



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO INGENIERÍA MECÁNICA



Simulación de emisiones acústicas generadas por fricción deslizante mediante ANSYS LS-DYNA.

POR

Matías Felipe Fuentealba Cisternas

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para optar al título profesional de Ingeniero Civil Mecánico.

Profesor Guía:

Dr.- Ing. Félix Leaman Weiffenbach

Septiembre 2023
Concepción (Chile)

© 2023 Matías Felipe Fuentealba Cisternas

© 2023 Matías Felipe Fuentealba Cisternas

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

Agradecimiento.

Deseo expresar mi profundo agradecimiento a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción por darme la oportunidad de perseguir mis sueños y brindarme una formación de la cual estoy tremendamente orgulloso. A su vez, no puedo dejar de agradecer también a mis profesores, en especial a mi profesor guía quien compartió su conocimiento, experiencia y su tiempo de manera inigualable.

También quiero agradecer a mi familia por su constante apoyo en las buenas, las malas y en las peores, especialmente agradecer a mi madre un ejemplo de sacrificio, esfuerzo, perseverancia y amor incondicional.

Finalmente, dar gracias a mi novia quien nunca me dejó de apoyar y dar ánimos, tu dedicación por hacer feliz a las personas mueve montañas.

Esta memoria está dedicada a Maximiliano René Henning Ortega.

Resumen

En los últimos años el método de emisiones acústicas ha cobrado mayor protagonismo en cuanto a monitoreo de condiciones, permitiendo detectar la formación de grietas y defectos en un material, al analizar las ondas generadas durante su evolución. Además, se ha convertido en una herramienta de gran utilidad para caracterizar y monitorear las diferentes condiciones de fricción y desgaste a las cuales son sometidas distintas piezas mecánicas en el día a día.

En los variados procedimientos de monitoreo se han observado diferentes fenómenos relacionados a las ondas de emisiones acústicas, entre ellos la ráfaga de EA, fenómeno presente en la interacción entre engranajes, el cual se caracteriza por una alta amplitud de las ondas en una cantidad mínima de tiempo. En esta interacción se presentan dos tipos de contacto, definidos por la condición de fricción en cada uno de ellos; contacto deslizante y contacto rodante.

Por lo que esta investigación, motivada por el fenómeno descrito anteriormente, profundizará en la condición deslizante del contacto entre engranajes, la cual se presume como detonante del fenómeno. Teniendo en cuenta lo antes mencionado y debido a que se torna necesario conocer la naturaleza de estos fenómenos, es que se llevarán a cabo simulaciones mediante un software de elementos finitos llamado ANSYS LS – DYNA, con el objetivo de profundizar en las distintas condiciones que influyen en la amplitud de las ondas de emisiones acústicas.

Esto se llevará a cabo mediante simulaciones de prueba para ajustar el software y su configuración, y así finalmente llevar a cabo una simulación de un cilindro deslizante sobre una superficie, lo cual constituye un caso simple, pero a su vez representativo de la condición de contacto deslizante entre engranajes.

Finalmente, el modelo antes descrito será sometido a diferentes condiciones, que modificarán la amplitud de las ondas obtenidas. Así, una vez obtenidos los resultados, se podrá concluir con base en la teoría presente en la literatura, si el modelo responde de buena manera a las diferentes condiciones. En caso contrario, se profundizará en futuras modificaciones al modelo, que aseguren una correcta representación de la interacción original.

Abstract.

In recent years, the acoustic emission method has become more important in terms of condition monitoring, allowing to detect the formation of cracks and defects in a material, by analyzing the waves generated during its evolution. In addition, it has become a very useful tool to characterize and monitor the different friction and wear conditions to which different mechanical parts are subjected on a daily basis.

In the various monitoring procedures, different phenomena related to acoustic emission waves have been observed, among them the AE burst, a phenomenon present in the interaction between gears, which is characterized by a high amplitude of the waves in a minimum amount of time. In this interaction, two types of contact are present, defined by the friction condition in each of them; sliding contact and rolling contact.

Therefore, this research, motivated by the phenomenon described above, will delve into the sliding condition of the contact between gears, which is presumed to be the trigger of the phenomenon. Taking into account the above mentioned and because it is necessary to know the nature of these phenomena, simulations will be carried out by means of a finite element software called ANSYS LS - DYNA, with the objective of deepening in the different conditions that influence the amplitude of the acoustic emission waves.

This will be carried out by means of test simulations to adjust the software and its configuration, and finally to carry out a simulation of a sliding cylinder on a surface, which is a simple case, but at the same time representative of the sliding contact condition between gears.

Finally, the model described above will be subjected to different conditions, which will modify the amplitude of the waves obtained. Thus, once the results are obtained, it will be possible to conclude, based on the theory present in the literature, if the model responds well to the different conditions. If not, future modifications to the model will be made to ensure a correct representation of the original interaction.

Tabla de Contenidos

Tabla de Contenidos.....	iii
Glosario	v
CAPÍTULO 1: Definición del Problema.....	1
1.1 Planteamiento del problema.	1
1.2 Objetivos.....	3
1.3 Hipótesis.....	3
1.4 Metodología.....	4
CAPÍTULO 2: Marco Teórico.....	5
2.1 Introducción.....	5
2.2 Fricción.....	5
2.2.1 Fricción deslizante.....	5
2.2.2 Fricción rodante.....	9
2.2.3 Diferencias fundamentales entre fricción deslizante y rodante.....	11
2.3 Emisiones Acústicas.....	12
2.4 Método de Elementos Finitos.....	13
CAPÍTULO 3: Instructivo de uso y configuración de ANSYS LS – DYNA.....	15
3.1 Introducción.....	15
3.2 Simulación de entrenamiento.....	15
3.3 Geometría y mallado.....	17
3.4 Materiales.....	19
3.5 Condiciones de borde.....	23
3.6 Condiciones de contacto.....	26
3.7 Propiedades de sección.....	28
3.8 Asignación de propiedades.....	29
3.9 Post – procesamiento.....	31
3.10 Revisión del modelo.....	33
3.11 Simulación.....	34
CAPÍTULO 4: Pre – Procesamiento de Caso Deslizante.....	38
4.1 Introducción.....	38
4.2 Geometría.....	38
4.3 Material.....	40

4.4 Propiedades de sección.....	41
4.5 Geometría y mallado.	41
4.6 Condición de contacto.	44
4.7 Elementos de masa.	45
4.8 Condiciones de borde.	46
4.9 Relajación dinámica y carga de gravedad.	47
CAPÍTULO 5: Simulación y Post – Procesamiento de Caso Deslizante.....	49
5.1 Introducción.....	49
5.2 Tiempo de duración de la simulación.....	49
5.3 Base de datos.	50
5.7 Configuración de sensores virtuales.....	50
5.5 Relajación dinámica.	51
5.6 Análisis de resultados.....	53
CAPÍTULO 6: Conclusión y Trabajo Futuro.....	58
6.1 Conclusión.....	58
6.2 Trabajo Futuro.	59
Referencias Bibliográficas.	60
Anexos.....	62

Glosario

EA	:	Emisiones Acústicas
RMS	:	Root mean square
P	:	Presión
F	:	Fuerza
A	:	Área
F_{R_s}	:	Fuerza de roce estático
μ_s	:	Coefficiente de roce estático
N	:	Fuerza normal
F_x	:	Fuerzas en la dirección X
F_y	:	Fuerzas en la dirección Y
M_O	:	Momentos respecto al punto "O"
r	:	Radio
μ_r	:	Coefficiente de resistencia a la rodadura
C_r	:	Coefficiente de rodadura
END	:	Ensayo no destructivo
MEF	:	Método de elementos finitos
CFD	:	Computational fluid dynamics
SI	:	Sistema Internacional
C_L	:	Velocidad longitudinal de propagación
C_T	:	Velocidad transversal de propagación
λ	:	Constante de Lamé
μ	:	Módulo de corte
ρ	:	Densidad
E	:	Módulo elástico
ν	:	Coefficiente de Poisson
λ_{min}	:	Longitud de onda mínima
L_e	:	Distancia mínima entre nodos
f_{max}	:	Frecuencia máxima de muestreo

CAPÍTULO 1: Definición del Problema.

1.1 Planteamiento del problema.

El fenómeno denominado emisión acústica (EA) es producido por la liberación de energía elástica almacenada en el interior de un material cuando este está sometido a cierto nivel de esfuerzos, los cuales pueden producir cambios en la estructura interna del material como el crecimiento de grietas internas, deformación local plástica y cambios de fase, entre otros. Esta energía se propaga a través del material en forma de ondas elásticas y puede ser captada mediante sensores sensibles a dichas ondas [1], teniendo en cuenta lo antes mencionado, este fenómeno ha sido ampliamente investigado para monitorear el desgaste producido por la fricción en los distintos materiales [7], destacando principalmente el monitoreo de desgaste en piezas mecánicas, particularmente en engranajes.

Teniendo en cuenta lo anterior, Bones y McBride [2] probaron que el contacto entre las asperezas de las superficies es la principal fuente de emisiones acústicas y de modo contrario observan que cuando las superficies son separadas por una película lubricante no se detecta señal alguna de EA por encima del ruido mismo generado por la interacción.

En concordancia con lo antes mencionado, queda en evidencia que el método de EA resulta también ser útil para caracterizar diferentes mecanismos de fricción, tales como fricción deslizante y fricción rodante, donde dos tipos principales de emisión acústica suelen ser reconocidos. Para un evento discreto a corto plazo, como un incremento de la propagación de grietas en un material frágil, se puede identificar una ráfaga de emisión que dura típicamente una fracción de milisegundo. Para el procedimiento de deformación constante a un nivel inferior, como el comportamiento a gran escala de un material dúctil, múltiples ondas de emisión individuales de baja amplitud se fusionan y superponen produciendo una emisión continua en la que el tiempo promedio entre emisiones de amplitud similar es menor que la duración de la emisión.

Los datos cuantitativos se expresan con mayor frecuencia en términos del valor cuadrático medio (rms) de la señal o en términos de medidas conocidas como conteos de sobreoscilaciones, que registran el número de veces que la señal de emisión acústica excede un nivel de voltaje de activación preestablecido. El primero se considera más apropiado para emisiones continuas y el último más adecuado para emisiones en ráfaga. En cada caso la medida está estrechamente relacionada con la energía de la onda de EA. Con lo anterior, se logra demostrar que la tasa de conteo de EA representa de mejor manera la condición de contacto que la fuerza de fricción o la tasa de desgaste, de la misma manera se puede usar la tasa de conteo para indicar la variación del coeficiente de fricción en distintos regímenes de lubricación [3]. Finalmente, en su investigación, Hanchi y Klamecki [4] concluyen que la tasa de conteo, la amplitud de onda y la energía de la señal EA podrían usarse para identificar la transición entre el desgaste leve y el desgaste avanzado.

Teniendo en cuenta lo antes mencionado, F. Leaman [5], por ejemplo, usa EA para ayudar a diagnosticar y pronosticar fallas en engranajes planetarios. La Figura 1 muestra las ondas de EA

medidas en el contacto entre engranajes, donde se produce el fenómeno llamado “burst” o ráfaga de ondas acústicas, el cual está asociado a los peaks de amplitud presentes en la medición.

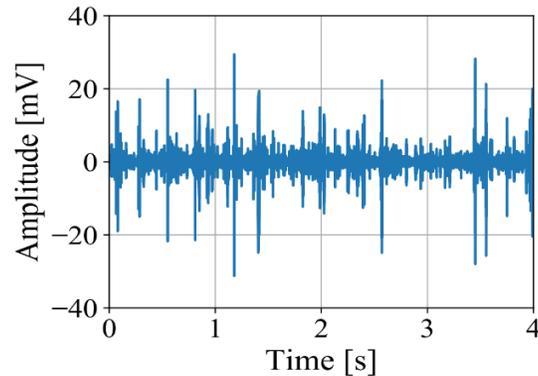


Figura 1: EA medidas en contacto de engranajes en Engranaje Planetario. (Fuente: [5])

Aun cuando el método posee un amplio potencial para detectar la condición de desgaste en engranajes, los diagnósticos basados en EA suelen tener un enfoque empírico, basado esencialmente en la experiencia práctica más que en una fundamentación teórica sólida. Debido a esto, aunque existen varias teorías que explican el origen de las ráfagas de EA en engranajes, aún no se ha comprobado experimentalmente cuál de ellas es la correcta, lo que limita en cierta medida la utilidad del método al no poder reconocer la naturaleza de las anomalías presentes en el espectro ondulatorio ante la presencia de una falla. Es por esto que se genera la necesidad de hacer simulaciones computacionales asociadas que permitan reconocer el origen y la naturaleza de las ráfagas de EA. Para lograr lo antes descrito es importante comprender que la interacción entre engranajes posee 2 tipos de contacto definidos por la condición de fricción presente en cada uno de ellos, estos son el contacto deslizante y el contacto rodante.

En la presente investigación y en virtud de los tiempos acotados de investigación, se procederá a simular mediante un software de elementos finitos sólo la condición de contacto deslizante, mediante un caso simplificado que represente de buena manera el deslizamiento momentáneo de un engranaje respecto a otro, fenómeno predominante en la interacción entre engranajes, la que se muestra con mayor detalle en la Figura 2.

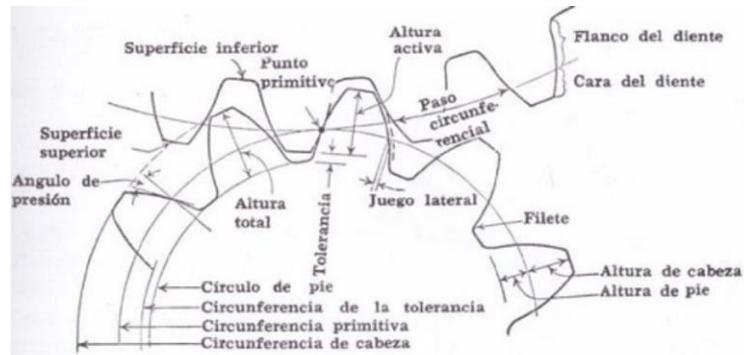


Figura 2: Esquema explicativo de los elementos de un engranaje. (Fuente: [10])

1.2 Objetivos.

Objetivo General: Obtener formas de ondas de EA generadas por fricción deslizante mediante ANSYS LS – DYNA.

Objetivos específicos:

- Identificar y configurar las diferentes funciones y comandos del software asociados a la obtención de EA, mediante un caso de prueba de menor complejidad.
- Definir caso de simulación objetivo (geometría, materiales, condiciones de borde, condiciones de contacto, métodos de resolución y métodos de simulación).
- Obtener formas de onda de EA del caso simulado para diferentes condiciones de carga.
- Evaluación de los diferentes resultados y su contraste con lo observado en la literatura como herramienta para generar modificaciones en simulaciones futuras.

1.3 Hipótesis.

La motivación de esta investigación se centra en avanzar en el proceso de probar o refutar la hipótesis que asume que las ráfagas de emisiones acústicas [5] son generadas por una transición entre los tipos de fricción presentes en la interacción, la cual, en su mayoría presenta una fricción de tipo deslizante, excepto cuando el contacto entre engranajes queda definido por el punto primitivo (Figura 2), instante en el cual la interacción presenta fricción del tipo rodadura pura.

Teniendo en cuenta lo antes mencionado, se pretende analizar el fenómeno mediante la simulación de ondas de EA producidas por el contacto deslizante entre engranajes, el cual representa la condición de contacto de menor complejidad y a su vez la con mayor protagonismo en el fenómeno de ráfagas. Esta investigación y posterior simulación proporcionará los conocimientos necesarios en cuanto a uso y configuración del software, para que en investigaciones futuras sea posible simular la condición de contacto rodante y una posible coexistencia de las condiciones de contacto en una misma simulación.

1.4 Metodología.

En primer lugar, es necesario realizar una revisión exhaustiva del estado del arte, con el fin de comprender completamente los conceptos relacionados con el tema, tales como fricción deslizante, fricción rodante, emisiones acústicas, la generación de estas mismas por fricción y el método de elementos finitos. Posteriormente, se deben definir los casos de prueba y estudio, los cuales se usarán para configurar el software y representar el fenómeno respectivamente.

Una vez definido lo anterior, se procederá a modelar mediante el módulo LS-DYNA de ANSYS el caso de prueba, identificando geometría, mallado, condiciones de borde, tipo de contacto, etc. Esto permitirá una mayor afinidad con el programa y una mejor comprensión de su funcionamiento lo que minimizará las dificultades al momento de modelar el caso objetivo.

Una vez haya sido modelado el caso de prueba, se procederá a configurar las opciones de procesamiento y post procesamiento del software, en este procedimiento se establecerán parámetros de control decisivos en el análisis, tales como tiempo de duración, método de resolución, animación y sus configuraciones, etc. Además, se solicitará al programa información nodal específica a una determinada frecuencia de muestreo, lo que permitirá obtener ondas de EA en la simulación de prueba.

Finalmente, se procederá a modelar, configurar y simular el caso objetivo del estudio, teniendo en cuenta los métodos y configuraciones usadas con anterioridad en la simulación de prueba. Los resultados obtenidos serán finalmente filtrados mediante un filtro de paso alto, con la finalidad de analizar exclusivamente las ondas de EA, excluyendo así ondas con frecuencia menor a 20 kHz. El procedimiento descrito con anterioridad permitirá analizar las ondas de EA y comparar los resultados obtenidos con los presentes en la literatura.

CAPÍTULO 2: Marco Teórico.

2.1 Introducción.

En el presente capítulo se estudiará cada uno de los fenómenos presentes en la generación de ondas de emisiones acústicas, lo que incluye los diferentes tipos de fricción (detonantes), el fenómeno de emisión acústica propiamente tal y finalmente se inspeccionará el método de elementos finitos, el cual ha sido seleccionado previamente como método de simulación del fenómeno.

2.2 Fricción.

Este fenómeno juega un papel fundamental en la generación de ondas de emisiones acústicas, ya que, como se ha mencionado anteriormente, el contacto entre las asperezas de las superficies es la principal fuente de emisiones [2], por ende, este fenómeno se ubica en el eje central de la investigación como principal precursor del desgaste en las superficies y por ende el origen de las ondas de EA.

2.2.1 Fricción deslizante.

La mayoría de las superficies, aun las que se consideran lisas, poseen irregularidades significativas si son observadas a escala microscópica, presentando rugosidad a lo largo de toda su extensión. En concordancia con lo anterior y tomando en cuenta las irregularidades de las superficies en contacto se debe diferenciar entre área aparente de contacto y área real de contacto. Son los llamados “peaks” o cimas de aspereza los que definen el área real de contacto, la cual representa una pequeña proporción del área aparente de contacto, tal como se observa en la Figura 3.

Considerando una presión de contacto entre dos superficies, se procede a analizar la ecuación convencional de presión:

$$P = \frac{F}{A} \quad (1)$$

Analizando la ecuación anterior y la Figura 3, se puede concluir que al mantener constante la fuerza normal (peso del bloque) y disminuir el valor del área, se tiene un considerable aumento de presión entre las superficies en contacto, lo que desencadena eventualmente en una deformación de los “peaks” de rugosidad, aumentando así el área de contacto real entre las superficies.

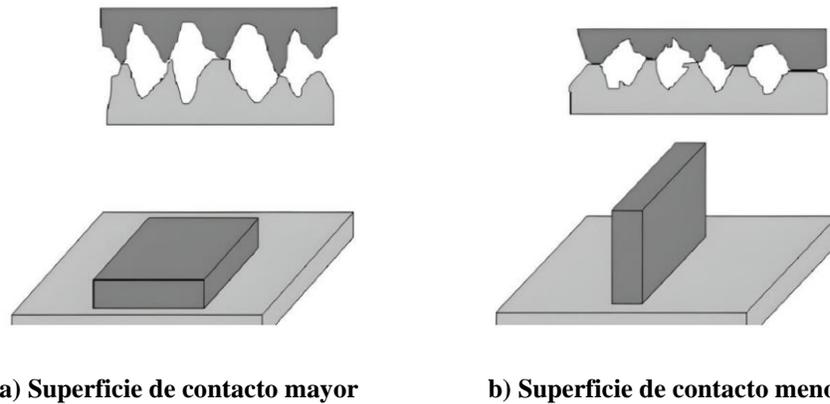


Figura 3: Área de contacto real vs aparente y efecto del aumento de presión de contacto. (Fuente: [9])

Como se menciona anteriormente, la presión de contacto entre las superficies permite extraer una fuerza normal de la interacción, la que se explica detalladamente en la Figura 4.

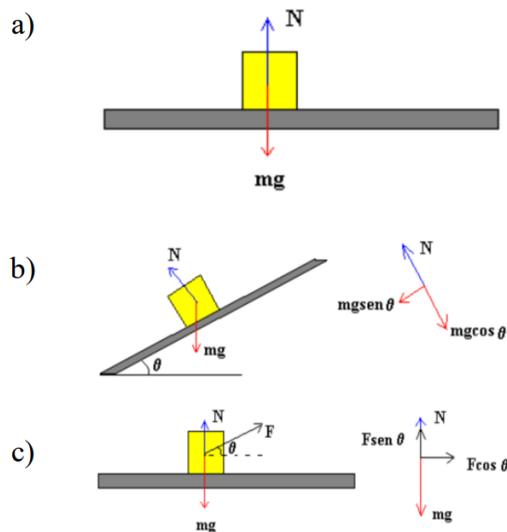


Figura 4: Fuerza Normal en distintos escenarios. (Fuente: [9])

Teniendo en cuenta la figura anterior, se observa que la fuerza normal (N) corresponde a la fuerza que ejerce el plano sobre el bloque, la cual depende del peso de este mismo, la inclinación del plano y de fuerzas externas que puedan estar actuando sobre el sistema. En la Figura 4 se muestran los diferentes casos que hacen variar el valor de la fuerza normal.

En el primer caso (Figura 4a) se puede apreciar un cuerpo descansando en equilibrio sobre un plano sin inclinación, donde a su vez no existe una fuerza externa actuando sobre el cuerpo, lo que determina una fuerza normal de igual magnitud al peso este.

En el segundo caso (Figura 4b), a diferencia del anterior, el plano presenta una inclinación θ , la cual provoca un cambio en la magnitud de la fuerza normal, la cual toma el valor de $N = mg \cos \theta$.

Para el caso final (Figura 4c), se tiene una fuerza la cual posee un ángulo de inclinación θ respecto al plano, donde queda en evidencia que mientras actúe una fuerza no paralela al plano se verá modificada la magnitud de la fuerza normal, la que en este caso toma un valor de $N = mg - F \sin \theta$.

De esta manera, teniendo en cuenta la rugosidad presentada por las superficies en contacto y la fuerza normal correspondiente, se introduce el concepto de fuerza de roce por deslizamiento, la que a su vez se divide en fuerza de roce estático y fuerza de roce cinético.

La fuerza de roce estático actúa cuando un cuerpo es tratado de sacar de su estado de reposo por alguna fuerza externa, su valor varía tal como se ve a continuación:

$$0 \leq F_{R_s} \leq \mu_s \cdot N \quad (2)$$

La fuerza en cuestión adquiere su valor mínimo cuando el cuerpo se encuentra en reposo y sin la presencia de fuerza alguna que trate de ponerlo en movimiento. Es importante comprender que el valor de la fuerza de roce estático es proporcional a la fuerza externa que actúa sobre el cuerpo tratando de sacarlo de su posición de equilibrio.

De manera más precisa, como se muestra en la Figura 5, la fuerza de roce tiene igual magnitud que la fuerza F (para un caso plano), pero distinto sentido, donde, al aumentar el valor de F la fuerza de roce va aumentando, adquiriendo, en este caso plano, el mismo valor que la fuerza F hasta llegar a su máximo valor $F_{R_s} = \mu_s \cdot N$, el cual representa la condición de deslizamiento inminente, es decir, cuando el cuerpo está a punto de moverse.

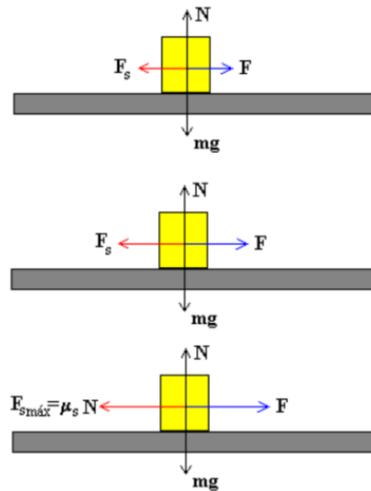


Figura 5: Relación entre variación de F y fuerza de roce estático. (Fuente: [9])

Al seguir aumentando la magnitud de la fuerza, el cuerpo abandona el reposo, y la fuerza adquiere la particularidad de tener un valor constante el cual depende del coeficiente de roce cinético y la fuerza normal a la superficie.

Como se aprecia en la Figura 6, desde el origen hasta el punto “A” la fuerza (F) aplicada sobre el bloque no es suficientemente grande como para moverlo, es decir, es menor a la fuerza máxima de roce, alcanzando así un estado de equilibrio estático. El punto “A” particularmente corresponde al movimiento inminente del cuerpo y marca la división entre el roce estático y el roce cinético.

Es importante también destacar el punto “D”, donde, una vez estando el cuerpo en movimiento, se puede decir que F tiene la misma magnitud de la fuerza de roce cinético, por lo que el cuerpo se movería con velocidad constante, alcanzando un estado de equilibrio cinético.

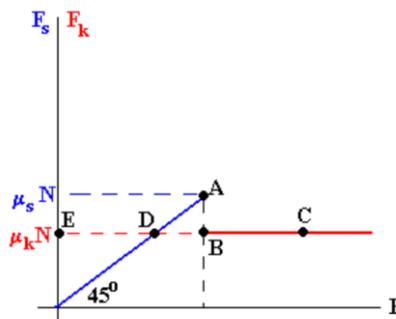


Figura 6: Gráfico fuerzas de roce cinético y estático en función de F . (Fuente:[9])

2.2.2 Fricción rodante.

Este fenómeno, mejor conocido como resistencia a la rodadura, se presenta cuando un cuerpo rueda sobre una superficie, deformándose uno de ellos o ambos de forma temporal.

El elemento rodante, en función del material con el que esté construido y su propio peso, además del de la carga que soporta, sufre una deformación que al rotar provoca repetidos ciclos de deformación y recuperación (Histéresis), estos propician la disipación de energía por calor. Además, esta deformación supone que la superficie de contacto no sea una línea recta como se piensa comúnmente, sino por el contrario un área de contacto determinada.

Al girar, sucesivas secciones del elemento rodante son deformadas al entrar en contacto con la superficie, pero no recuperan de manera inmediata su forma original a consecuencia de la viscoelasticidad del material, este retardo provoca que buena parte de la energía empleada en su deformación no sea recuperada al volver a su forma original. Esto se traduce en una distribución de presiones desigual, más intensas en su parte delantera, como se muestra en la Figura 7.

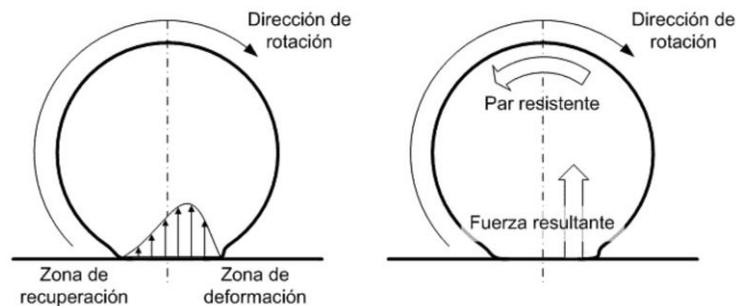


Figura 7: Distribución de Fuerzas en Superficie de Contacto. (Fuente:[11])

Esta distribución de presiones puede ser resumida en una fuerza resultante, la cual tiene dos componentes: una componente vertical N y una componente horizontal f . Cabe destacar que la componente vertical N no pasa por el centro de masas, sino a una pequeña distancia " μ_r ", denominada coeficiente de resistencia a la rodadura, tal como se observa en la Figura 8.

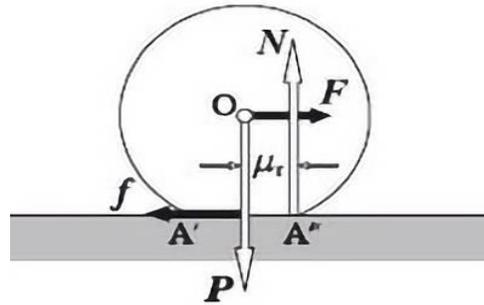


Figura 8: Diagrama de fuerzas en rodadura. (Fuente:[11])

Las ecuaciones del movimiento para un disco de peso P y radio r son las siguientes:

$$\sum F_x = 0 \rightarrow F - f = 0 \quad (3)$$

$$\sum F_y = 0 \rightarrow N - P = 0 \quad (4)$$

$$\sum M_O = 0 \rightarrow N \cdot \mu_r - f \cdot r = 0 \quad (5)$$

Resolviendo se tiene:

$$F = \frac{\mu_r}{r} \cdot P \quad (6)$$

De las expresiones anteriores se deduce que la fuerza necesaria para hacer girar el disco es inversamente proporcional al radio. Además, es importante mencionar que el valor del coeficiente μ_r , depende de la naturaleza de los cuerpos en contacto, fundamentalmente de su tendencia a la deformación (módulo elástico).

Se define también una magnitud adimensional llamada coeficiente de rodadura:

$$C_r = \frac{\mu_r}{r} \quad (7)$$

Así, la fuerza necesaria para hacer girar el disco queda de la siguiente manera:

$$F = C_r \cdot P \quad (8)$$

En general, el coeficiente de rodadura tiene un valor muy inferior al de los coeficientes de rozamiento por deslizamiento (estático y cinético); así pues, es mucho más conveniente, al efecto de disminuir las pérdidas energéticas, sustituir en los mecanismos y máquinas las partes deslizantes por las rodaduras.

El valor de C_r es propio de cada interacción y depende de varios factores:

- La rigidez del cilindro y superficie.
- El radio del cilindro (a mayor radio menor resistencia).
- El peso o carga al que se somete el elemento rodante.
- El acabado de las superficies en contacto, forma relativa, etc.
- Viscosidad entre las superficies de contacto.
- Temperatura de los cuerpos.
- Presión interna del elemento rodante (neumáticos: a mayor presión menor resistencia).

2.2.3 Diferencias fundamentales entre fricción deslizante y rodante.

La principal diferencia entre ambos fenómenos es la naturaleza del movimiento, ya que en el caso de fricción por deslizamiento de un cuerpo sobre una superficie horizontal es necesario aplicar una fuerza externa para mantener el cuerpo en movimiento con velocidad constante, a diferencia de la fricción rodante, donde en el caso de la rodadura (sin deslizamiento) de un cilindro sobre una superficie horizontal es necesario aplicar un torque externo para mantenerlo con movimiento uniforme.

El concepto de resistencia de rodadura es similar al de resistencia por deslizamiento, con la diferencia de que este último hace alusión a dos superficies que deslizan o resbalan una sobre otra, mientras que en la resistencia de rodadura no existe tal resbalamiento entre el cuerpo y la superficie sobre la que rueda, disminuyendo por regla general la resistencia al movimiento. En el caso de fricción deslizante, para iniciar el movimiento el cuerpo debe ser sometido una fuerza externa que iguale o supere la fuerza de roce desarrollada entre las superficies en contacto, la cual actúa sobre el cuerpo oponiéndose a su movimiento. En el caso de rodadura, el cuerpo debe ser accionado por un torque externo que iguale o supere el torque resistente producido por la reacción de la superficie sobre el cuerpo rodante deformado.

La diferencia radica fundamentalmente en que la normal resultante en fricción por deslizamiento no genera momento ya que su línea de acción coincide con el centro de masa del cuerpo, en el caso de la resistencia a la rodadura debido a las deformaciones presentes, la normal resultante genera un momento resistente el cual se opone al movimiento.

El antes mencionado, coeficiente de rodadura C_r , se define de esta forma con el objetivo de comparar la fuerza necesaria para hacer rodar un cuerpo versus la fuerza necesaria para hacerlo deslizar (caso elementos rodantes). De este análisis se concluye que C_r tiene un valor muy inferior al de los coeficientes de rozamiento estático y cinético, por lo que es más fácil hacer rodar un cuerpo que hacerlo deslizar.

2.3 Emisiones acústicas.

La emisión acústica (EA) es un término que engloba tanto un método de ensayo no destructivo como un fenómeno físico que ocurre en el interior de los materiales. Esta dualidad en su definición resalta la importancia de comprender la relación entre el fenómeno y su aplicación práctica. La EA se refiere al proceso mediante el cual un material, estructura o proceso emite energía en forma de ondas elásticas transitorias de manera espontánea. Estas ondas poseen información sobre el estado interno del material, haciéndolas valiosas para la evaluación y detección de defectos.

Cuando un material se somete a cargas, estímulos externos o condiciones ambientales severas, puede experimentar cambios en su estructura interna. Estos cambios incluyen el crecimiento de grietas, deformación local plástica, corrosión o transiciones de fase, todos los cuales generalmente van acompañados de la emisión de ondas elásticas en su interior. Estas ondas no solo reflejan las transformaciones que están ocurriendo en el material, sino que también pueden dar indicios de posibles defectos en desarrollo. Un ensayo de EA se convierte, por lo tanto, en una herramienta útil para controlar la formación de defectos en un material al detectar y analizar las ondas generadas durante su evolución.

Dependiendo del material y el proceso emisor, estas ondas pueden ser audibles para el oído humano si sus frecuencias están por debajo de 20 kHz. Ejemplos cotidianos incluyen el sonido de la madera al romperse, el papel al rasgarse, el agua al congelarse o las transformaciones martensíticas en algunos materiales. Sin embargo, en muchos casos de interés en la evaluación de materiales y estructuras, las emisiones no son audibles debido a dos razones principales: su intensidad es baja y sus frecuencias están en el rango de los ultrasonidos (por encima de 20 kHz). A pesar de esta limitación, el término "emisión acústica" se ha mantenido como el más utilizado para describir este proceso, aunque también se le ha llamado "micro-sísmica," "emisión de ondas elásticas," o "emisión de ondas de tensión" (SWE en inglés).

Históricamente, los ruidos o "emisiones acústicas" han sido herramientas de predicción comunes en diversas civilizaciones, pero su uso para caracterizar el comportamiento de los materiales fue en gran parte desestimado en entornos técnicos y científicos. Sin embargo, en las últimas seis décadas, los avances tecnológicos de los equipos de adquisición y la sensibilidad de los transductores han cambiado esta percepción. La emisión acústica ha demostrado ser una técnica valiosa para evaluar la integridad de materiales y estructuras, especialmente en comparación con otros métodos de ensayo no destructivo.

Una de las principales diferencias entre la EA y otros métodos de END radica en el origen de la señal. La EA es un método pasivo que detecta la energía liberada por el material en sí, mientras que otros métodos requieren un aporte artificial de energía, como rayos X, rayos gamma, ultrasonidos, energía térmica o microondas. Esta diferencia fundamental permite que la EA detecte fenómenos dinámicos activos, como el crecimiento de grietas, en lugar de discontinuidades geométricas.

El ensayo de EA ha demostrado ser efectivo en una amplia variedad de materiales, incluyendo metales, materiales compuestos avanzados, plásticos, hormigón y madera. Su aplicabilidad se extiende a la supervisión no invasiva de la integridad de estructuras y la caracterización de materiales sometidos a deformación o fractura. Entre las aplicaciones comunes se encuentran la detección de fallas en depósitos a presión, sistemas de tuberías, tanques de almacenamiento, control de soldaduras, detección de procesos de corrosión e inspección de estructuras y maquinaria.

Aunque la EA proporciona información valiosa sobre el comportamiento de la fractura y fatiga de los materiales, su capacidad para cuantificar el tamaño, la profundidad y la severidad del daño es limitada. Para obtener resultados cuantitativos más precisos, es necesario combinar la EA con otros métodos de diagnóstico. Además, la EA es sensible al ruido de fondo, tanto mecánico como eléctrico, lo que puede dificultar su uso en entornos de servicio severos. Para garantizar el éxito de un ensayo de EA, es esencial discriminar y reducir las señales de ruido, que son todas las señales de EA generadas por mecanismos irrelevantes al ensayo específico que se está llevando a cabo.

En resumen, la emisión acústica es un fenómeno físico que se ha convertido en una herramienta valiosa en la evaluación de materiales y estructuras. A pesar de sus limitaciones, la EA ofrece información única sobre la dinámica interna de los materiales, lo que la hace esencial en la detección y monitoreo de defectos. Su desarrollo continuo y la mejora de los equipos de detección seguirán impulsando su aplicación en una amplia variedad de campos, desde la ingeniería estructural hasta la fabricación de materiales avanzados, contribuyendo así al avance de la ciencia y la tecnología.

2.4 Método de elementos finitos.

El Método de Elementos Finitos (MEF) es una técnica numérica ampliamente utilizada en ingeniería y ciencias aplicadas para resolver problemas de análisis estructural, térmico, electromagnético y fluidodinámico, entre otros. Este método se basa en la discretización de un dominio continuo en elementos finitos para aproximar y resolver ecuaciones diferenciales parciales. En este apartado, se explorará el MEF, los tipos de software disponibles para su aplicación y por qué sería indicado para modelar la cinemática de un nodo sometido a interacciones dinámicas.

El MEF se fundamenta en la idea de dividir un dominio continuo en pequeños elementos geométricos, como triángulos, cuadriláteros, tetraedros, entre otros. Cada elemento se describe por un conjunto de ecuaciones diferenciales que rigen el comportamiento del sistema en ese elemento. Estas ecuaciones se combinan para formar un sistema global de ecuaciones, que se resuelve numéricamente para obtener aproximaciones a las cantidades de interés, como desplazamientos, tensiones o temperaturas.

Existen varios tipos de software que implementan el MEF para diferentes aplicaciones y campos de ingeniería. Algunos ejemplos destacados incluyen ANSYS, Abaqus, COMSOL y OpenFOAM. Estas herramientas ofrecen una amplia variedad de capacidades y se adaptan a diversas necesidades de modelado. Por ejemplo, ANSYS es conocido por su capacidad para abordar problemas de mecánica estructural y análisis de elementos finitos, mientras que OpenFOAM se especializa en simulaciones de dinámica de fluidos computacional (CFD).

La elección de un software específico depende en gran medida de la aplicación y el nivel de complejidad del problema. En el caso de modelar el movimiento de un nodo en un sistema físico, un software de análisis estructural como ANSYS o Abaqus podría ser una elección adecuada. Estas herramientas son capaces de simular de manera precisa y eficiente el comportamiento de estructuras mecánicas sometidas a cargas y restricciones, lo que incluye el seguimiento de nodos o puntos de interés.

Teniendo en cuenta lo antes mencionado, se selecciona el MEF como herramienta principal de la investigación, debido a su potencial para modelar el comportamiento cinemático de un nodo, ya que permite representar con precisión la deformación de los materiales y las interacciones entre diferentes partes de una estructura, lo que constituye una herramienta de carácter esencial al momento de analizar cómo un nodo se desplaza en respuesta a fuerzas aplicadas o restricciones. Al mismo tiempo, el método es altamente versátil y se puede aplicar a una amplia gama de problemas, desde la mecánica de sólidos hasta la transferencia de calor y la dinámica de fluidos. Esto significa que puede utilizarse para modelar el movimiento de un nodo en una variedad de contextos, desde el diseño de componentes mecánicos hasta la simulación de sistemas complejos de múltiples disciplinas.

Por todo lo antes mencionado, en la presente investigación se ha decidido trabajar con el software ANSYS, específicamente con el módulo LS – DYNA, el cual es conocido por su capacidad para abordar problemas dinámicos y no lineales. Teniendo en cuenta que en las simulaciones se desean obtener ondas de emisiones acústicas, las cuales suelen ser el resultado de eventos transitorios y cambiantes en la dinámica de un sistema, este software se convierte en la herramienta ideal para el trabajo, ya que puede capturar eficazmente estas variaciones y proporcionar resultados precisos.

Este software a su vez es compatible con varios formatos de archivo geométrico tales como IGES, STEP, CATIA, entre otros. La amplia variedad de formatos compatibles permite exportar archivos desde diferentes programas permitiendo así trabajar con geometrías existentes o si se desea, el software está equipado con herramientas que permiten crear la geometría y el mallado al mismo tiempo, herramienta de utilidad al momento de diseñar geometrías sencillas sometidas a un análisis complejo.

Finalmente, es necesario contar con un software que sea capaz de ir más allá de lo común al momento del análisis de la cinemática de un nodo, ya que para ser capaz de simular ondas de EA es necesario contar con una tasa de muestreo bastante alta, debido a que las EA se encuentran en un rango desde los 20 kHz hasta los 350 kHz. En este sentido el software cumple con los requisitos de la simulación, ya que posee una función de base de datos que al ser invocada brinda información bastante detallada de la cinemática de uno o varios nodos.

CAPÍTULO 3: Instructivo de uso y configuración de ANSYS LS – DYNA.

3.1 Introducción.

Con el fin de poder desarrollar de buena manera las simulaciones necesarias en la investigación, es importante saber manipular correctamente el software LS – DYNA, considerando que no es un software ampliamente conocido y que su interfaz es completamente distinta a la de ANSYS, surge la necesidad de dejar registro de las funciones, configuraciones, módulos y rutas utilizadas, facilitando así el desarrollo de futuras investigaciones y simulaciones en la comunidad ingenieril.

Teniendo en consideración lo mencionado con anterioridad, el presente capítulo explicará detalladamente el funcionamiento y configuración del programa, mediante el desarrollo de una simulación de prueba, por ende, de menor complejidad, en la cual se estudiará la interacción entre una esfera y el plano sobre el cual esta rebota.

Se ha considerado que una simulación de este tipo brindará al usuario todas las herramientas necesarias para poder realizar simulaciones de mayor complejidad a futuro. Es importante mencionar que el programa está disponible en la página oficial del software ANSYS, el cual se descargó usando la licencia de estudiante. No se profundizará en el proceso de instalación del programa ya que no constituye ninguna dificultad.

3.2 Simulación de entrenamiento.

Con el objetivo de mejorar la afinidad y destreza entre el usuario y el software, se ha definido un caso de estudio simplificado, el cual involucra cuerpos geométricos sencillos de modelar, a fin de minimizar los riesgos de errores por parte del usuario.

La simulación de entrenamiento consiste en estudiar el impacto de una esfera de material elástico contra una placa de material plástico con un intervalo de tiempo no mayor a 1 segundo. Lo anterior tiene como objetivo identificar los diferentes módulos del programa referidos a diseño de geometría y mallado, asignación de materiales, condiciones de borde, condiciones de contacto, configuración de resultados y principalmente el módulo encargado de muestrear la cinemática de nodos particulares, lo que permitirá simular ondas de emisiones acústicas.

Es importante mencionar que las unidades de medida no son establecidas en el software, debido a esto es el usuario quien debe asegurarse de establecer con anterioridad sus unidades de masa, longitud y tiempo, y mantener la consistencia de unidades durante toda la simulación, ya sea para definir densidades, fuerzas y esfuerzos como también al definir tiempos, velocidades, aceleraciones, entre otras.

A continuación, se muestran las especificaciones de cada uno de los cuerpos que participan en el caso de estudio.

a) Placa.

- Coordenadas de los vértices: (-10,-10,0); (10,-10,0); (10,10,0); (-10,10,0)
- Dimensiones: 20 x 20 x 0.5 [cm]
- Condiciones de borde: Contorno restringido en cuanto a rotaciones y traslaciones en todas direcciones (fijo).

En la Tabla 1 se muestran las propiedades del material que conforma la placa.

Tabla 1: Propiedades del material de la placa.

Tipo de Material (LS – DYNA)	024-PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY
Densidad	7850 $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$
Módulo de Young	209 [GPa]
Coefficiente de Poisson	0.29
Esfuerzo de Fluencia	500 [MPa]
Módulo Tangente de Elasticidad	10 [GPa]

b) Esfera.

- Coordenadas del centro: (0,0,5) [cm].
- Dimensiones: Radio = 4 [cm]
- Condiciones de borde: Velocidad inicial de (0,0,-1) [cm/s].

En la Tabla 2 se muestran las propiedades del material que conforma la esfera.

Tabla 2: Propiedades del material de la esfera.

Tipo de Material (LS – DYNA)	Elastic
Densidad	2850 $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$
Módulo de Young	72 [GPa]
Coefficiente de Poisson	0.3

3.3 Geometría y mallado.

En lo relacionado a este aspecto de la simulación, se recomienda crear la geometría dentro del mismo software de simulación, para esto se procede a abrir el módulo LS – PrePost.

Una vez abierto el programa, se debe seleccionar en la barra de herramientas de la parte superior: “FEM”, “Element and Mesh” y “Shape Mesher”. Como se muestra en la Figura 9. Todo lo anterior con la finalidad de crear el elemento y su mallado correspondiente al mismo tiempo, lo que agiliza significativamente el diseño.

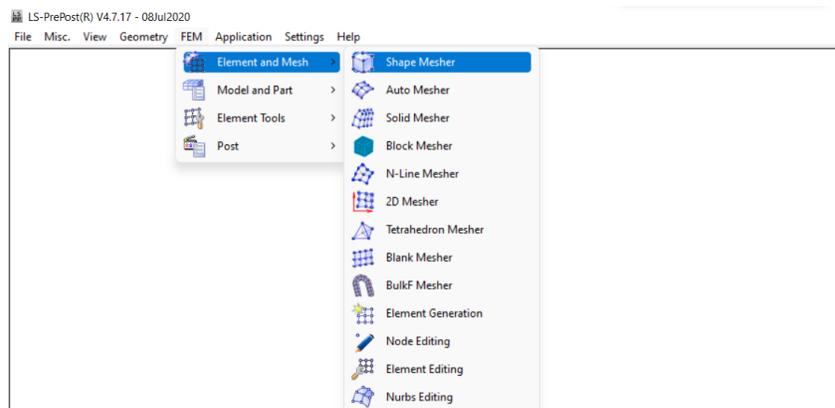


Figura 9: Menú de acceso para creación de geometría y mallado.

Posteriormente, en el menú de “Shape Mesher” se debe seleccionar “Entity: 4N Shell”, lo que corresponde a crear un elemento bidimensional tipo carcasa de 4 nodos, esto representará de buena manera la placa que será impactada por la esfera. Es importante mencionar que el diseño de esta placa se ha realizado momentáneamente sin espesor, lo que se ajustará más adelante.

Posteriormente, se debe completar P1, P2, P3 y P4 con las coordenadas correspondientes a los vértices de la placa. Luego en las opciones “NxNo.” y “NyNo.” se debe seleccionar el número de elementos que tendrá la placa en X e Y.

Se recomienda dejar el valor de Step (el que se encuentra a la derecha del NxNo y NyNo) en 1.

Luego se deben completar los parámetros de identificación del elemento, lo cual queda a elección del usuario.

Una vez rellenados los campos que se solicitan, se procede a hacer click en Create y luego Done.

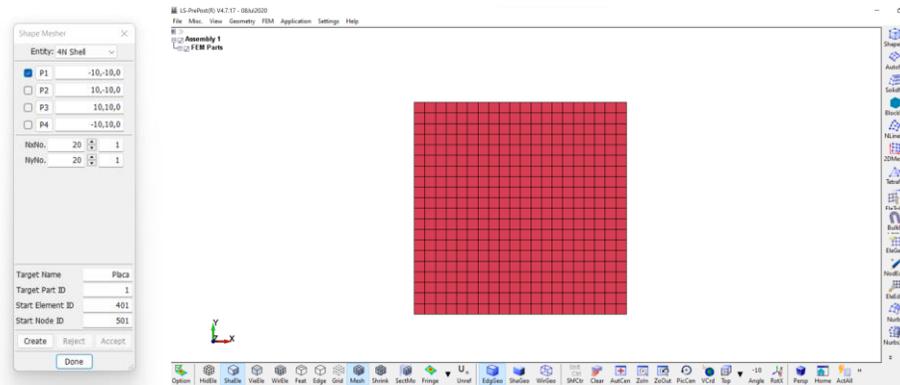


Figura 10: Configuración de menú, creación de placa y mallado

Como acto siguiente se debe diseñar la esfera, la cual será creada en la misma opción Shape Mesher, la diferencia es que ahora en vez de seleccionar “4N Shell”, se deberá seleccionar “Sphere Solid”. Una vez desplegado el menú de “Sphere Solid” se debe ingresar el radio de la esfera y la densidad del mallado, para luego insertar las coordenadas del centro de la esfera en las posiciones (x,y,z) y posteriormente dar valores a “Direct1” y “Direct2”, lo que representa las direcciones perpendiculares al radio de la esfera.

En este caso el radio de la esfera se encuentra en el eje Z, por lo que se rellenan con el número 1 las siguientes direcciones: Dx en Direct1 y Dy en Direct2, para finalmente rellenar los datos de identificación de la pieza. Luego click en Create, Accept y Done.

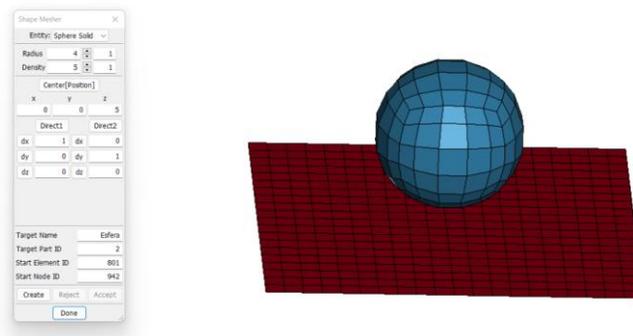


Figura 11: Configuración de menú, creación de esfera y mallado

Como se puede apreciar en la figura 11 ya se ha creado la geometría y la malla correspondiente a cada elemento, por lo que se procede a guardar el diseño creado.

En la barra de herramientas, se deben seleccionar las opciones: File, Save as, Save Keyword As, como se muestra en la Figura 12.

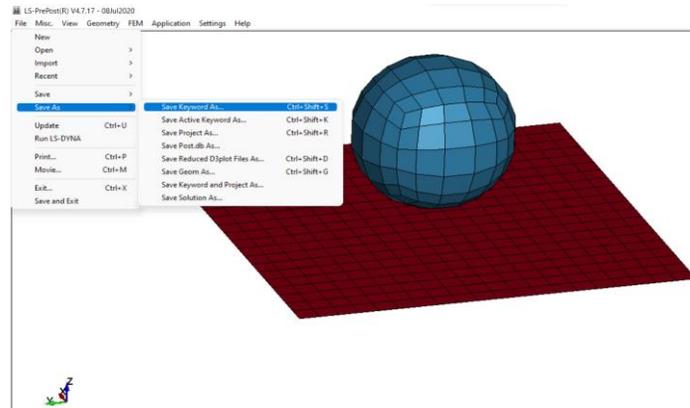


Figura 12: Opción de guardado para geometría

Se recomienda crear una carpeta para guardar el archivo ya que todo lo referente a la simulación, ya sean animaciones, errores, etcétera, quedarán guardados en esta carpeta. En este caso se ha creado la carpeta “Placa_esfera_impacto”, la cual contiene únicamente la geometría diseñada.

Las opciones de guardado deben quedar tal y como lo muestra la Figura 13.

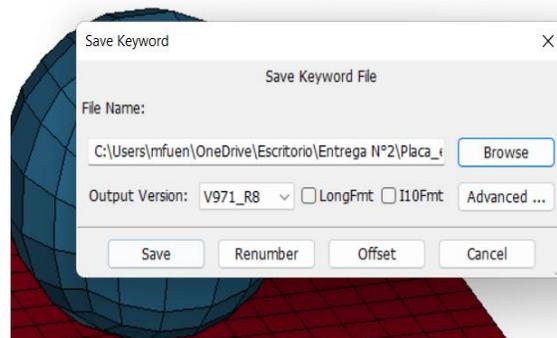


Figura 13: Configuración de guardado de geometría

3.4 Materiales.

En el proceso de diseño se crearán todas las propiedades de cada uno de los cuerpos, ya sean materiales, tipo de cuerpo, tipo de sección, etc., una vez que todas las cualidades estén creadas se procederá a asociar cada propiedad con el cuerpo respectivo.

Para crear los materiales, se debe seguir la ruta: “FEM”, “Model and Part”, “Keyword Manager”. Como se muestra a continuación en la Figura 14.

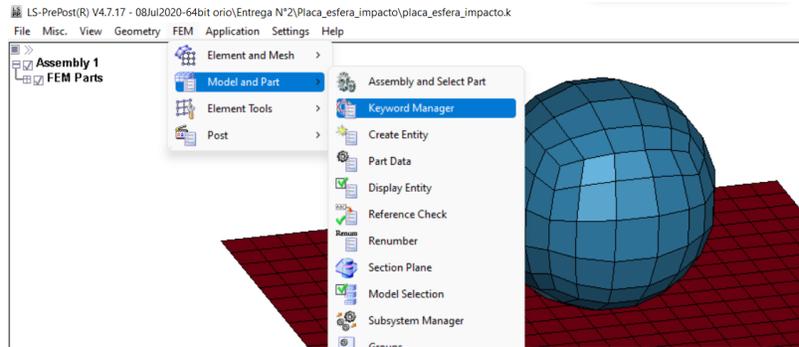


Figura 14: Menú de acceso para creación de materiales.

En el menú de “Keyword Manager”, si la opción “Model” está seleccionada, solo se mostrarán los elementos que ya pertenecen al modelo, en cambio si se selecciona la opción “All” se mostrarán todos los parámetros que se pueden definir, tal como se muestra a continuación en la Figura 15.

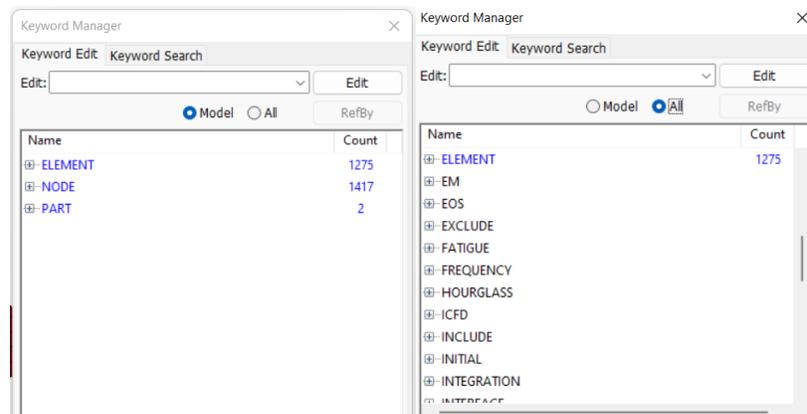


Figura 15: Menú Keyword Manager.

Para crear el material se debe seleccionar la opción “MAT” y a continuación seleccionar el tipo de material deseado, en este caso se selecciona el material correspondiente a la placa, como se puede apreciar en la Figura 16.

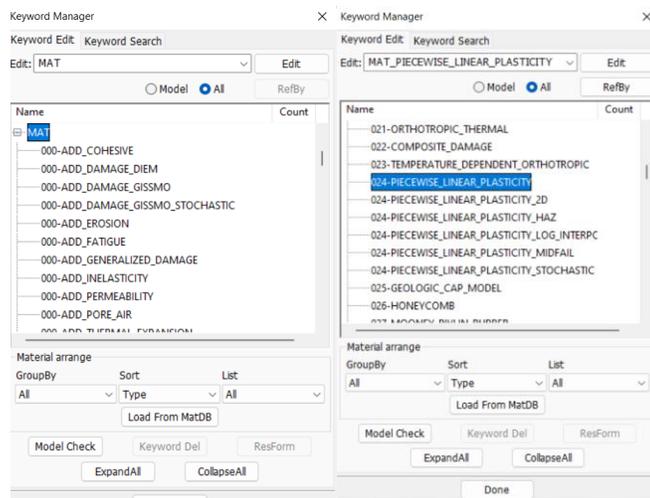


Figura 16: Menú de selección de tipo de material.

En este caso se selecciona uno de los tipos de materiales más comunes en LS – DYNA, 024-PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY. Una vez seleccionado el material se despliega el menú de inserción de parámetros, mostrado en la Figura 17.

Keyword Input Form

MatDB RefBy Pick Add Accept Delete Default Done

Use *Parameter Comment (Subsys: 1 New_Subsystem_1) Setting

*MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY_(TITLE) (024) (0)

TITLE

1	MID	RO	E	PR	SIJCY	ETAH	FAIL	IDEL
						0.0	10.E+20	0.0
2	C	P	LCSS	LCSB	YP			
	0.0	0.0	0	0	0.0			
3	EPS1	EPS2	EPS3	EPS4	EPS5	EPS6	EPS7	EPS8
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	ES1	ES2	ES3	ES4	ES5	ES6	ES7	ES8
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Plot Raise New Padd

Total Card: 0 Smallest ID: 0 Largest ID: 0 Total deleted card: 0

Figura 17: Menú de inserción de parámetros del material.

Se debe seguir los siguientes pasos para configurar de buena manera el material:

- 1- Clic Add (al seleccionar esta opción el programa la dará un valor a la casilla MID).
- 2- Asignar un título al material.
- 3- Rellenar las propiedades del material presentes en la fila 1 (si se hace clic en las casillas, el programa dará una descripción del valor que se debe ingresar).

Keyword Input Form

NewID MatDB RefBy Pick Add Accept Delete Default Done

Use *Parameter Comment (Subsys: 1 New_Subsystem_1) Setting

*MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY_(TITLE) (024) (0)

TITLE
material_placa_plastica

1	MID	RO	E	PR	SIGY	ETAN	FAIL	TDEL
1						0.0	10.E+20	0.0

2 C P Enter data into text field YP

0.0 0.0 0 0 0.0

3	EPS1	EPS2	EPS3	EPS4	EPS5	EPS6	EPS7	EPS8
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

4	ES1	ES2	ES3	ES4	ES5	ES6	ES7	ES8
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Plot Raise New Padd

RO:=Mass density.

Figura 18: Menú descriptivo de las propiedades del material.

Como se muestra en la Figura 18, se hace clic en la casilla “RO” y se observa en la parte inferior izquierda del menú, que el programa entrega una descripción del valor “RO”, el cual está asociado a la densidad del material, de la misma forma se puede obtener una descripción de cada valor que solicitan los distintos tipos de menú en todo el software.

- Una vez ingresados los valores del material, clic en Accept y se podrá apreciar al costado derecho que el material ya ha sido creado y figura en la lista. Lo anterior queda en evidencia en la Figura 19.

Keyword Input Form

NewID MatDB RefBy Pick Add Accept Delete Default Done 1 material_placa_plastica

Use *Parameter Comment (Subsys: 1 New_Subsystem_1) Setting

*MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY_(TITLE) (1)

TITLE
material_placa_plastica

1	MID	RO	E	PR	SIGY	ETAN	FAIL	TDEL
1		7850.0000	2.090e+11	0.29000000	5.000e+08	1.000e+10	1.000e+21	0.0

2 C P LCS5 LCSR VP

0.0 0.0 0 0 0.0

3	EPS1	EPS2	EPS3	EPS4	EPS5	EPS6	EPS7	EPS8
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

4	ES1	ES2	ES3	ES4	ES5	ES6	ES7	ES8
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Plot Raise New Padd

Total Card: 1 Smallest ID: 1 Largest ID: 1 Total deleted card: 0

Figura 19: Menú de material con material guardado.

- Clic Done para finalizar.

A continuación, se procede a crear el material de la esfera, que a diferencia de la placa está constituida por un material elástico, el cual se crea mediante un proceso análogo al anterior, como se muestra en la Figura 20.

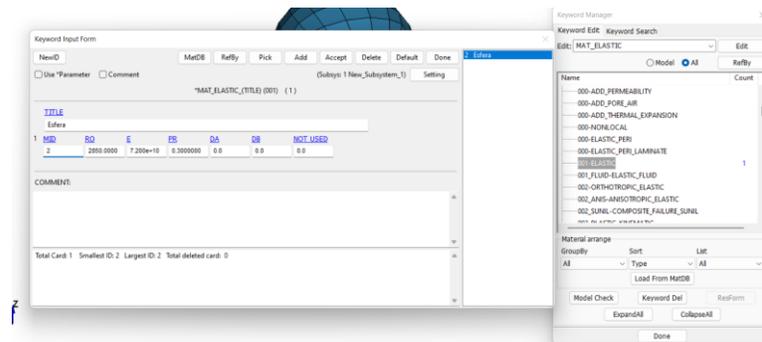


Figura 20: Menú de inserción de parámetros de material elástico.

Una vez que se lleva a cabo todo el proceso detallado anteriormente, se puede revisar en el menú de Keyword Manager los parámetros definidos para el modelo haciendo clic en “Model”.

Tal y como muestra la Figura 21, el modelo posee 1275 elementos, donde 400 corresponden a la placa (SHELL) y 875 corresponden a la esfera (SOLID), además hay 2 materiales creados (001 y 024) y el modelo posee 1417 nodos y 2 partes, las cuales corresponden a la placa y la esfera.

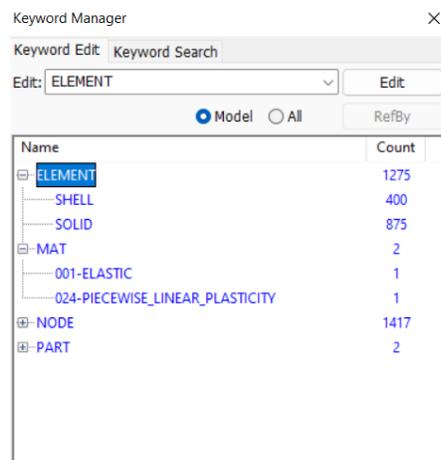


Figura 21: Menú de parámetros del modelo.

Hasta el momento se ha creado la geometría, el mallado y los materiales, los que aún no han sido asignados, como se mencionó con anterioridad.

3.5 Condiciones de borde.

Para crear las condiciones de borde de la placa se deben seguir los siguientes pasos:

- 1- Hacer clic en FEM, Model and Part y luego clic en Create Entity, como se muestra en la Figura 22.

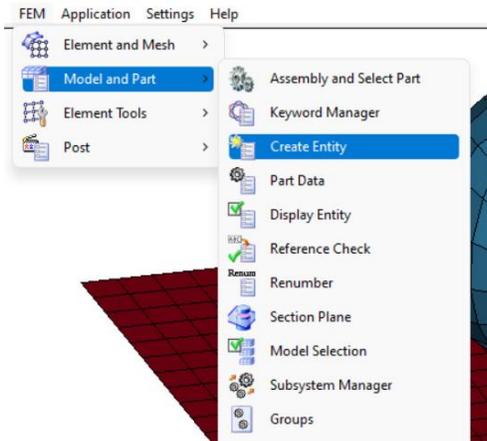


Figura 22: Menú de acceso para creación de condiciones de borde.

- 2- Una vez en el menú de “Entity Creation”, se debe seleccionar “Boundary” y luego seleccionar “SPC” (singular point constrain), para crear la condición se debe marcar la casilla “Cre” (parte superior derecha) y finalmente seleccionar la vista superior del diseño que permita ver la geometría desde arriba para facilitar la selección de los puntos del borde de la placa, una vez hecho esto se desplegará el menú de selección de nodos, tal como se muestra en la Figura 23.

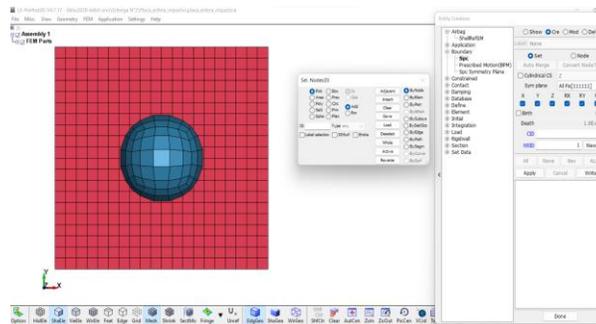


Figura 23: Selección de condiciones de borde de la placa y menú de selección de nodos.

- 3- Luego en el menú de selección de nodos (Sel. Nodes) se deben marcar las opciones Area, In, Add, ByNode. Lo anterior permitirá seleccionar los nodos de manera más rápida, ya que al seleccionar “Area” se podrán seleccionar todos los nodos dentro de un recuadro hecho por el ratón. Una vez realizado el procedimiento quedan seleccionados todos los nodos del contorno

de la placa, los que se pueden distinguir como cruces ligeramente amarillas, como lo muestra la Figura 24.

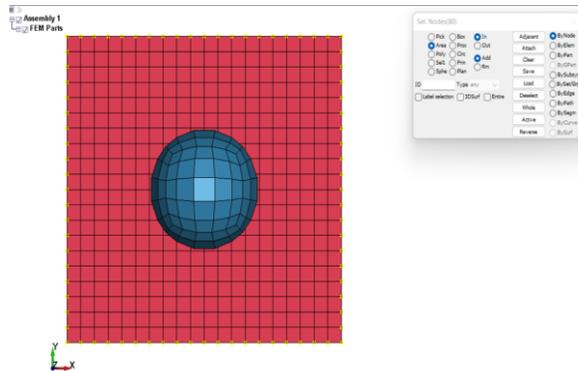


Figura 24: Selección de nodos del borde de la placa.

- 4- Una vez seleccionados los nodos del contorno, clic en Apply y luego clic en Done. Se puede apreciar en la Figura 25 que el programa ya ha fijado cada nodo del contorno del plano, lo que se muestra mediante cruces en cada uno de los nodos del borde.

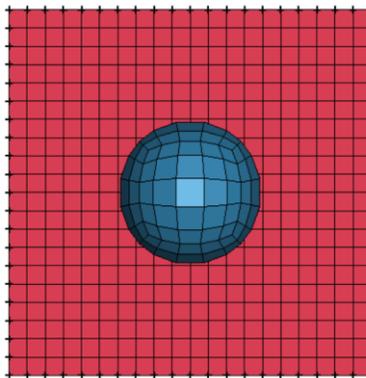


Figura 25: Condiciones de borde de la placa correctamente aplicadas.

Para crear las condiciones de borde de la esfera se deben seguir los siguientes pasos:

- 1- Se debe ingresar el valor de la velocidad de la esfera, para lo cual se ingresa al mismo menú que se usó anteriormente (Entity Creation), donde se debe seleccionar la opción “Initial” y luego hacer clic en “Velocity”, una vez hecho esto se desplegará el mismo módulo de selección

de nodos usado anteriormente, además de la ventana propia de la asignación de velocidades, como se muestra en la Figura 26.

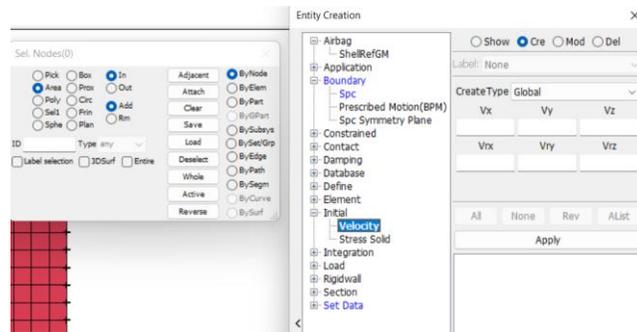


Figura 26: Menú de inserción de velocidad inicial de la esfera y menú de selección de nodos.

- 2- Para seleccionar la esfera, en la ventana de selección de nodos se deben marcar las opciones Area, In, Add, ByPart. Teniendo estas opciones marcadas se hace clic en el cuerpo y posteriormente se ingresa la velocidad inicial de la esfera, la cual en este caso es 10 [m/s] en la dirección negativa del eje Z. Luego clic en Apply y finalmente clic en Done.

Una vez finalizado el procedimiento anterior se puede apreciar que la esfera posee los vectores de velocidad en cada uno de sus nodos, como se muestra a continuación en la Figura 27.

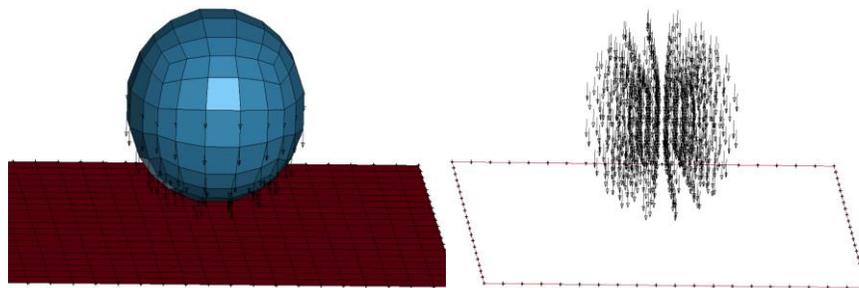


Figura 27: Velocidad inicial de la esfera correctamente aplicada.

3.6 Condiciones de contacto.

Para definir las condiciones de contacto se deben seguir los siguientes pasos:

- 1- Ingresar al menú de Keyword Manager, seleccionar la opción “contact” y seleccionar el tipo de contacto. En este caso se usará uno de los contactos más comunes: “Automatic_Surface_To_Surface”

- 2- Al abrir el menú de configuración de contacto, clic en Add y asignar un nombre a la interacción en la casilla “Title”.
- 3- Se debe definir los parámetros SSID (cuerpo esclavo) y MSID (cuerpo maestro). En primera instancia se debe asignar un valor igual a 3 a las opciones SSTYP y MSTYP y finalmente se debe hacer clic en el botón negro ubicado justo al lado de SSID y asignarle el valor “Placa” que aparecerá en una ventana emergente, posteriormente se debe repetir el procedimiento con la opción MSID y asignarle el valor “Esfera”, tal como se muestra en la Figura 28.

Es importante mencionar que en esta parte de la configuración se puede definir una amplia variedad de parámetros de contacto como coeficiente de roce estático, dinámico, coeficiente de decremento exponencial, etc.

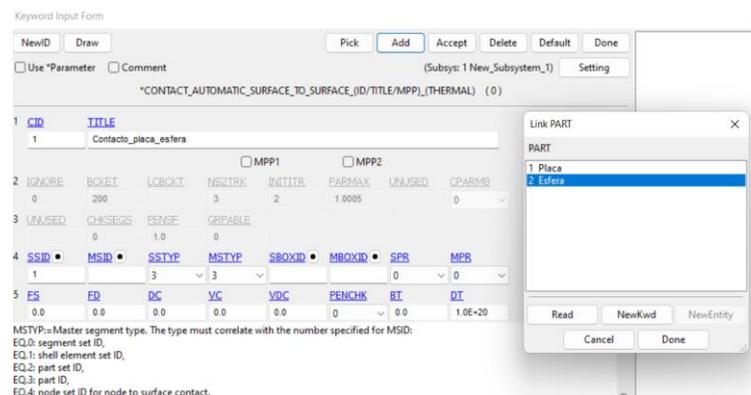


Figura 28: Menú de configuración de contacto.

- 4- Una vez asignadas las superficies esclava y maestra, clic Accept y luego clic Done. Se mostrará una lista al lado derecho donde se podrá verificar que el contacto ha sido creado, tal como se puede apreciar en la Figura 29.

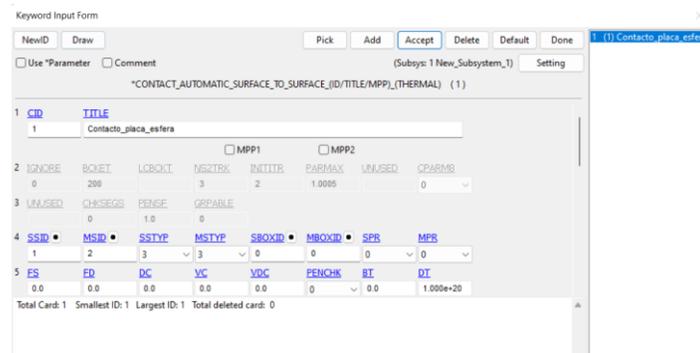


Figura 29: Menú de contacto y correcta creación de contacto.

3.7 Propiedades de sección.

Para crear las propiedades de sección correspondientes se debe seguir el siguiente procedimiento:

- 1- Ingresar a Keyword Manager y seleccionar la opción “Section”, en vista de que la placa será el primer elemento en definir, se debe seleccionar el tipo de elemento correspondiente a la placa: Shell, la Figura 30 muestra las diferentes selecciones que se debe hacer para crear la sección.

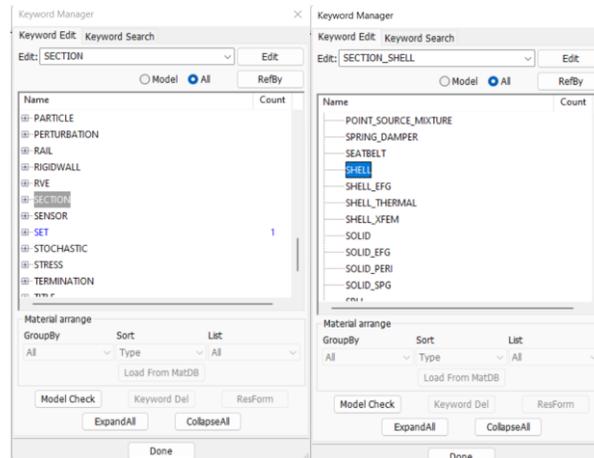


Figura 30: Opciones para la creación de la sección de la placa.

- 2- Una vez en el menú de configuración de la opción Shell, clic en Add y luego asignar un título.

- 3- En el presente caso la placa posee un espesor de 5 milímetros, lo cual se asigna en la opción T1 con un valor de 0.005.
- 4- Se debe asignar un valor para la variable ELFORM, lo cual está asociado a la formulación del elemento, de lo cual se entrega mayor detalle en el manual de LS – DYNA [13], adjunto al descargar el programa. Para este caso se selecciona el valor por defecto ELFORM = 2.
- 5- Finalmente, clic en Accept y Done.

En la Figura 31 queda en evidencia todo lo explicado anteriormente, donde al momento de hacer clic en “Accept”, se podrá ver al costado derecho la sección de la placa creada.

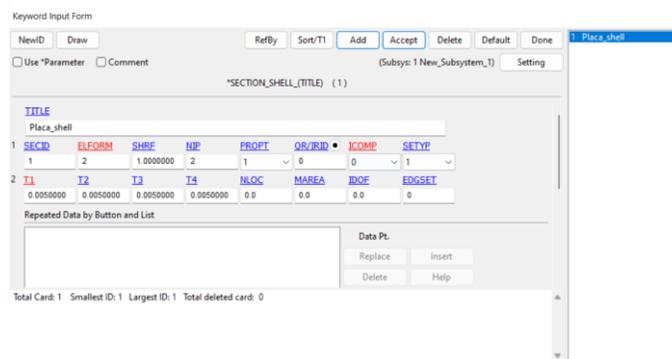


Figura 31: Correcta creación de las propiedades de sección de la placa.

De manera análoga se crea el tipo de sección para la esfera, recordando que el tipo de cuerpo es sólido, dentro de la opción “Section” se debe seleccionar SOLID y posteriormente asignarle un tipo de elemento en ELFORM.

3.8 Asignación de propiedades.

Como último paso en lo que concierne al diseño, se debe asignar a cada una de las partes las propiedades de sección creadas anteriormente, para esto se debe abrir Keyword Manager y seleccionar la opción Part, donde aparecerá el menú mostrado en la Figura 32.

Keyword Input Form

NewID Draw RefBy Pick Add Accept Delete Default Done 1 Placa 2 Esfera

Use *Parameter Comment (Subsys: 1 New_Subsystem_1) Setting

*PART_(TITLE) (2)

1 TITLE
Placa

PID	SECID	MID	EOSID	HGRID	GRAV	ADOPT	IMID
1	0	0	0	0	0	0	0

COMMENT:

Total Card: 2 Smallest ID: 1 Largest ID: 2 Total deleted card: 0

Figura 32: Menú de asignación de propiedades a cada cuerpo.

Como se puede apreciar en la lista ubicada al costado derecho se muestran las diferentes partes que posee el diseño, y considerando que se han creado con anterioridad las propiedades de sección y las propiedades del material, se procede a asociar cada parte con sus respectivas propiedades. Para esto se deben seguir los siguientes pasos:

- 1- Se debe designar las propiedades de la placa, para esto en la opción SECID se debe seleccionar la propiedad de sección perteneciente al elemento, lo cual se logra haciendo clic en el botón negro ubicado al lado de la opción correspondiente y asociándolo con su propiedad de sección. Para finalizar clic en Accept.

Como se muestra en la Figura 33, las opciones SECID y MID deben tener un número asignado, el que corresponde a la “parte” a la cual han sido asociadas.

Keyword Input Form

NewID Draw RefBy Pick Add Accept Delete Default Done 1 Placa 2 Esfera

Use *Parameter Comment (Subsys: 1 New_Subsystem_1) Setting

*PART_(TITLE) (2)

1 TITLE
Placa

PID	SECID	MID	EOSID	HGRID	GRAV	ADOPT	IMID
1	1	1	0	0	0	0	0

COMMENT:

Total Card: 2 Smallest ID: 1 Largest ID: 2 Total deleted card: 0

Figura 33: Menú de asignación de propiedades correctamente asignadas.

3.9 Post – procesamiento.

En este módulo se procede a definir los parámetros correspondientes a la simulación tales como el tiempo de duración, el intervalo de tiempo entre salidas de datos, el tipo de análisis, etcétera. Además, se seleccionan los tipos de datos que entregará el análisis, lo que está directamente relacionado a las bases de datos que el usuario selecciona dentro del software.

Para esto se debe realizar el siguiente procedimiento:

- 1- En el menú de Keyword Manager se debe seleccionar la opción “CONTROL” y hacer clic en “TERMINATION”, al hacer esto se desplegará el menú de configuración tal como se muestra en la Figura 34.

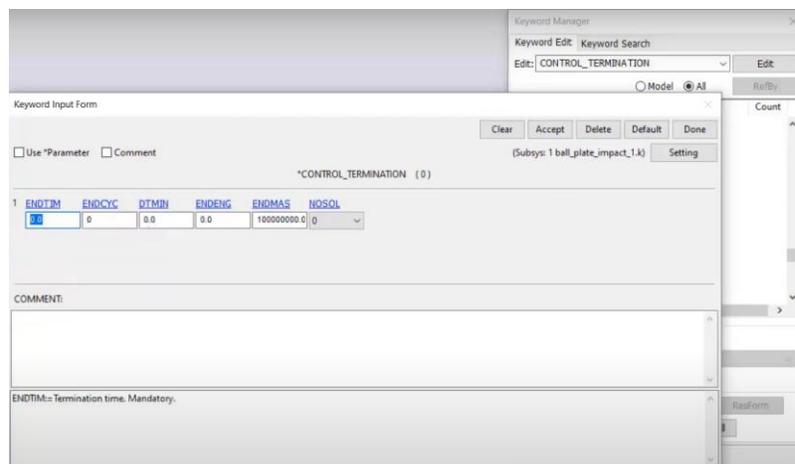


Figura 34: Menú de asignación de tiempo de finalización de la simulación.

- 2- En la casilla “ENDTJM” se debe insertar el tiempo que durará la interacción, en este caso 1 segundo. Finalmente, clic en Accept y Done.

Posteriormente se debe definir los intervalos de tiempo en los que estará dividida la simulación, para esto se debe hacer lo siguiente:

- 1- Abrir el menú de Keyword Manager y seleccionar la opción “DATABASE” para luego hacer clic en “BINARY_D3PLOT”.
- 2- Se desplegará el menú de configuración donde se debe elegir una de 2 opciones, la primera consiste en rellenar la casilla “DT” (intervalo de tiempo entre salidas) y la segunda corresponde a la casilla “NPLTC” (número de divisiones al tiempo de simulación). Al seleccionar la primera opción el usuario puede elegir el tiempo de duración de cada intervalo. En la segunda opción, el usuario decide el número de intervalos en los que quiere dividir el

tiempo que dura la simulación (1 segundo en este caso). Para esta simulación se fijó el número de intervalos de salida en 10, como se muestra en la Figura 35.

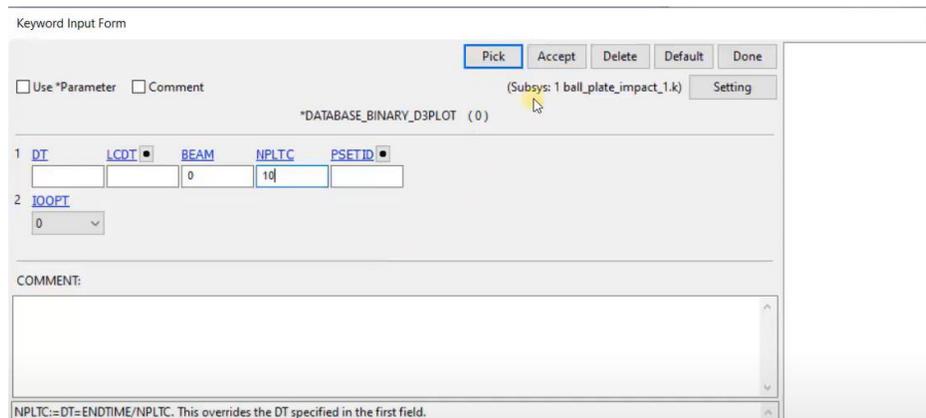


Figura 35: Configuración de tiempo entre datos de salida

Una vez configurada la animación, se deben definir los datos que el usuario necesita extraer del programa, en este caso se le solicitará al programa la información cinemática de nodos específicos, para lo cual se deben seguir los siguientes pasos:

- 1- En el menú de Keyword Manager, en la opción “DATABASE”, seleccionar “ASCII_option”
- 2- Una vez abierto el menú el usuario debe seleccionar las funciones que desea utilizar, en relación con el tipo de información que se desea obtener, en este caso se debe activar la función “NODOUT”.
- 3- Se debe dar un valor a DT (intervalo de tiempo para análisis), lo que corresponde a la frecuencia de muestreo, en este caso el valor debe ser $3.3e-6$ segundos, ya que este valor permitiría al software detectar ondas hasta una frecuencia de 303.000 hz.
- 4- Clic en Accept y Done.

Para más información sobre las otras opciones que permite esta configuración se debe consultar el manual de ANSYS LS – DYNA [13].

Una vez que las opciones de salida estén correctamente seleccionadas, el menú se debe ver como muestra la Figura 36.

	DT	BINARY	LCUR	IOOPT	OPTION1	OPTION2
<input type="checkbox"/> NCFORC	0.0	0	0	1		
<input type="checkbox"/> NODFOR	0.0	0	0	1		
<input checked="" type="checkbox"/> NODOUT	3.3e-06	0	0	1	0	0
<input type="checkbox"/> PBSTAT	0.0	0	0	1		
<input type="checkbox"/> PLLYOUT	0.0	0	0	1		

Figura 36: Configuración de datos de salida.

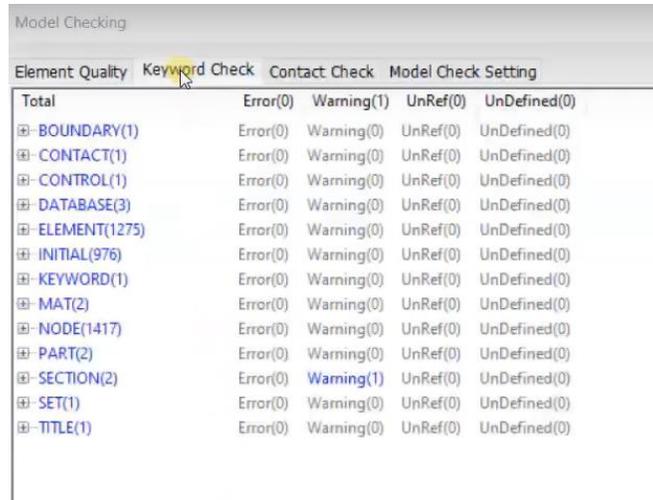
- 5- Finalmente, se debe seleccionar los nodos que enviarán su información a la función “NODOUT”, para esto se debe hacer clic en la opción “DATABASE”, “HISTORY_NODE_ID”. Una vez se despliegue la ventana de configuración, el usuario debe seleccionar los nodos haciendo clic en la opción “Pick”, lo que permitirá realizar la selección de forma manual, después de seleccionar un nodo se le debe asignar un “HEADING” o descripción para reconocerlo y hacer clic en “Insert”, repitiendo este procedimiento para cada nodo que se desee agregar.

3.10 Revisión del modelo.

Como último paso antes de llevar a cabo la simulación, se debe revisar el modelo, siguiendo estos pasos:

- 1- Abrir el menú de Keyword Manager
- 2- Hacer clic en Model Check
- 3- Hacer clic en la ventana Keyword Check

Al seguir estos pasos se desplegará una lista con todos los parámetros que han sido definidos para la simulación, donde el programa podrá notificar al usuario errores, advertencias, parámetros mal definidos y parámetros mal referenciados como se muestra en la Figura 37.



Element Quality	Keyword Check	Contact Check	Model Check Setting
Total	Error(0)	Warning(1)	UnRef(0) UnDefined(0)
BOUNDARY(1)	Error(0)	Warning(0)	UnRef(0) UnDefined(0)
CONTACT(1)	Error(0)	Warning(0)	UnRef(0) UnDefined(0)
CONTROL(1)	Error(0)	Warning(0)	UnRef(0) UnDefined(0)
DATABASE(3)	Error(0)	Warning(0)	UnRef(0) UnDefined(0)
ELEMENT(1275)	Error(0)	Warning(0)	UnRef(0) UnDefined(0)
INITIAL(976)	Error(0)	Warning(0)	UnRef(0) UnDefined(0)
KEYWORD(1)	Error(0)	Warning(0)	UnRef(0) UnDefined(0)
MAT(2)	Error(0)	Warning(0)	UnRef(0) UnDefined(0)
NODE(1417)	Error(0)	Warning(0)	UnRef(0) UnDefined(0)
PART(2)	Error(0)	Warning(0)	UnRef(0) UnDefined(0)
SECTION(2)	Error(0)	Warning(1)	UnRef(0) UnDefined(0)
SET(1)	Error(0)	Warning(0)	UnRef(0) UnDefined(0)
TITLE(1)	Error(0)	Warning(0)	UnRef(0) UnDefined(0)

Figura 37: Lista de revisión del modelo.

3.11 Simulación.

Una vez revisado el modelo, se procede a guardar los cambios y abrir el programa LS – RUN. Al abrir este módulo, aparecerá una ventana como la mostrada en la Figura 38, donde en la casilla “INPUT” se debe seleccionar el modelo terminado, que ha sido previamente guardado por el usuario. Con lo anterior ya configurado, se procede a hacer clic en el botón “play” para iniciar la simulación.

Una vez terminada, el programa arrojará un mensaje destacado en color verde que dirá “Finished”.

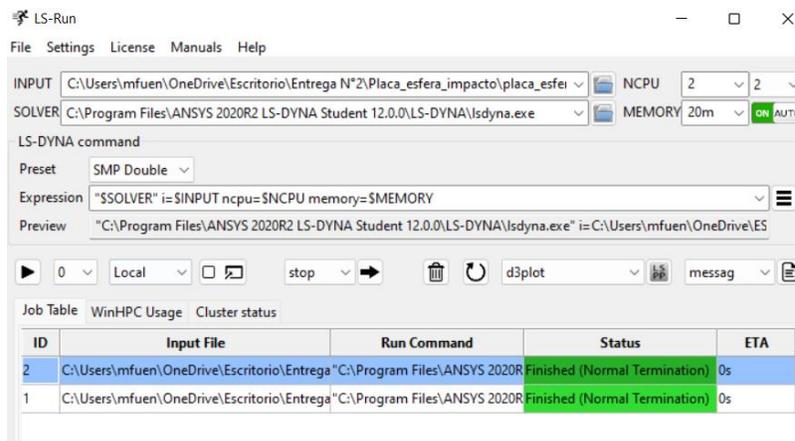


Figura 38: Módulo de simulación de LS – DYNA.

Finalmente, para revisar los datos referentes al análisis y al mismo tiempo ver la simulación creada por el software, se deben seguir los siguientes pasos:

- 1- En la barra de herramientas, clic en File, Open, LS – DYNA Binary Plot.
- 2- Ir a la carpeta donde se guardó anteriormente el modelo terminado y hacer clic en d3plot.
- 3- Clic en Open.

Una vez hecho esto el programa mostrará al usuario la animación correspondiente al modelo diseñado, donde se podrá acceder a los diferentes datos solicitados mediante la barra de herramientas que se encuentra al lado derecho de la pantalla. Haciendo clic en la opción “Post”, se desplegarán nuevas opciones en esta misma barra de herramientas, las cuales corresponden a diferentes tipos de análisis solicitados por el usuario tales como esfuerzos, deformaciones, comportamiento de energías internas (para este caso en especial), etc.

Finalmente, se procede a revisar la cinemática del nodo, para lo cual se selecciona la opción “POST”, presente en la barra de herramientas del costado derecho, para luego hacer clic en la opción “ASCII”, esto desplegará un menú como el que se muestra a continuación en la Figura 39.

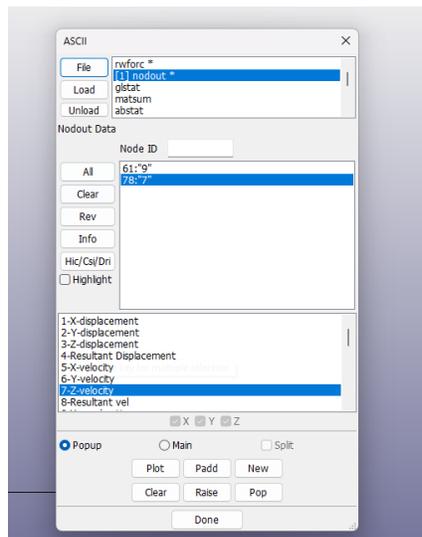


Figura 39: Menú de selección “ASCII”

Para visualizar los resultados, se deben seguir los siguientes pasos.

- 1- Seleccionar la opción “nodout” y hacer clic en “File”.
- 2- Se abrirá una ventana donde se debe cargar el archivo “Nodout” correspondiente.

- 3- Una vez cargado el archivo, se mostrarán los nodos con su respectiva descripción, como se ve en la Figura 39.
- 4- Una vez seleccionado el nodo, se debe marcar la característica que el usuario desea obtener y finalmente hacer clic en la opción “Plot”.

Una vez que se ha realizado todo el procedimiento descrito con anterioridad, se obtienen ondas de la frecuencia esperada, como se muestra en la Figura 40. Es importante recordar que LS DYNA no trabaja con unidades de medida definidas, por lo que el usuario debe definir sus unidades de medida y ser consistente con estas mismas al momento de introducir valores al programa, en este caso se han seleccionado las siguientes unidades de masa, longitud y tiempo: kg, cm, s.

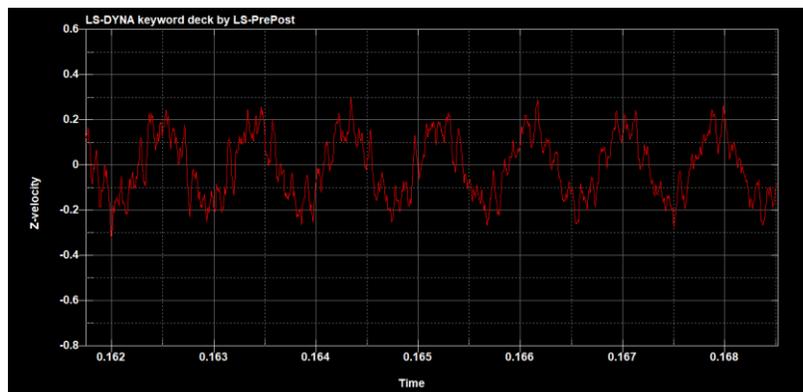


Figura 40: Velocidad en Z de nodo 1015.

De la Figura 40 se puede inferir que las ondas de frecuencia más alta no se pueden apreciar de buena manera ya que están superpuestas con ondas de baja frecuencia, razón por la cual se debe aplicar un filtro, de paso alto en este caso, con el objetivo de visualizar solamente las ondas de una frecuencia mayor a 20.000 [Hz], valor mínimo definido para que una onda se considere EA.

Debido a que LS DYNA no cuenta con una herramienta para filtrar los datos obtenidos, se ha optado por exportar los datos a un archivo Excel. Finalmente, se procede a crear un filtro de paso alto usando el lenguaje de programación Matlab (Anexo A), considerando una frecuencia de muestreo de 303.000 [Hz] y una frecuencia de corte de 20.000 [Hz], los resultados se muestran a continuación en la Figura 41.

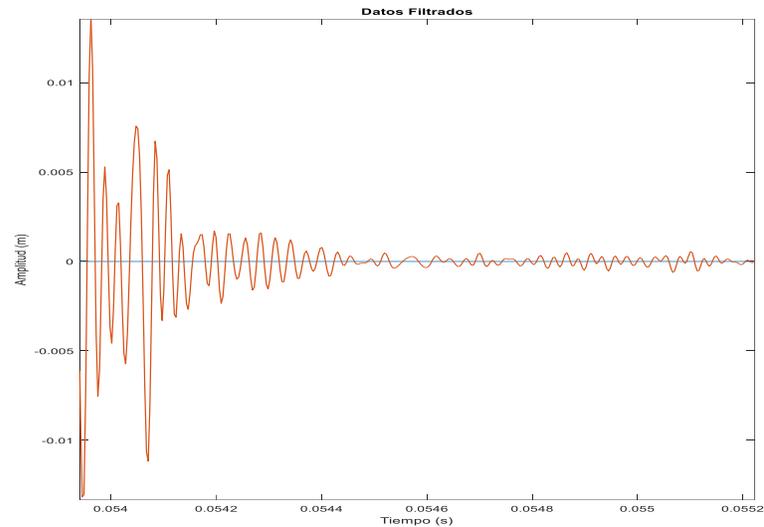


Figura 41: Velocidad en Z, nodo 1015, usando filtro de paso alto.

Como se puede observar en la Figura 41, se han obtenido ondas correspondientes a EA en un nodo perteneciente al plano, donde se puede observar una onda transiente originada por el impacto de la esfera sobre el plano, notando una disminución en la amplitud de esta a medida que pasa el tiempo. Además, se puede apreciar que estas ondas no presentan una frecuencia tan alta como era de esperar, sin embargo, ésta es mayor a 20 [kHz], por lo que son consideradas EA. Este problema puede ser solucionado fácilmente, construyendo una malla más fina para el elemento a analizar, lo que se aplicará posteriormente para las simulaciones propias del estudio.

CAPÍTULO 4: Pre – Procesamiento de Caso Deslizante.

4.1 Introducción.

En el presente capítulo se procederá a definir los parámetros fundamentales de la simulación del caso objetivo, tales como geometría, mallado, tipo de material, propiedades de sección, condiciones de contacto, condiciones de borde, etcétera.

Además, se definirán 3 velocidades de deslizamiento distintas para el elemento cilíndrico, con el objetivo de comparar las ondas de emisiones acústicas en contextos diferentes, es decir, la simulación original se dividirá en 3 simulaciones independientes, variando sólo la velocidad de deslizamiento y el tiempo de terminación en cada una. Finalmente, se analizará el proceso por el cual se añade la aceleración de gravedad al análisis.

Es importante mencionar que este modelo posee una mayor complejidad que el modelo de prueba, por lo que debe ser ajustado mediante una construcción de modelos prototipo, los cuales deben tener una menor cantidad de nodos que el modelo original, esto con la finalidad de hacer más “ligero” el modelo y obtener así tiempos de simulación significativamente más cortos. Una vez que se obtienen los resultados esperados en el modelo prototipo, se debe agregar la configuración utilizada al modelo original, reduciendo así el tiempo ensayo – error empleado en la simulación.

Las configuraciones expuestas en este capítulo son fruto de lo mencionado anteriormente, por lo que no se profundizará en las distintas opciones de configuración del modelo.

4.2 Geometría.

Con la finalidad de simular la interacción entre engranajes de una manera representativa y a la vez simplificada, se ha definido el caso principal de estudio como la interacción entre un plano y un cilindro que se mueve sobre él.

Cabe destacar que, como se ha mencionado con anterioridad, se deben definir las unidades de masa, longitud y tiempo, y a su vez mantener la consistencia de unidades durante la totalidad de la simulación, para este caso en específico se ha optado por kilogramos, milímetros y milisegundos respectivamente.

A continuación, en la Tabla 3, se presentan los diferentes cuerpos involucrados en la interacción y sus respectivas dimensiones.

Tabla 3: Dimensiones de los cuerpos.

Cuerpo	Plano	Cuerpo	Cilindro
Largo	200 [mm]	Radio	10 [mm]
Ancho	200 [mm]	Largo	10 [mm]
Espesor	0,1 [mm]	Espesor	0,1 [mm]

En base a simulaciones realizadas durante todo el proceso de la investigación, se han detectado problemas en la interacción entre un cilindro sólido y el plano al momento de aplicar la carga gravitatoria correspondiente, por esto, se ha decidido trabajar con un cilindro hueco con un respectivo espesor asociado. La cantidad de material que se pierde considerando un cilindro de tipo hueco se compensará aplicando masas distribuidas, lo que se analizará con mayor profundidad posteriormente.

Una vez definidas las dimensiones de cada uno de los cuerpos, es importante definir la posición de estos en función del sistema de referencia. Teniendo en cuenta lo anterior, se ha decidido ubicar el sistema de referencia en el centro del plano.

De esta manera, se debe definir para el caso del plano, las coordenadas de sus vértices y para el caso del cilindro, la dirección que tendrá y la ubicación de su centro en función del sistema de referencia.

A continuación, la Tabla 4 muestra las coordenadas de los vértices pertenecientes al plano.

Tabla 4: Coordenadas de los vértices del plano.

	X	Y	Z
Punto 1	-100	100	0
Punto 2	-100	-100	0
Punto 3	100	-100	0
Punto 4	100	100	0

Análogamente a lo mostrado con anterioridad, la Tabla 5 muestra la posición del centro del cilindro respecto al sistema de referencia.

Tabla 5: Coordenadas del centro del cilindro.

	X	Y	Z
Centro	0	30	10,5

En relación con el elemento cilíndrico, su orientación está definida a lo largo del eje X, lo que se debe configurar al momento de crear la geometría.

En cuanto al centro de este, se ha considerado generarlo a 30 mm del origen en la dirección Y debido a que se desea que el movimiento no inicie desde el centro del plano, sino más bien desde un costado de este mismo, pero a su vez se desea eliminar cualquier efecto producido por las condiciones de borde presentes, por lo que situarlo a 70 mm del borde se considera suficiente.

En cuanto a su posición en Z, considerando que el cilindro posee un radio de 10 mm, se debe ubicar su centro a una distancia mayor al radio con el fin de evitar la intersección en el proceso de diseño, esto debido a que, en las simulaciones de elementos finitos en general, se evita que los cuerpos se toquen entre sí para evitar interferencias geométricas y más precisamente, para tener un mayor control de la condición de contacto presente en la interacción.

Teniendo en cuenta que el propósito de la investigación es simular ondas de EA generadas por fricción deslizante, se debe controlar minuciosamente el contacto entre los cuerpos, lo que se analizará con mayor detalle próximamente.

4.3 Material.

Teniendo en cuenta que, paralelamente a esta investigación, se está construyendo un banco de ensayos para medir emisiones acústicas, se ha seleccionado el Aluminio 6061 como el material del cual estarán compuestos ambos cuerpos; plano y cilindro, coincidiendo así con los materiales de composición del banco de ensayos antes mencionado.

En la Tabla 6 se muestran las propiedades del material antes mencionado, las cuales se presentan en las unidades del SI únicamente por motivos de orden. Al momento de ingresar estos valores al software, se harán las transformaciones pertinentes para continuar con la consistencia de unidades mencionada con anterioridad.

Tabla 6: Propiedades del Aluminio 6061

Aluminio 6061	
Tipo de Material LS – DYNA	024-PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY
Densidad	$\rho = 2.700 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$
Módulo Elástico	$E = 7 \cdot 10^{10} [Pa]$
Coefficiente de Poisson	$\nu = 0,33$
Esfuerzo de Fluencia	$\sigma_y = 2,4 \cdot 10^8 [Pa]$

4.4 Propiedades de sección.

Una variable importante en los procesos de simulación de elementos finitos es el tipo de sección asignada a un elemento, variable relacionada al tipo de composición interior que presenta este mismo. En este caso se ha decidido que, tanto el cilindro como el plano serán elementos tipo “SHELL”, es decir, elementos de tipo cascarón. Lo anterior es comúnmente aceptado para modelar secciones de elementos delgados como placas o láminas, además se caracteriza por invocar un análisis de elementos finitos, es su mayoría, bidimensional.

Se considera que este tipo de sección representará correctamente al plano de la simulación, pero tendrá limitaciones al momento de representar al cilindro que originalmente se asumía sólido. La razón principal de este cambio se ha comentado con anterioridad.

Finalmente, al momento de crear la propiedad de sección, se debe incluir el espesor de cada uno de los elementos, el cual corresponde a 0.1 mm, una vez definida la propiedad de sección se debe aplicar a ambos elementos; plano y cilindro.

4.5 Geometría y mallado.

Una vez definidas las dimensiones de los cuerpos y el tipo de material y de sección que los conforma, es necesario seleccionar un tamaño adecuado de malla para cada uno de estos. Debido a que el monitoreo se centrará en el plano, se debe calcular la distancia mínima entre los nodos de éste para que el software pueda captar adecuadamente las ondas de emisiones acústicas.

En relación con lo anterior, es de vital importancia entender que las características del material cumplen un papel fundamental en la propagación de ondas por éste mismo. En un medio homogéneo, la velocidad teórica de transmisión de ondas longitudinales y transversales [8], está definida por las siguientes expresiones:

$$C_L = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad (9)$$

$$C_T = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (10)$$

Donde C_L corresponde a la velocidad longitudinal, C_T es la velocidad transversal, ρ es la densidad del material, λ es la constante de Lamé y μ es el módulo de corte.

A su vez estos parámetros son definidos como se muestra a continuación:

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \quad (11)$$

$$\mu = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (12)$$

Siendo E el módulo elástico del material y ν el coeficiente de Poisson.

Reemplazando los parámetros del material expuestos en la Tabla 6, en las ecuaciones presentadas anteriormente (9 – 12), se obtienen los siguientes valores:

$$C_L = 6.197,82 \left[\frac{m}{s} \right] \quad (13)$$

$$C_T = 3.121,95 \left[\frac{m}{s} \right] \quad (14)$$

Una vez se obtienen los valores de velocidad de transmisión de onda, se debe seleccionar el mayor de ellos para calcular la longitud de onda mínima. Es importante mencionar que, en el cálculo de la longitud de onda mínima se debe definir también la frecuencia máxima, la que corresponde a la frecuencia de muestreo definida con anterioridad.

Teniendo en cuenta lo antes mencionado, la longitud de onda mínima queda definida por:

$$\lambda_{min} = \frac{C_{max}}{f_{max}} = \frac{C_L}{300.000} = 0,0206 [m] \quad (15)$$

Finalmente, se aplica el criterio que relaciona la longitud de onda mínima con la distancia mínima entre nodos [8], el cual plantea lo siguiente:

$$\frac{\lambda_{min}}{10} \geq L_e \rightarrow L_e \leq 0,00206 [m] = 2,06 [mm] \quad (16)$$

Siendo L_e la distancia mínima entre nodos.

Teniendo en cuenta lo calculado anteriormente, se concluye que la distancia entre nodos debe ser menor a 2.06 [mm], esto significa que el mallado a lo ancho y largo del plano debe tener una cantidad mínima de elementos, lo que viene dado por las siguientes ecuaciones:

$$N_A \geq \frac{A}{L_e} \rightarrow N_C \geq \frac{200}{L_e} = 96,81 \quad (17)$$

Siendo N_C el número de elementos en la dirección axial del plano y A el ancho del plano en milímetros.

En concordancia con lo anterior, se decide que el mallado axial debe tener 100 elementos, lo que da como resultado una distancia nodal axial de 2,0 [mm], lo que cumple la restricción calculada (16).

Análogamente, se calcula la cantidad mínima de elementos que debe tener el plano en la dirección longitudinal.

$$N_L \geq \frac{L}{L_e} \rightarrow N_L \geq 96,81 \quad (18)$$

Siendo N_L el número de elementos en la dirección longitudinal y L el largo del plano.

Teniendo como base lo calculado anteriormente, se decide generar, 100 elementos en la dirección longitudinal del plano, es decir, una distancia longitudinal nodal de 2 [mm], cumpliendo la restricción calculada en (16).

En relación con el mallado del cuerpo cilíndrico y teniendo en cuenta que éste solo actuará como cuerpo detonante del fenómeno acústico y no como transmisor de este (para efectos del monitoreo), se decide elaborar un mallado menos refinado, el que consta de 30 elementos en la dirección circunferencial y 6 elementos en la dirección axial, lo que permitirá ahorrar tiempo de simulación.

Una vez finalizado el proceso de creación de la geometría y su mallado correspondiente, se tiene lo presentado en la Figura 42.

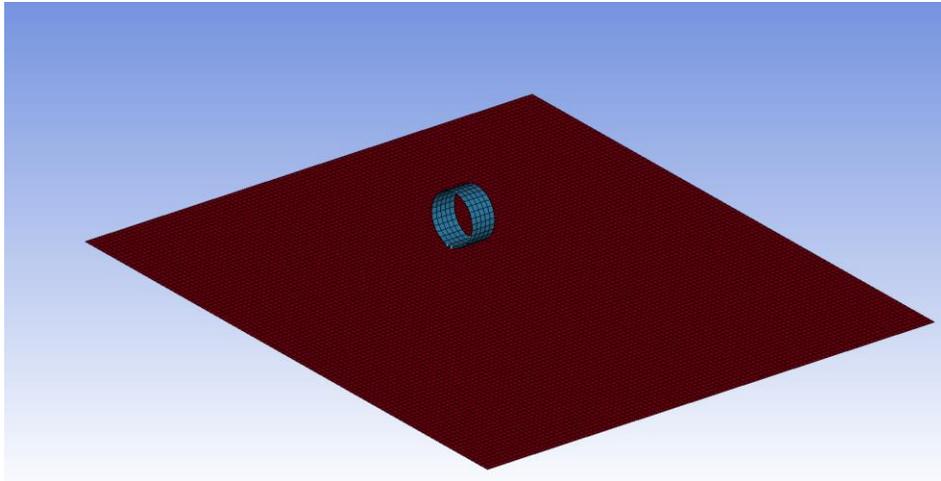


Figura 42: Construcción de geometría y mallado.

Como se puede apreciar, se consta de un plano bastante grande en relación con el elemento cilíndrico, lo que permitirá disminuir los efectos generados por las condiciones de borde impuestas al plano, el que a su vez cuenta con un mallado bastante denso, lo que permitirá captar con mayor exactitud las ondas de EA presentes en la interacción.

4.6 Condición de contacto.

Para definir correctamente el tipo de contacto presente en la interacción, se debe tener en cuenta el tipo de fricción predominante. Para el caso del cilindro deslizando sobre un plano, predomina la fricción de tipo deslizante, por lo que se decide aplicar un contacto (LS – DYNA) del tipo “AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE”, lo que permite al programa seleccionar automáticamente un conjunto de nodos en el área de contacto, los cuales estarán sometidos a las condiciones configuradas por el usuario.

El valor asignado a cada una de las variables de la función de contacto se muestra a continuación en la Tabla 7.

Tabla 7: Parámetros de la función de contacto deslizante

Tipo de Contacto (LS – DYNA)	AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE
SSTYP	3
MSTYP	3
SSID	2 (Cilindro)
MSID	1 (Plano)
FS	0.4
FD	0.3
SAST	0.01 [mm]
SBST	0.01 [mm]

Los parámetros “SAST” y “SBST” están relacionados a la penetración máxima permitida en los elementos A y B, los cuales representan al plano y cilindro respectivamente, por lo que, para evitar interferencias geométricas e interacciones no deseadas, se ha configurado una penetración máxima permitida de 0.01 mm.

4.7 Elementos de masa.

Como se ha mencionado anteriormente, en simulaciones prototipo relacionadas al modelo se han detectado problemas al llevar a cabo la interacción entre un cilindro sólido sometido a gravedad y el plano, por lo que se ha decidido representar el elemento cilíndrico mediante un cilindro hueco.

Para no perder el peso asociado al relleno del cilindro se ha decidido agregar elementos de masa a la simulación, los cuales han sido situados en nodos del cilindro directamente relacionados al contacto.

Lo antes descrito se muestra a continuación en la Figura 43.

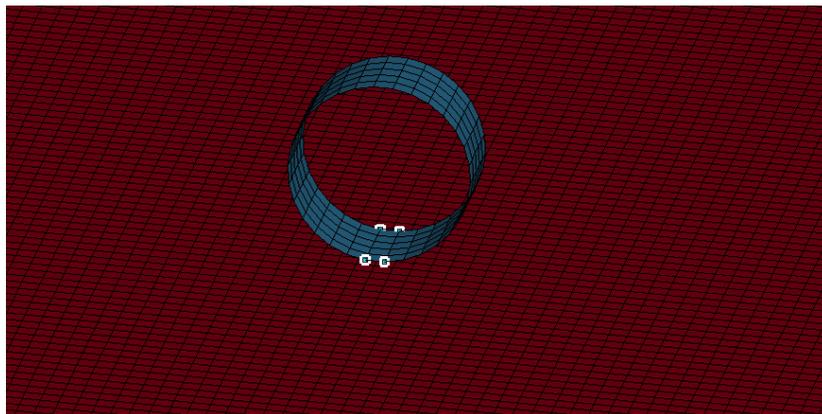


Figura 43: Elementos de masa de elemento cilíndrico.

Como se ve en la figura anterior, se ha asignado a cada uno de los nodos mostrados un cuarto de la masa total del cilindro, lo que se ha distribuido en los nodos próximos a los bordes para no causar problemas de inestabilidad en el modelo, lo que representa una buena aproximación del caso original que se pretende simular. Próximamente se analizará la carga producida por el cilindro en el plano y la respuesta correspondiente del mismo.

Para definir los elementos de gravedad del sistema, se debe seguir la ruta “Keyword Manager”, “Element”, “MASS”. Una vez abierta la venta de configuración del comando, se puede seleccionar cada nodo y asignarle su masa respectivamente.

4.8 Condiciones de borde.

En cuanto a las condiciones de borde del plano, se ha restringido el movimiento de todos los nodos pertenecientes al borde de este, al igual que se hizo en la simulación de entrenamiento.

En cuanto al elemento cilíndrico, se le debe asignar una velocidad de deslizamiento distinta para cada una de las 3 simulaciones independientes, esto con la finalidad de obtener diferentes formas ondas de EA a diferentes velocidades de deslizamiento. Para esto se ha definido que en cada simulación el cilindro deberá recorrer la misma distancia; 54 milímetros.

A continuación, la Tabla 8 se muestran las diferentes velocidades asignadas al elemento cilíndrico en cada una de las simulaciones.

Tabla 8: Parámetros de la función de contacto deslizante

Simulación	Velocidad de deslizamiento en la dirección Y
1	$-0,54 \left[\frac{mm}{ms} \right]$
2	$-1,08 \left[\frac{mm}{ms} \right]$
3	$-5,4 \left[\frac{mm}{ms} \right]$

Teniendo en cuenta que se desea obtener la misma distancia recorrida en todas las simulaciones, se debe configurar el tiempo de término de cada una, de modo que se cumpla con lo antes mencionado. Esto se explicará con mayor detalle próximamente en el capítulo de post – procesamiento.

4.9 Relajación dinámica y carga de gravedad.

A diferencia del caso de entrenamiento, en la presente simulación se debe considerar la aceleración de gravedad, la cual juega un rol importante en la interacción que se desea simular, ya que la fuerza normal o de contacto entre ambos cuerpos se genera debido al propio peso del elemento cilíndrico.

Al momento de utilizar la aceleración de gravedad en la simulación, debido a que los cuerpos presuntamente en contacto se encuentran separados, aunque sea por una distancia muy pequeña, se detecta movimiento inicial en éstos, por lo que es necesario aplicar algún método que asegure una inicialización de contacto entre los cuerpos acompañada de un equilibrio estático del sistema.

Para lograr lo descrito anteriormente, es necesario configurar la función de relajación dinámica presente en el software, la cual se encarga de inicializar las cargas del sistema, entre estas la gravedad. Lo antes mencionado se puede llevar a cabo de manera implícita o explícita, según prefiera el usuario.

En este caso se ha configurado una relajación dinámica implícita, ya que esta permite que el software haga un análisis previo a la simulación propiamente tal, precargando el sistema con gravedad y grabando en el modelo el estado de esfuerzos inicial del sistema, esto constituye una ventaja significativa debido a que permite al usuario programar velocidades iniciales, las cuales no interferirán en el estado de equilibrio inicial.

La relajación dinámica se debe invocar desde 2 rutas diferentes, en primera instancia se deben definir 2 curvas que representen la aceleración de gravedad y posteriormente relacionarlas con la carga configurada. El segundo paso consiste en definir los parámetros de control de la relajación dinámica, tales como tiempo de duración, parámetros de convergencia y método de interacción con la simulación.

Para definir correctamente las curvas de aceleración y asociarlas a la carga correspondiente, se debe respetar el siguiente procedimiento:

- Seguir la ruta: “Keyword Manager”, “Define”, “Curve”, donde se deben definir 2 curvas de aceleración, una curva constante y la otra que comience en cero y alcance el valor 1 en un intervalo no mayor a la décima parte del tiempo de terminación de la simulación.
- Para la curva constante se debe definir un valor SIDR = 0, en cambio para la curva donde la aceleración aumenta de forma lineal, se define SIDR=1.
- Luego, dirigirse al módulo “LOAD_BODY”, y asignar la curva constante al casillero “LCID”, de la misma forma asignar la curva variable al casillero “LCIDDR”.
- Finalmente, se debe ingresar el valor de la aceleración de gravedad en la casilla SF, la cual representa un factor por el cual se multiplicará la curva definida. Para este caso,

considerando que las unidades de trabajo corresponden a milímetros y milisegundos, se tiene $SF = 0.00981 \left[\frac{mm}{(ms)^2} \right]$.

Para definir los parámetros de control del módulo “Dynamic Relaxation”, se deben seguir los siguientes pasos:

- Seguir la ruta; “Keyword Manager”, “CONTROL_DYNAMIC_RELAXATION”.
- Una vez en la ventana de configuración, se debe asignar el valor “5” a la casilla “idrflag” y darle un valor distinto de cero a la casilla “DRTERM”, en este caso se ha optado por 100 milisegundos. Estos parámetros controlan el tipo de relajación dinámica utilizada (implícita o explícita) y el tiempo opcional de término respectivamente.
- Luego, se debe configurar la opción “CONTROL_IMPLICIT_DYNAMICS”, donde se deben asignar los parámetros de convergencia de la relajación dinámica, ya que esta constituye un proceso iterativo para lograr el equilibrio. En este caso, se recomienda usar los parámetros establecidos por defecto.
- Finalmente, se debe configurar la opción “CONTROL_IMPLICIT_GENERAL”, donde se le debe asignar el valor “0” a la casilla “IMFLAG”, lo que permitirá que el software ejecute el análisis explícito (simulación) justo después de terminar la relajación dinámica implícita, de lo contrario el software nunca aplicará a la simulación las condiciones de movimiento definidas en el modelo.

CAPÍTULO 5: Simulación y Post – Procesamiento de Caso Deslizante.

5.1 Introducción.

En el presente capítulo se expondrán las configuraciones de post – procesamiento de la simulación abarcando el tiempo de duración de esta, la configuración de los sensores implantados y las bases de datos utilizadas, las cuales tienen directa relación con el tipo de resultados que se desea extraer del software. Además, se analizará el estado de equilibrio inicial alcanzado gracias a la relajación dinámica.

Finalmente, se mostrarán los resultados obtenidos de las 3 simulaciones independientes aplicando un filtro de paso alto a la onda resultante, con el objetivo de analizar las formas de onda de las emisiones acústicas excluyendo así el ruido que propicia el análisis propiamente tal, para finalmente hacer un análisis detallado de estas y comparar los resultados obtenidos con lo presente en la literatura.

5.2 Tiempo de duración de la simulación.

Teniendo en cuenta que se deben realizar 3 simulaciones distintas, en las cuales el elemento cilíndrico debe recorrer la misma distancia a distintas velocidades de deslizamiento, se deben configurar distintos tiempos de duración para las simulaciones.

Teniendo en cuenta lo anterior, los tiempos de duración de la simulación deben ser configurados en función de la velocidad de deslizamiento definida para cada caso.

La Tabla 9 muestra las diferentes velocidades de deslizamiento y el tiempo de duración correspondiente a cada una, considerando que se desea que la distancia recorrida por el cilindro sea igual en todos los casos (54 mm).

Tabla 9: Velocidad de deslizamiento y tiempo de duración de simulación.

Simulación	Velocidad de Deslizamiento en la dirección Y	Tiempo de Duración
1	$-0,54 \left[\frac{mm}{ms} \right]$	100 [ms]
2	$-1,08 \left[\frac{mm}{ms} \right]$	50 [ms]
3	$-5,4 \left[\frac{mm}{ms} \right]$	10 [ms]

Como se puede apreciar, en cada una de las simulaciones, el desplazamiento total será de 54 milímetros, lo que cumple con la condición mencionada anteriormente.

5.3 Base de datos.

Con el fin de obtener resultados asociados a la cinemática de un nodo en específico, acompañados de una animación lo suficientemente detallada, se debe solicitar al software hacer uso de las bases de datos que no están incluidas por defecto en el análisis, esto se logra siguiendo la ruta: “Keyword Manager”, “DATABASE”. Dentro de este módulo se solicitarán las siguientes funciones:

- 1- ASCII_option: Una vez desplegada la ventana de configuración se debe seleccionar en la lista de bases de datos la opción “NODOUT” y asignar un valor a la variable “DT”, la cual corresponde al tiempo de muestreo que tendrá la función. Al configurarla, el software brindará al usuario las características cinemáticas de los nodos solicitados, lo que corresponde a la configuración de los sensores, tema que se profundizará más adelante. Para este caso se ha asignado un valor de 0.0033 milisegundos, lo que corresponde a una frecuencia de muestreo de 300 kHz aproximadamente.
- 2- BINARY_D3PLOT: Función encargada de la animación proporcionada por el programa, donde sólo se asignará un valor a la variable “NPLTC”, la cual configura el número de intervalos de muestreo de la animación, para este caso en particular se requiere una animación detallada de la simulación, por lo que se asigna a la variable “NPLTC” un valor de 50 unidades.

5.7 Configuración de sensores virtuales.

Con la finalidad de estudiar la propagación de ondas de EA en el plano y su vez analizar la respuesta de este en distintos puntos de su geometría, se ha decidido instalar 3 sensores ubicados en la misma dirección del movimiento deslizante, pero distanciados uno de otro.

Para que el software sea capaz de extraer los datos cinemáticos nodales configurados anteriormente en la función “NODOUT”, es necesario especificar los nodos de los cuales se desea obtener información (instalar sensores), de lo contrario, el programa creará un archivo “NOUDOT” vacío.

Para esto se debe configurar la función “HISTORY_NODE_ID”, la cual se encuentra en la misma ruta mencionada anteriormente, “Keyword Manager”, “DATABASE”. Esta permitirá al usuario seleccionar cuantos nodos desee y a la vez agregar una descripción de estos mismos con el fin de reconocerlos fácilmente en la etapa de post – procesamiento.

A continuación, la Figura 38 muestra la ubicación de los 3 sensores que se ha decidido instalar en el plano.

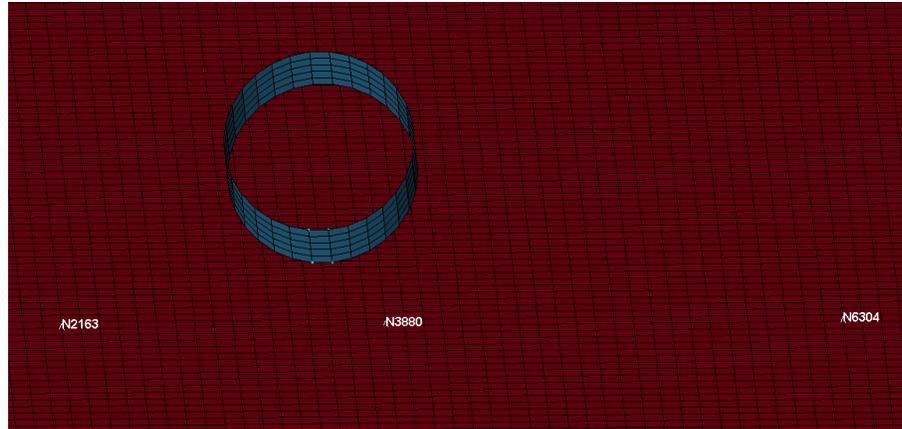


Figura 44: Ubicación de Sensores en el plano.

Como se puede apreciar en la Figura 44, se han instalado 3 sensores en el plano, priorizando el que no queden próximos entre ellos, pero a su vez que no estén ubicados cerca de los extremos del plano, ya que podría generarse una reacción no deseada debido a la condición de borde de este.

5.5 Relajación dinámica.

Una vez configurada esta función, es importante verificar que el estado de pre – carga y equilibrio esté respondiendo correctamente conforme pasa el tiempo, para esto se ha desarrollado una simulación de prueba, la cual consiste en quitar la velocidad de cualquiera de las simulaciones realizadas y analizar cómo actúa el estado de equilibrio alcanzado por la relajación dinámica a lo largo de la simulación.

Teniendo esto en cuenta, se desarrolló la simulación de prueba con un estado de pre – carga inicial implícita, el cual fue sometido a una simulación explícita de 100 milisegundos de duración.

A continuación, la Figura 45 muestra la energía cinética total del sistema durante el tiempo de duración de la simulación.

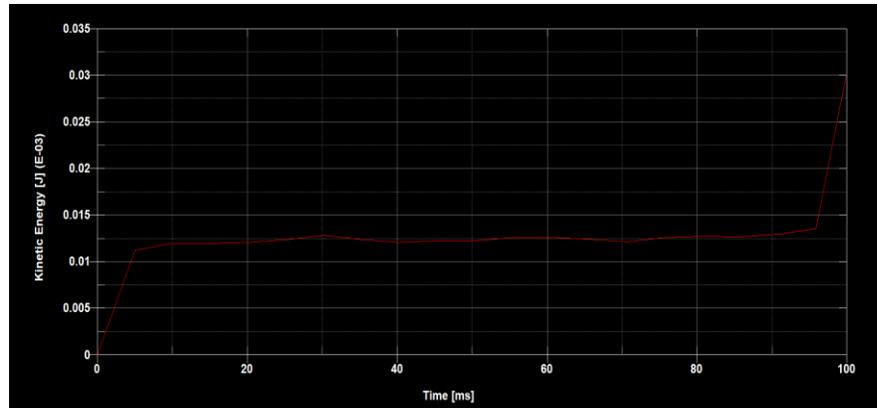


Figura 45: Energía Cinética total del sistema de prueba de equilibrio.

De la figura anterior se puede extraer que la variación máxima de la energía cinética del sistema es aproximadamente $0.03 \cdot 10^{-3}$ Joule, lo cual es considerado un valor despreciable en relación con los casos deslizantes a simular. Además, se puede observar que en la mayor parte de la simulación la energía cinética se mantiene constante, lo que se puede interpretar como un estado de equilibrio aceptable para las simulaciones objetivo.

Otra de las características importantes para tener en cuenta es la distribución de la carga en el plano, lo que constituye un fiel reflejo de cómo está respondiendo este a la carga sometida.

En las Figuras 46 y 47 se puede apreciar la presión y esfuerzo de Von Mises respectivamente.

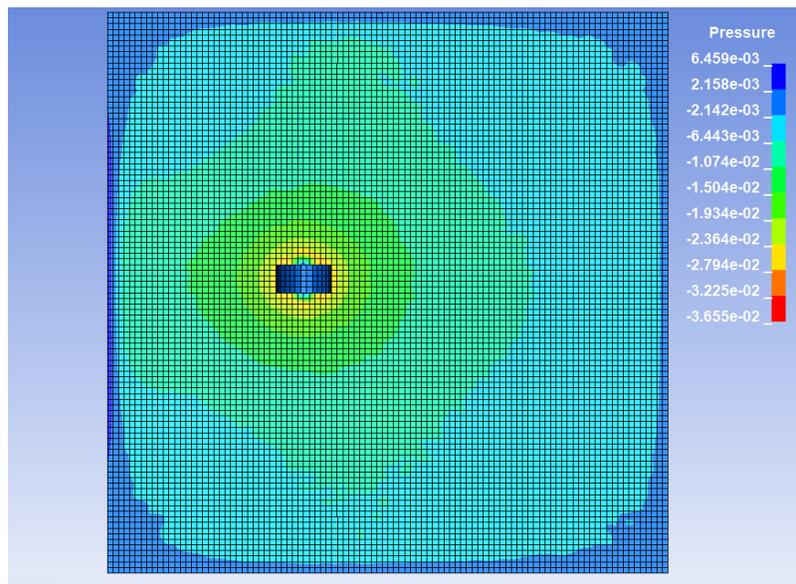


Figura 46: Distribución de presión en el plano en prueba de equilibrio.

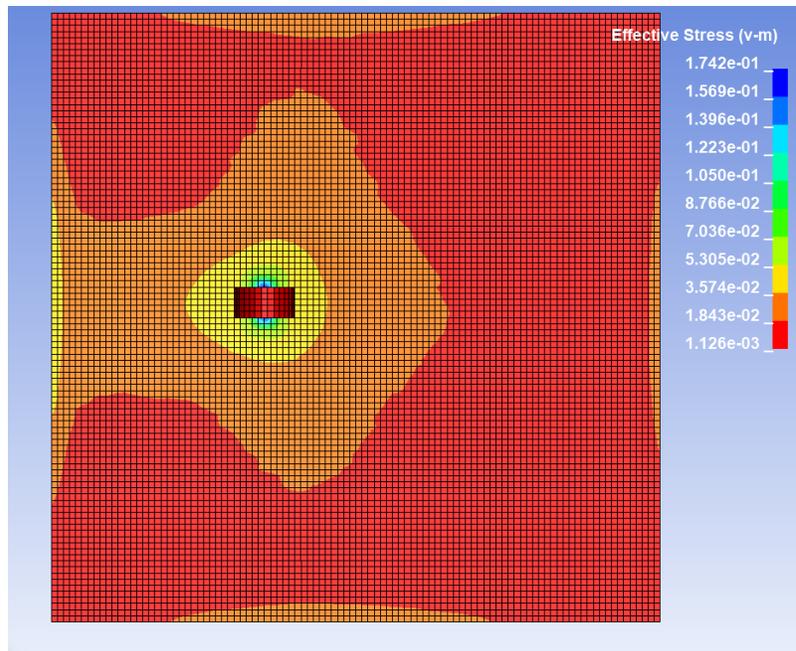


Figura 47: Distribución de esfuerzo de Von Mises en el plano en prueba de equilibrio.

Las Figuras mostradas anteriormente fueron extraídas del software en el instante de tiempo $t = 35,35$ ms, donde se puede ver que tanto la presión como los esfuerzos se distribuyen de manera adecuada en el plano. En el Anexo B se han incluido gráficas de presión y esfuerzo para distintos instantes de tiempo, en estos se observa que el esfuerzo y la presión varían muy poco conforme pasa el tiempo, lo que refleja un estado de equilibrio bastante estable.

5.6 Análisis de resultados.

Una vez realizadas las simulaciones, se han extraído y filtrado los datos del software, teniendo así las velocidades de los nodos solicitados en las direcciones Z e Y. Además, se han extraído gráficos referentes a la presión distribuida en el plano y la presión para elementos del plano en específico en diferentes instantes de tiempo.

Se mostrarán en este apartado una porción de las gráficas obtenidas de las cuales se puede extraer resultados y una discusión asociada, el resto de los gráficos han sido adjuntados en el Anexo C.

A continuación, las Figuras 48 y 49 muestran las ondas de EA asociadas a la velocidad en Z medida en los nodos más cercanos a los extremos del plano de la Simulación 1 (menor velocidad). Estas han pasado previamente por un filtro de paso alto (Anexo A), resultando así una señal filtrada de ondas con una frecuencia mayor a 100 kHz.

Se mostrará primero el nodo ubicado en la dirección contraria del movimiento y después el nodo más cercano a la trayectoria del cilindro, es decir, a medida que pasa el tiempo el cilindro se está alejando del nodo representado en la Figura 48 y se está acercando al nodo representado en la Figura 49.

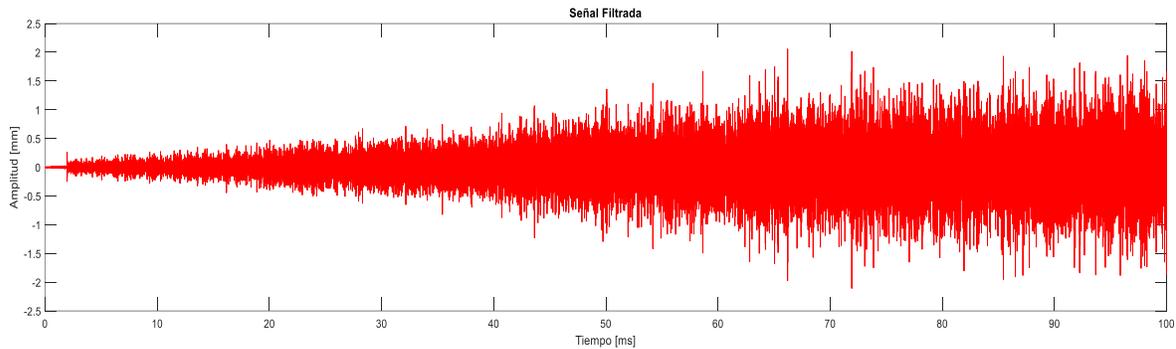


Figura 48: Velocidad en Z, nodo 2163 (lejano a movimiento), Simulación 1.

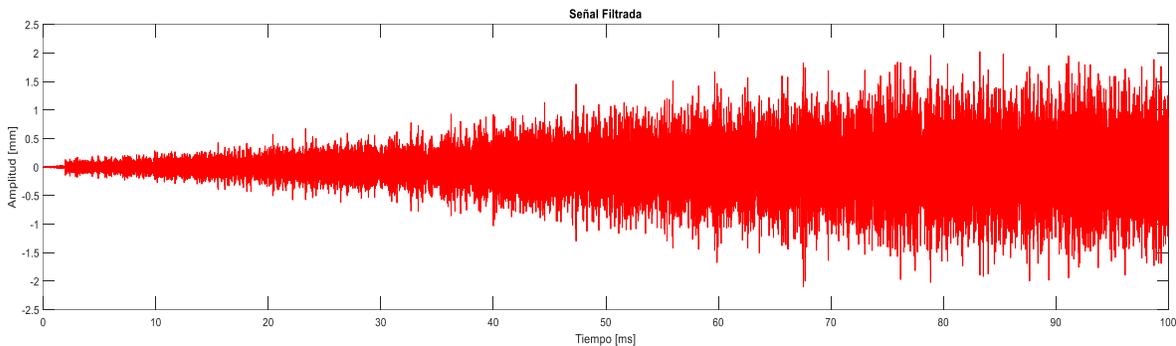


Figura 49: Velocidad en Z, nodo 6304 (cercano a movimiento), Simulación 1.

Como se puede apreciar en las Figuras 48 y 49, se ha logrado obtener ondas de EA generadas por fricción deslizante y se puede observar que la forma de onda de la EA es prácticamente igual para ambos casos.

En primera instancia se puede observar que la amplitud de la onda de EA crece a medida que pasa el tiempo, independiente si el cilindro se acerca o se aleja del nodo. Este fenómeno puede ser propiciado por el movimiento de deslizamiento del cilindro, ya que esencialmente este representa una carga moviéndose sobre un plano resistente, es decir, una carga dinámica actuando a lo largo de la simulación, lo que causa oscilaciones en el plano, las cuales se van acumulando y producen un aumento en la amplitud de las ondas de EA, independiente de la posición en la que esté ubicada el sensor.

También es importante tener en cuenta que el plano diseñado para esta simulación es de solo 20 centímetros de largo y que la velocidad mínima de propagación de la onda es $C_T = 3.121,95 \left[\frac{m}{s} \right]$, la cual fue calculada anteriormente en (14), por lo que es bastante difícil encontrar diferencias significativas en cuanto a la posición relativa de los sensores y la amplitud asociada a la onda de EA.

Otro punto para tener en consideración es que las simulaciones son realizadas en un ambiente más bien ideal, donde no se ha configurado la disipación de energía por parte del sistema, teniendo esto en

cuenta sería interesante hacer pruebas añadiéndole amortiguamiento a la simulación, ya que podría ser una posible solución al problema de cargas dinámicas.

Como se menciona anteriormente, a primera vista no se encuentran diferencias significativas en las gráficas, por lo que se ha programado el cálculo del valor RMS en el código Matlab del filtro de paso alto (Anexo A), los valores son mostrados a continuación en la Tabla 10.

Tabla 10: Valor RMS de onda EA de nodos 2163 y 6304, simulación 1.

Posición relativa	Nodo	Componente	Valor RMS
Lejos del movimiento	2163	Velocidad en Z	0.3951
Cerca del movimiento	6304	Velocidad en Z	0.4201

Teniendo esto en cuenta, se puede apreciar que el valor RMS de la señal del nodo 2163, correspondiente al nodo contrario al movimiento y más alejado del cilindro, posee menor magnitud que el nodo situado en la trayectoria, sin embargo, la diferencia entre ellos es de un orden muy pequeño, lo que no permite establecer diferencias concluyentes.

Además de la propagación de las ondas y de las diferencias de amplitud debido a la posición relativa de los sensores, es también interesante analizar cómo varían las amplitudes de las ondas de EA a medida que aumenta la velocidad de deslizamiento.

Teniendo en cuenta lo anterior, se mostrará a continuación, en las Figuras 50, 51 y 52 las ondas de EA relacionadas a la velocidad en Z, medidas en el nodo central de cada una de las simulaciones.

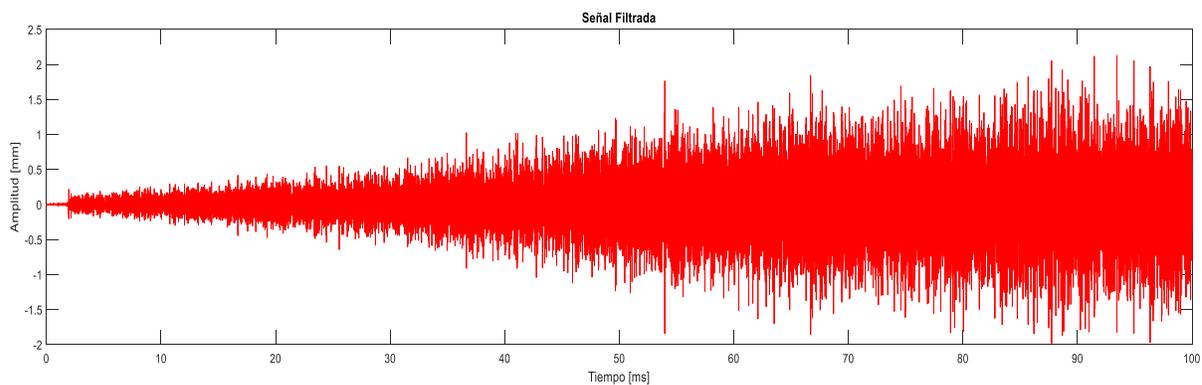


Figura 50: Velocidad en Z, nodo 3880, Simulación 1, velocidad; $0.54 \left[\frac{mm}{ms} \right]$.

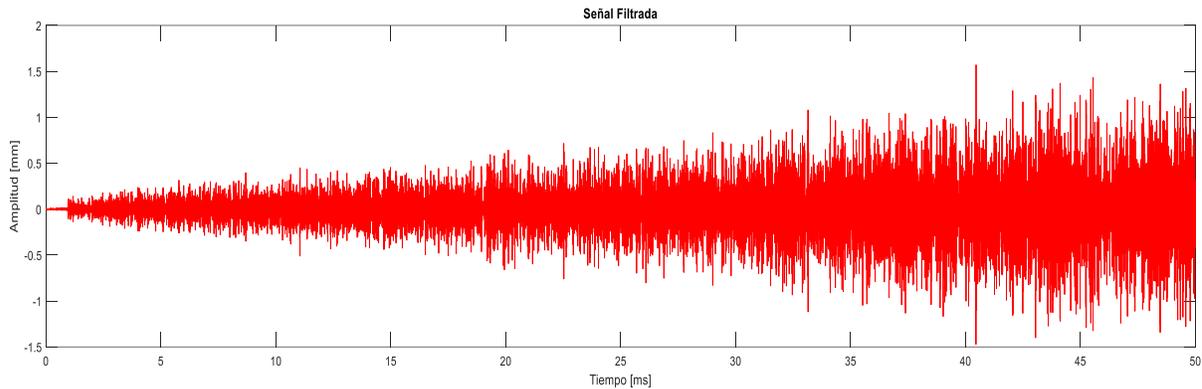


Figura 51: Velocidad en Z, nodo 3880, Simulación 2, velocidad; $1.08 \frac{mm}{ms}$..

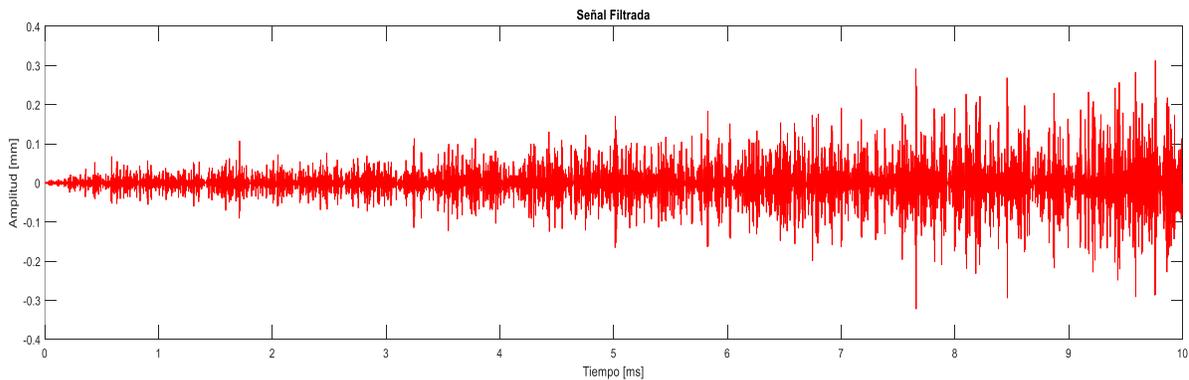


Figura 52: Velocidad en Z, nodo 3880, Simulación 3, velocidad; $5.4 \frac{mm}{ms}$..

En cuanto a lo mostrado en las Figuras 50, 51 y 52 se puede apreciar una disminución significativa en la amplitud de las ondas de EA a medida que aumenta la velocidad de deslizamiento, lo que contradice en cierta medida a la teoría presente en la literatura [14], ya que al aumentar la velocidad de deslizamiento aumenta la cantidad de asperezas y con esto la energía de la señal, por ende, debería aumentar la amplitud de las ondas, fenómeno que puede ser ocasionado por varios factores.

En primera instancia, como se mencionó anteriormente, hay un aumento en la amplitud de las ondas de EA a medida que pasa el tiempo en la simulación debido principalmente a las cargas dinámicas generadas por el propio peso de cilindro interactuando con un plano resistente. Teniendo en cuenta que el cilindro recorre la misma distancia en cada una de las simulaciones, se podría decir que en todas ellas el elemento cilíndrico interactúa con el mismo número de asperezas en la superficie, por lo cual, en ese sentido se debería mantener constante la generación de ondas de EA.

A su vez, el hecho de aumentar la velocidad de deslizamiento del cilindro en las diferentes simulaciones provocará que la componente de la velocidad del cilindro en Y sea cada vez mayor. De esta manera, al analizar las velocidades en Y del cilindro en las simulaciones 2 y 3 respecto a la primera, se genera una disminución en el ángulo entre la velocidad resultante del cilindro y la

superficie, lo que desencadena en una resultante cada vez más similar a la componente Y de la velocidad. Por lo antes mencionado, al disminuir el ángulo de la velocidad resultante respecto al plano, disminuiría el efecto generado por las cargas dinámicas asociadas a la masa.

Otro aspecto interesante de mencionar es la manera en que está definido el coeficiente de roce en el software [13], el cual se rige por la siguiente ecuación.

$$\mu_c = FD + (FS - FD)e^{-DC|v_{rel}|} \quad (19)$$

Siendo μ_c el coeficiente de roce, FD y FS los coeficientes de roce dinámico y estático, DC el coeficiente de decaimiento exponencial y v_{rel} la velocidad relativa de una superficie respecto a otra.

Del análisis de (19) se puede extraer que el coeficiente de fricción presente en la interacción entre ambas superficies depende de la velocidad de deslizamiento del cilindro respecto del plano. De esta manera, si se tiene un aumento en la velocidad relativa del sistema el segundo término de la ecuación disminuirá su valor y, por ende, disminuye el valor del coeficiente de fricción, lo que desencadena en una menor fuerza de roce total en la interacción.

Al mismo tiempo el problema puede ser originado por una elección equivocada de la condición de contacto, tema bastante complicado de abordar ya que el software posee más de 100 condiciones de contacto diferentes las cuales no se estudian con mucho detalle en el manual. También es importante mencionar que LS – DYNA ofrece opciones bastante sofisticadas para definir una superficie y las debidas condiciones de contacto y características de interacción entre cuerpos.

CAPÍTULO 6: Conclusión y Trabajo Futuro.

6.1 Conclusión.

Para llevar a cabo este proyecto es imprescindible tener un manejo fluido de ANSYS LS – DYNA, un software complejo, el cual cuenta con el potencial para simular casi cualquier escenario, por lo que usar LS - DYNA de buena manera resulta complicado al no tener información y ejemplos contundentes en la literatura. Al mismo tiempo, sus múltiples configuraciones e interfaz conllevan tiempos de aprendizaje y adaptación mucho más altos de lo común. Es por esto, que se generó el capítulo de instructivo de uso y configuración del software, lo que constituye un gran aporte, ya que disminuirá el tiempo de familiarización y aprendizaje de cualquier futuro investigador, un resultado casi tan importante como los obtenidos de las simulaciones.

A su vez, se han obtenido ondas de emisiones acústicas para el caso de impacto de una esfera sobre un plano, simulación que ha otorgado resultados coherentes, teniendo una onda transiente generada por el impacto, la cual disminuye su amplitud a medida que pasa el tiempo. En cuanto a la frecuencia de estas ondas, fluctúa entre 30 y 50 kHz, lo que se debe al bajo número de elementos en los cuales se dividió el plano, es decir un mallado poco refinado. A pesar de esto, se mantiene la buena recepción de los resultados ya que se sabía con anterioridad que este problema de frecuencias surgiría.

De la mano con lo aprendido en la simulación de entrenamiento, se llevó a cabo la simulación del caso deslizante, donde se pudo configurar exitosamente variadas funciones tales como la instalación de sensores, asignación de elementos de masa, la relajación dinámica etc. Además, se diseñó un mallado para el plano, el cual cumple con todas las solicitudes del problema, lo que se vio reflejado en la frecuencia de las ondas obtenidas (Anexo D).

Todas las herramientas mencionadas anteriormente, pudieron ser utilizadas en la simulación del caso deslizante donde se logró configurar un equilibrio implícito, aplicando cargas al sistema, y alcanzando un estado de pre – carga óptima para llevar a cabo la simulación del caso deslizante.

En relación con el objetivo principal de la investigación, se considera que, si bien este no se logró a la perfección, debido a que algunos de los fenómenos observados no coinciden con la teoría presente en la literatura, se han identificado y analizado los problemas existentes y se han propuesto diferentes soluciones, lo que representa un logro y un aporte significativo para futuras simulaciones mediante ANSYS LS – DYNA.

6.2 Trabajo futuro.

Para futuras simulaciones mediante LS – DYNA, se debe ser cauteloso en cuanto a las unidades de medida y su consistencia, ya que los errores asociados no serán advertidos por el software. Además, se recomienda siempre usar modelos prototipo con una menor cantidad de nodos que el modelo original, esto permitirá disminuir significativamente los tiempos de simulación lo que permitirá al usuario calibrar funciones y variables mediante el método de ensayo – error, en un tiempo reducido en comparación con un modelo más completo.

En relación con el caso del cilindro deslizante, se recomienda investigar en cuanto al contacto de un cuerpo sólido con uno de cascarón, cuando el primero está sometido a gravedad, esto podría llevar a solucionar el problema y así poder considerar un cilindro sólido en la simulación, el cual representaría de mejor manera la carga distribuida en el área de contacto.

Otro problema que debe ser solucionado, es el asociado al aumento de la amplitud de las ondas EA a medida que aumenta la velocidad de deslizamiento, como se mencionó anteriormente, esto puede ser causado por las cargas dinámicas generadas por la masa del cilindro, combinado con la manera en la que está definido el coeficiente de roce en el software y la dirección de la velocidad resultante.

Finalmente, una vez se hayan aplicado todas las modificaciones mencionadas anteriormente, se debe diseñar una simulación en la cual ambos elementos; plano y cilindro sean sólidos, probando los diferentes tipos de materiales (LS – DYNA) que los constituyen, todo esto con el fin de representar la interacción deseada lo más parecida posible al caso real.

Referencias Bibliográficas.

- [1] Emisiones Acústicas y su aplicación al mantenimiento predictivo, Diplomatura de máquinas navales, Universidad Politécnica de Cataluña, 2014.
- [2] R.J. Boness, S.L. McBride, Adhesive and abrasive wear studies using acoustic emission techniques, *Wear* 149 (1991) 41–53.
- [3] S. Lingard, C.W. Yu, C.F. Yau, Sliding wear studies using acoustic emission, *Wear* 162–164 (1993) 597–604.
- [4] J. Hanchi, B.E. Klamecki, Acoustic emission monitoring of the wear process, *Wear* 145 (1991) 1–27.
- [5] F. Leaman Weiffenbach, Contributions to the Diagnosis and Prognosis of Ring Gear Faults of Planetary Gearboxes Using Acoustic Emissions (2020).
- [6] M. Fuentealba, Lineamientos para la modelación de Emisiones Acústicas generadas por Fricción Rodante, Universidad de Concepción (2022).
- [7] J. Sun, R.J.K. Wood, L. Wang, I. Care, H.E.G. Powrie, Wear monitoring of bearing steel using electrostatic and acoustic emission techniques, *Wear* 259 (2005) 1482–1489.
- [8] Z. Jianchao, H. Rujiang, W. Zhe, J. Green, L. Shaohua, Signal Simulation and Experimental Research on Acoustic Emission using LS-DYNA, *Wear* 8 (2015) 151-158.
- [9] Rozamiento por Deslizamiento, Universidad del País Vasco, España.
- [10] J. Borja, Dibujo Técnico: Engranajes Cilíndricos Rectos, SENA, Bogotá.
- [11] O. E. Piro, Resistencia a la Rodadura, Universidad Nacional de la Plata, Argentina.

[12] E. Martinez, A. Gallego, La Emisión Acústica como Método END. Definición, ventajas y limitaciones, Universidad Politécnica de Catalunya

[13] LS – DYNA, Keyword User’s Manual, Volume I, Livermore Software Technology.

[14] Y. Fan, F. Gu, A. Ball, Modelling acoustic emissions generated by sliding friction, Wear (2010) 811-815.

Anexos.

Anexo A: Código Matlab de filtro de paso alto y cálculo de valor RMS para cada simulación.

```
% Especifica la ruta del archivo CSV
archivo_csv = 'C:\Users\mfuen\OneDrive\Escritorio\Excel Ultimo\Vel_z_cerca_3.csv'; % Cambia
esto a la ruta de tu archivo CSV

% Lee los datos desde el archivo CSV
datos = csvread(archivo_csv);

% Dividir los datos en valores de x y y
x = datos(:, 1); % Columna de valores x (tiempo)
y = datos(:, 2); % Columna de valores y (amplitud)

% Parámetros del filtro
orden = 4;
frecuencia_minima = 100000;
frecuencia_muestreo = 1 / (0.0033 * 1e-3);
frecuencia_nyquist = frecuencia_muestreo / 2;
frecuencia_corte_nyquist = frecuencia_minima / frecuencia_nyquist;

% Diseñar el filtro paso alto
[b, a] = butter(orden, frecuencia_corte_nyquist, 'high');

% Filtrar los datos en la dimensión y
y_filtrados = filtfilt(b, a, y);

% Visualizar los resultados
figure;
subplot(2,1,1);
plot(x, y, 'b');
title('Señal Original');
xlabel('Tiempo (x)');
```

```

ylabel('Amplitud (y)');
subplot(2,1,2);
plot(x, y_filtrados, 'r');
title('Señal Filtrada');
xlabel('Tiempo (x)');
ylabel('Amplitud Filtrada (y)');
% Calcula el valor RMS de la señal filtrada
valor_rms = sqrt(mean(y_filtrados.^2));
fprintf('Valor RMS de la señal filtrada: %.4f\n', valor_rms);

```

Anexo B: Gráficas de simulación de prueba para relajación dinámica presión y esfuerzo de Von Mises, para diferentes instantes de tiempo.

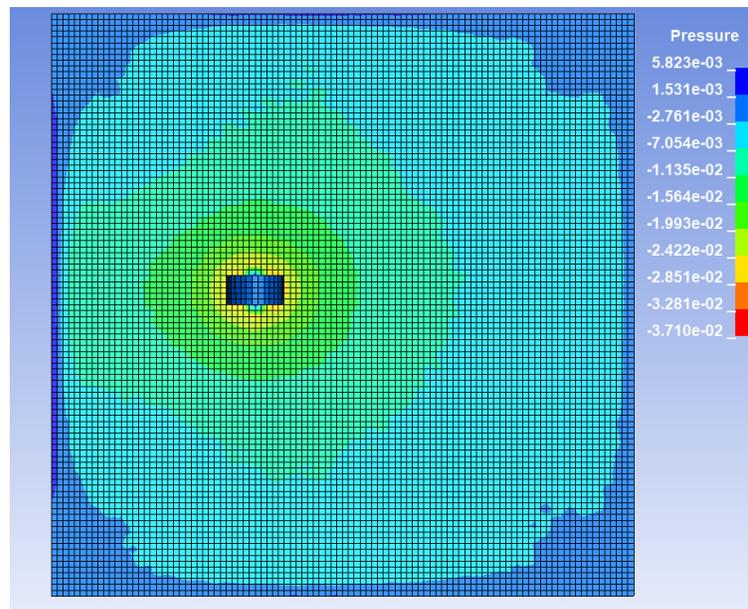


Figura B.1: Presión distribuida en simulación relajación dinámica $t= 50.5$ [ms].

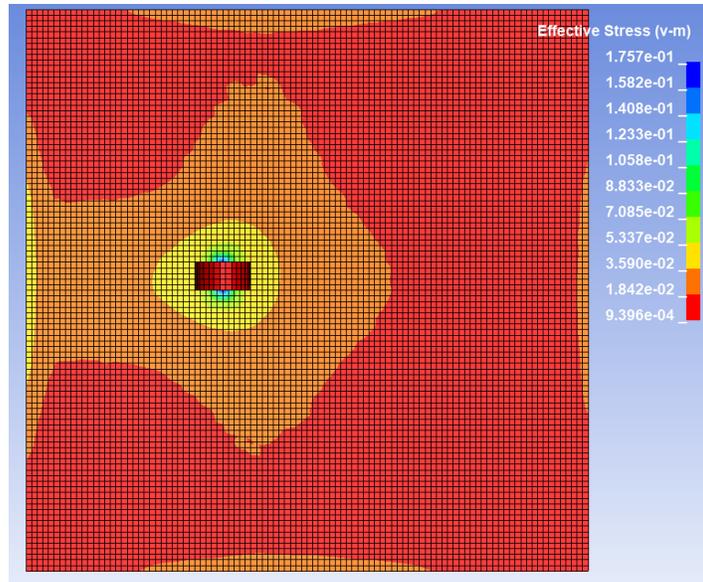


Figura B.2: Esfuerzo de Von Mises distribuido en simulación relajación dinámica $t= 50.5$ [ms].

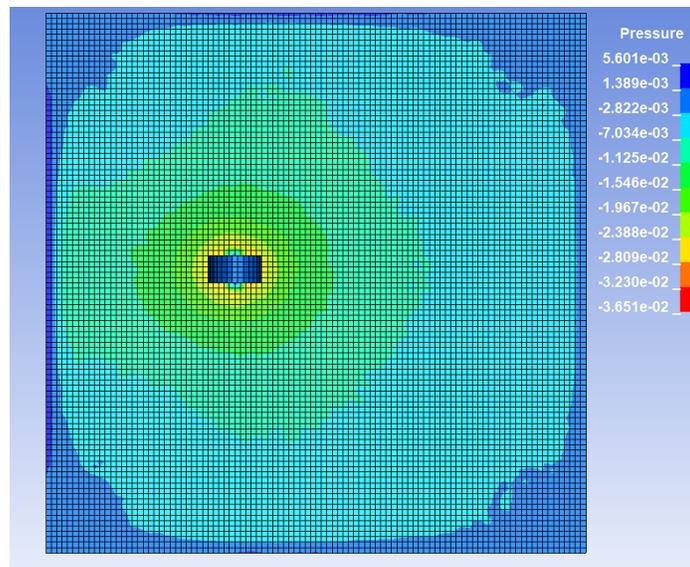


Figura B.3: Presión distribuida en simulación relajación dinámica $t= 90.9$ [ms].

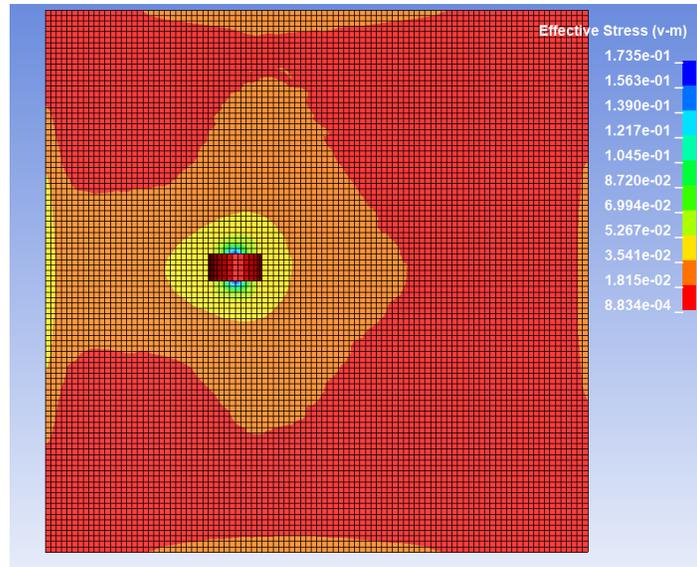


Figura B.4: Esfuerzo de Von Mises distribuido en simulación relajación dinámica $t= 90.9$ [ms].

Anexo C: Gráficos de velocidades en Z e Y para los diferentes sensores, y distribución de presión durante movimiento deslizante; Para simulaciones 1, 2 y 3.

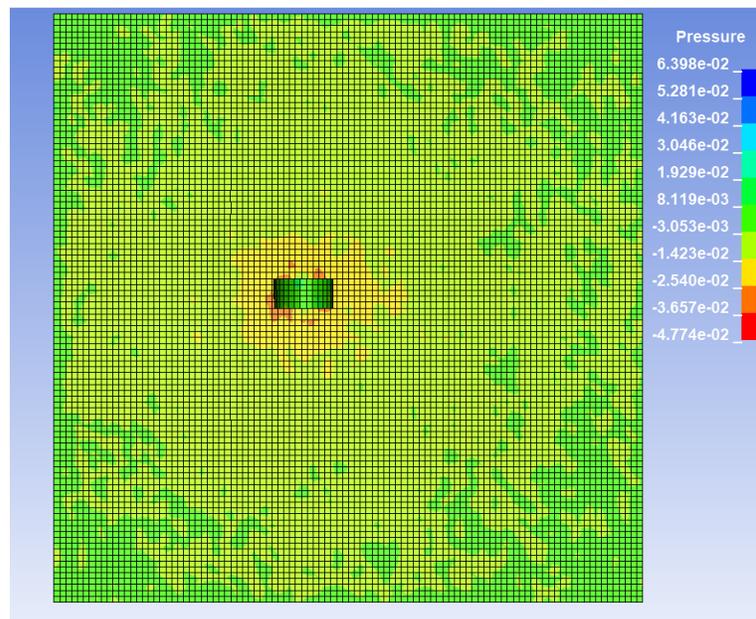


Figura C.1: Presión distribuida en simulación de velocidad 1, $t= 30.3$ [ms].

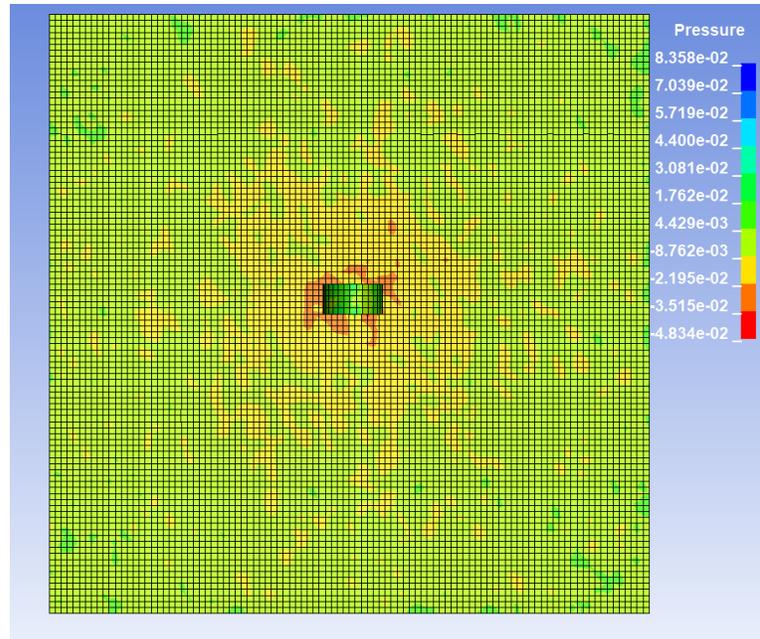


Figura C.2: Presión distribuida en simulación de velocidad 2, $t = 30.3$ [ms].

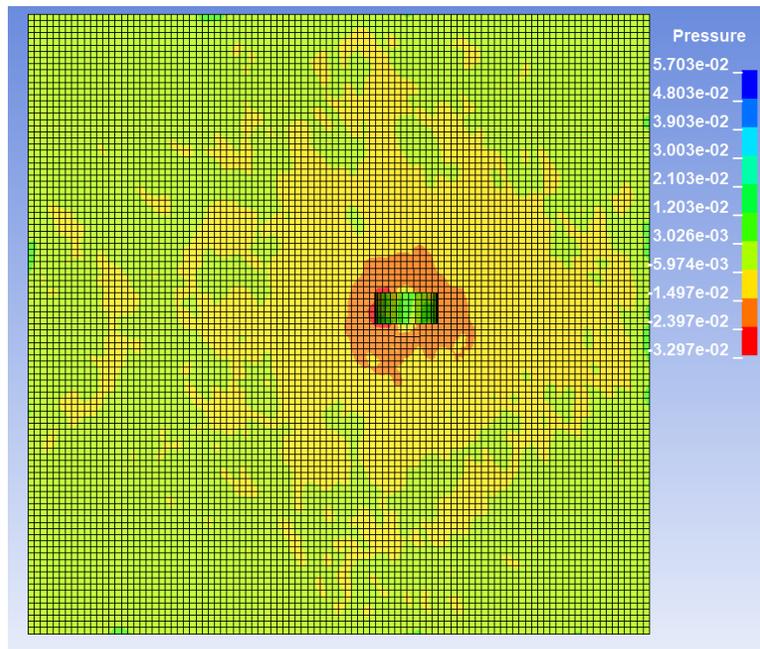


Figura C.3: Presión distribuida en simulación de velocidad 3, $t = 9.6$ [ms].

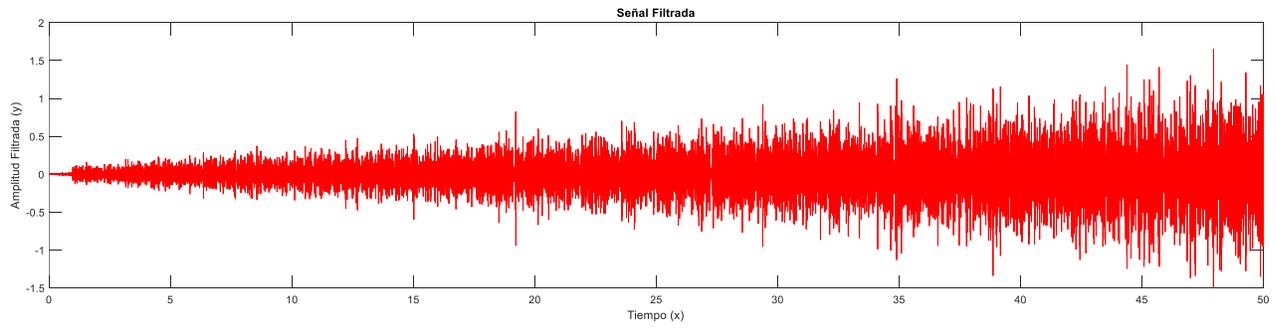


Figura C.4: Velocidad en Z simulación 2, nodo 2163.

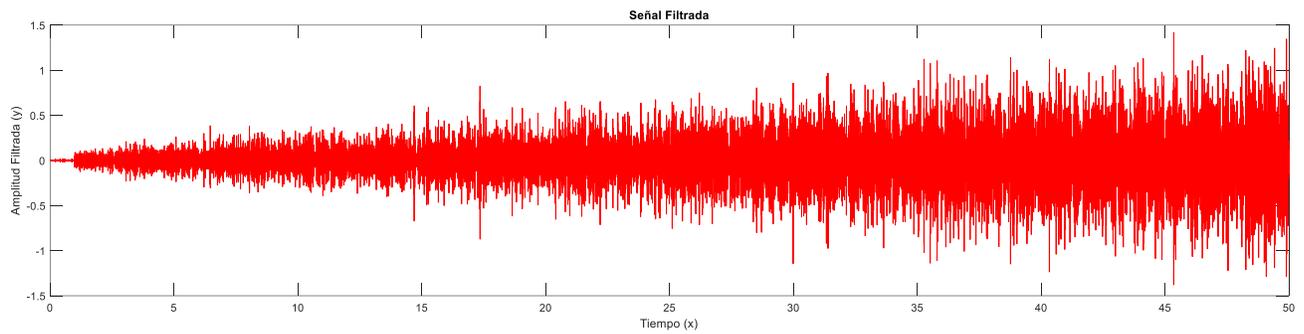


Figura C.5: Velocidad en Z simulación 2, nodo 6304.

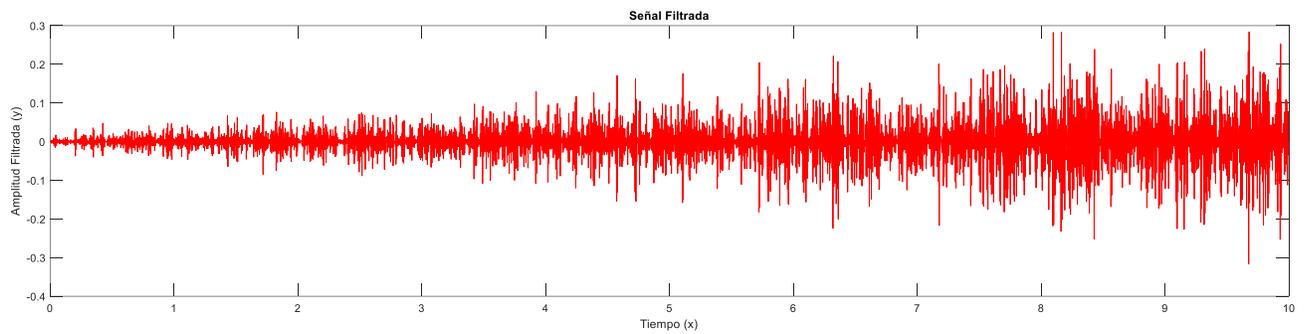


Figura C.6: Velocidad en Z simulación 3, nodo 2163.

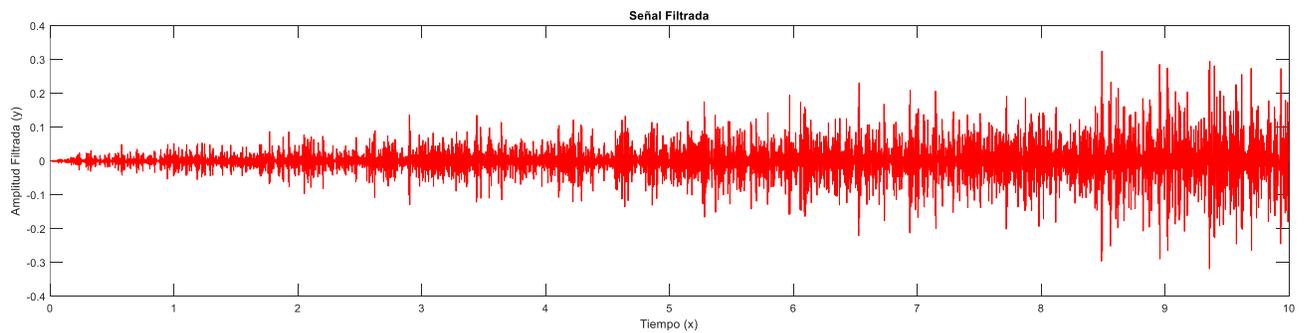


Figura C.7: Velocidad en Z simulación 3, nodo 6304.

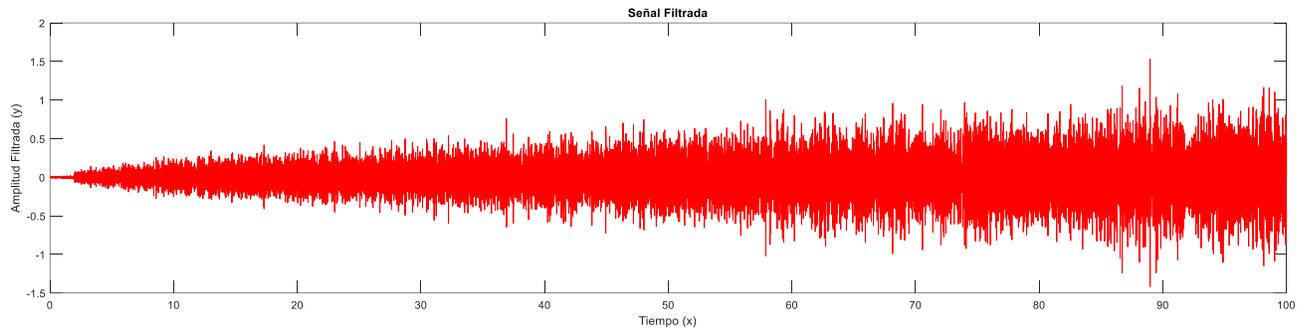


Figura C.8: Velocidad en Y simulación 1, nodo 2163.

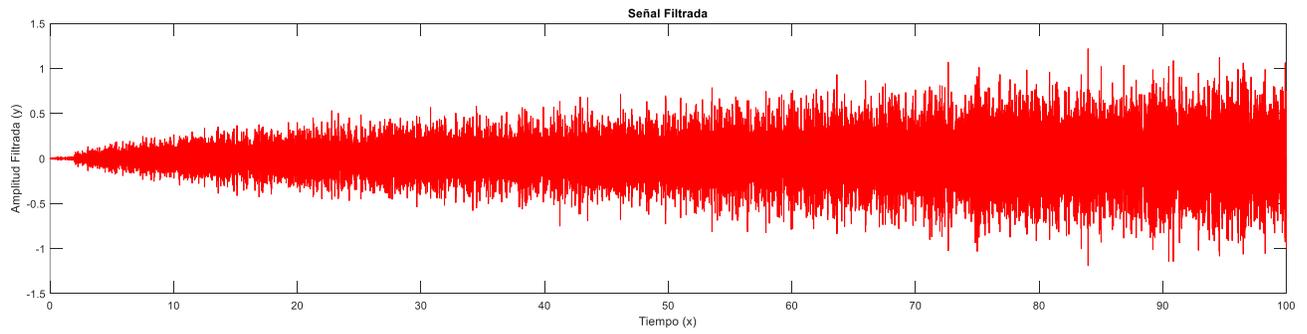


Figura C.9: Velocidad en Y simulación 1, nodo 6304.

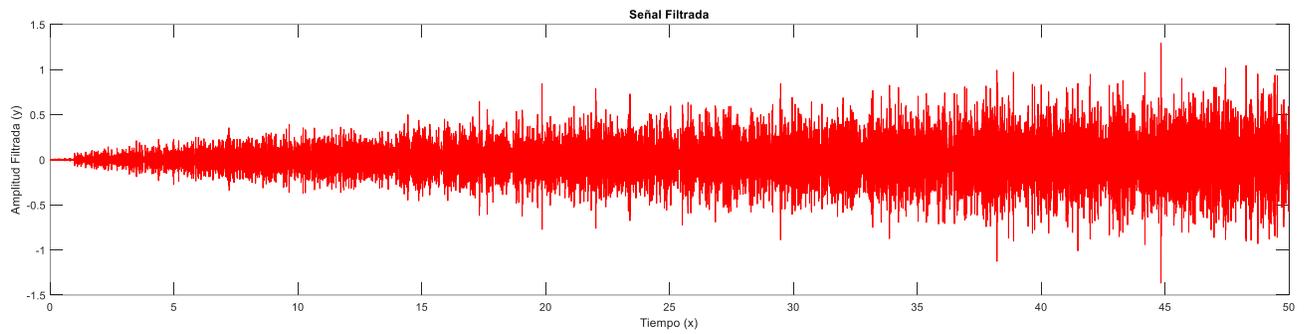


Figura C.10: Velocidad en Y simulación 2, nodo 2163.

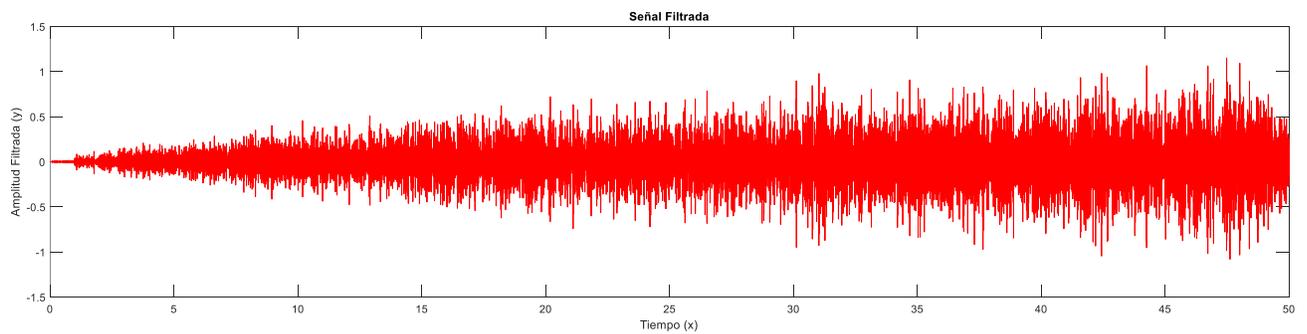


Figura C.11: Velocidad en Y simulación 2, nodo 6304.

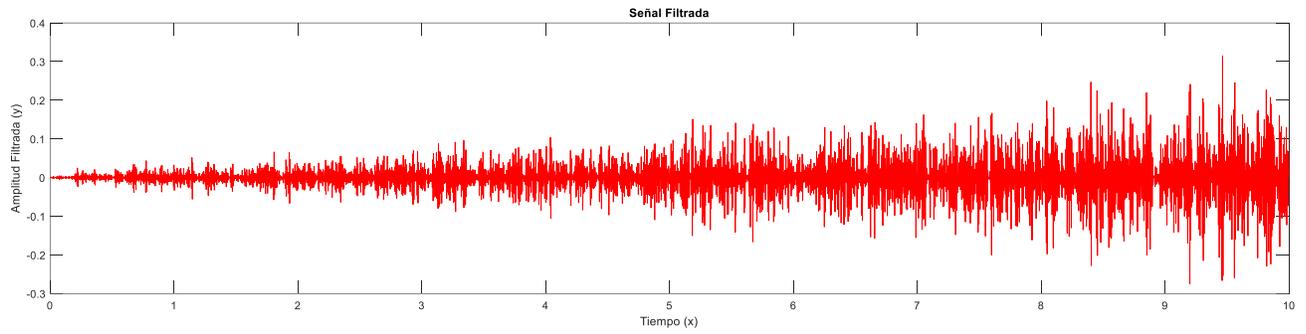


Figura C.12: Velocidad en Y simulación 3, nodo 2163.

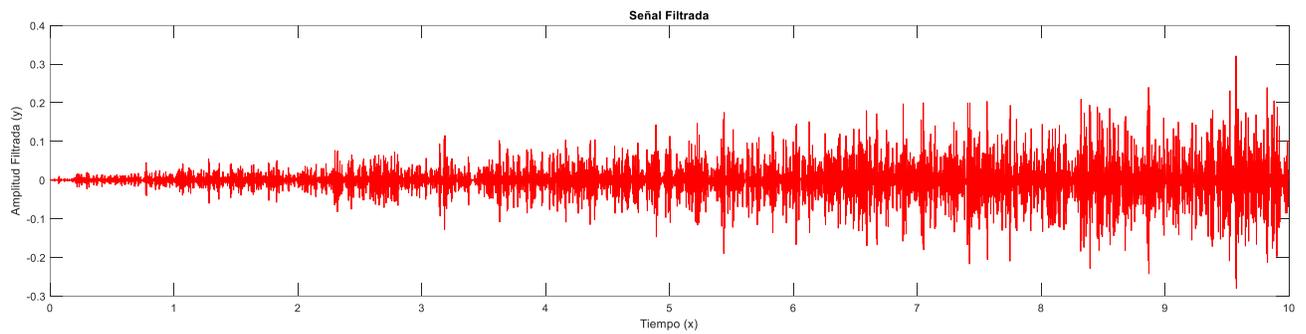


Figura C.13: Velocidad en Y simulación 3, nodo 6304.

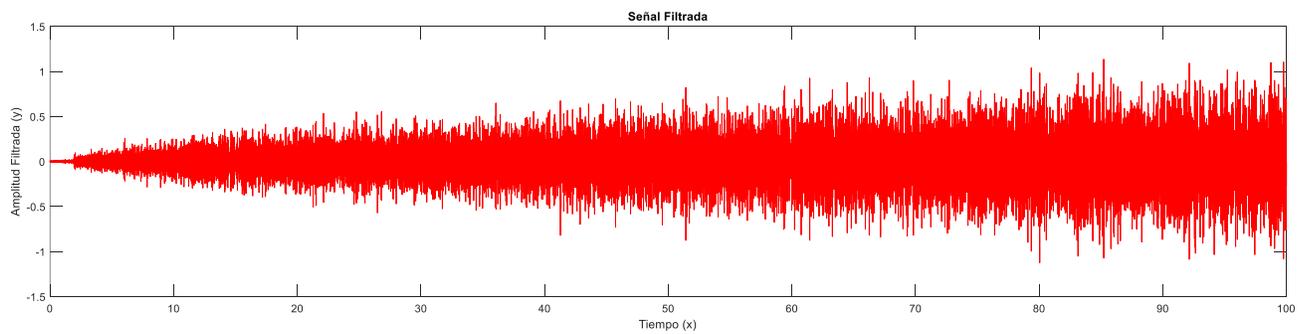


Figura C.14: Velocidad en Y simulación 1, nodo 3880.

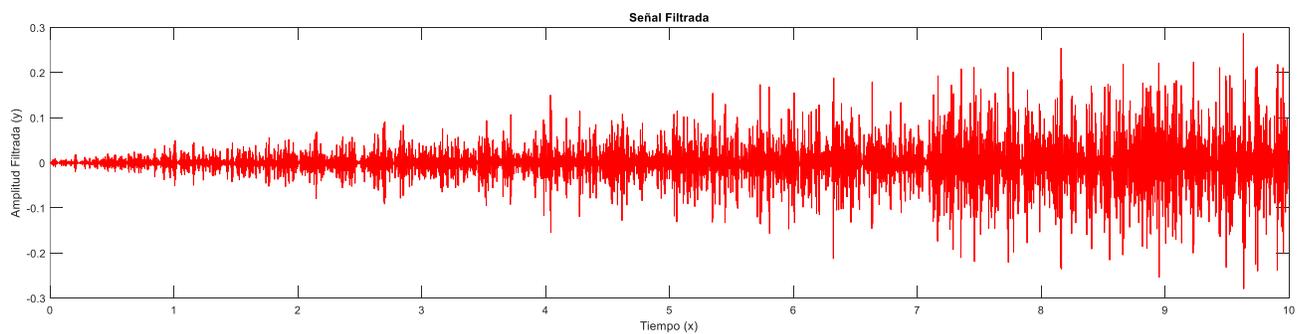


Figura C.15: Velocidad en Y simulación 3, nodo 3880.

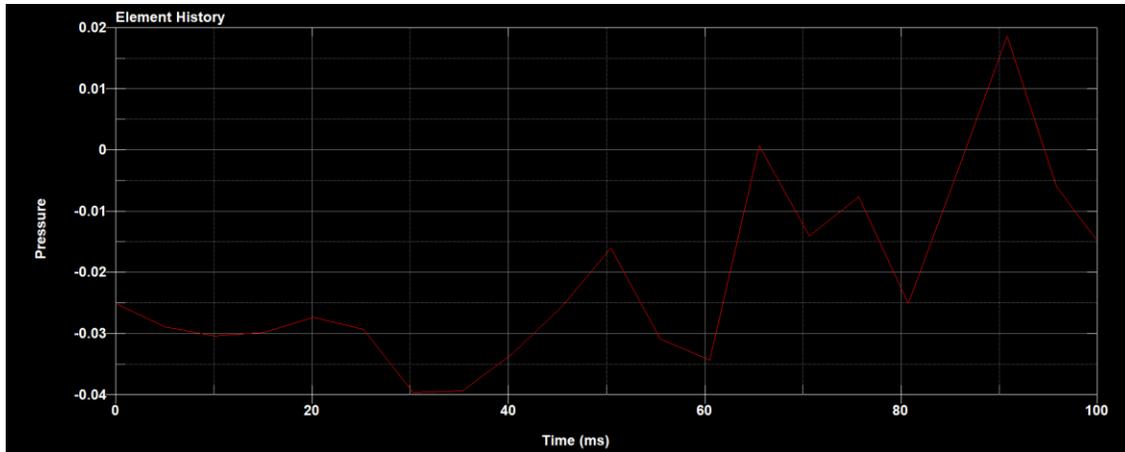


Figura C.16: Distribución de presión en elemento del plano próximo al movimiento.
Simulación 1, velocidad; $0.54 \frac{mm}{ms}$.

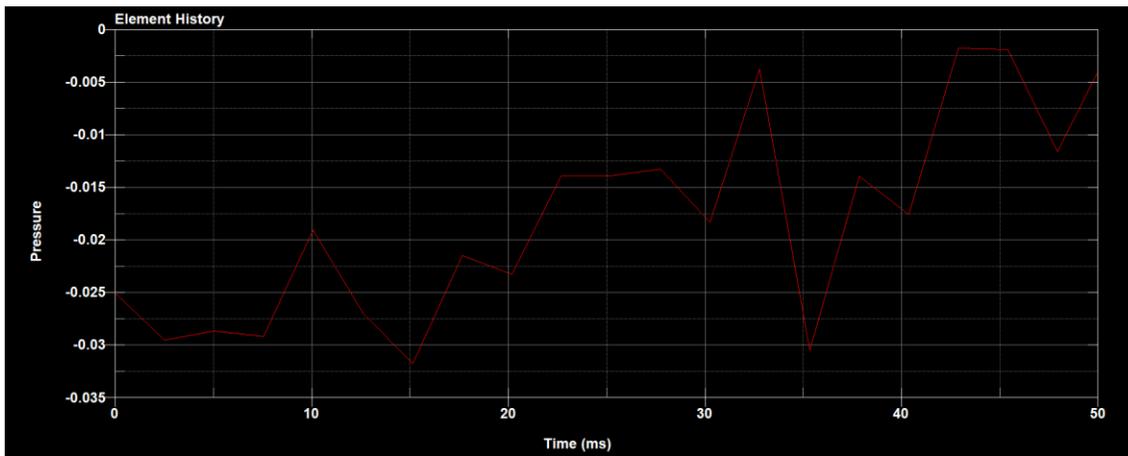


Figura C.17: Distribución de presión en elemento del plano próximo al movimiento.
Simulación 2, velocidad; $1.08 \frac{mm}{ms}$.

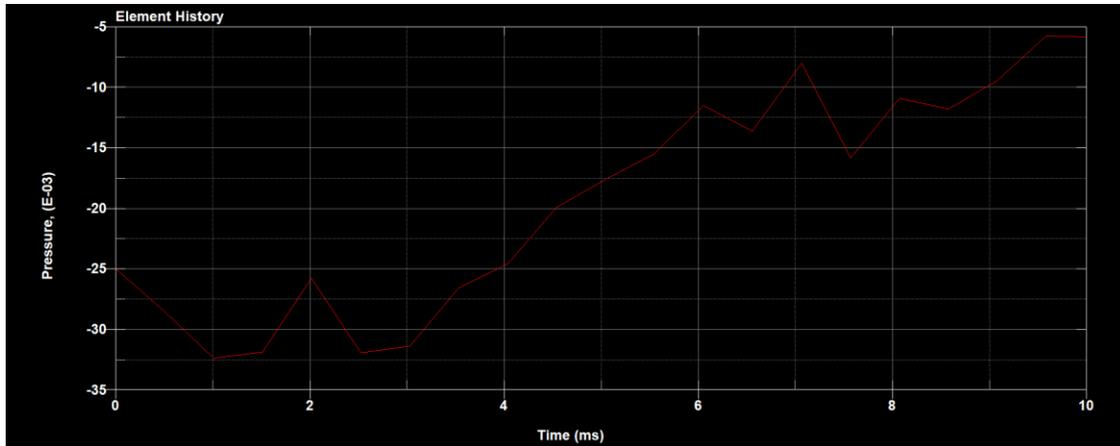


Figura C.18: Distribución de presión en elemento del plano próximo al movimiento.
 Simulación 3, velocidad; $5.4 \frac{mm}{ms}$.

Anexo D: Gráficas de espectro de frecuencia correspondientes a las velocidades en Z del nodo 3880, el cual corresponde al nodo más cercano al movimiento.

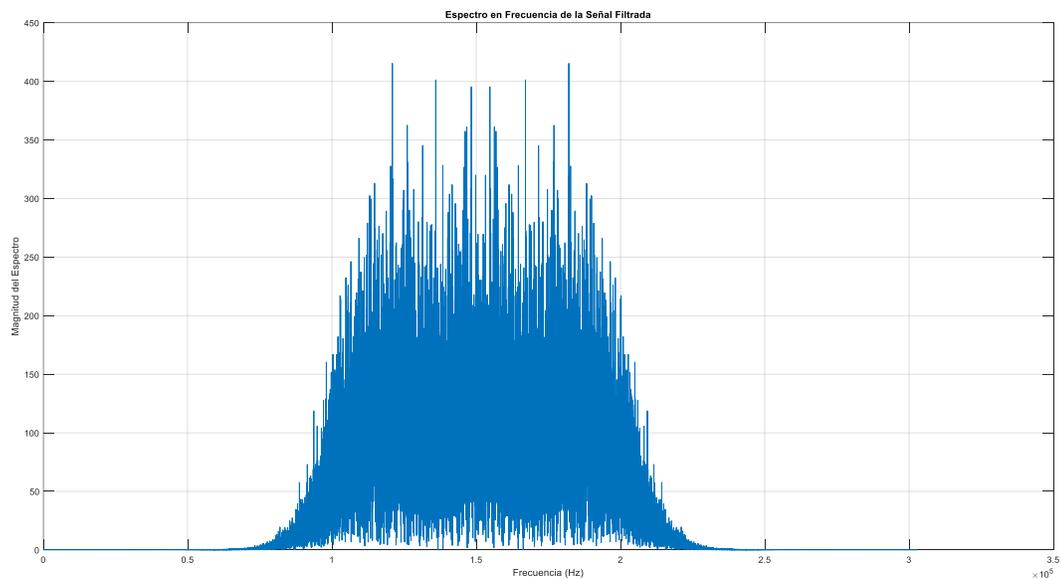


Figura D.1: Espectro de frecuencia de velocidad en Z de nodo 3880, simulación 1, velocidad; $0.54 \frac{mm}{ms}$.

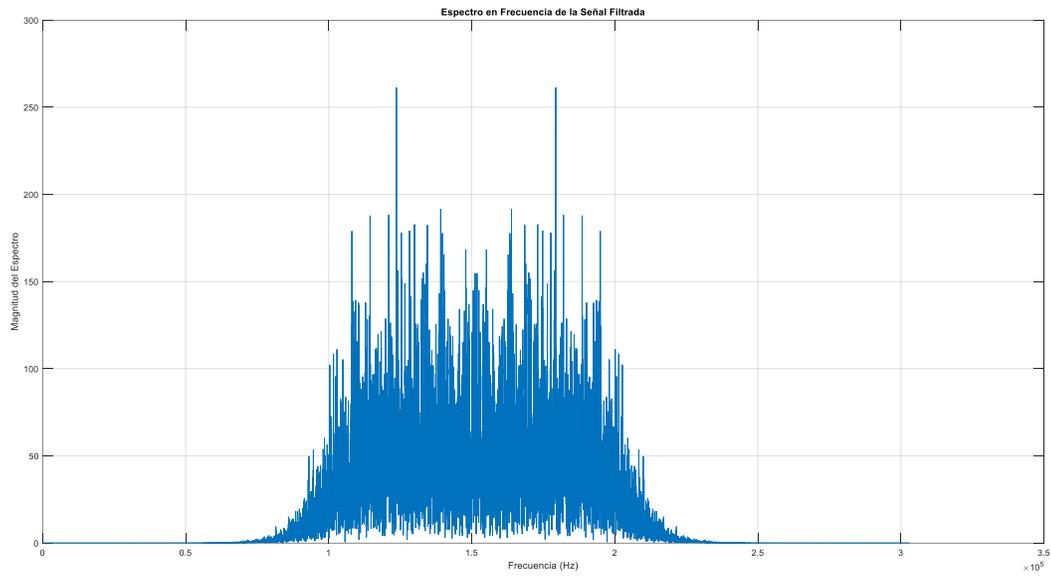


Figura D.2: Espectro de frecuencia de velocidad en Z de nodo 3880, simulación 2, velocidad; $1.08 \left[\frac{mm}{ms} \right]$.

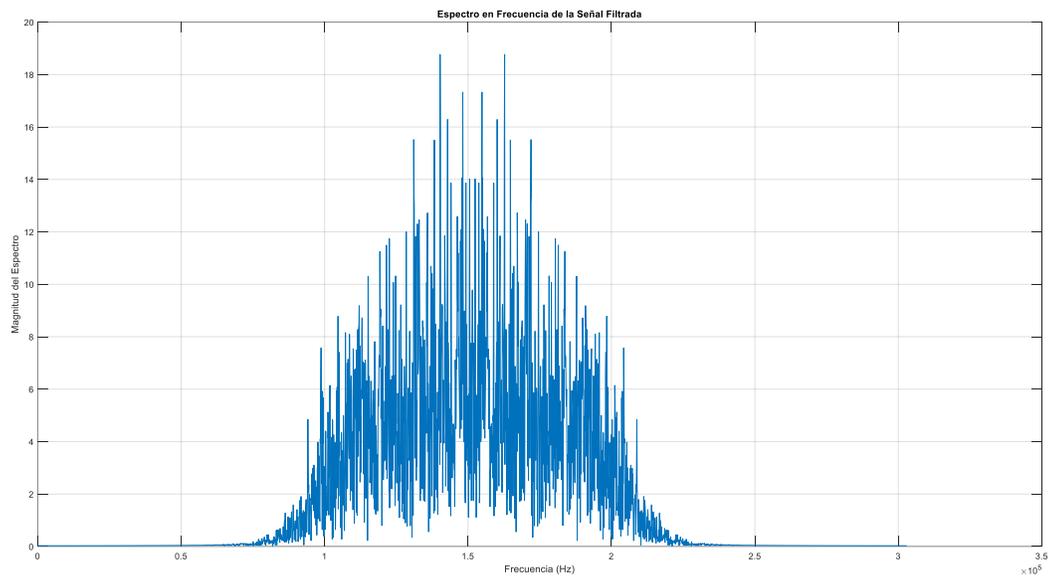


Figura D.3: Espectro de frecuencia de velocidad en Z de nodo 3880, simulación 3, velocidad; $5.4 \left[\frac{mm}{ms} \right]$.