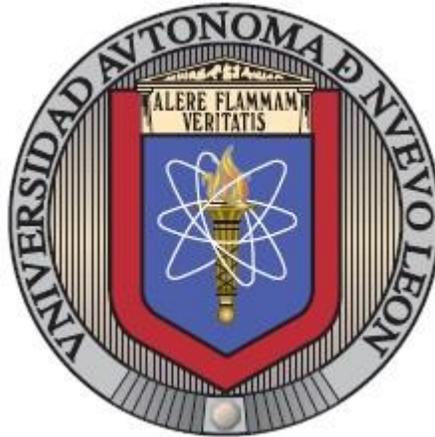


UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA

SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



TESIS:

**REDUCCIÓN DE RUIDO MEDIANTE SELLOS ELASTÓMEROS PARA
PUERTAS DE VEHÍCULOS DE TRABAJO PESADO BAJO DIFERENTES
CONDICIONES DE DISEÑO.**

POR:

IRAM JOSUÉ VEGA RENTERÍA

**EN OPCIÓN PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRÍA EN CIENCIAS DE
LA INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN

05/2021

Universidad Autónoma de Nuevo León
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Subdirección de Estudios de Posgrado

Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la Tesis “Reducción de ruido mediante sellos elastómeros para puertas de vehículos de trabajo pesado bajo diferentes condiciones de diseño.”, realizada por el alumno Iram Josué Vega Rentería, con número de matrícula 2032323, sea aceptada para su defensa como requisito para obtener el grado de Maestría en Ciencias de la Ingeniería Automotriz.

El Comité de Tesis



Dr. Diego Francisco Ledezma Ramírez
Director



Dr. Oscar Jesús Zapata Hernández
Co-Director



Dra. Tania Paloma Berber Solano
Revisor



M.C. Javier Schulze Rojas
Revisor

Vo. Bo.



Dr. Simón Martínez Martínez
Subdirector de Estudios de Posgrado

157

San Nicolás de los Garza, Nuevo León, Julio de 2021

Agradecimientos.

Agradezco a Dios por permitirme cumplir una meta mas y darme esa energía y fortaleza para poder hacerlo.

A mis papas y hermana Luis Vega, Esperanza Renteria y Cinthia Vega que siempre han confiado en mí y me han dado los valores suficientes para poder seguir mi camino.

A mis amigos que han sido fundamentales para alcanzar estas metas.

Al Conacyt por el apoyo financiero para que el proyecto pudiese llevarse a cabo y para continuar en los estudios. Al igual a las empresas Caterpillar y Driven por sus apoyos de infraestructura, equipo e instalaciones.

A mis asesores Dr. Diego Ledezma, Dr. Oscar Zapata, MC. Javier Schulze por la experiencia y el alto aprendizaje obtenido de ellos.

A la Universidad Autónoma de Nuevo León y al programa de Maestría en Ciencias de la Ingeniería Automotriz, que me ayudaron y dieron el acceso a este tipo de proyectos con la industria.

Índice.

| | |
|--|----|
| Índice..... | |
| 1 Capítulo 1. Introducción..... | 1 |
| 1.1 Antecedentes..... | 1 |
| 1.1 Planteamiento del problema..... | 4 |
| 1.2 Justificación..... | 5 |
| 1.3 Objetivos..... | 5 |
| 1.4 Hipótesis..... | 6 |
| 1.5 Metodología..... | 6 |
| 1.6 Descripción de la tesis..... | 7 |
| 2 Capítulo 2: Fundamentos teóricos..... | 8 |
| 2.1 Introducción..... | 8 |
| 2.2 Ruido..... | 8 |
| 2.3 Pérdida de transmisión de ruido..... | 9 |
| 2.4 Reducción de ruido..... | 10 |
| 2.5 Fugas..... | 11 |
| 2.6 Sistemas de sellado..... | 14 |
| 2.6.1 Geometría..... | 14 |
| 2.6.2 Propiedades de geometría..... | 14 |
| 2.7 Compresión..... | 16 |
| 2.8 Pruebas experimentales..... | 18 |
| 2.8.1 Tubo de impedancia..... | 19 |
| 2.8.2 Cámara anecoica..... | 23 |
| 2.9 Pruebas mecánicas en sellos..... | 25 |

| | | |
|------|---|----|
| 2.10 | Conclusiones..... | 26 |
| 3 | Capítulo 3. Modelaje matemático y principios de simulación FEM..... | 27 |
| 3.1 | Introducción..... | 27 |
| 3.2 | Ecuación de la onda..... | 28 |
| 3.3 | Perdida de transmisión del ruido..... | 29 |
| 3.4 | Ecuaciones constitutivas para modelado de compresión de sello..... | 29 |
| 3.5 | Modelado propiedades hiperelásticas..... | 30 |
| 3.6 | Elemento finito..... | 31 |
| 3.7 | Historia..... | 32 |
| 3.8 | Hibrido FE-SEA..... | 33 |
| 3.9 | Comparación FEM..... | 34 |
| 3.10 | ACTRAN Software..... | 36 |
| 3.11 | Elementos acústicos..... | 37 |
| 3.12 | Conclusiones..... | 39 |
| 4 | Capítulo 4 Simulación computacional..... | 39 |
| 4.1 | Introducción..... | 39 |
| 4.2 | Simulación estática no lineal..... | 40 |
| 4.3 | Geometría..... | 40 |
| 4.4 | Mallado..... | 41 |
| 4.5 | Condiciones fronteras..... | 42 |
| 4.6 | Transición de resultados MARC-ACTRAN..... | 44 |
| 4.7 | Simulación acústica..... | 45 |
| 4.8 | Geometría..... | 45 |
| 4.9 | Mallado..... | 46 |
| 4.10 | Condiciones frontera..... | 48 |
| 4.11 | Conclusiones..... | 51 |

| | | |
|-----|--|----|
| 5 | Capítulo 5 Pruebas experimentales. | 52 |
| 5.1 | Introducción..... | 52 |
| 5.2 | Variables..... | 52 |
| 5.3 | Diseño de tubo de impedancia. | 55 |
| 5.4 | Parámetros..... | 56 |
| 5.5 | Manufactura de tubo de impedancia. | 58 |
| 5.6 | Materiales para la medición. | 60 |
| 5.7 | Prueba de tensión/compresión de sello..... | 61 |
| 5.8 | Conclusiones. | 63 |
| 6 | Capítulo 6 Resultados y discusión. | 64 |
| 6.1 | Introducción..... | 64 |
| 6.2 | Proceso experimental. | 64 |
| 6.3 | Proceso de correlación con FEM..... | 72 |
| 7 | Capítulo 7 Conclusiones generales y recomendaciones..... | 76 |
| 7.1 | Conclusiones de la tesis. | 76 |
| 7.2 | Conclusiones específicas..... | 76 |
| 7.3 | Recomendaciones para trabajo futuro. | 77 |
| 7.4 | Resumen Biográfico. | 77 |
| 8 | Referencias. | 78 |
| | Apéndice A | 81 |

Índice de Figuras

| | |
|--|----|
| <i>Figura 1.1 Cámara anecoica y reverberante para mediciones experimentales de TL [1].</i> | 1 |
| <i>Figura 1.2 Modelo de sello elastómero automotriz en Actran [1].</i> | 2 |
| Figura 1.3 Resultados entre mediciones experimentales (negro) y simulación numérica (verde) [1]. | 2 |
| Figura 1.4 Modelo de sello y sus condiciones fronteras en Actran [2]. | 3 |
| Figura 1.5 Resultados entre medición experimental en cámara anecoica (azul) y simulación numérica (rojo) [2]. | 3 |
| Figura 1.6 Diagrama esquemático del tubo de impedancia y sus componentes para medición de TL [3]. | 4 |
| Figura 1.7 Metodología para obtención de resultados numéricos y experimentales. | 7 |
| Figura 2.1 Patrones de transmisión de ruido en un vehículo [6]. | 8 |
| Figura 2.2 Medición de Transmission Loss en cuarto reverberante [6]. | 10 |
| Figura 2.3 Tubo de impedancia y sus componentes (Kundt's tube) [7]. | 11 |
| Figura 2.4 Ruido en sellos con flujo neto y sin flujo neto [7]. | 13 |
| Figura 2.5 Influencia de las fugas de un sistema en el TL [5]. | 13 |
| Figura 2.6 Propiedades geométricas de sello. Sección transversal de sello aplicado a una cabina vehicular, [9]. | 15 |
| Figura 2.7 Interferencia en el sello y superficie de sellado (plano J). Sección transversal de sello aplicado a una cabina vehicular, [9]. | 16 |
| Figura 2.8 Transmission Loss en diferentes compresiones en un sello, [11]. | 17 |
| Figura 2.9 Vista del área transversal del sello con una compresión (figa derecha), y experimental (izq.), [12]. | 17 |
| Figura 2.10 Comparación de método experimental y análisis FEM, en una prueba de compresión,[12]. | 18 |
| Figura 2.11 Tubo de impedancia con onda estacionaria de 3 micrófonos, [15]. | 20 |

| | |
|---|----|
| Figura 2.12 Diagrama esquemático de tubo de impedancia con 4 micrófonos para TL , [11]. | 20 |
| Figura 2.13 Prensa de agarre de sello conectada al tubo cuadrado de onda estacionaria, [11]. | 21 |
| Figura 2.14 Tubo de impedancia con 4 microfones de Brüel & Kjær, [16]. | 21 |
| Figura 2.15 Modo de prensado para prueba en diferentes sellos,[1]. | 22 |
| Figura 2.16 Descripción de cuarto reverberante para medición de TL , [20]. | 24 |
| Figura 2.17 Comparación de resultados entre método experimental (rojo) y simulación virtual (bordes negros), [20]. | 25 |
| Figura 2.18 Prueba uniaxial, planar y equibiaxial [1]. | 26 |
| Figura 3.1 Modelo masa – resorte, de un sistema acústico [21]. | 27 |
| Figura 3.2 Malla de disco de freno, con elementos y nodos hechos en MARC, [26]. | 32 |
| Figura 3.3 Deformación de geometría de sello al cerrar la puerta, [20]. | 34 |
| Figura 3.4. Modelo híbrido FE-SEA en un sistema de sello de un vehículo, [20]. | 34 |
| Figura 3.5 Área transversal de un sello de vehículo, [2]. | 35 |
| Figura 3.6 Desarrollo de metodología, [2]. | 35 |
| Figura 3.7 Metodología de método de transferencia de matriz,[33]. | 37 |
| Figura 3.8 Elementos lineal y cuadrático, de elemento finito en software Actran. | 38 |
| Figura 3.9 Elementos de triángulo con 3 y 6 nodos (lineales y cuadráticos). | 38 |
| Figura 3.10 Elementos de rectángulo con 4 y 8 nodos (lineales y cuadráticos) | 38 |
| Figura 4.1 Cabina de vehículo con el sello adjunto. | 40 |
| Figura 4.2 Sello sin deformación. | 41 |
| Figura 4.3 Mallado del sello. | 42 |
| Figura 4.4 Interacciones de los contactos. | 43 |
| Figura 4.5 Lista de contactos, el sello va pegado con la puerta y hace interacción con el cuerpo. | 43 |
| Figura 4.6 Condiciones frontera, el sello este fijo en la puerta y hace movimiento con respecto al cuerpo del vehículo. | 44 |

| | |
|---|----|
| Figura 4.7 Condiciones de contacto entre el sello y la puerta..... | 44 |
| Figura 4.8 Modelo de tubo de impedancia con sello en Apex..... | 46 |
| Figura 4.9 Modulo indicador de tamaño, de elemento necesario para simulación. | 47 |
| Figura 4.10 Mallado acústico cuadrático. Azul; fluido, rojo; superficie de contacto, negro; sello y gris; prensa de compresión. | 47 |
| Figura 4.11 Dominios del modelo. | 48 |
| Figura 4.12 Lista de materiales en Actran. | 49 |
| Figura 4.13 Componentes del modelo. | 50 |
| Figura 4.14 Parámetros del ducto modal en Actran..... | 50 |
| Figura 5.1 Diferentes compresiones en el sello D1..... | 54 |
| Figura 5.2 Geometría D2 (izquierdo) y geometría D1 (derecho) con diferente compresión. | 54 |
| Figura 5.3 Superficie de contacto curva, plana y con cordón de soldadura (izquierda a derecha). | 55 |
| Figura 5.4 Concepto de tubo de impedancia en 3D..... | 56 |
| Figura 5.5 Diseño de tubo de impedancia en 3D (Creo)..... | 56 |
| Figura 5.6 Dimensiones y tolerancias geométricas para la manufactura..... | 57 |
| Figura 5.7 Caja de bocina y tornillos niveladores..... | 58 |
| Figura 5.8 Tubos de acrílico..... | 59 |
| Figura 5.9 Prensa de compresión..... | 59 |
| Figura 5.10 Tubo de impedancia ensamblado..... | 60 |
| Figura 5.11 Bases de micrófono impresos en 3D. | 60 |
| Figura 5.12 Proceso de adquisición de datos experimentales. | 61 |
| Figura 5.13 Prueba de compresión uniaxial en el sello para obtención de la curva esfuerzo - deformación..... | 62 |
| Figura 5.14 Arreglo de curvas de una prueba uniaxial, utilizando el modelo Mooney Rivlin de tercer grado. | 62 |
| Figura 6.1 Resultados de TL de D1 con superficie curva. | 65 |
| Figura 6.2 Resultados de TL de D1 con superficie plana. | 66 |
| Figura 6.3 Resultados de TL de D1 con cordón de soldadura..... | 67 |

Figura 6.4 Resultados de *TL* de D2 con superficie curva. 68

Figura 6.5 Resultados de *TL* de D2 con superficie plana. 69

Figura 6.6 Resultados de *TL* de D2 con cordón de soldadura. 70

Figura 6.7 Resultados de *TL* de D1 con la mejor superficie de contacto. 71

Figura 6.8 Resultados de *TL* en comparación del D2 con D1. 72

Figura 6.9 Modelo 2D en Actran, con superficie de contacto, prensa de compresión, tubo de impedancia y sello D1. 73

Figura 6.10 Sección transversal del tubo de impedancia con sello D1. 73

Figura 6.11 Comparación de resultados de *TL* entre experimentación y FEM. 74

Nomenclatura

| | |
|------------|--|
| <i>TL</i> | Perdida de transmisión de ruido |
| <i>NR</i> | Reducción de ruido |
| <i>SPL</i> | Nivel de presión sonora |
| W_{src} | Energía incidente |
| W_{rec} | Energía transmitida |
| S_{src} | Densidad espectral de la presión de sonido antes de la muestra |
| S_{rec} | Densidad espectral de la presión de sonido después de la muestra |
| f | Frecuencia |
| c | Velocidad de sonido |
| λ | Longitud de onda |
| <i>FEM</i> | Método de elemento finito |
| | |
| | |
| | |

RESUMEN.

Recientemente, el confort en la industria automotriz ha sido un tema de mucha importancia, ya que con el avance de tecnologías se han implementado diferentes métodos para el aislamiento vibro-acústico en el interior de los vehículos.

En el sector de vehículos pesados (tractocamiones) es de suma importancia, ya que se exponen a diferentes factores de trabajo como lo pueden ser: minería, construcción, agricultura, etc.

En este tipo de trabajos, el conductor se expone de 8 a 10 horas diarias a una presión acústica constante en su área de trabajo. Esto puede resultar en fatiga, molestias en el oído, e inclusive en pérdida de la audición.

En este trabajo de investigación, se estudiarán los sellos elastómeros de las puertas, para determinar los factores que influyen en la absorción acústica, como lo puede ser el porcentaje de compresión en el sello, su geometría y la superficie de contacto.

El desarrollo de este proyecto involucra un proceso de dos simulaciones numéricas en forma secuencial. Primeramente, se realiza una simulación no lineal con la finalidad de obtener la forma de sello y el efecto de la deformación y posteriormente una simulación acústica para la pérdida de transmisión. También se presentan validaciones experimentales mediante un tubo de impedancia acústica (Kundt tube) diseñado para esta aplicación, con la finalidad de correlacionar los datos y predecir con mayor certeza las variables que influyen en el sistema.

1 Capítulo 1. Introducción

Los estudios que se muestran a continuación son una base para hacer el presente trabajo, y muestran conceptos muy importantes a tomar en cuenta como es el TL, tubo de impedancia, frecuencias de trabajo, cámara anecoica, etc. Se tiene como objetivo llevar el análisis de elemento finito a una correlación de mediciones experimentales como lo muestran a continuación.

1.1 Antecedentes.

En el estudio realizado por Orcun Saf [1], se hizo una investigación acerca del comportamiento acústico de un sello bajo a diferentes condiciones de trabajo para poder tener una evaluación y comparar el mejor diseño posible, el estudio se divide en dos partes; la simulación numérica y la medición experimental.

El proceso que se tomó en cuenta para las mediciones experimentales fue con cámaras anecoicas e insertaron el sello entre las mismas para poder tener los resultados en Transmission Loss, como se muestra en la Figura 1.1.

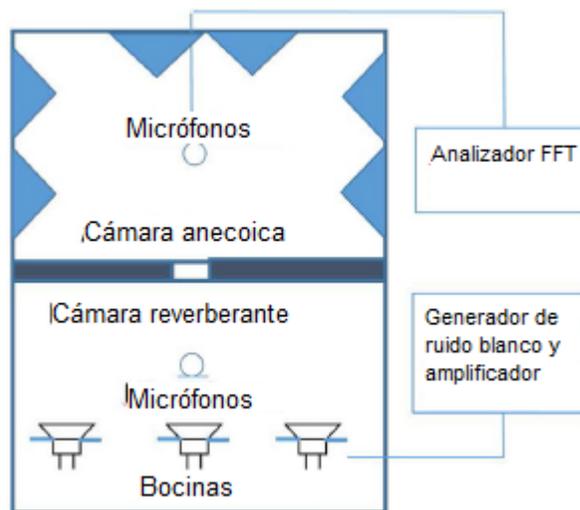


Figura 1.1 Cámara anecoica y reverberante para mediciones experimentales de TL [1].

En cuanto a la simulación numérica se realizó con el software Actran y se hicieron varios modelos en 2D para la simplificación del costo computacional, el modelo esta explicado en la Figura 1.2.

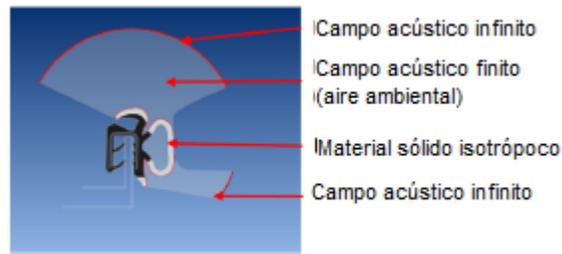


Figura 1.2 Modelo de sello elastómero automotriz en Actran [1].

En la Figura 1.3 se muestran los resultados, se obtuvieron las siguientes comparaciones entre la medición experimental y la simulación numérica.

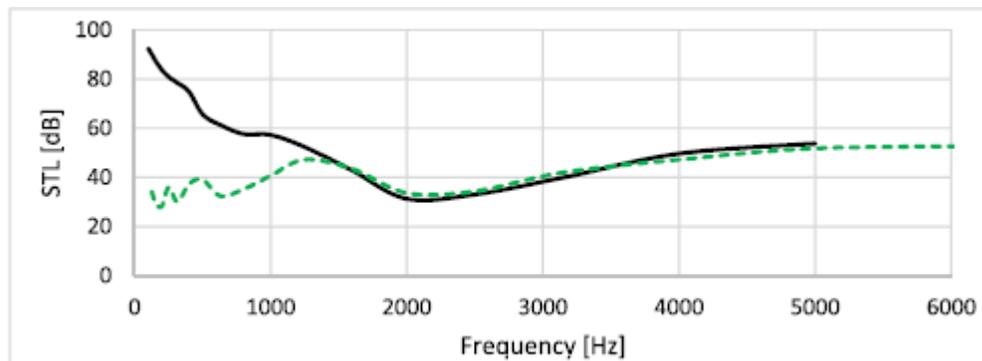


Figura 1.3 Resultados entre mediciones experimentales (negro) y simulación numérica (verde) [1].

Andro [2] realizó otro estudio en el cual involucraron sellos elastómeros automotrices para la optimización del sellado acústico, la metodología es muy parecida a la de Orcun, para poder realizar la simulación numérica se deben hacer dos pasos principales los cuales son; la deformación del sello y el comportamiento acústico.

Al igual se realizó una correlación de resultados, el método de las mediciones experimentales se hizo en cámara anecoica y reverberante. La simulación numérica se realizó en un modelo de 2D, en el cual tiene sus condiciones fronteras parecidas al estudio anterior.

En la Figura 1.4, se visualiza el modelo y las condiciones frontera que utilizaron en el software Actran, las cuales son desplazamiento fijo, elementos infinitos, finitos, y los diferentes materiales del modelo, aire y elastómero.

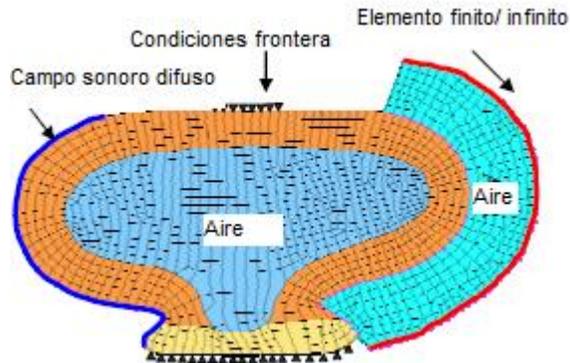


Figura 1.4 Modelo de sello y sus condiciones fronteras en Actran [2].

Los resultados que se muestran en la Figura 1.5, de Andro fueron buenos, ya que estuvo cerca en todo el rango de frecuencias al menos con diferencias menores a 5 dB lo que se puede tomar como aceptable.

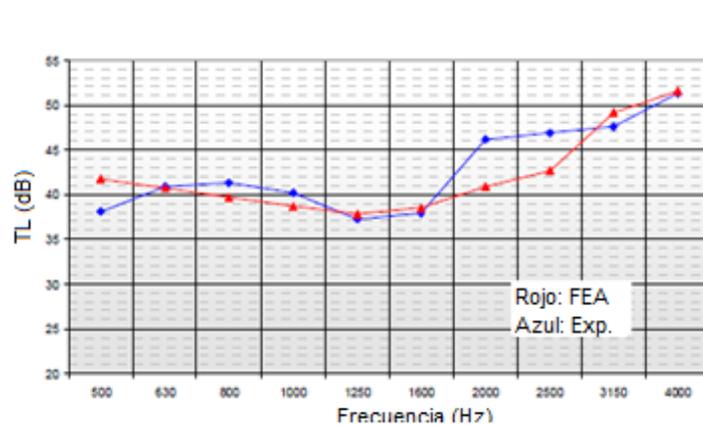


Figura 1.5 Resultados entre medición experimental en cámara anecoica (azul) y simulación numérica (rojo) [2].

Para poder analizar la parte de mediciones experimentales Vengala [3] hizo un estudio de cómo se comporta el tubo de impedancia para las mediciones acústicas, el objetivo principal del tubo de impedancia es de crear una onda plana por lo largo del eje donde se encuentra la muestra, a partir de ahí se miden las

presiones y velocidades de la onda con los micrófonos insertados en el tubo, para poder analizar el TL de una muestra se debe tener 4 micrófonos, 2 en cada lado de la muestra.

En la Figura 1.6 se muestra que, con la ayuda de un amplificador y una bocina se crea un ruido blanco para poder tener la onda plana, y así se realiza la medición en el rango de frecuencias que se requiera, las tarjetas de adquisición de datos para poder tener las mediciones que hacen los micrófonos en rango de tiempo y a partir de estos datos se puede obtener el TL en rango de frecuencias, que es lo que se busca.

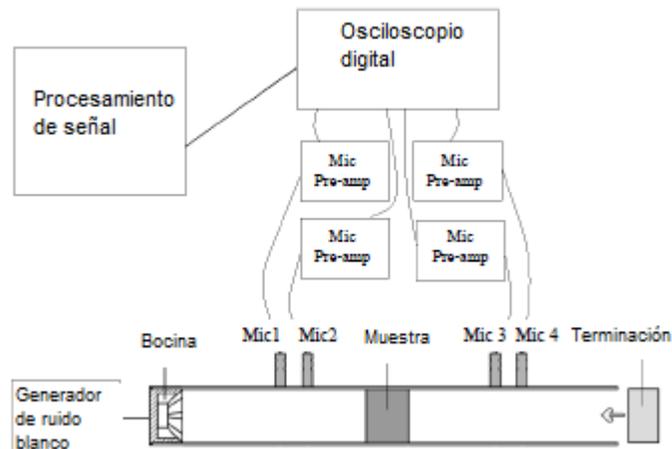


Figura 1.6 Diagrama esquemático del tubo de impedancia y sus componentes para medición de TL [3].

1.1 Planteamiento del problema.

En los camiones de trabajo pesado, como minería, agricultura, construcción, etc. Las vibraciones que predominan dentro de la cabina son las medias y altas (2000-5000 Hz), en donde el oído humano tiene la mayor sensibilidad.

A esto se suma, las jornadas largas de trabajo, lo que se convierte en una amenaza para la salud auditiva.

Es por esta razón la cual se busca investigar de forma más directa en los sellos de las cabinas, ya que es una parte débil en cuanto la absorción acústica por

diferentes factores, como deformaciones no lineales del sello, compresiones fuera de tolerancia del sello, irregularidades en la superficie, etc.

1.2 Justificación.

El desarrollo de un proceso de simulación numérica y mediciones experimentales para poder ver el comportamiento acústico del sello de las puertas, con diferentes factores de trabajo, para hacer un diseño de cabinas óptimo que pueda ayudar en la reducción de presión acústica e igual para establecer parámetros que ayuden a la manufactura para no generar retrabajos.

Existen diferentes métodos de medición experimental como lo pueden ser en cámaras anecoicas, tubos de impedancia. Se tiene que ajustar al costo beneficio. Una solución accesible de diseñar y manufacturar es el tubo de impedancia.

Este equipo se diseñará con las restricciones que se quieren estudiar, las cuales son:

- Variación en el porcentaje de compresión en el sello
- Cambiar la geometría del sello
- Efecto en diferentes superficies de contacto

1.3 Objetivos.

Objetivo general.

Estudiar la absorción acústica, con diferentes variables en los sellos de las puertas (compresión de sello, superficie de contacto y geometría de sello) y relacionar los datos experimentales, con la validación de un método de elemento finito para futuras mejoras de diseño.

Objetivos específicos:

Proponer un método experimental para medir el desempeño acústico de los sellos en las cabinas de vehículos pesados, con diferentes variables de trabajo y una validación con simulación numérica

- Diseño de tubo de impedancia acústica

- Manufactura de tubo de impedancia
- Instrumentación de tubo de impedancia
- Mediciones en el tubo de impedancia
- Modelo de sello con condiciones frontera
- Simulación no lineal
- Modelo acústico de sello con tubo de impedancia
- Simulación acústica
- Correlación de resultados

1.4 Hipótesis.

El tipo de superficie de contacto, la fuerza aplicada en el sello y su geometría pueden afectar la absorción acústica pudiéndose generar fugas debido a irregularidades de la superficie generando más ruido dentro de la cabina.

1.5 Metodología.

La metodología para la simulación numérica se divide en dos procesos principales. El primero que es la simulación no lineal, consiste en crear el modelo CAD del sello en este caso para agregar la malla, las propiedades y sus condiciones frontera, con esto, se obtiene la figura deformada del sello.

A partir de ahí se crea el modelo acústico con el tubo de impedancia y se hace la malla adecuada, para agregar las condiciones frontera del tubo de impedancia y así obtener los resultados en respuesta de frecuencia.

En la Figura 1.7, se encuentra el proceso de la metodología y los pasos a seguir en los dos procesos, tanto experimental como en el análisis de elemento finito, hasta llegar a la validación de resultados.

• Metodología.

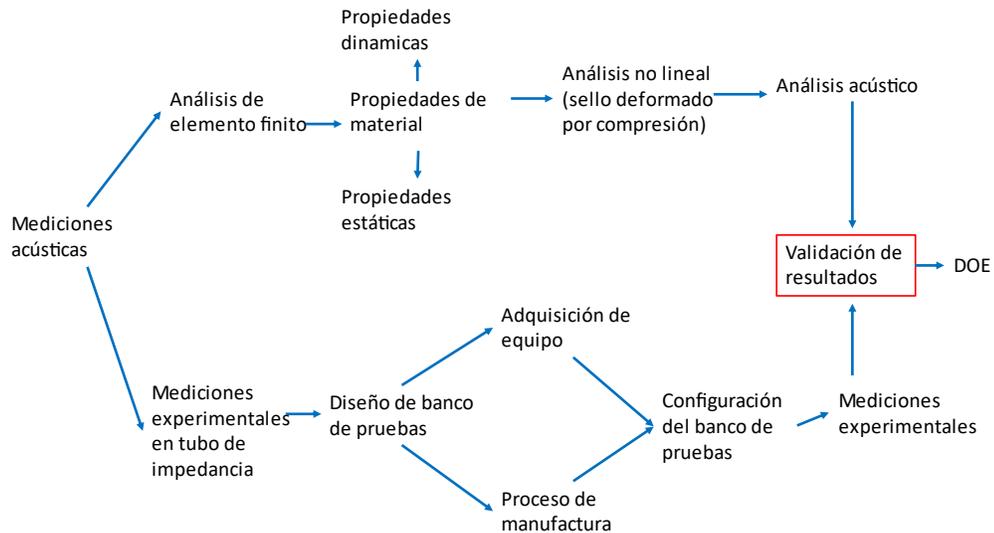


Figura 1.7 Metodología para obtención de resultados numéricos y experimentales.

1.6 Descripción de la tesis.

En el presente documento se presenta en el capítulo 2 la teoría para entender los elementos principales de la acústica y sus mediciones, así como las comparaciones entre las mediciones experimentales entre el tubo de impedancia y la cámara anecoica. En el capítulo 3 la modelación matemática para la comprensión de las variables que afectan en la acústica; así como una introducción al elemento finito y su aplicación en el área de Vibraciones y Acústica, sus representaciones en el software y algunos softwares utilizados. Posteriormente en el capítulo 4 ya tiene parte de la simulación computacional, con los pasos descritos desde la simulación mecánica no lineal (compresión del sello), hasta el modelo acústico del tubo de impedancia. Luego en el capítulo 5 se tiene las mediciones experimentales en nuestro banco de prueba, y el cómo se tiene que adaptar a la simulación computacional. Por último los resultados entre la experimentación y la simulación están presentados en el capítulo 6 y en el 7 la conclusión de los resultados y el porqué de los resultados.

2 Capítulo 2: Fundamentos teóricos.

2.1 Introducción.

En este capítulo se analizan los conceptos teóricos base para llevar a cabo las mediciones acústicas en el tubo de impedancia, así como una comparación de equipos de medición para conocer el equipo más viable en cuanto a manufactura y costos. También se analiza las variables de las geometrías en los sellos y las partes más importantes.

2.2 Ruido.

Todos los ruidos generados en el vehículo son por las llantas, el motor y el impacto del viento en la cabina a altas velocidades, [4].

En un vehículo predomina el de estructura y son en bajas frecuencias (<200 Hz) mientras que por la vía aérea el patrón predomina por arriba de los 500 Hz, en las frecuencias medias los dos patrones de transmisión tienen el mismo nivel de importancia, [5].

En la Figura 2.1, se muestra los patrones de transmisión de ruido, que son la rodada del vehículo, el motor, transmisión, viento, y como se reproducen en el vehículo de manera de vibración o de ruido.

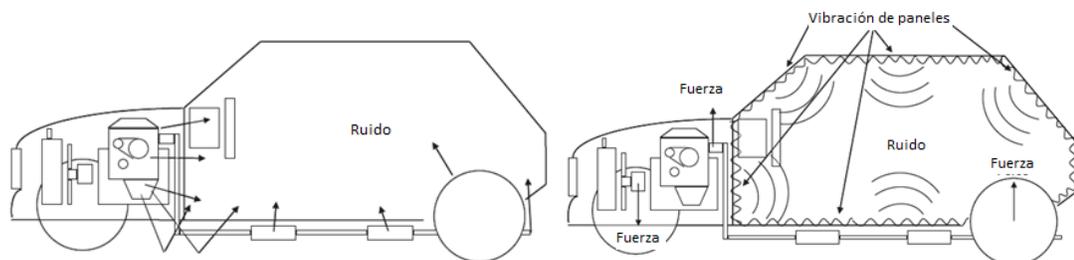


Figura 2.1 Patrones de transmisión de ruido en un vehículo [6].

La reducción del ruido aéreo está enfocada en los orificios, espacios, canales que hay en la estructura donde pueda pasar el ruido [6].

Para controlar el ruido aéreo existen dos acciones: insolación del sonido y la absorción del sonido en la cabina del vehículo.

La absorción del sonido es la más usada para reducir el ruido, se basa en las propiedades de los materiales para disipar la energía acústica.

2.3 Pérdida de transmisión de ruido.

El método para cuantificar la transmisión a través de un sistema de sellado es el de Pérdida de transmisión de ruido (Transmission Loss, TL) definido como [3]:

$$TL = 10 \log_{10} \frac{W_{src}}{W_{rec}} \quad \text{Ec. 2.1}$$

Donde W_{src} es la potencia incidente en la cámara de la fuente de energía y W_{rec} es la potencia transmitida al cuarto receptor.

La pérdida de transmisión sonora es la medición de la disminución en la intensidad del sonido. Como propiedad de un material, es la habilidad para bloquear el sonido.

La medición del TL es con una prueba del material de absorción entre dos cuartos reverberantes, un ruido de banda ancha es generado en uno de los cuartos y el nivel de presión de sonido (SPL), es medido en los dos cuartos para determinar la reducción de sonido y el coeficiente de transmisión de sonido (τ)[3].

Los equipos para realizar pruebas de Transmission Loss en la medición de acústica son:

- Cámara Anecoica o Semi- anecoica, cuarto reverberante, cabina Alpha, tubo Kundt's (tubo de impedancia).

La medición en el TL (perdida de transmisión), está definida por las normas ISO 140/3-1995 y ASTM E90-74. Esta medición requiere dos cámaras reverberantes con volumen mínimo de 64m^3 , las dos conectadas a una ventana donde la pieza de medición pueda ser sujeta, [6].

La Figura 2.2 muestra el diagrama esquemático de las mediciones en cámara anecoica y reverberante, el cual la muestra a medir se encuentra entre los cuartos.

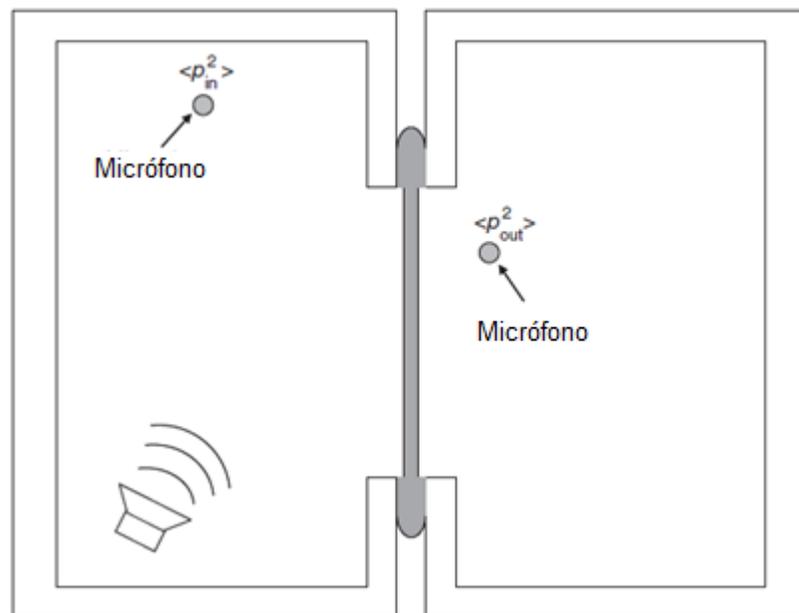


Figura 2.2 Medición de Transmission Loss en cuarto reverberante [6].

2.4 Reducción de ruido.

La medición de transmisión de sonido a través del sistema de sellado también puede hacerse con la Reducción de ruido (Noise Reduction), definida como:

$$NR = 10 \log 10 \frac{S_{src}^2}{S_{rec}^2}$$

Ec. 2.2

S_{src} es la densidad espectral de la presión de sonido en el micrófono en el lado de la fuente del obstáculo. S_{rec} es la densidad espectral de la presión de sonido en el micrófono detrás del obstáculo.

La desventaja del NR es la dependencia de la posición de los micrófonos, este no es el caso para Transmission Loss, porque se toma en cuenta toda la energía transmitida por las mediciones de la intensidad, [7].

En la Figura 2.3, se muestra un diagrama del tubo de impedancia, para medir las propiedades acústicas de un material absorbente.

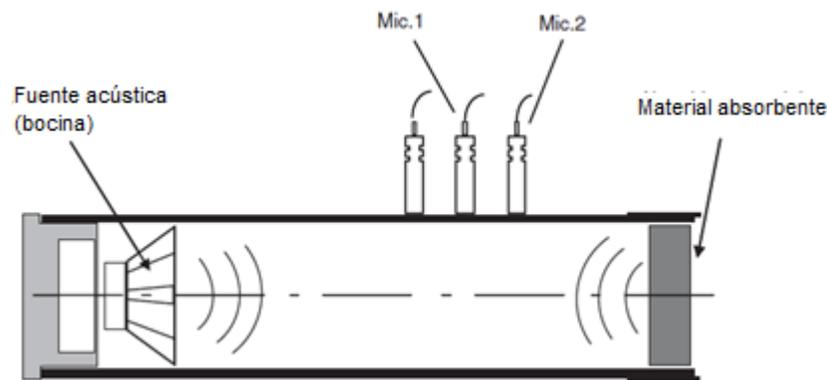


Figura 2.3 Tubo de impedancia y sus componentes (Kundt's tube) [7].

2.5 Fugas

Los sellos de las puertas o ventanas en el vehículo son muy importantes para la reducción del ruido aerodinámico. Se debe tener cuidado especial en las tolerancias geométricas y en el comportamiento dinámico de los sellos con compresión.

Existen varios patrones de transmisión de ruido [8]:

1. Ruido aerodinámico (ruido de viento).

Es generado por el flujo turbulento en la estructura del vehículo y se propaga a través del vidrio de la ventana de la puerta.

2. Ruido generado por rodado de llanta en la superficie.

Es generado en la parte inferior del vehículo, donde la energía de sonido de las llantas cercanas es transmitida al interior del vehículo, principalmente por el sello de la puerta.

3. Ruido del motor y sistema de escape.

El ruido de motor y escape son transmitidos al interior mayormente por los paneles estructurales del cuerpo y su transmisión por los sellos de la puerta es despreciable.

En el primer caso de la Figura 2.4, las presiones aerodinámicas son capaces de deformar el sello incluso hasta separarlo de la superficie. En el segundo, la presión aerodinámica acciona en la superficie del sello, haciéndolo mover y generando una fuente acústica. [7]

Los rechinos en el interior de un vehículo son generados por, el desplazamiento de las superficies. El ruido generado por esto es generalmente de frecuencias altas de 200Hz a 5KHz.[7]

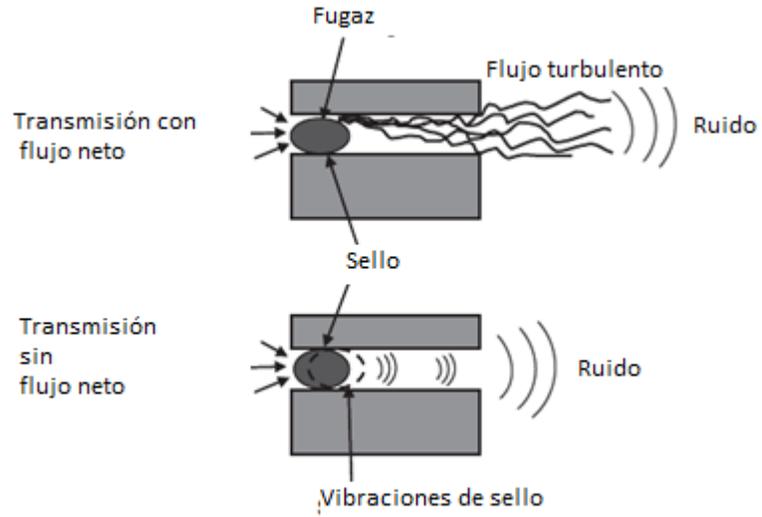


Figura 2.4 Ruido en sellos con flujo neto y sin flujo neto [7].

En la Figura 2.5, se compara la importancia entre el TL de un sistema con fugas a un sistema sellado, ya que es proporcional lo que afecta en los resultados.

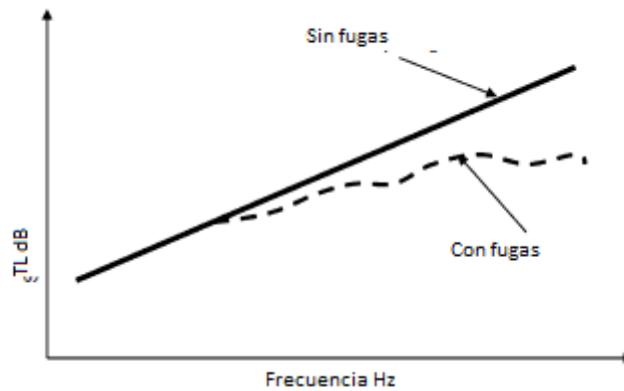


Figura 2.5 Influencia de las fugas de un sistema en el TL [5].

2.6 Sistemas de sellado.

2.6.1 Geometría.

El típico sello de puerta consiste en el bulbo del sello que es llenado con aire. Por esa razón, la transmisión de ruido en el sello se hacen dos patrones, uno por la estructura, dadas las fluctuaciones de esfuerzos internos dentro del material del sello. La otra a través del aire dentro del bulbo del sello, que está conectando la membrana interior y exterior, el patrón aéreo es el dominante.

La predicción de la transmisión de ruido de los sistemas de sellado es una tarea complicada.

Las características de transmisión de un sello en un vehículo dependen fuertemente de varias condiciones de frontera:

- Tipo de montaje: el sello puede ser pegado o montado con pestaña.
- La relación de compresión del sello cuando la puerta está cerrada.
- El contacto adyacente a la puerta y cuerpo de vehículo
- La figura de la cavidad exterior de la puerta (excitaciones en el sello, fluctuaciones) [7].

Las partes que componen a un sello y en las que se desempeña se describen en la siguiente sección [9]:

2.6.2 Propiedades de geometría.

El primer parámetro para iniciar un diseño de sello es el “espacio de sello” donde el sello realiza sus tareas, es la medición lineal entre la puerta y el cuerpo de la cabina vehicular. En la Figura 12 se puede mostrar el espacio de sello, donde se encuentra la geometría del sello sin compresión.

La altura del bulbo en el sello deberá ser definida para mantener una carga mínima, esto manteniendo la funcionalidad tal y como se muestra en la Figura 2.6.

El espesor de pared del bulbo es un parámetro clave para cambiar las fuerzas CLD (Deflexión de la carga de compresión) y el patrón de deformación de sello cuando sea comprimido, [9].

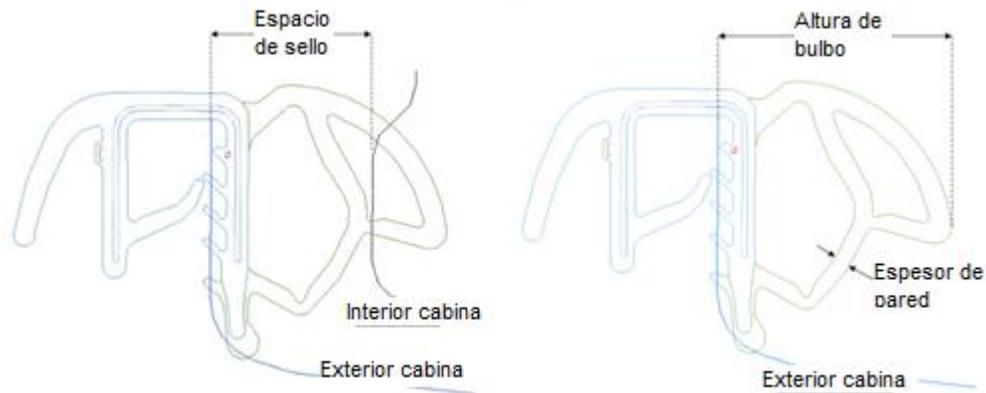


Figura 2.6 Propiedades geométricas de sello. Sección transversal de sello aplicado a una cabina vehicular, [9].

La interferencia del sello es la distancia lineal entre la sección del sello sin compresión y el interior de la puerta a través de la extrusión. Como lo muestra la Figura 2.7, es la diferencia entre la altura de bulbo y el espacio del sello. En tanto la superficie de sellado es el plano J en el panel de metal donde el bulbo del sello hace contacto completando su función.

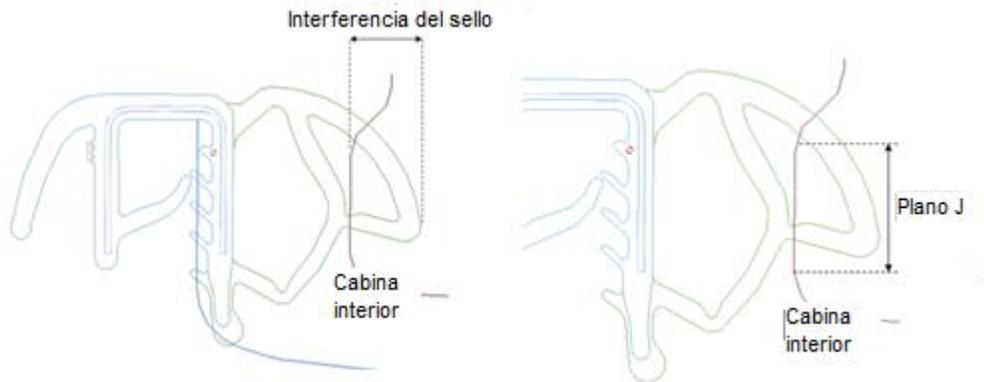


Figura 2.7 Interferencia en el sello y superficie de sellado (plano J). Sección transversal de sello aplicado a una cabina vehicular, [9].

2.7 Compresión.

La compresión en el sello es uno de los factores más importantes que afectan al desempeño acústico en las cabinas de los vehículos, ya que es la variable que deforma al sello según su fuerza aplicada.

La compresión de un sello en la puerta es un sistema masa resorte, en el cual la mayor influencia está dividida en tres contribuciones: amortiguamiento, resonancia y rigidez, [10].

Cuando la puerta está cerrada, la deformación en el sello es mayor, y el área deformada del sello es diferente que en áreas no deformadas como en las esquinas de la puerta. Esta compresión cambia las propiedades de rigidez del sello, [7].

En la Figura 2.8, se puede observar que la pérdida de transmisión (TL) de los sellos, incrementan según la compresión (mayor). [11] Mientras haya mayor fuerza en el cerrado de puerta, el área de contacto entre el sello y la puerta será mejor. En el citado estudio, también se pudo observar las deformaciones que tiene el sello en las curvaturas de la puerta.

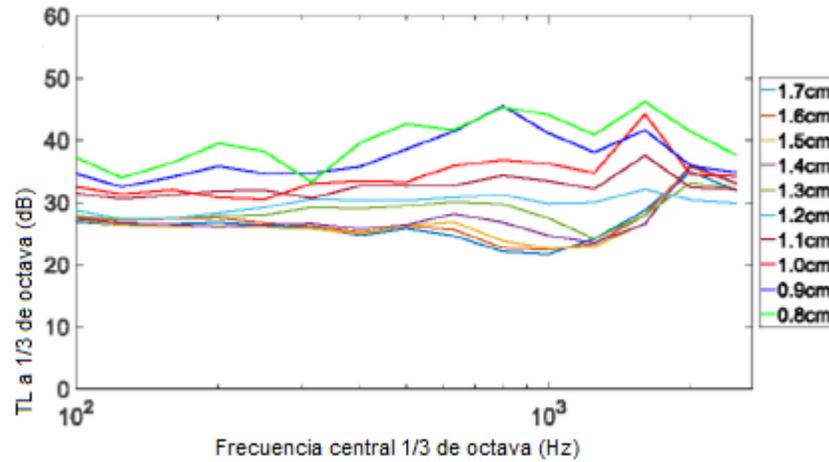


Figura 2.8 Transmission Loss en diferentes compresiones en un sello, [11].

En la Figura 2.9 se muestra la comparación del modelo FEM con la prueba experimental de compresión, y se muestran las mismas condiciones frontera.

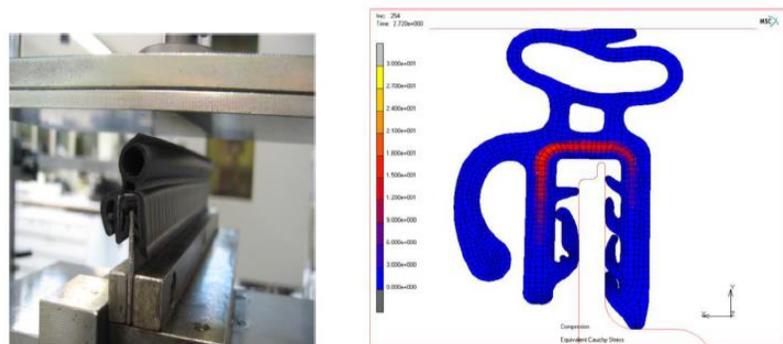


Figura 2.9 Vista del área transversal del sello con una compresión (figa derecha), y experimental (izq.), [12].

En la Figura 2.10, se encuentran graficadas los resultados y se puede comprobar la validación entre ambos, experimental y FEM. Se tiene como resultado final una diferencia menor entre la simulación FEM y la prueba de laboratorio.

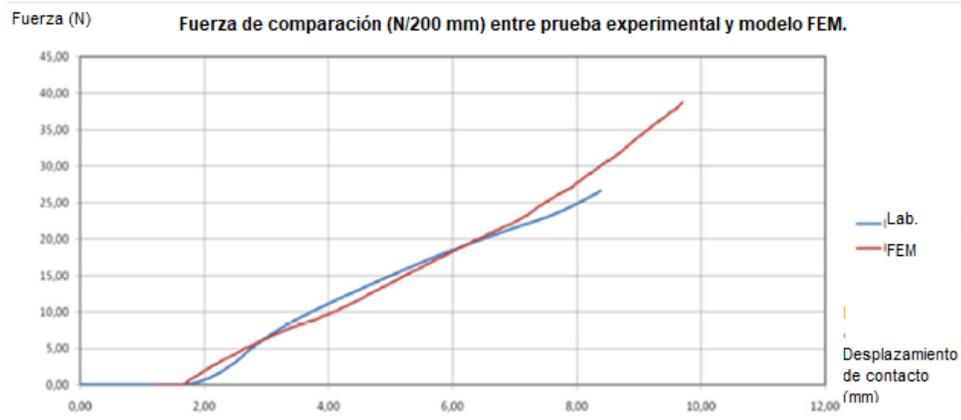


Figura 2.10 Comparación de método experimental y análisis FEM, en una prueba de compresión,[12].

Revelando así la dependencia de la geometría en el perfil del sello para el rendimiento en el sello acústico, donde la industria de sellos se concentra en hacer diseños con geometrías variables, para adaptarse a las complejidades en los nuevos vehículos [12].

Para cuantificar el confort del cerrado de puerta, la deformación del sello es medida por un incremento de fuerza, el cual deforma el sello. Esta función está definida como Deflexión por carga de compresión (Compression Load Deflection),[7].

2.8 Pruebas experimentales.

Los sellos en las puertas juegan un papel muy importante en el bloqueo de ruido hacia la cabina del vehículo. Se han desarrollado métodos de medición como cámaras de reverberación, cámaras anecoicas o túnel de viento, para poder medir la absorción del sonido en los sellos. Sin embargo, todos estos métodos son muy caros y requieren de mucho tiempo de fabricación. Debido a esto se requiere un modelo más simple y económico para hacer mediciones más rápidas del sello de las puertas [11].

2.8.1 Tubo de impedancia

Este aparato es un tubo con una muestra en un costado y una bocina en el otro. El tubo puede ser de metal, plástico, cemento Portland, u otro material que tenga propiedades de baja absorción de sonido.

El interior puede ser circular o rectangular, pero tiene que ser uniforme de inicio a fin. Además, el interior del tubo puede ser sellado con, pintura, epoxi, u cualquier material de recubrimiento que asegure baja absorción de sonido en el interior, [13].

Las paredes del tubo deben ser suficientemente fuerte y rígidas para que la propagación de la energía de sonido por vibraciones sea despreciable. Se menciona a continuación el proceso de diseño de los parámetros de tubos de impedancia, [14].

Para geometrías circulares con la frecuencia máxima es:

$$f < 1.586 \frac{c}{d} \quad \text{Ec. 2.3}$$

f : frecuencia Hz

c : Velocidad del sonido m/s

d : diámetro de tubo m

Para geometrías rectangulares con d como símbolo para la dimensión más larga del área, el límite mayor de frecuencia es:

$$f < 0.500 \frac{c}{d} \quad \text{Ec. 2.4}$$

Para el largo del tubo, debe ser lo suficientemente largo para contener el patrón de la onda estacionaria necesitada para la medición.

$$f > 0.75 c / (l - d) \quad \text{Ec. 2.5}$$

l es el largo del tubo[14].

Como se puede ver en la Figura 2.11, el tubo de impedancia con sus diferentes propiedades geométricas y de instrumentación. Existen diferentes modelos de tubo de impedancia, de los cuales, se diseña a partir de las necesidades de las mediciones que se quieren obtener.

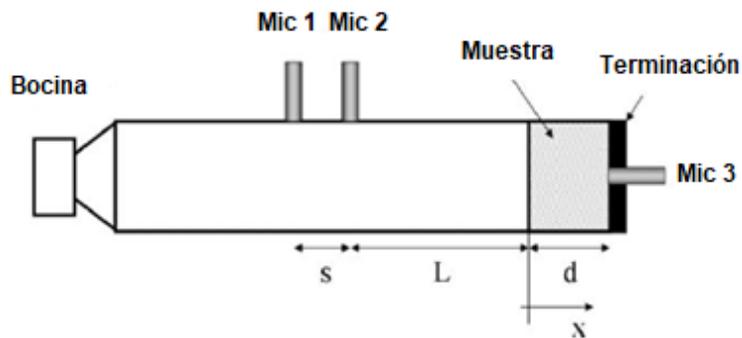


Figura 2.11 Tubo de impedancia con onda estacionaria de 3 micrófonos, [15].

En la Figura 2.12, se muestra un tubo (con sección cuadrada) de impedancia con 4 micrófonos, con una adición de un sujetador en el cual se pone el sello para medir la pérdida de transmisión (TL), variando la compresión en el sello.

El rango de frecuencias puede variar según su geometría, para frecuencias altas (3KHz-10KHz) la geometría del tubo debe ser muy pequeña y para frecuencias bajas (100 Hz- 1KHz) se puede tener un ancho de tubo más amplio.

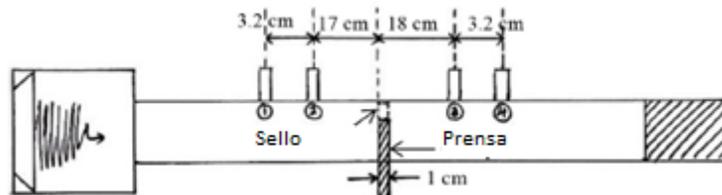


Figura 2.12 Diagrama esquemático de tubo de impedancia con 4 micrófonos para TL , [11].

En la Figura 2.13, se puede visualizar un tubo de impedancia, hecho con plástico ya que es bastante rígido, con una prensa para sujetar el material a medir el desempeño acústico.



Figura 2.13 Prensa de agarre de sello conectada al tubo cuadrado de onda estacionaria, [11].

En la Figura 2.14 se muestra un tubo de impedancia hecho por la empresa Brüel & Kjær, en el cual hacen mediciones de TL con 4 micrófonos, [16].

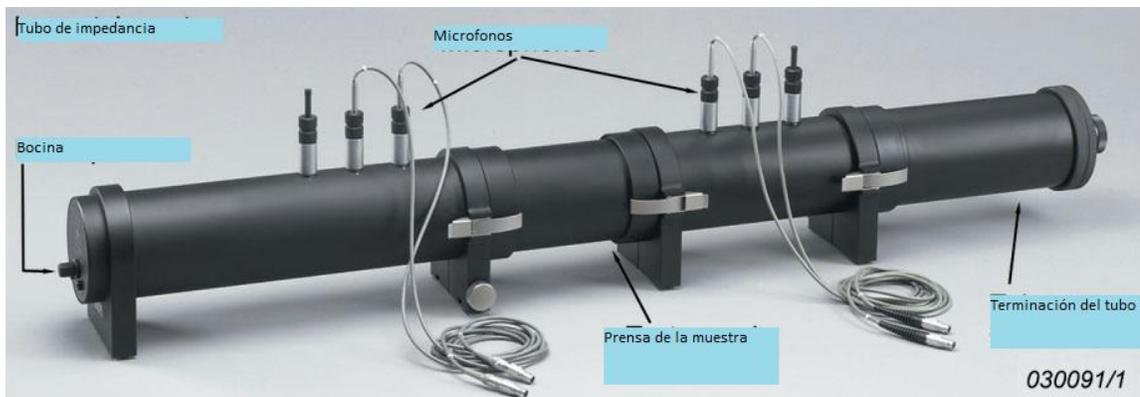


Figura 2.14 Tubo de impedancia con 4 micrófonos de Brüel & Kjær, [16].

En la Figura 2.15, se tienen diferentes muestras de sello aplicadas en la prensa, para poder medir su desempeño acústico en el tubo de impedancia.

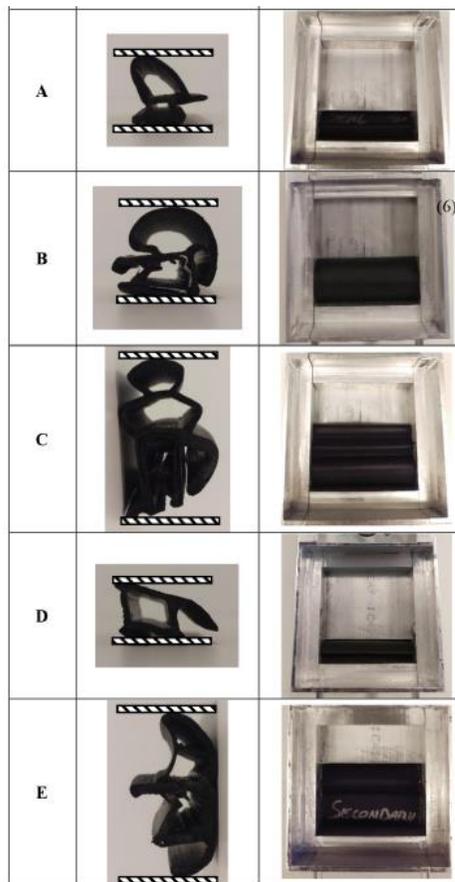


Figura 2.15 Modo de prensado para prueba en diferentes sellos,[1].

Este procedimiento presentado podría reemplazar los métodos convencionales mencionados, que hacen uso de cámaras de reverberación,[11].

El rango de frecuencia útil depende del ancho del tubo y de la distancia entre las dos posiciones de micrófono,[17].

Este método tiene alto grado de precisión con sus resultados, lo cual es el reemplazo del método con cámaras reverberantes, que tiene como característica contraria las grandes cámaras/ cuartos,[3].

El tubo de impedancia se puede diseñar con materiales de bajo costo,[18] esto facilita a estudiantes de universidades el poder hacer mediciones de absorción

de ruido teniendo la misma capacidad que los tubos de impedancia comerciales, que tienen un costo de alrededor de 5,000 dólares, en cambio con los materiales más económicos puede costar alrededor de 1000 dólares.

2.8.2 Cámara anecoica.

Las mediciones con cámaras anecoicas son muy comunes en los laboratorios de acústica y vibración, con este equipo se pueden medir diferentes variables y modelos. Consiste en tener una cámara anecoica; que su función es insular todo el medio de ruidos en cierto rango de frecuencia, que está conectada a una cámara reverberante que se encarga de reproducir el ruido en forma de eco. Entre las cámaras se encuentra la muestra a medir y pueden ser diferentes modelos, desde un auto completo o solo un panel.

Las ondas esféricas se pueden propagar libremente sin reflexiones ni difracciones, los cuartos anecoicos tienen la capacidad de absorber el 99.9% del ruido. [4].

Se utiliza una señal de ruido aleatoria que es encendida hasta que el nivel de presión sonora alcance un estado estable, cuando a la señal es apagada el *SPL* disminuirá y la tasa de descomposición en cada banda de frecuencia puede ser medida, [19].

La absorción del cuarto es calculada, basada en asumir que el campo de sonido incidente es difundido antes y durante la caída y ninguna energía adicional entra al cuarto, la fórmula de Sabine:

$$A = 0.9210 \frac{Vd}{c} \quad \text{Ec. 2.6}$$

A = Absorción de sonido

V = volumen del cuarto reverberante

c = velocidad del sonido

d = tasa de descomposición

Estos valores son para la medición de la absorción de ruido en cámaras reverberantes [19].

En la Figura 2.16 se muestra una medición del método experimental del TL en dos salas acústicas de 157m^3 , una anecoica de clase 1 en el rango de frecuencia de 150 Hz a 10KHz y el de reverberación de 125 Hz a 10KHz, donde se insertan los micrófonos en las dos salas para hacer la comparación de TL , y la muestra de medición se inserta entre las salas acústicas. (cumpliendo con ISO 3741 e ISO 354) [20].

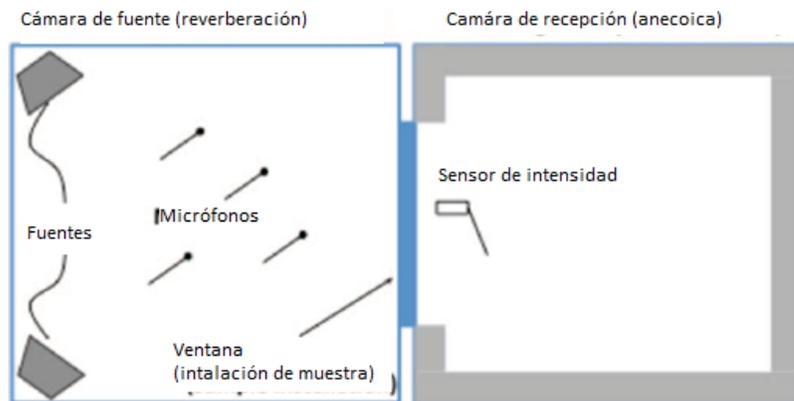


Figura 2.16 Descripción de cuarto reverberante para medición de TL , [20].

En la Figura 2.17 se muestra la comparación de resultados entre el modo experimental y el análisis híbrido FE-SAE tiene una diferencia entre 3 a 5 dB lo que se puede considerar como aceptable, ya que es difícil encontrar una validación experimental en este tipo de análisis, solo se pudo ver discrepancia en las frecuencias menores a 500 Hz ya que influye la estructura del sistema donde va el sellado entre las dos cámaras. Micrófonos

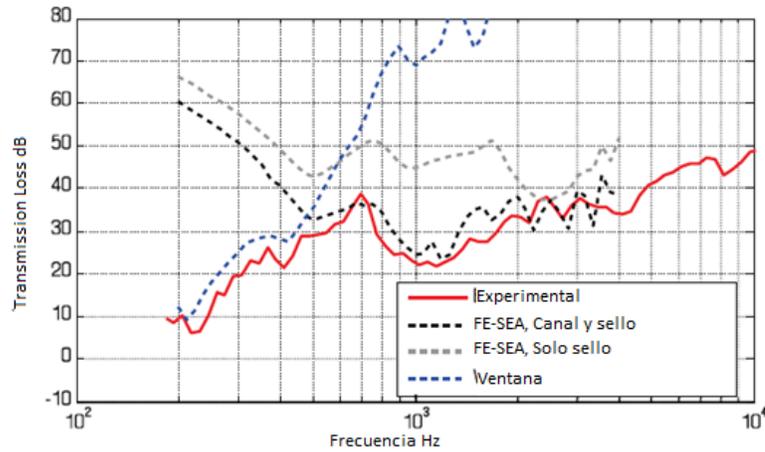


Figura 2.17 Comparación de resultados entre método experimental (rojo) y simulación virtual (bordes negros), [20].

2.9 Pruebas mecánicas en sellos.

Los sellos elastómeros tienen cierta capacidad para absorber grandes esfuerzos y deformaciones sin llegar al punto de cedencia, estos mismos se dividen en dos tipos de elastómeros; los sólidos y los de esponja. En la mayoría de los casos son extrusiones del perfil transversal.

Estos aspectos pueden ser caracterizar por deformaciones no lineales, para caracterizar las propiedades se utilizan varias técnicas de pruebas experimentales. Uno de los modelos utilizados es el Mooney Rivlin que sirve para expresar propiedades hiperelásticas de un elastómero y calcular la deformación no lineal y las fuerzas de reacción en segmentos 2D en un Análisis de Elemento Finito.

Para poder obtener los coeficientes del modelo, se necesita la gráfica de esfuerzo deformación. En los que existen diferentes pruebas experimentales para poder obtenerlas, como lo son: Prueba uniaxial; prueba planar y prueba equibiaxial.[1].

En la Figura 2.18 se tienen las diferentes pruebas experimentales, en las que se pueden obtener las propiedades hiper elásticas de los elastómeros.



Figura 2.18 Prueba uniaxial, planar y equibiaxial [1].

2.10 Conclusiones.

En este capítulo se mostró los conceptos básicos de la acústica y los diferentes métodos de pruebas experimentales, para poder hacer una comparación y analizar cuál de ellos está a nuestro alcance para realizar la manufactura de ello. También es importante conocer las diferentes partes que componen a un sello elastómero automotriz, y la función de ellas. Con esta información se puede dar a entender que es lo que queremos realizar y el porqué, concluyendo en los diferentes aspectos a tomar en cuenta.

3 Capítulo 3. Modelaje matemático y principios de simulación FEM.

3.1 Introducción.

Las ecuaciones matemáticas generales que se utilizan para el modelado de un sistema acústico están presentado a continuación, al igual de cómo se comporta el elastómero con sus variables, las ecuaciones principales son la ecuación de la onda para representar las propiedades acústicas de un sistema cuando se somete a una presión y velocidad, y la ecuación de Mooney Rivlin que describe el comportamiento de un sistema hiper elástico bajo condiciones de largas deformaciones.

El principio de la transmisión acústica es un sistema de masa- resorte, cuando la masa efectúa una tensión en el resorte derecho, va frenando el desplazamiento de las masas, siendo un sistema finito [21].

Cuando hay una fuerza que se aplica de izquierda a derecha, el resorte se comprime a lo largo del eje y este ejerce una fuerza en la siguiente masa, produciendo un movimiento. La inercia hace que las masas se desplazan paulatinamente.

Para simplificar el funcionamiento del movimiento de una onda en un campo se observa en la Figura 3.1; un cilindro con resortes y masas.

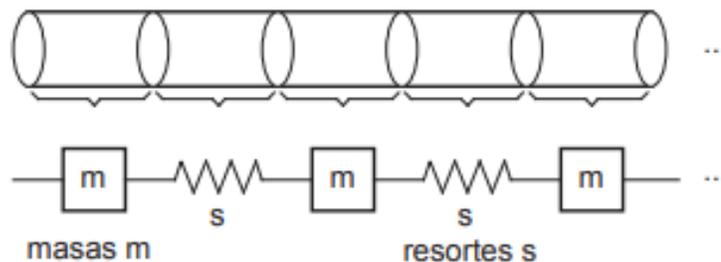


Figura 3.1 Modelo masa – resorte, de un sistema acústico [21].

3.2 Ecuación de la onda.

Los fenómenos físicos que ocurren para que una onda se propague a través de una masa se formulan mediante dos ecuaciones. Primero se considera como los pequeños resortes de aire comprimidos por los movimientos de sus extremos. Luego se debe formular como las pequeñas masas de aire se mueven aceleradamente a causa de fuerzas elásticas sobre ella [21].

La ecuación de la onda se obtiene a partir de dos ecuaciones acústicas fundamentales, la ecuación de la continuidad y la ley de Newton.

La primera ecuación es la densidad sonora que se obtiene a partir de la derivada espacial de la deformación (ecuación de continuidad):

$$\frac{\rho}{\rho_0} = - \frac{\partial \xi(x)}{\partial x} \quad \text{Ec. 3.1}$$

ξ = desplazamiento

ρ = densidad sonora

La segunda ecuación es la segunda ley de Newton, que es la aceleración de la masa producida por la diferencia entre fuerzas que actúan en el elemento:

$$\rho_0 \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = - \frac{\partial p}{\partial x} \quad \text{Ec. 3.2}$$

Todo evento sonoro (unidimensional) debe satisfacer a la ecuación de la onda.

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{1}{c} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad \text{Ec. 3.3}$$

Para hacer más práctico, se consideran los eventos sonoros o vibratorios con un comportamiento armónico.

Donde λ es la longitud de onda, c la velocidad y f la frecuencia.

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad \text{Ec. 3.4}$$

3.3 Perdida de transmisión del ruido.

El propósito de una barrera es la de atenuar el sonido, esa es la habilidad de una barrera hablando en acústica. Para ser más específico a este término se le conoce como Perdida de transmisión del ruido (Transmission Loss), más conocida como TL para fines prácticos. TL es la representación de la perdida de sonido a través de una barrera.

Se puede definir como la diferencia entre el SPL en la fuente y el SPL en el lado recibido. [22]

En otros términos, se puede describir al TL como la diferencia entre la energía incidente y la energía transmitida con la Ecuación 1.

$$TL = 10 \log_{10} \frac{W_{src}}{W_{rec}}$$

3.4 Ecuaciones constitutivas para modelado de compresión de sello.

Para analizar el comportamiento mecánico de un cuerpo continuo deformado, se debe emplear la mecánica continua no lineal. Algunos conceptos como la cinemática, los esfuerzos y el balance de fuerzas y momentos son básicos para comprender estos comportamientos.

El modelo que resolver es un compuesto elastómero y tiene propiedades hiperelásticas, cuya ecuación debe cumplir con [23]:

$$\sigma = \frac{\partial W}{\partial \epsilon} \quad \text{Ec. 3.5}$$

$W =$ Potencial de deformación

$\sigma =$ Esfuerzo

$\epsilon =$ Deformación

3.5 Modelado propiedades hiperelásticas.

Con la gráfica esfuerzo deformación, se pueden obtener los coeficientes del modelo Mooney Rivlin, para poder hacer la simulación estática no lineal. Esto se realiza en el software MARC y se le llama arreglo de curvas, el cual, hace un ajuste entre los datos de la curva y el modelo a obtener, para así tener los coeficientes y poder meterlos como propiedades del material hiperelástico. La grafica esta descrita en el capítulo 5.

El modelo Mooney Rivlin es uno de los más utilizados junto al modelo Odgen, para poder representar el comportamiento de un material hiperelástico, en este caso un elastómero. En el que se obtienen ciertos coeficientes que sirven para tener resultados aceptables en la simulación de elemento finito.

En la Ecuación 12, muestra el modelo de Mooney Rivlin al que se basan en invariantes de deformación, [24].

$$W = \sum_{i+j=1}^N C_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j \quad \text{Ec. 3.6}$$

Donde:

$W =$ Energía de deformación

$C_{ij} =$ Coeficiente de Rivlin

$I_1, I_2 =$ Invariantes de deformación

Como se menciona en la metodología, se necesitan propiedades del material en un comportamiento estático y dinámico. Para el dinámico, se realiza en una maquina DMA (Análisis dinámico mecánico), en donde la prueba se realiza a diferentes frecuencias para conocer su comportamiento en las mismas. La prueba en DMA se obtienen dos parámetros el módulo de perdida y el módulo de almacenamiento, que, dicho anteriormente, cambian según la frecuencia.

3.6 Elemento finito.

El método de elemento finito es un método numérico para resolver problemas de ingeniería, estos incluyen análisis estructurales, transferencia de calor, dinámica de fluidos, transportación de la masa y potencial electromagnético. Estos métodos existen para problemas que incluyen geometrías complejas, cargas y propiedades de material, que generalmente no se pueden obtener de soluciones matemáticas de manera analítica.

Las soluciones analíticas son las que son dadas por una expresión matemática a las incógnitas deseadas en cualquier lugar del cuerpo analizado. Estas soluciones analíticas requieren la solución de ecuaciones diferenciales parciales u ordinarias, por sus geometrías complejas, cargas y propiedades de material, que no se pueden obtener usualmente.

El proceso de modelación a un cuerpo es dividiéndolo en un sistema equivalente de cuerpos más pequeños (elementos finitos), interconectados con puntos en común (nodos), y líneas o superficies de frontera que se llama discretización. [25]

En la Figura 3.2, se muestra una parte de un disco de freno de automóvil, con su mallado, preparando el modelo para la simulación.

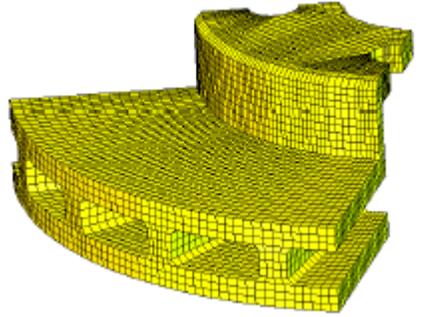


Figura 3.2 Malla de disco de freno, con elementos y nodos hechos en MARC, [26].

3.7 Historia.

El desarrollo del método de elemento finito inicia a principios de 1940, en el campo de la ingeniería estructural, con el trabajo de Hrennikoff en 1941, y McHenry en 1942, que usaron una línea de puntos con elementos (unidimensional), para la solución de esfuerzos en los sólidos continuos. Courant propuso una solución de esfuerzos en forma variacional en 1943, luego introdujo la interpolación sobre subregiones triangulares, haciendo que toda la región un método para obtener soluciones numéricas aproximadas.

Las soluciones a problemas de tres dimensiones fueron desarrolladas en 1961 por Martin, Gallagher en 1962 y Melosh en 1963. Con una matriz de rigidez por elementos tetraedros.

En 1965, Archer considero el análisis dinámico den el desarrollo de la matriz masa-consistente, que es aplicable para el análisis de un sistema de masa-distribución como las barras y vigas en el análisis estructural.

Desde principios de 1950 hasta ahora, los avances han sido enormes en la aplicación del método de elemento finito para resolver problemas complicados de ingeniería [25].

Las primeras simulaciones acústicas se realizaron por Lighthill en los años 50, donde modeló el ruido aerodinámico de un Jet, en el cual se basaba en la teoría

de Aero acústica, y a partir de ahí se empezaron a desarrollar más modelos acústicos, [27].

En los años 80, se tuvo más avance en cuanto a simulación acústica, ya que se contaba con equipo computacional más capaz y porque se redujo el costo de este, teniendo unos resultados confiables para solucionar los problemas, [28].

3.8 Híbrido FE-SEA.

El método híbrido es utilizado en muchos análisis acústicos que involucran frecuencias altas y modelos muy grandes. En general cada fabricante de software tiene sus propios métodos de solución.

El método FE-SEA se divide en dos partes, el FE (Elemento Finito) resuelve los problemas acústicos esturales en las bajas frecuencias, mientras que el SEA (Análisis estadístico de energía), es usado usualmente para resolver problemas con geometrías complejas a altas frecuencias, [29].

El ruido transmitido a través de los sellos es un resultado de la radiación del sonido por las vibraciones en las paredes del sello, que es lo que hace el campo acústico en el canal, [20].

Para estimar la geometría deformada se utilizó análisis no lineal contacto/deformación para calcular la geometría deformada del sello en la puerta para condiciones reales.

Posteriormente la geometría es usada en un análisis vibro-acústico para predecir en el lugar la pérdida de transmisión en el sello utilizando un modelo híbrido FE-SEA, (Finite element- Statistical energy analysis)

En la Figura 3.3, se muestra el análisis de la compresión en el sello, se comprime por el desplazamiento de la puerta.

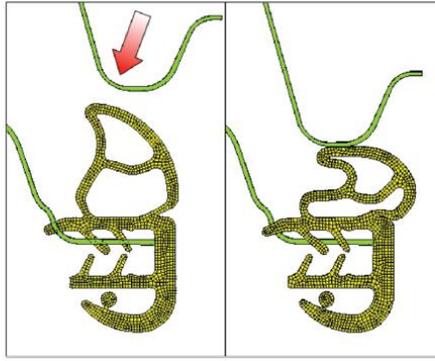


Figura 3.3 Deformación de geometría de sello al cerrar la puerta, [20].

En la Figura 3.4, se visualiza el modelo en el sistema FE-SEA, en el que se hace el mallado tanto del sello como del fluido.

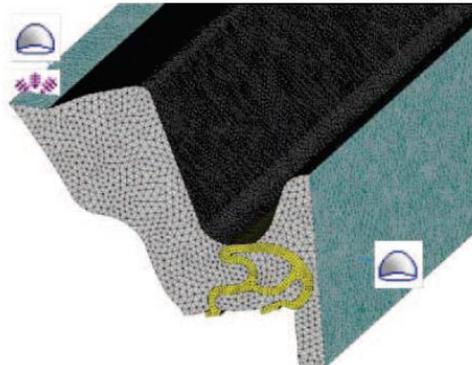


Figura 3.4. Modelo híbrido FE-SEA en un sistema de sello de un vehículo, [20].

3.9 Comparación FEM

En el método de elemento finito (FEM), la gran diferencia a comparación del híbrido es el rango de frecuencias, en un FEM se analizan frecuencias de 100 Hz – 10KHz. Para rangos de frecuencias superiores el costo computacional del método FEM lo vuelve impráctico y se aplican métodos híbridos FEM-SEA.

En la Figura 3.5, se hizo un análisis Híbrido en dos tipos de sello en el área transversal [2].

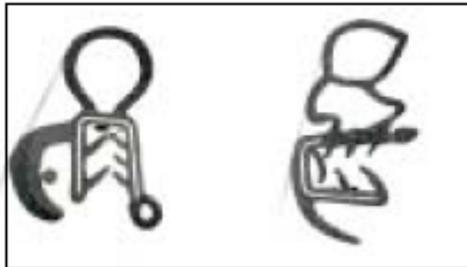


Figura 3.5 Área transversal de un sello de vehículo, [2].

Este tipo de modelo es muy interesante en la etapa inicial del desarrollo del proceso. Con el uso de esta herramienta predictiva se puede encontrar el mejor diseño que satisfaga los requerimientos, por ejemplo, fuerza de cerrado de puerta y la perdida de transmisión de sonido.

En la Figura 3.6 se encuentra la metodología, como primer paso, se calcula la forma del sello después de la compresión usando los parámetros visco elásticos, usando el software comercial Abaqus. El segundo paso, una estructura de fluido se tiene que usar para obtener la perdida de transmisión del sello de la puerta, utilizando el software Actran.

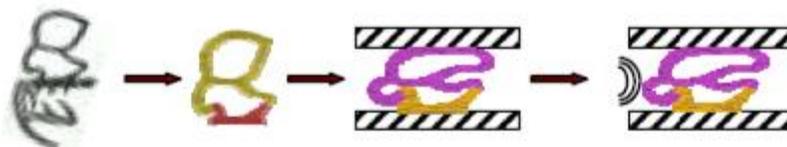


Figura 3.6 Desarrollo de metodología, [2].

Los modelos FEM tienen una gran validez con respecto a las mediciones experimentales, ya que se han realizado estudios de validación para materiales absorbentes acústicos tales como paneles y fibras, la ventaja del modelo FEM es que se puede desarrollar en modelos de dos dimensiones, para disminuir los costos computacionales y tiempos.

Los modelos de FEM, pueden ser comparados con las técnicas experimentales, y tienen una amplia representación de condiciones frontera que ayudan a ahorrar el tiempo de modelado, [30].

Aunque hay muchos tipos de métodos numéricos, FEM tiene la ventaja por su rango de adaptabilidad, por ejemplo, es aplicable a problemas con materiales heterogéneos, con geometrías muy complejas y diferentes tipos de no linealidades, [32].

3.10 ACTRAN Software

Actran permite obtener modelos acústicos con buenas validaciones, ya que ofrece una solución numérica completa desde el dibujo del modelo hasta la visualización de resultados en diferentes formas, [31].

El software Actran permite obtener el modelo de un tubo de impedancia con una simplificación; que se le llama modelo de transferencia de matriz.

Los puntos a observar son que las paredes tienen que ser rígidas, que cumple la misma función del tubo de impedancia, para crear una onda plana.

Los componentes de un sistema tipo ducto que tienen subsistemas pueden ser divididos en las siguientes categorías [33]:

- Fuente acústica
- Subsistemas internos acústicos

- Condición de salida acústica

En la Figura 3.7, se muestra un diagrama esquemático de cómo están subdivididos los sistemas que puede analizar Actran para una simulación de ductos.

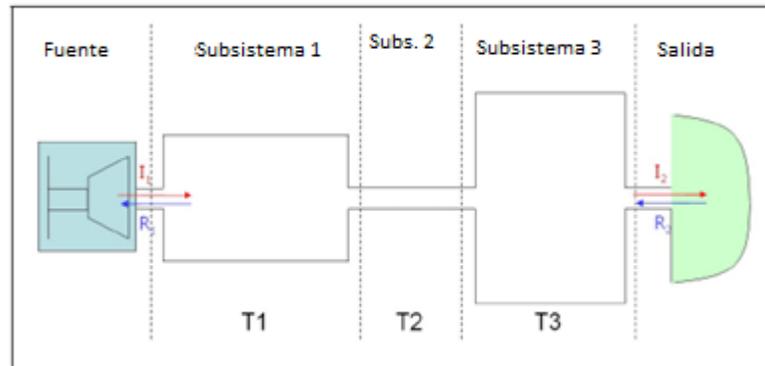


Figura 3.7 Metodología de método de transferencia de matriz,[33].

La pérdida de transmisión de sonido se puede evaluar con Actran y representar gráficamente con PltViewer la energía incidente y transmitida [34].

3.11 Elementos acústicos.

Los elementos que maneja Actran para la simulación acústica son los mismos que utilizan en el análisis de elemento finito, para otro tipo de software utilizan los elementos frontera para hacer la discretización del modelo [33].

En esta sección solo se utilizarán elementos de dos dimensiones, por lo cual el tiempo computacional será muy poco.

El orden de interpolación depende del modelo a solucionar y lo complejo que pueda estar, cuando es un modelo con una geometría simple, los resultados se pueden obtener sin problema con elementos lineales y cuando se tiene un modelo más complejo debemos utilizar elementos cuadráticos para poder analizar todos los puntos del modelo.

En la Figura 3.8, se muestra los elementos lineales y cuadráticos, el cuadrático tiene más nodos para geometrías más complejas.



Figura 3.8 Elementos lineal y cuadrático, de elemento finito en software Actran.

En la Figura 3.9, se tienen triángulos con elementos lineales y cuadráticos.

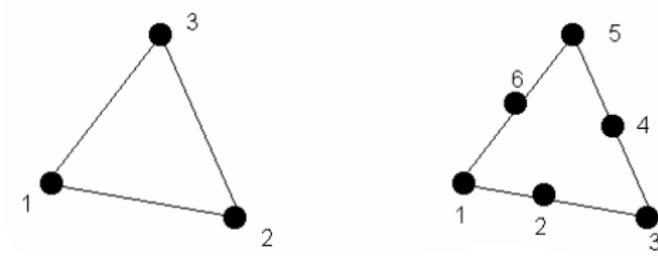


Figura 3.9 Elementos de triángulo con 3 y 6 nodos (lineales y cuadráticos).

En la Figura 3.10, se visualizan cuadrados con 4 y 8 elementos correspondiendo a elementos lineales y cuadráticos.

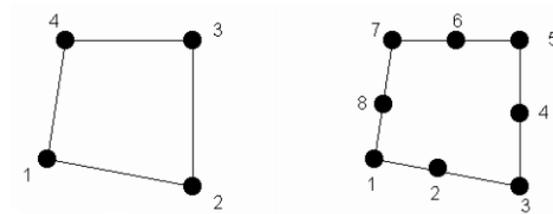


Figura 3.10 Elementos de rectángulo con 4 y 8 nodos (lineales y cuadráticos)

3.12 Conclusiones.

Todos los conceptos mostrados en este capítulo son en específico para tener una buena base de información para poder realizar la simulación de elemento finito (FEM), a partir de aquí se pueden diferenciar como estará dividido el modelo, y las ecuaciones que lo componen como son la ecuación de la onda y las ecuaciones constitutiva de compresión de un material hiperelástico. El elemento finito ayuda a conocer como es el comportamiento interno del sello a las condiciones que se requieren.

4 Capítulo 4 Simulación computacional.

4.1 Introducción.

La experimentación computacional se divide en dos procesos principales para obtener los resultados deseados, los cuales son: simulación estática no lineal y la simulación acústica.

El objetivo es de crear un modelo con las mismas características de las mediciones experimentales, como el tubo de impedancia es simétrico se puede

desarrollar el modelo computacional en 2D para ahorrar el costo computacional de los modelos 3D.

4.2 Simulación estática no lineal.

Este proceso de simulación se basó en la metodología antes mencionada, la cual es propuesta por el grupo MSC. El objetivo de esta simulación es tener una geometría del sello deformada con los parámetros utilizados en los análisis.

Los siguientes pasos son la obtención de la geometría del sello en 2D, el mallado de la geometría, el modelo que se utilizara y la obtención de la geometría deformada.

4.3 Geometría

La geometría que se utiliza en uno de los vehículos pesados se obtiene a través de todo el modelo 3D del vehículo, con este proceso también se obtiene los parámetros de compresión del sello con la puerta y el marco.

Como se muestra en la Figura 4.1, la parte exterior del sello es donde se encuentra la costilla, esto se necesita para conocer la dirección de la onda acústica.

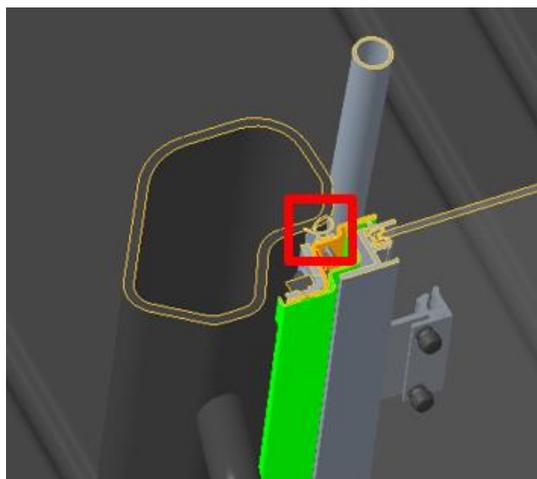


Figura 4.1 Cabina de vehículo con el sello adjunto.

La geometría se obtiene a través de la superficie en el software Creo, se exporta a un formato iges, como se visualiza en la Figura 4.2, para poder exportarlo al software MARC, donde se realiza el análisis estático.

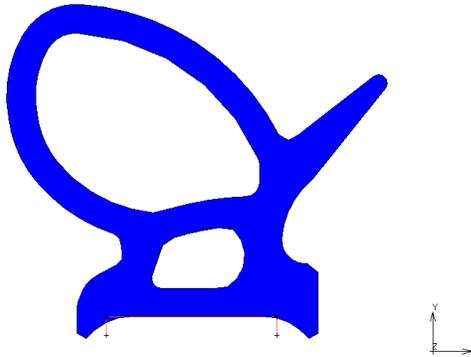


Figura 4.2 Sello sin deformación.

4.4 Mallado

Para el proceso de mallado se realiza en Apex, es en 2D con elementos cuadriláteros de 4 nodos. En este proceso se obtuvo el mallado con la ayuda de puntos por las orillas de la geometría, para tener un mejor control y calidad de elementos que son 1900 con un tamaño de 0.25mm, como se muestra en la Figura 4.3, esto tomando en cuenta que es un objeto pequeño y para tener mejor calidad en la deformación final.

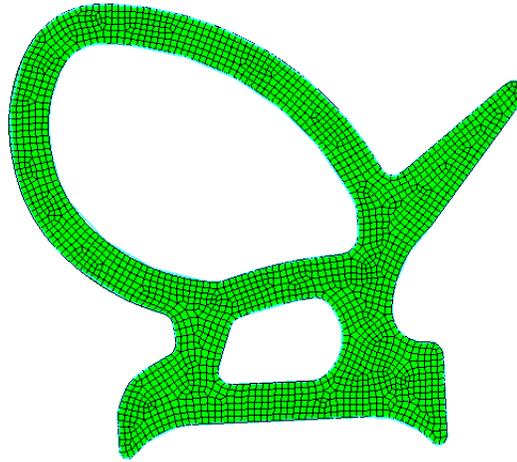


Figura 4.3 Mallado del sello.

4.5 Condiciones fronteras.

Las condiciones fronteras en el modelo están definidas por el marco y la puerta del vehículo, se comprime 6.11 mm con una superficie de contacto curva, y la base del sello está pegada al marco.

Este es un problema estático estructural y es un sistema que se divide en 3 partes.

El sello que tiene una malla para su deformación; la puerta es un elemento rígido donde se encuentra pegado el sello y el marco que también es una parte rígida que se encuentra estática.

En la Figura 4.4, se observa que tiene 3 contactos de interacción entre ellos, como se menciona anteriormente. Malla deformable (sello) y las interacciones geométricas rígidas (marco y puerta).

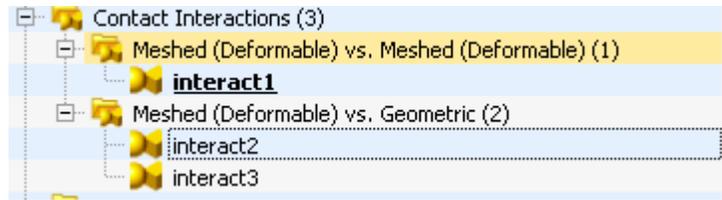


Figura 4.4 Interacciones de los contactos.

En la Figura 4.5 se puede ver las interacciones entre ellos en la siguiente figura, donde el sello y el marco tienen una interacción de contacto en movimiento y la puerta con el sello tienen una interacción de contacto fijo.

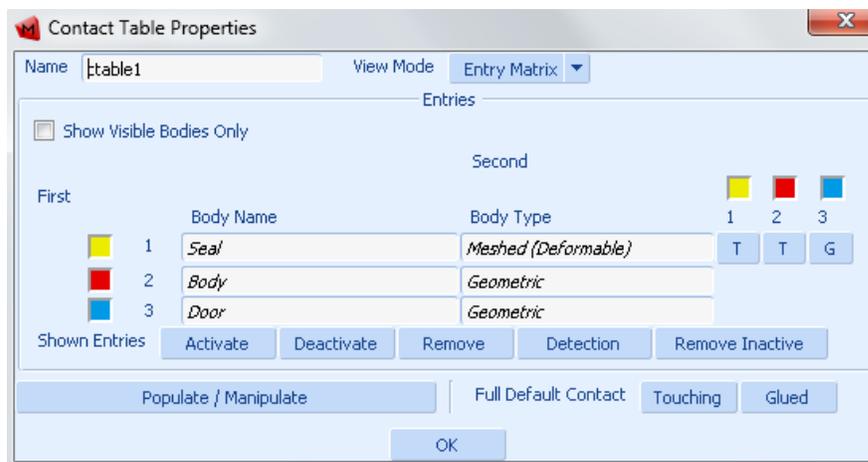


Figura 4.5 Lista de contactos, el sello va pegado con la puerta y hace interacción con el cuerpo.

En el siguiente diagrama (Figura 4.6), se explica cómo se establecen las condiciones fronteras, la parte fija que es la puerta (donde va pegado el sello), y el marco por la parte de arriba del sello para hacer la comprensión.

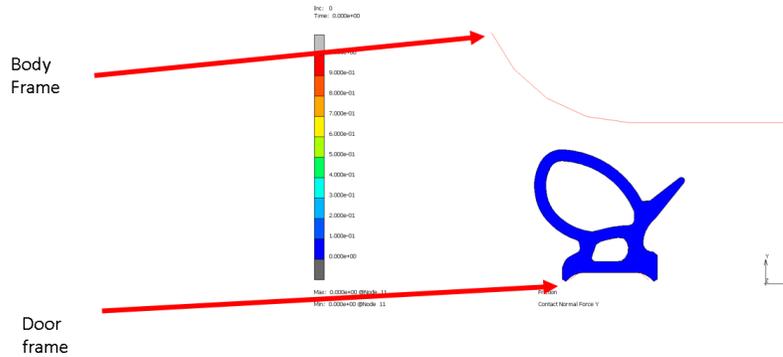


Figura 4.6 Condiciones frontera, el sello este fijo en la puerta y hace movimiento con respecto al cuerpo del vehículo.

Las condiciones de contacto son de fricción entre el sello y la puerta, que tiene un valor de 0.2, que es que se utiliza regularmente para elastómeros [35], como se muestra en la Figura 4.7.

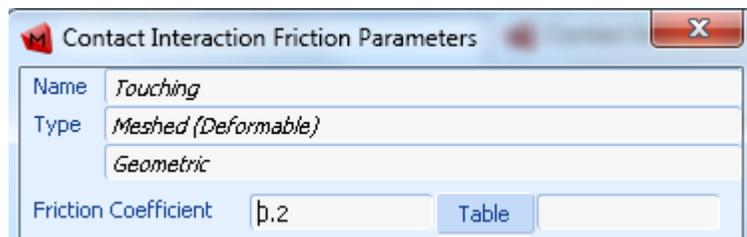


Figura 4.7 Condiciones de contacto entre el sello y la puerta.

4.6 Transición de resultados MARC-ACTRAN.

El sello deformado se obtiene a través de su malla deformada, a partir de esto se convierte la malla deformada en una geometría, para este proceso utilizamos STL e IGS, cuando se tiene la geometría deformada se hace un dibujo CAD del sello dentro del tubo de impedancia con todas sus dimensiones.

A partir del modelo CAD se realiza el mallado con las limitaciones de frecuencia que se tienen en la simulación acústica y se realiza el modelo acústico para poder obtener los resultados finales en *TL*.

4.7 Simulación acústica.

La simulación acústica del sello consta de varias partes y tienen como objetivo determinar la pérdida de transmisión de ruido (TL), las partes involucradas son las siguientes: creación de geometría con sello y tubo de impedancia; mallado de modelo; condiciones frontera y obtención de resultados.

Para iniciar la solución se sigue con la siguiente ecuación en Actran [36]:

$$(K + i\omega C - \omega^2 M) x(\omega) = F(\omega) \quad \text{Ec. 4.1}$$

Para una solución de un tubo de impedancia de forma rectangular, se utiliza la ecuación de Helmholtz que nos lleva a la impedancia acústica de un material que es la siguiente [37]:

$$Z = \rho c \frac{1+r}{1-r} \quad \text{Ec. 4.2}$$

Donde:

Z = impedancia acústica.

r = coeficiente de reflexión.

4.8 Geometría.

Lo que se debe tomar en cuenta para la geometría del tubo de impedancia es que se debe modelar el fluido dentro del tubo, esto para que se pueda desarrollar la transferencia de matriz, que tiene las variables de velocidad y presión en un fluido, en este caso el aire dentro del tubo.

La dirección de fluido va de izquierda a derecha, la parte azul dentro del tubo es la representación del aire, la parte roja es del marco, la gris de la puerta y el sello está en color negro, como se muestra en la Figura 4.8.

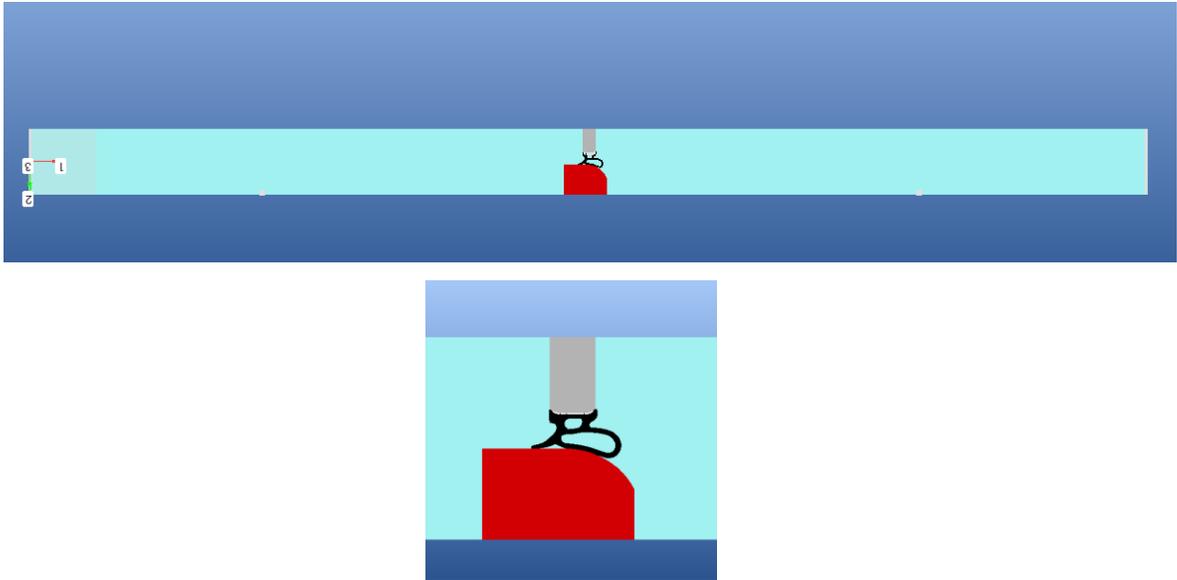


Figura 4.8 Modelo de tubo de impedancia con sello en Apex.

4.9 Mallado.

El mallado en la simulación acústica es importante, ya que tiene parámetros por la ecuación de la onda, en el software Actran tiene un módulo donde calcula el tamaño de elemento según las frecuencias que se van a presentar.

El tamaño máximo de elemento para nuestro modelo que va de las frecuencias de 300 a 2800 Hz es de 15 milímetros. En el modelo se tiene elementos de 1 milímetro ya que no involucra costo computacional extra por ser un modelo en 2D, como se muestra en la Figura 4.9, el módulo indicador de mallado mínimo para el modelo según las frecuencias a analizar (está en metros).

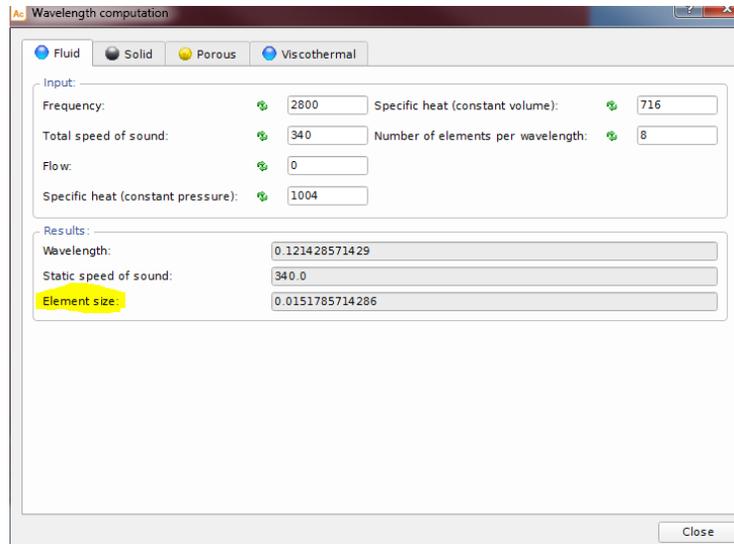


Figura 4.9 Modulo indicador de tamaño, de elemento necesario para simulación.

En la Figura 4.10 se muestra el mallado es de forma cuadrilátera con elementos cuadráticos, esto para unir la malla en las intersecciones del modelo, utilizando la herramienta de unir nodos.

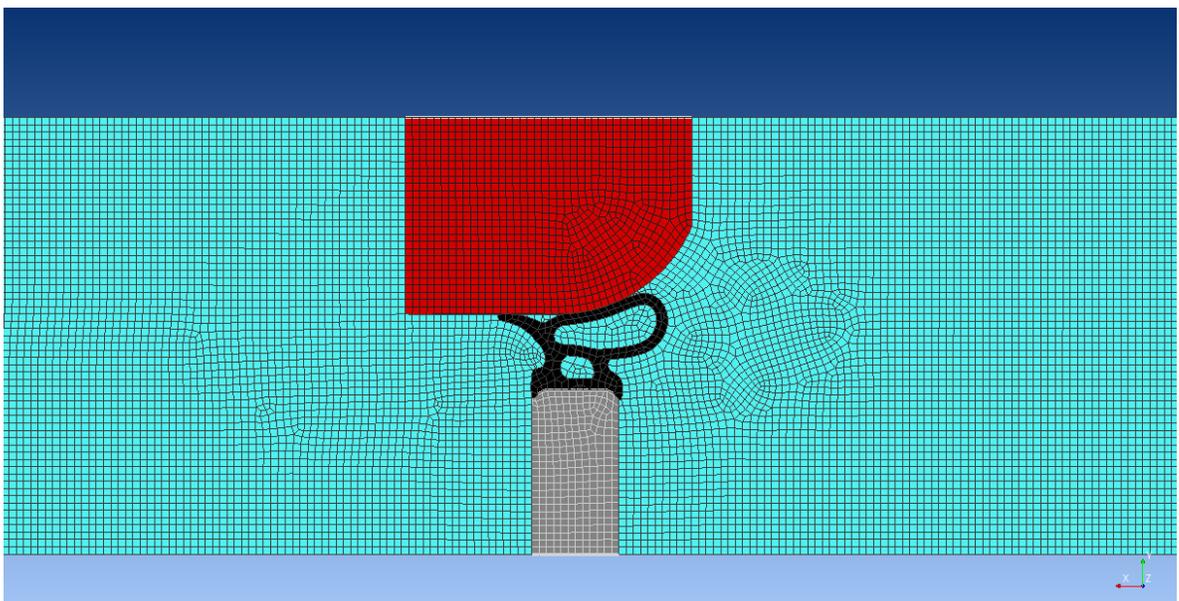


Figura 4.10 Mallado acústico cuadrático. Azul; fluido, rojo; superficie de contacto, negro; sello y gris; prensa de compresión.

4.10 Condiciones frontera.

En el modelo acústico las condiciones fronteras son la parte más importante del modelo, ya que, si no se especifican bien, los resultados pueden variar en comparación con los resultados experimentales.

Como es un modelo de un tubo de impedancia uno de los puntos más importantes es la generación de una onda plana, esto para que las presiones y velocidades del fluido sean las mismas en cualquier punto de la sección transversal.

Primero se definen las partes en el modelo, como ya se ha mencionado anteriormente, se muestra en la Figura 4.11:

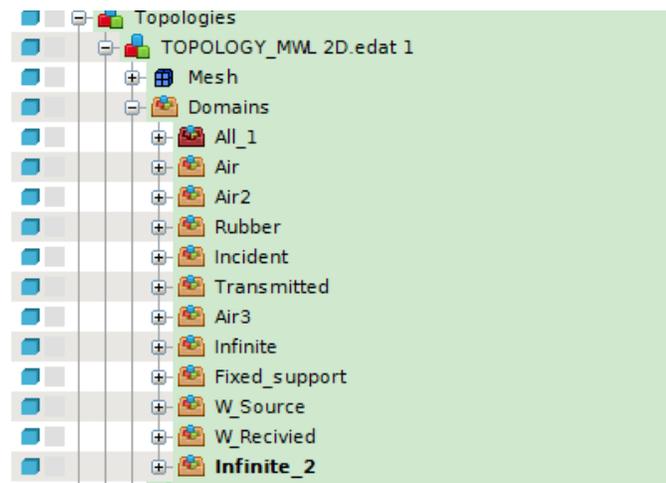


Figura 4.11 Dominios del modelo.

Después de este paso se definen las propiedades de los materiales, al ser dependientes de la frecuencia se pueden modelar de manera tabular o gráficamente. Son 4 materiales diferentes en el modelo; el aire, el acero, el material impreso (PLA), y el sello que es un elastómero. En las propiedades de los materiales los parámetros que más influyen son el módulo de elasticidad, el módulo de poisson, el amortiguamiento y la densidad. Este último es una

propiedad directamente proporcional a la ley de la masa por lo que es muy importante.

En la Figura 4.12, se muestran los diferentes materiales que se utilizaron en el modelo de tubo de impedancia como se menciona anteriormente.

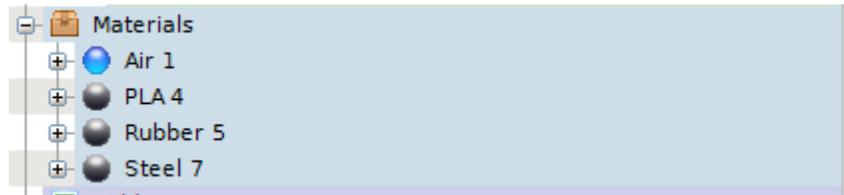


Figura 4.12 Lista de materiales en Actran.

El proceso continuó con los parámetros del modelo como son las frecuencias de trabajo y selección de componentes en el modelo.

Para modelar la onda plana dentro del tubo se utiliza el componente ducto modal que sirve para tener en cuenta que el fluido está dentro de un tubo y tiene una onda plana.

Una de las condiciones para que se cumpla las propiedades del tubo de impedancia es que tenga una terminación anecoica y se puede modelar en el mismo componente de ducto modal.

La condición de desplazamiento fijo en la parte del sello para que los modos de vibración no afecten los resultados.

Por último, el post procesamiento del modelo se puede representar de varias maneras, pero la que nos interesa es la gráfica en función de frecuencia para ver las diferencias de TL entre resultados experimentales y computacionales.

En la Figura 4.13, se muestra las condiciones frontera, los componentes y el post procesamiento que se tienen en el modelo del tubo de impedancia.

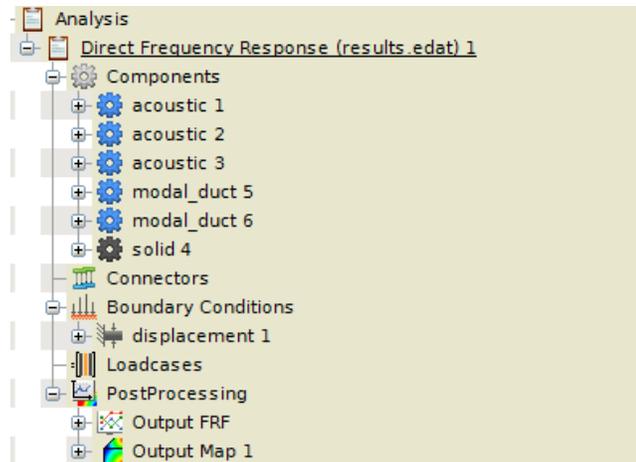


Figura 4.13 Componentes del modelo.

Los parámetros de entrada y salida del ducto modal se muestran en la Figura 4.14, que es de 1 Pascal de amplitud y su salida es libre, ya que cuenta con la terminación de la bocina.

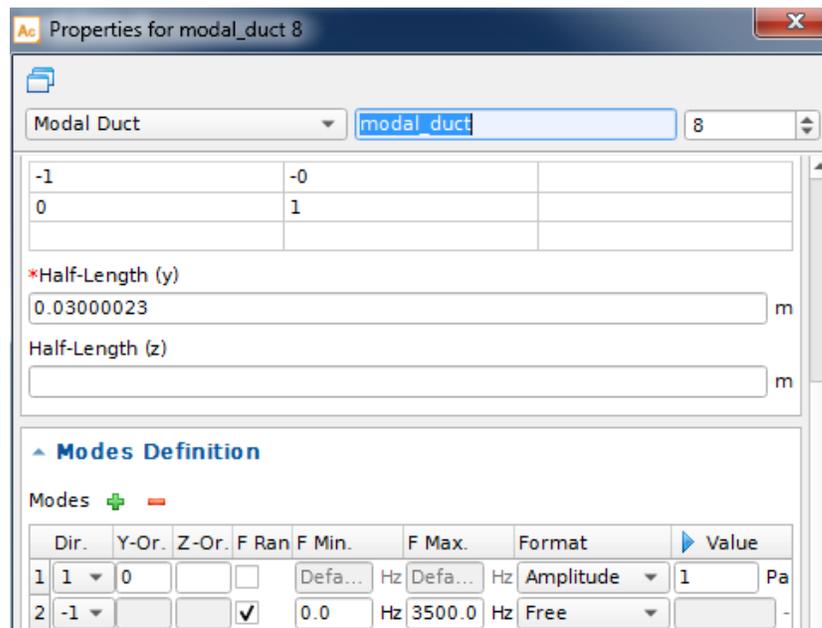


Figura 4.14 Parámetros del ducto modal en Actran.

En la Tabla 4.1, se muestran los valores de entrada y salida de cada componente del modelo en Actran.

| Componentes | Entrada | Salida |
|----------------------|-------------------------|--------|
| Ducto modal (bocina) | 1 Pascal | Libre |
| Ducto modal (salida) | N/A | Libre |
| Desplazamientos | Fijo | N/A |
| Acústicos | Propiedades de material | N/A |
| Sólido | Propiedades de material | N/A |
| Post FRF | | TL |

Tabla 4-1 Parámetros de entrada y salida del modelo de tubo de impedancia en Actran.

4.11 Conclusiones.

Este capítulo da a conocer el funcionamiento de los diferentes componentes que se utilizaron para realizar el modelo final, gracias a que la simulación es en 2D, el tiempo del análisis fue menor. La medición de Transmission Loss nos sirve para obtener las pérdidas dentro del sistema del tubo de impedancia y es por eso que se tiene que modelar el tubo de impedancia en la simulación acústica, para que los datos de entrada sean lo más parecidos que a la experimentación.

5 Capítulo 5 Pruebas experimentales.

5.1 Introducción.

Para el proceso de medición de prueba experimental, se realizó un estudio de mercado para analizar la opción más barata y confiable de obtener los resultados. Otro aspecto fue el espacio requerido para hacer la prueba de aproximadamente 25 m². Las dos opciones más confiables y utilizadas son la cámara anecoica y el tubo de impedancia.

Como se dice en la descripción de cada método en los capítulos anteriores, el espacio para desarrollar cada prueba es muy diferente. Por parte de la cámara anecoica se requieren al menos dos cuartos de al menos 63m³. Y por el tubo de impedancia el volumen es menor a 1m³.

Por otro lado, en todo papel de ingeniería es tomar en cuenta la reducción de costos. El diseñar y hacer una cámara anecoica tiene costos muy elevados por los materiales a utilizar, sin embargo, el tubo de impedancia tiene muy bajos costos por el tamaño y los materiales que se pueden utilizar. Por todo lo analizado se optó por hacer el tubo de impedancia.

5.2 Variables.

Las variables por medir fueron propuestas por el grupo de Vibraciones y Acústica de la empresa Caterpillar las cuales son:

- Nivel de compresión en sello
- Geometría de sello
- Superficie de contacto

Las variables tienen los siguientes parámetros para la geometría del sello D1, se muestran en la Tabla 2:

| D1 Geometría de sello. | | | |
|------------------------|-----------------|---|---|
| Superficie de contacto | compresión (mm) | | |
| Base | 6 | 7 | 5 |
| Plana | 6 | 7 | 5 |
| Cordón de soldadura | 6 | 7 | 5 |

Tabla 5-1 Variables de las mediciones en el tubo de impedancia con el sello D1.

Las variables de mediciones en el tubo de impedancia para la geometría de sello D2 se muestran en la Tabla 3:

| D2 Geometría de sello. | | | |
|------------------------|-----------------|---|---|
| Superficie de contacto | compresión (mm) | | |
| Base | 6 | 7 | 5 |
| Plana | 6 | 7 | 5 |
| Cordón de soldadura | 6 | 7 | 5 |

Tabla 5-2 Variables en las mediciones en el tubo de impedancia con el sello D2.

La primera variable de nivel de compresión es para ver las diferencias cuando se tiene mayor o menor compresión, primero se realizaron las diferentes deformaciones del sello como se muestra en la Figura 5.1:

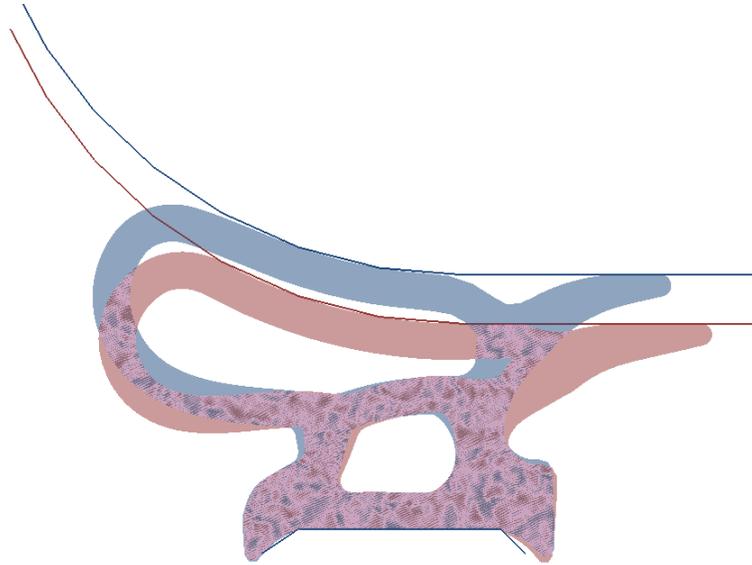


Figura 5.1 Diferentes compresiones en el sello D1.

La segunda variable es la geometría del sello en el cual se tienen dos diferentes geometrías para analizar cuál es la que tiene mejor comportamiento acústico. Las cuales se llaman D2 y D1, como se muestra en la Figura 5.2:



Figura 5.2 Geometría D2 (izquierdo) y geometría D1 (derecho) con diferente compresión.

La última variable y la más importante que interesa conocer es la superficie de contacto del sello, ya que, por imperfecciones en el proceso de manufactura, puede tener diferentes situaciones, las cuales se van a analizar tres, que son superficie curva, superficie plana y superficie con cordón de soldadura, como se

muestra en la Figura 5.3. Con estas el sello va a tener diferentes compresiones y se analizaran cada una de ellas.

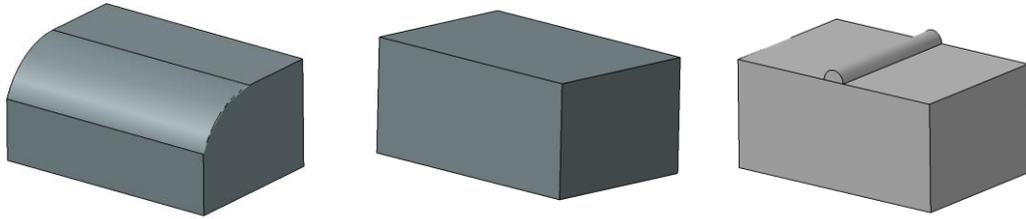


Figura 5.3 Superficie de contacto curva, plana y con cordón de soldadura (izquierda a derecha).

5.3 Diseño de tubo de impedancia.

Una característica importante en el tubo de impedancia es el material según el ASTM 2611, menciona que el tubo debe de ser lo suficientemente rígido para no tener reverberación. Se opto por costo y manufactura Acrílico para el tubo y acero para la prensa.

En la Figura 5.4, está el concepto de tubo de impedancia, a partir de este modelo, se define las características del equipo y que componentes tendrá.

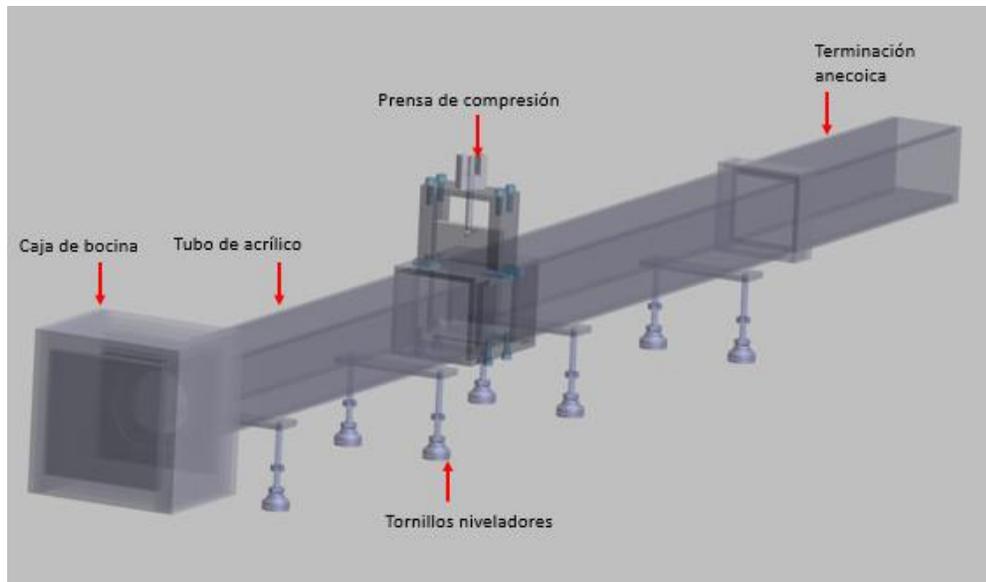


Figura 5.4 Concepto de tubo de impedancia en 3D.

A partir del concepto se diseña el tubo de impedancia con los parámetros de manufactura y materiales para conocer sus características, como se muestra en la Figura 5.5.

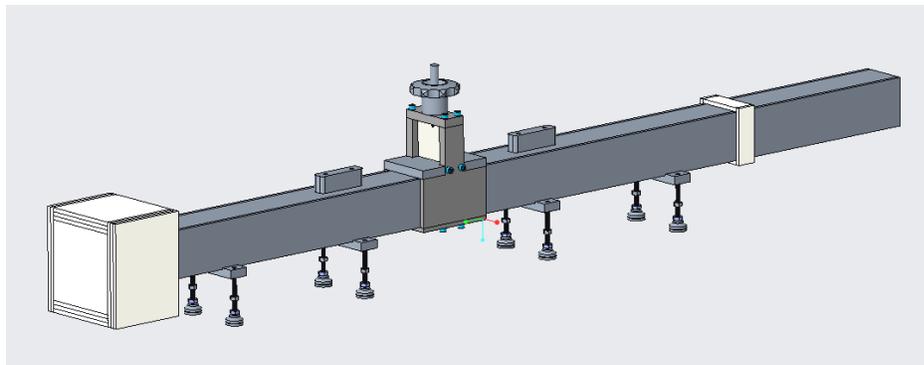


Figura 5.5 Diseño de tubo de impedancia en 3D (Creo).

5.4 Parámetros.

Los parámetros importantes para el diseño del tubo de impedancia son las frecuencias de medición a las que se van a trabajar, en este trabajo se quieren analizar las frecuencias a partir de los 300 Hz y hasta los 2700 Hz.

Con las fórmulas en los capítulos anteriores se pueden caracterizar de una manera sencilla y se pueden obtener los límites del tubo.

El tubo tendrá un diámetro de 0.06 m. y 1 m de largo:

$d = 0.06\text{m}$ (rectangular)

$l = 1\text{m}$

Max Frecuencia:

$$f < 0.500 \frac{c}{d} = 0.5 \left(\frac{340\text{m}}{0.06\text{m}} \right) = 2833 \text{ Hz}$$

Min Frecuencia:

$$f > 0.75 \frac{c}{(l-d)} = 0.75 \left(\frac{340\text{m}}{(1\text{m}-0.1\text{m})} \right) = 271\text{Hz}$$

En la Figura 5.6, se muestra el dibujo del tubo de impedancia con sus parámetros de manufactura.

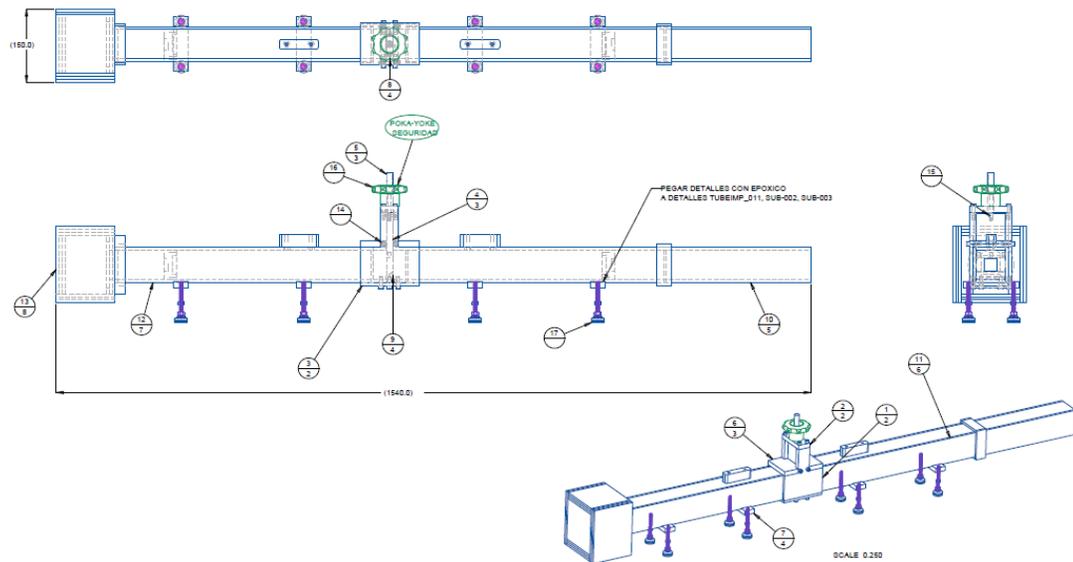


Figura 5.6 Dimensiones y tolerancias geométricas para la manufactura.

5.5 Manufactura de tubo de impedancia.

Para la manufactura del tubo, se obtuvo la ayuda de la empresa Caterpillar, en el área de Tool Room. Se maquino la prensa con fresadora, para poder tener el movimiento necesario de compresión en el sello.

En la Figura 5.7, se visualiza la caja de la bocina, la cual está hecha de acrílico y pegada con epoxi, y los tornillos niveladores que le darán soporte al tubo de impedancia.



Figura 5.7 Caja de bocina y tornillos niveladores.

La Figura 5.8, muestra los tubos de acrílico con forma rectangular y están pegados con epoxi para evitar fugas de ruido.



Figura 5.8 Tubos de acrílico.

La prensa está hecha de acero, ya que es un material fácil de maquinar y lo suficientemente resistente para hacer compresión al elastómero, Figura 5.9.



Figura 5.9 Prensa de compresión.

La longitud de todo el ensamble del tubo de impedancia es de aproximadamente 1.5 metros, Figura 5.10.



Figura 5.10 Tubo de impedancia ensamblado.

Figura 5.11, las bases de los micrófonos se realizaron con una impresora 3D, de material PLA, para sujetar los micrófonos y que no tenga fugas de ruido.

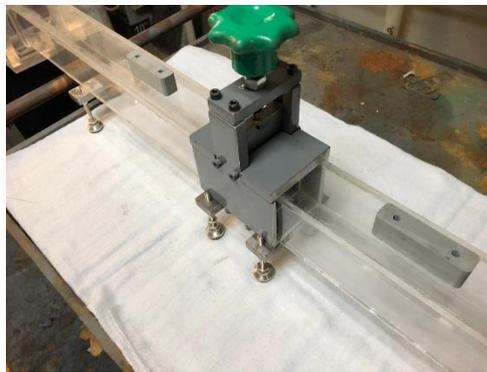


Figura 5.11 Bases de micrófono impresos en 3D.

5.6 Materiales para la medición.

Los equipos de medición fueron obtenidos por la UANL, los cuales eran 4 micrófonos, una tarjeta de adquisición de datos y el software para el análisis de resultados:

- 1 amplificador de energía 150w (Dayton Audio)
- 1 speaker 8 ohm 3"

- 4 micrófonos GRAS
- 1 tarjeta de adquisición de datos National Instruments
- 1 laptop

Figura 5.12, los materiales de medición se seleccionaron para reducir los costos y tener confiabilidad en los resultados.



Figura 5.12 Proceso de adquisición de datos experimentales.

5.7 Prueba de tensión/compresión de sello.

La prueba de compresión del sello se realizó en el laboratorio de CIQA, en una maquina universal, para poder obtener la curva esfuerzo deformación, se realizó como referencia el estándar ASTM D 695, ya que al no poder obtener una probeta de prueba se realizó sobre el producto que es el sello, los resultados se muestran en la Figura 5.13.

Se realizaron 5 corridas, en las cuales se obtuvo un promedio de datos para una mejor representación.

El área del sello considerada es de, 18 mm ancho, 17 mm alto y 127 longitud.

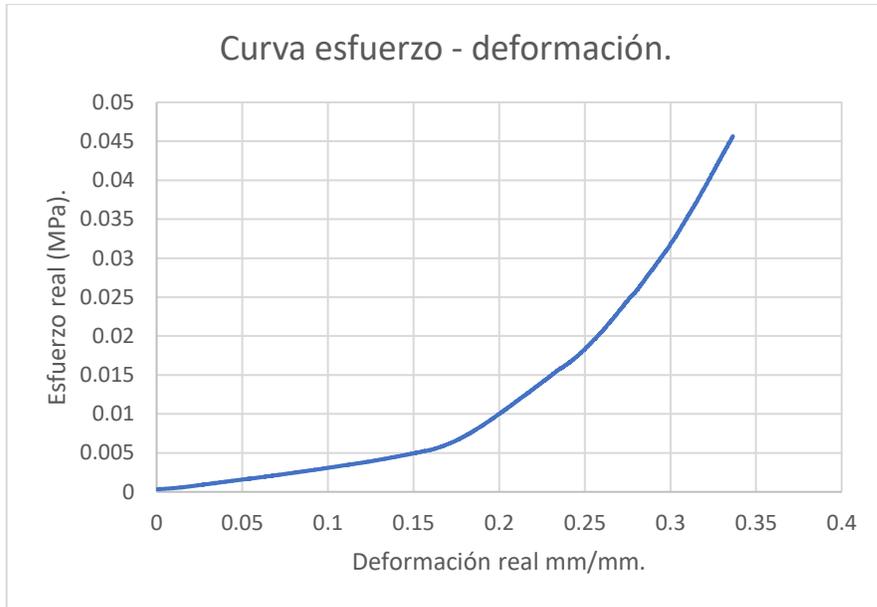


Figura 5.13 Prueba de compresión uniaxial en el sello para obtención de la curva esfuerzo - deformación.

El arreglo de curvas se realiza en MARC, como se menciona en el capítulo 3, la mayor característica es obtener los coeficientes de Mooney Rivlin, para obtener los datos de entrada en la simulación no lineal, en la Figura 5.14, se muestra la gráfica en la cual se agregan los datos experimentales de la prueba de compresión y el software hace los cálculos para obtener los coeficientes que se necesitan según el modelo.

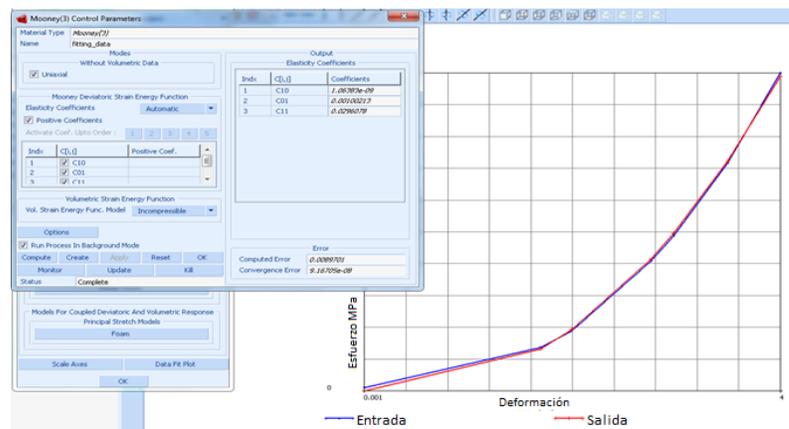


Figura 5.14 Arreglo de curvas de una prueba uniaxial, utilizando el modelo Mooney Rivlin de tercer grado.

Los coeficientes que se obtuvieron fueron los siguientes:

$$C10 = 1.06e-9$$

$$C01 = 0.00100213$$

$$C11 = 0.0296078$$

Los valores de las propiedades dinámicas a los que se están sometiendo las simulaciones, se obtuvieron de una investigación, la cual, utilizan un material con las propiedades muy cercanas al nuestro. La relación de amortiguamiento es de 0.16, densidad de 370 kg/m³ relación de poisson de 0.4, y un módulo de elasticidad de 7.08 MPa, [38].

Estos valores se basan en las mismas características del sello que se está utilizando en esta investigación, la caracterización de las propiedades dinámicas del material se obtuvo en una prueba de análisis mecánico dinámico como se menciona en el capítulo 3.

5.8 Conclusiones.

Las pruebas experimentales se realizaron en un tubo de impedancia, esto haciendo un análisis de cual método era más factible para nosotros de utilizar. Con ello se seleccionaron los materiales más fáciles de manufacturar y más económicos. El proceso de medición experimental se basa en diferentes pasos para la obtención del resultado esperado, TL.

6 Capítulo 6 Resultados y discusión.

6.1 Introducción.

El proceso de simulación computacional tanto el de medición experimental, tienen como objetivo tener cierta correlación en los resultados, los datos se analizaron por medio de graficas de TL con respecto a la frecuencia. Teniendo como respuesta puntual cuales son las frecuencias más afectadas por el ruido dentro de un vehículo.

6.2 Proceso experimental.

Las mediciones en el tubo de impedancia se hicieron en base al estándar del ASTM 2611-19, en el que viene descrito el proceso y los puntos importantes a cuidar cuando se realizan las mediciones.

En la Figura 6.1 se muestran los resultados de TL del sello D1 con una superficie de contacto curva en el tubo de impedancia a diferentes compresiones. Al inicio de las mediciones existe una zona de bajo TL , que se atiene a la ley de la masa, al tener diferentes compresiones se puede ver que al tener mayor compresión el TL aumenta, esto por aumentar la rigidez del sello, en la zona de los 2700 Hz existe una resonancia, de la cual se obtiene por la geometría del tubo de impedancia, al no tener la capacidad de medir esa longitud de onda, existen fugas las cuales se visualizan en los resultados.

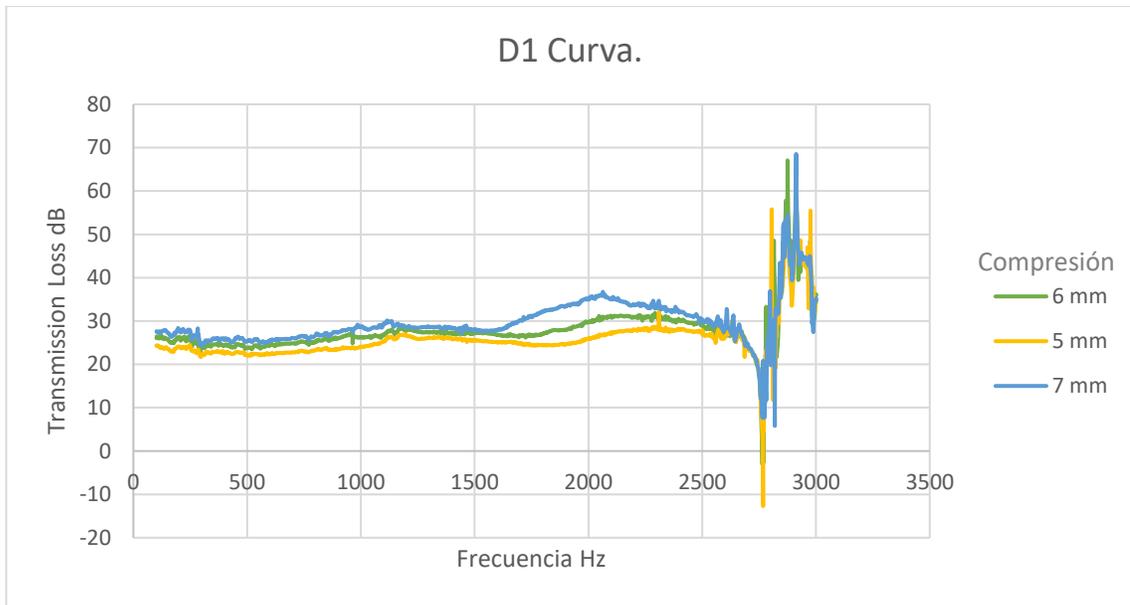


Figura 6.1 Resultados de TL de D1 con superficie curva.

En la Figura 6.2 se muestran los resultados del sello D1 con una superficie plana en el tubo de impedancia a diferentes compresiones, los datos muestran la misma variación que los resultados pasados, solo que con una disminución de TL en general que se debe a la superficie de contacto y las fugas que tienen en el sello, ya que el sello de D1 está diseñado para la superficie curva.

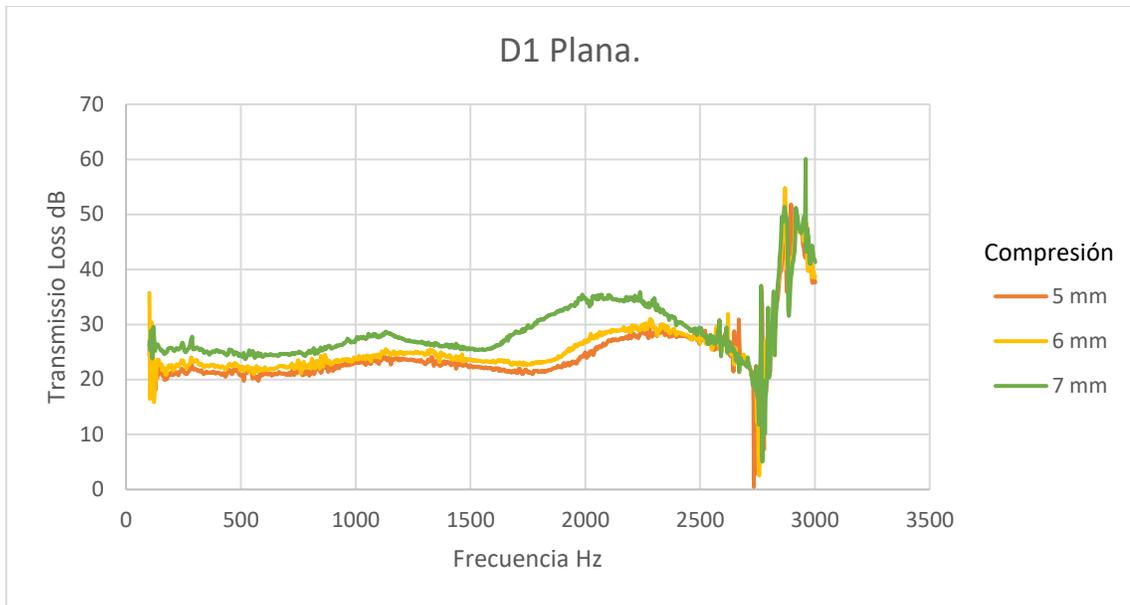


Figura 6.2 Resultados de TL de D1 con superficie plana.

En la Figura 6.3 se muestran los resultados de TL del sello D1 a diferentes compresiones a una superficie de contacto con cordón de soldadura, el contacto de superficie con cordón de soldadura es un concepto para proporcionar o medir que tanto afecta en el TL , como se puede ver, disminuye al tener ciertas fugas u orificios en el modelo, sin embargo, la tendencia de las compresiones sigue siendo la misma, al aumentar la compresión el TL aumenta.

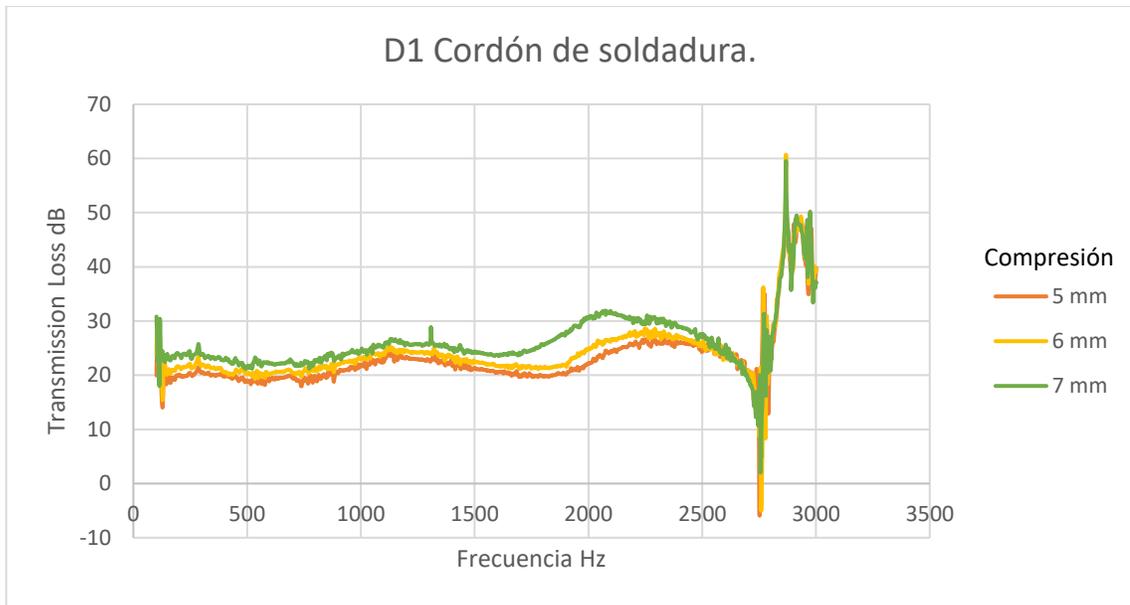


Figura 6.3 Resultados de TL de D1 con cordón de soldadura.

En la Figura 6.4 se muestran los resultados de TL en el sello D2 a diferentes compresiones con una superficie de contacto curva, el sello D2 muestra diferentes propiedades al de D1, con esto se tienen diferentes resultados, sin embargo, las tendencias son similares, siguen la ley de la masa y a las limitaciones de medición del tubo de impedancia, entre las frecuencias 0-300 y 2700-3000 existen resonancias por la geometría del tubo y la longitud de la onda. El TL va en aumento a partir de las 1700 Hz basándose en, si existe mayor densidad o frecuencia, va a aumentar.

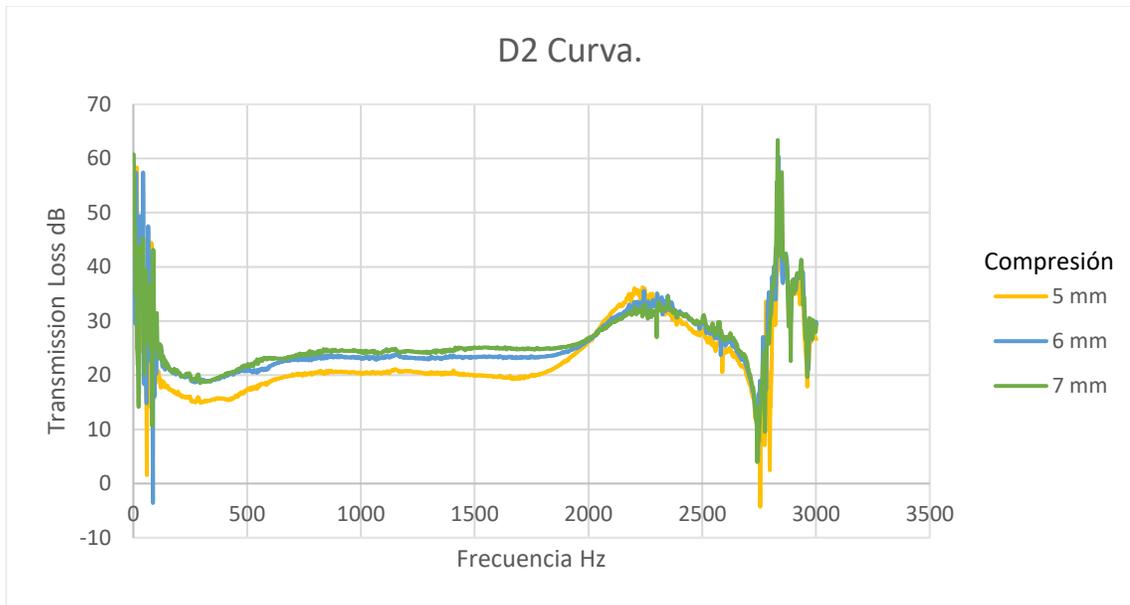


Figura 6.4 Resultados de TL de D2 con superficie curva.

En la Figura 6.5 se muestran los resultados del sello D2 con una superficie plana en el tubo de impedancia a diferentes compresiones, el TL tiene una tendencia similar a la superficie curva, esto es a que la geometría del sello D2 se puede adaptar a la superficie curva o plana, pero sigue teniendo las mismas resonancias dentro del tubo de impedancia.

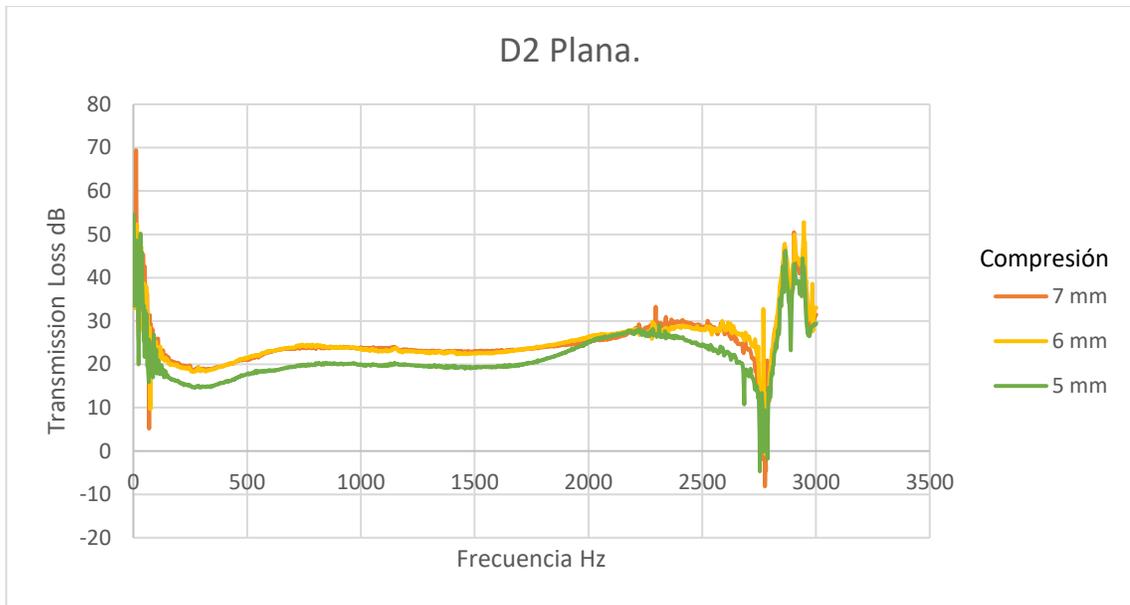


Figura 6.5 Resultados de *TL* de D2 con superficie plana.

En la Figura 6.6 se muestran los resultados de *TL* del sello D2 a diferentes compresiones a una superficie de contacto con cordón de soldadura, el *TL* tiene una disminución en el rango de frecuencias a estudiar, por las fugas que se generan en el sello al tener diferente deformación en el contacto, las resonancias en los extremos de las frecuencias siguen por las capacidades de medición del tubo de impedancia.

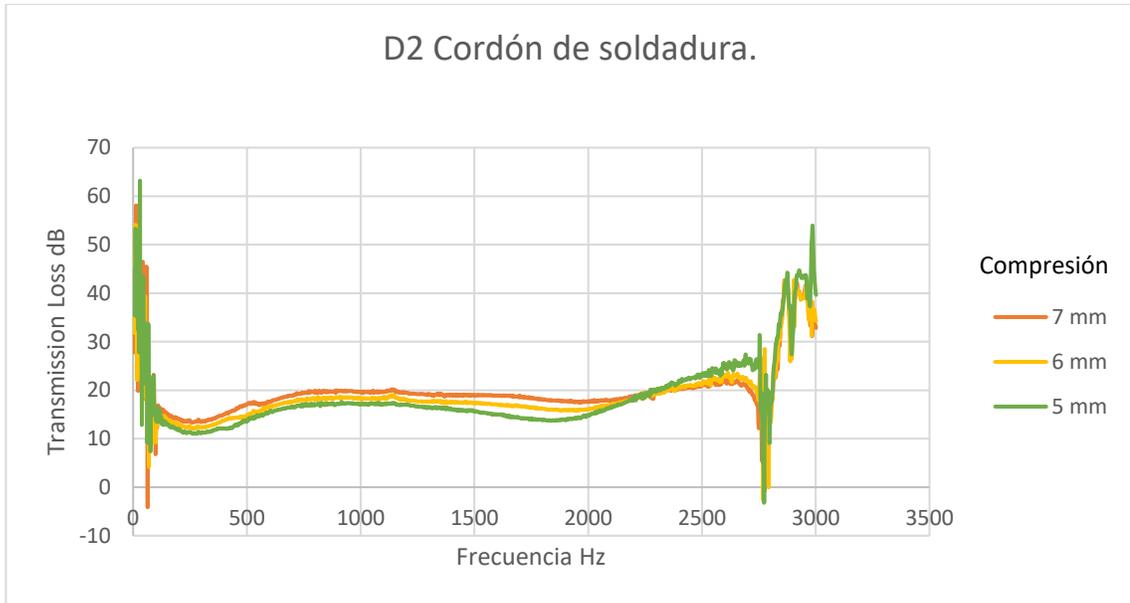


Figura 6.6 Resultados de TL de D2 con cordón de soldadura.

En la Figura 6.7 se muestra el mejor contacto de superficie en el sello D1 con una misma compresión, como se explicó en las variables a medir, se tienen 3 superficies de contacto, para los resultados del sello D1 en las 3 diferentes superficies de contacto, la mejor es la curva, ya que su diseño le permite tener mejor rigidez y acoplamiento en esta superficie y se refleja en el TL , como se puede observar en la Figura 6.7:

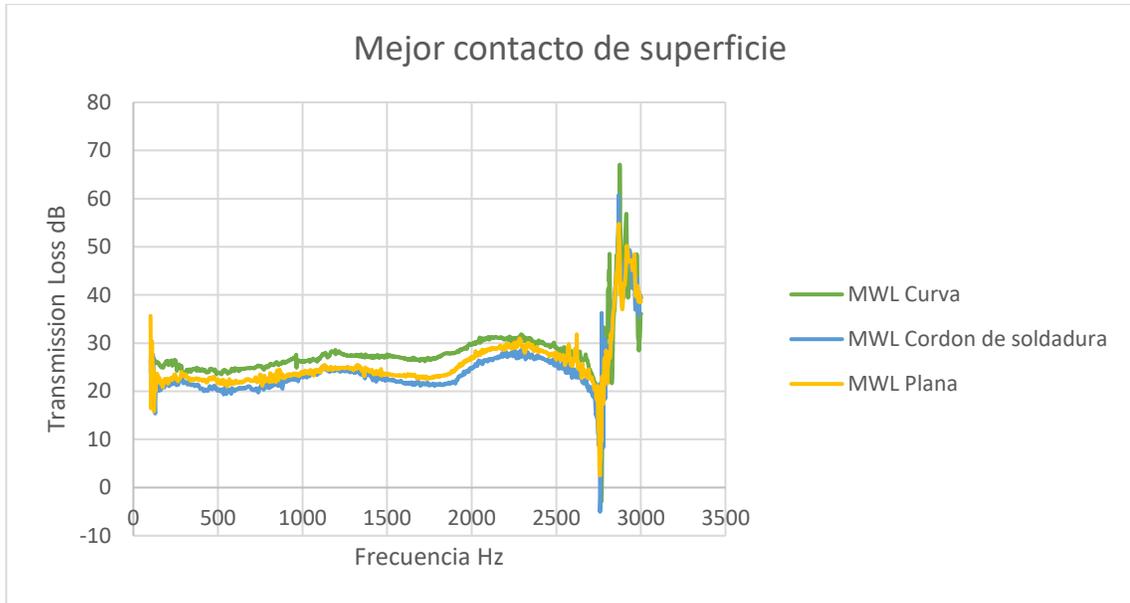


Figura 6.7 Resultados de TL de D1 con la mejor superficie de contacto.

En la Figura 6.8 se tiene la comparación de resultados de diferentes geometrías de sello a una misma superficie y a una misma compresión, las diferencias entre los sellos son que el D1 tiene mayor densidad, y mejor respuesta a la compresión, mientras el D2 tiene fugas en la compresión de este, por esto, aunque tenga mayor geometría, si se analizan los dos a una misma compresión, el D1 tiene mejor respuesta de TL .

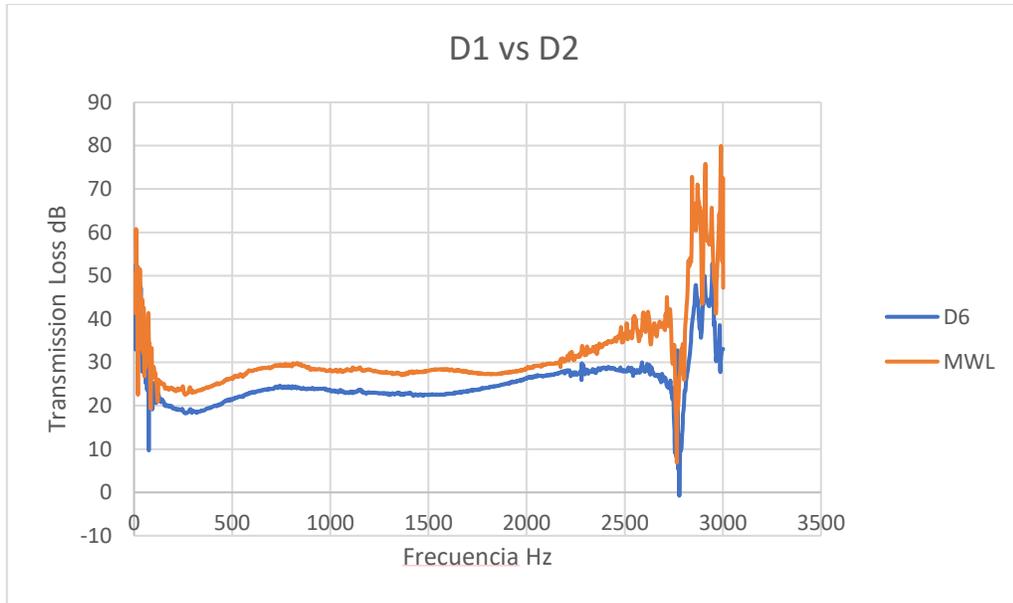


Figura 6.8 Resultados de *TL* en comparación del D2 con D1.

6.3 Proceso de correlación con FEM

Comparación de resultados experimentales (tubo de impedancia), con resultados FEM en el software Actran. Para tener resultados aceptables se realizó esta correlación, uno de los puntos importantes es que se debe modelar todas las piezas utilizadas en la medición experimental, así como sus propiedades de los componentes.

Se agregó al modelo los componentes de superficie de contacto, la prensa de compresión el sello y el tubo de impedancia, como se ve en las Figuras 6.9 y 6.10, se tienen diferencias de 1 mm de espesor en algunas paredes del sello entre el modelado y la extrusión.

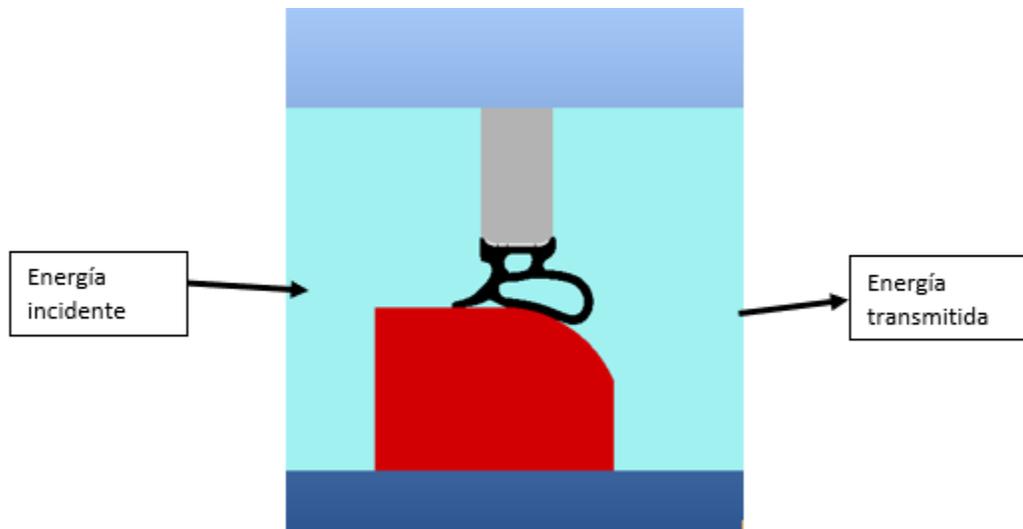


Figura 6.9 Modelo 2D en Actran, con superficie de contacto, prensa de compresión, tubo de impedancia y sello D1.

En la Figura 6.10 se muestran con las flechas amarillas las diferencias de alrededor de 1 mm entre el modelo CAD y el sello en extrusión, variaciones por el proceso de manufactura del material.

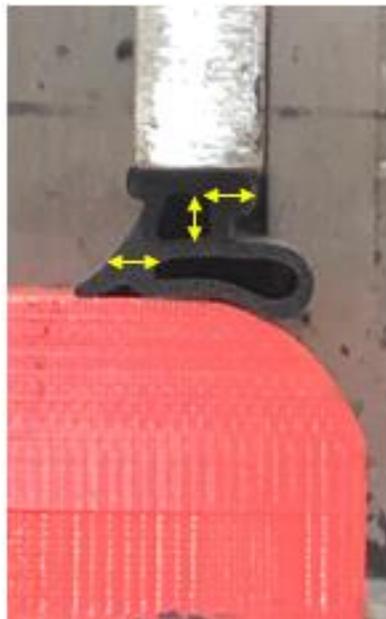


Figura 6.10 Sección transversal del tubo de impedancia con sello D1.

En la Figura 6.11 se muestra que, los resultados tienen una variación menor a 5 dB, entre el rango de 300 a 2700 Hertz, en los extremos la variación aumenta, esto se debe a las limitaciones geométricas del tubo de impedancia, ya que no se pueden desarrollar longitudes de onda fuera del rango de frecuencias. Al igual el TL es de alrededor de 35 dB, y va aumentando poco a poco según la frecuencia, el objetivo es reducir el ruido entre 1 a 3 KHz.

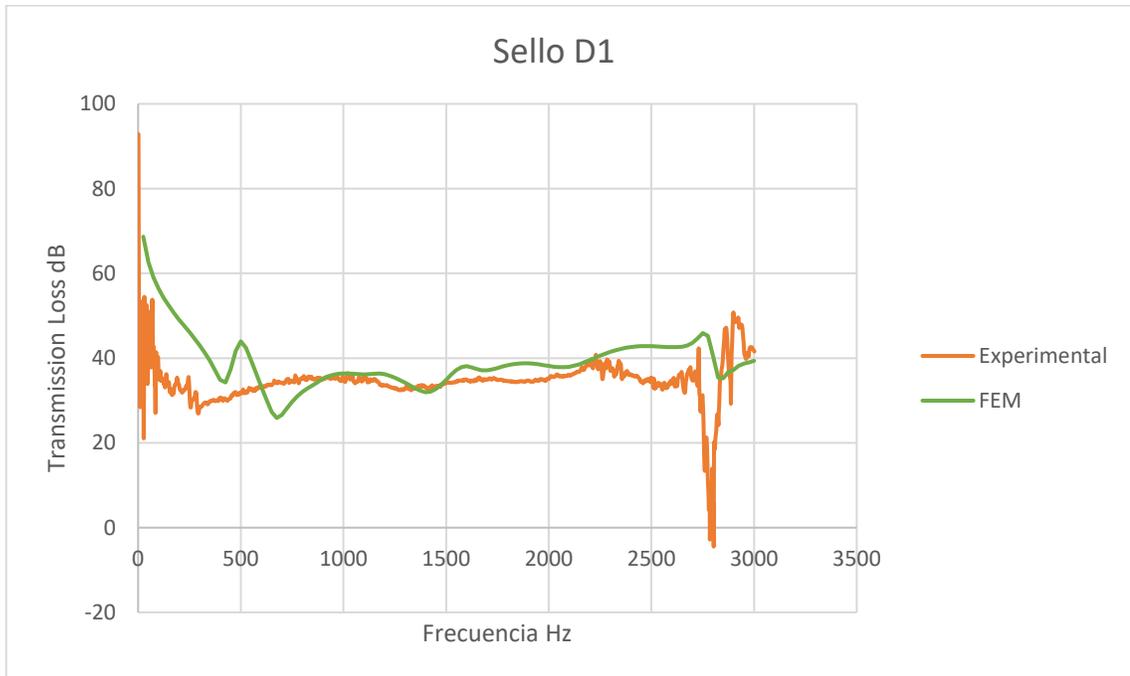


Figura 6.11 Comparación de resultados de TL entre experimentación y FEM.

Los resultados muestran cierta tendencia, cuando hay mayor compresión el TL es mayor, en cualquiera de las dos geometrías, también tiene cierta mejoría al tener más contacto con la superficie de contacto como es la superficie curva. Por último, la superficie de contacto con imperfección (cordón de soldadura) tiene más afectación de fuga y por ende tiene menor TL .

Las diferencias de resultados entre el sello D1 y D2, son notables, esto es en base a las propiedades de los materiales, y específicamente en su densidad.

La comparación entre resultados experimentales y FEM, se notan muy cercanas entre el rango de interés, que es de 300 Hz a 2700 Hz, fuera de los límites de estas frecuencias se encuentran más diferencias de resultados, esto por los límites de medición del tubo de impedancia.

7 Capítulo 7 Conclusiones generales y recomendaciones.

7.1 Conclusiones de la tesis.

La investigación de reducción de ruido en cabinas de vehículos se realizó con dos métodos, dando peso a la correlación de resultados para poder tener una base de nuevos datos que pueden contribuir a una optimización de diseño.

Se diseño y se manufacturo el equipo de experimentación (tubo de impedancia), según las capacidades y las variables que se requerían para la investigación, siguiendo con todos los lineamientos del estándar del ASTM 2611-19, para obtener resultados confiables.

Los resultados tienen una correlación muy cercana menor a 5 dB, que por estudios anteriores se puede decir que se pueden tomar como aceptables.

7.2 Conclusiones específicas.

Los objetivos generales y específicos se pudieron realizar, y con esto llevar a conclusiones específicas las cuales son:

- Si el contacto entre el sello y la superficie de contacto incrementa, el TL aumentara.
- Si la relación de comprensión entre el sello y la superficie de contacto incrementa, el TL aumentara.
- Si el espesor de geometría incrementa, el TL aumentara.

La densidad del sello es crítica para las mediciones de TL , esto es en base a la ley de la masa, en la cual nos dice que, al aumentar la masa o la frecuencia, el TL será mayor.

7.3 Recomendaciones para trabajo futuro.

Como próximo trabajo por hacer, se puede analizar las mediciones experimentales en cámaras anecoicas, que otorgan gran calidad de resultados y con geometrías más complejas, como puede ser; la puerta completa de una cabina, para analizar el ruido a nivel del ensamble y poder optimizar las piezas que componen a toda la puerta.

Otra recomendación es tener los modelos de las geometrías con precisión, ya que con los sellos se tuvieron algunas variaciones entre el modelo 3D y el real, con esto cambian las propiedades y se pierde la correlación entre ambos resultados.

Por último, las variaciones del TL se deben a los diferentes materiales y las fugas que puede tener el ensamble del tubo de impedancia, por lo mismo se recomienda realizar mediciones en un tubo con un mismo material en todo el tubo.

7.4 Resumen Biográfico.

Iram Josué Vega Renteria, nació el 16 de septiembre de 1995, obteniendo el título de Ingeniero en Sistemas Automotrices en 2018 en la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, posteriormente estudio la Maestría en Ciencias de la Ingeniería Automotriz en la Universidad Autónoma de Nuevo León, en el cual desarrollo su proyecto de titulación con la empresa Caterpillar en el área de Vibraciones y Acústica, además, ha participado en proyectos de investigación en la UNAM y en congresos a nivel nacional.

8 Referencias.

1. Orçun Saf, (2020) An investigation of the sound transmission loss for elastomeric vehicle door seals.
2. B. Andro, s. C. (2008). Prediction of sound transmission through automotive door seal systems. Acoustics 08 Paris, 3819-3824
3. Vengala, k. C. (2007). Building a modified impedance tube for measurement of sound transmission loss and absorption coefficients of polymer cross-linked aerogel core composites. Hyderabad, andhra pradesh.
4. Joshua S. Fu, (2010), Evaluation of Noise Level, Whole-Body Vibration, and Air Quality Inside Cabs of Heavy-Duty Diesel Vehicles
5. Pang, j. (2018). Noise and vibration control in automotive bodies. John wiley & sons.
6. Wang, d. X. (2010). Vehicle noise and vibration refinement. Woodhead.
7. Hazir, a. (2016). Simulation of the noise transmission through automotive door seals. Stuttgart, germany: springer vieweg.
8. SAE International. (1999). *Sound transmission analysis of vehicle door sealing system*. Michigan.
9. SAE International. (2018). *Closures weatherstrips with variable cross sections*. Sao Paolo.
10. A. Stnti. (2004). Dynamic modeling of a car door weather seals: a first outline
11. Weimin, t., & bolton, j. (2017). A desktop procedure for measuring the transmission loss of automotive door seals. Sae.

12. J. Ordieres-meré, m.-m. V.-g.-m. (2012). A simulation method to estimate closing forces in car-sealing rubber elements. *Int. J. Vehicle design*, 249–271
13. ASTM 2611- (2019)
14. Astm international. (2016). *Astm c384-04, standard test method for impedance and absorption of acoustical material by impedance tube method*. West conshohocken, pa: astm international.
15. Doutres, o. (2010). Evaluation of the acoustic and non-acoustic properties of sound absorbing. *Applied acoustics*, 506-509.
16. Brüel & Kjær. (2007). Technical review, transmission loss measurements in a standing wave tube.
17. Sanchis, e. J. (2008). *Modelización, simulación y caracterización acústica de materiales para su uso en acústica arquitectónica*. Valencia, España.
18. Dr. Mohan D. Rao, (2014), development of a low-cost impedance tube to measure acoustic absorption and transmission loss of materials.
19. International, ASTM. (2017). *ASTM C423-17, Standard Test Method for Sound Absorption and Sound Absorption Coefficients by Reverberation Room Method*. ASTM International.
20. Cordioli, j., stumpf, c., calcada, m., rocha, t., shorter, p., & cotini, v. (2010). Prediction of sound transmission through door seals using the hybrid fe-sea method. *Sae brasil international noise and vibration congress*.
21. Michael Moser, J. L. (2009). *Ingeniería acústica*. Springer.
22. McGraw-Hill Education (2015)
23. Pere Prat (2006)
24. González Carbonell, (2009), Modelos de materiales hiperelásticos para el análisis de los elastómeros usando el MEF

25. Logan, D. L. (2010). A first course in the finite element method. Cengage learning.
26. Marc theory (2019) MSC
27. Free field technologies sa. (2019). Actran 19.1 user's guide - volume 1. Belgica.
28. Tyrrell. R, (1998). How To Get Started in Acoustics Analysis. Nafems
29. Youtong Fang, (2018). China's High-Speed Rail Technology: An International Perspective. Springer
30. Muller, G, (2013), Handbook of engineering acoustics. Springer.
31. Kari Saine, (2013). Actran powerful vibro acoustic finite element software
32. Steffen Marburg, (2008). Computational Acoustics of Noise Propagation in Fluids – Finite and Boundary Element Methods. Springer
33. Free Field Technologies, (2012), Acoustic simulation with Actran.
34. D'amico, g. (2018). Acoustic analysis of passive metamaterial panels using the finite element method and homogenized properties. Torino.
35. Shashikanth. C, (2013). Non-Linear Analysis Of Rubber Boot Seal. IJERT
36. Raffaele Panzella, (2020). Advanced Finite Element Method for the Vibro-Acoustic response of plate-cavity systems
37. Qi Li, (2020). Finite-Element Method for Calculating the Sound Field in a Tank with Impedance Boundaries
38. Junhong Park (2003) Effects of geometric parameters on the sound transmission characteristic of bulb seals.

Apéndice A

Correlación ley de la masa.

Una recomendación que se realizó por parte de un grupo de expertos de Ruido y Vibraciones, para darle más valor a la investigación, fue de hacer una correlación entre mediciones teóricas, mediciones experimentales y de elemento finito. Esta se llevó a cabo con un material homogéneo geoméricamente, el cual es Neopreno con una densidad de 1300 kg/m^3 , 12.7 mm de espesor y un módulo de elasticidad de 2.5 MPa.

La medición se realizó como lo muestra el siguiente diagrama esquemático (Figura A.1):

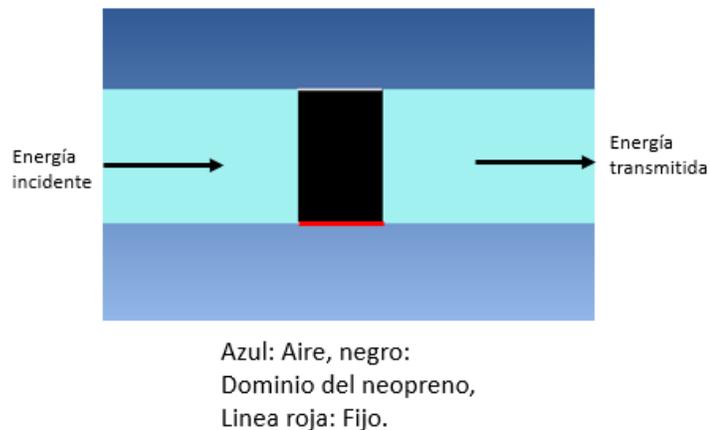


Figura A.1 Modelo de solo Neopreno en el tubo de impedancia.

Los resultados como se muestran en la Figura A.2, entre los tres diferentes métodos fueron los siguientes, los cuales están en una variación aceptable, los resultados de elemento finito de 2D y 3D se empalman, esto por ser una sección simétrica a lo largo del tubo de impedancia. Los valores del tubo de impedancia y elemento finito tienen ciertas diferencias, esto es por los diferentes materiales que está conformado el tubo de impedancia y puede tener ciertas fugas que no se pueden evitar, ya que es un ensamble de muchas partes. Los resultados teóricos se asimilan mucho a los de elemento finito, teniendo una variación mínima, los resultados teóricos se basan solo en el material y sus geometrías sin

tomar en cuenta el tubo de impedancia, los cálculos fueron proporcionados por el equipo experto de Ruido y Vibraciones.

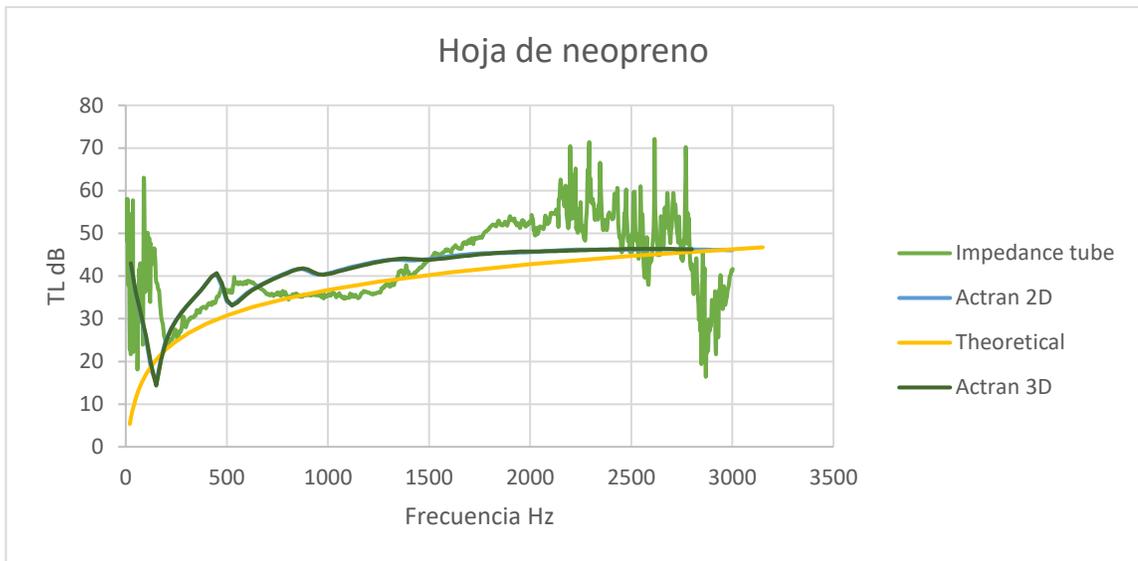


Figura A.2 Resultados de solo neopreno en el tubo de impedancia.