**RAE**

**1. TIPO DE DOCUMENTO:** Trabajo de grado para optar por el título de INGENIERO DE SONIDO-

**2. TÍTULO:** ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE DIFERENTES TIPOS DE SELLAMIENTO AL PASO DE RUIDO A TRAVÉS DE UNA PUERTA ACÚSTICA

**3. AUTORES:** Deiber Sthip Rodríguez Ardila, Harold Camino Arias

**4. LUGAR:** Bogotá, D.C

**5. FECHA:** Enero de 2019

**6. PALABRAS CLAVE:** Aislamiento Acústico, Transmisión de Ruido, Sellamiento, Puerta Acústica, Magnitud global, Magnitud espectral.

**7. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO:** El objetivo de esta investigación consiste en la evaluación de tres tipos de sellamientos implementados en una puerta acústica, minimizando las vías de transmisión por fugas entre recintos según la norma de aislamiento acústico ISO 16283-1. De esta manera, determinar semejanzas y diferencias en la combinación sellamiento-puerta según su funcionalidad. También se presentan todos los aspectos ingenieriles del diseñó y la construcción de una puerta acústica bajo determinadas condiciones. Finalmente los resultados obtenidos permiten apreciar mejorías en la atenuación acústica en bandas de frecuencia específicas exhibiendo comportamientos distintos para cada tipo de sellamiento.

**8. LÍNEAS DE INVESTIGACION:** Línea de Investigación de la USB: Acústica y vibraciones. Sub línea de Facultad de Ingeniería: Control de Ruido. Campo Temático del Programa: Diseño y Construcción de una puerta acústica para la evaluación de sellamientos.

**9. METODOLOGÍA:** Cuantitativa, con un enfoque metodológico con base en el estudio y diseño de una puerta acústica.

**10. CONCLUSIONES:** El funcionamiento de cada sellamiento dependerá directamente de los problemas para el control de ruido en rangos de frecuencia específicos, aportando un aumento del aislamiento acústico corrigiendo errores de transmisión sonora en la interacción del marco y la hoja de la puerta acústica. El diseño ingenieril de una puerta acústica es uno de los procesos más rigurosos, que debe estar basado en el comportamiento de los materiales de relleno y sus dimensiones en combinación con la puerta acústica y la forma de montura del sellamiento, estos parámetros determinarán la funcionalidad y el comportamiento de la combinación sellamiento-partición con puerta, brindando mejores resultados.

# Análisis del comportamiento de diferentes tipos de sellamiento al paso de ruido a través de una puerta acústica

**Deiber Sthip Rodríguez Ardila**
**Harold Camino Arias**

Universidad de San Buenaventura, sede Bogotá

Facultad de Ingeniería

Programa de Ingeniería de sonido

Bogotá, Colombia

2019

# Análisis del comportamiento de diferentes tipos de sellamiento al paso del ruido a través de una puerta acústica

**Deiber Sthip Rodríguez Ardila**
**Harold Camino Arias**

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de ingeniero de sonido:

Director:
Luis Fernando Hermida Cadena

Línea de Investigación:
Acústica y vibraciones.

Universidad de San Buenaventura, sede Bogotá
Facultad de Ingeniería
Programa de Ingeniería de Sonido
Bogotá, Colombia
2019

# Agradecimiento

El proyecto de grado no solo es un trabajo, es una experiencia fruto del conocimiento y esfuerzo de aquellas personas que aportan un grano de arena en este proceso, de manera profesional como personal. Con estas líneas quisiera mostrar mi agradecimiento a todas aquellas personas que tendieron su mano y brindaron su confianza.

A nuestro tutor, el profesor Luis Fernando Hermida por su ayuda y colaboración en cada momento de consulta, soporte, apoyo y esfuerzo en este trabajo de investigación.

Al profesor Luis Jorge por estar involucrado en las consultas donde nos ofreció su apoyo con su conocimiento para la realización del trabajo investigativo.

Al director del programa, Manuel Torres por estar involucrado de primera mano en los procesos y trámites requeridos, adicionalmente el apoyo en la realización de esta meta.

A los compañeros y familiares por la ayuda prestada durante el desenvolvimiento de este trabajo en la etapa de campo: Familia Rodríguez Ardila y Familia Camino Arias.

# Resumen

Una puerta acústica no es un sistema estático, por consiguiente, se dificulta la atenuación de energía acústica debido a la compleja interacción entre los diferentes componentes de ese sistema. En este caso, la existencia de aberturas entre la hoja y el marco (hendiduras) disminuye la eficiencia del aislamiento, permitiendo la transmisión de ruido entre recintos. Como solución a este problema se ha presentado el constante uso de sellamientos; estos elementos permiten la hermeticidad mediante el contacto entre la hoja y el marco de una puerta acústica, de tal forma que minimice la energía sonora trasferida a través de las hendiduras.

El objetivo de esta investigación consiste en la evaluación de tres tipos de sellamientos implementados en una puerta acústica minimizando las vías de transmisión por fugas entre recintos. De esta manera, determinar semejanzas y diferencias en la combinación sellamiento-puerta según su funcionalidad.

Se diseñó y construyó una puerta acústica considerando parámetros tales como: materiales internos y externos, dimensiones de sellamientos, dimensiones de cavidad interna, puntos de contacto marco-hoja, entre otros. Para la instalación y comparación de diferentes tipos de sellamientos, se utilizó como referencia la norma ISO 16283-1 medición *in situ* de aislamiento acústico e ISO 717-1 para la evaluación global de aislamiento acústico. Finalmente los resultados obtenidos permiten apreciar mejorías en la atenuación acústica en bandas de frecuencia específicas exhibiendo comportamientos distintos para cada tipo de sellamiento, presentando un desempeño alto el sellamiento de contacto y de fricción hasta con un R’ de 3.8dB en bandas específicas de frecuencia por encima de la partición con la puerta acústica sin sellamiento.

**Palabras clave: Aislamiento Acústico, Transmisión de Ruido, Sellamiento, Puerta Acústica, Magnitud global, Magnitud espectral.**

# Abstract

An acoustic door is not a static system, therefore, the attenuation of acoustic energy is difficult due to the complex interaction between the different components of that system. In this case, the existence of openings between the leaf and the frame (cracks) decreases the efficiency of the insulation, allowing the transmission of noise between enclosures. As a solution to this problem, the constant use of seals has been presented; these elements allow the airtightness through the contact between the leaf and the frame of an acoustic door, in such a way as to minimize the sound energy transferred through the slits.

The objective of this investigation consists of the evaluation of three types of seals implemented in an acoustic door, minimizing transmission routes due to leaks between enclosures. In this way, determine similarities and differences in the sealing-door combination according to their functionality.

An acoustic door was designed and built considering parameters such as internal and external materials, sealing dimensions, internal cavity dimensions, frame-leaf contact points, among others. For the installation and comparison of different types of seals, the ISO 16283-1 standard in situ measurement of acoustic insulation and ISO 717-1 for the overall evaluation of acoustic insulation was used as reference. Finally the obtained results allow to appreciate improvements in the acoustic attenuation in specific frequency bands exhibiting different behaviors for each type of sealing, presenting a high performance contact and friction sealing with an R' of 3.8dB in specific bands of frequency per above the partition with the acoustic door without sealing.

**Keywords: Acoustic Isolation, Noise Transmission, Sealing, Acoustic Door, Overall Magnitude, Spectral Magnitude.**

# Contenido

**Pág.**

**1. Problema de investigación. ..... 18**

1.1. Planteamiento del problema. ..... 18

1.2. Antecedentes del problema ..... 20

1.3. Objetivos. ..... 22

1.2.1. Objetivo general. ..... 22

1.2.2. Objetivos específicos ..... 22

1.4. Justificación ..... 22

1.5. Alcances y Limitaciones ..... 23

1.6. Limitaciones ..... 23

**2. Marco de referencia ..... 24**

2.1. Marco Teórico ..... 24

2.2.1. Transmisión de sonido ..... 24

2.2.2. Absorción de los materiales ..... 37

2.2.3. Puertas acústicas ..... 39

2.2.4. Sellamientos en puertas ..... 40

2.2. Marco Normativo ..... 43

2.2.1. Norma ISO 10140 – 1 A1 (2011): Medición en laboratorio del aislamiento acústico de los elementos de construcción, Parte 1: Reglas de aplicación para productos específicos, Modificación 1: Directrices para la determinación del índice de reducción acústica de juntas rellenas de material de relleno y/o de elementos de sellado. ..... 43

2.2.2. Norma ISO 10140 – 2 (2011): Medición en laboratorio del aislamiento acústico de los elementos de construcción, Parte 2: Medición del aislamiento acústico al ruido aéreo. ..... 44

2.2.3. Norma ISO 16283-1 (2014): Medición in situ del aislamiento acústico en los edificios y en los elementos de construcción Parte 1: Aislamiento a ruido aéreo. ..... 46

2.2.4. Norma ISO 3382-2 (2008): Medición de parámetros acústicos en recintos Parte 2: Tiempo de reverberación en recintos ordinarios. ..... 48

2.2.5. Norma ISO 717-1 (2013): Evaluación del aislamiento acústico en los edificios y los elementos de construcción Parte 1: Aislamiento de ruido aéreo. ..... 50

2.2.6. Norma ISO 12999-1 (2014): Determinación y aplicación de las incertidumbres de medición en la acústica de edificios Parte 1: Aislamiento acústico. ..... 50

**3. Diseño Metodológico ..... 52**

3.1. Tipo y enfoque de investigación ..... 52

3.2. Recopilación de datos ... 53
3.3. Variables o categorías de análisis ... 54
3.3.1. Variables independientes ... 54
3.3.2. Variables dependientes ... 54
3.3.3. Variables foráneas ... 54
3.4. Instrumentos ... 54
**4. Desarrollo ingenieril ... 55**
4.1. Valoración y selección de los componentes de la puerta acústica ... 55
4.1.1. Hoja de la puerta acústica ... 56
4.1.2. Materiales de relleno de la hoja-puerta acústica ... 57
4.1.3. Marco de soporte ... 62
4.1.4. Sellamientos ... 65
4.2. Etapa de diseño de la puerta acústica ... 67
4.2.1 Simulación ... 70
4.3. Proceso de construcción, ensamble y montaje de la puerta acústica ... 75
4.3.1. Proceso de construcción y ensamble ... 75
4.3.2 Montaje de la puerta acústica ... 82
4.4. Caracterización acústica ... 84
4.4.1. Tiempo de Reverberación ... 84
4.4.2. Medición de Aislamiento Acústico ... 85
4.5. Fijación de los sellamientos en la puerta acústica ... 86
**5. Resultados y análisis de resultados ... 90**
5.1. Tiempo de reverberación (ISO 3382-2) ... 90
5.2. Evaluación de la diferencia de niveles de presión sonora a razón del cambio de sellamiento implementado en la partición con puerta acústica ... 94
5.2.1. Partición con puerta acústica sin sellamiento ... 95
5.2.2. Partición con puerta acústica y sellamiento magnético. ... 98
5.2.3. Partición con puerta acústica y sellamiento de contacto. ... 99
5.2.4. Partición con puerta acústica y sellamiento de fricción ... 100
5.2.5. Comparación de resultados entre Sellamientos ... 102
5.3 Análisis de costos ... 106
**6. Conclusiones ... 109**
**7. Recomendaciones ... 112**
**8. Referencias ... 113**
**9. Anexos ... 115**

Contenido

A Protocolo de medición para tiempo de reverberación según norma ISO 3382-2 ..... 115
B Protocolo de medición de aislamiento acústico en edificios según norma ISO 16283-1 117
C Tablas de resultados norma ISO 717-1 ..... 119
D Tablas incertidumbres ISO 12999-1 ..... 123
E Planos ingenieriles de la puerta acústica ..... 127
F Informes de Medición ..... 129
G Autorización software INSUL. ..... 133

# Lista de imágenes

**Pág.**

Imagen 2-1 Formas de perfiles de Sellamientos de Contacto. a) Perfil I, b) perfil P, c) perfil D, .... 41

Imagen 2-2 Sellamiento Ajustable y fricción. .... 42

Imagen 2-3 Sellamiento Magnético, a) Perfil sencillo b) Perfil doble. .... 42

Imagen 4-1 Esquema Marcos de Soporte .... 65

Imagen 4-2 Sellamientos para evaluar a) Sellamiento magnético con perfil sencillo, b) Sellamiento de contacto con perfil D, c) Sellamiento de fricción. .... 67

Imagen 4-3 Modelo de Cerradura .... 69

Imagen 4-4 Software de Simulación para elementos multicapa INSUL .... 71

Imagen 4-5 Simulación de primera configuración .... 72

Imagen 4-6 Simulaciones de segunda configuración .... 72

Imagen 4-7 Simulación con AcusticPlaca y Sonowall. .... 73

Imagen 4-8 Prototipos para el desarrollo de la puerta acústica. .... 76

Imagen 4-9 Estructura externa de la puerta acústica .... 76

Imagen 4-10 Ajuste y detalles de la estructura externa de la puerta. .... 77

Imagen 4-11 Refuerzos internos en la parte posterior de la puerta. .... 77

Imagen 4-12 Proceso de relleno de material acústico en la puerta acústica a) Primera capa de relleno con Sonowall. b) y c) Capa de relleno con Drywall. d) Segunda capa de relleno con Sonowall..... 78

Imagen 4-13 Proceso de sellamiento total de la puerta acústica a través de la unción proporcionada por las aberturas entre bandeja y tapa. a) Puerta Acústica sellada. b) Aberturas para la unión entre la bandeja y la tapa. c) Proceso de sellamiento. .... 79

Imagen 4-14 Modelo de Bisagras .... 80

Imagen 4-15 Marco de soporte sencillo. .... 80

Imagen 4-16 Marco de soporte .... 81

Imagen 4-17 Abertura de la cerradura .... 81

Imagen 4-18 Puerta acústica con pintura electroestática. .... 81

Imagen 4-19 Relleno del Marco. .... 82

Imagen 4-20 Muestra de Chazos y Tornillo para el anclaje. .... 82

Imagen 4-21 Anclaje del marco a la estructura de cemento. 83
Imagen 4-22 Montaje de la Puerta Acústica. 83
Imagen 4-23 Conexión de equipos de medición para el tiempo de reverberación. 85
Imagen 4-24 Partición con placas metálicas. 87
Imagen 4-25 Implementación sellamiento Magnético. 88
Imagen 4-26 Instalación del Sellamiento de contacto 88
Imagen 4-27 Instalación del sellamiento de fricción 89

# Lista de Ilustraciones

**Pág.**

Ilustración 2-1 Transmisión de sonido de un material a otro con incidencia de onda normal. ..... 25

Ilustración 2-2  a) Transmisión de sonido de un material a ..... 27

Ilustración 2-3 Frente de onda golpeando una interfaz en incidencia oblicua. ..... 28

Ilustración 2-4. Laminado de dos capas. ..... 35

Ilustración 2-5 Flujo de energía mediante una superficie. ..... 37

Ilustración 4-1 Modelo de doble escalón-Iberacústica. ..... 57

Ilustración 4-2 Modelo de doble escalón - WST. ..... 57

Ilustración 4-3 esquema puerta acústica-vista isométrica. ..... 68

Ilustración 4-4 Elemento de construcción de múltiples capas (Puerta Acústica). ..... 75

Ilustración 4-5 Grilla de medición de tiempo de reverberación. ..... 84

Ilustración 4-6 Grilla de medición de aislamiento acústico. ..... 86

# Lista de gráficas

**Pág**

Gráfica 4-1 línea de tendencia para la evaluación de costos ..... 59

Gráfica 4-2 línea de tendencia para la evaluación de densidad ..... 60

Gráfica 5-1 Nivel de presión sonora del ruido de fondo en relación a la señal generada por la fuente (ISO 3382-2) ..... 91

Gráfica 5-2 Tiempo de Reverberación en el recinto receptor por bandas de tercio de octava. ..... 92

Gráfica 5-3 Desviaciones Típicas del tiempo de reverberación. ..... 93

Gráfica 5-4 Nivel de presión sonora del ruido de fondo en relación a la señal generada por la fuente en el recinto receptor (ISO 16283-1) ..... 95

Gráfica 5-5 Índice de Reducción Sonora Aparente de la partición con puerta acústica Sin Sellamiento ..... 96

Gráfica 5-6 Índice de Reducción Sonora Aparente de la partición con puerta acústica y Sellamiento Magnético. ..... 98

Gráfica 5-7 Índice de Reducción Sonora Aparente de la partición con la puerta acústica y Sellamiento De Contacto ..... 99

Gráfica 5-8 Índice de Reducción Sonora Aparente de la partición con puerta acústica y Sellamiento De Fricción. ..... 101

Gráfica 5-9 Índice de reducción sonora aparente de los sellamientos ..... 103

# Lista de tablas

**Pág.**

Tabla 4-1 Empresas productoras de puertas acústicas. ..... 56

Tabla 4-2 Evaluación de Materiales Acústicos. ..... 61

Tabla 4-3 Evaluación Placas De Yeso. ..... 61

Tabla 4-4 Marcos de soporte para puertas acústicas según empresas. ..... 63

Tabla 4-5 Escalones para marcos de soporte según empresas. ..... 64

Tabla 4-6 Evaluación de Sellamientos ..... 66

Tabla 4-7 secciones individuales de la puerta acústica ..... 69

Tabla 4-8 Especificaciones de material de relleno. ..... 74

Tabla 5-1 Tiempos de Reverberación por bandas de tercio de octava. ..... 91

Tabla 5-2 Desviaciones típicas de tiempo de reverberación por bandas de tercio de octava. ..... 93

Tabla 5-3 Parámetros acústicos e incertidumbres de la partición con puerta acústica sin sellamiento. ..... 96

Tabla 5-4 índice de reducción sonora aparente de la partición con puerta acústica sin sellamiento. 97

Tabla 5-5 Parámetros acústicos e incertidumbres de la partición con puerta acústica y sellamiento magnético. ..... 99

Tabla 5-6 Parámetros acústicos e incertidumbres de la partición con puerta acústica y sellamiento de contacto. ..... 100

Tabla 5-7 Parámetros acústicos e incertidumbres de la partición con puerta acústica y sellamiento de fricción. ..... 101

Tabla 5-8 Diferencia del índice de reducción sonora aparente entre Sellamientos. ..... 103

Tabla 5-10 Costos de la Puerta Acústica. ..... 106

Tabla 5-11 Comparación de costos y beneficios de los sellamientos. ..... 107

# Lista de ecuaciones

**Pág.**

Ecuación 1. Presión instantánea en el material 1. ..... 24

Ecuación 2. Presión instantánea en el material dos ..... 25

Ecuación 3. Velocidad de partícula instantánea en el material 1. ..... 25

Ecuación 4. Velocidad de partícula instantánea en el material 2. ..... 25

Ecuación 5 Relación de amplitudes de presión ..... 26

Ecuación 6 Coeficiente de Potencia Acústica. ..... 26

Ecuación 7 Pérdida por transmision. ..... 26

Ecuación 11 Relación entre ángulos de incidencia y transmisión con su movimiento uniforme para una incidencia oblicua. ..... 28

Ecuación 12 Segunda ley de Snell. ..... 29

Ecuación 13 Relación de magnitudes referentes a las presiones. ..... 29

Ecuación 14 Coeficiente de transmisión de potencia acústica para una incidencia oblicua. ..... 29

Ecuación 16 Velocidad instantánea ..... 30

Ecuación 17 Presión acústica para la Región 1. ..... 31

Ecuación 18 Potencia acústica promedio para incidencia aleatoria. ..... 31

Ecuación 19 Transmisión de potencia acústica en la región 1. ..... 31

Ecuación 20 Pérdida por transmisión para la región 1. ..... 32

Ecuación 21 Frecuencia de resonancia ..... 32

Ecuación 22 Frecuencia de resonancia más baja ..... 32

Ecuación 23 Coeficiente de transmisión de potencia sonora. ..... 33

Ecuación 24 Pérdida por transmisión para incidencia normal. ..... 33

Ecuación 25 Pérdida por transmisión Experimental. ..... 33

Ecuación 26 Frecuencia critica con propiedades del material ..... 33

Ecuación 27 Pérdida por transmisión en la Región 3. ..... 34

Ecuación 28 Pérdida por transmisión de incidencia normal. ..... 34

Ecuación 30 Pérdida por transmisión para la región controlada por amortiguamiento ..... 35

Ecuación 31 Masa especifica. ..... 36
Ecuación 32 Frecuencia Critica..... 36
Ecuación 34 Coeficiente de Amortiguamiento. ..... 36
Ecuación 35 Coeficientes energéticos..... 37
Ecuación 36 índice de reducción acústica de las juntas considerando la transmisión acústica..... 43
Ecuación 37 Promedio del nivel de presión sonora. ..... 46
Ecuación 38 Índice aparente de reducción acústica de la puerta..... 47
Ecuación 39. Índice aparente. ..... 47
Ecuación 40 Índice Sonoro Aparente Aproximado de una Puerta. ..... 48
Ecuación 41 Desviación T20..... 49
Ecuación 42 Desviación T 30..... 49
Ecuación 44 Incertidumbre de medición del índice de reducción sonora acústica ponderada..... 51
Ecuación 45 Ecuación de la recta para la evaluación de costo..... 59
Ecuación 46 Ecuación de la recta para la evaluación de la densidad..... 60
Ecuación 47 Masa de un cuerpo..... 68

# Introducción

Una puerta es un elemento de construcción complementaria constituido por una hoja y un marco, la estructura puede ser metálica, de madera u otro material, implementada como vía de acceso a un recinto; regularmente es complementada con chapas, cerraduras o cerrojos para impedir la entrada o salida. Las puertas acústicas son diseñadas para la insonorización de espacios, minimizando la transmisión de ruido de un sitio a otro, obteniendo niveles requeridos para distintas prácticas las cuales requieran esta condición; esto se logra mediante el diseño geométrico, uso de materiales absorbentes y rígidos que brindan características estructurales apropiadas.

La interacción entre el marco y la hoja de una puerta acústica da cabida a la existencia de aberturas llamadas hendiduras, afectando la eficiencia del aislamiento; Se han creado modelos matemáticos con el propósito de precisar la afectación de las vías de transmisión por fugas a través de hendiduras, sin embargo, dichos modelos dan como resultado aproximaciones a los niveles de presión transmitidos mas no presentan solución alguna.

Esta investigación analiza el comportamiento del paso de ruido presente en la interacción marco-hoja de una puerta acústica (hendiduras) a través de la implementación de tres tipos de sellamiento (sellamiento magnético, sellamiento de fricción y sellamiento de contacto), con la finalidad de determinar el aumento o disminución del nivel de aislamiento acústico del elemento, determinando la funcionalidad de cada uno.

El objetivo de este trabajo es diseñar y construir una puerta acústica en donde se evaluarán los sellamientos clasificando su comportamiento, siguiendo los criterios de evaluación y análisis brindados por norma ISO 16283-1 e ISO 717-1. Para el diseño y la construcción de la puerta acústica se realizó una valoración de empresas fabricantes de este tipo de elementos, evaluando las características de los materiales internos y externos usualmente empleados, de este modo, se generó un proceso de simulación señalando que los materiales apropiados para la construcción son: Sonowall, Drywall y acero.

A partir del proceso de medición y análisis se concluyó que los sellamientos aumentan el nivel de aislamiento acústico del elemento en bandas de frecuencia específicas, sin embargo, el sellamiento de contacto presenta niveles de aislamiento superiores a las demás combinaciones.

# 1. Problema de investigación.

## 1.1. Planteamiento del problema.

Las puertas son generalmente los elementos de aislamiento acústico más débiles, por lo tanto requieren diseño acústico cuidadoso (Hongiston, 1999), esto se debe a que son objetos que constantemente están siendo manipulados por las personas. Si bien se han desarrollado diferentes modelos matemáticos donde la interacción entre materiales permite el conocimiento del aislamiento acústico proporcionado por una determinada partición acústica, obteniendo así una aproximación del comportamiento real al momento de su montaje teniendo en cuenta variables de diseño, (F.Barron, 2003), dichos modelos no muestran cómo se comporta la estructura general respecto a diferentes componentes como lo son las puertas. Una puerta no es un elemento estático y no depende directamente de las variables anteriormente nombradas debido a que es un sistema que no minimiza en su totalidad las fugas entre la hoja de la puerta y el marco, por tal motivo se atribuye a los tipos de sellado (Herrera, J. M., & Recuero, M., 2010).

Se han realizado estudios enfocados al tratamiento y la metodología de construcción de puertas acústicas, con el fin de reducir la energía sonora transmitida a través de las mismas, estas comprenden vías de transmisión estructurales y vías de transmisión por fugas, que son las más comunes y en donde la teoría se ha basado (Hongiston, 1999). Al tratarse del aislamiento acústico en estos elementos, no solo hay que tener en cuenta los factores en los cuales se han enfocado los estudios, además debe analizarse el sellado, ya que el ruido puede transmitirse de un sitio a otro a través de aberturas de mínimas dimensiones sin ningún problema, es decir, la existencia de una mínima abertura en el sellamiento de una puerta acústica permite la transmisión de ruido de un sitio a otro. Uno de los pioneros que identificó este problema fue Gomperts (1964), donde estudió el aislamiento acústico de las aberturas en forma de hendidura y circulares en paredes, luego aplicó esta teoría a las rendijas o aberturas de una puerta, ya que en estas existía el mismo fenómeno de la difracción proyectándolo a un modelo matemático que permite recurrir a diferentes variables como las dimensiones de las aberturas, la frecuencia, el grosor, el área de sección transversal y la posición permitiendo el conocimiento previo del comportamiento de estas aberturas al paso de ruido.

El estudio desarrollado por Kim (2012) sobre el comportamiento de las aberturas en forma de hendidura en la parte inferior de 30 puertas de oficina, dio a conocer que el ruido transmitido es proporcional a las dimensiones de dicha abertura, no obstante genera combinaciones geométricas (alto y ancho de la hendidura) dando conocimiento sobre el comportamiento del paso del ruido al verse afectado por dichas dimensiones, en sus resultados muestra las variaciones de niveles de ruido al momento de implementar las combinaciones de las medidas.

Los modelos matemáticos presentan aproximaciones sobre la construcción de puertas con tratamiento acústico, no obstante, son pocos los estudios que comparan los resultados experimentales con los resultados teóricos. En los últimos años se han hecho estudios en donde se hacen caracterizaciones principalmente relacionados con la pérdida por transmisión sonora, tal y como fue en el caso de Hongisto, V., Keränen, J., & Lindgren, M (1999), que realizó un modelo de puerta con tratamiento acústico, donde las variables son los materiales internos (relleno) y el material de la estructura externa (madera y metal), esto con el propósito de comparar el desenvolvimiento de las teorías brindadas por diferentes autores como M.C. Gomperts (1964), R. E. Jones (1964), B. H. Sharp (1978) entre otros. En sus resultados muestra el comportamiento dada la combinación de material externo y material interno catalogándolos por su nivel de permisibilidad al paso de ruido, sin embargo la estructura de la puerta siempre es la misma, es decir que se implementó un cambio de materiales más no de términos como el sellamiento y el diseño de la estructura, que son requerimientos que afectan la transmisión de ruido.

En la última década se han realizado algunos estudios sobre tipos de sellamiento para puertas recurriendo a la búsqueda de diferentes tipos de materiales para este tipo de sellado, como es el caso de (Herrera, J. M., & Recuero, M., 2010) en donde se estudiaron los tipos de sellamiento para puertas de acero haciendo uso de sellos estándar, sellos ajustables y sellos de fricción. Para este trabajo la puerta no se encontraba tratada acústicamente y junto a esto se evaluó la diferencia entre la teoría expuesta por Hongiston (1999) y la teoría de Gomperts (1964), concluyendo que la teoría de Hongiston es válida para puertas con un STC 47 (Sound Transmission Class) o inferior, mientras que la teoría de Gomperts es estrictamente válida para una incidencia normal. Los sellamientos en puertas hacen parte en gran medida de los principales pilares para obtener niveles de transmisión de ruido mínimos, cuando no existe un sellamiento acorde a la necesidad exigida en

la puerta con tratamiento acústico no tendrá gran relevancia según lo expuesto por las teorías tratadas en este artículo.

Dados los anteriores párrafos y el poco estudio acerca de los sellamientos es necesario responder la siguiente pregunta: ¿cómo se comportan diferentes tipos de sellamientos en una puerta tratada acústicamente a la transmisión de ruido?

## 1.2. Antecedentes del problema

En 1964 Gomperts, M.C. propone un modelo matemático con el propósito de conocer el factor de transmisión de sonido a través de pequeñas aberturas circulares y otras en forma de hendidura. Concluye que la posición de la abertura, la frecuencia, el grosor de la partición y el área de sección transversal de la abertura son parámetros a considerar en la predicción en una partición. (Gomperts, 1964)

Actualmente estos modelos matemáticos son usados con la finalidad de conocer dicho factor de transmisión de esta forma ser tratados, pues este es un problema generalizado en propuestas de puertas con tratamiento acústico, puesto que por una ranura existe una gran transmisión de ruido.

Para 1999 V. Hongisto, genera un estudio sobre puertas con tratamiento acústico donde las principales variables son los materiales internos y el material de la estructura (madera y metal). En la primera etapa, realiza predicciones de dichas puertas haciendo uso de modelos matemáticos tales como los de Gomperts M.C, Jones R.E, Sharp B.H. entre otros, brindando un acercamiento a un modelo que puede ser mejorado bajo condiciones tales como la forma, la estructura y el sellado, (Hongiston, 1999).

En la segunda etapa realiza el montaje de las puertas descritas con los modelos matemáticos para luego generar un paralelo entre el estudio matemático y las condiciones reales a la hora del montaje, además, muestra la diferencia del aislamiento acústico cuando son puertas de metal o de

madera. En este estudio se generaron cambios únicamente de materiales internos de una estructura metálica y de madera, (Hongisto, V., Keränen, J., & Lindgren, M., 1999) .

En el año 2012 M. Kim, realizó un estudio a 30 puertas de un edificio centrándose en el aislamiento total de puertas con aberturas con formas de hendidura en la parte inferior, se realizaron mediciones in situ y se realizaron predicciones teóricas. Los resultados de este estudio muestran una relación entre el comportamiento del aislamiento acústico y la dimensión de la abertura. Por ende el estudio generado en este caso fue específicamente en la parte inferior de las puertas convencionales y no se realizó una solución sobre el problema, por lo contrario hizo una revisión del comportamiento de la transmisión de ruido, (Kim, 2012).

Para el año 2010 J.M. Herrera y M Recuero, estudiaron combinaciones y tipos de sellamientos para una puerta de acero sin tratamiento acústico interno, utilizando sellamientos estándar no convencionales, sellos ajustables y sellos de fricción. Junto a esto se evaluó la diferencia entre la teoría expuesta por Hongisto y la teoría de Gomperts, lo cual concluyo que la teoría de Hongisto es válida para puertas con STC 47 o inferior, mientras que la teoría de Gompert es estrictamente válida para una incidencia normal, (Herrera, J. M., & Recuero, M., 2010). Las conclusiones son ciertas en el caso específico de la puerta utilizada en este estudio. En el caso de hacer el mismo estudio con otro tipo de puertas ¿Estas teorías se comportarían de la misma forma?

# 1.3. Objetivos.

## 1.2.1. Objetivo general.

Analizar el comportamiento de diferentes tipos de sellamiento en una puerta tratada acústicamente a la transmisión de ruido, de forma tal que se evidencia la interacción presente entre el tipo de sellamiento y la puesta acústica.

## 1.2.2. Objetivos específicos.

- Diseñar y construir una puerta acústica de dos escalones en acero y con material acústico interno con su debido marco de soporte.

- Evaluar tres tipos de sellamiento en la puerta acústica mediante la norma ISO 16283-1 de aislamiento acústico, ajustándose a los modelos de medición acordes a dicha norma.

- Analizar los tipos de sellamiento usados en la puerta acústica en términos de su funcionalidad generando comparaciones entre los parámetros acústicos para cada tipo de sellamiento.

# 1.4. Justificación

La caracterización de los tipos de sellamiento es necesaria para determinar el efecto y comportamiento de la transmisión de ruido a través de puertas acústicas, así mismo, verificar y minimizar los problemas de aislamiento acústico dados en estos elementos. Las puertas acústicas son elementos de constante movimiento generando problemas de transmisión de ruido por fugas debido a la existencia de hendiduras alrededor de la puerta, es decir, si no existe un sellamiento o hermeticidad en el cierre, la transmisión del ruido entre dos recintos no se reducirá a los niveles requeridos.

Conociendo el comportamiento de la combinación sellamiento-puerta es posible determinar su funcionamiento en distintas áreas, destacándose por su rendimiento al minimizar el paso de ruido y su funcionalidad en bandas de frecuencia específicas. En instalaciones y recintos controlados tales como: estudios de grabación, estudios de radio, televisión, laboratorios acústicos entre otros, es importante que el ruido al interior sea mínimo, siendo necesaria una excelente interacción entre el sellamiento y la puerta acústica permitiendo reducir el ruido de fondo a niveles requeridos.

## 1.5. Alcances y Limitaciones

- Se evaluará tres tipos de sellamiento para la minimización de los problemas de aislamiento acústico de una puerta tratada acústicamente.
- La puerta tendrá fibra de vidrio o lana de roca como material acústico absorbente únicamente.
- Los sellamientos determinarán su funcionalidad en la implementación de distintos lugares, resaltándose en su rendimiento al disminuir el paso del ruido.

## 1.6. Limitaciones

- La evaluación de diferentes tipos de sellamiento se llevarán a cabo a partir del estudio de tres tipos de sellamientos.
- El material acústico interno implementado en el diseño de la puerta acústica puede ser de fibra de vidrio o lana de roca.
- El Proceso y condiciones de medición son de carácter *in situ.*

# 2. Marco de referencia

## 2.1. Marco Teórico

### 2.2.1. Transmisión de sonido

Para ampliar la información de los conceptos y teorías presentadas en esta sección puede remitirse al libro de referencia Industrial Noise Control del autor Barron, R. F. (2003), secciones 4 y 7; en él se presenta en detalle los temas tratados referentes al aislamiento acústico y absorción acústica.

El ruido puede controlarse a partir de la modificación de la fuente, el receptor o la transmisión presente en el camino, de lo anterior se procederá a presentar los modelos teóricos referentes a la transmisión de ruido y la atenuación de la energía acústica al tener en cuenta los cambios del medio, los materiales presentes a la hora de la transmisión y como estos generan variaciones en dichos niveles.

**Cambio de medio con incidencia normal**

En primera instancia se hará un análisis de la transmisión de sonido de un material a otro con incidencia normal, es decir que el ángulo de incidencia de la onda es 0° y la normal estaría descrita por el material o interfaz. Como se muestra en la ilustración 2-1, cuando la onda de sonido incide una parte de la energía es reflejada y otra porción es transmitida al siguiente medio.

Al tener en cuenta la suposición de ondas planas, en el medio 1 se puede considerar la siguiente formula descrita en la ecuación 1, donde se describe la onda incidente y la onda reflejada dando como resultado la presión acústica instantánea:

$$p_1(x,t) = A_1 e^{j(\omega t - k_1 x)} + B_1 e^{j(\omega t + k_1 x)}$$

Ecuación 1. Presión instantánea en el material 1.
(Onda incidente y onda reflejada).

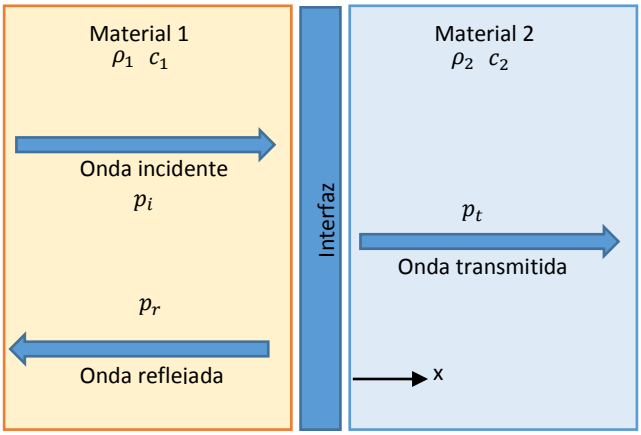



Ilustración 2-1 Transmisión de sonido de un material a otro con incidencia de onda normal.

En el material 2 se puede suponer la inexistencia de reflexiones, de tal forma que la presión acústica instantánea de la onda transmitida se describe de la siguiente manera:

$$p_2(x,t) = A_2 e^{j(\omega t - k_2 x)}$$

Ecuación 2. Presión instantánea en el material dos (Onda transmitida).

La velocidad de partícula instantánea para los dos materiales se describe en la ecuación 3 y 4, al suponer que la onda reflejada viaja en la dirección x:

$$u_1(x,t) = \left(\frac{1}{Z_1}\right)[A_1 e^{j(\omega t - k_1 x)} - B_1 e^{j(\omega t + k_1 x)}]$$

Ecuación 3. Velocidad de partícula instantánea en el material 1.

$$u_2(x,t) = \left(\frac{1}{Z_2}\right) A_2 e^{j(\omega t - k_2 x)}$$

Ecuación 4. Velocidad de partícula instantánea en el material 2.

Las impedancias características para los materiales 1 y 2 serian $Z_1 = \rho_1 c_1$ y $Z_2 = \rho_2 c_2$. Teniendo en cuenta la presión acústica instantánea ejercida y la velocidad de partícula instantánea en los dos materiales suponiendo x=0 y se obtiene:

$$\frac{A_2}{A_1} = \left(\frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2}\right)$$

Ecuación 5 Relación de amplitudes de presión

Para seleccionar los materiales que generan control sobre la transmisión de ruido, es importante tener en cuenta el coeficiente de transmisión de potencia acústica que se define como la relación de la potencia acústica incidente y la potencia acústica transmitida. Teniendo en cuenta lo anterior y la ecuación 6 se obtiene el coeficiente de potencia acústica transmitida:

$$a_t = \frac{4Z_1 Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2}$$

Ecuación 6 Coeficiente de Potencia Acústica.

La transmisión de energía acústica de un material a otro puede expresarse en términos de pérdida por transmisión (TL), la cual expresa el coeficiente de transmisión de potencia acústica en unidades de decibeles (dB):

$$TL = 10log_{10}\left(\frac{W_{in}}{W_{tr}}\right) = 10log_{10}\left(\frac{1}{a_t}\right)$$

Ecuación 7 Pérdida por transmision.

Si las impedancias son coincidentes entre los materiales significaría que la energía seria transmitida en su totalidad de un material a otro, mientras que si estas impedancias son diferentes el coeficiente de transmisión de potencia acústica variaría y sería menor por tanto la energía transmitida por la interfaz disminuiría y seria en su mayor parte reflejada. Lo anterior tomado de la ecuación 6.

**Cambio de medio con incidencia oblicua**

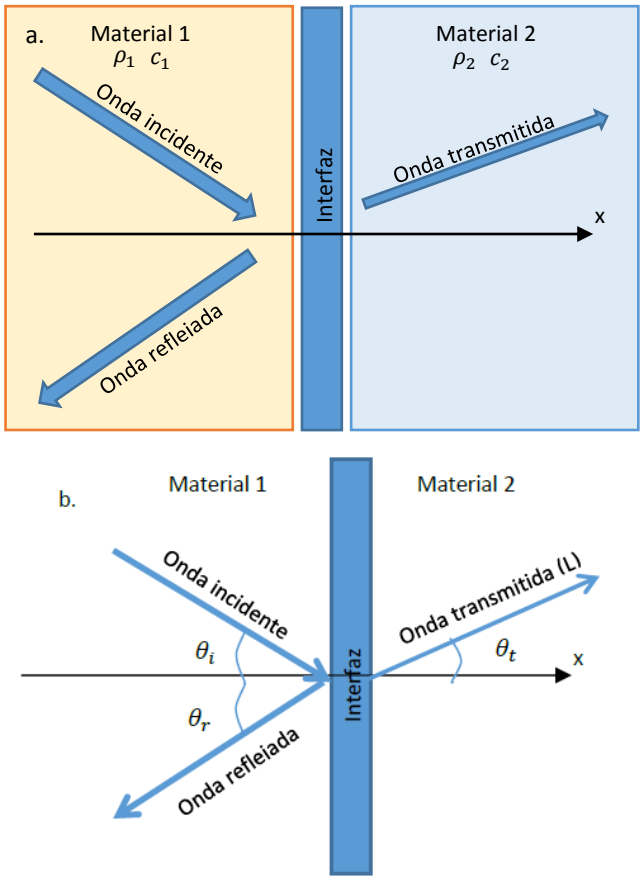



Ilustración 2-2 a) Transmisión de sonido de un material a Otro con incidencia de onda oblicua. b) Ángulos de Transmisión para incidencia de onda oblicua.

La expresión que describe una onda en movimiento en ángulo de incidencia normal a la interfaz está dada de la siguiente manera:

$$p(x,y,t) = \mathrm{A}e^{j(\omega t - kL)}$$

Ecuación 8

El valor de L es el vector de la onda transmitida, de esta manera, es posible separarlo en coordenadas X y Y dadas en la ecuación 9, tal como se muestra en la ilustración 2-2 b, donde:

$$L = x\cos\theta_t + y\sin\theta_t$$

Ecuación 9

La ecuación 10 describe la presión de la onda acústica para el primer y segundo material, tomando en cuenta que el ángulo con el que incide la onda, es igual al ángulo en que se refleja (primera ley de Snell):

$$p_1(x,y,t) = A_1 e^{j(\omega t - k_1(x\cos\theta_i + y\,sen\theta_i))} + B_1 e^{j(\omega t - k_1(x\cos\theta_i + y\,sen\theta_i))}$$

$$p_2(x,y,t) = A_2 e^{j(\omega t - k_2(x\cos\theta_i + y\,sen\theta_i))}$$

Ecuación 10

La ley de Snell es una relación entre ángulos que para incidencias oblicuas determina el ángulo de refracción a través de una superficie separada por los dos materiales, por tal motivo existe una relación entre el ángulo de transmisión y el ángulo de incidencia (segunda ley de Snell).

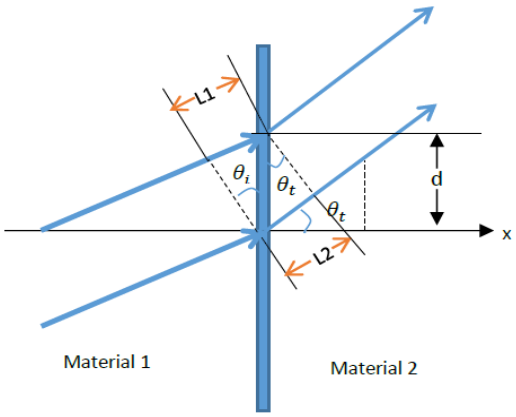



Ilustración 2-3 Frente de onda golpeando una interfaz en incidencia oblicua.

$$dsin\theta_i = L_1 = c_1\Delta t$$
$$dsin\theta_t = L_2 = c_2\Delta t$$

Ecuación 11 Relación entre ángulos de incidencia y transmisión con su movimiento uniforme para una incidencia oblicua.

Donde el recorrido y la velocidad uniforme de la onda transmitida (L2) e incidente (L1) tienen como relación el área superficial de la interfaz "d" con sus respectivos ángulos (Ilustración 2-3). Por tal motivo al dividir las expresiones de distancia y velocidad de L1 y L2 en términos para cada material obtenemos la ecuación 12.

$$\frac{sin\theta_i}{sin\theta_t} = \frac{c_1}{c_2}$$

Ecuación 12 Segunda ley de Snell.

Suponiendo que la onda incidente tiene una trayectoria sobre el eje x = 0, la presión acústica (ecuación 10) y las velocidades de partícula ejercidas son las mismas para cada material. De esta manera al sumar las expresiones descritas por estas dos variables, se obtiene una relación de magnitud referente a la presión transmitida e incidente de la siguiente forma:

$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{p_{tr}}{p_{in}} = \frac{2Z_2 cos\theta_2}{Z_1 cos\theta_t + Z_2 cos\theta_i}$$

Ecuación 13 Relación de magnitudes referentes a las presiones.

Para la incidencia oblicua, el coeficiente de transmisión para la potencia acústica seda a partir de la sustitución de la ecuación 12 y la expresión de la intensidad de la onda plana $I = \frac{p^2}{Z_0}$ en la ecuación 13, obteniendo el coeficiente de transmisión de potencia acústica como expresión final para incidencia oblicua de ondas incidentes ecuación 14.

$$a_t = \frac{2Z_1 Z_2 cos\theta_i cos\theta_t}{(Z_1 cos\theta_t + Z_2 cos\theta_i)^2}$$

Ecuación 14 Coeficiente de transmisión de potencia acústica para una incidencia oblicua.

**Pérdida por transmisión en materiales**

La pérdida por transmisión se genera a partir de la creación de una barrera acústica para reducir la energía transferida de un sitio a otro, se analiza el comportamiento general de la transmisión que se da a través de un panel o partición.

Al analizar este tipo de componentes existen tres regiones de operación, las cuales son:

- Región l: Controlada por la elasticidad.
- Región ll: Controlada por masa.
- Región lll: Controlada por amortiguación.

A continuación se generara el análisis respectivo para cada región de operación.

**Región l: Controlada por la elasticidad**

En esta región el panel vibra como un todo debido a la baja frecuencia y la transmisión de sonido se determina por la rigidez del material. Las expresiones para la presión acústica están dadas por la ecuación 1 y 2 asociando que el medio es igual a ambos lados y el panel es muy delgado en comparación con la longitud de onda ($\lambda$), de tal manera las ecuaciones de velocidad de partícula estarían dadas en la ecuación 3 y 4 diciendo que $Z = \rho_O c$.

En la superficie del panel podemos suponer una velocidad de partícula igual a la velocidad instantánea del panel V (t). Como resultado podemos obtener las siguientes expresiones:

$$A_1 - B_1 = A_2$$

Ecuación 15

$$\mathrm{V(t)} = \frac{\mathrm{A_2 e^{j\omega t}}}{\mathrm{\rho_O} c}$$

Ecuación 16 Velocidad instantánea.

La fuerza neta que actúa sobre el panel se puede representar de forma mecánica a la de un resorte, por lo tanto la fuerza de elasticidad se iguala a la de un resorte (ley de Hooke) dada por el panel. La compliancia mecánica se denotara con el símbolo $C_S$. Si se equilibra la fuerza del panel suponiendo que es delgado se obtiene la siguiente expresión de velocidad instantánea $-A_2 e^{j\omega t}/j\omega c\rho_O C_s$.

Realizando la sustitución de las ecuaciones 1 y 2 de presión acústica para la región 1 se obtiene:

$$A_1 + B_1 - A_2 = \frac{jA_2}{\omega\rho_O c C_s}$$

Ecuación 17 Presión acústica para la Región 1.

Al combinar las ecuaciones 14, 15 y 16 se obtiene la expresión para relación de coeficientes. A partir de dicha ecuación es posible determinar la ecuación que permite el cálculo del coeficiente de transmisión de potencia acústica para incidencia normal. En la vida real el sonido incide con ángulos aleatorios es decir que no solo se puede suponer un ángulo de incidencia. La potencia acústica promedio para incidencia aleatoria puede hallarse mediante la siguiente expresión:

$$a_t = 2\int_0^{\pi/2} a_t(\theta)\cos\theta\,\mathrm{sen}\theta\, d\theta$$

Ecuación 18 Potencia acústica promedio para incidencia aleatoria.

Se puede obtener la expresión para la transmisión de potencia acústica en la región 1 controlada por elasticidad a partir de la ecuación 18.

$$a_t = K_s^2 \ln(1 + K_s^{-2} = K_s^2 \ln(1/a_{tn}))$$

Ecuación 19 Transmisión de potencia acústica en la región 1.

Al obtener la expresión para pérdida por transmisión y ser sustituida por la expresión de transmisión para incidencia normal se obtiene la expresión final para la pérdida por transmisión de la región 1.

$$\mathrm{TL} = 20\log_{10}\left({}^{1}/_{\mathrm{K_s}}\right) - 10\log_{10}(0.23026\mathrm{TL_n})$$

Ecuación 20 Pérdida por transmisión para la región 1.

**Frecuencia de resonancia**

La frecuencia de resonancia marca el cambio de la región l a la región ll, este fenómeno se debe al aumento en la frecuencia permitiendo resonancia en el material a distintas frecuencias llamadas frecuencias resonantes. Para placas rectangulares con sus respectivas dimensiones a y b con espesor h, puede describirse la frecuencia de resonancia con la siguiente expresión:

$$f_{mn} = \left({}^{\pi}/_{4\sqrt{3}}\right) C_L[({}^{m}/_{a})^2 + ({}^{n}/_{b})^2]$$

Ecuación 21 Frecuencia de resonancia.

Donde m y n son números enteros; $C_L$ es la velocidad del sonido de ondas longitudinales en el material determinada por su densidad, el módulo de Young y la razón de Poisson.

Generalmente la frecuencia resonante más baja es el predominante y corresponde cuando los coeficientes m=n=1 en la siguiente ecuación:

$$f_{11} = \left({}^{\pi}/_{4\sqrt{3}}\right) C_L h[({}^{1}/_{a})^2 + ({}^{1}/_{b})^2]$$

Ecuación 22 Frecuencia de resonancia más baja.

**Región ll: controlada por masa**

En esta sección la rigidez del panel es independiente y la pérdida de energía depende de la masa del material dada para frecuencias más altas que las de la región 2.

El coeficiente de transmisión de potencia sonora está dado por la ecuación 22.

$$\frac{1}{a_{tn}} = 1 + (\frac{\pi f M_s}{\rho_1 c_1})^2$$

Ecuación 23 Coeficiente de transmisión de potencia sonora.

Hace referencia a la masa superficial o masa del panel por unidad de área de la superficie, $M_s = \rho_w h$, en el que $\rho_w$ es la densidad del panel, y en la ecuación 22, $\rho_1$ es la densidad y $c_1$ es la velocidad del sonido en el aire alrededor del panel.

La pérdida por transmisión para incidencia normal está relacionada con el coeficiente de transmisión de potencia por incidencia normal dada en la ecuación 23.

$$TL_n = 10log_{10}(1/a_{tn})$$

Ecuación 24 Pérdida por transmisión para incidencia normal.

Para incidencia aleatoria se ha encontrado experimentalmente la pérdida por transmisión relacionada con TLn por la ecuación 24 (Beranek, 1971).

$$TL = TL_n - 5$$

Ecuación 25 Pérdida por transmisión Experimental.

**Frecuencia crítica**

En la transición de la región ll a la lll se presenta una frecuencia crítica dada por la igualdad en las longitudes de ondas que inciden sobre el material con las ondas presentes en el aire. Al presentarse vibración en el panel como resultado del refuerzo en la onda incidente se presenta una disminución en la pérdida por transmisión dando como resultado el paso entre estas dos regiones.

Teniendo en cuenta las propiedades físicas del material y la velocidad del sonido en el aire encontramos que:

$$f_c = \frac{\sqrt{3}\ c^2 \rho_w}{\pi c_L}$$

Ecuación 26 Frecuencia critica con propiedades del material.

Donde,

$\rho_w$: es la densidad del material.
C: es la velocidad del sonido en el aire.
$c_L$: es la velocidad longitudinal del sonido en el panel.

**Región 3: controlada por amortiguamiento**

En esta región las frecuencias son mayores a la frecuencia crítica, la pérdida por transmisión es dependiente de la frecuencia y de la amortiguación interna del material. La ecuación 26 indica la pérdida por transmisión cuando la región es controlada por amortiguación. (Beranek, 1971).

$$TL = TL_n(f_c) + 10log_{10}(\eta) + 33.2210log_{10}\left({}^{f}/_{f_c}\right) - 5.7$$

Ecuación 27 Pérdida por transmisión en la Región 3.

La ecuación 26 toma en cuenta la incidencia normal del sonido dada por la cantidad $TL_n(f_c)$ que es equivalente a la ecuación 27.

$$TL_n(f_c) = 10log_{10}\left[1\left(\frac{\pi M_s f_c}{\rho_1 c_1}\right)^2\right]$$

Ecuación 28 Pérdida por transmisión de incidencia normal.

El valor de $\eta$ corresponde a coeficiente de amortiguación del material.

**Laminado de dos capas**

Los paneles compuestos por dos o más capas sólidas de material son frecuentemente usados en particiones para recintos o estructuras acústicas. Cuando los materiales están unidos sin espacios de aire, el panel compuesto obtendrá un eje central límite entre los dos materiales.

En la ilustración 2-4 se muestra la unión de dos materiales unidos sin cavidad de aire, donde x es el eje de flexión el cual no sufre cambios de longitud cuando la onda incide al material, encontrando los términos o características propias del mismo material respecto a sus longitudes superficiales.

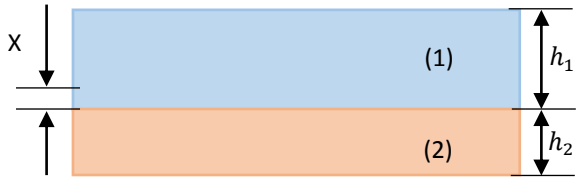



Ilustración 2-4. Laminado de dos capas.

Si el eje de flexión x se encuentra en el material 1, se refiere a la existencia de un desplazamiento positivo hacia este medio, pero negativo para el material 2, de esta misma forma ocurre si el eje de flexión se desplaza al materia 2 siendo negativo para el medio 1, de esta manera podemos encontrar la cantidad de energía en términos de las propiedades de las capas individuales.

$$x = \frac{E_1 h_1^2 - E_2 h_2^2}{2(E_1 h_1 + E_2 h_2)}$$

Ecuación 29

Donde,

$E_i$, es el módulo de Young para el material o medio i.

$h_i$, es el espesor del material o medio i.

La pérdida por transmisión de la región 3 puede ser determinada a partir de la ecuación 29 obteniendo la ecuación 30.

$$TL = 10log_{10}1 + \left[\left(\frac{\pi M_s f}{\rho_o c}\right)^2\right] - 5$$

Ecuación 30 Pérdida por transmisión para la región controlada por amortiguamiento.

La masa específica para los materiales está dada por la ecuación 31:

$$M_s = \rho_1 h_1 + \rho_2 h_2$$

Ecuación 31 Masa especifica.

La frecuencia crítica o de coincidencia de onda para el panel laminado se puede encontrar a partir de la ecuación 30, donde c es la velocidad del sonido alrededor del panel y B es la rigidez a la flexión del panel dada por la ecuación 32 y B es la rigidez a la flexión del panel determinada en la ecuación 33.

$$f_c = \frac{c^2}{2\pi}\left(\frac{M_s}{B}\right)^{1/2}$$

Ecuación 32 Frecuencia Critica.

$$B = \frac{E_1 h_1^3}{12(1-\sigma_1^2)}[1 + 3(1 - 2x/h_1)^2] + \frac{E_2 h_2^3}{12(1-\sigma_2^2)}[1 + 3(1 + 2x/h_2)^2]$$

Ecuación 33

Donde,

$\sigma_i$: es la razón de Poisson de cada material o medio i.

La pérdida de transmisión para un panel en capas puede determinarse a partir de la ecuación 26 con el coeficiente de amortiguamiento total ɳ calculado a partir de ecuación 34.

$$\eta = \frac{\eta_1 E_1 h_1 + \eta_1 E_1 h_2 (h_1 + h_2)^2}{E_1 h_1^3[1 + 3(1 - 2x/h_1)^2] + E_2 h_2^3[1 + 3(1 + 2x/h_2)^2]}$$

Ecuación 34 Coeficiente de Amortiguamiento.

## 2.2.2. Absorción de los materiales

La absorción acústica se ve influenciada por la propagación del sonido en un espacio cerrado y las superficies limitantes. Las ondas sonoras que viajan por el recinto chocan en las superficies perdiendo energía, de esta forma reduciendo el tiempo de reverberación.

Los materiales absorbentes no cambian la directividad de las ondas sonoras emitidas por la fuente, sin embargo, presentan resistencia a la energía de forma superficial (Ilustración 2-5).

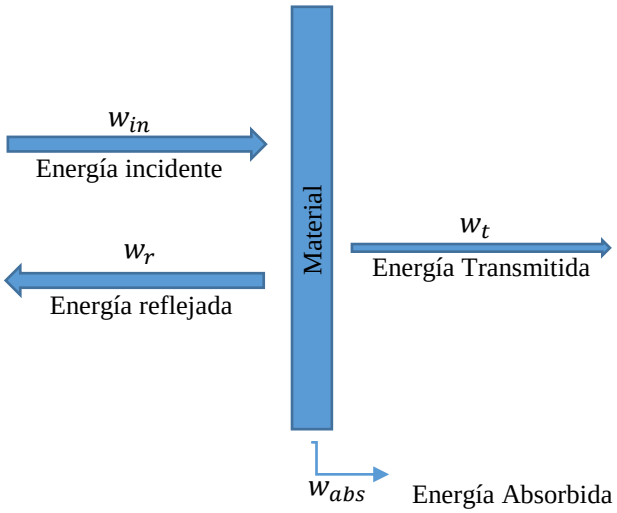



Ilustración 2-5 Flujo de energía mediante una superficie.

La energía incidente es igual a la suma de la energía absorbida, la energía reflejada y la energía transmitida, expresándose en términos de potencia como $W_i = W_r + W_{abs} + W_t$. Las relaciones entre la potencia reflejada, la potencia absorbida y la potencia transmitida conjunto a la energía incidente en el material dará como resultado los coeficientes de reflexión ($R$), absorción ($\alpha$) y transmisión $a_t$ con propiedades energéticas representados en la ecuación 35.

$$R = \frac{W_r}{W_{in}} \qquad \alpha = \frac{W_{abs}}{W_{in}} \qquad a_t = \frac{W_t}{W_{in}}$$

Ecuación 35 Coeficientes energéticos.

La absorción de energía acústica se puede presentar en tres diferentes mecanismos, paneles perforados, paneles no perforado y paneles con un espacio de aire detrás del panel (Barron R. F., 2003). Las propiedades como el espesor, la densidad y la porosidad del material implican la absorción distribuida en bandas de frecuencia específicas; las propiedades mencionadas en los materiales absorbentes se involucran en detalles constructivos, los cuales, no se pueden representar mediante una expresión matemática (Carrion Isberg., 1998).

El funcionamiento de un material absorbente está representado por canales donde la onda sonora puede desplazarse. La disipación de la energía se produce en cuanto a la distribución y el número de estos canales o conductos produciendo absorción (Carrion Isberg., 1998). Por ende, podemos definir la porosidad como la cantidad de volumen de aire dentro del material absorbente (Castillo J., Costa A., 2012), que determinará el comportamiento de los coeficientes de absorción y por consiguiente la onda sonora incidente será parcialmente reflejada.

Sin embargo, existe otra propiedad que va de la mano con la porosidad y se conoce como resistividad, debido a que si los materiales absorbentes son porosos en su totalidad, estos no van a generar la absorción necesaria y la distribución en frecuencia será parecida a la de la superficie sin revestimiento. La resistividad es la capacidad que tiene el material de oponerse a la energía sonora que incide sobre la superficie, y da una idea de la cantidad de la energía absorbida de dicho material (Castillo J., Costa A., 2012). Sin embargo, al incrementarse la porosidad del material, la absorción aumentará, debido a que la onda incidente penetra en mayor medida, logrando mayor fricción del aire entre las superficies del material  transformando la energía sonora en calor (Castillo J., Costa A., 2012).

Las propiedades físicas como la densidad y el espesor son variables independientes que afectan directamente la distribución de la energía sonora respecto al rango de frecuencias. El espesor (D) de los materiales está relacionado con el incremento de la absorción, esto es debido a que el espesor es mucho menor a la longitud de onda del sonido del material $D \ll \lambda$ (Carrion Isberg., 1998). Además contamos con que es una superficie rígida y la velocidad de partícula va a ser nula al momento en que incide la onda, incluso para cuando la onda sea reflejada, los valores de la

amplitud de la velocidad de partícula serán próximos a cero y por lo tanto la fricción de las partículas de aire con los canales del material será reducida (Carrion Isberg., 1998).

La absorción aumenta conforme al espesor del material, si aumentamos la frecuencia la longitud de onda $\lambda$ disminuiría, por lo tanto, el espesor $D$ será cada vez mayor implicando que la velocidad de partícula aumente disipando energía y aumentando la absorción (Carrion Isberg., 1998).

Finalmente lo que respecta a la densidad del material, los efectos son mayores cuando esta variable física incrementa progresivamente, sin embargo, llega hasta un límite en el cual la absorción empieza a disminuir (Carrion Isberg., 1998), este límite se presenta cuando la onda sonora incidente es menor, por lo tanto, genera una mayor reflexión.

### 2.2.3. Puertas acústicas

Los materiales acústicos cuentan con propiedades determinadas por variables físicas como la densidad, el espesor, la porosidad entre otros. Estas variables determinan la reducción de la energía sonora para optimizar las condiciones acústicas.

Para la construcción de puertas acústicas generalmente son usados materiales porosos, debido a que sus propiedades contribuyen a evitar resonancia en cavidades de aire (Trevor J.C., Dantonio P,. 2004), una puerta es un modelo de las distintas particiones expuestas por Hongiston.

No es lo mismo absorción acústica que aislamiento acústico. Los materiales porosos que se introducen entre las cámaras de cerramiento como: paredes, fachadas, paneles aislantes y puertas acústicas, no aportan apenas aislamiento acústico por sí mismo, sin embargo juegan un papel importante en la mejora del aislamiento acústico de la partición. Por lo general, los materiales absorbentes que se colocan entre estas particiones suelen ser excelentes aislantes térmicos, debido a que son materiales con una alta porosidad y baja masa. Para las puertas acústicas según la empresa Acústica Integral el material de relleno debe ser fonoabsorbente (material capaz de

absorber y atenuar el sonido) e incluso para empresas como AudioTec utilizan rellenos fono-aislantes (Materiales de mayor atenuación que absorción).

Empresas como Iberacústica utilizan placas de yeso internas en las estructuras teniendo la finalidad de mejorar las características acústicas de la puerta, mejorando la resistividad de la puerta y con ello el aislamiento brindado.

## 2.2.4. Sellamientos en puertas

Los sellamientos también conocidos como empaques o burletes, son elementos rígidos o semirrígidos los cuales cuentan con ciertas características físicas, tales como: la dimensión, el espesor y la forma o el perfil en las que en el mercado se encuentran.

Los materiales de fabricación son distintos, pueden ser de caucho, espuma y felpa o textura de terciopelo. Por lo general los sellamientos son instalados en las hendiduras o rendijas existentes entre el marco y la hoja de la puerta. Por este motivo los sellamientos tienen el fin de garantizar una mayor hermeticidad previniendo principalmente el flujo de aire. Existen tres tipos de sellamientos, cada uno contempla diferentes características.

**Sellamientos de contactos**

Son sellamientos que generan hermeticidad al tener contacto con la puerta acústica, por lo general, estos tipos de sellamiento se colocan en el marco. Estos sellamientos tienen distintos perfiles (formas: P, E y D) dependientes del espacio de la rendija o hendidura entre el marco y la puerta (imagen 2-1), Adquiriendo dimensiones que oscilan entre los 4 y 5 mm (milímetros), de espesor de los sellamientos.

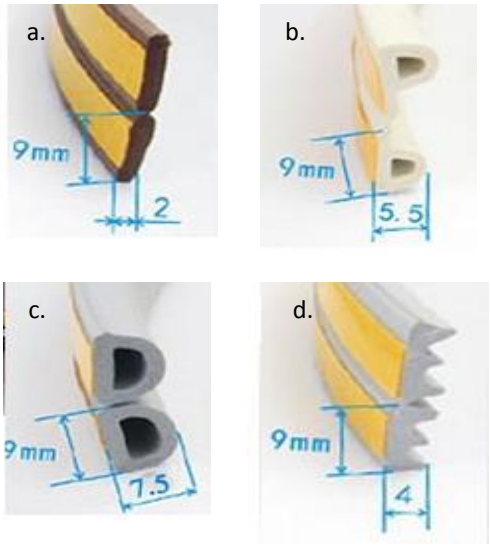



Imagen 2-1 Formas de perfiles de Sellamientos de Contacto. a) Perfil I, b) perfil P, c) perfil D, d) perfil E.

**Sellamientos ajustables y de fricción**

Como su nombre lo indica, son sellamientos que actúan acoplándose de manera mecánica o automática a la puerta de tal modo que al cerrarse este se ajuste con el marco. Generalmente se utilizan en la parte inferior de la estructura como es mostrado en la imagen 2-2, algunos de estos sellamientos son autoadhesivos, sin embargo otros cuentan con mecanismos más sofisticados, o simplemente tienden a tener complicaciones en cuanto a su manipulación al momento del montaje debido a sus características físicas como los de fricción.

Imagen 2-2 Sellamiento Ajustable y fricción.

**Sellamientos magnéticos**

Son sellamientos a base de caucho que hacen uso de una cinta magnética en su interior con la finalidad de brindar hermeticidad entre el marco y la hoja de la puerta sin necesidad de ningún elemento externo que genere presión, es decir tener la posibilidad de cerrar la hoja de la puerta sin necesidad de chapas o cerrojos. Los sellamientos magnéticos constan de diferentes perfiles sencillos o dobles donde el imán es introducido, los cuales varían según el modelo mostrados en la imagen 2-3.

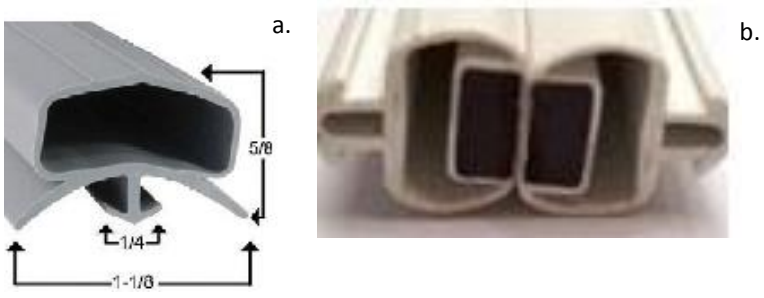



Imagen 2-3 Sellamiento Magnético, a) Perfil sencillo b) Perfil doble.

## 2.2. Marco Normativo

Los lineamientos para determinar un correcto análisis en el estudio acústico se demuestra a través de la Organización Internacional de Normalización (ISO), que señala el reciente proceso de medición in situ del aislamiento acústico en edificios y los de elementos de construcción y en laboratorio.

A continuación se encontrarán algunas normas las cuales aplican para casos de aislamiento a partir de la medición in situ de distintos elementos:

### 2.2.1. Norma ISO 10140 – 1 A1 (2011): Medición en laboratorio del aislamiento acústico de los elementos de construcción, Parte 1: Reglas de aplicación para productos específicos, Modificación 1: Directrices para la determinación del índice de reducción acústica de juntas rellenas de material de relleno y/o de elementos de sellado.

Esta una modificación para los casos en que se quiere analizar pequeñas aberturas, en este caso aplica al sellamiento de ranuras, huecos o justas entre piezas de las puertas o ventanas. También hace un acercamiento para determinar el índice de reducción sonora en estos casos (apartado J.1). La ecuación 36 presenta el índice de reducción acústica de las juntas considerando la transmisión acústica en hendiduras.

$$R_S = L_1 - L_2 + 10\ log\frac{S_n l}{A l_n}$$

Ecuación 36 índice de reducción acústica de las juntas considerando la transmisión acústica.

Donde,

L1, es el nivel de presión acústica energético medio en el recinto emisor.

L2, es el nivel de presión acústica medio en el recinto receptor.

l, es la longitud de la ranura o junta en metros.

Sn, es el área de referencia, en metros cuadrados ($1m^2$).

ln, es la longitud de referencia , en metros ($m$).

A, es el área de absorción equivalente en el recinto receptor, en metros cuadrados.

Además especifica parámetros geométricos donde aconseja las dimensiones que deben tener estas ranuras, donde se sugiere una longitud de un metro y el ancho de la hendidura no mayor a 5mm. Las generalidades del índice de reducción acústica para el elemento de ensayo como la puerta, el cual debe tener un índice muy elevado el cual permitirá obtener resultados de medición fiables en espectro de la frecuencia, el ensayo y sus condiciones de funcionamiento después de su montaje, de los cuales se establece la geometría en el cual es pertinente la anchura de la junta y el ajuste entre el marco y la puerta. Además se establece que para el ancho de los sellamientos, se necesita una abertura con 3mm demás que el habitual, esto es debido a que la puerta debe funcionar en condiciones reales y el sellado tiende a expandirse con el tiempo (Apartados J.2, J.3.3 y J.4, respectivamente).

### 2.2.2. Norma ISO 10140 – 2 (2011): Medición en laboratorio del aislamiento acústico de los elementos de construcción, Parte 2: Medición del aislamiento acústico al ruido aéreo.

La norma determina el procedimiento completo para la medición del aislamiento acústico, esta permite comparar las propiedades del aislamiento de los elementos de construcción, para hacer una caracterización de cada uno de estos como los sellamientos.

Para el proceso de medición se deben cumplir los requisitos de la preparación, el montaje y el procesamiento de datos (Apartado 5 y 5.3) del elemento de ensayo, en donde se ven involucrados los recintos emisor y receptor, en los cuales se toman los datos de las presiones acústicas en los rangos de 100Hz a 5000Hz. Para el procesamiento de datos se calcula los índices de reducción aparente o la diferencia de nivel normalizados, los cuales deberán ser corregidos según el tiempo de reverberación.

La norma hace una descripción detallada para las puertas y elementos de ensayo de tamaño reducido (Apartado 6.5), así como los del acondicionamiento del elemento de construcción en los recintos, los cuales van a depender de la temperatura y la humedad relativa en los recintos de ensayo en el momento, durante y al finalizar el procedimiento de medición (Apartado 6.1).

Conforme a este proceso la norma explica algunos requerimientos para elementos más pequeños como las aberturas, hendiduras o flancos, en los cuales se menciona que la partición en la cual se van a colocar los sellamientos deben tener un aislamiento elevado, de tal modo que la transmisión en la partición sea despreciable comparado con el del elemento o sellado a evaluar (Apartado 6.5), si no pasa eso se debe cumplir con las condiciones siguientes (Apartado 7,2):

$$R'_F < -15dB \ , es\ despreciable\ el\ sonido\ transmitido$$

$$R'_F \geq -15dB \ , se\ debe\ corregir\ \ utilizando\ el\ proceso\ del\ anexo\ A.$$

$R'_F$, Es el índice de reducción acústica equivalente para el flanco o ranura.

Conforme a esto la norma desarrolla una metodología en la cual determina la transmisión por estas hendiduras y que son especificadas en el anexo A. Para lo cual se debe cumplir que la diferencia del índice de reducción sonora aparente entre la partición y el elemento debe ser de al menos 6dB en cualquier frecuencia.

Para elementos técnicos pequeños, el proceso de medición para determinar la transmisión por flancos se puede hacer para la partición con las hendiduras o huecos que existen entre el marco y la puerta, para luego hacer la medición sobre el montaje de los sellamientos.

### 2.2.3. Norma ISO 16283-1 (2014): Medición in situ del aislamiento acústico en los edificios y en los elementos de construcción Parte 1: Aislamiento a ruido aéreo.

La norma establece la metodología de medición in situ del aislamiento acústico para ruido aéreo, la cual reemplaza la norma ISO 140 - 4 (1999), ISO 140-5 (1999) y la ISO 140-14 (1999). Sin embargo la norma adopta y origina nuevas especificaciones con respecto a la geometría de los recintos (Apartado C.3) del anexo C y el rango de frecuencias de 50 Hz a 5000Hz para la evaluación.

Teniendo en cuenta que el recinto es muy grande, y este es mayor a los $250\ m^3$, la norma describe el procedimiento en cuanto al posicionamiento de altavoces y micrófonos, donde lo se utilizan dos posiciones del altavoz y lo recomendable es no colocarlo al frente de la puerta ni cerca de la pared en la que se montó la puerta. El proceso establecido para determinar el nivel de presión sonora, sugiere cinco posiciones de micrófono en los dos recintos de estudio, de esta forma, medir el nivel de presión sonora, posteriormente aplicar la ecuación 37 hallando el nivel de presión promedio en los recintos (apartado C.4).

$$L = 10\log(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} 10^{\frac{Li}{10}})$$

Ecuación 37 Promedio del nivel de presión sonora.

Donde,

L1, L2…Ln son niveles de presión acústica en diferentes posiciones de micrófono en el recinto.

El tiempo de reverberación, ruido de fondo y de igual manera el tiempo promedio de captura en cada posición de micrófono debe ser de 6 segundos (Apartado 7), esto con el fin de cuantificar, evaluar y comparar la transmisión acústica.

Además expone nuevos indicios de la evaluación del aislamiento acústico en donde las puertas forman una separación común (Apartado C.4), así como los espacios más comunes en donde las puertas se montan, y emplea un procedimiento para estimar la pérdida por transmisión a través de trayectorias laterales y paredes circundantes (Apartado C.4.4) en el cual se emplea la siguiente ecuación 38.

$$R'_{puerta} = L1 - L2 + 10\,Log\left(\frac{S_{puerta}}{A}\right)$$

Ecuación 38 Índice aparente de reducción acústica de la puerta.

Donde,

$R'_{puerta}$, es el índice de reducción acústica aparente de la puerta.

$L1$, es el nivel de presión acústica promedio en el recinto fuente.

$L2$ , es el nivel de presión acústica promedio en el recinto receptor.

$A$, es el área de absorción equivalente en el recinto receptor.

$S_{puerta}$, es el área de la abertura libre en la que se monta la puerta, incluido su cerco.

Además requiere una segunda medición en la cual se verifican la transmisión por flancos, para la cual se utiliza la siguiente expresión.

$$R'_{Puerta_{aisl}} = L_{1_aisl} - L_{2_{aisl}} + 10\log\left(\frac{S_{puerta}}{A}\right)$$

Ecuación 39. Índice aparente.

Donde,

$L_{1_aisl}\ y\ L_{2_{aisl}}$, Son niveles del recinto fuente y receptor.

Se deben comparar los resultados de la ecuación 38 y ecuación 39, pueden ser tres comparaciones.

$$R'_{Puerta_{aisl}} - R'_{puerta} \geq 15dB$$

Sin cometer ningún error durante la medición se cumple que,

$$6dB < R'_{Puerta_{aisl}} - R'_{puerta} < 15dB$$

La transmisión está afectada por la transmisión a través de las construcciones circundantes. Esto debe ocurrir solo si el aislamiento adicional (Sellamientos) funciona se utiliza la ecuación 40.

$$R'_{puerta_aprox} = -10\log\left(\frac{10^{-R'_{puerta}}}{10} - \frac{10^{-R'_{puerta_{aisl}}}}{10}\right)$$

Ecuación 40 Índice Sonoro Aparente Aproximado de una Puerta.

## 2.2.4. Norma ISO 3382-2 (2008): Medición de parámetros acústicos en recintos Parte 2: Tiempo de reverberación en recintos ordinarios.

Especifica los métodos de medición para el tiempo de reverberación de un recinto ordinario con el fin de determinar algunos procesos para la corrección de las mediciones de aislamiento acústico, por lo cual la norma describe el proceso de medición, el equipo y el número de mediciones requeridas según el método para evaluar.

Debido a que el recinto es muy grande se estableció el método de ruido interrumpido mediante el método ingeniería, el cual establece dos posiciones de fuente con seis combinaciones de micrófonos para un rango de frecuencias de al menos 125Hz a 4000Hz en banda de octava, o 100Hz a 5000Hz en bandas de un tercio de octava.

El método de Ruido interrumpido (Sección 5.2) se utiliza una fuente capaz de producir un ruido pseudo-aleatorio con un nivel de presión acústica suficiente, lo cual genera un campo acústico que alcance un estado estacionario en el recinto, con el fin de garantizar una curva de decrecimiento de al menos de 35 dB por encima del ruido de fondo. De esa forma se promedian los datos de las mediciones según el promedio de un número de mediciones en cada una de las posiciones para obtener una incertidumbre aceptable dado por las siguientes ecuaciones.

$$\sigma(T_{20}) = 0.88T_{20}\sqrt{\frac{1+(1.90/n)}{N\ B\ T_{20}}}$$

Ecuación 41 Desviación T20

$$\sigma(T_{30}) = 0.55T_{30}\sqrt{\frac{1+(1.90/n)}{N\ B\ T_{30}}}$$

Ecuación 42 Desviación T 30.

Donde,

B, es el ancho de banda (Hz).

n, es el número de decrecimientos medidos en cada posición.

N, es el número de posiciones de medición independientes (combinaciones de posiciones de fuentes y micrófonos).

$T_{20}$, es el tiempo de reverberación, en segundos, en función de un rango de evaluación de 20dB.

$T_{30}$, es el tiempo de reverberación, en segundos, en función de rango de evaluación de 30dB.

Con referencia al anexo A.2 la varianza de conjunto y la varianza espacial se establecieron la siguiente ecuación:

$$\frac{\sigma(\bar{T})}{\bar{T}} = G\sqrt{\frac{1+(H/n)}{N\ BT}}$$

Ecuación 43.

Donde,

$\sigma(\bar{T})$, es la desviación típica del tiempo de reverberación medio (Segundos).

B, es el ancho de banda (Hz).

G, H son constantes que dependen del rango de evaluación.

T, es el tiempo de reverberación (Segundos)

### 2.2.5. Norma ISO 717-1 (2013): Evaluación del aislamiento acústico en los edificios y los elementos de construcción Parte 1: Aislamiento de ruido aéreo.

El objetivo de esta norma es normalizar la medición del aislamiento a ruido aéreo de elementos de construcción y de edificios, independiente del método de medición. Sin embargo la norma hace la normalización mediante la cual evalúa la dependencia frecuencial del aislamiento al ruido aéreo, de tal modo que pueda convertirse en un único valor que caracterice el comportamiento acústico de los sellamientos empleados en la puerta acústica.

El método de comparación que utiliza la norma está determinado para los resultados del aislamiento en bandas de octava y tercios de octava, en un rango de 100 Hz a 3150 Hz, de este modo se usan los valores de referencia de la tabla 3 del numeral 4.2 de la norma desplazando la curva de referencia en saltos de 1 dB o 0,1 dB para expresión de incertidumbre, hasta que la suma de las desviaciones desfavorables sea lo más cercano a 32 dB.

De este modo se conocen la magnitud global única llamada Índice ponderado de reducción sonora (Rw), parámetro que indica caracterización del aislamiento acústico de un elemento, para nuestro caso el de los sellamientos.

### 2.2.6. Norma ISO 12999-1 (2014): Determinación y aplicación de las incertidumbres de medición en la acústica de edificios Parte 1: Aislamiento acústico.

En la acústica de la edificación, es indispensable la determinación de las incertidumbres de tal manera que sean comprensibles y próximas a la realidad. La evaluación de este parámetro define si se cumple un requerimiento en cuanto a los resultados de las propiedades acústicas de algún producto o elemento que está asociado a las magnitudes como lo es el aislamiento acústico.

La norma específica un procedimiento detallado para la evaluación de la incertidumbre basado en modelos matemáticos que completan la medición, donde se incorporan conceptos de reproducibilidad y repetibilidad ofreciendo la posibilidad de indicar la incertidumbre de las mediciones realizadas de acuerdo al método.

Existe repetibilidad cuando ocurre el mismo procedimiento de la medición, con los mismos operarios y el mismo sistema de medición, siempre en la misma localización durante un corto periodo de tiempo con un objeto determinado. Mientras que la reproducibilidad está bajo condiciones donde la medición es realizada con diferentes sistemas de medición, en locaciones diferentes con operarios distintos de forma repetitiva sobre objetos similares.

De acuerdo al anexo B apartado B.2, la incertidumbre del índice de reducción acústico ponderado puede calcularse bajo la suposición de correlación positiva entre los aislamientos en bandas de tercio de octava, causada por el uso de los mismos elementos de medición y posiciones de la fuente para todas las bandas de frecuencia obteniendo valores mayores a 1. De tal manera, la incertidumbre es hallada teniendo en cuenta el método de cálculo del índice de reducción acústico ponderado expresado por la norma ISO 717-1, asumiendo este proceso la correlación positiva total $u(R_w)$ es un valor único descrito por la sustracción entre la sumatoria de las incertidumbre y el aislamiento acústico medido (correlaciones positivas $R_w + u(R_w)$ y negativas $R_w - u(R_w)$) de la ecuación 44, indicado el resultado para hallar la incertidumbre de medición:

$$u(R_w) = \frac{R_w + u(R_w) - [R_w - u(R_w)]}{2}$$

Ecuación 44 Incertidumbre de medición del índice de reducción sonora acústica ponderada.

# 3. Diseño Metodológico

## 3.1. Tipo y enfoque de investigación

Cuantitativa, en la determinación del funcionamiento de los sellamientos propuestos se medirá la eficiencia comparando los niveles de presión sonora generando en el recinto fuente respecto al nivel transmitido al recinto receptor, de esta forma, evaluar la transmisión de ruido en la partición junto con la puerta acústica y el cambio de sellamientos implementados.

Para esto se evaluarán diferentes tipos de sellamiento para la minimización de los problemas de aislamiento acústico de una puerta tratada acústicamente, además la puerta tendrá fibra de vidrio como material acústico absorbente. Esto con el fin de determinar la funcionalidad de los sellamientos para una puerta acústica la cual es implementada en distintos lugares, logrando así resaltar su rendimiento al disminuir el paso del ruido.

Por otro lado la evaluación de tres tipos de sellamiento se llevará a cabo a partir del estudio de tres sellamientos que pueden ser ajustables, magnéticos y de contacto. Además el material acústico interno implementado en el diseño de la puerta acústica puede ser de fibra de vidrio o lana de roca, lo que dependerá de la investigación dentro del contexto del diseño ingenieril de la puerta acústica.

La implementación y evaluación de diferentes tipos de sellamiento minimizarán la transmisión de ruido a través de las puertas acústicas entre recintos. Estos sellamientos se pueden clasificar según su funcionalidad haciendo uso de descriptores acústicos como Rw o STC.

A continuación se hace una descripción de las actividades a grandes rasgos para el desarrollo del proyecto, las cuales están directamente relacionadas con los objetivos específicos.

Actividad 1: Diseño y construcción.

- Descripción: Esta etapa estará enfocada principalmente al diseño y la construcción de una puerta acústica, la cual consta de dos escalones en acero con su debida estructura de soporte con material acústico interno.

Actividad 2: Pruebas e implementación de sellamientos.

- Descripción: Una vez construida la puerta acústica, se evaluarán los sellamientos ajustables y sellamientos de contacto utilizando la puerta acústica mediante la norma ISO 16283-1 de aislamiento acústico, este proceso será continuo debido a que la norma es precisa a los modelos de medición.

Actividad 3: Validación e incorporación de resultados:

- Descripción: Con el fin de determinar el funcionamiento y la usabilidad de los tipos de sellamientos se generarán comparaciones entre los parámetros acústicos como nivel de presión sonora (SPL) y pérdida por transmisión (TL) para cada tipo de sellamiento.

## 3.2. Recopilación de datos

Mediciones directas de los parámetros de desempeño de los sellamientos: Se cuantificará la eficiencia de tres tipos de sellamiento, en cuanto a la transmisión de ruido al desplazarse de un recinto a otro así como la estructura interna y externa de la puerta ante las variaciones del nivel de presión sonora (SPL) y la pérdida por transmisión (TL).

Estas mediciones se harán según la Norma ISO 16283-1 (2014): Medición in situ del aislamiento acústico en los edificios y en los elementos de construcción Parte 1: Aislamiento a ruido aéreo, la cual nos permitirá hacer la comparación de los tres tipos de sellamiento según los parámetros acústicos anteriormente mencionados.

## 3.3. Variables o categorías de análisis

### 3.3.1. Variables independientes

- Tipos de Sellamiento.
- Material interno absorbente.
- Transmisión de ruido.
- Estructura Externa de la puerta.

### 3.3.2. Variables dependientes

- Nivel de presión sonora (SPL).
- Pérdida por transmisión sonora (TL).
- Variación de niveles de presión sonora.
- Índice de reducción sonora (Rw).

### 3.3.3. Variables foráneas

- Temperatura.
- Humedad.
- Ruido de fondo.

## 3.4. Instrumentos

- Sonómetro.
- Pistofono.
- Interfaz de audio.
- Micrófonos de medición.
- Sistema de adquisición de datos.
- Fuente acústica omnidireccional.

# 4. Desarrollo ingenieril

En esta sección se describe el proceso llevado a cabo para el diseño, la construcción, el montaje y el ensamble de la puerta acústica. Se presentarán características que abarcan el proceso de diseño desde la fabricación, así como información de materiales de relleno para marcos de soporte y puertas acústicas. Adicionalmente se contemplan factores exteriores relevantes durante el proceso de construcción, como lo son: las bisagras, la cerradura, la soldadura y refuerzos internos.

Para el diseño de la puerta se utilizaron herramientas tecnológicas que permitieron realizar simulaciones entre los materiales propuestos, para garantizar un aislamiento dentro de un rango adecuado según la información recolectada sobre la fabricación de puertas acústicas en empresas. El proceso de selección de los sellamientos destinados a este estudio es un punto clave en esta investigación y dependiente de las dimensiones de la puerta acústica, por tal motivo se muestra la evaluación realizada para este ítem.

Determinando el aislamiento total de la puerta acústica en relación al tipo de sellamiento usado, se somete a una serie de mediciones reguladas por la norma ISO 16283-1 con la finalidad de evidenciar el comportamiento acústico de las combinaciones sellamiento-puerta.

## 4.1. Valoración y selección de los componentes de la puerta acústica

En la etapa inicial del proceso de desarrollo de la puerta acústica se realizó una investigación a nivel global de 15 empresas fabricantes de estos productos. La información encontrada se clasificó en dos secciones diferentes; la primera muestra los materiales internos de relleno de la hoja, la segunda sección presenta los marcos de soporte junto con el relleno usado por los fabricantes. No todas las empresas muestran este tipo de información, por lo contrario la reservan y muestran solo la clasificación del aislamiento acústico que ofrece bajo diferentes indicadores (Rw-STC).

### 4.1.1. Hoja de la puerta acústica

Se tomaron como referencia 4 empresas que mostraban la información pertinente sobre el relleno interno de sus puertas acústicas. En la tabla 4-1 se muestra la información recolectada por cada empresa, para este caso los materiales externos e internos de la hoja de la puerta acústica.

| **Empresas productoras de puertas acústicas** | | | |
|---|---|---|---|
| **País** | **Nombre de la empresa** | **Materiales externos** | **Materiales internos** |
| **Alemania** | MECALUX logismarket | Madera comprimida (alta densidad) | Lana de roca. |
| **España** | Iberacústica | Acero (espesor 1.5 mm) | Lana de roca de distintas densidades. Placa de yeso-cartón. |
| **España** | WST | Acero (espesor 1.5mm a 2.0mm) | Material fono aislante. Placa de yeso laminado. |
| **Australia** | ACD | Acero (0.9mm a 1.5 mm) | Fibra de vidrio. |

Tabla 4-1 Empresas productoras de puertas acústicas.

La tabla 4-1 permite apreciar que la mayoría de las empresas mostradas usan internamente en sus modelos materiales de tipo fibroso, acompañadas de otro material como el yeso presentado una densidad y rigidez más alta. Para los materiales externos una de las empresas indagadas trabaja con madera de alta rigidez y las demás con acero de diferentes espesores.

Las puertas acústicas de las empresas en estudio son diseñadas y construidas a partir del concepto de particiones de multicapa comúnmente llamadas tipo *"sándwich"*. La diferencia en la densidad de los materiales propuestos hace que el comportamiento acústico en temas de aislamiento posea variaciones, es decir, el resultado del SPL (magnitud) representado en un espectro de frecuencias será distinto.

De la tabla 4-1 el 70% de las empresas presenta diseños de puertas acústicas de doble escalón, por tal motivo para el diseño de la hoja de la puerta acústica se tomó como referencia dicho porcentaje, con la finalidad de obtener resultados similares a los datos indagados en estas empresas. La ilustración 4-1 presenta el diseño realizado por la empresa Iberacustica donde se exterioriza dicha configuración, al igual que la empresa WST en la ilustración 4-2, asimismo empresas como LogisMarket, Knauf y Spacedoors trabajan con puertas acústicas escalonadas diseñadas para marcos de soporte sencillo.

Las empresas en estudio no mencionan del tipo de sellamiento usado y solo tienen como referente el aislamiento total de la puerta acústica bajo diferentes indicadores.

Ilustración 4-1 Modelo de doble escalón-Iberacústica.

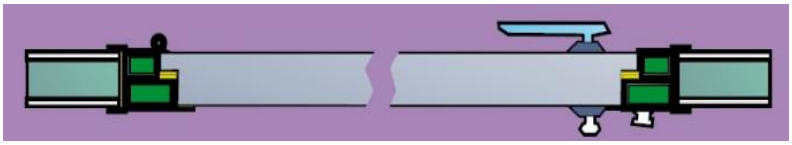


Ilustración 4-2 Modelo de doble escalón - WST

## 4.1.2. Materiales de relleno de la hoja-puerta acústica.

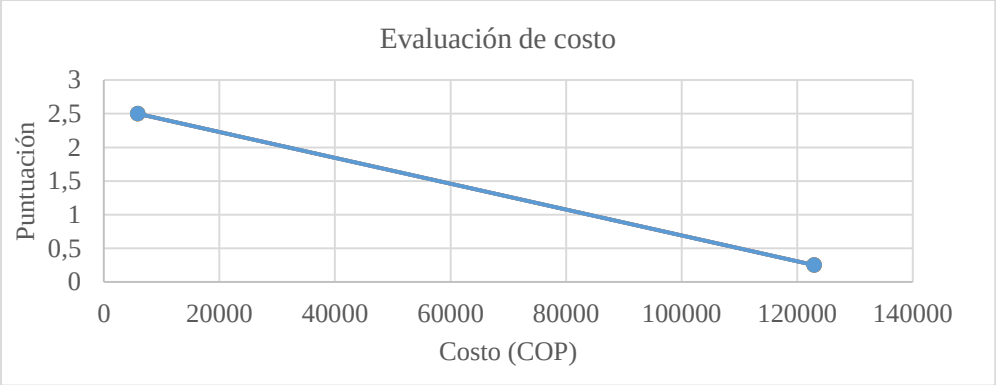
Basado en la información recolectada sobre él estudió de los materiales usados en puertas acústicas (tabla 4-1), se efectuó una indagación de materiales como lo son: fibra de vidrio (diferentes densidades), lana de roca (diferentes densidades), espuma de poliuretano (diferentes dimensiones) y yeso (diferentes espesores y funciones). Estos materiales fueron evaluados bajo cuatro parámetros diferentes, obteniendo un material que fuese adecuado en el desarrollo de la puerta acústica requerida para esta investigación.

En la evaluación de los materiales, cada parámetro tiene una ponderación del 25% indicando que las variables evaluadas poseen igual importancia, de esta forma, generar una sumatoria final dando como resultado la puntuación total sobre el 100% de la evaluación; Se asigna a cada parámetro una puntuación de 1 a 10, donde 10 es desempeño alto y 1 desempeño bajo, esta puntuación es relativa al parámetro de evaluación (ejemplo: si el parámetro posee un puntaje de 10 y la ponderación es de 25% el puntaje ponderado será 2.5). En el caso de no presentarse el dato de evaluación, se penalizara con la menor puntuación ponderada 0,25.

Los parámetros de evaluación respecto a los materiales absorbentes son: costo, densidad, NRC (Noise Reduction Coefficient) y durabilidad. Si el parámetro costo posee un valor alto la puntuación será menor (puntuación ponderada más baja: 0.25), por lo contrario, si los parámetros densidad, NRC y durabilidad poseen un valor alto la puntuación será alta (puntuación ponderada más alta: 2.5).

Los parámetros de evaluación para las placas de yeso son: masa, costo, densidad y durabilidad., si el parámetro costo y masa poseen un valor alto la puntuación será menor (puntuación ponderada baja: 0.25), por lo contrario, si los parámetros densidad y durabilidad poseen un valor alto la puntuación será alta (puntuación ponderada alta: 2.5).

Describiendo la el proceso de evaluación en el caso del costo, como ejemplo se tomaron 4 valores donde el costo más alto tenía la puntuación más baja ($123.000 COP = 0,25) y el costo más bajo presentaba la puntuación más alta ($5873 COP = 2,5) de los materiales absorbentes mostrados en la tabla 4-2, de esta forma, se trazó una línea de tendencia presentando la ecuación de la recta (tendencia lineal) como es mostrado en la gráfica 4-1 enseñando una pendiente negativa.




Gráfica 4-1 línea de tendencia para la evaluación de costos

Tomando la ecuación generada por la línea de tendencia (ecuación 45) se evalúa el precio de cada material ingresando el costo en la variable *X* dando como resultado la puntuación de cada parámetro.

$$y = -2x10^{-5}x + 2.128$$

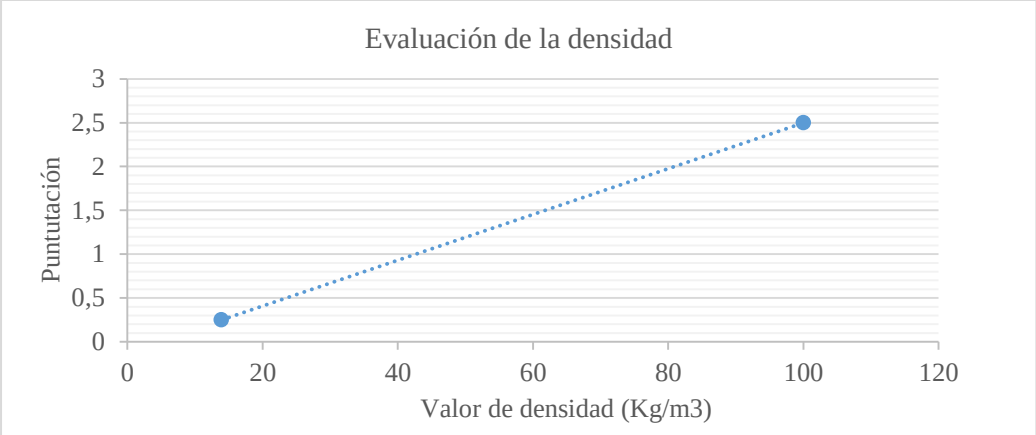
Ecuación 45 Ecuación de la recta para la evaluación de costo

Donde;

y: puntuación de materiales

x: variable de evaluación (costo)

Para el caso de la densidad se toma como ejemplo los materiales absorbentes de la tabla 4-2, generando un proceso similar donde el valor más alto posee una puntuación alta (100(kg/m3) = 2,5) y el valor más bajo una puntuación baja (13,9(Kg/m3) = 0,25). Teniendo en cuenta lo anterior, se realizó una línea de tendencia como es mostrado en la gráfica 4-2, hallando la ecuación de la recta (Ecuación 46) se realiza la evaluación y puntuación de los materiales respecto a su densidad.




Gráfica 4-2 línea de tendencia para la evaluación de densidad

$$y = 0.0261x - 0.1132$$

Ecuación 46 Ecuación de la recta para la evaluación de la densidad

Donde;

y: puntuación de materiales

x: variable de evaluación (densidad)

Los parámetros de evaluación son encontrados en las fichas técnicas brindadas por las empresas productoras de los materiales. Los materiales de la tabla 4-2 fueron investigados a nivel local para asegurar la accesibilidad a estos.

| **Evaluación de Materiales Acústicos** | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Material** | | **Dimensiones (metros)** | **Costo (COP)** | **Densidad (Kg/m3)** | **NRC** | **Durabilidad (Años)** | **Puntaje total** |
| **Frescasa eco** | **Característica** | **17.84x1.20m** | 74300 | 13.9 | 0.85 | 7 | 4.1 |
| | **Puntaje** | | 1.13 | 0.25 | 2.50 | 0.25 | |
| **acustifibra** | **Característica** | **2.44x1.22m** | 113000 | No presenta | 0.7 | 10 | 4.4 |
| | **Puntaje** | | 0.35 | 0.25 | 1.25 | 2.50 | |
| **Phonofloor HD** | **Característica** | **2.44x1.22m** | 123000 | No presenta | 0.7 | 10 | 4.4 |
| | **Puntaje** | | 0.39 | 0.25 | 1.25 | 2.50 | |
| **Black theater** | **Característica** | **1.22x2.44m** | 110982 | 48 | 0.7 | 10 | 5.6 |
| | **Puntaje** | | 0.39 | 1.50 | 1.75 | 2.00 | |
| **Sonowall (2")** | **Característica** | **1.22x0.61m** | 9307 | 32 | 0.7 | 10 | 7.4 |
| | **Puntaje** | | 2.43 | 1.25 | 1.75 | 2.00 | |

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Sonowall (1")** | **Característica** | **1.22x0.61m** | 5873 | 60 | 0.7 | 10 | |
| | **Puntaje** | | 2.50 | 1.45 | 1.25 | 2.50 | 7.7 |
| **Sonab (para exterior)** | **Característica** | **1.22x0.61m** | 22375 | 80 | 0.75 | 8 | |
| | **Puntaje** | | 2.17 | 1.97 | 1.67 | 1.00 | 6.8 |
| **acustiplaca (1")** | **Característica** | **1.22x0.61m** | 15.054 | 100 | 0.83 | 10 | |
| | **Puntaje** | | 2.31 | 2.50 | 2.33 | 2.50 | 9.6 |
| **Sonoacoustic** | **Característica** | **1.00x1.00m** | 44112 | 30 | 0.58 | 10 | |
| | **Puntaje** | | 1.73 | 0.67 | 0.25 | 2.50 | 5.2 |

Tabla 4-2 Evaluación de Materiales Acústicos.

Concluida la evaluación de materiales se consolidó con mejor puntuación la Acústiplaca (lana de roca), con la segunda mejor puntuación Sonowall, este material consiste en láminas compuestas de fibras flexibles y ligeras de textura elástica y esponjosa. La espuma de poliuretano-Sonoacustic fue descartada debido a su alto costo y dimensiones no adecuadas para este desarrollo, En cuanto a la frescasa, posee una durabilidad y densidad inferior en comparación del Sonowall, pero en términos de costo y NRC presenta un puntaje alto.

Teniendo en cuenta la investigación se encontraron tres tipos de yeso con dimensiones iguales (1.22 x 2.44 metros), donde su implementación es similar. Estos tipos de yeso son modelos con resistencia al fuego, la humedad y básico (sin resistencia al fuego o humedad). En la tabla 4-3 se presentan los valores de puntuación para cada parámetro de evaluación.

| **Evaluación Placa De Yeso** | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Material** | | **Masa (Kg)** | **Costo (COP)** | **Densidad (Kg/m3)** | **Durabilidad (años)** | **Total Puntaje** |
| **Drywall Knauf ST 9.5mm** | **Característica** | **15** | 20500 | 530.4 | 10 | |
| | **Puntaje** | 2.50 | 2.38 | 0.25 | 0.25 | 5.4 |
| **Drywall gyplac ST 12.5mm** | **Característica** | **20.2** | 18400 | 542.9 | 20 | |
| | **Puntaje** | 1.40 | 2.50 | 0.42 | 2.50 | 6.8 |
| **Drywall gyplac RF 12.7 mm** | **Característica** | **22** | 39900 | 591.2 | 20 | |
| | **Puntaje** | 1.01 | 0.44 | 1.16 | 2.50 | 5.1 |
| **Drywall gyplac RH 12.7mm** | **Característica** | **25.6** | 39900 | 677.2 | 20 | |
| | **Puntaje** | 0.25 | 0.44 | 2.48 | 2.50 | 5.7 |

Tabla 4-3 Evaluación Placas De Yeso.

La menor puntuación obtenida en la evaluación destinada a las placas de yeso (Tabla 4-3) fue dada por el Drywall gyplac RH de 12.7mm y el Drywall gyplac RF de 12.7mm, debido al alto peso y costo que presentan. Por otra parte, el puntaje total para los demás materiales evaluados fue consistente y similar alcanzando altos puntajes, siendo materiales con alta posibilidad de uso en el desarrollo del proyecto. Sin embargo, el mayor puntaje fue registrado por el Drywall de 12.5 mm con 6,8 puntos, siendo este el material destinado a las simulaciones y construcción de la puerta acústica.

Como precaución se da conocimiento del coeficiente de conductividad térmica de los materiales seleccionados a estudio a partir de la evaluación realizada en las tablas 4-2 y 4-3; el coeficiente de conducción térmica hace referencia a la cantidad de calor que transfiere un material, en este sentido, cuando el coeficiente es mayor significa que el flujo de calor es alto. La puerta acústica será sellada en su totalidad, sin embargo, el coeficiente de conductividad térmica del acero (material externo) es de 50(W/m*K) entendiéndose como un alto flujo de transferencia de energía, por lo tanto, si los materiales internos son inflamables o la temperatura que soporta es baja podrían producir llama o verse afectador por la temperatura.

Para el caso del Sonowall o lana de roca en general, el coeficiente de conductividad térmica es de 0.03 (W/m*K) entendiéndose como un coeficiente de conductividad térmica bajo, es decir, es un material que no presencia grandes incrementos en la temperatura del mismo, de igual forma, la temperatura máxima que puede soportar es de 454°c. En el caso del Drywall no existe propagación de llama y soporta temperaturas superiores a los 150°c.

No existirá humedad al interior de la hoja de la puerta acústica debido a que esta será sellada en su totalidad impidiendo el flujo de aire o algún fluido en el interior, por tal motivo los temas de humedad no son tenidos en cuenta.

### 4.1.3. Marco de soporte

Para el desarrollo del marco de soporte, de las 15 empresas consultadas, solo 4 mostraban la información referente a la estructura del marco y su respectivo material interno. En la tabla 4-4 se muestra la información recolectada por cada empresa, para este caso los materiales internos del marco de soporte y los materiales externos.

| Marcos de soporte para puertas acústicas según empresas | | | |
|---|---|---|---|
| **País** | **Nombre de la empresa** | **Materiales externos** | **Materiales internos** |
| **Alemania** | Pacificdoors | Acero (espesor 1.5mm) | Bloques de poliéster.<br>Lana de roca o vidrio. |
| **España** | Iberacústica | Acero (espesor 1.5 mm) | Lana de roca de distintas densidades. |
| **USA** | Pyropanel | Acero (espesor 1.5mm a 2.0mm) | Concreto.<br>Fibra de vidrio. |
| **Australia** | Spencedoors | Acero (0.9mm a 1.5 mm) | Concreto.<br>Yeso. |

Tabla 4-4 Marcos de soporte para puertas acústicas según empresas.

Con el fin de tener un alto rendimiento en el aislamiento acústico brindado por la puerta se deben evitar los espacios o grietas entre la pared y el marco evitando la transmisión de flaqueo (Malcom. J. Croocker., 2007). Los materiales a usar en el relleno de marcos son similares en las empresas consultadas, siendo la lana de roca el material más apropiado. Por esta razón se escoge el Sonowall (Lana de roca), mismo material que se determinó para la evaluación de los materiales acústicos mostrados en la tabla 4-1 para la puerta acústica.

El número de escalones con los cuales la puerta hace contacto es una variable que afecta el aislamiento total, si el marco de soporte tiene 3 escalones y la puerta es de dos escalones tendrá dos puntos de contacto donde se podrá realizar el montaje de un sellamiento doble, el cual permite una mayor hermeticidad, por otra parte, el marco normal de puerta posee dos escalones y permite un solo punto de contacto. La geometría y la forma del escalón afectan la propagación del sonido funcionando como un deflector, por tal motivo posee mayor dificultad generar estudios que describan el comportamiento de las ondas sonoras debido a dicho cambio en la geometría (Carl Hopkins., 2007).

Se tomó 15 referencias, donde 7 mostraban la información referente al número de escalones para la construcción del marco de soporte. En la tabla 4-5 se muestra la información recolectada por cada

empresa teniendo en cuenta la forma y el número de escalones para la estructura del marco de soporte de la puerta.

| Escalones para marcos de soporte según empresas | | |
|---|---|---|
| **País** | **Nombre de la empresa** | **Escalones del Marco se soporte** |
| **Alemania** | LogisMarket<br>Baulinks<br>Knuaf | • Sencillo y Doble.<br>• Sencillo.<br>• Sencillo. |
| **España** | Iberacústica<br>WST | • Sencillo, Doble y Triple.<br>• Sencillo y Doble. |
| **Nueva Zelanda** | PacificDoors | • Sencillo. |
| **Australia** | Spencedoors | • Sencillo. |

Tabla 4-5 Escalones para marcos de soporte según empresas.

Los marcos de soporte propuestos por las empresas (tabla 4-5), son un ítem de referencia en la construcción, adicionalmente permiten conocer cuántos puntos de contacto poseerá la puerta acústica. El número de contactos entre marco-puerta es una variable adicional y abre un nuevo campo de investigación, existen diferentes posibilidades al modificarse presentando variaciones en el aislamiento total de la puerta acústica.

Partiendo de las dimensiones determinadas para la puerta acústica se procedió a realizar el diseño del marco de soporte con el cual se pudiese realizar la evaluación sobre los distintos tipos de sellamiento de forma más eficiente y sencilla. A continuación se presenta el esquema del marco de soporte (imagen 4-1), las dimensiones se pueden apreciar en el anexo E.

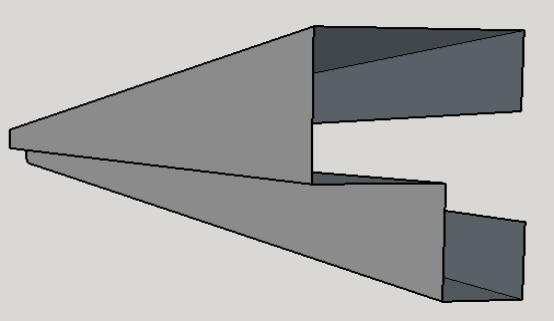


Imagen 4-1 Esquema Marcos de Soporte

### 4.1.4. Sellamientos

En esta etapa se realizó una investigación a nivel nacional de diferentes tipos de sellamientos como es planteado en el apartado 2.2.4. Conforme a la investigación, los sellamientos se categorizaron y clasificaron según su forma de forma de funcionamiento (Contacto, ajustable y magnético).

Los parámetros de evaluación de los sellamientos serán realizados para cada tipo (magnético, ajustable o de fricción y de contacto), es decir, se evaluaran los mismos parámetros pero para cada tipo de sellamiento. Los parámetros de evaluación son: Ancho del sellamiento, espesor, Costo (metro lineal) y búsqueda (dificultad). Cada parámetro tiene una ponderación del 25% indicando que las variables evaluadas poseen igual importancia, de esta forma, generar una sumatoria final dando como resultado la puntuación total sobre el 100% de la evaluación para cada tipo de sellamiento.

En la evaluación de sellamientos, si el parámetro costo posee un valor alto la puntuación será baja (puntuación baja: 0.25), la búsqueda tendrá tres niveles de dificultad (baja, media y alta), donde la dificultad baja tendrá una puntuación de 2.5, dificultad media una puntuación de 1.25 y dificultad alta una puntuación de 0,25; Para la evaluación del espesor se toma como referencia el apartado 2.2.1 la norma ISO 10140-1, donde indica que la hendidura no debería ser mayor a 5mm, por tal motivo, los sellamientos con menor o mayor espesor serán penalizados con la menor puntuación, los que cumplen este requisito obtendrán la mayor puntuación (puntuación alta: 2.5); La evaluación del ancho tiene en cuenta que el escalón de la puerta no será superior a los 3cm debido

a la montura de la cerradura y el cierre de la misma, de esta forma los sellamiento con un ancho mayor a 3cm serán penalizados con la puntuación más baja 0,25.

La evaluación de costo y ancho sigue el mismo procedimiento indicado en el apartado 4.1.2 que toma como ejemplo los materiales absorbentes.

| Evaluación de Sellamientos | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **#** | **Sellamientos** | | **Ancho (cm)** | **Espesor (mm)** | **Costo (COP-Metro lineal)** | **Búsqueda (dificultad)** | **Total Puntaje** |
| **1** | **Contacto 1** | **Característica** | 3,8 | 3 | 4238 | Baja | 5.5 |
| | | **Puntaje** | 0.25 | 0.25 | 2.5 | 2.5 | |
| **2** | **Contacto 2** | **Característica** | 2,5 | 5 | 4238 | Baja | 9.43 |
| | | **Puntaje** | 1.93 | 2.5 | 2.5 | 2.5 | |
| **3** | **Contacto 3** | **Característica** | 0.81 | 5 | 5613 | Media | 6.5 |
| | | **Puntaje** | 1.5 | 2.5 | 0.25 | 1.25 | |
| **1** | **Ajustable 1** | **Característica** | 3,5 | 5 | 2113 | Media | 6.21 |
| | | **Puntaje** | 0.25 | 2.5 | 2.21 | 1.25 | |
| **2** | **Ajustable 2** | **Característica** | 3 | 2 | 4488 | Alta | 3.25 |
| | | **Puntaje** | 2.5 | 0.25 | 0.25 | 0.25 | |
| **3** | **Ajustable 3** | **Característica** | 5 | 7 | 1875 | Alta | 3.14 |
| | | **Puntaje** | 0.25 | 0.25 | 2.4 | 0.25 | |
| **1** | **Magnético 1** | **Característica** | 3 | 5 | 5000 | media | 8.75 |
| | | **Puntaje** | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 1.25 | |

Tabla 4-6 Evaluación de Sellamientos

Las dimensiones de los sellamientos mostradas en la tabla 4-6 son de carácter estandar, por tal motivo, las hendiduras existentes entre el marco y la hoja de la puerta acústica deben permitir la montura sencilla de estos elementos. El espesor de los sellamientos se toma en cuenta al momento del diseño de la puerta acústica, de lo contrario existe la posibilidad de permitir fugas (sellamiento no hermetico) o el forzamiento al momento del cierre de la puerta acústica.

De cada tipo de sellamiento se seleccionó uno dependiendo de la puntuacion total obtenida, por consiguiente, se sugiere el uso del sellamiento de contacto 2, sellamiento ajustable 1 y sellamiento magnético. La hendirura (espacio entre el marco y hoja de la puerta) es inmodificable, de esta manera, se busca que el espesor de los sellamientos concuerde con la dimension de la hendidura. En general los sellamientos tienen formas de montura similares.

En la imagen 4-2 se muestran los tipos de sellamientos que se implementarán en la puerta acústica.

Imagen 4-2 Sellamientos para evaluar a) Sellamiento magnético con perfil sencillo, b) Sellamiento de contacto con perfil D, c) Sellamiento de fricción.

## 4.2. Etapa de diseño de la puerta acústica

Teniendo en cuenta las características de los materiales de relleno y sellamientos referidos en las secciones 4.1.1 y 4.1.3 respectivamente, La puerta acústica tendrá una configuración de doble escalón y el marco de soporte tendrá un solo punto de contacto, es decir, será un marco sencillo y dependerá de las dimensiones de la hoja.

Las estructuras sencillas de las puertas usadas en viviendas constan de una altura aproximada de 2 m a 2.50m y un ancho de 0.80m a 1.00m, teniendo en cuenta estas dimensiones la puerta se diseñó con longitudes similares, las cuales son: altura 2.20m y ancho 95.5m. Para el espesor de la puerta acústica se tuvo en cuenta las dimensiones de los materiales de relleno, donde el Sonowall posee un espesor de 1” (2.54cm) y el Drywall 1,25cm, con esta información se debe respetar una cavidad interna de 6.33cm (medida interna); el material externo será acero Cold rolled de espesor 1.2mm, de esta forma queda definido el espesor total de la puerta acústica que será aproximadamente de 6,77 cm ≈ 7,00cm, los planos ingenieriles se encuentran en el Anexo E.

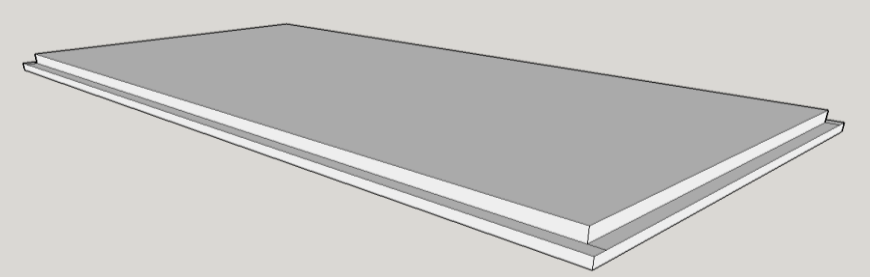


Ilustración 4-3 esquema puerta acústica-vista isométrica.

Las dimensiones de los escalones tienen gran importancia en el proceso de diseño y desarrollo de la puerta acústica, estos escalones deben permitir el fácil montaje y desmontaje los sellamientos que se usarán para esta investigación. Debido a la implementación del sellamiento de contacto se requiere de una fuerza externa al momento del cierre de la puerta, es decir, es necesario el uso de una cerradura, los escalones también dependerán de las dimensiones de la cerradura a implementar generando variaciones en estas dimensiones.

Para obtener la masa total de la puerta acústica sin materiales internos se hallan las áreas independientes de cada sección, es decir, el área de la parte frontal y posterior incluyendo el área de los escalones, en el caso del marco se genera el mismo procedimiento. El anexo E presenta las dimensiones de la puerta acústica (hoja y marco). En la tabla 4-7 se aprecian el seccionamiento de la puerta acústica con sus respectivas áreas y masas.

Posteriormente se aplica la ecuación 47 para obtener la masa de un cuerpo, en este caso, de las aéreas independientes de la lámina en acero con espesor de 1.2mm como material externo de la puerta acústica, con los resultados se realiza una sumatoria entre la masa de cada sección obteniendo la masa total de la lámina de acero implementada.

$$Masa\ (Kg) = Volumen\ (m^3)\ x\ densidad(Kg/m^3)$$

Ecuación 47 Masa de un cuerpo

| Secciones individuales de la puerta acústica | | | |
|---|---|---|---|
| **Parte** | **Secciones** | **Área (m2)** | **Masa (Kg)** |
| **Hoja** | Placa frontal | 1.82 | 17.14 |
| | Placa posterior | 2.09 | 19.69 |
| | Escalones | 0.7005 | 6.60 |
| **Refuerzos** | internos | 0.748 | 7.05 |
| **Marco** | inferior y superior | 0.014 | 0.13 |
| | lateral derecho e izquierdo | 0.366 | 3.45 |
| | profundidad del marco | 0.305 | 2.87 |
| **Total** | | **6.0435** | **56.93** |

Tabla 4-7 secciones individuales de la puerta acústica

La estructura metálica de la hoja contiene refuerzos internos usados para aumentar la resistencia del elemento a impactos que puedan generar abolladuras, teniendo en cuenta estos aspectos la hoja y el marco de la puerta acústica posee un área y una masa total de 6.04m2 y 56.93Kg respectivamente (tabla 4-7); El material interno de relleno consta de una placa de Drywall 17.2kg y lana de roca 10.5kg. Realizando una sumatoria de todos los materiales presentes en la hoja de la puerta y el marco se obtiene una masa total de 84.63kg.

Al implementar una cerradura para el cierre se sugiere tener un espacio para la montura de al menos 4 cm y en la pestaña de 3cm, esta información es brindada por fabricantes de chapas y cerrojos tales como Cerracol, a continuación se muestra del modelo de la chapa que se utilizará para la puerta acústica.

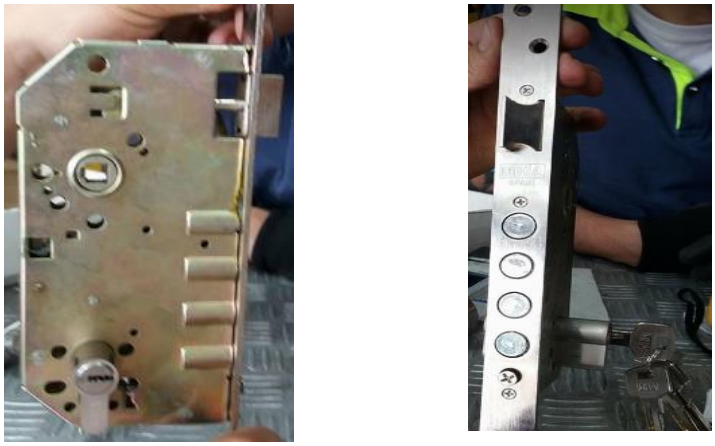


Imagen 4-3 Modelo de Cerradura

### 4.2.1 Simulación

A partir de la investigación de las empresas y la evaluación de los materiales, se desarrollaron tres simulaciones asumiendo los materiales con mejor puntuación obtenidos en los apartados 4.1.2 (Sonowall y AcusticPlaca). En el anexo F se presenta la autorización de la licencia del software INSUL concebida por la empresa SFSerrano – Control Acústico.

Las tres configuraciones de materiales se realizaron teniendo en cuenta la distribución del relleno propuestos por las empresas estudiadas y la evaluación de la placa de yeso tabla 4-3, con el fin de obtener resultados similares referente a la pérdida por transmisión sonora (TL) y el índice de reducción sonora (STC o Rw), de este modo permitiendo un aislamiento acústico óptimo para la evaluación de los sellamientos.

Las simulaciones fueron realizadas en el software INSUL, el cual, funciona con el método de cálculo de paredes dobles (un material con dos caras diferentes) formando así capas múltiples. La pérdida por transmisión evaluada por el software tiene en cuenta aspectos como el espesor debido a que su cálculo está dado principalmente por la frecuencia de coincidencia generada por cada uno de los materiales y/o capas, sin embargo si las capas están íntimamente unidas entre sí, es posible modelar el panel como uno solo combinando el espesor de las multicapas, además este cálculo trabaja bajo las siguientes cuatro regiones de frecuencia.

Región 1 Esta determinada principalmente por la ley de masas, evaluando la pérdida de transmisión en bajas frecuencias sabiendo únicamente la masa superficial y el módulo de elasticidad del material.

Región 2 Esta se encuentra por encima de la frecuencia de resonancia, determinada por la masa de los paneles y el entrehierro, aumentando la pérdida por transmisión a 18 dB / octava a medida que los paneles se desacoplan.

Región 3 Cuando el ancho de la cavidad se vuelve del mismo tamaño a la longitud de onda de la frecuencia de corte, aumentando la pérdida por transmisión a 12 dB / octava.

Región 4 Determinada por las conexiones sólidas que actúan como puentes de sonido entre los paneles, limitando la pérdida de transmisión de forma constante por encima de la ley de masas.

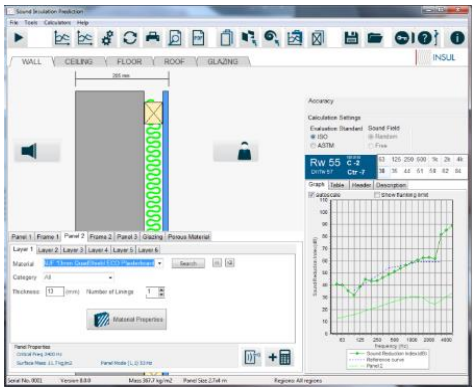



Imagen 4-4 Software de Simulación para elementos multicapa INSUL

En la Imagen 4-4 se observa la interfaz gráfica del software donde se muestran tres secciones donde se contempla la selección de los materiales para cada una de los paneles, la gráfica generada según la partición dada y la ilustración de la estructura que se está evaluando.

- **Primera configuración (Sonowall-Drywall-Sonowall)**

    - Láminas de Acero de 1.2 mm
    - Sonowall: densidad de 60 $^{Kg}/_{m^3}$ y espesor de 1”
    - Drywall: espesor de 12.5 mm

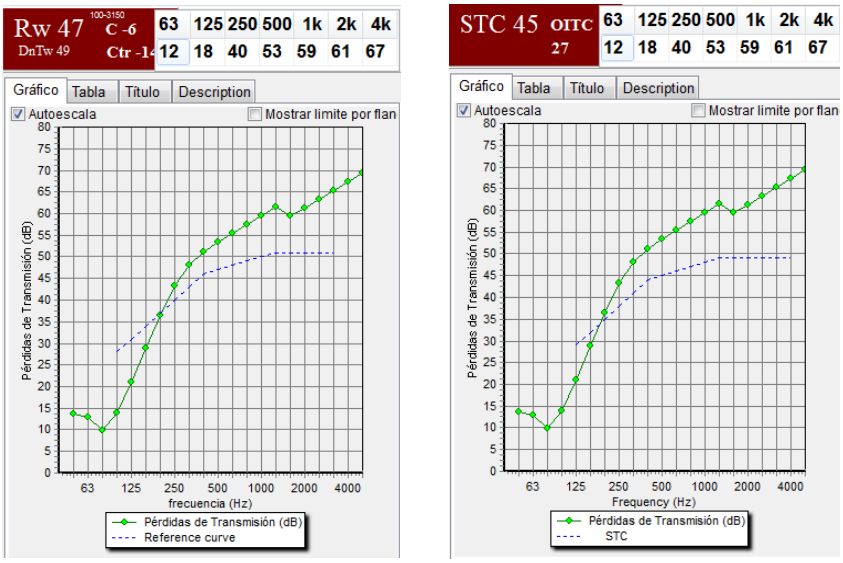



Imagen 4-5 Simulación de primera configuración

- **Segunda configuración (Acústiplaca-Drywall-Acústiplaca)**

  - Láminas de Acero de 1.2 mm
  - AcusticPlaca: densidad de 60 $^{Kg}/_{m^3}$ y espesor de 1”.
  - Drywall: espesor de 12.5 mm

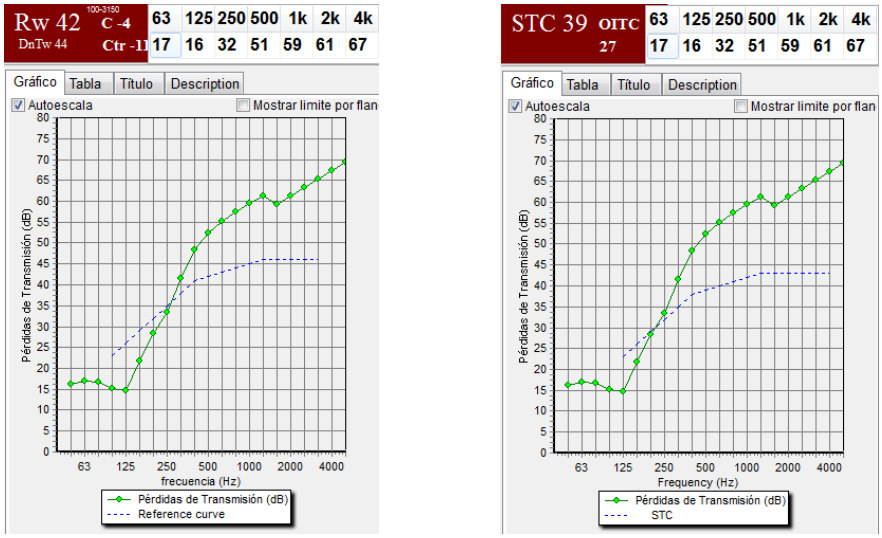



Imagen 4-6 Simulaciones de segunda configuración

- **Tercera configuración (Sonowall-Drywall-AcusticPlaca)**

  - Láminas de Acero de 1.2 mm
  - Sonowall: densidad de 60 $^{Kg}/_{m^3}$ y espesor de 1”
  - AcusticPlaca: densidad de 60 $^{Kg}/_{m^3}$ y espesor de 1”
  - Drywall: espesor de 12.5 mm

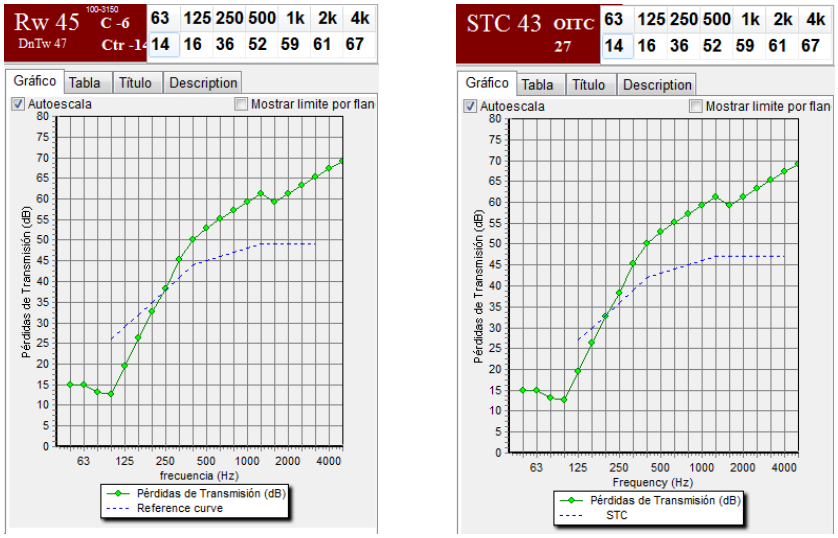



Imagen 4-7 Simulación con AcusticPlaca y Sonowall.

las simulaciones realizadas para las configuraciones de los materiales internos de la puerta acústica giraban en torno a los puntajes más significativos encontrados en la evaluación de los materiales de relleno presentados en tabla 4-2, la AcusticPlaca 1” tuvo como resultado un puntaje de 9.6/10, mientras que el Sonowall 1” tuvo un puntaje de 7,7/10. La tabla 4-3 presenta la evaluación de las placas de yeso, el resultado de mayor relevancia fue la placa Gyplac ST de 12.5mm con un puntaje de 6,8/10 frente a las demás referencias. La simulación tendrá como finalidad mostrar que configuración de materiales presenta un mayor nivel de aislamiento, de esta forma, realizar la elección final de los materiales internos para la construcción de la puerta acústica.

La configuración uno obtuvo el mayor valor en los indicadores de Rw-47dB y STC-45dB por el software de simulación, sin embargo para la banda de 63Hz presenta un valor bajo respecto a las demás configuraciones; en relación a la segunda configuración presenta una diferencia de 5dB y a la tercera configuración una diferencia de 2dB en dicha frecuencia. Para bandas de 2KHz y 4KHz el comportamiento es igual en todas las configuraciones simuladas.

La configuración tres obtuvo un valor de Rw-45dB y STC-43dB, debido a la combinación de los materiales (Sonowall-Drywall-AcusticPlaca) presentando un mejor comportamiento en la banda de 63Hz respecto a las demás configuraciones, con una atenuación de 17dB. De lo anterior la configuración uno posee valores altos de aislamiento a partir de la banda de 125Hz, 250Hz y 500Hz debido a que cuenta con un margen de 2 dB hasta 6 dB por encima de las configuraciones 2 y 3.

La configuración uno presenta un Rw-47dB y STC-45dB siendo superior a las demás configuraciones, adicionalmente los materiales usados son asequibles a nivel local, permitiendo de esta manera la construcción de la puerta acústica sin percances. Dada las evaluaciones realizadas en las tablas 4-1, 4-2, 4-5 y las simulaciones elaboradas, la puerta acústica será construida a partir de la configuración uno. En la tabla 4-8 se presentan las especificaciones de los materiales con los cuales será construida la puerta acústica y en la ilustración 4-4 la forma en la que serán distribuidos dichos materiales.

| **Especificaciones de materiales de relleno** | | |
|---|---|---|
| **Material** | **Especificación** | **Dimensión [m]** |
| **Acero** | CR calibre 1.2mm | 1.22x2.44m |
| **Yeso-cartón** | ST calibre 12.5mm | 1.22x2.44m |
| **Sonowall** | Espesor 1” | 1.22x0.61m |

Tabla 4-8 Especificaciones de material de relleno.

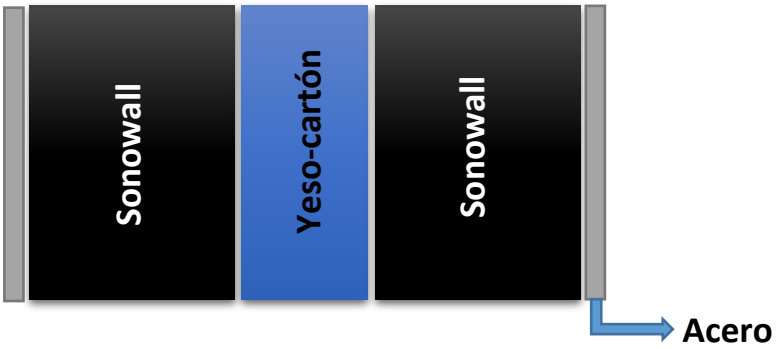



Ilustración 4-4 Elemento de construcción de múltiples capas (Puerta Acústica).

## 4.3. Proceso de construcción, ensamble y montaje de la puerta acústica

### 4.3.1. Proceso de construcción y ensamble

En la etapa inicial de construcción se crean prototipos de bajas dimensiones a partir del modelo propuesto en la sección 4.2, estos no tienen en cuenta las dimensiones de alto y ancho, sin embargo, las medidas de los escalones y el espacio interno son contempladas. Estos prototipos tienen como finalidad generar un acercamiento a la construcción de la pieza completa y pretende minimizar los errores que puedan presentarse durante el procesamiento del material y el ensamblaje de la puerta acústica; otro objetivo es determinar el espacio real requerido para que los sellamientos puedan generar un cierre hermético, de aquí parten las medidas del marco de soporte respetando el espesor del sellamiento y la medida de los escalones determinada por el ancho de la cerradura que se implementará.

En la imagen 4-8 se presenta uno de los cuatro prototipos realizados, donde el ancho de la pieza será igual al de la puerta final.

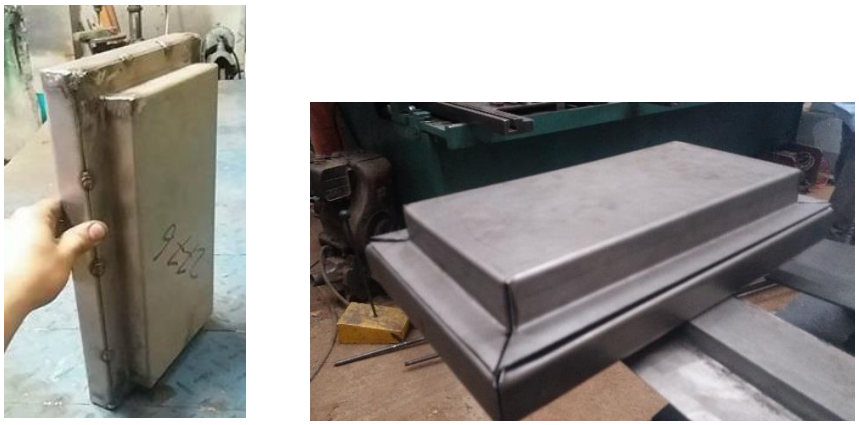


Imagen 4-8 Prototipos para el desarrollo de la puerta acústica.

Realizado el prototipo se contemplan las medidas de los materiales de relleno (tabla 4-8) y la configuración de estos (ilustración 4-4). Su construcción inicia con las placas de acero, donde las medidas de los dobleces y de los cortes deben ser precisas, siendo de mayor importancia las esquinas para un ajuste correcto evitando problemas en el ensamble; Como es mostrado en la imagen 4-9 la puerta consta de dos piezas metálicas: una bandeja (contenedor del material interno) y una tapa (sella cavidad interna).

El proceso de ensamble estuvo acompañado de un experto en ornamentación, quien posteriormente soldó y pulió las esquinas de las piezas metálicas de tal forma que no existiera salida o entrada de aire u otro fluido (imagen 4-10).

Imagen 4-9 Estructura externa de la puerta acústica
(Bandeja-parte inferior y tapa-parte superior)

Imagen 4-10 Ajuste y detalles de la estructura externa de la puerta.

En la parte interna se implementaron dos refuerzos en lámina del mismo calibre en forma de “U” con el objetivo de generar resistencia a impactos previniendo deformaciones, la forma de estos refuerzos fue idealizada para encajar el material interno de forma homogénea como es mostrado en la imagen 4-11.

Imagen 4-11 Refuerzos internos en la parte posterior de la puerta.

El material interno se distribuyó en las secciones de la puerta acústica siguiendo la configuración de múltiples capas (ilustración 4-4). En la imagen 4-12 se presenta el proceso de ubicación del material interno, donde el Sonowall actúa como primera capa, posteriormente se cortaron y utilizaron placas Drywall como segunda capa y finalmente una tercera capa de material absorbente-Sonowall. *(Para la manipulación del material interno se usaron implementos de protección personal tales como guantes y tapabocas previniendo riesgos por contacto con el material acústico o laceraciones debido al uso de bisturí o manipulación de piezas metálicas)*.

Imagen 4-12 Proceso de relleno de material acústico en la puerta acústica a) Primera capa de relleno con Sonowall. b) y c) Capa de relleno con Drywall. d) Segunda capa de relleno con Sonowall.

Cuando el material interno se encontraba totalmente distribuido el siguiente paso es el acople de la segunda pieza metálica para sellar totalmente la puerta acústica. En este proceso se realizaron aberturas a la placa metálica que actuaba como la "tapa" donde debía coincidir con los refuerzos internos y con la otra pieza, luego se usó soldadura para metal tipo MIG (Metal Inert Gas) generando el cierre total de la puerta acústica. En la imagen 4-13 se observa las aberturas realizadas a una de las piezas metálicas donde coincidían con la ubicación de los refuerzos dispuesto por la pieza inferior, siendo posteriormente soldadas y pulidas finalizando de esta manera la etapa de relleno en la puerta acústica.

Imagen 4-13 Proceso de sellamiento total de la puerta acústica a través de la unción proporcionada por las aberturas entre bandeja y tapa. a) Puerta Acústica sellada. b) Aberturas para la unión entre la bandeja y la tapa. c) Proceso de sellamiento.

Según la experiencia del ensamblador y la trayectoria de su trabajo se implementaron bisagras calibre 5/8 las cuales se encargan junto con el marco de abrir, cerrar, soportar y sostener el peso de la hoja, para ello se utilizaron 3 bisagras. En la imagen 4-14 se muestra el tipo de bisagra implementada en la puerta acústica antes y después del ensamblaje.

Imagen 4-14 Modelo de Bisagras.

La construcción del marco de soporte se realizó de tal manera que tuviera un escalón sencillo como se muestra en la imagen 4-15 y se acoplara a la hoja permitiendo el montaje de los sellamientos.

Imagen 4-15 Marco de soporte sencillo.

Al igual que las láminas de la hoja, este cuenta con dobleces y cortes precisos para un ensamble sin errores y un acople preciso con la hoja. En la imagen 4-16 se muestra el marco totalmente ensamblado, el relleno de este se efectúa al momento del montaje. Teniendo el marco y la hoja en su totalidad se realizó la abertura donde irá la cerradura o chapa como es mostrado en la imagen 4-17.

Imagen 4-16 Marco de soporte.

Imagen 4-17 Abertura de la cerradura.

Para finalizar la etapa de ensamblaje se matizó la puerta acústica con pintura electrostática para prevenir el desgaste y la corrosión del material externo, para aplicar este tipo de pintura es necesario exponer las piezas metálicas a alta temperatura. En la imagen 4-18 se presenta la puerta finalizada preparada para su montaje.

Imagen 4-18 Puerta acústica con pintura electroestática.

### 4.3.2 Montaje de la puerta acústica

La abertura en la cual se concibió el montaje fue de las mismas dimensiones del marco de soporte ya que presenta la medida completa de la puerta acústica. Por lo tanto, la partición se construye empleando cemento y ladrillos donde estará sujeta la estructura (puerta acústica y marco de soporte), uno de los requisitos para la instalación son las dimensiones de la abertura; debe ser precisas para la inexistencia de juntas o grietas perimetralmente entre la puerta y sitio de montura, evitando transmisión por este tipo de cavidades.

Antes de realizar la instalación se rellena de material absorbente (Sonowall) el marco de soporte, como se muestra en la imagen 4-19. El marco de soporte cuenta con seis huecos, tres en el lateral derecho y tres en el lateral izquierdo, los cuales cumplirán la función de anclar la puerta acústica en la estructura de cemento implementando chazos. En la imagen 4-20 se muestra el tipo de chazo usado en el momento del montaje de la puerta acústica y en la imagen 4-21 se observa la forma de anclaje del elemento a la estructura en cemento.

Imagen 4-19 Relleno del Marco.

Imagen 4-20 Muestra de Chazos y Tornillo para el anclaje.

Imagen 4-21 Anclaje del marco a la estructura de cemento.

Una vez colocado el marco se verifica la existencia de aberturas, estas fueron rellenas con cemento evitando fugas, además se observó el correcto ajuste de la estructura presenciando óptimas condiciones para el montaje de la puerta acústica, como se muestra en la imagen 4-22.

Imagen 4-22 Montaje de la Puerta Acústica.

# 4.4. Caracterización acústica

## 4.4.1. Tiempo de Reverberación

Se estableció un protocolo para la medición de tiempo de reverberación en el recinto receptor según la norma ISO 3382-2 que se describe en el anexo A, el procedimiento de medición se realizó con micrófonos omnidireccionales los cuales se ubicaron en ocho posiciones con tres repeticiones para cada posición con intervalos de medición de 5,6 segundos siendo este el método de ingeniería, se tomaron dos posiciones de fuentes esto debido a que el recinto contaba con un volumen superior a los $250\,m^3$. Las mediciones se realizaron en horas de la mañana, al interior del recinto se encontraban dos personas para el manejo de los equipos y el mobiliario encontrado no tuvo modificación alguna.

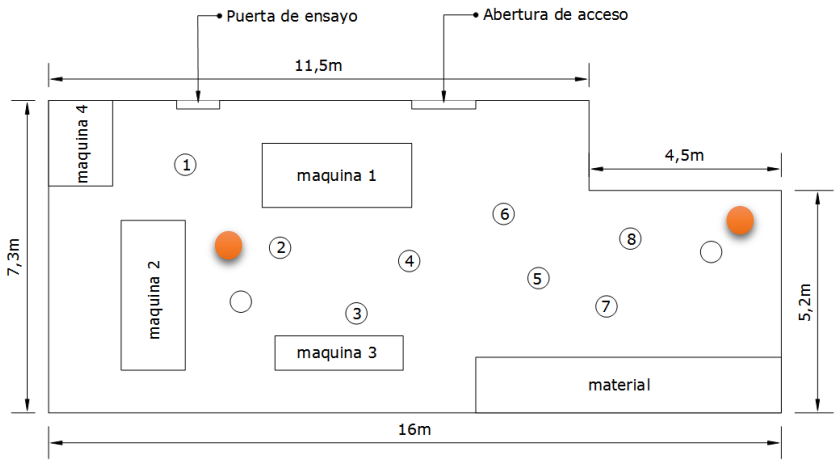



Ilustración 4-5 Grilla de medición de tiempo de reverberación.

Puntos de fuente

Puntos de receptores

Los elementos a usar fueron ceñidos a lo exigido por la norma ISO 3382-2 como se muestran en la imagen 4-23, posteriormente se configuró el Software EASERA de tal forma que este generara un barrido de frecuencias asegurando la relación señal ruido establecida por la norma (mínimo S/N de 35dB para mediciones de T20). El sistema fue previamente calibrado con el pistofono emitiendo una señal de 94 dB @ 1Khz, ajustando la ganancia para los micrófonos de medición. La medición

fue realizada a través del método de respuesta impulsiva integrada obteniendo la respuesta al impulso en cada una de las posiciones.

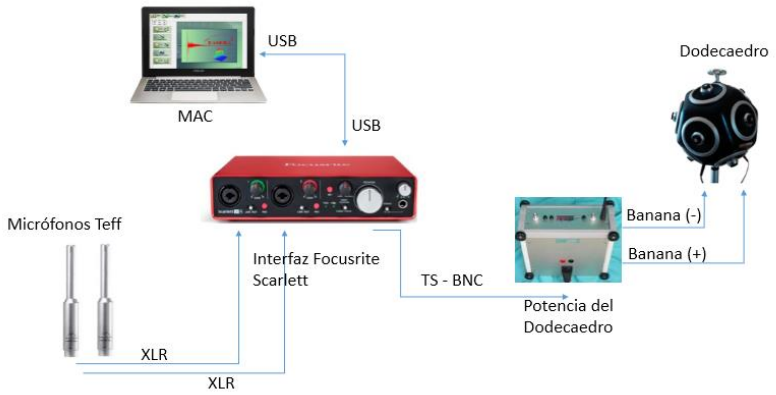



Imagen 4-23 Conexión de equipos de medición para el tiempo de reverberación.

## 4.4.2. Medición de Aislamiento Acústico

Se estableció un protocolo para la evaluación del aislamiento acústico según la norma ISO 16283-1 que se describe en el anexo B. El procedimiento de medición se realizó con sonómetros tipo 1, se ubicaron en 10 posiciones en el recinto receptor y 8 posiciones en el recinto emisor con dos repeticiones para cada posición con intervalos de medición de 15 segundos, siendo este el método de micrófonos fijos como se muestra en la ilustración 4-6, se tomaron dos posiciones de fuentes en el recinto emisor. Al interior de cada uno de los recintos se encontraba un operario y el mobiliario no tuvo modificación alguna. El recinto fuente contaba con una altura de 7 metros, el recinto receptor con una altura de 5 metros.

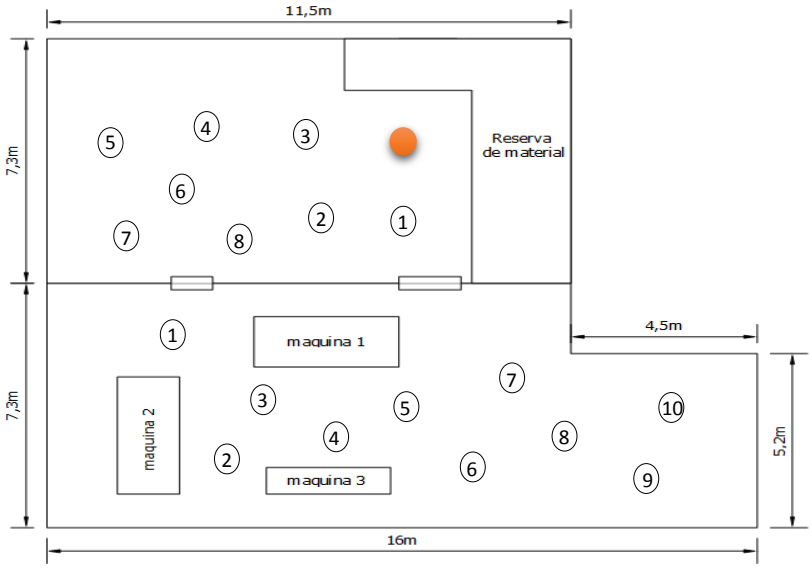



Ilustración 4-6 Grilla de medición de aislamiento acústico.

Punto de fuente.

Puntos de medición.

Se realizó la respectiva calibración antes y después de cada medición usando un pistofono que emite una señal de 94 dB @ 1Khz. Antes de iniciar cada medición se evaluó el ruido de fondo con el fin de obtener datos consistentes para cada una de las mediciones, adicionalmente que la fuente generara un ruido de banda ancha con una amplitud de por lo menos 6 dB a 10dB por encima del ruido de fondo para cada banda de frecuencia para lograr la excitación del campo acústico.

## 4.5. Fijación de los sellamientos en la puerta acústica

Para la evaluación de los sellamientos se realizó el proceso de acuerdo al apartado 4.4.2, donde los recintos comparten un área de separación común. En este caso el área de separación era definida y contaba con un área de $74{,}5\ m^2$, sin embargo existen dos aperturas de entrada entre los dos recintos: la primera es donde se encuentra la puerta acústica y la segunda es una apertura con la finalidad de permitir la entrada y salida de material. Según las normas ISO 10140-1 e ISO 10140-2, es necesario evitar o minimizar la transmisión por flancos y aberturas notables para la evaluación del aislamiento acústico de un elemento de construcción, aconsejando el cierre de la

abertura disminuyendo así la transmisión por flancos; de tal forma se construyó una partición con placas metálicas como es mostrado en la imagen 4-24.

Imagen 4-24 Partición con placas metálicas.

Las condiciones de medición para todas las combinaciones sellamientos-puerta fueron iguales, es decir, no existió cambio en el mobiliario presente en cada recinto, por tanto los resultados están sujetos a las mismas condiciones. La implementación y fijación de los sellamientos fue generada a partir del uso de cinta doble faz.

El montaje del sellamiento magnético contó con el despliegue de la cinta doble faz sobre el escalón de la hoja de la puerta acústica, de esta forma al momento del cierre el imán quedaría adherido al marco de soporte de la puerta acústica, como se muestra en la imagen 4-25.

Imagen 4-25 Implementación sellamiento Magnético.

El sellamiento de contacto se fijó en el marco de soporte de tal forma que la parte de “la bomba” (cavidad interna del sellamiento) generara el cierre. La montura de este sellamiento tuvo mayores complicaciones debido a sus propiedades elásticas tomando mayor tiempo para la fijación. En la imagen 4-26 se presenta el sellamiento al momento del montaje.

Imagen 4-26 Instalación del Sellamiento de contacto

El proceso de montaje del sellamiento de fricción tuvo mayor complicación en comparación al sellamiento magnético y de contacto, la fijación implicaba dos secciones de pegado formando una “L” al hacer contacto con el marco de soporte, ajustándose al espacio entre estas dos estructuras como es presentado en la imagen 4-27.

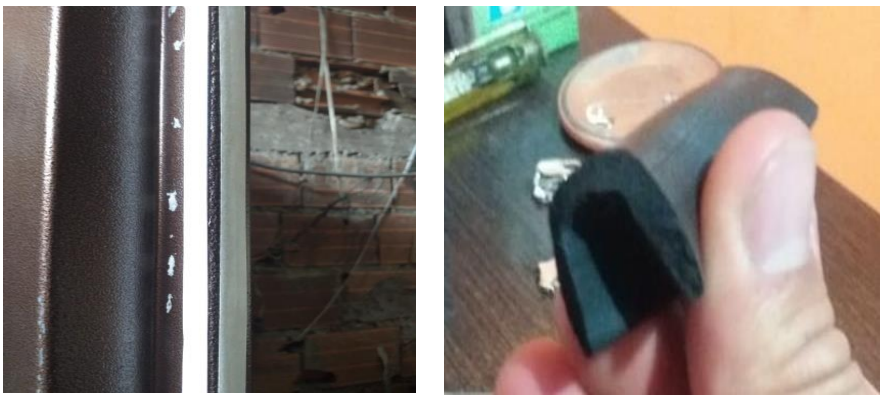


Imagen 4-27 Instalación del sellamiento de fricción

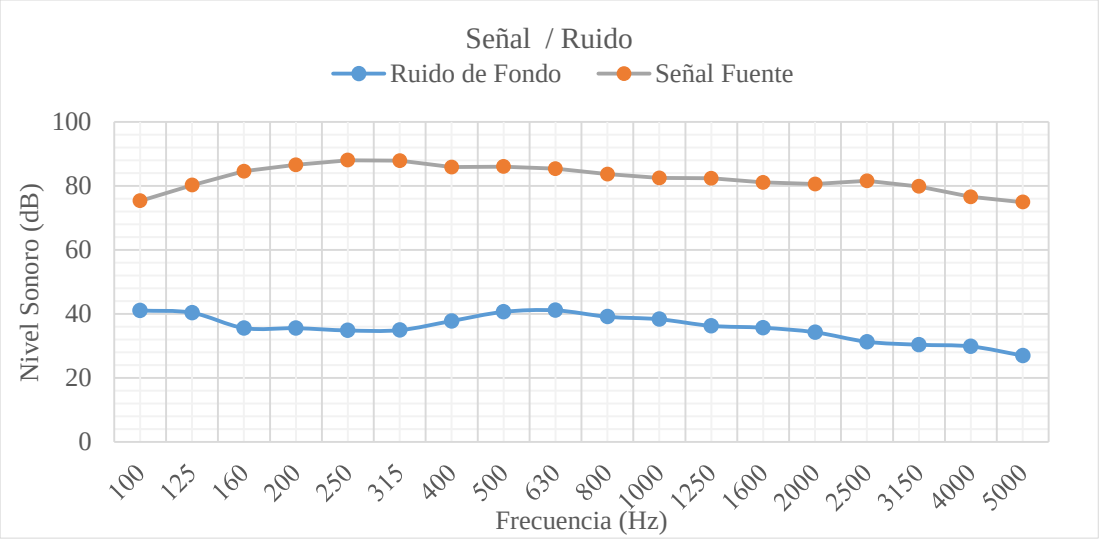
# 5. Resultados y análisis de resultados

Esta sección presenta los resultados evaluados bajo la norma ISO 3382-2 para tiempo de reverberación en recintos ordinarios y la norma ISO 16283-1 para aislamiento a ruido aéreo. Los métodos de evaluación usados son establecidos por las normas anteriormente mencionadas.

La evaluación realizada para cada tipo de sellamiento es analizada mediante la norma ISO 16283-1, donde se pretende mostrar cómo afecta la variación de sellamientos en una puerta acústica. Se presentan comparaciones entre los resultados brindados para cada sellamiento, estableciendo diferencias del comportamiento a la transmisión de ruido, de esta forma clasificar bajo indicadores de la norma ISO 717-1 los sellamientos destinados a este estudio.

## 5.1. Tiempo de reverberación (ISO 3382-2)

Realizadas las mediciones de tiempo de reverberación descrita en el apartado 4.4.1 se elabora un promedio de los resultados obtenidos; inicialmente se efectúa un promedio de las repeticiones en cada punto, seguido de un promedio entre puntos para cada posición de fuente, finalmente se procede a realizar un promedio general de los datos resultantes en cada posición de fuente. Los datos son expresados por bandas de tercio de octava. En la tabla 5-1 se presentan los resultados finales del tiempo de reverberación EDT, T10. T20 y T30.

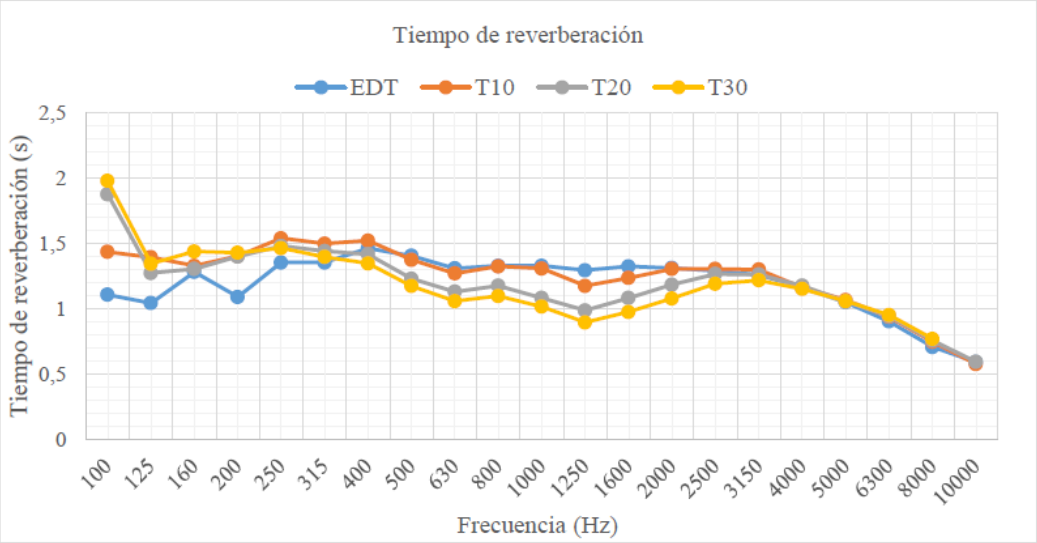



Gráfica 5-1 Nivel de presión sonora del ruido de fondo en relación a la señal generada por la fuente (ISO 3382-2)

En la gráfica 5-1 se presenta el nivel de presión sonora del ruido de fondo y de la señal generada por la fuente respecto a la frecuencia. Se observa que la señal generada por la fuente se encuentra por encima del ruido de fondo al menos 35dB en el rango de frecuencias de 100Hz a 5000Hz, asegurando de esta forma el análisis de tiempo de reverberación requerido por la norma ISO 3382-2 (T20).

| **Tiempos de reverberación por bandas de tercio de octava** | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **F(Hz)** | **EDT(s)** | **T10(s)** | **T20(s)** | **T30(s)** | **F(Hz)** | **EDT(s)** | **T10(s)** | **T20(s)** | **T30(s)** |
| **100** | 1.108 | 1.435 | 1.875 | 1.977 | **1250** | 1.294 | 1.175 | 0.988 | 0.896 |
| **125** | 1.044 | 1.394 | 1.273 | 1.345 | **1600** | 1.324 | 1.236 | 1.083 | 0.976 |
| **160** | 1.281 | 1.329 | 1.304 | 1.438 | **2000** | 1.311 | 1.304 | 1.184 | 1.079 |
| **200** | 1.091 | 1.403 | 1.399 | 1.428 | **2500** | 1.290 | 1.304 | 1.266 | 1.191 |
| **250** | 1.354 | 1.539 | 1.479 | 1.463 | **3150** | 1.260 | 1.300 | 1.261 | 1.217 |
| **315** | 1.354 | 1.498 | 1.441 | 1.396 | **4000** | 1.159 | 1.162 | 1.176 | 1.151 |
| **400** | 1.462 | 1.521 | 1.416 | 1.347 | **5000** | 1.051 | 1.068 | 1.056 | 1.059 |
| **500** | 1.405 | 1.374 | 1.230 | 1.174 | **6300** | 0.904 | 0.939 | 0.944 | 0.953 |
| **630** | 1.309 | 1.270 | 1.131 | 1.059 | **8000** | 0.709 | 0.749 | 0.758 | 0.771 |
| **800** | 1.328 | 1.324 | 1.176 | 1.097 | **10000** | 0.593 | 0.579 | 0.596 | 0.603 |
| **1000** | 1.329 | 1.308 | 1.083 | 1.016 | | | | | |

Tabla 5-1 Tiempos de Reverberación por bandas de tercio de octava.



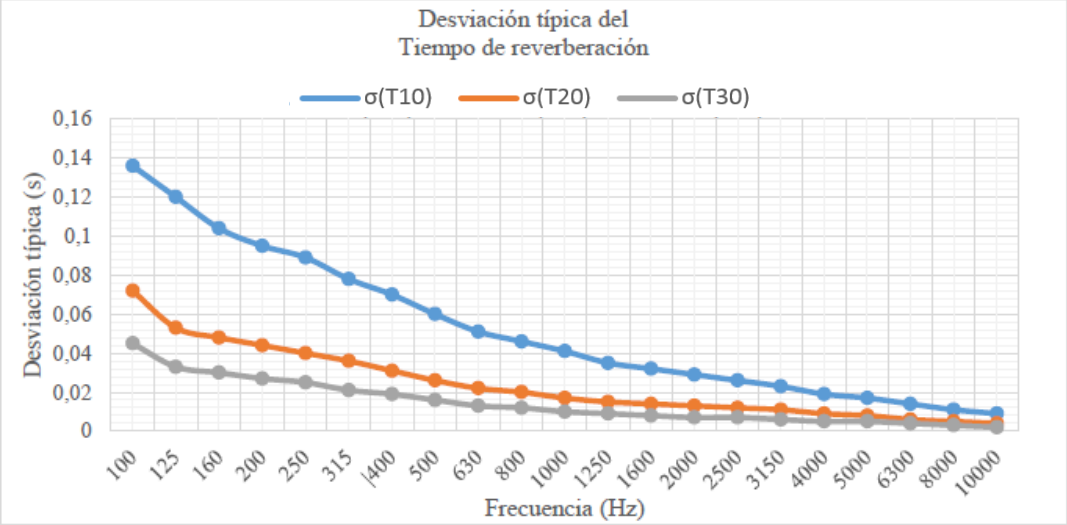

Gráfica 5-2 Tiempo de Reverberación en el recinto receptor por bandas de tercio de octava.

La incertidumbre de medición depende del número de promedios realizados, debido a la señal usada para la evaluación es común determinar desviaciones típicas en los valores resultantes. A través de la ecuación 40 se determinan las incertidumbres de medición bajo el método de ruido interrumpido el cual es referenciado por el método de respuesta impulsiva integrada. La desviación típica es calculada para cada banda de frecuencia, es decir, la frecuencia central es la banda de frecuencia evaluada como es demarcado en la ecuación 39. La tabla 5-2 presenta la desviación típica del tiempo de reverberación para curvas de decrecimiento (T10, T20 y T30) por bandas de tercio de octava, estos valores son presentados como desviación en segundos. La letra B hace referencia al ancho de banda para cada frecuencia.

| **Desviaciones Típicas del tiempo de reverberación por bandas de tercio de octava** | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **F(Hz)** | **B** | **σ(T10)** | **σ(T20)** | **σ(T30)** | **F(Hz)** | **B** | **σ(T10)** | **σ(T20)** | **σ(T30)** |
| **100** | 23.000 | 0.136 | 0.072 | 0.045 | **1250** | 287.500 | 0.035 | 0.015 | 0.009 |
| **125** | 28.750 | 0.120 | 0.053 | 0.033 | **1600** | 368.000 | 0.032 | 0.014 | 0.008 |
| **160** | 36.800 | 0.104 | 0.048 | 0.030 | **2000** | 460.000 | 0.029 | 0.013 | 0.007 |
| **200** | 46.000 | 0.095 | 0.044 | 0.027 | **2500** | 575.000 | 0.026 | 0.012 | 0.007 |
| **250** | 57.500 | 0.089 | 0.040 | 0.025 | **3150** | 724.500 | 0.023 | 0.011 | 0.006 |
| **315** | 72.450 | 0.078 | 0.036 | 0.021 | **4000** | 920.000 | 0.019 | 0.009 | 0.005 |
| **\|400** | 92.000 | 0.070 | 0.031 | 0.019 | **5000** | 1.150.000 | 0.017 | 0.008 | 0.005 |

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **500** | 115.000 | 0.060 | 0.026 | 0.016 | **6300** | 1.449.000 | 0.014 | 0.006 | 0.004 |
| **630** | 144.900 | 0.051 | 0.022 | 0.013 | **8000** | 1.840.000 | 0.011 | 0.005 | 0.003 |
| **800** | 184.000 | 0.046 | 0.020 | 0.012 | **10000** | 2.300.000 | 0.009 | 0.004 | 0.002 |
| **1000** | 230.000 | 0.041 | 0.017 | 0.010 | | | | | |

Tabla 5-2 Desviaciones típicas de tiempo de reverberación por bandas de tercio de octava.




Gráfica 5-3 Desviaciones Típicas del tiempo de reverberación.

A través de las desviaciones típicas obtenidas en la tabla 5-2 se observa un comportamiento descendente al aumento de la frecuencia en los tiempos de reverberación T10, T20 y T30 (gráfica 5-2) haciendo referencia a una disminución de la incertidumbre cuando la frecuencia asciende, Sin embargo, los valores con una mayor pendiente de descenso son presentados por la desviación típica de T10, es decir, los datos con mayor fiabilidad son presentados por T20 y T30 con desviaciones no superiores a 0.08s; adicionalmente los tiempos de reverberación establecidos por T20 y T30 no poseen variaciones superiores a 0.25s en todo el espectro de frecuencia como es expuesto en la gráfica 5-2, en comparación con el tiempo de reverberación de EDT y T10 poseen variaciones superiores a 0.5s respecto a T20 y T30. A partir de esta información los tiempos de reverberación de EDT y T10 no serán usados en este estudio.

Al momento de las mediciones del tiempo de reverberación la fuente generó un nivel de presión sonora de al menos 35dB por encima del nivel de ruido de fondo (S/N) en las banas de frecuencia

de estudio, suficiente para evaluar las curvas de decrecimiento T20 (grafica 5-1). En la gráfica 5-3 se contempla valores de desviación superiores de T20 frente a los valores presentados por T30, no obstante, según la norma ISO 3382-2 para evaluar curvas de decrecimiento T30 es necesario generar al menos 45dB por encima del ruido de fondo, en la gráfica 5-2 el valor máximo de diferencia entre el tiempo de reverberación de T20 y T30 es de 0.25s, pero en todo el espectro de frecuencia el comportamiento es semejante. Pese a que los valores de desviación presentados por T20 son superiores a los expuestos por T30, se decide trabajar con el tiempo de reverberación T20, puesto que las condiciones de medición fueron favorables para la evaluación de esta curva de decrecimiento.

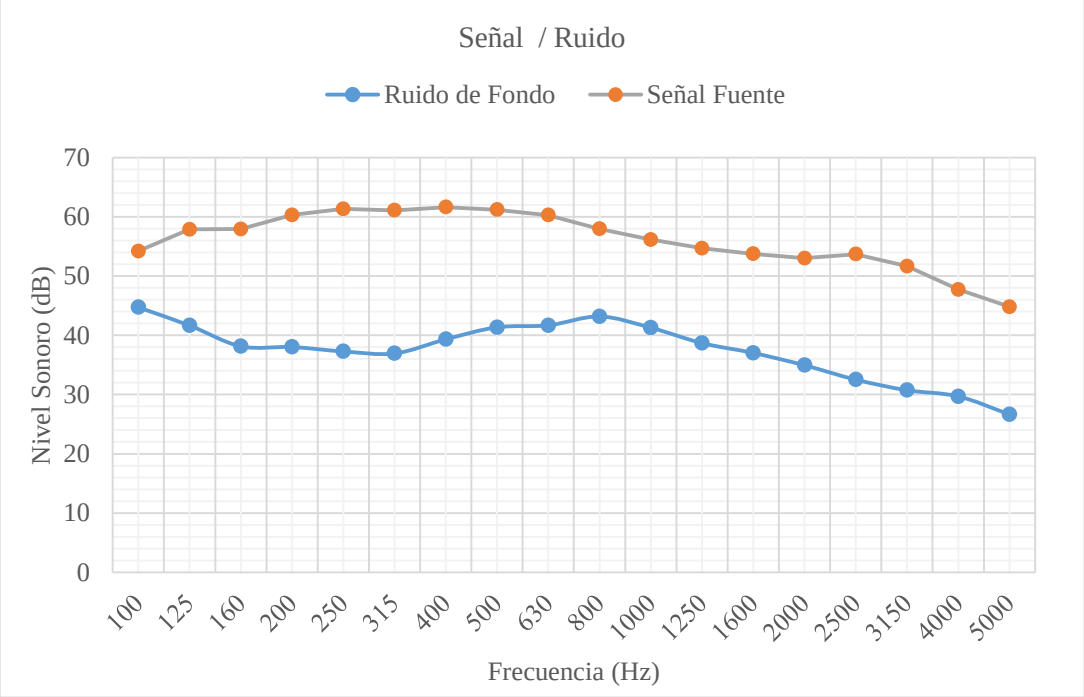
## 5.2. Evaluación de la diferencia de niveles de presión sonora a razón del cambio de sellamiento implementado en la partición con puerta acústica

Realizadas las mediciones in situ como es expresado por la norma ISO 16283-1, se procede a realizar el promedio de los datos obtenidos. Siguiendo el debido proceso descrito por la norma se hallan los valores de índice de reducción sonora aparente (R') por bandas de tercio de octava para la partición con la puerta acústica y cada tipo de sellamiento. La clasificación requiere el proceso descrito por la norma ISO 717-1, se calcula la magnitud global Rw y las magnitudes espectrales C y Ctr clasificando el aislamiento ofrecido por la partición con la puerta acústica y cada tipo de sellamiento bajo el indicador Rw.

Los valores de incertidumbre fueron hallados bajo los parámetros indicados por la norma ISO 12999-1. A partir de los diferentes tipos de sellamiento se realizará un análisis de los resultados para observar su impacto en la transmisión de ruido.

La evaluación de diferencia de niveles de presión sonora a razón del cambio de sellamiento implementado en la partición con puerta acústica es necesario asegurar un nivel de presión sonora de al menos 10dB por encima del ruido de fondo en las frecuencias a analizar en el recinto

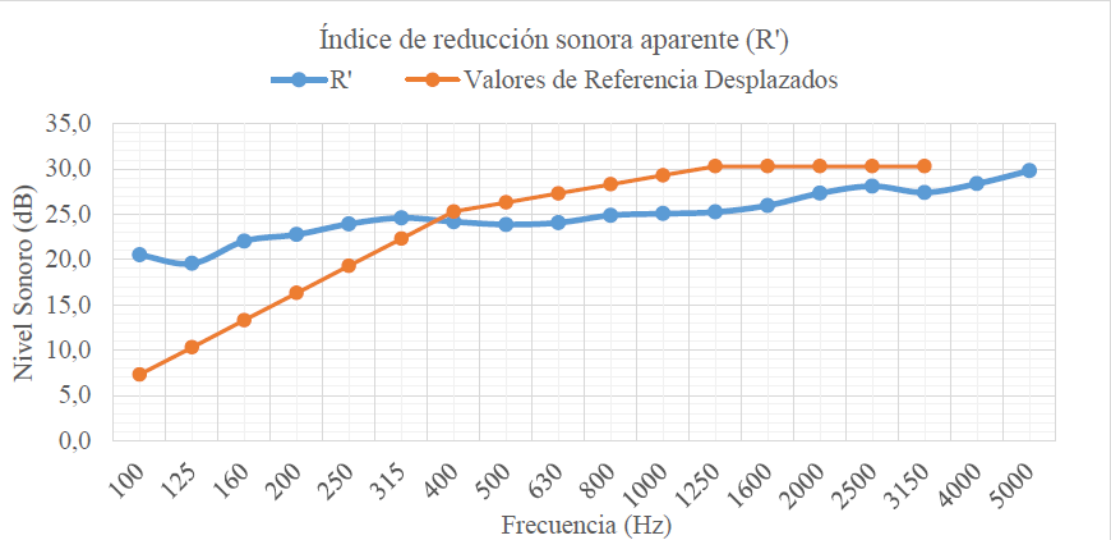
receptor, de lo contrario, es necesario generar correcciones según lo indicado por la norma ISO 16283-1. En la gráfica 5-4 se presenta el nivel de presión sonora del ruido de fondo y de la señal generada por la fuente respecto a la frecuencia, de esta forma asegurando el nivel de presión óptimo para la medición y análisis de la partición con la puerta acústica sin generar ningún tipo de corrección.




Gráfica 5-4 Nivel de presión sonora del ruido de fondo en relación a la señal generada por la fuente en el recinto receptor (ISO 16283-1)

## 5.2.1. Partición con puerta acústica sin sellamiento

En la Gráfica 5-5 se presenta el índice de reducción sonora de la partición acompañado de los valores de referencia desplazados para el caso donde la puerta acústica no posee ningún tipo de sellamiento, adicionalmente en la tabla 5-3 se presentan las magnitudes globales con sus respectivas incertidumbres.




Gráfica 5-5 Índice de Reducción Sonora Aparente de la partición con puerta acústica Sin Sellamiento

| **Parámetros Acústicos e Incertidumbres de la partición con puerta acústica sin sellamiento.** | |
|---|---|
| **Rw (C; Ctr)** | 26,3 (0;-1) dB |
| **Rw (C; Ctr; C100-5000;Ctr100-5000)** | 26,3 (0;-1; 26; 25) dB |
| **Incertidumbre (Rw + C50-5000)** | 1,92 dB |
| **Incertidumbre (Rw +Ctr50-5000)** | 1,90 dB |
| **Incertidumbre (Rw)** | 1,83 dB |

Tabla 5-3 Parámetros acústicos e incertidumbres de la partición con puerta acústica sin sellamiento.

La gráfica 5-5 permite apreciar un incremento progresivo en el aislamiento conforme al aumento de la frecuencia. El comportamiento de los valores de R' no poseen variaciones superiores a 2.4 dB entre bandas de frecuencia consecutiva, la máxima variación se encuentra entre las bandas de 125Hz y 160Hz. En las bandas de 800Hz, 1000Hz y 1250Hz se presenta con variaciones mínimas no superiores a 0.2dB, este caso no es esperado por la teoría expuesta en el apartado 2.2.1 donde obedece a un mayor aislamiento cuando la frecuencia aumenta.

| Índice de reducción sonora aparente de la partición con puerta acústica sin sellamiento | | | |
|---|---|---|---|
| **Hz** | **Sin sellamiento (dB)** | **Hz** | **Sin sellamiento (dB)** |
| **100** | 20.5 | **800** | 24.9 |
| **125** | 19.6 | **1000** | 25.1 |
| **160** | 22.0 | **1250** | 25.2 |
| **200** | 22.8 | **1600** | 26.0 |
| **250** | 23.9 | **2000** | 27.3 |
| **315** | 24.6 | **2500** | 28.1 |
| **400** | 24.2 | **3150** | 27.4 |
| **500** | 23.9 | **4000** | 28.4 |
| **630** | 24.1 | **5000** | 29.8 |
| **Rw** | **26.3** | | |

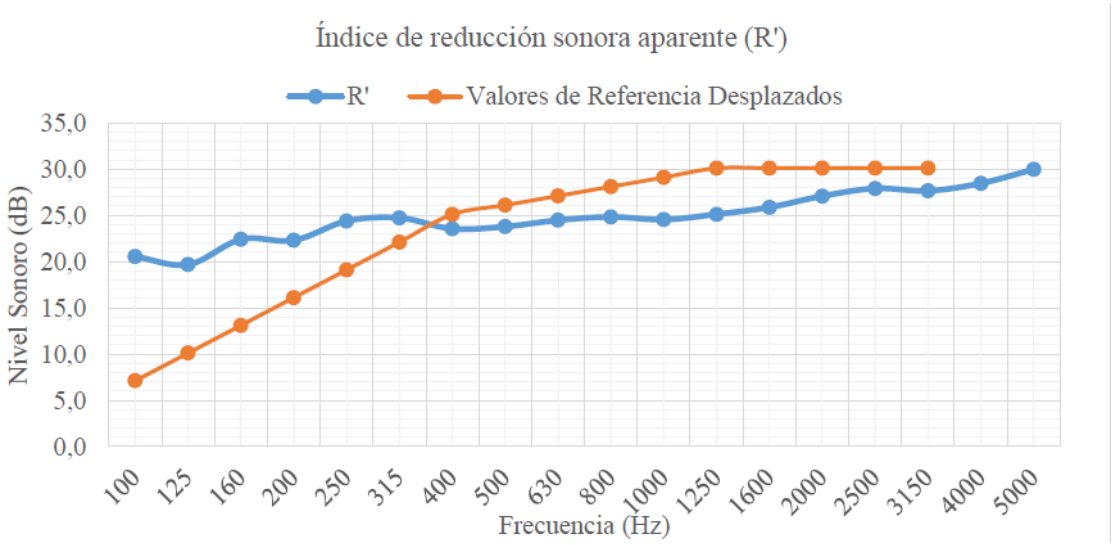
Tabla 5-4 índice de reducción sonora aparente de la partición con puerta acústica sin sellamiento.

Considerando que la Universidad no cuenta con laboratorios de transmisión, fue necesario adecuar un espacio, de tal forma, realizar el mejor desarrollo posible de la medición. Dicho lo anterior, a pesar de aplicar un tratamiento para evitar problemas de flanqueo, según la norma ISO 10140-2, las placas metálicas implementadas en la imagen 4-24, no hacían un acople preciso con la abertura, concediendo transmisión de la señal al recinto receptor y por ende aumentando el nivel de presión sonora en este.

El software de simulación funciona bajo los parámetros ofrecidos por el material, determinando de esta manera el comportamiento de una sección multicapa, no tiene en cuenta aberturas presentes en la puerta acústica o niveles de presión sonora entre recintos. La evaluación de una partición a través de la norma ISO 16283-1 permite la evaluación del aislamiento teniendo en cuenta una diferencia de presión entre recintos. Son métodos disímiles y trabajan con diferentes variables, por tal motivo son resultados no comparables. Sin embargo, la simulación permite un acercamiento al comportamiento real de la puerta acústica, no obstante, existen otras condiciones que repercuten en el proceso de medición *in situ* como los materiales en el área de separación común (partición).

## 5.2.2. Partición con puerta acústica y sellamiento magnético.

En la Gráfica 5-6 se presenta el índice de reducción sonora acompañado de los valores de referencia desplazados para el caso de estudio con sellamiento magnético, adicionalmente se presentan las magnitudes globales con sus respectivas incertidumbres.




Gráfica 5-6 Índice de Reducción Sonora Aparente de la partición con puerta acústica y Sellamiento Magnético.

La medición de sellamiento magnético presento un comportamiento anormal en sus resultados, esto puede observarse en las fluctuaciones registradas en la respuesta en frecuencia de la medición como se presenta en la gráfica 5-6. Específicamente, este comportamiento se demarca en los cambios de pendiente entre las frecuencias 315Hz y 400Hz donde el valor es de 24.7dB y 23.5dB respectivamente, este mismo fenómeno sucede en la banda de 160Hz y 200Hz, 800Hz y 1000Hz finalmente en 2500Hz y 3150 Hz. Además se puede apreciar que entre las frecuencias 400Hz a 800Hz y las frecuencias 1250Hz a 2500 Hz, hay un incremento de al menos 2dB en el aislamiento acústico.

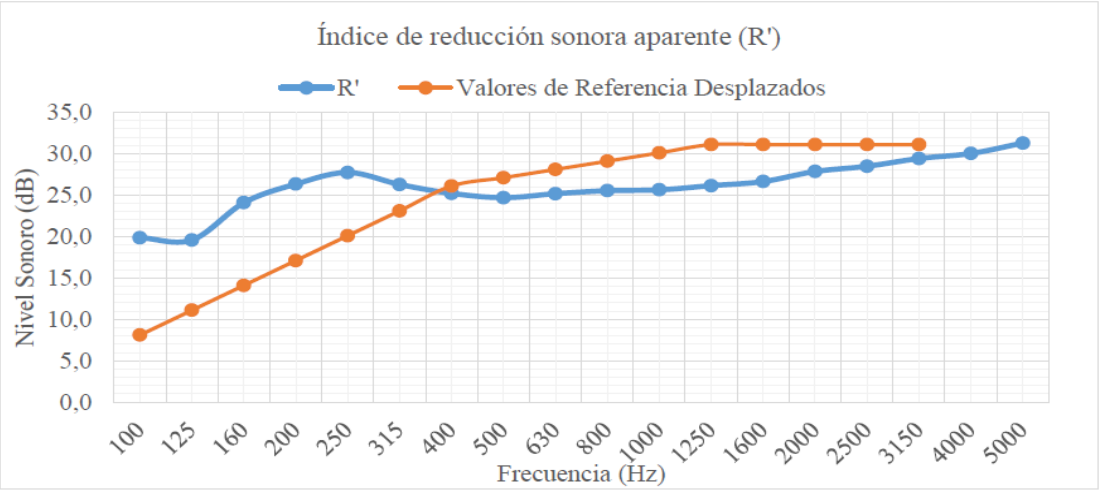
| Parámetros Acústicos e Incertidumbres de la partición con puerta acústica y sellamiento magnético. | |
|---|---|
| **Rw (C; Ctr)** | 25,9 (0;-1) dB |
| **Rw (C; Ctr; C100-5000;Ctr100-5000)** | 25,9 (0;-1; 26; 25) dB |
| **Incertidumbre (Rw + C50-5000)** | 1,91 dB |
| **Incertidumbre (Rw +Ctr50-5000)** | 1,90 dB |
| **Incertidumbre (Rw)** | 1,83 dB |

Tabla 5-5 Parámetros acústicos e incertidumbres de la partición con puerta acústica y sellamiento magnético.

Los valores de incertidumbre presentados en la tabla 5-5 del sellamiento magnético respecto a la puerta sin sellamiento tienden a ser semejantes, la diferencia máxima es de 0.01dB para el espectro C. En el caso de la magnitud global Rw presentada por la puerta sin sellamiento es de 26.3dB y con sellamiento magnético es de 25.9dB, presentando una diferencia de 0.4dB, por lo cual, el sellamiento magnético permite una mayor transferencia de energía acústica entre los recintos.

## 5.2.3. Partición con puerta acústica y sellamiento de contacto.

En la Gráfica 5-7 se presenta el índice de reducción sonora acompañado de los valores de referencia desplazados para el caso de estudio con sellamiento de contacto, adicionalmente se presentan las magnitudes globales con sus respectivas incertidumbres.




Gráfica 5-7 Índice de Reducción Sonora Aparente de la partición con la puerta acústica y Sellamiento De Contacto.

| Parámetros acústicos e incertidumbres de la partición con puerta acústica y sellamiento de contacto | |
|---|---|
| **Rw (C; Ctr)** | 27,1 (0;-1) dB |
| **Rw (C; Ctr; C100-5000;Ctr100-5000)** | 27,1 (0;-1; 27; 26) dB |
| **Incertidumbre (Rw + C50-5000)** | 1,91 dB |
| **Incertidumbre (Rw +Ctr50-5000)** | 1,92 dB |
| **Incertidumbre (Rw)** | 1,83 dB |

Tabla 5-6 Parámetros acústicos e incertidumbres de la partición con puerta acústica y sellamiento de contacto.

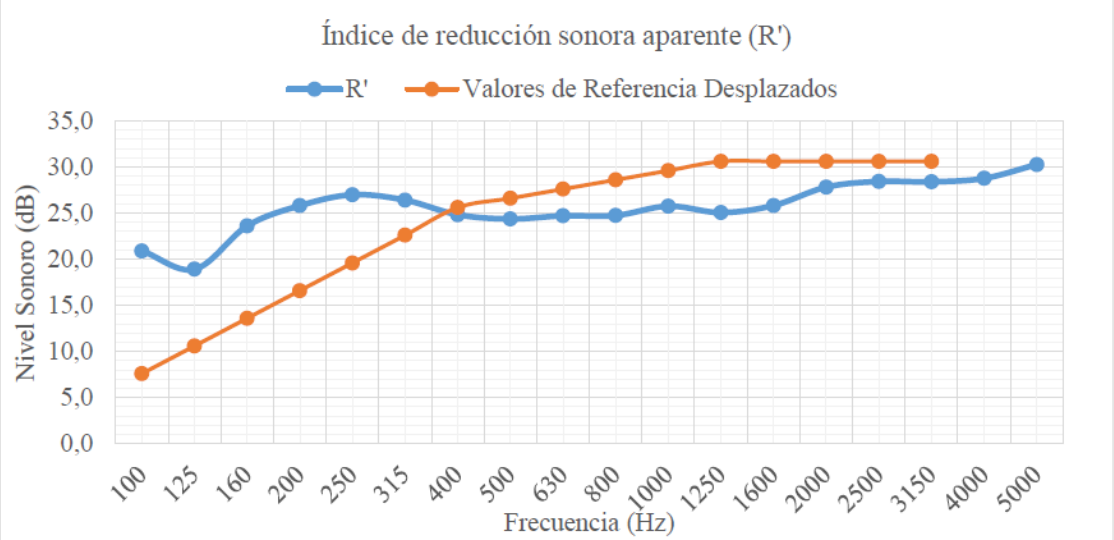
A partir de la banda de frecuencia 125Hz se presenta un comportamiento ascendente en cuanto al nivel de aislamiento hasta la banda de 250Hz, luego los valores descienden hasta la banda de 500Hz. Este comportamiento es semejante al sellamiento de fricción presentado en el apartado 5.2.4, sin embargo, posee un mayor nivel de aislamiento en frecuencias bajas.

A parir de la banda de 500Hz los valores de aislamiento son ascendentes sin presentar ningún tipo fluctuación como el observado en el caso de estudio del sellamiento magnético en el apartado 5.2.2.

Los valores de la incertidumbre presentados por el sellamiento de contacto respecto a la puerta sin sellamiento presentan una diferencia máxima de 0.02dB presente para el espectro Ctr y 0.01dB para el espectro C. En el caso de la magnitud global Rw presentada por la puerta sin sellamiento es de 26.3dB y con sellamiento de contacto es de 27.1dB, presentando una diferencia de 0.8dB mayor, la cual se hace presente en bajas frecuencias.

## 5.2.4. Partición con puerta acústica y sellamiento de fricción

En la Gráfica 5-8 se presenta el índice de reducción sonora acompañado de los valores de referencia desplazados para el caso de estudio del sellamiento de fricción, adicionalmente se presentan las magnitudes globales con sus respectivas incertidumbres.




Gráfica 5-8 Índice de Reducción Sonora Aparente de la partición con puerta acústica y Sellamiento De Fricción.

En las bandas de 125Hz a 500Hz el comportamiento es semejante al sellamiento de contacto, a partir de esta frecuencia sus valores comienzan a aumentar hasta la banda de 1000Hz, se presenta un decaimiento de 0.6dB hasta la banda de 1250Hz, en seguida los valores ascienden nuevamente. A partir de 2000Hz hasta 4000Hz se originan variaciones mininas, donde el incremento de su aislamiento al aumento de frecuencia no tiene casi afectación.

| **Parámetros acústicos e incertidumbres de la partición con puerta acústica y sellamiento de fricción.** | |
|---|---|
| **Rw (C; Ctr)** | 26,6 (0;-1) dB |
| **Rw (C; Ctr; C100-5000;Ctr100-5000)** | 26,6 (0;-1; 27; 25) dB |
| **Incertidumbre (Rw + C50-5000)** | 1,92 dB |
| **Incertidumbre (Rw +Ctr50-5000)** | 1,92 dB |
| **Incertidumbre (Rw)** | 1,83 dB |

Tabla 5-7 Parámetros acústicos e incertidumbres de la partición con puerta acústica y sellamiento de fricción.

Los valores de la incertidumbre presentados por el sellamiento de fricción una diferencia máxima de 0.02dB para el espectro Ctr respecto a la puerta sin sellamiento, los demás valores son iguales. En el caso de la magnitud global Rw presentada por la puerta sin sellamiento es de 26.3dB y con sellamiento de fricción es de 26.6dB, presentando una diferencia de 0.3dB en su magnitud global a favor de la puerta con sellamiento de fricción.

## 5.2.5. Comparación de resultados entre Sellamientos

En esta sección se realiza el análisis de los resultados obtenidos a través de la experimentación con los sellamientos destinados a estudio. Dicho análisis mostrará el comportamiento y el efecto de los sellamientos a la transmisión de ruido a través de una puerta acústica y las variaciones existentes cuando no se presenta ningún tipo de sellamiento.

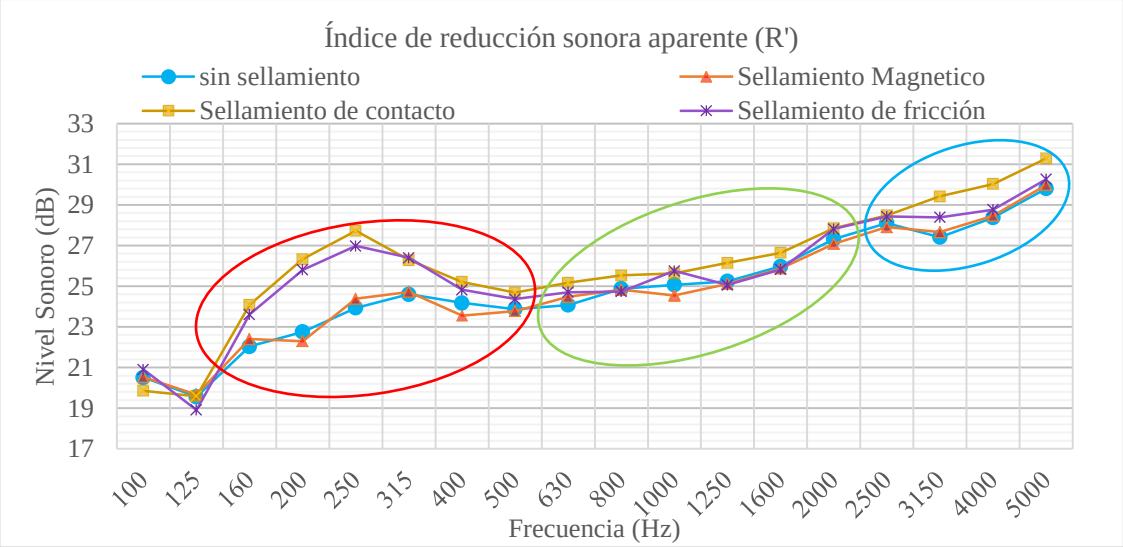
La tabla 5-8 muestra la diferencia del índice de reducción sonora entre la partición con puerta acústica y sellamientos versus sin sellamiento, presentando dos casos: el primero es donde los valores son negativos correspondiendo a un aislamiento mayor por parte de la puerta acústica sin sellamiento, el segundo cuando el valor es positivo corresponde a un valor de aislamiento mayor que la puerta sin sellamiento. La gráfica 5-9 presenta la comparación del índice de reducción sonora aparente cuando la puerta acústica se encuentra con y sin sellamiento.

| **Diferencia del índice de reducción sonora aparente entre Sellamientos** | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Hz** | **R' Sin Sellamiento (dB)** | **R' Magnético (dB)** | **R' Fricción (dB)** | **R' Contacto (dB)** | **Diferencia Magnético (dB)** | **Diferencia Fricción (dB)** | **Diferencia Contacto (dB)** |
| **100** | 20,5 | 20,5 | 20,9 | 19,9 | 0,02 | 0,39 | -0,66 |
| **125** | 19,5 | 19,7 | 18,9 | 19,6 | 0,11 | -0,65 | 0,02 |
| **160** | 22,0 | 22,4 | 23,6 | 24,1 | 0,37 | 1,58 | 2,05 |
| **200** | 22,7 | 22,3 | 25,8 | 26,3 | -0,46 | 3,05 | 3,58 |
| **250** | 23,9 | 24,4 | 27,0 | 27,7 | 0,45 | 3,05 | 3,80 |
| **315** | 24,6 | 24,7 | 26,4 | 26,3 | 0,12 | 1,80 | 1,68 |
| **400** | 24,1 | 23,5 | 24,8 | 25,2 | -0,63 | 0,64 | 1,03 |
| **500** | 23,8 | 23,8 | 24,4 | 24,7 | -0,09 | 0,49 | 0,82 |
| **630** | 24,0 | 24,5 | 24,7 | 25,2 | 0,40 | 0,63 | 1,10 |
| **800** | 24,8 | 24,8 | 24,7 | 25,5 | -0,05 | -0,14 | 0,65 |

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **1000** | 25,0 | 24,5 | 25,7 | 25,6 | -0,53 | 0,68 | 0,57 |
| **1250** | 25,2 | 25,1 | 25,1 | 26,1 | -0,13 | -0,19 | 0,90 |
| **1600** | 25,9 | 25,9 | 25,8 | 26,6 | -0,10 | -0,14 | 0,67 |
| **2000** | 27,3 | 27,1 | 27,8 | 27,9 | -0,24 | 0,49 | 0,53 |
| **2500** | 28,1 | 27,9 | 28,4 | 28,5 | -0,20 | 0,32 | 0,38 |
| **3150** | 27,4 | 27,7 | 28,4 | 29,4 | 0,24 | 0,98 | 2,01 |
| **4000** | 28,3 | 28,5 | 28,8 | 30,0 | 0,10 | 0,39 | 1,66 |
| **5000** | 29,8 | 30,0 | 30,3 | 31,3 | 0,17 | 0,46 | 1,48 |
| **Rw** | **26,3** | **25,1** | **26,6** | **27,1** | **-1,2** | **0.3** | **0.8** |

Tabla 5-8 Diferencia del índice de reducción sonora aparente entre Sellamientos.

Los valores de la magnitud global Rw de las combinaciones sellamiento-puerta frente a la puerta sin sellamiento presentan un incremento en el aislamiento acústico de máximo 0.8dB brindado por el sellamiento de contacto, seguido por el sellamiento de fricción con un incremento de 0.3dB (tabla 5-8); la incertidumbre hallada bajo los parámetros de la norma ISO 12999-1 destinada a valores únicos, presenta un valor de incertidumbre de ±1.83dB para todas las combinaciones asumiendo que no existe diferencia en dicho valor. La evaluación a partir de un valor único en este estudio sugiere que al aplicar sellamientos magnéticos, de contacto o fricción en puertas acústicas no genera grandes variaciones, sin embargo, es necesario contemplar el comportamiento al paso de ruido en un espectro amplio de frecuencias, observando la afectación tanto positiva como negativa en bandas específicas como es mostrado a continuación.




Gráfica 5-9 Índice de reducción sonora aparente de los sellamientos

En la Gráfica 5-9 el círculo rojo encierra el rango de frecuencias de 160Hz a 500Hz, allí se presencia un comportamiento similar entre la puerta acústica sin sellamiento y con sellamientos pero con diferentes valores de aislamiento; en el rango de 125Hz a 250Hz existe un aumento progresivo en el aislamiento, luego una caída en los valores hasta la frecuencia de 500Hz. El sellamiento de contacto (línea amarilla) posee valores de aislamiento superiores a las demás combinaciones, seguido del sellamiento de fricción (tabla 5-9). El sellamiento magnético tiende a poseer valores similares a la puerta sin sellamiento, para la banda de 200Hz y 400Hz se encuentra 0.46dB y 0.63dB por debajo de la puerta sin sellamiento respectivamente.

El mayor aislamiento es de 3.8dB y 3.5dB en la banda de 250 Hz expuesto por el sellamiento de contacto y fricción respectivamente en relación a la puerta sin sellamiento. A partir de los valores presentes en el rango de 160Hz a 400Hz, es relevante el funcionamiento y el efecto de los sellamientos de fricción y de contacto al paso del ruido, donde la capacidad de aislamiento es superior a los demás cómo se observa en la tabla 5-8.

En la banda de 2500 Hz el aislamiento de los sellamientos posee valores semejantes (tabla 5-8), pero al pasar a la frecuencia de 3150Hz el sellamiento de contacto continua presentando un rendimiento preferente; el sellamiento de fricción se mantiene con variaciones mínimas, sin embargo el sellamiento magnético y la puerta sin sellamiento presenta una caída en sus valores como es señalado por el circulo azul, donde la variación máxima es de 0.24dB en la banda de 3150Hz respecto a la puerta sin sellamiento; el sellamiento de contacto se mantiene con valores superiores a la puerta sin sellamiento en este rango de frecuencias (3150Hz-5000Hz).

En el rango de 630Hz a 2000Hz (Elipse Verde) mostrado en la gráfica 5-8, el comportamiento del sellamiento de contacto presenta valores que se encuentran en ascenso, los valores de aislamiento son mayores que las demás combinaciones a excepción de la banda de frecuencia de 1000Hz y 2000Hz, donde el sellamiento de fricción posee los mismos valores. La puerta sin sellamiento posee un comportamiento semejante al sellamiento de contacto a partir de la banda de 500Hz pero con valores de aislamientos inferiores (tabla 5-8), ratificando de esta forma el funcionamiento del sellamiento de contacto y su funcionalidad en este rango de frecuencias.

El sellamiento magnético frente a la puerta sin sellamiento presenta que en las bandas de 200Hz, 400Hz, 500Hz y 800Hz a 2500Hz los valores de aislamiento son inferiores a la puerta acústica sin sellamiento; el sellamiento magnético posee un aislamiento mayor en la banda de 250Hz con 0.45dB. En la tabla 5-7 se presenta el valor de la magnitud global (Rw), donde la puerta acústica sin sellamiento posee un Rw = 26.3dB y con sellamiento magnético un Rw = 25.1dB, por lo tanto, el valor Rw del sellamiento es inferior a la puerta sin sellamiento en 1.2dB, el resultado esperado es un cierre hermético en la hendidura aumentando el aislamiento del elemento.

La diferencia del aislamiento entre la puerta acústica sin sellamiento y con sellamiento magnético es atribuible a las condiciones mismas del material, el sellamiento magnético presenta una baja elasticidad almacenando una cantidad mínima de energía (Croocker J.M, 2007), por tal motivo, su bajo amortiguamiento no permite la disipación de energía permitiendo la transmisión de ruido estructural o por vía sólida, en este sentido, la disipación de energía no es eficiente ya que no existe un desacople mecánico (Balachandran B., & Magrab B. E, 2009) del marco respecto a la hoja de la puerta acústica permitiendo el aumento del nivel de presión sonora en el recinto receptor.

El sellamiento de fricción y de contacto ofrece un aislamiento mayormente demarcado en el rango de 160Hz a 400Hz frente a la puerta acústica sin sellamiento como es mostrado en la gráfica 5-9, partiendo de este hecho, se justifica el comportamiento y la influencia ofrecida por estos sellamientos minimizando la trasferencia de ruido. El sellamiento de contacto ofrece valores superiores a las demás configuraciones, esto es reflejado en su valor global Rw=27.1 dB siendo superior a puerta sin sellamiento en 0.8 dB (en la tabla 5-8 se presentan los valores de R’ y las diferencias); el sellamiento de fricción se encuentra en segunda posición con un Rw global de 0.3dB por encima de la puerta sin sellamiento. Cada sellamiento ofrece un comportamiento distinto por bandas de frecuencia, el valor global Rw permite un acercamiento al nivel general de aislamiento en el elemento, más no muestra de forma explícita el funcionamiento de cada sellamiento y la afectación generada sobre un rango amplio de frecuencias.

## 5.3 Análisis de costos

En el análisis de costos se presentaran los precios referentes a los materiales de construcción de la puerta acústica y sellamientos evaluados. De igual forma, se mencionan las mejorías en el aislamiento acústico de la partición con puerta acústica respecto a los costos de los sellamientos implementados, con la finalidad de observar la relación costo-beneficio.

La relación costo-beneficio será establecida bajo tres puntuaciones (baja, media y alta) debido a la existencia 3 tipos de sellamiento, la relación es baja cuando el costo es elevado y el funcionamiento en términos acústicos no es eficiente, la relación será alta en el caso donde la eficiencia es alta y su costo es bajo.

| **Costos de la Puerta Acústica** | | | |
|---|---|---|---|
| **Cantidad** | **Material** | **Característica** | **Costo (COP)** |
| 3 | Lamina de acero | Cold Rolled 1.2mm | $400.000 |
| 1 | Lamina de Drywall | Yeso-cartón ST 12.5 mm | $18.400 |
| 5 | Sonowall | Lana de roca | $50.000 |
| 3 | Bisagras | 5/8” | $10.000 |
| 1 | Pintura | Electrostática | $50.000 |
| 1 | Mano de obra | Ensamble, ajuste de partición y procesamiento de lámina de acero | $400.000 |
| 1 | Cerradura de seguridad | Anclaje de 4 puntos | $400.000 |
| **total** | | | **$1.328.400** |

Tabla 5-10 Costos de la Puerta Acústica.

En la tabla 5-9 se presentan los costos de mano de obra, y materiales internos y externos implementados en la puerta acústica. Los costos de materiales internos son apreciados en la tabla 4-2 y 4-3.

En la tabla 5-10 se presenta el índice de reducción sonora pondero (Rw) de la partición con puerta y sellamientos y sin sellamiento, también se presenta el costo de cada sellamiento implementado para 8 metros que conforman el perímetro de la puerta acústica donde se presentan las hendiduras.

| **Comparación de costos y beneficios de los sellamientos.** | | |
|---|---|---|
| **Partición con puerta y Sellamientos** | **Rw (dB)** | **Costo (COP)** |
| **Partición con puerta sin sellamiento** | 26.3 | $0 |
| **Partición con puerta y sellamiento magnético** | 25.1 | $40.000 |
| **Partición con puerta y sellamiento de fricción** | 26.6 | $44.900 |
| **Partición con puerta y sellamiento de contacto** | 27.1 | $33.900 |

Tabla 5-11 Comparación de costos y beneficios de los sellamientos.

La puerta acústica realizada para este estudio tuvo un costo de $1.328.400 COP, al momento de analizar el aislamiento total de la partición con la puerta acústica sin sellamiento se obtiene un Rw=26.3dB, de acuerdo al apartado 5.2.5 el sellamiento magnético presenta un Rw inferior. Por este motivo, la relación costo-beneficio es baja respecto a las demás combinaciones, puesto que al invertir $40.000 COP se está obteniendo un nivel ruido mayor en el recinto receptor. Por lo contrario, el sellamiento de fricción presenta un Rw superior a la puerta sin sellamiento, en este caso el valor de compra es mayor al magnético por $4.900 COP y se logra obtener un aislamiento mayor en bandas específicas de frecuencia (tabla 5-8) siendo una relación costo-beneficio media.

En el caso del sellamiento de contacto se obtiene un Rw=27.1dB superior a las demás combinaciones, el costo de este sellamiento es de $33.900 COP inferior al costo del sellamiento magnético y de fricción (tabla 5-11), por tal motivo, la relación costo-beneficio es alta. De esta forma, invirtiendo el valor mencionado se pueden obtener un mayor nivel de aislamiento acústico en la partición disminuyendo la energía sonora transferida entre los recintos. Es importante tener en cuenta el valor total de la puerta acústica, es justificable invertir el valor del sellamiento de

contacto a una puerta acústica de esta índole, ya que es posible mejorar el rendimiento en términos acústicos por un bajo costo.

# 6. Conclusiones

- La teoría expuesta por Gomperts (1964), Jones R.E, Sharp B.H, asume que las características propias del sonido permiten superar obstáculos a partir de aberturas, funcionando como nuevas fuentes de ruido en un recinto; cuando el cierre en una puerta se hace hermético, no existirán aberturas o grietas donde el ruido pueda filtrarse aumentando de esta forma el aislamiento total. Conforme a la teoría expuesta y el análisis de resultados se encuentra que la partición con puerta acústica en combinación con el sellamiento de contacto y de fricción presentan un Rw (índice de reducción ponderado aparente) de 27.1 dB y 26.6 dB respectivamente, exhibiendo los mayores niveles de aislamiento respecto a la partición sin sellamiento.

  De lo anterior, el funcionamiento de cada sellamiento dependerá directamente de los problemas a solucionar, es decir, si se desea un control de ruido específico en un rango de frecuencias entre 160Hz y 500Hz el comportamiento del sellamiento de contacto y de fricción poseerá un óptimo ejercicio, de igual manera, si se desea un control en un rango de 500Hz a 2000Hz el comportamiento de los sellamientos y de la puerta acústica sin sellamiento ofrecen un aislamiento funcional.

- A través de la experimentación y evaluación de sellamientos en puertas acústicas, se enfatiza el funcionamiento de estos elementos aportando en el aumento del aislamiento acústico del sistema, corrigiendo errores de transmisión sonora debido a las hendiduras presentes en la interacción marco-hoja. Adicionalmente, el sellamiento de contacto presenta una excelente relación costo-beneficio, se puede evidenciar que con una inversión no superior a los $33.900 COP, se pudo obtener un aumento en el aislamiento en bandas de frecuencia específicas de hasta 3.8dB, es decir, la atenuación de una puerta acústica con sellamientos puede disminuir la energía transmitida a menos de la mitad.

- La creación de prototipos antes de la construcción de la puerta acústica permite un acercamiento a la construcción real, dando conocimiento de las dimensiones auténticas que debe poseer: los escalones del marco, escalones de la hoja, la cavidad interna y geometría

de las hendiduras. Partiendo de este hecho, es posible asumir el diseño y la construcción de la puerta acústica como uno de los procesos más rigurosos, si no existe una excelente planeación antes de su construcción el comportamiento de la puerta acústica no será eficiente y traerá complicaciones al momento del ensamblaje y montaje, es necesaria la implementación de prototipos ajustados a las dimensiones tanto del material acústico como del sellamiento.

La precisión de las dimensiones en el material de relleno es relevante, si la cavidad interna de la hoja posee dimensiones superiores a las requeridas por el material acústico existirán vacíos al interior del sistema donde podría presentarse resonancia, por lo contrario, si las dimensiones son inferiores el material acústico no cumplirá con las medidas requeridas, de esta forma, obligar un material a ocupar un menor espacio hará que sus características tales como la densidad varíen y con esto el comportamiento propio de la estructura.

- Los tipos de sellamientos poseen una forma de montura distinta, la ubicación en la puerta y la precisión al momento del cierre (hermeticidad) son factores que alteran el resultado de medición aumentando o disminuyendo la transferencia de energía sonora a través de una partición. Por las razones mencionadas, el sellamiento magnético permitió una fácil manipulación respecto a los demás sellamientos, sin embargo, no genera cambios importantes en el aislamiento, en si la puerta acústica sin sellamiento permite un aislamiento mayor, por tal motivo, el sellamiento magnético presenta un comportamiento deficiente respecto al aislamiento acústico ofrecido por las demás combinaciones, atribuyendo este hecho a las características propias que constituyen el material del sellamiento permitiendo la transmisión de ruido por vía sólida.

  De acuerdo al apartado 5.2 el diseño de una puerta acústica debe estar basado en el comportamiento de una partición en combinación con la puerta acústica y la forma de montura del sellamiento, estos parámetros determinarán la funcionalidad y el comportamiento de la combinación sellamiento-partición con puerta, brindando mejores resultados. El diseño de esta puerta acústica tenía como finalidad evaluar diferentes sellamientos, por tal motivo, las dimensiones de las hendiduras fueron consideradas en este ítem, en la práctica es necesario crear modelos acordes al tipo de sellamiento permitiendo un desenvolvimiento efectivo de las condiciones de aislamiento en el elemento, es decir, la

estructura tendrá predefinida una forma de cierre y de montura, con esto, sus dimensiones y características propias no variarán.

# 7. Recomendaciones

Se sugiere realizar un procedimiento en el que los sellamientos sean evaluados en condiciones estables y recintos correctamente tratados con una única abertura entre ellos, para la debida instalación de un elemento de construcción como lo es la puerta acústica. De esta forma, concebir una evaluación del aislamiento acústico de los sellamientos bajo condiciones controladas (condiciones de laboratorio), permitiendo resultados sin influencia de factores externos (transmisión por flancos, aberturas adicionales en área de separación común, ruido de fondo entre otros).

El funcionamiento óptimo de los equipos es obligatorio, los requisitos de difusión siguieren un equipo correctamente calibrado y una fuente totalmente omnidireccional, evitando diferencias de niveles de presión sonora que afectan el comportamiento acústico de la evaluación realizada.

Como futuros estudios se propone la evaluación de distintos sellamientos convencionales y no convencionales aplicados a puertas tratadas acústicamente y puertas sin tratamiento, los cuales cambian según su forma y el número de hendiduras presentes en la estructura, con el fin de analizar el comportamiento ofrecido por cada tipo de sellamiento y como puede influenciar en el ruido generado en zonas residenciales, comerciales y mixtas o en recintos controlados. Estudios adicionales por realizar a elementos de construcción (puertas acústicas) comprenden variables tales como: variación de materiales internos de relleno, mayor o menor número de escalones en la hoja, mayor o menor número de escalones en el marco, adición de mayor numero de sellamiento (sellamientos dobles, triples etc.), combinación de sellamientos, ubicación de sellamientos, uso de materiales en el marco, tipos de anclaje de puerta acústica, variación en la geometría de la puerta acústica, variación de los espesores del material externo, variación de los materiales de construcción externa, la influencia del sellamiento en frecuencias bajas y vibración entre otros.

Se recomienda contemplar las condiciones de repetibilidad y reproducibilidad, así como mediciones interlaboratotio expresadas en la norma ISO 12999-1, con la finalidad de obtener datos con mayor fiabilidad, de esta forma, precisar los valores de aislamiento en los elementos de construcción.

# 8. Referencias

Gomperts, M.C. (1964). *The sound insulation of circular and slit- shaped apertures*, Acoustical, 14, pp.1-16.

Barron, R. F. (2003). *Industrial Noise Control and Acoustics*. *New York.*

Herrera, J. M., & Recuero, M. (2010). Influence of seal installation to predict sound insulation of double panel steel doors. *Building and Environment*, *45*(4), 1087–1094.

Hongisto, V. (1999). Sound Insulation of Doors — Part 1 : Prediction Models for Structural and Leak Transmission. *Journal of Sound and Vibration*, *230*, 133–148.

Hongisto, V., Keränen, J., & Lindgren, M. (1999). Sound Insulation of Doors — Part 2 : Comparison Between Measurement Results. *Journal of Sound and Vibration*, *230*, 149–170.

Kim, M. (2012). In-situ Sound Insulation Performance of Interior Doors with Slit-shaped Apertures. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, *11*(1), 205–212.

Carrion Isbert, A (1998). Diseño acustico de espacios arquitectonicos . edicion UPC. España.

Trevor J.C., Dantonio P. (2004). Acustic absorbers and diffusers, Theory, Desing and application, Londres.

Castillo J., Costa A. (2012). Características físicas de materiales absorbentes sonoros porosos, Universidad Regional Córdoba, Argentina.

Croocker J.M. (2007). Handbook of a noise and vibration control, New Yersey, Estados Unidos. Board.

Balachandran B., & Magrab B. E. (2009). Vibrations. Toronto, Canada, Segunda edicion, Cengage learning.

Hopkins C. (2007). Sound Insulation, Oxford, UK. Primera edición, Elsevier Ltd.

UNE-EN ISO 16283-1. (2014). Medición in situ del aislamiento acústico en los edificios y en los elementos de construcción, parte 1: Aislamiento a Ruido aéreo.

UNE-EN ISO 3382-2. (2008). Medición de parámetros acústicos en recintos, parte 2: Tiempo de reverberación en recintos ordinarios.

UNE-EN ISO 717-1. (2013). Evaluación del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción, parte 1: Aislamiento a ruido aéreo.

UNE-EN ISO 12999-1. (2014). Determinación y aplicación de las incertidumbres de medición en la acústica de edificio.

UNE-EN ISO 10140-1:2011/A1. (2011). Medición en laboratorio del aislamiento acústico de los elementos de construcción, parte 1: Regalas de aplicación para productos específicos, modificación 1: Directrices para la determinación del índice de reducción acústica de juntas rellenas de material de relleno y/o de elementos de sellado.

UNE-EN ISO 10140-2. (2011). Medición en laboratorio del aislamiento acústico de los elementos de construcción, parte 2: medición del aislamiento acústico al ruido aéreo.

UNE-EN ISO 10140-5. (2011). Medición en laboratorio del aislamiento acústico de los elementos de construcción, parte 5: Requisitos para instalaciones y equipos de ensayo.

# 9. Anexos

## A Protocolo de medición para tiempo de reverberación según norma ISO 3382-2

*CONFIGURACIÓN DE SONÓMETRO*
*Ponderación: Lineal, A y C.*
*Buffer: Tercio de Octava-fast*
*Tiempo Delay: 5s.*
*Tiempo de integración: 12s con muestras cada 20 ms.*

1. Condiciones de medición

Se debe tener en cuenta el número de personas que está en el recinto en el momento de realizar la medición, se deberá desarrollar el ejercicio con la mínima cantidad de personas al interior del mismo y el mobiliario encontrado en el sitio no será modificado para ninguna medición.

Ya que los recintos poseen volúmenes superiores a $250\,m^3$, se deberá tener en cuenta la atenuación del aire en alta frecuencia, por lo tanto, es necesario medir la temperatura y la humedad relativa del aire. (Termómetro y medidor de humedad).

2. Equipo

a. Fuente omnidireccional

Deberá cumplir los requisitos de la Norma ISO 3382-1:-, apartado A.3.1. Se debe producir un nivel de presión acústica suficiente para generar curvas de decaimiento sin contaminación por ruido de fondo. Se debe asegurar por lo menos 35dB por encima del ruido de fondo.

b. Micrófonos y equipo de análisis

Se realizara la medición correspondiente con micrófonos de medición omnidireccionales o la implementación de sonómetro. Este deberá estar conectado a un sistema de pre-amplificación y un equipo de análisis que permita calcular las respuestas impulsivas.

c. Pantallas anti-viento (si es necesario).
d. Calibrador para micrófonos.
e. Cables de conexión (XLR, de alimentación, USB, TRS, TR).
f. Computador para adquisición de datos.
g. Sofware Easera y Sofware del sonómetro.

3. Posiciones de micrófonos y fuentes

Ninguna posiciones de micrófono deberá estar a menos de 1 metro de la fuente generadora.
El nivel de presión acústica generado deberá superar al menos 35dB el ruido de fondo medido con anterioridad. Se tomaran dos posiciones de fuente y se realizaran 8 puntos de medición con una distancia aproximada entre posiciones de 1m, con 2 repeticiones por punto según la normativa por posición de fuente según el método de ingeniería y como se muestra en la ilustración 2.

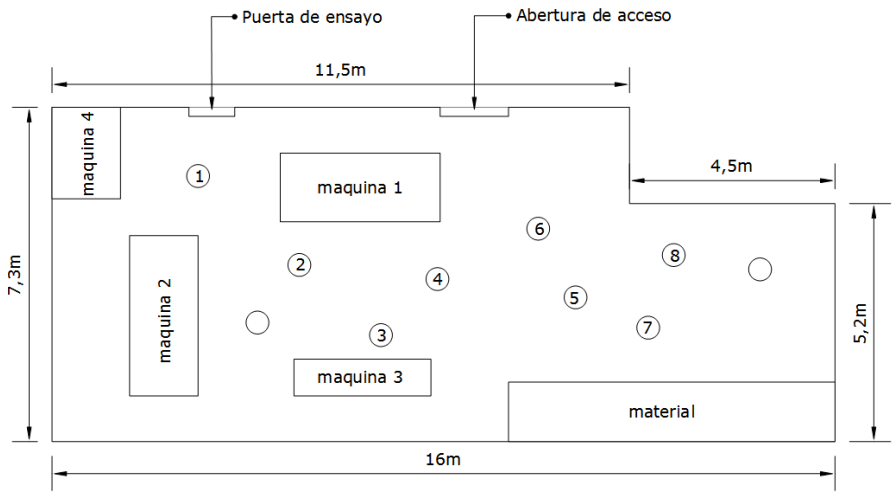



Ilustración 2. Posicionamiento de sonómetro.

# B Protocolo de medición de aislamiento acústico en edificios según norma ISO 16283-1

*CONFIGURACIÓN DE SONÓMETRO*
*Ponderación: Lineal, A y C.*
*Buffer: Tercio de Octava-slow.*
*Tiempo Delay: 5s.*
*Tiempo de integración: 8s con muestras cada 20 ms.*

1. Condiciones de medición

Se debe tener en cuenta el número de personas que está en el recinto en el momento de realizar la medición, se deberá desarrollar el ejercicio con la mínima cantidad de personas al interior del mismo. Ya que los recintos poseen volúmenes superiores a $250\ m^3$, se deberá tener en cuenta la atenuación del aire en alta frecuencia, por lo tanto, es necesario medir la temperatura y la humedad relativa del aire. Debido al volumen de los recintos y a la falta de un laboratorio, la medición se realizara *in situ* en condiciones similares a la medición en laboratorio y se tendrán en cuenta aspectos relevantes según la norma ISO 10140-1 y 10140-2.

2. Equipo

a. Fuente omnidireccional

Deberá cumplir por lo menos 6dB por encima del ruido de fondo en el recinto receptor para cada banda de frecuencia, de lo contrario se aplicara correcciones del apartado 9.2 de la norma.

b. Micrófonos y equipo de análisis

Se realizara la medición correspondiente con micrófonos de medición omnidireccionales o la implementación de sonómetro. Este deberá estar conectado a un sistema de pre-amplificación y un equipo de análisis que permita calcular las respuestas impulsivas.

a. Pantallas anti-viento (si es necesario).
b. Calibrador para micrófonos.
c. Cables de conexión (XLR, de alimentación, USB, TRS, TR).
d. Computador para adquisición de datos.
e. Software del sonómetro.

3. Posiciones de micrófonos y fuentes

Ninguna posiciones de micrófono deberá estar cercana a la posición de la fuente generadora. Se tomaran dos posiciones de fuente y se realizaran 10 puntos de medición con una distancia aproximada entre posiciones de 1m con 2 repeticiones por posición de fuente y como se muestra en la ilustración 3.

Se debe tener en cuenta que se realizaran mediciones en el recinto receptor como en el recinto fuente, cambiando la posición de la fuente 2 veces en el recinto emisor usando el método de micrófonos fijos.

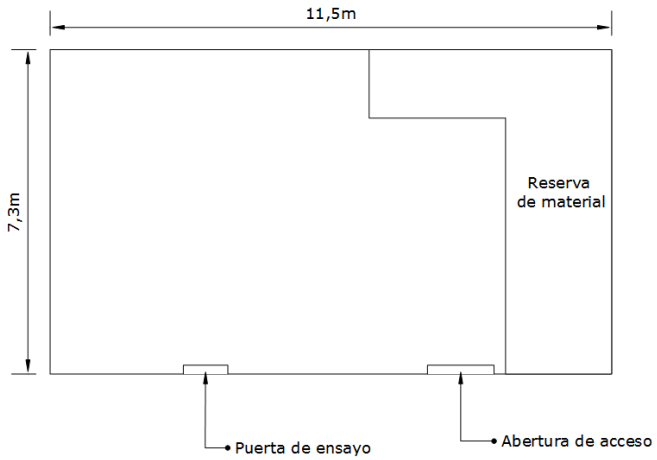



Ilustración 3.Plano de planta del recinto emisor.

4. Correcciones

Se deberán aplicar las respectivas correcciones descritas por la normativa ISO 16283-1 si es necesario, según los datos arrojados después de las mediciones.

# C Tablas de resultados norma ISO 717-1

| Parámetros acústicos Sin Sellamiento | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **DATOS DE ENTRADA** | | **MAGNITUD GLOBAL** | | | **MAGNITUD ESPECTRAL C** | | | **MAGNITUD ESPECTRAL Ctr** | | |
| **Frecuencia (Hz)** | **R' (dB)** | **Valores de referencia ⅓ octava** | **Valores de referencia desplazados ⅓ octava** | **Desviación desfavorable** | **Espectro 1 Li1** | **Li1-Ri** | **10^(Li1-Ri)/10** | **Espectro 2 Li2** | **Li2-Ri** | **10^(Li2-Ri)/10** |
| 50 | | | | | -41 | -41 | 0 | -25 | -25 | 0 |
| 63 | | | | | -37 | -37 | 0 | -23 | -23 | 0 |
| 80 | | | | | -34 | -34 | 0 | -21 | -21 | 0 |
| 100 | 20,5 | 33 | 7,3 | 0 | -30 | -50,51293 | 8,88601E-06 | -20 | -40,512934 | 8,88601E-05 |
| 125 | 19,6 | 36 | 10,3 | 0 | -27 | -46,56347 | 2,20624E-05 | -20 | -39,563472 | 0,000110574 |
| 160 | 22,0 | 39 | 13,3 | 0 | -24 | -46,03501 | 2,49172E-05 | -18 | -40,03501 | 9,91971E-05 |
| 200 | 22,8 | 42 | 16,3 | 0 | -22 | -44,756 | 3,34503E-05 | -16 | -38,755995 | 0,000133168 |
| 250 | 23,9 | 45 | 19,3 | 0 | -20 | -43,93242 | 4,0435E-05 | -15 | -38,932421 | 0,000127867 |
| 315 | 24,6 | 48 | 22,3 | 0 | -18 | -42,60288 | 5,49177E-05 | -14 | -38,602879 | 0,000137947 |
| 400 | 24,2 | 51 | 25,3 | 1,1188844 | -16 | -40,18112 | 9,59154E-05 | -13 | -37,181116 | 0,000191376 |
| 500 | 23,9 | 52 | 26,3 | 2,4269832 | -14 | -37,87302 | 0,000163192 | -12 | -35,873017 | 0,000258642 |
| 630 | 24,1 | 53 | 27,3 | 3,227962 | -13 | -37,07204 | 0,000196244 | -11 | -35,072038 | 0,000311026 |
| 800 | 24,9 | 54 | 28,3 | 3,4185645 | -12 | -36,88144 | 0,000205048 | -9 | -33,881436 | 0,000409125 |
| 1000 | 25,1 | 55 | 29,3 | 4,2311894 | -11 | -36,06881 | 0,00024724 | -8 | -33,068811 | 0,000493309 |
| 1250 | 25,2 | 56 | 30,3 | 5,0581238 | -10 | -35,24188 | 0,000299097 | -9 | -34,241876 | 0,000376541 |
| 1600 | 26,0 | 56 | 30,3 | 4,3311498 | -10 | -35,96885 | 0,000252997 | -10 | -35,96885 | 0,000252997 |
| 2000 | 27,3 | 56 | 30,3 | 2,9788542 | -10 | -37,32115 | 0,000185304 | -11 | -38,321146 | 0,000147192 |
| 2500 | 28,1 | 56 | 30,3 | 2,1973707 | -10 | -38,10263 | 0,000154788 | -13 | -41,102629 | 7,75777E-05 |
| 3150 | 27,4 | 56 | 30,3 | 2,8896706 | -10 | -37,41033 | 0,000181538 | -15 | -42,410329 | 5,74073E-05 |
| 4000 | 28,4 | | | | -10 | -38,37007 | 0,000145543 | -16 | -44,370074 | 3,65589E-05 |
| 5000 | 29,8 | | | | -10 | -39,80791 | 0,000104522 | -18 | -47,807908 | 1,65657E-05 |
| | | | **Suma <32** | 31,878753 | | **suma** | 0,002416098 | | **suma** | 0,003325931 |
| | | | | | | **Xaj=** | 26,16885441 | | **Xaj=** | 24,78086788 |

Tabla C-1 Parámetros acústicos Sin Sellamiento.

| Parámetros acústicos Sellamiento Magnético | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **DATOS DE ENTRADA** | | **MAGNITUD GLOBAL** | | | **MAGNITUD ESPECTRAL C** | | | **MAGNITUD ESPECTRAL Ctr** | | |
| **Frecuencia (Hz)** | **R' (dB)** | **Valores de referencia ⅓ octava** | **Valores de referencia desplazados ⅓ octava** | **Desviación desfavorable** | **Espectro 1 Li1** | **Li1-Ri** | **10^(Li1-Ri)/10** | **Espectro 2 Li2** | **Li2-Ri** | **10^(Li2-Ri)/10** |
| 50 | | | | | -41 | -41 | 0 | -25 | -25 | 0 |
| 63 | | | | | -37 | -37 | 0 | -23 | -23 | 0 |
| 80 | | | | | -34 | -34 | 0 | -21 | -21 | 0 |
| 100 | 20,5 | 33 | 7,1 | 0 | -30 | -50,5343 | 8,84245E-06 | -20 | -40,534272 | 8,84245E-05 |
| 125 | 19,7 | 36 | 10,1 | 0 | -27 | -46,6689 | 2,15331E-05 | -20 | -39,66894 | 0,000107921 |
| 160 | 22,4 | 39 | 13,1 | 0 | -24 | -46,4002 | 2,29075E-05 | -18 | -40,40023 | 9,11963E-05 |
| 200 | 22,3 | 42 | 16,1 | 0 | -22 | -44,2987 | 3,71649E-05 | -16 | -38,298669 | 0,000147956 |
| 250 | 24,4 | 45 | 19,1 | 0 | -20 | -44,3831 | 3,64496E-05 | -15 | -39,38307 | 0,000115264 |
| 315 | 24,7 | 48 | 22,1 | 0 | -18 | -42,7246 | 5,33993E-05 | -14 | -38,724648 | 0,000134133 |
| 400 | 23,5 | 51 | 25,1 | 1,551125 | -16 | -39,5489 | 0,000110946 | -13 | -36,548875 | 0,000221367 |
| 500 | 23,8 | 52 | 26,1 | 2,320429 | -14 | -37,7796 | 0,000166741 | -12 | -35,779571 | 0,000264267 |
| 630 | 24,5 | 53 | 27,1 | 2,626686 | -13 | -37,4733 | 0,000178924 | -11 | -35,473314 | 0,000283575 |
| 800 | 24,8 | 54 | 28,1 | 3,272881 | -12 | -36,8271 | 0,000207629 | -9 | -33,827119 | 0,000414274 |
| 1000 | 24,5 | 55 | 29,1 | 4,560491 | -11 | -35,5395 | 0,000279286 | -8 | -32,539509 | 0,000557249 |
| 1250 | 25,1 | 56 | 30,1 | 4,983303 | -10 | -35,1167 | 0,000307844 | -9 | -34,116697 | 0,000387552 |
| 1600 | 25,9 | 56 | 30,1 | 4,229902 | -10 | -35,8701 | 0,000258815 | -10 | -35,870098 | 0,000258815 |
| 2000 | 27,1 | 56 | 30,1 | 3,016124 | -10 | -37,0839 | 0,00019571 | -11 | -38,083876 | 0,000155458 |
| 2500 | 27,9 | 56 | 30,1 | 2,193549 | -10 | -37,9065 | 0,00016194 | -13 | -40,906451 | 8,11624E-05 |
| 3150 | 27,7 | 56 | 30,1 | 2,445247 | -10 | -37,6548 | 0,000171603 | -15 | -42,654753 | 5,42656E-05 |
| 4000 | 28,5 | | | | -10 | -38,4652 | 0,000142392 | -16 | -44,465156 | 3,57672E-05 |
| 5000 | 30,0 | | | | -10 | -39,9754 | 0,000100568 | -18 | -47,975392 | 1,5939E-05 |
| | | | **Suma <32** | 31,19974 | | **suma** | 0,002462695 | | **suma** | 0,003414587 |
| | | | | | | **Xaj=** | 26,08589349 | | **Xaj=** | 24,66661858 |

Tabla C-2 Parámetros acústicos Sellamiento Magnético.

| Parámetros acústicos Sellamiento Contacto | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **DATOS DE ENTRADA** | | **MAGNITUD GLOBAL** | | | **MAGNITUD ESPECTRAL C** | | | **MAGNITUD ESPECTRAL Ctr** | | |
| **Frecuencia (Hz)** | **R' (dB)** | **Valores de referencia ⅓ octava** | **Valores de referencia desplazados ⅓ octava** | **Desviación desfavorable** | **Espectro 1 Li1** | **Li1-Ri** | **10^(Li1-Ri)/10** | **Espectro 2 Li2** | **Li2-Ri** | **10^(Li2-Ri)/10** |
| 50 | | | | | -41 | -41 | 0 | -25 | -25 | 0 |
| 63 | | | | | -37 | -37 | 0 | -23 | -23 | 0 |
| 80 | | | | | -34 | -34 | 0 | -21 | -21 | 0 |
| 100 | 19,9 | 33 | 8,1 | 0 | -30 | -49,8551 | 1,0339E-05 | -20 | -39,85514 | 0,000103392 |
| 125 | 19,6 | 36 | 11,1 | 0 | -27 | -46,5881 | 2,1938E-05 | -20 | -39,588103 | 0,000109949 |
| 160 | 24,1 | 39 | 14,1 | 0 | -24 | -48,0824 | 1,5551E-05 | -18 | -42,082426 | 6,19095E-05 |
| 200 | 26,3 | 42 | 17,1 | 0 | -22 | -48,3344 | 1,4674E-05 | -16 | -42,334406 | 5,84197E-05 |
| 250 | 27,7 | 45 | 20,1 | 0 | -20 | -47,7283 | 1,6872E-05 | -15 | -42,728251 | 5,3355E-05 |
| 315 | 26,3 | 48 | 23,1 | 0 | -18 | -44,2845 | 3,7286E-05 | -14 | -40,284541 | 9,36582E-05 |
| 400 | 25,2 | 51 | 26,1 | 0,890008 | -16 | -41,21 | 7,5683E-05 | -13 | -38,209992 | 0,000151008 |
| 500 | 24,7 | 52 | 27,1 | 2,407548 | -14 | -38,6925 | 0,00013513 | -12 | -36,692452 | 0,000214168 |
| 630 | 25,2 | 53 | 28,1 | 2,92693 | -13 | -38,1731 | 0,0001523 | -11 | -36,17307 | 0,000241375 |
| 800 | 25,5 | 54 | 29,1 | 3,565129 | -12 | -37,5349 | 0,00017641 | -9 | -34,534871 | 0,000351976 |
| 1000 | 25,6 | 55 | 30,1 | 4,464557 | -11 | -36,6354 | 0,000217 | -8 | -33,635443 | 0,000432968 |
| 1250 | 26,1 | 56 | 31,1 | 4,955657 | -10 | -36,1443 | 0,00024298 | -9 | -35,144343 | 0,00030589 |
| 1600 | 26,6 | 56 | 31,1 | 4,459657 | -10 | -36,6403 | 0,00021675 | -10 | -36,640343 | 0,000216753 |
| 2000 | 27,9 | 56 | 31,1 | 3,247078 | -10 | -37,8529 | 0,00016395 | -11 | -38,852922 | 0,000130229 |
| 2500 | 28,5 | 56 | 31,1 | 2,615721 | -10 | -38,4843 | 0,00014177 | -13 | -41,484279 | 7,10513E-05 |
| 3150 | 29,4 | 56 | 31,1 | 1,680006 | -10 | -39,42 | 0,00011429 | -15 | -44,419994 | 3,6141E-05 |
| 4000 | 30,0 | | | | -10 | -40,0296 | 9,9321E-05 | -16 | -46,029599 | 2,49483E-05 |
| 5000 | 31,3 | | | | -10 | -41,2884 | 7,433E-05 | -18 | -49,288382 | 1,17804E-05 |
| | | | **Suma <32** | 31,21229 | | **suma** | 0,00192656 | | **suma** | 0,002668972 |
| | | | | | | **Xaj=** | 27,152175 | | **Xaj=** | 25,73655979 |

Tabla C-3 Parámetros acústicos Sellamiento de Contacto.

| Parámetros acústicos Sellamiento De Fricción | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **DATOS DE ENTRADA** | | **MAGNITUD GLOBAL** | | | **MAGNITUD ESPECTRAL C** | | | **MAGNITUD ESPECTRAL Ctr** | | |
| **Frecuencia (Hz)** | **R' (dB)** | **Valores de referencia ⅓ octava** | **Valores de referencia desplazados ⅓ octava** | **Desviación desfavorable** | **Espectro 1 Li1** | **Li1-Ri** | **10^(Li1-Ri)/10** | **Espectro 2 Li2** | **Li2-Ri** | **10^(Li2-Ri)/10** |
| 50 | | | | | -41 | -41 | 0 | -25 | -25 | 0 |
| 63 | | | | | -37 | -37 | 0 | -23 | -23 | 0 |
| 80 | | | | | -34 | -34 | 0 | -21 | -21 | 0 |
| 100 | 20,9 | 33 | 7,6 | 0 | -30 | -50,9023 | 8,12394E-06 | -20 | -40,902335 | 8,12394E-05 |
| 125 | 18,9 | 36 | 10,6 | 0 | -27 | -45,9141 | 2,56207E-05 | -20 | -38,914092 | 0,000128408 |
| 160 | 23,6 | 39 | 13,6 | 0 | -24 | -47,6107 | 1,73354E-05 | -18 | -41,610662 | 6,90135E-05 |
| 200 | 25,8 | 42 | 16,6 | 0 | -22 | -47,8053 | 1,65757E-05 | -16 | -41,805291 | 6,59889E-05 |
| 250 | 27,0 | 45 | 19,6 | 0 | -20 | -46,9826 | 2,00326E-05 | -15 | -41,982618 | 6,33488E-05 |
| 315 | 26,4 | 48 | 22,6 | 0 | -18 | -44,4011 | 3,62989E-05 | -14 | -40,401066 | 9,11787E-05 |
| 400 | 24,8 | 51 | 25,6 | 0,779663 | -16 | -40,8203 | 8,27878E-05 | -13 | -37,820337 | 0,000165183 |
| 500 | 24,4 | 52 | 26,6 | 2,233517 | -14 | -38,3665 | 0,000145664 | -12 | -36,366483 | 0,000230862 |
| 630 | 24,7 | 53 | 27,6 | 2,896751 | -13 | -37,7032 | 0,000169697 | -11 | -35,703249 | 0,000268952 |
| 800 | 24,7 | 54 | 28,6 | 3,860825 | -12 | -36,7392 | 0,000211876 | -9 | -33,739175 | 0,000422749 |
| 1000 | 25,7 | 55 | 29,6 | 3,850141 | -11 | -36,7499 | 0,000211356 | -8 | -33,749859 | 0,00042171 |
| 1250 | 25,1 | 56 | 30,6 | 5,544117 | -10 | -35,0559 | 0,000312185 | -9 | -34,055883 | 0,000393017 |
| 1600 | 25,8 | 56 | 30,6 | 4,776096 | -10 | -35,8239 | 0,000261583 | -10 | -35,823904 | 0,000261583 |
| 2000 | 27,8 | 56 | 30,6 | 2,787372 | -10 | -37,8126 | 0,000165477 | -11 | -38,812628 | 0,000131443 |
| 2500 | 28,4 | 56 | 30,6 | 2,175535 | -10 | -38,4245 | 0,000143732 | -13 | -41,424465 | 7,20367E-05 |
| 3150 | 28,4 | 56 | 30,6 | 2,207947 | -10 | -38,3921 | 0,000144809 | -15 | -43,392053 | 4,57925E-05 |
| 4000 | 28,8 | | | | -10 | -38,7637 | 0,000132932 | -16 | -44,763709 | 3,3391E-05 |
| 5000 | 30,3 | | | | -10 | -40,264 | 9,41026E-05 | -18 | -48,263985 | 1,49143E-05 |
| | | | **Suma <32** | 31,11196 | | **suma** | 0,002200188 | | **suma** | 0,002960811 |
| | | | | | | **Xaj=** | 26,57540179 | | **Xaj=** | 25,28589337 |

Tabla C-4 Parámetros acústicos Sellamiento de Fricción.

# D Tablas incertidumbres ISO 12999-1

| Incertidumbre sin sellamiento | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **F (Hz)** | **Ri** | **ui** | **Rw+c100-5000** | | **Rw+ctr,100-5000** | | **Rw** | | |
| 100 | **20,5129343** | 3 | 1,77299E-05 | 4,4536E-06 | 0,0001773 | 4,4536E-05 | 12,4870657 | 35,3758242 | 8,886005284 |
| 125 | **19,5634718** | 2,7 | 4,10821E-05 | 1,1848E-05 | 0,0002059 | 5,9382E-05 | 16,4365282 | 81,9696017 | 23,64029135 |
| 160 | **22,0350101** | 2,4 | 4,33011E-05 | 1,4338E-05 | 0,00017238 | 5,7082E-05 | 16,9649899 | 86,3970647 | 28,60875692 |
| 200 | **22,7559952** | 2,1 | 5,42501E-05 | 2,0625E-05 | 0,00021597 | 8,2111E-05 | 19,2440048 | 136,270072 | 51,80843631 |
| 250 | **23,9324212** | 1,8 | 6,12009E-05 | 2,6715E-05 | 0,00019353 | 8,4481E-05 | 21,0675788 | 193,53427 | 84,48077301 |
| 315 | **24,6028791** | 1,8 | 8,31213E-05 | 3,6284E-05 | 0,00020879 | 9,1141E-05 | 23,3971209 | 330,911677 | 144,448186 |
| 400 | **24,1811156** | 1,8 | 0,000145174 | 6,3371E-05 | 0,00028966 | 0,00012644 | 26,8188844 | 727,592877 | 317,6058103 |
| 500 | **23,8730168** | 1,8 | 0,000247001 | 0,00010782 | 0,00039147 | 0,00017088 | 28,1269832 | 983,327813 | 429,2381585 |
| 630 | **24,072038** | 1,8 | 0,000297027 | 0,00012966 | 0,00047076 | 0,00020549 | 28,927962 | 1182,48653 | 516,1740937 |
| 800 | **24,8814355** | 1,8 | 0,000310353 | 0,00013547 | 0,00061924 | 0,00027031 | 29,1185645 | 1235,53896 | 539,3323195 |
| 1000 | **25,0688106** | 1,8 | 0,000374213 | 0,00016335 | 0,00074665 | 0,00032593 | 29,9311894 | 1489,76902 | 650,3077619 |
| 1250 | **25,2418762** | 1,8 | 0,000452702 | 0,00019761 | 0,00056992 | 0,00024878 | 30,7581238 | 1802,23897 | 786,7058457 |
| 1600 | **25,9688502** | 1,8 | 0,000382926 | 0,00016715 | 0,00038293 | 0,00016715 | 30,0311498 | 1524,45631 | 665,4493146 |
| 2000 | **27,3211458** | 1,8 | 0,000280469 | 0,00012243 | 0,00022278 | 9,7249E-05 | 28,6788542 | 1116,56862 | 487,3998796 |
| 2500 | **28,1026293** | 1,9 | 0,000239738 | 9,9939E-05 | 0,00012015 | 5,0088E-05 | 27,8973707 | 954,414598 | 397,866225 |
| 3150 | **27,4103294** | 2 | 0,000287718 | 0,00011454 | 9,0984E-05 | 3,6222E-05 | 28,5896706 | 1145,42606 | 456,0023263 |
| 4000 | **28,370074** | 2,4 | 0,000252925 | 8,3752E-05 | 6,3532E-05 | 2,1037E-05 | -28,370074 | 0,00252925 | 0,000837515 |
| 5000 | **29,8079084** | 2,8 | 0,000199163 | 5,4854E-05 | 3,1565E-05 | 8,6938E-06 | -29,8079084 | 0,00199163 | 0,000548541 |
| **Suma** | | | 24,23647601 | 28,0848812 | 22,8621377 | 26,6816751 | -25,3185947 | -41,148205 | -37,47252944 |
| **incertidumbre** | | | **1,924202591** | | **1,909768673** | | **1,837837789** | | |

Tabla D-1 Incertidumbre Sin Sellamiento.

| Incertidumbre Sellamiento Magnético | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **F (Hz)** | **Ri** | **ui** | **Rw+c100-5000** | | **Rw+ctr,100-5000** | | **Rw** | | |
| 100 | **20,5342718** | 3 | 1,7643E-05 | 4,43173E-06 | 0,00017643 | 4,4317E-05 | 12,4657282 | 35,2024444 | 8,842454242 |
| 125 | **19,6689396** | 2,7 | 4,00965E-05 | 1,15639E-05 | 0,000200958 | 5,7957E-05 | 16,3310604 | 80,0029575 | 23,07310497 |
| 160 | **22,4002298** | 2,4 | 3,98086E-05 | 1,31819E-05 | 0,000158481 | 5,2478E-05 | 16,5997702 | 79,4286199 | 26,30128798 |
| 200 | **22,2986694** | 2,1 | 6,02744E-05 | 2,29157E-05 | 0,000239957 | 9,1229E-05 | 19,7013306 | 151,402505 | 57,56162708 |
| 250 | **24,3830699** | 1,8 | 5,51687E-05 | 2,4082E-05 | 0,000174459 | 7,6154E-05 | 20,6169301 | 174,458851 | 76,15405033 |
| 315 | **24,724648** | 1,8 | 8,0823E-05 | 3,52805E-05 | 0,000203018 | 8,8621E-05 | 23,275352 | 321,762334 | 140,454353 |
| 400 | **23,5488749** | 1,8 | 0,000167924 | 7,33014E-05 | 0,000335052 | 0,00014626 | 27,4511251 | 841,613149 | 367,377464 |
| 500 | **23,7795713** | 1,8 | 0,000252373 | 0,000110165 | 0,000399984 | 0,0001746 | 28,2204287 | 1004,71496 | 438,5739853 |
| 630 | **24,4733139** | 1,8 | 0,000270812 | 0,000118214 | 0,000429209 | 0,00018736 | 28,5266861 | 1078,12374 | 470,6180798 |
| 800 | **24,8271191** | 1,8 | 0,000314259 | 0,000137179 | 0,00062703 | 0,00027371 | 29,1728809 | 1251,08867 | 546,1200136 |
| 1000 | **24,5395088** | 1,8 | 0,000422716 | 0,000184522 | 0,00084343 | 0,00036817 | 30,4604912 | 1682,86438 | 734,5969449 |
| 1250 | **25,1166968** | 1,8 | 0,00046594 | 0,00020339 | 0,000586584 | 0,00025605 | 30,8833032 | 1854,94192 | 809,7115151 |
| 1600 | **25,8700982** | 1,8 | 0,000391733 | 0,000170998 | 0,000391733 | 0,000171 | 30,1299018 | 1559,51725 | 680,7539704 |
| 2000 | **27,0838765** | 1,8 | 0,000296219 | 0,000129304 | 0,000235295 | 0,00010271 | 28,9161235 | 1179,26756 | 514,7689585 |
| 2500 | **27,9064511** | 1,9 | 0,000250816 | 0,000104557 | 0,000125706 | 5,2403E-05 | 28,0935489 | 998,51569 | 416,2506201 |
| 3150 | **27,654753** | 2 | 0,000271972 | 0,000108274 | 8,60052E-05 | 3,4239E-05 | 28,345247 | 1082,74131 | 431,0470776 |
| 4000 | **28,4651559** | 2,4 | 0,000247448 | 8,19378E-05 | 6,21562E-05 | 2,0582E-05 | -28,4651559 | 0,00247448 | 0,000819378 |
| 5000 | **29,9753915** | 2,8 | 0,000191629 | 5,2779E-05 | 3,03711E-05 | 8,3649E-06 | -29,9753915 | 0,00191629 | 0,00052779 |
| **Suma** | | | 24,15933901 | 27,99675464 | 22,75244327 | 26,5635586 | -25,3243505 | -41,2631492 | -37,59078833 |
| **incertidumbre** | | | **1,918707816** | | **1,90555768** | | **1,83618043** | | |

Tabla D-2 Incertidumbre Sellamiento Magnético.

| Incertidumbre Sellamiento De Contacto | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **F (Hz)** | **Ri** | **ui** | **Rw+c100-5000** | | **Rw+ctr,100-5000** | | **Rw** | | |
| 100 | **19,8551403** | 3 | 2,06294E-05 | 5,18186E-06 | 0,000206294 | 5,1819E-05 | 13,1448597 | 41,1610054 | 10,3391771 |
| 125 | **19,5881027** | 2,7 | 4,08498E-05 | 1,17812E-05 | 0,000204734 | 5,9046E-05 | 16,4118973 | 81,5060274 | 23,50659507 |
| 160 | **24,0824264** | 2,4 | 2,70245E-05 | 8,94865E-06 | 0,000107586 | 3,5625E-05 | 14,9175736 | 53,920928 | 17,85489735 |
| 200 | **26,3344063** | 2,1 | 2,3799E-05 | 9,04814E-06 | 9,47457E-05 | 3,6021E-05 | 15,6655937 | 59,7804767 | 22,72790333 |
| 250 | **27,7282505** | 1,8 | 2,55373E-05 | 1,11474E-05 | 8,0756E-05 | 3,5251E-05 | 17,2717495 | 80,7560272 | 35,25128441 |
| 315 | **26,2845409** | 1,8 | 5,64347E-05 | 2,46346E-05 | 0,000141757 | 6,1879E-05 | 21,7154591 | 224,670425 | 98,07219744 |
| 400 | **25,2099921** | 1,8 | 0,000114552 | 5,00035E-05 | 0,00022856 | 9,977E-05 | 25,7900079 | 574,117505 | 250,6113805 |
| 500 | **24,6924524** | 1,8 | 0,000204529 | 8,92801E-05 | 0,000324157 | 0,0001415 | 27,3075476 | 814,244371 | 355,4305591 |
| 630 | **25,17307** | 1,8 | 0,000230512 | 0,000100622 | 0,000365336 | 0,00015948 | 27,82693 | 917,68367 | 400,5834508 |
| 800 | **25,5348709** | 1,8 | 0,000267001 | 0,00011655 | 0,000532737 | 0,00023255 | 28,4651291 | 1062,95019 | 463,9945855 |
| 1000 | **25,6354427** | 1,8 | 0,00032844 | 0,000143369 | 0,000655323 | 0,00028606 | 29,3645573 | 1307,54226 | 570,762898 |
| 1250 | **26,1443433** | 1,8 | 0,000367761 | 0,000160533 | 0,000462984 | 0,0002021 | 29,8556567 | 1464,08291 | 639,0953695 |
| 1600 | **26,6403433** | 1,8 | 0,000328069 | 0,000143207 | 0,000328069 | 0,00014321 | 29,3596567 | 1306,06764 | 570,1192008 |
| 2000 | **27,8529223** | 1,8 | 0,000248146 | 0,00010832 | 0,00019711 | 8,6041E-05 | 28,1470777 | 987,888136 | 431,2288118 |
| 2500 | **28,4842787** | 1,9 | 0,00021957 | 9,15318E-05 | 0,000110045 | 4,5875E-05 | 27,5157213 | 874,122161 | 364,3947664 |
| 3150 | **29,4199935** | 2 | 0,000181134 | 7,21109E-05 | 5,72797E-05 | 2,2803E-05 | 26,5800065 | 721,108556 | 287,0784869 |
| 4000 | **30,0295987** | 2,4 | 0,0001726 | 5,71531E-05 | 4,33551E-05 | 1,4356E-05 | -30,0295987 | 0,001726 | 0,000571531 |
| 5000 | **31,2883818** | 2,8 | 0,000141632 | 3,90087E-05 | 2,24472E-05 | 6,1825E-06 | -31,2883818 | 0,00141632 | 0,000390087 |
| **Suma** | | | 25,23136515 | 29,05727293 | 23,80564693 | 27,645829 | -25,024564 | -40,2414095 | -36,57156525 |
| **incertidumbre** | | | **1,912953889** | | **1,920091034** | | **1,834922098** | | |

Tabla D-3 Incertidumbre Sellamiento De Contacto

| Incertidumbre Sellamiento de Fricción | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **F (Hz)** | **Ri** | **ui** | **Rw+c50-5000** | | **Rw+ctr,50-5000** | | **Rw** | | |
| 100 | **20,9023354** | 3 | 1,62094E-05 | 4,07161E-06 | 0,000162094 | 4,0716E-05 | 12,0976646 | 32,3419692 | 8,123935353 |
| 125 | **18,9140917** | 2,7 | 4,7708E-05 | 1,37591E-05 | 0,000239106 | 6,8959E-05 | 17,0859083 | 95,1898911 | 27,45306446 |
| 160 | **23,6106618** | 2,4 | 3,01255E-05 | 9,97548E-06 | 0,000119932 | 3,9713E-05 | 15,3893382 | 60,108214 | 19,90370031 |
| 200 | **25,8052911** | 2,1 | 2,68826E-05 | 1,02205E-05 | 0,000107021 | 4,0688E-05 | 16,1947089 | 67,5259796 | 25,6726614 |
| 250 | **26,9826176** | 1,8 | 3,03206E-05 | 1,32354E-05 | 9,58823E-05 | 4,1854E-05 | 18,0173824 | 95,8822551 | 41,85412237 |
| 315 | **26,4010662** | 1,8 | 5,49406E-05 | 2,39824E-05 | 0,000138005 | 6,0241E-05 | 21,5989338 | 218,722461 | 95,4758173 |
| 400 | **24,8203372** | 1,8 | 0,000125304 | 5,46973E-05 | 0,000250015 | 0,00010914 | 26,1796628 | 628,009602 | 274,1361342 |
| 500 | **24,3664831** | 1,8 | 0,000220471 | 9,62391E-05 | 0,000349423 | 0,00015253 | 27,6335169 | 877,711293 | 383,1348755 |
| 630 | **24,7032494** | 1,8 | 0,000256847 | 0,000112118 | 0,000407076 | 0,00017769 | 28,2967506 | 1022,52765 | 446,3495097 |
| 800 | **24,7391748** | 1,8 | 0,000320688 | 0,000139985 | 0,000639856 | 0,00027931 | 29,2608252 | 1276,68136 | 557,291625 |
| 1000 | **25,7498586** | 1,8 | 0,0003199 | 0,000139641 | 0,000638284 | 0,00027862 | 29,2501414 | 1273,54455 | 555,9223596 |
| 1250 | **25,0558827** | 1,8 | 0,000472511 | 0,000206258 | 0,000594856 | 0,00025966 | 30,9441173 | 1881,09934 | 821,1296455 |
| 1600 | **25,823904** | 1,8 | 0,000395922 | 0,000172826 | 0,000395922 | 0,00017283 | 30,176096 | 1576,19375 | 688,0335259 |
| 2000 | **27,8126283** | 1,8 | 0,000250459 | 0,000109329 | 0,000198947 | 8,6843E-05 | 28,1873717 | 997,096442 | 435,2483831 |
| 2500 | **28,4244648** | 1,9 | 0,000222615 | 9,28012E-05 | 0,000111572 | 4,6511E-05 | 27,5755352 | 886,244438 | 369,4481724 |
| 3150 | **28,3920533** | 2 | 0,000229506 | 9,13681E-05 | 7,25763E-05 | 2,8893E-05 | 27,6079467 | 913,681151 | 363,7430178 |
| 4000 | **28,7637089** | 2,4 | 0,000231009 | 7,64943E-05 | 5,80269E-05 | 1,9215E-05 | -28,7637089 | 0,00231009 | 0,000764943 |
| 5000 | **30,2639851** | 2,8 | 0,000179309 | 4,93857E-05 | 2,84185E-05 | 7,8271E-06 | -30,2639851 | 0,00179309 | 0,000493857 |
| **Suma** | | | 24,6461371 | 28,48817418 | 23,36580618 | 27,18685 | -25,1384089 | -40,7564054 | -37,08669151 |
| **incertidumbre** | | | **1,92101854** | | **1,910521924** | | **1,834856954** | | |

Tabla D- 4 Incertidumbre Sellamiento De Fricción

# E Planos ingenieriles de la puerta acústica

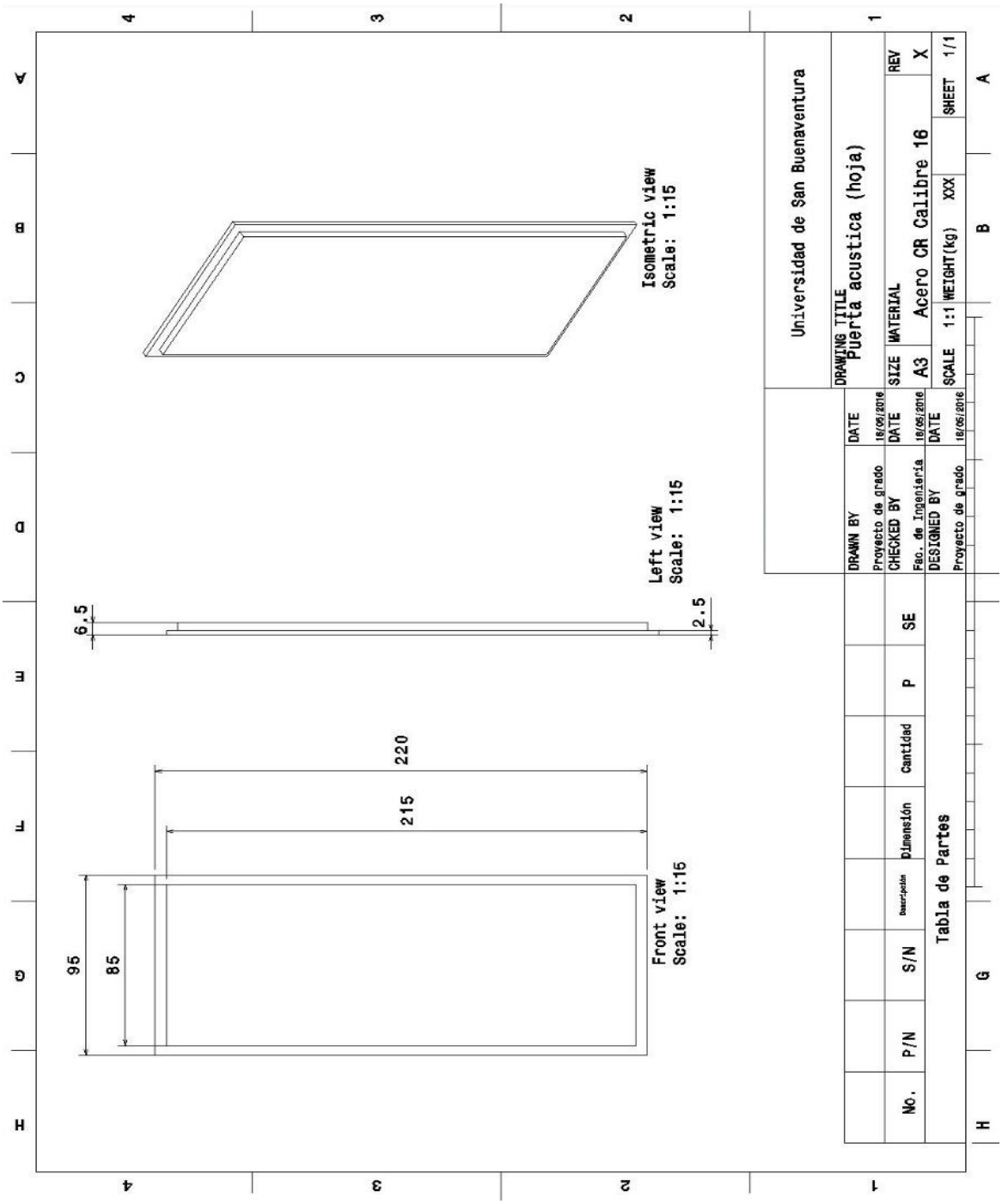



Imagen E- 1 Plano ingenieril-Hoja

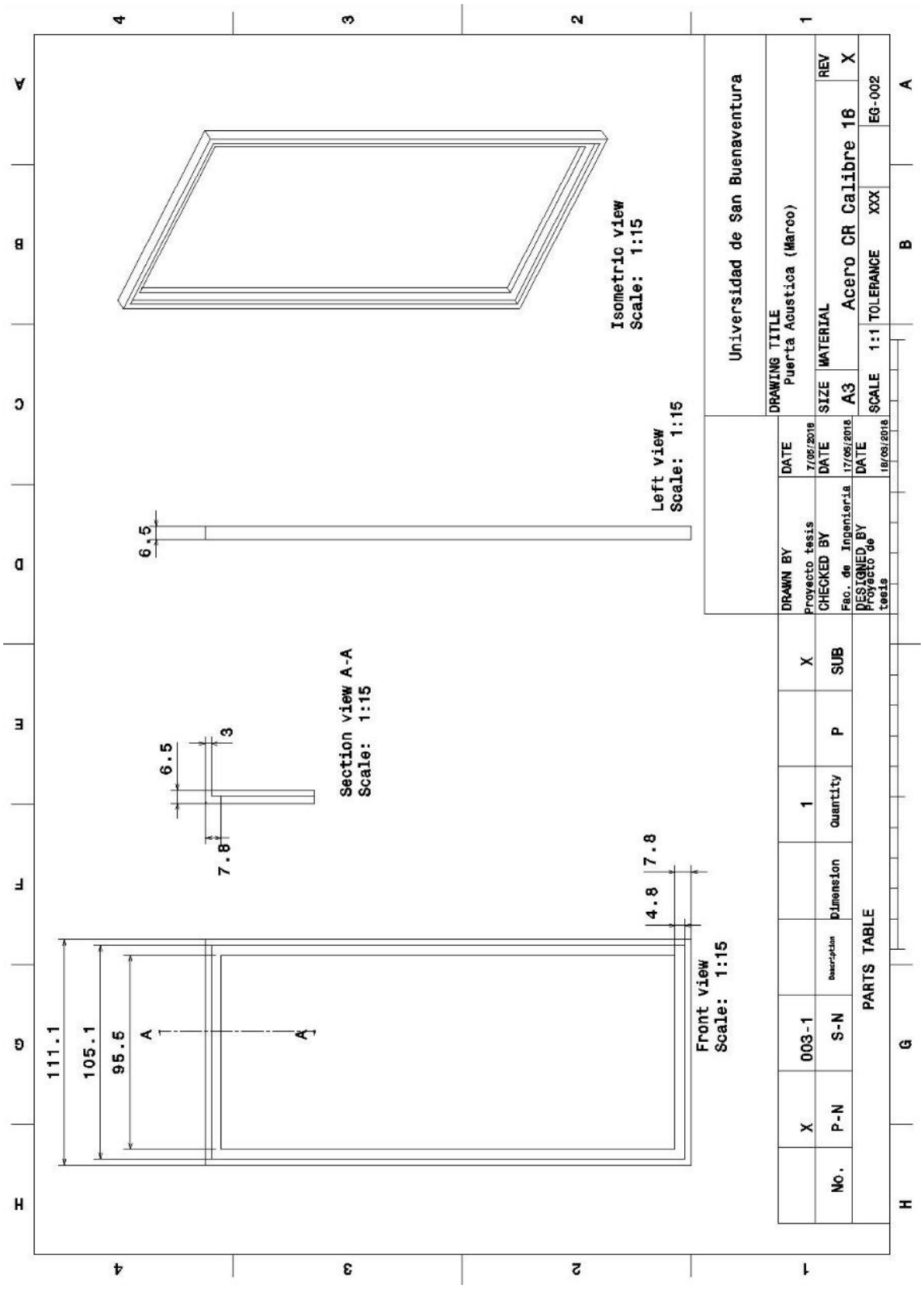



Imagen E - 2 Plano ingenieril-marco

# F Informes de Medición

**Índice de reducción acústica aparente de acuerdo con la norma ISO 16283-1**
**Mediciones de campo del aislamiento acústico a ruido aéreo entre recintos**

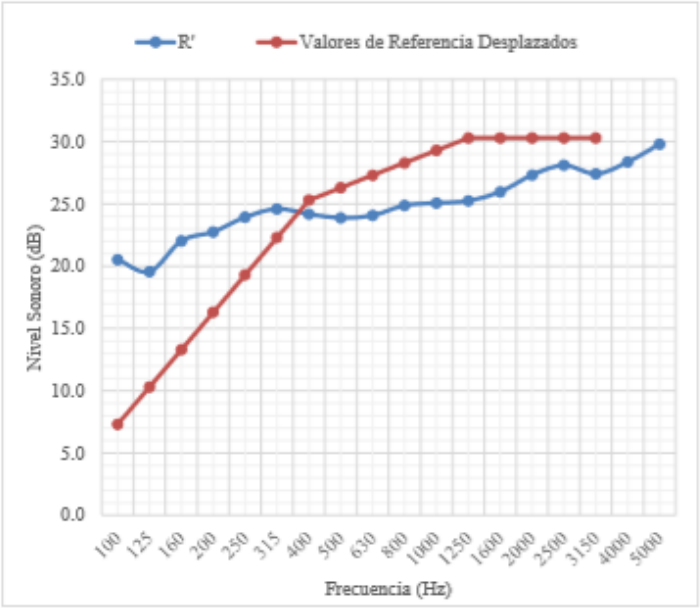
| Institución: | Universidad San Buenaventura | fecha del ensayo: | 27 de octubre de 2018 |
|---|---|---|---|

El estudio fue realizado en la empresa Construroal SAS.

Al momento de realizar las mediciones de para el hallazgo de la reducción acústica aparente y tiempo de reverberación no sé realizaron modificaciones de tipo acústico al interior de los recintos, fue necesaria la presencia de operario en el recinto emisor y receptor, y no fue modificada la superficie total del mismo.

Área de separación común: $74{,}5\ m^2$
Volumen del recinto fuente: $671.6\ m^3$
Volumen del recinto receptor: $584\ m^3$

| frecuencia (f) Hz | R' (un tercio de octava)dB |
|---|---|
| 100 | 20.5 |
| 125 | 19.6 |
| 160 | 22.0 |
| 200 | 22.8 |
| 250 | 23.9 |
| 315 | 24.6 |
| 400 | 24.2 |
| 500 | 23.9 |
| 630 | 24.1 |
| 800 | 24.9 |
| 1000 | 25.1 |
| 1250 | 25.2 |
| 1600 | 26.0 |
| 2000 | 27.3 |
| 2500 | 28.1 |
| 3150 | 27.4 |
| 4000 | 28.4 |
| 5000 | 29.8 |




Clasificación de acuerdo con la Norma ISO 717-1:

Rw (C;Ctr)=26,3 ±1.83(0 ; -1)dB

$C_{100\text{-}5000}$=26dB
$C_{tr,100\text{-}5000}$=25dB

Evaluación basada en la medición de campo utilizando los resultados obtenidos por un método de peritaje:

N° de informe de ensayo: 1 Objeto de ensayo: Sin sellamiento

Imagen F - 1 Informe de medición partición sin sellamiento

**Índice de reducción acústica aparente de acuerdo con la norma ISO 16283-1**
**Mediciones de campo del aislamiento acústico a ruido aéreo entre recintos**

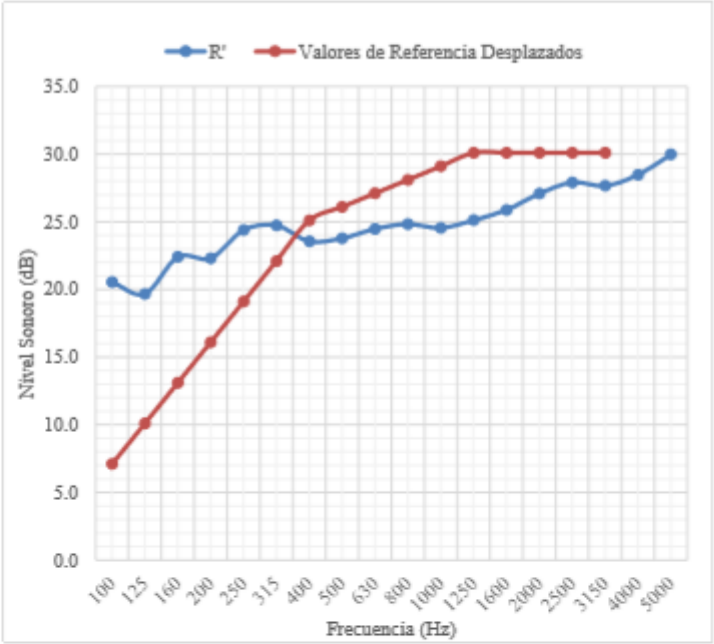
| | | | |
|---|---|---|---|
| **Institución:** | Universidad San Buenaventura | **fecha del ensayo:** | 27 de octubre de 2018 |

El estudio fue realizado en la empresa Construroal SAS.

Al momento de realizar las mediciones de para el hallazgo de la reducción acústica aparente y tiempo de reverberación no sé realizaron modificaciones de tipo acústico al interior de los recintos, fue necesaria la presencia de operario en el recinto emisor y receptor, y no fue modificada la superficie total del mismo.

Área de separación común: $74{,}5\ m^2$
Volumen del recinto fuente: $671.6\ m^3$
Volumen del recinto receptor: $584\ m^3$

| frecuencia (f) Hz | R' (un tercio de octava)dB |
|---|---|
| 100 | 20.5 |
| 125 | 19.7 |
| 160 | 22.4 |
| 200 | 22.3 |
| 250 | 24.4 |
| 315 | 24.7 |
| 400 | 23.5 |
| 500 | 23.8 |
| 630 | 24.5 |
| 800 | 24.8 |
| 1000 | 24.5 |
| 1250 | 25.1 |
| 1600 | 25.9 |
| 2000 | 27.1 |
| 2500 | 27.9 |
| 3150 | 27.7 |
| 4000 | 28.5 |
| 5000 | 30 |




Clasificación de acuerdo con la Norma ISO 717-1:

Rw (C;Ctr)=25,1 ±1.83(0 ; -1,4)dB

$C_{100\text{-}5000}$=26dB
$C_{tr,100\text{-}5000}$=25dB

Evaluación basada en la medición de campo utilizando los resultados obtenidos por un método de peritaje:

N° de informe de ensayo: 2 Objeto de ensayo: Sellamiento Magnético

Imagen F - 2 Informe de medición partición con Sellamiento Magnético.

**Índice de reducción acústica aparente de acuerdo con la norma ISO 16283-1**
**Mediciones de campo del aislamiento acústico a ruido aéreo entre recintos**

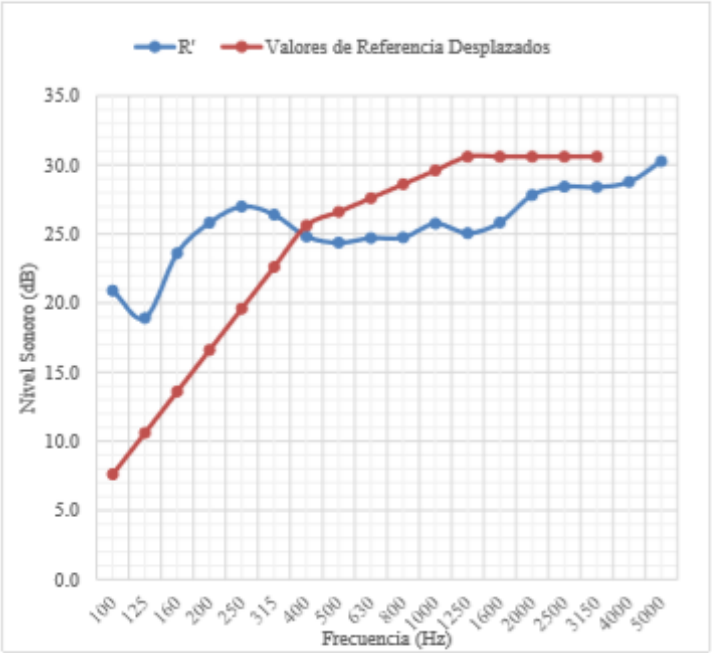
| Institución: | Universidad San Buenaventura | fecha del ensayo: | 27 de octubre de 2018 |
|---|---|---|---|

El estudio fue realizado en la empresa Construroal SAS.

Al momento de realizar las mediciones de para el hallazgo de la reducción acústica aparente y tiempo de reverberación no sé realizaron modificaciones de tipo acústico al interior de los recintos, fue necesaria la presencia de operario en el recinto emisor y receptor, y no fue modificada la superficie total del mismo.

Área de separación común: $74{,}5\ m^2$
Volumen del recinto fuente: $671.6\ m^3$
Volumen del recinto receptor: $584\ m^3$

| frecuencia (f) Hz | R' (un tercio de octava)dB |
|---|---|
| 100 | 20.9 |
| 125 | 18.9 |
| 160 | 23.6 |
| 200 | 25.8 |
| 250 | 27.0 |
| 315 | 26.4 |
| 400 | 24.8 |
| 500 | 24.4 |
| 630 | 24.7 |
| 800 | 24.7 |
| 1000 | 25.7 |
| 1250 | 25.1 |
| 1600 | 25.8 |
| 2000 | 27.8 |
| 2500 | 28.4 |
| 3150 | 28.4 |
| 4000 | 28.8 |
| 5000 | 30.3 |




Clasificación de acuerdo con la Norma ISO 717-1:

Rw (C;Ctr)=26,6 ±1.83(0 ; -1,3)dB

$C_{100\text{-}5000}$=26dB
$C_{tr,100\text{-}5000}$=25dB

Evaluación basada en la medición de campo utilizando los resultados obtenidos por un método de peritaje:

N° de informe de ensayo: 3 Objeto de ensayo: Sellamiento de Fricción

Imagen F - 3 Informe de medición partición con Sellamiento de Fricción.

**Índice de reducción acústica aparente de acuerdo con la norma ISO 16283-1**
**Mediciones de campo del aislamiento acústico a ruido aéreo entre recintos**

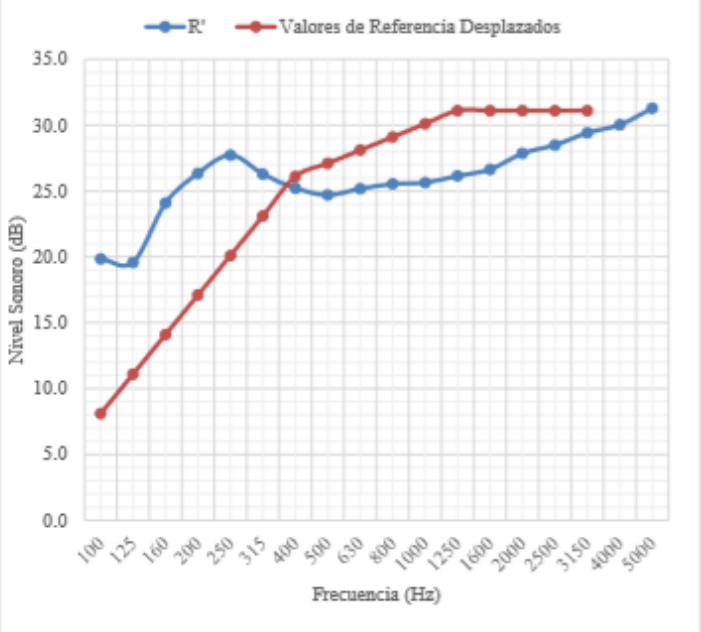
| Institución: | Universidad San Buenaventura | fecha del ensayo: | 27 de octubre de 2018 |
|---|---|---|---|

El estudio fue realizado en la empresa Construroal SAS.

Al momento de realizar las mediciones de para el hallazgo de la reducción acústica aparente y tiempo de reverberación no sé realizaron modificaciones de tipo acústico al interior de los recintos, fue necesaria la presencia de operario en el recinto emisor y receptor, y no fue modificada la superficie total del mismo.

Área de separación común: $74{,}5\ m^2$
Volumen del recinto fuente: $671.6\ m^3$
Volumen del recinto receptor: $584\ m^3$

| frecuencia (f) Hz | R' (un tercio de octava)dB |
|---|---|
| 100 | 19.9 |
| 125 | 19.6 |
| 160 | 24.1 |
| 200 | 26.3 |
| 250 | 27.7 |
| 315 | 26.3 |
| 400 | 25.2 |
| 500 | 24.7 |
| 630 | 25.2 |
| 800 | 25.5 |
| 1000 | 25.6 |
| 1250 | 26.1 |
| 1600 | 26.6 |
| 2000 | 27.9 |
| 2500 | 28.5 |
| 3150 | 29.4 |
| 4000 | 30 |
| 5000 | 31.3 |




Clasificación de acuerdo con la Norma ISO 717-1:

Rw (C;Ctr)=27,1 ±1.83(0.1 ; -1,4)dB

$C_{100\text{-}5000}$=27dB
$C_{tr,100\text{-}5000}$=25dB

Evaluación basada en la medición de campo utilizando los resultados obtenidos por un método de peritaje:

N° de informe de ensayo: 4 Objeto de ensayo: Sellamiento de Contacto

Imagen F - 4 Informe de medición partición con Sellamiento de Contacto.

# G Autorización software INSUL.

SFSerrano S.A.S. – Control Acûstico

| Nuestra experiencia, su garantía | Doc. ID: Cot.17025 21 11 2018 | Validez: 90 días calendario |

Bogotá D.C., 21 de Noviembre de 2018

Señores
**Universidad de San Buenaventura**
Cra. 8 H # 172 - 20
Ciudad

Por medio de la presente les comunico que los estudiantes del programa de ingeniería de sonido, Deiver Sthip Rodríguez Ardila & Harold Camino Arias, nos solicitaron e hicieron uso de nuestra licencia del software INSUL para el desarrollo de su proyecto de grado "Análisis del comportamiento de diferentes tipos de sellamiento al paso de ruido a través de una puerta acústica". Quedo atento a cualquier inquietud al respecto.

Cordial saludo,

Ing. Franklin Serrano Poveda
frank@control-acustico.com
SFSerrano S.A.S. – Control Acústico

SFSerrano S.A.S. - Control Acústico.
http://www.control-acustico.com/

Contáctenos en Toda Colombia
Cra 8 #174-30 C.22 Bogotá D.C. - Colombia
Tels. 57+ 319 363 9779 (Col) / 1+973 856 7808 (USA)
frank@control-acustico.com

Imagen G- 1 Autorización Software Insul