

# Tabla de Contenido

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación . . . . .	1
1.2. Objetivos . . . . .	2
1.2.1. Objetivo General . . . . .	2
1.2.2. Objetivos Específicos . . . . .	2
1.3. Alcances . . . . .	2
<b>2. Antecedentes</b>	<b>3</b>
2.1. Conceptos de Acústica . . . . .	3
2.1.1. Propagación del Sonido en Paneles . . . . .	3
2.2. Sistemas de un Grado de Libertad . . . . .	4
2.2.1. Ecuación de Movimiento . . . . .	5
2.2.2. Función de Transferencia . . . . .	5
2.2.3. Frecuencia Natural y Factor de Amortiguamiento . . . . .	6
2.2.4. Residuos . . . . .	7
2.2.5. Respuesta en Frecuencia (FRF) y Respuesta a un Impulso . . . . .	7
2.3. Sistemas con Múltiples Grados de Libertad . . . . .	8
2.3.1. Ecuaciones de Movimiento . . . . .	8
2.3.2. Frecuencias Naturales . . . . .	9
2.3.3. Modos Normales y Residuos . . . . .	10
2.3.4. Función de Respuesta en Frecuencia (FRF) y Función de Respuesta a un Impulso (IRF) . . . . .	11
2.3.5. Resonancias y Antiresonancias . . . . .	11
2.4. Paneles tipo Sándwich . . . . .	12
2.4.1. Aplicaciones . . . . .	13
2.4.2. Estado del Arte . . . . .	15
2.4.3. Modelos Analíticos . . . . .	16
2.4.4. Modelos Computacionales . . . . .	17
2.5. Panel en Estudio . . . . .	20
2.6. Señales y su Procesamiento . . . . .	23
2.6.1. Excitación de Impacto . . . . .	23
2.6.2. Excitación Aleatoria . . . . .	24
2.6.3. Excitación Aleatoria en Trenes (Burst Random) . . . . .	24
2.6.4. Respuesta en Frecuencia (FRF) y Coherencia en Procesamiento de Señales . . . . .	25
2.7. Métodos de Correlación . . . . .	27

2.7.1.	Diferencia en las Frecuencias de Resonancia . . . . .	27
2.7.2.	Modal Assurance Criterion (MAC) . . . . .	27
2.7.3.	Frequency Response Assurance Criterion (FRAC) . . . . .	28
<b>3.</b>	<b>Metodología</b>	<b>29</b>
3.1.	Revisión Bibliográfica . . . . .	29
3.2.	Modelo Numérico . . . . .	29
3.3.	Mediciones Experimentales . . . . .	30
3.3.1.	Medición de Respuesta a un Impacto . . . . .	30
3.3.2.	Mediciones bajo Cargas Aleatorias en Trenes y Condiciones de Empotramiento . . . . .	31
3.3.3.	Procesamiento de la Respuesta frente a Excitaciones . . . . .	31
3.3.4.	Consideraciones . . . . .	32
3.4.	Ajuste del Modelo Numérico . . . . .	32
3.5.	Aplicación del modelo . . . . .	33
<b>4.</b>	<b>Resultados y Discusión</b>	<b>35</b>
4.1.	Modelo de Elementos Finitos . . . . .	35
4.1.1.	Geometría . . . . .	35
4.1.2.	Materiales . . . . .	37
4.1.3.	Condiciones de Borde . . . . .	37
4.1.4.	Mallado . . . . .	38
4.1.5.	Análisis de Convergencia . . . . .	39
4.1.6.	Detalles de la Implementación . . . . .	39
4.2.	Montajes Experimentales . . . . .	39
4.2.1.	Panel tipo Sándwich . . . . .	40
4.2.2.	Montaje Experimental para la Respuesta a un Impacto . . . . .	41
4.2.3.	Montaje Experimental para Carga Aleatoria en Trenes y Empotramiento . . . . .	43
4.3.	Resultados de la Medición de la Respuesta a un Impacto . . . . .	44
4.4.	Ajuste del Modelo Numérico . . . . .	51
4.4.1.	Modos Normales Numéricos . . . . .	52
4.5.	Correlación entre Mediciones y Modelo Numérico . . . . .	53
4.6.	Resultados de la Medición con Empotramiento y Carga Aleatoria en Trenes . . . . .	54
4.7.	Aplicación del Modelo de Elementos Finitos . . . . .	61
<b>5.</b>	<b>Conclusiones y Recomendaciones</b>	<b>63</b>
5.1.	Conclusiones . . . . .	63
5.2.	Recomendaciones . . . . .	64
	<b>Bibliografía</b>	<b>65</b>

# Índice de Figuras

2.1. Transmisión del sonido en un panel tipo sándwich . . . . .	3
2.2. Reducción del sonido en función de la frecuencia . . . . .	4
2.3. Sistema de un grado de libertad . . . . .	5
2.4. Excitación en 1, medición en 1 . . . . .	11
2.5. Excitación en 1, medición en 2 o viceversa . . . . .	12
2.6. Excitación en 2, medición en 2 . . . . .	12
2.7. Panel tipo sándwich . . . . .	12
2.8. Ubicación del panel en estudio . . . . .	13
2.9. Panel revestido con núcleo de panel de abeja . . . . .	14
2.10. Comparación entre los niveles de sonido medidos . . . . .	14
2.11. Placa tipo sándwich hecha con una combinación de distintos materiales y topología variable . . . . .	15
2.12. Respuesta de la placa . . . . .	16
2.13. Esquema de un núcleo de panel de abeja reticular . . . . .	16
2.14. Esquema del retículo en tres dimensiones . . . . .	17
2.15. Esquema del modelo equivalente . . . . .	17
2.16. Esquema de panel tipo sándwich con núcleo interior de espuma de aluminio .	18
2.17. Mallado del modelo de elementos finitos . . . . .	18
2.18. Comparación entre el modelo y las mediciones . . . . .	19
2.19. Comparación entre geometrías del núcleo . . . . .	20
2.20. Geometría del retículo . . . . .	21
2.21. Reticulado en forma de "V" invertida . . . . .	21
2.22. Distribución espacial del reticulado dentro de la placa . . . . .	22
2.23. Respuesta en frecuencia de modelos de elementos finitos . . . . .	22
2.24. Señal de impacto . . . . .	23
2.25. Señal aleatoria . . . . .	24
2.26. Señal aleatoria en trenes . . . . .	25
2.27. Matriz de valores $MAC$ . . . . .	28
3.1. Implementación del modelo de elementos finitos . . . . .	30
3.2. Esquema del montaje experimental para respuesta a un impacto . . . . .	31
3.3. Esquema del montaje para condiciones de empotramiento y cargas cíclicas .	31
3.4. Metodología de validación del modelo de elementos finitos . . . . .	33
3.5. Implementación del modelo ajustado . . . . .	33
3.6. Esquema de la metodología . . . . .	34

4.1. Dimensiones de las placas . . . . .	35
4.2. Dimensiones del elemento unitario del reticulado . . . . .	36
4.3. Modelo CAD del panel tipo sándwich . . . . .	36
4.4. Capa de pegamento epóxico . . . . .	37
4.5. Elementos finitos . . . . .	38
4.6. Mallado de las placas . . . . .	38
4.7. Unión de la placa y el retículo . . . . .	38
4.8. Unión de la placa y el retículo . . . . .	40
4.9. Retículos unidos a la placa inferior . . . . .	40
4.10. Panel tipo sándwich construido . . . . .	41
4.11. Montaje experimental de la primera medición . . . . .	42
4.12. División del panel . . . . .	42
4.13. Montaje experimental de la segunda medición . . . . .	43
4.14. Montaje experimental de la segunda medición . . . . .	43
4.15. Respuesta temporal la placa al excitar el punto 1 . . . . .	44
4.16. Respuesta temporal la placa al excitar el punto 2 . . . . .	45
4.17. Respuesta temporal la placa al excitar el punto 3 . . . . .	45
4.18. Respuesta en frecuencia de la placa al excitar el punto 1 . . . . .	46
4.19. Respuesta en frecuencia de la placa al excitar el punto 2 . . . . .	46
4.20. Respuesta en frecuencia de la placa al excitar el punto 3 . . . . .	47
4.21. Coherencia de la medición en el punto 1 . . . . .	47
4.22. Coherencia de la medición en el punto 2 . . . . .	48
4.23. Coherencia de la medición en el punto 3 . . . . .	48
4.24. Modo normal 1, 269 Hz . . . . .	49
4.25. Modo normal 2, 297 Hz . . . . .	49
4.26. Modo normal 3, 531 Hz . . . . .	50
4.27. Modo normal 1, 275 Hz . . . . .	52
4.28. Modo normal 2, 298 Hz . . . . .	53
4.29. Modo normal 3, 507 Hz . . . . .	53
4.30. Respuesta temporal la placa al excitar el punto 21'. . . . .	55
4.31. Respuesta temporal la placa al excitar el punto 27'. . . . .	55
4.32. Respuesta temporal la placa al excitar el punto 31'. . . . .	56
4.33. Respuesta en frecuencia de la placa al excitar el punto 21'. . . . .	56
4.34. Respuesta en frecuencia de la placa al excitar el punto 27'. . . . .	57
4.35. Respuesta en frecuencia de la placa al excitar el punto 31'. . . . .	57
4.36. Coherencia de la medición en el punto 21'. . . . .	58
4.37. Coherencia de la medición en el punto 27'. . . . .	58
4.38. Coherencia de la medición en el punto 31'. . . . .	59
4.39. Modo normal 1, 155 Hz . . . . .	60
4.40. Modo normal 2, 242 Hz . . . . .	60
4.41. Modo normal 3, 345 Hz . . . . .	60

# Índice de Tablas

4.1. Propiedades mecánicas del aluminio usadas en el modelo numérico . . . . .	37
4.2. Propiedades mecánicas del pegamento Permabond ET538B . . . . .	37
4.3. Frecuencias naturales obtenidas del análisis de convergencia. . . . .	39
4.4. Propiedades del panel construido. . . . .	41
4.5. Frecuencias naturales obtenidas de las mediciones. . . . .	49
4.6. Criterio <i>MAC</i> aplicado en los modos normales medidos experimentalmente. .	50
4.7. Frecuencias naturales obtenidas al ajustar el modelo numérico. . . . .	51
4.8. Comparación entre frecuencias naturales medidas y calculadas. . . . .	52
4.9. Frecuencias naturales obtenidas del modelo numérico. . . . .	52
4.10. Criterio <i>MAC</i> aplicado entre los modos normales medidos y calculados. . . .	54
4.11. Frecuencias naturales obtenidas de las mediciones. . . . .	59
4.12. Criterio <i>MAC</i> aplicado en los modos normales medidos experimentalmente. .	61
4.13. Comparación entre frecuencias naturales medidas y calculadas en condiciones de empotramiento. . . . .	61
4.14. Criterio <i>MAC</i> aplicado entre los modos normales medidos y calculados. . . .	62