



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería Mecánica

Diseño y caracterización experimental de un amortiguador magnético tubular

Autor:

Vicente Sánchez, Miguel Ángel

Tutor(es):

Lorenzana Ibán, Antolín

Magdaleno González, Álvaro

**Departamento de Construcciones
Arquitectónicas, Ingeniería del Terreno y
Mecánica de los Medios Continuos y Teoría
de Estructuras**

Valladolid, Diciembre 2021.

Resumen

El objetivo de este trabajo es estudiar el efecto magnético como fuente de disipación de energía para obtener una alternativa a la amortiguación viscosa, obviando los problemas que ésta presenta. Para tal fin, se desarrollan dos metodologías de trabajo que permiten experimentar con distintas variables y medir, para cada una de las configuraciones estudiadas, el coeficiente de amortiguación magnética. Posteriormente será posible determinar cuál es la configuración óptima que permita con, los elementos estudiados, una mayor amortiguación.

Palabras clave

Amortiguación viscosa, amortiguación magnética, corrientes de Foucault, coeficiente de amortiguación, metodología experimental.

Abstract

The objective of this work is to study the magnetic effect as a source of energy dissipation to obtain an alternative to viscous damping, avoiding the problems it presents. For this purpose, two work methodologies are developed that allow experimenting with different variables and measuring, for each of the studied configurations, the magnetic damping coefficient. Later it will be possible to determine which is the optimal configuration that allows, with the elements studied, a greater damping.

Keywords

Viscous damping, magnetic damping, Eddy currents, damping coefficient, experimental methodology

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, expresar mi agradecimiento al tutor de este TFG, Antolín Lorenzana, por su apoyo y orientación en todo momento, por su estrecha colaboración, y su implicación más allá de lo profesional. Gracias por hacer posible este proyecto.

Agradecer también a mi madre su incansable esfuerzo, su dedicación, su confianza en mi persona y su apoyo, no sólo durante esta etapa académica, sino en cada momento vital. Has sido mi ejemplo, mi fuente de fuerza y motivación.

Este logro es tuyo, mamá.

Contenido

Resumen.....	2
Palabras clave	2
Abstract.....	2
Keywords	2
AGRADECIMIENTOS	3
Índice de Tablas	8
Índice de Figuras.....	13
Índice de Ecuaciones	16
CAPÍTULO 1.....	18
INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	18
1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	19
1.1. Justificación del trabajo.	19
1.2. Objetivos.....	20
1.3. Estructura del documento.....	20
CAPÍTULO 2	22
2. MARCO TEÓRICO-FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	23
2.1. Sistemas mecánicos discretos de un grado de libertad.....	23
2.2. Vibraciones libres.	25
2.2.1. Vibraciones libres no amortiguadas.....	26
2.2.2. Vibraciones libres amortiguadas.....	28
2.3. Amortiguamiento viscoso.	29
2.4. Amortiguación magnética.	34
2.4.1. Corrientes de Foucault.....	34

2.4.2. Explicación de las Corrientes de Foucault.....	35
2.4.3. Modelado matemático de la amortiguación magnética por Corrientes de Foucault.....	36
2.4.4. Caracterizado experimental del coeficiente de amortiguación magnético.	39
CAPITULO 3	44
3. METODOLOGÍA Y ESCENARIOS DE ESTUDIO.	45
3.1. Metodología de trabajo.	45
3.1.1. Toma de datos manual mediante cronómetro.....	46
3.1.2. Toma de datos mediante la célula de carga.	49
3.2. Casos de estudio.	54
3.2.1. Tipos de imanes.	54
3.2.2. Número y disposición de los imanes.	55
3.2.3. Separación entre los imanes.....	56
3.2.4. Masa añadida a los imanes.	57
3.2.5. Holgura entre el tubo y el imán.....	57
3.2.6. Espesor del elemento conductor.	58
3.3. Resumen y consideraciones previas.....	58
CAPITULO 4	60
4. RESULTADOS.....	61
4.1. Resultados con la toma de datos manual	61
4.1.1. Tubo de cobre de \varnothing_{INT} 13 mm y espesor de un mm.....	61
4.1.2. Tubo de cobre de \varnothing_{INT} 16 mm y espesor de un mm.....	63
4.1.3. Tubo de cobre de \varnothing_{INT} 23 mm y espesor de un mm.....	68
4.1.4. Tubo de cobre de \varnothing_{INT} 13 mm y espesor de dos mm.....	71

4.1.5. Tubo de cobre de $\emptyset INT$ 16 mm y espesor de dos mm.....	72
4.2. Resultados obtenidos mediante el uso de la célula de carga.....	75
4.2.1. Tubo de cobre de $\emptyset INT$ 13 mm y espesor de un mm.....	75
4.2.2. Tubo de cobre de $\emptyset INT$ 16 mm y espesor de un mm.....	78
4.2.3. Tubo de cobre de $\emptyset INT$ 23 mm y espesor de un mm.....	83
4.2.4. Tubo de cobre de $\emptyset INT$ 13 mm y espesor de dos mm.....	87
4.2.5. Tubo de cobre de $\emptyset INT$ 16 mm y espesor de dos mm.....	89
4.2.6. Tubo de cobre de $\emptyset INT$ 13 mm y espesor de tres mm.	94
4.3. Análisis de resultados.	95
4.3.1. Tubo de cobre de $\emptyset INT$ 13 mm y espesor de un mm.....	96
4.3.2. Tubo de cobre de $\emptyset INT$ 16 mm y espesor de un mm.....	99
4.3.3. Tubo de cobre de $\emptyset INT$ 23 mm y espesor de un mm.....	105
4.3.4. Tubo de cobre de $\emptyset INT$ 13 mm y espesor de dos mm...	107
4.3.5. Tubo de cobre de $\emptyset INT$ 16 mm y espesor de dos mm...	108
4.3.6. Tubo de cobre de $\emptyset INT$ 13 mm y espesor de tres mm. .	111
4.4. Caracterización de los imanes.....	112
4.4.1. Imán $\emptyset 12$ mm.....	112
4.4.1. Imán $\emptyset 15$ mm.....	114
4.5. Ejemplo de aplicación.	116
CAPITULO 5	119
5. CONCLUSIONES-LINEAS FUTURAS.	120
5.1. Conclusiones.....	120
5.2. Consideraciones adicionales.	121
5.3. Líneas futuras.	122

BIBLIOGRAFIA	123
ANEXOS.....	126
A. CALIBRACIÓN DE LA CÉLULA DE CARGA.....	127
B. PROPIEDADES DE LOS IMANES.	128
C. PLANO FABRICACIÓN SOPORTE	130

Índice de Tablas

Tabla 1. Datos y resultados imán \emptyset 12 mm, sin separación, tubo de $\emptyset INT$ 13 mm y $e= 1mm$	62
Tabla 2. Datos y resultados imán \emptyset 12 mm, 4.5 mm de separación, tubo de $\emptyset INT$ 13 mm y $e= 1mm$	63
Tabla 3. Datos y resultados imán \emptyset 12 mm, 9 mm de separación, tubo de $\emptyset INT$ 13 mm y $e= 1mm$	63
Tabla 4 Datos y resultados imán \emptyset 12 mm, sin separación, tubo de $\emptyset INT$ 16 mm y $e= 1mm$	64
Tabla 5. Datos y resultados imán \emptyset 12 mm, 4.5 mm de separación, tubo de $\emptyset INT$ 16 mm y $e= 1mm$	65
Tabla 6. Datos y resultados imán \emptyset 12 mm, 9 mm de separación, tubo de $\emptyset INT$ 16 mm y $e= 1mm$	65
Tabla 7. Datos y resultados imán \emptyset 15 mm, sin separación, tubo de $\emptyset INT$ 16 mm y $e= 1mm$	66
Tabla 8. Datos y resultados imán \emptyset 15 mm, 4.5 mm de separación, tubo de $\emptyset INT$ 16 mm y $e= 1mm$	66
Tabla 9. Datos y resultados imán \emptyset 15 mm, 9 mm de separación, tubo de $\emptyset INT$ 16 mm y $e= 1mm$	66
Tabla 10. Datos y resultados imán \emptyset 15 mm, sin separación, masa añadida, tubo de $\emptyset INT$ 16 mm y $e= 1mm$	67
Tabla 11. Datos y resultados imán \emptyset 15 mm, 4.5 mm de separación, masa añadida, tubo de $\emptyset INT$ 16 mm y $e= 1mm$	67
Tabla 12. Datos y resultados imán \emptyset 15 mm, 9 mm de separación, masa añadida, tubo de $\emptyset INT$ 16 mm y $e= 1mm$	68
Tabla 13. Datos y resultados imán \emptyset 12 mm, sin separación, tubo de $\emptyset INT$ 23 mm y $e= 1mm$	68
Tabla 14. Datos y resultados imán \emptyset 12 mm, 4.5 mm de separación, tubo de $\emptyset INT$ 23 mm y $e= 1mm$	68
Tabla 15. Datos y resultados imán \emptyset 12 mm, 9 mm de separación, tubo de $\emptyset INT$ 23 mm y $e= 1mm$	69

Tabla 16. Datos y resultados imán \emptyset 15 mm, sin separación, tubo de $\emptyset INT$ 23 mm y $e= 1mm$	69
Tabla 17. Datos y resultados imán \emptyset 15 mm, 4.5 mm de separación, tubo de $\emptyset INT$ 23 mm y $e= 1mm$	69
Tabla 18. Datos y resultados imán \emptyset 15 mm, 9 mm de separación, tubo de $\emptyset INT$ 23 mm y $e= 1mm$	70
Tabla 19. Datos y resultados imán \emptyset 15 mm, sin separación, masa añadida y tubo de $\emptyset INT$ 23 mm y $e= 1mm$	70
Tabla 20. Datos y resultados imán \emptyset 15 mm, 4.5 mm cd separación, masa añadida y tubo de $\emptyset INT$ 23 mm y $e= 1mm$	71
Tabla 21. Datos y resultados imán \emptyset 15 mm, 9 mm cd separación, masa añadida y tubo de $\emptyset INT$ 23 mm y $e= 1mm$	71
Tabla 22. Datos y resultados imán \emptyset 12 mm, sin separación, tubo de $\emptyset INT$ 13 mm y $e= 2mm$	72
Tabla 23. Datos y resultados imán \emptyset 12 mm, 4.5 mm cd separación, tubo de $\emptyset INT$ 13 mm y $e= 2mm$	72
Tabla 24. Datos y resultados imán \emptyset 12 mm, 4.5 mm cd separación, tubo de $\emptyset INT$ 13 mm y $e= 2mm$	72
Tabla 25. Datos y resultados imán \emptyset 12 mm, sin separación, tubo de $\emptyset INT$ 16 mm y $e= 2mm$	73
Tabla 26. Datos y resultados imán \emptyset 12 mm, 4.5 mm de separación, tubo de $\emptyset INT$ 16 mm y $e= 2mm$	73
Tabla 27. Datos y resultados imán \emptyset 12 mm, 9mm de separación, tubo de $\emptyset INT$ 16 mm y $e= 2mm$	73
Tabla 28. Datos y resultados imán \emptyset 15 mm, sin separación, masa añadida y tubo de $\emptyset INT$ 16 mm y $e= 2 mm$	74
Tabla 29. Datos y resultados imán \emptyset 15 mm, sin separación, masa añadida y tubo de $\emptyset INT$ 16 mm y $e= 2 mm$	74
Tabla 30. Datos y resultados imán \emptyset 15 mm, sin separación, masa añadida y tubo de $\emptyset INT$ 16 mm y $e= 2 mm$	75
Tabla 31. Datos y resultados imán \emptyset 12 mm, sin separación, tubo de $\emptyset INT$ 13 mm y $e= 1mm$	76

Tabla 32. Datos y resultados imán \emptyset 12 mm, 4.5 mm de separación, tubo de $\emptyset INT$ 13 mm y $e= 1$ mm.	77
Tabla 33. Datos y resultados imán \emptyset 12 mm, 9 mm de separación, tubo de $\emptyset INT$ 13 mm y $e= 1$ mm.	78
Tabla 34. Datos y resultados imán \emptyset 12 mm, sin separación, tubo de $\emptyset INT$ 16 mm y $e= 1$ mm.	78
Tabla 35. Datos y resultados imán \emptyset 12 mm, 4.5 mm de separación, tubo de $\emptyset INT$ 16 mm y $e= 1$ mm.	79
Tabla 36. Datos y resultados imán \emptyset 12 mm, 9 mm de separación, tubo de $\emptyset INT$ 16 mm y $e= 1$ mm.	79
Tabla 37. Datos y resultados imán \emptyset 15 mm, sin separación, tubo de $\emptyset INT$ 16 mm y $e= 1$ mm.	80
Tabla 38. Datos y resultados imán \emptyset 15 mm, 4.5 mm de separación, tubo de $\emptyset INT$ 16 mm y $e= 1$ mm.	81
Tabla 39. Datos y resultados imán \emptyset 15 mm, 9 mm de separación, tubo de $\emptyset INT$ 16 mm y $e= 1$ mm.	81
Tabla 40. Datos y resultados imán \emptyset 15 mm, sin separación, con masa añadida, tubo de $\emptyset INT$ 16 mm y $e= 1$ mm.	82
Tabla 41. Datos y resultados imán \emptyset 15 mm, 4.5 mm de separación, con masa añadida, tubo de $\emptyset INT$ 16 mm y $e= 1$ mm.	82
Tabla 42. Datos y resultados imán \emptyset 15 mm, 9 mm de separación, con masa añadida, tubo de $\emptyset INT$ 16 mm y $e= 1$ mm.	83
Tabla 43. Datos y resultados imán \emptyset 12 mm, sin separación, tubo de $\emptyset INT$ 23 mm y $e= 1$ mm.	83
Tabla 44. Datos y resultados imán \emptyset 12 mm, 4.5 mm de separación, tubo de $\emptyset INT$ 23 mm y $e= 1$ mm.	84
Tabla 45. Datos y resultados imán \emptyset 12 mm, 9 mm de separación, tubo de $\emptyset INT$ 23 mm y $e= 1$ mm.	84
Tabla 46. Datos y resultados imán \emptyset 15 mm, sin separación, tubo de $\emptyset INT$ 23 mm y $e= 1$ mm.	85
Tabla 47. Datos y resultados imán \emptyset 15 mm, 4.5 mm de separación, tubo de $\emptyset INT$ 23 mm y $e= 1$ mm.	85

Tabla 48. Datos y resultados imán \emptyset 15 mm, 9 mm de separación, tubo de $\emptyset INT$ 23 mm y $e= 1mm$	86
Tabla 49. Datos y resultados imán \emptyset 15 mm, sin separación, con masa añadida, tubo de $\emptyset INT$ 23 mm y $e= 1mm$	86
Tabla 50. Datos y resultados imán \emptyset 15 mm, 4.5 mm de separación, con masa añadida, tubo de $\emptyset INT$ 23 mm y $e= 1mm$	87
Tabla 51. Datos y resultados imán \emptyset 15 mm, 9 mm de separación, con masa añadida, tubo de $\emptyset INT$ 23 mm y $e= 1mm$	87
Tabla 52. Datos y resultados imán \emptyset 12 mm, 9 mm de separación, tubo de $\emptyset INT$ 13 mm y $e= 2mm$	88
Tabla 53. Datos y resultados imán \emptyset 12 mm, 9 mm de separación, tubo de $\emptyset INT$ 13 mm y $e= 2mm$	89
Tabla 54. Datos y resultados imán \emptyset 12 mm, 9 mm de separación, tubo de $\emptyset INT$ 13 mm y $e= 2mm$	89
Tabla 55. Datos y resultados imán \emptyset 12 mm, sin separación, tubo de $\emptyset INT$ 16 mm y $e= 2mm$	90
Tabla 56. Datos y resultados imán \emptyset 12 mm, 4.5 mm de separación, tubo de $\emptyset INT$ 16 mm y $e= 2mm$	90
Tabla 57. Datos y resultados imán \emptyset 12 mm, 9 mm de separación, tubo de $\emptyset INT$ 16 mm y $e= 2mm$	91
Tabla 58. Datos y resultados imán \emptyset 15 mm, sin separación, tubo de $\emptyset INT$ 16 mm y $e= 2mm$	91
Tabla 59. Datos y resultados imán \emptyset 15 mm, 4.5 mm de separación, tubo de $\emptyset INT$ 16 mm y $e= 2mm$	92
Tabla 60. Datos y resultados imán \emptyset 15 mm, 9 mm de separación, tubo de $\emptyset INT$ 16 mm y $e= 2mm$	92
Tabla 61. Datos y resultados imán \emptyset 15 mm, sin separación, masa añadida, tubo de $\emptyset INT$ 16 mm y $e= 2mm$	93
Tabla 62. Datos y resultados imán \emptyset 15 mm, 4.5 mm de separación, masa añadida, tubo de $\emptyset INT$ 16 mm y $e= 2mm$	93
Tabla 63. Datos y resultados imán \emptyset 15 mm, 9 mm de separación, masa añadida, tubo de $\emptyset INT$ 16 mm y $e= 2mm$	94

Tabla 64. Datos y resultados imán \varnothing 12 mm, sin separación, tubo de \varnothing INT 13 mm y e= 3mm.	94
Tabla 65. Datos y resultados imán \varnothing 12 mm, sin separación, tubo de \varnothing INT 13 mm y e= 3mm	95
Tabla 66. Datos y resultados imán \varnothing 12 mm, sin separación, tubo de \varnothing INT 13 mm y e= 3mm	95
Tabla 67. Comparativa de resultados	96
Tabla 68. Presupuesto de materiales	122
Tabla 69. Propiedades imán \varnothing 12 mm.[13]	129
Tabla 70. Propiedades imán \varnothing 15 mm.[14]	130

Índice de Figuras

Figura 1. Sistema mecánico de 1 grado de libertad (modelo m-k-c)[1].....	24
Figura 2. Esquema de un sistema libre no amortiguado.[2]	26
Figura 3. Esquema de un sistema libre amortiguado [2].....	28
Figura 4. Representación del movimiento sobreamortiguado.[2].....	31
Figura 5. Representación del movimiento subamoritguado.[2]	33
Figura 6. Representación del movimiento críticamente amortiguado.[1]	34
Figura 7. Explicación de las corrientes de Foucault.[4].....	35
Figura 8. Ejemplo para el modelado de la amortiguación magnética.[7].....	37
Figura 9. Representación modelo experimental[9]	39
Figura 10. Modelo experimental simplificado.....	42
Figura 11. Varillas de madera empleadas.	45
Figura 12. Obús experimental	46
Figura 13. Dispositivo experimental para la medida manual.....	47
Figura 14. Cronómetro empleado.....	47
Figura 15. Esquema teórico del proceso de medida manual.....	48
Figura 16. Célula de carga	49
Figura 17. Equipo SIRIUS HD-STG	50
Figura 18. Modelado del soporte a emplear mediante CATIA V5R2019.....	51
Figura 19. Montaje de la tubería y la célula de carga en el soporte.	51
Figura 20. Impresora 3D empleada y modelo obtenido	52
Figura 21. Dispositivo experimental para la medida con célula de carga.....	52
Figura 22. Esquema teórico del proceso de medida con célula de carga.....	53
Figura 23. Esquema de lo monitorizado por SIRIUS-DEWESOFT	53

Figura 24. Primer imán empleado [13]	55
Figura 25. Segundo imán empleado. [14]	55
Figura 26. Disposición de los imanes.....	56
Figura 27. Imanes separados a repulsión.....	57
Figura 28. Tubo de cobre.	58
Figura 29. Tubos concéntricos para aumentar el espesor.	58
Figura 30. Registro de datos a través de DEWESOFT.	76
Figura 31. C_{eq} para imanes sin separación.	97
Figura 32. C_{eq} para imanes con 4.5 mm de separación.....	97
Figura 33. C_{eq} para imanes con 9 mm de separación.	98
Figura 34. Comparación C_{eq} para imán $\varnothing 12\text{mm}$ en tubo $\varnothing_{int} = 13\text{ mm}$	99
Figura 35. Comparación C_{eq} para imán $\varnothing 12\text{mm}$ en tubo $\varnothing_{int} = 16\text{ mm}$...	100
Figura 36. C_{eq} para imán $\varnothing 15\text{mm}$ en tubo $\varnothing_{int} = 16\text{ mm}$	101
Figura 37. C_{eq} para imán $\varnothing 15\text{mm}$ en tubo $\varnothing_{int} = 16\text{ mm}$	101
Figura 38. C_{eq} para imán $\varnothing 15\text{mm}$ en tubo $\varnothing_{int} = 16\text{ mm}$	102
Figura 39. Comparación de C_{eq} para imán $\varnothing 15\text{mm}$ en tubo $\varnothing_{int} = 16\text{ mm}$	102
Figura 40. Comparación de C_{eq} sin separación con masa añadida para imán $\varnothing 15\text{mm}$ en tubo $\varnothing_{int} = 16\text{ mm}$	103
Figura 41. Comparación de C_{eq} 4.5 mm de separación con masa añadida para imán $\varnothing 15\text{mm}$ en tubo $\varnothing_{int} = 16\text{ mm}$	104
Figura 42 Comparación de C_{eq} separación de 9 mm con masa añadida para imán $\varnothing 15\text{mm}$ en tubo $\varnothing_{int} = 16\text{ mm}$	104
Figura 43. Comparación de C_{eq} para imán $\varnothing 12\text{mm}$ en tubo $\varnothing_{int} = 23\text{ mm}$	105
Figura 44. Comparación de C_{eq} para imán $\varnothing 15\text{mm}$ en tubo $\varnothing_{int} = 23\text{ mm}$	106

Figura 45 Comparación de C_{eq} separación de 9 mm con masa añadida para imán $\varnothing 15\text{mm}$ en tubo $\varnothing_{int} = 23$ mm.....	107
Figura 46 Comparación de C_{eq} para imán $\varnothing 12\text{mm}$ en tubo $\varnothing_{int} = 13$ mm y $e=2$ mm	108
Figura 47 Comparación de C_{eq} para imán $\varnothing 12\text{mm}$ en tubo $\varnothing_{int} = 16$ mm y $e=2$ mm	109
Figura 48. Comparación de C_{eq} para imán $\varnothing 15\text{mm}$ en tubo $\varnothing_{int} = 16$ mm y $e=2$ mm	110
Figura 49. Comparación de C_{eq} separación de 9 mm con masa añadida para imán $\varnothing 15\text{mm}$ en tubo $\varnothing_{int} = 23$ mm y $e=2$ mm.....	111
Figura 50. Comparación de C_{eq} para imán $\varnothing 12$ mm en tubo $\varnothing_{int} = 13$ mm y $e=3$ mm	112
Figura 51. Comparación de C_{eq} para imán $\varnothing 12$ mm para distintos espesores, sin separación y holgura mínima.	113
Figura 52. Comparación de C_{eq} para imán $\varnothing 12$ mm para distintos espesores, 4.5mm de separación y holgura mínima.....	113
Figura 53. Comparación de C_{eq} para imán $\varnothing 12$ mm para distintos espesores, 9 mm de separación y holgura mínima.	114
Figura 54. Comparación de C_{eq} para imán $\varnothing 15$ mm para distintos espesores, sin separación y holgura mínima.	115
Figura 55. Comparación de C_{eq} para imán $\varnothing 15$ mm para distintos espesores, 4.5 mm separación y holgura mínima.....	115
Figura 56. Comparación de C_{eq} para imán $\varnothing 15$ mm para distintos espesores, 9 mm separación y holgura mínima.	116
Figura 57. Modelado experimental en ANSYS MAXWELL	122
Figura 58. Configuración canal de medida DEWESOFT	127
Figura 59. Setup canal de medida DEWESOFT.....	128

Índice de Ecuaciones

Ecuación 1. Fuerza elástica del resorte	24
Ecuación 2. Fuerza de amortiguamiento viscoso	24
Ecuación 3. Segunda Ley de Newton.	25
Ecuación 4. Ecuación Diferencial General del Movimiento.	25
Ecuación 5. Ecuación Diferencial General del Movimiento para sistemas sometidos a vibraciones libres.....	25
Ecuación 6. Relación posición de equilibrio.....	26
Ecuación 7. Ecuación diferencial del movimiento en sistemas libres no amortiguados.	27
Ecuación 8.....	27
Ecuación 9. Frecuencia natural del sistema.	27
Ecuación 10. Solución de la Ecuación Diferencial del Movimiento para sistemas libres no amortiguados	27
Ecuación 11. Ecuación movimiento sistema libre amortiguado	28
Ecuación 12. Solución sistema vibratorio libre amortiguado.	30
Ecuación 13. Amortiguamiento crítico.....	30
Ecuación 14. Factor de amortiguamiento del sistema.	30
Ecuación 15. Solución del sistema libre amortiguado en función del factor de amortiguamiento.....	30
Ecuación 16. Solución sistema libre sobreamortiguado.....	31
Ecuación 17. Fórmula de Euler para números complejos	32
Ecuación 18. Solución sistema libre subamortiguado.....	32
Ecuación 19. Frecuencia angular amortiguada.....	32
Ecuación 20. Amplitud del movimiento subamortiguado.	32
Ecuación 21. Ángulo de fase del movimiento subamortiguado	33

Ecuación 22. Solución del sistema libre críticamente amortiguado.....	33
Ecuación 23. Expresión para las corrientes de Foucault.....	37
Ecuación 24. Desarrollo de la expresión de las corrientes de Foucault.....	37
Ecuación 25. Desarrollo fuerzas repulsivas.....	38
Ecuación 26. Coeficiente amortiguamiento magnético.....	39
Ecuación 27. Expresión de la velocidad terminal.....	41
Ecuación 28. Velocidad terminal en flujo turbulento.....	41
Ecuación 29. Fuerzas de amortiguamiento viscosas debidas al efecto electromagnético y a la resistencia aerodinámica.....	41
Ecuación 30. Segunda ley de Newton al modelo experimental simplificado..	42
Ecuación 31. Expresión para el cálculo de la constante de amortiguación	43
Ecuación 32. Velocidad del imán en el modelo experimental.....	43
Ecuación 33. Cálculo experimental del coeficiente de amortiguación magnético medido manualmente.....	48
Ecuación 34. Cálculo experimental del coeficiente de amortiguación magnético medido con SIRIUS.....	54

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1. Justificación del trabajo.

La estabilidad y resistencia de una estructura, así como su funcionalidad, son los objetivos primeros en cuanto al cálculo y diseño de estructuras se refiere.

Sin embargo, es habitual encontrar puentes, pasarelas, edificios esbeltos y demás construcciones que, aun cumpliendo con estos objetivos, presenten vibraciones.

Las vibraciones mecánicas pueden tener su origen en fuerzas cuyas magnitudes, sentidos o puntos de aplicación varíen en función del tiempo. Aun siendo indeseables, las vibraciones pueden no ser perjudiciales, sin producir grandes consecuencias en el comportamiento de la estructura.

No obstante, en la mayor parte de los casos son perjudiciales. En primer lugar, afectan a la fiabilidad de las estructuras. Las vibraciones son variaciones de posición en una estructura y, por tanto, originan variaciones en los estados tensionales, pudiendo generar plastificaciones locales del material, así como fenómenos de fatiga y fallo en las estructuras. En segundo lugar, producen molestias en los usuarios de las estructuras mencionadas, disminuyendo el confort o empeorando las condiciones de uso de éstas.

Es necesario, por todo lo anterior, reducir el impacto de la fuerza de vibración. Para ello se proporciona amortiguación. Ésta hace referencia a las propiedades de disipación de energía de un material o de un sistema bajo tensión cíclica, es decir, la capacidad de reducir la vibración transmitida a un cuerpo.

Las estrategias de amortiguación mediante amortiguadores de masa sintonizada (TMD) son ampliamente aceptadas por la comunidad de ingenieros como un medio para mitigar los efectos de las cargas dinámicas en las estructuras. En ellos es habitual que los componentes de amortiguación sean proporcionados por amortiguadores viscosos, debido a las ventajas que estos presentan.

Sin embargo, estos tipos de amortiguadores también presentan una serie de inconvenientes, tales como la posibilidad de que el líquido viscoso se filtre con el paso del tiempo, el cambio de la viscosidad con la temperatura, pudiendo llegar incluso a congelarse, así como la dificultad de mantenimiento y de cambiar la relación de amortiguación una vez que estos amortiguadores se encuentran ya equipados en un TMD.

Es por ello por lo que surge la necesidad de encontrar una estrategia de amortiguación sin contacto. Es aquí donde se sitúa la amortiguación magnética, que presenta un comportamiento semejante al viscoso, sin los inconvenientes mencionados anteriormente.

1.2. Objetivos.

El objeto de este proyecto es, por tanto, el estudio de la amortiguación magnética como alternativa a la amortiguación viscosa. Dada la complejidad, así como extensión del tema a tratar, se han fijado una serie de objetivos a cumplir, de tal modo que ayuden a comprender y a realizar el estudio de una forma concreta y ordenada, los cuales se recogen a continuación:

- Explorar el efecto magnético como fuente de disipación de energía.
- Experimentar, de acuerdo con los materiales disponibles, distintas configuraciones que permitan estudiar la amortiguación para cada una de ellas.
- Diseñar una metodología experimental que permita caracterizar el coeficiente de amortiguamiento magnético en distintas configuraciones, con el objetivo de sustituir un amortiguador viscoso por otro magnético, ambos de tipo pistón.
- Estudiar el comportamiento de la amortiguación magnética según distintas variables, tales como el tipo de imán, el número de éstos, su disposición, etc.
- Caracterizar y determinar, para los elementos estudiados, el coeficiente de amortiguación en su configuración más adecuada.

1.3. Estructura del documento.

El presente trabajo se ha organizado de una forma progresiva, constando en total de seis capítulos.

En el [Capítulo 1] se establecen los objetivos a cumplir, así como la justificación y motivación a la hora de realizar el presente trabajo.

A continuación, en el [Capítulo 2] se introduce el marco teórico que sustenta la posterior experimentación, dónde se explican los fundamentos tanto de los sistemas vibratorios como de la amortiguación magnética.

Tratando de seguir un orden que permita una mejor comprensión del trabajo, en el [Capítulo 3] se exponen las distintas metodologías experimentales empleadas en el desarrollo del trabajo, así como los casos de estudio y sus distintas variables que se han tenido en cuenta y con las que se ha experimentado.

Una vez expuesto lo anterior, en el [Capítulo 4] se recogen los resultados de ambas metodologías, así como las gráficas que muestran la influencia de las distintas variables en los coeficientes de amortiguamiento magnéticos.

Por último, en el [Capítulo 5], se recogen las conclusiones y líneas futuras de trabajo, así como la bibliografía empleada en el desarrollo del presente proyecto.

Para completar el trabajo, se adjuntan en los anexos las propiedades en detalle de los imanes empleados, el plano de fabricación del elemento modelado, así como las instrucciones a seguir en Dewesoft a la hora de calibrar la célula de carga con la que se van a realizar las experimentaciones.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO – FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2. MARCO TEÓRICO-FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Para poder entender de forma correcta el presente trabajo, tanto el desarrollo experimental como las consideraciones tomadas en el mismo, es necesario situar en un contexto teórico los principios y fenómenos físicos que intervienen y que caracterizan el sistema mecánico objeto del estudio.

Los sistemas mecánicos pueden ser clasificados según el número de grados de libertad que posean, como sistemas continuos, en los que se encuentran infinitos grados de libertad, o sistemas discretos con un número finito de ellos.

Normalmente, tanto máquinas como estructuras, al estar compuestas por elementos elásticos, presentan un número infinito de grados de libertad [1]. Sin embargo, el tratar de estudiar y describir el sistema, así como su comportamiento vibratorio, como un sistema continuo, conlleva el empleo de un conjunto de ecuaciones, que resultan complejas tanto en su comprensión como en su resolución.

Por tanto, es práctica habitual en la Teoría de Vibraciones [2] estudiar el sistema como uno discreto, puesto que presentan una serie de conveniencias respecto al estudio como un sistema continuo, tales como:

- Sencillez respecto a sistemas continuos, resultando estos últimos más complejos tanto en comprensión, como en modelado y resolución.
- Similitud en gran parte de las características y propiedades presentes en ambos sistemas.
- Capacidad de aproximar un sistema mecánico con un número infinito de grados de libertad (continuo), como el conjunto de un número infinito de sistemas con un solo grado de libertad (discreto). Este método de estudio recibe el nombre de Análisis Modal.

De esta forma, en el presente trabajo, se abordará el planteamiento del sistema objeto de estudio como un sistema discreto de un grado de libertad.

2.1. Sistemas mecánicos discretos de un grado de libertad.

Como se ha mencionado con anterioridad, se trata del modelo más sencillo que se puede crear a la hora de aproximar pequeñas oscilaciones, dada la linealidad y por tanto la sencillez operacional de las ecuaciones que rigen el movimiento.

A continuación, en la Figura 1, se muestra de forma esquematizada un sistema mecánico de 1 grado de libertad (modelo masa-muelle-amortiguador) con los parámetros que caracterizan su comportamiento.

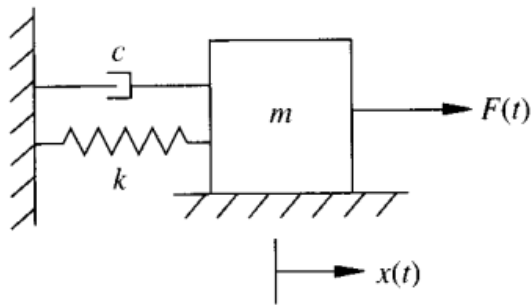


Figura 1. Sistema mecánico de 1 grado de libertad (modelo m-k-c)[1]

- Muelle: elemento elástico, de masa despreciable, representado mediante su constante de rigidez k y caracterizado por ésta.

Presenta una fuerza proporcional a la deformación, de sentido opuesto, que trata de recuperar la posición de equilibrio, la cual se define por la siguiente expresión:

$$F_k = -kx(t)$$

Ecuación 1. Fuerza elástica del resorte

Dónde k hace referencia, como se ha mencionado anteriormente, a la constante de rigidez del muelle; y $x(t)$ a la posición relativa de la masa en un determinado instante de tiempo.

- Amortiguamiento: representado y caracterizado por su coeficiente de amortiguamiento, c , en él tiene lugar el fenómeno de disipación de energía, mediante una fuerza recuperadora proporcional a la velocidad relativa entre los extremos, la cual queda definida a través de la siguiente expresión:

$$F_c = -c\dot{x}(t)$$

Ecuación 2. Fuerza de amortiguamiento viscoso

Existen distintos tipos de amortiguamiento (amortiguamiento viscoso, amortiguamiento por fricción seca, amortiguamiento magnético...) los cuales se dedicará en apartados futuros un desarrollo más detallado. Se explicará en detalle el amortiguamiento magnético, pues es éste el objeto de estudio del presente trabajo.

- Coordenada de posición $x(t)$: indica la posición del sistema en un determinado instante de tiempo. De ésta derivan tanto la velocidad como la aceleración del sistema empleados en la Ecuación 1 y Ecuación 2.
- Masa: sólido rígido e indeformable, el cual almacena energía cinética.

- Fuerza externa aplicada sobre el sistema, representada en la Figura 1 por la expresión $F(t)$.

Para obtener la ecuación que rige el movimiento del sistema discreto objeto del estudio, basta con aplicar la segunda Ley de Newton:

$$\sum F_{ext} = m\ddot{x}(t)$$

Ecuación 3. Segunda Ley de Newton.

Dónde, sustituyendo el sumatorio de fuerzas por las distintas fuerzas vistas anteriormente, se llega a la siguiente expresión:

$$\sum F_{ext} = m\ddot{x}(t)$$

$$F_k(t) + F_c(t) + F(t) = m\ddot{x}(t)$$

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = F(t)$$

Ecuación 4. Ecuación Diferencial General del Movimiento.

Esta ecuación recibe el nombre de Ecuación Diferencial General del Movimiento.

En la aproximación vibratoria y modelado a través de un sistema discreto de un grado de libertad, la Ecuación 4 queda condicionada según sea la naturaleza de la vibración presente en el sistema.

Se pueden distinguir entre vibraciones libres, vibraciones forzadas, y vibraciones autoexcitadas, explicadas en más detalle en el próximo apartado a excepción de las vibraciones autoexcitadas, puesto que, al no ser un fenómeno lineal, su estudio no tiene lugar en un sistema discreto; y las forzadas, ya que no son objeto de estudio del presente trabajo.

2.2. Vibraciones libres.

Un sistema mecánico, el cual su naturaleza vibratoria se corresponda con las vibraciones libres, se caracteriza por la vibración en ausencia de fuerzas externas ($F(t) = 0$), producidas por la acción de un impulso inicial.[1]

Por tanto, la Ecuación Diferencial General del Movimiento queda definida de la siguiente forma:

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = 0$$

Ecuación 5. Ecuación Diferencial General del Movimiento para sistemas sometidos a vibraciones libres.

Las vibraciones libres pueden ser a su vez no amortiguadas, también conocidas como armónicas, o amortiguadas. Resulta interesante introducir un breve contexto de cada una de ellas.

2.2.1. Vibraciones libres no amortiguadas.

También conocido como vibraciones armónicas, se trata del modelo matemático más sencillo, en el cual se prescinde del elemento amortiguador, quedando formado únicamente por un resorte de masa despreciable y constante de rigidez k , así como por una masa m proveniente del peso puntual aplicado en uno de sus extremos.

Este modelo, representado a continuación en la Figura 2, recibe el nombre de sistema m-k (masa-resorte).

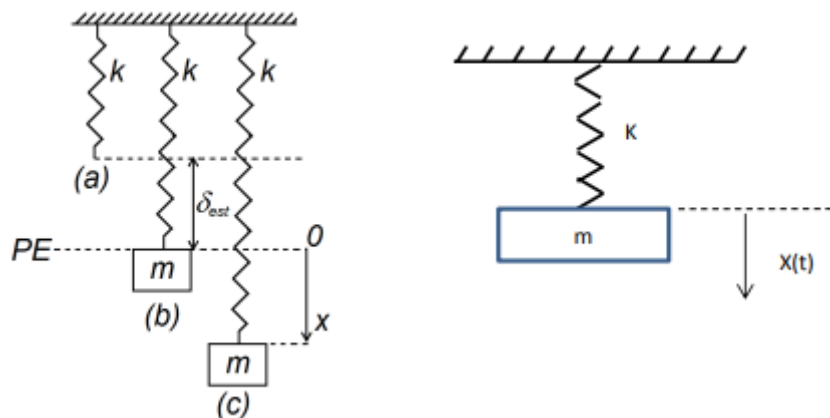


Figura 2. Esquema de un sistema libre no amortiguado.[2]

La masa m , al encontrarse colgada del resorte y estar sometida también al efecto de la gravedad, lleva asociada consigo un peso, el cual causa que en el resorte se produzca una deflexión estática (alargamiento estático, δ_{est}), hasta alcanzar su posición de equilibrio.

Una vez alcanzada dicha posición, el efecto de la gravedad sobre la masa se iguala a la fuerza elástica reactiva del resorte, cumpliéndose la siguiente relación:

$$k \cdot \delta_{est} = P = m \cdot g$$

Ecuación 6. Relación posición de equilibrio.

Si en su posición de equilibrio, se fuerza el desplazamiento de la masa una distancia x y posteriormente se la deja libre, comienza un movimiento vibratorio en el que la única fuerza que se encuentra presente es la fuerza reactiva del resorte.

Aplicando la Ecuación 3, se obtiene:

$$\sum F_{ext} = m\ddot{x}(t)$$
$$P - k \cdot (x + \delta_{est}) = m\ddot{x}(t)$$

Teniendo presente la Ecuación 6, la expresión anterior queda escrita de la siguiente forma:

$$m\ddot{x}(t) + kx(t) = 0$$

Ecuación 7. Ecuación diferencial del movimiento en sistemas libres no amortiguados.

Si se divide toda la expresión anterior por la masa:

$$\ddot{x}(t) + w_0^2 \cdot x(t) = 0$$

Ecuación 8

Siendo w_0 la frecuencia natural del sistema, representando la relación entre el parámetro elástico k y el inercial m [rad/seg].

$$w_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Ecuación 9. Frecuencia natural del sistema.

La solución general de la Ecuación 8 es del tipo:

$$x(t) = A \sin(w_0 \cdot t) + B \cos(w_0 \cdot t)$$

Ecuación 10. Solución de la Ecuación Diferencial del Movimiento para sistemas libres no amortiguados

Donde A y B son dos constantes que van a depender de las condiciones iniciales a las que se encuentre sometido el sistema de un grado de libertad objeto de estudio.

Se puede observar como la Ecuación 10 es la superposición de dos armónicas con un desfase entre sí de 90° .

Por tanto, se puede concluir que un sistema m - k posee una vibración sinusoidal caracterizada por su frecuencia natural (Ecuación 9) que depende de forma exclusiva de los parámetros característicos propios del sistema.

2.2.2. Vibraciones libres amortiguadas.

Al excitar un sistema mecánico de un grado de libertad, la respuesta libre de éste dependerá de su frecuencia natural (rigidez y masa, como se ha explicado en el apartado anterior) así como del amortiguamiento que presente el sistema, que en este caso se produce a través del elemento disipador que el sistema anterior no presentaba.

El modelo representativo del sistema se muestra esquematizado en la Figura 3:

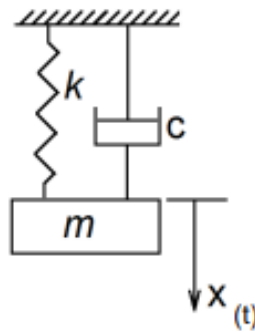


Figura 3. Esquema de un sistema libre amortiguado [2]

Como se ha comentado en el apartado anterior, el modelo no amortiguado sólo tenía presente las fuerzas de inercia, así como la fuerza reactiva del resorte. Sin embargo, el presente modelo tiene en cuenta, además de las mencionadas anteriormente, la fuerza producida por el elemento disipador.

Por tanto, la ecuación del movimiento característica de este sistema es de la forma:

$$m\ddot{x}(t) + F_c + kx(t) = 0$$

Ecuación 11. Ecuación movimiento sistema libre amortiguado

Donde F_c hace referencia a la fuerza de amortiguamiento, es decir, la fuerza por la cual una vibración es atenuada disminuyendo su amplitud.

El estudio de la fuerza de amortiguamiento F_c no es sencillo, sin embargo, se suelen emplear modelos ideales de amortiguamiento que permiten predecir la respuesta del sistema.

Entre todos los modelos existentes de amortiguamiento, los más habituales e importantes se pueden clasificar en:

- Amortiguación viscosa.
- Amortiguación por histéresis.
- Amortiguamiento por fricción seca.

De todas ellas, el presente trabajo centra su objetivo de estudio en la amortiguación magnética, como alternativa a la amortiguación viscosa.

Por lo tanto, los siguientes apartados se dedicarán a la explicación de estas dos últimas, base teórica de la que se sustenta la posterior experimentación, que será tratada en siguientes capítulos.

2.3. Amortiguamiento viscoso.

El amortiguamiento viscoso, es el mecanismo de amortiguamiento más empleado, donde se produce una disipación de energía debida a la resistencia que ofrece un fluido respecto al avance de un sólido.

En la realidad habrá también fricción, histéresis, disipación con el aire, pero al ser todo lo anterior difícil de modelar, se opta por considerar solo lo viscoso, pues presenta linealidad.

Es por ello por lo que se trata de la modelización de amortiguamiento más simple de tratar matemáticamente, pues asume la fuerza de amortiguamiento como una fuerza proporcional a la velocidad de la masa concentrada presente en el sistema. Entonces, la fuerza de amortiguamiento viscoso tiene la forma vista en la Ecuación 2.

$$F_c = -c\dot{x}(t)$$

Por tanto, es posible linealizar la ecuación del movimiento, siempre que la amortiguación se produzca por un flujo laminar de un fluido viscoso.

La ecuación del movimiento para un sistema de un grado de libertad, con vibraciones libres y amortiguación viscosa, se rige por la Ecuación 11.

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = 0$$

La solución de esta ecuación es del tipo:

$$x = Ae^{\lambda t}$$

Donde A hace referencia a una constante. Derivando respecto del tiempo, se obtiene tanto la velocidad como la aceleración:

$$\dot{x} = A\lambda e^{\lambda t} = \lambda x$$

$$\ddot{x} = \lambda^2 x$$

Sustituyendo las expresiones anteriores en la ecuación diferencial del movimiento (Ecuación 11), se obtiene la siguiente ecuación algebraica:

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = 0$$

$$m\lambda^2 x + c\lambda x + kx = 0$$

$$(m\lambda^2 + c\lambda + k)x = 0$$

$$(m\lambda^2 + c\lambda + k) = 0$$

Donde las raíces de este sistema vendrán dadas por la siguiente expresión:

$$\lambda = -\frac{c}{2m} \pm \frac{1}{2m} \sqrt{c^2 - 4km}$$

Ecuación 12. Solución sistema vibratorio libre amortiguado.

El sistema amortiguado presentará un coeficiente de amortiguamiento, representado por su coeficiente de amortiguamiento c , pero también estará caracterizado por un amortiguamiento crítico, el cual depende de su masa concentrada y de su frecuencia natural. Dicho amortiguamiento crítico, queda definido por la expresión siguiente:

$$c_c = 2mw_0$$

Ecuación 13. Amortiguamiento crítico.

Para poder cuantificar el amortiguamiento del sistema, se introduce un coeficiente a mayores, conocido como factor de amortiguamiento (ζ), el cual relaciona el amortiguamiento que presenta el sistema con su amortiguamiento crítico.

Por tanto, el factor de amortiguamiento del sistema libre amortiguado queda definido por la siguiente relación:

$$\zeta = \frac{c}{c_c} = \frac{c}{2mw_n} = \frac{c}{2\sqrt{km}}$$

Ecuación 14. Factor de amortiguamiento del sistema.

Una vez introducido y definido el concepto del factor de amortiguamiento, es posible relacionar la solución del sistema amortiguado mostrada en la Ecuación 12.

$$\lambda_{1,2} = -\frac{c}{2m} \pm \frac{1}{2m} \sqrt{c^2 - 4km}$$

$$\lambda_{1,2} = -\zeta w_0 \pm w_0 \sqrt{\zeta^2 - 1}$$

Ecuación 15. Solución del sistema libre amortiguado en función del factor de amortiguamiento.

Por tanto, las soluciones del sistema libre amortiguado dependen del factor de amortiguamiento que presente el sistema, pudiendo distinguirse entre tres distintos tipos de soluciones y, por tanto, tres tipos distintos de movimientos.

- **Movimiento sobreamortiguado ($\zeta > 1$).**

Cuando se tiene un factor de amortiguamiento $\zeta > 1$, las soluciones del sistema libre amortiguado (Ecuación 15) son raíces reales negativas:

$$\lambda_1 = -\zeta\omega_0 + \omega_0\sqrt{\zeta^2 - 1}$$

$$\lambda_2 = -\zeta\omega_0 - \omega_0\sqrt{\zeta^2 - 1}$$

Siendo la solución general del sistema una combinación lineal de las anteriores raíces, obteniendo consecuencia de ello la siguiente expresión:

$$x(t) = e^{-\zeta\omega_0 t} [C_1 e^{-\omega_0 t \sqrt{\zeta^2 - 1}} + C_2 e^{\omega_0 t \sqrt{\zeta^2 - 1}}]$$

Ecuación 16. Solución sistema libre sobreamortiguado.

En la Figura 4 se representa el movimiento amortiguado, donde se observa como el movimiento decrece de forma exponencial con el tiempo y por tanto, se puede concluir que el sistema no oscila.

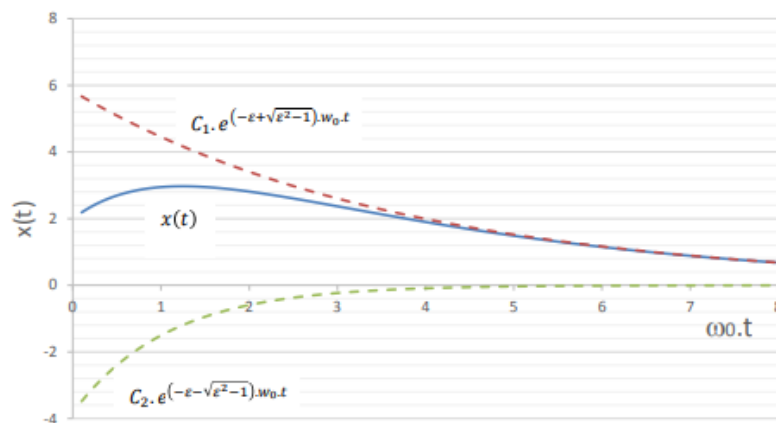


Figura 4. Representación del movimiento sobreamortiguado.[2]

- **Movimiento subamortiguado ($\zeta < 1$).**

En el caso en el que el sistema presente un factor de amortiguamiento $\zeta < 1$, la solución de la Ecuación 12 tendrá como resultado dos raíces complejas:

$$\lambda_1 = -\zeta\omega_0 + \omega_0\sqrt{1 - \zeta^2} j$$

$$\lambda_2 = -\zeta w_0 - w_0 \sqrt{1 - \zeta^2} j$$

La solución de la ecuación diferencial del movimiento será del tipo:

$$x(t) = c_1 e^{\lambda_1 t} + c_2 e^{\lambda_2 t}$$

Donde c_1 y c_2 son constantes complejas. Por tanto, para poder escribir la solución general sin tener que recurrir a dichas constantes, es necesario aplicar la fórmula de Euler para números complejos:

$$e^{j\alpha} = \cos(\alpha) + j\sin(\alpha)$$

Ecuación 17. Fórmula de Euler para números complejos

$$x(t) = c_1 e^{\lambda_1 t} + c_2 e^{\lambda_2 t}$$

$$x(t) = e^{-\zeta w_0 t} [C_1 \cos(w_d t) + C_2 \sin(w_d t)]$$

Ecuación 18. Solución sistema libre subamortiguado

Donde C_1 y C_2 son constantes que van a depender de las condiciones iniciales del sistema. Como se puede observar, en esta ecuación se introduce a su vez una nueva frecuencia w_d , la cual se denomina frecuencia angular amortiguada y se define por la expresión:

$$w_d = w_0 \sqrt{1 - \zeta^2}$$

Ecuación 19. Frecuencia angular amortiguada

Si se observa la expresión anterior se deduce que, para cualquier amortiguamiento, aunque éste sea pequeño, la frecuencia amortiguada va a ser siempre mayor que la frecuencia natural del sistema.

La Ecuación 18 puede también escribirse del siguiente de la siguiente forma:

$$x(t) = C e^{-\zeta w_0 t} \sin(w_d t + \phi) \cdot e^{-\zeta w_0 t}$$

Donde C es la amplitud del movimiento subamortiguado y ϕ es el ángulo de fase.

$$C = \sqrt{C_1^2 + C_2^2} = \frac{\sqrt{(v_0 + \zeta \cdot w_0 \cdot x_0)^2 + (x_0 \cdot w_0)^2}}{w_d^2}$$

Ecuación 20. Amplitud del movimiento subamortiguado.

$$\phi = \arctan \frac{x_0 \cdot w_d}{v_0 + \zeta \cdot w_0 \cdot x_0}$$

Ecuación 21. Ángulo de fase del movimiento subamortiguado

Como se puede observar en la Figura 5, en el movimiento subamortiguado se producen oscilaciones, lo que significa que se encuentra presente un movimiento vibratorio.

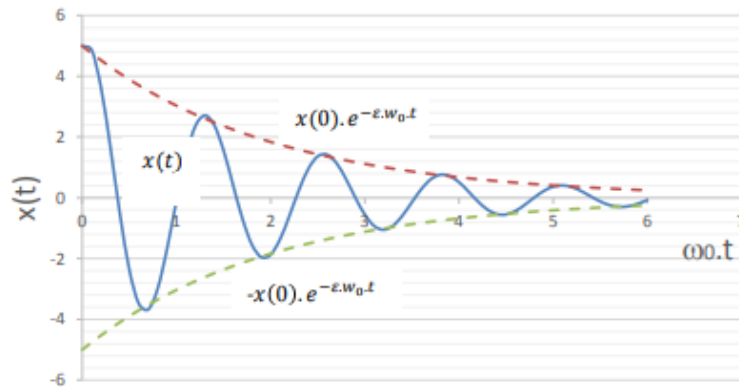


Figura 5. Representación del movimiento subamortiguado.[2]

- **Movimiento críticamente amortiguado ($\zeta = 1$)**

Si el sistema libre amortiguado presenta un factor de amortiguamiento $\zeta = 1$, la solución de la Ecuación 12 tiene como solución una raíz doble negativa.

$$\lambda_1 = \lambda_2 = -w_0$$

La solución general para el caso críticamente amortiguado será del tipo:

$$x(t) = (C_1 + C_2 t)e^{-w_0 t}$$

Ecuación 22. Solución del sistema libre críticamente amortiguado.

Este movimiento representa el caso límite entre la oscilación y la no oscilación, es decir, representa un caso límite en el cual los elementos elásticos superan la capacidad de amortiguación de los elementos disipadores.

Como ejemplo de este movimiento, se puede tomar la representación mostrada en la Figura 6.

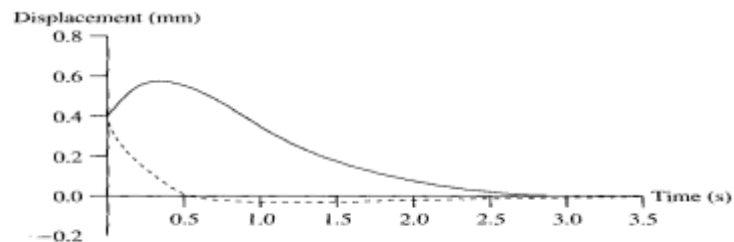


Figura 6. Representación del movimiento críticamente amortiguado.[1]

2.4. Amortiguación magnética.

Como se ha comentado previamente, la amortiguación viscosa es el mecanismo de amortiguación más empleado, debido a que le permite linealizar la ecuación del movimiento que lo caracteriza y, por tanto, facilitar su resolución matemática.

En el [Capítulo 1] del presente trabajo se han presentado las motivaciones que han llevado a realizar este mismo, entre las cuales se encontraba el buscar un método de amortiguación que paliase los inconvenientes debidos al contacto de la amortiguación viscosa, pero que al mismo tiempo conservase su comportamiento lineal.

Aquí es donde se sitúa la amortiguación magnética mediante corrientes parásitas como estrategia alternativa a este problema.

2.4.1. Corrientes de Foucault.

Las corrientes de Foucault, también conocidas como *Eddy Currents* o como corrientes parásitas, son bucles de corrientes eléctricas inducidas que se producen dentro de un conductor cuando éste se expone a un campo magnético variable de acuerdo con la ley de inducción de Faraday.

Estos bucles son inducidos dentro de conductores estacionarios cercanos a un campo magnético, que puede ser creado por un transformador o por un electroimán, y que resulta variable en el tiempo; o pueden ser inducidos por el movimiento relativo entre el conductor y un campo magnético externo. Según sea el origen de las corrientes, se pueden clasificar en corrientes parásitas del transformador o corrientes parásitas del movimiento, respectivamente, cuya magnitud va a ser proporcional a la fuerza del campo magnético aplicado, a la tasa de cambio de flujo y a la conductividad del material, así como inversamente proporcional a su resistividad.[3]

Las corrientes de Foucault, según la ley de Lenz, crean electroimanes con campos magnéticos que se oponen al campo magnético que las produjo.

Sirva como ejemplo de lo anterior el campo de aplicación en el presente trabajo, donde las corrientes parásitas van a crear electroimanes que, como se menciona anteriormente, se opondrán al efecto del campo magnético aplicado, provocando una fuerza repulsiva proporcional a la velocidad relativa entre el campo magnético y el conductor haciendo que las corrientes de Foucault actúen del mismo modo que si se tratase de un amortiguador viscoso.

2.4.2. Explicación de las Corrientes de Foucault.

Para explicar las corrientes parásitas, se recurre a la Figura 7, donde se observa como un imán estacionario induce bucles de corrientes eléctricas en una lámina conductora, C, la cual se desplaza a través de su campo magnético. Es importante incidir en la naturaleza no ferromagnética del elemento conductor, pues de lo contrario el imán atraería la placa. Por lo tanto, habitualmente se emplea como elemento conductor cobre o aluminio.

El campo magnético del imán, representado por B, se dirige hacia la parte inferior de la placa, al mismo tiempo que la placa conductora se está desplazando. Esto implica que el flujo magnético es variable, lo que a su vez significa que el campo magnético a través de un punto concreto de la misma aumenta a medida que se acerca al imán. Es decir, $\frac{dB}{dt} > 0$.

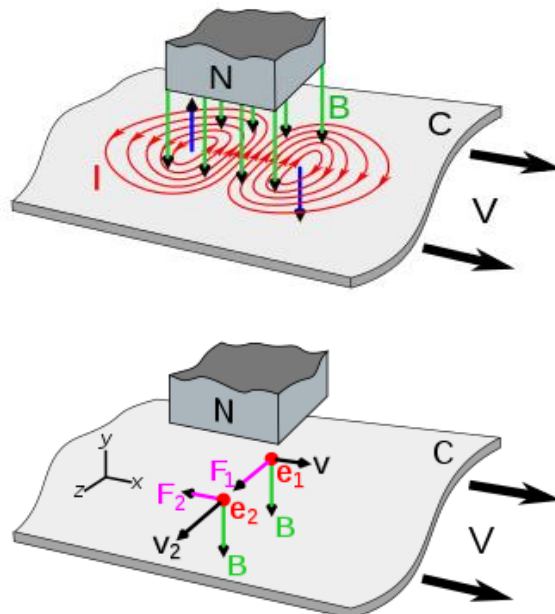


Figura 7. Explicación de las corrientes de Foucault.[4]

Debido a la ley de la inducción de Faraday, a partir de lo anterior se crea un campo eléctrico circular de sentido antihorario, que induce a su vez un flujo de corriente en el elemento conductor con sentido también antihorario, representado por I. Esta se corresponde con la corriente de Foucault.

A medida en que el elemento conductor se aleja del imán, el campo magnético disminuye, induciendo una segunda corriente de Foucault que, en esta ocasión, presenta un sentido contrario a la mencionada anteriormente.

A causa de la Ley de Ampere, cada una de las corrientes de Foucault anteriores crea un campo magnético contrario, que tal y como explica la Ley de Lenz, se opone al cambio en el campo magnético, originando una fuerza de frenado en la placa conductora. [5]

En la zona de la placa donde está aumentando el campo magnético, se ha comentado que la corriente de Foucault creada presenta un sentido antihorario por lo que, aplicando la regla de la mano derecha, ésta origina un campo magnético cuya dirección es positiva (tomando como referencia el sistema mostrado en la Figura 7) y se opone al campo creado por el imán, creando una fuerza repulsiva entre la placa y dicho imán.

Por otro lado, la otra corriente de Foucault creada a medida que disminuye el campo magnético, presenta un sentido horario, por lo que en esta ocasión el campo creado coincide con la dirección del campo del imán, produciendo una fuerza atractiva entre el imán y la placa conductora. [4]

Ambas fuerzas creadas como consecuencia de las corrientes parásitas creadas se oponen al movimiento del elemento conductor, por lo que se produce una pérdida de energía cinética. Dicha energía perdida se disipa en forma de calor, provocando que la placa conductora se caliente a su paso por el imán.

Esta energía disipada en forma de calor puede ser ventajosa, si se pretende aprovechar para calentar a través de la inducción; al mismo tiempo que presenta inconvenientes, como pérdidas de potencia y de eficiencia de los transformadores. No obstante, no se va a profundizar en el presente trabajo en estos aspectos. [6]

Sin embargo, sí resulta interesante continuar con el concepto de la pérdida de energía cinética del elemento conductor pues, las fuerzas de frenado que lo produce son exactamente proporcionales a la velocidad de éste.

Por tanto, se puede concluir que las fuerzas de frenado, consecuencia del principio de las corrientes de Foucault, actúan del mismo modo a cómo actuaría un amortiguador viscoso, objetivo de estudio de este trabajo.

2.4.3. Modelado matemático de la amortiguación magnética por Corrientes de Foucault.

Se toma la Figura 8 como ejemplo de lo expuesto hasta el momento, donde se tiene un sistema formado por dos placas conductoras fijas, con dos imanes que se mueven solidarios a la masa M.

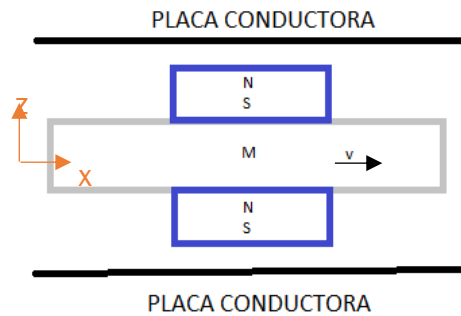


Figura 8. Ejemplo para el modelado de la amortiguación magnética.[7]

Como se ha explicado en el apartado anterior, el movimiento relativo entre los imanes y la placa conductora induce las mencionadas corrientes de Foucault, las cuales se pueden formular de acuerdo con la Ecuación 23 :

$$I = \sigma(v \times B)$$

Ecuación 23. Expresión para las corrientes de Foucault.

Donde se tiene que σ es la conductividad eléctrica de la placa, v es la velocidad relativa entre los imanes y ésta, así como B la densidad del campo magnético que originan los imanes.[7]

Teniendo en cuenta que, según el sistema de referencia mostrado en la Figura 8, la velocidad sólo se presenta en una dirección, y que la densidad del campo magnético se distribuye espacialmente,

$$v = v_x i + 0j + 0k$$

$$B = B_x i + B_y j + B_z k$$

La Ecuación 23 puede reescribirse de acuerdo con la siguiente expresión:

$$I = \sigma(v \times B)$$

$$I = \sigma v_x (-B_z j + B_y k)$$

Ecuación 24. Desarrollo de la expresión de las corrientes de Foucault.

Donde se observa que la componente radial del campo magnético no presenta ningún efecto sobre las corrientes parásitas, fruto del producto vectorial. Por tanto, son solo las componentes B_z y B_y las que se han de tomar en cuenta.

Como se ha visto en el apartado anterior, una vez se generan las corrientes parásitas, éstas inducen un campo magnético de sentido opuesto al campo aplicado por el imán, provocando las mencionadas fuerzas repulsivas.[8]

Estas fuerzas repulsivas se pueden escribir como:

$$F = \int_V I \times B dV$$

$$F = \int_V I \times B dV = -\sigma v_x \int_V ((-B_z^2 - B_y^2)i + (B_y B_x)j + (B_z B_x)k) dV$$

$$F = -\sigma v_x \int_V (B_z^2 + B_y^2) dV$$

Ecuación 25. Desarrollo fuerzas repulsivas.

De la Ecuación 25 se pueden extraer una serie de conclusiones. La primera de ellas está relacionada con las fuerzas repulsivas, que actúan como fuerzas de frenado, donde se observa que son proporcionales a la velocidad relativa de los imanes y de las placas conductoras. Del mismo modo, es inmediato ver que el signo negativo de éstas se corresponde con su sentido, opuesta a la dirección de avance. Por último, como se mencionaba en líneas anteriores, la fuerza repulsiva depende de las componentes z e y , como es lógico, pues la corriente de Foucault de la que provienen dependía únicamente también de dichas componentes, como se observa en la Ecuación 24.

Si se recuerda la Ecuación 2, la fuerza de amortiguamiento presentaba una relación de proporcionalidad entre la velocidad del sistema y una constante de amortiguamiento propia del elemento disipador.

$$F_c = -c\dot{x}(t)$$

Como se ha mencionado, la amortiguación magnética mediante corrientes parásitas presenta el mismo comportamiento lineal que la amortiguación viscosa. Por lo tanto, teniendo en cuenta lo anterior, la Ecuación 25 será de igual forma a la Ecuación 2:

$$F = -\sigma v_x \int_V (B_z^2 + B_y^2) dV$$

$$F = -v_x c$$

Donde el coeficiente de amortiguamiento lineal viene dado por la Ecuación 26

$$c = \sigma \int_V (B_z^2 + B_y^2) dV$$

Ecuación 26. Coeficiente amortiguamiento magnético.

Suponiendo que el sistema de amortiguamiento magnético es empleado como elemento disipador en el sistema de un grado de libertad, libre y amortiguado explicado en el presente trabajo, se puede obtener un factor de amortiguamiento idéntico al ya comentado en la amortiguación viscosa, definido por la Ecuación 14.

$$\zeta = \frac{c}{2mw_n}$$

2.4.4. Caracterizado experimental del coeficiente de amortiguación magnético.

Hasta el momento se ha comentado el principio físico de las corrientes de Foucault, su origen y las fuerzas repulsivas que generan, así como la forma matemática de modelar la amortiguación magnética y de determinar dichas fuerzas y, por tanto, caracterizar su coeficiente de amortiguación.

Sin embargo, en el presente trabajo se va a tratar de caracterizar el coeficiente de amortiguamiento de forma experimental, para una serie de configuraciones dadas, explicadas en capítulos posteriores.

El proceso experimental seguido para caracterizar el coeficiente de amortiguamiento se explica tomando de base la Figura 9, donde se pueden

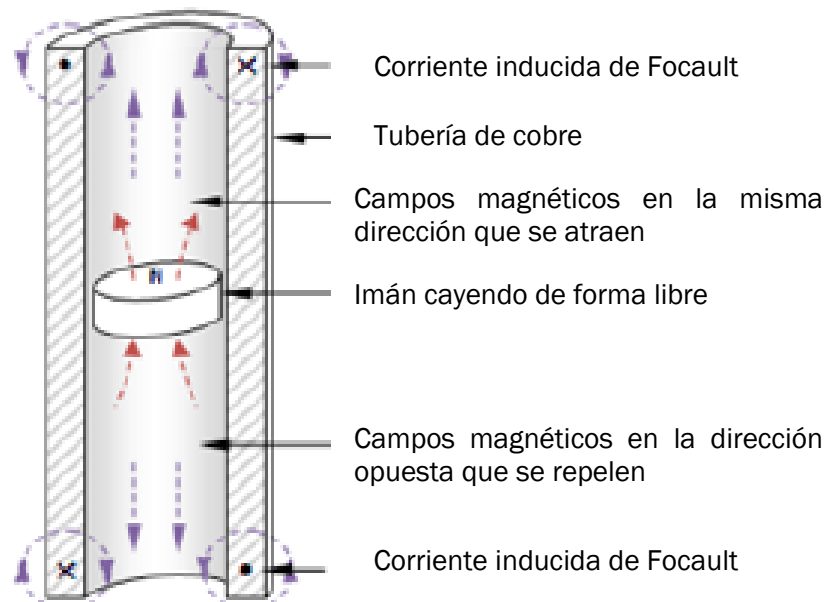


Figura 9. Representación modelo experimental[9]

observar los fundamentos físicos propios de la amortiguación magnética ya explicados, pero en este caso aplicados al caso concreto de estudio del presente trabajo.

El imán es soltado y, a medida que cae a través del tubo de material no ferromagnético, produce un campo magnético variable en el tiempo, lo que origina las corrientes parásitas señaladas en la Figura 9, por un breve espacio de tiempo, según va cayendo el imán.

Atendiendo a lo explicado con anterioridad, estas corrientes parásitas van a inducir campos magnéticos que se van a oponer al campo magnético propio del imán, como si se tratase de un par de imanes que se repelen entre sí. Este campo magnético inducido, como ya se ha explicado, va a originar unas fuerzas repulsivas que van a oponerse al movimiento del imán.

Sin embargo, en esta configuración experimental interviene otro fenómeno físico a mayores que el del amortiguamiento magnético, el referido a la velocidad terminal como consecuencia de la caída libre que experimenta el imán.

Para poder entender las posteriores hipótesis tomadas a la hora de simplificar el cálculo para caracterizar el coeficiente de amortiguamiento, es importante primero explicar, de forma lo más comedida posible, qué es la caída libre y que implicaciones trae consigo.

2.4.4.1. Caída libre. Velocidad terminal.

Cuando un sólido cae bajo la influencia de alguna fuerza cuyo impulso sea constante, sirva en este caso el campo gravitatorio, está sometido a una fuerza de arrastre la cual va incrementando a medida que el cuerpo aumenta de velocidad, hasta alcanzar una velocidad máxima en donde las fuerzas de arrastre y las fuerzas de empuje se van a igualar. Esta velocidad es la denominada velocidad terminal.[10]

En una caída libre vertical, se aproxima inicialmente a un movimiento uniformemente acelerado, donde aplicando la segunda ley de Newton, vista en la Ecuación 3, se obtiene:

$$\sum F_{ext} = ma_y$$
$$-mg + F_c = ma_y$$

Donde F_c hace referencia a la fuerza de amortiguamiento viscoso definida en la Ecuación 2, siendo k_w la constante de proporcionalidad del rozamiento aerodinámico.

$$F_c = -k_w v_y$$

Donde la velocidad terminal vendrá definida por la expresión:

$$-mg - k_w v_y = 0$$

$$v_\infty = \lim_{t \rightarrow \infty} v_y(t) = -\frac{mg}{k_w}$$

Ecuación 27. Expresión de la velocidad terminal.

En una caída libre a grandes velocidades, el flujo alrededor del cuerpo es turbulento, por lo que la fuerza de rozamiento aerodinámica se expresa de forma proporcional al cuadrado de la velocidad[11]:

$$-mg + \frac{C_d}{2} \rho A_t v_\infty^2 = 0$$

Siendo la velocidad terminal:

$$v_\infty = \sqrt{\frac{2mg}{C_d \rho A_t}}$$

Ecuación 28. Velocidad terminal en flujo turbulento.

Donde C_d es el coeficiente aerodinámico que depende del cuerpo que cae, A_t es el área transversal a la dirección del movimiento, y ρ es la densidad del fluido.

Por tanto, se concluye que en una caída libre coexisten dos movimientos, un movimiento uniformemente acelerado junto con un movimiento rectilíneo uniforme posterior, una vez se alcanza la velocidad terminal.

2.4.4.2. Hipótesis y simplificaciones tomadas.

Como se ha concluido previamente, al dejar caer libremente el imán por el interior del tubo no ferromagnético, inicialmente experimenta un movimiento rectilíneo uniformemente acelerado hasta alcanzar la velocidad terminal, una vez la fuerza de interacción magnética se iguale al peso del imán, para a continuación moverse de acuerdo con un movimiento rectilíneo uniforme.

Por tanto, en la Ecuación 2, donde se hace referencia a la fuerza de amortiguamiento viscosa, se tiene en cuenta lo explicado obteniendo:

$$F_c = cv + k_w v^2 + F_{fricción}$$

Ecuación 29. Fuerzas de amortiguamiento viscosas debidas al efecto electromagnético y a la resistencia aerodinámica.

Para simplificar tanto el planteamiento, como la resolución a la hora de caracterizar la constante de amortiguamiento magnético, se considera que el amortiguamiento viscoso producido por el aire es despreciable respecto al producido por imán, puesto que como se observará más adelante, las velocidades a las que se mueve el imán son pequeñas.

Del mismo modo, se considera que la velocidad terminal se alcanza inmediatamente es lanzado el imán, y por tanto el movimiento de éste lo consideramos únicamente como un movimiento rectilíneo uniforme. De igual forma, más adelante en la toma de datos se observa como esta hipótesis es cierta.

Con todo ello, aplicando la segunda ley de Newton (Ecuación 3) al modelado experimental simplificado en la Figura 10, se tiene que:

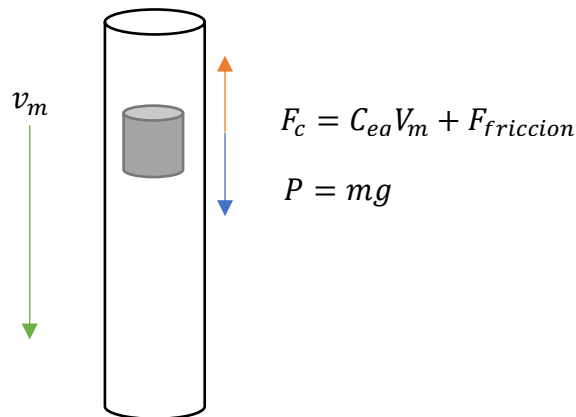


Figura 10. Modelo experimental simplificado.

$$\sum F_{ext} = ma$$

Tomando como hipótesis las mencionadas anteriormente:

$$v_m = cte \quad a = 0$$

$$\sum F_{ext} = 0$$

$$P - F_c = 0$$

$$mg - C_{eq}v_m - F_{fricción} = 0$$

Ecuación 30. Segunda ley de Newton al modelo experimental simplificado

Donde la fuerza de fricción $F_{fricción} = 0$, ya que el imán en ningún momento roza con el tubo en su movimiento.

Por tanto, la Ecuación 30 se simplifica quedando:

$$mg - C_{eq}v_m - F_{fricción} = 0$$

$$mg - C_{eq}v_m = 0$$

De donde resulta inmediato obtener:

$$C_{eq} = \frac{mg}{v_m} \left[\frac{Ns}{m} \right]$$

Ecuación 31. Expresión para el cálculo de la constante de amortiguación

Donde C_{eq} hace referencia a la constante de amortiguación magnética que se quiere caracterizar, objetivo del trabajo; mientras que v_m se corresponde con la velocidad a la que se desplaza el imán y m la masa total del obús, considerando la masa del imán y la de la varilla de madera, de las tuercas empleadas, etc.

Para el cálculo de v_m , basta con medir el tiempo que tarda en caer el imán, puesto que el espacio que recorre es conocido.

Por tanto,

$$v_m = \frac{\text{espacio}}{\text{tiempo}} = \frac{L_{recorrida} (m)}{\text{tiempo} (s)}$$

Ecuación 32. Velocidad del imán en el modelo experimental.

Sustituyendo en la Ecuación 31:

$$C_{eq} = \frac{mgt}{L_{recorrida}} \left[\frac{Ns}{m} \right]$$

Será esta la expresión que se empleará en adelante para caracterizar de forma experimental el coeficiente de amortiguamiento magnético.

CAPITULO 3

METODOLOGÍA Y CASOS DE ESTUDIO

3. METODOLOGÍA Y ESCENARIOS DE ESTUDIO.

Una vez explicado el marco teórico que sustenta la experimentación del presente trabajo, así como entendidas las simplificaciones e hipótesis que se han tomado y el porqué de éstas, es momento de introducir en este capítulo la metodología de trabajo seguida durante el desarrollo experimental, así como los diversos casos de estudio que se han tomado como referencia a la hora de caracterizar el coeficiente de amortiguación magnético.

3.1. Metodología de trabajo.

En el anterior capítulo se ha obtenido la expresión que permite caracterizar el coeficiente de amortiguación magnético, vista en la Ecuación 31, donde son conocidos todos los datos a excepción de la velocidad del imán v_m , donde en la Ecuación 32 se observa que ésta depende del espacio que recorre y del tiempo en que lo lleva a cabo. Por tanto, para poder obtenerla, basta con medir el tiempo que tarda experimentalmente en caer.

En cuanto a la metodología empleada para tal efecto, cabe reseñar la importancia que se le ha otorgado a seguir un procedimiento de trabajo ordenado, reproducible y sistemático, con el fin de poder obtener unos resultados lógicos y coherentes que permitan un correcto análisis de resultados y la obtención de unas conclusiones coherentes.

Es por ello por lo que, para facilitar la correcta manipulación de los imanes, se decide crear un obús donde poder situarlos y manejarlos. Este obús interesa que sea de una masa si no despreciable, lo más ínfima posible. Por este motivo se emplean varillas de madera de distintos diámetros acordes a los imanes que se van a caracterizar, mostradas en la Figura 11.



Figura 11. Varillas de madera empleadas.

Además de su ínfima masa, se decide el uso de estas varillas de madera puesto que es una forma metódica de tener controlado el efecto de su peso añadido en todos los ensayos experimentales que se lleven a cabo.

Se obtiene entonces el dispositivo experimental mostrado en la Figura 12.



Figura 12. Obús experimental

Siguiendo con el objetivo de emplear una forma sistemática y ordenada de realizar la experimentación, se centran los esfuerzos en encontrar un método que permita una adecuada toma de datos para su posterior análisis.

Consecuencia de lo anterior, en una primera aproximación, se decide dividir la toma de datos mediante dos métodos experimentales distintos.

3.1.1. Toma de datos manual mediante cronómetro.

Sea este método el más sencillo e inmediato, también es el método que mayores imprecisiones puede ocasionar, debido al fallo humano a la hora de la toma de los datos, así como por la dificultad de medir tiempos que van a resultar pequeños.

En primer lugar, es necesario crear un entorno que asegure un correcto desarrollo de la actividad experimental. Para ello, como se observa en la Figura 13, se amarra la tubería mediante una cuerda elástica a un tocho de madera, el cual presenta unas dimensiones y un peso suficientes como para sustentar el peso de la tubería.

No sólo es importante esto último, sino que también resulta importante que las propiedades magnéticas de la tubería y del imán no se vean modificadas por su presencia, lo cual adulteraría los resultados finales y restaría validez a los mismos.



Figura 13. Dispositivo experimental para la medida manual.

Sirva de ejemplo el obús expuesto en la Figura 13, éste se lanzará a través de la tubería de material no ferromagnético y se procederá a la adquisición del tiempo que tarda en realizar el recorrido.

El tiempo será medido mediante un cronómetro. En este caso se ha empleado el propio del móvil, pudiendo ser válida cualquier otra opción.

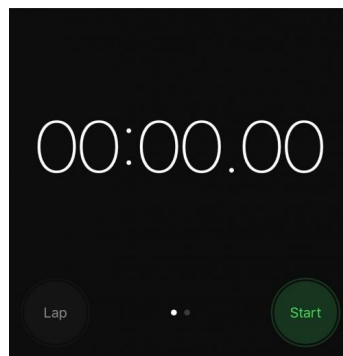


Figura 14. Cronómetro empleado

Sin embargo, para asegurar que todos los ensayos son medidos de igual forma y tratando de minimizar el posible error humano, se decide tomar dos puntos de referencia a la hora de iniciar y finalizar el proceso de medida, mostrados en la Figura 15.

Se toma como referencia inicial de medida el momento en que, una vez soltado el imán dentro del tubo, el vástago del obús desaparece por completo del campo visual, es decir, se encuentra completamente introducido en la tubería. En ese mismo instante, se comienza a medir el tiempo hasta llegar a la posición de referencia final, la cual coincide con la salida del imán por la tubería, es decir, hasta que el imán aparece en el campo visual. En ese preciso instante, se detiene el cronómetro y se toma el dato de la medida del tiempo.

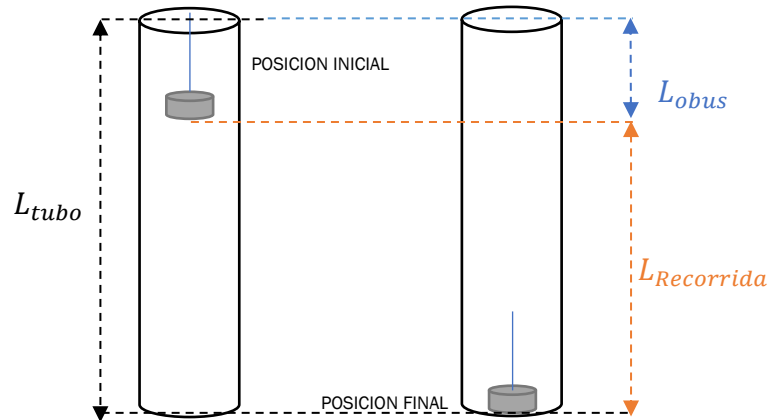


Figura 15. Esquema teórico del proceso de medida manual.

Para asegurar la mayor fidelidad posible con la realidad experimental, se realiza tres veces el mismo proceso de medida, tomando como resultado válido la media de éstos.

Una vez obtenida la media de las tres mediciones experimentales, es inmediato obtener la velocidad a la que se desplaza el imán, v_m , mediante la aplicación de la Ecuación 32.

Sin embargo, es necesario tener en cuenta que, con el sistema de referencia tomado a la hora de realizar la medida del tiempo, éste no se corresponde con el tiempo que tarda en recorrer la longitud de la tubería, sino con el tiempo que tarda desde la referencia inicial hasta la referencia final.

Teniendo en cuenta lo mencionado, se tiene:

$$v_m = \frac{\text{espacio}}{\text{tiempo}} = \frac{L_{\text{recorrida}}}{t}$$

Donde,

$$L_{\text{recorrida}} = L_{\text{tubo}} - L_{\text{obus}}$$

Por lo que si se sustituye lo anterior en la Ecuación 31, se tiene la expresión con la que se obtendrá el coeficiente de amortiguamiento magnético mediante la toma de datos manual.

$$C_{eq} = \frac{mgt}{L_{\text{recorrida}}} = \frac{mgt}{L_{\text{tubo}} - L_{\text{obus}}}$$

Ecuación 33. Cálculo experimental del coeficiente de amortiguación magnético medido manualmente.

3.1.2. Toma de datos mediante la célula de carga.

Una vez comentada la primera metodología aplicada para la toma de las medidas del tiempo, es lógico razonar si ésta es lo suficientemente precisa para el objetivo que se presenta, sobre todo al comprobar como para determinadas configuraciones, las cuales se comentarán en futuras páginas, los tiempos de medida son muy pequeños y por tanto los errores que se pueden cometer en la toma de datos, elevados.

Como consecuencia de todo ello, surge la necesidad de encontrar una segunda metodología alternativa de medida. Permitirá ésta comparar y confirmar si con la primera ya mencionada los resultados son válidos o de lo contrario, tomar los resultados de esta segunda como los correctos y desechar los anteriores.

Esta segunda forma de adquirir los datos estará basada en los mismos principios que la primera, es decir, en conseguir un sistema metódico y repetitivo que permita adquirir los datos de una forma correcta para su posterior análisis.

Para ello, se va a emplear una célula de carga cuyo rango de medida no sea inferior a las magnitudes que se están tratando, así como un hardware que permita la adquisición y análisis de los datos, y un software capaz de monitorizar todo lo anterior.

De este modo, los dispositivos empleados en esta segunda metodología de trabajo quedan de la siguiente manera:

- Una célula de carga con una capacidad máxima de carga nominal de 20 kilogramos, con una sensibilidad de $1.00 \pm 0.15 \frac{mV}{V}$. La célula de carga empleada, la cual se muestra a continuación en la Figura 16, presenta cuatro cables de salida, (una salida de V_{cc} , otra GND y por último dos salidas de señal), condición necesaria que hay que tener en cuenta a la hora de conectarlo al hardware elegido.



Figura 16. Célula de carga

- Un hardware de adquisición de datos, en este caso se ha empleado SIRIUS HD-STG, dispositivo mostrado en la Figura 17, que consta de 16 canales de entrada D-SUB, donde se procederá a conectar la célula de carga.

Las características técnicas del SIRIUS HD-STG se adjuntan en el [Anexo A]



Figura 17. Equipo SIRIUS HD-STG

- Un software que permita procesar los datos, para ello se empleará el propio facilitado por el fabricante, DewesoftX, en su versión más reciente.

Una vez comentados los dispositivos empleados para esta segunda metodología, el siguiente punto a destacar es el entorno experimental necesario para el correcto funcionamiento de todo lo anterior.

La idea será la comentada en el apartado anterior, fijar la tubería al tocho de madera empleado antes, para asegurar una posición fija y posteriormente lanzar el dispositivo, obús, que forman los imanes por dentro de la tubería.

La diferencia, como se ha indicado en líneas anteriores, se encuentra en la adquisición de los datos, que en esta ocasión vendrá dada por la lectura de la célula de carga junto con el dispositivo SIRIUS y monitorizada en directo a través del software instalado en el ordenador.

Para que todo lo anterior funcione de forma correcta, es necesario encontrar una forma de amarrar la tubería al tocho de madera, al mismo tiempo que la célula de carga se encuentre anexionada a la tubería y en voladizo respecto al tocho de madera y, por tanto, sea capaz de medir los esfuerzos que están ocurriendo durante la experimentación.

Para cumplir ambos objetivos, se decide modelar mediante el sistema CAD CATIA V5R2019, programa de uso extendido en el ámbito industrial, cuya licencia está facilitada por la Universidad de Valladolid, un soporte en el que se puedan fijar las tuberías de distinto diámetro, así como fijar la célula de carga a todo lo anterior.

En la Figura 18 se muestra el modelado en CATIA V5 del soporte ideado, donde se cumplen los requisitos anteriormente mencionados, existiendo una zona en forma de escuadra, que conforma un área de contacto lo suficientemente extensa para que la tubería se sitúe allí y, a través de los taladros realizados, se introduzca un tope que sirva para amarrar la tubería al soporte, como se puede observar en la Figura 19.

Del mismo modo, se observa también en la Figura 18 el alojamiento ideado que alberga la célula de carga y que hace que ésta sea solidaria a la tubería para poder así medir los esfuerzos que experimenta y por tanto, cumplir el otro requisito necesario a la hora de modelar el soporte.

En el [Anexo C] se adjuntan los planos de fabricación del soporte.

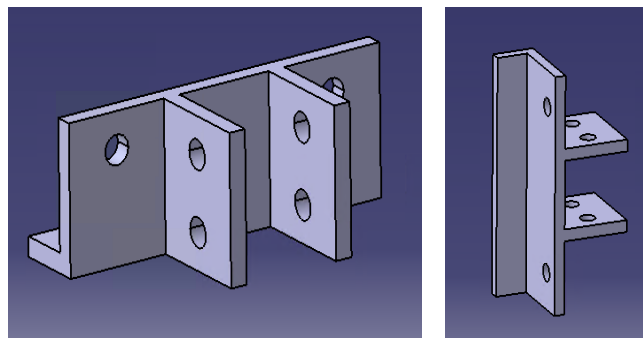


Figura 18. Modelado del soporte a emplear mediante CATIA V5R2019

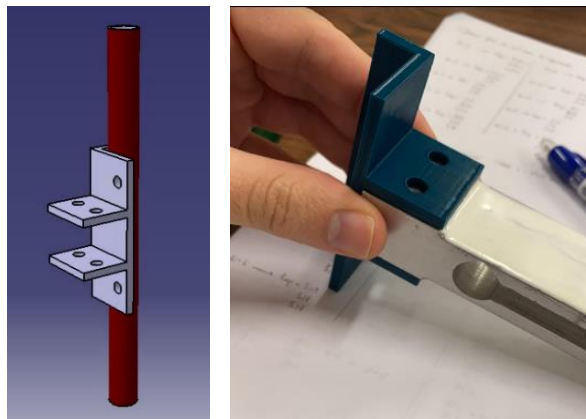


Figura 19. Montaje de la tubería y la célula de carga en el soporte.

Por tanto, una vez modelado el soporte descrito, se procede a su fabricación mediante la impresora 3D perteneciente al Laboratorio de Estructuras, obteniendo el producto de forma física, ambos mostrados en la Figura 20.

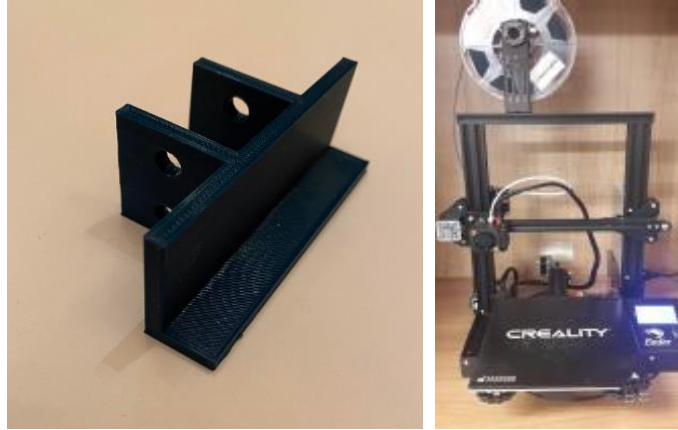


Figura 20. Impresora 3D empleada y modelo obtenido

Ya con el soporte fabricado, se monta en él la célula de carga, la tubería y se configura el entorno experimental que va a caracterizar esta segunda metodología de trabajo.



Figura 21. Dispositivo experimental para la medida con célula de carga

Una vez realizado lo anterior, con el montaje ya dispuesto según se muestra en la Figura 21, es necesario calibrar la célula de carga, de acuerdo con el Anejo C adjunto al presente trabajo, antes de comenzar con la toma de datos.

Al igual que en el anterior método de medida, el obús es soltado de tal forma que discurre a través del tubo. Sin embargo, en esta ocasión no se van a tomar medidas manuales, puesto que el proceso de adquisición de datos se va a realizar con el conjunto célula-hardware-software. Tampoco va a ser preciso en este caso tomar referencias a la hora de medir, puesto que va a ser la propia célula de carga la que registre los esfuerzos que tienen lugar dentro del tubo en el momento de introducir el imán, durante el transcurso de su movimiento hasta que éste haya finalmente haya abandonado por completo el tubo.

Teniendo en cuenta lo anterior, se tiene el siguiente esquema, mostrado en la Figura 22, donde se observa la nueva posición en la que va a comenzar el proceso de medida, así como el momento en que la célula deja de detectar el campo del imán y por finaliza el proceso de medida.

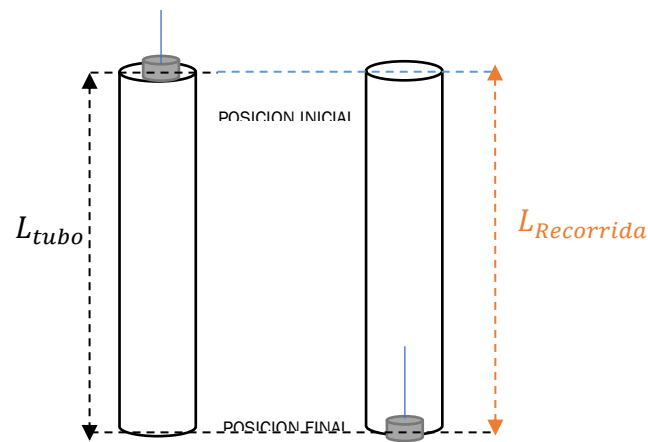


Figura 22. Esquema teórico del proceso de medida con célula de carga.

Las fuerzas que tengan lugar dentro del tubo, como bien se ha comentado, son medidas por la célula de carga, y monitorizadas al mismo tiempo en el software Dewesoft instalado en el ordenador, siendo un ejemplo de ello el esquema mostrado en la Figura 23.

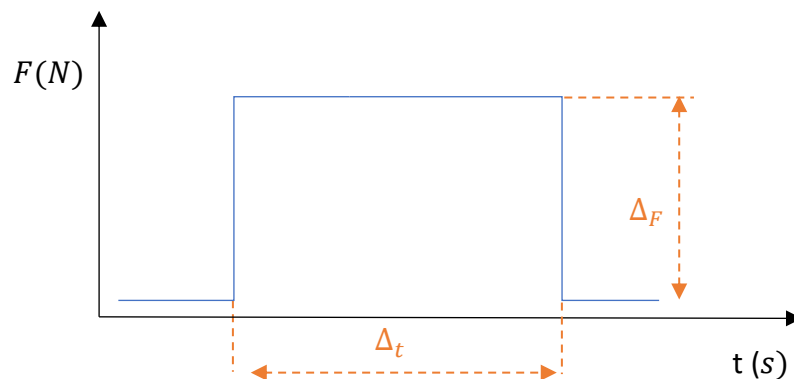


Figura 23. Esquema de lo monitorizado por SIRIUS-DEWESOFT

En dicha figura se representa de forma esquematizada los resultados que se van a monitorizar durante los procesos de medida. Aquí se va a poder observar la presencia de un salto en el valor de la fuerza medida, que permanecerá constante en el transcurso del tiempo hasta que se produzca un nuevo salto, donde la fuerza medida volverá a ser la del inicio.

Este salto en el valor de la fuerza, Δ_F , durante un determinado período de tiempo, Δ_t , mostrados en la Figura 23, se corresponden directamente con las fuerzas repulsivas fruto de las corrientes de Foucault inducidas por el imán durante su movimiento por el tubo.

Teniendo en cuenta lo anterior, se tiene para esta metodología que:

$$L_{recorrida} = L_{tubo}$$

$$\Delta_F = F_c$$

Donde se puede calcular la velocidad a la que se desplaza el imán según la Ecuación 32:

$$v_m = \frac{L_{tubo}}{\Delta_t}$$

Por tanto, el cálculo del coeficiente de amortiguamiento magnético es inmediato:

$$F_c = c_{eq} v_m$$

$$F_c = \Delta_F$$

$$C_{eq} = \frac{\Delta_F}{v_m}$$

Ecuación 34. Cálculo experimental del coeficiente de amortiguación magnético medido con SIRIUS.

3.2. Casos de estudio.

Una vez explicadas las metodologías de trabajo que se van a seguir en la experimentación, es necesario acotar qué es lo que se va a tratar de caracterizar, es decir, cuales van a ser los escenarios de estudio y el porqué de éstos.

3.2.1. Tipos de imanes.

Se ha decidido estudiar la caracterización de dos imanes distintos, tanto en dimensiones como en masa y fuerzas equivalentes de sujeción. No obstante, ambos presentan la misma dirección y tipo de magnetización

Los imanes se han elegido de NdFeB debido a que sus propiedades resultan adecuadas en comparación a otro tipo de magnetización, como pueda ser su alta densidad de flujo magnético, su coercitividad y su densidad de energía magnética. [12]

De este modo, los imanes elegidos y con los que se van a desarrollar las experimentaciones son los mostrados en la Figura 24 y en la Figura 25:

- Imán Ø12/5 mm, con una altura de 12 mm y una fuerza de sujeción $F = 4.4 \text{ kg}$.

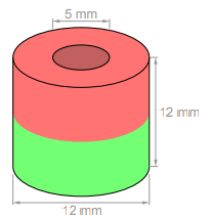


Figura 24. Primer imán empleado [13]

- Imán $\text{Ø}15/6$ mm, con una altura de 6 mm y una fuerza de sujeción equivalente a $F = 5.1$ kg.

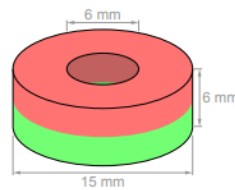


Figura 25. Segundo imán empleado. [14]

El resto de las propiedades de ambos imanes se recogen en el {Anexo B}.

3.2.2. Número y disposición de los imanes.

Una vez determinados los tipos de imanes que se van a caracterizar, la siguiente variable a considerar será el número de imanes que conformarán el obús, llegando a ser hasta seis al mismo tiempo, pues se toma esta cantidad como válida a fin de conseguir unos resultados fiables.

En cuanto a la disposición de los imanes en el dispositivo experimental, se tendrá en cuenta dos tipos de configuraciones, explicadas a continuación:

- A repulsión unos de otros. A priori esta configuración será la que mejores resultados presente, debido a la presencia de mayores líneas de campo.
- A atracción unos con otros. Esta disposición, por su parte, a priori será la que peores resultados otorgue.

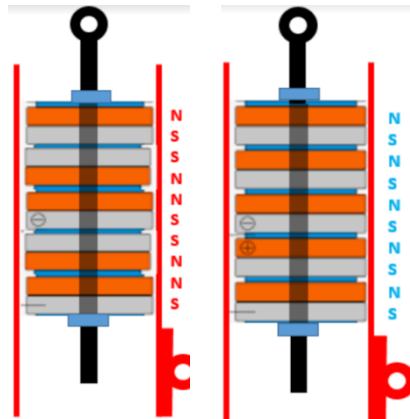


Figura 26. Disposición de los imanes.

3.2.3. Separación entre los imanes.

La siguiente variable de estudio es la separación de los imanes, teniendo tres posibilidades.

- Sin separación, con contacto entre ellos tanto a repulsión como a atracción.
- Con una separación de 4.5 mm, tanto a repulsión como a atracción.
- Con una separación de 9 mm en las disposiciones ya mencionadas.

Para conseguir la separación entre los imanes a atracción, se emplean unas arandelas de plástico, cuya masa es despreciable en comparación a la del imán, cada una de ellas con un grosor de 1.5 mm. Por ejemplo, para conseguir una separación de 4.5 mm se emplearán tres arandelas, cuya masa total seguirá siendo despreciable.

Para conseguir la separación de los imanes a repulsión, se considera las dimensiones del imán en concreto, y se calcula teniendo en cuenta la separación deseada entre cada uno de ellos, la longitud total que ocuparían en el obús. Una vez calculada, se realiza un taladro en la varilla de madera a esa distancia y se introduce un tope mecánico (se ha empleado una pequeña varilla metálica, pudiendo ser válida cualquier otra opción). Una vez puesto el tope, los imanes se dejan libres y serán ellos mismos los que, con sus fuerzas repulsivas, unos a otros se coloquen de tal forma que equidisten la distancia deseada.

Un ejemplo de lo anterior se observa en la Figura 27.



Figura 27. Imanes separados a repulsión.

3.2.4. Masa añadida a los imanes.

Se trata de la variable con menos importancia de todas con las que se va a trabajar puesto que, si se le dedica un razonamiento previo, el coeficiente de amortiguamiento es algo intrínseco al imán, independiente de la masa añadida que se le ponga, siempre y cuando ésta no modifique sus propiedades magnéticas. No obstante, al añadir masa los tiempos cambian, por lo que resulta interesante comprobar si esto afecta al coeficiente de amortiguamiento.

Sin embargo, se le dedicará un estudio para uno sólo de los imanes, a fin de comprobar si este razonamiento es correcto y, por tanto, lo real coincide con lo ideal.

Para ello, se dispondrá de dos tuercas, cada una con una masa de 4.4 gramos y 5.1 gramos respectivamente, las cuales se dispondrán en el extremo del obús lo bastante alejadas de los imanes, para asegurar que no adulteran su comportamiento. Para ello se empleará el tope mecánico mencionado anteriormente.

3.2.5. Holgura entre el tubo y el imán.

Resulta interesante también estudiar el comportamiento de los imanes según la distancia que exista entre ellos y el elemento conductor, pues como se ha indicado en el [Capítulo 2], mayores serán las corrientes parásitas generadas cuanto menor sea la distancia entre el imán y la placa conductora.

Para tal fin, se procede al estudio de los imanes en distintos tubos, todos ellos con el mismo espesor y mismas longitudes, pero con distintos diámetros para tener, por tanto, distintas separaciones entre los imanes y el elemento conductor. Se tienen, por tanto, los siguientes tubos:

- Tubo de cobre de $\varnothing_{ext} = 15.1$ mm , $\varnothing_{int} = 13$ mm y un metro de longitud.

- Tubo de cobre de de $\varnothing_{ext} = 17.1 \text{ mm}$, $\varnothing_{int} = 16 \text{ mm}$ y un metro de longitud.
- Tubo de cobre de de $\varnothing_{ext} = 25.1 \text{ mm}$, $\varnothing_{int} = 23 \text{ mm}$ y un metro de longitud.



Figura 28. Tubo de cobre.

Donde se ha empleado el cobre como material no ferromagnético frente al aluminio, debido a sus mejores propiedades conductoras y su impermeabilidad magnética. [15]

3.2.6. Espesor del elemento conductor.

Por último, se considera estudiar también el comportamiento del imán según sea el grosor del elemento conductor. Sin embargo, se plantea el problema de la falta de disponibilidad comercial de tubos de distinto espesor, por lo que se idea una solución manual.

Para ello, aprovechando los tubos de los que se dispone para el desarrollo experimental y sus concentricidades, se colocará el tubo de menor diámetro dentro de uno de diámetro mayor para lograr de este modo un único tubo, pero con el espesor deseado, como se observa en la Figura 29.



Figura 29. Tubos concéntricos para aumentar el espesor.

3.3. Resumen y consideraciones previas.

Como se ha podido apreciar a lo largo del presente capítulo, son extensas las variables a tratar y múltiples sus posibles combinaciones.

Consecuencia de ello surge este apartado, dedicando unas líneas que sirvan de guía, pretendiendo resumir y orientar el desarrollo experimental, estableciendo cuales son las combinaciones que se van a estudiar.

- Para cada tubo de cobre, de $\varnothing_{int} = 13$ mm $\varnothing_{int} = 16$ mm, con sus respectivos imanes de \varnothing 12 mm y \varnothing 15 mm, se estudia la combinación de hasta seis imanes, a repulsión y a atracción, y con distintas separaciones. Es decir, para cada imán se estudia, con la misma holgura, el efecto de la combinación de hasta 6 imanes, a repulsión o atracción, y con distintas separaciones.
- Para el imán de \varnothing 15 mm, se estudia el efecto de la masa según la separación de éstos, tanto con el tubo de $\varnothing_{int} = 16$ mm como para el tubo de $\varnothing_{int} = 23$ mm. Por tanto, se estudia, para un mismo imán, el efecto de la masa según la holgura y la separación entre imanes.
- Se estudia el imán de \varnothing 12 mm en el resto de los tubos con distintos espesores, variando la combinación de imanes, su distancia y su disposición.
- Se estudia el imán de \varnothing 15 mm con distintas masas y aumentando el espesor, manteniendo fija la holgura.

CAPITULO 4

RESULTADOS-CALIBRADO EXPERIMENTAL

4. RESULTADOS

Consecuencia de las metodologías de trabajo explicadas en el capítulo anterior, se van a obtener unos datos con una precisión mayor o menos, según sea el método empleado.

En este capítulo se van a recoger los datos de medida obtenidos con cada metodología de trabajo, así como sus resultados experimentales junto con una explicación de éstos.

Posteriormente, se van a graficar los resultados, a fin de poder comparar las tendencias que siguen los coeficientes caracterizados según las variables que se modifiquen, para así poder llegar a unas conclusiones válidas y establecer un criterio de elección.

4.1. Resultados con la toma de datos manual

En este apartado se agrupan las medidas tomadas con el cronómetro para cada configuración tratada, así como el post procesado de los datos obtenidos, con las correspondientes caracterizaciones experimentales del coeficiente de amortiguamiento para cada una de dichas configuraciones.

Con el objetivo de agrupar todos estos datos y resultados de una forma clara y ordenada, se van a clasificar los datos según sea el tubo utilizado, reorganizando dentro de esta clasificación acorde a la disposición que presenten los imanes, así como la distancia entre ellos.

4.1.1. Tubo de cobre de \varnothing_{INT} 13 mm y espesor de un mm.

Para el tubo cobre de $\varnothing_{int} = 13$ mm y espesor de 1 mm, se realizan los diferentes ensayos para obuses con un distinto número de imanes y distancias entre ellos diferentes, pudiendo estar configurados a repulsión y a atracción.

A continuación, se recogen en la Tabla 1 cada una de las medidas tomadas junto con la caracterización del coeficiente de amortiguación magnético para cada una de éstas.

A modo de ejemplo que sirva como aplicación de la metodología vista en el [Capítulo 3], se desarrollan los cálculos para una de estas medidas, realizándose de forma análoga para las demás.

4.1.1.1. Imán \varnothing 12 mm.

Sin separación entre los imanes, permaneciendo éstos en contacto, se tienen las siguientes medidas y resultados recogidos en la Tabla 1.

ATRACCIÓN					
NUMERO IMANES	Ensayo 1 (s)	Ensayo 2 (s)	Ensayo 3 (s)	Tiempo medio (s)	C_{eq} (Ns/m)
1	15,12	15,15	15,13	15,13	1,57
2	9,98	10,16	10,03	10,05	1,9636
3	7,11	7,07	7,14	7,107	2,0352
4	6,03	6,05	5,98	6,02	2,2725
5	5,31	5,27	5,25	5,27	2,4728
6	4,83	4,86	4,79	4,82	2,701
REPULSIÓN					
1	15,12	15,15	15,13	15,13	1,57
2	22,27	22,02	22,22	22,17	4,32
3	24,02	24,05	24,26	24,11	6,90
4	25,26	25,29	25,39	25,31	9,55
5	25,65	25,82	25,75	25,74	12,06
6	26,07	26,29	26,38	26,24	14,69

Tabla 1. Datos y resultados imán \varnothing 12 mm, sin separación, tubo de \varnothing_{INT} 13 mm y $e=1$ mm

Sirva de ejemplo las medidas tomadas a repulsión para un numero de imanes $N = 1$, se procede a explicar el cálculo de C_{eq} aplicando la Ecuación 33 (véase el [Capítulo 3]).

Por tanto, se tiene que:

$$C_{eq} = \frac{mgt}{L_{recorrida}} = \frac{mgt}{L_{tubo} - L_{obus}}$$

Donde m es la masa del obús completo, teniendo en cuenta la masa del imán o de los imanes, la masa de la varilla de madera, así como la masa añadida si la hubiera.

Sustituyendo:

$$C_{eq} = \frac{mgt}{L_{tubo} - L_{obus}} = \frac{9.81 \cdot 0,0096 \cdot 15.13}{1 - 0,9034} = 1,5759 \frac{Ns}{m}$$

Para el resto de los coeficientes de amortiguación caracterizados mediante esta metodología, se realizará de forma análoga a la anterior.

En la Tabla 2 se muestran los datos y resultados para una separación entre imanes de 4.5 mm.

REPULSION					
NUMERO IMANES	Ensayo 1 (s)	Ensayo 2 (s)	Ensayo 3 (s)	Tiempo medio (s)	C_{eq} (Ns/m)

1	15,12	15,15	15,13	15,13	1,5759
2	20,03	19,78	20,15	19,98	3,9026
3	20,94	21,62	21,48	21,35	6,1133
4	22,6	22,57	22,55	22,57	8,5215
5	23,02	23,02	23,38	23,14	10,8440
6	23,01	23,18	23,26	23,15	12,9582
ATRACCION					
NUMERO IMANES	Ensayo 1 (s)	Ensayo 2 (s)	Ensayo 3 (s)	Tiempo medio (s)	C_{eq} (Ns/m)
1	15,12	15,15	15,13	15,13	1,5759
2	11,9	11,95	12,02	11,95	2,3346
3	10,44	10,51	10,37	10,44	2,9898
4	9,63	9,83	9,77	9,74	3,6781
5	9,26	9,28	9,3	9,28	4,3488
6	9,06	8,53	9,03	8,87	4,9668

Tabla 2. Datos y resultados imán \varnothing 12 mm, 4.5 mm de separación, tubo de \varnothing_{INT} 13 mm y $e=1$ mm

Por último, para una separación entre imanes de 9 mm se tienen los resultados mostrados en la Tabla 3.

REPULSION					
NUMERO IMANES	Ensayo 1 (s)	Ensayo 2 (s)	Ensayo 3 (s)	Tiempo medio (s)	C_{eq} (Ns/m)
1	13,12	12,84	12,92	12,96	1,4539
2	16,26	16,18	16,26	16,23	3,4146
3	16,64	17,25	17,21	17,03	5,2550
4	17,7	17,9	17,83	17,81	7,2429
5	18,14	18,17	18,27	18,19	9,1847
6	18,48	18,41	18,43	18,44	11,1194
ATRACCION					
NUMERO IMANES	Ensayo 1 (s)	Ensayo 2 (s)	Ensayo 3 (s)	Tiempo medio (s)	C_{eq} (Ns/m)
1	13,12	12,84	12,92	12,96	1,4539
2	11,61	12,23	12,29	12,04	2,5333
3	11,89	11,91	12,01	11,93	3,6826
4	11,82	11,78	11,8	11,8	4,7987
5	11,82	11,73	11,63	11,72	5,9201
6	11,57	11,68	11,49	11,58	6,9827

Tabla 3. Datos y resultados imán \varnothing 12 mm, 9 mm de separación, tubo de \varnothing_{INT} 13 mm y $e=1$ mm

4.1.2. Tubo de cobre de \varnothing_{INT} 16 mm y espesor de un mm.

De forma análoga al apartado anterior, para el tubo cobre de $\varnothing_{int} = 16$ mm y espesor de 1 mm se van a realizar los diferentes ensayos teniendo en cuenta en este caso, los dos imanes disponibles, distintas separaciones entre ellos, así como se comprobará el efecto de la masa sobre uno de ellos.

4.1.2.1. Imán Ø 12 mm.

En esta ocasión, se experimenta primer con el imán de Ø 12 mm de igual forma que la hecha anteriormente, diferenciándose en que el tubo será de mayor diámetro y, por tanto, la distancia hasta el elemento conductor mayor.

Se comienza por tanto la experimentación sin separación entre dichos imanes. Los datos tomados, así como los resultados obtenidos, se recogen en la Tabla 4.

REPULSION					
NUMERO IMANES	Ensayo 1 (s)	Ensayo 2 (s)	Ensayo 3 (s)	Tiempo medio (s)	C_{eq} (Ns/m)
1	13,77	1,68	1,75	5,73	0,5970
2	19,11	19,02	19,14	19,09	3,7275
3	21,81	21,85	21,78	21,81	6,2470
4	22,71	22,56	22,69	22,65	8,5517
5	23,63	22,8	23,54	23,32	10,93
6	24,07	23,89	23,93	23,96	13,4135
ATRACCION					
NUMERO IMANES	Ensayo 1 (s)	Ensayo 2 (s)	Ensayo 3 (s)	Tiempo medio (s)	C_{eq} (Ns/m)
1	13,77	1,68	1,75	5,73	0,5970
2	8,99	9,05	8,89	8,97	1,7528
3	6,99	6,64	7,04	6,89	1,9731
4	5,95	5,92	5,95	5,94	2,2423
5	4,94	5,07	5,03	5,01	2,3493
6	4,51	4,63	4,57	4,57	2,5580

Tabla 4 Datos y resultados imán Ø 12 mm, sin separación, tubo de Ø_{INT} 16 mm y e= 1mm

El siguiente paso es caracterizar el coeficiente de amortiguamiento separando los imanes entre sí una distancia de 4.5 mm. En la Tabla 5 se puede observar tanto las medidas tomadas, como los resultados:

REPULSION					
NUMERO IMANES	Ensayo 1 (s)	Ensayo 2 (s)	Ensayo 3 (s)	Tiempo medio (s)	C_{eq} (Ns/m)
1	13,77	13,74	13,8	13,77	1,4340
2	17,45	17,49	17,41	17,45	3,4073
3	19,78	19,83	19,91	19,84	5,6818
4	20,48	20,76	20,71	20,65	7,7955
5	21,39	21,41	21,28	21,36	10,0099
6	21,32	21,44	21,29	21,35	11,9507
ATRACCION					
NUMERO IMANES	Ensayo 1 (s)	Ensayo 2 (s)	Ensayo 3 (s)	Tiempo medio (s)	C_{eq} (Ns/m)
1	13,77	13,74	13,8	13,77	1,4340
2	10,09	11,01	10,83	10,64	2,0782
3	9,73	9,71	9,72	9,72	2,7836
4	8,86	8,92	8,97	8,91	3,3661

5	8,55	8,49	8,57	8,53	4,0005
6	8,1	8,23	8,26	8,19	4,5881

Tabla 5. Datos y resultados imán \varnothing 12 mm, 4.5 mm de separación, tubo de \varnothing_{INT} 16 mm y $e=1mm$

Por último, se repite el proceso para una separación entre imanes de 9 mm, agrupado en la Tabla 6.

REPULSION					
NUMERO IMANES	Ensayo 1 (s)	Ensayo 2 (s)	Ensayo 3 (s)	Tiempo medio (s)	C_{eq} (Ns/m)
1	13,77	13,74	13,8	13,77	1,6735
2	14,48	14,42	14,51	14,47	3,1790
3	15,67	15,89	15,56	15,70	4,9925
4	16,5	16,26	16,42	16,39	6,8200
5	16,56	16,46	16,77	16,59	8,5338
6	16,79	16,99	16,99	16,92	10,3630
ATRACCION					
NUMERO IMANES	Ensayo 1 (s)	Ensayo 2 (s)	Ensayo 3 (s)	Tiempo medio (s)	C_{eq} (Ns/m)
1	13,77	13,74	13,8	13,77	1,6735
2	12,84	12,74	12,67	12,75	2,8011
3	10,8	10,94	10,99	10,91	3,4678
4	10,37	10,47	10,83	10,5566	4,3918
5	10,6	10,63	10,86	10,6966	5,5001
6	10,62	10,87	10,59	10,6933	6,5481

Tabla 6. Datos y resultados imán \varnothing 12 mm, 9 mm de separación, tubo de \varnothing_{INT} 16 mm y $e=1mm$.

4.1.2.1. Imán \varnothing 15 mm.

Al igual que se ha realizado con el imán de \varnothing 12 mm, se procede a estudiar el comportamiento del imán de \varnothing 15 mm con la menor holgura posible. Sin embargo, en esta primera metodología de trabajo sólo se podrá estudiar con los imanes dispuestos a repulsión, debido a las dificultades experimentales que se han tenido a la hora de medir tiempos muy pequeños.

Posteriormente, se estudiará el comportamiento del imán ante una presencia de masa que no altere sus propiedades, para comprobar si el modelo real cumple con lo ideal.

Hecha esta aclaración, se comienza con la toma de medidas y de resultados para el imán de \varnothing 15 mm sin separación entre imanes.

REPULSION					
NUMERO IMANES	Ensayo 1 (s)	Ensayo 2 (s)	Ensayo 3 (s)	Tiempo medio (s)	C_{eq} (Ns/m)
1	8,53	8,61	8,52	8,55	0,8839
2	11,63	10,95	11,58	11,39	2,0209
3	11,2	11,29	11,16	12,10	2,8224
4	11,51	11,22	11,45	12,50	3,7115
5	11,52	11,67	11,62	12,61	4,6402

6	11,82	11,79	11,85	13,05	5,6032
---	-------	-------	-------	-------	--------

Tabla 7. Datos y resultados imán \varnothing 15 mm, sin separación, tubo de \varnothing_{INT} 16 mm y $e=1$ mm.

Posteriormente se repite el ensayo, esta vez separando los imanes unos de otros una distancia de 4.5 mm:

REPULSION					
NUMERO IMANES	Ensayo 1 (s)	Ensayo 2 (s)	Ensayo 3 (s)	Tiempo medio (s)	C_{eq} (Ns/m)
1	8,53	8,61	8,52	8,55	0,8839
2	11,51	11,31	11,37	11,39	2,0227
3	12,16	12,11	12,04	12,10	3,0455
4	12,55	12,52	12,45	12,50	4,0742
5	12,56	12,72	12,56	12,61	5,0441
6	12,87	13,34	12,95	13,05	6,1879

Tabla 8. Datos y resultados imán \varnothing 15 mm, 4.5 mm de separación, tubo de \varnothing_{INT} 16 mm y $e=1$ mm

Finalmente, con una distancia entre imanes de 9 mm, se realiza de nuevo el ensayo obteniendo:

REPULSION					
NUMERO IMANES	Ensayo 1 (s)	Ensayo 2 (s)	Ensayo 3 (s)	Tiempo medio (s)	C_{eq} (Ns/m)
1	6,1	6,02	6,14	6,08	0,7873
2	7,92	7,93	8,05	7,96	1,6782
3	9,15	9,23	9,22	9,2	2,6860
4	9,87	9,91	9,84	9,87	3,6854
5	10,33	10,21	10,22	10,25	4,6609
6	10,59	10,99	10,79	10,79	5,7822

Tabla 9. Datos y resultados imán \varnothing 15 mm, 9 mm de separación, tubo de \varnothing_{INT} 16 mm y $e=1$ mm.

Con todo lo analizado hasta el momento, en una primera aproximación se habría estudiado la influencia de la holgura para el imán de \varnothing 12 mm, así como el comportamiento del imán de \varnothing 15 con una holgura mínima.

Sin embargo, como se introducía al comienzo del presente trabajo, se va a estudiar también el efecto de la masa añadida al imán para distintas configuraciones de éstos, donde los datos son expuestos en las tablas mostradas a continuación, comenzando sin separación entre imanes:

MASA AÑADIDA DE 4.4 GRAMOS / REPULSION					
NUMERO IMANES	Ensayo 1 (s)	Ensayo 2 (s)	Ensayo 3 (s)	Tiempo medio (s)	C_{eq} (Ns/m)
1	6	6,06	5,66	5,90	0,9023
2	8,96	8,82	8,98	8,92	2,0240
3	10,14	9,71	9,97	9,94	2,9924
4	10,83	10,68	10,86	10,79	4,0483
5	10,46	10,73	11,06	10,75	4,8303
6	10,73	10,76	10,74	10,74	5,6238
MASA AÑADIDA DE 9.6 GRAMOS / REPULSION					

NUMERO IMANES	Ensayo 1 (s)	Ensayo 2 (s)	Ensayo 3 (s)	Tiempo medio (s)	C_{eq} (Ns/m)
1	4,27	4,32	4,31	4,3	0,6569
2	7,2	7,07	7,47	7,24	1,6443
3	8,56	8,58	8,39	8,51	2,5619
4	9,29	9,06	9,43	9,26	3,4743
5	9,67	9,68	9,75	9,7	4,3585
6	10	9,95	10,12	10,02	5,2469

Tabla 10. Datos y resultados imán \varnothing 15 mm, sin separación, masa añadida, tubo de \varnothing_{INT} 16 mm y $e=1$ mm.

Con la Tabla 10 serviría para hacer una primera aproximación de la influencia de la masa, sin embargo, se estudia para el resto de las configuraciones, con el fin de seguir un orden.

Con una separación de 4.5 mm se obtienen los siguientes resultados:

MASA AÑADIDA DE 4.4 GRAMOS / REPULSION					
NUMERO IMANES	Ensayo 1 (s)	Ensayo 2 (s)	Ensayo 3 (s)	Tiempo medio (s)	C_{eq} (Ns/m)
1	6,82	6,8	6,74	6,78	1,0368
2	9,23	9,28	9,15	9,22	2,0921
3	10,41	10,13	10,14	10,22	3,0787
4	10,85	10,73	10,84	10,80	4,0546
5	11,4	11,24	11,38	11,34	5,0954
6	11,66	11,64	11,78	11,69	6,1211
MASA AÑADIDA DE 9.6 GRAMOS / REPULSION					
NUMERO IMANES	Ensayo 1 (s)	Ensayo 2 (s)	Ensayo 3 (s)	Tiempo medio (s)	C_{eq} (Ns/m)
1	4,21	4,27	4,19	4,22	0,8871
2	7,23	7,29	7,31	7,27	2,0680
3	8,5	8,32	8,38	8,4	3,0100
4	9,42	9,45	9,43	9,43	4,0797
5	10,35	10,32	10,33	10,33	5,2351
6	10,8	10,7	10,67	10,72	6,2277

Tabla 11. Datos y resultados imán \varnothing 15 mm, 4.5 mm de separación, masa añadida, tubo de \varnothing_{INT} 16 mm y $e=1$ mm.

Por último, para una distancia entre imanes de 9 mm:

MASA AÑADIDA DE 4.4 GRAMOS / REPULSION					
NUMERO IMANES	Ensayo 1 (s)	Ensayo 2 (s)	Ensayo 3 (s)	Tiempo medio (s)	C_{eq} (Ns/m)
1	4,39	4,47	4,46	4,44	0,8149
2	6,76	6,67	6,81	6,74	1,7869
3	7,8	7,8	7,92	7,84	2,7139
4	8,52	8,59	8,63	8,58	3,6677
5	9,02	9,02	9,1	9,04	4,6028
6	9,56	9,5	9,55	9,53	5,6275
MASA AÑADIDA DE 9.6 GRAMOS / REPULSION					
NUMERO IMANES	Ensayo 1 (s)	Ensayo 2 (s)	Ensayo 3 (s)	Tiempo medio (s)	C_{eq} (Ns/m)

1	3,21	3,34	3,34	3,29	0,8122
2	5,58	5,63	5,63	5,61	1,8394
3	7	7,13	7,13	7,08	2,8984
4	7,86	7,91	7,81	7,86	3,8538
5	8,63	8,77	8,63	8,67	4,9597
6	8,82	8,69	9,01	8,84	5,7718

Tabla 12. Datos y resultados imán \varnothing 15 mm, 9 mm de separación, masa añadida, tubo de \varnothing_{INT} 16 mm y $e=1$ mm.

4.1.3. Tubo de cobre de \varnothing_{INT} 23 mm y espesor de un mm.

Continuando con la toma de datos y análisis de estos, se trabaja esta vez con el tubo de cobre de \varnothing_{INT} 23 milímetros, tratando de estudiar el comportamiento de los imanes al aumentar la holgura.

Al igual que en el caso anterior, se toman los datos únicamente a repulsión, debido a que en una primera aproximación a lo largo de todo lo obtenido se observa como ésta es la configuración más provechosa, y debido a las dificultades a la hora de medir tiempos pequeños.

4.1.3.1. Imán \varnothing 12 mm.

Siguiendo la misma estructura que en casos anteriores, se tienen los siguientes datos y coeficientes de amortiguamiento sin separación entre imanes:

REPULSION					
NUMERO IMANES	Ensayo 1 (s)	Ensayo 2 (s)	Ensayo 3 (s)	Tiempo medio (s)	C_{eq} (Ns/m)
1	4,79	4,92	4,79	4,83	0,5033
2	5,36	5,48	5,23	5,35	1,0459
3	4,59	4,65	4,66	4,63	1,3269
4	4,41	4,45	4,49	4,45	1,6799
5	4,52	4,43	4,47	4,47	2,0963
6	4,72	4,71	4,72	4,71	2,6401

Tabla 13. Datos y resultados imán \varnothing 12 mm, sin separación, tubo de \varnothing_{INT} 23 mm y $e=1$ mm.

Para una separación entre imanes de 4.5 mm, se tiene en este caso:

REPULSION					
NUMERO IMANES	Ensayo 1 (s)	Ensayo 2 (s)	Ensayo 3 (s)	Tiempo medio (s)	C_{eq} (Ns/m)
1	4,79	4,92	4,79	4,83	0,5033
2	5,36	5,5	5,11	5,32	1,0394
3	5,11	5,08	4,92	5,03	1,4424
4	5,14	5,12	5,04	5,1	1,9252
5	5,3	5,31	5,3	5,30	2,4852
6	5,5	5,44	5,43	5,45	3,0543

Tabla 14. Datos y resultados imán \varnothing 12 mm, 4.5 mm de separación, tubo de \varnothing_{INT} 23 mm y $e=1$ mm.

En el caso de separar los imanes una distancia de 9 mm:

REPULSION					
NUMERO IMANES	Ensayo 1 (s)	Ensayo 2 (s)	Ensayo 3 (s)	Tiempo medio (s)	C_{eq} (Ns/m)
1	3,99	4,19	3,61	3,93	0,4773
2	4,4	4,52	4,39	4,43	0,9747
3	4,65	4,46	4,38	4,49	1,4293
4	4,61	4,46	4,52	4,53	1,8846
5	4,71	4,73	4,65	4,69	2,4149
6	4,64	4,81	4,71	4,72	2,8903

Tabla 15. Datos y resultados imán \varnothing 12 mm, 9 mm de separación, tubo de \varnothing_{INT} 23 mm y $e=1$ mm.

4.1.3.1. Imán \varnothing 15 mm.

Se realiza del mismo modo que en el apartado anterior, con la salvedad de que en esta ocasión el imán presenta mayor holgura respecto del conductor.

Se estudiará el comportamiento a repulsión a distintas distancias de separación, así como con diferentes masas añadidas.

Se comienza el estudio con los imanes de \varnothing 15 milímetros en contacto:

REPULSION					
NUMERO IMANES	Ensayo 1 (s)	Ensayo 2 (s)	Ensayo 3 (s)	Tiempo medio (s)	C_{eq} (Ns/m)
1	4,4	4,46	4,85	4,57	0,4729
2	5,77	5,59	5,77	5,71	1,0134
3	5,04	5,12	4,92	5,02	1,2648
4	4,53	4,51	4,46	4,5	1,4659
5	4,04	4,22	4,2	4,15	1,6609
6	4	3,93	3,83	3,92	1,8582

Tabla 16. Datos y resultados imán \varnothing 15 mm, sin separación, tubo de \varnothing_{INT} 23 mm y $e=1$ mm.

Posteriormente se separan los imanes, como se viene haciendo durante toda la experimentación, una distancia de 4.5 mm obteniendo:

REPULSION					
NUMERO IMANES	Ensayo 1 (s)	Ensayo 2 (s)	Ensayo 3 (s)	Tiempo medio (s)	C_{eq} (Ns/m)
1	4,4	4,46	4,85	4,57	0,4722
2	6,03	6,16	6,05	6,08	1,0791
3	5,77	5,75	5,77	5,76	1,4502
4	5,79	5,9	5,76	5,81	1,8948
5	5,71	5,7	5,62	5,67	2,2701
6	5,65	5,75	5,76	5,72	2,7115

Tabla 17. Datos y resultados imán \varnothing 15 mm, 4.5 mm de separación, tubo de \varnothing_{INT} 23 mm y $e=1$ mm.

Para finalizar, separando los imanes una distancia de 9 mm, se tiene:

REPULSION					
NUMERO IMANES	Ensayo 1 (s)	Ensayo 2 (s)	Ensayo 3 (s)	Tiempo medio (s)	C_{eq} (Ns/m)
1	4,07	3,88	3,93	3,96	0,5122
2	4,7	4,93	4,91	4,84	1,0209
3	5,04	5,04	5,03	5,03	1,4705
4	5,04	5,17	5,12	5,11	1,9074
5	5,05	5,12	5,03	5,06	2,3032
6	5,19	5,18	5,18	5,18	2,7776

Tabla 18. Datos y resultados imán \varnothing 15 mm, 9 mm de separación, tubo de \varnothing_{INT} 23 mm y $e=1$ mm.

A continuación, se plantea la experimentación añadiendo masa añadida al imán de \varnothing 15 mm, para comprobar si la holgura, en presencia de masa añadida, afecta al coeficiente de amortiguación.

Sin separación entre los imanes se obtienen los siguientes resultados:

MASA AÑADIDA DE 4.4 GRAMOS / REPULSION					
NUMERO IMANES	Ensayo 1 (s)	Ensayo 2 (s)	Ensayo 3 (s)	Tiempo medio (s)	C_{eq} (Ns/m)
1	3,1	3,15	3,07	3,10	0,4746
2	4,4	4,53	4,35	4,42	1,0044
3	4,51	4,4	4,28	4,39	1,3236
4	4,91	4,45	4,39	4,58	1,7196
5	4,52	4,51	4,46	4,49	2,0205
6	3,92	3,87	3,94	3,91	2,0467
MASA AÑADIDA DE 9.6 GRAMOS / REPULSION					
NUMERO IMANES	Ensayo 1 (s)	Ensayo 2 (s)	Ensayo 3 (s)	Tiempo medio (s)	C_{eq} (Ns/m)
1	2,21	2,17	2,22	2,2	0,4621
2	3,72	3,86	3,8	3,79	1,0780
3	4,27	4,37	4,26	4,3	1,5408
4	4,14	4,26	4,36	4,25	1,8395
5	3,94	3,93	3,8	3,89	1,9707
6	3,7	3,8	3,68	3,72	2,1643

Tabla 19. Datos y resultados imán \varnothing 15 mm, sin separación, masa añadida y tubo de \varnothing_{INT} 23 mm y $e=1$ mm.

Con una separación de 4.5 mm:

MASA AÑADIDA DE 4.4 GRAMOS / REPULSION					
NUMERO IMANES	Ensayo 1 (s)	Ensayo 2 (s)	Ensayo 3 (s)	Tiempo medio (s)	C_{eq} (Ns/m)
1	3,42	3,33	3,39	3,38	0,5163
2	5,12	4,91	4,91	4,98	1,1300
3	5,12	5,03	5,04	5,06	1,5243
4	5,11	5,133	5,1	5,11	1,9188
5	5,2	5,11	5,13	5,14	2,3125
6	5,23	5,17	5,21	5,20	2,7238
MASA AÑADIDA DE 9.6 GRAMOS / REPULSION					
NUMERO IMANES	Ensayo 1 (s)	Ensayo 2 (s)	Ensayo 3 (s)	Tiempo medio (s)	C_{eq} (Ns/m)

1	3,8	3,72	3,69	3,73	0,5708
2	4,12	4,05	4,2	4,12	0,9356
3	4,19	4,46	4,6	4,41	1,3296
4	4,86	4,73	4,78	4,79	1,7971
5	4,64	4,84	4,93	4,80	2,1583
6	4,91	4,87	4,92	4,9	2,5650

Tabla 20. Datos y resultados imán \varnothing 15 mm, 4.5 mm cd separación, masa añadida y tubo de \varnothing_{INT} 23 mm y e= 1mm.

Por último, considerando una distancia de separación entre imanes de 9 mm:

MASA AÑADIDA DE 4.4 GRAMOS / REPULSION					
NUMERO IMANES	Ensayo 1 (s)	Ensayo 2 (s)	Ensayo 3 (s)	Tiempo medio (s)	C_{eq} (Ns/m)
1	3,52	3,43	3,45	3,46	0,6363
2	4,19	4,19	4,05	4,14	1,0974
3	4,47	4,45	4,42	4,44	1,5393
4	4,72	4,84	4,89	4,81	2,0590
5	4,79	4,58	4,61	4,66	2,3709
6	4,89	4,9	4,99	4,92	2,9071
MASA AÑADIDA DE 9.6 GRAMOS / REPULSION					
NUMERO IMANES	Ensayo 1 (s)	Ensayo 2 (s)	Ensayo 3 (s)	Tiempo medio (s)	C_{eq} (Ns/m)
1	3,3	3,25	3,32	3,29	0,6039
2	3,4	3,36	3,41	3,39	0,8978
3	3,99	4,07	3,99	4,01	1,3904
4	4,38	4,45	4,33	4,38	1,8752
5	4,25	4,19	4,39	4,27	2,1759
6	4,46	4,52	4,45	4,47	2,6416

Tabla 21 Datos y resultados imán \varnothing 15 mm, 9 mm cd separación, masa añadida y tubo de \varnothing_{INT} 23 mm y e= 1mm.

4.1.4. Tubo de cobre de \varnothing_{INT} 13 mm y espesor de dos mm.

Con objetivo de poder caracterizar el coeficiente de amortiguamiento magnético en función del espesor del material conductor, se realizan las mismas medidas que para el espesor de 1 mm, pero teniendo en cuenta el nuevo grosor del tubo empleado.

Se realizarán las medidas únicamente a repulsión.

4.1.4.1. Imán \varnothing 12 mm.

Se tiene, por tanto, los siguientes valores del coeficiente de amortiguación sin separación entre los imanes:

REPULSION				
NUMERO IMANES	Ensayo 1 (s)	Ensayo 2 (s)	Tiempo medio (s)	C_{eq} (Ns/m)
1	18,55	18,52	18,53	1,9302

2	26,51	26,58	26,54	5,1832
3	28,55	28,52	28,53	8,1719
4	29,81	29,65	29,73	11,2232
5	30,92	31,17	31,04	14,5486
6	30,91	31,45	31,18	17,4530

Tabla 22. Datos y resultados imán \varnothing 12 mm, sin separación, tubo de \varnothing_{INT} 13 mm y $e=2$ mm.

Con una separación entre imanes de 4.5 mm se obtiene que:

REPULSION				
NUMERO IMANES	Ensayo 1 (s)	Ensayo 2 (s)	Tiempo medio (s)	C_{eq} (Ns/m)
1	18,55	18,52	18,53	1,9302
2	24,53	24,71	24,62	4,8073
3	26,24	26,23	26,23	7,5133
4	27,92	27,9	27,91	10,5362
5	28,72	28,82	28,77	13,4824
6	29,02	29,16	29,09	16,2831

Tabla 23. Datos y resultados imán \varnothing 12 mm, 4.5 mm cd separación, tubo de \varnothing_{INT} 13 mm y $e=2$ mm.

Por último, separando los imanes entre sí una distancia de 9 mm, los resultados obtenidos son los siguientes:

REPULSION				
NUMERO IMANES	Ensayo 1 (s)	Ensayo 2 (s)	Tiempo medio (s)	C_{eq} (Ns/m)
1	15,63	15,72	15,67	1,9050
2	20,07	19,56	19,81	4,3533
3	21,21	21,57	21,39	6,7990
4	22,21	22,25	22,23	9,2482
5	22,98	22,87	22,92	11,7878
6	23,06	23,13	23,09	14,1423

Tabla 24. Datos y resultados imán \varnothing 12 mm, 4.5 mm cd separación, tubo de \varnothing_{INT} 13 mm y $e=2$ mm.

4.1.5. Tubo de cobre de \varnothing_{INT} 16 mm y espesor de dos mm.

De forma análoga a la anterior, a fin de comprobar cómo se comporta el coeficiente de amortiguamiento ante un aumento del espesor del elemento conductor, se estudia el imán de $\varnothing 15$ mm en el tubo de \varnothing_{INT} 16 mm y de espesor 2 mm.

4.1.5.1. Imán \varnothing 15 mm.

Sin separación entre imanes, los datos medidos, así como los resultados son:

REPULSION					
NUMERO IMANES	Ensayo 1 (s)	Ensayo 2 (s)	Ensayo 3 (s)	Tiempo medio (s)	C_{eq} (Ns/m)
1	11,38	11,32	11,33	11,34	1,1723

2	14,05	14,06	14,2	14,10	2,5031
3	14,18	14,12	14,11	14,13	3,5571
4	14,2	14,11	14,19	14,16	4,6150
5	13,72	13,88	13,75	13,78	5,5120
6	14,34	14,32	14,33	14,33	6,7931

Tabla 25. Datos y resultados imán \emptyset 12 mm, sin separación, tubo de \emptyset_{INT} 16 mm y $e=2$ mm.

Con una distancia de separación de 4.5 mm, los resultados y coeficientes de amortiguamiento son los mostrados a continuación:

REPULSION					
NUMERO IMANES	Ensayo 1 (s)	Ensayo 2 (s)	Ensayo 3 (s)	Tiempo medio (s)	C_{eq} (Ns/m)
1	11,38	11,32	11,33	11,34	1,1723
2	14,65	14,71	14,75	14,70	2,6096
3	15,84	15,72	15,77	15,77	3,9698
4	16,8	16,92	16,8	16,84	5,4859
5	17,1	17,14	16,89	17,04	6,8157
6	17,52	17,59	17,39	17,5	8,2958

Tabla 26. Datos y resultados imán \emptyset 12 mm, 4.5 mm de separación, tubo de \emptyset_{INT} 16 mm y $e=2$ mm.

Por último, separando los imanes 9 mm se obtiene:

REPULSION					
NUMERO IMANES	Ensayo 1 (s)	Ensayo 2 (s)	Ensayo 3 (s)	Tiempo medio (s)	C_{eq} (Ns/m)
1	10,52	10,4	10,38	10,43	1,3495
2	12,55	12,38	12,44	12,45	2,6241
3	13,56	13,56	13,71	13,61	3,9736
4	14,51	14,44	14,84	14,59	5,4485
5	14,76	14,71	14,311	14,59	6,6340
6	15,22	15,16	15,17	15,18	8,1365

Tabla 27. Datos y resultados imán \emptyset 12 mm, 9mm de separación, tubo de \emptyset_{INT} 16 mm y $e=2$ mm.

Continuando con el orden que se está siguiendo en la experimentación, las últimas medidas serán dedicadas a comprobar si el coeficiente de amortiguamiento se modifica con la presencia de una masa añadida, a su vez que el espesor del elemento conductor aumenta.

Por tanto, sin separación de los imanes y masa añadida se tiene:

MASA AÑADIDA DE 4.4 GRAMOS / REPULSION					
NUMERO IMANES	Ensayo 1 (s)	Ensayo 2 (s)	Ensayo 3 (s)	Tiempo medio (s)	C_{eq} (Ns/m)
1	6,75	6,91	6,93	6,86	1,0485
2	11,2	11,07	11,09	11,12	2,5232
3	11,85	11,92	11,99	11,92	3,5885
4	12,44	12,61	12,3	12,45	4,6711
5	12,44	12,5	12,29	12,41	5,5762
6	13,33	13,23	13,06	13,20	6,9133

MASA AÑADIDA DE 9.6 GRAMOS / REPULSION					
NUMERO IMANES	Ensayo 1 (s)	Ensayo 2 (s)	Ensayo 3 (s)	Tiempo medio (s)	C_{eq} (Ns/m)
1	4,23	4,56	4,42	4,40	0,9249
2	9,92	9,87	10,07	9,95	2,8287
3	10,25	10,19	10,22	10,22	3,6622
4	11,57	11,37	11,34	11,42	4,9418
5	11,43	11,38	11,31	11,37	5,7620
6	12,48	12,47	12,38	12,44	7,2266

Tabla 28. Datos y resultados imán \emptyset 15 mm, sin separación, masa añadida y tubo de \emptyset_{INT} 16 mm y e= 2 mm.

Para una separación de imanes de 4.5 mm, los resultados obtenidos son:

MASA AÑADIDA DE 4.4 GRAMOS / REPULSION					
NUMERO IMANES	Ensayo 1 (s)	Ensayo 2 (s)	Ensayo 3 (s)	Tiempo medio (s)	C_{eq} (Ns/m)
1	6,68	6,74	7	6,80	1,0398
2	11,64	11,54	12,03	11,73	2,6632
3	13,4	13,28	13,46	13,38	4,0281
4	14,29	14,51	14,46	14,42	5,4103
5	14,72	14,96	14,87	14,85	6,6726
6	16,1	16,01	15,95	16,02	8,3860
MASA AÑADIDA DE 9.6 GRAMOS / REPULSION					
NUMERO IMANES	Ensayo 1 (s)	Ensayo 2 (s)	Ensayo 3 (s)	Tiempo medio (s)	C_{eq} (Ns/m)
1	1	5,68	5,79	5,63	1,1973
2	2	10,1	10,13	10,05	2,8685
3	3	12,03	12,15	12,05	4,3276
4	4	13,29	13,33	13,33	5,7592
5	5	14,01	13,99	13,85	7,0674
6	6	14,58	14,75	14,52	8,4888

Tabla 29. Datos y resultados imán \emptyset 15 mm, sin separación, masa añadida y tubo de \emptyset_{INT} 16 mm y e= 2 mm.

Para finalizar el conjunto de medidas y experimentaciones realizadas, se separan los imanes una última distancia de 9 mm, obteniendo:

MASA AÑADIDA DE 4.4 GRAMOS / REPULSION					
NUMERO IMANES	Ensayo 1 (s)	Ensayo 2 (s)	Ensayo 3 (s)	Tiempo medio (s)	C_{eq} (Ns/m)
1	6,68	6,74	7	6,80	1,0398
2	11,64	11,54	12,03	11,73	2,6632
3	13,4	13,28	13,46	13,38	4,0281
4	14,29	14,51	14,46	14,42	5,4103
5	14,72	14,96	14,87	14,85	6,6726
6	16,1	16,01	15,95	16,02	8,3860
MASA AÑADIDA DE 9.6 GRAMOS / REPULSION					
NUMERO IMANES	Ensayo 1 (s)	Ensayo 2 (s)	Ensayo 3 (s)	Tiempo medio (s)	C_{eq} (Ns/m)
1	1	5,68	5,79	5,63	1,1973
2	2	10,1	10,13	10,05	2,8685

3	3	12,03	12,15	12,05	4,3276
4	4	13,29	13,33	13,33	5,7592
5	5	14,01	13,99	13,85	7,0674
6	6	14,58	14,75	14,52	8,4888

Tabla 30. Datos y resultados imán \varnothing 15 mm, sin separación, masa añadida y tubo de \varnothing_{INT} 16 mm y $e=2$ mm.

Finalizando así, la toma de datos y el cálculo de resultados mediante la primera metodología, la medida manual mediante cronómetro.

4.2. Resultados obtenidos mediante el uso de la célula de carga.

Como se ha comentado a lo largo del presente trabajo, se han adoptado dos metodologías a la hora de conseguir caracterizar el coeficiente de amortiguación magnético para distintas configuraciones, siendo ésta que se va a tratar a continuación la más precisa, obteniendo unos resultados a priori más fidedignos que los expuestos anteriormente.

En este apartado se agrupan las medidas tomadas con esta segunda metodología, así como el tratamiento de los datos hasta llegar a los correspondientes coeficientes de amortiguamiento, objeto de este trabajo.

Siendo común con la anterior forma de trabajo la idea de seguir un procedimiento en cuanto a configuraciones y medidas se refiere, se va a emplear el mismo orden de medida, así como las mismas configuraciones que van a ser objeto de estudio.

4.2.1. Tubo de cobre de \varnothing_{INT} 13 mm y espesor de un mm.

Al igual que con la otra metodología de caracterización, se realizan los ensayos para el tubo de cobre de $\varnothing_{int} = 13$ mm y espesor de 1 mm con distintos números de imanes y distancias entre los mismos diferentes, tanto a repulsión como a atracción.

En la tabla se recogen las medidas registradas por la célula de carga, así como el valor del coeficiente de amortiguamiento propio de cada configuración.

Como se hizo en el apartado anterior, se tomará como ejemplo una de las adquisiciones de datos para, según los principios comentados en el [Capítulo 3] indicar cómo se ha caracterizado su coeficiente de amortiguación magnética y el resto de los que se mostrarán en las siguientes tablas.

4.2.1.1. Imán \varnothing 12 mm.

En la Tabla 31 se recogen los datos registrados por la célula de carga y el hardware, así como los valores de los coeficientes de amortiguación magnético cuando no existe separación entre los imanes.

REPULSIÓN					
NUMERO IMANES	RANGO F (N)		RANGO T (s)		C_{eq} (Ns/m)
1	-0,157	-0,057	10,97	26,3	1,5178
2	-0,169	0,005	9,26	31,18	3,7763
3	-0,08	0,257	5,27	29,01	7,9211
4	-0,038	0,312	6,43	31,44	8,6668
5	-0,019	0,397	8,678	34,38	10,5894
6	-0,039	0,467	7,468	33,64	13,1129
ATRACCIÓN					
NUMERO IMANES	RANGO F (N)		RANGO T (s)		C_{eq} (Ns/m)
1	-0,157	-0,057	10,97	20,3	0,9237
2	-0,048	0,132	20,489	10,02	1,8652
3	-0,043	0,215	5,162	12,61	1,9038
4	-0,067	0,276	5,919	11,41	1,8651
5	-0,067	0,352	8,515	12,92	1,8307
6	-0,066	0,44	6,351	10,02	1,8386

Tabla 31. Datos y resultados imán \varnothing 12 mm, sin separación, tubo de \varnothing_{INT} 13 mm y $e=1$ mm.

Sirva de ejemplo, al igual que se realizó con la otra metodología, las medidas tomadas a repulsión para un número de imanes $N = 1$, se procede a explicar cómo se ha calculado C_{eq} , aplicando la Ecuación 34 (véase de nuevo el [Capítulo 3]).

En la Figura 30 se observan los datos monitorizados a través del software instalado en el ordenador para el caso que se está explicando. Los saltos en el tiempo, así como en la fuerza, mostrados en el modelo esquematizado de la Figura 22, tienen su reflejo en la Figura 30, tal y como se puede observar.

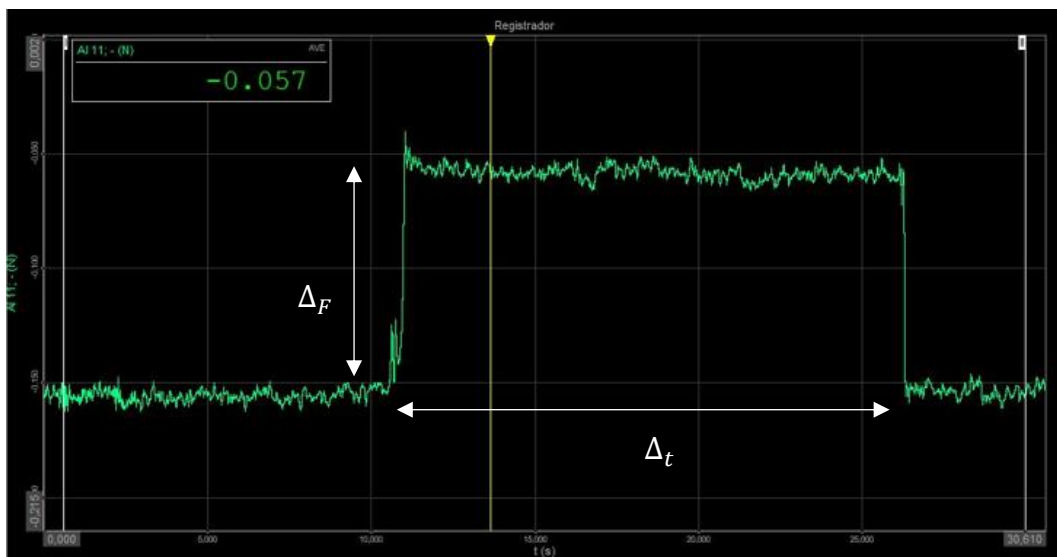


Figura 30. Registro de datos a través de DEWESOFT.

Por tanto, para el caso en el que $N = 1$ a repulsión, se tiene que:

$$\Delta_F = |F_2 - F_1| = |(-0.057) - (-0.157)| = 0.1 \text{ N}$$

$$\Delta_t = t_2 - t_1 = 26.3 - 10.97 = 15.33 \text{ s}$$

Una vez obtenidos los incrementos, el cálculo del coeficiente de amortiguamiento magnético es inmediato, aplicando la mencionada Ecuación 34:

$$v_m = \frac{L_{tubo}}{\Delta_t} = \frac{1.01 \text{ m}}{15.33 \text{ s}}$$

$$C_{eq} = \frac{\Delta_F}{v_m} = \frac{0.1}{\frac{1.01}{15.33}} = 1.5178 \frac{Ns}{m}$$

El resto de los coeficientes de amortiguación magnéticos calculados mediante esta metodología experimental se obtendrán de forma análoga a la anterior.

Continuando con el proceso experimental, se tiene ahora la Tabla 32, donde se muestran los datos y resultados obtenidos con una separación de 4.5 mm:

REPULSIÓN					
NUMERO IMANES	RANGO F (N)		RANGO T (s)		C_{eq} (Ns/m)
1	-0,157	-0,057	10,97	26,3	1,5178
2	-0,09	0,091	7,956	27,67	3,5329
3	-0,101	0,16	7,713	28,61	5,4008
4	-0,093	0,256	8,07	30,02	7,5850
5	-0,111	0,316	3,41	26,69	9,8425
6	-0,102	0,402	29,15	4,97	12,0660
ATRACCIÓN					
NUMERO IMANES	RANGO F (N)		RANGO T (s)		C_{eq} (Ns/m)
1	-0,157	-0,057	10,97	26,3	1,5178
2	-0,019	0,062	5,432	17,42	0,9620
3	-0,118	0,143	5,111	15,71	2,7412
4	-0,118	0,241	3,539	13,36	3,4918
5	-0,119	0,318	5,164	14,55	4,0619
6	-0,138	0,384	3,795	12,79	4,6494

Tabla 32. Datos y resultados imán \varnothing 12 mm, 4.5 mm de separación, tubo de \varnothing_{INT} 13 mm y $e = 1$ mm.

Por último, para una separación entre imanes de 9 mm se obtienen los siguientes datos y resultados.

REPULSIÓN					
NUMERO IMANES	RANGO F (N)		RANGO T (s)		C_{eq} (Ns/m)
1	-0,122	-0,022	3,327	17,21	1,3745
2	-0,117	0,07	11,057	28,35	3,2032

3	-0,095	0,172	3,809	22,34	4,8998
4	-0,079	0,27	3,799	22,9	6,6002
5	-0,063	0,369	8,347	27,98	8,3996
6	-0,055	0,457	5,82	25,57	10,0159
<i>ATRACCIÓN</i>					
NUMERO IMANES	RANGO F (N)		RANGO T (s)		C_{eq} (Ns/m)
1	-0,122	-0,022	3,327	17,21	1,3745
2	-0,049	0,148	4,054	17,53	2,6286
3	-0,039	0,247	6,008	18,66	3,5849
4	-0,025	0,353	10,042	23,04	4,8649
5	-0,013	0,454	11,772	24,55	5,9114
6	-0,012	0,542	5,028	17,40	6,7900

Tabla 33. Datos y resultados imán \varnothing 12 mm, 9 mm de separación, tubo de \varnothing_{INT} 13 mm y $e=1$ mm.

4.2.2. Tubo de cobre de \varnothing_{INT} 16 mm y espesor de un mm.

De forma análoga a lo realizado mediante la otra metodología experimental, se procede a medir en el tubo de cobre de $\varnothing_{INT} = 16$ mm, con un espesor $e = 1$ mm, los distintos tipos de imanes disponibles, a las habituales distancias que se están estudiando, así como con masa añadida en uno de ellos.

4.2.2.1. Imán \varnothing 12 mm.

En primer lugar, se realiza el ensayo con los imanes en contacto entre sí, obteniendo como resultado los datos y los coeficientes mostrados a continuación.

<i>REPULSIÓN</i>					
NUMERO IMANES	RANGO F (N)		RANGO T (s)		C_{eq} (Ns/m)
1	0,004	0,102	10,01	16,3	0,6103
2	0,032	0,208	2,95	11,19	1,4358
3	0,037	0,298	4,57	12,47	2,0414
4	0,039	0,38	12,84	20,86	2,7077
5	0,028	0,454	7,51	16,28	3,6990
6	0,048	0,552	3,16	11,98	4,4012
<i>ATRACCIÓN</i>					
NUMERO IMANES	RANGO F (N)		RANGO T (s)		C_{eq} (Ns/m)
1	0,004	0,102	10,01	16,3	0,6103
2	0,064	0,238	6,28	10,66	0,7545
3	0,083	0,334	5,58	8,78	0,7952
4	0,097	0,44	3,96	6,53	0,8727
5	0,093	0,526	3,76	5,88	0,9088
6	0,096	0,601	6,29	8,07	0,89

Tabla 34. Datos y resultados imán \varnothing 12 mm, sin separación, tubo de \varnothing_{INT} 16 mm y $e=1$ mm.

Con una separación de 4.5 mm se recogen los datos tomados, así como los resultados de los coeficientes obtenidos en la siguiente tabla:

REPULSIÓN					
NUMERO IMANES	RANGO F (N)		RANGO T (s)		C_{eq} (Ns/m)
1	0,004	0,102	10,01	16,3	0,6103
2	-0,009	0,172	5,05	12,94	1,4139
3	-0,027	0,24	6,52	14,91	2,2179
4	0,008	0,35	11,06	19,65	2,9086
5	0,053	0,476	10,03	18,87	3,7022
6	0,07	0,581	6	14,95	4,5281
ATRACCIÓN					
NUMERO IMANES	RANGO F (N)		RANGO T (s)		C_{eq} (Ns/m)
1	0,004	0,102	10,01	16,3	0,6103
2	0,002	0,182	7,86	12,06	0,7485
3	0,027	0,294	9,57	12,98	0,9014
4	0,002	0,355	5,5	8,57	1,0729
5	0,012	0,444	2,71	5,51	1,1976
6	0,024	0,545	4,73	7,32	1,3360

Tabla 35. Datos y resultados imán \emptyset 12 mm, 4.5 mm de separación, tubo de \emptyset_{INT} 16 mm y $e=1$ mm.

Para terminar con este imán, se recogen los datos tomados y los resultados con una distancia de 9 milímetros entre imanes, obteniendo:

REPULSIÓN					
NUMERO IMANES	RANGO F (N)		RANGO T (s)		C_{eq} (Ns/m)
1	0,003	0,113	21,37	27,26	0,6414
2	0,042	0,228	6,08	12,24	1,1344
3	0,064	0,327	8,25	15,74	1,9503
4	0,067	0,417	10,33	17,97	2,6475
5	0,066	0,498	4,77	12,59	3,3447
6	0,074	0,585	10,07	18,09	4,0576
ATRACCIÓN					
NUMERO IMANES	RANGO F (N)		RANGO T (s)		C_{eq} (Ns/m)
1	0,003	0,113	21,37	27,26	0,6414
2	0,06	0,249	4,1	8,82	0,8832
3	0,053	0,335	6,56	10,78	1,1782
4	0,054	0,428	5,67	9,69	1,4885
5	0,036	0,494	9,41	13,53	1,8682
6	0,036	0,568	4,66	8,56	2,0542

Tabla 36. Datos y resultados imán \emptyset 12 mm, 9 mm de separación, tubo de \emptyset_{INT} 16 mm y $e=1$ mm.

4.2.2.2. Imán \varnothing 15 mm.

Para el imán de \varnothing 15 mm, se realizan las mismas configuraciones, tanto en lo referido al número de imanes, como a la disposición de estos. Además, al igual que se hizo en la toma de datos manual, se medirá el efecto de la masa añadida en los coeficientes de amortiguación.

Sin embargo, aprovechando la capacidad que ofrece esta segunda metodología de trabajo en cuanto a cuantificar tiempos pequeños, se medirá también a atracción, no solo a repulsión.

Por tanto, sin separación entre imanes se tiene que:

REPULSIÓN					
NUMERO IMANES	RANGO F (N)		RANGO T (s)		C_{eq} (Ns/m)
1	0,017	0,107	3,43	12,8	0,8349
2	0,013	0,167	8,03	20,24	1,8617
3	0,001	0,231	8,05	20,02	2,7258
4	0,008	0,286	3,05	15,4	3,3993
5	-0,019	0,344	6,83	19,35	4,4997
6	-0,018	0,408	2,73	15,41	5,3481
ATRACCIÓN					
NUMERO IMANES	RANGO F (N)		RANGO T (s)		C_{eq} (Ns/m)
1	0,017	0,107	3,43	12,8	0,8349
2	0,035	0,12	6,26	15,9	0,8112
3	-0,054	0,171	4,66	12,7	1,7910
4	-0,062	0,221	5,23	11,99	1,8941
5	-0,063	0,294	7,05	12,71	2,0006
6	-0,069	0,352	9,68	14,54	2,0258

Tabla 37. Datos y resultados imán \varnothing 15 mm, sin separación, tubo de \varnothing_{INT} 16 mm y $e=1$ mm.

A continuación, se toman los datos y se calculan los coeficientes de amortiguamiento con una distancia de separación entre imanes de 4.5 mm.

REPULSIÓN					
NUMERO IMANES	RANGO F (N)		RANGO T (s)		C_{eq} (Ns/m)
1	0,017	0,107	3,43	12,8	0,8349
2	-0,079	0,081	3,12	14,99	1,8803
3	-0,079	0,151	3,79	16,64	2,9262
4	-0,089	0,199	7,92	21,68	3,9236
5	-0,096	0,264	3,75	17,88	5,0364
6	-0,09	0,334	4,92	19,74	6,2214
ATRACCIÓN					
NUMERO IMANES	RANGO F (N)		RANGO T (s)		C_{eq} (Ns/m)
1	0,017	0,107	3,43	12,8	0,8349
2	-0,091	0,071	2,79	11,35	1,3729

3	-0,096	0,139	5,7	13,15	1,7334
4	-0,091	0,215	5,05	12,07	2,1268
5	-0,074	0,295	1,67	8,28	2,4149
6	-0,061	0,378	5,07	11,32	2,7165

Tabla 38. Datos y resultados imán \varnothing 15 mm, 4.5 mm de separación, tubo de \varnothing_{INT} 16 mm y $e=1$ mm.

Para finalizar, se repite el proceso, pero con una separación entre imanes de 9 mm.

REPULSIÓN					
NUMERO IMANES	RANGO F (N)		RANGO T (s)		C_{eq} (Ns/m)
1	-0,023	0,077	4,29	12,37	0,8
2	-0,022	0,147	6,72	17,96	1,8807
3	-0,024	0,215	1,58	13,63	2,8514
4	-0,014	0,295	2,8	15,43	3,8640
5	-0,002	0,369	5,59	18,59	4,7752
6	-0,012	0,43	1,47	14,9	5,8772
ATRACCIÓN					
NUMERO IMANES	RANGO F (N)		RANGO T (s)		C_{eq} (Ns/m)
1	-0,023	0,077	4,29	12,37	0,8
2	-0,002	0,182	3,1	11,86	1,5958
3	0,011	0,264	0,77	9,32	2,1417
4	0,005	0,332	6,16	14,67	2,7552
5	0,013	0,413	2,86	11,28	3,3346
6	0,016	0,491	2,59	10,83	3,8752

Tabla 39. Datos y resultados imán \varnothing 15 mm, 9 mm de separación, tubo de \varnothing_{INT} 16 mm y $e=1$ mm.

Con todo lo anterior, se ha medido el efecto de la holgura sobre el imán de \varnothing 12 mm, así como la medida de los coeficientes de amortiguación para el imán de \varnothing 15 mm con una holgura mínima.

A continuación, se mide el efecto de la masa sobre el imán de \varnothing 15 mm, y con diferentes separaciones entre éstos.

Sin separación entre ellos, se tiene que:

MASA AÑADIDA DE 4.4 GRAMOS / REPULSIÓN					
NUMERO IMANES	RANGO F (N)		RANGO T (s)		C_{eq} (Ns/m)
1	0,024	0,172	2,21	8,49	0,9202
2	0,022	0,237	10,86	20,45	2,0414
3	0,06	0,342	6,08	17,08	3,0712
4	0,006	0,347	8,95	19,58	3,5889
5	0,002	0,416	10,27	21,99	4,8040
6	0,025	0,492	1,39	13,92	5,7935
MASA AÑADIDA DE 9.6 GRAMOS / ATRACCIÓN					

NUMERO IMANES	RANGO F (N)		RANGO T (s)		C_{eq} (Ns/m)
	1	0,012	0,206	16,96	
2	0,019	0,274	1,49	8,99	1,8935
3	0,011	0,336	6,76	15,6	2,8445
4	0,019	0,402	4,61	14,33	3,6859
5	0,024	0,473	9,17	19,1	4,4144
6	0,022	0,541	6,65	17,45	5,5497

Tabla 40. Datos y resultados imán \emptyset 15 mm, sin separación, con masa añadida, tubo de \emptyset_{INT} 16 mm y $e=1$ mm.

Con una separación de 4.5 mm entre imanes, los resultados son los siguientes:

MASA AÑADIDA DE 4.4 GRAMOS / REPULSIÓN					
NUMERO IMANES	RANGO F (N)		RANGO T (s)		C_{eq} (Ns/m)
	1	0,024	0,172	2,21	
2	0,054	0,269	4,2	13,15	1,9051
3	0,061	0,339	7,51	17,88	2,8543
4	0,079	0,422	7,64	19,24	3,9394
5	0,09	0,598	3,65	16,12	6,2720
6	0,084	0,563	14,96	27,58	5,9851
MASA AÑADIDA DE 9.6 GRAMOS / ATRACCIÓN					
NUMERO IMANES	RANGO F (N)		RANGO T (s)		C_{eq} (Ns/m)
	1	0,012	0,206	16,96	
2	0,001	0,254	8,73	16,21	1,8737
3	0,001	0,324	3,57	12,92	2,9901
4	0,001	0,386	5,73	16,47	4,0939
5	0,003	0,454	12,21	23,92	5,2289
6	0,006	0,524	3,68	15,92	6,2775

Tabla 41. Datos y resultados imán \emptyset 15 mm, 4.5 mm de separación, con masa añadida, tubo de \emptyset_{INT} 16 mm y $e=1$ mm.

Por último, se toman las medidas y se calculan los resultados con una separación de 9 mm entre imanes.

MASA AÑADIDA DE 4.4 GRAMOS / REPULSIÓN					
NUMERO IMANES	RANGO F (N)		RANGO T (s)		C_{eq} (Ns/m)
	1	-0,023	0,129	3,08	
2	0,025	0,249	2,25	9,83	1,6811
3	0,058	0,349	9,85	19,2	2,6939
4	0,105	0,462	3,04	13,61	3,7361
5	-0,004	0,418	11,81	23,02	4,6837
6	0,006	0,495	1,93	13,77	5,7324
MASA AÑADIDA DE 9.6 GRAMOS / ATRACCIÓN					
NUMERO IMANES	RANGO F (N)		RANGO T (s)		C_{eq} (Ns/m)
	1	-0,024	0,179	4,24	
2	-0,027	0,243	21,21	28,03	1,8231

3	-0,026	0,312	2,28	10,79	2,8479
4	-0,031	0,369	2,55	12,17	3,8099
5	-0,023	0,436	1,6	11,94	4,6990
6	-0,02	0,513	5,3	16,06	5,6782

Tabla 42. Datos y resultados imán \varnothing 15 mm, 9 mm de separación, con masa añadida, tubo de \varnothing_{INT} 16 mm y $e=1$ mm.

4.2.3. Tubo de cobre de \varnothing_{INT} 23 mm y espesor de un mm.

Para el tubo de cobre de $\varnothing_{INT} = 23$ mm, se va a ensayar con los imanes disponibles de diámetro $\varnothing = 12$ mm y $\varnothing = 15$ mm respectivamente, de igual forma que la hecha hasta el momento, tanto a repulsión como a atracción.

De este modo, se podrá medir la influencia de la holgura en el imán de diámetro $\varnothing = 15$ mm, con o sin masa añadida, medida que en el apartado anterior no pudo medir, puesto que se realizaron las medidas con una holgura mínima en éste.

4.2.3.1. Imán \varnothing 12 mm.

Comenzando con el imán de diámetro $\varnothing = 12$ mm, sin separación entre ellos, se tiene que:

REPULSIÓN					
NUMERO IMANES	RANGO F (N)		RANGO T (s)		C_{eq} (Ns/m)
1	-0,007	0,093	4,86	9,62	0,4712
2	0,011	0,189	3,76	9,42	0,9975
3	0,008	0,273	2,13	7,24	1,3407
4	0,002	0,343	14,65	19,21	1,5395
5	0,03	0,412	9,69	14,29	1,7398
6	-0,004	0,504	10,82	15,83	2,5198
ATRACCIÓN					
NUMERO IMANES	RANGO F (N)		RANGO T (s)		C_{eq} (Ns/m)
1	-0,007	0,093	4,86	9,62	0,4712
2	-0,004	0,174	19,72	23,04	0,5851
3	-0,007	0,252	6,51	9,02	0,6436
4	-0,022	0,313	18,03	19,95	0,6368
5	-0,07	0,352	12,48	14,16	0,7019
6	-0,073	0,43	5,78	7,2	0,7071

Tabla 43. Datos y resultados imán \varnothing 12 mm, sin separación, tubo de \varnothing_{INT} 23 mm y $e=1$ mm.

Para una disposición en la que los imanes se encuentran separados entre sí 4.5 mm, los datos y resultados obtenidos son:

REPULSIÓN			
NUMERO IMANES	RANGO F (N)		RANGO T (s)
			C_{eq} (Ns/m)

1	-0,007	0,093	4,86	9,62	0,4712
2	-0,081	0,098	9,55	14,86	0,9410
3	-0,068	0,198	7,07	12,48	1,4248
4	-0,085	0,259	6,16	11,33	1,7608
5	-0,068	0,363	5,39	10,87	2,3384
6	-0,072	0,438	5,68	11,17	2,7721
ATRACCIÓN					
NUMERO IMANES	RANGO F (N)		RANGO T (s)		C_{eq} (Ns/m)
1	-0,007	0,093	4,86	9,62	0,4712
2	-0,055	0,126	5,34	8,24	0,5197
3	-0,06	0,207	5,35	7,53	0,5762
4	-0,064	0,289	5,03	7,43	0,8388
5	-0,055	0,387	2,38	4,46	0,9102
6	-0,056	0,478	9,85	11,72	0,9886

Tabla 44. Datos y resultados imán \varnothing 12 mm, 4.5 mm de separación, tubo de \varnothing_{INT} 23 mm y $e=1$ mm

Para finalizar con este imán, se toman los datos cuando éstos se encuentran separados entre sí 9 mm, recogidos en la siguiente tabla:

REPULSIÓN					
NUMERO IMANES	RANGO F (N)		RANGO T (s)		C_{eq} (Ns/m)
1	-0,061	0,043	11,54	16,09	0,4685
2	-0,055	0,138	1,77	6,94	0,9879
3	-0,061	0,208	5,18	10,33	1,3716
4	-0,066	0,289	7,76	12,94	1,8206
5	-0,055	0,378	3,35	8,64	2,2678
6	-0,056	0,462	1,76	7,21	2,7951
ATRACCIÓN					
NUMERO IMANES	RANGO F (N)		RANGO T (s)		C_{eq} (Ns/m)
1	-0,061	0,043	11,54	16,09	0,4685
2	-0,066	0,127	10,47	13,8	0,6363
3	-0,06	0,223	2,69	5,49	0,7845
4	-0,057	0,317	8,71	10,97	0,8368
5	-0,063	0,397	2,58	4,85	1,0338
6	-0,072	0,473	4,66	7,06	1,2950

Tabla 45. Datos y resultados imán \varnothing 12 mm, 9 mm de separación, tubo de \varnothing_{INT} 23 mm y $e=1$ mm.

Como consecuencia de todo lo anterior, se ha medido el comportamiento del imán con una holgura aún mayor.

4.2.3.2. Imán \varnothing 15 mm.

Para el análisis de este imán, se realizarán las medidas para las mismas configuraciones que las hechas hasta el momento, lo que significa el estudio del imán y sus configuraciones, con y sin masa añadida, aumentando la holgura entre éste y el elemento conductor.

Por tanto, se comienza a medir con los imanes en contacto, teniendo:

REPULSIÓN					
NUMERO IMANES	RANGO F (N)		RANGO T (s)		C_{eq} (Ns/m)
1	-0,002	0,093	6,17	11,19	0,4721
2	0,007	0,165	5,97	12,13	0,9636
3	-0,005	0,219	10,68	16,25	1,2353
4	0,002	0,289	2,45	7,61	1,4666
5	-0,001	0,355	3,87	8,31	1,5649
6	-0,005	0,417	12,5	16,63	1,7256
ATRACCIÓN					
NUMERO IMANES	RANGO F (N)		RANGO T (s)		C_{eq} (Ns/m)
1	-0,002	0,093	6,17	11,19	0,4721
2	0,005	0,166	4,89	10,55	0,9022
3	-0,005	0,219	2,04	7,08	1,1177
4	0,022	0,314	9,63	14,12	1,2980
5	0,078	0,438	14,9	18,69	1,3508
6	-0,002	0,422	7,97	11,28	1,3895

Tabla 46. Datos y resultados imán \varnothing 15 mm, sin separación, tubo de \varnothing_{INT} 23 mm y $e=1$ mm.

Las siguientes medidas y resultados, recogidas en la Tabla 47, se realizan con los imanes separados una distancia de 4.5 mm.

REPULSIÓN					
NUMERO IMANES	RANGO F (N)		RANGO T (s)		C_{eq} (Ns/m)
1	-0,002	0,093	6,17	11,19	0,4721
2	0,055	0,214	9,27	16,6	1,1539
3	0,066	0,292	10,12	16,8	1,4947
4	0,074	0,369	7,35	14,05	1,9569
5	0,099	0,454	6,2	12,71	2,2881
6	0,001	0,433	5,52	11,99	2,7673
ATRACCIÓN					
NUMERO IMANES	RANGO F (N)		RANGO T (s)		C_{eq} (Ns/m)
1	-0,002	0,093	6,17	11,19	0,4721
2	0,013	0,174	2,01	6,69	0,7460
3	0,014	0,248	4,16	7,71	0,8224
4	0,018	0,32	10,04	12,98	0,8790
5	0,019	0,393	1,3	3,82	0,9331
6	0,022	0,469	6,28	8,54	1,0002

Tabla 47. Datos y resultados imán \varnothing 15 mm, 4.5 mm de separación, tubo de \varnothing_{INT} 23 mm y $e=1$ mm.

A continuación, con una distancia de 9 mm entre los imanes, se realizan las siguientes medidas.

REPULSIÓN					
-----------	--	--	--	--	--

NUMERO IMANES	RANGO F (N)		RANGO T (s)		C_{eq} (Ns/m)
	1	0,027	0,129	14,48	
2	0,032	0,208	3,95	10,34	1,1135
3	0,033	0,273	4,63	11,15	1,5493
4	0,036	0,338	3,02	9,69	1,9943
5	0,032	0,402	9,75	16,19	2,3592
6	0,033	0,469	8,17	14,63	2,7886
ATRACCIÓN					
NUMERO IMANES	RANGO F (N)		RANGO T (s)		C_{eq} (Ns/m)
	1	0,027	0,129	14,48	
2	0,035	0,21	2,89	7,35	0,7727
3	0,032	0,293	20,38	23,68	0,8527
4	0,031	0,353	5,96	9,48	1,1222
5	0,033	0,427	2,79	5,87	1,2015
6	0,029	0,503	2,46	5,42	1,3891

Tabla 48. Datos y resultados imán \emptyset 15 mm, 9 mm de separación, tubo de \emptyset_{INT} 23 mm y $e=1$ mm.

Como se ha mencionado en la línea introductoria, se va a medir también el efecto de la masa sobre el imán de \emptyset 15 mm, con una holgura mayor a la medida en el apartado anterior.

Se tiene, por tanto, estando los imanes en contacto:

MASA AÑADIDA DE 4.4 GRAMOS / REPULSIÓN					
NUMERO IMANES	RANGO F (N)		RANGO T (s)		C_{eq} (Ns/m)
	1	0,027	0,175	2,31	
2	0,026	0,237	2,5	7,62	1,0696
3	0,027	0,3	5,43	10,29	1,3136
4	0,019	0,365	4,8	9,15	1,4901
5	0,007	0,417	4,66	8,63	1,6115
6	0,003	0,481	2,21	6,3	1,9356
MASA AÑADIDA DE 9.6 GRAMOS / ATRACCIÓN					
NUMERO IMANES	RANGO F (N)		RANGO T (s)		C_{eq} (Ns/m)
	1	0,003	0,192	4,07	
2	0,001	0,259	2,26	6,27	1,0243
3	-0,008	0,313	2,57	6,62	1,2871
4	-0,009	0,38	3,31	7,13	1,4712
5	-0,011	0,448	1,65	5,36	1,6860
6	-0,02	0,5	2,86	6,66	1,9564

Tabla 49. Datos y resultados imán \emptyset 15 mm, sin separación, con masa añadida, tubo de \emptyset_{INT} 23 mm y $e=1$ mm.

Para una distancia de 4.5 mm se miden y se obtienen los siguientes valores:

MASA AÑADIDA DE 4.4 GRAMOS / REPULSIÓN					
NUMERO IMANES	RANGO F (N)		RANGO T (s)		C_{eq} (Ns/m)
	1	0,027	0,175	2,31	

1	-0,045	0,102	8,48	12,2	0,5414
2	-0,051	0,161	1,63	7,1	1,1481
3	-0,052	0,227	2,46	7,83	1,4833
4	-0,054	0,292	6,83	12,36	1,8944
5	-0,054	0,351	7,43	13,18	2,3056
6	-0,055	0,414	1,88	7,74	2,7211
<i>MASA AÑADIDA DE 9.6 GRAMOS / ATRACCIÓN</i>					
NUMERO IMANES	RANGO F (N)		RANGO T (s)		C_{eq} (Ns/m)
1	-0,08	0,109	4,63	7,46	0,5295
2	-0,083	0,171	3,3	7,45	1,0436
3	-0,081	0,244	4,39	8,84	1,4319
4	-0,081	0,308	2,07	6,76	1,8063
5	-0,079	0,369	5,56	10,65	2,2577
6	-0,089	0,43	15,53	20,86	2,7388

Tabla 50. Datos y resultados imán \emptyset 15 mm, 4.5 mm de separación, con masa añadida, tubo de \emptyset_{INT} 23 mm y $e=1$ mm.

Para finalizar la medida de la influencia de la masa, con una distancia entre imanes de 9 mm, se tiene:

<i>MASA AÑADIDA DE 4.4 GRAMOS / REPULSIÓN</i>					
NUMERO IMANES	RANGO F (N)		RANGO T (s)		C_{eq} (Ns/m)
1	0,019	0,176	6,07	9,32	0,5051
2	0,063	0,289	8,08	12,64	1,0203
3	0,083	0,378	10,05	15,29	1,5304
4	-0,002	0,355	21,84	27,27	1,9193
5	0,012	0,436	7,83	13,33	2,3089
6	0,029	0,519	7,52	13,35	2,8284
<i>MASA AÑADIDA DE 9.6 GRAMOS / ATRACCIÓN</i>					
NUMERO IMANES	RANGO F (N)		RANGO T (s)		C_{eq} (Ns/m)
1	0,037	0,242	7,92	10,38	0,4993
2	0,051	0,316	1,85	5,67	1,0022
3	0,055	0,395	15,68	20,17	1,5114
4	0,069	0,467	9,47	14,27	1,8914
5	0,076	0,549	16,14	21,18	2,3603
6	0,084	0,621	3,65	8,79	2,7328

Tabla 51. Datos y resultados imán \emptyset 15 mm, 9 mm de separación, con masa añadida, tubo de \emptyset_{INT} 23 mm y $e=1$ mm.

4.2.4. Tubo de cobre de \emptyset_{INT} 13 mm y espesor de dos mm.

En esta ocasión se realizan las medidas en un tubo de cobre de $\emptyset_{INT} = 13$ mm, pero que es introducido a su vez en otro tubo de $\emptyset_{INT} = 15$ mm, de tal modo que queden concéntricos y formen un solo tubo de 2 milímetros de espesor.

Por tanto, se van a realizar las medidas para las configuraciones habituales durante el transcurso de la experimentación, lo que va a permitir medir la influencia del espesor del elemento conductor.

4.2.3.1. Imán Ø12 mm.

Se comienza la adquisición de los datos con los imanes en contacto entre sí, obteniendo como resultado:

REPULSIÓN					
NUMERO IMANES	RANGO F (N)		RANGO T (s)		C_{eq} (Ns/m)
1	0,012	0,11	3,19	23,25	1,9464
2	0,003	0,177	6,86	35,58	4,9478
3	0,011	0,27	5,29	36,27	7,9443
4	0,008	0,355	5,25	37,68	11,1417
5	0,013	0,438	2,76	36,29	14,1091
6	0,022	0,53	6,95	41,25	17,2518
ATRACCIÓN					
NUMERO IMANES	RANGO F (N)		RANGO T (s)		C_{eq} (Ns/m)
1	0,012	0,11	3,19	23,25	1,9464
2	0,044	0,223	2,87	16,45	2,4067
3	0,066	0,327	2,02	11,9	2,5531
4	0,004	0,343	3,21	10,75	2,5307
5	0,02	0,448	4,58	10,71	2,5976
6	0,028	0,54	2,97	7,96	2,5295

Tabla 52. Datos y resultados imán Ø 12 mm, 9 mm de separación, tubo de Ø_{INT} 13 mm y e= 2mm.

Para una separación entre imanes de 4.5 mm, los resultados y coeficientes de amortiguamiento obtenidos son:

REPULSIÓN					
NUMERO IMANES	RANGO F (N)		RANGO T (s)		C_{eq} (Ns/m)
1	0,012	0,11	3,19	23,25	1,9464
2	0,051	0,235	4,89	31,26	4,8040
3	0,065	0,329	3,87	32,91	7,5906
4	0,074	0,415	4,39	34,87	10,2907
5	0,081	0,504	5,03	37,94	13,7830
6	0,082	0,592	7,31	39,13	16,0675
ATRACCIÓN					
NUMERO IMANES	RANGO F (N)		RANGO T (s)		C_{eq} (Ns/m)
1	0,012	0,11	3,19	23,25	1,9464
2	0,082	0,262	2,5	17,67	2,7035
3	0,083	0,348	3,67	17,04	3,5079
4	0,08	0,437	2,04	14,31	4,3370
5	0,083	0,523	12,09	23,58	5,0055

6	0,075	0,605	4,6	15,83	5,8929
---	-------	-------	-----	-------	--------

Tabla 53. Datos y resultados imán \emptyset 12 mm, 9 mm de separación, tubo de \emptyset_{INT} 13 mm y $e=2$ mm.

Teniendo una separación de 9 mm, los resultados medidos son los recogido en la Tabla 54.

REPULSIÓN					
NUMERO IMANES	RANGO F (N)		RANGO T (s)		C_{eq} (Ns/m)
1	0,069	0,173	1,7	20,74	1,9605
2	0,069	0,253	3,62	26,88	4,2374
3	0,062	0,332	11,38	36,47	6,7072
4	0,062	0,415	4,93	30,96	9,0976
5	0,05	0,482	8,52	35,12	11,3774
6	0,036	0,552	8,95	36,02	13,8298
ATRACCIÓN					
NUMERO IMANES	RANGO F (N)		RANGO T (s)		C_{eq} (Ns/m)
1	0,069	0,173	1,7	20,74	1,9605
2	0,029	0,229	1,77	18,75	3,3623
3	0,025	0,306	5,74	21,93	4,5043
4	0,011	0,385	6,46	22,43	5,9136
5	0	0,461	6,04	21,81	7,1979
6	-0,004	0,551	3,62	19,06	8,4843

Tabla 54. Datos y resultados imán \emptyset 12 mm, 9 mm de separación, tubo de \emptyset_{INT} 13 mm y $e=2$ mm.

4.2.5. Tubo de cobre de \emptyset_{INT} 16 mm y espesor de dos mm.

Al igual que en el caso recién visto, el tubo de cobre ya estudiado de diámetro interior $\emptyset_{INT} = 15$ es introducido en otro tubo de diámetro interior $\emptyset_{INT} = 23$ mm, de tal forma que queden concéntricos el uno del otro, pudiendo entonces considerarlo como un tubo de diámetro interior $\emptyset_{INT} = 16$ mm y espesor 2 mm.

El montaje anterior va a permitir medir la influencia del grosor y de la holgura para el imán de menor diámetro, así como el efecto del grosor para el imán de diámetro mayor.

4.2.4.1. Imán \emptyset 12 mm.

Como se acaba de comentar, este dispositivo experimental permitirá medir la influencia del espesor y de la holgura respecto a las variables habitualmente tratadas.

Se tiene, por tanto, con los imanes en contacto, las siguientes medidas y resultados:

REPULSIÓN				
NUMERO IMANES	RANGO F (N)		RANGO T (s)	C_{eq} (Ns/m)

1	0,038	-0,055	4,61	14,26	0,8885
2	-0,06	0,12	4,79	17,04	2,1831
3	-0,061	0,202	5,25	17,02	3,0648
4	-0,059	0,289	2,36	14,3	4,1139
5	-0,062	0,366	1,99	14,72	5,3944
6	-0,065	0,448	4,56	17,37	6,5064
<i>ATRACCIÓN</i>					
NUMERO IMANES	RANGO F (N)		RANGO T (s)		C_{eq} (Ns/m)
1	0,038	-0,055	4,61	14,26	0,8885
2	-0,012	0,167	5,85	12,89	1,2476
3	-0,022	0,239	10,65	16,06	1,3980
4	-0,014	0,325	2,97	7,31	1,4566
5	-0,016	0,404	9,17	12,72	1,4762
6	-0,033	0,472	9,23	12,21	1,49

Tabla 55. Datos y resultados imán \varnothing 12 mm, sin separación, tubo de \varnothing_{INT} 16 mm y $e=2$ mm.

Por su parte, al separar los imanes unos de otros una distancia de 4.5 mm, se obtienen diferentes medidas y coeficientes, los cuales se muestran a continuación:

<i>REPULSIÓN</i>					
NUMERO IMANES	RANGO F (N)		RANGO T (s)		C_{eq} (Ns/m)
1	0,038	-0,055	4,61	14,26	0,8885
2	-0,049	0,131	3,86	16,06	2,1742
3	-0,041	0,216	2,9	15,64	3,2417
4	-0,048	0,293	7,92	21,21	4,4870
5	-0,041	0,381	8,2	21,82	5,6907
6	-0,037	0,473	3,87	17,71	6,9885
<i>ATRACCIÓN</i>					
NUMERO IMANES	RANGO F (N)		RANGO T (s)		C_{eq} (Ns/m)
1	0,038	-0,055	4,61	14,26	0,8885
2	-0,039	0,14	5,55	11,97	1,1378
3	-0,045	0,223	3,59	8,75	1,3691
4	-0,04	0,312	4,87	9,8	1,7181
5	-0,045	0,393	5,73	9,69	1,7173
6	-0,061	0,464	5,56	9,16	1,8712

Tabla 56. Datos y resultados imán \varnothing 12 mm, 4.5 mm de separación, tubo de \varnothing_{INT} 16 mm y $e=2$ mm.

La última medida a realizar con este imán será con una distancia de 9 mm entre ellos, obteniendo lo recogido en la Tabla 57

<i>REPULSIÓN</i>					
NUMERO IMANES	RANGO F (N)		RANGO T (s)		C_{eq} (Ns/m)
1	0,077	0,182	3,46	12,45	0,9346
2	0,089	0,274	4,73	15,65	2,0001
3	0,103	0,372	2,25	13,88	3,0974

4	0,002	0,354	3,96	15,97	4,1856
5	0,009	0,447	4,76	17,16	5,3774
6	0,012	0,534	5,19	18,14	6,6929
<i>ATRACCIÓN</i>					
<i>NUMERO IMANES</i>	<i>RANGO F (N)</i>		<i>RANGO T (s)</i>		<i>C_{eq} (Ns/m)</i>
1	0,077	0,182	3,46	12,45	0,9346
2	0,037	0,232	3,53	10,39	1,3244
3	0,021	0,301	5,5	11,62	1,6966
4	0,008	0,385	11,97	17,65	2,1201
5	0,009	0,471	4,18	9,72	2,5341
6	-0,011	0,538	4,6	9,92	2,8917

Tabla 57. Datos y resultados imán \varnothing 12 mm, 9 mm de separación, tubo de \varnothing_{INT} 16 mm y $e=2$ mm.

4.2.4.1. Imán \varnothing 15 mm.

Esta configuración experimental, permitirá medir y posteriormente calcular la influencia del espesor para el imán de diámetro $\varnothing = 15$ mm, así comprobar si el grosor del elemento conductor afecta al comportamiento ideal del imán frente a la masa añadida.

Se tiene, por tanto, las siguientes medidas para los imanes sin distancia entre sí:

<i>REPULSIÓN</i>					
<i>NUMERO IMANES</i>	<i>RANGO F (N)</i>		<i>RANGO T (s)</i>		<i>C_{eq} (Ns/m)</i>
1	0,001	0,094	7,17	19,8	1,1629
2	0,012	0,173	2,32	17,83	2,4723
3	0,019	0,243	3,53	18,83	3,3932
4	0,018	0,308	5,24	20,88	4,4906
5	0,02	0,382	3,88	19,59	5,6307
6	0,021	0,449	7,55	23,3	6,6742
<i>ATRACCIÓN</i>					
<i>NUMERO IMANES</i>	<i>RANGO F (N)</i>		<i>RANGO T (s)</i>		<i>C_{eq} (Ns/m)</i>
1	0,001	0,094	7,17	19,8	1,1629
2	0,016	0,179	2,47	16,05	2,1916
3	0,014	0,243	1,24	13,42	2,7616
4	0,014	0,31	6,32	17,02	3,1358
5	0,017	0,375	2,44	11,68	3,2751
6	0,024	0,45	2,13	10,04	3,3362

Tabla 58. Datos y resultados imán \varnothing 15 mm, sin separación, tubo de \varnothing_{INT} 16 mm y $e=2$ mm.

Para una distancia de 4.5 milímetros, los datos recogidos, así como los coeficientes de amortiguamiento calculados se muestran en la Tabla 59.

<i>REPULSIÓN</i>					
<i>NUMERO IMANES</i>	<i>RANGO F (N)</i>		<i>RANGO T (s)</i>		<i>C_{eq} (Ns/m)</i>

1	0,001	0,094	7,17	19,8	1,1629
2	0,019	0,184	5,61	23,5	2,9226
3	0,027	0,251	3,24	22,1	4,1828
4	0,028	0,32	2	21,73	5,7041
5	0,035	0,391	4,82	24,9	7,0777
6	0,03	0,459	7,69	27,73	8,5120
<i>ATRACCIÓN</i>					
NUMERO IMANES	RANGO F (N)		RANGO T (s)		C_{eq} (Ns/m)
1	0,001	0,094	7,17	19,8	1,1629
2	0,039	0,205	2,61	13,5	1,7898
3	0,038	0,276	2,3	12,17	2,3258
4	0,056	0,357	2,39	11,38	2,6791
5	0,042	0,419	2,95	11,28	3,1093
6	0,045	0,483	6,28	14,18	3,4259

Tabla 59. Datos y resultados imán \varnothing 15 mm, 4.5 mm de separación, tubo de \varnothing_{INT} 16 mm y $e=2$ mm.

Por último, para una distancia entre imanes de 9 mm, se obtienen las siguientes medidas y posteriormente los coeficientes de amortiguamiento mostrados a continuación:

<i>REPULSIÓN</i>					
NUMERO IMANES	RANGO F (N)		RANGO T (s)		C_{eq} (Ns/m)
1	0,049	0,153	4,74	16,26	1,1862
2	0,057	0,227	3,73	19,23	2,6089
3	0,055	0,295	5,59	22,45	4,0063
4	0,046	0,35	10,04	27,67	5,3064
5	0,05	0,425	18,05	36,33	6,7871
6	0,061	0,499	11,1	29,97	8,1832
<i>ATRACCIÓN</i>					
NUMERO IMANES	RANGO F (N)		RANGO T (s)		C_{eq} (Ns/m)
1	0,049	0,153	4,74	16,26	1,1862
2	0,239	0,059	5,09	16,07	1,9568
3	0,05	0,312	11,04	21,88	2,8119
4	0,062	0,383	5,4	15,94	3,3498
5	0,063	0,466	4,86	15,23	4,1377
6	0,07	0,545	2,89	12,87	4,6935

Tabla 60. Datos y resultados imán \varnothing 15 mm, 9 mm de separación, tubo de \varnothing_{INT} 16 mm y $e=2$ mm.

El siguiente paso es seguir comprobando la idoneidad del comportamiento de los imanes frente a la masa añadida. En este caso, como ya se ha mencionado al comienzo de este apartado, se comprueba el efecto de la masa junto con el efecto del aumento del grosor del material conductor.

Por lo que, sea nula la distancia de separación entre imanes, se tiene que:

MASA AÑADIDA DE 4.4 GRAMOS / REPULSIÓN
--

NUMERO IMANES	RANGO F (N)		RANGO T (s)		C_{eq} (Ns/m)
	1	0,059	0,205	4,79	
2	0,062	0,273	7,99	19,97	2,5027
3	0,001	0,283	21,64	34,84	3,6855
4	-0,008	0,337	7,54	21,42	4,7411
5	-0,003	0,405	8,17	22,1	5,6271
6	0,007	0,482	15,3	30,16	6,9886
<i>MASA AÑADIDA DE 9.6 GRAMOS / ATRACCIÓN</i>					
NUMERO IMANES	RANGO F (N)		RANGO T (s)		C_{eq} (Ns/m)
1	0,011	0,203	4,36	10,92	1,2470
2	-0,002	0,258	3,09	13,35	2,6411
3	0,004	0,328	3,32	14,63	3,6281
4	0,005	0,402	4,1	16,38	4,8268
5	0,455	0,001	1,88	14,45	5,6502
6	-0,005	0,524	6,08	19,56	7,0603

Tabla 61. Datos y resultados imán \varnothing 15 mm, sin separación, masa añadida, tubo de \varnothing_{INT} 16 mm y $e=2$ mm.

Mientras que, para una separación entre los imanes de 4.5 mm, los coeficientes de amortiguamiento son:

<i>MASA AÑADIDA DE 4.4 GRAMOS / REPULSIÓN</i>					
NUMERO IMANES	RANGO F (N)		RANGO T (s)		C_{eq} (Ns/m)
1	0,059	0,205	4,79	13,21	1,2171
2	0,014	0,227	1,7	14,25	2,6466
3	0,001	0,279	7,7	22,82	4,1617
4	-0,001	0,344	5,6	22,19	5,66688
5	0	0,411	3,89	21,3	7,0846
6	0	0,483	2,31	20,27	8,5887
<i>MASA AÑADIDA DE 9.6 GRAMOS / ATRACCIÓN</i>					
NUMERO IMANES	RANGO F (N)		RANGO T (s)		C_{eq} (Ns/m)
1	0,011	0,203	4,36	10,92	1,2470
2	0,011	0,266	6,14	16,84	2,7014
3	0,011	0,332	5,36	18,1	4,0490
4	0,011	0,4	8,02	22,34	5,5153
5	0,01	0,469	1,54	17,08	7,0622
6	0,011	0,534	5,86	22,27	8,4974

Tabla 62. Datos y resultados imán \varnothing 15 mm, 4.5 mm de separación, masa añadida, tubo de \varnothing_{INT} 16 mm y $e=2$ mm.

Por último, siendo 9 mm la distancia de separación, las medidas y posteriores resultados son:

<i>MASA AÑADIDA DE 4.4 GRAMOS / REPULSIÓN</i>					
NUMERO IMANES	RANGO F (N)		RANGO T (s)		C_{eq} (Ns/m)
1	-0,048	0,102	2,19	10,17	1,1851

2	-0,056	0,162	4,6	16,41	2,5490
3	-0,061	0,227	3,01	16,62	3,8808
4	-0,074	0,282	5,92	20,93	5,2906
5	-0,072	0,351	2,05	18,17	6,7512
6	-0,056	0,426	3,8	20,47	7,9553
<i>MASA AÑADIDA DE 9.6 GRAMOS / ATRACCIÓN</i>					
NUMERO IMANES	RANGO F (N)		RANGO T (s)		C_{eq} (Ns/m)
1	-0,07	0,133	2,19	8,34	1,2360
2	-0,052	0,22	3,21	13,11	2,6663
3	-0,059	0,272	2,7	14,86	3,9851
4	-0,054	0,349	5,15	18,87	5,4744
5	-0,051	0,411	2,83	17,33	6,6326
6	-0,062	0,476	2,57	17,75	8,0859

Tabla 63. Datos y resultados imán \varnothing 15 mm, 9 mm de separación, masa añadida, tubo de \varnothing_{INT} 16 mm y $e=2$ mm.

4.2.6. Tubo de cobre de \varnothing_{INT} 13 mm y espesor de tres mm.

Como medida adicional realizada con esta segunda metodología de trabajo, se considera una nueva situación experimental, en este caso para obtener un análisis a mayores sobre el efecto del espesor del material conductor sobre el imán de menor diámetro, por lo que en este caso la holgura será mínima.

Para ello, igual que se ha realizado antes a la hora de aumentar los espesores de las tuberías, se introducen todas las empleadas hasta el momento unas en otras, de forma que queden concéntricas. Se considerará de este modo un espesor de 3 mm.

Se realiza el primer conjunto de medidas, con los imanes en contacto unos con otros. Se obtienen entonces los siguientes coeficientes:

<i>REPULSIÓN</i>					
NUMERO IMANES	RANGO F (N)		RANGO T (s)		C_{eq} (Ns/m)
1	0,001	0,099	4,09	26,99	2,2219
2	0,009	0,186	5,7	38,38	5,7270
3	-0,004	0,261	5,53	40,14	9,0808
4	-0,019	0,325	3,03	39,13	12,2954
5	-0,019	0,403	11,75	49,09	15,6014
6	-0,038	0,471	5,16	42,99	19,0648

Tabla 64. Datos y resultados imán \varnothing 12 mm, sin separación, tubo de \varnothing_{INT} 13 mm y $e=3$ mm.

Para una distancia de 4.5 mm:

<i>REPULSIÓN</i>					
NUMERO IMANES	RANGO F (N)		RANGO T (s)		C_{eq} (Ns/m)
1	0,001	0,099	4,09	26,99	2,2219

2	-0,045	0,129	5,23	35,76	5,2596
3	-0,051	0,214	6,45	38,99	8,5377
4	-0,055	0,285	3,72	37,83	11,4825
5	-0,061	0,365	5,82	41,52	15,0576
6	-0,086	0,429	6,17	37,45	15,9497

Tabla 65. Datos y resultados imán \varnothing 12 mm, sin separación, tubo de \varnothing_{INT} 13 mm y $e=3$ mm

Y para finalizar, con una distancia de separación de 9 milímetros entre ellos, los coeficientes de amortiguamiento magnético son:

REPULSIÓN					
NUMERO IMANES	RANGO F (N)		RANGO T (s)		C_{eq} (Ns/m)
1	-0,065	0,042	3,67	24,6	2,2173
2	-0,071	0,115	7,56	34,57	4,9741
3	-0,081	0,189	2,02	31,38	7,8487
4	-0,075	0,28	4,47	34,66	10,6113
5	-0,082	0,352	4,99	35,88	13,2735
6	-0,086	0,429	8,17	37,45	14,9299

Tabla 66. Datos y resultados imán \varnothing 12 mm, sin separación, tubo de \varnothing_{INT} 13 mm y $e=3$ mm

Una vez expuestas todas las configuraciones que se han estudiado a lo largo del presente capítulo, así como sus respectivas tablas en las que se han agrupado tanto las medidas, como los coeficientes de amortiguamiento propios para cada una de ellas, se valora como suficiente el número de variables y el número de ejemplos de éstas.

Por tanto, gracias a lo anterior se podrá realizar un caracterizado completo y detallado sobre los coeficientes de amortiguación magnéticos propios de los imanes empleados, así como qué variables les influyen y cuáles son las configuraciones más ventajosas.

4.3. Análisis de resultados.

Una vez se han estudiado y caracterizado los coeficientes de amortiguamiento magnético para cada una de las configuraciones y disposiciones mencionadas a lo largo del presente trabajo, mediante ambas metodologías de estudio, es momento de comprobar la validez de la toma de datos manuales respecto a la realizada con la célula de carga.

Tomando como ejemplo los coeficientes de amortiguación caracterizados para el imán de diámetro $\varnothing = 12$ mm en el tubo de cobre de diámetro interior $\varnothing_{int} = 13$ mm, se pueden comparar los resultados obtenidos con ambas metodologías empleadas.

NUMERO DE IMANES	CRONOMETRO	CELULA DE CARGA + SIRIUS
	C_{eq} (Ns/m)	
1	1,5759	1,5178
2	4,3289	3,7763
3	6,9047	7,9211
4	9,5559	8,6668
5	12,0625	10,5894
6	14,6916	13,1129

Tabla 67. Comparativa de resultados

En la Tabla 67 se observa como los resultados obtenidos son similares en cuanto a magnitud para ambas metodologías, por lo que se puede comprobar la fiabilidad de ambos métodos para una primera aproximación.

Sin embargo, los resultados obtenidos mediante la célula de carga se tomarán como los de referencia para futuros apartados y conclusiones, debido a la mayor precisión que otorga la célula de carga respecto a la medida manual.

A continuación, se representarán los resultados en forma gráfica para cada configuración tratada, así como unas conclusiones que permitan entender cómo varían los coeficientes de amortiguamiento.

4.3.1. Tubo de cobre de \varnothing_{INT} 13 mm y espesor de un mm.

4.3.1.1. Imán \varnothing 12 mm.

A continuación, se presentan las gráficas para las tres separaciones ensayadas:

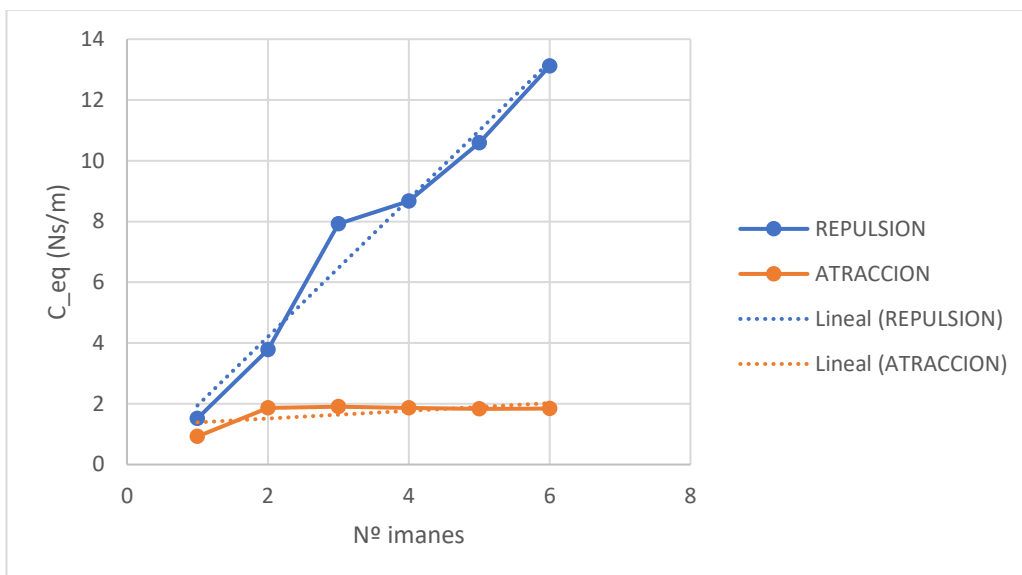


Figura 31. C_{eq} para imanes sin separación.

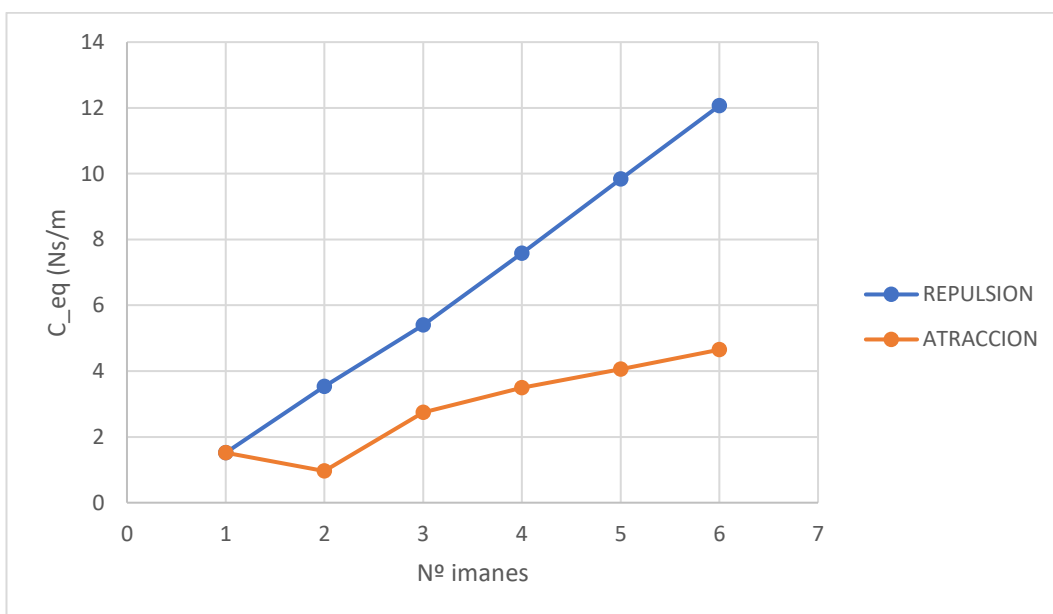


Figura 32. C_{eq} para imanes con 4.5 mm de separación.

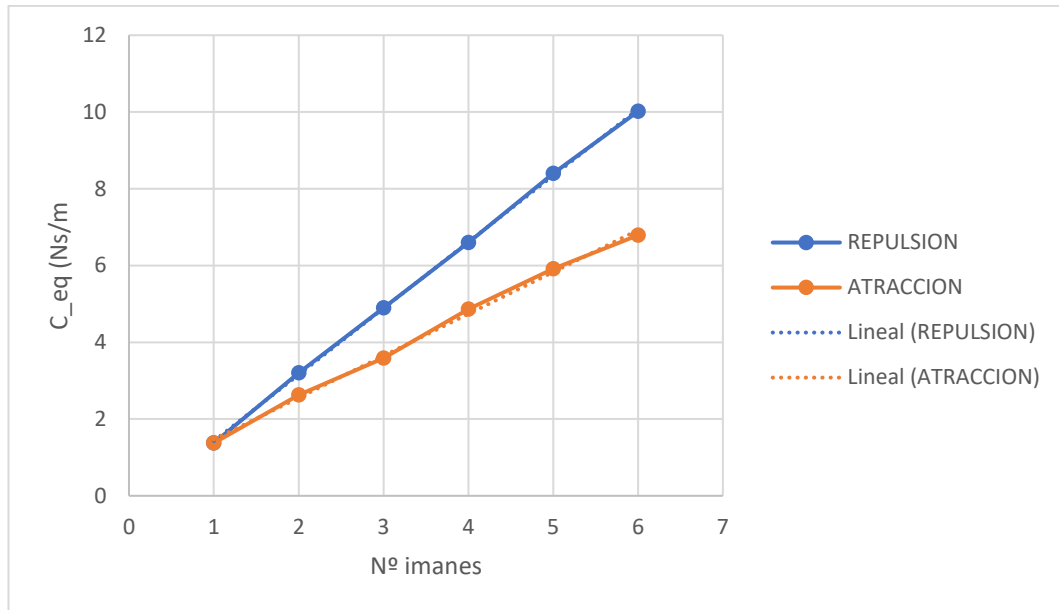


Figura 33. C_{eq} para imanes con 9 mm de separación.

En todas ellas se puede observar como el coeficiente de amortiguamiento aumenta conforme lo hace el número de imanes, tanto a repulsión como a atracción. Sin embargo, lo hace de forma mucho más notable en el caso de los imanes dispuestos a repulsión, algo que resulta lógico, pues en esta configuración, al estar a repulsión unos de otros se presentan fuerzas repulsivas entre los imanes, que sirven de amortiguación entre ellos, así como mayores líneas de campo magnético que en el caso de los imanes a atracción, dónde actuarían como un único imán con una sola línea de campo.

Del mismo modo, se observan dos comportamientos distintos a medida que aumenta la distancia de separación. Por un lado, con los imanes a repulsión, el coeficiente de amortiguamiento disminuye a medida que aumenta la distancia entre imanes consecuencia de una cada vez menor interacción repulsiva entre ellos. Por otro lado, cuando los imanes están dispuestos a atracción entre ellos la amortiguación aumenta, puesto que los imanes dejan de comportarse como uno solo, apareciendo más líneas de campo conforme se separan unos de otros.

De esta segunda tendencia se puede deducir que, según aumenta la distancia entre ellos, el comportamiento para ambas disposiciones tenderá a equipararse, pues los imanes se comportarán del mismo modo.

De cara a caracterizar un amortiguador magnético, interesa que presente el mayor coeficiente de amortiguación posible, lo cual se da con los imanes dispuestos a repulsión y, como se observa en la Figura 34, sin separación entre ellos.

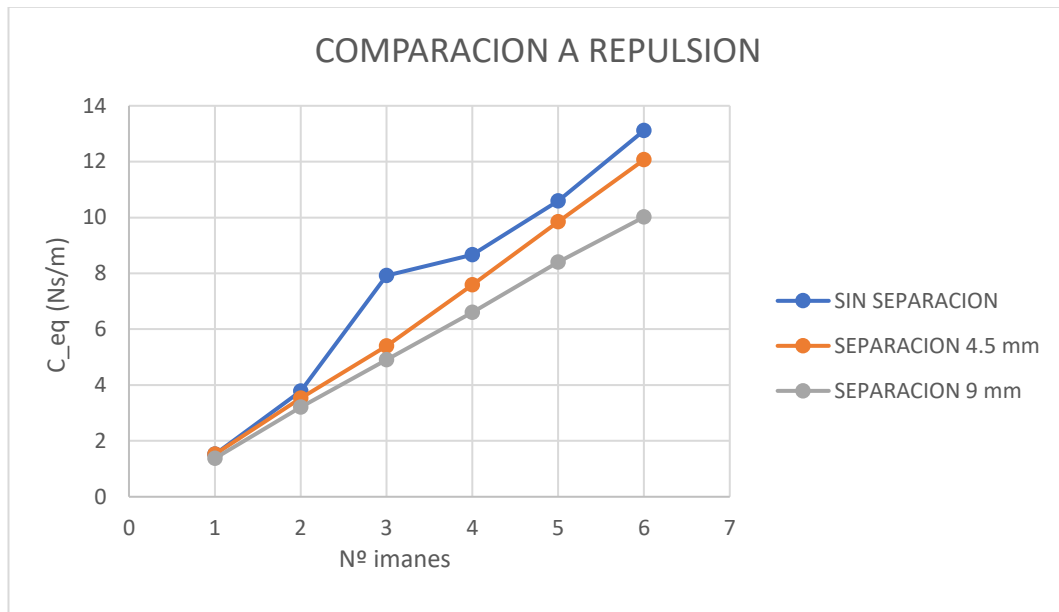


Figura 34. Comparación C_{eq} para imán $\varnothing 12\text{mm}$ en tubo $\varnothing_{int} = 13\text{ mm}$

4.3.2. Tubo de cobre de \varnothing_{INT} 16 mm y espesor de un mm.

4.3.2.1. Imán \varnothing 12 mm.

A continuación, se representan las mismas configuraciones, pero con una holgura mayor entre el imán y el elemento conductor. Como las tendencias individuales, referidas estas al comportamiento a repulsión y a atracción en función de la distancia de separación, son las mismas que las comentadas anteriormente, se va a representar en la Figura 35 el conjunto de ellas, para poder entender mejor cómo actúa la holgura entre el imán y el tubo de cobre.

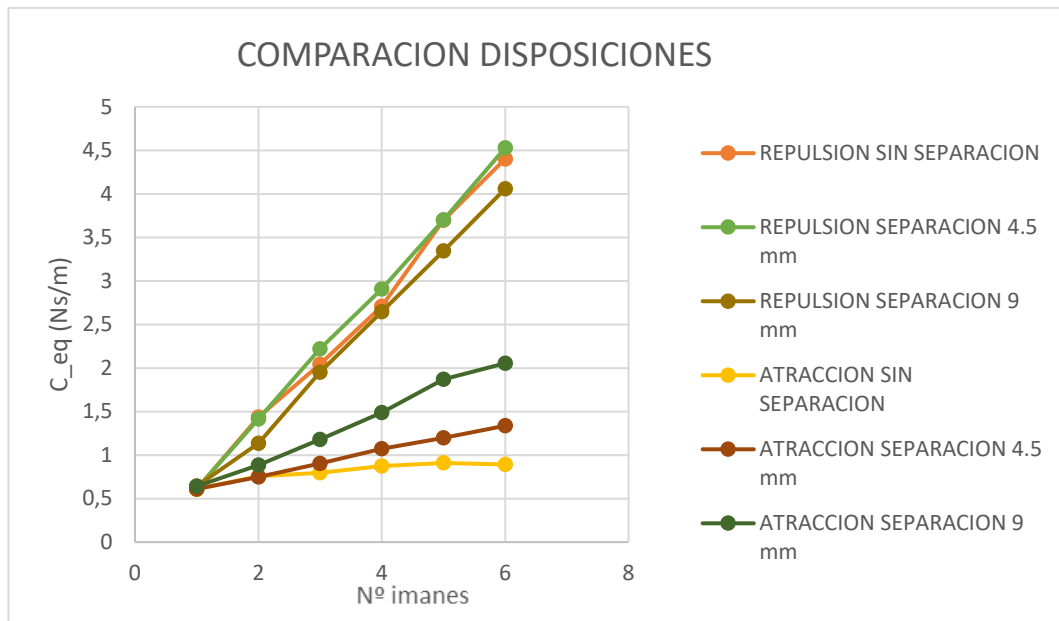


Figura 35. Comparación C_{eq} para imán $\varnothing 12\text{mm}$ en tubo $\varnothing_{int} = 16\text{ mm}$

En la figura anterior se representa el comportamiento del imán en las configuraciones ya mencionadas, pero con una holgura del tubo mayor a la ya estudiada.

Se tiene, por tanto, la misma tendencia en el comportamiento a medida que se aumenta el número de imanes, tanto con éstos a repulsión como a atracción, donde se incrementa el coeficiente de amortiguación; así como el mismo comportamiento a medida que se aumenta la distancia entre ellos, aumentando el amortiguamiento cuando se disponen a atracción.

Sin embargo, a repulsión se observa que, con un aumento de la holgura entre el imán y el elemento conductor, el coeficiente de amortiguamiento disminuye notablemente, no habiendo diferencias significativas entre disponerlos a contacto o con una separación mínima de 4.5 milímetros. No obstante, si hay diferencia al aumentar la distancia hasta 9 milímetros, pues en este caso existe menos interacción repulsiva y por tanto menos amortiguamiento entre ellos, como ya se ha comentado.

Se puede concluir entonces que la holgura entre el imán y el conductor disminuye el amortiguamiento magnético, igualando el comportamiento con los imanes en contacto con los dispuestos a 4.5 mm de separación.

4.3.2.2. Imán $\varnothing 15\text{ mm}$.

Así como se realizó con el imán de $\varnothing 12\text{ mm}$, se van a mostrar a continuación las tendencias en el comportamiento de forma individualizada para cada configuración de los imanes de $\varnothing 15\text{ mm}$, donde la holgura entre imán y conductor va a ser mínima.

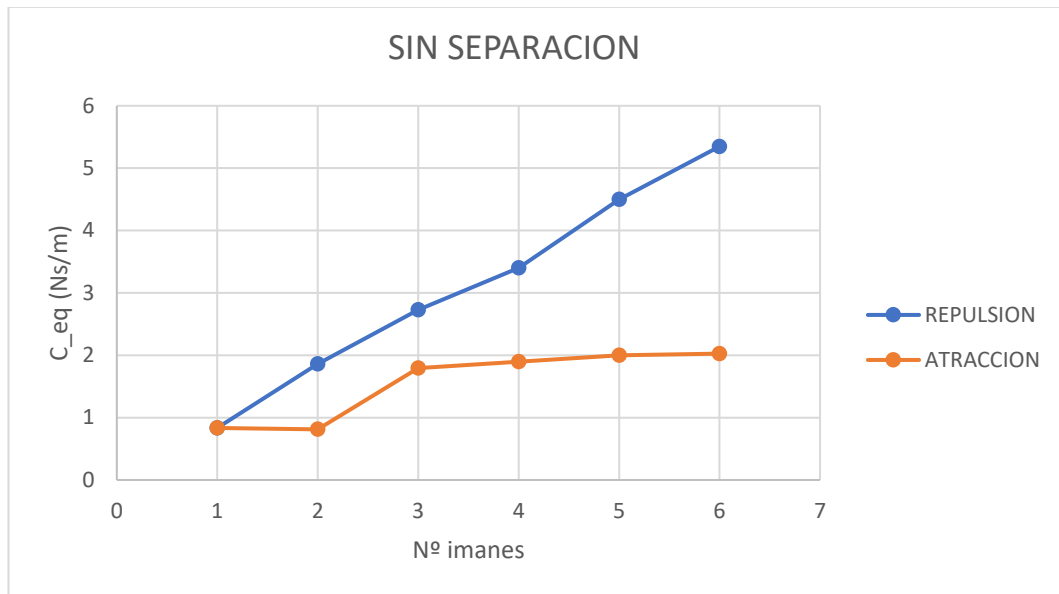


Figura 36. C_{eq} para imán $\varnothing 15\text{mm}$ en tubo $\varnothing_{int} = 16\text{ mm}$

Al igual que ocurría con el imán de $\varnothing 12\text{ mm}$, se observa el aumento del coeficiente de amortiguamiento a medida que aumenta el número de imanes a repulsión, aumentando también a atracción, pero estabilizándose a medida que aumenta dicho número.

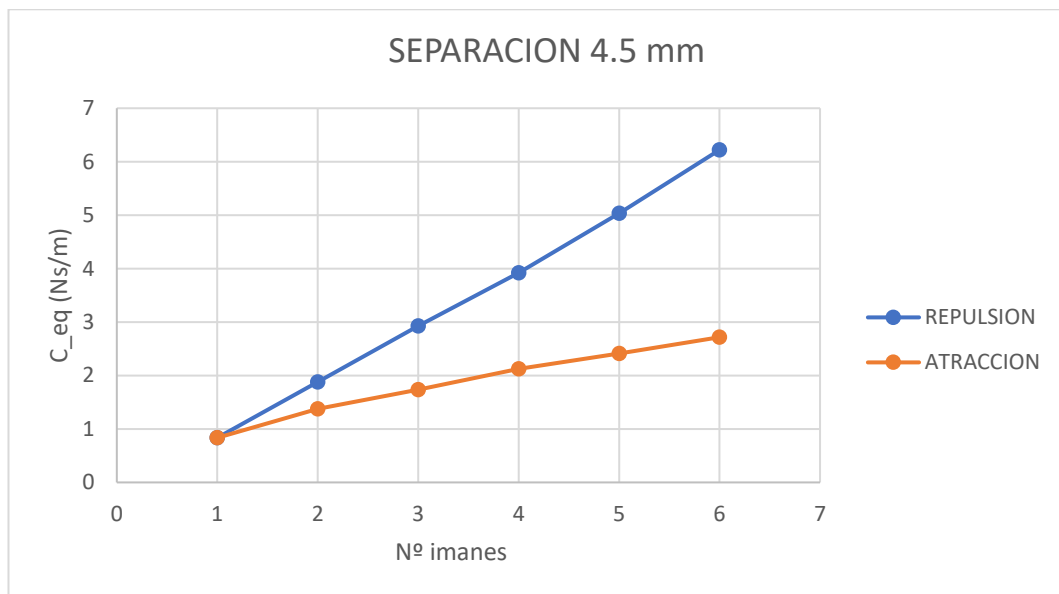


Figura 37. C_{eq} para imán $\varnothing 15\text{mm}$ en tubo $\varnothing_{int} = 16\text{ mm}$

Al aumentar la distancia de separación, se observa en la Figura 37 como aumentan el coeficiente de amortiguamiento para ambas disposiciones, cuya explicación es extrapolable a lo que ocurría con el imán de $\varnothing 12\text{ mm}$.

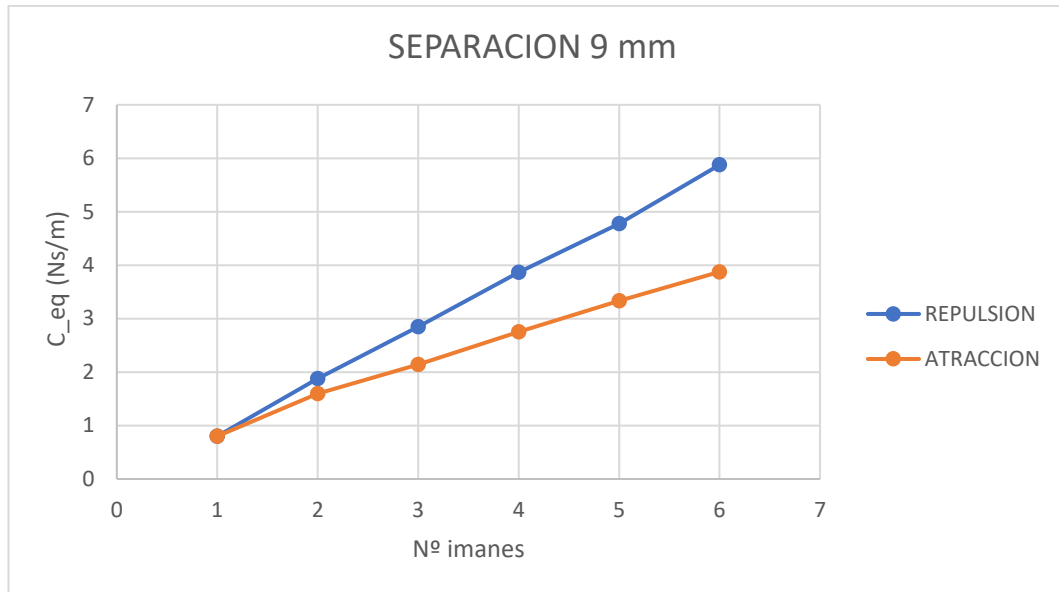


Figura 38. C_{eq} para imán $\varnothing 15\text{mm}$ en tubo $\varnothing_{int} = 16\text{ mm}$

Por último, al aumentar la distancia de separación hasta 9 mm se repite la tendencia mostrada en el imán de $\varnothing 12\text{ mm}$, aumentando el coeficiente de amortiguamiento para ambas disposiciones, mostrando una tendencia a equipararse en ambas disposiciones para una distancia mucho mayor.

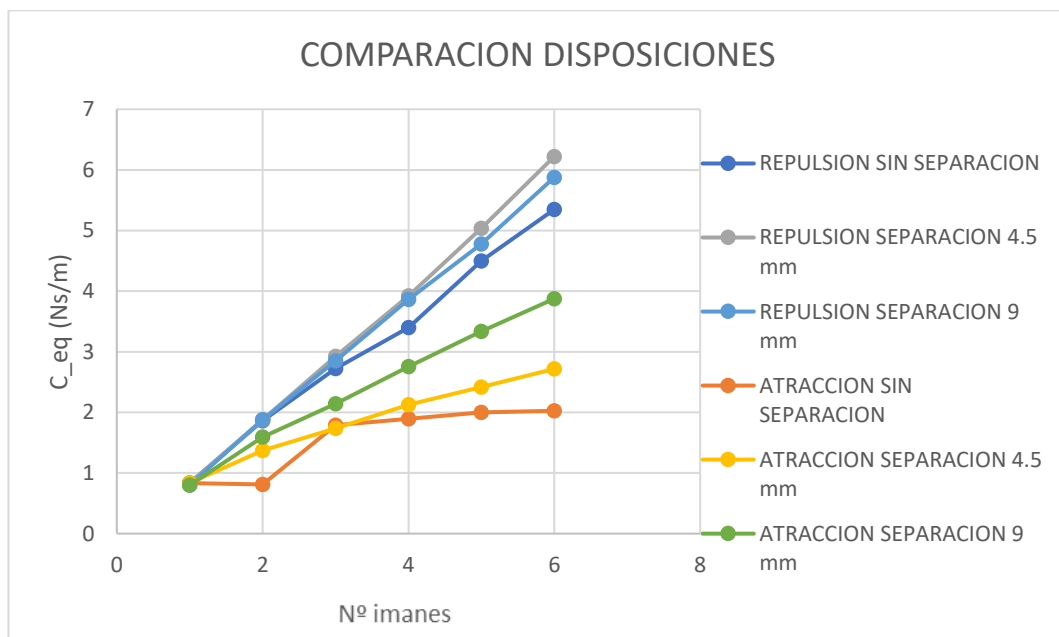


Figura 39. Comparación de C_{eq} para imán $\varnothing 15\text{mm}$ en tubo $\varnothing_{int} = 16\text{ mm}$

Poniendo todo lo anterior en común, se observa cómo para este imán el mayor amortiguamiento se da a una separación de 4.5 mm mientras que, de las configuraciones a repulsión, sin contacto entre ellos es la que menos coeficiente de amortiguamiento presenta. Esto tiene su explicación en la

geometría del imán que, como se indicó en el [Capítulo 3], es diferente a la del imán de $\varnothing 12$ mm, por lo que es lógico que sus disposiciones óptimas no coincidan.

En cuanto al efecto de la masa añadida, como se ha comentado en el presente capítulo, ha sido estudiada para el imán de $\varnothing 15$ mm, dispuesto a repulsión, con dos masas distintas y respetando las configuraciones empleadas hasta ahora, para poder comparar los resultados.

Se tienen, por tanto, las siguientes gráficas:

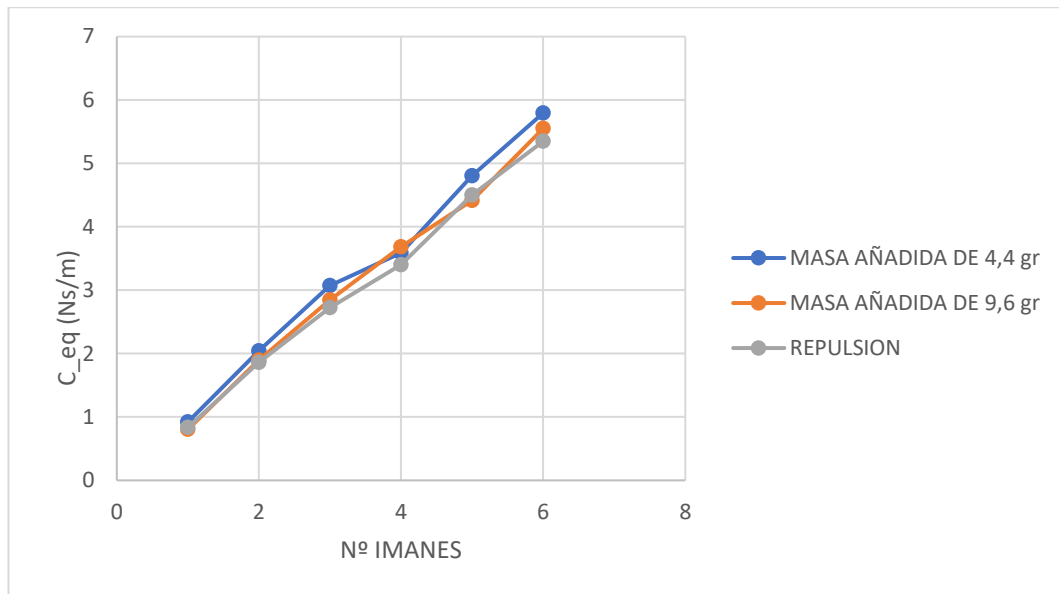


Figura 40. Comparación de C_{eq} sin separación con masa añadida para imán $\varnothing 15$ mm en tubo $\varnothing_{int} = 16$ mm

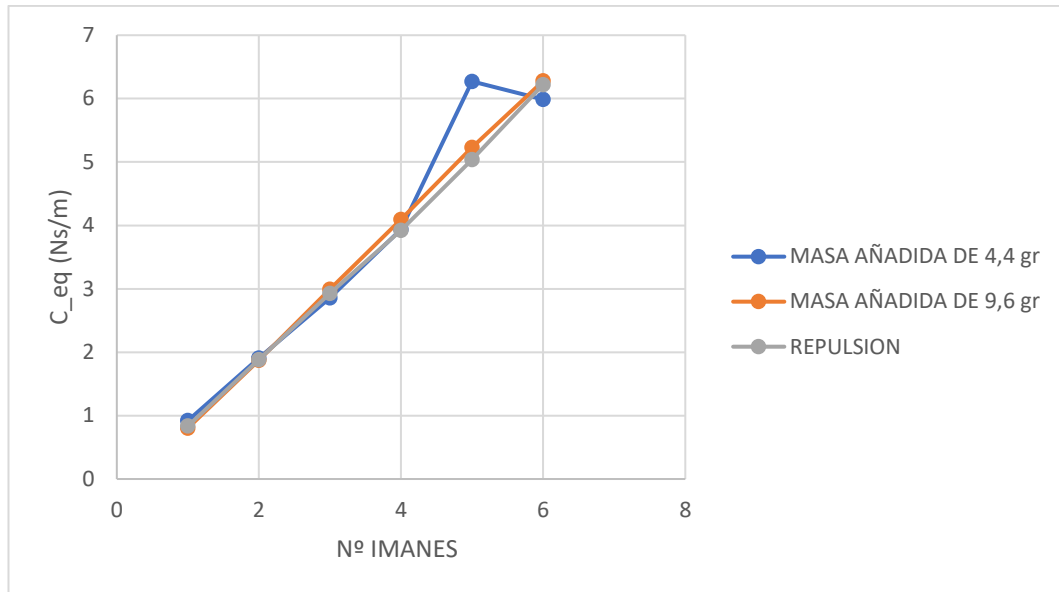


Figura 41. Comparación de C_{eq} 4.5 mm de separación con masa añadida para imán $\varnothing 15\text{mm}$ en tubo $\varnothing_{int} = 16\text{ mm}$

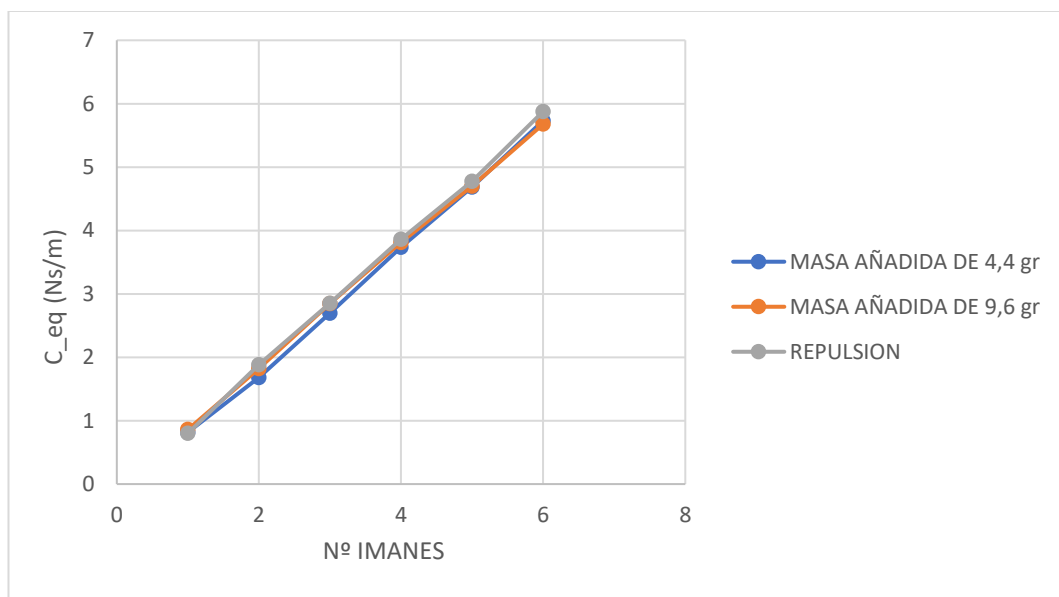


Figura 42 Comparación de C_{eq} separación de 9 mm con masa añadida para imán $\varnothing 15\text{mm}$ en tubo $\varnothing_{int} = 16\text{ mm}$

En todas ellas se observa como el coeficiente de amortiguación se mantiene invariable ante la presencia de masa añadida, independiente de cual sea la masa y la distancia entre imanes. En la Figura 41 se observa, no obstante, un punto donde si hay una diferencia de valores, pero al ser éste el único valor que difiere, siendo el resto todos iguales frente a su valor sin masa añadida, se asume como un error, bien por una pérdida de calibración de la célula de carga, o bien por un error manual al procesar los datos.

Por tanto, se demuestra que el comportamiento real del imán coincide con el ideal, siendo la amortiguación de éste independiente de la masa. Más adelante se probará lo mismo, aumentando tanto la holgura como el espesor.

4.3.3. Tubo de cobre de \varnothing_{INT} 23 mm y espesor de un mm.

4.3.3.1. Imán \varnothing 12 mm.

Se expone a continuación, la gráfica donde se recoge el comportamiento del imán de \varnothing 12 mm al aumentar aún más la holgura respecto al elemento conductor.

Al igual que se comentó en el apartado anterior, la tendencia en el comportamiento del imán a medida que aumenta la distancia entre imanes es la misma, por lo que sólo se va a representar el conjunto de las configuraciones.

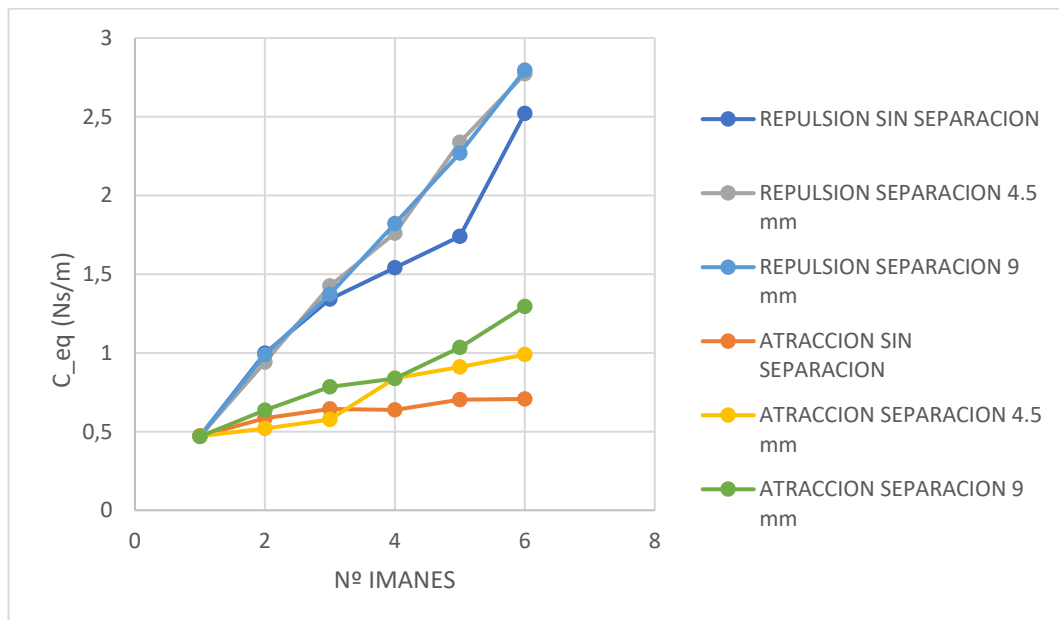


Figura 43. Comparación de C_{eq} para imán \varnothing 12mm en tubo $\varnothing_{int} = 23$ mm

En la Figura 43 se muestra como un aumento aún mayor de la holgura lleva asociada una disminución en proporción del coeficiente de amortiguamiento. Sin embargo, el comportamiento del imán en cuanto a su disposición es el mismo que con la holgura ya vista en el apartado anterior, donde el coeficiente de amortiguación es el mismo tanto con separación de 4.5 milímetros como con los imanes en contacto; como a atracción, donde aumenta a medida que lo hace la separación.

4.3.3.2. Imán \varnothing 15 mm.

Al igual que con el imán de \varnothing 12 mm, se va a representar únicamente el conjunto de las configuraciones, puesto que el estudio individualizado ya se ha

realizado, y las tendencias en el comportamiento se mantienen, siendo objeto de estudio en este apartado el comportamiento del conjunto con la variación de la holgura.

Por tanto, para el imán de $\varnothing 15$ mm se tiene:

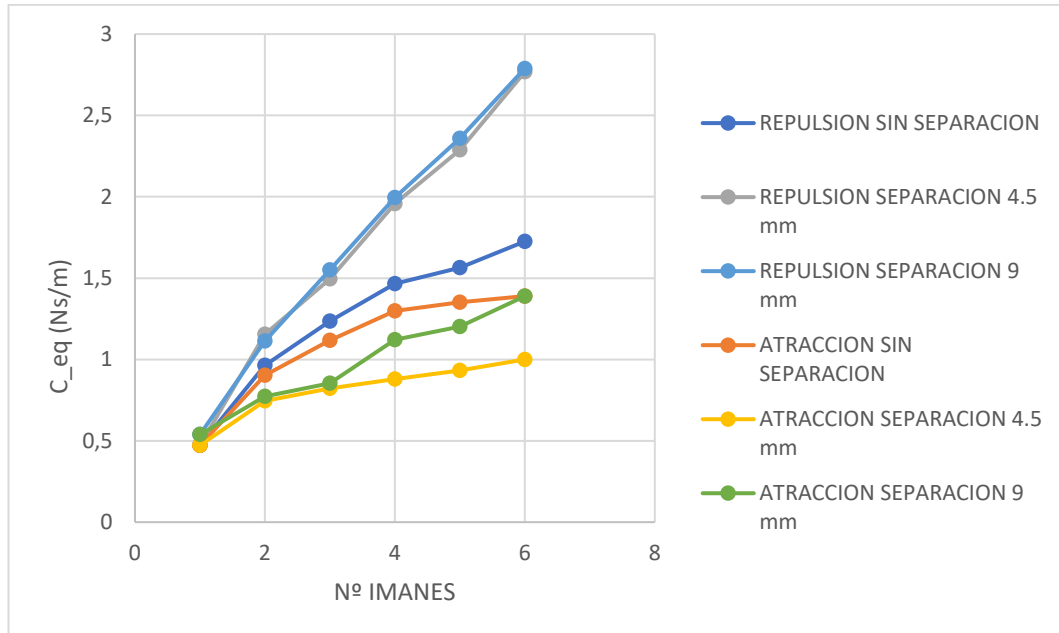


Figura 44. Comparación de C_{eq} para imán $\varnothing 15$ mm en tubo $\varnothing_{int} = 23$ mm

En la Figura 44 se observa como el comportamiento del imán a repulsión ha variado frente a la holgura, pues ha disminuido considerablemente el coeficiente de amortiguamiento, así como éste se ha equiparado para las configuraciones donde el imán presenta una separación de 4.5 y 9 mm respectivamente. También se observa como con los imanes en contacto entre sí a repulsión, ha bajado aún más el valor del coeficiente en relación con las otras dos disposiciones, casi equiparándose a los imanes en atracción separados 9 mm.

En lo referido a cómo se comporta el imán con masa añadida al aumentarle la holgura, en la siguiente gráfica se reúnen los comportamientos sufridos por éste:

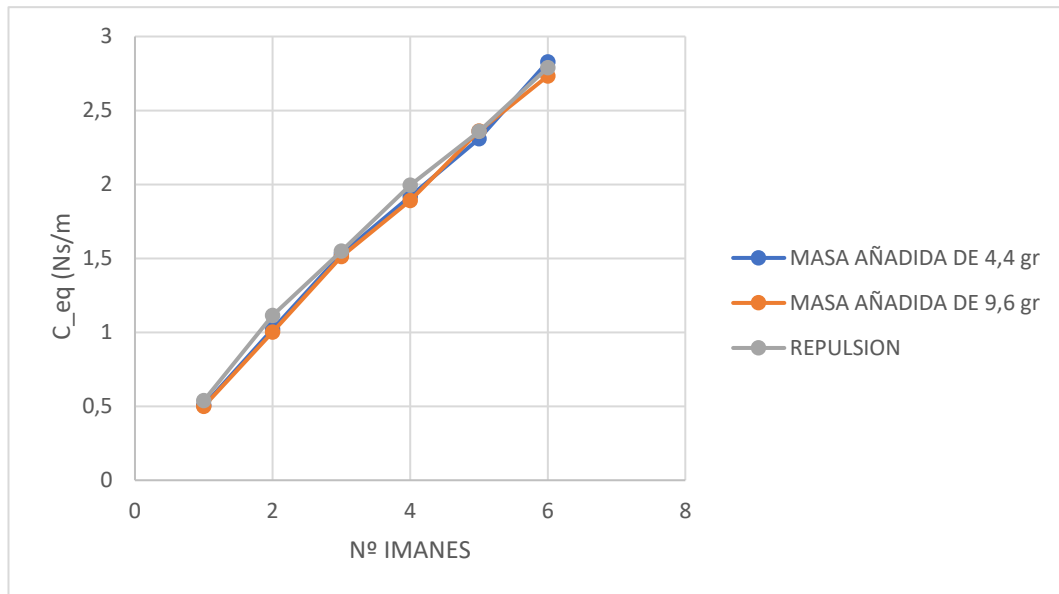


Figura 45 Comparación de C_{eq} separación de 9 mm con masa añadida para imán $\varnothing 15\text{mm}$ en tubo $\varnothing_{int} = 23\text{ mm}$

Se ha representado sólo como ejemplo la disposición de los imanes a 9 mm, puesto que en el apartado anterior se ha llegado a la conclusión que la separación entre imanes y la masa añadida no afectaban al amortiguamiento, y ahora se pretende comprobar si la holgura condiciona a las anteriores mencionadas.

Y, como se puede observar, el valor del coeficiente de amortiguamiento permanece inalterado, por lo que se concluye que el coeficiente de amortiguamiento no se ve modificado por la masa en presencia de holgura.

4.3.4. Tubo de cobre de \varnothing_{INT} 13 mm y espesor de dos mm.

4.3.4.1. Imán \varnothing 12 mm.

Como se viene aplicando en los últimos apartados, se va a representar el conjunto de configuraciones en una misma gráfica, puesto que el comportamiento al aumentar el número de imanes y la distancia es el mismo, y el objeto de estudio en esta ocasión es cómo afecta el aumento de espesor.

Por tanto, las tendencias del coeficiente de amortiguación quedan representadas en la siguiente gráfica.

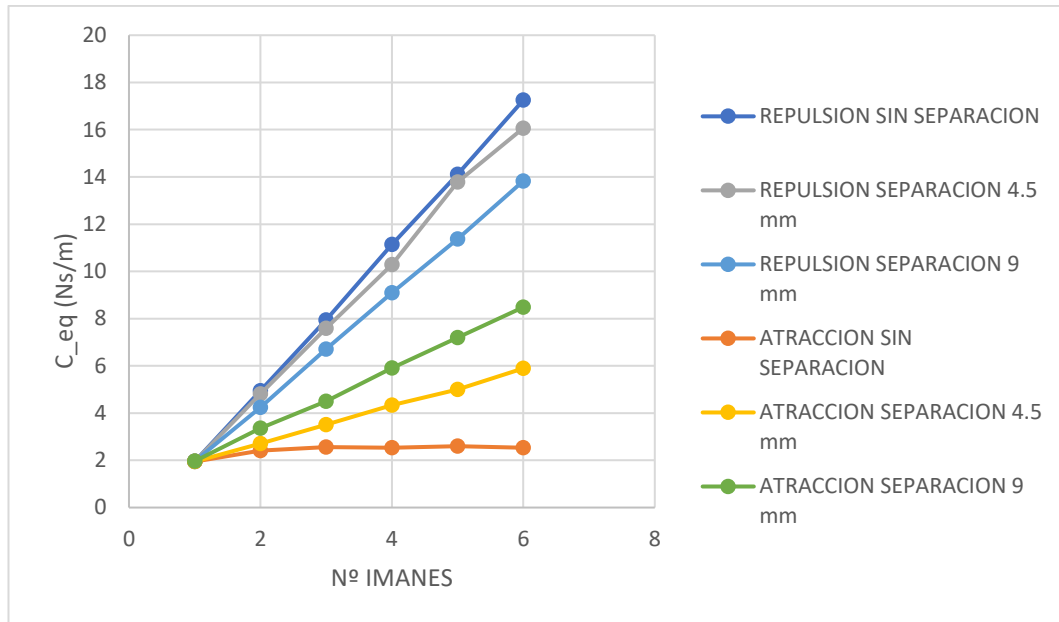


Figura 46 Comparación de C_{eq} para imán $\varnothing 12\text{mm}$ en tubo $\varnothing_{int} = 13\text{ mm}$ y $e=2\text{ mm}$

Se observa en la Figura 46 como ha aumentado de forma significativa el coeficiente de amortiguamiento al aumentar el espesor del elemento conductor, tanto en repulsión como dispuestos a atracción.

Como se explicó en el modelado matemático del coeficiente de amortiguación magnético, véase la Ecuación 26, éste estaba supeditado a la integral del volumen del material conductor. Por tanto, es lógico pensar que, al aumentar el espesor del elemento conductor, aumentará también el coeficiente de amortiguamiento, como se observa en la figura.

4.3.5. Tubo de cobre de \varnothing_{INT} 16 mm y espesor de dos mm.

4.3.5.1. Imán \varnothing 12 mm.

En esta ocasión, se representa el efecto de aumentar el espesor, sobre lo anteriormente estudiado, sea esto el cómo afecta la holgura y la disposición de los imanes.

Como ya se ha mencionado, sólo se representa el conjunto de las configuraciones, puesto que el objeto de interés es el comportamiento frente al aumento del espesor.

Por tanto, se tiene la siguiente gráfica:

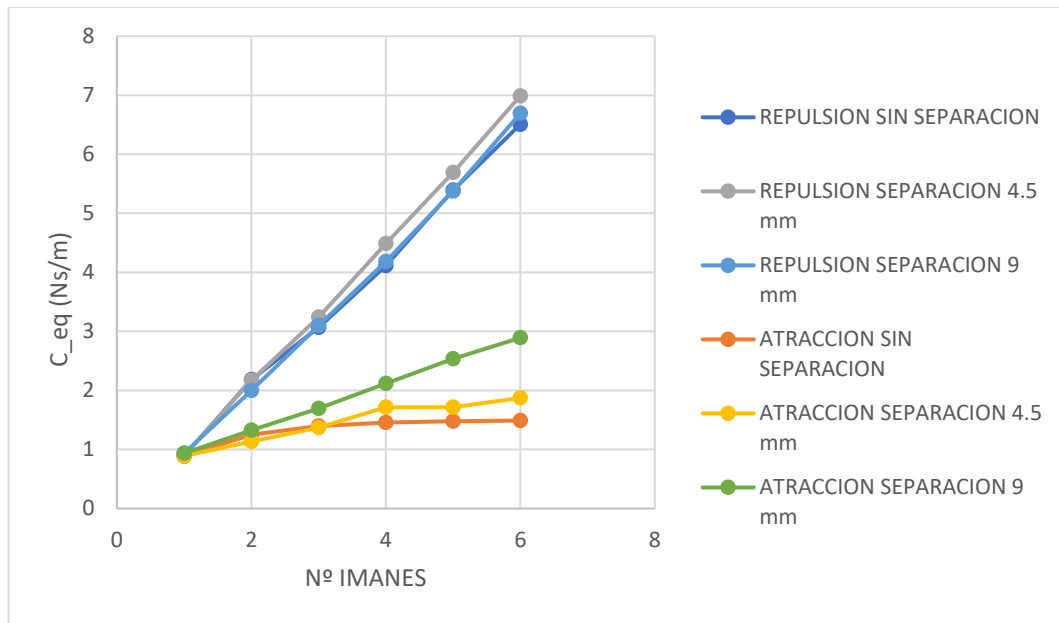


Figura 47 Comparación de C_{eq} para imán $\varnothing 12\text{mm}$ en tubo $\varnothing_{int} = 16\text{mm}$ y $e=2\text{mm}$

Se observa como ante un aumento del espesor, en presencia de holgura, los valores del coeficiente de amortiguamiento aumentan en todas las configuraciones disponibles, alcanzando valores similares en todas las disposiciones a repulsión. Por tanto, se observa un aumento del amortiguamiento, pero se mantiene la tendencia que éste seguía cuando se analizó únicamente la presencia de la holgura.

4.3.5.2. Imán $\varnothing 15\text{mm}$.

De igual modo que se viene haciendo en los últimos apartados, se representa el conjunto de las disposiciones para poder analizar el comportamiento del coeficiente de amortiguamiento ante el aumento del espesor, puesto que las tendencias individuales se mantendrán acordes a lo estudiado.

Queda representado en la Figura 48 la influencia del espesor:

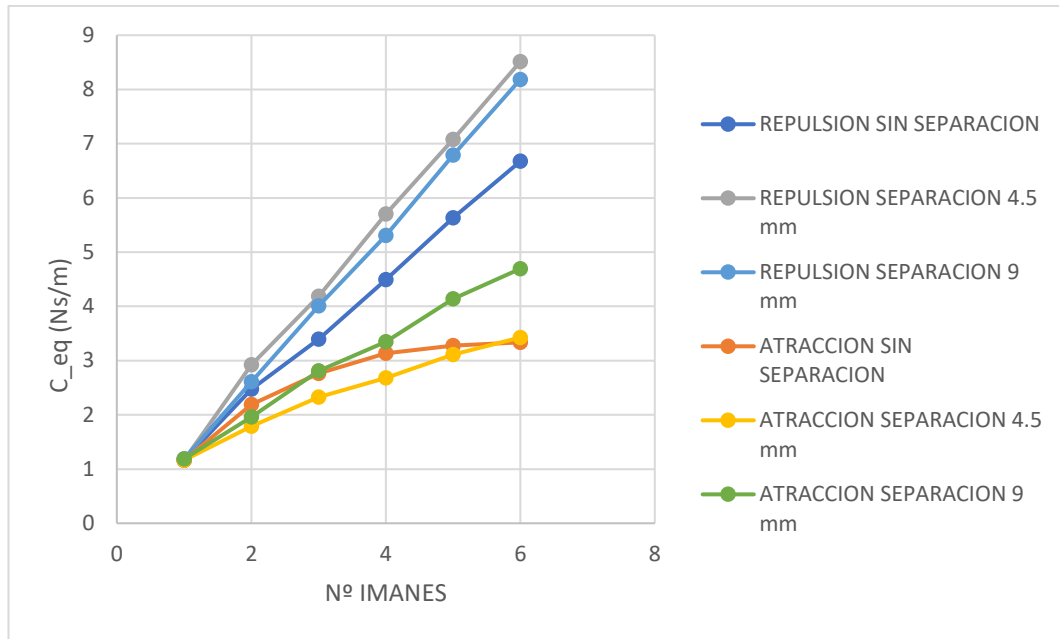


Figura 48. Comparación de C_{eq} para imán $\varnothing 15\text{mm}$ en tubo $\varnothing_{int} = 16\text{ mm}$ y $e=2\text{ mm}$

Se observa en la gráfica anterior un aumento, también, del coeficiente de amortiguamiento. Sin embargo, este aumento no es tan significativo como pudo ser el caso del imán de $\varnothing 12\text{ mm}$, probablemente por la distinta magnetización, así como geometría, que presentan uno y otro, pues de ser el mismo imán este aumento del coeficiente de amortiguamiento sería proporcional entre ellos.

Como comentario, se sigue manteniendo las tendencias individuales ya vistas para el imán de $\varnothing 15\text{ mm}$, donde las disposiciones óptimas siguen siendo una separación de 4.5 y 9 mm entre imanes.

En lo referido a la masa, al igual que en el apartado anterior, se representa sólo un ejemplo de cómo afecta el espesor, puesto que será análogo para el resto de las configuraciones.

Por tanto, el espesor y la masa afectan a la amortiguación magnética de acuerdo con la siguiente gráfica:

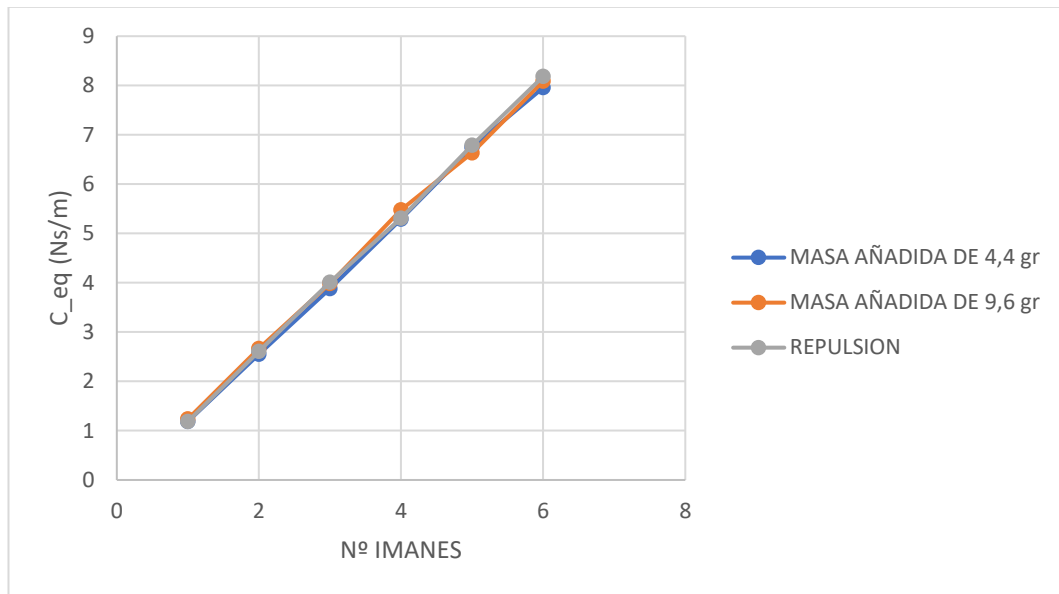


Figura 49. Comparación de C_{eq} separación de 9 mm con masa añadida para imán $\varnothing 15\text{mm}$ en tubo $\varnothing_{int} = 23\text{ mm}$ y $e=2\text{ mm}$

Se observa como el coeficiente de amortiguamiento permanece inalterado ante el aumento de espesor del elemento conductor en presencia de masa añadida, correspondiéndose con el obtenido sin la presencia de masa.

Por tanto, se concluye como el coeficiente de amortiguamiento magnético es independiente de la masa añadida, tanto de ella sola, como en presencia de holguras y espesores distintos, confirmándose el comportamiento ideal.

4.3.6. Tubo de cobre de \varnothing_{INT} 13 mm y espesor de tres mm.

4.3.6.1. Imán \varnothing 12 mm.

Como medida adicional para el estudio del efecto del espesor se representa, para un espesor mayor que el anteriormente analizado, cómo se comporta el coeficiente de amortiguación magnético:

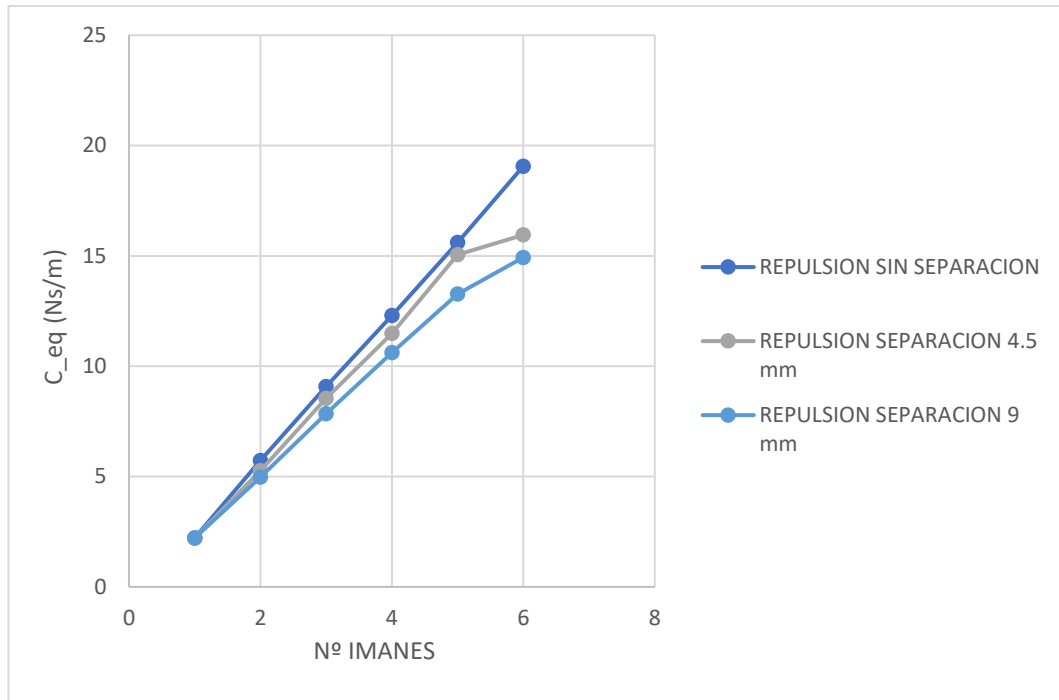


Figura 50. Comparación de C_{eq} para imán $\varnothing 12$ mm en tubo $\varnothing_{int} = 13$ mm y $e=3$ mm

Para un aumento a mayores del espesor, como se puede comprobar en la Figura 50, se tiene un aumento del coeficiente de amortiguamiento, aproximadamente en proporción al estudiado anteriormente, cuando se pasó de un espesor de 1 a 2 mm, presentando por tanto un comportamiento lineal.

4.4. Caracterización de los imanes.

Se ha comprobado cómo la holgura afecta de forma negativa al comportamiento disipativo de los imanes, así como el nulo efecto de la masa.

Por lo tanto, se prescinde de ambas a la hora de caracterizar cada uno de los dos imanes, pues se tendrá en cuenta la distancia entre imanes, el número de éstos, y el espesor del material conductor, partiendo de la premisa de lograr una holgura mínima entre éste y el imán.

4.4.1. Imán $\varnothing 12$ mm.

Para el imán de $\varnothing 12$ mm, se representan las gráficas que caracterizan los coeficientes de amortiguamiento a continuación:

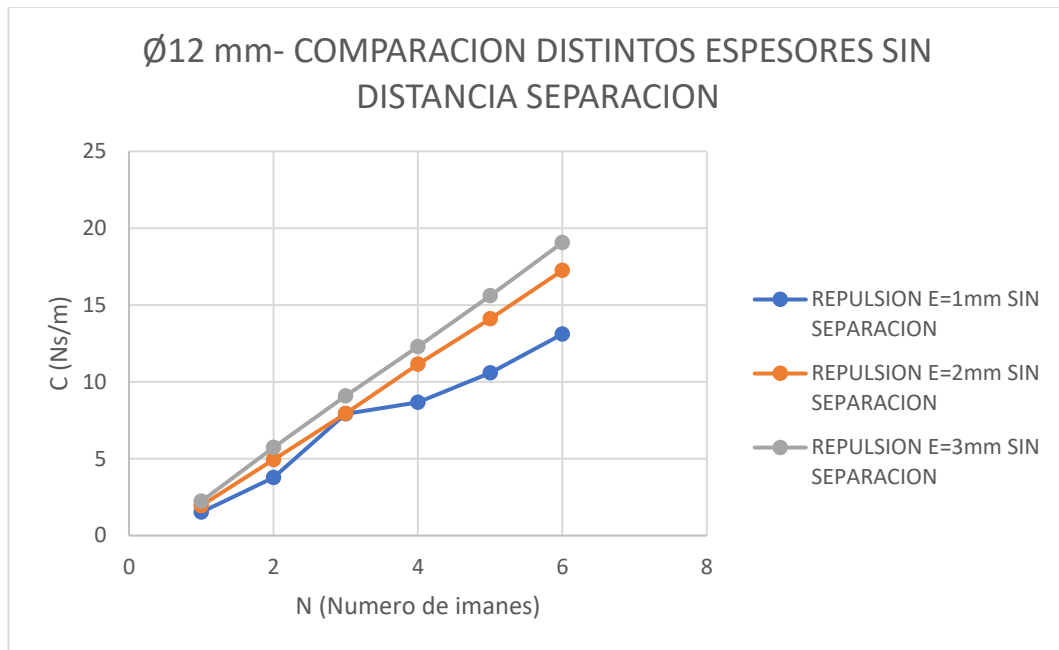


Figura 51. Comparación de C_{eq} para imán Ø12 mm para distintos espesores, sin separación y holgura mínima.

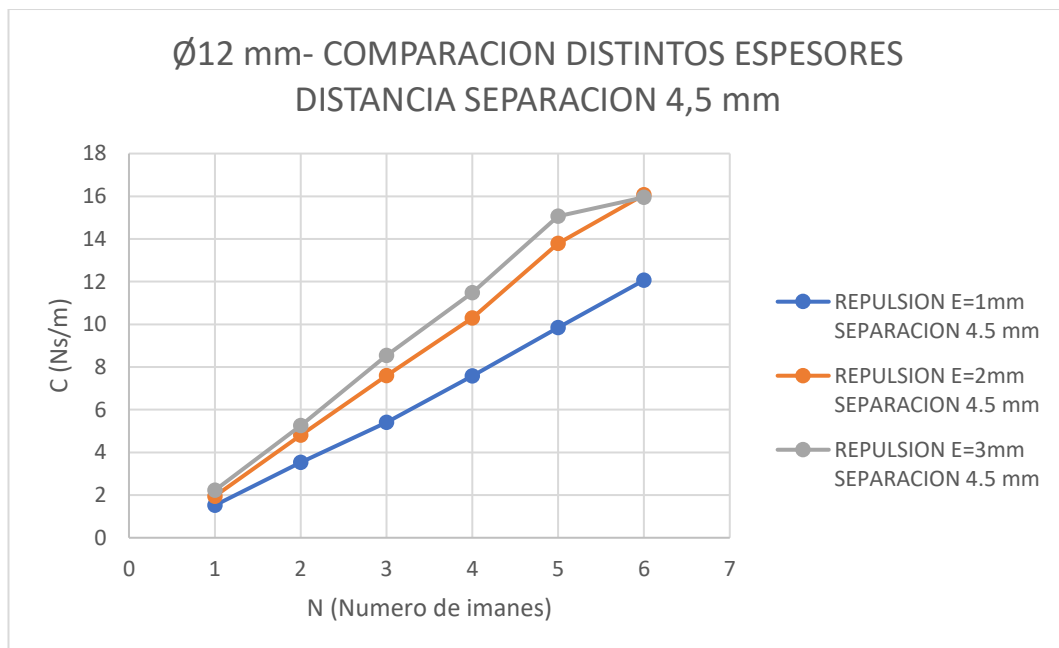


Figura 52. Comparación de C_{eq} para imán Ø12 mm para distintos espesores, 4.5mm de separación y holgura mínima.

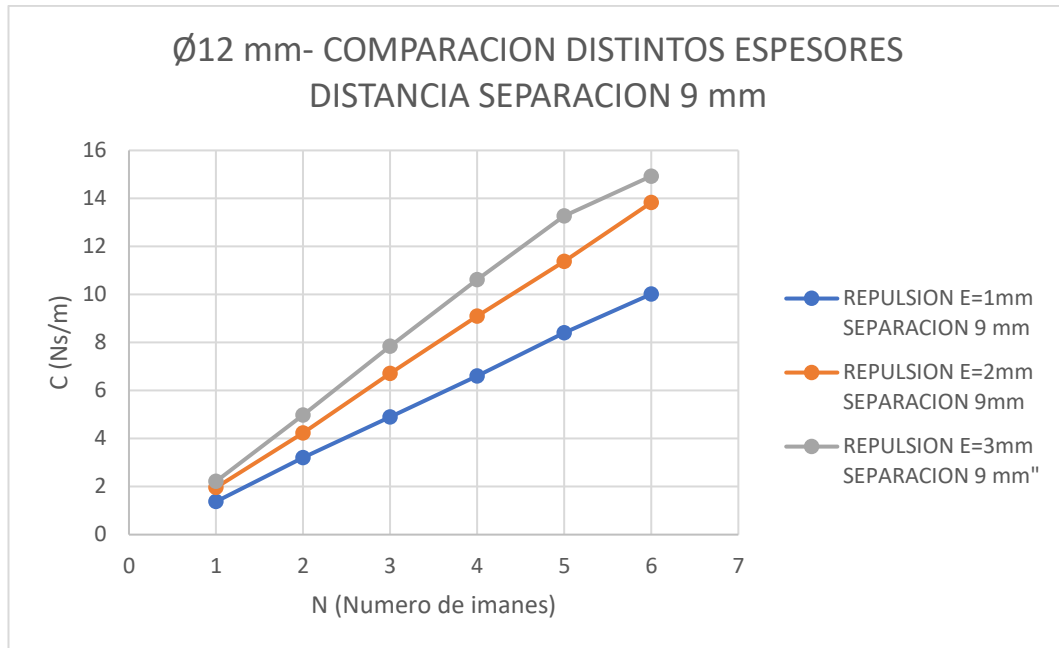


Figura 53. Comparación de C_{eq} para imán $\varnothing 12$ mm para distintos espesores, 9 mm de separación y holgura mínima.

4.4.1. Imán $\varnothing 15$ mm.

Se realiza el mismo procedimiento para el imán de $\varnothing 15$ mm, representando en el siguiente conjunto de gráficas su caracterización:

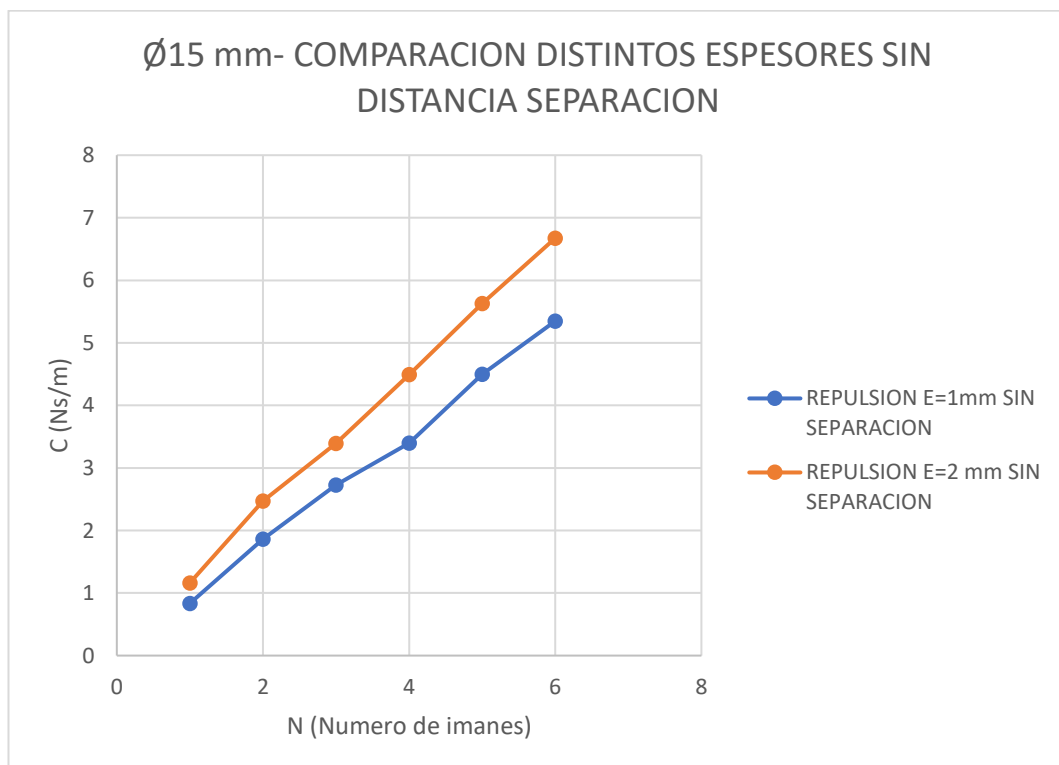


Figura 54. Comparación de C_{eq} para imán $\varnothing 15$ mm para distintos espesores, sin separación y holgura mínima.

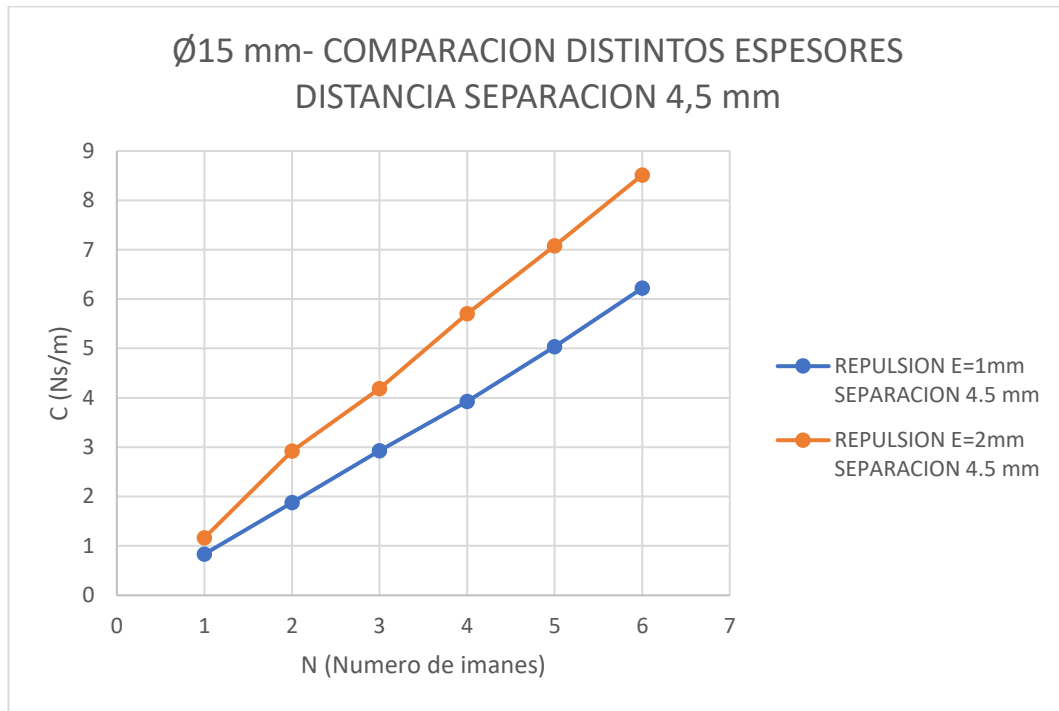


Figura 55. Comparación de C_{eq} para imán $\varnothing 15$ mm para distintos espesores, 4.5 mm separación y holgura mínima.

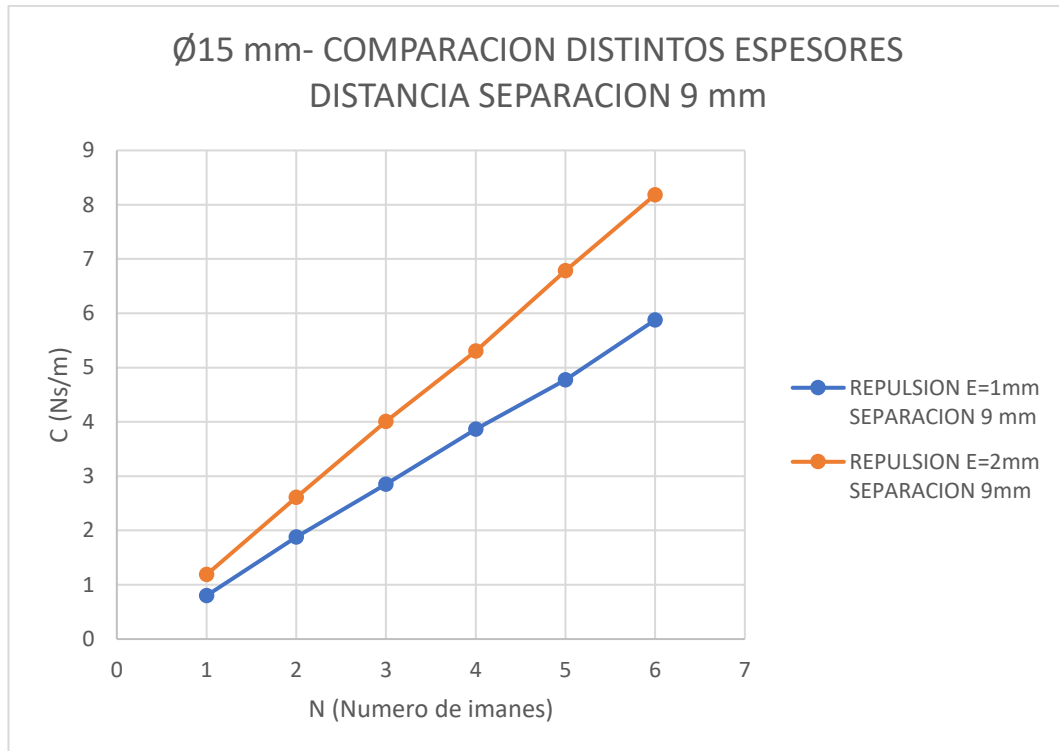


Figura 56. Comparación de C_{eq} para imán $\varnothing 15$ mm para distintos espesores, 9 mm separación y holgura mínima.

4.5. Ejemplo de aplicación.

El presente trabajo se ha desarrollado desde el punto de vista experimental, donde se ha estudiado el comportamiento del coeficiente de amortiguación para dos imanes distintos y diversos tipos de configuraciones.

Sin embargo, como se ha mencionado en distintos puntos de éste, el interés en conocer el comportamiento del imán como elemento disipador radica en la linealidad que ha demostrado tener y, por tanto, a su capacidad de sustituir un amortiguador viscoso, presentando las virtudes de éste y ventajas tales como su nula fricción y mejor mantenimiento.

Tómese de ejemplo un Trabajo Fin de Grado realizado en el Departamento de C.A., I. T., M.M.C y Teoría de Estructuras, donde se realizó el estudio de cuatro propuestas de amortiguadores para la disipación de vibraciones en un TMD. Dentro de estas cuatro propuestas, se encontraba un amortiguador viscoso, comúnmente usado en los manillares de las motocicletas, el cual para el experimento realizado presentaba un coeficiente de amortiguación viscosa $c_{viscoso} = 307.56 \frac{Ns}{m}$.

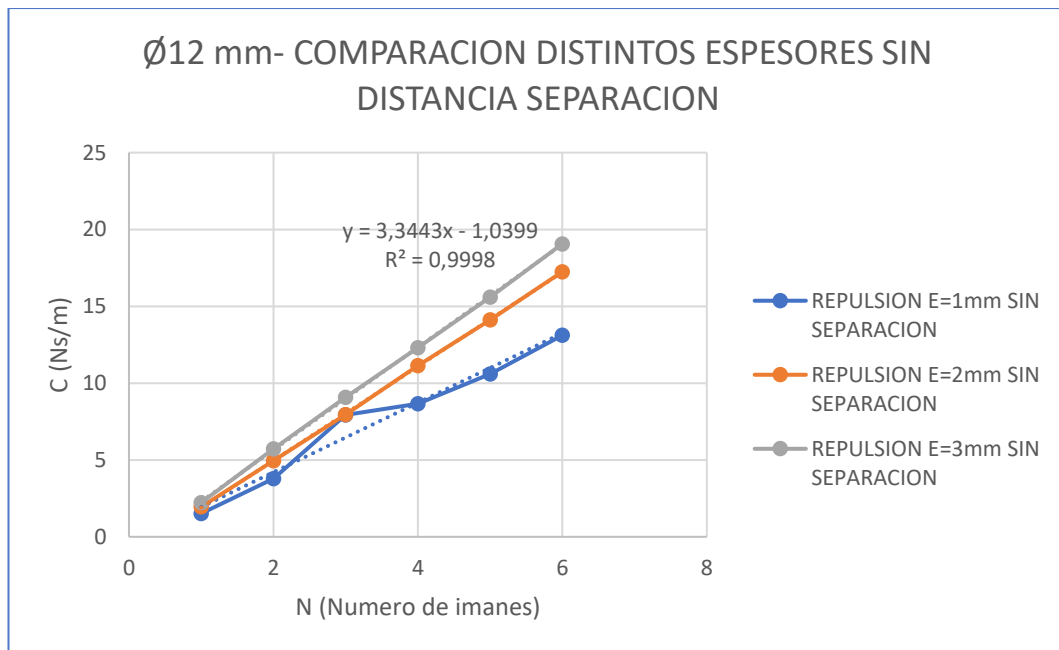
Si se quisiera sustituir dicho amortiguador, por cualquiera de los motivos expuestos a lo largo del trabajo, en pro de un sistema de amortiguación basado en el magnetismo con los imanes trabajados en este proyecto, se debería realizar el siguiente procedimiento.

En primer lugar, se acudiría a las tablas del apartado anterior donde se caracterizaba el comportamiento del coeficiente de amortiguación magnético, para comprobar qué imán y qué configuración resulta más adecuada.

Se obtendría que, a tenor de lo reflejado en la Figura 51, la configuración óptima sería un conjunto de imanes, dispuestos a repulsión y sin separación entre ellos, y con un grosor del elemento conductor de 3 mm.

El siguiente paso sería conocer cuántos imanes son necesarios para conseguir un coeficiente de amortiguación equiparable al viscoso. Para ello, se muestra la Figura 51 de nuevo, pero centrándola en la configuración que se ha considerado la óptima.

En ella, recordando que su comportamiento va a ser idéntico al viscoso y, por tanto, lineal, se tiene la ecuación que rige el comportamiento del coeficiente de amortiguamiento magnético:



$$y(x) = 3.3443 x - 1.0399$$

Donde $y(x) = C_{eq}$, siendo $x = N^{\circ}_{imanes}$.

Por tanto, teniendo en cuenta el $C_{viscoso}$ que se quiere obtener, la expresión anterior queda:

$$C_{eq} = 3.3443 \cdot N^{\circ}_{imanes} - 1.0399$$

$$307.56 = 3.3443 \cdot N - 1.0399$$

$$N = 92.28 \sim 93 \text{ imanes}$$

Serían necesarios 93 imanes como los trabajados los necesarios para sustituir dicho amortiguador viscoso, u otro tipo de imán con una magnetización diferente, que permita con una configuración optima sustituir el amortiguador viscoso con un número menor de imanes.

CAPITULO 5

CONCLUSIONES-LINEAS FUTURAS

5. CONCLUSIONES-LINEAS FUTURAS.

En este apartado se recogen las conclusiones y consideraciones finales del presente Trabajo Fin de Grado, así como posibles líneas futuras de trabajo que amplíen lo desarrollado en el presente proyecto.

5.1. Conclusiones.

Una vez desarrollada la experimentación, tomadas las medidas y analizados los resultados obtenidos mediante ambas metodologías, se pueden obtener una serie de razonamientos en relación con la amortiguación magnética.

Se ha demostrado como la amortiguación magnética presenta la linealidad propia de la amortiguación viscosa y, por tanto, la viabilidad de emplearla en sustitución de la amortiguación viscosa.

Del mismo modo, se ha observado la influencia de las distintas variables con las que se ha experimentado. Se tiene como para un mismo tipo de imán, la holgura entre el elemento conductor y éste perjudica la capacidad de disipación de energía, mientras que un aumento del número de imanes dispuestos a repulsión entre sí, y un aumento del espesor del elemento conductor, tiene como consecuencia un aumento en el coeficiente de amortiguamiento magnético. Así mismo, se ha demostrado también como el comportamiento real de los imanes se corresponde con el ideal, siendo su coeficiente de amortiguación magnética independiente de la masa añadida.

También se observa cómo el tipo de imán condiciona la elección de su configuración óptima, siendo ésta distinta para cada uno de los imanes tratados, por lo que, a la hora de sustituir un amortiguador viscoso por uno magnético, debiera ser ésta la primera variable a tener en cuenta.

Todo lo mencionado anteriormente, se ha visto reflejado mediante el uso de ambas metodologías de trabajo explicadas en el desarrollo del presente trabajo, por lo que, aunque una es más precisa que otra, ambas se consideran válidas para estudiar y analizar el comportamiento de la amortiguación magnética frente a las distintas variables.

Como consecuencia de todo lo anterior, recapitulando los objetivos expuestos en el [Capítulo 1], se tiene que:

- Se ha explorado el efecto magnético como fuente de disipación de energía, teniendo como resultado una amortiguación con un comportamiento lineal propio de la amortiguación viscosa.
- Se ha experimentado y estudiado la amortiguación magnética en distintos escenarios (distintos imanes, tubos diferentes, masas y separaciones diversas).

- Se han diseñado dos metodologías que han resultado válidas a la hora de caracterizar el coeficiente de amortiguamiento magnético, siendo una más rápida e inmediata, aunque más imprecisa; mientras que otra proporcionaba resultados más fidedignos al comportamiento del imán.
- Se han obtenido correlaciones entre el coeficiente de amortiguación magnético y las distintas variables, estudiando la influencia de éstas en el coeficiente de amortiguación.
- Para los imanes y las variables estudiadas, se ha obtenido las configuraciones óptimas que permiten una mayor amortiguación magnética.

Por tanto, se puede concluir que tanto el estudio de la amortiguación magnética, como la consecución de los objetivos inicialmente dispuestos, se ha llevado a cabo de manera satisfactoria.

5.2. Consideraciones adicionales.

En lo referente a la elaboración y desarrollo del presente Trabajo Fin de Grado, es de interés realizar una serie de valoraciones acerca del impacto ambiental y económico que éste ha supuesto.

En cuanto al impacto ambiental, cabe destacar que los materiales empleados en el transcurso del proyecto no han sido peligrosos ni se han llevado a cabo actividades que implicasen un perjuicio al medio ambiente.

Del mismo modo, la instrumentación empleada propia del laboratorio, así como los materiales específicos adquiridos para el presente trabajo, queda disponible para futuros alumnos que, en sus respectivos Trabajos Fin de Grado, requieran el uso de estos materiales.

Es por ello por lo que el impacto ambiental puede considerarse mínimo, destacando únicamente el momento futuro en el que se desechen estos materiales, ya sea por un deterioro de éstos, o bien por la finalización del ciclo de vida de los componentes electrónicos. No obstante, todos estos materiales podrán ser reciclados.

En lo que a nivel económico se refiere, en la Tabla 68 se recogen los gastos de los materiales específicos adquiridos para el presente proyecto.

<i>Material</i>	<i>Precio (€)</i>
<i>Imán Ø 12 mm [13]</i>	31.74
<i>Imán Ø 15 mm [14]</i>	25.95
<i>Tubería de cobre Øint 13 mm [16]</i>	14.29
<i>Tubería de cobre Øint 16 mm [17]</i>	16.79
<i>Tubería de cobre Øint 16 mm [18]</i>	8.89
TOTAL	97.66

Tabla 68. Presupuesto de materiales

A lo mostrado anteriormente, se le suma el presupuesto del trabajador. Un ingeniero industrial, en condición de becario, presenta un salario promedio de 874 €/mes [19], con 160 horas trabajadas. Por tanto, resulta un coste de 5.46 €/hora. Tomando como referencia el número de créditos ECTS asociados al Trabajo Fin de Grado, así como su equivalencia en horas, siendo unas 300 horas aproximadamente, se tiene que el coste asociado al trabajador sería de 1638 €.

Por tanto, el coste total del proyecto, contando tanto los materiales adquiridos como la mano de obra del trabajador, asciende a *mil setecientos treinta y cinco euros con sesenta y seis céntimos*.

5.3. Líneas futuras.

El presente trabajo ha centrado su desarrollo en la caracterización del coeficiente de amortiguación magnético de un modo experimental, tomando datos, ya sea de forma manual o mediante el empleo de un software adicional, para posteriormente procesar los datos y obtener los resultados.

Sin embargo, esta misma caracterización puede realizarse mediante un modelado y una simulación por ordenador, de la cual se obtenga directamente el valor de la fuerza de amortiguación para un imán y una configuración determinada, de la cual posteriormente se pueda obtener el coeficiente de amortiguación.

Lo mencionado anteriormente puede llevarse a cabo mediante el uso del programa *ANSYS MAXWELL*, un software de simulación por elementos finitos (MEF) que permite el estudio de las interacciones electromagnéticas entre varios sólidos.

Como posible ampliación al presente trabajo desarrollado, se podría continuar con el modelado del dispositivo experimental, dispuesto en la Figura 57, donde sin ser éste el objeto del presente trabajo se ha iniciado con el modelado para su posterior simulación.

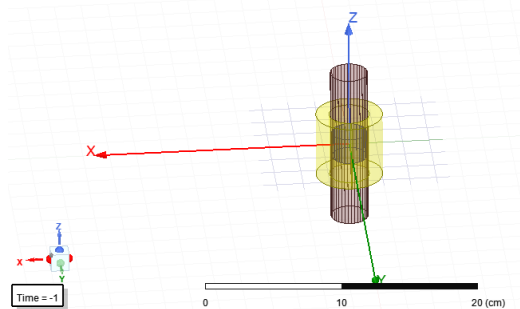


Figura 57. Modelado experimental en ANSYS MAXWELL

BIBLIOGRAFIA

6. BIBLIOGRAFÍA.

- [1] S. Graham. Kelly, *Schaum's outline of theory and problems of mechanical vibrations*. McGraw-Hill, 1996.
- [2] P. L. Ringegni, A. Martínez, and D. Pezzo, "Mecánica y Mecanismos."
- [3] K. M. and G. F. Ebrahimi B, "A Novel Eddy Current Damper: Theory and Experimentation," *Journal of Physics D: Applied Physics*, pp. 1–6, 2009.
- [4] J. Fassnacht and P. Mutschler, "Benefits and limits of using an acceleration sensor in actively damping high frequent mechanical oscillations," *Conference Record - IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society)*, vol. 4, pp. 2337–2344, 2001, doi: 10.1109/IAS.2001.955949.
- [5] I. D. Vagner, B. I. (Boris I.) Lembrikov, and P. Wyder, "Electrodynamics of magnetoactive media," p. 422, 2004.
- [6] H. Johnson, H. W. Johnson, and M. Graham, *High-speed Signal Propagation: Advanced Black Magic*. Prentice Hall Professional, 2003. Accessed: Nov. 27, 2021. [Online]. Available: https://books.google.com/books?id=mMJxcWqm_1oC&pg=PA80
- [7] S. G. Krishnamoorthy and I. Skiedraite, "Development of electromagnetic damper," *Mechanika*, vol. 21, no. 3, pp. 226–233, 2015, doi: 10.5755/j01.mech.21.3.9838.
- [8] B. J. I. D. and B. W. Sodano HA, "Concept and Model of Eddy Current Damper for Vibration Suppression of a Beam," *Journal of Sound*, 2005.
- [9] Z. Shi, J. Shan, C. N. Loong, W. Wu, C.-C. Chang, and W. Shi, "Experimental and Numerical Study on Dynamic Behavior of Eddy Current Damping with Frequency Dependence," *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 146, no. 10, p. 04020116, Oct. 2020, doi: 10.1061/(asce)em.1943-7889.0001852.
- [10] P. A. Tipler and P. A. Tipler, "Física para la ciencia y la tecnología (2 volúmenes)," 2000.
- [11] J. B. Marion and J. B. Marion, "Dinámica clásica de las partículas y sistemas," *Dinámica Clásica de las Partículas y Sistemas*, p. p 3-45, 1996.
- [12] Z. Wang, Z. Chen, and J. Wang, "Feasibility study of a large-scale tuned mass damper with eddy current damping mechanism," *Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, vol. 11, no. 3, pp. 391–401, 2012, doi: 10.1007/s11803-012-0129-x.

- [13] “Aro magnético 12 x 5 x 12 mm, niquelado - supermagnete.es.”
https://www.supermagnete.es/iman-es-anillo-neodimio/aro-magnetico-12mm-5mm-12mm_R-12-05-12-N (accessed Nov. 28, 2021).
- [14] “Aro magnético 15 x 6 x 6 mm, niquelado - supermagnete.es.”
https://www.supermagnete.es/iman-es-anillo-neodimio/aro-magnetico-15mm-6mm-6mm_R-15-06-06-N (accessed Nov. 28, 2021).
- [15] “Conductores de cobre VS conductores de aluminio - Gomez Maqueda - Material Eléctrico y Automatización Industrial en Sevilla.”
<https://www.gomezmaqueda.com/conductores-cobre-aluminio/> (accessed Nov. 28, 2021).
- [16] “Tubo de cobre Ø15 mm 2,5 metros de longitud · LEROY MERLIN.”
<https://www.leroymerlin.es/fp/17885196/tubo-de-cobre-15-mm-2-5-metros-de-longitud> (accessed Dec. 14, 2021).
- [17] “Tubo de cobre Ø18 mm 2,5 metros de longitud · LEROY MERLIN.”
<https://www.leroymerlin.es/fp/17885336/tubo-de-cobre-18-mm-2-5-metros-de-longitud> (accessed Dec. 14, 2021).
- [18] “Tubo de cobre Ø22 mm 1 metro de longitud · LEROY MERLIN.”
<https://www.leroymerlin.es/fp/17946166/tubo-de-cobre-22-mm-1-metro-de-longitud> (accessed Dec. 14, 2021).
- [19] “Salario de un Becario en ingeniería industrial en España.”
<https://es.indeed.com/career/practicante-ingenieria-industrial/salaries> (accessed Dec. 14, 2021).

ANEXOS

7. ANEXOS.

A. CALIBRACIÓN DE LA CÉLULA DE CARGA.

A continuación, se expone la metodología empleada para el calibrado de la célula de carga, a fin de poder emplearla de forma correcta.

En primer lugar, se ha de conectar a uno de los múltiples puertos D-SUB que posee el hardware SIRIUS, mostrados en la Figura 17, mediante un adaptador de 9 pines, ya que la célula de carga, como se ha mencionado, solo posee 4 cables.

Una vez puenteados los pines, y conectada la célula de carga al hardware SIRIUS a través de uno de sus múltiples canales, se configura dicho canal de acuerdo con la Figura 58, ajustando el rango de medida, así como el tipo de medida y las unidades de medida de la célula de carga.

ID	Used	C	Name	Ampl. name	Range	Measurement	Min	Values	Max	Physical quantity	Units	Zero	Setup
1	Unused		AI 1	SIRIUS-HD-STGS	30 V	Voltage	-10,00	-0,1422	10,00		V	Zero	Setup
2	Unused		AI 2	SIRIUS-HD-STGS	30 V	Voltage	-890,43	-3,85	497,84		N	Zero	Setup
3	Unused		AI 3	SIRIUS-HD-STGS	30 V	Voltage	-10,00	-0,0375	10,00		V	Zero	Setup
4	Unused		AI 4	SIRIUS-HD-STGS	30 V	Voltage	-10,00	0,0340	10,00		V	Zero	Setup
5	Used		AI 5	SIRIUS-HD-STGS	2 mV/V	Bridge	-379,00	0,05	379,00	Force	N	Zero	Setup
6	Unused		AI 6	SIRIUS-HD-STGS	30 V	Voltage	-10,00	-0,0010	10,00		V	Zero	Setup
7	Unused		AI 7	SIRIUS-HD-STGS	30 V	Voltage	-10,00	-0,1838	10,00		V	Zero	Setup
8	Unused		AI 8	SIRIUS-HD-STGS	30 V	Voltage	-10,00	-0,0406	10,00		V	Zero	Setup
9	Unused		AI 9	SIRIUS-HD-STGS	30 V	Voltage	-10,00	-0,3073	10,00		V	Zero	Setup
10	Unused		AI 10	SIRIUS-HD-STGS	30 V	Voltage	-10,00	-0,1399	10,00		V	Zero	Setup
11	Unused		AI 11	SIRIUS-HD-STGS	30 V	Voltage	-10,00	-0,0533	10,00		V	Zero	Setup
12	Unused		AI 12	SIRIUS-HD-STGS	30 V	Voltage	-10,00	-0,0533	10,00		V	Zero	Setup
13	Unused		AI 13	SIRIUS-HD-STGS	30 V	Voltage	-10,00	0,0051	10,00		V	Zero	Setup
14	Unused		AI 14	SIRIUS-HD-STGS	30 V	Voltage	-10,00	-0,0410	10,00		V	Zero	Setup
15	Unused		AI 15	SIRIUS-HD-STGS	30 V	Voltage	-10,00	-0,0378	10,00		V	Zero	Setup
16	Unused		AI 16	SIRIUS-HD-STGS	30 V	Voltage	-10,00	-0,0009	10,00		V	Zero	Setup

Figura 58. Configuración canal de medida DEWESOFT

A la hora de calibrar la célula de carga, se va a tomar como referencia el peso de una tuerca, cuya masa será medida en una báscula y multiplicada por el valor de la gravedad.

$$P = m \cdot g = 0.188 \text{ kg} \cdot 9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 1.8515 \text{ N}$$

Tomando como referencia el peso anterior, se dispone la misma tuerca sobre la célula de carga en la dirección de medida de la carga, de tal modo que ajustando los valores mostrados en la Figura 59, tales como la calibración por dos puntos, se aproxima el valor medido al valor real del peso de la tuerca.

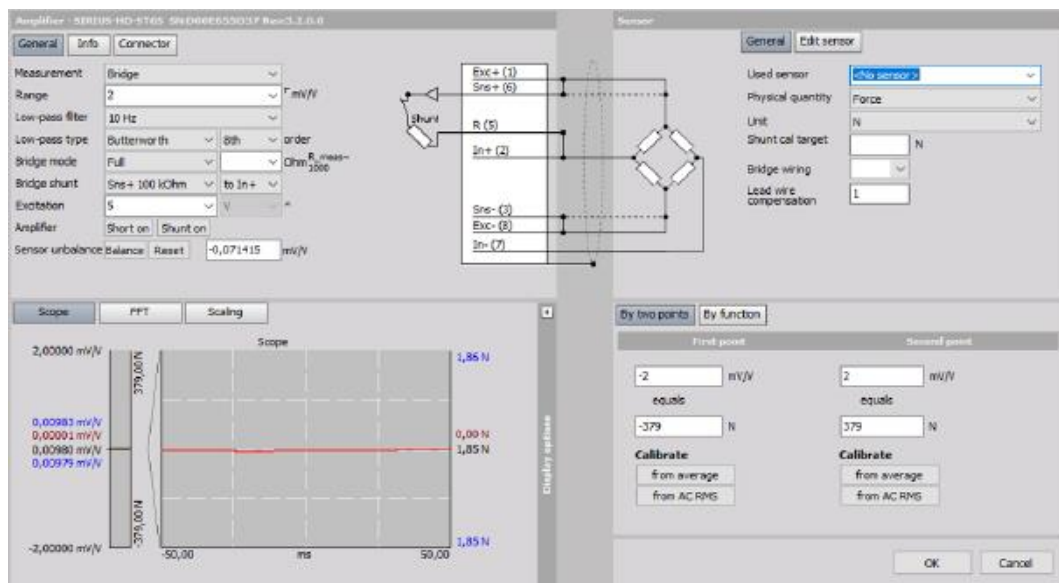


Figura 59. Setup canal de medida DEWESOFT

De nuevo, en la Figura 59 se observa como el valor medido por la célula de carga, en el apartado *Scope*, de valor 1.86 N, se aproxima al valor real calculado y tomado como referencia.

Por tanto, la célula de carga se encontraría ya calibrada. No obstante, se puede añadir masa a mayores para comprobar la linealidad del calibrado.

B. PROPIEDADES DE LOS IMANES.

Para el imán de diámetro $\varnothing = 12$ mm, se recogen las propiedades en la tabla mostrada a continuación.

Material	NdFeB
Forma	Aro
Diámetro exterior	12 mm
Diámetro interior	5 mm
Alto	12 mm
Tolerancia	+/- 0,1 mm

Sentido de magnetización	axial (paralelo al alto)
Revestimiento	níquelado (Ni-Cu-Ni)
Tipo de fabricación	sinterizado
Magnetización	N42
Fza. sujec.	aprox. 4,4 kg (aprox. 43,1 N)
Fuerza de desplazamiento	aprox. 880 g (aprox. 8,63 N)
Temperatura de servicio máx.	80 °C
Peso	8,5238 g
Temperatura de Curie	310 °C
Remanencia Br	12900-13200 G, 1.29-1.32 T
Coercitividad bHc	10.8-12.0 kOe, 860-955 kA/m
Coercitividad iHc	≥12 kOe, ≥955 kA/m
Producto energético (BxH)max	40-42 MGOe, 318-334 kJ/m ³

Tabla 69. Propiedades imán Ø12 mm.[13]

Por su parte, las propiedades del imán de diámetro $\varnothing = 15$ mm quedan recogidas en la Tabla 70.

Material	NdFeB
Forma	Aro
Diámetro exterior	15 mm

Diámetro interior	6 mm
Alto	6 mm
Tolerancia	+/- 0,1 mm
Sentido de magnetización	axial (paralelo al alto)
Revestimiento	niquelado (Ni-Cu-Ni)
Tipo de fabricación	sinterizado
Magnetización	N42
Fza. sujec.	aprox. 5,1 kg (aprox. 50 N)
Fuerza de desplazamiento	aprox. 1 kg (aprox. 10 N)
Temperatura de servicio máx.	80 °C
Peso	6,7689 g
Temperatura de Curie	310 °C
Remanencia Br	12900-13200 G, 1.29-1.32 T
Coercitividad bHc	10.8-12.0 kOe, 860-955 kA/m
Coercitividad iHc	≥12 kOe, ≥955 kA/m
Producto energético (BxH)max	40-42 MGOe, 318-334 kJ/m ³

Tabla 70. Propiedades imán Ø15 mm.[14]

C. PLANO FABRICACIÓN SOPORTE

H G F E D C B A

4

3

2

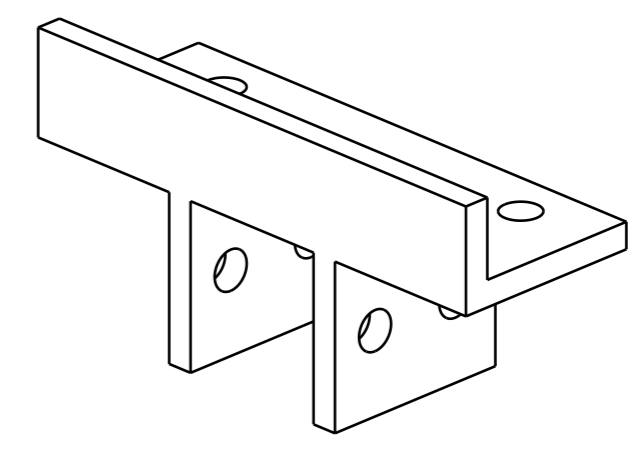
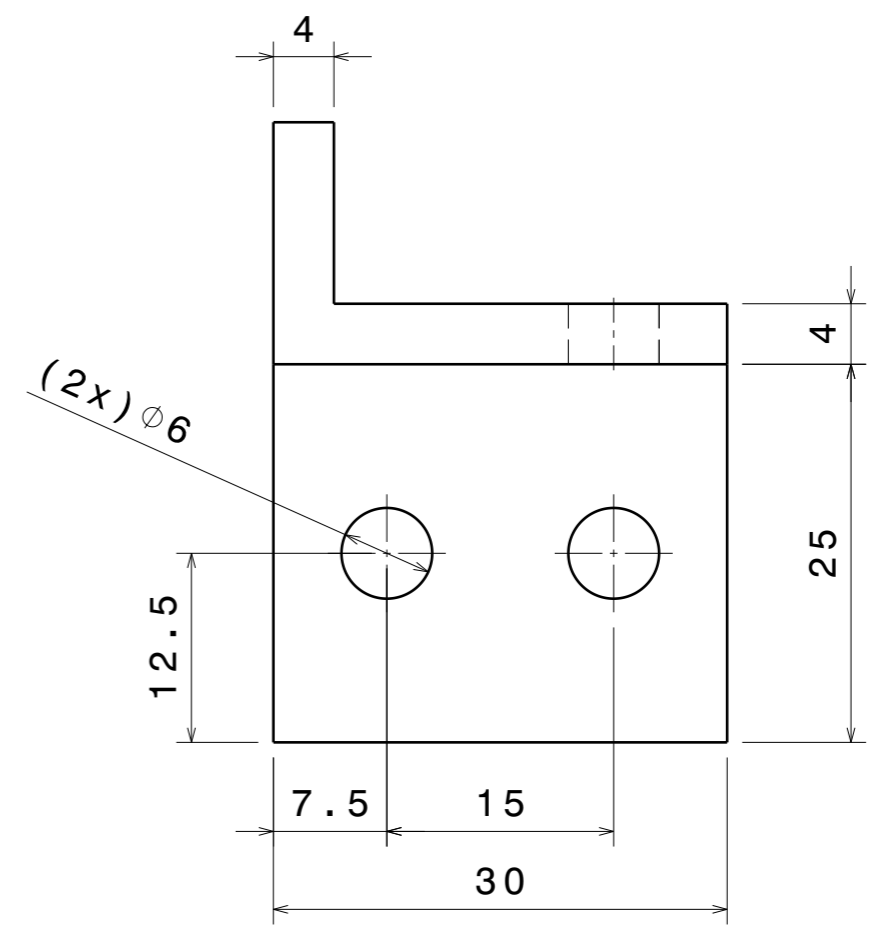
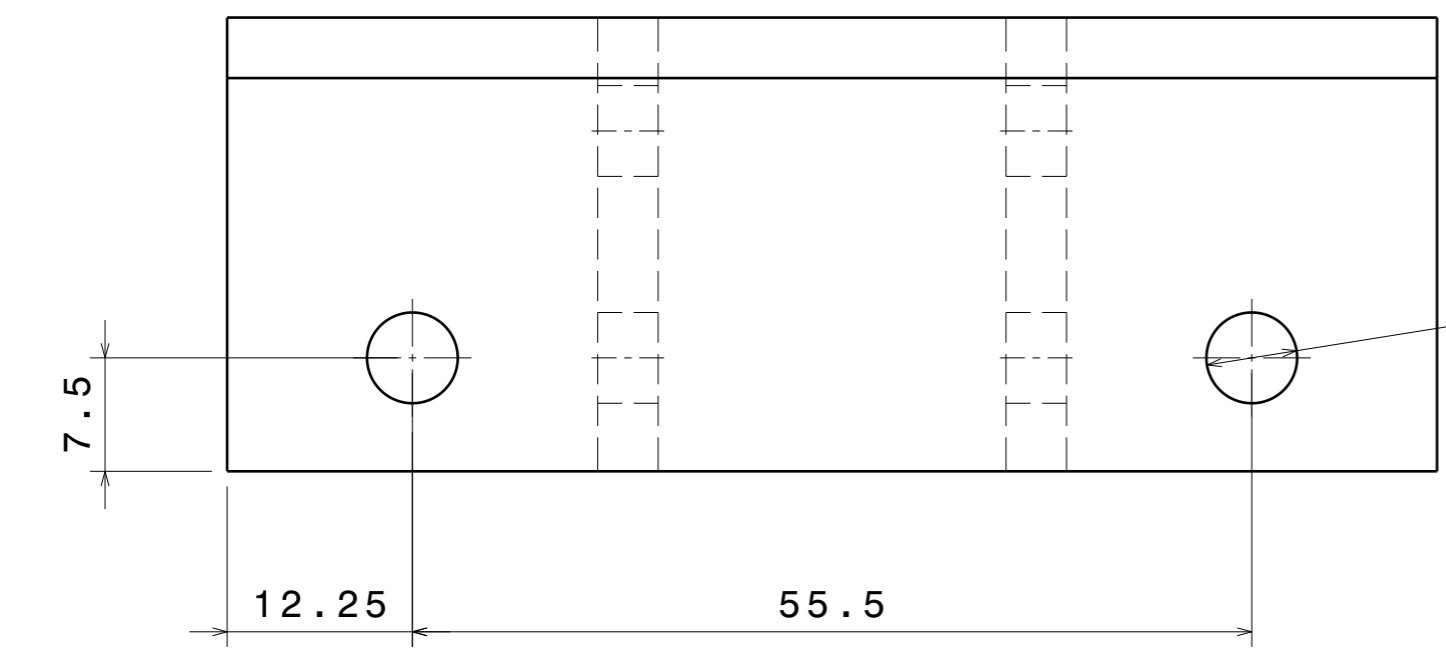
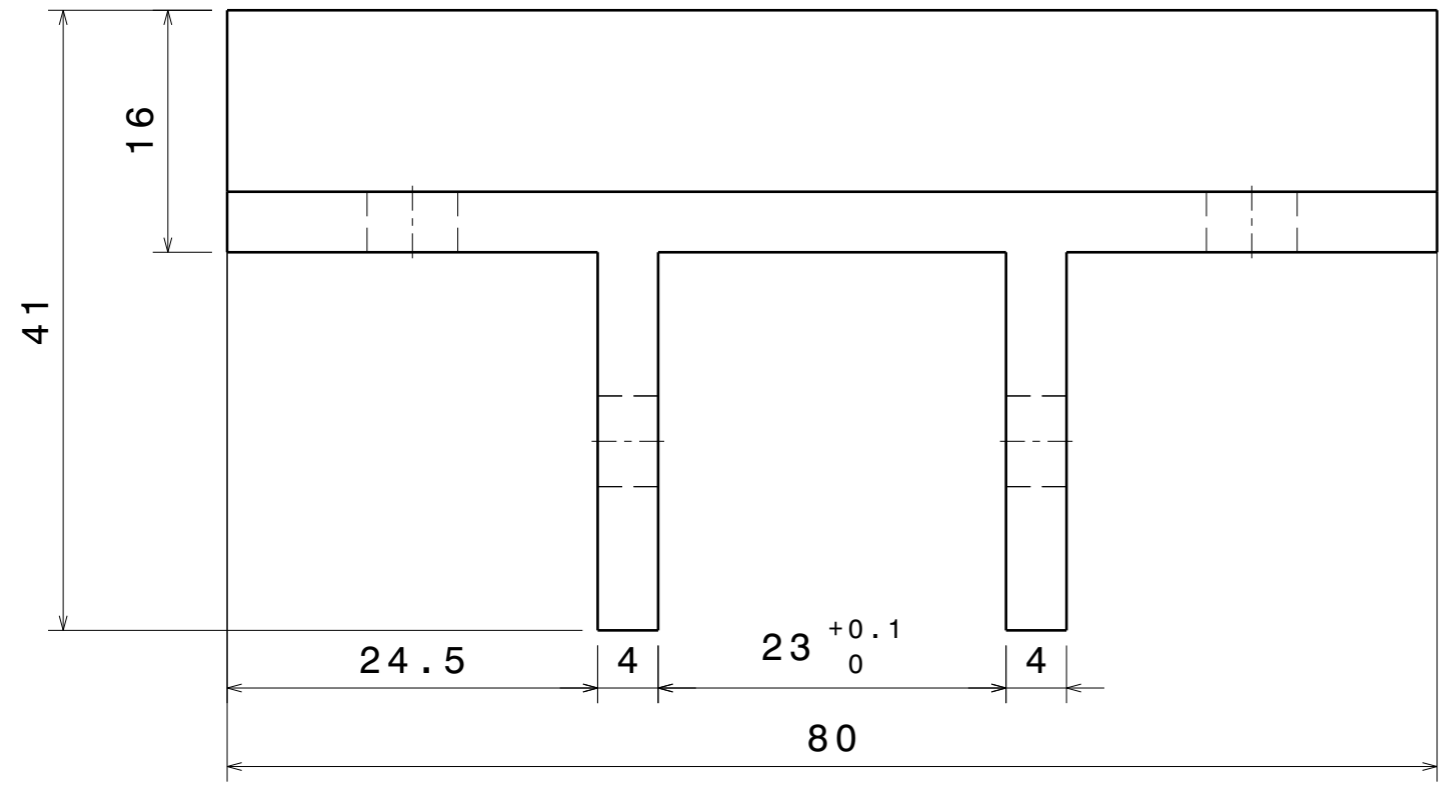
1

4

3

2

1



DESIGNED BY: MIGUEL A. VICENTE		<h1>SOPORTE</h1>	
DATE: 09/12/2021			
CHECKED BY: XXX		<h2>DASSAULT SYSTEMES</h2>	
DATE: XXX			
SIZE: A3		XXX	
SCALE: 2:1	WEIGHT (kg): XXX		
DRAWING NUMBER: XXX		SHEET: 1/1	

I	-
H	-
G	-
F	-
E	-
D	-
C	-
B	-
A	-

H G F E D C B A

This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.