

Universidad Nacional de Córdoba
Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales



Proyecto Integrador

Cálculo y Diseño de un Absorbedor Dinámico de Vibraciones para una Chimenea Metálica bajo carga de Viento.

Alumnos: Lupi, Eduardo Jesús. Mat: 32080437
Tavella, Hernán Gabriel Mat: 32369519

Carrera: Ingeniería Mecánica

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA ELECTRICISTA

Director: Dr. Ing. José Stuardi

Co-Director: Ing. Guillermo Chiappero

- AÑO 2016 -

Dedicatoria:

“A todos los que me apoyaron para escribir y concluir este proyecto, a pesar de los inconvenientes transcurridos en el trayecto. Pues es a ellos a quienes se las debo por su apoyo incondicional”.

Hernán G. Tavella.

“A mis Padres y Abuelos que a través de su Sabiduría y apoyo contribuyeron con mi formación. A mis Hermanos, en especial a Carolina por su colaboración en la edición del presente Informe. A mis Amigos y Compañeros cuya leal Amistad perdura al paso de los años. Finalmente, a mi Novia por su dulce Compañía y apoyo Incondicional”.

Eduardo J. Lupi.

I. Prólogo

Cuando una estructura mecánica es excitada a una frecuencia cercana a la frecuencia natural le provoca a la misma grandes desplazamientos, surge la inquietud de cómo evitarlos o aminorar su efecto. La primera respuesta que resulta más intuitiva sería encarar el problema por el lado de la resistencia, es decir sobredimensionar los elementos estructurales de manera que sean suficientemente rígidos como para disminuir la deflexión. Sin embargo, este método no es aplicable en todos los casos. En primer lugar debido a que el sobredimensionamiento de la estructura genera altos costos de construcción, como también puede darse el caso en donde no sea posible debido a cuestiones espaciales del terreno donde se encuentra emplazada la estructura. Es por este motivo que puede optarse por la instalación de un absorbedor de vibraciones, también llamado absorbedor dinámico de vibraciones. El cual es un elemento mecánico utilizado para reducir o eliminar efectos de vibraciones no deseadas.

Un absorbedor dinámico consiste en un segundo sistema masa-resorte acoplado al sistema principal. Considerando el sistema principal como de un grado de libertad dinámico, el efecto logrado por la inclusión de un absorbedor es transformar al sistema en uno de dos grados de libertad dinámico. Una estructura puede verse sometida a vibraciones excesivas debido a que la frecuencia de excitación de una fuerza actuante coincide o es próxima a la frecuencia natural de la misma. El absorbedor de vibraciones dinámico puede diseñarse de manera tal que las frecuencias naturales resultante estén lo más alejadas posible de la frecuencia de excitación. Por otro lado se aprovecha el efecto beneficioso de un aumento del “amortiguamiento aparente” en el sistema que puede generar la colocación del absorbedor.

El presente trabajo final consiste en el cálculo y desarrollo de un absorbedor de vibraciones mediante el estudio detallado de los efectos vibratorios causales de desplazamientos dinámicos considerados excesivos en una chimenea circular de escape de gases propiedad de la empresa nacional Aceitera General Deheza S.A. Dicha estructura posee 22,2 metros de altura de los cuales los 6,33 metros iniciales son de acero al carbono S235 y el resto de acero inoxidable 304L. Ambos materiales poseen un diámetro externo de 1,23 metros con espesores de 6 y 5 milímetros respectivamente (Ver plano en Anexo I).

El tipo de dispositivo propuesto en este trabajo final muchas veces es desconocido por los profesionales o en otros casos se estima que el desarrollo e implementación del mismo es excesivamente costoso. Se da de ésta forma ya que no existe ninguna empresa nacional dedicada al cálculo e implementación de los mismos, por lo que debe recurrirse a empresas internacionales derivando en un gran costo de investigación y desarrollo. Es por este motivo que el presente informe tiene como objetivo principal demostrar que si bien el estudio de una estructura puede resultar matemáticamente complejo de desarrollar, existen muchas herramientas para ayudar al proyectista en el cálculo, diseño e implementación de un absorbedor de vibraciones dinámico y a su vez se demostrará su sencillez constructiva.

II. Índice General.

I. Prólogo	i
II. Índice General.....	ii
III. Índice de Tablas	v
IV. Índice de Figuras	vii
Capítulo 1 Aspectos Generales	1
1.1. Introducción.....	1
1.2. Efecto del viento sobre las estructuras	2
1.3. Reseña Histórica	4
1.4. Metodología de trabajo	5
1.5. Objetivos.....	6
1.6. Aclaraciones	7
1.7. Referencias	8
Capítulo 2 Aspectos Conceptuales.	9
2.1. Introducción.....	9
2.2. Objetivos.....	9
2.3. Sistemas de un Grado de Libertad Dinámico (1 GLD)	10
2.3.1. Clasificación de la fuente generadora de vibraciones	11
2.3.2. Determinación de la ecuación del movimiento: Solución de Régimen Permanente y Régimen Transitorio	12
2.4. Sistemas de múltiples grados de libertad.....	15
2.4.1. Ecuaciones rectoras	15
2.5. Sistema de dos Grados de Libertad Dinámico (Absorbedor de Vibraciones). 19	
2.5.1. Absorbedor de vibraciones no amortiguado.....	22
2.5.2. Absorbedor de vibraciones amortiguado.....	25
2.5.3. Ejercicios de prueba.....	25
2.6. Modelización de la estructura de Análisis a 1 GLD.....	31
2.6.1. Análisis dinámico del continuo	33
2.6.2. Análisis en Matlab.	35
2.6.2.1. Calculo de la matriz de flexibilidad de la chimenea.....	36
2.6.2.2. Cálculo de la matriz Rigidez (inversa de la matriz flexibilidad).....	39
2.6.2.3. Confección de la matriz de masa.....	39
2.6.2.4. Obtención de las frecuencias naturales y modos a través del cálculo de valores y vectores propios	40
2.6.2.5. Obtención de los parámetros reducidos de la estructura	41
2.6.3. Análisis en Abaqus.	43
2.6.4. Análisis comparativo entre los resultados obtenidos con Dinámica de continuo, Matlab y Abaqus.....	45
2.6.5. Determinación de exponente del modo fundamental	45
2.7. Modelización de la estructura de análisis consistente en Sistema Primario más Absorbedor (2 GLD)	47
2.7.1. Análisis en Matlab.	47
2.7.2. Análisis en Abaqus	49
2.7.3. Estudio y comparación entre las repuestas (Sintonizado)	50
2.7.3.1. Primer caso: Relación de masa del 5%	51
2.7.3.2. Segundo caso: Relación de masa del 10%.....	54
2.7.3.3. Tercer caso: Relación de masa del 15%	56
2.8. Rutinas Matlab.....	59

2.8.1.	Rutina Cap2_1	62
2.8.2.	Rutina Cap2_2	63
2.8.3.	Rutina Cap2_3	65
2.9.	Conclusiones del Capítulo	66
2.10.	Resumen del Capítulo.....	66
2.11.	Referencias	66
Capítulo 3	Análisis Normativo	67
3.1.	Introducción.....	67
3.2.	Objetivos.....	67
3.3.	Análisis a través de Norma INTI CIRSOC 102	68
3.3.1.	Método 1 - Procedimiento Simplificado	68
3.3.1.1.	Campo de validez	69
3.3.2.	Método 2 - Procedimiento Analítico	69
3.3.2.1.	Campo de validez	69
3.3.2.2.	Limitaciones	70
3.3.2.3.	Protecciones.....	70
3.3.3.	Método 3 – Procedimiento del Túnel de Viento.....	70
3.3.3.1.	Campo de validez	70
3.3.3.2.	Condiciones de Ensayo.....	70
3.3.3.3.	Respuesta Dinámica	71
3.3.4.	Selección del método a utilizar.....	71
3.3.5.	Análisis del Método 2 – Procedimiento de Diseño	72
3.3.5.1.	Determinación de V y K_d	73
3.3.5.2.	Determinación del factor de importancia I	75
3.3.5.3.	Determinación de la Categoría y Coeficiente de exposición K_z	77
3.3.5.4.	Determinación del factor topográfico K_{zt}	80
3.3.5.5.	Determinación del Factor de efecto de ráfaga G	82
3.3.5.6.	Determinación de la clase cerramiento.....	84
3.3.5.7.	Determinación del coeficiente presión interna GC_{pi}	84
3.3.5.8.	Determinación de los coeficientes de presión externa C_p	84
3.3.5.9.	Determinación de la presión dinámica q_z	85
3.3.5.10.	Determinación de la carga de viento de diseño F	86
3.3.6.	Cálculo de desplazamiento máximo en dirección del viento	89
3.3.7.	Flujograma del procedimiento de la Norma INTI CIRSOC 102.....	90
3.4.	Análisis a través de Norma DIN 1055-4	93
3.4.1.	La velocidad del viento y la presión de la velocidad.....	93
3.4.2.	Vibraciones inducidas por Ráfagas	94
3.4.2.1.	Método para determinar el factor de respuesta de ráfaga.....	94
3.4.3.	Carga estática equivalente	95
3.4.3.1.	Factor de respuesta de ráfaga.....	96
3.4.3.2.	Coeficiente de fuerza aerodinámica c_f	102
3.4.3.2.1.	Coeficiente de fuerza básico.....	102
3.4.3.2.2.	Esbeltez efectiva y factor de reducción ψ_λ	104
3.4.3.3.	Presión media de la velocidad q_m	106
3.4.3.3.1.	Mapa de zonas Eólicas Generalidades.....	106
3.4.3.3.2.	Influencia de Elevación con respecto al nivel del mar	107
3.4.3.3.3.	Influencia de la rugosidad del terreno y la topografía	107
3.4.4.	Las deformaciones y aceleraciones	113
3.4.5.	Vibraciones transversales por desprendimiento de vórtices y fenómenos aeroelásticos.....	115

3.4.5.1.	Vibraciones inducidas por vórtices Generalidades.....	116
3.4.5.2.	Velocidad crítica del viento.....	116
3.4.5.3.	Número de Strouhal.....	117
3.4.5.4.	Exposición debido a las vibraciones transversales por desprendimiento de vórtice	118
3.4.5.5.	Cálculo de la amplitud de la vibración lateral	119
3.4.5.6.	Coefficiente de fuerza de excitación aerodinámica	119
3.4.5.7.	Longitud efectiva.....	121
3.4.5.8.	Factor de longitud efectiva K_w	122
3.4.5.9.	Coefficiente de forma de onda K	124
3.4.6.	Conceptos dinámicos básicos	124
3.4.6.1.	Generalidades	124
3.4.6.2.	Modo de flexión Fundamental.....	125
3.4.6.3.	Masa equivalente	126
3.4.6.4.	Decremento logarítmico	127
3.4.7.	Flujograma del procedimiento de la Norma DIN 1055-4.....	128
3.4.7.1.	Carga de Viento	129
3.4.7.2.	Vibraciones Transversales por desprendimiento de Vórtices.....	134
3.5.	Comparación entre las normas en dirección del viento.....	137
3.6.	Conclusiones del Capítulo	142
3.7.	Resumen del Capítulo.....	142
3.8.	Referencias	143
Capítulo 4	Aplicación	144
4.1.	Introducción.....	144
4.2.	Objetivos.....	144
4.3.	Símbolos	145
4.3.1.	Simbología Local INTI CIRSOC 102	145
4.3.2.	Simbología Local DIN 1055-4	146
4.4.	Lineamientos	147
4.5.	Análisis en dirección del viento (X).....	148
4.5.1.	Análisis a través de norma INTI CIRSOC 102	148
4.5.1.1.	Procedimiento de Diseño.....	148
4.5.2.	Análisis a través de Norma DIN 1055-4.	159
4.5.2.1.	Procedimiento de diseño.....	159
4.6.	Análisis en dirección perpendicular al viento (Y).....	175
4.6.1.	Análisis a través de la norma DIN 1055-4	176
4.7.	Conclusiones del Capítulo.....	186
4.8.	Resumen del Capítulo.....	186
4.9.	Referencias	187
Capítulo 5	Modelización Numérica	188
5.1.	Introducción.....	188
5.2.	Objetivos.....	188
5.3.	Símbolos	189
5.3.1.	Simbología Local Modelización Numérica.....	189
5.4.	Vibraciones inducidas por vórtices.....	190
5.4.1.	Introducción teórica.....	190
5.4.2.	Simulación del Sistema de análisis sin absorbedor	196
5.4.3.	Simulación del Sistema de análisis con absorbedor	212
5.5.	Análisis de tensiones y de vida a la fatiga	228
5.6.	Conclusión del capítulo	234

5.7.	Resumen de Capítulo.....	235
5.8.	Referencias	235
Capítulo 6	Diseño mecánico del absorbedor	237
6.1.	Introducción.....	237
6.2.	Objetivos.....	237
6.3.	Metodología de Proyecto.....	237
6.4.	Proyecto conceptual.....	239
6.5.	Diseño del absorbedor	253
6.5.1.	Diseño del elemento de inercia.....	253
6.5.2.	Diseño de los elementos de disipación.....	254
6.5.3.	Diseño de los elementos elásticos	257
6.5.4.	Calculo de Soldadura según NBE EA-95.....	267
6.5.5.	Verificación de cable se sujeción	272
6.6.	Estudio de Costos	274
6.7.	Conclusión del Capítulo	275
6.8.	Resumen del Capítulo.....	275
6.9.	Referencias	276
	Conclusiones del Proyecto Integrador	277
	Anexo I: Estructura de Estudio.....	AI-1
	Anexo II: Amortiguamiento Estructural.....	AII-1
	Referencia:.....	AII-3
	Anexo III: Planos de Diseño	AIII-1
	Índice de Planos.....	AIII-1
	Anexo IV: Rutinas de Cálculo en Matlab.....	AIV-1
	Rutina Cap2_1	AIV-1
	Rutina Cap2_2	AIV-3
	Rutina Cap2_3	AIV-7
	Rutina Cap5_1	AIV-9
	Rutina Cap5_2	AIV-19

III. Índice de Tablas

Tabla 2. 1	Conjunto de valores de prueba	26
Tabla 2. 2	Conjunto de valores de prueba	27
Tabla 2. 3	Conjunto de valores de prueba	28
Tabla 2. 4	Conjunto de valores de prueba	29
Tabla 2. 5	Conjunto de valores de prueba	30
Tabla 2. 6	Comparativa de los resultados entre Dinámica del Continuo, Matlab y Abaqus	45
Tabla 2. 7	Determinación del exponente del modo fundamental	46
Tabla 2. 8	Determinación del exponente del modo fundamental (RMS).....	47
Tabla 2. 9	Rango de valores, análisis de Respuesta en Frecuencia para m_r del 5% ...	51
Tabla 2. 10	Valores de los diferentes parámetros m_r del 5%.....	52
Tabla 2. 11	Rango de valores, análisis de Respuesta en Frecuencia para m_r del 10% .	54
Tabla 2. 12	Valores de los diferentes parámetros m_r del 10%.....	54

Tabla 2. 13	Rango de valores, análisis de Respuesta en Frecuencia para m_r del 15% .	57
Tabla 2. 14	Valores de los diferentes parámetros m_r del 15%.....	57
Tabla 4. 1	Simbología Local para Norma INTI CIRSOC 102	145
Tabla 4. 2	Simbología Local para Norma DIN 1055-4	146
Tabla 4. 3	Tabla de tramos de aplicación de carga de viento de la estructura de análisis	147
Tabla 4. 4	Tabla de fuerzas y desplazamientos Según INTI [1].....	156
Tabla 4. 5	Tabla de fuerzas y desplazamientos en dirección Longitudinal al viento según DIN [2]	173
Tabla 4. 6	Tabla de fuerzas y desplazamientos	181
Tabla 5. 1	Simbología Local para el Capítulo 5	189
Tabla 5. 2	Tabla de fuerzas y desplazamientos Transversales a la dirección del viento	206
Tabla 5. 3	Vida a la fatiga en relación al desplazamiento del extremo libre.....	210
Tabla 5. 4	Estadísticas Generales brindadas por la Estación Meteorológica (Julio-Diciembre 2015)	211
Tabla 5. 5	Análisis Mes a Mes del porcentaje de Daño a Fatiga (Julio-Diciembre 2015).....	212
Tabla 5. 6	Absorbedor aplicado al GLD 21 (22,1 metros)	221
Tabla 5. 7	Absorbedor aplicado al GLD 20 (21,5 metros)	222
Tabla 5. 8	Absorbedor aplicado al GLD 19 (20,5 metros)	222
Tabla 5. 9	Absorbedor aplicado al GLD 20.....	224
Tabla 5. 10	Parámetros seleccionados	227
Tabla 5. 11	Tabla de fuerzas y desplazamientos (absorbedor en GLD 21).....	229
Tabla 5. 12	Tabla de fuerzas y desplazamientos (absorbedor en GLD 20).....	231
Tabla 5. 13	Tabla de fuerzas y desplazamientos (absorbedor en GLD 19).....	233
Tabla 5. 14	Resumen de los CS	234
Tabla 6. 1	Conjunto de variables que se adaptan a las propiedades reducidas de la Solución A	251
Tabla 6. 2	Planilla de Cálculo para la obtención de las dimensiones del amortiguador viscoso	255
Tabla 6. 3	Rigidez k del resorte necesaria según longitud del péndulo.....	257
Tabla 6. 4	Rigidez del resorte según sus dimensiones	258
Tabla 6. 5	Análisis de Costos de Fabricación del Absorbedor	274
Tabla 6. 6	Empresas a las que se les solicitó cotización.....	275

IV. Índice de Figuras

Figura 2. 1	Sistema de un grado de libertad dinámico.....	10
Figura 2. 2	Modelación de una estructura esbelta como un sistema masa-resorte ...	11
Figura 2. 3	Sistema de un grado de libertad dinámico, determinación de las ecuaciones de movimiento.....	12
Figura 2. 4	Excitación armónica aplicada directamente a la masa del sistema, a) Respuesta en Amplitud, b) Respuesta en fase	14
Figura 2. 5	Respuesta a excitación armónica, a) Respuesta transitoria, b) Respuesta régimen permanente, d) Respuesta Total (Régimen permanente más transitoria).....	15
Figura 2. 6	Sistema de dos grados de libertad.....	16
Figura 2. 7	Diagrama de cuerpo libre sistema 2 GLD	16
Figura 2. 8	a) Sistema de N grados de libertad dinámicos, b) Diagrama de cuerpo libre del elemento i del sistema de N grados de libertad dinámicos.....	17
Figura 2. 9	Sistema 2 GLD absorbedor de vibraciones	19
Figura 2. 10	Absorbedor de vibraciones sin amortiguamiento	22
Figura 2. 11	Respuesta en frecuencia para sistema sin Absorbedor y con Absorbedor	23
Figura 2. 12	Frecuencias Naturales en función de la relación de masa para absorbedor dinámico sin amortiguamiento.	24
Figura 2. 13	Absorbedor de vibraciones dinámico con amortiguamiento	25
Figura 2. 14	Sistema 2 GLD Absorbedor	25
Figura 2. 15	Respuesta en Frecuencia.....	27
Figura 2. 16	Respuesta en Frecuencia.....	28
Figura 2. 17	Respuesta en Frecuencia.....	29
Figura 2. 18	Respuesta en Frecuencia.....	30
Figura 2. 19	Respuesta en Frecuencia.....	31
Figura 2. 20	Simplificación del modelo de un sistema de múltiples grados de libertad dinámicos.....	35
Figura 2. 21	Sistemas Real y Auxiliar (Método de los Trabajos Virtuales)	37
Figura 2. 22	Repuesta en frecuencia del sistema reducido sin absorbedor.....	42
Figura 2. 23	Deformada del sistema de MGLD en Abaqus.....	43
Figura 2. 24	Repuesta en frecuencia del sistema reducido sin amortiguamiento (Abaqus $\zeta=0$)	44
Figura 2. 25	Sistema de MGLD con absorbedor incorporado	50
Figura 2. 26	Respuesta en Frecuencia para una relación de masa del 5% (Matlab)...	52
Figura 2. 27	Respuesta en Frecuencia para una relación de masa del 5% (Abaqus)..	53
Figura 2. 28	Comparativa de Respuesta en Frecuencia para una relación de masa del 5% (Abaqus/Matlab)	53
Figura 2. 29	Respuesta en Frecuencia para una relación de masa del 10% (Matlab) .	55
Figura 2. 30	Respuesta en Frecuencia para una relación de masa del 5% (Abaqus)..	55
Figura 2. 31	Comparativa de Respuesta en Frecuencia para una relación de masa del 10% (Abaqus/Matlab)	56
Figura 2. 32	Respuesta en Frecuencia para una relación de masa del 15% (Matlab) .	57
Figura 2. 33	Respuesta en Frecuencia para una relación de masa del 15% (Abaqus) .	58

Figura 2. 34	Comparativa de Respuesta en Frecuencia para una relación de masa del 15% (Abaqus/Matlab)	58
Figura 2. 35	Comparativa de Respuesta en Frecuencia para los parámetros óptimos (Matlab)	59
Figura 2. 36	Referencias de los diagramas de flujo de las Rutinas de Cálculo del Capítulo 2	61
Figura 2. 37	Diagrama de Flujo de la Rutina Cap2_1	62
Figura 2. 38	Diagrama de Flujo de la Rutina Cap2_2 (Parte 1/2)	63
Figura 2. 39	Diagrama de Flujo de la Rutina Cap2_2 (Parte 2/2)	64
Figura 2. 40	Diagrama de Flujo de la Rutina Cap2_3	65
Figura 3. 1	Velocidad Básica del Viento	73
Figura 3. 2	Velocidad Básica del Viento	74
Figura 3. 3	Factor de direccionalidad.....	75
Figura 3. 4	Factor de Importancia.....	75
Figura 3. 5	Clasificación de Edificios y otras estructuras para carga de viento	76
Figura 3. 6	Ejemplo de Exposición A.....	77
Figura 3. 7	Ejemplo de Exposición B	78
Figura 3. 8	Ejemplo de Exposición C	78
Figura 3. 9	Ejemplo de Exposición D.....	78
Figura 3. 10	Coeficiente de Exposición para la presión dinámica.....	79
Figura 3. 11	Factor topográfico.....	81
Figura 3. 12	Factor topográfico.....	82
Figura 3. 13	Constante de exposición del terreno	84
Figura 3. 14	Coeficiente de Fuerza	85
Figura 3. 15	Coeficientes de fuerza para formas prismáticas redondeadas	88
Figura 3. 16	Factor de corrección por relación de esbeltez	88
Figura 3. 17	Flujograma para determinar la presión dinámica según INTI [1]	91
Figura 3. 18	Flujograma para determinar la Carga de Viento según INTI [1]	92
Figura 3. 19	Altura efectiva z_e	95
Figura 3. 20	Altura efectiva z_e	97
Figura 3. 21	Exponente ε	99
Figura 3. 22	Longitud integral de la turbulencia $L_i(z)$	99
Figura 3. 23	Cuadrado de la acción básica de las ráfagas Q_0^2	100
Figura 3. 24	Función densidad espectral adimensional R_N	101
Figura 3. 25	Función de transferencia aerodinámica	102
Figura 3. 26	Coeficiente de fuerza básica C_{f0} para cilindros con esbeltez infinita para diversas rugosidades equivalentes k/b (Figura 19 Norma DIN [2])	103
Figura 3. 27	Rugosidad equivalente.....	104
Figura 3. 28	Factor de reducción ψ_{λ} , en dependencia de la esbeltez efectiva λ y para diferentes grados de solidez φ (Figura 26 Norma DIN [2])	105
Figura 3. 29	Esbeltez efectiva λ para estructuras cilíndricas, triangulares, puentes y secciones rectangulares, estructuras de bordes filosos y reticulados (Tabla 16 Norma DIN [2])	105
Figura 3. 30	Definición del grado de solidez φ	106
Figura 3. 31	Mapa de las zonas eólicas para el territorio de la Republica Federal Alemana.....	107

Figura 3. 32	Categoría de terreno.....	108
Figura 3. 33	Perfiles de velocidad media del viento, intensidad de turbulencia, presión de ráfaga y velocidad de ráfaga en un terreno nivelado (Tabla B.2 Norma DIN [2]).....	109
Figura 3. 34	Perfiles de velocidad media del viento, intensidad de turbulencia, presión de ráfaga y velocidad de ráfaga en un terreno nivelado para los casos citados en 10.3	110
Figura 3. 35	Valores para la longitud efectiva L_e	110
Figura 3. 36	Factor s de acantilados y saltos de terreno	111
Figura 3. 37	Factor s para crestas y colinas	112
Figura 3. 38	Exponente α del perfil	114
Figura 3. 39	Aproximación del coeficiente K_x de acuerdo con la ecuación 3.46	115
Figura 3. 40	Número de Strouhal y valor de fuerza de excitación aerodinámica básica para diferentes formas diferentes de sección transversal.....	117
Figura 3. 41	Número de Strouhal para formas de sección transversal rectangular con aristas vivas (Figura D.1 Norma DIN [2]).....	118
Figura 3. 42	Coefficiente de fuerza de excitación aerodinámica en función de la relación de la velocidad del viento crítica y de la velocidad media del viento.	120
Figura 3. 43	Fuerza de excitación aerodinámica básica para un cilindro circular en función del número de Reynolds (Figura D.2 Norma DIN [2])	120
Figura 3. 44	Ejemplos conocidos de la ubicación de la Longitud Efectiva.....	121
Figura 3. 45	Longitud efectiva como función de la amplitud de desplazamiento	121
Figura 3. 46	Factor de Longitud Efectiva y coeficiente de forma de onda.....	123
Figura 3. 47	Forma modal flexional fundamental para edificios, torres y chimeneas en voladizo (Figura F.2 Norma DIN [2])	125
Figura 3. 48	Forma modal flexional fundamental para estructuras simplemente apoyadas y empotradas (Tabla F.1 Norma DIN [2]).....	126
Figura 3. 49	Parámetros a_j , b_j , δ_{min}	128
Figura 3. 50	Determinación de la Fuerza dinámica F_{wj} según DIN [2]	129
Figura 3. 51	Determinación del coeficiente de fuerza aerodinámica c_f Según DIN [2].	130
Figura 3. 52	Determinación de la presión media de la velocidad q_m según DIN [2]	131
Figura 3. 53	Determinación del factor de respuesta de Ráfaga G según DIN [2]	132
Figura 3. 54	Determinación de la componente de respuesta resonante R_x según DIN [2]	133
Figura 3. 55	Determinación de la Fuerza F_i y de la amplitud máxima $\max y_f$ según DIN [2]	134
Figura 3. 56	Determinación del Número de Scruton S_c según DIN [2]	135
Figura 3. 57	Determinación del coeficiente de fuerza de excitación aerodinámica c_{lat} según DIN [2]	136
Figura 4. 1	Desplazamiento Longitudinal al viento (X) en función de la altura, Análisis Estático en Abaqus [2] según Ecuaciones 4.31, 4.32 y 4.34..	157
Figura 4. 2	Tensión en función de la altura debido a cargas en dirección Longitudinal al viento. Análisis Estático en Abaqus [2] según Ecuaciones 4.31, 4.32 y 4.34.	157

Figura 4. 3	Desplazamientos Longitudinal al viento según las Ecuación (4.42) y.	158
Figura 4. 4	Desplazamiento Longitudinal al viento (X) en función de la altura, Análisis Estático en Abaqus [2] según Ecuaciones 4.107 y 4.108.....	174
Figura 4. 5	Tensión en función de la altura debido a cargas en dirección Longitudinal al viento. Análisis Estático en Abaqus [2] según Ecuaciones 4.107 y 4.108.....	174
Figura 4. 6	Desplazamientos Longitudinal al viento según las Ecuaciones (4.116), (4.117) y Abaqus [2] (Figura 4.4).....	175
Figura 4. 7	Extracto de las Figuras 3.44 y 3.45.	179
Figura 4. 8	Desplazamiento Transversal al viento (Y) en función de la altura, Análisis Estático en Abaqus [2] según Ecuación 4.143.	182
Figura 4. 9	Tensión en función de la altura debido a cargas en dirección transversal al viento. Análisis Estático en Abaqus [2] según Ecuación 4.143.	182
Figura 4. 10	Desplazamiento Transversal al viento según Ecuación 4.145 y Abaqus [2] (Figura 4.8)	183
Figura 5. 1	Régimen de flujo a través de un cilindro circular- Lienhard [5]	191
Figura 5. 2	Variación del número de Strouhal según el Re para cilindros circulares- [5, 8 y 11]	192
Figura 5. 3	Respuesta de las vibraciones inducidas en un cilindro soportado por resortes –.....	193
Figura 5. 4	Variación del Coeficiente de sustentación C_L para cilindros circulares (Blevins [3]).....	195
Figura 5. 5	Perfil de velocidad del viento	196
Figura 5. 6	Zona de Lock-In	201
Figura 5. 7	Respuesta en velocidad de la Chimenea sin Absorbedor	204
Figura 5. 8	Desplazamiento Transversal al viento (Y) en función de la altura, Análisis Estático en Abaqus [16] según Ecuación 5.39.	207
Figura 5. 9	Tensión en función de la altura debido a cargas en dirección transversal al viento. Análisis Estático en Abaqus [16] según Ecuación 5.39.	207
Figura 5. 10	Comparativa desplazamiento Transversal al viento según Ecuación 5.40 y Figura 5.8.....	207
Figura 5. 11	Estación Meteorológica de Bouwer.....	209
Figura 5. 12	Estratificación del daño debido a carga en dirección transversal al viento que ocasiona Reducción de la vida en Fatiga en función de la Velocidad de Referencia del Viento.....	210
Figura 5. 13	Modelo propuesto de múltiples grados de libertad dinámicos (22 GLD)	213
Figura 5. 14	Respuesta máxima de la chimenea en función de la relación de masa, Absorbedor en posición 20	219
Figura 5. 15	Respuesta máxima del absorbedor en función de la relación de masa, Absorbedor en posición 20	219
Figura 5. 16	Coeficiente de seguridad a fluencia en función de la relación de masa, Absorbedor en posición 20	220
Figura 5. 17	Reducción del desplazamiento debido al absorbedor en función de la relación de masa, Absorbedor en posición 20.	220

Figura 5. 18	Salida 1 de la rutina de cálculo de la Tabla 5.9. Respuesta en velocidad del extremo libre del sistema rincipal.....	224
Figura 5. 19	Salida 2 de la rutina de cálculo de la Tabla 5.9. Comparativa de Respuesta en velocidad del extremo libre del sistema principal y reducción de las amplitudes del desplazamiento utilizando un absorbedor de vibraciones.	225
Figura 5. 20	Salida 3 de la rutina de cálculo de la Tabla 5.9. Coeficiente de Seguridad a Fluencia en el empotramiento.....	225
Figura 5. 21	Salida 4 de la rutina de cálculo de la Tabla 5.9. Respuesta en velocidad del absorbedor	226
Figura 5. 22	Salida 5 de la rutina de cálculo de la Tabla 5.9. Rendimiento del absorbedor	226
Figura 5. 23	Salida 6 de la rutina de cálculo de la Tabla 5.9. Respuesta en velocidad del extremo libre del sistema principal y el absorbedor.....	227
Figura 6. 1	Esquema de sistema para la solución A	240
Figura 6. 2	Diagrama de cuerpo libre de la solución A (Péndulo Simple)	241
Figura 6. 3	Esquemas de sistema para la solución B	242
Figura 6. 4	Diagrama de cuerpo libre de la solución B	243
Figura 6. 5	Esquema de sistema para la solución C	245
Figura 6. 6	Diagrama de cuerpo libre de la solución C	245
Figura 6. 7	Esquema de movimiento del péndulo - Solución C.....	246
Figura 6. 8	Diagrama de fuerzas - Solución C	247
Figura 6. 9	Esquema de la configuración del elemento de inercia	254
Figura 6. 10	Esquema del amortiguador viscoso	255
Figura 6. 11	Constantes A y m de la resistencia de tensión mínima	261
Figura 6. 12	Esfuerzos de torsión máximos permisibles de resortes helicoidales de compresión en aplicaciones estáticas	261
Figura 6. 13	Fórmulas para calcular las dimensiones de resortes de compresión ...	263
Figura 6. 14	Esquema del amortiguador viscoso con los resortes incorporados	264
Figura 6. 15	Perfil de soldadura	267
Figura 6. 16	Perfil de soldadura, diagrama de direcciones	267
Figura 6. 17	Tensiones del perfil de soldadura	267
Figura 6. 18	Travesaño de sujeción	269
Figura 6. 19	Punto de sujeción del Elemento de Inercia	271
Figura 6. 20	Cable metálico tipo torzal	272
Figura 6. 21	Guardacabos	273
Figura 6. 22	Casquillo	273
Figura 6. 23	Grillete Lira	273

Capítulo 1 Aspectos Generales

1.1. Introducción

Las principales fuentes causales de vibraciones pueden ser inducidas por el hombre o debidas a fenómenos naturales. Las creaciones del ser humano pueden ser generadoras de vibraciones, como por ejemplo el martillo de forja, o incluso puede ocurrir que un grupo de gente subiendo escaleras en conjunto o caminando al unísono genere una frecuencia de excitación similar a la frecuencia natural del sistema provocando su falla, es de conocimiento público que un pelotón de soldados debe romper filas al cruzar un puente ya que de no hacerlo se corre el riesgo de que la estructura principal llegue a resonancia. Por otro lado, los terremotos son causantes de ondas sísmicas lo que genera que estructuras edilicias se balanceen y oscilen en diferentes formas, dependientes de la frecuencia y dirección del movimiento de base. El caso que nos interesa hacer hincapié y el que nos detendremos a analizar con más detenimiento; es el fenómeno de las vibraciones inducidas por el viento, los cuales producen desplazamientos mayores a un metro en el extremo superior de un rascacielos o en estructuras muy esbeltas. En el caso en estudio se analizan las vibraciones sobre una chimenea esbelta construida con tubos estructurales de pared fina y de gran longitud, estas vibraciones excesivas debidas al viento han sido estudiadas por varios autores [1, 2], en el caso de chimeneas metálicas, de bajo amortiguamiento, las vibraciones son lo suficientemente fuertes y frecuentes como para causar un acumulamiento de daño en la estructura provocando su posterior falla.

Para contrarrestar los efectos de las vibraciones sobre las estructuras es lógico pensar en aislar la estructura de la fuente que las origina mediante algún dispositivo, estos se conocen como absorbedores de vibraciones o sistemas de aislamiento de vibraciones. Los absorbedores de vibraciones son dispositivos adheridos a la estructura principal, cuyo objetivo es minimizar la amplitud de la vibración [3, 4, 5]. Este absorbedor será sintonizado a una frecuencia particular de forma tal que cuando la estructura principal sea excitada a dicha frecuencia el absorbedor vibrará fuera de fase con respecto al movimiento del sistema principal reduciendo la amplitud de las vibraciones del sistema principal.

El primer tipo de absorbedor consistió en un sistema masa-resorte, el cual fue aplicado por primera vez en 1909 por Frahm [3], quien propuso reducir el movimiento de balanceo de los barcos, así como las vibraciones de los cascos. Luego en 1956 Den Hartog [6] desarrolla una solución al problema clásico de un absorbedor de vibraciones con amortiguamiento, que consiste de un sistema masa-resorte y un amortiguador viscoso, colocado en un sistema sin amortiguamiento, el cual es excitado por una fuerza armónica. Al agregar amortiguamiento al absorbedor, la amplitud de la vibración del sistema principal no puede hacerse cero a la frecuencia natural del sistema, pero la sensibilidad del sistema a variaciones de la frecuencia de la fuerza excitatriz disminuye. Otra ventaja es que la amplitud de la vibración de la masa del absorbedor resulta considerablemente menor.

En la literatura consultada se entiende como “absorbedor de vibraciones” a un dispositivo *pasivo* adherido a la estructura que se desea controlar la vibración. Este consta de masas, resortes y amortiguadores. Por lo tanto, el término *pasivo* se utiliza para destacar que los parámetros de sintonización no varían con las condiciones externas de excitación. Un importante avance en el diseño de absorbedores pasivos fue enunciado en 1992 por Juang y Phan [7]. Como un ejemplo de este tipo de sistemas podemos mencionar un embalaje diseñado con un sistema masa, resorte, amortiguador para disminuir el daño en el elemento a ser transportado, el mismo es diseñado para una cierta frecuencia crítica de excitación del sistema y un transporte determinado cuya masa, rigidez y amortiguamiento son constantes, obteniendo un desplazamiento reducido respecto al sistema original sin absorbedor. Por otro lado, es posible superar las limitaciones de rendimiento del sistema pasivo implementando un sistema activo. Los absorbedores *activos* [5] constan de sensores, actuadores y un controlador centralizado que ofrece una flexibilidad de manera de poder cambiar, la sintonización inicial ante distintas frecuencias excitatrices, para poder lograr el mayor rendimiento del sistema absorbedor. Volviendo al embalaje con sistema de absorbedor de vibraciones, si ahora se le agregan sensores que midan desplazamientos y se construye un sistema capaz de variar la rigidez y amortiguamiento, entonces se está frente a un *sistema activo* que por medio de un controlador puede variar su sintonización para adaptarse a distintas frecuencias de excitación y tipos de transporte.

1.2. Efecto del viento sobre las estructuras

A.G. Davenport [8] introdujo el concepto de cadena de carga de viento, lo que estipula que cada eslabón es necesario para el cálculo del accionar del viento así como la respuesta a este estímulo. El concepto de la cadena es para enfatizar que cada una de las variables es fundamental a la hora del cálculo estructural y a la vez señalar que existe interacción entre éstas. Por ejemplo, propuso que puede determinarse los desplazamientos máximos de una estructura, multiplicando los desplazamientos estáticos medios por el factor de respuesta de ráfaga. Como componente de la cadena encontramos las condiciones del terreno, los desniveles ejercen una influencia importante en el viento. Si bien la velocidad media disminuye, el viento se transforma en turbulento y más difícil de describir. La velocidad media del viento aumenta a medida que nos alejamos, en altura, del suelo. Cuando hablamos de desniveles no sólo nos referimos a deformaciones naturales de la superficie sino también a la población edilicia del terreno en estudio. Otro componente de importancia es la respuesta de la estructura a las cargas de viento, la misma puede vibrar en diferentes direcciones cuando se encuentra bajo el efecto de las cargas del viento, por ejemplo la misma puede vibrar en la misma dirección del viento, así como perpendicularmente al mismo.

Simiu y Scalan [9] distinguen dos tipos de acciones generadas por el viento: *aerodinámicas* y *aeroelásticas*. Las acciones denominadas *aerodinámicas* están caracterizadas por la incidencia del viento sobre la estructura de forma que las fuerzas resultantes no dependen del movimiento de la misma. Por otra parte, las acciones *aeroelásticas* ocurren cuando el viento incide sobre una estructura en movimiento dando lugar a una interacción entre los movimientos de la estructura y el fluido, generando fuerzas dependientes del movimiento de la estructura. La interacción fluido-

estructura puede ocasionar oscilaciones de carácter divergente o no, en función de las llamadas fuerzas auto-excitadas. Los fenómenos *aeroelásticos* más importantes descritos en ingeniería de estructuras son el desprendimiento de vórtice (*vortex shedding*), el galope transversal (*galloping*), el galope inducido por una estela (*Wake galloping*), el flameo (*flutter*) y el bataneo (*buffering*).

El fenómeno *aeroelástico* ocasionado por la generación y *desprendimiento de vórtice*, Simiu y Scalan [9], se debe a la separación del flujo de aire por la presencia de un obstáculo y se caracteriza por el desprendimiento periódico de torbellinos con sentido de rotación alternados llamados vórtices de Von Kármán [10, 11]. El mencionado desprendimiento de vórtice genera fuerzas transversales a la dirección del flujo de aire sobre la estructura cuyo sentido se va alternando, las cuales son las causas de las vibraciones transversales típicas de este fenómeno *aeroelástico*. Una particularidad del desprendimiento de vórtice es el fenómeno de *Lock-in* [11, 12] que se produce cuando la frecuencia a la que se desprenden los torbellinos está próxima a la frecuencia natural de la estructura en la dirección transversal al flujo de aire. En esta situación, el desprendimiento de vórtice pasa a estar controlado por la frecuencia mecánica y la amplitud de la oscilación es máxima, pero autolimitada.

El *galope transversal*, Simiu y Scalan [9], genera movimientos de gran amplitud en la dirección normal al flujo de aire, con frecuencias menores a las que se producirían en el caso de desprendimiento de torbellinos. Este fenómeno es característico de las estructuras esbeltas con secciones transversales rectangulares o con forma de D, así como de cables de tendido eléctrico con hielo adherido. El galope inducido por estela tiene lugar cuando existen dos obstáculos próximos de tal forma que uno de los cuerpos se encuentra en la estela del otro. Debido a la estela de torbellinos que genera el cuerpo aguas arriba del flujo de aire, el segundo cuerpo recibe una corriente incidente cuya intensidad y sentido variarán con el tiempo. Este fenómeno es típico de las cadenas de ferrocarril y de las líneas de transporte de energía eléctrica en que los cables discurren agrupados en conjuntos formados por dos, cuatro, seis o más cables situados en paralelo y separados por espaciadores mecánicos en la dirección transversal

La inestabilidad aerodinámica provocada por el *flameo*, Simiu y Scalan [9], se produce a partir de una cierta velocidad crítica de viento cuando las fuerzas que el flujo de aire provoca sobre la estructura, en combinación con los movimientos de la propia estructura, dan lugar a amortiguamientos negativos en la estructura de tal manera que los movimientos de la misma se ven amplificados hasta que, debido al elevado nivel de tensiones que alcanza el material, se produce el colapso, como en el ejemplo clásico del puente Tacoma Narrows.

La vibración por *bataneo*, Simiu y Scalan [9], es aquella que se produce por la turbulencia u otras perturbaciones de la corriente no producidas por el obstáculo que las sufre, distinguiéndose dos tipos de bataneo: el generado por la propia turbulencia de la corriente incidente (que puede dar lugar a cargas cuasiestáticas o dinámicas) y el debido a las perturbaciones causadas por algún otro obstáculo próximo situado corriente arriba del obstáculo en consideración; este último tipo de bataneo se conoce en la literatura como *bataneo de estela o interferencia*.

Dependiendo del tipo de estructura, los fenómenos citados anteriormente pueden ocurrir aisladamente o asociados con otros, como por ejemplo, las vibraciones por flexión de torres, son provocadas por el desprendimiento vórtices y por la turbulencia del viento.

1.3. Reseña Histórica

Cómo antecedentes de los absorbedores de vibraciones a lo largo de la historia se pueden nombrar principalmente:

Fuente: Wikipedia [13].

- En Canadá, Vancouver. One Wall Centre, completado en el año 2001 consiste de 48 pisos con una altura total de 157,8 metros. Posee un sistema sintonizado de amortiguamiento por agua en el techo del complejo edilicio. El dispositivo consiste en dos tanques de agua de 227.330 litros especialmente diseñado para contrarrestar el balanceo del edificio debido a vibraciones no deseadas.
- En China, Shanghai. Shanghai World Financial Center, terminado en el 2008 con 101 niveles y 487,4 metros de altura. Para proteger el edificio de las fuerzas del viento y terremotos se han diseñado dos sistemas de absorbedores de vibraciones sintonizados tipo pendulares debajo del mirador.
- En Alemania, Berlín. Fernsehturm (Torre de televisión), concluido en 1969 con una altura de 368 metros. De manera de evitar el balanceo de la torre debido a las cargas del viento se construyó un vástago de acero de 1,5 toneladas suspendido por tres cables y adicionalmente se colocaron cuatro absorbedores hidráulicos de choque.
- En Irlanda, Dublín. Spire of Dublin, finalizado en 2003 con 121,2 metros de altura. Ésta estructura estrecha y esbelta fue diseñada hueca con dos masas suspendidas de cables, de ésta manera se aseguró estabilidad durante una tormenta de viento.
- En Japón, Honshu. Akashi Kaikyō Bridge, terminado en 1998 de 3.991 metros de largo. El puente contiene péndulos que fueron diseñados para operar en la frecuencia de resonancia para amortiguar las fuerzas generadas por el desplazamiento debido al viento.
- En Rusia, Sakhalin Island. Sakhalin-I, completado en 1996 es una plataforma para localizar y producir petróleo y gas la cual posee un amortiguador de vibraciones en la torre de perforación para evitar el daño de la estructura cuando está sometida a terremotos.
- En Taiwan, Taipei. Taipei 101, concluido en 2004 con 101 pisos y 509 metros de altura. Está diseñado para soportar vientos provenientes de

huracanes y temblores de terremotos, los cuales son comunes en éste área del pacífico asiático. Los rascacielos deben ser lo suficientemente flexibles para soportar fuertes vientos pero también deben permanecer lo suficientemente rígidos para evitar grandes desplazamientos en la estructura. Para lograr esto se diseñó para optimizar al máximo la performance de la estructura de acero, combinado con la solidez de la fundación del mismo. A su vez, se incluyó un péndulo de acero cuya esfera es de 5,5 metros de diámetro que ocupa los pisos 92 hasta el 87. Adicionando dos absorbedores de vibraciones en la punta de la aguja.

- Emiratos Árabes Unidos, Dubai. Burj Al Arab, terminado en 1999 posee 60 pisos y 322 metros de altura. Debido a vibraciones inducidas por vientos se colocan 11 absorbedores de vibraciones. De los cuales 8 están situados en la estructura reticulada externa y los 3 restantes están situados en la aguja. Este sistema está totalmente monitoreado por un sistema de control electrónico para garantizar el mayor confort a los clientes del hotel.
- Estados Unidos, Tacoma. Tacoma Bridge, terminado en 1940 de 1.810 metros. En el momento de su construcción el puente era el tercero más largo del mundo. Cuando estaba siendo construido se comenzaba a mover verticalmente y torsionalmente ante las cargas de viento, luego fue inaugurado y se tomaron varias medidas para evitar dicho movimiento pero todas ellas resultaron en vano. Finalmente el puente colapsó ante un viento de 64 km/h en el mismo año. El país se vio envuelto en la segunda guerra mundial lo que produjo el retraso en los planes de reemplazar el puente. Cerca de diez años después se construye el nuevo puente de Tacoma Narrow. Este puente se toma como referencia para explicar cómo las fuerzas inducidas por el viento actuando a una frecuencia periódica, pueden igualar a la frecuencia natural de la estructura provocando el colapso de la misma a través del fenómeno de flameo. El nuevo puente Tacoma Narrow Bridge está equipado con absorbedores de vibraciones tipo pendulares y amortiguadores hidráulicos instalados entre las torres para evitar el flameo.

1.4. Metodología de trabajo

El presente Proyecto Integrador es de carácter teórico, donde se estudia los efectos de la carga de viento sobre una estructura esbelta metálica de sección circular, como lo son las chimeneas industriales, y establecer la forma de disminuir dichos efectos sobre la estructura para maximizar la vida útil de la misma sin necesidad de recurrir a un excesivo dimensionamiento de partes estructurales o el uso de riostras.

Para la determinación de los efectos del viento sobre la estructura de análisis se recurrió a consultar las normas vigentes asociadas a dicho fenómeno; una de origen Nacional y otra Extranjera. La Norma Nacional vigente es la provista por el Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI) denominada CIRSOC 102 [14], la Norma Extranjera vigente es proveniente de Instituto Alemán de Normalización (DIN) denominada DIN 1055-4 [15]; de dichas Normas se realizó un análisis sobre la información que puede ser extraída de las mismas como también sus limitaciones.

Vale aclarar que las normas presentadas no brindan toda la información necesaria para determinar la configuración del absorbedor de vibraciones; por lo que se complementó mediante simulación numérica dentro de rutinas de cálculo utilizando el software Matlab 7.0 [16] y bibliografía especializada en el fenómeno [10, 11]. Con estas herramientas se pudieron determinar los parámetros necesarios para el diseño mecánico del sistema absorbedor de vibraciones. También se utilizó el software de elementos finitos llamado Abaqus [17] como soporte a los datos que son extraídos de Matlab [16] para obtener corroboración de los resultados.

Para un análisis ordenado de lo expuesto en los párrafos anteriores se decidió exponer el Proyecto Integrador en seis capítulos, en el primer capítulo se presenta un resumen del Proyecto con el fin de servir de guía al lector. En el segundo capítulo se centra en explicar aspectos conceptuales, obteniendo los parámetros que definen a la estructura de análisis utilizando Matlab [16] y mediante Abaqus [17] como validante de los resultados obtenidos con Matlab [16] considerándolos como, en primera instancia, de un grado de libertad dinámico, y luego, de dos grados de libertad dinámicos procediendo de la misma manera. En el tercer capítulo se establecen los lineamientos pertenecientes a las normas en la resolución de la estructura bajo carga de viento, definiendo los alcances de cada una de ellas. En el cuarto capítulo se realiza la resolución numérica de la normas obteniendo como resultado las solicitaciones máximas. En el quinto capítulo se presenta la teoría del fenómeno aeroelástico de desprendimiento de vórtice junto con el procedimiento para la simulación numérica del fenómeno que, mediante rutinas de cálculo en Matlab [16] obtiene la respuesta de la estructura y se evalúan distintos parámetros del absorbedor para determinar los más eficientes, también se elabora un análisis estadístico del viento. En el sexto capítulo se presentan potenciales configuraciones del sistema absorbedor de vibraciones, se selecciona la opción más viable, se realiza el diseño mecánico (planos de conjunto, de detalle, etc.) y su memoria de cálculo.

1.5. Objetivos

Se establece como finalidad principal del presente Proyecto Integrador el estudio y diseño de una alternativa para disminuir la deflexión máxima de la chimenea debida a carga de viento utilizando un sistema absorbedor de vibraciones.

En forma resumida, los objetivos del presente Proyecto Integrador son:

1. Determinar los parámetros de un sistema absorbedor de vibraciones que, bajo los efectos de la carga de viento, mantenga a la estructura de estudio dentro de amplitudes de desplazamientos aceptables; dando un nivel tensional garantizando una vida infinita en fatiga.
2. Establecer la configuración física del sistema absorbedor de vibraciones, determinando el dispositivo más viable desde el punto de vista de la fabricación.

Se propone demostrar de forma cuantitativa la necesidad de aplicación del sistema absorbedor de vibraciones y las ventajas del mismo. Para ello se estableció el siguiente eje temático:

1. Teoría asociada a sistemas de uno y dos grados de libertad dinámico.
2. Ejemplos numéricos sobre los análisis paramétricos de los sistemas.
3. Determinación de los parámetros reducidos de la estructura de análisis.
4. Reproducción de los resultados en Softwares de cálculo numérico y Elementos finitos. Ejemplos numéricos.
5. Análisis Normativos.
6. Simulación teórica de fenómenos dinámicos y aeroelásticos.
7. Determinación de los parámetros que constituyen el absorbedor más eficiente utilizando las simulaciones numéricas basadas en los aspectos normativos y teóricos.
8. Diseño mecánico del absorbedor.

1.6. Aclaraciones

En este apartado dentro del Capítulo uno vale aclarar que la Norma DIN [15] que se utilizó para el desarrollo del presente Proyecto Integrador estaba en Alemán, lo que mediante herramientas que presenta Internet, como lo son los traductores on-line [18, 19], se pudo interpretar, en la medida de lo posible, los párrafos que fueron utilizados en la resolución del proyecto; por lo cual se decidió introducirlos dentro del Capítulo 3 por si otro estudiante necesita dicha información, pueda hacerlo libremente. Estos párrafos traducidos por los autores de este Proyecto Integrador fueron colocados respetando la mismas referencias numéricas de capítulos y apartados dadas por la Norma DIN [15]; con el objeto de facilitar su búsqueda si fuera necesario.

Otra aclaración que es relevante establecer aquí son el formato de las ecuaciones que se utilizaron en los capítulos posteriores, cuando se presentan las ecuaciones, estas tienen el siguiente formato, a modo de ejemplo citamos la ecuación 1.1:

$$G = 0,925 \left(\frac{1 + 1,7 g_Q I_z - Q}{1 + 1,7 g_v I_z} \right) \quad (1.1)$$

Reemplazando por sus valores en la **Ecuación 1.1**:

$$G = 0,925 \left(\frac{1 + 1,7 \cdot 3,4 \cdot 0,191 \cdot 0,9178}{1 + 1,7 \cdot 3,4 \cdot 0,191} \right) \quad (V.1-1.1)$$

La referencia de la ecuación V.1-1.1 significa que la ecuación 1.1 ha sido valuada (V.1-1.1) por primera vez (V.1-1.1) por sus valores numéricos. Esta nomenclatura se definió de esta manera debido a la existencia de ecuaciones que son valuadas en múltiples oportunidades.

1.7. Referencias

- ¹ Blessmann, J., “Acidentes Causados pelo Vento”, 4ª Edición, editorial de la Universidad Federal del Rio Grande do Sul, 2001.
- ² Battista, R.C., “Validação da Estabilidade da Estructura da Poste Metálico para Telecomunicações” PEC-4317, Fundación COPPETEC, Universidad Federal de Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.
- ³ Rao, S., “Mechanical Vibrations”, Prentice Hall, Upper Sandle River, 2011.
- ⁴ Balachandran, B., Magrab, E., “Vibrations”, Cengage Learning, Toronto, 2009.
- ⁵ Gerb, “Vibration Insolation Systems”, Gerb, Berlin, 1994.
- ⁶ Den Hartog, J.P., “Mechanical Vibrations”, MacGraw-hill, New York, 1956.
- ⁷ Juang, J. y Phan, M., “Robust controller desings for second-order dynamic systems: a virtual approach”, Jornal of Guidance, Control and Dynamics, 15, pp 1192-1198, 1992.
- ⁸ Davenport, A.G. “Gust Loading Factors”, Journal of the Structural Division, ASCE, 93, pp. 11-34. 1967.
- ⁹ Simiu, E., y Scanlan, R.H., “Wind Effects on Structures, fundamental and applications to design”, John Wiley and Sons Inc., New York, 1996.
- ¹⁰ Dyrbye, C., Hansen, S., “Wind Loads on Structures”, John Wiley and Sons Inc., Chirchester, 1997.
- ¹¹ Blevins, R., “Flow-Induced Vibrations”, Krieger Publishin Company, Malabar, 2001.
- ¹² Feng, C., “The Measurement of Vortex-Induced Effects in Flow Past Stationary and Oscillating Circular and D-Section Cylinders”, University of British Columbia, 1968.
- ¹³ <https://es.wikipedia.org/>
- ¹⁴ INTI, “CIRSOC 102, Reglamento Argentino de acción del viento sobre las construcciones”, INTI, Buenos Aires, Julio 2005.
- ¹⁵ DIN, “1055-4, Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 4: Windlasten”, DIN, Berlin, 2005.
- ¹⁶ The MathWorks, “Matlab 7.0 R14”, MathWorks, USA, 2007.
- ¹⁷ Dassault Systemes, “Abaqus CAE”, Dassault Systemes, France, 2010.
- ¹⁸ <https://translate.google.com.ar/>
- ¹⁹ <http://www.reverso.net/>

Capítulo 2 Aspectos Conceptuales.

2.1. Introducción

En este capítulo se realiza una revisión de los conceptos teóricos que rigen el movimiento de un sistema sujeto a cargas armónicas. Además se estudia la estructura objeto de análisis, esto es la chimenea metálica, a partir de su condición de sistema continuo de múltiples grados de libertad para obtener sus propiedades reducidas a un grado de libertad dinámico, es decir la obtención de masa, rigidez y amortiguamiento considerando a toda la estructura de análisis como un sistema simple de masa-resorte-amortiguador. Para ello se utilizan programas de resolución numérica como los son Abaqus [1] y Matlab [2].

Para lograr un estudio simplificado la estructura se tratará como un sistema de **un grado de libertad dinámico** (Ver apartado 2.3.), para ello se utilizarán los dos programas de cálculo antes mencionados para obtener los parámetros reducidos del sistema, estos son:

1. Masa reducida.
2. Rigidez reducida.
3. Amortiguación reducida.

En una primera aproximación se considerará la amortiguación reducida igual a cero, ya que se trata de una estructura metálica y empíricamente está comprobado que dichas estructuras poseen un valor bajo de amortiguamiento por lo que puede ser despreciado.

Por otro lado también se analizará la influencia de la incorporación de un absorbedor de vibraciones en su extremo libre.

2.2. Objetivos

La finalidad de este capítulo se centra en la necesidad de poner a disposición del lector la información teórica sobre el análisis de sistemas vibratorios bajo cargas armónicas, detallar las ecuaciones que rigen su movimiento y validar las herramientas informáticas que permite modelar numéricamente la estructura de análisis.

Resumidamente, los objetivos de este capítulo son:

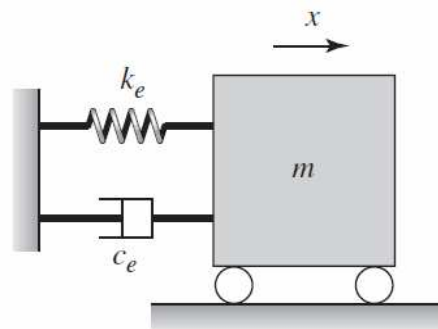
1. Definir y establecer ecuaciones que rigen a los Sistemas Dinámicos.
2. Establecer conceptos sobre Absorbedores de vibraciones.
3. Modelizar la estructura de análisis utilizando los programas de cálculo anteriormente mencionados, obtener sus parámetros.
4. Analizar los resultados arrojados por los programas de cálculo.

2.3. Sistemas de un Grado de Libertad Dinámico (1 GLD)

El número de *grados de libertad* de un sistema es igual al número de coordenadas independientes entre sí que son necesarias para describir en forma completa la posición (o el movimiento) de un sistema. Si los grados de libertad están provistos de masa, entonces son llamados *grados de libertad dinámicos* [3, 4]. De acuerdo con el número de grados de libertad, se distinguen los sistemas con grados de libertad finitos de los sistemas con infinitos grados de libertad.

Los sistemas mecánicos con un número finito de grados de libertad están compuestos de un número finito de cuerpos rígidos vinculados a través de elementos elásticos sin masa. Dentro de esta clasificación juegan un rol importante los sistemas con un único grado de libertad, por su simplicidad, ya que muchos fenómenos oscilatorios pueden ser explicados con claridad y sencillez, además gran cantidad de sistemas reales se pueden modelar obteniendo una adecuada aproximación.

Un sistema de un grado de libertad dinámico **Figura 2.1** es el caso más simple de análisis constando de valores de masa, rigidez y amortiguación, su compartimiento está bien estudiado y existe abundante bibliografía.



Fuente: Balachandran & Magrab [3]

Figura 2. 1 Sistema de un grado de libertad dinámico

En general, los elementos que conforman un sistema vibratorio son de tres tipos:

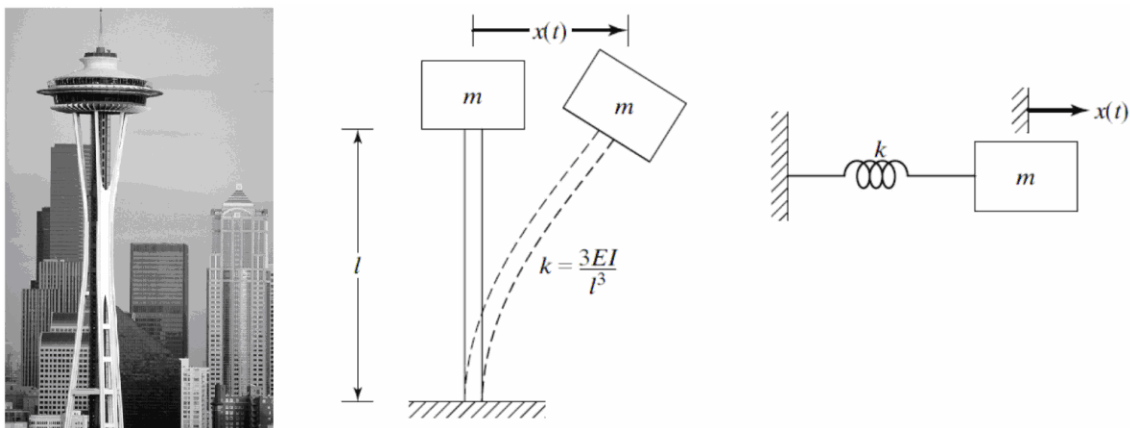
- Elementos de inercia (m):** Almacenan y liberan energía cinética.
- Elemento de rigidez (k_e):** Almacenan y liberan energía potencial.
- Elementos de disipación (o amortiguamiento c_e):** Representan las pérdidas de energía del sistema.

Además de estos elementos, en las ecuaciones de movimiento deben tenerse en cuenta las fuerzas y momentos aplicados externamente, y las alteraciones provocadas por los desplazamientos y/o velocidades iniciales preescritos.

Cada tipo de elemento posee su propia relación excitación-respuesta (lineal o no-lineal). La excitación puede ser una fuerza o un momento, y la respuesta correspondiente puede ser un desplazamiento, una velocidad o una aceleración.

Varios sistemas mecánicos y estructurales se pueden idealizar como sistemas de un solo grado de libertad. En muchos sistemas prácticos, la masa está distribuida, pero para un análisis simple se puede considerar como una sola masa puntual m_{eq} . Así mismo, la elasticidad del sistema, la cual puede estar distribuida por todo el sistema, también se puede idealizar como un solo resorte k_{eq} .

Del mismo modo, la estructura que se muestra en la **Figura 2.2** puede analizarse como una viga en voladizo empotrada en el suelo. Para estudiar la vibración transversal, la masa de la parte superior se puede considerar como una masa puntual y la estructura de soporte (viga) se puede representar como un resorte para obtener el modelo de un solo grado de libertad que se ve en la figura. La constante del resorte k se puede determinar teniendo en cuenta la fuerza de deflexión, a partir de las propiedades geométricas y de materiales de las columnas.



Fuente: Rao [4]

Figura 2. 2 Modelación de una estructura esbelta como un sistema masa-resorte

2.3.1. Clasificación de la fuente generadora de vibraciones

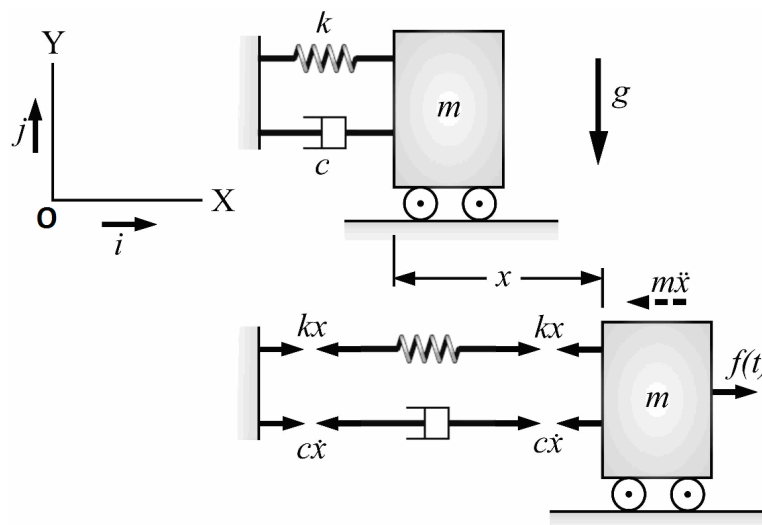
En esta clasificación se tiene en cuenta la causa generadora del movimiento. La denominación *oscilador libre* indica que mientras oscila, el sistema no está sometido a la causa que originó el movimiento. *Las vibraciones libres* pueden ser amortiguadas o no, dependiendo si se consideran términos disipativos que representan la pérdida de energía en el sistema.

Las vibraciones forzadas, son causadas por cargas que actúan en forma parcial o temporalmente durante el movimiento, y que no dependen de la magnitud del movimiento que originan.

Las cargas pueden ser clasificadas como *periódicas* o *no periódicas*, siempre que puedan ser descritas de alguna manera mediante ecuaciones matemáticas.

2.3.2. Determinación de la ecuación del movimiento: Solución de Régimen Permanente y Régimen Transitorio

Para determinar la ecuación que rige el movimiento en dirección normal a la dirección de la gravedad, se supone que la masa se mueve sin fricción. La longitud sin estiramiento del resorte es L y un punto fijo O se localiza en la posición sin estiramiento del resorte, como se ilustra en la **Figura 2.3**. Si se observa que el resorte no sufre deflexión estática alguna y que resulta un equilibrio de fuerza en la dirección i , se obtiene directamente la ecuación 2.1.



Fuente: Balachandran & Magrab [3]

Figura 2. 3 Sistema de un grado de libertad dinámico, determinación de las ecuaciones de movimiento.

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = f(t) \quad (2.1)$$

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + kx = f(t) \quad (2.2)$$

Si consideramos que las condiciones iniciales son cero, es decir:

$$x(0) = \dot{x}(0) = 0$$

La solución general de la ecuación diferencial 2.2 para $0 \leq \zeta < 1$ se reduce a:

$$x(t) = \frac{1}{m\omega_d} \int_0^t e^{-\zeta\omega_n\eta} \text{sen}(\omega_d\eta) f(t-\eta) d\eta \quad (2.3)$$

Por propiedad de convolución tenemos que la ecuación 2.3 pasa a ser:

$$x(t) = \frac{1}{m\omega_d} \int_0^t e^{-\zeta\omega_n(t-\eta)} \text{sen}[\omega_d(t-\eta)] f(\eta) d\eta \quad (2.4)$$

Donde η es la variable de integración y:

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (2.5)$$

Resolviendo la integral (ecuación 2.4) para una fuerza excitatriz armónica aplicada súbitamente en $t=0$ ocasiona una repuesta con una parte transitoria y una en régimen permanente, consideremos la función de fuerza periódica:

$$f(t) = F_o \text{sen}(\omega t) u(t) \quad (2.6)$$

Donde $u(t)$ es la función escalón.

$$u(t) = 0 \quad t < 0 \quad (2.7)$$

$$u(t) = 1 \quad t \geq 0 \quad (2.8)$$

Sustituyendo las ecuaciones 2.7 y 2.8 en la ecuación general 2.4 nos queda:

$$x(t) = \frac{F_o e^{-\zeta\omega_n t}}{m\omega_d} \int_0^t e^{\zeta\omega_n \eta} \text{sen}[\omega_d(t-\eta)] \text{sen}(\omega \eta) d\eta \quad (2.9)$$

Se introducen los siguientes parámetros adimensionales.

$\tau = \omega_n t$	Tiempo adimensional.	
$\Omega = \omega / \omega_n$	Frecuencia de excitación adimensional.	(2.10)
$\xi = \omega_n \eta$	Variable de integración del tiempo adimensional.	

Reemplazando las ecuaciones 2.10 en la ecuación 2.9 nos queda:

$$x(\tau) = \frac{F_o e^{-\zeta \tau}}{k \sqrt{1 - \zeta^2}} \int_0^\tau e^{\zeta \xi} \text{sen}[\sqrt{1 - \zeta^2}(\tau - \xi)] \text{sen}(\Omega \xi) d\xi \quad (2.11)$$

La solución para la repuesta forzada luego de integrar la ecuación general (ecuación 2.11) resulta de la forma:

$$x(\tau) = [x_{strans}(\tau) + x_{srp}(\tau)] u(\tau) \quad (2.12)$$

Donde la solución de *régimen permanente* de la repuesta está dada por:

$$x_{srp}(\tau) = \frac{F_o}{k} H(\Omega) \text{sen}(\Omega\tau - \theta(\Omega)) \quad (2.13)$$

$$D(\Omega) = (1 - \Omega^2)^2 + (2\zeta\Omega)^2 \quad (2.13a)$$

$$H(\Omega) = \frac{1}{\sqrt{D(\Omega)}} = \frac{1}{\sqrt{(1 - \Omega^2)^2 + (2\zeta\Omega)^2}} \quad (2.13b)$$

$$\theta(\Omega) = \tan^{-1} \frac{2\zeta\Omega}{1 - \Omega^2} \quad (2.13c)$$

Y la solución *transitoria* de la repuesta se encuentra mediante:

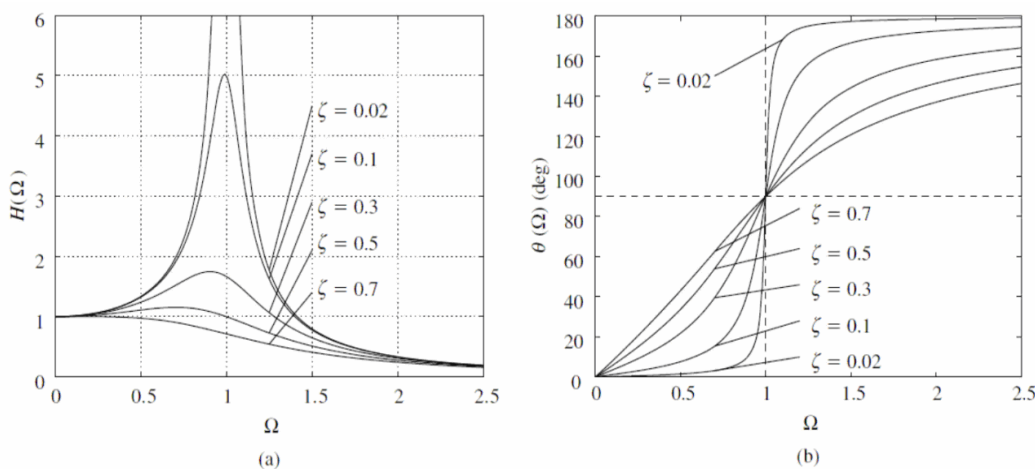
$$x_{strans}(\tau) = \frac{F_o}{k} \frac{H(\Omega)\Omega e^{-\zeta\tau}}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \text{sen}(\tau\sqrt{1 - \zeta^2} + \theta_i(\Omega)) \quad (2.14)$$

$$\theta_i(\Omega) = \tan^{-1} \frac{2\zeta\sqrt{1 - \zeta^2}}{2\zeta^2 - (1 - \Omega^2)} \quad (2.14a)$$

La cantidad $H(\Omega)$ se denomina *repuesta de la amplitud* y la cantidad $\theta(\Omega)$ se llama *repuesta de fase*, lo cual proporciona la fase con respecto a la fuerza $f(t)$.

Se puede observar que en la componente de régimen permanente ((a) de la **Figura 2.4**) varía en forma periódica en la frecuencia adimensional Ω , la frecuencia de la fuerza aplicada $f(t)$ y con una amplitud $F_o H(\Omega)/k$. Además, la repuesta de desplazamiento se demora una cantidad $\theta(\Omega)$ con respecto a la entrada.

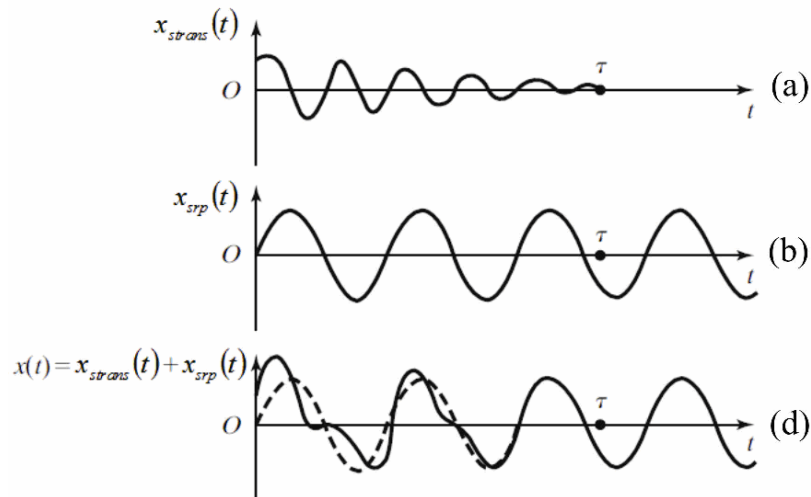
La repuesta a la amplitud $H(\Omega)$ y la repuesta en fase $\theta(\Omega)$ se grafican en (b) de la **Figura 2.4** para distintos valores de ζ .



Fuente: Balachandran & Magrab [3]

Figura 2.4 Excitación armónica aplicada directamente a la masa del sistema, a) Respuesta en Amplitud, b) Respuesta en fase

La solución o respuesta transitoria $x_{strans}(t)$ ((a) de la **Figura 2.5**) varía periódicamente con una frecuencia ω_d/ω y su amplitud decrece de modo exponencial con el tiempo en función de la relación de amortiguamiento ζ .



Fuente: Rao [4]

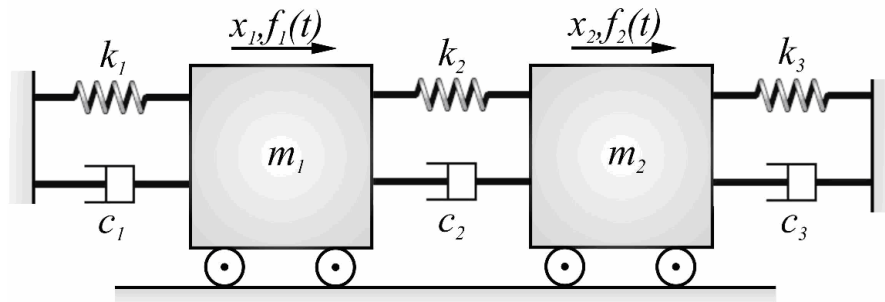
Figura 2. 5 Respuesta a excitación armónica, a) Respuesta transitoria, b) Respuesta régimen permanente, d) Respuesta Total (Régimen permanente más transitoria)

2.4. Sistemas de múltiples grados de libertad

Los sistemas que requieren más de una coordenada independiente para poderlas describir tienen varios grados de libertad. Los elementos de inercia presentes en el sistema son los que determinan la cantidad de grados de libertad. Por ejemplo, en un sistema con dos grados de libertad puede haber un elemento de inercia cuyo movimiento se describe por medio de dos coordenadas independientes o dos elementos de inercia cuyos movimientos se expresa mediante dos coordenadas independientes. En general, la cantidad de grados de libertad de un sistema no sólo lo determinan los elementos de inercia, sino también las restricciones impuestas en el sistema.

2.4.1. Ecuaciones rectoras

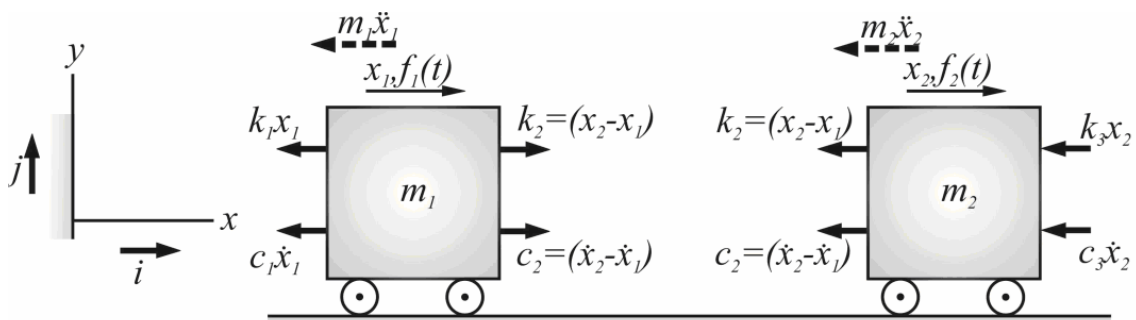
Sea el sistema de dos grados de libertad dinámico (2GLD) que se muestra en la **Figura 2.6**.



Fuente: Balachandran & Magrab [3]

Figura 2. 6 Sistema de dos grados de libertad

Las coordenadas generalizadas x_1 y x_2 se utilizan para especificar las posiciones de las masas m_1 y m_2 , respectivamente, a través del extremo fijo del lado izquierdo. Con base en el diagrama de cuerpo libre del elemento de inercia m_1 (**Figura 2.7**) y efectuando el equilibrio de fuerzas en la dirección horizontal i , se obtiene la ecuación **2.15**:



Fuente: Balachandran & Magrab [3]

Figura 2. 7 Diagrama de cuerpo libre sistema 2 GLD

$$-m_1\ddot{x}_1 - k_1x_1 + k_2(x_2 - x_1) - c_1\dot{x}_1 + c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + f_1(t) = 0 \quad (2.15)$$

Donde:

$-m_1\ddot{x}_1$	Fuerza de inercia.	(2.16)
$-k_1x_1$	Fuerza asociada con el resorte de rigidez k_1 .	
$k_2(x_2 - x_1)$	Fuerza asociada con el resorte de rigidez k_2 .	
$-c_1\dot{x}_1$	Fuerza asociada con el amortiguador de coeficiente c_1 .	
$c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1)$	Fuerza asociada con el amortiguador de coeficiente c_2 .	
$f_1(t)$	Fuerza externa que actúa sobre la masa m_1 .	

Esta ecuación, al escribirla de nuevo, es la primera de las ecuaciones que conforman el sistema. De igual modo, a partir del diagrama de cuerpo libre del elemento de inercia m_2 (**Figura 2.7**) se obtiene la segunda ecuación del sistema.

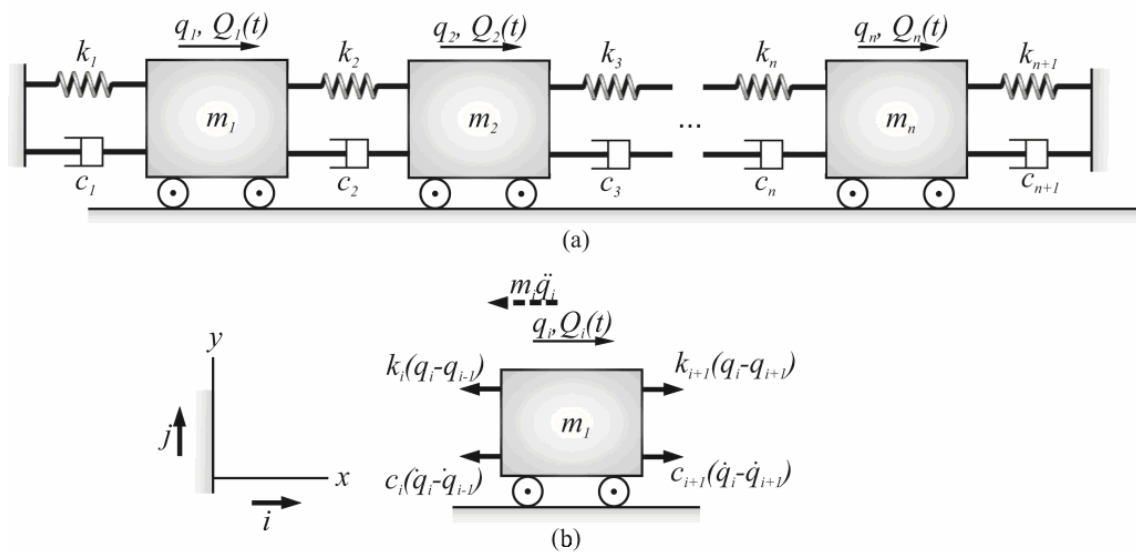
$$m_2\ddot{x}_2 + (c_2 + c_3)\dot{x}_2 - c_2\dot{x}_1 - c_3\dot{x}_3 + (k_2 + k_3)x_2 - k_2x_1 - k_3x_3 = f_2(t) \quad (2.17)$$

Donde:

$-m_2\ddot{x}_2$	Fuerza de inercia.	(2.18)
$k_2(x_2 - x_1 - x_3)$	Fuerza asociada con el resorte de rigidez k_2 .	
$-c_1\dot{x}_1$	Fuerza asociada con el amortiguador c_1 .	
$c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1 - \dot{x}_3)$	Fuerza asociada con el amortiguador c_2 .	
$f_2(t)$	Fuerza externa que actúa sobre la masa m_2 .	

Ahora generalizando para N grados de libertad (**Figura 2.8**) con $N+1$ elementos de rigidez lineales y $N+1$ elementos de disipación lineales, tenemos que cada ecuación que conforma el sistema de ecuaciones diferenciales es de la forma para el grado de libertad i :

$$m_i\ddot{q}_i + (c_i + c_{i+1})\dot{q}_i - c_i\dot{q}_{i-1} - c_{i+1}\dot{q}_{i+1} + (k_i + k_{i+1})q_i - k_iq_{i-1} - k_{i+1}q_{i+1} = Q_i(t) \quad (2.19)$$



Fuente: Balachandran & Magrab [3]

Figura 2. 8 a) Sistema de N grados de libertad dinámicos, b) Diagrama de cuerpo libre del elemento i del sistema de N grados de libertad dinámicos

Donde:

q_i	Coordenada generalizada del grado de libertad i .	(2.20)
$Q_i(t)$	Fuerza exterior que actúa sobre el i -ésimo elemento de inercia	

En forma matricial:

Matriz de Masa.

$$[M] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & m_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & m_N \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

Matriz de rigidez:

$$[K] = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & -k_3 & \ddots & \dots & \dots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \ddots & -k_{N-1} & 0 \\ \vdots & \vdots & \dots & -k_{N-1} & k_{N-1} + k_N & -k_N \\ 0 & 0 & \dots & 0 & -k_N & k_N + k_{N+1} \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

Matriz de amortiguamiento:

$$[C] = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ -c_2 & c_2 + c_3 & -c_3 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & -c_3 & \ddots & \dots & \dots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \ddots & -c_{N-1} & 0 \\ \vdots & \vdots & \dots & -c_{N-1} & c_{N-1} + c_N & -c_N \\ 0 & 0 & \dots & 0 & -c_N & c_N + c_{N+1} \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

Las coordenadas generalizadas:

$$\begin{aligned} [q] &= \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \vdots \\ q_N \end{bmatrix} & [\dot{q}] &= \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \vdots \\ \dot{q}_N \end{bmatrix} & [\ddot{q}] &= \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \\ \vdots \\ \ddot{q}_N \end{bmatrix} \\ \text{Desplazamiento} & & \text{Velocidad} & & \text{Aceleración} & \end{aligned} \quad (2.24)$$

Las fuerzas exteriores:

$$[Q] = \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ \vdots \\ Q_N \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

En forma matricial reducida tenemos:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{Q\} \quad (2.26)$$

Para la coordenada generalizada x y fuerzas exteriores f , la matriz resulta ser:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{f\} \quad (2.27)$$

Los elementos que no están en la diagonal principal de la matriz de amortiguamiento, en la matriz de rigidez y son distintos de cero representan los elementos de acoplamiento del sistema.

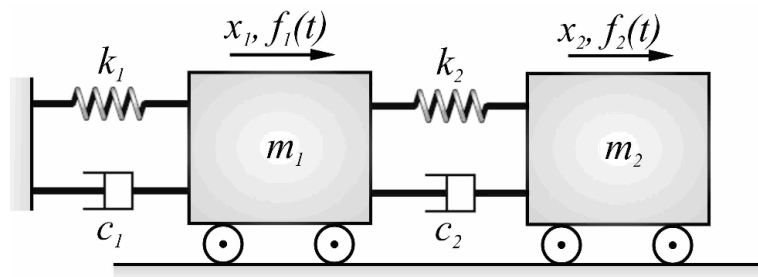
A continuación se prosigue con un caso que es de gran importancia en la disminución de vibraciones a la que están sometidas las estructuras en general.

2.5. Sistema de dos Grados de Libertad Dinámico (Absorbedor de Vibraciones)

El absorbedor de vibración, también llamado absorbedor de vibración dinámico, es un dispositivo dinámico que se utiliza para reducir o eliminar la vibración indeseable. Se compone de otra masa, rigidez y amortiguación anexada a la masa principal (sistema primario) que tiene que ser protegido contra las vibraciones. Por lo tanto, la masa principal y la masa del absorbedor anexada constituyen un sistema de dos grados de libertad dinámicos, por lo tanto el nuevo sistema posee dos frecuencias naturales.

Una máquina o sistema puede experimentar vibración excesiva si en ella actúa una fuerza cuya frecuencia de excitación se aproxime a la frecuencia natural de la máquina o sistema. En tales casos, la vibración de la máquina o sistema se puede reducir por medio de un absorbedor de vibraciones dinámica.

Ahora se hará un análisis matemático de forma general a un sistema al cual se le agrega al sistema inicial un sistema absorbente de vibraciones quedando así el sistema con un grado más de libertad dinámico.



Fuente: Balachandran & Magrab [3]

Figura 2. 9 Sistema 2 GLD absorbedor de vibraciones

Sea el sistema que muestra la **Figura 2.9**. A este sistema de 2 GLD se le hizo un análisis de sus parámetros y se obtuvo la respuesta de m_1 ante una excitación $f_1(t)$ sinusoidal.

Para deducir las ecuaciones rectoras del sistema de dos grados de libertad utilizamos las ecuaciones de Lagrange.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial V}{\partial q_i} + \frac{\partial D}{\partial \dot{q}_i} = Q_i \quad \text{Para } j= 1, 2, \dots, N \quad (2.28)$$

Donde T es la energía cinética del sistema, V la energía potencial, D la función disipación de Rayleigh y Q_i es la fuerza generalizada que actúa en i -ésimo elemento de inercia. Elegimos a x_1 y x_2 como coordenadas generalizadas considerando desplazamientos positivos, con origen en la posición de equilibrio estático.

La energía cinética de este sistema será:

$$T = \frac{1}{2} m_1 \dot{x}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 \dot{x}_2^2 \quad (2.29)$$

Derivando la ecuación 2.29:

$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_1} \right) = m_1 \ddot{x}_1$	(2.30)
$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_2} \right) = m_2 \ddot{x}_2$	
$\frac{\partial T}{\partial x_1} = \frac{\partial T}{\partial x_2} = 0$	

La energía potencial de este sistema será:

$$V = \frac{1}{2} k_1 x_1^2 + \frac{1}{2} k_2 (x_2 - x_1)^2 \quad (2.31)$$

Derivando la ecuación 2.31:

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial x_1} &= k_1 x_1 + k_2 (x_1 - x_2) \\ \frac{\partial V}{\partial x_2} &= k_2 (x_2 - x_1) \end{aligned} \quad (2.32)$$

La energía disipativa de este sistema será:

$$D = \frac{1}{2} c_1 \dot{x}_1^2 + \frac{1}{2} c_2 (\dot{x}_2 - \dot{x}_1)^2 \quad (2.33)$$

Derivando la ecuación 2.33:

$\frac{\partial D}{\partial \dot{x}_1} = c_1 \dot{x}_1 + c_2 (\dot{x}_1 - \dot{x}_2)$	(2.34)
$\frac{\partial D}{\partial \dot{x}_2} = c_2 (\dot{x}_2 - \dot{x}_1)$	

Las ecuaciones que rigen el sistema son a partir de la ecuación **2.28**, aplicando las ecuaciones de Lagrange:

$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_1} \right) - \frac{\partial T}{\partial x_1} + \frac{\partial V}{\partial x_1} + \frac{\partial D}{\partial \dot{x}_1} = F(t)$	(2.35)
$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_2} \right) - \frac{\partial T}{\partial x_2} + \frac{\partial V}{\partial x_2} + \frac{\partial D}{\partial \dot{x}_2} = 0$	

La fuerza generalizada en estas coordenadas será:

$$Q = f(t) \tag{2.36}$$

Reemplazando las ecuaciones **2.30**, **2.32**, **2.34** y **2.36** en la ecuación **2.35**, ordenando podemos expresarla en forma matricial:

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f(t) \\ 0 \end{Bmatrix} \tag{2.37}$$

Para obtener la solución del sistema de ecuaciones, suponemos que la respuesta está dada en función de una fuerza excitatriz de la forma:

$$\{f(t)\} = \{F\} e^{i\omega t} \tag{2.38}$$

Entonces si partimos de la ecuación **2.38** la solución que será de la forma:

$$\{x(t)\} = \{X\} e^{i\omega t}$$

Con:

$$\{x(t)\} = \begin{Bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{Bmatrix} \quad \{X\} = \begin{Bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{Bmatrix} \tag{2.39}$$

Las dos primeras derivadas de la ecuación **2.39**:

$$\{\dot{x}(t)\} = \{X\} i\omega e^{i\omega t} \tag{2.40}$$

$$\{\ddot{x}(t)\} = -\{X\} \omega^2 e^{i\omega t}$$

Reemplazando las ecuaciones **2.40** y **2.38** en la ecuación **2.37**:

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} -m_1 & 0 \\ 0 & -m_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{Bmatrix} \omega^2 e^{i\omega t} + \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{Bmatrix} i\omega e^{i\omega t} + \dots \\ & \dots + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{Bmatrix} e^{i\omega t} = \begin{Bmatrix} F \\ 0 \end{Bmatrix} e^{i\omega t} \end{aligned} \tag{2.41}$$

Simplificando y agrupando de **2.41** tenemos:

$$\begin{bmatrix} (k_1 + k_2) + (c_1 + c_2)i\omega - m_1\omega^2 & -k_2 - c_2i\omega \\ -k_2 - c_2i\omega & k_2 + c_2i\omega - m_2\omega^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (2.42)$$

Despejando de la ecuación **2.42**, nos queda:

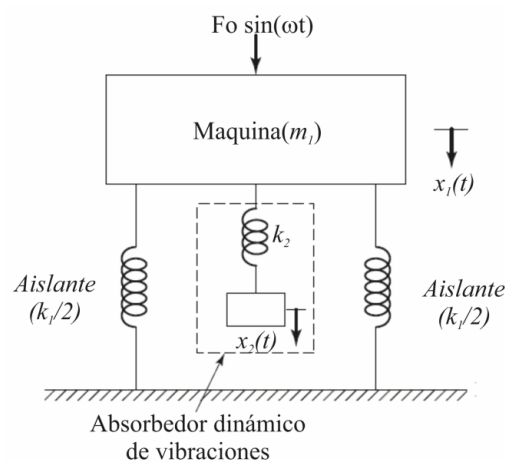
$$\begin{Bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} (k_1 + k_2) + (c_1 + c_2)i\omega - m_1\omega^2 & -k_2 - c_2i\omega \\ -k_2 - c_2i\omega & k_2 + c_2i\omega - m_2\omega^2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} F \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (2.43)$$

En el diseño de los absorbedores dinámicos de vibraciones deben considerarse las propiedades particulares de cada sistema primario, de acuerdo a esto el sistema secundario puede ser un:

1. Absorbedor de vibraciones no amortiguado.
2. Absorbedor de vibraciones amortiguado.

2.5.1. Absorbedor de vibraciones no amortiguado

Los absorbedores de vibraciones no amortiguados se aplican a sistemas primarios de amortiguamiento propio bajo o nulo donde la fuerza sobre el sistema primario tiene una frecuencia de excitación dentro de un rango limitado bien conocido. El absorbedor de vibraciones se utiliza comúnmente en máquinas que operan a velocidad constante, porque el absorbedor de vibraciones se sintoniza a una frecuencia particular y es efectivo dentro de una banda angosta de frecuencias. Algunas aplicaciones comunes del absorbedor de vibraciones (Ver **Figura 2.10**) comprenden herramientas alternativas como lijadoras, sierras y compactadoras, así como grandes motores de combustión interna los cuales funcionan a un régimen constante.



Fuente: Rao [4]

Figura 2. 10 Absorbedor de vibraciones sin amortiguamiento

Siendo en este caso los valores de amortiguamiento:

$$c_1 = c_2 = 0 \quad (2.44)$$

Reemplazando la ecuación 2.44 en la ecuación 2.43, resulta:

$$\begin{Bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} (k_1 + k_2) - m_1 \omega^2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 - m_2 \omega^2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} F \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (2.45)$$

Resolviendo la ecuación 2.45 la solución es:

$$X_1 = \frac{(k_2 - m_2 \omega^2) F}{(k_1 + k_2 - m_1 \omega^2)(k_2 - m_2 \omega^2) - k_2^2} \quad (2.46)$$

$$X_2 = \frac{k_2 F}{(k_1 + k_2 - m_1 \omega^2)(k_2 - m_2 \omega^2) - k_2^2} \quad (2.47)$$

Como es posible ver en la ecuación de X_1 (Sistema primario ecuación 2.46) la respuesta tiene un valor mínimo igual a cero donde la frecuencia de excitación es igual a:

$$\omega = \sqrt{\frac{k_2}{m_2}} \quad (2.48)$$

Suponiendo una fuerza excitatriz externa de amplitud unitaria ($F=1$), resultan las siguientes graficas:

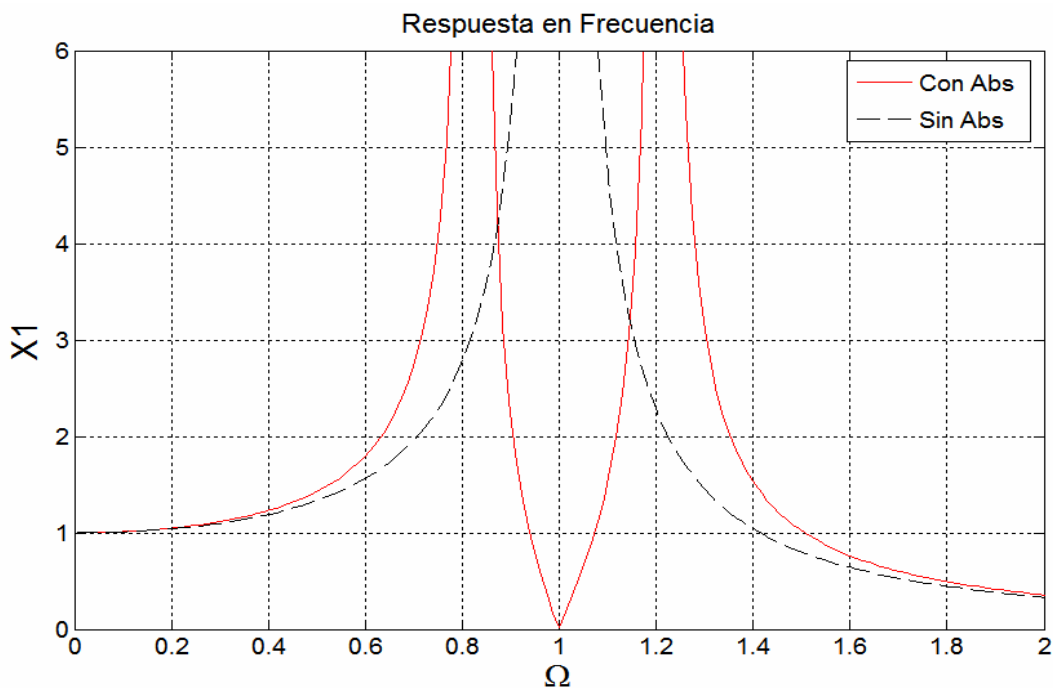


Figura 2. 11 Respuesta en frecuencia para sistema sin Absorbedor y con Absorbedor

De la **Figura 2.11** es posible observar lo siguiente:

1. La primera frecuencia natural del sistema con absorbedor es menor que la frecuencia natural del sistema sin absorbedor, y la segunda frecuencia natural del sistema con absorbedor es mayor que ésta.
2. Como el absorbedor se sintoniza a una determinada frecuencia, la amplitud de régimen permanente de la máquina es cero en dicha frecuencia. Si la máquina opera a otras frecuencias o si la fuerza que actúa en la máquina tiene varias frecuencias, entonces la amplitud de las vibraciones puede llegar a ser grande.

Para determinar los valores de las dos frecuencias adimensionales $\Omega_{1,2}$ donde se producen los picos de resonancia del sistema de 2 GLD de acuerdo con las masas que lo conforman (m_1 y m_2), definimos a m_r como relación de masa adimensional. Estas frecuencias $\Omega_{1,2}$ se presentan en la **Figura 2.12**.

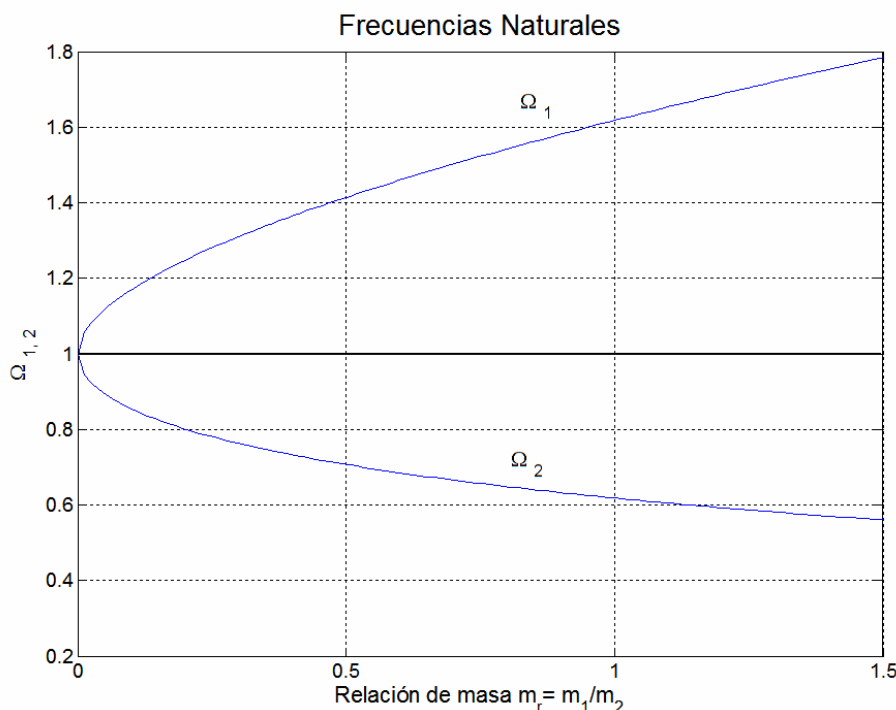


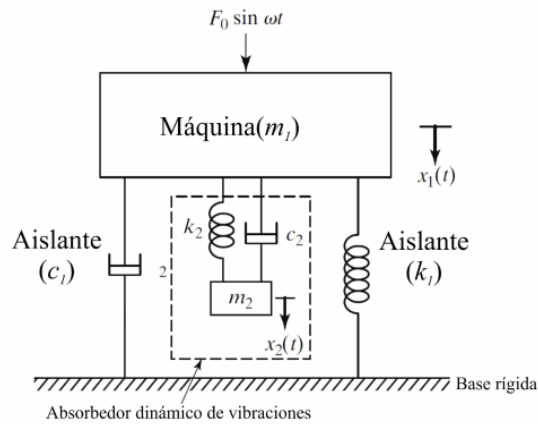
Figura 2. 12 Frecuencias Naturales en función de la relación de masa para absorbedor dinámico sin amortiguamiento.

De la **Figura 2.12** es posible observar lo siguiente:

1. Los picos de resonancia de un sistema con absorbedor incorporado tienden a separarse con el aumento de la relación de masa para una misma relación de frecuencias naturales.
2. Al aumentar la relación de frecuencias a igual relación de masa la primera frecuencia natural disminuye mientras la segunda frecuencia natural aumenta, se observa también que con ésta variación la diferencia entre la primer frecuencia natural no es tan grande como en la segunda frecuencia natural.

2.5.2. Absorbedor de vibraciones amortiguado

Sea el sistema absorbedor que se presenta en la **Figura 2.13**:



Fuente: Rao [4]

Figura 2. 13 Absorbedor de vibraciones dinámico con amortiguamiento

Los absorbedores de vibraciones amortiguados se aplican a sistemas primarios que poseen amortiguamiento propio donde la fuerza sobre este no tiene una frecuencia de excitación dentro de un rango limitado bien conocido, o que posee un paso por picos no admitidos durante el proceso de arranque y detención del equipo o máquina.

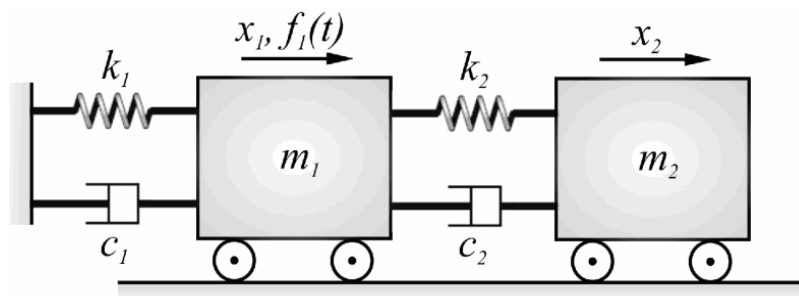
Siendo:

$$c_1 \neq c_2 \neq 0 \quad (2.49)$$

Por lo tanto de la ecuación inicial 2.43 permanecerá sin alteraciones. Se analiza el comportamiento del sistema en forma numérica y realizando un estudio paramétrico, para ello utilizaremos la rutina de cálculo programada en Matlab [1] (**Ver 2.8.1**).

2.5.3. Ejercicios de prueba

Para analizar de forma más gráfica la solución de la respuesta en frecuencia del sistema primario, se elaboró una rutina de cálculo en Matlab [1] donde se puede ver como varía la repuesta de un sistema principal mediante la introducción de un absorbedor de vibraciones cuyos valores son variables (**Ver 2.8.1**).



Fuente: Balachandran & Magrab [3]

Figura 2. 14 Sistema 2 GLD Absorbedor

Para realizar el análisis numérico se planteó el sistema de 2 grados de libertad (2 GLD) de la **Figura 2.14** y para generalizar el estudio se introdujeron los siguientes números adimensionales (ecuación **2.50**).

$m_r = \frac{m_2}{m_1}$	Relación de masa	(2.50)
$\omega_{nr} = \frac{\omega_{n2}}{\omega_{n1}}$	Relación de Frecuencias naturales.	
$\zeta_1 = \frac{c_1}{2m_1\omega_{n1}}$	Relación de amortiguamiento critico asociado al grado de libertad dinámico 1. (Adimensional)	
$\zeta_2 = \frac{c_2}{2m_2\omega_{n2}}$	Relación de amortiguamiento critico asociado al grado de libertad dinámico 2. (Adimensional)	
$\Omega = \frac{\omega}{\omega_{n1}}$	Relación de frecuencias.	

Por simplicidad suponemos los siguientes valores base:

$$m_1 = 1 \text{ Kg}$$

$$k_1 = 1 \text{ N/m}$$

Por lo tanto:

$$\omega_{n1} = \sqrt{\frac{k_1}{m_1}} = 1 \text{ rad/s}$$

1) Variación de la relación de amortiguamiento del sistema absorbedor

En este primer ejercicio de prueba se sugieren los siguientes parámetros adimensionales de las ecuaciones **2.50**, ver **Tabla 2.1**.

Salida	Relación de masa m_r	Relación de Frecuencias naturales ω_{nr}	Relación de Amortiguamiento 1 ζ_1	Relación de Amortiguamiento 2 ζ_2
1	0,1	1	0,1	0
2	0,1	1	0,1	0,05
3	0,1	1	0,1	0,2

Tabla 2. 1 Conjunto de valores de prueba

La correspondiente salida de la rutina de cálculo será:

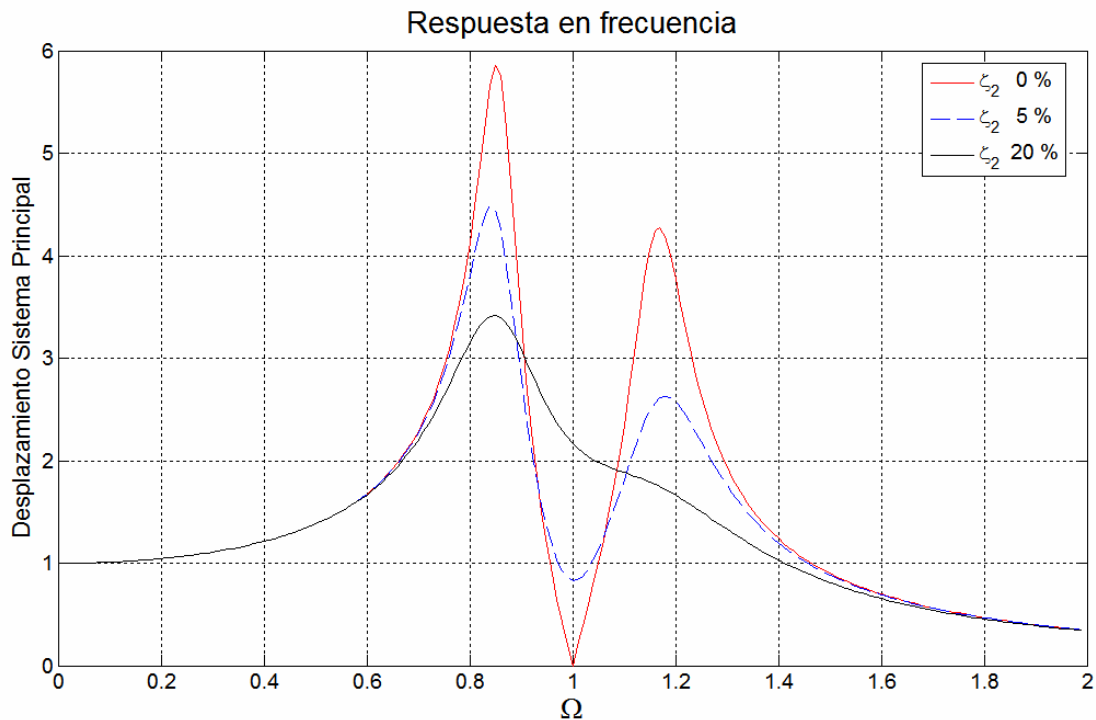


Figura 2. 15 Respuesta en Frecuencia
(Variación del amortiguamiento del absorbedor)

En la **Figura 2.15** se puede observar que al aumentar ζ_2 , ya sea aumentando el amortiguamiento c_2 , disminuyendo m_r o ω_{nr} o una combinación de ellos se obtiene disminuciones en los picos de resonancia del sistema, a su vez crece el valor de desplazamiento en la región de valle entre dichos picos y aumenta la banda de frecuencias del valle (suavización del gráfico).

2) Variación de la relación de masa

En este segundo ejercicio de prueba se sugieren los siguientes parámetros adimensionales de las ecuaciones 2.50 ver **Tabla 2.2**.

Salida	Relación de masa m_r	Relación de Frecuencias naturales ω_{nr}	Relación de Amortiguamiento 1 ζ_1	Relación de Amortiguamiento 2 ζ_2
1	0,1	1	0,1	0
2	0,2	1	0,1	0
3	0,3	1	0,1	0

Tabla 2. 2 Conjunto de valores de prueba

La correspondiente salida de la rutina de calculo será:

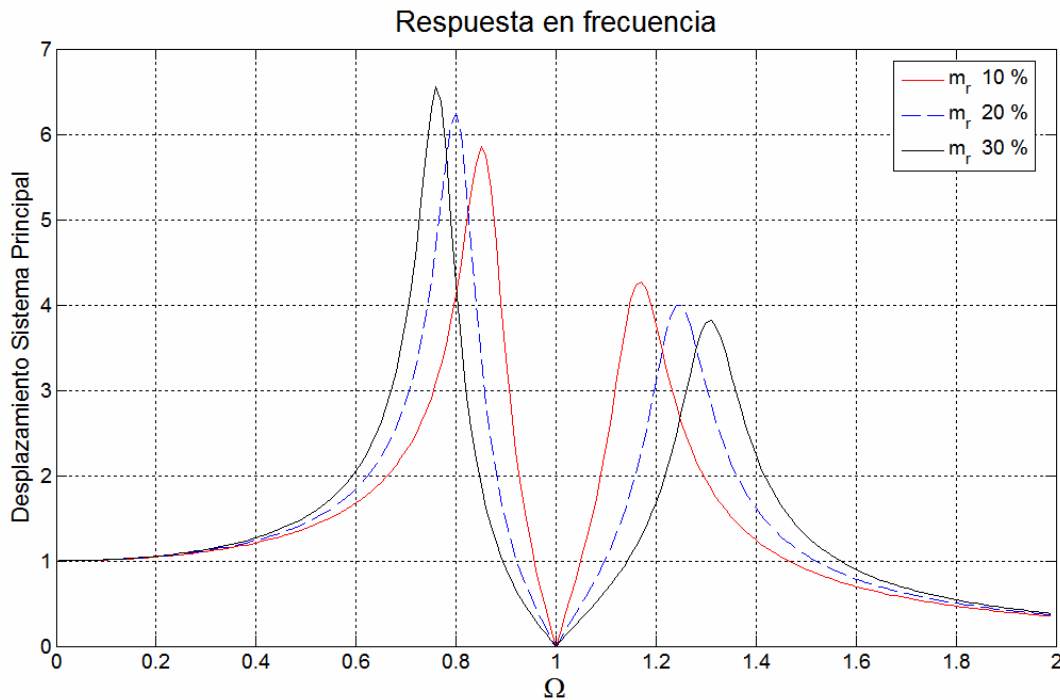


Figura 2.16 Resposta en Frecuencia (Variación de la relación de masa)

En **Figura 2.16** se puede observar que al aumentar m_r , ya sea aumentando el valor de m_2 o disminuyendo m_1 o una combinación de ellos se obtiene aumentos de los picos de resonancia del sistema para frecuencias Ω menores a 1 y se observan un desplazamiento de los picos hacia frecuencias Ω más bajas. También para frecuencias Ω mayores a 1 se obtiene disminución de los picos de resonancia del sistema, observamos un desplazamiento hacia frecuencias Ω más altas. Al no modificarse el valor de $\zeta_2=0$ el punto de cero desplazamiento del sistema principal está ubicado en $\Omega=1$

3) Variación de la relación de amortiguamiento del sistema principal

En este tercer ejercicio de prueba se sugieren los siguientes parámetros adimensionales de las ecuaciones 2.50, ver **Tabla 2.3**.

Salida	Relación de masa m_r	Relación de Frecuencias naturales ω_{nr}	Relación de Amortiguamiento 1 ζ_1	Relación de Amortiguamiento 2 ζ_2
1	0,1	1	0,1	0
2	0,1	1	0,3	0
3	0,1	1	0,5	0

Tabla 2.3 Conjunto de valores de prueba

La correspondiente salida de la rutina de cálculo será:

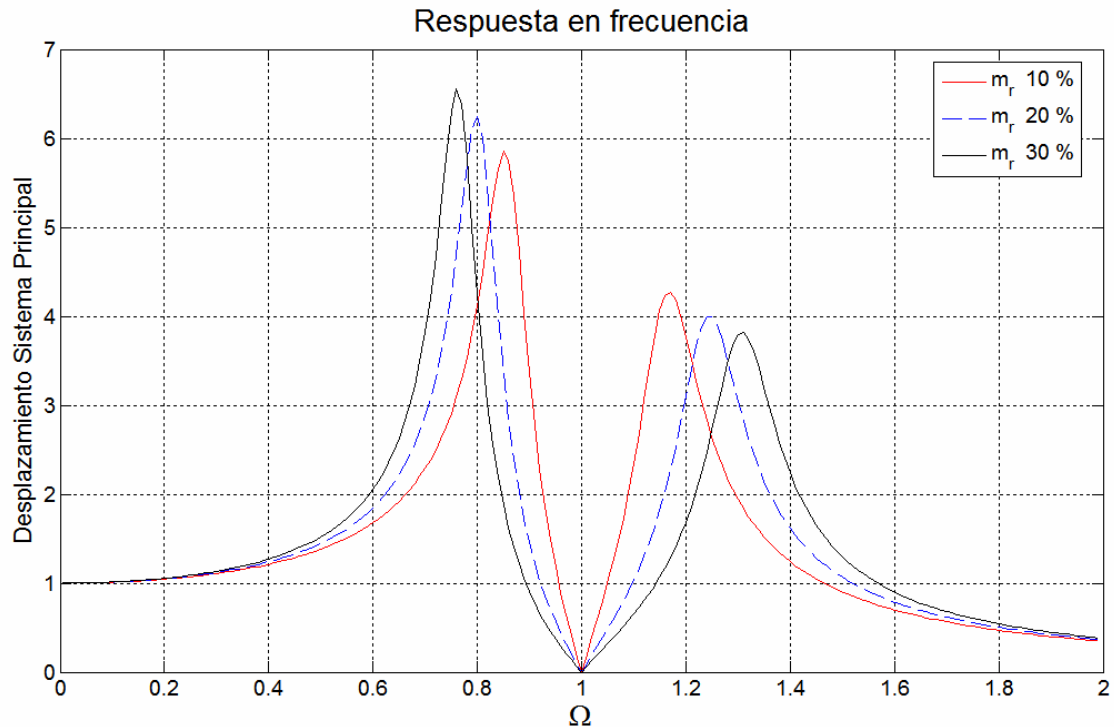


Figura 2. 17 Resposta en Frecuencia
(Variación del amortiguamiento del sistema principal)

Se puede observar que en la **Figura 2.17** al aumentar el valor de ζ_1 , es decir aumentando el valor de c_1 se obtiene disminución de los picos de resonancia del sistema para todas las frecuencias Ω . Si mantenemos constante el valor de $\zeta_2=0$ el punto de cero desplazamiento del sistema principal está ubicado en $\Omega=1$.

4) Variación de la relación de frecuencias naturales

En este cuarto ejercicio de prueba se sugieren los siguientes parámetros adimensionales de las ecuaciones 2.50, ver **Tabla 2.4**.

Salida	Relación de masa m_r	Relación de Frecuencias naturales ω_{nr}	Relación de Amortiguamiento 1 ζ_1	Relación de Amortiguamiento 2 ζ_2
1	0,1	1	0,1	0
2	0,1	0,9	0,1	0
3	0,1	0,7	0,1	0

Tabla 2. 4 Conjunto de valores de prueba

La correspondiente salida de la rutina de cálculo será:

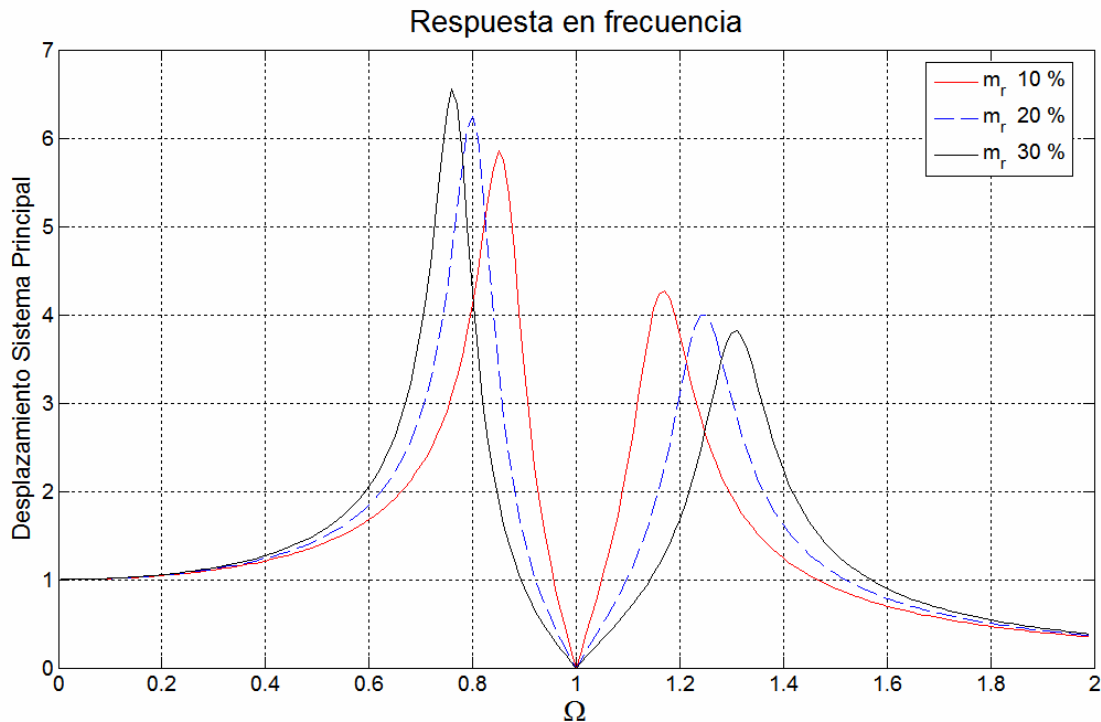


Figura 2.18 Resposta en Frecuencia
(Variación de la relación de frecuencias naturales del sistema principal)

En la **Figura 2.18** se puede observar que al disminuir ω_{nr} , ya sea disminuyendo el valor de $m_2 k_1$ o aumentando $m_1 k_2$ o una combinación de ellos se obtiene aumentos de los picos de resonancia del sistema para frecuencias Ω menores a 1 y también un desplazamiento de los picos hacia frecuencias Ω más bajas. Así como para frecuencias Ω mayores a 1 se obtiene disminución de los picos de resonancia del sistema, además se observa un desplazamiento hacia frecuencias Ω más altas, al aumentar ω_{nr} los picos de resonancia se acercan haciendo que la zona de valle sea menor, además se observa que para ω_{nr} en disminución pasando el pico de resonancia existe una abrupta pendiente de la repuesta, lo que indica que para pequeñas variaciones de Ω se producen grandes variaciones de X_1 . Al no modificarse el valor de $\zeta_2=0$ el punto de cero desplazamiento del sistema principal ya no está ubicado en $\Omega=1$ salvo para $\omega_{nr}=1$.

5) Variación de la relación de amortiguación en el sistema absorbedor

En este quinto ejercicio de prueba se sugieren los siguientes parámetros adimensionales de las ecuaciones 2.50, ver **Tabla 2.5**.

Salida	Relación de masa m_r	Relación de Frecuencias naturales ω_{nr}	Relación de Amortiguamiento 1 ζ_1	Relación de Amortiguamiento 2 ζ_2
1	0,1	1	0,1	0,1
2	0,1	1	0,1	0,3
3	0,1	1	0,1	0,5

Tabla 2.5 Conjunto de valores de prueba

La correspondiente salida de la rutina de cálculo será:

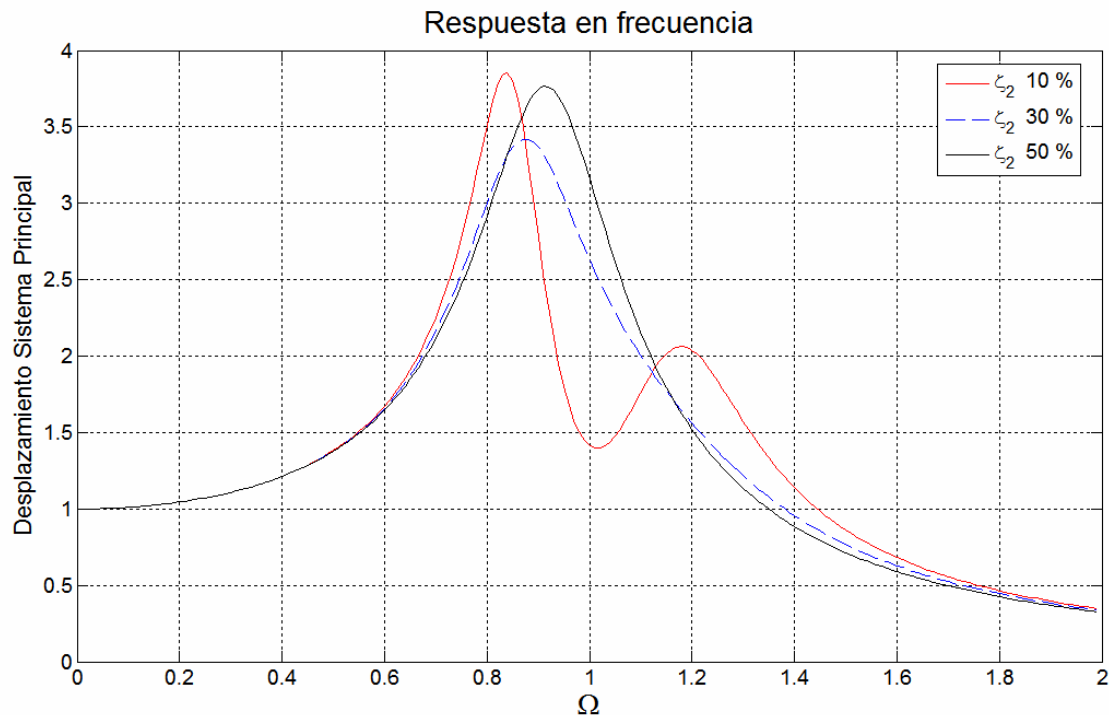


Figura 2. 19 Respuesta en Frecuencia
(Variación de la relación de amortiguamiento del absorbedor)

En la **Figura 2.19** se puede observar que al aumentar ζ_2 , ya sea aumentando el amortiguamiento c_2 , disminuyendo m_r o ω_{nr} o una combinación de ellos se obtiene pequeñas disminuciones en los picos de resonancia del sistema, a su vez crece el valor de desplazamiento en la región de valle entre estos picos y aumenta la banda de frecuencias de esta zona (suavización del gráfico) quedando para un elevado ζ_2 un pico sin zona de valle.

2.6. Modelización de la estructura de Análisis a 1 GLD.

La estructura de análisis, como ya se mencionó, es una chimenea metálica de acero que puede ser modelada como una viga empotrada-libre. Para obtener las propiedades dinámicas que corresponde a un sistema equivalente de 1 GLD se puede utilizar conceptos teóricos de la dinámica del continuo. Además para hacer un estudio de las propiedades intrínsecas del objeto en análisis, se recurrió a programas de cálculo numérico con el objetivo principal de obtener sus parámetros reducidos y así analizarlo como un sistema simple de un grado de libertad dinámico.

Dicho análisis simplista nos servirá como guía en la selección de los parámetros del absorbedor al ser modelizado como sistema de dos grados de libertad. Para proceder con lo mencionado anteriormente obtuvimos los datos de la estructura estudiada en base al plano de la estructura (**Ver Anexo I**).

Del **Anexo I** se obtuvo que la estructura estudiada está conformada por dos tubos del mismo diámetro exterior pero de diferentes secciones, materiales y longitud los cuales han sido identificados en el presente Proyecto Integrador como tramo superior e inferior.

Propiedades del tramo inferior:

Diámetro Exterior de_i :	1,23 metros.	
Espesor del tubo e_i :	6 milímetros.	
Longitud L_i :	6,3 metros.	(2.51)
Material:	S235 (Acero al Carbono).	
Densidad ρ_i :	7800 Kg/m ³ .	

Sección Transversal:

$$A_i = \frac{\pi \cdot (de_i^2 - (de_i - 2e_i)^2)}{4} = 0,02307 \text{ m}^2 \quad (2.52)$$

Masa:

$$m_i = \frac{\pi \cdot (de_i^2 - (de_i - 2e_i)^2)}{4} \cdot L_i \cdot \rho_i = 1133,75 \text{ Kg} \quad (2.53)$$

Inercia:

$$I_i = \frac{\pi \cdot (de_i^4 - (de_i - 2e_i)^4)}{64} = 4,3208 \cdot 10^{-3} \text{ m}^4 \quad (2.54)$$

Módulo de Elasticidad:

$$E_i = 2,1 \cdot 10^{11} \text{ N / m}^2 \quad (2.55)$$

Propiedades del tramo Superior:

Diámetro Exterior de_s :	1,23 metros.	
Espesor del tubo e_s :	5 milímetros.	
Longitud L_s :	15,9 metros.	(2.56)
Material:	AISI 304L (Acero Inoxidable).	
Densidad ρ_s :	8000 Kg/m ³ .	

Sección Transversal:

$$A_s = \frac{\pi \cdot (de_s^2 - (de_s - 2e_s)^2)}{4} = 0,01924 \text{ m}^2 \quad (2.57)$$

Masa:

$$m_s = \frac{\pi \cdot (de_s^2 - (de_s - 2e_s)^2)}{4} \cdot L_s \cdot \rho_s = 2447,61 \text{ Kg} \quad (2.58)$$

Inercia:

$$I_s = \frac{\pi \cdot (de_s^4 - (de_s - 2e_s)^4)}{64} = 3,6095 \cdot 10^{-3} \text{ m}^4 \quad (2.59)$$

Módulo de Elasticidad:

$$E_s = 1,9 \cdot 10^{11} \text{ N / m}^2 \quad (2.60)$$

Propiedades de la estructura como conjunto:

Masa Total de la estructura de estudio:

$$m_t = m_i + m_s = 3581,36 \text{ Kg} \quad (2.61)$$

Longitud Total de la estructura de estudio:

$$L = L_i + L_s = 22,2 \text{ m} \quad (2.62)$$

2.6.1. Análisis dinámico del continuo

De la dinámica del continuo se tiene que la solución de la primera frecuencia propia de una viga empotrada-libre resulta (Capítulo 9 de Balachandran & Magrab [3]):

$$\Omega_1^4 = \frac{\omega_1^2 \cdot \rho \cdot A \cdot L^4}{E \cdot I} \quad (2.63)$$

Donde:

$$\frac{\Omega_1}{\pi} = 0,5969 \quad (2.64)$$

Por lo que despejando la Ecuación 2.61 la primera frecuencia natural resulta:

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{\Omega_1^4 \cdot E \cdot I}{\rho \cdot A \cdot L^4}} \quad (2.65)$$

Como tenemos dos secciones diferentes dentro de la estructura de estudio, para el cálculo de la frecuencia natural se utilizaron las propiedades del tramo superior de la chimenea, ya que estas representan el 70 % de la longitud total. Reemplazando (2.56), (2.57), (2.59), (2.60), (2.62) y (2.64) en la ecuación (2.65):

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{(0,5969 \cdot \pi)^4 \cdot 1,9 \cdot 10^{11} \cdot 3,6095 \cdot 10^{-3}}{8000 \cdot 0,01924 \cdot 22,2^4}} \quad (\text{V.1-2.65})$$

$$\omega_1 = 15,06 \text{ rad/s} \quad (2.66)$$

Por otro lado, la rigidez equivalente se puede obtener por trabajos virtuales, métodos de las fuerzas, etc. Y resulta:

$$k_e = \frac{3EI}{L^3} \quad (2.67)$$

Al reemplazar (2.59), (2.60) y (2.62) en la ecuación (2.67):

$$k_e = \frac{3 \cdot 1,9 \cdot 10^{11} \cdot 3,6095 \cdot 10^{-3}}{22,2^3} \quad (\text{V.1-2.67})$$

$$k_e = 188045,51 \text{ N/m} \quad (2.68)$$

La masa equivalente m_e , al igual que la rigidez equivalente, puede ser obtenida igualando la energía elástica de la viga con la correspondiente al sistema de 1 GLD.

En este caso el cálculo de la m_e puede ser realizado en forma directa como:

$$m_e = \frac{k_e}{\omega_1^2} \quad (2.69)$$

Reemplazando (2.66) y (2.68) en la ecuación (2.69):

$$m_e = \frac{188045,51}{15,06^2} \quad (\text{V.1-2.69})$$

$$m_e = 829,02 \text{ Kg} \quad (2.70)$$

2.6.2. Análisis en Matlab.

Para el estudio de esta estructura de análisis (chimenea) en Matlab se realizaron las siguientes consideraciones iniciales:

1. La estructura de análisis está empotrada en el extremo inferior.
2. La estructura de análisis está libre en su extremo superior.

Para determinar las propiedades reducidas de la estructura de análisis se modela el sistema en uno de 21 grados de libertad dinámicos (**Figura 2.20**) separándolo por tramos y determinándole su masa y rigidez a cada uno de ellos. Las longitudes de cada tramo en el que se subdividió la estructura se encuentran indicadas en la **Figura 2.20**.

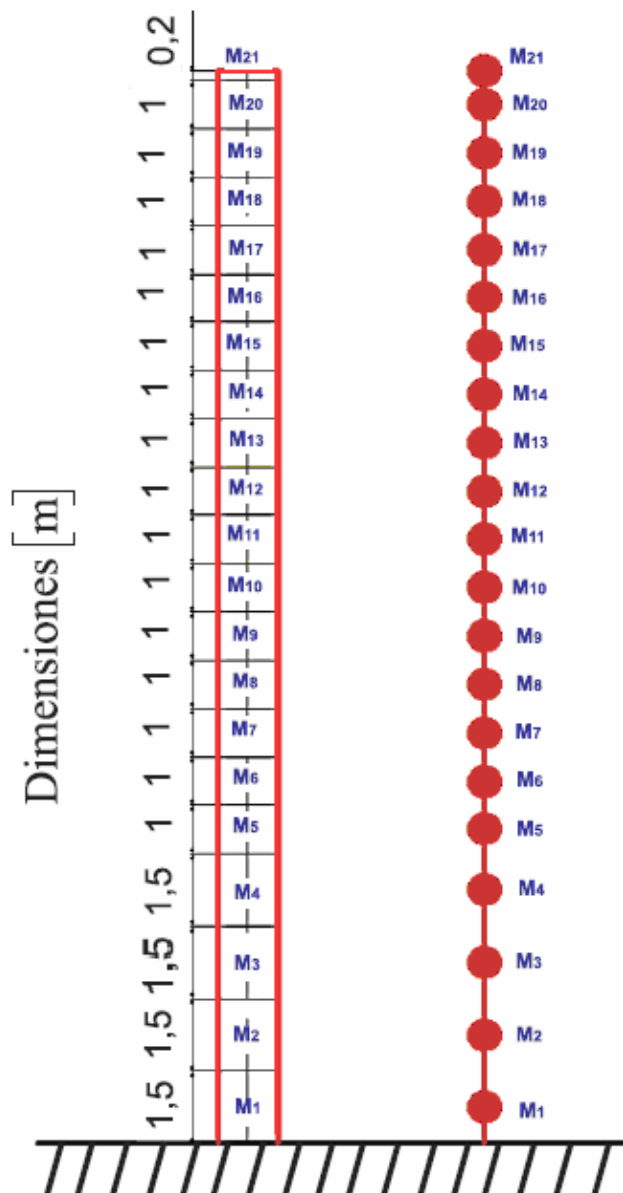


Figura 2. 20 Simplificación del modelo de un sistema de múltiples grados de libertad dinámicos

Propiedades de las secciones:

$E_s = 1,9 \cdot 10^{11} \text{ N / m}^2$	Módulo de Elasticidad del Acero inoxidable.	(2.71)
$I_s = 3,6095 \cdot 10^{-3} \text{ m}^4$	Inercia de la sección superior.	
$E_i = 2,1 \cdot 10^{11} \text{ N / m}^2$	Módulo de Elasticidad del Acero al carbono.	
$I_i = 4,3208 \cdot 10^{-3} \text{ m}^4$	Inercia de la sección inferior.	

Para obtener los parámetros de rigidez y masa condensada se propone un **Sistema de 21 GLD** de la **Figura 2.20** el cual es calculado por medio de una rutina de cálculo en Matlab [1] que opera de la forma que se describe a continuación.

2.6.2.1. Cálculo de la matriz de flexibilidad de la chimenea.

Como paso previo a la determinación de la matriz de Rigidez del sistema, se calculó la matriz de flexibilidad de la estructura de análisis a través del principio de los trabajos virtuales, se realizó de esta manera debido a la baja complejidad que presenta para la programación en alguna rutina de cálculo y además entrega de forma directa la deformada bajo carga estática externa en dirección horizontal (X) permitiendo subdividir fácilmente la estructura en tramos menores que se utilizaron en los capítulos posteriores. A continuación se presentará un caso genérico dado que la estructura tiene una serie de particularidades como lo son el cambio de sección y de material, que son consideradas dentro de la rutina de cálculo en Matlab [1].

Se pueden establecer los desplazamientos de la estructura aplicando el principio de los trabajos virtuales (Massa & Prato [4]), dicho método consta en la utilización de dos sistemas:

1. Sistema real bajo cargas estáticas.
2. Sistema auxiliar con una carga estática ficticia unitaria aplicada en el punto donde deseamos calcular el desplazamiento

La finalidad del cálculo de los desplazamientos de las secciones en que fue dividida la estructura es obtener la matriz de flexibilidad del sistema, así determinaremos el desplazamiento del punto en cuestión bajo una carga exterior unitaria. Un elemento genérico i, j perteneciente a la matriz es calculado de la siguiente manera:

- Se supone los siguientes sistemas real y auxiliar (**Figura 2.21**).

Sistema real: la carga externa se supone aplicada en el centro del tramo i ,

Sistema auxiliar: la carga ficticia unitaria se supone aplicada en centro del tramo j .

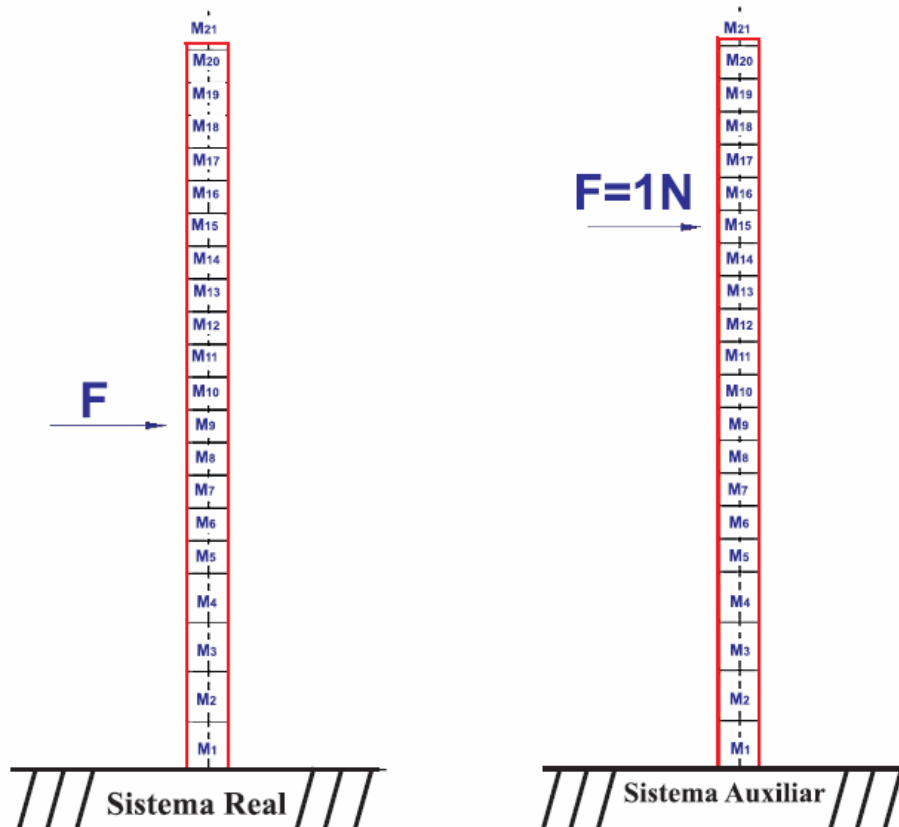


Figura 2. 21 Sistemas Real y Auxiliar (Método de los Trabajos Virtuales)

- Se calculan los diagramas de esfuerzos de los sistemas (N , Q , M y M_t).
- Se plantea la ecuación de los Trabajos Virtuales.

$$\delta W_e = -\delta W_{Fi} \quad (2.72)$$

Donde:

δW_e Trabajos Virtuales de las fuerzas externas.

δW_{Fi} Trabajos Virtuales de las fuerzas internas.

La ecuación **2.72** en su expresión general:

$$F_j \delta_{i,j} = \int_0^\ell \bar{M}_j \left(\frac{M_i}{E.I} \right) dz + \int_0^\ell \bar{Q}_j \left(\frac{Q_i}{A_c.G} \right) dz + \int_0^\ell \bar{M}_{t,j} \left(\frac{M_{t,i}}{I_p.G} \right) dz + \int_0^\ell \bar{N}_j \left(\frac{N_i}{A.E} \right) dz \quad (2.73)$$

Donde:

F_j Fuerza externa del Sistema auxiliar (unitario).

$\delta_{i,j}$ Valor del desplazamiento del tramo j debido a una carga en el tramo i .

\bar{M}_j Momento flector debido a la carga ficticia aplicada en j .

M_i Momento Flector debido a la carga externa aplicada en i .

\bar{Q}_j	Corte debido a la carga ficticia aplicada en j .
Q_i	Corte debido a la carga exterior aplicada en i .
$\bar{M}_{i,j}$	Momento Torsor debido a la carga ficticia aplicada en j .
$M_{i,i}$	Momento Torsor debido a la carga externa aplicada en i .
\bar{N}_j	Fuerza Normal ficticia a la sección transversal aplicada en j .
N_i	Fuerza Normal a la sección transversal aplicada en i .
A_c	Área de corte.
A	Área transversal
G	Módulo de Corte.
E	Módulo de Elasticidad.
I	Momento de inercia de la sección.
I_p	Momento de inercia polar de la sección.
ℓ	Longitud de la estructura de análisis.

En nuestro caso de análisis no tenemos fuerzas externas que produzcan esfuerzos normales y torsión, por lo tanto, el trabajo virtual de los dos últimos términos es igual a cero. Realizando un análisis de las magnitudes de los factores distintos de cero (los que son debidos al momento flector y al esfuerzo de corte) de la Ecuación **2.73** se puede despreciar el término del trabajo virtual debido al esfuerzo de corte ya que es ínfimo en comparación con el aporte del momento flector, quedando la ecuación de la siguiente forma:

$$F_j \delta_{i,j} = \int_0^\ell \bar{M}_j \left(\frac{M_i}{E.I} \right) dz \quad (2.74)$$

Dado que la carga ficticia F_j es de valor unitario la ecuación **2.74** queda de la siguiente forma:

$$\delta_{i,j} = \int_0^\ell \bar{M}_j \left(\frac{M_i}{E.I} \right) dz \quad (2.75)$$

La rutina de cálculo en Matlab [1] determina cada uno de los valores de desplazamiento suponiendo que la carga externa del sistema real es de valor unitario, de esto último los resultados de la ecuación resulta ser el valor de la flexibilidad del elemento (i, j) de la matriz de flexibilidad, y repitiendo este procedimiento iterativamente en todos los tramos se logró determinar elemento a elemento todos los valores ($f_{i,j}$) que componen la matriz de flexibilidad de la estructura.

$$f_{i,j} = \delta_{i,j} = \int_0^\ell \bar{M}_j \left(\frac{M_i}{E.I} \right) dz \quad (2.76)$$

Expresado en forma matricial:

$$[F] = \begin{bmatrix} f_{1,1} & f_{1,2} & \cdots & f_{1,i} & \cdots & f_{1,21} \\ f_{2,1} & f_{2,2} & \cdots & f_{2,i} & \cdots & f_{2,21} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \cdots & \vdots \\ f_{i,1} & f_{i,2} & \cdots & f_{i,i} & \cdots & f_{i,21} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_{21,1} & f_{21,2} & \cdots & f_{21,i} & \cdots & f_{21,21} \end{bmatrix} \quad (2.77)$$

2.6.2.2. Cálculo de la matriz Rigidez (inversa de la matriz flexibilidad)

Una vez obtenida la matriz de flexibilidad (Ecuación 2.77), la rutina de programación de Matlab invierte la matriz para obtener la matriz de rigidez del sistema.

$$[K] = [F]^{-1} \quad (2.78)$$

La dimensión de la matriz de flexibilidad y rigidez es de 21x21, unas de las propiedades más importantes de estas matrices es la simetría y el dominio diagonal.

2.6.2.3. Confección de la matriz de masa

La matriz de masa se confeccionó a partir de la masa promedio por unidad de longitud, de esta manera la masa correspondiente a cada tramo es directamente proporcional a la longitud que se estableció para cada parte de análisis en la que se dividió la chimenea. Definimos $\mu_i(z)$ y $\mu_s(z)$ como la masa por unidad de longitud dependiendo si el tramo de análisis pertenece a la sección inferior o superior de la chimenea.

$$\mu_i(z) = \left(\frac{m_i}{L_i} \right) \text{ Kg/m} \quad (2.79)$$

$$\mu_s(z) = \left(\frac{m_s}{L_s} \right) \text{ Kg/m} \quad (2.80)$$

Para ello introduciremos en las ecuaciones 2.79 y 2.80 la masa de cada uno de los tramos de la chimenea ya calculadas en 2.58 y 2.63 y las longitudes de cada tramo de la chimenea definidas en 2.51 y 2.56.

$$\mu_i(z) = \left(\frac{3581,36}{6,3} \right) = 180 \text{ Kg/m} \quad (2.81)$$

$$\mu_s(z) = \left(\frac{2447,61}{15,9} \right) = 153,94 \text{ Kg/m} \quad (2.82)$$

Por lo tanto la masa correspondiente a cada tramo:

Para $m = 1, 2, 3$ y 4 .

$$m_m = \mu_i(z) \cdot l_m \text{ Kg} \quad (2.83)$$

Para $m = 5, 6, 7, \dots, 21$.

$$m_m = \mu_s(z) \cdot l_m \text{ Kg} \quad (2.84)$$

Donde:

l_m Longitud del tramo m . Para $m = 1, 2, 3, \dots, 21$.

Reemplazando las ecuaciones **2.83** y **2.84** en la ecuación **2.21** se obtiene la matriz de masa del sistema.

$$[M] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & m_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & m_{21} \end{bmatrix} \quad (2.85)$$

2.6.2.4. Obtención de las frecuencias naturales y modos a través del cálculo de valores y vectores propios

Para determinar las frecuencias naturales y los modos de vibrar del sistema de 21 GLD en el que se descompuso la estructura de estudio, se utilizó el sistema de ecuaciones algebraicas para vibraciones libres (Capítulo 3 Massa & Prato [5]), para obtener una solución no trivial se debe cumplir que:

$$\det\{[K] - \lambda[M]\} = 0 \quad (2.86)$$

De **2.86** se obtuvo el polinomio característico utilizando lo ya determinado en las ecuaciones **2.78** y **2.85**, por lo que las raíces que se obtienen de dicho polinomio son los valores propios del sistema; los cuales corresponden a los valores de las frecuencias naturales al cuadrado de la estructura de estudio. Como el sistema posee 21 GLD existirán 21 frecuencias naturales con sus respectivos modos (vectores propios).

Para el modo i será:

$$\lambda_i = \omega_{ni}^2 \quad (2.87)$$

En este momento del análisis, sólo nos interesa el primer modo de vibrar junto con su frecuencia natural. De la rutina de cálculo numérico programado en el software Matlab [1] se extrae la primera frecuencia natural cuyo valor es:

$$\begin{aligned}\omega_{n1} &= 16,4503 \text{ rad/s} \\ f_{n1} &= 2,618 \text{ Hz}\end{aligned}\tag{2.88}$$

Con toda la información que se pudo extraer de la rutina de cálculo de Matlab [1] estamos en condiciones de calcular la rigidez equivalente y la masa equivalente.

2.6.2.5. Obtención de los parámetros reducidos de la estructura

Con la información obtenida anteriormente podemos calcular los parámetros reducidos de la estructura de análisis. De la matriz de flexibilidad podemos obtener la deflexión del extremo libre cuando se aplica sobre éste una fuerza unitaria (elemento (21,21) de la ecuación 2.77).

Desplazamiento del extremo a carga unitaria:

$$\delta = 4,6115 \cdot 10^{-6} \text{ m}\tag{2.89}$$

Con este valor de desplazamiento bajo carga unitaria calculamos la rigidez reducida o condensada de la estructura, que es su inversa.

$$k_c = \frac{1}{\delta}\tag{2.90}$$

Reemplazando 2.89 en la ecuación 2.90.

$$k_c = \frac{1}{4,6115 \cdot 10^{-6}}\tag{V.1-2.90}$$

Rigidez reducida de la estructura:

$$k_c = 216850 \text{ N/m}\tag{2.91}$$

La frecuencia natural al cuadrado de la estructura.

$$\omega_n^2 = \frac{k_c}{m_c}\tag{2.92}$$

Con los valores de las ecuaciones 2.88 y 2.91 las introducimos en la ecuación 2.78 y así calculamos la **masa reducida** m_c :

$$m_c = \frac{216850}{16,4503^2}\tag{V.1-2.92}$$

$$m_c = 801,33 \text{ Kg} \quad (2.93)$$

Con los valores obtenidos en las ecuaciones **2.91** y **2.93** y la rutina de cálculo de Matlab podemos obtener a modo de ejemplo la repuesta en frecuencia de la estructura de análisis sometida a una fuerza sinusoidal de amplitud unitaria aplicada en el extremo libre de la chimenea **Figura 2.22**, se consideró amortiguamiento nulo. (**Ver 2.8.2**).

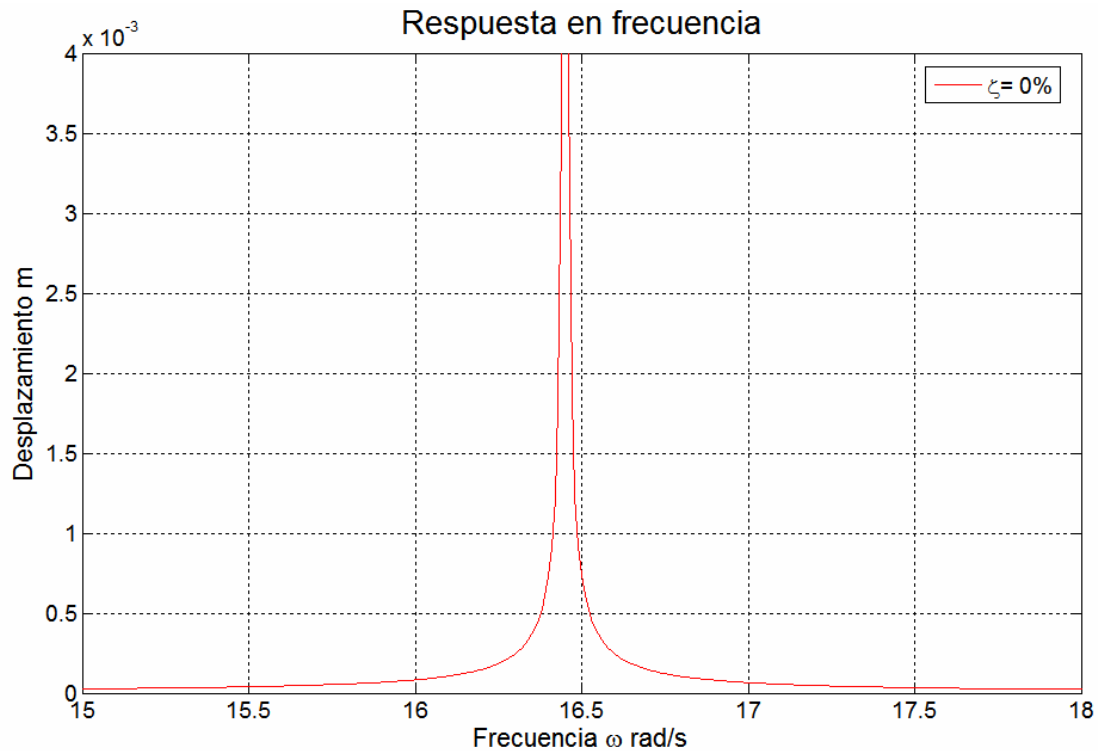


Figura 2. 22 Repuesta en frecuencia del sistema reducido sin absorbedor.

Como se puede observar en la **Figura 2.22** y debido a la ausencia de amortiguamiento existe una estrecha zona en la que los desplazamientos son muy elevados, esto se produce cuando la estructura es excitada a la frecuencia natural de la misma, fuera de esa zona de resonancia los valores de la respuesta de la estructura son bajos (alrededor del 0,5% de la respuesta en resonancia) por lo que la zona donde se produce la resonancia debe diseñarse algún dispositivo que disminuya tal desplazamiento.

2.6.3. Análisis en Abaqus.

En el software Abaqus [2] se modeló la chimenea como una estructura de barras (Figura 2.23), a las cuales se asignaron sección transversal, espesor y material.

El paso siguiente fue determinar la rigidez y la masa reducida, para ello se hizo un análisis estático con una carga unitaria en el extremo libre de la estructura obteniéndose los siguientes resultados:

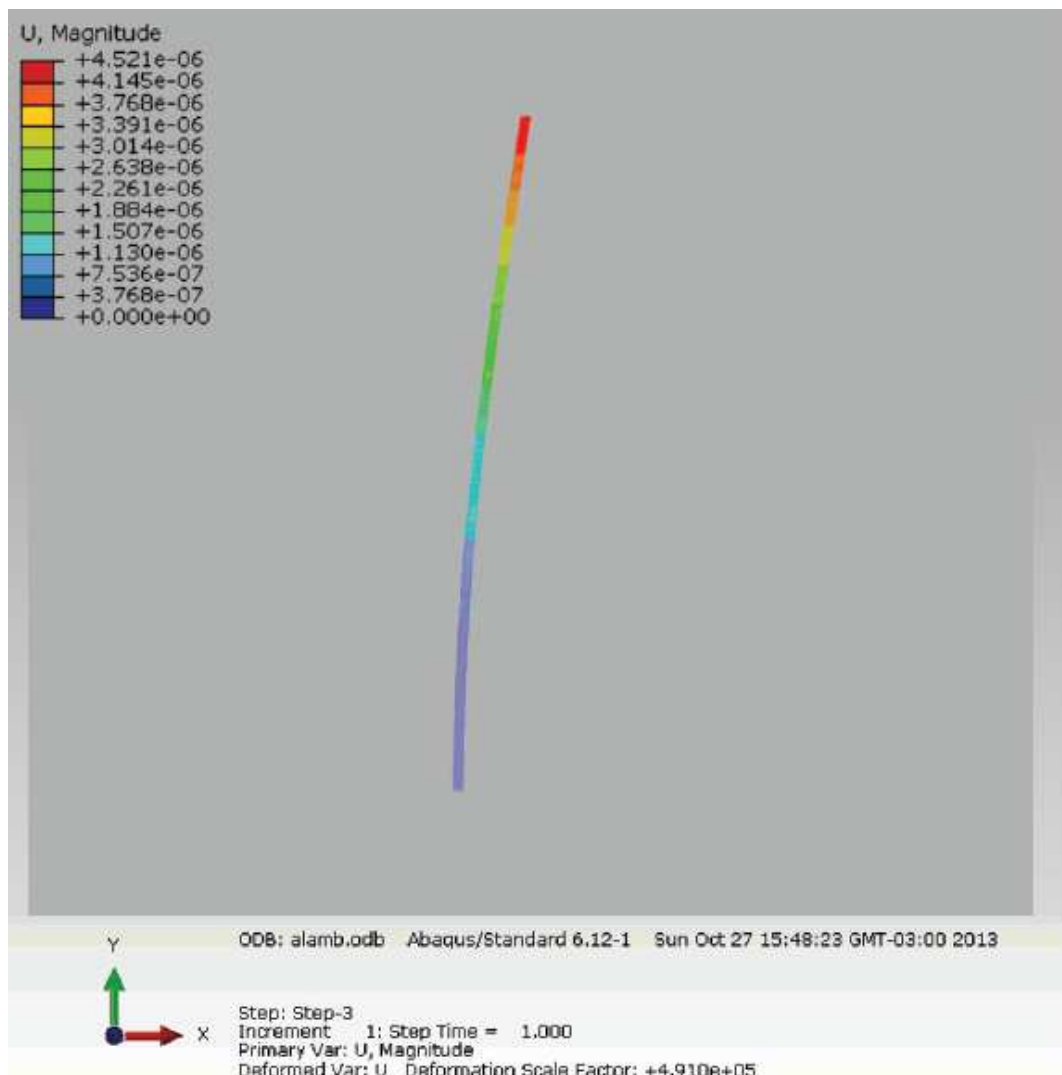


Figura 2. 23 Deformada del sistema de MGLD en Abaqus

$$\delta = 4,52 \cdot 10^{-6} \text{ m} \quad (2.94)$$

$$\begin{aligned} \omega_{n1} &= 16,56 \text{ rad/s} \\ f_{n1} &= 2,636 \text{ Hz} \end{aligned} \quad (2.95)$$

Con los datos de **2.94** podemos averiguar la rigidez reducida de la estructura aplicando una carga en el extremo libre de la misma, y aplicando la ecuación **2.90**.

$$k_c = \frac{1}{4,52 \cdot 10^{-6}} \quad (\text{V.2-2.90})$$

$$k_c = 221240 \frac{N}{m} \quad (2.96)$$

Con la rigidez reducida **(2.96)** y la frecuencia natural **(2.95)** calculamos la **masa reducida** utilizando la ecuación **2.92**:

$$m_c = \frac{221240}{16,56^2} \quad (\text{V.2-2.92})$$

$$m_c = 806,75 \text{ Kg} \quad (2.97)$$

Lo siguiente fue determinar la respuesta en frecuencia de nuestro modelo de barras, para ello se hizo un análisis dinámico una carga unitaria en el extremo libre de la estructura obteniéndose los siguientes resultados en la Figura **2.24**.

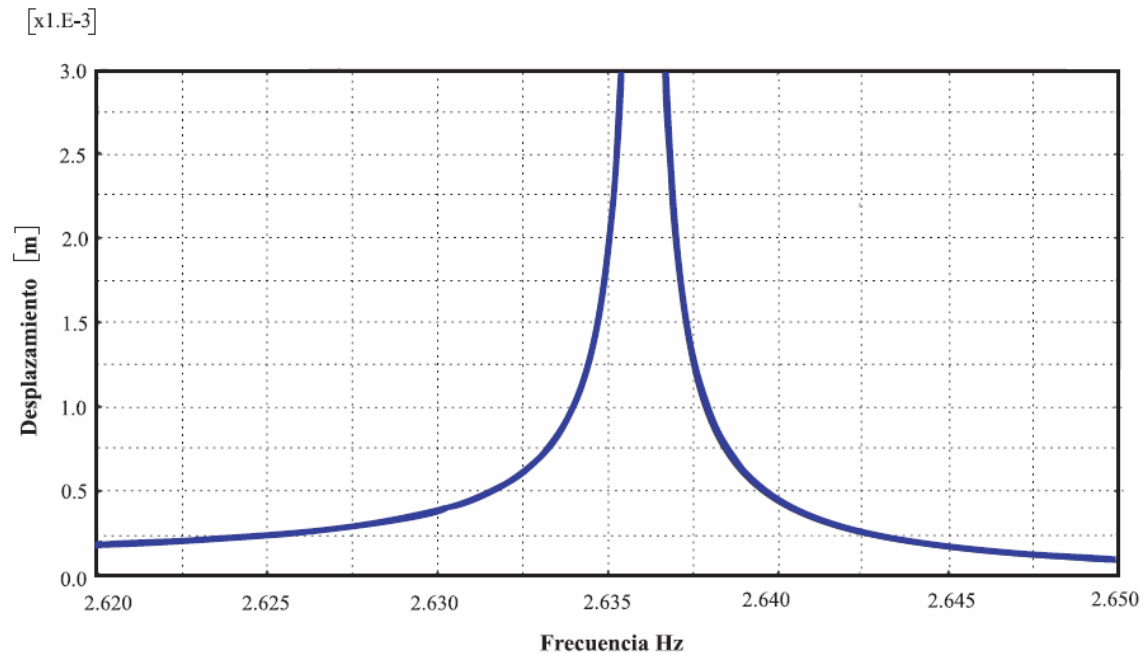


Figura 2. 24 Respuesta en frecuencia del sistema reducido sin amortiguamiento (Abaqus $\zeta=0$)

Obtenidos los resultados de los dos programas se continuó en comparar sus respectivas respuestas en frecuencia, Figura **2.22** y **2.24**.

2.6.4. Análisis comparativo entre los resultados obtenidos con Dinámica de continuo, Matlab y Abaqus.

Para realizar una comparación de los resultados obtenidos en las ecuaciones 2.66, 2.68, 2.70, 2.88, 2.89, 2.91, 2.93, 2.94, 2.95, 2.96 y 2.97 estos valores se agruparon en la Tabla 2.8.

	Desplazamiento <i>m</i>	Rigidez reducida <i>N/m</i>	Frecuencia natural 1º modo <i>rad/s</i>	Masa reducida <i>Kg.</i>
Continuo	----	188046	15,06	829,02
Matlab	4,61.10 ⁻⁰⁶	216850	16,45	801,33
Abaqus	4,52.10 ⁻⁰⁶	221240	16,56	806,75
Diferencia Mínima	2%	2%	0,66%	0,67%

Tabla 2. 6 Comparativa de los resultados entre Dinámica del Continuo, Matlab y Abaqus

Realizando una comparativa entre los resultados obtenidos mediante los métodos de cálculo propuestos (Tabla 2.6), podemos concluir que el modelo numérico presentado en la rutina de cálculo de Matlab [1] se correlaciona muy bien con el programa de elementos finitos Abaqus [2] (ya que existe una discrepancia no mayor al 2%), este resultado permitió hacer directamente distintos análisis basados en los resultados obtenidos por uno de ellos, en otras palabras, se realizaron simulaciones en Abaqus y Solidworks [2, 7] a partir de datos obtenidos en la rutinas de cálculo de Matlab [1].

2.6.5. Determinación de exponente del modo fundamental

El exponente de modo fundamental es aquel valor que potencia a una ecuación y aproxima a la forma de la deformada de la estructura en el primer modo o el modo fundamental, ese valor de exponente se utilizará en la aplicación de la normativa DIN 1055-4 [8] que se dará una introducción más adelante.

La ecuación del modo fundamental sería de la forma:

$$\phi(z) = \left(\frac{z}{h}\right)^\xi \tag{2.98}$$

Donde:

- ξ Exponente del modo fundamental.
- z Cota donde es evaluada la ecuación.
- h Longitud de la estructura.

Quedando la ecuación 2.98 de la siguiente forma:

$$\phi(z) = \left(\frac{z}{22,2}\right)^\xi \tag{V.1-2.98}$$

Pero debemos determinar el valor del exponente del modo fundamental ζ , esto lo obtenemos mediante la matriz modal calculada anteriormente en la rutina de cálculo de Matlab [1] (Ver 2.8.2) donde extraemos el vector propio que corresponde al primer modo de vibrar, el cual por aproximaciones utilizando planilla de cálculo Excel (Tabla 2.7) determinamos el exponente más adecuado al modo vibrar.

Cota m	Primer Modo	Exponente del modo Fundamental ζ				
		1,3	1,4	1,5	1,6	1,7
0,75	0,002	0,012	0,009	0,006	0,004	0,003
2,25	0,016	0,051	0,041	0,032	0,026	0,020
3,75	0,042	0,099	0,083	0,069	0,058	0,049
5,25	0,079	0,153	0,133	0,115	0,100	0,086
6,5	0,118	0,203	0,179	0,158	0,140	0,124
7,5	0,155	0,244	0,219	0,196	0,176	0,158
8,5	0,196	0,287	0,261	0,237	0,215	0,196
9,5	0,241	0,332	0,305	0,280	0,257	0,236
10,5	0,290	0,378	0,351	0,325	0,302	0,280
11,5	0,343	0,425	0,398	0,373	0,349	0,327
12,5	0,398	0,474	0,447	0,423	0,399	0,377
13,5	0,455	0,524	0,498	0,474	0,451	0,429
14,5	0,514	0,575	0,551	0,528	0,506	0,485
15,5	0,575	0,627	0,605	0,583	0,563	0,543
16,5	0,637	0,680	0,660	0,641	0,622	0,604
17,5	0,700	0,734	0,717	0,700	0,683	0,667
18,5	0,763	0,789	0,775	0,761	0,747	0,733
19,5	0,827	0,845	0,834	0,823	0,813	0,802
20,5	0,891	0,902	0,894	0,887	0,880	0,873
21,5	0,955	0,959	0,956	0,953	0,950	0,947
22,2	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000

Tabla 2. 7 Determinación del exponente del modo fundamental

Extraer el exponente del modo fundamental de la **Tabla 2.7** es difícil de determinar a simple vista, por ello para poder seleccionar el exponente del primer modo procedimos a calcular la desviación estándar estableciendo como base las amplitudes locales a cada tramo del modo de vibrar dado por la rutina de Matlab [1] (Se tomaron 10 valores correspondientes a los tramos superiores debido a su importancia en el cálculo de tensiones ya que presentan el mayor desplazamiento), a partir de ellas se calculó el valor cuadrático medio (RMS), de ellos se selecciona el que presenta el menor valor RMS.

$$x_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} \quad (2.99)$$

Cota m	Primer Modo	Desviación Estándar al Exponente del modo Fundamental				
		1,3	1,4	1,5	1,6	1,7
13,5	0,455	0,004761	0,001849	0,000361	0,000016	0,000676
14,5	0,514	0,003721	0,001369	0,000196	0,000064	0,000841
15,5	0,575	0,002704	0,000900	0,000064	0,000144	0,001024
16,5	0,637	0,001849	0,000529	0,000016	0,000225	0,001089
17,5	0,700	0,001156	0,000289	0,000000	0,000289	0,001089
18,5	0,763	0,000676	0,000144	0,000004	0,000256	0,000900
19,5	0,827	0,000324	0,000049	0,000016	0,000196	0,000625
20,5	0,891	0,000121	0,000009	0,000016	0,000121	0,000324
21,5	0,955	0,000016	0,000001	0,000004	0,000025	0,000064
22,2	1	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
Valor RMS		0,0392	0,0227	0,0114	0,0116	0,0258

Tabla 2. 8 Determinación del exponente del modo fundamental (RMS)

Adoptamos el valor de exponente en $\xi = 1,5$ (Tabla 2.8) ya que presenta el menor valor RMS, quedando la ecuación 2.98 de la forma del modo como:

$$\phi(z) = \left(\frac{z}{22,2} \right)^{1,5} \quad (2.100)$$

2.7. Modelización de la estructura de análisis consistente en Sistema Primario más Absorbedor (2 GLD)

De forma similar al punto 2.6 del presente capítulo se procede a determinar la respuesta reducida para dos grados de libertad.

2.7.1. Análisis en Matlab.

Para obtener la repuesta de un sistema de 2 GLD se optó por partir de los valores de masa y de rigidez reducida ya calculadas en el apartado 2.6.2 para lo cual se programó una rutina de cálculo en Matlab [1] que opera en la siguiente manera; en base a los parámetros previamente calculados en el apartado 2.6.2, ésta rutina permite modificar los valores de relaciones de masa, relaciones de amortiguamiento crítico del absorbedor y relaciones de frecuencias naturales con el objeto de analizar como varía la repuesta del sistema modificando sus parámetros sometido una carga de amplitud unitaria aplicado el sistema principal.

Utilizando la rutina de cálculo de Matlab [1] (ver 2.8.3) y modificando los valores de:

1. Relación de masa
2. Relación de frecuencias naturales
3. Relación de amortiguamiento critico en el absorbedor

De la **Tabla 2.7** extraemos los siguientes valores:

Rigidez reducida: $k_c = 216850 N / m$

Frecuencia natural: $\omega_n = 16,4503 \text{ rad/s (2,618 Hz)}$

Masa reducida: $m_c = 801,33 \text{ Kg}$

Aquí consideramos que el valor de c_1 se determinara más adelante, por ahora los resultados que se presentan en este apartado son bajo la suposición de c_1 es de valor nulo, los parámetros del sistema principal se muestran a continuación (2.101):

$$\begin{aligned}
 k_1 &= k_c = 216850 \text{ N/m} \\
 m_1 &= m_c = 801,33 \text{ Kg} \\
 \omega_1 &= \omega_c = 16,4503 \text{ rad/s} \\
 c_1 &= 0 \text{ Ns/m}
 \end{aligned}
 \tag{2.101}$$

El resto de los valores de los parámetros m_2 , k_2 y c_2 del sistema secundario (*Absorbedor*) se determinan aplicando 2.101 a los parámetros adimensionales ya definidos en las ecuaciones 2.50, donde estos resultan ser:

$m_r = \frac{m_2}{m_1} = \frac{m_2}{801,33}$	Relación de masa	(V.1-2.50)
$\omega_{nr} = \frac{\omega_{n2}}{\omega_{n1}} = \frac{\sqrt{k_2/m_2}}{16,4503}$	Relación de Frecuencias naturales	
$\zeta_1 = \frac{c_1}{2m_1\omega_{n1}} = 0$	Relación de amortiguamiento critico asociado al grado de libertad dinámico 1.	
$\zeta_2 = \frac{c_2}{2m_2\omega_{n2}}$	Relación de amortiguamiento critico asociado al grado de libertad dinámico 2.	

Despejando m_2 , k_2 y c_2 nos queda:

$m_2 = 801,33 \cdot m_r$	Masa del absorbedor.	(2.102)
$\omega_{n2} = 16,4503 \cdot \omega_{nr}$	Relación de Frecuencias naturales.	
$k_2 = (16,4503 \cdot \omega_{nr})^2 m_2$	Rigidez asociada al GLD 2.	
$c_2 = 2\zeta_2 m_2 \omega_{n2}$	Amortiguamiento asociado al GLD 2.	

A partir de ello y utilizando la rutina de cálculo en Matlab [1] (**Ver 2.8.3**), se obtienen las respuestas en frecuencia, que a su vez serán comparadas con la respectiva salida de la modelización que se realizó bajo un análisis con Abaqus [2], los resultados se exponen en el apartado **2.7.3**.

2.7.2. Análisis en Abaqus

En el software Abaqus [2] se modeló la chimenea como una estructura de barras, a las cuales se asignaron sección transversal, espesor y material; y en el extremo libre se le anexó una masa ligada a la chimenea con un elemento de rigidez y uno de amortiguación, ver **Figura 2.25**.

Lo siguiente fue determinar la respuesta en frecuencia, para ello se hicieron diversos análisis dinámicos con una carga unitaria en el extremo libre de la estructura; variando los parámetros de masa, rigidez y amortiguamiento del absorbedor para así comparar las repuestas en frecuencia obtenidas con la rutina de cálculo numérico programado en Matlab [1] presentado en **2.7.1**.

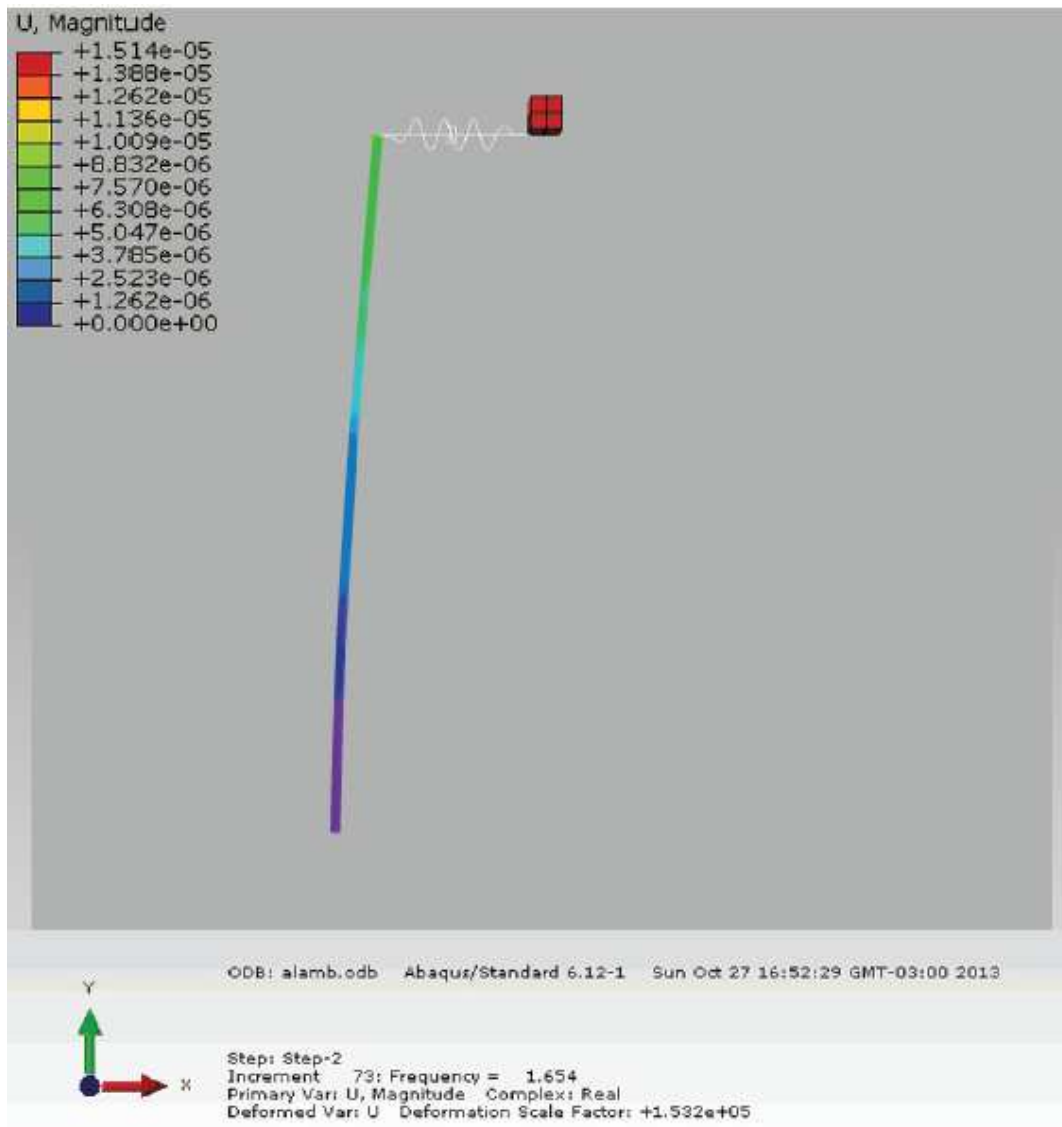


Figura 2. 25 Sistema de MGLD con absorbedor incorporado

2.7.3. Estudio y comparación entre las repuestas (Sintonizado)

En el presente apartado se comparan los resultados obtenidos en los dos programas al ingresar la masa del absorbedor, la rigidez y el valor de amortiguación.

Según la bibliografía consultada (Balachandran & Magrab [3]) se pueden calcular los valores óptimos de la relación de frecuencias naturales $\omega_{r,opt}$ y de la relación de amortiguamiento crítico asociado al absorbedor $\xi_{2,opt}$ para estructuras con una baja relación de amortiguamiento crítico ξ_1 como lo son las que están compuestas por materiales metálicos:

$$\omega_{r,opt} = \frac{1}{1 + m_r} \quad (2.103)$$

$$\zeta_{2,opt} = \sqrt{\frac{3m_r}{8(1+m_r)^3}} \quad (2.104)$$

Con estos valores calculados según las ecuaciones proporcionadas por la bibliografía consultada (Balachandran & Magrab [3]) se extrajo la respuesta en frecuencia. A su vez se cargaron los valores de dichos parámetros al software Abaqus [2] para así comparar resultados extraídos de las simulaciones. Los casos de análisis se tomaron con los valores de relación de masa de 5%, 10% y 15% de la masa reducida.

2.7.3.1. Primer caso: Relación de masa del 5%

En este primer caso donde se sugiere una relación de masa del 5% se determinan los parámetros de la menor respuesta mediante cálculos teóricos y se comparan distintos resultados mediante análisis de los gráficos salida de la rutina de cálculo, se varían los parámetros de relación de frecuencias naturales y amortiguamiento crítico 2 (sistema absorbedor), se expondrán aquellas salidas dentro de un rango de los parámetros que resultaron más efectivos a la hora de la reducción de la amplitud de las vibraciones expuesto en la **Tabla 2.9. Rutina Cap2_3 (Ver 2.8.3)**.

Partimos de una relación de masa del 5%, por lo tanto:

$$m_r = 0,05 \quad (2.105)$$

Reemplazando **2.105** en las ecuaciones **2.103** y **2.104** tenemos:

$$\omega_{r,opt} = \frac{1}{1+0,05} \quad (V.1-2.103)$$

$$\zeta_{2,opt} = \sqrt{\frac{3 \cdot 0,05}{8(1+0,05)^3}} \quad (V.1-2.104)$$

$$\omega_{r,opt} = 0,951 \quad (2.106)$$

$$\zeta_{2,opt} = 0,127 \quad (2.107)$$

Salida	Relación de masa m_r	Relación de Frecuencias ω_n	Relación de Amortiguamiento 1 ζ_1	Relación de Amortiguamiento 2 ζ_2
1	0,05	0,951	0	0,1
2	0,05	0,951	0	0,127
3	0,05	0,951	0	0,16

Tabla 2. 9 Rango de valores, análisis de Respuesta en Frecuencia para m_r del 5%

De estos parámetros adimensionales, que se presentan en la **Tabla 2.9**, se extraen los distintos valores de los elementos que conforman el absorbedor mediante los valores **2.101** y las ecuaciones **2.102** se construye así la **Tabla 2.10**.

Salida	Masa 1	Masa 2	Rigidez 1	Rigidez 2	Amortig 1	Amortig 2
	m_1	m_2	k_1	k_2	c_1	c_2
	Kg.	Kg.	N/m	N/m	Ns/m	Ns/m
1	786,23	39,3115	216850	9806	0	124,18
2	786,23	39,3115	216850	9806	0	157,65
3	786,23	39,3115	216850	9806	0	198,68

Tabla 2. 10 Valores de los diferentes parámetros m_r del 5%

Con los valores de la **Tabla 2.9** y la rutina de cálculo en Matlab [1] Cap2_3 (Ver 2.8.3) obtenemos la repuesta en frecuencia del sistema para una carga unitaria en el sistema principal; el cual presenta una variación de la relación de amortiguamiento del sistema absorbedor de vibraciones para una **relación de frecuencias naturales de 95.1%** y una **relación de masa del 5%** se muestra en la **Figura 2.26**.

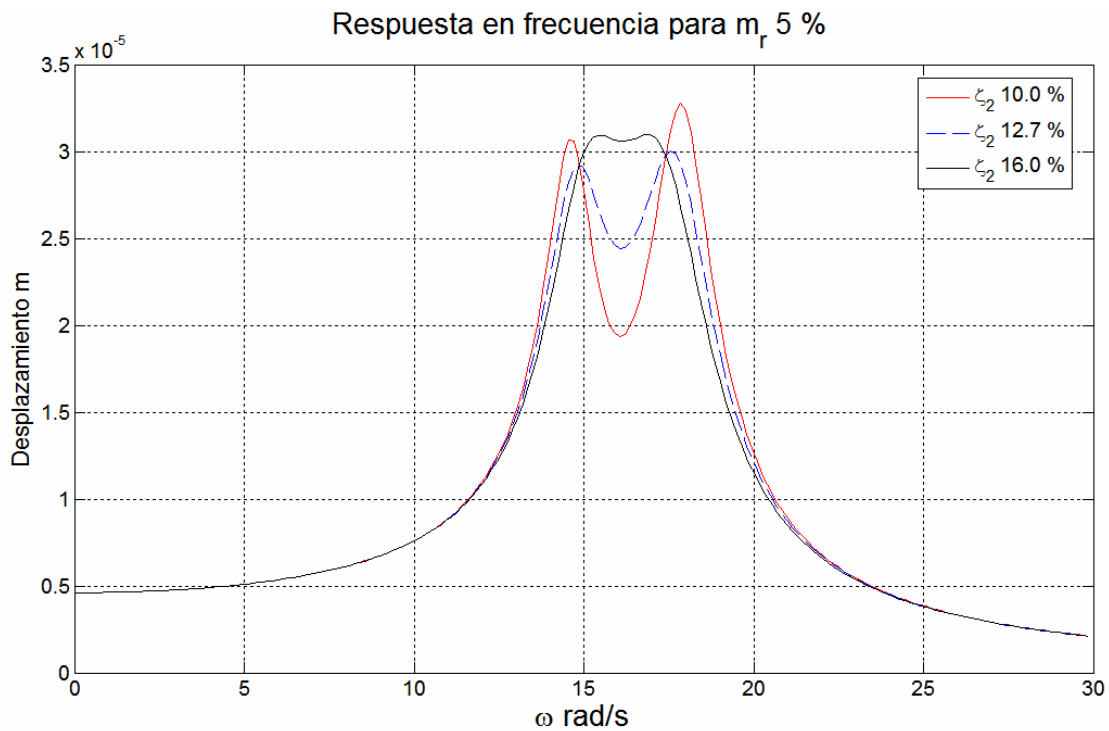


Figura 2. 26 Respuesta en Frecuencia para una relación de masa del 5% (Matlab)

Para obtener la salida correspondiente a Abaqus [2] se cargan a dicho programa amortiguamiento obtenido por cálculos teóricos $c_2 = 157,65$ [Ns/m] **Figura 2.27**.

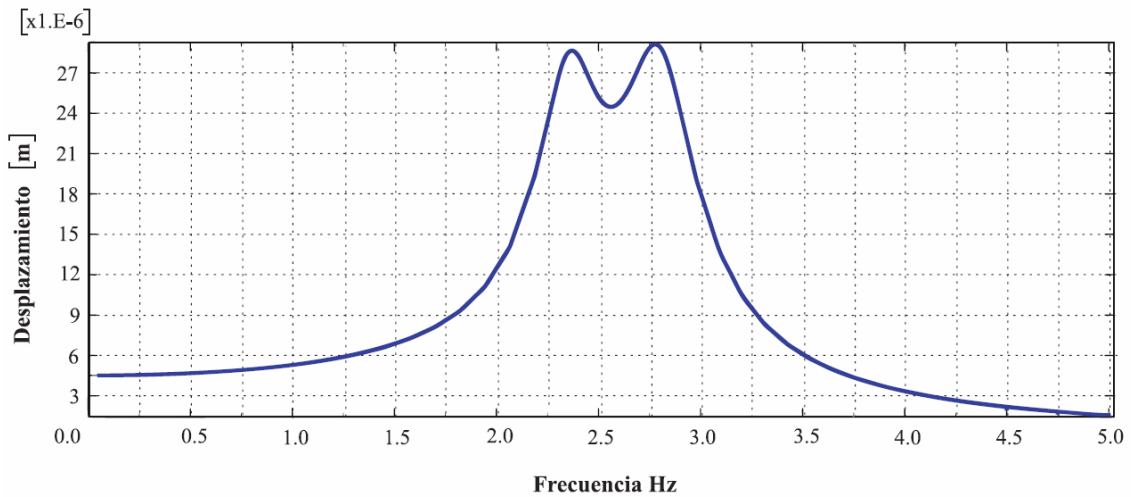


Figura 2. 27 Respuesta en Frecuencia para una relación de masa del 5% (Abaqus)

Para observar de manera más minuciosa el grafico y determinar si la rutina de cálculo utilizada arroja los mismos resultados que el Software de elementos finitos, se plasmó las gráficas de los parámetros óptimos de cada programa en una misma figura (Figura 2.28), cruzando los gráficos tenemos:

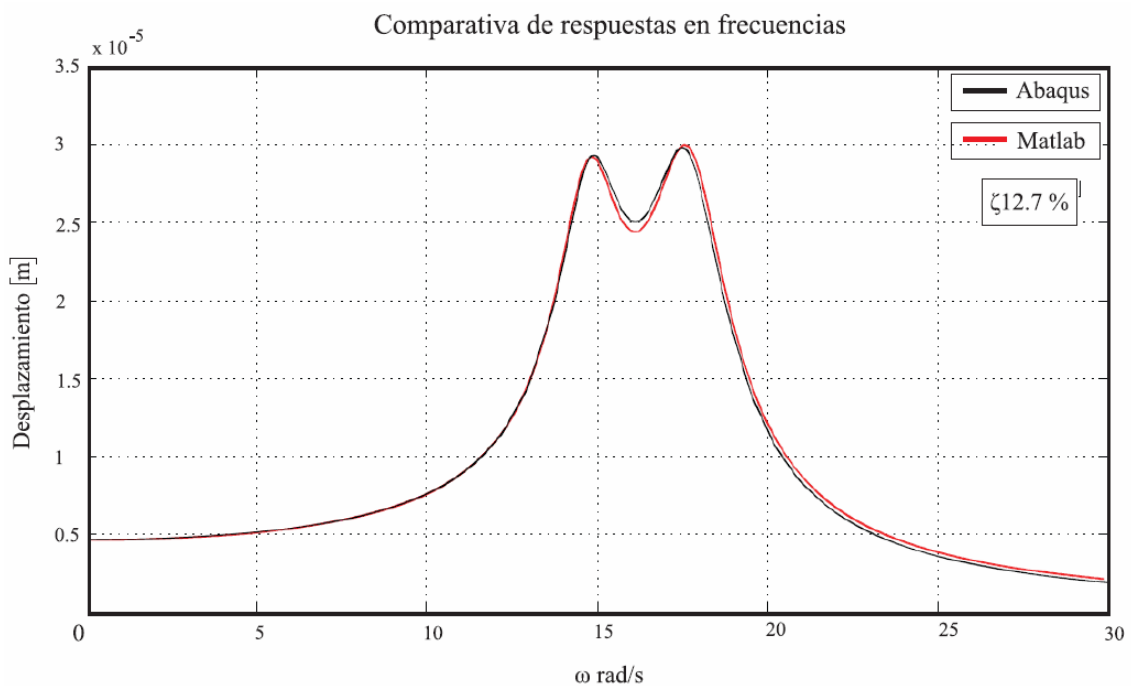


Figura 2. 28 Comparativa de Respuesta en Frecuencia para una relación de masa del 5% (Abaqus/Matlab)

Como se puede observar, la comparación entre los resultados obtenidos como máximo presentan una pequeña diferencia aproximadamente del 4% (Figura 2.28).

2.7.3.2. Segundo caso: Relación de masa del 10%

De la misma forma que el primer caso, calculamos la respuesta en frecuencia para un sistema con una relación de masa de 10%, por lo tanto:

$$m_r = 0,1 \quad (2.108)$$

Reemplazando 2.108 en las ecuaciones 2.103 y 2.104 tenemos:

$$\omega_{r,opt} = \frac{1}{1+0,1} \quad (V.2-2.103)$$

$$\zeta_{2,opt} = \sqrt{\frac{3 \cdot 0,1}{8(1+0,1)^3}} \quad (V.2-2.104)$$

$$\omega_{r,opt} = 0,91 \quad (2.109)$$

$$\zeta_{2,opt} = 0,168 \quad (2.110)$$

Parámetros adimensionales más eficientes obtenidos con la rutina Cap2_3 (Ver 2.8.3).

Salida	Relación de masa m_r	Relación de Frecuencias ω_n	Relación de Amortiguamiento 1 ζ_1	Relación de Amortiguamiento 2 ζ_2
1	0,1	0,91	0	0,14
2	0,1	0,91	0	0,168
3	0,1	0,91	0	0,2

Tabla 2. 11 Rango de valores, análisis de Respuesta en Frecuencia para m_r del 10%

De estos parámetros adimensionales que se presentan en la **Tabla 2.11** se extraen los distintos valores de los elementos que conforman el absorbedor mediante los valores 2.101 y las ecuaciones 2.102 se construyó así la **Tabla 2.12**.

Salida	Masa 1 m_1	Masa 2 m_2	Rigidez 1 k_1	Rigidez 2 k_2	Amortig 1 c_1	Amortig 2 c_2
	Kg.	Kg.	N/m	N/m	Ns/m	Ns/m
1	786,23	78,623	216850	17957	0	332,70
2	786,23	78,623	216850	17957	0	399,24
3	786,23	78,623	216850	17957	0	475,29

Tabla 2. 12 Valores de los diferentes parámetros m_r del 10%

La repuesta del sistema para una carga unitaria en el sistema principal con una variación de la relación de amortiguamiento del sistema absorbedor de vibraciones para una relación de frecuencias naturales de **91%** y **una relación de masa del 10%** se muestra en la **Figura 2.29**.

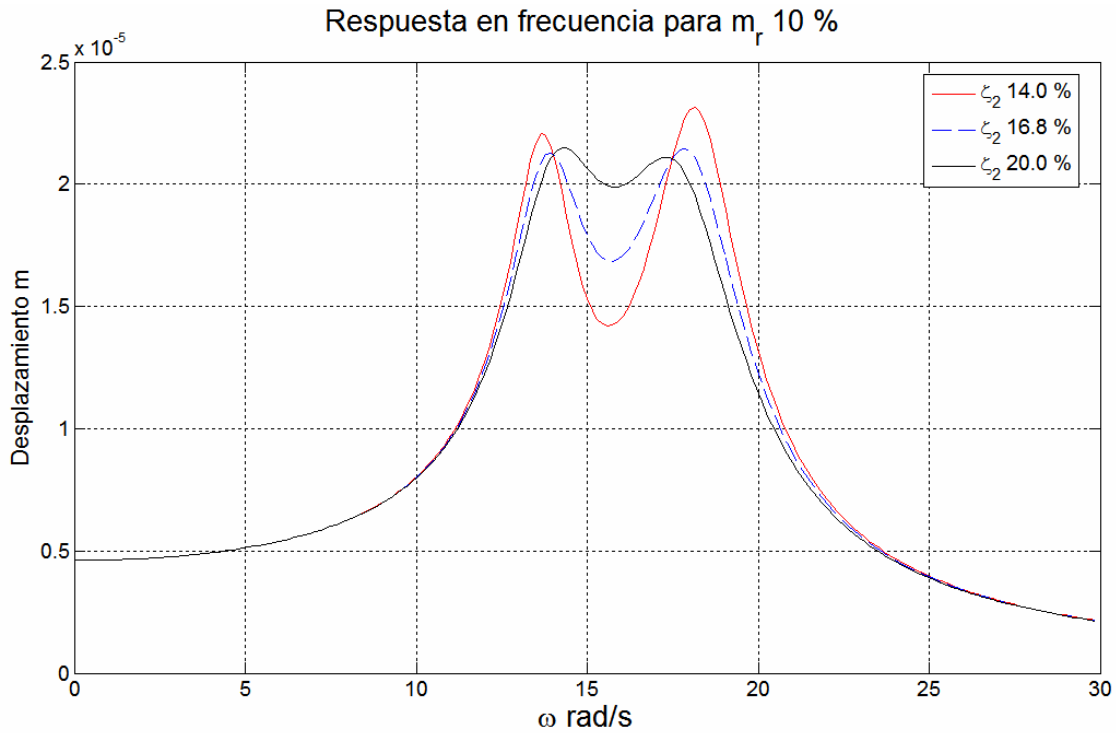


Figura 2. 29 Resposta en Frecuencia para una relación de masa del 10% (Matlab)

Para obtener la salida correspondiente a Abaqus [2] se cargan a dicho programa la segunda fila de la **Tabla 2.12** cuya mejor alternativa es para $c_2 = 399,24$ [Ns/m] **Figura 2.30**.

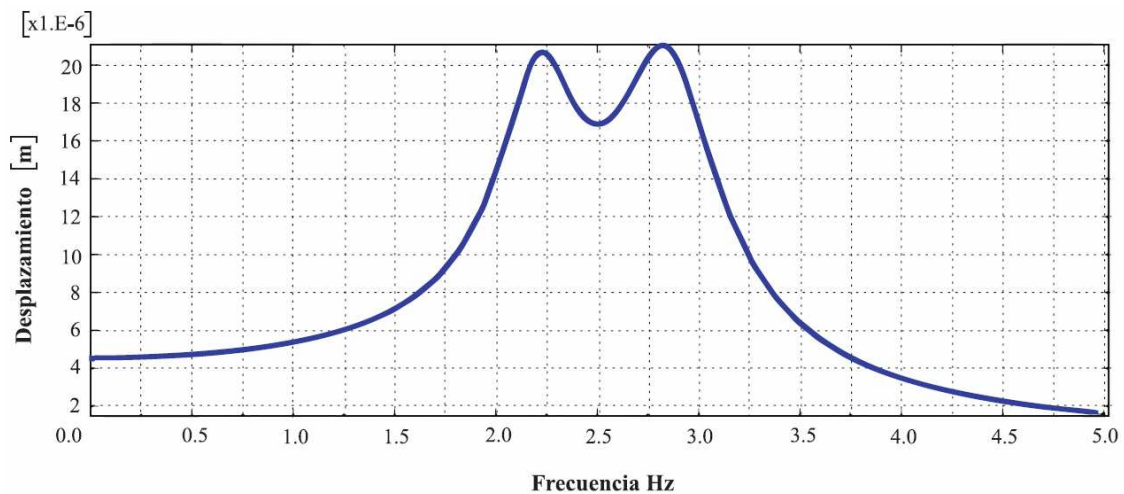


Figura 2. 30 Resposta en Frecuencia para una relación de masa del 5% (Abaqus)

Del mismo modo que en el caso anterior, para observar de manera más minuciosa el gráfico se plasmó las gráficas del caso óptimo de cada Software en una misma figura (**Figura 2.31**), cruzando los gráficos tenemos:

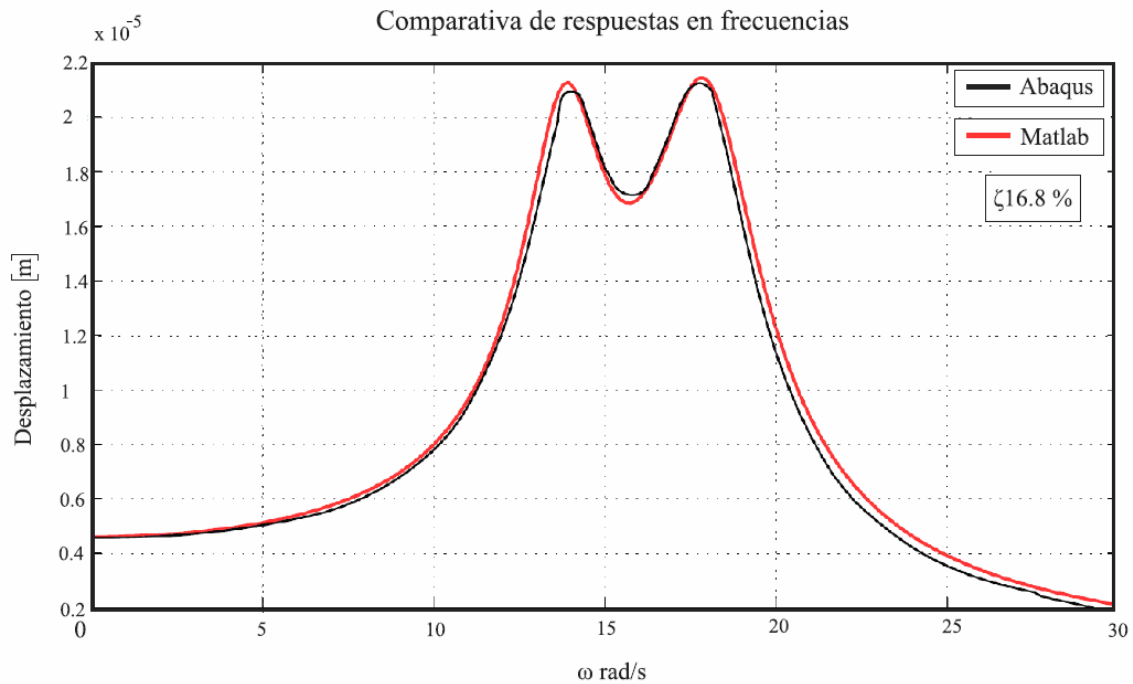


Figura 2. 31 Comparativa de Respuesta en Frecuencia para una relación de masa del 10% (Abaqus/Matlab)

Como se puede observar la diferencia entre los resultados obtenidos como máximo presentan una pequeña diferencia aproximadamente del 2% (**Figura 2.31**).

2.7.3.3. Tercer caso: Relación de masa del 15%

Como en los dos anteriores casos, calculamos la respuesta en frecuencia para un sistema con una relación de masa de 15%, por lo tanto:

$$m_r = 0,15 \quad (2.111)$$

Reemplazando **2.111** en las ecuaciones **2.103** y **2.104** tenemos:

$$\omega_{r,opt} = \frac{1}{1+0,15} \quad (V.3-2.103)$$

$$\zeta_{2,opt} = \sqrt{\frac{3 \cdot 0,15}{8(1+0,15)^3}} \quad (V.1-2.104)$$

$$\omega_{r,opt} = 0,869 \quad (2.112)$$

$$\zeta_{2,opt} = 0,217 \quad (2.113)$$

Parámetros adimensionales más eficientes obtenidos con la rutina Cap2_3 (Ver 2.8.3).

Salida	Relación de masa m_r	Relación de Frecuencias ω_n	Relación de Amortiguamiento 1 ζ_1	Relación de Amortiguamiento 2 ζ_2
1	0,15	0,869	0	0,20
2	0,15	0,869	0	0,217
3	0,15	0,869	0	0,24

Tabla 2. 13 Rango de valores, análisis de Respuesta en Frecuencia para m_r del 15%

De estos parámetros adimensionales se extraen los distintos valores de los elementos que conforman el absorbedor mediante los valores 2.101 y las ecuaciones 2.102 se construye así la **Tabla 2.14**.

Salida	Masa 1 m_1	Masa 2 m_2	Rigidez 1 k_1	Rigidez 2 k_2	Amortig 1 c_1	Amortig 2 c_2
	Kg.	Kg.	N/m	N/m	Ns/m	Ns/m
1	786,23	117,935	216850	24904	0	680,8 1
2	786,23	117,935	216850	24904	0	738,65
3	786,23	117,935	216850	24905	0	816,97

Tabla 2. 14 Valores de los diferentes parámetros m_r del 15%

La repuesta del sistema para una carga unitaria en el sistema principal con una variación de la relación de amortiguamiento del sistema absorbedor de vibraciones para una relación de frecuencias naturales de **87.5%** y una **relación de masa del 15%** se muestra en la **Figura 2.32**.

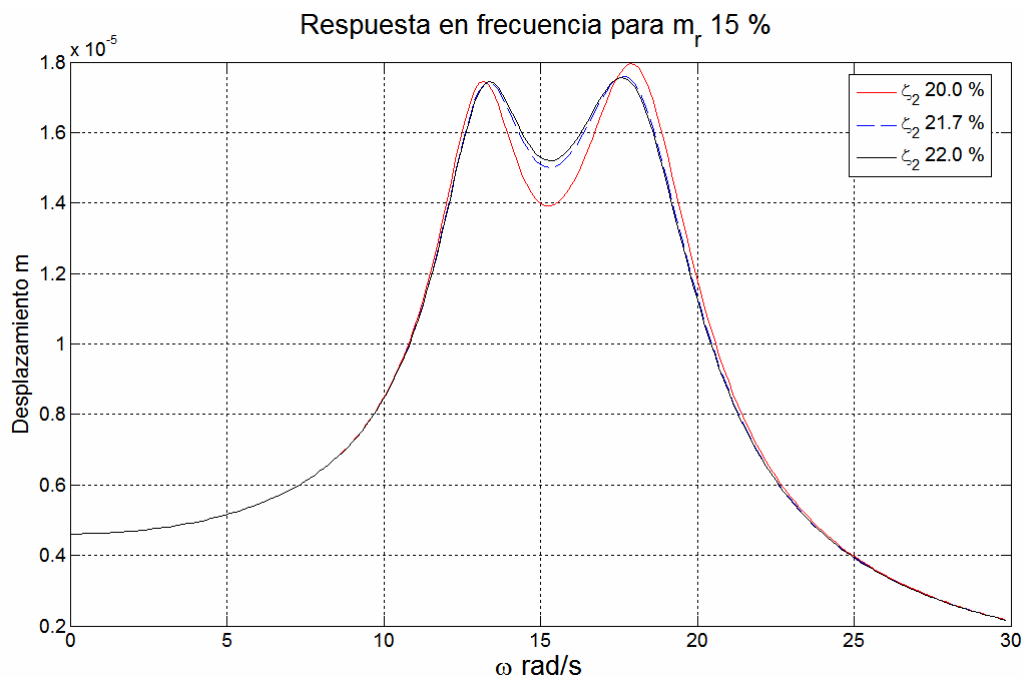


Figura 2. 32 Respuesta en Frecuencia para una relación de masa del 15% (Matlab)

Para obtener la salida correspondiente a Abaqus [2] se cargan a dicho programa la segunda fila de la **Tabla 2.14** cuya mejor alternativa es para $c_2 = 738,65$ [N.s/m] **Figura 2.33**.

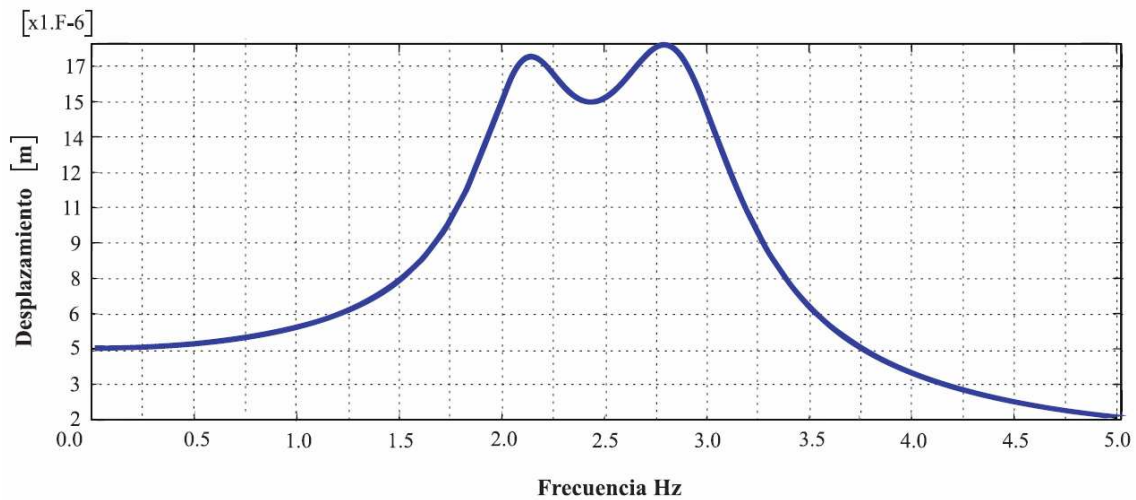


Figura 2. 33 Respuesta en Frecuencia para una relación de masa del 15% (Abaqus)

Del mismo modo que en los dos casos anteriores, para observar de manera más minuciosa el gráfico se plasmó las gráficas de los parámetros óptimos de cada Software en una misma figura (**Figura 2.34**), cruzando los gráficos tenemos:

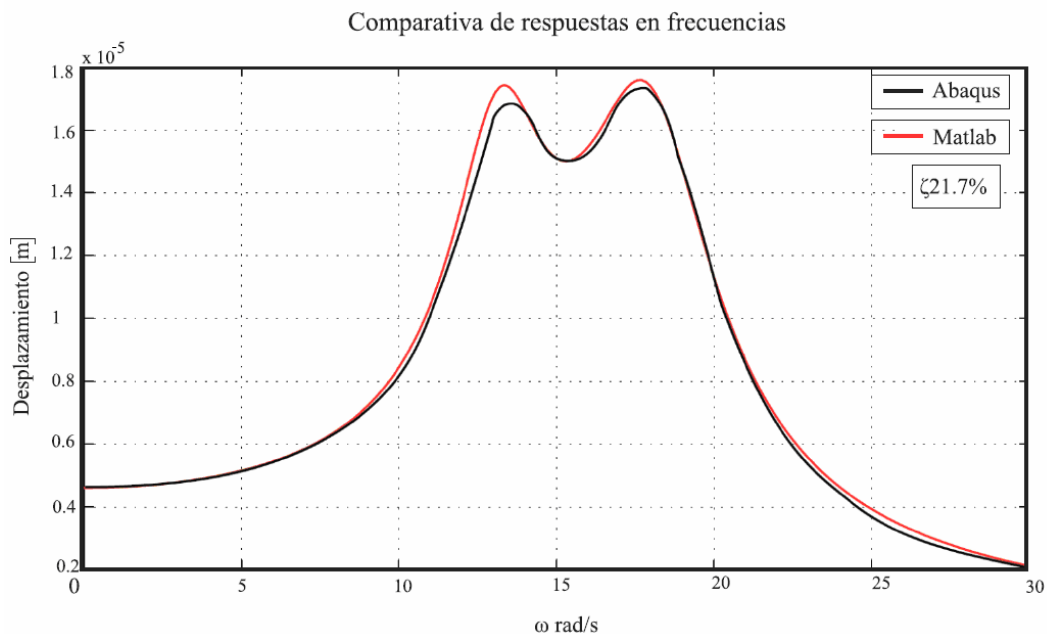


Figura 2. 34 Comparativa de Respuesta en Frecuencia para una relación de masa del 15% (Abaqus/Matlab)

Como se puede observar la diferencia entre los resultados obtenidos como máximo presentan una pequeña diferencia aproximadamente del 3% (**Figura 2.34**).

Podemos comprobar, entonces, que existe una concordancia entre las repuestas entregadas por distintos programas de cálculo.

Otro aspecto que está intrínseco dentro de esta sección es la exposición de los parámetros que dan la menor repuesta para una cierta relación de masa, (relación de frecuencias naturales y relación de amortiguamiento crítico del absorbedor), siendo el tercer caso el que da la repuesta mínima **Figura 2.35**.

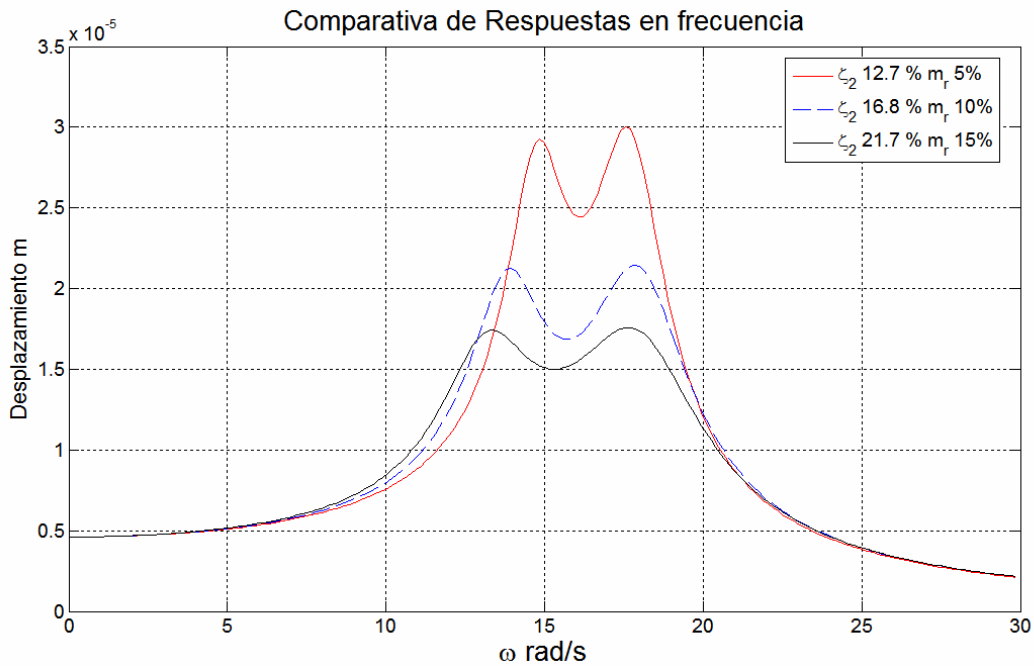


Figura 2. 35 Comparativa de Respuesta en Frecuencia para los parámetros óptimos (Matlab)

De la **Figura 2.35** se puede observar que un incremento en la relación de masa del 5% al 10% se produce una reducción de la respuesta máxima que ronda en un 30% aproximadamente, en cambio un incremento de la relación de masa de un 10% a un 15% disminuye la respuesta máxima solo en un poco más que un 15%.

2.8. Rutinas Matlab

En esta sección se presentan los diagramas de flujo de las rutinas de cálculo para darle al lector una explicación gráfica del procedimiento interno de los mismos. También a continuación se agregaron las ecuaciones que se referencian en las rutinas de cálculo con su respectivo número para facilitar la búsqueda de las mismas.

Las ecuaciones utilizadas son las siguientes:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{f\} \quad (2.27)$$

$$\{f(t)\} = \{F\}e^{i\omega t} \quad (2.38)$$

$$\{x(t)\} = \{X\}e^{i\omega t} \quad (2.39)$$

$$\{\dot{x}(t)\} = i\{X\}\omega e^{i\omega t} \quad (2.40)$$

$$\{\ddot{x}(t)\} = -\{X\}\omega^2 e^{i\omega t}$$

$$\begin{Bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} (k_1 + k_2) + (c_1 + c_2)i\omega - m_1\omega^2 & -k_2 - c_2i\omega \\ -k_2 - c_2i\omega & k_2 + c_2i\omega - m_2\omega^2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} F \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (2.43)$$

$m_r = \frac{m_2}{m_1}$	Relación de masa	
$\omega_{nr} = \frac{\omega_{n2}}{\omega_{n1}}$	Relación de Frecuencias naturales.	
$\zeta_1 = \frac{c_1}{2m_1\omega_{n1}}$	Relación de amortiguamiento critico asociado al grado de libertad dinámico 1. (Adimensional)	(2.50)
$\zeta_2 = \frac{c_2}{2m_2\omega_{n2}}$	Relación de amortiguamiento critico asociado al grado de libertad dinámico 2. (Adimensional)	
$\Omega = \frac{\omega}{\omega_{n1}}$	Relación de frecuencias.	

$$\begin{aligned} E_{Inox} &= 1,9 \cdot 10^{11} \text{ N / m}^2 && \text{Módulo de Elasticidad del Acero inoxidable.} \\ I_{Inox} &= 3,6095 \cdot 10^{-3} \text{ m}^4 && \text{Inercia de la sección superior.} \\ E_{Acero} &= 2,1 \cdot 10^{11} \text{ N / m}^2 && \text{Módulo de Elasticidad del Acero al carbono.} \\ I_{Inox} &= 4,3208 \cdot 10^{-3} \text{ m}^4 && \text{Inercia de la sección inferior.} \end{aligned} \quad (2.71)$$

$$\delta_{i,j} = \int_0^\ell \bar{M}_j \left(\frac{M_i}{E.I} \right) dz \quad (2.75)$$

$$f_{i,j} = \delta_{i,j} = \int_0^\ell \bar{M}_j \left(\frac{M_i}{E.I} \right) dz \quad (2.76)$$

$$[K] = [F]^{-1} \quad (2.78)$$

$$[M] = \begin{bmatrix} \mu(z) \cdot l_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \mu(z) \cdot l_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \mu(z) \cdot l_{21} \end{bmatrix} \quad (2.85)$$

$$k_c = 216850 \text{ N/m} \quad (2.91)$$

$$m_c = 801,33 \text{ Kg} \quad (2.93)$$

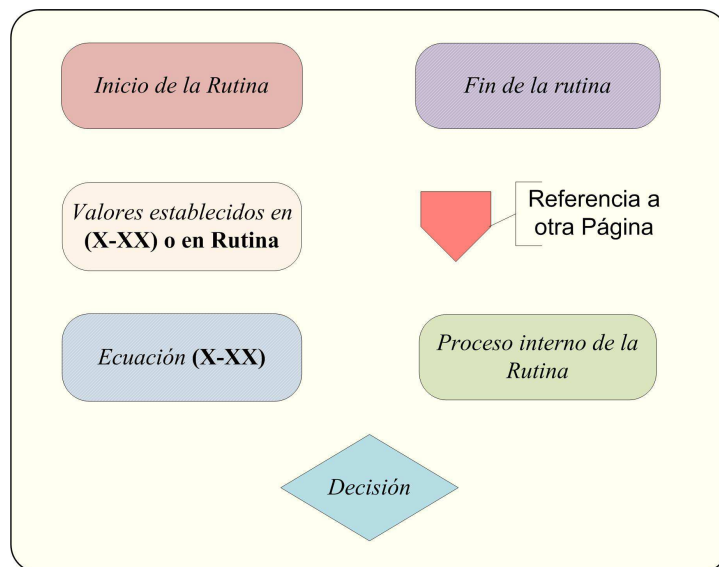


Figura 2. 36 Referencias de los diagramas de flujo de las Rutinas de Cálculo del Capítulo 2

2.8.1. Rutina Cap2_1

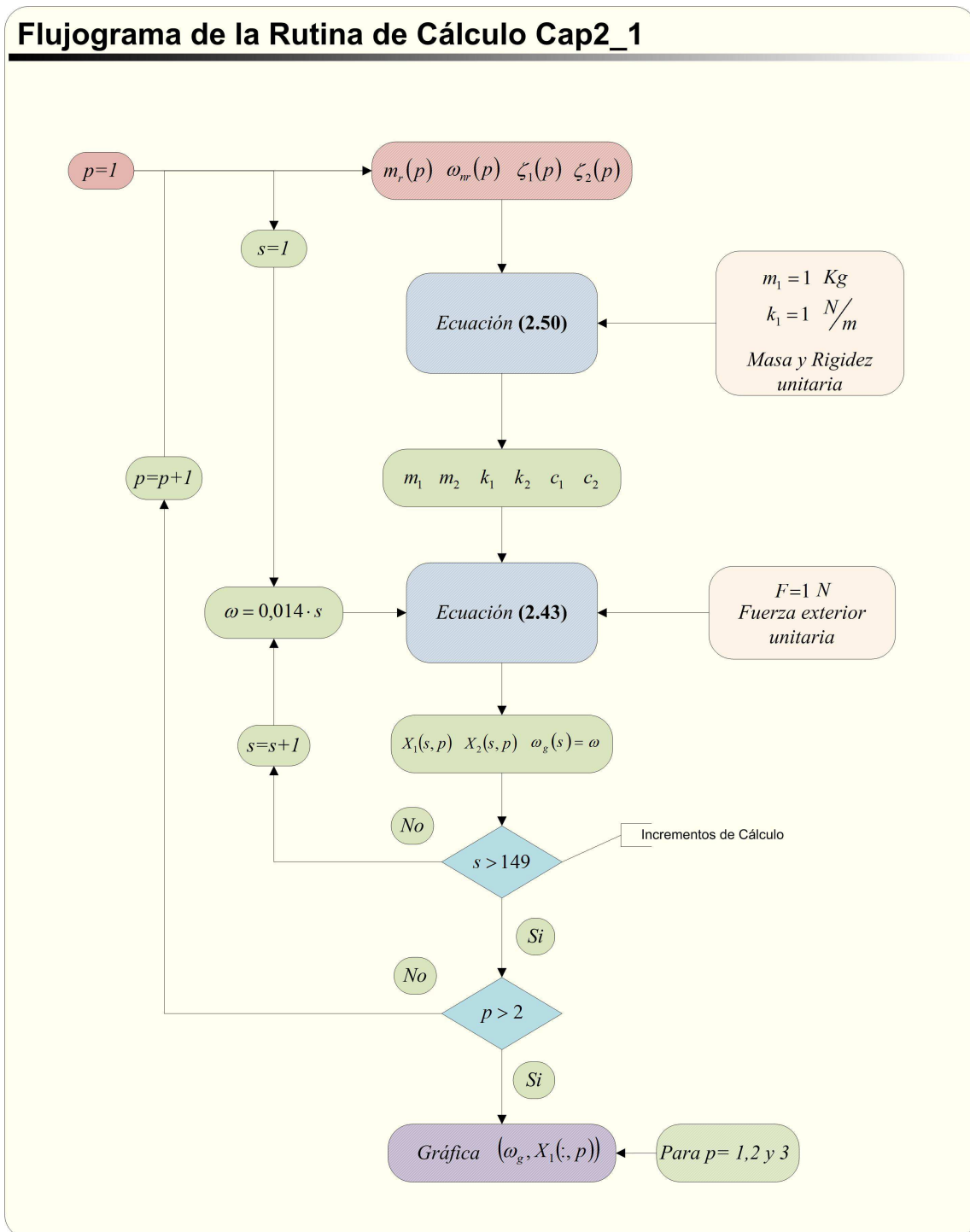


Figura 2. 37 Diagrama de Flujo de la Rutina Cap2_1

2.8.2. Rutina Cap2_2

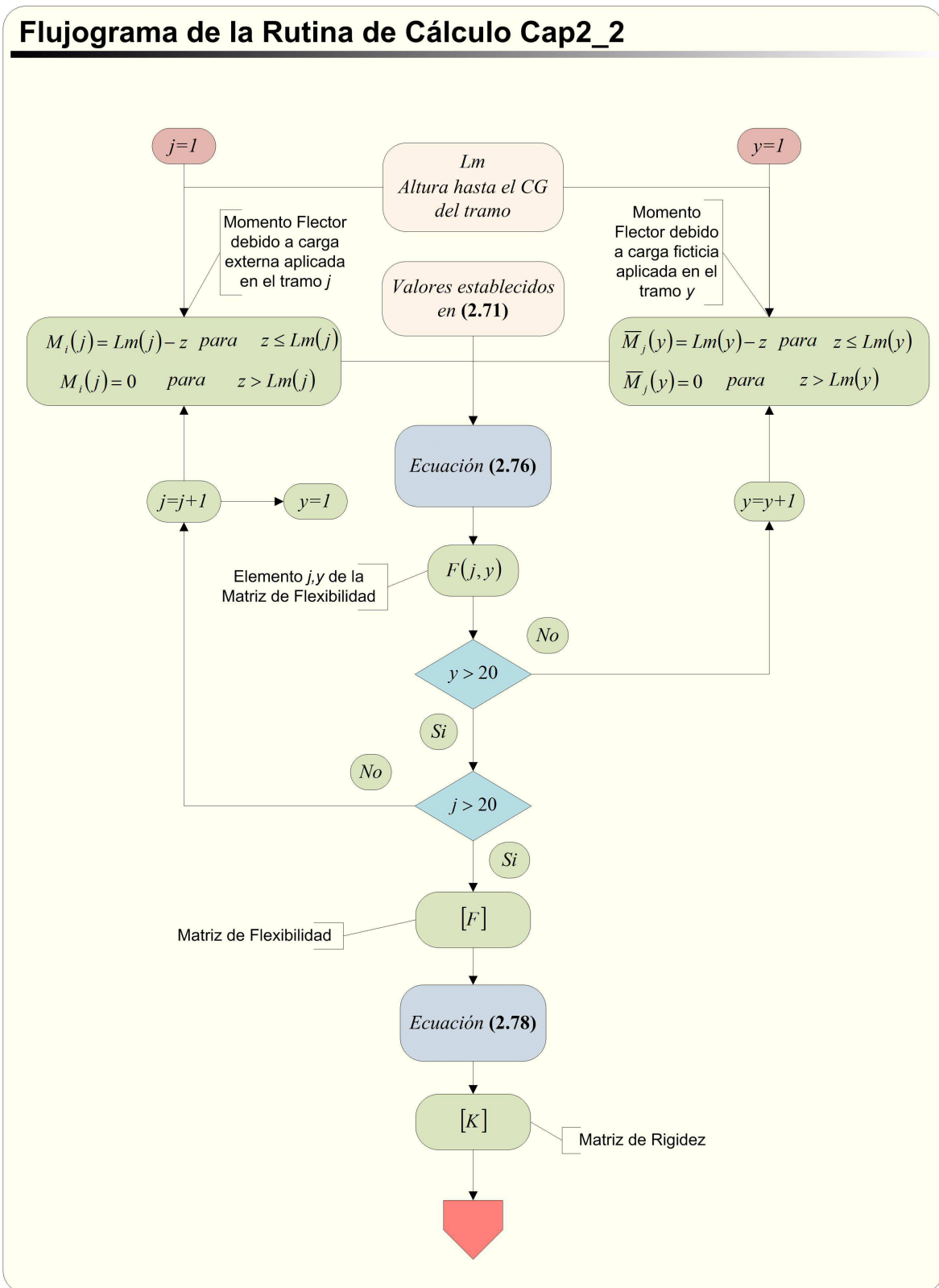


Figura 2. 38 Diagrama de Flujo de la Rutina Cap2_2 (Parte 1/2)

Flujograma de la Rutina de Cálculo Cap2_2 (Continuación)

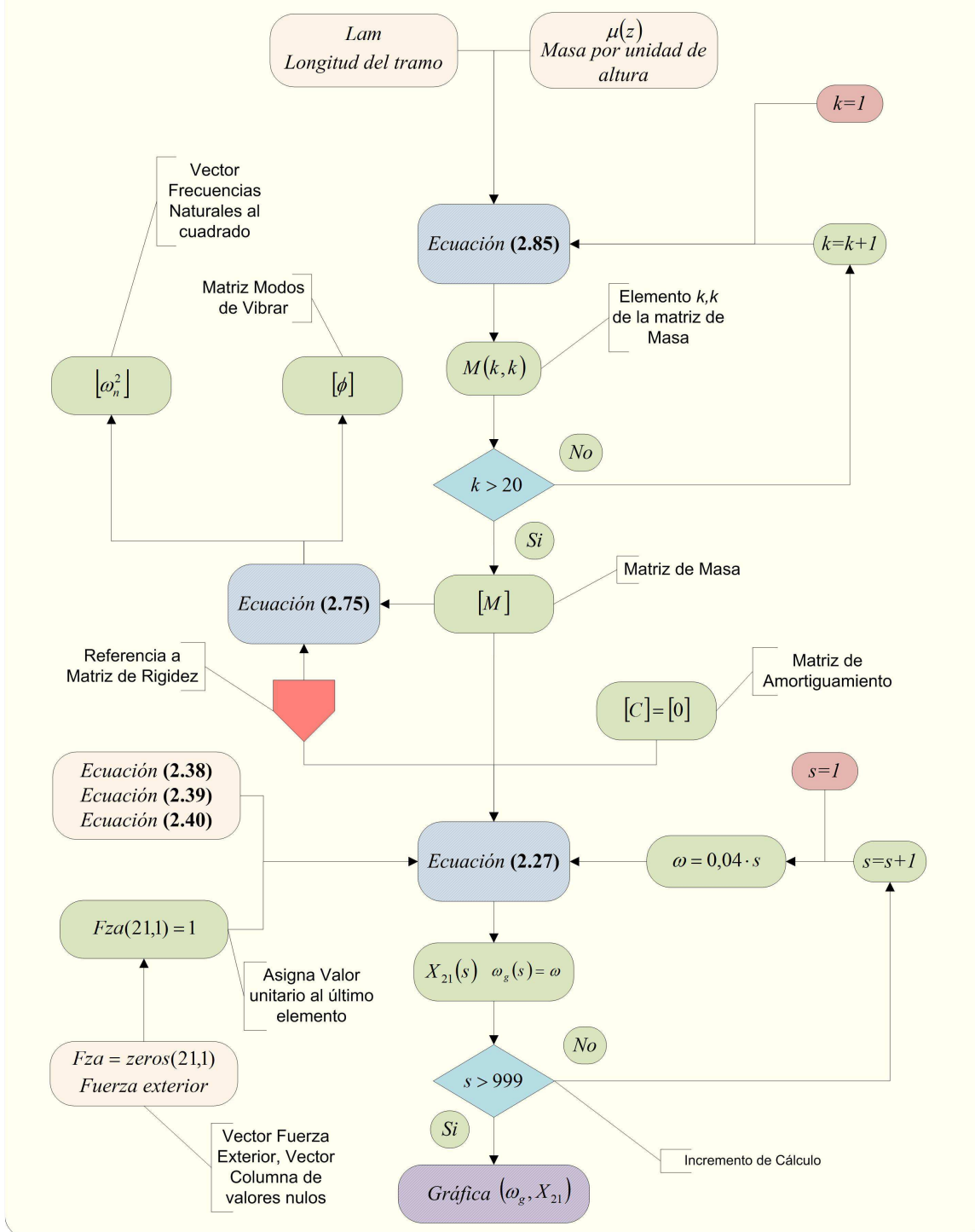


Figura 2. 39 Diagrama de Flujo de la Rutina Cap2_2 (Parte 2/2)

2.8.3. Rutina Cap2_3

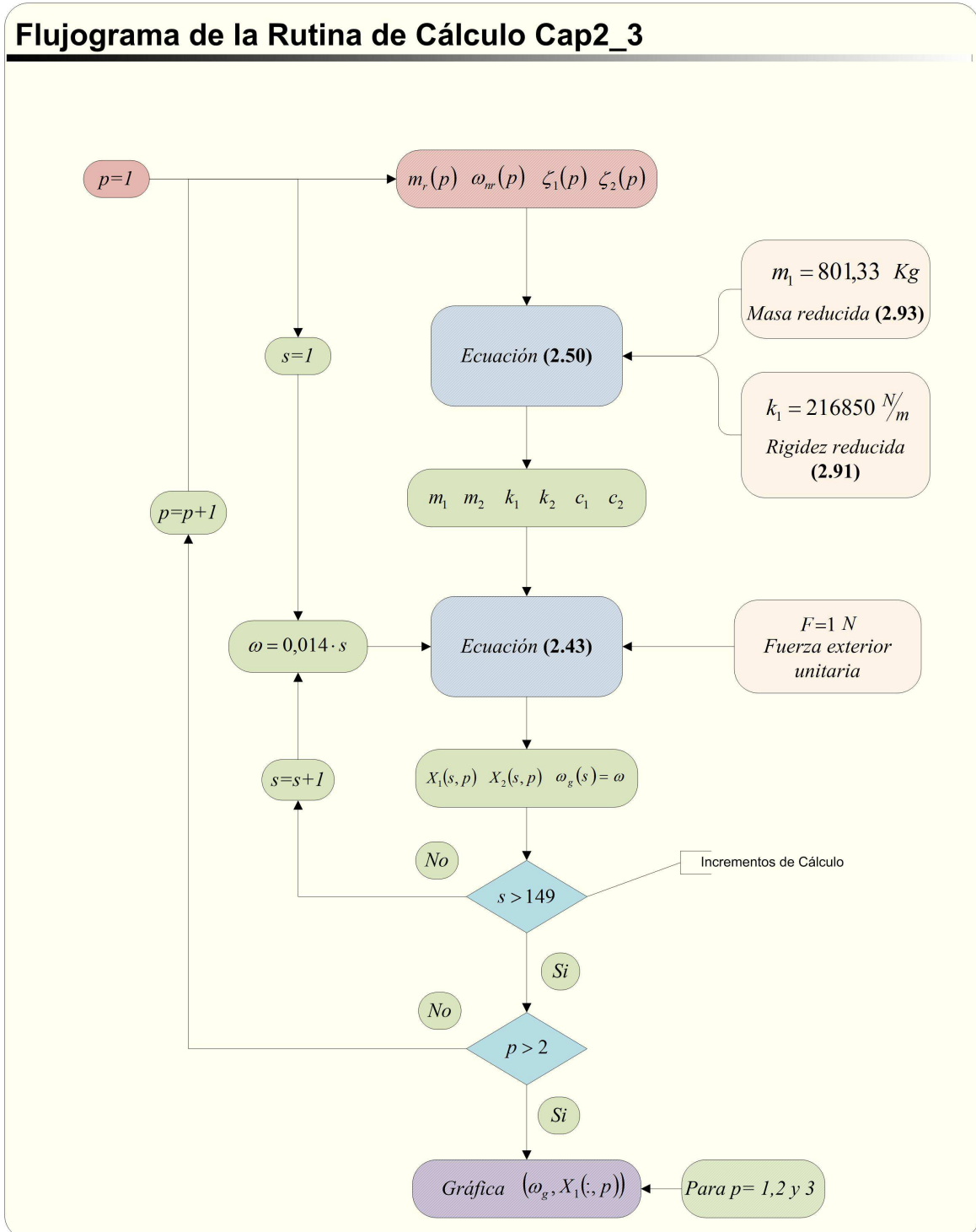


Figura 2. 40 Diagrama de Flujo de la Rutina Cap2_3

2.9. Conclusiones del Capítulo

En el presente capítulo se revisaron los conceptos básicos de sistemas vibratorios, desde el simple sistema de un grado de libertad dinámica hasta el sistema de múltiples grados de libertad.

Se logró modelar la estructura de análisis, se obtuvieron los parámetros de la estructura de análisis mediante el uso de programas de cálculo numérico, se determinó la respuesta en frecuencia bajo una carga oscilatoria unitaria tanto para el sistema original como para el que posee absorbedor de vibraciones.

También se estableció la influencia de la variación de los parámetros del absorbedor de vibraciones en la respuesta en frecuencia de la estructura, se validaron los resultados comparando las salidas de los programas utilizados, siendo los modelos en el que se analizaron con los programas de cálculo numérico compatibles entre sí.

2.10. Resumen del Capítulo

Para resumir lo plasmado en el capítulo 2, sucintamente podemos decir que solo se introducen los conceptos básicos sobre sistemas vibratorios sin llegar a analizar el problema objeto de este Proyecto Integrador (Vibraciones inducidas por carga de viento). A lo largo del capítulo nos centramos en establecer un método de estudio de la estructura de análisis propiamente dicha y tratar de modelar su comportamiento como un simple sistema de un grado de libertad dinámico a través de sus parámetros reducidos; del mismo modo, también nos enfocamos en determinar la respuesta de la estructura ante una eventual instalación de un sistema absorbedor de vibraciones. En el capítulo siguiente se realiza un análisis normativo sobre el fenómeno de Carga de Viento.

2.11. Referencias

- ¹ The MathWorks, “Matlab 7.0 R14”, MathWorks, USA, 2007.
- ² Dassault Systemes, “Abaqus CAE”, Dassault Systemes, France, 2010.
- ³ Balachandran, B., Magrab, E., “Vibrations”, Cengage Learning, Toronto, 2009.
- ⁴ Rao, S., “Mechanical Vibrations”, Prentice Hall, Upper Sandle River, 2011.
- ⁵ Massa, J., Prato, C., “Análisis Estructural (Problemas Estáticos)”, Departamento de Estructuras FCEFyN UNC, Córdoba, 2007.
- ⁶ Massa, J., Prato, C., “Dinámica Estructural”, Departamento de Estructuras FCEFyN UNC, Córdoba, 2007.
- ⁷ Dassault Systemes, “Solidworks”, Dassault Systemes, France, 2010.
- ⁸ DIN, “1055-4, Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 4: Windlasten”, DIN, Berlin, 2005.

Capítulo 3 Análisis Normativo

3.1. Introducción

En el **Capítulo 1** se realizó una mención de las normas existentes para el cálculo de solicitaciones en estructuras bajo carga de viento. Las acciones del viento que se estudian sobre la estructura de estudio son los llamados fenómenos del tipo *Aerodinámicos* y *Aeroelásticos*, que pueden provocar vibraciones en las estructuras tanto en dirección del viento (X) como transversal a este (Y).

En el presente Capítulo se realiza un análisis de las normas presentadas y se establecen lineamientos a seguir para la verificación de la estructura bajo carga de viento según el enfoque de cada norma, las Normas utilizadas en el Proyecto Integrador fueron:

1. Norma INTI CIRSOC 102 “*Reglamento Argentino de acción del viento sobre las construcciones*” Julio 2005 [1].
2. Norma DIN 1055-4 “*Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 4: Windlasten*” März 2005 [2].

Para una mejor interpretación por parte del lector se decidió incorporar los fragmentos de las normas que son utilizados en el presente Proyecto Integrador. Todos los artículos tomados de las normas fueron referenciados en el texto; las ecuaciones, tablas y figuras pertenecientes a cada norma han sido referenciadas al pie de dichas ecuaciones, tablas y figuras. Esta acción se realizó con el fin de tener una recopilación de la información necesaria para la resolución de esta parte del Proyecto Integrador; dado que también se realizó un trabajo de interpretación de la Norma DIN [2] del alemán al español utilizando los traductores disponibles en Internet [3, 4].

3.2. Objetivos

El objetivo de este capítulo, en forma resumida, pueden mencionarse las siguientes acciones:

1. Realizar una recopilación de la información brindada por las Normas que se aplican al presente Proyecto Integrador.
2. Determinar los Alcances y limitaciones de las Normativas consultadas.
3. Identificar los fenómenos que abarcan las Normas.
4. Establecer un procedimiento ordenado para la posterior resolución.
5. Establecer una comparativa entre las formas de cálculo y consideraciones que realizan cada una de las Normas.

Una vez completo este capítulo se prosiguió con la aplicación a la estructura objeto de este Proyecto Integrador con el fin de evaluar la necesidad de colocar un absorbedor de vibraciones.

3.3. Análisis a través de Norma INTI CIRSOC 102



Este Reglamento se aplica a todas las construcciones dentro del territorio de la **República Argentina**. Para el Sector Antártico e Islas Malvinas, no se dan valores de la velocidad básica del viento, por no contarse con datos estadísticos de esas zonas.

Los edificios y otras estructuras, incluyendo tanto su sistema principal resistente a la fuerza del viento como sus componentes y revestimientos, se deben diseñar y construir para resistir las cargas de viento que se especifican en este Reglamento [1].

Las cargas de viento de diseño para edificios y otras estructuras, incluyendo tanto su sistema principal resistente a la fuerza del viento como sus elementos componentes y de revestimiento, se deben determinar siguiendo alguno de los procedimientos siguientes:

1. **Método 1** – Procedimiento simplificado tal como se especifica en el Capítulo 4 del reglamento INTI [1], para edificios que reúnen los requisitos allí indicados.
2. **Método 2** – Procedimiento analítico se especifica en el Capítulo 5 del reglamento INTI [1], para edificios y otras estructuras que reúnen los requisitos allí indicados.
3. **Método 3** – Procedimiento del Túnel de Viento tal como se especifica en el Capítulo 6 del reglamento INTI [1].

A continuación se transcribieron los párrafos que contienen las condiciones de aplicación de cada método de la Norma INTI [1] con el objeto de orientar al lector sobre la información necesaria para su aplicación.

3.3.1. Método 1 - Procedimiento Simplificado

El procedimiento simplificado dado por el Capítulo 4 de la Norma INTI [1], nos permiten determinar la carga de viento para una cierta categoría de estructuras que cumplen los requisitos que se detallan en el campo de validez.

3.3.1.1. Campo de validez

(Artículo 4.1 de INTI [1])

Un edificio cerrado total o parcialmente cuyas cargas de viento de diseño se determinan de acuerdo con este capítulo debe cumplir las siguientes condiciones:

1. Se trata de un edificio con diafragmas simples.

Edificio con diafragmas simples: Un edificio cerrado o parcialmente cerrado en el cual las cargas de viento se transmiten al sistema principal vertical resistente a la fuerza del viento a través de diafragmas de entrepisos y cubierta.

2. La pendiente de la cubierta del edificio es menor que 10° .
3. La altura media de la cubierta del edificio es menor o igual a 10 m.
4. El edificio o estructura es de forma regular.
5. El edificio no se encuadra como edificio flexible.

Edificios y otras estructuras flexibles: Aquellos edificios y otras estructuras esbeltas que tienen una frecuencia natural fundamental menor que **1 Hz**.

6. La estructura del edificio no posee juntas de dilatación o separaciones.
7. El edificio no está sujeto a los efectos topográficos Se considera como terreno llano.

3.3.2. Método 2 - Procedimiento Analítico

El procedimiento analítico dado por el Capítulo 5 la Norma INTI [1], nos permiten determinar la carga de viento para una cierta categoría de estructuras que cumplen los requisitos que se detallan en el campo de validez, este procedimiento requiere realizar cálculos un poco más elaborados que los realizarían en el procedimiento simplificado.

3.3.2.1. Campo de validez

(Artículo 5.1 de INTI [1])

Un edificio u otra estructura cuya carga de diseño se determina de acuerdo con este capítulo debe reunir las siguientes condiciones:

1. El edificio u otra estructura es de forma regular.
2. El edificio u otra estructura no posee características de respuesta que den lugar a *cargas transversales de viento, desprendimientos de vórtices, inestabilidad debida a galope o flameo*. Por su ubicación, tampoco deben merecer consideración especial los efectos de canalización o golpeteo en la estela debido a las obstrucciones a barlovento.

3.3.2.2. Limitaciones

(Artículo 5.2 de INTI [1])

Las disposiciones del *Capítulo 5* de la Norma INTI [1] tienen en cuenta el efecto de amplificación causado por ráfagas en resonancia con las vibraciones en dirección del viento de edificios u otras estructuras flexibles. Los edificios u otras estructuras que no reúnen los requisitos del artículo 5.1. de la Norma INTI [1] o *que tienen formas o características de respuesta inusuales, se deben diseñar recurriendo a bibliografía reconocida que documente tales efectos de la carga de viento*, o bien se deben remitir al uso del túnel de viento especificado en el Capítulo 6 de la Norma INTI [1] (PROCEDIMIENTO DEL TÚNEL DE VIENTO).

3.3.2.3. Protecciones

(Artículo 5.2.1 de INTI [1])

No se permiten reducciones en la presión dinámica provenientes de la aparente protección brindada por edificios y otras estructuras u obstáculos del terreno.

3.3.3. Método 3 – Procedimiento del Túnel de Viento

El procedimiento del túnel de viento dado por el Capítulo 6 de INTI [1], nos permiten determinar la carga de viento para todas las categorías de estructuras que cumplen los requisitos que se detallan en el campo de validez, este procedimiento requiere realizar ensayos y mediciones en túnel de viento.

3.3.3.1. Campo de validez

(Artículo 6.1 de INTI [1])

Los ensayos en túnel de viento se deben utilizar para los casos que se consideran en el artículo 5.2 de la Norma INTI [1]. El ensayo en túnel de viento se admite en reemplazo de los Métodos 1 y 2 de la Norma INTI [1] para cualquier edificio o estructura.

3.3.3.2. Condiciones de Ensayo

(Artículo 6.2 de INTI [1])

Los ensayos en túnel de viento, o ensayos similares empleando fluidos diferentes que el aire, que se usen para la determinación de cargas de viento de diseño para cualquier edificio u otra estructura, se deben realizar de acuerdo con este artículo. Los ensayos para la determinación de fuerzas y presiones medias y fluctuantes deben reunir la totalidad de las siguientes condiciones:

1. La capa límite atmosférica natural ha sido modelada para tener en cuenta la variación de la velocidad del viento con la altura.
2. Las escalas pertinentes de macro longitud (integral) y micro longitud de la componente longitudinal de la turbulencia atmosférica están modeladas aproximadamente a la misma escala que la usada para modelar el edificio u otra estructura.
3. El edificio u otra estructura modelada y las estructuras y topografía circundantes son geoméricamente similares a sus contrapartes en escala natural, excepto que, para edificios de baja altura que reúnan los requisitos del artículo 5.1. de la Norma INTI [1] (Campo de validez del método 2), se permitirán ensayos para el edificio modelado en un único sitio de exposición tal como se define en el artículo 5.6.1. de la Norma INTI [1] (Categoría de exposición, Generalidades).
4. El área proyectada del edificio u otra estructura y alrededores modelados es menor que el 8% del área de la sección transversal de ensayo a menos que se haga una corrección por bloqueo.
5. Se ha tenido en cuenta el gradiente de presión longitudinal en la sección de ensayo del túnel de viento.
6. Los efectos del número de Reynolds sobre las presiones y las fuerzas están minimizados.
7. Las características de respuesta del instrumental del túnel de viento son consistentes con las mediciones requeridas.

3.3.3.3. Respuesta Dinámica

(Artículo 6.2 de INTI [1])

Los ensayos realizados con el propósito de determinar la respuesta dinámica de un edificio u otra estructura deben respetar los requisitos del artículo 6.2 de la Norma INTI [1] (Condiciones de ensayo). El modelo estructural y el análisis asociado deben considerar la distribución de masa, rigidez y amortiguamiento.

3.3.4. Selección del método a utilizar.

En base a lo expuesto anteriormente podemos resumir cada método como sigue

El método 1 aquí presentado no se aplica a este Proyecto Integrador dado que la estructura de análisis no cumple con lo requerido en la condición **número 3** ya que la estructura de análisis posee más de 10 metros de altura.

El método 2 aquí presentado tiene dentro de su campo de validez requerimientos que la estructura de análisis cumple correctamente, pero vale aclarar también la limitación de este método la cual no aplica a estructuras propensas a una respuesta transversal a la dirección del viento e inestabilidades dinámicas. Para avanzar con el análisis se considerara que la estructura no presenta inestabilidades dinámicas. Al final del capítulo 4 del presente Proyecto Integrador se validará o no el uso del **método 2 de la Norma INTI CIRSOC 102**.

El método 3 aquí presentado es el procedimiento más completo para obtener la respuesta del sistema a las acciones del viento, tiene en cuenta las posibilidades de que aparezcan respuestas transversales debido a inestabilidades dinámicas producidas por la acción del viento. Pero no se aplica a este Proyecto Integrador dada la complejidad de la modelación y la necesidad de uso de un túnel de viento.

Desarrollados todos los criterios de selección del método de análisis se proseguirá desarrollando el método de análisis seleccionado, el Método 2 de la Norma INTI [1].

3.3.5. Análisis del Método 2 – Procedimiento de Diseño

Para la determinación de las cargas en la que está sometida la estructura de análisis hay un procedimiento detallado en el artículo 5.3 de la Norma INTI [1] y establece el siguiente conjunto de pasos ordenados:

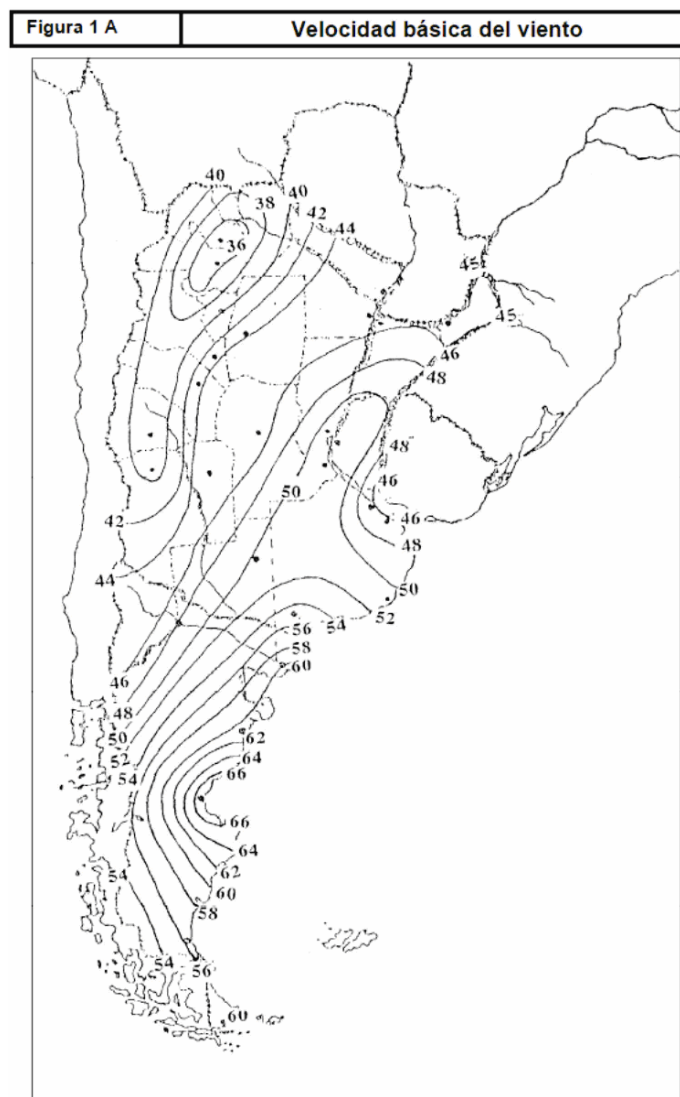
1. Se determina la velocidad básica del viento V y el factor de direccionalidad K_d de acuerdo con el artículo 5.4 de la Norma INTI [1].
2. Se determina un factor de importancia I de acuerdo con el artículo 5.5 de la Norma INTI [1].
3. Se determinan para cada dirección de viento una categoría o categorías de exposición y los coeficientes de exposición para presión dinámica K_z o K_h , según corresponda, de acuerdo con el artículo 5.6 de la Norma INTI [1].
4. Se determina un factor topográfico K_{zt} de acuerdo con el artículo 5.7 de la Norma INTI [1].
5. Se determina un factor de efecto de ráfaga G o G_f , según corresponda, de acuerdo con el artículo 5.8 de la Norma INTI [1].
6. Se determina una clasificación de cerramiento de acuerdo con el artículo 5.9. de la Norma INTI [1].
7. Se determina el coeficiente de presión interna GC_{pi} , de acuerdo con el artículo 5.11.1 de la Norma INTI [1].
8. Se determinan los coeficientes de presión externa C_p o GC_{pf} , o los coeficientes de fuerza C_f , según corresponda, de acuerdo con los artículos 5.11.2. o 5.11.3., respectivamente de la Norma INTI [1].
9. Se determina la presión dinámica q_z o q_h , según corresponda, con el artículo 5.10 de la Norma INTI [1].
10. Se determina la carga de viento de diseño p o F de acuerdo con los artículos 5.12 y 5.13 de la Norma INTI [1], según corresponda.

3.3.5.1. Determinación de V y K_d .

La *velocidad básica del viento* V se determina utilizando el artículo 5.4 de la Norma INTI [1]. V se usa en la determinación de las cargas de viento de diseño sobre edificios y otras estructuras, se debe obtener del mapa de la **Figura 3.1** o de la Tabla de la **Figura 3.2**. Se debe suponer que el viento proviene de cualquier dirección horizontal.

DEFINICION:

Velocidad básica del viento, V : Velocidad de ráfaga para un intervalo de **3 segundos**, a **10 metros** sobre el terreno, en exposición **C (Terrenos abiertos con obstrucciones dispersas)** y asociada con una probabilidad anual de **0,02** de ser igualada o excedida (intervalo medio de recurrencia de **50 años**).



Fuente: INTI [1]

Figura 3. 1 Velocidad Básica del Viento
(Figura 1 A de INTI [1])

Figura 1 B		Velocidades básicas del viento en ciudades	
		CIUDAD	V (m/s)
		BAHIA BLANCA	55,0
		BARILOCHE	46,0
		BUENOS AIRES	45,0
		CATAMARCA	43,0
		COMODORO RIVADAVIA	67,5
		CORDOBA	45,0
		CORRIENTES	46,0
		FORMOSA	45,0
		LA PLATA	46,0
		LA RIOJA	44,0
		MAR DEL PLATA	51,0
		MENDOZA	39,0
		NEUQUEN	48,0
		PARANA	52,0
		POSADAS	45,0
		RAWSON	60,0
		RESISTENCIA	45,0
		RIO GALLEGOS	60,0
		ROSARIO	50,0
		SALTA	35,0
		SANTA FE	51,0
		SAN JUAN	40,0
		SAN LUIS	45,0
		SAN MIGUEL DE TUCUMAN	40,0
		SAN SALVADOR DE JUJUY	34,0
		SANTA ROSA	50,0
		SANTIAGO DEL ESTERO	43,0
		USHUAIA	60,0
		VIEDMA	60,0

Nota:
Los valores se refieren a velocidad de ráfaga de 3 segundos en m/s a 10 m. sobre el terreno para Categoría de Exposición C y están asociadas con una probabilidad anual de 0,02.

Fuente: INTI [1]

Figura 3. 2 Velocidad Básica del Viento
(Figura 1 B de INTI [1])

El factor de direccionalidad del viento, K_d , se especifica en el artículo 5.4.4 de la Norma INTI [1]. K_d se obtiene de la **Figura 3.3** y se debe aplicar solamente cuando se use conjuntamente con las combinaciones de carga especificadas en los respectivos Reglamentos de aplicación.

DEFINICION:

Factor de direccionalidad del viento, K_d : Factor que tiene en cuenta las probabilidades reducidas de que los vientos máximos provengan de cualquier dirección determinada y de que los coeficientes de presión máxima ocurran para cualquier dirección del viento.

Tabla 6		Factor de direccionalidad del viento, K_d	
Tipo de estructura		Factor de direccionalidad K_d *	
Edificios			
Sistema principal resistente a la fuerza de viento		0,85	
Componentes y revestimientos		0,85	
Cubiertas abovedadas		0,85	
Chimeneas, tanques y estructuras similares			
Cuadradas		0,90	
Hexagonales		0,95	
Redondas		0,95	
Carteles llenos		0,85	
Carteles abiertos y estructura reticulada		0,85	
Torres reticuladas			
Triangular, cuadrada, rectangular		0,85	
Toda otra sección transversal		0,95	

* El factor de direccionalidad K_d se ha calibrado con las combinaciones de carga especificadas en el Apéndice B. Este factor se debe aplicar solo cuando se use conjuntamente con las combinaciones de carga especificadas en B.3 o en los respectivos reglamentos de aplicación.

Fuente: INTI [1]

Figura 3. 3 Factor de direccionalidad
(Tabla 6 de INTI [1])

3.3.5.2. Determinación del factor de importancia I

El factor de importancia I se especifica en el artículo 5.5 de la Norma INTI [1], para un edificio u otra estructura I se obtiene de la **Figura 3.4**, se debe determinar en base a las categorías de edificios y otras estructuras indicadas en la **Figura 3.5**.

DEFINICION:

Factor de Importancia I : Factor que tiene en cuenta el grado de riesgo para la vida humana y daños a la propiedad.

Tabla 1		Factor de importancia, I (Cargas de viento)	
Categoría		I	
I		0,87	
II		1,00	
III		1,15	
IV		1,15	

Fuente: INTI [1]

Figura 3. 4 Factor de Importancia
(Tabla 1 de INTI [1])

TABLA A-1 - Clasificación de Edificios y Otras Estructuras para Cargas de Viento

Naturaleza de la Ocupación	Categoría
Edificios y otras estructuras que representan un bajo riesgo para la vida humana en caso de falla incluyendo, pero no limitado a: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Instalaciones Agrícolas. ▪ Ciertas instalaciones temporarias. ▪ Instalaciones menores para almacenamiento. 	I
Todos los edificios y otras estructuras excepto aquellos listados en Categorías I, III y IV.	II
Edificios y otras estructuras que representan un peligro substancial para la vida humana en caso de falla incluyendo, pero no limitado a: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Edificios y otras estructuras donde se reúnen más de 300 personas en un área. ▪ Edificios y otras estructuras para guarderías, escuelas primarias y secundarias con capacidad mayor que 150 personas. ▪ Edificios y otras estructuras con instalaciones para el cuidado diurno con capacidad mayor que 150 personas. ▪ Edificios y otras estructuras con una capacidad mayor que 500 personas para universidades o instalaciones para educación de adultos. ▪ Instalaciones para el cuidado de la salud con una capacidad de 50 o más pacientes residentes pero sin instalaciones para cirugía o tratamientos de emergencia. ▪ Instalaciones para cárceles y detenciones. ▪ Estaciones de generación de energía y otras instalaciones de utilidad pública no incluidas en la Categoría IV. Edificios y otras estructuras que contienen suficientes cantidades de sustancias tóxicas o explosivas como para ser peligrosas al público si se liberan, incluyendo, pero no limitado, a: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Instalaciones petroquímicas. ▪ Instalaciones para almacenamiento de combustibles. ▪ Plantas de fabricación o almacenamiento de productos químicos peligrosos. ▪ Plantas de fabricación o almacenamiento de explosivos. Edificios y otras estructuras equipados con contención secundaria de sustancias tóxicas, explosivas u otras peligrosas (incluyendo, pero no limitado a, tanques de doble pared, receptáculos de tamaño suficiente para contener un derrame u otros medios de contención de derrames o explosiones dentro de los límites de la instalación y prevenir la liberación de cantidades de contaminantes nocivas para el aire, el suelo, el agua freática o superficial) deben clasificarse como estructuras de Categoría II.	III
Edificios y otras estructuras diseñadas como instalaciones esenciales, incluyendo, pero no limitados a: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Hospitales y otras instalaciones para el cuidado de la salud que tienen instalaciones para cirugía o tratamientos de emergencia. ▪ Cuarteles de bomberos, centros de rescate, estaciones de policía y garajes para vehículos de emergencia. ▪ Refugios diseñados contra sismos, huracanes y otras emergencias. ▪ Centros de comunicaciones y otras instalaciones necesarias para respuestas a emergencias. ▪ Estaciones generadoras de energía y otras instalaciones de utilidad pública necesarias en una emergencia. ▪ Estructuras auxiliares necesarias para la operación de aquellas de Categoría IV durante una emergencia (incluyendo pero no limitado a torres de comunicación, tanques de almacenamiento de combustible, torres de refrigeración, estructuras de sub-estaciones de electricidad, tanques de agua para incendio u otras estructuras de alojamiento o soporte de agua, otros materiales o equipamiento para combatir el fuego). ▪ Torres de control de aviación, centros de control de tráfico aéreo y hangares de emergencia. ▪ Instalaciones de almacenamiento de agua y estructuras de bombeo requeridas para mantener la presión de agua para combatir incendios. ▪ Edificios y otras estructuras con funciones críticas de defensa nacional. 	IV

Fuente: INTI [1]

Figura 3. 5 Clasificación de Edificios y otras estructuras para carga de viento (Anexo A Tabla A-1 de INTI [1])

3.3.5.3. Determinación de la Categoría y Coeficiente de exposición K_z

Para cada dirección de viento considerada, se debe determinar una categoría de exposición que refleje adecuadamente las características de las irregularidades de la superficie del terreno para el lugar en el cual se va a construir el edificio o la estructura. La categoría de exposición se especifica en el artículo 5.6 de la Norma INTI [1].

Para un sitio de emplazamiento ubicado en la zona de transición entre categorías, se debe aplicar aquella que conduzca a las mayores fuerzas de viento. Se deben tener en cuenta las variaciones en la rugosidad superficial del terreno que se generan a partir de la topografía natural y de la vegetación, así como de las construcciones existentes. Para cualquier dirección dada de viento, la exposición en la cual se ubica un edificio específico u otra estructura se debe fijar dentro de las siguientes categorías:

1. **Exposición A.** Centro de grandes ciudades con al menos **50%** de los edificios de altura mayor que **20 m**. El uso de esta categoría de exposición está limitado a aquellas áreas para las cuales el terreno representativo de la Exposición **A** prevalece en la dirección de barlovento en una distancia de al menos **800 m** ó **10** veces la altura del edificio u otra estructura, la que sea mayor. Se tendrán en cuenta los posibles efectos de acanalamiento o presiones dinámicas incrementadas debido a que el edificio o estructura se localiza en la estela de edificios adyacentes. (Ver Figura 3.6).

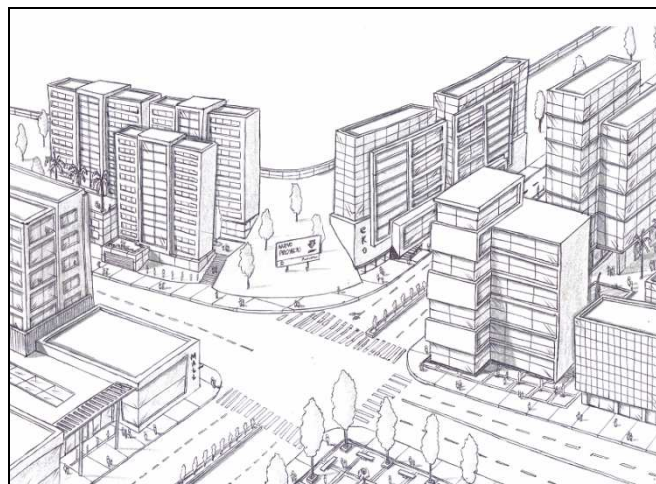


Figura 3. 6 Ejemplo de Exposición A

2. **Exposición B.** Áreas urbanas y suburbanas, áreas boscosas, o terrenos con numerosas obstrucciones próximas entre sí, del tamaño de viviendas unifamiliares o mayores. El uso de esta categoría de exposición está limitado a aquellas áreas para las cuales el terreno representativo de la Exposición **B** prevalece en la dirección de barlovento en una distancia de al menos **500 m** ó **10** veces la altura del edificio u otra estructura, la que sea mayor. (Ver Figura 3.7).



Figura 3. 7 Ejemplo de Exposición B

3. **Exposición C.** Terrenos abiertos con obstrucciones dispersas, con alturas generalmente menores que **10 m**. Esta categoría incluye campo abierto plano y terrenos agrícolas. (Ver Figura 3.8).



Figura 3. 8 Ejemplo de Exposición C

4. **Exposición D.** Áreas costeras planas, sin obstrucciones, expuestas al viento soplando desde aguas abiertas en una distancia de al menos **1600 m**. Esta exposición se debe aplicar solamente a aquellos edificios y otras estructuras expuestas al viento soplando desde el agua. La exposición **D** se extiende tierra adentro desde la costa a una distancia de **500 m** ó **10** veces la altura del edificio o estructura, la que sea mayor. (Ver Figura 3.9).

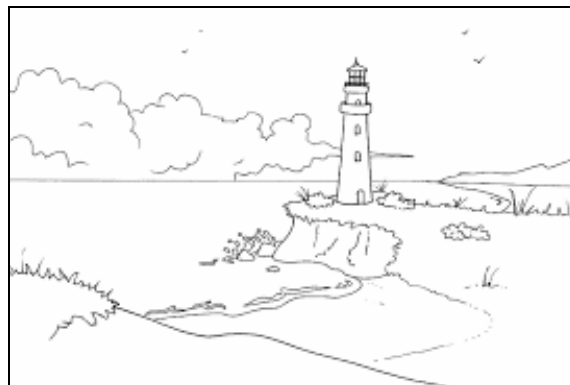


Figura 3. 9 Ejemplo de Exposición D

Los componentes y revestimientos para edificios con altura media de cubierta que excedan los **20 metros** y para otras estructuras se deben calcular usando la exposición que conduzca a las cargas de viento más elevadas para cualquier dirección del viento en el sitio de emplazamiento. Según el artículo **5.6.3.2** de la Norma INTI [1].

En base a la categoría de exposición determinada en el artículo **5.6** de la Norma INTI [1], se debe obtener de la **Figura 3.10** un coeficiente de exposición para la presión dinámica K_z o K_h , según corresponda en el artículo **5.6.4** de la Norma INTI [1].

Tabla 5		Coeficientes de exposición para la presión dinámica, K_h y K_z					
Altura sobre el nivel del terreno, z (m)	Exposición (Nota 1)						
	A		B		C	D	
	Caso 1	Caso 2	Caso 1	Caso 2	Casos 1 y 2	Casos 1 y 2	
0 - 5	0,68	0,33	0,72	0,59	0,87	1,05	
6	0,68	0,36	0,72	0,62	0,90	1,08	
7,50	0,68	0,39	0,72	0,66	0,94	1,12	
10	0,68	0,44	0,72	0,72	1,00	1,18	
12,50	0,68	0,48	0,77	0,77	1,05	1,23	
15	0,68	0,51	0,81	0,81	1,09	1,27	
17,50	0,68	0,55	0,84	0,84	1,13	1,30	
20	0,68	0,57	0,88	0,88	1,16	1,33	
22,50	0,68	0,60	0,91	0,91	1,19	1,36	
25	0,68	0,63	0,93	0,93	1,21	1,38	
30	0,68	0,68	0,98	0,98	1,26	1,43	
35	0,72	0,72	1,03	1,03	1,30	1,47	
40	0,76	0,76	1,07	1,07	1,34	1,50	
45	0,80	0,80	1,10	1,10	1,37	1,53	
50	0,83	0,83	1,14	1,14	1,40	1,56	
55	0,86	0,86	1,17	1,17	1,43	1,59	
60	0,89	0,89	1,20	1,20	1,46	1,61	
75	0,98	0,98	1,28	1,28	1,53	1,68	
90	1,05	1,05	1,35	1,35	1,59	1,73	
105	1,12	1,12	1,41	1,41	1,64	1,78	
120	1,18	1,18	1,46	1,46	1,69	1,82	
135	1,23	1,23	1,51	1,51	1,73	1,86	
150	1,29	1,29	1,56	1,56	1,77	1,89	

Notas:

- Caso 1:
 - Todos los componentes y revestimientos.
 - Sistema principal resistente a la fuerza del viento en edificios de baja altura diseñados usando la Figura 4.
- Caso 2:
 - Todos los sistemas principales resistentes a la fuerza de viento con excepción de aquellos en edificios de baja altura diseñados usando la Figura 4.
 - Todos los sistemas principales resistentes a la fuerza de viento en otras estructuras.
- El coeficiente de exposición para la presión dinámica se puede determinar mediante la siguiente expresión:

Para $5\text{ m} \leq z \leq z_g$:	Para $z < 5\text{ m}$:
$K_z = 2,01(z/z_g)^{2/\alpha}$	$K_z = 2,01(5/z_g)^{2/\alpha}$
- Observación: No se debe tomar z menor que 30 m para el Caso 1 en exposición A, ni menos que 10 m para el caso 1 en exposición B.
- α y z_g se obtienen de la Tabla 4.
- Se permite la interpolación lineal para valores intermedios de la altura z. Las categorías de exposición están definidas en el artículo 5.6.

Fuente: INTI [1]

Figura 3. 10 Coeficiente de Exposición para la presión dinámica
(Tabla 5 de INTI [1])

3.3.5.4. Determinación del factor topográfico K_{zt}

DEFINICIONES:

Loma: Con respecto a los efectos topográficos, una cresta de colina alargada caracterizada por fuertes relieves en dos direcciones. (Ver **Figura 3.11**).

Escarpa: Con respecto a los efectos topográficos, un farallón o pendiente fuerte que por lo general separa dos áreas de pendiente suave. (Ver **Figura 3.11**).

Colina: Con respecto a los efectos topográficos, una superficie de terreno caracterizada por fuertes relieves en cualquier dirección horizontal. (Ver **Figura 3.11**).

La variación de la velocidad del viento debido a la topografía se especifica en el artículo **5.7.1** de la Norma INTI [1]. Los efectos del aumento de la velocidad del viento sobre lomas, escarpas y colinas aisladas que constituyen cambios abruptos en la topografía general en cualquier categoría de exposición, se deben incluir en el diseño toda vez que los edificios y otras condiciones del terreno y localización de las estructuras verifiquen los siguientes aspectos:

1. La loma, escarpa o colina se encuentra aislada y sin obstrucciones a barlovento generadas por otros rasgos topográficos de similar altura, en una distancia igual a 100 veces la altura del rasgo topográfico **100 H** ó **3000 m**, según cuál sea el menor valor. Esta distancia se medirá horizontalmente desde el punto en el cual se determina la altura **H** de la loma, escarpa o colina.
2. La loma, escarpa o colina sobresale un factor de dos o más veces la altura de cualquier rasgo topográfico del terreno a barlovento, dentro de un cuadrante cualquiera de radio igual a **3000 m**.
3. La estructura se localiza como se indica en las **Figuras 3.11 y 3.12**. En la mitad superior de una loma o colina o cerca del borde de una escarpa.
4. $H/L_h \geq 0,2$
5. $H \geq 5$ m para exposiciones **C** y **D** y $H \geq 20$ m para exposiciones **A** y **B**.

H Altura de la loma o escarpa en la **Figura 3.11**, en m.

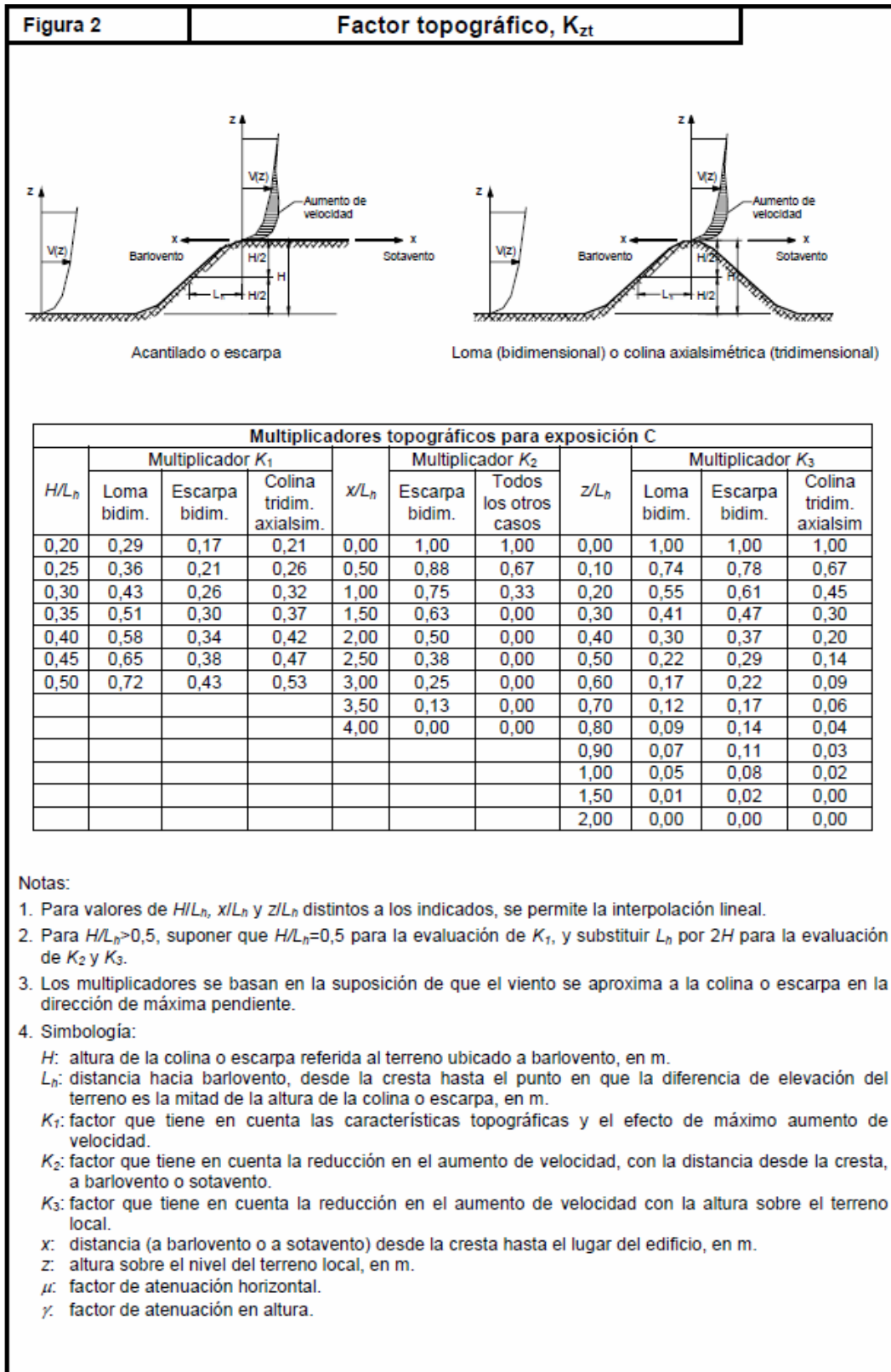
L_h Distancia en la dirección de barlovento, medida desde la cresta de la colina o escarpa según la **Figura 3.11** hasta el punto en que la diferencia de elevación del terreno es la mitad de la altura de la colina o escarpa, en m.

El efecto del aumento de la velocidad del viento se debe incluir en el cálculo de las cargas de viento de diseño mediante el **factor topográfico K_{zt}** que se especifica en el artículo **5.7.2** de la Norma INTI [1].

$$K_{zt} = (1 + K_1 \cdot K_2 \cdot K_3)^2 \quad (3.1)$$

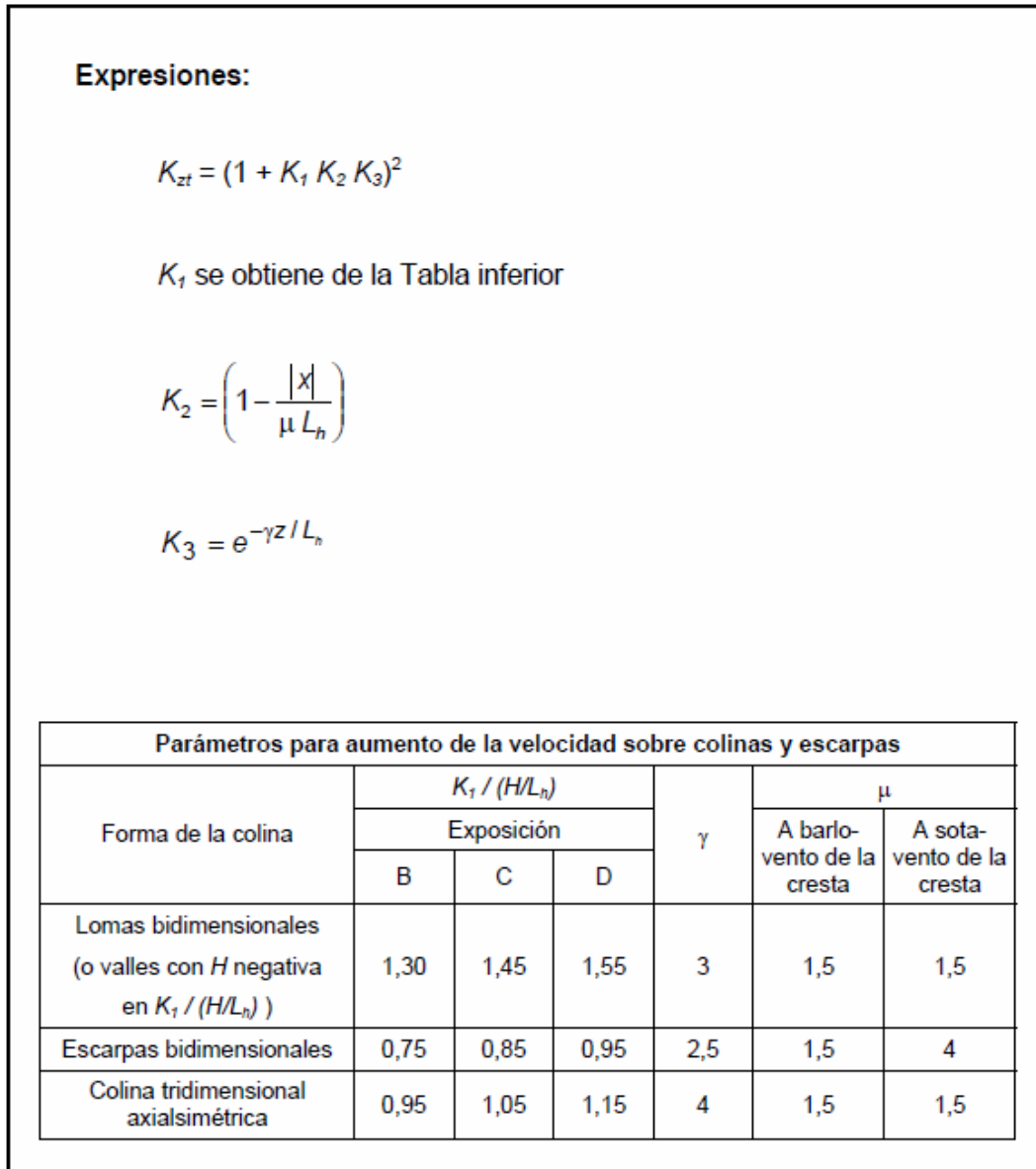
Ecuación (1) de INTI [1]

Donde K_1 , K_2 y K_3 se incluyen en la Figuras 3.11 y 3.12.



Fuente: INTI [1]

Figura 3. 11 Factor topográfico
(Figura 2 de INTI [1])



Fuente: INTI [1]

Figura 3. 12 Factor topográfico
(Figura 2 cont. de INTI [1])

3.3.5.5. Determinación del Factor de efecto de ráfaga G

DEFINICIONES:

Factor de efecto de ráfaga, G : Factor que tiene en cuenta los efectos de carga en la dirección del viento debidos a la interacción estructura-turbulencia del viento.

Edificios y otras estructuras rígidos: Un edificio u otra estructura cuya frecuencia natural es mayor o igual que **1 Hertz**.

Para las estructuras rígidas el **factor de efecto de ráfaga** G , especificado en el artículo **5.8.1** de la Norma INTI [1], se debe adoptar igual a **0,85** o se debe determinar mediante la expresión:

$$G = 0,925 \cdot \left(\frac{1 + 1,7 \cdot g_Q \cdot I_z \cdot Q}{1 + 1,7 \cdot g_v \cdot I_z} \right) \quad (3.2)$$

Ecuación (2) de INTI [1]

Donde:

$$I_z = c \cdot \left(\frac{10}{z} \right)^{1/6} \quad (3.3)$$

Ecuación (3) de INTI [1]

Siendo:

- I_z Intensidad de la turbulencia a la altura \bar{z} .
 \bar{z} Altura equivalente de la estructura (**0,6h** pero no menor que z_{min} (Ver Figura 3.13) para todos los edificios de altura h).

Los valores de z_{min} y c están indicados para cada tipo de exposición en la **Figura 3.13**. Las magnitudes g_Q y g_v se adoptarán igual a **3,4**. La respuesta base Q está dada por:

$$Q = \frac{1}{\sqrt{1 + 0,63 \cdot \left(\frac{b+h}{L_z} \right)^{0,63}}} \quad (3.4)$$

Ecuación (4) de INTI [1]

Donde:

- b Dimensión horizontal de un edificio medida normalmente a la dirección del viento, en m.
 h Altura media de la cubierta de un edificio o altura de otra estructura, excepto para un ángulo de la cubierta θ menor o igual a 10° en que se usará la altura del alero, en m.
 L_z Escala de longitud integral de la turbulencia a la altura equivalente.

$$L_z = \ell \cdot \left(\frac{\bar{z}}{10} \right)^{\bar{\epsilon}} \quad (3.5)$$

Ecuación (5) de INTI [1]

Donde ℓ y $\bar{\epsilon}$ están indicados en la **Figura 3.13**.

Tabla 4		Constantes de exposición del terreno								
Exposición	α	Z_g (m)	\hat{a}	\hat{b}	$\bar{\alpha}$	\bar{b}	c	ℓ (m)	$\bar{\varepsilon}$	Z_{min} (m)
A	5,0	457	1/5	0,64	1/3,0	0,30	0,45	55	1/2,0	18,3
B	7,0	366	1/7	0,84	1/4,0	0,45	0,30	98	1/3,0	9,2
C	9,5	274	1/9,5	1,00	1/6,5	0,65	0,20	152	1/5,0	4,6
D	11,5	213	1/11,5	1,07	1/9,0	0,80	0,15	198	1/8,0	2,1

Z_{min} : altura mínima utilizada para asegurar que la altura equivalente \bar{Z} es mayor que $0,6h$ ó Z_{min} . Para edificios con $h \leq Z_{min}$, \bar{Z} se debe tomar como Z_{min} .

Fuente: INTI [1]

Figura 3. 13 Constante de exposición del terreno
(Tabla 4 de INTI [1])

3.3.5.6. Determinación de la clase cerramiento.

La determinación de la clase de cerramiento que se especifica en el artículo 5.9 INTI [1] no aplica a este proyecto Integrador.

3.3.5.7. Determinación del coeficiente presión interna GC_{pi}

La determinación de la clase de cerramiento que se especifica en el artículo 5.11.1 INTI [1] no se utiliza en este proyecto Integrador dado que no se aplica 5.9 INTI [1].

3.3.5.8. Determinación de los coeficientes de presión externa C_p

Los coeficientes de fuerza C_f se especifican en el artículo 5.11.3 INTI [1] están dados en la **Figura 3.14**.

Otras estructuras		Todo h		
Tabla 10	Coefficientes de fuerza, C_r	Chimeneas, tanques y estructuras similares		
Sección transversal	Tipo de superficie	h/D		
		1	7	25
Cuadrada (viento normal a la cara)	Todas	1,3	1,4	2
Cuadrada (viento según la diagonal)	Todas	1,0	1,1	1,5
Hexagonal u octogonal	Todas	1,0	1,2	1,4
Circular $(D\sqrt{q_z} > 5,3)$, D en m, q_z en N/m^2	Moderadamente suave	0,5	0,6	0,7
	Rugosa ($D'/D \cong 0,02$)	0,7	0,8	0,9
	Muy rugosa ($D'/D \cong 0,08$)	0,8	1,0	1,2
Circular $(D\sqrt{q_z} \leq 5,3)$, D en m, q_z en N/m^2	Todas	0,7	0,8	1,2

Notas:

1. La fuerza de viento de diseño se debe determinar en base al área A_r de la estructura proyectada sobre un plano normal a la dirección del viento. Se supone que la fuerza actúa paralelamente a la dirección del viento.
2. Se permite la interpolación lineal para valores de h/D distintos de los indicados.
3. Simbología:
 D : diámetro de la sección transversal circular y menor dimensión horizontal de la sección transversal cuadrada, hexagonal u octogonal a la altura considerada, en m;
 D' : profundidad de los elementos salientes tales como costillas y alerones, en m;
 h : altura de la estructura, en m; y
 q_z : presión dinámica evaluada a la altura z sobre el terreno, en N/m^2 .

Fuente: INTI [1]

Figura 3. 14 Coeficiente de Fuerza
(Tabla 10 de INTI [1])

3.3.5.9. Determinación de la presión dinámica q_z

La presión dinámica q_z , evaluada a la altura z , se debe calcular mediante la expresión que se especifica en el artículo 5.10 INTI [1]:

$$q_z = 0,613 \cdot K_z \cdot K_{zt} \cdot K_d \cdot V^2 \cdot I \left[\frac{N}{m^2} \right] \quad (3.6)$$

Ecuación (13) de INTI [1]

q_z Presión dinámica del viento sobre la estructura.

K_z Coeficiente de exposición para la presión dinámica, **Figura 3.10** evaluado a la altura z .

K_{zt} Factor topográfico. (3.1).

- K_d Factor de direccionalidad del viento según **Figura 3.3**
 V Velocidad básica del viento obtenida de la **Figura 3.1.**
 I Factor de importancia obtenida de la **Figura 3.4.**

3.3.5.10. Determinación de la carga de viento de diseño F

Para determinar la carga de viento de diseño la Norma INTI CIRSOC 102 propone una forma de cálculo dentro del Método 2 (Procedimiento analítico) que llamaremos Procedimiento Analítico A y otro en la sección Anexo II que utiliza los cálculos básicos del procedimiento analítico, el que llamaremos Procedimiento analítico B; dicho esto no queda en claro la diferencia entre uno y el otro, así que aquí presentaremos los dos procedimientos y en la sección 3.3.7 del presente Proyecto Integrador determinaremos el que se utilizó en los cálculos numéricos.

Procedimiento Analítico A:

Cargas de viento de diseño sobre edificios abiertos y otras estructuras (Artículo 5.13 INTI [1])

La fuerza de viento de diseño F para edificios abiertos y otras estructuras se debe determinar mediante la siguiente expresión:

$$F = q_z G C_f A_f \quad [N] \quad (3.7)$$

Ecuación (20) de INTI [1]

Siendo:

- q_z Presión dinámica evaluada a la altura z del baricentro del área A_f ;
 G Factor de efecto de ráfaga;
 C_f Coeficiente de fuerza neta de la **Figura 3.14**;
 A_f Área proyectada normal al viento, excepto cuando C_f es referido al área de la superficie real, en m^2 .

Otra forma de cálculo que plantea la Norma para la determinación de la fuerza de viento en estructuras con un cierto grado de esbeltez se encuentra en la sección ANEXO II de la Norma INTI [1] y se presenta a continuación.

Procedimiento Analítico B:

Coefficientes de fuerza para estructuras o elementos estructurales con sección transversal uniforme (ANEXO II INTI [1])

Las cargas de viento F sobre estructuras o partes de estructuras con relaciones de esbeltez $8 \leq \ell/b < 40$ se determinarán utilizando las siguientes expresiones:

$$F = GC_f A_f K_e q_z \quad [N] \quad (3.8)$$

Ecuación (II.1) de INTI [1]

$$F_x = GC_{fx} A_f K_e q_z \quad [N] \quad (3.9)$$

Ecuación (II.2) de INTI [1]

$$F_y = GC_{fy} A_f K_e q_z \quad [N] \quad (3.10)$$

Ecuación (II.3) de INTI [1]

Siendo:

- q_z Presión dinámica evaluada a la altura z del baricentro del área A_f ;
- G Factor de efecto de ráfaga;
- C_f Coeficiente de fuerza neta de la **Figura 3.15**.
- C_{fx}, C_{fy} Coeficientes de fuerza en la dirección de los ejes x , y de la estructura o elemento estructural. No aplica debido a la doble simetría de la sección circular.
- A_f Área proyectada normal al viento = $b \cdot \ell$
- b Dimensión transversal definida en la **Figura 3.15**.
- ℓ Longitud de la estructura o elemento.
- K_e Factor de corrección por esbeltez de la **Figura 3.16**.

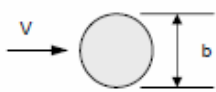

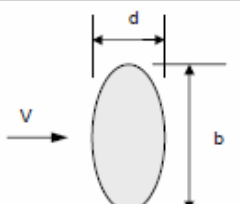
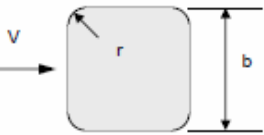
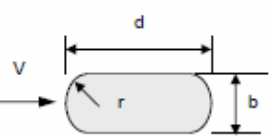
Los coeficientes de fuerza para formas prismáticas con secciones transversales redondeadas en las aristas se obtendrán de la **Figura 3.15**, en función de $V_z \cdot b$. Para valores intermedios de $V_z \cdot b$ se acepta la interpolación lineal. La velocidad V_z a la altura z se calcula mediante:

$$V_z = \left(\frac{z}{10} \right)^\alpha V \quad (3.11)$$

Ecuación (II.7) de INTI [1]

Siendo:

- V_z Velocidad de ráfaga a la altura z .
- z Altura del baricentro del área A_f , en metros.
- V Velocidad básica del viento obtenida de la **Figura 3.1**.
- α Exponente para la ley potencial de la velocidad de ráfaga de 3 seg, **Figura 3.13**.

Tabla II.1 - Coeficientes de fuerza para formas prismáticas redondeadas		
Forma de la sección transversal	Coeficiente de fuerza C_f	
	$V_b b < 4 \text{ m}^2/\text{s}$	$V_b b > 10 \text{ m}^2/\text{s}$
 <p>Rugosa o con salientes</p> <p>Lisa</p>	1,2	1,2
 <p>Elipse</p> <p>$\frac{b}{d} = \frac{1}{2}$</p>	0,7	0,3
 <p>Elipse</p> <p>$\frac{b}{d} = 2$</p>	1,7	1,5
 <p>$\frac{b}{d} = 1 ; \frac{r}{b} = \frac{1}{3}$</p> <p>$\frac{b}{d} = 1 ; \frac{r}{b} = \frac{1}{18}$</p>	1,2	0,6
 <p>$\frac{b}{d} = \frac{1}{2} ; \frac{r}{b} = \frac{1}{2}$</p>	0,4	0,3

Fuente: INTI [1]

Figura 3. 15 Coeficientes de fuerza para formas prismáticas redondeadas (Tabla II.1 de INTI [1])

Tabla II.6 - Factor de corrección por relación de esbeltez	
Relación de esbeltez $\left(\frac{\ell}{b}\right)$	Factor de corrección K_e
8	0,7
14	0,8
30	0,9
40 o más	1,0

Nota : Para valores intermedios de la relación de esbeltez $\left(\frac{\ell}{b}\right)$, se permite la interpolación lineal.

Fuente: INTI [1]

Figura 3. 16 Factor de corrección por relación de esbeltez (Tabla II.6 de INTI [1])

3.3.6. Cálculo de desplazamiento máximo en dirección del viento

Para el cálculo de desplazamientos en dirección de viento la norma INTI [1] provee un método que se desarrollara a continuación.

$$X_{\max}(z) = \frac{\phi(z)\rho B h C_{fx} \hat{V}_z^2}{2m_1(2\pi n_1)^2} KG \quad (3.12)$$

Ecuación (C-4) de INTI [1]

Siendo:

- $\phi(z)$ La forma del modo fundamental
- ξ El exponente del modo.
- ρ La densidad del aire.
- C_{fx} El coeficiente de fuerza medio en dirección del viento.
- G Factor de efecto ráfaga.
- n_1 Frecuencia natural en Hz.
- m_1 La masa modal

$$m_1 = \int_0^h \mu(z)\phi(z)^2 dz \quad (3.13)$$

Ecuación (C-5) de INTI [1]

$\mu(z)$ La masa por unidad de altura;

Factor de exposición:

$$K = (1,65)^{\hat{\alpha}} / [\hat{\alpha} + \xi + 1] \quad (3.14)$$

Ecuación (C-6) de INTI [1]

\hat{V}_z Velocidad de ráfaga de 3 segundos a la altura \bar{z} :

$$\hat{V}_z = \hat{b} \left(\frac{z}{10} \right)^{\hat{\alpha}} V \quad (3.15)$$

Ecuación (C-8) de INTI [1]

Donde V es la velocidad de ráfaga de **3 segundos** en exposición **C** a la altura de referencia Obtenida de la **Figura 3.1**; \hat{b} y $\hat{\alpha}$ están dados en la **Figura 3.13**:

- \hat{b} Factor de velocidad de ráfaga.
- $\hat{\alpha}$ Inversa del exponente de la ley potencial de la velocidad de ráfaga.

3.3.7. Flujograma del procedimiento de la Norma INTI CIRSOC 102

La Norma INTI [1] que aquí se desarrolla puede ser expuesta en forma grafica, para su mejor comprensión, a través de un diagrama de flujo en el que se puede observar las relaciones entre todos los parámetros intervinientes en el proceso de cálculo para la obtención de la carga de viento sobre la estructura de análisis.

Vale aclarar que en la determinación de la carga de viento de diseño F se utilizará el método propuesto en el ANEXO II de la Norma INTI [1] (Procedimiento analítico B), consideramos que es la más acertada, debido a que la estructura de análisis es un cilindro esbelto de sección circular.

En la **Figura 3.17** del presente capitulo se puede observar el flujograma del método utilizado para obtener los valores de presión dinámica; en la **Figura 3.18** se encuentra el diagrama de flujo del método para obtener los valores de la fuerza aerodinámica que afecta a la estructura, según lo establece la Norma INTI [1].

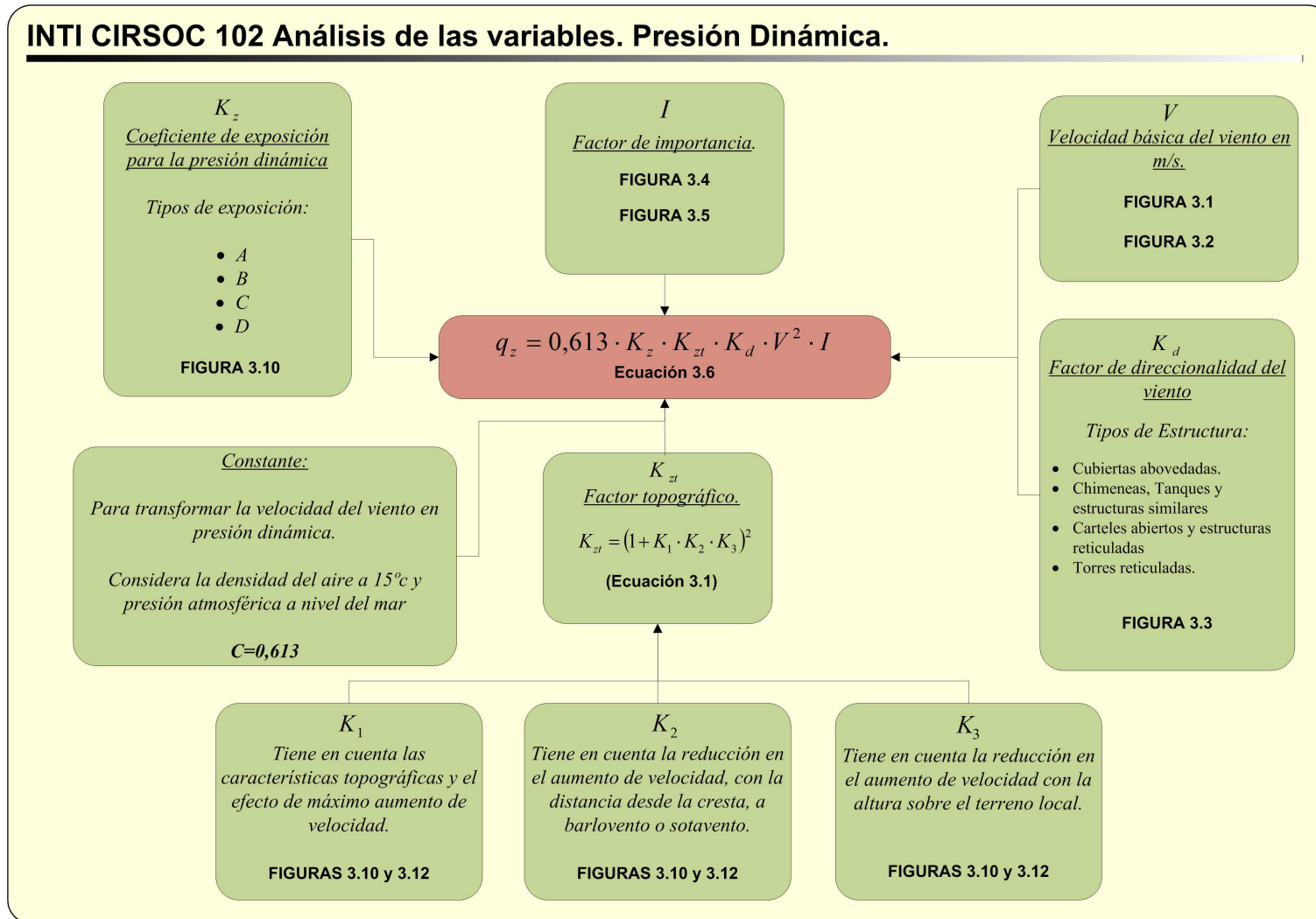


Figura 3. 17 Flujoograma para determinar la presión dinámica según INTI [1]

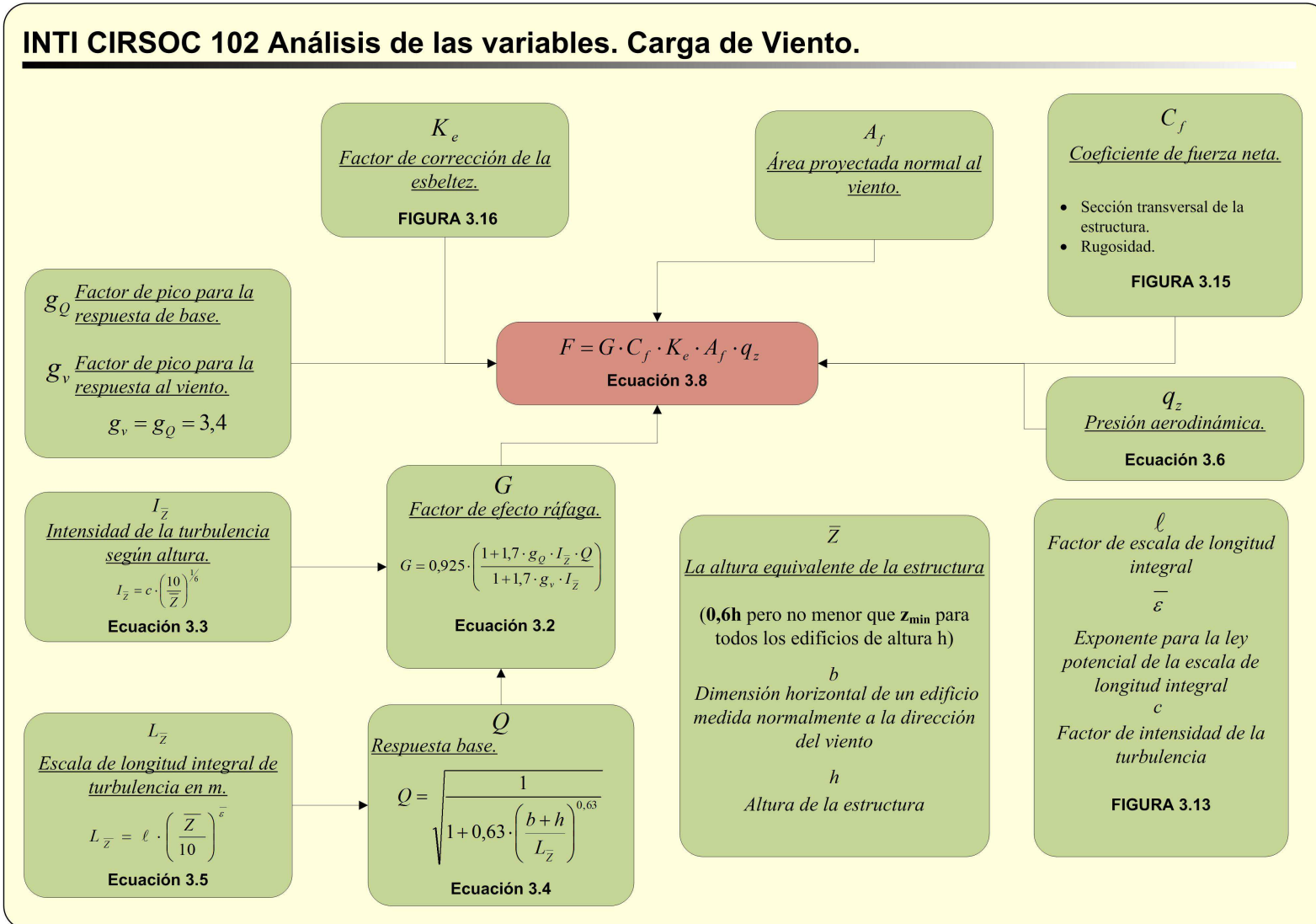


Figura 3. 18 Flujoograma para determinar la Carga de Viento según INTI [1]

3.4. Análisis a través de Norma DIN 1055-4

A continuación se realiza un análisis similar al expuesto anteriormente sobre las Norma Nacional INTI [1] pero utilizando la Norma Alemana DIN 1055-4 [2] para estructuras bajo carga de viento.



3.4.1. La velocidad del viento y la presión de la velocidad

Definiciones

(Artículo 7.1 Norma DIN [2])

- (1) La presión q que se asocia con una velocidad de viento v es igual a:

$$q = \frac{\rho}{2} v^2 \quad (3.16)$$

Ecuación 2 Norma DIN [2]

- (2) La presión q que se asocia con una velocidad del viento v , la densidad del aire depende de la temperatura, a menos que se disponga lo contrario, se utiliza un valor de $\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$. Este valor se obtiene a una presión atmosférica de 1.013 hPa (a nivel del mar) y una temperatura de 10°C . Esto es:

$$q = \frac{v^2}{1600} \quad (3.17)$$

Ecuación 3 Norma DIN [2]

Para las unidades de presión q en kN/m , y de velocidad del viento v en m/s .

- (3) En el mapa de la zona eólica en el **Anexo A** de la Norma DIN [2] (3.4.3.3.1) se encuentran los valores de velocidad del viento promedio de referencia v_{ref} y sus presiones correspondientes q_{ref} . Los valores característicos promedio se aplican durante un período de 10 minutos con una probabilidad de excedencia en el plazo de un año de 0,02. La velocidad v_{ref} se aplica a una altura de 10 metros, en un terreno plano abierto.
- (4) Las presiones de velocidad se aplican a terreno plano. En obras expuestas, puede ser necesario un aumento según el **Anexo B** de la Norma DIN [2] (ver 3.4.3.3.3).

3.4.2. Vibraciones inducidas por Ráfagas

(Artículo 11.1 Norma DIN [2])

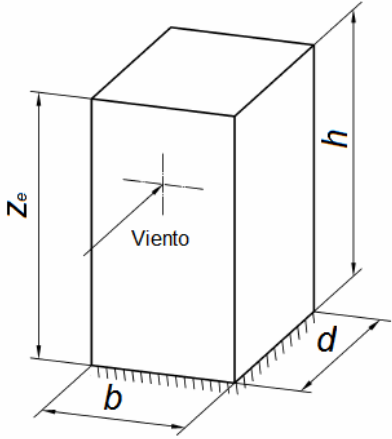
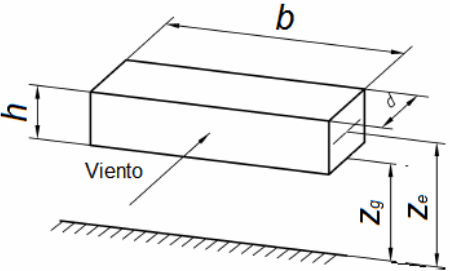
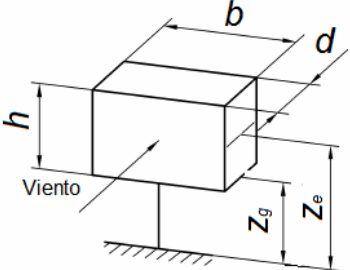
- (1) Se pueden registrar picos de resonancia en las construcciones susceptibles a vibraciones, estos son producidas por las acciones de las fuerzas de las ráfagas del viento promedio que son magnificadas por el factor G .
- (2) El factor de respuesta de ráfaga calcula la respuesta de resonancia dinámica de la estructura y la excitación por la turbulencia del viento en la zona de captación de la carga.
- (3) El factor de respuesta de ráfaga G se determina de acuerdo con el Anexo C de la Norma DIN [2] (ver 3.4.2.1).

3.4.2.1. Método para determinar el factor de respuesta de ráfaga

Generalidades:

(Artículo C.1 Norma DIN [2])

- (1) Un proceso más cercano para determinar el efecto resultante de las ráfagas **a favor del viento incluidas las ráfagas que excitan vibraciones en resonancia**, es determinado por una carga estática equivalente. Esto se basa en que la carga estática media del viento se incrementa con el factor de respuesta de ráfaga que es un factor dinámico. El método es aplicable para todas las fuerzas del viento, así como secciones distribuidas de las fuerzas del viento, pero no por la presión del viento.
- (2) Hace hincapié en la dirección del viento, no tiene en cuenta los efectos transversales a la dirección del viento, que son resueltos generalmente por **carga ficticia**, a menos que la susceptibilidad a la vibración en la ***dirección transversal sea mayor que en la dirección longitudinal*** o hay *resonancia debido a desprendimiento de vórtice* de acuerdo con el Anexo D de la Norma DIN [2] (ver 3.4.3.3.3).
- (3) El método para determinar el factor de respuesta ráfagas de acuerdo con el artículo C.3 de la Norma DIN [2] (ver 3.4.3.1) se aplica a los sistemas estructurales verticales, teniendo en cuenta la forma de onda básica. Aproximadamente se puede utilizar para sistemas de apoyo horizontales con forma de onda similar (ejemplo haz de un solo tramo). Los casos estándar que se muestran en la **Figura 3.19** se aplican bajo la condición de que se puede asumir el comportamiento estructural lineal elástico.
- (4) El método no es para sistemas continuos, así como también para mástiles arriostradas, puentes colgantes y puentes de arco.

<p>Predominantemente la estructura se extiende verticalmente. (Ej. Los edificios, chimeneas, torres, etc.)</p> $z_e = 0,6 \cdot h$ $\geq z_{\min}$	
<p>Predominantemente el edificio se extiende horizontalmente. (Ej. Los puentes, líneas aéreas, etc.)</p> $z_e = z_g + 0,5 \cdot h$ $\geq z_{\min}$	
<p>Estructura puntiforme (por ejemplo, lámparas de arco, tanques elevados, etc.)</p> $z_e = z_g + 0,5 \cdot h$ $\geq z_{\min}$	
<p>z_{\min} es la altura mínima en la Tabla B.2 o B.3.</p>	

Fuente: DIN [2]

Figura 3. 19 Altura efectiva z_e
(Figura C.1 Norma DIN [2])

3.4.3. Carga estática equivalente

(Artículo C.2 Norma DIN [2])

(1) La carga estática equivalente de la energía eólica total es:

$$F_w = G \cdot c_f \cdot q_m(z) \cdot A_{ref} \quad (3.18)$$

Ecuación C.1 Norma DIN [2]

Donde:

- c_f *Coeficiente de fuerza aerodinámica* (artículo 12 de la Norma DIN [2]).
- G *Factor de respuesta de ráfaga según el artículo C.3 de la Norma DIN [2] (ver 3.4.3.1).*

- $q_m(z_e)$ Presión media de velocidad en altura z_e sobre el suelo.
 z_e Altura efectiva según la **Figura 3.19**.
 A_{ref} Superficie de referencia para el coeficiente de fuerza (Sección 12 de la Norma DIN [2]), (**ver 3.4.3.2**).

- (2) La carga estática equivalente de la energía eólica en el tramo j del eje estructura es:

$$F_{wj} = G \cdot c_{ff} \cdot q_m(z_j) \cdot A_j \quad (3.19)$$

Ecuación C.2 Norma DIN [2]

Además de la ecuación **3.18** resulta ser:

- z_j Altura media de la sección j por encima del suelo.
 c_{ff} Coeficiente de fuerza aerodinámica para la sección j .
 A_j Área de la sección j enfrentada al viento.

- (3) Los resultados de la presión promedio q_m de la velocidad del viento media v_m son:

$$q_m = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_m^2 \quad (3.20)$$

Ecuación C.3 Norma DIN [2]

Donde:

- v_m Velocidad media del viento según las **Figuras 3.33 y 3.34**;
 ρ Densidad del aire, $\rho = 1,25 \text{ Kg/m}^3$

La intensidad de la turbulencia y la velocidad media se dan como una función de la altura sobre el nivel del suelo en la **Figura 3.34** Donde v_{ref} está en el mapa de zonas de viento que puede verse en la **Figura 3.31**. Como regla general puede ser utilizado en la zona de viento en las categorías de terreno de I a IV, pero está referenciada a la categoría de terreno II.

Los valores son válidos para terreno plano. Se pueden registrar influencias de la topografía, si es el caso, en conformidad con el Anexo B de la Norma DIN [2] (**ver 3.4.3.3.3**).

3.4.3.1. Factor de respuesta de ráfaga

(Artículo C.3 Norma DIN [2])

- (1) El factor de respuesta de ráfaga se calcula como sigue:

$$G = 1 + 2 \cdot g \cdot I_v(z_e) \cdot \sqrt{Q_0^2 + R_x^2} \quad (3.21)$$

Ecuación C.4 Norma DIN [2]

Donde:

- $I_v(z_e)$ Intensidad de la turbulencia en la altura efectiva de las **Figuras 3.33 y 3.34.**
 g Factor de cresta que se hace referencia en el párrafo (2) de esta sección de la Norma DIN [2].
 Q_0 Componente cuasi-estática (acción básica de las ráfagas) la respuesta de ráfaga en el párrafo (5) de esta sección.
 R_x Porción de resonancia de la respuesta debido a la respuesta de ráfaga en el párrafo (6) de esta sección.

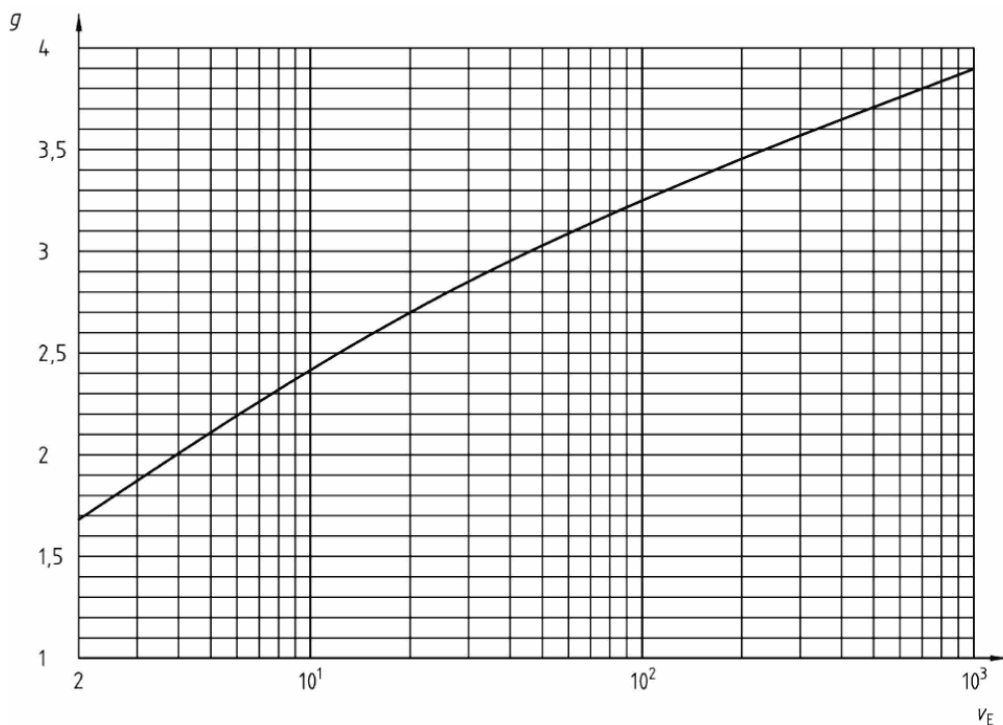
(2) El factor de cresta g se muestra en la **Figura 3.20** y se define como sigue:

$$g = \sqrt{2 \cdot \ln(v_E \cdot t)} + \frac{0,6}{\sqrt{2 \cdot \ln(v_E \cdot t)}} \quad (3.22)$$

Ecuación C.5 Norma DIN [2]

Donde:

- t Período promedio de la velocidad de referencia v_{ref} ($t = 600 \text{ s} = 10 \text{ min}$).
 v_E Valor esperado de la frecuencia de la reacción de las ráfagas de acuerdo con la ecuación **3.23**.



Fuente: DIN [2]

Figura 3. 20 Altura efectiva z_e
(Figura C.2 Norma DIN [2])

(3) El valor esperado de la respuesta de frecuencia ráfagas v_E se define como:

$$v_E = \sqrt{\frac{v_{E,0}^2 \cdot Q_0^2 + n_{1,x}^2 \cdot R_x^2}{Q_0^2 + R_x^2}} \quad (3.23)$$

Ecuación C.6 Norma DIN [2]

Donde:

$n_{1,x}$ *Primera frecuencia natural, en Hz, de la vibración de la estructura en la dirección del viento (dirección x). Las fórmulas aproximadas se dan en el Anexo F de la Norma DIN [2] (ver 3.4.6);*

$v_{E,0}$ *Valor esperado de la frecuencia en Hz, la respuesta de ráfaga de la estructura suponiendo un comportamiento estructural cuasi-estático según la ecuación 3.24.*

Ésta se define como sigue:

$$v_{E,0} = \frac{v_m(z_e)}{L_t(z_e)} \cdot \frac{1}{1,11 \cdot S^{0,615}} \quad (3.24)$$

Ecuación C.7 Norma DIN [2]

Donde:

$$S = 0,46 \cdot \left[\frac{b+h}{L_t(z_e)} \right] + 1,58 \cdot \left[\frac{\sqrt{b \cdot h}}{L_t(z_e)} \right] \quad (3.25)$$

Ecuación C.8 Norma DIN [2]

b, h *Anchura, la altura del edificio de acuerdo con la Figura 3.19;*

$v_m(z_e)$ *Velocidad media del viento en $z = z_e$ en las Figura 3.33 y 3.34;*

$L_t(z_e)$ *Componente de la longitud integral de la turbulencia en la dirección del viento media para $z = z_e$ según la ecuación 3.26.*

(4) La longitud integral de la turbulencia $L_t(z)$ se muestra en la **Figura 3.22** y se definen como sigue:

$L_t(z) = 300 \cdot (z/300)^\varepsilon$	$(L_t, z \text{ en metros})$	para $z_{\min} \leq z \leq 300$	(3.26)
$L_t(z) = 300 \cdot (z_{\min}/300)^\varepsilon$	$(L_t, z_{\min} \text{ en metros})$	para $z \leq z_{\min}$	

Ecuación C.9 Norma DIN [2]

Donde:

ε *Exponente de la Figura 3.21;*

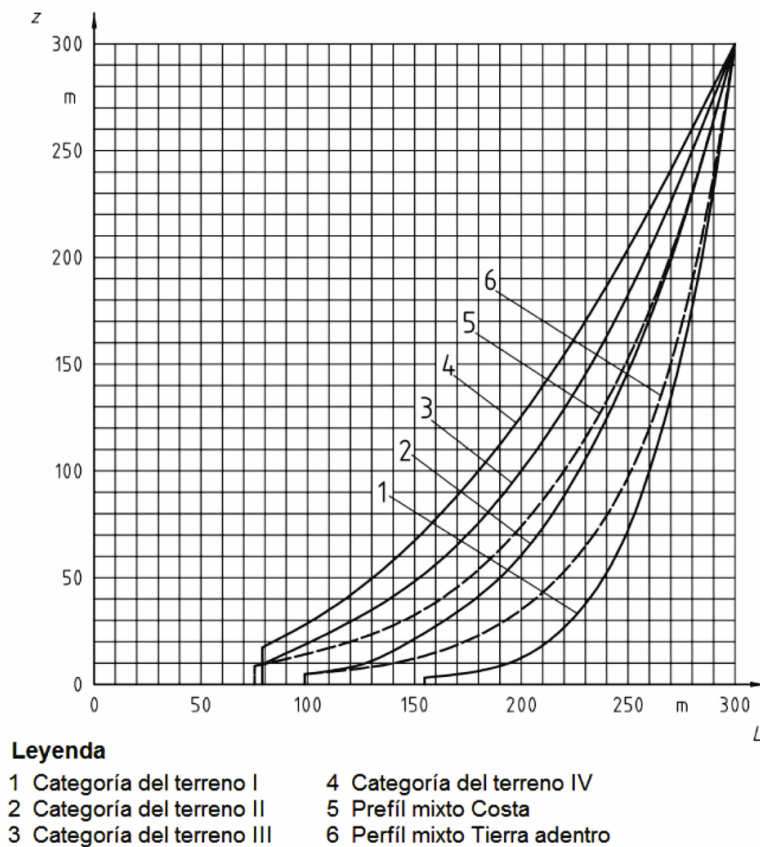
z_{\min} *Atura mínima según las Figura 3.33 y 3.34.*

Por el lado de la seguridad, en las zonas costeras del Mar Báltico y en las islas del Norte corresponden a la categoría del terreno I, los sitios del interior fueron asumidos como categoría II.

Categoría del terreno	I	II	III	IV	Perfil Mixto Costa	Perfil Mixto Tierra adentro
	0,13	0,26	0,37	0,46	$\left(\frac{1}{2000z}\right)^{0,15}$	$\left(\frac{1}{3000z}\right)^{0,10}$

Fuente: DIN [2]

Figura 3. 21 Exponente ϵ
(Tabla C.1 Norma DIN [2])



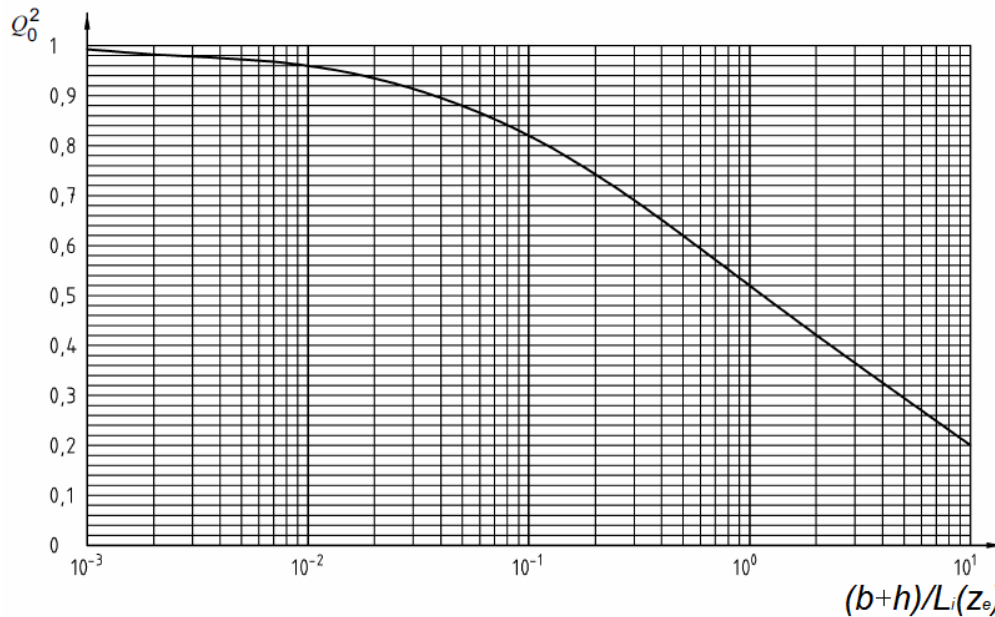
Fuente: DIN [2]

Figura 3. 22 Longitud integral de la turbulencia $L_i(z)$
(Figura C.3 Norma DIN [2])

- (5) El cuadrado de la acción básica de las ráfagas Q_0 se muestra en la **Figura 3.23** y se define como sigue:

$$Q_0^2 = \frac{1}{1 + 0,9 \cdot \left(\frac{b+h}{L_i(z_e)}\right)^{0,63}} \quad (3.27)$$

Ecuación C.10 Norma DIN [2].



Fuente: DIN [2]

Figura 3.23 Cuadrado de la acción básica de las ráfagas Q_0^2
(Figura C.4 Norma DIN [2])

- (6) La proporción de respuesta de resonancia al cuadrado de la respuesta de ráfaga R_x^2 se define como sigue:

$$R_x^2 = \frac{\pi^2}{2 \cdot \delta} \cdot R_N \cdot R_h \cdot R_b \quad (3.28)$$

Ecuación C.11 Norma DIN [2].

Donde:

δ *Decremento logarítmico de las oscilaciones en la dirección del viento.* Los valores se especifican en el anexo F de la Norma DIN [2] (ver 3.4.6);

R_N *Función de densidad espectral adimensional de la velocidad del viento en el punto de resonancia $n = n_{1,x}$* según la **ecuación 3.29**;

R_h, R_b *Función de transferencia aerodinámica* según las **ecuaciones 3.30 y 3.31**.

- (7) La función adimensional de densidad espectral R_N se muestra en la **Figura 3.24** y se define como sigue:

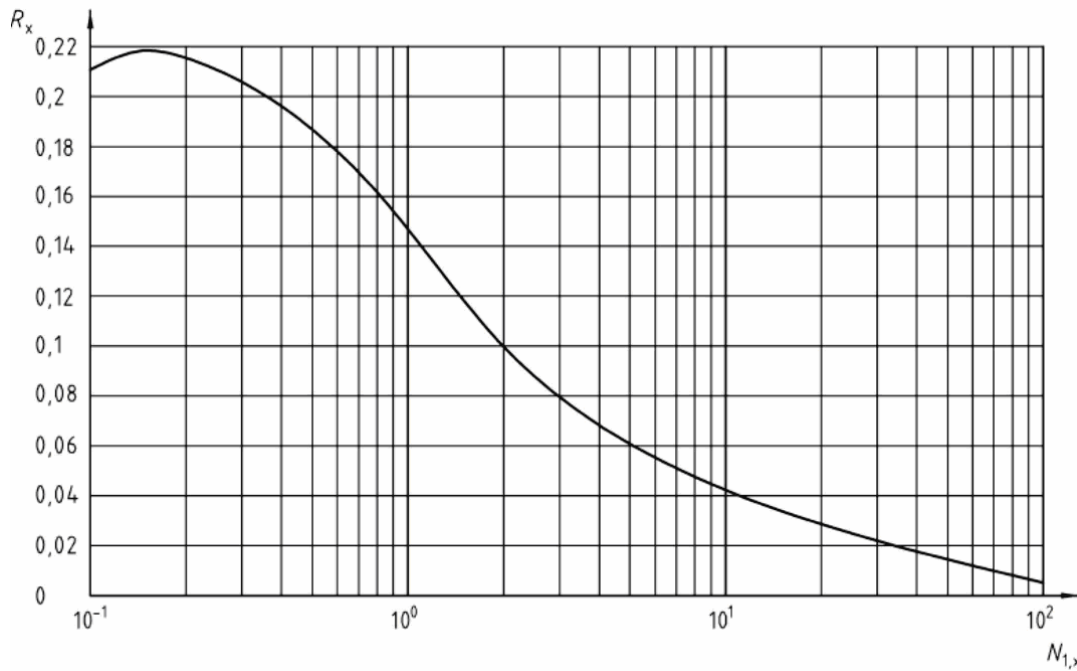
$$R_N = \frac{6,8 \times N_{1,x}}{(1 + 10,2 \times N_{1,x})^{5/3}} \quad (3.29)$$

Ecuación C.12 Norma DIN [2].

Donde:

$$N_{1,x} = \frac{n_{1,x} \cdot L_i(z_e)}{v_m(z_e)} \quad (3.30)$$

Ecuación C.13 Norma DIN [2].



Fuente: DIN [2]

Figura 3. 24 Función densidad espectral adimensional R_N
(Figura C.5 Norma DIN [2])

- (8) Las funciones de transferencia aerodinámicas R_h y R_b se dan para la forma fundamental con la misma dirección (deformación unidireccional). Ellos están calculados en base a R_l de la siguiente manera:

$R_l = \frac{1}{\eta} - \frac{1}{2\eta^2} \cdot (1 - e^{-2\eta})$	Para $\eta > 0$	(3.31)
$R_l = 1$	Para $\eta = 0$	

Ecuación C.14 Norma DIN [2].

Donde:

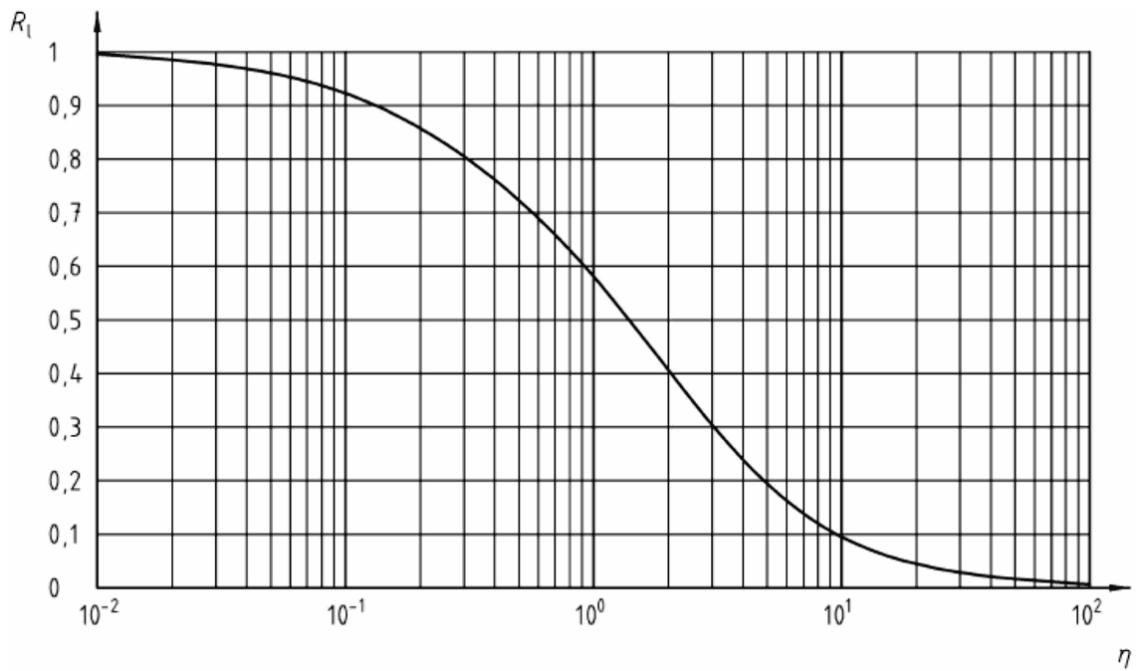
$$R_h = R_l \quad \text{Con } \eta = \frac{4,6 \cdot N_{1,x} \cdot h}{L_i(z_e)} \quad (3.32)$$

Ecuación C.15 Norma DIN [2].

$$R_b = R_l \quad \text{Con } \eta = \frac{4,6 \cdot N_{1,x} \cdot b}{L_i(z_e)} \quad (3.33)$$

Ecuación C.16 Norma DIN [2].

R_l se muestra en la **Figura 3.25**. Para formas modales de onda más precisas son necesarios estudios adicionales.



Fuente: DIN [2]

**Figura 3. 25 Función de transferencia aerodinámica
(Figura C.6 Norma DIN [2])**

3.4.3.2. Coeficiente de fuerza aerodinámica c_f

(Artículo 12.7.1 Norma DIN [2])

Cilindro circular.

(1) El coeficiente de fuerza c_f para un cilindro circular finito:

$$c_f = c_{f,0} \cdot \psi_\lambda \quad (3.34)$$

Ecuación 30 Norma DIN [2].

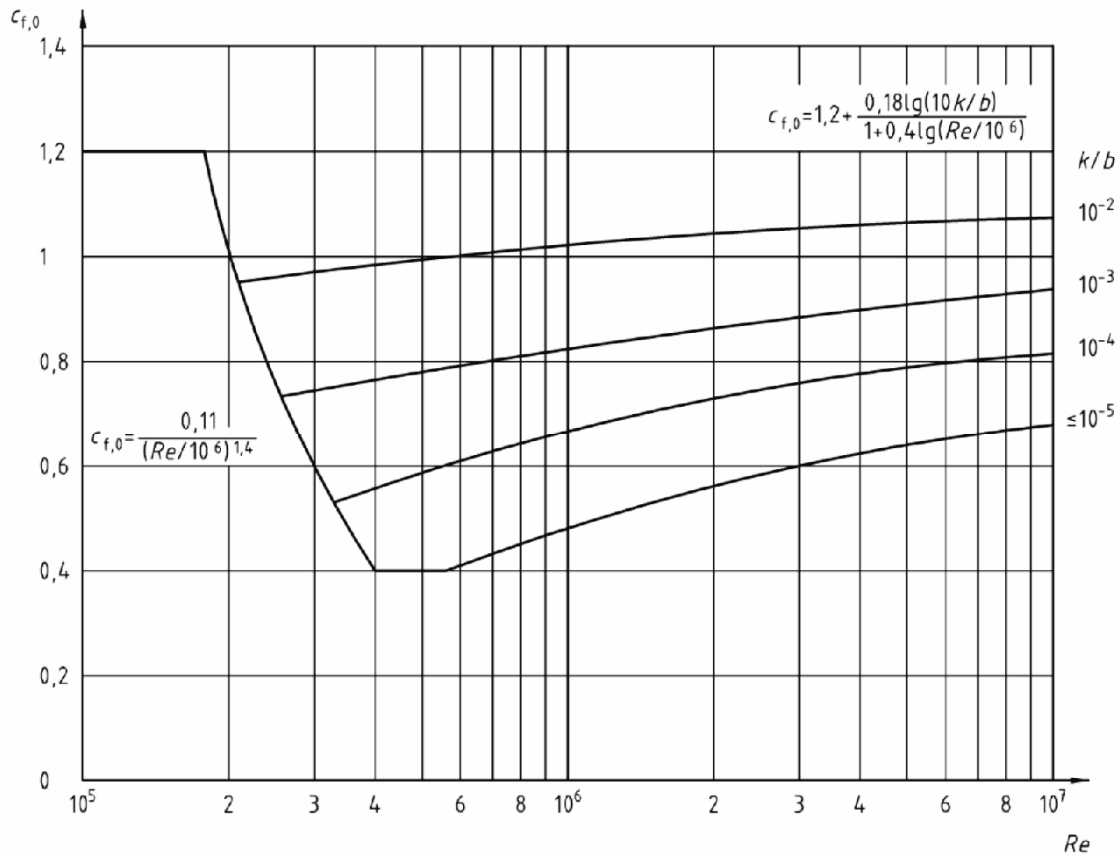
Donde:

$c_{f,0}$ Coeficiente de fuerza básica de un cilindro con la delgadez infinita véase la **Figura 3.26**;

ψ_λ Factor de reducción para dar cuenta la esbeltez véase **Figura 3.28**.

3.4.3.2.1. Coeficiente de fuerza básico.

El coeficiente de fuerza básica se da como una función de la rugosidad equivalente y el número de Reynolds en la **Figura 3.26**.



Fuente: DIN [2]

Figura 3. 26 Coeficiente de fuerza básica C_{f0} para cilindros con esbeltez infinita para diversas rugosidades equivalentes k/b (Figura 19 Norma DIN [2])

(2) El número de Reynolds es:

$$Re = \frac{v \cdot b}{\nu} \tag{3.35}$$

Ecuación 31 Norma DIN [2]

Con:

$$v = \sqrt{2 \cdot q / \rho} \tag{3.36}$$

Ecuación 32 Norma DIN [2]

Donde:

- ν Viscosidad cinemática. $\nu = 1,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
- q Presión debido a la velocidad;
- b Diámetro del cilindro en m;
- ρ Densidad del aire, en Kg/m^3 .

Los valores de rugosidad equivalente k se dan en la **Figura 3.27**.

(3) Para el alambre el coeficiente de fuerza básica c_{f0} es independiente del número de Reynolds y se establece como $c_{f0}=1,2$.

	Tipo de Superficie					
	Albañilería	Concreto Liso	Concreto Aspero	Madera	Acero	Acero (incluyendo cabezas de tornillos, etc)
k en mm	4	2	10	2	0,5	1

Fuente: DIN [2]

**Figura 3. 27 Rugosidad equivalente
(Tabla 11 Norma DIN [2])**

- (4) Para superficie acanalada con aleta altura h_R y la aleta de tono a , para $2h_R \leq a \leq 6 \times h_R$ aplica, k se puede configurar con la altura del nervio h_R . Para aletas de pie individuales con una separación de aletas $a > 6 \cdot h_R$ la rugosidad anteriormente definida ya no es aplicable.
- (5) El área de referencia A_{ref} debe determinarse según la ecuación 3.37, que se debe ajustar para b , el diámetro del cilindro.

$$A_{ref} = l \cdot b \quad (3.37)$$

Ecuación 29 Norma DIN [2]

Donde:

- l Longitud de la sección considerada;
- b Diámetro del cilindro.

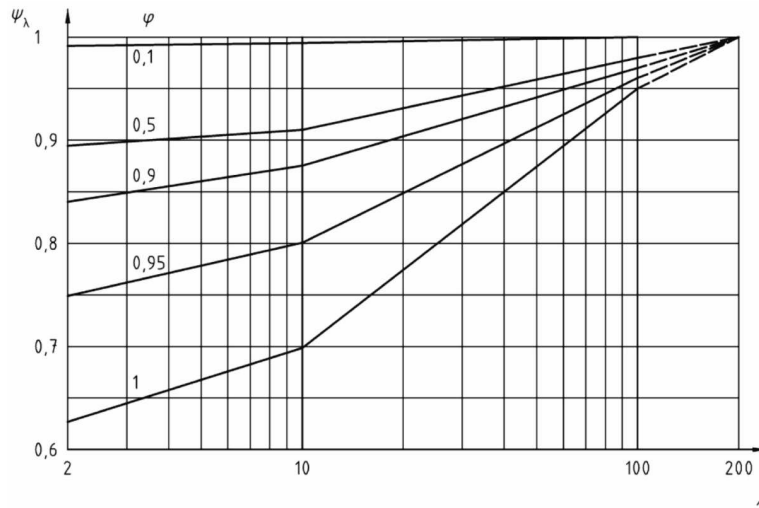
- (6) La altura de referencia z_e es igual a la altura del componente en estudio la sección sobre el nivel del suelo.

Para cilindros cerca de una superficie plana con una holgura relativa desde el suelo $z_e/b < 1,5$ se requieren consideraciones especiales.

3.4.3.2.2. Esbeltez efectiva y factor de reducción ψ_λ

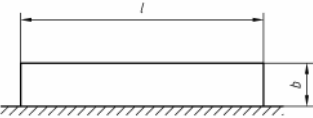
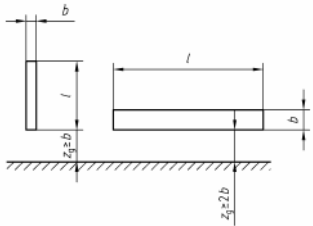
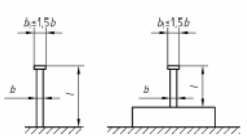
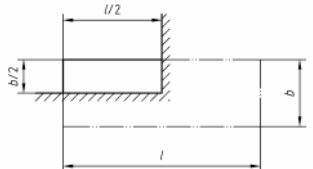
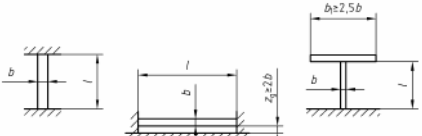
(Artículo 12.13 Norma DIN [2])

- (1) El factor de reducción ψ_λ para considerar la esbeltez se da en la **Figura 3.28** como una función de la esbeltez efectiva λ y para diferentes grados de solidez φ .
- (2) La esbeltez efectiva λ se define en la **Figura 3.29**.



Fuente: DIN [2]

Figura 3. 28 Factor de reducción ψ_λ , en dependencia de la esbeltez efectiva λ y para diferentes grados de solidez φ (Figura 26 Norma DIN [2])

Lfd. Nr	Ubicación del edificio, el flujo perpendicular al plano	Esbeltez efectiva λ
1	 Para $l > b$	$\lambda = l/b$ o $\lambda = 2$, El que sea mayor
2	 Para $b \leq l$	Por secciones transversales poligonales: Para $l \geq 50$ m es $\lambda = 1,4 l/b$ o $\lambda = 70$, El valor más pequeño es decisivo Para $l < 15$ m es $\lambda = 2 l/b$ o $\lambda = 70$, El valor más pequeño es decisivo
3	 Para $b \leq l$	Para cilindros circulares: Para $l \geq 50$ m es $\lambda = 0,7 l/b$ o $\lambda = 70$, El valor más pequeño es decisivo Para $l < 15$ m es $\lambda = l/b$ o $\lambda = 70$, El valor más pequeño es decisivo
4		Los valores intermedios se pueden interpolar linealmente.
5		Para $l \geq 50$ m es $\lambda = 0,7 l/b$ o $\lambda = 70$, El valor más grande es decisivo Para $l < 15$ m es $\lambda = l/b$ o $\lambda = 70$, El valor más grande es decisivo Los valores intermedios se pueden interpolar linealmente.

Fuente: DIN [2]

Figura 3. 29 Esbeltez efectiva λ para estructuras cilíndricas, triangulares, puentes y secciones rectangulares, estructuras de bordes filosos y reticulados (Tabla 16 Norma DIN [2])

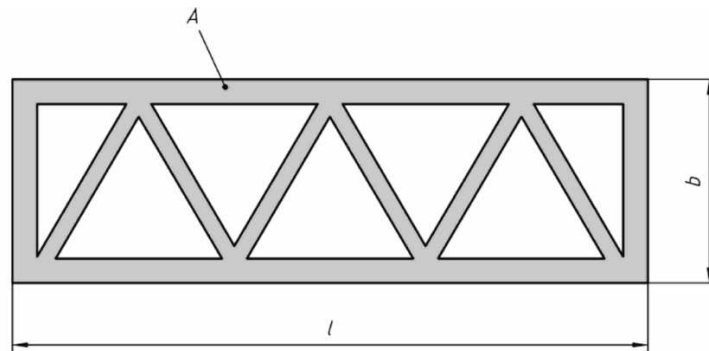
(3) El grado de solidez φ en **Figura 3.30** se define como sigue:

$$\varphi = A/A_c \quad (3.38)$$

Ecuación 45 Norma DIN [2]

Donde:

A Suma de las áreas proyectadas de las partes individuales;
 A_c Área encerrada. $A_c = b \cdot l$



Fuente: DIN [2]

Figura 3. 30 Definición del grado de solidez φ
(Figura 27 Norma DIN [2])

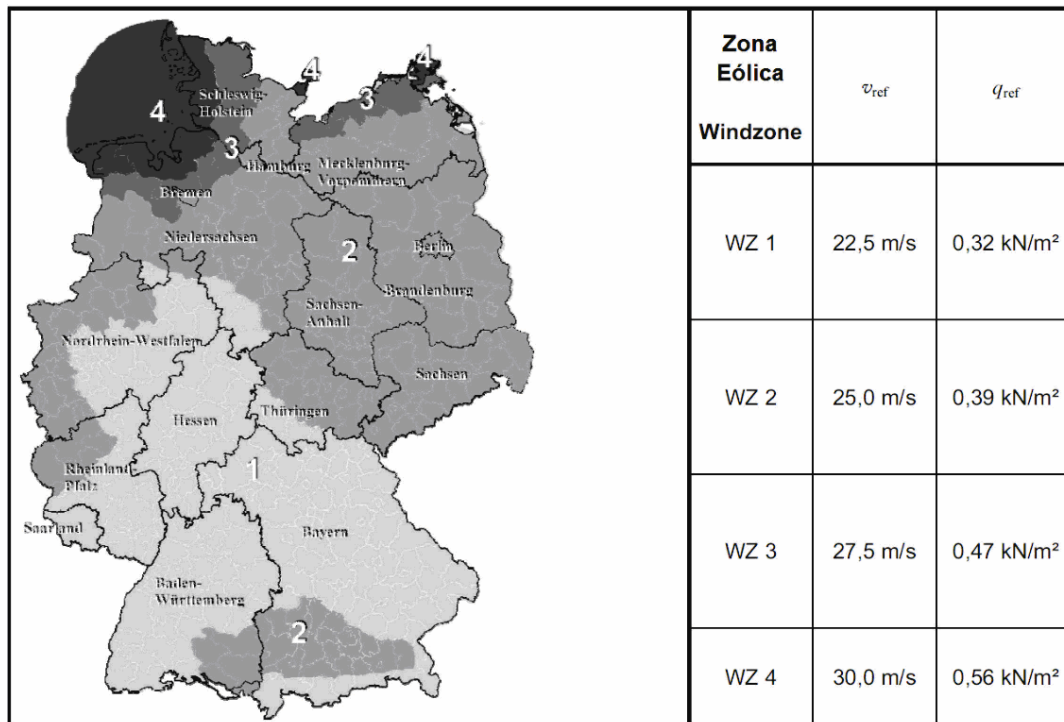
3.4.3.3. Presión media de la velocidad q_m

Para determinar la presión media de la velocidad la Norma DIN [2] se basa en datos estadísticos recolectados a lo largo del tiempo lo que le permite contar con mapas de zonas eólicas y así obtener la velocidad de referencia para el cálculo de carga de viento.

3.4.3.3.1. Mapa de zonas Eólicas Generalidades

(Artículo A.1 Norma DIN [2])

- (1) En la zona eólica especificada en el mapa, el viento promedio tiene una velocidad v_{ref} y una presión de velocidad q_{ref} . Los valores se refieren a un promedio durante un período de 10 minutos con una probabilidad de excedencia de 0,02 dentro de un año. La velocidad v_{ref} se define como aquella velocidad a una altura de 10 metros sobre el suelo en terreno llano abierto, que corresponde a la categoría de terreno II al Anexo B de la Norma DIN [2] (ver 3.4.3.3.3).



Fuente: DIN [2]

Figura 3. 31 Mapa de las zonas eólicas para el territorio de la Republica Federal Alemana (Tabla A.1 Norma DIN [2])

3.4.3.3.2. Influencia de Elevación con respecto al nivel del mar

(Artículo A.2 Norma DIN [2])

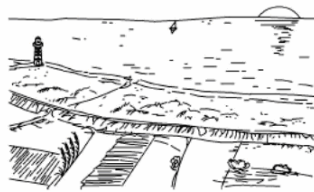

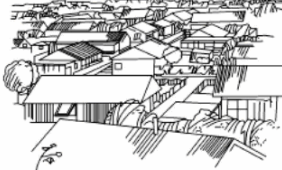
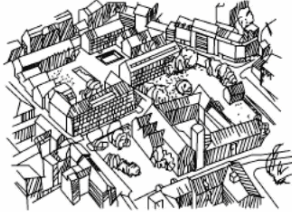
- (1) La presión de la velocidad se va a incrementar si la obra se encuentra por encima de una altitud de 800 m sobre el nivel del mar.
- (2) El factor de incremento es $(0,2+H_s/1.000)$, Donde H_s denota el nivel del mar en metros.
- (3) Para crestas y elevaciones de la cumbre de la montaña por encima $H_s = 1.100$ m son requeridas consideraciones especiales.

3.4.3.3.3. Influencia de la rugosidad del terreno y la topografía

(Artículo B Norma DIN [2])

- (1) Los perfiles de velocidad media del viento y la intensidad de la turbulencia asociada dependen de la rugosidad y la topografía en la proximidad de la construcción.
- (2) Para fines prácticos es útil resumir la amplia gama de origen natural de la rugosidad en las categorías del terreno. Hay cuatro categorías de terreno de acuerdo con las **Figuras 3.32 y 3.33**. La mezcla del perfil de costa describe las condiciones en una zona de transición entre la categoría Terreno I y II. El perfil

mixto describe las condiciones en el interior de una zona de transición entre la categoría de terreno II y III.

<p>Categoría del Terreno I</p> <p>Mar abierto; Lagos con al menos 5 km área abierta a favor del viento; tierra lisa, plana y sin obstáculos</p> <p>$Z_0 = 0,01 \text{ m}$</p>	
<p>Categoría del Terreno II</p> <p>Terreno con setos, granjas individuales, casas o árboles, por ejemplo. área agrícola</p> <p>$Z_0 = 0,05 \text{ m}$</p>	
<p>Categoría del Terreno III</p> <p>Suburbios, zonas industriales o comerciales; Bosques.</p> <p>$Z_0 = 0,30 \text{ m}$</p>	
<p>Categoría del Terreno IV</p> <p>Las zonas urbanas, donde al menos el 15% de la superficie ocupada con edificios con una altura media es superior a 15 m</p> <p>$Z_0 = 1,00 \text{ m}$</p>	

Fuente: DIN [2]

Figura 3. 32 Categoría de terreno
(Tabla B.1 Norma DIN [2])

- (3) En la **Figura 3.33** están los perfiles de la presión debido a la velocidad media, la intensidad de la turbulencia y la velocidad de ráfaga para las cuatro categorías del terreno. La presión de la velocidad de ráfaga se utiliza generalmente para la determinación de la carga de viento sobre las estructuras **que no son susceptibles a la vibración**.
- (4) Por el lado de la seguridad, en las zonas costeras, las islas del Mar del Norte y del Mar Báltico corresponde la categoría de terreno I, la categoría de sitios para el interior fueron asumidos como categoría II.
- (5) Si la influencia de la rugosidad de la superficie dispuesta en el párrafo (4) se puede determinar con más precisión, entonces se aplican las siguientes reglas
 - La reducción de las velocidades del viento cerca de la superficie de bosques se puede evaluar sólo con categoría de terreno II. En una fuerte tormenta no se garantiza que la rugosidad categoría del Terreno III siga en vigor porque la vegetación en circunstancias no resiste las fuerzas del viento.

- El cambio de flujo de viento es impartido por un cambio de la rugosidad aguas abajo, las cuales deben ser tenidas en cuenta. Se refiere al perfil del viento, la intensidad de la turbulencia, y otros parámetros que pueden ser necesarios. Se observa la influencia de la distancia entre cambio de rugosidad y ubicación del edificio.
 - La categoría del terreno debe ser determinada por el sitio aguas arriba de la construcción en dirección del viento de interés.
 - En caso de duda, asumir la categoría de terreno más suave.
- (6) La influencia de la variación de la rugosidad del terreno se puede determinar sin un examen detallado de la siguiente manera; si la ubicación de la construcción está cerca de 1 km de un cambio de un terreno más suave a uno más áspero, por lo que se debe utilizar la categoría de terreno más suave ya que es menos favorable. Sí la obra está a más de 3 km de los cambios de rugosidad, por lo que la categoría de terreno más áspero se puede utilizar si el edificio es menor de 50 m. Para los edificios que se extienden a las elevaciones más altas que 50 m por encima del suelo, se asume la categoría de terreno más suave.

Categoría del Terreno	I	II	III	IV
Altura mínima. z_{min}	2,00 m	4,00 m	8,00 m	16,00 m
La media de la velocidad del viento. v_m para $z > z_{min}$	$1,18 \times v_{ref} (z/10)^{0,12}$	$1,00 \times v_{ref} (z/10)^{0,16}$	$0,77 \times v_{ref} (z/10)^{0,22}$	$0,56 \times v_{ref} (z/10)^{0,30}$
v_m / v_{ref} para $z < z_{min}$	0,97	0,86	0,73	0,64
Intensidad de la Turbulencia I_v para $z > z_{min}$	$0,14 \times (z/10)^{-0,12}$	$0,19 \times (z/10)^{-0,16}$	$0,28 \times (z/10)^{-0,22}$	$0,43 \times (z/10)^{-0,30}$
I_v para $z < z_{min}$	0,20	0,22	0,29	0,37
Presión debida a la velocidad de ráfaga. q para $z > z_{min}$	$2,6 \times q_{ref} (z/10)^{0,19}$	$2,1 \times q_{ref} (z/10)^{0,24}$	$1,6 \times q_{ref} (z/10)^{0,31}$	$1,1 \times q_{ref} (z/10)^{0,40}$
q / q_{ref} para $z < z_{min}$	1,9	1,7	1,5	1,3
Velocidad de ráfaga. v para $z > z_{min}$	$1,61 \times v_{ref} (z/10)^{0,095}$	$1,45 \times v_{ref} (z/10)^{0,120}$	$1,27 \times v_{ref} (z/10)^{0,155}$	$1,05 \times v_{ref} (z/10)^{0,200}$
v / v_{ref} para $z < z_{min}$	1,38	1,30	1,23	1,15

Fuente: DIN [2]

Figura 3. 33 Perfiles de velocidad media del viento, intensidad de turbulencia, presión de ráfaga y velocidad de ráfaga en un terreno nivelado (Tabla B.2 Norma DIN [2])

- (7) La Figura 3.34 contiene a los perfiles de la intensidad media de la velocidad del viento y la turbulencia que se utilizan en los Anexos C a F de la Norma DIN [2] (ver 3.4.2.1 y 3.4.6).

	Regla Perfil Tierra adentro	Perfil de la Regla en las zonas costeras
Altura mínima z_{min}	7,00 m	4,00 m
La media de la velocidad del viento v_m Para $50\text{ m} < z < 300\text{ m}$	$1,00 \times v_{ref} (z/10)^{0,16}$	$1,18 \times v_{ref} (z/10)^{0,12}$
v_m / v_{ref} Para $z_{min} < z < 50\text{ m}$	$0,86 \times (z/10)^{0,25}$	$1,10 \times (z/10)^{0,165}$
v_m / v_{ref} Para $z < z_{min}$	0,79	0,95
Intensidad de turbulencia I_v Para $50\text{ m} < z < 300\text{ m}$	$0,19 \times (z/10)^{-0,16}$	$0,14 \times (z/10)^{-0,12}$
I_v Para $z_{min} < z < 50\text{ m}$	$0,22 \times (z/10)^{-0,25}$	$0,15 \times (z/10)^{-0,165}$
I_v Para $z < z_{min}$	0,24	0,17
Velocidad de ráfaga v Para $50\text{ m} < z < 300\text{ m}$	$1,45 \times v_{ref} (z/10)^{0,120}$	$1,61 \times v_{ref} (z/10)^{0,095}$
v / v_{ref} Para $z_{min} < z < 50\text{ m}$	$1,31 \times (z/10)^{0,185}$	$1,51 \times (z/10)^{0,135}$
v / v_{ref} Para $z < z_{min}$	1,23	1,33

Fuente: DIN [2]

Figura 3. 34 Perfiles de velocidad media del viento, intensidad de turbulencia, presión de ráfaga y velocidad de ráfaga en un terreno nivelado para los casos citados en 10.3 (Tabla B.3 Norma DIN [2])

- (8) Las colinas aisladas y los niveles del terreno afectan especialmente a la velocidad media del viento. Esta influencia se puede contemplar con el coeficiente de topografía c_t . No se aplica terreno y regiones montañosas.
- (9) El coeficiente de topografía $c_t(z)$ está relacionada con la velocidad del viento al pie de la colina o el salto del terreno. Se aplica a los edificios que son menos de la mitad de la longitud de la pendiente o menos de 1,5 veces la altura de la cresta del acantilado. El coeficiente de topografía c_t se define como:

$c_t = 1$	Para	$\Phi < 0,05$	(3.39)
$c_t = 1 + 2 \cdot s \cdot \Phi$	Para	$0,05 < \Phi < 0,3$	
$c_t = 1 + 0,6 \cdot s$	Para	$\Phi > 0,3$	

Ecuación B.1 Norma DIN [2]

Donde:

s Factor s de acuerdo con la **Figuras 3.36 y 3.37** están relacionada con la *longitud efectiva* L_e de la pendiente de barlovento;

Φ *Ladera de barlovento como se indica en la Figura 3.35.*

Pendiente de Barlovento $\Phi = H / L_u$	
Plano ($0,05 < \Phi < 0,3$) $L_e = L_u$	Empinado ($\Phi \geq 0,3$) $L_e = H / 0,3$

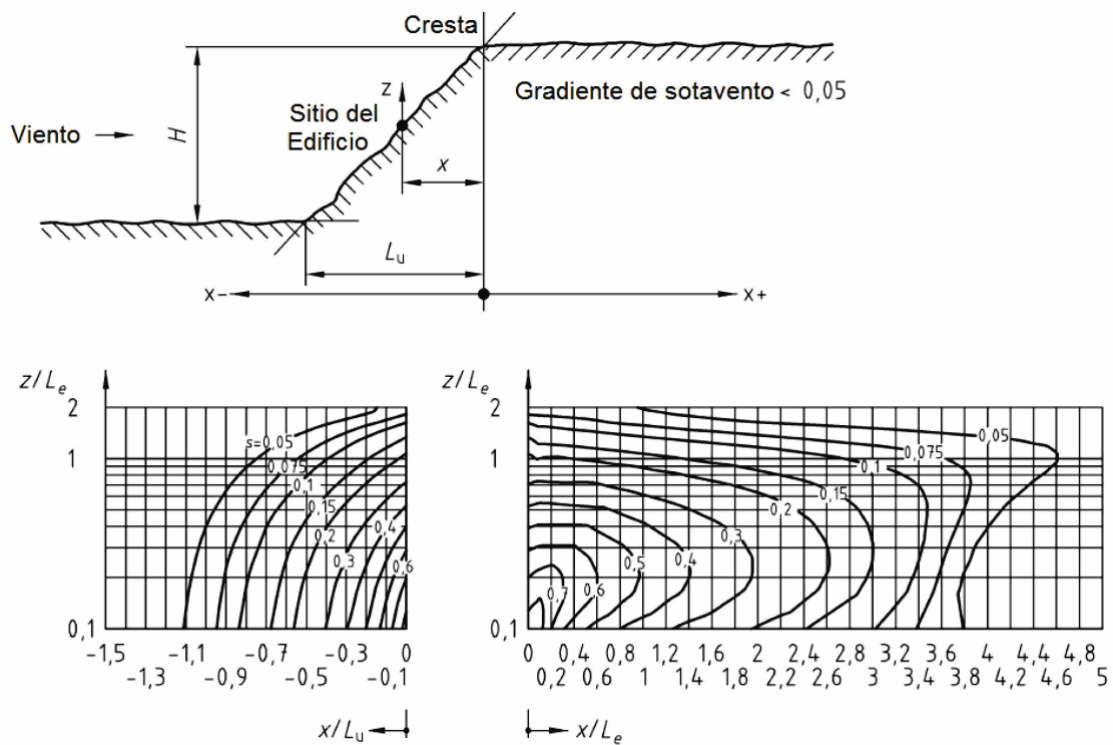
Fuente: DIN [2]

Figura 3. 35 Valores para la longitud efectiva L_e (Tabla B.4 Norma DIN [2])

Donde en las **Figuras 3.34 y 3.35** significan.

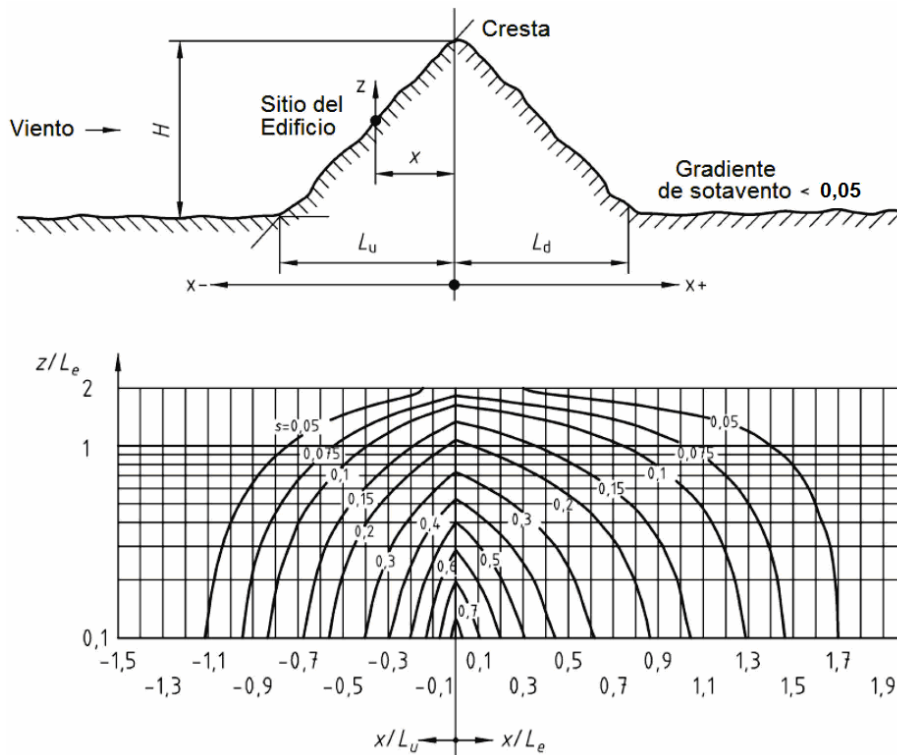
- L_e Longitud efectiva de la pendiente de barlovento de la **Figura 3.35**;
- L_u Longitud real de la pendiente de barlovento (proyección sobre la horizontal);
- L_d Longitud real de la pendiente de sotavento;
- H Altura efectiva de la colina o el salto del terreno;
- x Distancia horizontal desde la cresta de la estructura de la encuesta;
- z Distancia vertical desde el nivel del suelo en la superficie de la pendiente.

- (10) Para las estructuras en los lados de valles empinados o de puentes que cruzan estos valles, la necesidad de aumentar la velocidad del viento se debe considerar cuidadosamente.



Fuente: DIN [2]

Figura 3. 36 Factor s de acantilados y saltos de terreno (Figura B.1 Norma DIN [2])



Fuente: DIN [2]

Figura 3.37 Factor s para crestas y colinas (Figura B.2 Norma DIN [2])

(11) El perfil de la velocidad media viene dada por:

$$v_{m,t}(z) = c_t(z) \cdot v_m(z) \quad (3.40)$$

Ecuación B.2 Norma DIN [2]

Siendo:

$v_m(z)$ *Perfil de la velocidad media* en el nivel del suelo (según las **Figuras 3.33 y 3.34**).

(12) Para el perfil de intensidad de la turbulencia:

$$I_{v,t}(z) = \frac{1}{c_t(z)} \cdot I_v(z) \quad (3.41)$$

Ecuación B.3 Norma DIN [2]

Siendo:

$I_v(z)$ *Perfil de la intensidad de la turbulencia* en terreno plano de acuerdo a la **Figuras 3.33 y 3.34**.

(13) El perfil de la presión de la velocidad de ráfaga está dado por las **ecuaciones 3.39 y 3.40**:

$$q(z) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_{m,t}^2(z) \cdot [1 + 6 \cdot I_{v,t}(z)] \quad (3.42)$$

Ecuación B.4 Norma DIN [2]

Siendo:

ρ Densidad del aire, $\rho = 1,25 \text{ Kg/m}^3$

3.4.4. Las deformaciones y aceleraciones

(Artículo C.4 Norma DIN [2])

- (1) Esta sección proporciona recomendaciones para la determinación de las deformaciones y aceleraciones que se extienden verticalmente en estructuras de los edificios predominantemente en estado límite con un enfoque de servicio bajo diferentes velocidades del viento con respecto a las diversas probabilidades de excedencia.
- (2) La deformación más grande en la dirección del viento $max x(z)$ y la desviación estándar de la aceleración en la dirección del viento $\sigma_{\ddot{x}}(z)$ en la altura z :

$$max x(z) = \Phi_{i,x}(z) \cdot \frac{\rho \cdot b \cdot c_f \cdot v_m^2(z_e)}{2 \cdot m_{1,x} \cdot (2 \cdot \pi \cdot n_{1,x})^2} \cdot G \cdot K_x \quad (3.43)$$

Ecuación C.17 Norma DIN [2]

$$\sigma_{\ddot{x}}(z) = \Phi_{i,x}(z) \cdot \frac{\rho \cdot b \cdot c_f \cdot v_m^2(z_e)}{m_{1,x}} \cdot I_V(z_e) \cdot R_x \cdot K_x \quad (3.44)$$

Ecuación C.18 Norma DIN [2]

Donde:

$\Phi_{i,x}(z)$ Forma fundamental a favor del viento (Anexo F de la Norma DIN [2]) (ver **3.4.6**);

G Factor de respuesta de ráfaga según la ecuación **3.21**.

ρ Densidad del aire $1,25 \text{ Kg/m}^3$.

b Anchura de la estructura como se muestra en la **Figura 3.19**;

c_f Coeficiente de fuerza en la dirección del viento en la sección 12 de la Norma DIN [2] (Ver **3.4.3.2**);

$v_m(z_e)$ Perfil de la velocidad media para $z = z_e$ (según las **Figuras 3.33 y 3.34**).

$I_V(z_e)$ Intensidad de la turbulencia I_V a favor del viento para $z = z_e$ (según las **Figuras 3.33 y 3.34**).

$n_{i,x}$ Frecuencia natural fundamental de vibraciones estructurales en la dirección del viento (fórmulas aprox. se dan en el Anexo F de la Norma DIN [2]) (ver **3.4.6**).

- $m_{i,x}$ Masa equivalente de vibraciones en la dirección del viento en el Anexo F de la Norma DIN [2]; (ver 3.4.6)
- R_x Proporción respuesta resonante según la ecuación 3.28;
- K_x Coeficiente adimensional de acuerdo con la ecuación 3.45.

(3) El coeficiente K_x es definido como sigue:

$$K_x = \frac{\int_0^h v_m^2(z) \cdot \Phi_{1,x}(z) \cdot dz}{v_m^2(z_e) \int_0^h \Phi_{1,x}^2(z) \cdot dz} \quad (3.45)$$

Ecuación C.19 Norma DIN [2].

(4) Para un enfoque de $\Phi_{i,x}(z) = (z/h)^\zeta$ (Ver F.3 de la Norma DIN [2]), la ecuación 3.45 con perfiles de viento totalmente desarrollados en la Figura 3.33 puede aproximarse como sigue:

$$K_x = 0,60^{-2\alpha} \cdot \frac{1 + 2\zeta}{1 + \zeta + 2\alpha} \quad (3.46)$$

Ecuación C.20 Norma DIN [2].

Donde:

- α Exponente del perfil de la categoría del terreno en la Figura 3.38;
- ζ Exponente del modo de flexión fundamental en F.3 de la Norma DIN [2] (ver 3.4.6)

Categoría del terreno	I	II	III	IV
Exponente del perfil α	0,12	0,16	0,22	0,30

Fuente: DIN [2]

Figura 3. 38 Exponente α del perfil
(Tabla C.2 Norma DIN [2])

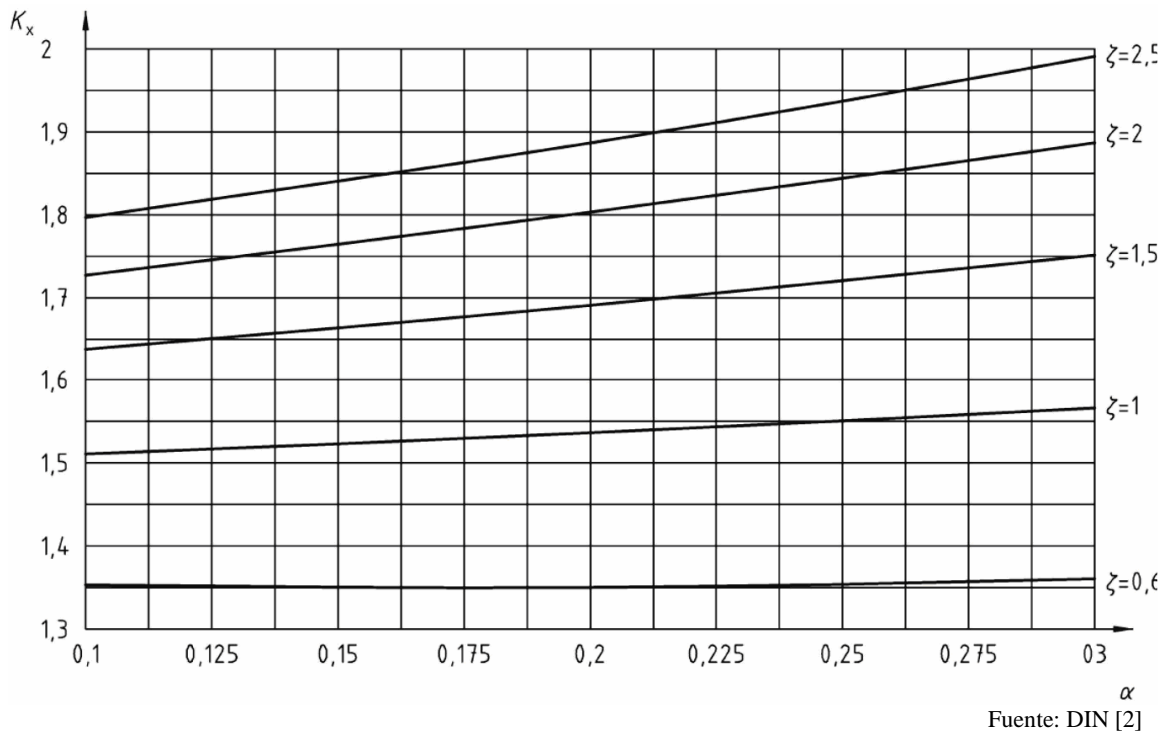


Figura 3.39 Aproximación del coeficiente K_x de acuerdo con la ecuación 3.46
(Figura C.7 Norma DIN [2])

3.4.5. Vibraciones transversales por desprendimiento de vórtices y fenómenos aeroelásticos

(Artículo 11.2 Norma DIN [2])

- (1) Una estructura simple puede necesitar ser examinada por los siguientes fenómenos de oscilación y los efectos de inestabilidad:
- Vibraciones transversales producidas por desprendimiento de vórtices.
 - Galope.
 - Flameo.
 - Divergencia.
 - Galope debido a interferencia.
 - Vibraciones inducidas por viento y/o lluvia.

Información para el estudio de estos fenómenos se dan en los Anexos D y E de la Norma DIN [2] (ver 3.4.5.1).

En el presente Proyecto Integrador solo se estudiara de la Norma DIN [2] el fenómeno de vibraciones transversales producidas por desprendimiento de vórtice aunque la Norma permita evaluar la estructura de análisis en los distintos fenómenos.

3.4.5.1. Vibraciones inducidas por vórtices Generalidades

(Artículo D.1 Norma DIN [2])

Las Vibraciones perpendiculares a la dirección del viento inducidas por desprendimiento de vórtice pueden ocurrir en estructuras y componentes similares a barras delgadas. Un método de cálculo para el caso de la resonancia se indica en D.2 de la Norma DIN [2] (3.4.5.2), en el que la frecuencia de desprendimiento de vórtice coincide con una frecuencia natural de la estructura.

3.4.5.2. Velocidad crítica del viento

(Artículo D.2.1 Norma DIN [2])

- (1) Cuando la frecuencia de desprendimiento de vórtice es igual a una frecuencia natural del componente la velocidad crítica del viento $v_{crit,i}$ se determina por la ecuación 3.47.

$$v_{crit,i} = \frac{b \cdot n_i}{St} \quad (3.47)$$

Ecuación D.1 Norma DIN [2].

Donde:

- b Para secciones cilíndricas b es el diámetro exterior;
 $n_{1,y}$ Frecuencia natural de la forma de onda i -ésima para las vibraciones transversales a la dirección del viento. Fórmulas aproximadas se dan en la sección F de la Norma DIN [2] (ver 3.4.6.);
 St Número de Strouhal según las Figuras 3.40 y 3.41.

- (2) No ocurre una resonancia crítica si;

$$v_{crit,i} > 1,25 \cdot v_{m,L_j}$$

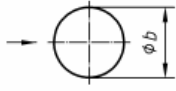
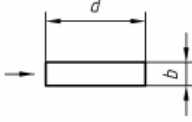
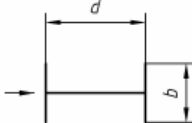
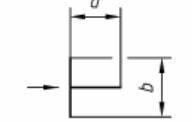
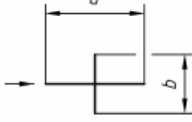
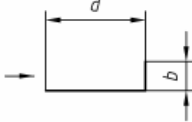
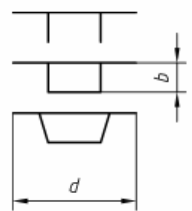
Donde:

- $v_{crit,i}$ Ecuación 3.47.
 v_{m,L_j} Velocidad media del viento, tal como se definen en las Figuras 3.33 y 3.34, determinada al nivel del punto central de la longitud activa L_j , en el que se produce la excitación debida a desprendimiento de vórtice.

3.4.5.3. Número de Strouhal

(Artículo D.1 Norma DIN [2])

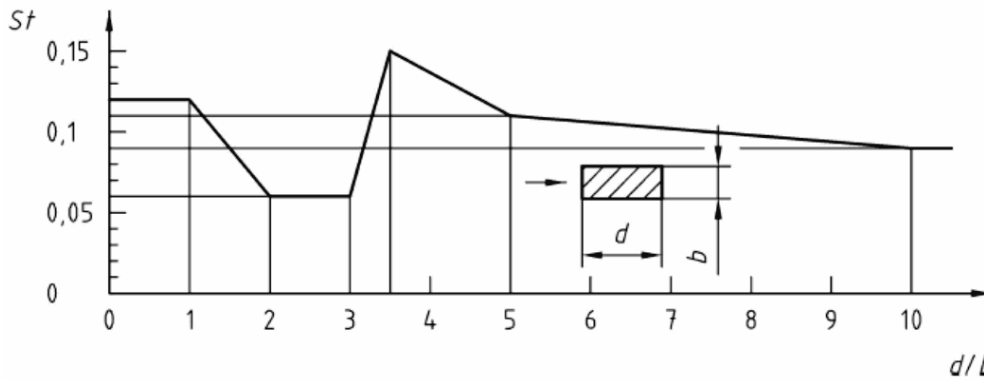
El número de Strouhal St para diferentes formas de sección transversal se puede encontrar en la **Figura 3.40**.

Forma de la sección transversal	St	$C_{lat,0}$	
 Para todos los Números de Reynolds	0,18	Ver Figura D.2	
 $0,5 \leq d/b \leq 10$	Ver Figura D.1	1,1	
	$d/b = 1$	0,11	0,8
	$d/b = 1,5$	0,10	1,2
	$d/b = 2$	0,14	0,3
	$d/b = 1$	0,13	1,6
	$d/b = 2$	0,08	2,3
	$d/b = 1$	0,16	1,4
	$d/b = 2$	0,12	1,1
	$d/b = 1,3$	0,11	0,8
Puentes 	$d/b \leq 5$	0,15	$0,12 d/b$
	$5 < d/b < 10$	$\frac{1}{1,1 \times \frac{d}{b} + 1}$	$5 \times \frac{d}{b} \times \left(\frac{1}{1,1 \times \frac{d}{b} + 1} \right)^2$
	$d/b \geq 10$	0,083	$0,035 d/b$

Valores intermedios pueden ser interpolados linealmente

Fuente: DIN [2]

Figura 3. 40 Número de Strouhal y valor de fuerza de excitación aerodinámica básica para diferentes formas de sección transversal (Tabla D.1 Norma DIN [2])



Fuente: DIN [2]

Figura 3. 41 Número de Strouhal para formas de sección transversal rectangular con aristas vivas (Figura D.1 Norma DIN [2])

3.4.5.4. Exposición debido a las vibraciones transversales por desprendimiento de vórtice

(Artículo D.2.3 Norma DIN [2])

Las tensiones debidas a las vibraciones transversales inducidas por desprendimiento de vórtices son resultantes de las fuerzas de inercia del sistema excitado en resonancia. En el punto j la fuerza de inercia $F_i(s_j)$ se calcula perpendicular a la dirección del viento de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$F_i(s_j) = M_j \cdot (2\pi \cdot n_{i,y})^2 \cdot \Phi_{i,y}(s_j) \cdot \max y_F \quad (3.48)$$

Ecuación D.3 Norma DIN [2]

Donde:

- M_j Masa oscilante en el tramo j .
- $n_{i,y}$ Frecuencia natural de la forma de onda i -ésima transversalmente a la dirección del viento
- $\Phi_{i,y}(s_j)$ Forma de onda normalizada i transversal a la dirección del viento como la relación de la amplitud de desplazamiento y en el punto $s = s_j$ para mayor amplitud de desplazamiento máximo $\max y_F$ **Figura 3.46.**
- $\max y_F$ Mayor amplitud de la oscilación Según D.2.4 de la Norma DIN [2] (**ver 3.4.5.5**)
- s Coordenada de ejecución del funcionamiento de la estructura. Se aplica a los edificios predominantemente se extienden verticalmente. $s_j \equiv z$

3.4.5.5. Cálculo de la amplitud de la vibración lateral

(Artículo D.2.4 Norma DIN [2])

- (1) La mayor amplitud de desplazamiento $\max y_F$ calculado a la velocidad crítica del viento $v_{crit,i}$ viene dada por:

$$\frac{\max y_F}{b} = K_w \cdot K \cdot c_{lat} \cdot \frac{1}{St^2} \cdot \frac{1}{Sc} \quad (3.49)$$

Ecuación D.4 Norma DIN [2]

Donde:

b Diámetro exterior;

K_w Factor de longitud efectiva de D.2.7 de la Norma DIN [2] (ver 3.4.5.8);

K Coeficiente de la forma de onda de D.2.8 de la Norma DIN [2] (ver 3.4.5.9);

c_{lat} Coeficiente de fuerza de excitación aerodinámica de D.2.5 de la Norma DIN [2] (ver 3.4.5.6)

St Número de Strouhal según las Figuras 3.40 y 3.41.

Sc Número de Scruton según Ecuación 3.50.

- (2) El número de Scruton es calculado de la siguiente manera:

$$Sc = \frac{2 \cdot m_{i,y} \cdot \delta}{\rho \cdot b^2} \quad (3.50)$$

Ecuación D.5 Norma DIN [2]

Donde:

ρ Densidad del aire.

$m_{i,y}$ Masa equivalente por unidad de longitud según ecuación 3.55.

δ Decremento logarítmico de amortiguación según la ecuación 3.56, pero sin el componente de amortiguación aeroelástico δ_a .

- (3) La ecuación 3.49 se puede resolver iterativamente con la ayuda de la ecuación 3.56, o de las Figuras 3.45 y 3.46.

3.4.5.6. Coeficiente de fuerza de excitación aerodinámica

(Artículo D.2.5 Norma DIN [2])

El coeficiente de fuerza de excitación aerodinámica c_{lat} se da en la Figura 3.42.

Relación de velocidad crítica del viento		c_{lat}
$\frac{v_{crit,i}}{v_{m,Lj}} \leq 0,83$		$c_{lat} = c_{lat,0}$
$0,83 \leq \frac{v_{crit,i}}{v_{m,Lj}} \leq 1,25$		$c_{lat} = \left(3,0 - 2,4 \times \frac{v_{crit,i}}{v_{m,Lj}} \right) \times c_{lat,0}$
$1,25 \leq \frac{v_{crit,i}}{v_{m,Lj}}$		$c_{lat} = 0$
Con:	$c_{lat,0}$	Valor simple del coeficiente de fuerza de excitación c_{lat} según la Tabla D.1 y la imagen D.2;
	$v_{crit,i}$	Velocidad crítica del viento según la ecuación (D.1);
	$v_{m,Lj}$	Velocidad media del viento en medio de la longitud efectiva según la Tabla B.2 y B.3, que es superada con una probabilidad de 0,02 anual, de acuerdo con D.2.6.

Fuente: DIN [2]

Figura 3. 42 Coeficiente de fuerza de excitación aerodinámica en función de la relación de la velocidad del viento crítica y de la velocidad media del viento.
(Tabla D.2 Norma DIN [2])

En la **Figura 3.43**, el número de Reynolds Re es calculado utilizando la velocidad crítica del viento:

$$Re(v_{crit,i}) = \frac{b \cdot v_{crit,i}}{\nu} \quad (3.51)$$

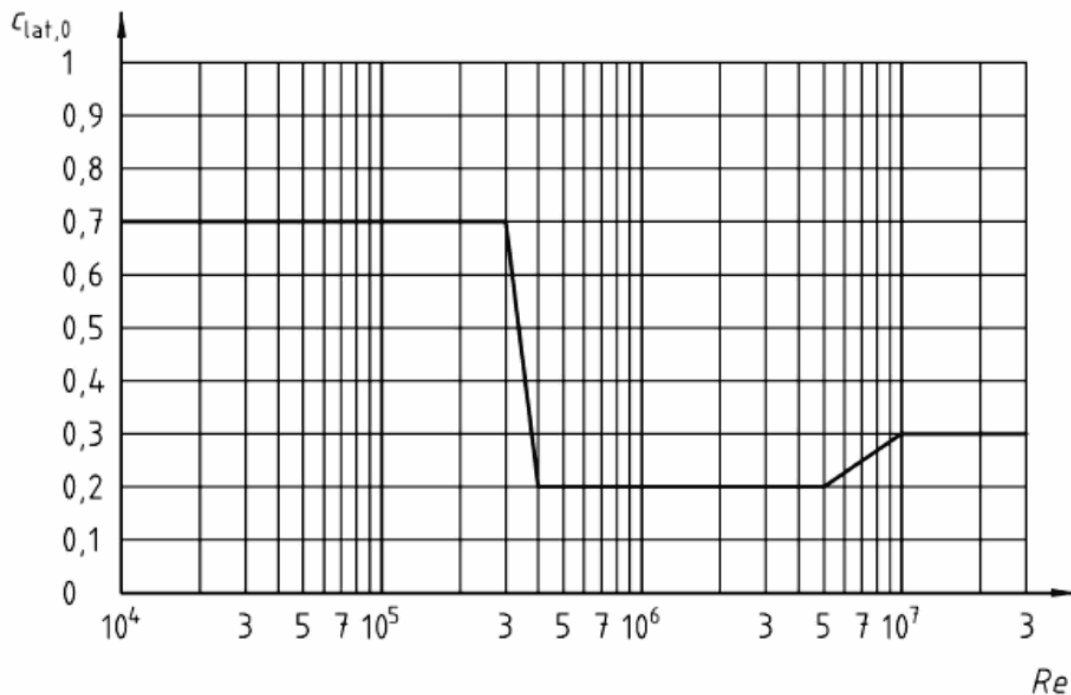
Ecuación D.6 Norma DIN [2]

Donde:

b Diámetro exterior;

ν Viscosidad cinemática del aire, $\nu = 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$

$v_{crit,i}$ Velocidad crítica del viento según la **ecuación 3.47**.



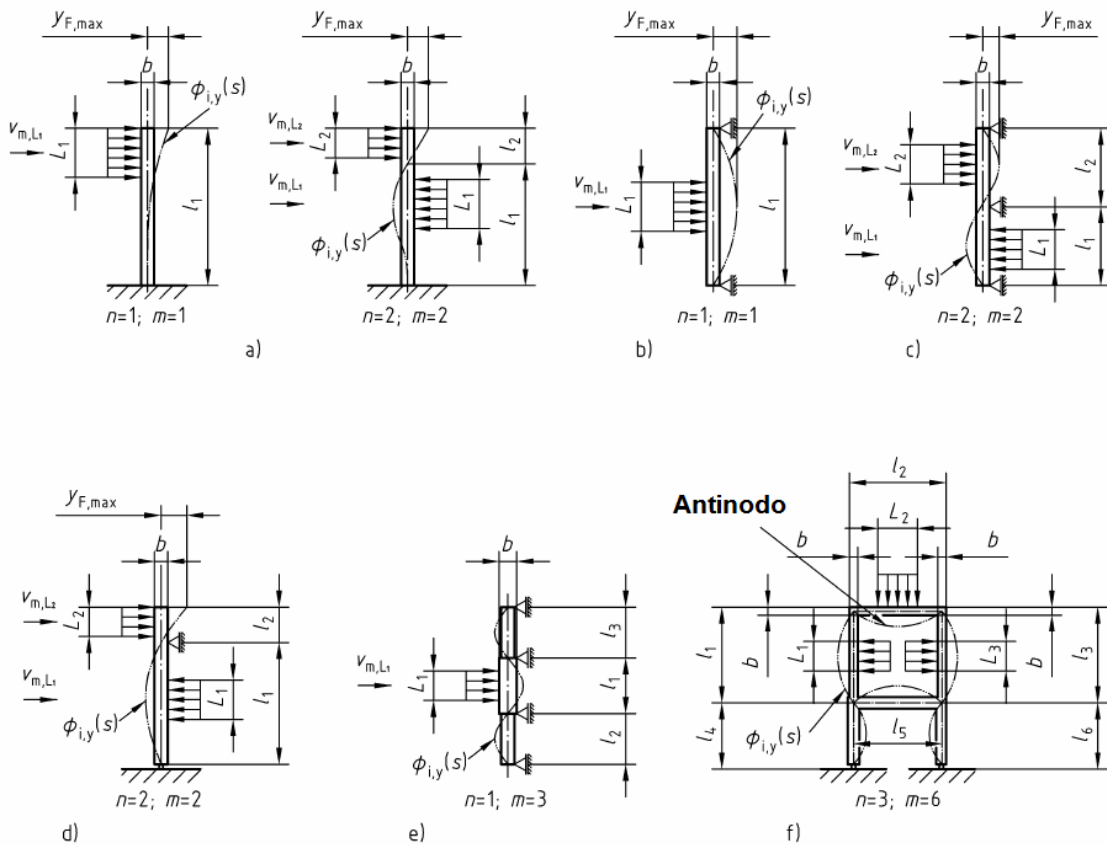
Fuente: DIN [2]

Figura 3. 43 Fuerza de excitación aerodinámica básica para un cilindro circular en función del número de Reynolds (Figura D.2 Norma DIN [2])

3.4.5.7. Longitud efectiva

(Artículo D.2.6 Norma DIN [2])

- (1) La longitud efectiva L_j se va a establecer en el rango de los antinodos. Se dan ejemplos en la **Figura 3.44**. Para mástiles arriostradas y la mayoría de los campos de puentes continuos, se requieren consideraciones especiales.
- (2) La relación L_j se define en la **Figura 3.45** Donde $y_{F,j}$ es la amplitud de desplazamiento en el punto j . En la mayoría de los casos, la amplitud de desplazamiento en el antinodo es igual a la amplitud máxima $max y_f$.



Fuente: DIN [2]

Figura 3. 44 Ejemplos conocidos de la ubicación de la Longitud Efectiva (Figura D.3 Norma DIN [2])

$y_{F,j} / b$	L_j / b
$< 0,1$	6
$0,1 \dots 0,6$	$4,8 + 12 \times \frac{y_{F,j}}{b}$
$> 0,6$	12

Fuente: DIN [2]

Figura 3. 45 Longitud efectiva como función de la amplitud de desplazamiento (Tabla D.3 Norma DIN [2])

3.4.5.8. Factor de longitud efectiva K_W

(Artículo D.2.7 Norma DIN [2])

(1) El factor de longitud efectiva K_W se define por la ecuación 3.52:

$$K_W = \frac{\sum_{j=1}^n \int_{L_j} |\Phi_{i,y}(s)| ds}{\int_l |\Phi_{i,y}(s)| ds} \leq 0,6 \quad (3.52)$$

Ecuación D.7 Norma DIN [2]

Donde:

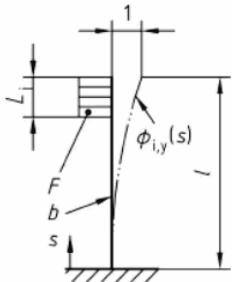
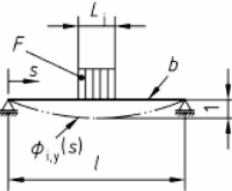
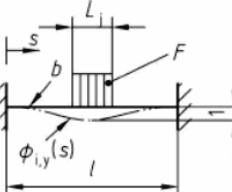
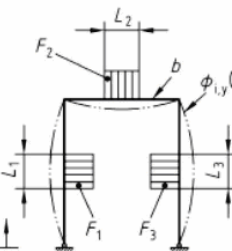
$\Phi_{i,y}$ Forma i -ésima modalidad normalizada (véase D.2.3 de la Norma DIN [2] (ver 3.4.5.4);

L_j Longitud efectiva de D.2.6 de la Norma DIN [2] (ver 3.4.5.7);

n Número de áreas en las que el desprendimiento de vórtices se produce al mismo tiempo;

l Toda longitud de la barra sobresaliente. Para Edificios en voladizo l es igual a la altura del edificio.

(2) Para algunas estructuras simples que vibran en la forma básica y en el que se aplican las fuerzas de excitación, como se muestra en la Figura 3.46, el factor de longitud efectiva K_W puede ser determinada aproximadamente por las ecuaciones de la Figura 3.46.

Estructura / componente	Forma de Vibrar $\phi_{i,y}(s)$	K_w	K
	<p>Véase F.3 Con $n = 1$ y $\zeta = 2,0$</p>	$3 \times \frac{L_j/b}{\lambda} \times \left[1 - \frac{L_j/b}{\lambda} + \frac{1}{3} \times \left(\frac{L_j/b}{\lambda} \right)^2 \right]$	0,13
	<p>Véase Tabla F.1 Con $n = 1$</p>	$\cos \left[\frac{\pi}{2} \times \left(1 - \frac{L_j/b}{\lambda} \right) \right]$	0,10
	<p>Véase Tabla F.1 Con $n = 1$</p>	$\frac{L_j/b}{\lambda} + \frac{1}{\pi} \times \sin \left[\pi \times \left(1 - \frac{L_j/b}{\lambda} \right) \right]$	0,11
	<p>Por análisis modal Con $n = 3$</p>	$\frac{\sum_{j=1}^n \int_{L_j} \phi_{i,y}(s) ds}{\int_l \phi_{i,y}(s) ds}$	0,10
<p>$\lambda = l/b$ (esbeltez); n Número de áreas en las que se produce desprendimiento de vórtices de forma simultánea. La forma de onda $\phi_{i,y}(s)$ se puede determinar por F.3.</p>			

Fuente: DIN [2]

Figura 3. 46 Factor de Longitud Efectiva y coeficiente de forma de onda (Tabla D.4 Norma DIN [2])

3.4.5.9. Coeficiente de forma de onda K

(Artículo D.2.8 Norma DIN [2])

(1) El coeficiente K de la forma de onda se define como:

$$K = \frac{\int_0^l |\Phi_{i,y}(s)| ds}{4\pi \cdot \int_0^l \Phi_{i,y}^2(s) ds} \quad (3.53)$$

Ecuación D.8 Norma DIN [2]

Donde:

$\Phi_{i,y}$ i -ésima forma de onda normalizada para las vibraciones transversales en F.3 de la Norma DIN [2] (ver 3.4.5.4);

l Longitud total de la barra sobresaliente.

(2) Para algunas estructuras simples que vibran en la forma de la frecuencia fundamental, el coeficiente K se da en la **Figura 3.46**.

3.4.6. Conceptos dinámicos básicos

3.4.6.1. Generalidades

(Artículo F.1 Norma DIN [2])

(1) Los procedimientos de cálculo en esta sección asumen que los edificios tienen un comportamiento elástico lineal y formas de modo común. Las propiedades dinámica de la estructura se describen a continuación, por:

- Frecuencias naturales;
- Formas de onda;
- Masa equivalente;
- Decremento logarítmico de la amortiguación.

(2) Para combinaciones de carga (por ejemplo. El viento y nieve) el cálculo dinámico se lleva a cabo teniendo en cuenta las masas adicionales.

(3) Para edificios con formas convencionales y sencillas, los datos dinámicos básicos utilizando ecuaciones aproximadas que se derivan de cálculos simples o experiencia, para determinar si estas ecuaciones se verifican suficientemente.

3.4.6.2. Modo de flexión Fundamental

(Artículo F.3 Norma DIN [2])

- (1) El modo de flexión fundamental $\Phi_1(s)$ de edificios, torres y chimeneas pueden estimarse como sigue:

$$\Phi_1(s) = \left(\frac{s}{h}\right)^\zeta \quad (3.54)$$

Ecuación F.5 Norma DIN [2]

Siendo:

s *Coordenada en el eje longitudinal de la estructura o componente.*

Para el exponente ζ se pueden utilizar los siguientes valores:

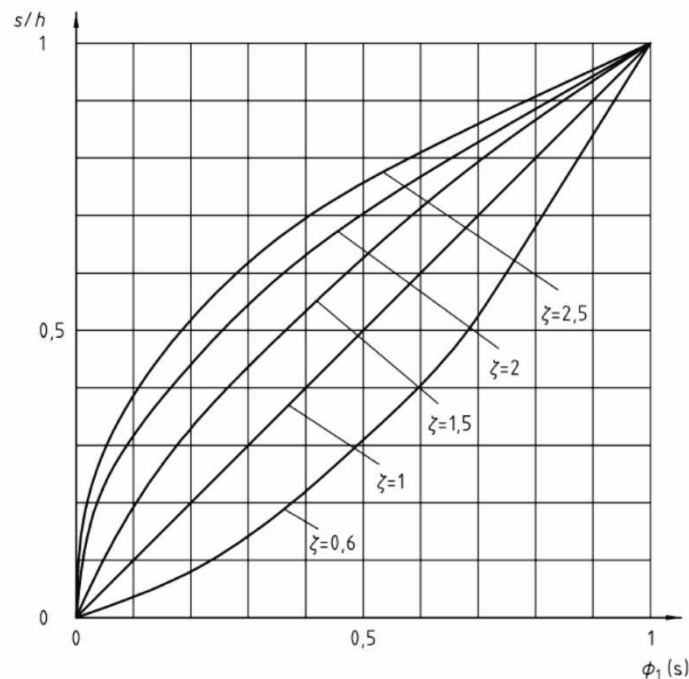
$\zeta = 0,6$ *Estructuras de marco delgado con el panel no estructural;*

$\zeta = 1$ *Edificios con núcleo ascendente y soportes exteriores o con un mayor apoyo y relleno de refuerzo;*

$\zeta = 1,5$ *Edificios y construcciones que sólo son usados por un núcleo central de hormigón en voladizo delgadas;*

$\zeta = 2$ *Torres y mástiles;*

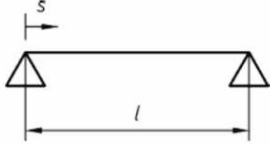
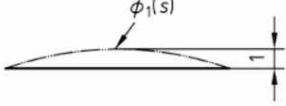
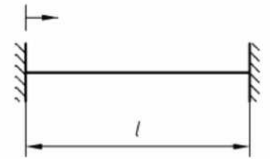
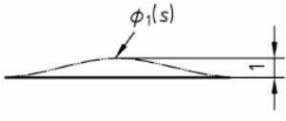
$\zeta = 2,5$ *Torres de viga de acero.*



Fuente: DIN [2]

Figura 3. 47 Forma modal flexional fundamental para edificios, torres y chimeneas en voladizo (Figura F.2 Norma DIN [2])

- (2) El modo de flexión fundamental de los puentes se puede aproximar por la **Figura 3.48**.

Sistema	Forma de la onda	$\phi_1(s)$
		$\sin\left(\pi \times \frac{s}{l}\right)$
		$\frac{1}{2} \times \left[1 - \cos\left(2 \times \pi \times \frac{s}{l}\right) \right]$

Fuente: DIN [2]

Figura 3. 48 Forma modal flexional fundamental para estructuras simplemente apoyadas y empotradas (Tabla F.1 Norma DIN [2])

3.4.6.3. Masa equivalente

(Artículo F.4 Norma DIN [2])

- (1) La masa equivalente por unidad de longitud m_i se define como:

$$m_i = \frac{\int_0^L m \cdot \Phi_i^2(s) \cdot ds}{\int_0^L \Phi_i^2(s) \cdot ds} \quad (3.55)$$

Ecuación F.6 Norma DIN [2]

Donde:

m Masa por unidad de longitud;

L Altura h estructura o largo l del tramo o componente estructural.

- (2) Para estructuras que tienen poca variación en la distribución de masa, el peso promedio por unidad de longitud puede ser una buena aproximación en el tercio del edificio en el que la forma de onda está en su máximo, puede ser considerado como m_l (véase la **Figura 3.48**).

3.4.6.4. Decremento logarítmico

(Artículo F.5 Norma DIN [2])

- (1) El decremento logarítmico de amortiguación δ para el modo de flexión fundamental puede estimarse como sigue:

$$\delta = \delta_s + \delta_a + \delta_d \quad (3.56)$$

Ecuación F.7 Norma DIN [2]

Donde:

δ_s Decremento logarítmico de amortiguación de la estructura;

δ_a Decremento logarítmico de amortiguamiento aerodinámico;

δ_d Decremento logarítmico de amortiguación debido a las medidas especiales (por ejemplo, vibraciones).

- (2) El decremento logarítmico de amortiguación de la estructura δ_s se puede determinar de la siguiente forma:

$$\delta_s = a_1 n_1 + b_1 \geq \delta_{\min} \quad (3.57)$$

Ecuación F.8 Norma DIN [2].

Donde:

n_1 Frecuencia de modo de flexión fundamental.

a_1, b_1, δ_{\min} Parámetros de la Tabla **Figura 3.49** para diferentes tipos de construcción; δ_{\min} se aplica a pequeñas deformaciones.

- (3) El decremento logarítmico de amortiguamiento aerodinámico δ_a de oscilaciones en la dirección del viento se puede estimar como:

$$\delta_a = \frac{\rho \cdot b \cdot c_f}{2 \cdot n_{1,x} \cdot m_{1,x}} \cdot v_m(z_e) \quad (3.58)$$

Ecuación F.9 Norma DIN [2]

Donde:

ρ Densidad del aire $\rho = 1,25 \text{ Kg/m}^3$;

b Ancho de la superficie del edificio expuesto al viento, en m;

c_f Coeficiente de fuerza aerodinámica media en la dirección del viento (ver 3.4.3.2);

$v_m(z_e)$ Velocidad media del viento $v_m(z)$ de acuerdo a las **Figuras 3.33 y 3.34** para $z=z_e$ en m/s.

z_e Altura de referencia de la **Figura 3.19**, en m;

$m_{1,x}$ Masa equivalente fundamental en la dirección del viento, en kg / m (ver **3.4.6.3**);

$n_{1,x}$ Frecuencia natural del modo fundamental en la dirección del viento en Hz

Para el cálculo de vibraciones transversales excitadas por desprendimiento de vórtice ver el Anexo D de la Norma DIN [2] (Ver **3.4.5.1**, **3.5.4.2** y **3.4.5.3**), la amortiguación aerodinámica no debe ser calculada.

- (4) Si se adjuntan medidas especiales para el aumento de la atenuación, el decremento de amortiguación adicional δ_d debe ser determinado por procedimientos teóricos o experimentales apropiados.

Tipo de Construcción		a_1	b_1	δ_{min}
Edificio de construcción sólida		0,045	0,05	0,100
Edificio de acero.		0,045	0	0,050
Edificio de construcción mixta (Hormigón y acero)		0,080	0	0,080
Torres de hormigón armado.		0,050	0	0,025
Chimeneas de construcción masiva.		0,075	0	0,030
Chimeneas de acero según DIN 4133		–	–	–
Puentes de acero y torres de acero reticuladas	Soldada	0	0,020	0
	Tornillos pretensados	0	0,030	0
	Tornillos brutos	0	0,050	0
Puentes mixtos		0	0,040	0
Puentes en construcción masiva	Sesgada y sin grietas	0	0,040	0
	Con grietas	0	0,100	0
Cuerdas	Conjunto de Cables paralelos	0	0,006	0
	Cables dispuestos en espiral	0	0,020	0
Los valores de la tabla se ofrecen como guía. Salvo en disposición contraria en las normas técnicas especificadas no son válidos.				

Fuente: DIN [2]

Figura 3. 49 Parámetros a_1 , b_1 , δ_{min}
(Tabla F.2 Norma DIN [2])

3.4.7. Flujograma del procedimiento de la Norma DIN 1055-4

La Norma DIN [2] que aquí se desarrolla puede ser expuesta en forma grafica a través de un diagrama de flujo en el que se pueden observar las relaciones entre todos los parámetros intervinientes en el proceso de cálculo para la obtención de la sollicitación de la estructura de análisis bajo carga de viento.

De la **Figura 3.50** a la **Figura 3.54** se muestran los flujogramas del método para obtener los valores de Fuerza aerodinámica según lo establece la Norma DIN [2].

De la **Figura 3.55** a la **Figura 3.57** se presentan los diversos diagramas de flujo del método que propone la norma para obtener los valores de la fuerza y desplazamiento transversal debido a desprendimiento de vórtice que afecta a la estructura de análisis, según nuestra interpretación de la Norma DIN [2].

3.4.7.1. Carga de Viento

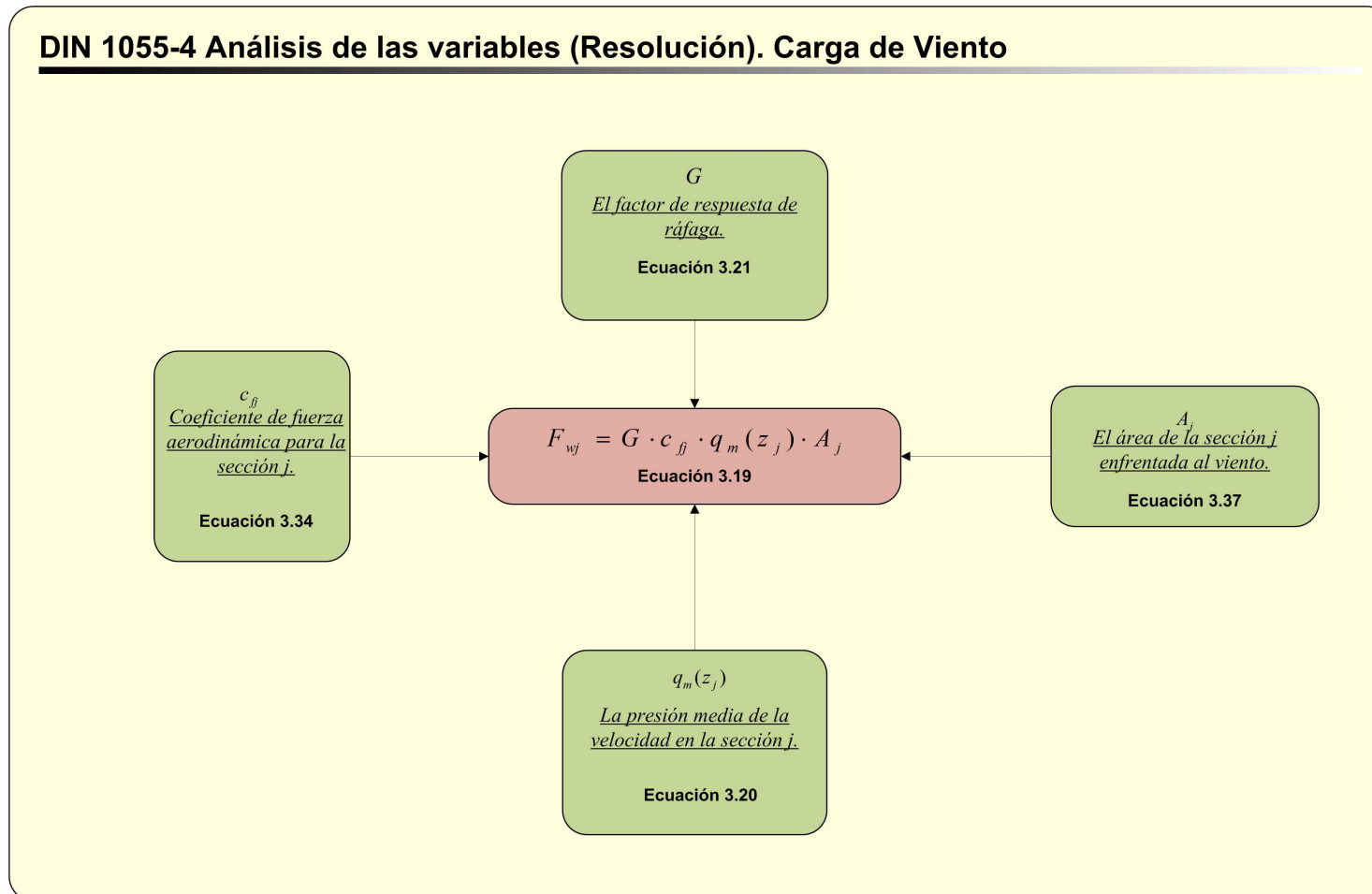


Figura 3. 50 Determinación de la Fuerza dinámica F_{wj} según DIN [2]

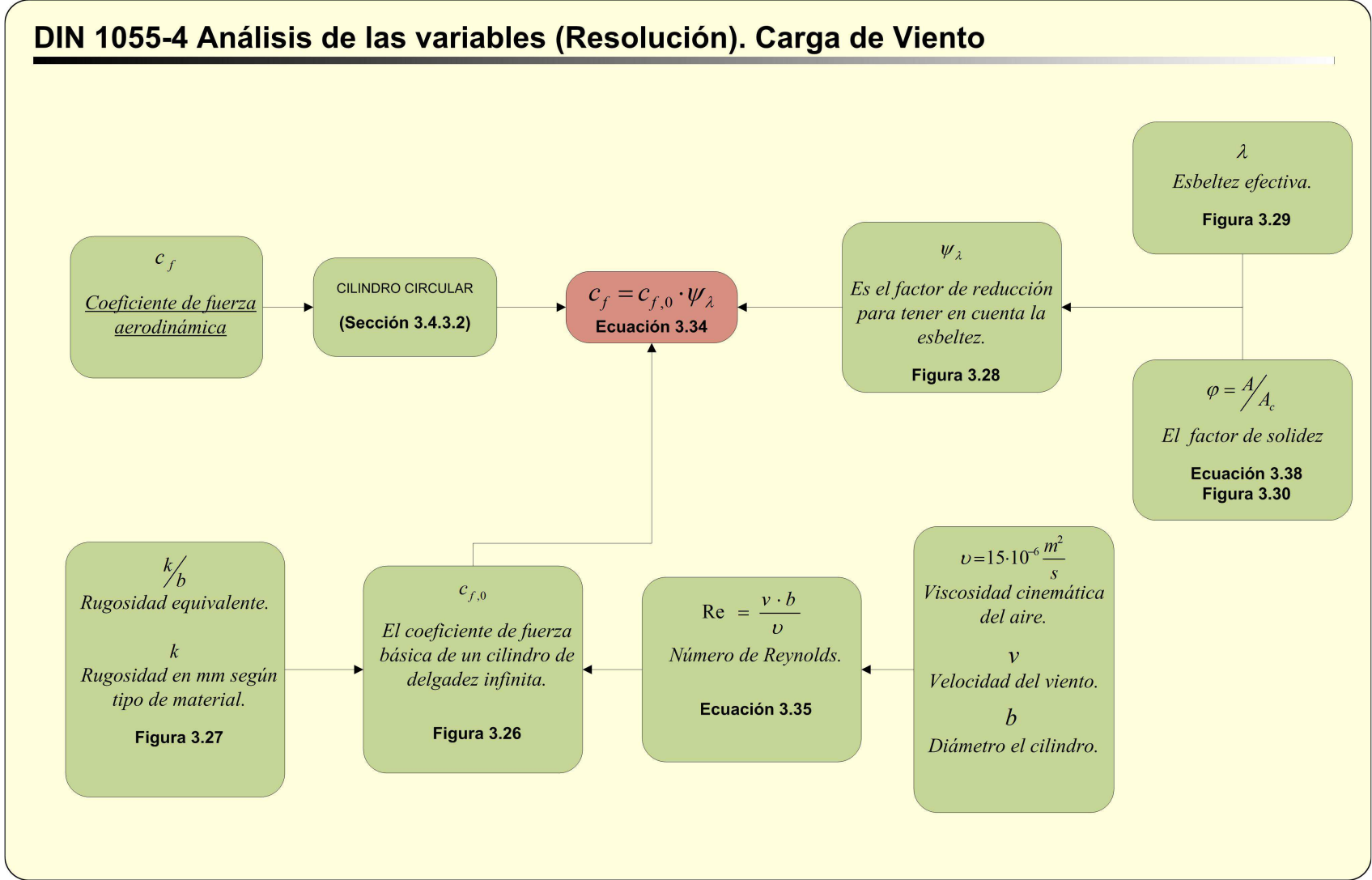


Figura 3. 51 Determinación del coeficiente de fuerza aerodinámica c_f Según DIN [2].

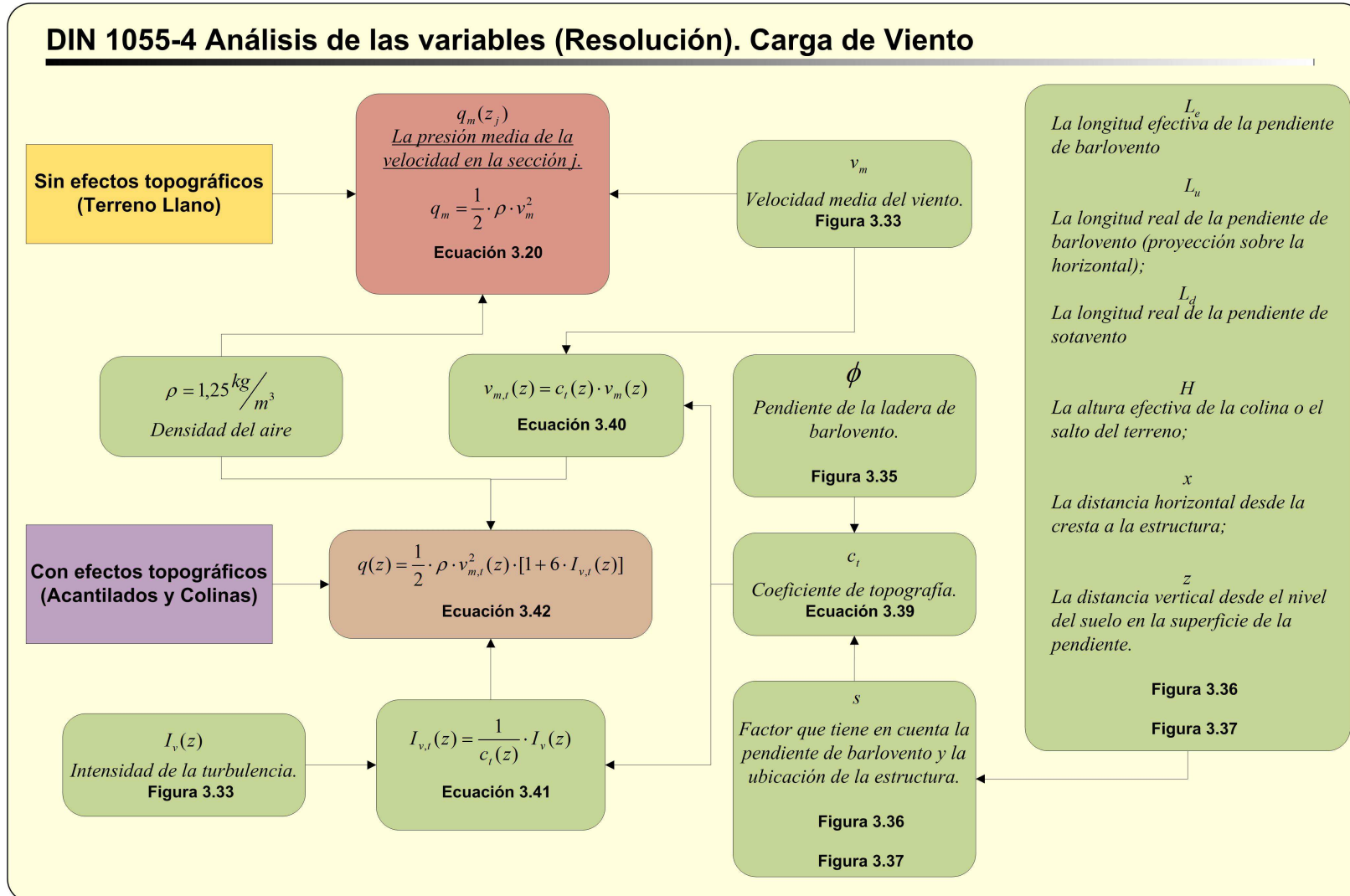


Figura 3. 52 Determinación de la presión media de la velocidad q_m según DIN [2]

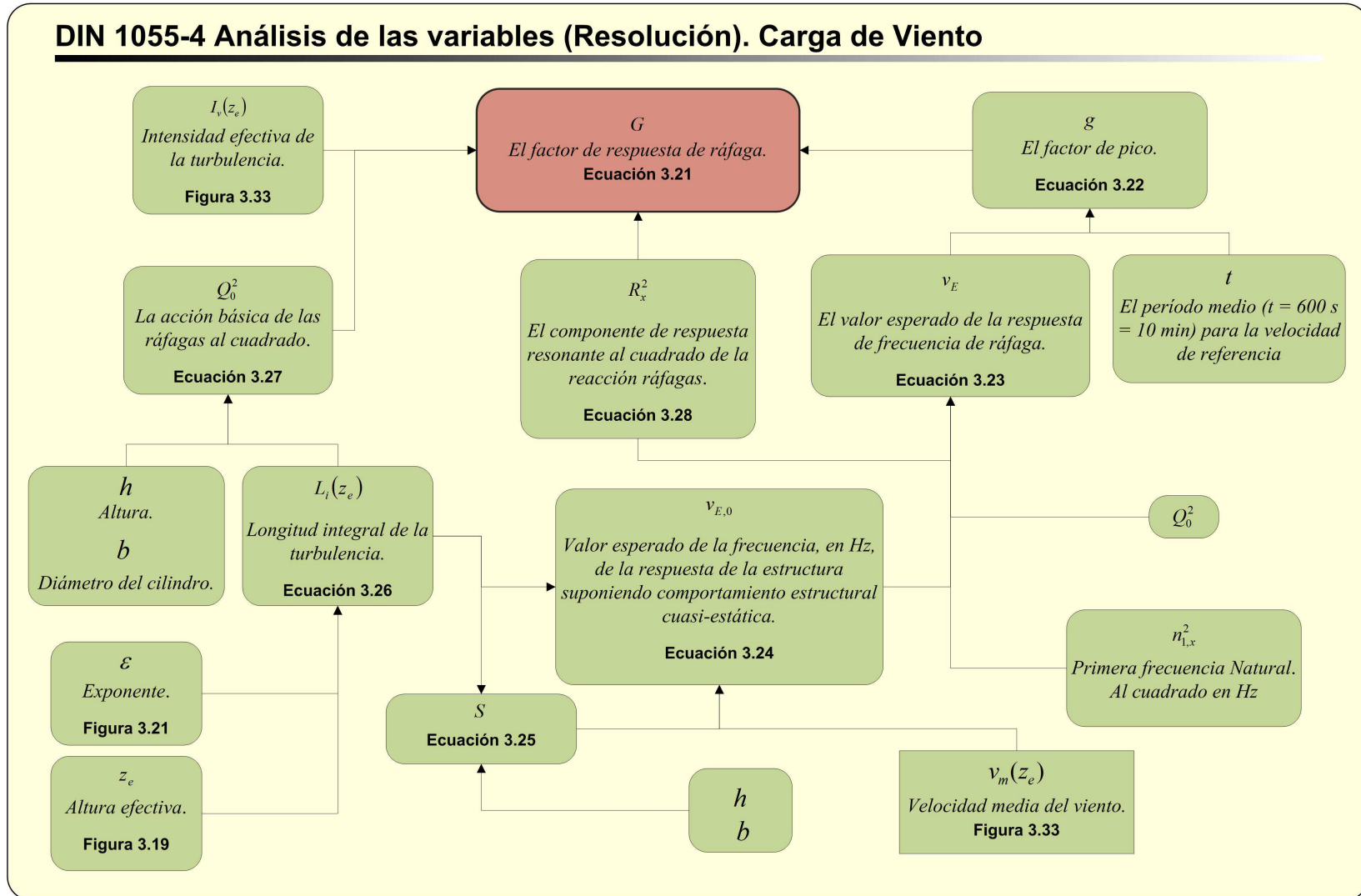


Figura 3. 53 Determinación del factor de respuesta de Ráfaga G según DIN [2]

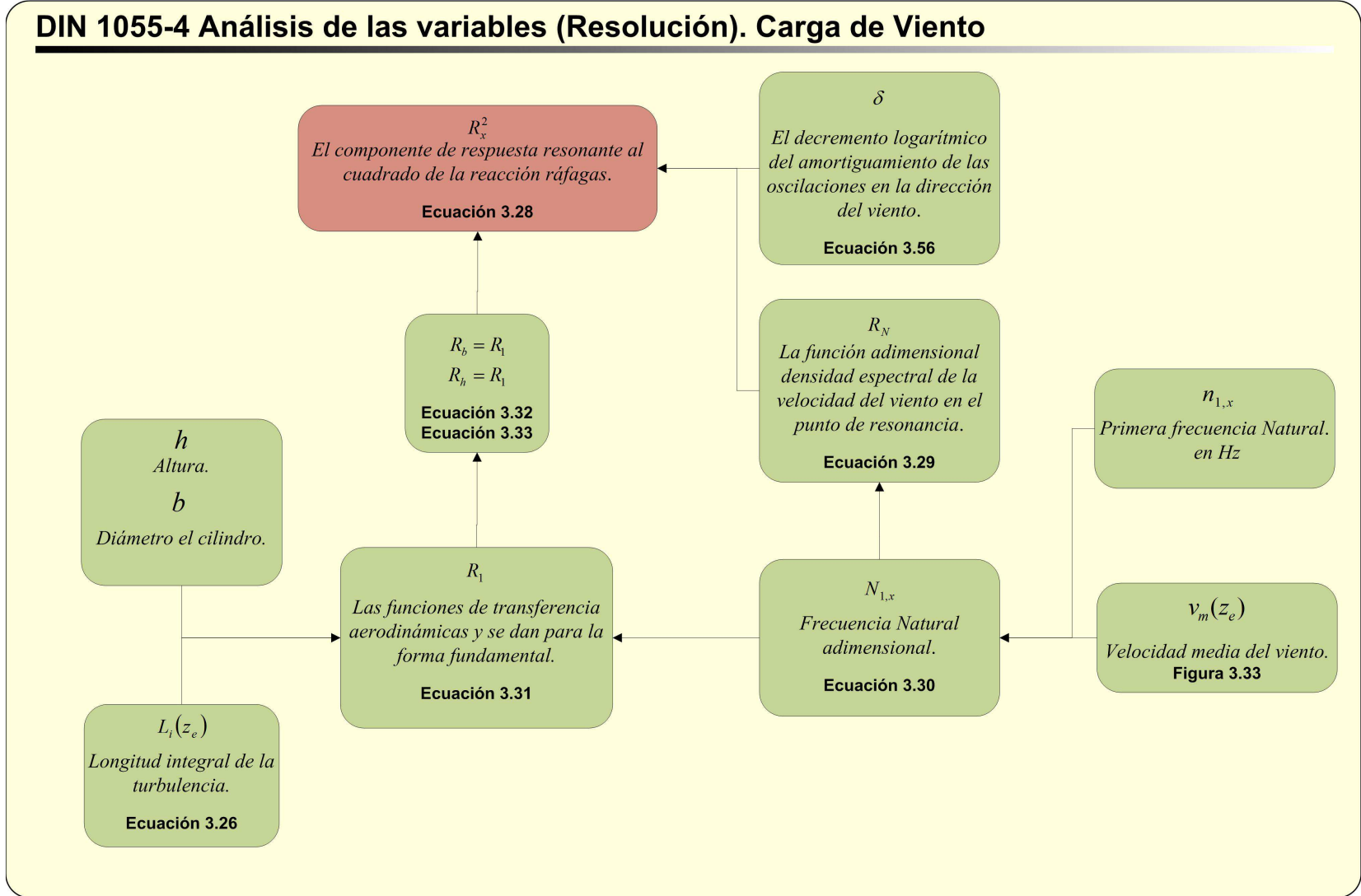


Figura 3. 54 Determinación de la componente de respuesta resonante R_x según DIN [2]

3.4.7.2. Vibraciones Transversales por desprendimiento de Vórtices.

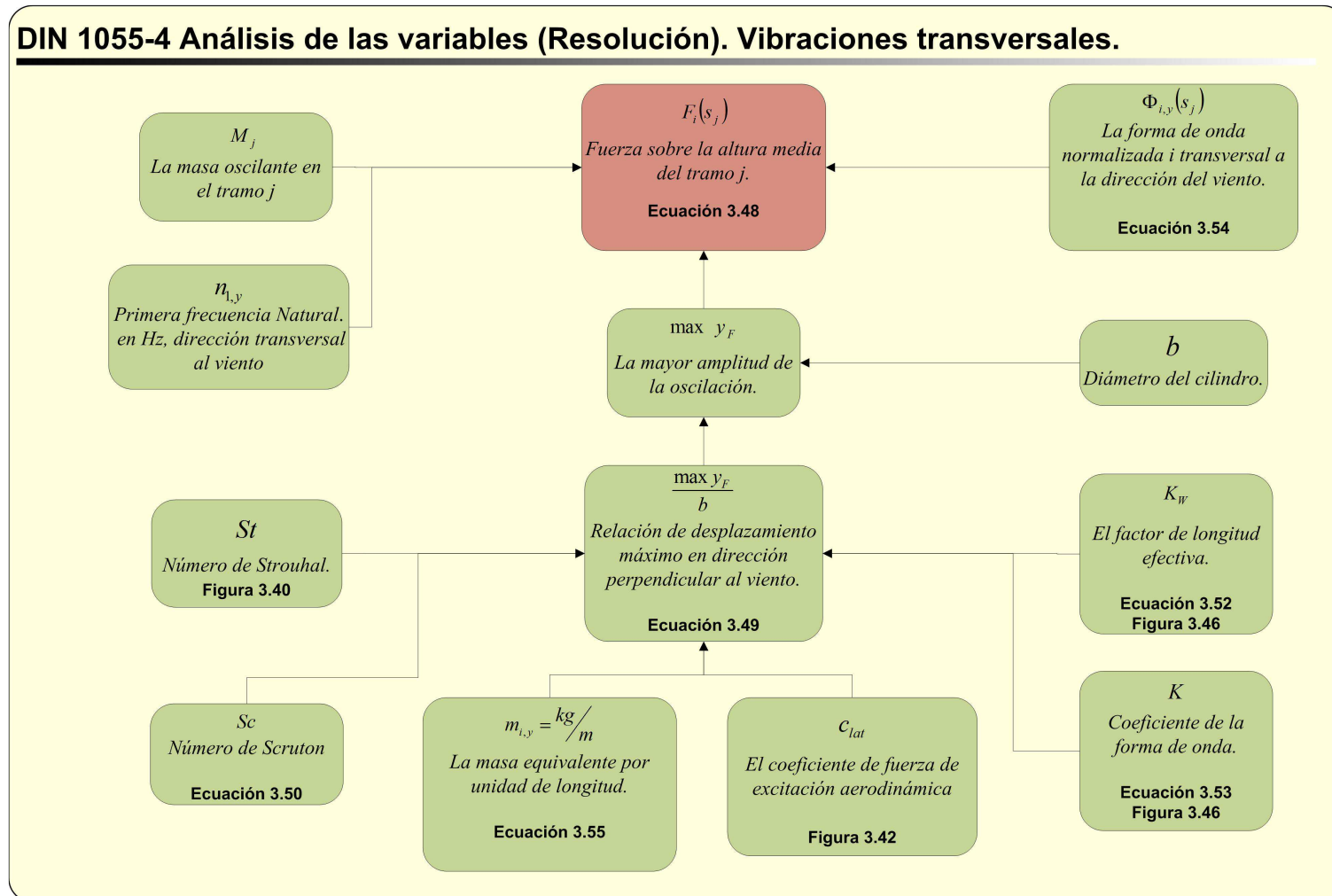


Figura 3. 55 Determinación de la Fuerza F_i y de la amplitud máxima $\max y_f$ según DIN [2]

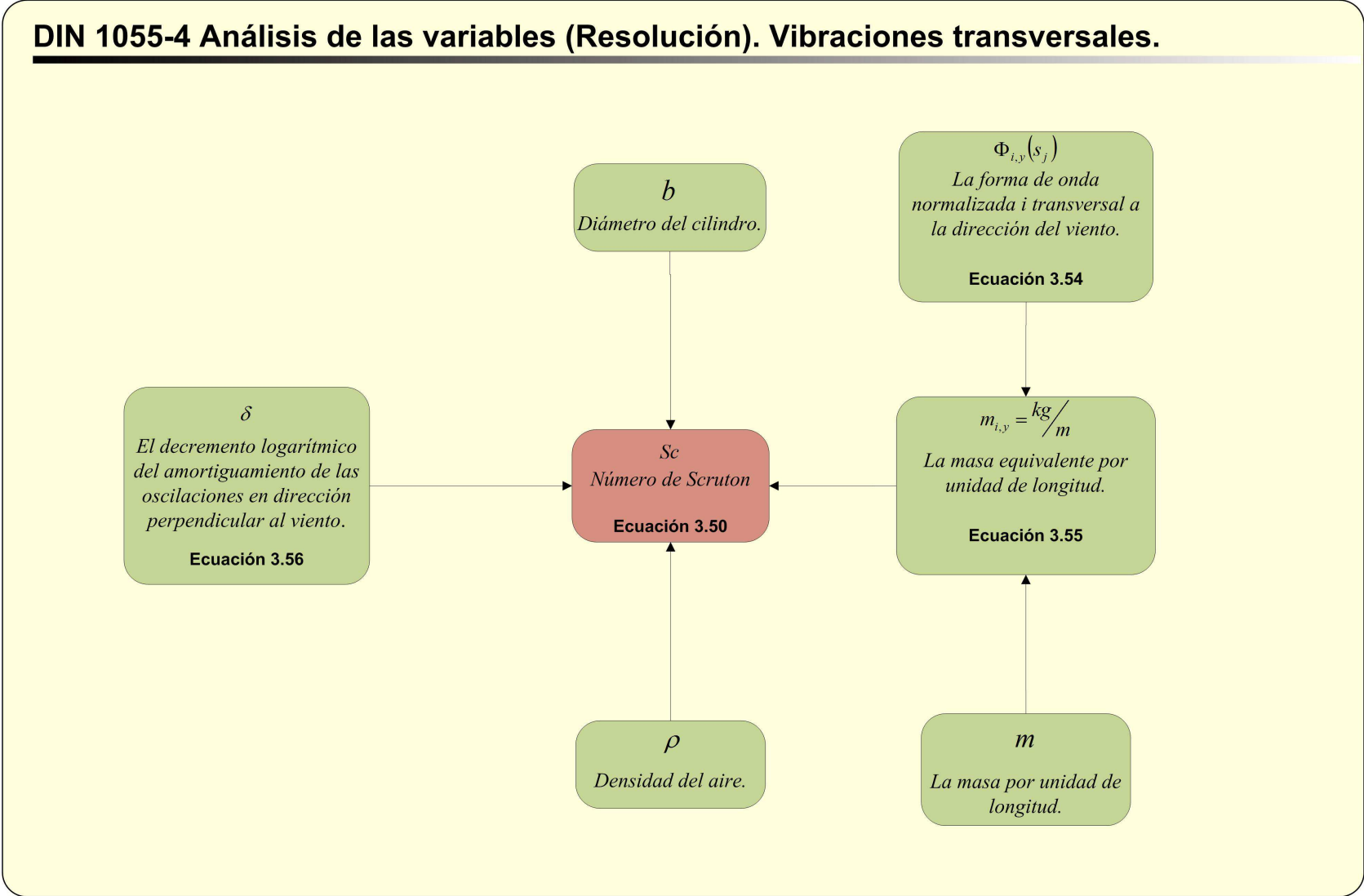


Figura 3. 56 Determinación del Número de Scruton Sc según DIN [2]

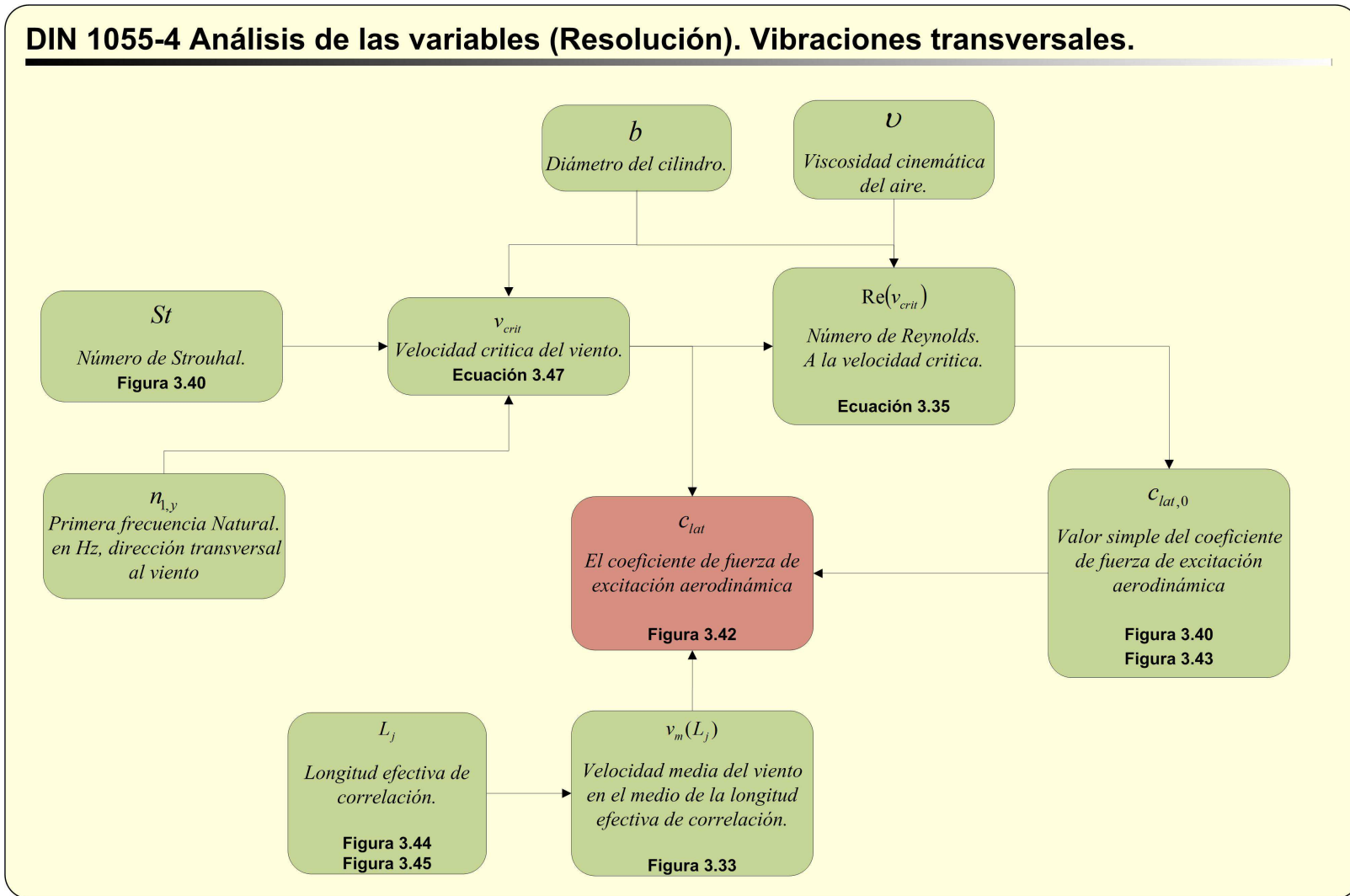


Figura 3. 57 Determinación del coeficiente de fuerza de excitación aerodinámica c_{lat} según DIN [2]

3.5. Comparación entre las normas en dirección del viento

En este apartado se analizarán las diferencias en el cálculo de la fuerza que ejerce el viento sobre la estructura, determinando similitudes y diferencias, para ello partimos de las ecuaciones.

1. Fuerza eólica.

Para la Norma **INTI CIRSOC 102**:

$$F(z) = G \cdot C_f \cdot K_e \cdot A_f \cdot q_z(z)$$

$q_z(z)$ Presión dinámica del viento sobre la estructura.

G Factor de efecto ráfaga.

C_f Coeficiente de fuerza neta.

K_e Factor de corrección de la esbeltez.

A_f Área proyectada normal al viento.

Para la Norma **DIN 1055-4**:

$$F_{wj} = G \cdot c_{fj} \cdot q_m(z_j) \cdot A_j$$

z_j Altura media de la sección j por encima del suelo.

A_j Área de la sección j enfrentada al viento.

c_{fj} Coeficiente de fuerza aerodinámica para la sección j .

G Factor de respuesta de ráfaga.

$q_m(z_j)$ Presión media de velocidad en el nivel z .

Como se puede observar en ambas ecuaciones, estas poseen casi los mismos parámetros para el cálculo de la fuerza aerodinámica del viento. A continuación se realizó un análisis comparativo de cada uno de los coeficientes de ambas ecuaciones tratando de dejar en claro las diferencias entre los distintos métodos de cálculo.

Se pone en evidencia que las áreas proyectadas al viento son las mismas en las dos ecuaciones.

2. Cálculo de factor de respuesta de ráfaga G :

Para el caso de la norma **INTI CIRSOC 102** tenemos que el factor de efecto de ráfaga G considera los efectos de carga en la dirección del viento debidos a la interacción estructura-turbulencia del viento.

$$G = 0,925 \cdot \left(\frac{1 + 1,7 \cdot g_Q \cdot I_{\bar{z}} \cdot Q}{1 + 1,7 \cdot g_v \cdot I_{\bar{z}}} \right)$$

Donde:

$Q =$ Respuesta base.

$$Q = \frac{1}{\sqrt{1 + 0,63 \cdot \left(\frac{b+h}{L_z}\right)^{0,63}}}$$

$I_z =$ Intensidad de la turbulencia según altura.

$$I_z = c \cdot \left(\frac{10}{z}\right)^{1/6}$$

$L_z =$ Escala de longitud integral de turbulencia en m.

$$L_z = \ell \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^{\bar{\epsilon}}$$

$g_Q =$ Factor de pico para la respuesta de base.

$g_v =$ Factor de pico para la respuesta al viento.

En este caso considera que (ya que se considera como estructura rígida):

$$g_v = g_Q = 3,4$$

Para el caso de la norma **DIN 1055-4** tenemos que el factor de efecto de ráfaga G se calcula de una forma diferente a la norma nacional.

$$G = 1 + 2 \cdot g \cdot I_v(z_e) \cdot \sqrt{Q_0^2 + R_x^2}$$

$g =$ Factor de pico.

$$g = \sqrt{2 \cdot \ln(v_E \cdot t)} + \frac{0,6}{\sqrt{2 \cdot \ln(v_E \cdot t)}}$$

t El período medio ($t = 600 \text{ s} = 10 \text{ min}$) para la velocidad de referencia v_{ref}

$v_E =$ Valor esperado de la respuesta de frecuencia de ráfaga

$$v_E = \sqrt{\frac{v_{E,0}^2 \cdot Q_0^2 + n_{1,x}^2 \cdot R_x^2}{Q_0^2 + R_x^2}}$$

$n_{1,x}^2$ Primera frecuencia natural al cuadrado, en Hz, de la vibración estructural en la dirección del viento.

$v_{E,0}$ = Valor esperado de la frecuencia, en Hz, de la respuesta de la estructura suponiendo comportamiento estructural cuasi-estática.

$$v_{E,0} = \frac{v_m(z_e)}{L_i(z_e)} \cdot \frac{1}{1,11 \cdot S^{0,615}}$$

Factor S

$$S = 0,46 \cdot \left[\frac{b+h}{L_i(z_e)} \right] + 1,58 \cdot \left[\frac{\sqrt{b \cdot h}}{L_i(z_e)} \right]$$

$L_i(z_e)$ = Longitud integral de la turbulencia.

$$L_i(z_e) = 300 \cdot \left(\frac{z_e}{300} \right)^\varepsilon$$

Q_0^2 = Acción básica al cuadrado de las ráfagas.

$$Q_0^2 = \frac{1}{1 + 0,9 \cdot \left(\frac{b+h}{L_i(z_e)} \right)^{0,63}}$$

R_x El componente de respuesta resonante al cuadrado de la reacción ráfagas se define como:

$$R_x^2 = \frac{\pi^2}{2 \cdot \delta} \cdot R_N \cdot R_h \cdot R_b$$

δ = Decremento logarítmico del amortiguamiento de las oscilaciones en la dirección del viento (según DIN 4133 [5]).

R_N = Función adimensional densidad espectral de la velocidad del viento en el punto de resonancia.

$$R_N = \frac{6,8 \cdot N_{1,x}}{(1 + 10,2 \cdot N_{1,x})^{5/3}}$$

$$N_{1,x} = \frac{n_{1,x} \cdot L_i(z_e)}{v_m(z_e)}$$

Las funciones de transferencia aerodinámicas R_h y R_b se dan para la forma fundamental.

$$R_1 = \frac{1}{\eta} - \frac{1}{2 \cdot \eta^2} \cdot (1 - e^{-2 \times \eta}) \quad \text{Para } \eta > 0$$

$$R_h = R_1 \quad \text{Con } \eta = \frac{4,6 \cdot N_{1,x} \cdot h}{L_i(z_e)}$$

$$R_b = R_1 \quad \text{Con } \eta = \frac{4,6 \cdot N_{1,x} \cdot b}{L_i(z_e)}$$

z_e *Altura de referencia*

$$z_e = 0,6 \cdot h$$

Como se puede observar que para el cálculo del factor de efecto de ráfaga previamente hay que obtener una gran cantidad de valores de distintos parámetros que la norma nacional no calcula directamente.

3. Cálculo de coeficiente de fuerza aerodinámica C_f y c_{ff} :

Para el caso de la norma **INTI CIRSOC** tenemos que el coeficiente de fuerza solamente tiene dos valores para secciones circulares que son de 0,6 o 1,2, con una pequeña zona de transición entre estos dos valores, dependiendo de la rugosidad de la estructura y del producto de la velocidad de referencia al cuadrado por el diámetro del cilindro. La esbeltez es tenida en cuenta con el factor de corrección de esbeltez K_e en donde se evalúa la relación entre diámetro y largo de la estructura.

Para la norma **DIN 1055-4** este coeficiente de fuerza está compuesto por el producto de dos variables, una es el coeficiente de fuerza aerodinámico para delgadez infinita $c_{f,0}$ y el factor de reducción para tener en cuenta la esbeltez ψ_λ . El factor $c_{f,0}$ depende del número de Reynolds y varía dependiendo de la rugosidad relativa de la estructura. El factor que tiene en cuenta la esbeltez ψ_λ depende de una proporción de la relación de diámetro y largo (esbeltez), como así de otros factores que se explican en la norma DIN 1055-4.

4. Cálculo de la presión dinámica q :

Para el caso de la norma **INTI CIRSOC** el cálculo de la presión dinámica es de la siguiente forma:

$$q_z = 0,613 \cdot K_z \cdot K_{zt} \cdot K_d \cdot V^2 \cdot I \left[\frac{N}{m^2} \right]$$

K_z = Coeficiente de exposición para la presión dinámica, evaluado a la altura z .

K_{zt} = Factor topográfico. Por tratarse de terreno abierto el valor de este coeficiente es unitario.

K_d = Factor de direccionalidad del viento depende del tipo de estructura.

V = Velocidad básica del viento

I = Factor de importancia.

De lo expresado anteriormente la presión dinámica del viento según el cálculo de la norma **INTI CIRSOC 102** es función de una sola variable que es K_z que depende de la altura y de dos parámetros mas, como lo son α (Exponente para la ley potencial de la velocidad de ráfaga de 3 segundos) y z_g (Altura nominal de la capa limite).

Para el caso de la norma **DIN 1055-4** el cálculo de la presión dinámica es de la siguiente forma:

$q_m(z_j)$ La presión media de velocidad en el nivel z .

$$q_m = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_m^2 \left[\frac{N}{m^2} \right]$$

Siendo ρ la densidad del aire y v_m es la velocidad media del viento que varía de forma exponencial:

v_m = Velocidad media del viento:

$$v_m = 30 \cdot \left(\frac{z}{10} \right)^{0,16} \quad \text{Para } z \geq z_{\min}$$

Como se puede observar v_m varia de forma exponencial siempre en base a la velocidad de referencia, que es la velocidad media tomada en un intervalo de 10 minutos.

La diferencia que se presenta más evidente es la definición de la velocidad de referencia (DIN 1055-4) y la velocidad básica del viento (INTI CIRSOC 102) ya que son velocidades promedios de diferente duración, en el caso de DIN 1055-4 son 10 minutos y en el caso de la norma INTI CIRSOC 102 el tiempo es de 3 segundos.

Las dos normas coinciden en la altura de velocidad de referencia del viento y en la frecuencia de ocurrencia, (10 metros de altura y una probabilidad de una ocurrencia en 50 años), de aquí surge la primera diferencia entre las velocidades de referencia ya que la norma nacional toma como referencia una velocidad de ráfaga de duración 3 segundos, en cambio la norma alemana sugiere como velocidad de referencia aquella

velocidad promedio que es alcanzada por el viento dentro de un rango de duración de 10 minutos, o sea, 600 segundos.

3.6. Conclusiones del Capítulo

En el presente capítulo se presentaron el procedimiento que cada norma plantea para la verificación de una estructura bajo carga de viento aplicada a nuestra estructura de análisis, para ello se recopiló la información en este capítulo transcribiendo párrafos de dichas Normativas.

Se procedió a estudiar los alcances de cada una de ellas y se determinó que la norma Nacional INTI CIRSOC 102 establece un procedimiento para el cálculo de estructuras bajo carga de viento; pero no posee un método de cálculo analítico para los efectos transversales debido a desprendimiento de vórtice. La Norma INTI CIRSOC 102 recomienda para el fenómeno de inestabilidad transversal, su procedimiento de túnel de viento o consultar bibliografía especializada. La Norma DIN 1055-4 establece procedimientos de cálculo para carga de viento y también contempla el caso de inestabilidades transversales producidas por desprendimiento de vórtice haciendo a esta última Norma mucho más completa pero con un nivel de complejidad más alto que la Norma Nacional.

Como ya se mencionó, dejando expuestos en los diagramas de flujo de cada una de las Normas, la Norma Nacional requiere menor esfuerzo de cálculo para determinar la carga de viento con respecto al mismo procedimiento dado por DIN 1055-4.

Otra conclusión que podemos obtener de este capítulo es que la aplicación de la Norma DIN 1055-4 hace referencia solamente a Alemania, con sus zonas de viento y consideraciones de su geografía. En la parte final de este capítulo se realizó una comparación entre el método propuestos por ambas Normas y como es evidente, presentan una similitud en los métodos de cálculo.

En el próximo capítulo se aplicó la Norma INTI CIRSOC 102 en la región de nuestro interés (Sur Córdoba) con su velocidad básica y demás factores que se irán presentando a posteriori. Por el lado de la Norma DIN 1055-4 se aplicó con las condiciones topográficas de llanura y en la zona de viento más severa de Alemania y se estudiaron los resultados de ambas Normas.

3.7. Resumen del Capítulo

Se recopilaron los párrafos útiles para la aplicación de las Normas, se estudiaron sus alcances y se establecieron sus limitaciones. También se determinaron los fenómenos que contemplan dichas normativas, se realizó una organización de la información de modo gráfico y se compararon en su procedimiento. Dejando todos los elementos necesarios para realizar una aplicación clara y ordenada de las Normativas.

En el capítulo siguiente se realiza la aplicación de las Normas a nuestra estructura de análisis.

3.8. Referencias

- ¹ INTI, “CIRSOC 102, Reglamento Argentino de acción del viento sobre las construcciones”, INTI, Buenos Aires, 2005.
- ² DIN, “1055-4, Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 4: Windlasten”, DIN, Berlin, 2005.
- ³ <https://translate.google.com.ar/>
- ⁴ <http://www.reverso.net/>
- ⁵ DIN, “4133, Schornsteine aus Stahl”, DIN, Berlin, 2005.

Capítulo 4 Aplicación

4.1. Introducción

En el presente capítulo se realiza la aplicación de las normativas desarrolladas en el Capítulo 3 para la estructura de análisis del presente Proyecto Integrador; tanto en sentido de la dirección del viento (X) como en dirección transversal a este (Y).

Esta aplicación arroja los valores numéricos que provienen directamente del método que proponen las dos Normas estudiadas, con los valores obtenidos se pudo calcular las tensiones debida a efectos aerodinámicos e inestabilidades aeroelásticas con el objeto de determinar la vida a la fatiga y de este modo determinar la necesidad de un sistema absorbedor de vibraciones que prolongue la vida útil de la chimenea.

4.2. Objetivos

Los objetivos del presente Capítulo son la obtención de las cargas externas producida por el viento que deberá resistir la estructura, en este capítulo determinaremos:

1. Magnitudes de las fuerzas en dirección del viento según los criterios normativos.
2. Magnitud de las fuerzas transversales a la dirección del viento.
3. Desplazamientos en dirección del viento.
4. Desplazamientos en dirección transversal a la dirección del viento.
5. Análisis tensional.
6. Vida a la fatiga.

Con esta información es posible calcular todos los esfuerzos a lo que está sometida la estructura y así poder evaluar la necesidad de colocar un absorbedor de vibraciones.

Para evitar confusiones debido al uso de las simbologías propias de cada Norma; al principio de este capítulo se agregó tablas resumen de las simbologías utilizadas, con el fin de otorgarle al lector una mejor comprensión de las acciones que se van llevando a cabo durante la aplicación de las Normativas a la estructura de análisis del Proyecto Integrador.

En este capítulo se tomó como premisa de trabajo determinar toda la información que puede ser extraída de la aplicación de las Normas finalizando cada resultado con pequeños comentarios y, finalmente, en la conclusión de este capítulo se discuten los resultados obtenidos.

4.3. Símbolos

4.3.1. Simbología Local INTI CIRSOC 102

Símbolo	Descripción	Unidad
A_f	Área de edificios y otras estructuras abiertas, sea normal a la dirección del viento o proyectada sobre un plano normal a la dirección del viento.	m ²
B	Dimensión horizontal de un edificio medida normalmente a la dirección del viento.	m
\bar{b}	Factor de velocidad media horaria de viento en la expresión.	----
\hat{b}	Factor de velocidad de ráfaga de 3 seg. .	----
C_f	Coefficiente de fuerza que se debe usar en la determinación de las cargas de viento para otras estructuras.	----
c	Factor de intensidad de la turbulencia en la expresión.	----
D	Diámetro de una estructura o elemento circular.	m
G	Factor de efecto de ráfaga.	----
g_Q	Factor de pico para la respuesta base en las expresiones.	----
g_R	Factor de pico para la respuesta resonante en la expresión.	----
g_v	Factor de pico para la respuesta al viento en las expresiones.	----
h	Altura media de la cubierta de un edificio o altura de otra estructura, excepto para un ángulo de la cubierta θ menor o igual a 10° en que se usará la altura del alero, en m.	m
I	Factor de importancia.	----
$I_{\bar{z}}$	Intensidad de la turbulencia a la altura z que se obtiene de la expresión.	----
K_1, K_2, K_3	Multiplicadores topográficos en la Figura 2 para obtener K_{zt} .	----
K_d	Factor de direccionalidad del viento.	----
K_h	Coefficiente de exposición para la presión dinámica, evaluado a la altura $z = h$.	----
K_z	Coefficiente de exposición para la presión dinámica, evaluado a la altura z .	----
K_{zt}	Factor topográfico.	----
$L_{\bar{z}}$	Escala de longitud integral de la turbulencia.	m
l	Factor de escala de longitud integral.	m
m_I	Masa modal	Kg
n_1	Frecuencia natural del edificio.	Hz
Q	Respuesta base obtenida de la expresión.	----
q	Presión dinámica.	N/m ²
q_z	Presión dinámica evaluada a la altura z sobre el nivel del terreno.	N/m ²
V	Velocidad básica del viento.	m/s
z	Altura sobre el nivel del terreno.	m
\bar{z}	Altura equivalente de la estructura	m
z_g	Altura nominal de la capa límite atmosférica utilizada en este Reglamento.	m
z_{min}	Altura mínima.	m
α	Exponente para la ley potencial de la velocidad de ráfaga de 3 segundos.	----
$\hat{\alpha}$	Inversa de α .	----
$\bar{\alpha}$	Exponente para la ley potencial de la velocidad media horaria del viento.	----
$\bar{\epsilon}$	Exponente para la ley potencial de la escala de longitud integral.	----

Tabla 4. 1 Simbología Local para Norma INTI CIRSOC 102

4.3.2. Simbología Local DIN 1055-4

Símbolo	Descripción	Unidad
A_{ref}	Superficie de referencia	m ²
F_w	Fuerza eólica total ejercida sobre un edificio	N
G	Factor de respuesta de ráfaga.	----
H_s	Altura al nivel del mar.	m
Sc	Número de Scruton	----
St	Número de Strouhal	----
R_h, R_b	Las funciones de transferencia aerodinámica.	----
R_N	Función de densidad espectral adimensional	----
R_x	Proporción de respuesta resonante	----
b	Anchura del componente o estructura	m
c_f	Coefficiente de fuerza aerodinámica	----
d	Dimensión perpendicular a la dirección de flujo	m
g	Factor de cresta	----
h	Altura de la estructura	m
k	Rugosidad de la superficie	----
$m_{l,x}$	Masa equivalente de vibraciones en la dirección del viento	
$n_{l,x}$	Frecuencia natural fundamental de las vibraciones estructurales en la dirección del viento	Hz
q	Presión aerodinámica, que se asocia con una velocidad del viento v	Pa
q_{ref}	Presión aerodinámica, que se asocia con una velocidad del viento promediada en el tiempo v_{ref} .	Pa
v	Velocidad de ráfaga de viento	m/s
v_{crit}	Velocidad crítica del viento	m/s
v_{ref}	Velocidad del viento promediada en el tiempo	m/s
z_e, z_i	Altura de referencia para la presión externa o presión interna o coeficiente de fuerza	m
z	Altura desde el suelo	m
Φ	Forma de onda.	----
δ	Decremento de amortiguación logarítmica en el anexo F	----
φ	Factor de solidez	----
μ	Parámetro de superficie para la permeabilidad de las paredes	----
ν	Viscosidad cinemática	s/m ²
ρ	La densidad del aire	Kg/m ³
ψ_λ	Factor de reducción para el coeficiente de fuerza aerodinámica para el edificio o construcción de esbeltez finita.	----
ψ_s	Factor de sombra	----
Índices		
i	Interior; Orden de frecuencia natural y forma del modo	----
j	El número de sección o un punto en una estructura o componente	----
v	Velocidad del viento	m/s
x	En la dirección del viento	m
y	Transversal a la dirección del viento	m
z	En la dirección vertical	m

Tabla 4. 2 Simbología Local para Norma DIN 1055-4

4.4. Lineamientos

El análisis normativo plantea que, la fuerza debido a carga de viento que actúa sobre la estructura es una función de la altura sobre el nivel del terreno; para hacer una correcta interpretación de los valores que son extraídos de las Normas, la estructura de análisis fue dividida en tramos, en cada uno de ellos se determinaron la correspondiente carga de viento aplicada al baricentro de dicho tramo.

Esta fragmentación en tramos que se realizó a la estructura de análisis se muestra en la **Tabla 4.3**.

Tramo	Cota de tramo [m]	Long, de tramo ℓ [m]	Cota al baricentro del tramo z [m]
1	[0 - 1,5]	1,5	0,75
2	[1,5 - 3]	1,5	2,25
3	[3 - 4,5]	1,5	3,75
4	[4,5 - 6]	1,5	5,25
5	[6 - 7]	1	6,5
6	[7 - 8]	1	7,5
7	[8 - 9]	1	8,5
8	[9 - 10]	1	9,5
9	[10 - 11]	1	10,5
10	[11 - 12]	1	11,5
11	[12 - 13]	1	12,5
12	[13 - 14]	1	13,5
13	[14 - 15]	1	14,5
14	[15 - 16]	1	15,5
15	[16 - 17]	1	16,5
16	[17 - 18]	1	17,5
17	[18 - 19]	1	18,5
18	[19 - 20]	1	19,5
19	[20 - 21]	1	20,5
20	[21 - 22]	1	21,5
21	[22 - 22,2]	0,2	22,1

Tabla 4. 3 Tabla de tramos de aplicación de carga de viento de la estructura de análisis

4.5. Análisis en dirección del viento (X)

Como ya se había mencionado anteriormente, (Capítulo 3), las dos normas que se utilizaron en el presente Proyecto Integrador plantean su método de cálculo para la estructura bajo carga de viento y contemplan al tipo de nuestra estructura de análisis.

Paso siguiente se realizó la aplicación del método para carga de viento en dirección del viento (X).

4.5.1. Análisis a través de norma INTI CIRSOC 102

En este apartado se realizó la aplicación de lo expuesto en el capítulo anterior en la estructura de análisis. Para la resolución de un problema de carga de viento sobre la estructura de análisis, se aplicó el **método 2** brindado por el reglamento INTI [1], se determinaron las cargas de viento y se calcularon los desplazamientos en dirección del viento (X) de la estructura de análisis según Norma.

4.5.1.1. Procedimiento de Diseño

Se determinarán las cargas de viento para una chimenea de acero de 22,2 metros de altura (estructura de análisis) en las siguientes condiciones:

<u>Ubicación:</u>	Provincia de Córdoba, República Argentina.
<u>Topografía:</u>	Plana, Llanura Pampeana.
<u>Terreno:</u>	Agrícola.
<u>Dimensiones exteriores:</u>	Diámetro 1,23 metros, Altura 22,2 metros.

Carga de viento de diseño F .

1. *Velocidad básica del viento V .*

V es utilizada en la determinación de las cargas de viento de diseño sobre estructuras se extrae de la **Figura 3.1. La Velocidad Básica del viento para la provincia de Córdoba:**

$$V = 46 \quad (4.1)$$

2. *Factor de direccionalidad del viento, K_d .*

Se obtuvo de la **Figura 3.3**, para chimeneas circulares:

$$K_d = 0,95 \quad (4.2)$$

3. *Categoría del edificio.*

Categoría II extraído de la **Figura 3.5.**

4. Factor de importancia I

Extraído de la **Figura 3.4.**

$$I = 1 \quad (4.3)$$

5. Categoría de exposición.

Exposición C. Terrenos abiertos con obstrucciones dispersas, con alturas generalmente menores que **10 metros**. Esta categoría incluye campo abierto plano y terrenos agrícolas. (**Figura 3.8**).

6. Coeficiente de exposición K_z .

Coeficiente de exposición para la presión dinámica, evaluado a la altura z . Los valores se pueden extraer de la **Figura 3.10** y responden a las siguientes ecuaciones:

Para $z \leq 5m$

$$K_z = 2,01 \cdot \left(\frac{5}{Z_g} \right)^{2/\alpha} \quad (4.4)$$

Para $5m \leq z \leq z_g$

$$K_z = 2,01 \cdot \left(\frac{z}{Z_g} \right)^{2/\alpha} \quad (4.5)$$

Los parámetros Z_g y α de la ecuación anterior se extraen de la **Figura 3.13**.

$$Z_g = 274 \quad (4.6)$$

$$\alpha = 9,5 \quad (4.7)$$

Reemplazando los valores de (4.6) y (4.7) en las ecuaciones 4.4 y 4.5.

Para $z \leq 5$

$$K_z = 2,01 \cdot \left(\frac{5}{274} \right)^{2/9,5} \quad (4.8)$$

Para $5 \leq z \leq 274$

$$K_z = 2,01 \cdot \left(\frac{z}{274} \right)^{2/9,5} \quad (4.9)$$

7. Factor topográfico K_{zt}

El efecto del aumento de la velocidad del viento se debe incluir en el cálculo de las cargas de viento de diseño mediante el factor K_{zt} (Ecuación 3.1).

Siendo para terreno llano: $H/L_h = x/L_h = z/L_h = 0$

Donde K_1 , K_2 y K_3 se extrajeron de la Figuras 3.11 y 3.12.

$$\begin{aligned} K_1 &= 0 \\ K_2 &= 1 \\ K_3 &= 1 \end{aligned} \quad (4.10)$$

Reemplazando 4.10 en la Ecuación 3.1 tenemos:

$$K_{zt} = (1 + 0 \cdot 1 \cdot 1)^2 \quad (V.1-3.1)$$

$$K_{zt} = 1 \quad (4.11)$$

8. La altura equivalente \bar{z}

Se extrajo de la Figura 3.13 (0,6h pero no menor que z_{min} para todos los edificios de altura h).

$$\bar{z} = 0,6 \cdot 22,2 = 13,32 \text{ Metros.} \quad (4.12)$$

Los valores de z_{min} y c están indicados para cada tipo de exposición en la Figura 3.13.

$$c = 0,20 \quad (4.13)$$

$$z_{min} = 4,6 \text{ Metros} \quad (4.14)$$

$$z_{min} < \bar{z}$$

9. Intensidad de la turbulencia a la altura equivalente I_z

Como (4.14) < (4.12), utilizamos (4.12).

Reemplazando (4.12) y (4.13) en la Ecuación 3.3 obtenemos:

$$I_z = 0,20 \cdot \left(\frac{10}{13,32} \right)^{1/6} \quad (V.1-3.3)$$

$$I_z = 0,191 \quad (4.15)$$

Donde:

b Dimensión horizontal de un edificio medida normalmente a la dirección del viento, en m.

h Altura media de la cubierta de un edificio o altura de otra estructura, excepto para un ángulo de la cubierta θ menor o igual a 10° en que se usará la altura del alero, en m.

$$b = 1,23 \text{ m} \quad (4.16)$$

$$h = 22,2 \text{ m} \quad (4.17)$$

Donde ℓ y $\bar{\varepsilon}$ están indicados en la **Figura 3.13**.

$$\ell = 152 \text{ metros} \quad (4.18)$$

$$\bar{\varepsilon} = 1/5,0 = 0,2 \quad (4.19)$$

10. Longitud integral de la turbulencia a la altura equivalente $L_{\bar{z}}$.

Reemplazando (4.12), (4.18) y (4.19) en la **Ecuación 3.5** tenemos:

$$L_{\bar{z}} = \ell \cdot \left(\frac{\bar{z}}{10} \right)^{\bar{\varepsilon}} = 152 \cdot \left(\frac{13,32}{10} \right)^{0,2} \quad (V.1-3.5)$$

$$L_{\bar{z}} = 160,97 \quad (4.20)$$

11. Respuesta de base Q

Reemplazando las (4.16), (4.17) y (4.20) en la **Ecuación 3.4** obtenemos:

$$Q = \sqrt{\frac{1}{1 + 0,63 \cdot \left(\frac{1,23 + 22,2}{160,97} \right)^{0,63}}} \quad (V.1-3.4)$$

$$Q = 0,9178 \quad (4.21)$$

12. Las magnitudes g_Q y g_v

$$g_Q = g_v = 3,4 \quad (4.22)$$

13. Factor de efecto de ráfaga G .

Reemplazando (4.15), (4.21) y (4.22) en la **Ecuación 3.2** tenemos el factor de efecto de ráfaga G :

$$G = 0,925 \cdot \left(\frac{1 + 1,7 \cdot 3,4 \cdot 0,191 \cdot 0,9178}{1 + 1,7 \cdot 3,4 \cdot 0,191} \right) \quad (\text{V.1-3.2})$$

$$G = 0,8851 \quad (4.23)$$

14. Clase cerramiento.

No aplica. Dado que nuestra estructura de análisis no presenta cerramientos.

15. Coeficiente presión interna GC_{pi} .

No se utiliza ya que no se aplica el artículo 5.9 de la Norma INTI [1] (Clasificación de cerramientos).

16. Coeficientes de presión externa C_p .

No aplica ya que no se aplica el artículo 5.9 de la Norma INTI [1] (Clasificación de cerramientos).

17. Presión dinámica q_z

La presión dinámica q_z , evaluada a la altura z , se calcula mediante la expresión (3.6). Reemplazando (4.1), (4.2), (4.3), (4.8) y (4.11) en la Ecuación 3.6:

Para $z \leq 5m$

$$q_z = 0,613 \cdot 2,01 \cdot \left(\frac{5}{274} \right)^{2/9,5} \cdot 1 \cdot 0,95 \cdot 46^2 \cdot 1 \quad (\text{V.1-3.6})$$

$$q_z = 1066,19 \quad (4.24)$$

Reemplazando (4.1), (4.2), (4.3), (4.8) y (4.9) en la Ecuación 3.6:

Para $5m \leq z \leq 274$

$$q_z = 0,613 \cdot 2,01 \cdot \left(\frac{z}{274} \right)^{2/9,5} \cdot 1 \cdot 0,95 \cdot 46^2 \cdot 1 \quad (\text{V.2-3.6})$$

$$q_z = 2476,83 \cdot \left(\frac{z}{274} \right)^{2/9,5} \quad (4.25)$$

18. Esbeltez:

$$\frac{\ell}{b} = \frac{22,2}{1,23} = 18,13 \quad (4.26)$$

19. Factor de corrección por esbeltez:

De la **Figura 3.16** interpolando para la esbeltez de nuestra estructura de análisis (4.26) obtenemos:

$$K_e = 0,83 \quad (4.27)$$

20. Velocidad V_z a la altura z .

Reemplazando (4.1) y (4.7) en la **Ecuación 3.11**, obtenemos la

$$V_z = \left(\frac{z}{10}\right)^{9,5} \cdot 46 \quad (4.28)$$

21. Coeficiente de fuerza neta

Los coeficientes de fuerza C_f para formas prismáticas con secciones transversales redondeadas en las aristas se obtuvieron de la **Figura 3.15**, en función de $V_z \cdot b$. Para valores intermedios de $V_z \cdot b$ se realizó la interpolación lineal. Pero para este Proyecto Integrador se seleccionaron los coeficiente de fuerza más desfavorables correspondiente a un cilindro rugoso.

De la **Ecuación 4.28** calculamos las alturas z donde se cumplen las condiciones $V_z \cdot b$ de la **Figura 3.15**.

Para un cilindro rugoso donde $V_z \cdot b < 4 \text{ m}^2/\text{s}$, esta relación se cumple en el rango de $0 < z < 7,56$ metros, el correspondiente coeficiente de fuerza según la **Figura 3.15** es:

$$C_f = 1,2 \quad (4.29)$$

Para un cilindro rugoso donde $V_z \cdot b > 10 \text{ m}^2/\text{s}$, esta relación se cumple en $z > 8,33$ metros, el coeficiente de fuerza, según la **Figura 3.15**, es:

$$C_f = 1,2 \quad (4.30)$$

Se observa que el coeficiente de fuerza C_f no presenta cambio, manteniéndose constante con la variación del factor $V_z \cdot b$. Por ello consideramos el valor de C_f constante e igual a 1,2 (4.29 y 4.30).

Carga de viento de diseño F.

Reemplazando (4.16), (4.23), (4.24), (4.27) y (4.29) en la **Ecuación 3.8** nos da:

Para $z \leq 5m$ donde $V_z \cdot b < 4 \text{ m}^2/\text{s}$

$$F(z) = 0,8851 \cdot 1,2 \cdot (1,23 \cdot \ell) \cdot 0,83 \cdot 1066,19 \quad (V.1-3.8)$$

$$F(z) = 1156,1 \cdot \ell \text{ [N]} \quad (4.31)$$

Remplazando (4.16), (4.23), (4.27), (4.25) y (4.29) en la Ecuación 3.7 nos da:

Para $5m < z \leq 7,56m$ donde $V_z b \leq 4 \text{ m}^2/\text{s}$

$$F(z) = 0,8851 \cdot 1,2 \cdot (1,23 \cdot \ell) \cdot 0,83 \cdot 2476,83 \cdot \left(\frac{z}{274}\right)^{2/9,5} \quad (\text{V.1-3.7})$$

$$F(z) = 2685,67 \cdot \ell \cdot \left(\frac{z}{274}\right)^{2/9,5} [N] \quad (4.32)$$

Remplazando (4.16), (4.23), (4.27), (4.25) y (4.29) en la Ecuación 3.7 nos da:

Para $7,56m < z \leq 8,33m$ donde $4 \text{ m}^2/\text{s} < V_z b \leq 10 \text{ m}^2/\text{s}$

$$F(z) = 0,8851 \cdot 1,2 \cdot (1,23 \cdot \ell) \cdot 0,83 \cdot 2476,83 \cdot \left(\frac{z}{274}\right)^{2/9,5} \quad (\text{V.2-3.7})$$

$$F(z) = 2685,67 \cdot \ell \cdot \left(\frac{z}{274}\right)^{2/9,5} [N] \quad (4.33)$$

Remplazando (4.16), (4.23), (4.27), (4.25) y (4.30) en la Ecuación 3.7 nos da:

Para $8,33m < z$ donde $10 \text{ m}^2/\text{s} < V_z b$.

$$F(z) = 0,8851 \cdot 1,2 \cdot (1,23 \cdot \ell) \cdot 0,83 \cdot 2476,83 \cdot \left(\frac{z}{274}\right)^{2/9,5} \quad (\text{V.3-3.7})$$

$$F(z) = 2685,67 \cdot \ell \cdot \left(\frac{z}{274}\right)^{2/9,5} [N] \quad (4.34)$$

Con las ecuaciones (4.31), (4.32), (4.33) y (4.34) se construyó una tabla donde se pueden observar los valores de la Fuerza del viento según la altura. Ver Tabla 4.4.

Cálculo de desplazamiento máximo en dirección del viento.

Para el cálculo de desplazamientos en dirección de viento (X) la norma Nacional INTI [1] provee un método que se desarrolló en el capítulo anterior. La variación del desplazamiento en función de la altura está definida en la ecuación 3.12, para su aplicación previamente se calcularon y establecieron distintos factores.

22. Masa modal m_1 .

Remplazando las expresiones (2.29), (2.100) y (4.17) en la Ecuación 3.13, obtenemos:

$$m_1 = \int_0^{22,2} 151,1 \cdot \left(\frac{z}{22,2}\right)^3 dz \quad (\text{V.1-3.13})$$

$$m_1 = 833 \quad (4.35)$$

23. Densidad del aire ρ

$$\rho = 1,25 \text{ Kg} / \text{m}^3 \quad (4.36)$$

De la **Figura 3.13** obtenemos:

$$\hat{b} = 1 \quad (4.37)$$

$$\hat{\alpha} = 1/9,5 \quad (4.38)$$

24. Exponente del modo ξ

De la expresión **2.100** extraemos:

$$\xi = 1,5 \quad (4.39)$$

25. Factor de exposición K

Remplazando la expresión **(4.37)**, **(4.38)** y **(4.39)** en la **Ecuación 3.14**:

$$K = (1,65)^{1/9,5} / \left[\frac{1}{9,5} + 1,5 + 1 \right] \quad (\text{V.1-3.14})$$

$$K = 0,4046 \quad (4.40)$$

26. Velocidad de ráfaga \hat{V}_z

Remplazando la expresión **(4.1)**, **(4.37)** y **(4.38)** en la **Ecuación 3.15**:

$$\hat{V}_z = 1 \cdot \left(\frac{z}{10} \right)^{1/9,5} 46 \quad (\text{V.1-3.15})$$

$$\hat{V}_z = 46 \cdot \left(\frac{z}{10} \right)^{1/9,5} \quad (4.41)$$

Desplazamiento máximo en dirección del viento

Reemplazando **(2.88)**, **(4.16)**, **(4.17)**, **(4.23)**, **(4.30)**, **(4.35)**, **(4.36)**, **(4.40)** y **(4.41)** en la **Ecuación 3.12**:

$$X_{\max}(z) = \frac{\left(\frac{z}{22,2}\right)^{1,5} \cdot 1,25 \cdot 1,23 \cdot 22,2 \cdot 1,2 \cdot (46)^2 \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^{2/9,5}}{2 \cdot 833 \cdot (2\pi \cdot 2,618)^2} \cdot 0,4046 \cdot 0,8851 \quad (\text{V.1-3.12})$$

Obtenemos finalmente:

$$X_{\max}(z) = 4,03166 \cdot 10^{-4} \cdot (z)^{1,7105} \quad (4.42)$$

Con las **Ecuaciones (4.31), (4.32), (4.33) y (4.34)** se determinó la carga de viento de la estructura en relación de la altura media de tramo. Los desplazamientos en dirección del viento se establecieron utilizando la ecuación **(4.42)**. Con toda esta información construimos la tabla de fuerzas y desplazamientos (**Tabla 4.4**).

Tramo	Long, de tramo ℓ [m]	Cota al baricentro del tramo z [m]	Ecuación número	Fuerza del viento [N]	Fuerza del Viento por unidad de longitud [N/m]	Desplazamiento en X (4.42) [cm]
1	1,5	0,75	(4.31)	1734,15	1156,1	0,02
2	1,5	2,25		1734,15	1156,1	0,16
3	1,5	3,75		1734,15	1156,1	0,39
4	1,5	5,25	(4.32)	1752,05	1168,03	0,69
5	1	6,5		1221,75	1221,75	0,99
6	1	7,5		1259,12	1259,12	1,27
7	1	8,5	(4.34)	1292,73	1292,73	1,57
8	1	9,5		1323,36	1323,36	1,90
9	1	10,5		1351,54	1351,54	2,25
10	1	11,5		1377,68	1377,68	2,63
11	1	12,5		1402,07	1402,07	3,03
12	1	13,5		1424,97	1424,97	3,46
13	1	14,5		1446,57	1446,57	3,91
14	1	15,5		1467,03	1467,03	4,38
15	1	16,5		1486,46	1486,46	4,88
16	1	17,5		1504,99	1504,99	5,39
17	1	18,5		1522,70	1522,70	5,93
18	1	19,5		1539,67	1539,67	6,49
19	1	20,5		1555,97	1555,97	7,07
20	1	21,5		1571,65	1571,65	7,67
21	0,2	22,1		316,16	1580,78	8,04

Tabla 4. 4 Tabla de fuerzas y desplazamientos Según INTI [1]

Análisis de tensiones y desplazamientos:

Como continuación al análisis de los resultados que se obtuvieron al utilizar la Norma INTI [1]; se emplearon las cargas de viento dadas por las ecuaciones (4.31), (4.32) y (4.34) como entrada para el análisis estático de elementos finitos (FEA) en el Software Abaqus [2], los resultados arrojados por el programa fueron:

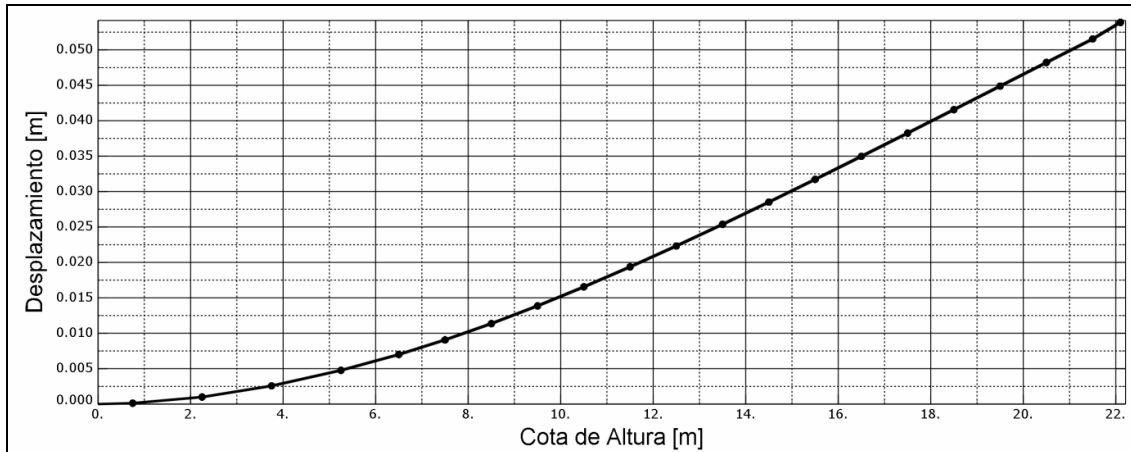


Figura 4. 1 Desplazamiento Longitudinal al viento (X) en función de la altura, Análisis Estático en Abaqus [2] según Ecuaciones 4.31, 4.32 y 4.34.

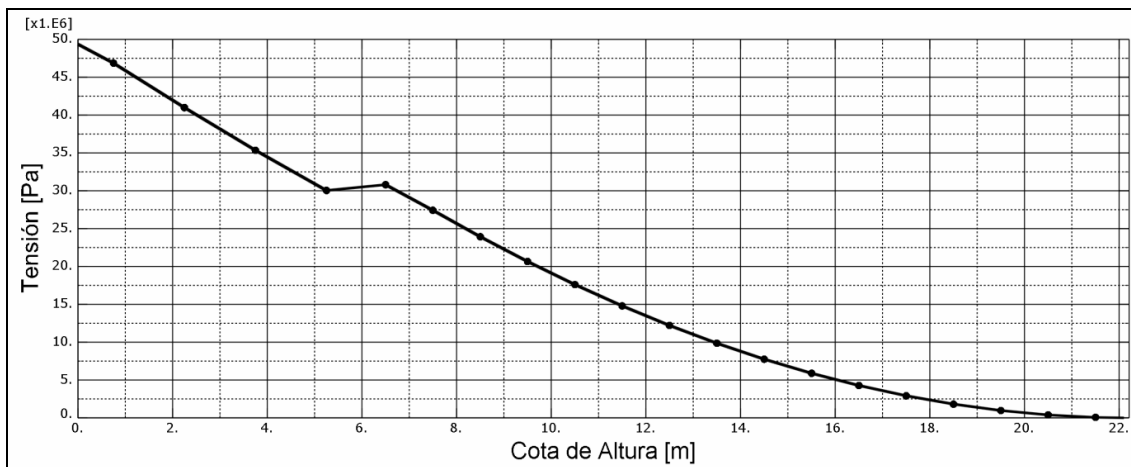


Figura 4. 2 Tensión en función de la altura debido a cargas en dirección Longitudinal al viento. Análisis Estático en Abaqus [2] según Ecuaciones 4.31, 4.32 y 4.34.

En la última columna de la **Tabla 4.4** se encuentran los valores de desplazamiento en dirección del viento según una ecuación empírica dada en la sección comentarios de la Norma INTI [1], dicho valores sirvieron para obtener una rápida aproximación del desplazamiento debido a carga de viento en dirección del viento; en cambio si los comparamos con los resultados dados en la **Figura 4.1** (obtenida de Abaqus [2]) mediante un cruce de gráficas (plasmada en la **Figura 4.3**) podemos ver que existe una diferencia del **35%**.

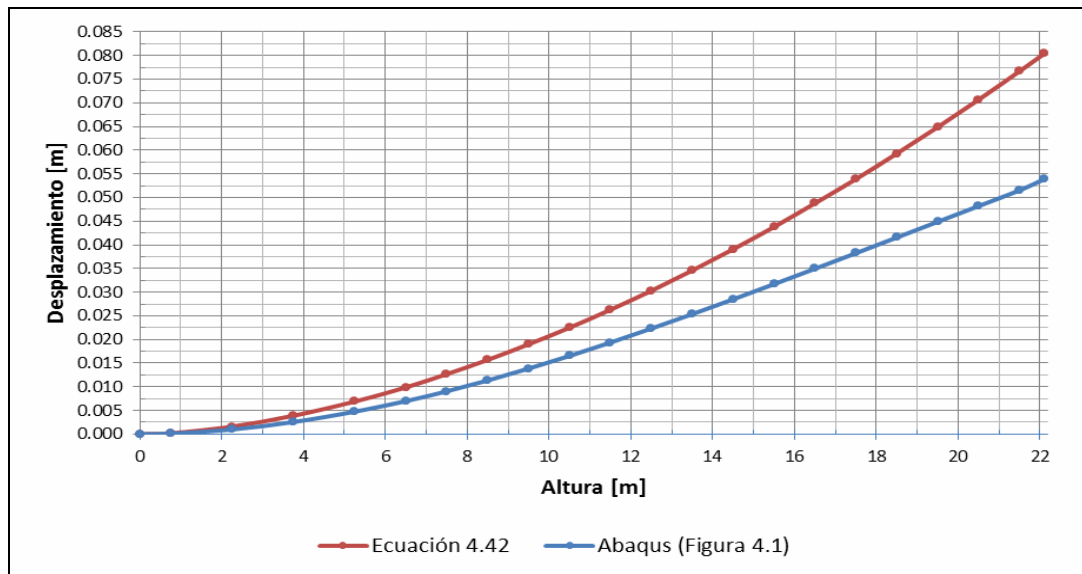


Figura 4. 3 Desplazamientos Longitudinal al viento según las Ecuación (4.42) y Abaqus [2] (Figura 4.1).

Seguidamente calculamos el Coeficiente de Seguridad a fluencia en la zona más solicitada, según la **Figura 4.2** la tensión en el empotramiento es de 50 MPa, el método para el cálculo de dicha tensión es basado en la teoría de **Von Mises**.

Las propiedades del acero **S235** son las siguientes:

$$\sigma_R = 414 \quad \text{Rotura [N/mm}^2\text{]} \quad \sigma_f = 235 \quad \text{Fluencia [N/mm}^2\text{]} \quad (4.43)$$

Y la sollicitación es de:

$$\sigma = 50 \text{Mpa} = 50 \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (4.44)$$

El coeficiente de Seguridad a Fluencia será:

$$CS = \frac{\sigma_f}{\sigma} \quad (4.45)$$

Reemplazando (4.43) y (4.44) en la ecuación (4.45):

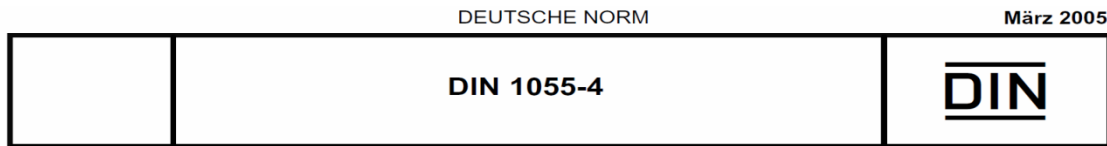
$$CS = \frac{235}{50} \quad (\text{V.1-4.45})$$

$$CS = 4,7 \quad (4.46)$$

Como podemos ver en (4.46) las cargas no producirán la falla de la estructura ya que la estructura está dimensionada con un factor de Coeficiente de Seguridad a fluencia de **4,7**.

4.5.2. Análisis a través de Norma DIN 1055-4.

Aquí se realizó un análisis similar al anteriormente expuesto pero utilizando la norma Alemana DIN [3] para estructuras bajo carga de viento.



4.5.2.1. Procedimiento de diseño.

Consideración: la norma DIN [3] está desarrollada para Alemania, ya que considera zonas de vientos para ese país, pero se hará una adaptación a Argentina considerando zona agrícola. Se tomara como zona de análisis aquella zona donde los vientos sean más severos.

Ubicación: Zona eólica IV.
Topografía: Plana.
Terreno: Agrícola.
Dimensiones: Diámetro 1,23 metros, Altura 22,2 metros.
Frecuencia natural de la estructura: 2,618 Hz.

$$b = 1,23 \text{ m} \quad (4.47)$$

$$h = 22,2 \text{ m} \quad (4.48)$$

$$n_{1,x} = n_{1,y} = 2,618 \text{ Hz} \quad (4.49)$$

1. Velocidad referencia del viento

Se extrae de la **Figura 3.31** considerando zona de eólica IV.

$$v_{ref} = 30 \text{ m/s} \quad (4.50)$$

2. Presión referencia del viento

Se extrae de la **Figura 3.31** considerando zona de eólica IV.

$$q_{ref} = 0,56 \text{ kN/m}^2 \quad (4.51)$$

3. Densidad del aire.

$$\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3 \quad (4.52)$$

4. Categoría del terreno.

Categoría II: Sitio con setos, las granjas individuales, casas o árboles, por ejemplo. Área agrícola (según la Figura 3.32).

Efectos topográficos $c_t(z)$; sin efecto, dado que el análisis se hace sobre terreno plano, por ello el coeficiente topográfico es unitario.

$$c_t(z) = 1 \quad (4.53)$$

Extraemos de la Figura 3.33 las ecuaciones que rigen los distintos parámetros para el cálculo de la estructura para la categoría II.

5. Altura mínima z_{min} .

$$z_{min} = 4,00m \quad (4.54)$$

6. Velocidad media del viento:

Para $z > z_{min}$

$$v_m = 1,00 \cdot v_{ref} \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^{0,16} \quad (4.55)$$

Reemplazando (4.50) en la Ecuación 4.55:

$$v_m = 30 \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^{0,16} \quad (4.56)$$

Para $z \leq z_{min}$

$$v_m = 0,86 \cdot v_{ref} \quad (4.57)$$

Reemplazando (4.50) en la Ecuación 4.57:

$$v_m = 0,86 \cdot 30 \quad (V.1-4.57)$$

$$v_m = 25,8 \text{ m/s} \quad (4.58)$$

7. Intensidad de la turbulencia

Para $z > z_{min}$

$$I_v = 0,19 \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^{-0,16} \quad (4.59)$$

Para $z \leq z_{\min}$

$$I_v = 0,22 \quad (4.60)$$

8. Presión de la velocidad de ráfaga

Para $z > z_{\min}$

$$q = 2,1 \cdot q_{ref} \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^{0,24} \quad (4.61)$$

Reemplazando (4.51) en la Ecuación 4.61:

$$q = 2,1 \cdot 0,56 \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^{0,24} \quad (V.1-4.61)$$

$$q = 1,176 \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^{0,24} \quad (4.62)$$

Para $z \leq z_{\min}$

$$q = 1,7 \cdot q_{ref} \quad (4.63)$$

Reemplazando (4.51) en la Ecuación 4.63:

$$q = 1,7 \cdot 0,56 \quad (V.1-4.63)$$

$$q = 0,952 \quad (4.64)$$

9. Velocidad de ráfaga:

Para $z > z_{\min}$

$$v = 1,45 \cdot v_{ref} \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^{0,12} \quad (4.65)$$

Reemplazando (4.50) en la Ecuación 4.65:

$$v = 1,45 \cdot 30 \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^{0,12} \quad (V.1-4.65)$$

$$v = 43,5 \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^{0,12} \quad (4.66)$$

Para $z \leq z_{\min}$

$$v = 1,3 \cdot v_{ref} \quad (4.67)$$

Reemplazando (4.50) en la Ecuación 4.67:

$$v = 1,3 \cdot 30 \quad (V.1-4.67)$$

$$v = 39 \quad (4.68)$$

10. Presión media de la velocidad del viento $q_m(z_j)$:

Para $z > z_{\min}$

Reemplazando (4.52) y (4.56) en la Ecuación 3.20:

$$q_m = \frac{1}{2} \cdot 1,25 \cdot \left(30 \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^{0,16}\right)^2 \quad (V.1-3.20)$$

$$q_m = 562,5 \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^{0,32} \quad (4.69)$$

Para $z \leq z_{\min}$

Reemplazando (4.52) y (4.56) en la Ecuación 3.20:

$$q_m = \frac{1}{2} \cdot 1,25 \cdot (25,8)^2 \quad (V.2-3.20)$$

$$q_m = 416,025 \quad (4.70)$$

11. La altura de referencia z_e

Para una chimenea según la **Figura 3.19**:

$$z_e = 0,6 \cdot h \quad (4.71)$$

Reemplazando (4.48) en la Ecuación 4.71:

$$z_e = 0,6 \cdot 22,2 \quad (V.1-4.71)$$

$$z_e = 13,32 \quad (4.72)$$

De la **Figura 3.21** extraemos el valor del exponente ε .

$$\varepsilon = 0,26 \quad (4.73)$$

12. Longitud integral de la turbulencia $L_i(z_e)$.

Reemplazando (4.72) y (4.73) en la Ecuación 3.26.

$$L_i(z_e) = 300 \cdot \left(\frac{13,32}{300} \right)^{0,26} \quad (V.1-3.26)$$

$$L_i(z_e) = 133,49 \quad (4.74)$$

13. Factor S.

Reemplazando (4.47), (4.48) y (4.74) en la Ecuación 3.25.

$$S = 0,46 \cdot \left[\frac{1,23 + 22,2}{133,49} \right] + 1,58 \cdot \left[\frac{\sqrt{1,23 \cdot 22,2}}{133,49} \right] \quad (V.1-3.25)$$

$$S = 0,1426 \quad (4.75)$$

14. La acción básica al cuadrado de las ráfagas Q_0^2 .

Reemplazando (4.47), (4.48) y (4.74) en la Ecuación 3.27.

$$Q_0^2 = \frac{1}{1 + 0,9 \cdot \left(\frac{1,23 + 22,2}{133,49} \right)^{0,63}} \quad (V.1-3.27)$$

$$Q_0^2 = 0,7688 \quad (4.76)$$

15. Intensidad de la turbulencia $I_v(z_e)$

Como $z_e > z_{\min}$

Reemplazando (4.72) en la Ecuación 4.59.

$$I_v(z_e) = 0,19 \cdot \left(\frac{13,32}{10} \right)^{-0,16} \quad (V.1-4.59)$$

$$I_v(z_e) = 0,1815 \quad (4.77)$$

16. Velocidad media del viento $v_m(z_e)$

Como $z_e > z_{\min}$

Reemplazando (4.72) en la Ecuación 4.56.

$$v_m(z_e) = 30 \cdot \left(\frac{13,32}{10} \right)^{0,16} \quad (\text{V.1-4.56})$$

$$v_m = 31,41 \quad (4.78)$$

17. El período medio t de la velocidad de referencia v_{ref}

$$t = 600 \text{ s} \quad (4.79)$$

18. Valor esperado de la frecuencia $v_{E,0}$.

Reemplazando (4.74), (4.75) y (4.78) en la Ecuación 3.24.

$$v_{E,0} = \frac{31,41}{133,49} \cdot \frac{1}{1,11 \cdot 0,1426^{0,615}} \quad (\text{V.1-3.24})$$

$$v_{E,0} = 0,7023 \quad (4.80)$$

19. Decremento logarítmico

Decremento logarítmico del amortiguamiento de las oscilaciones en la dirección del viento δ (según DIN 4133 [4]).

$$\delta = 0,025 \quad (4.81)$$

20. Factor $N_{1,x}$

Reemplazando (4.49), (4.74) y (4.78) en la Ecuación 3.30.

$$N_{1,x} = \frac{2,618 \cdot 133,49}{31,41} \quad (\text{V.1-3.30})$$

$$N_{1,x} = 11,126 \quad (4.82)$$

21. Función adimensional densidad espectral de la velocidad del viento en el punto de resonancia R_N .

Reemplazando (4.82) en la Ecuación 3.29.

$$R_N = \frac{6,8 \cdot 11,126}{(1 + 10,2 \cdot 11,126)^{5/3}} \quad (V.1-3.29)$$

$$R_N = 0,028 \quad (4.83)$$

22. Función de transferencia aerodinámica R_h

Reemplazando (4.48), (4.74) y (4.82) en la Ecuación 3.32.

$$\eta = \frac{4,6 \cdot 11,126 \cdot 22,2}{133,49} \quad (V.1-3.32)$$

$$\eta = 8,511 \quad (4.84)$$

Reemplazando (4.84) en la Ecuación 3.31.

$$R_1 = \frac{1}{8,511} - \frac{1}{2 \cdot (8,511)^2} \cdot (1 - e^{-28,511}) \quad (V.1-3.31)$$

$$R_h = 0,11 \quad (4.85)$$

23. Función de transferencia aerodinámica R_b .

Reemplazando (4.47), (4.74) y (4.82) en la Ecuación 3.33.

$$\eta = \frac{4,6 \cdot 11,126 \cdot 1,23}{133,49} \quad (V.1-3.33)$$

$$\eta = 0,472 \quad (4.86)$$

Reemplazando (4.86) en la Ecuación 3.31.

$$R_1 = \frac{1}{0,472} - \frac{1}{2 \cdot (0,472)^2} \cdot (1 - e^{-20,472}) \quad (V.2-3.31)$$

$$R_b = 0,746 \quad (4.87)$$

24. Componente de respuesta resonante R_x al cuadrado de la reacción ráfaga.

Reemplazando (4.81), (4.83), (4.85) y (4.87) en la Ecuación 3.28.

$$R_x^2 = \frac{\pi^2}{2 \cdot 0,025} \cdot 0,028 \cdot 0,11 \cdot 0,746 \quad (V.1-3.28)$$

$$R_x^2 = 0,4535 \quad (4.88)$$

25. Valor esperado de la respuesta de frecuencia de ráfaga v_E .

Reemplazando (4.76), (4.80), (4.85), (4.87) y (4.88) en la Ecuación 3.23.

$$v_E = \sqrt{\frac{0,7023^2 \cdot 0,7688 + 6,985 \cdot 0,4535}{0,7688 + 0,4535}} \quad (V.1-3.23)$$

$$v_E = 1,7035 \quad (4.89)$$

26. Factor de pico g

Reemplazando (4.79) y (4.89) en la Ecuación 3.22.

$$g = \sqrt{2 \cdot \ln(1,7035 \cdot 600)} + \frac{0,6}{\sqrt{2 \cdot \ln(1,7035 \cdot 600)}} \quad (V.1-3.22)$$

$$g = 3,884 \quad (4.90)$$

27. Factor de respuesta de ráfaga G

Reemplazando (4.76), (4.77), (4.88) y (4.90) en la Ecuación 3.21.

$$G = 1 + 2 \cdot 3,884 \cdot 0,1815 \cdot \sqrt{0,7688 + 0,4535} \quad (V.1-3.21)$$

$$G = 2,559 \quad (4.91)$$

28. Rugosidad del acero.

Obtenido de la **Figura 3.27**:

$$k_{acero} = 0,0005m \quad (4.92)$$

29. Rugosidad equivalente:

$$\frac{k}{b} \quad (4.93)$$

Reemplazando (4.47) y (4.92) en la Ecuación 4.93:

$$\frac{k}{b} = \frac{0,0005}{1,23} \quad (V.1-4.93)$$

$$\frac{k}{b} = 4,06 \cdot 10^{-4} \quad (4.94)$$

30. Viscosidad cinemática del aire.

$$\nu = 15 \cdot 10^{-6} \quad (4.95)$$

31. Número de Reynolds

Para $z \leq z_{\min}$

Reemplazando (4.47), (4.68) y (4.95) en la Ecuación 3.35:

$$\text{Re} = \frac{39 \cdot 1,23}{15 \cdot 10^{-6}} \quad (V.1-3.35)$$

$$\text{Re} = 3198000 \quad (4.96)$$

Para $z > z_{\min}$

Reemplazando (4.47), (4.67) y (4.95) en la Ecuación 3.35:

$$\text{Re} = \frac{43,5 \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^{0,12} \cdot 1,23}{15 \cdot 10^{-6}} \quad (V.2-3.35)$$

$$\text{Re} = 3567000 \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^{0,12} \quad (4.97)$$

32. Coeficiente de fuerza básica de un cilindro de delgadez infinita $c_{f,0}$.

$c_{f,0}$ Se puede obtener de la **Figura 3.26** o de la ecuación:

$$c_{f,0} = 1,2 + \frac{0,181 \lg\left(10 \cdot \frac{k}{b}\right)}{1 + 0,41 \lg\left(\frac{\text{Re}}{10^6}\right)} \quad (4.98)$$

Para $z \leq z_{\min}$

Reemplazando (4.94) y (4.96) en la Ecuación 4.98:

$$c_{f,0} = 1,2 + \frac{0,18 \cdot \lg(10 \cdot 4,06 \cdot 10^{-4})}{1 + 0,4 \cdot \lg\left(\frac{3198000}{10^6}\right)} \quad (\text{V.1-4.98})$$

$$c_{f,0} = 0,8419 \quad (4.99)$$

Para $z > z_{\min}$

Reemplazando (4.94) y (4.97) en la Ecuación 4.98:

$$c_{f,0} = 1,2 + \frac{0,18 \cdot \lg(10 \cdot 4,06 \cdot 10^{-4})}{1 + 0,4 \cdot \lg\left(\frac{3567000}{10^6} \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^{0,12}\right)} \quad (\text{V.2-4.98})$$

$$c_{f,0} = 1,2 - \frac{0,4305}{1 + 0,4 \cdot \lg\left(3,567 \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^{0,12}\right)} \quad (4.100)$$

33. Esbeltez efectiva λ .

Para cilindros según la **Figura 3.19**:

$$\lambda = 0,7 \cdot \frac{h}{b} \quad (4.101)$$

Reemplazando (4.47) y (4.48) en la Ecuación 4.101.

$$\lambda = 0,7 \cdot \frac{22,2}{1,23} \quad (\text{V.1-4.101})$$

$$\lambda = 12,52 \quad (4.102)$$

34. Factor de solidez:

Partiendo de la ecuación 3.38:

La estructura de análisis no posee agujeros por donde pueda pasar el viento, (Cara cerrada es completa la incidencia del viento)

$$\varphi = 1 \quad (4.103)$$

35. Factor de reducción para tener en cuenta la esbeltez

Con (4.102) y (4.103) se obtuvo de la **Figura 3.28** el valor de ψ_λ :

$$\psi_\lambda = 0,73 \quad (4.104)$$

36. Coeficiente de fuerza aerodinámica para la sección j (c_{fj})

Para $z \leq z_{\min}$

Reemplazando (4.99) y (4.104) en la **Ecuación 3.34**:

$$c_f = 0,8419 \cdot 0,73 \quad (V.1-3.34)$$

$$c_f = 0,615 \quad (4.105)$$

Para $z > z_{\min}$

Reemplazando (4.100) y (4.104) en la **Ecuación 3.34**:

$$c_f = \left(1,2 - \frac{0,4305}{1 + 0,4 \cdot \lg \left(3,567 \cdot \left(\frac{z}{10} \right)^{0,12} \right)} \right) \cdot 0,73 \quad (V.2-3.34)$$

$$c_f = \left(0,876 - \frac{0,3143}{1 + 0,4 \cdot \lg \left(3,567 \cdot \left(\frac{z}{10} \right)^{0,12} \right)} \right) \quad (4.106)$$

Carga estática equivalente de la energía eólica en el tramo j :

Para $z \leq z_{\min}$

Reemplazando (4.47), (4.70), (4.91) y (4.105) en la **Ecuación 3.19**.

$$F_{wj} = 2,559 \cdot 0,615 \cdot 416,025 \cdot (1,23 \cdot \ell) \quad (\text{V.1-3.19})$$

$$F_{wj} = 805,323 \cdot \ell \quad (4.107)$$

Para $z > z_{\min}$

Reemplazando (4.47), (4.69), (4.91) y (4.106) en la Ecuación 3.19.

$$F_{wj} = 2,559 \cdot \left(0,876 - \frac{0,3143}{1 + 0,4 \cdot \lg \left(3,567 \cdot \left(\frac{z}{10} \right)^{0,12} \right)} \right) \cdot 562,5 \cdot \left(\frac{z}{10} \right)^{0,32} \cdot (1,23 \cdot \ell) \quad (\text{V.2-3.19})$$

$$F_{wj} = \left(1550,965 - \frac{556,471}{1 + 0,4 \cdot \lg \left(3,567 \cdot \left(\frac{z}{10} \right)^{0,12} \right)} \right) \cdot \left(\frac{z}{10} \right)^{0,32} \cdot \ell \quad (4.108)$$

Con las ecuaciones (4.107) y (4.108) se construyó una tabla donde se pueden observar los valores de la Fuerza del viento con respecto a la altura. Ver Tabla 4.5.

Desplazamiento máximo en dirección del viento

Continuando con el análisis se puede calcular los desplazamientos en dirección del viento de los distintos puntos de la estructura mediante la aplicación ecuación 3.43. Previamente debemos determinar otras variables

37. Espesor del cilindro de la estructura de análisis.

$$e = 0,005m \quad (4.109)$$

38. Densidad del acero.

$$\rho_{\text{acero}} = 7800 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (4.110)$$

39. La masa equivalente por unidad de longitud.

Para las estructuras con poca variación en la distribución de la masa por unidad de longitud, el peso promedio por unidad de longitud puede ser una buena aproximación en el un tercio del edificio en el que la forma de onda $\Phi(s)$ tiene su máximo y se define como m_i .

Como la estructura es cilíndrica uniformemente en el último tramo, calculamos:

$$m_i = \left[\frac{\pi \cdot (b^2 - (b - 2 \cdot e)^2)}{4} \cdot \rho_{acero} \right] \quad (4.111)$$

Reemplazando (4.47), (4.109) y (14.110) en la Ecuación 4.111:

$$m_i = \frac{\pi \cdot (1,23^2 - (1,23 - 2 \times 0,005)^2)}{4} \cdot 7850 \quad (V.1-4.111)$$

$$m_i = 151,1 \text{ kg/m} \quad (4.112)$$

40. Exponente perfil α

En función de la categoría de terreno en la **Figura 3.20**.

$$\alpha = 0,16 \quad (4.113)$$

41. Exponente del modo ξ

Se extrae de la Ecuación 2.100.

$$\xi = 1,5 \quad (4.114)$$

42. Coeficiente adimensional.

Reemplazando (4.113) y (4.114) en la Ecuación 3.45:

$$K_x = 0,60^{-2 \cdot (0,16)} \cdot \frac{1 + 2 \cdot 1,5}{1 + 1,5 + 2 \cdot 0,16} \quad (V.1-3.45)$$

$$K_x = 1,6704 \quad (4.115)$$

Desplazamiento máximo en dirección del viento

Para $z \leq z_{\min}$

Reemplazando (2.100), (4.36), (4.47), (4.49), (4.82), (4.91), (4.105), (4.112), (4.114) y (4.115) en la Ecuación 3.43:

$$\max x(z) = \left(\frac{z}{22,2}\right)^{1,5} \cdot \frac{1,25 \cdot 1,23 \cdot 0,615 \cdot (31,36)^2}{2 \cdot 151,1 \cdot (2 \cdot \pi \cdot 2,618)^2} \cdot 2,559 \cdot 1,6704 \quad (V.1-3.43)$$

$$\max x(z) = 0,0477 \times \left(\frac{z}{22,2}\right)^{1,5} \quad (4.116)$$

Para $z > z_{\min}$

Reemplazando (2.100), (4.36), (4.47), (4.49), (4.82), (4.91), (4.106), (4.112), (4.114) y (4.115) en la Ecuación 3.43:

$$\max x(z) = \left(\frac{z}{22,2}\right)^{1,5} \times \left(0,876 - \frac{0,3143}{1 + 0,4 \lg \left(3,567 \times \left(\frac{z}{10}\right)^{0,12} \right)} \right) \times \frac{1,25 \times 1,23 \times (31,36)^2}{2 \times 151,1 \times (2 \times \pi \times 2,618)^2} \times 2,559 \times 1,6704 \quad (V.2-3.43)$$

$$\max x(z) = 0,0776 \times \left(\frac{z}{22,2}\right)^{1,5} \times \left(0,876 - \frac{0,3143}{1 + 0,4 \lg \left(3,567 \times \left(\frac{z}{10}\right)^{0,12} \right)} \right) \quad (4.117)$$

Con las Ecuaciones (4.107), (4.108), (4.116) y (4.117) podemos determinar la carga de viento y el desplazamiento de la estructura en relación de la altura media de tramo, para ello construimos la tabla de fuerzas y desplazamientos (Tabla 4.5).

Tramo	Long, de tramo l	Cota al baricentro del tramo	Ecuación número	Fuerza del viento en X	Fuerza del Viento por unidad de longitud	Desplazamiento en X 4.116 y 4.117
	[m]	[m]		[N]	[N/m]	[Cm]
1	1,5	0,75	4.107	1207,985	805,323	0,03
2	1,5	2,25		1207,985	805,323	0,15
3	1,5	3,75		1207,985	805,323	0,33
4	1,5	5,25	4.108	1330,499	887,000	0,55
5	1	6,5		951,215	951,215	0,76
6	1	7,5		996,814	996,814	0,94
7	1	8,5		1038,481	1038,481	1,14
8	1	9,5		1076,963	1076,963	1,34
9	1	10,5		1112,804	1112,804	1,56
10	1	11,5		1146,413	1146,413	1,79
11	1	12,5		1178,106	1178,106	2,03
12	1	13,5		1208,133	1208,133	2,28
13	1	14,5		1236,697	1236,697	2,54
14	1	15,5		1263,962	1263,962	2,81
15	1	16,5		1290,066	1290,066	3,09
16	1	17,5		1315,125	1315,125	3,37
17	1	18,5		1339,236	1339,236	3,67
18	1	19,5		1362,485	1362,485	3,97
19	1	20,5		1384,943	1384,943	4,28
20	1	21,5		1406,674	1406,674	4,60
21	0,2	22,1		283,877	1419,387	4,79

Tabla 4. 5 Tabla de fuerzas y desplazamientos en dirección Longitudinal al viento según DIN [2]

Análisis de tensiones y desplazamientos.

Como continuación del análisis de los resultados que se extrajeron al utilizar el método de carga de viento en dirección del viento dada por la Norma DIN [3], se emplearon las cargas determinadas por las Ecuaciones 4.107 y 4.108 como elementos de entrada para el análisis de elementos finitos (FEA) en el Software Abaqus [2], los resultados arrojados por el programa fueron:

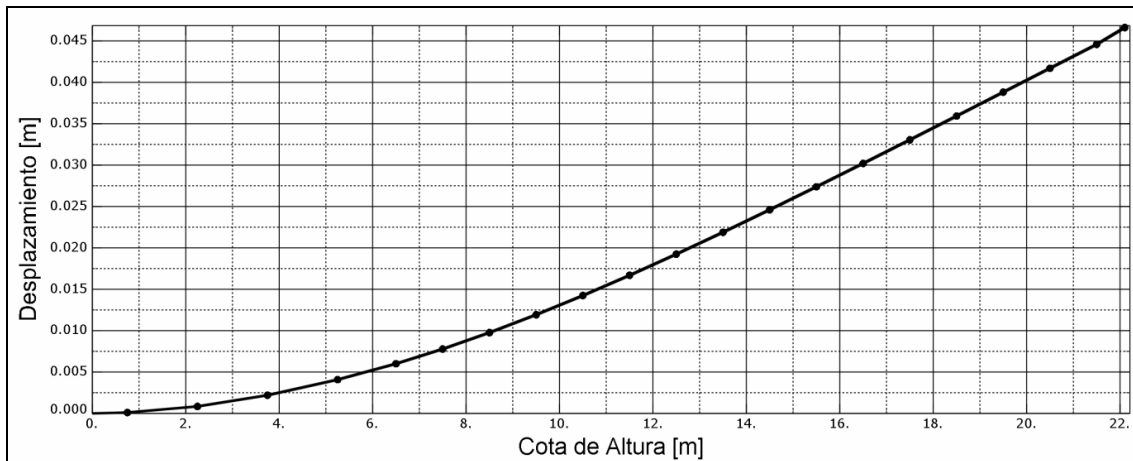


Figura 4. 4 Desplazamiento Longitudinal al viento (X) en función de la altura, Análisis Estático en Abaqus [2] según Ecuaciones 4.107 y 4.108.

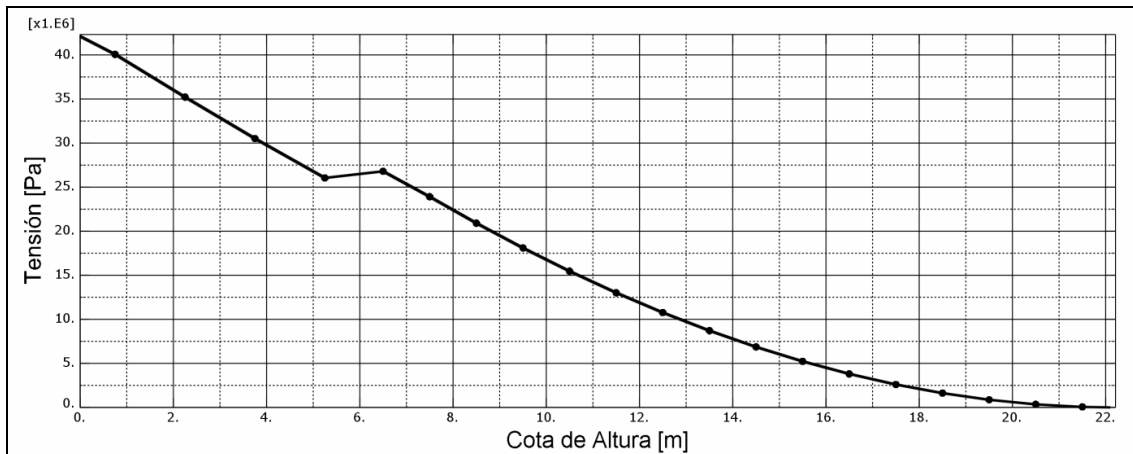


Figura 4. 5 Tensión en función de la altura debido a cargas en dirección Longitudinal al viento. Análisis Estático en Abaqus [2] según Ecuaciones 4.107 y 4.108.

A partir de lo obtenido por el Software Abaqus [2] se realiza una comparativa de la información mediante un cruce de gráficas, lo que se muestra en la **Figura 4.6** representa la comparación entre el desplazamiento calculado mediante la ecuaciones que propone la Norma DIN [3] (4.116 y 4.117) y el desplazamiento calculado mediante el uso del software Abaqus (FEA) [2]. Se puede observar en la **Figura 4.6** la ínfima diferencia entre los valores de desplazamiento de la estructura dado por las **Ecuaciones (4.116) y (4.117)** y salida del programa **Abaqus [2]** (Alrededor del 4%).

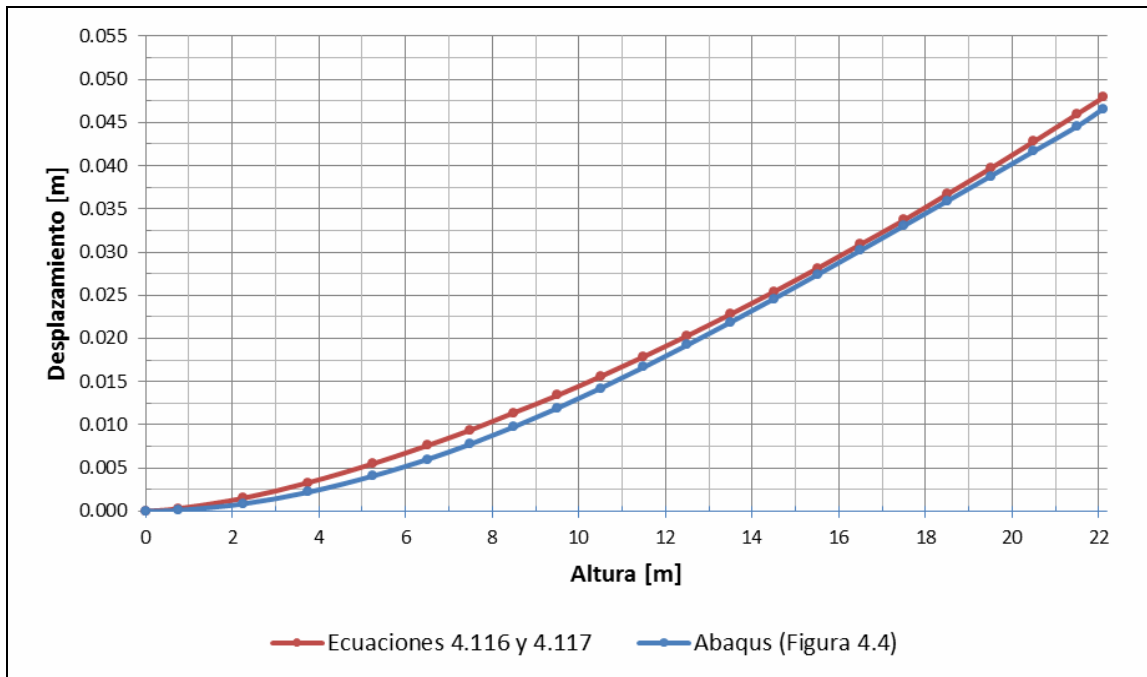


Figura 4. 6 Desplazamientos Longitudinal al viento según las Ecuaciones (4.116), (4.117) y Abaqus [2] (Figura 4.4)

Según la **Figura 4.5** que se extrae del software Abaqus [2] podemos observar que la tensión al empotramiento es cercana a los 45 MPa, el método para el cálculo de dicha tensión es basado en la teoría de Von Mises.

$$\sigma = 45 \text{ Mpa} = 45 [N/mm^2] \quad (4.118)$$

El coeficiente de Seguridad a Fluencia se obtiene reemplazando los valores de (4.43) y (4.118) en la **Ecuación 4.45**:

$$CS = \frac{235}{45} \quad (V.2-4.45)$$

$$CS = 5,22 \quad (4.119)$$

Lo que nos permite determinar que la carga de viento debido a ráfagas en dirección de viento (**X**) no producirán la falla de la estructura, estando está dimensionada con un factor de Coeficiente de Seguridad a fluencia de **5,22**.

4.6. Análisis en dirección perpendicular al viento (Y)

El fenómeno aeroelástico que se analiza en este apartado corresponde a un estudio del conocido como efecto de desprendimiento de vórtice o vórtices de Von Karman, este fenómeno como ya se mencionó en el capítulo anterior (**Ver apartado 3.4.5**) tiene efectos transversales a la dirección del viento.

La norma que considera el estudio de dicho fenómeno es la Norma DIN [3], ya que la Norma Nacional INTI [1] hace una aclaración respecto a la aparición de estos fenómenos aeroelásticos ya mencionada oportunamente.

4.6.1. Análisis a través de la norma DIN 1055-4

Ahora se estudiarán las acciones del viento en dirección perpendicular a la que posee el viento, dichos efectos producen vibraciones transversales a la dirección del viento que son inducidas por desprendimiento de vórtice.

Estas vibraciones que son inducidas por desprendimiento de vórtice pueden ocurrir en estructuras y componentes similares a varillas delgadas. En el Capítulo 3 (3.4.5 del presente Proyecto Integrador) se presenta un método de cálculo para el caso de resonancia, esto sucede cuando la frecuencia de desprendimiento de vórtice coincide con una frecuencia natural de la estructura.

Según DIN [3] las tensiones debidas a oscilaciones transversales inducidas por desprendimiento de vórtice son resultado de las fuerzas de inercia del sistema excitado en resonancia (Ecuación 3.48), (Ver 3.4.5.4).

1. El factor de longitud efectiva K_w

Según la ecuación 3.52. Este no puede ser mayor que 0,6. Se asume igual a:

$$K_w = 0,6 \quad (4.120)$$

2. Número de Strouhal St

Para todos los números de Reynolds (Re) se extrae de la Figura 3.40.

$$St = 0,18 \quad (4.121)$$

3. Velocidad crítica v_{crit}

Reemplazando (4.47), (4.49) y (4.121) en la Ecuación 3.47:

$$v_{crit} = \frac{1,23 \cdot 2,618}{0,18} \quad (V.1-3.47)$$

$$v_{crit} = 17,88 \quad (4.122)$$

4. Número de Reynolds a la velocidad crítica

Reemplazando (4.47), (4.95) y (4.122) en la Ecuación 3.51:

$$\operatorname{Re}(v_{crit}) = \frac{17,88 \cdot 1,23}{15 \cdot 10^{-6}} \quad (\text{V.1-3.51})$$

$$\operatorname{Re}(v_{crit}) = 1466160 \quad (\text{4.123})$$

5. Masa por unidad de longitud

$$m_j = m_i \quad (\text{4.124})$$

Reemplazando (4.122) en la Ecuación 4.124:

$$m_j = 151,1 \quad (\text{4.125})$$

6. Forma de onda normalizada del modo 1 transversal a la dirección del viento $\Phi_{1,y}(s_j)$.

Por tratarse de una sección simétrica en ambos ejes:

$$\Phi_{1,y} = \Phi_{1,x} \quad (\text{4.126})$$

Reemplazando (2.100) en la Ecuación 4.126:

$$\Phi_{1,y}(z) = \left(\frac{z}{22,2} \right)^{1,5} \quad (\text{4.127})$$

7. El coeficiente de la forma de onda K .

Reemplazando (4.127) en la Ecuación 3.52.

$$K = \frac{\int_0^{22,2} \left| \left(\frac{s}{22,2} \right)^{1,5} \right| ds}{4\pi \cdot \int_0^{22,2} \left(\frac{s}{22,2} \right)^3 ds} \quad (\text{V.1-3.52})$$

$$K = \frac{22,2^3}{4\pi \cdot 22,2^{1,5}} \cdot \frac{\int_0^{22,2} |s^{1,5}| ds}{\int_0^{22,2} s^3 ds}$$

$$K = \frac{22,2^3}{4\pi \cdot 22,2^{1,5}} \cdot \frac{4}{2,5} \cdot \left[\frac{|s^{2,5}|}{s^4} \right]_0^{22,2}$$

$$K = \frac{22,2^3}{4\pi \cdot 22,2^{1,5}} \cdot \frac{4}{2,5} \cdot \left[\frac{22,2^{2,5}}{22,2^4} \right]$$

$$K = 0,127 \quad (4.128)$$

8. Número de Scruton Sc .

Reemplazando (4.36), (4.47), (4.81) y (4.125) en la Ecuación 3.50.

$$Sc = \frac{2 \cdot 151,1 \cdot 0,025}{1,25 \cdot 1,23^2} \quad (V.1-3.50)$$

$$Sc = 3,995 \approx 4 \quad (4.129)$$

9. Coeficiente de fuerza de excitación aerodinámica simple $c_{lat,0}$.

Con (4.123) y la Figura 3.42 se extrae el valor del coeficiente de fuerza aerodinámica simple $c_{lat,0}$:

$$c_{lat,0} = 0,2 \quad (4.130)$$

10. Coeficiente de fuerza de excitación aerodinámica c_{lat} .

Para determinar el valor del coeficiente de fuerza de excitación aerodinámica c_{lat} debemos conocer la velocidad media del viento en el baricentro de la longitud efectiva L_j , como este valor no lo conocemos procedimos a **estimar** que la longitud efectiva es toda la longitud de la estructura de análisis $L_{j,d}$, (**por ser el caso más desfavorable**) se obtuvo el siguiente valor estimativo:

$$L_{j,d} = 22,2 \quad (4.131)$$

Su baricentro está situado a:

$$z_{j,d} = 11,1 \quad (4.132)$$

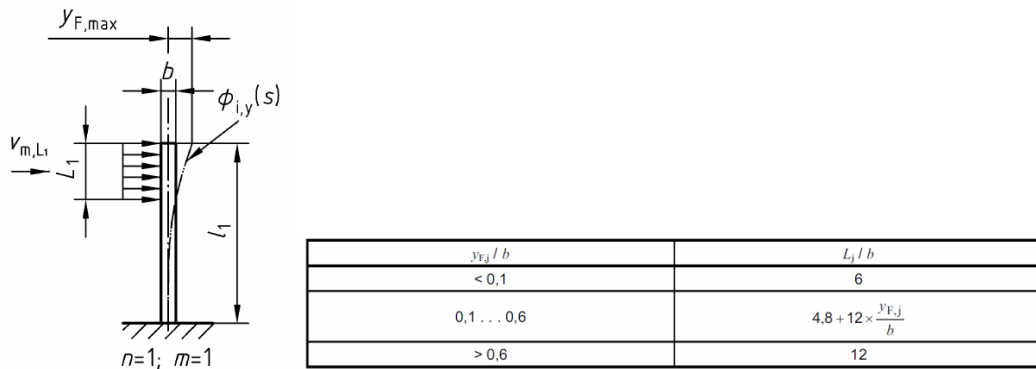


Figura 4. 7 Extracto de las Figuras 3.44 y 3.45.

Reemplazando (4.132) en la Ecuación 4.56.

$$v_m(z_{j,d}) = 30 \cdot \left(\frac{11,1}{10} \right)^{0,16} \quad (\text{V.2-4.56})$$

$$v_m(z_{j,d}) = 30,505 \quad (4.133)$$

Para que se cumpla la relación de la Figura 3.42.

$$c_{lat} = c_{lat,0} \quad \text{Cuando} \quad \frac{v_{crit}}{v_{m,Lj}} \leq 0,83 \quad (4.134)$$

Reemplazando (4.133) en la Ecuación 4.134.

$$\frac{v_{crit}}{v_{m,Lj}} = \frac{17,88}{30,505} \quad (\text{V.1-4.134})$$

$$\frac{v_{crit}}{v_{m,Lj}} = 0,59 \quad (4.135)$$

Por lo tanto podemos decir que se cumple la relación que se presenta en la Ecuación 4.134 $c_{lat} = c_{lat,0}$.

$$c_{lat} = 0,2 \quad (4.136)$$

11. Masa oscilante en el tramo j M_j .

$$M_j = m_j \cdot \ell_j \quad (4.137)$$

Reemplazando (4.125) en la Ecuación 4.137.

$$M_j = 151,1 \cdot \ell_j \quad (4.138)$$

12. Amplitud de la vibración transversal máxima:

Reemplazando (4.120), (4.121), (4.128), (4.129), y (4.136) en la Ecuación 3.49:

$$\frac{\max y_F}{b} = 0,6 \cdot 0,127 \cdot 0,2 \cdot \frac{1}{0,18^2} \cdot \frac{1}{4} \quad (\text{V.1-3.49})$$

$$\frac{\max y_F}{b} = 0,118 \quad (4.139)$$

Reemplazando (4.47) y despejando de la Ecuación 4.139:

$$\max y_F = 1,23 \cdot 0,118 \quad (\text{V.1-4.139})$$

$$\max y_F = 0,145m \quad (4.140)$$

13. Calculamos la verdadera longitud efectiva L_j :

Extraemos de la Figura 4.7 la siguiente ecuación ya despejada:

$$L_j = b \cdot \left(4,8 + 12 \cdot \frac{y_{F,j}}{b} \right) \quad (4.141)$$

Reemplazando (4.47) y (4.139) en la Ecuación 4.141:

$$L_j = 1,23 \cdot (4,8 + 12 \cdot 0,118) \quad (\text{V.1-4.141})$$

$$L_j = 7,64 \text{ m} \quad (4.142)$$

Fuerza sobre la altura media del tramo.

Reemplazamos la (4.49), (4.127), (4.138) y (4.140) en la Ecuación 3.48;

$$F_i(s_j) = 151,1 \cdot \ell_i \cdot (2 \cdot \pi \cdot 2,618)^2 \cdot \left(\frac{s_j}{22,2} \right)^{1,5} \cdot 0,145 \quad (\text{V.1-3.48})$$

$$F_i(s_j) = 5928,32 \cdot \ell_i \cdot \left(\frac{s_j}{22,2} \right)^{1,5} \quad (4.143)$$

La amplitud en dirección transversal a la dirección del viento.

$$y(s_j) = \Phi_{i,y}(s_j) \cdot \max y_F \tag{4.144}$$

Reemplazamos (4.127) y (4.140) en la Ecuación 4.144;

$$y(s_j) = \left(\frac{s_j}{22,2} \right)^{1,5} \cdot 0,145 \tag{4.145}$$

Tramo	Long, de tramo <i>ℓ</i> [m]	Cota al baricentro del tramo [m]	Ecuación número	Fuerza del viento en Y [N]	Fuerza del Viento por unidad de longitud [N/m]	Desplazamiento en Y (4.145) [Cm]
1	1,5	0,75	(4.143)	56,278	37,519	0,09
2	1,5	2,25		292,430	194,953	0,47
3	1,5	3,75		629,209	419,473	1,01
4	1,5	5,25		1042,287	694,858	1,67
5	1	6,5		957,254	957,254	2,30
6	1	7,5		1186,449	1186,449	2,85
7	1	8,5		1431,480	1431,480	3,44
8	1	9,5		1691,385	1691,385	4,06
9	1	10,5		1965,355	1965,355	4,72
10	1	11,5		2252,702	2252,702	5,41
11	1	12,5		2552,831	2552,831	6,13
12	1	13,5		2865,218	2865,218	6,88
13	1	14,5		3189,400	3189,400	7,65
14	1	15,5		3524,963	3524,963	8,46
15	1	16,5		3871,533	3871,533	9,29
16	1	17,5		4228,770	4228,770	10,15
17	1	18,5		4596,366	4596,366	11,03
18	1	19,5		4974,036	4974,036	11,94
19	1	20,5		5361,518	5361,518	12,87
20	1	21,5		5758,571	5758,571	13,82
21	0,2	22,1		1200,260	6001,301	14,40

Tabla 4. 6 Tabla de fuerzas y desplazamientos

Análisis de tensiones y desplazamientos:

Como continuación del análisis de los resultados que se extrajeron de la **Tabla 4.6** al utilizar la Norma DIN [3], se emplearon las cargas de viento dadas por las **Ecuación 4.143** como elementos de entrada para el análisis de elementos finitos (FEA) en el Software Abaqus [2], los resultados arrojados por el programa fueron:

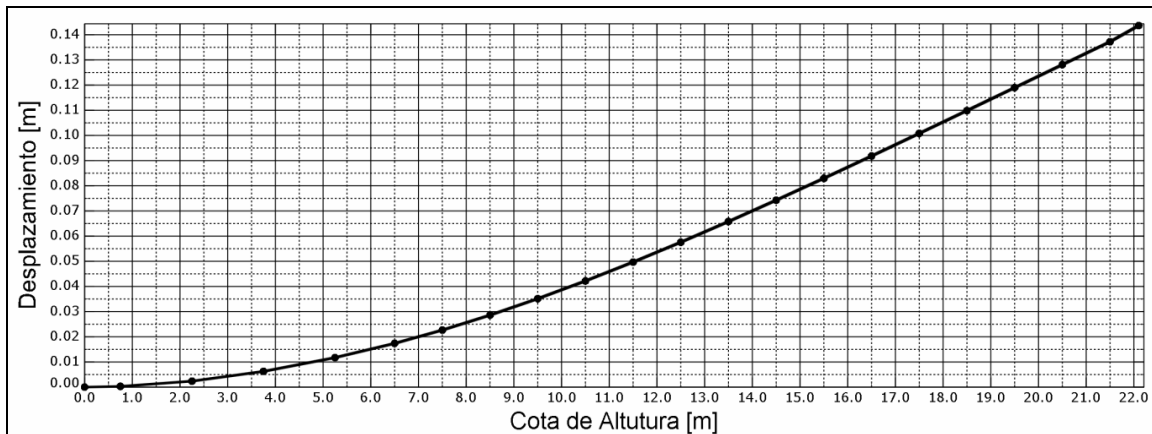


Figura 4. 8 Desplazamiento Transversal al viento (Y) en función de la altura, Análisis Estático en Abaqus [2] según Ecuación 4.143.

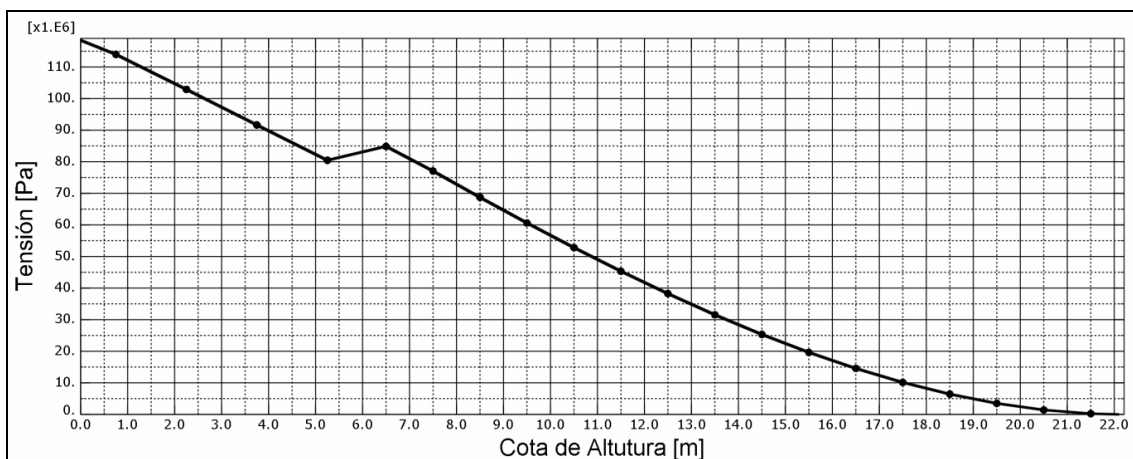


Figura 4. 9 Tensión en función de la altura debido a cargas en dirección transversal al viento. Análisis Estático en Abaqus [2] según Ecuación 4.143.

A partir de lo obtenido por el Software Abaqus [2] se realizó una comparativa de la información mediante un cruce de gráficas, lo que se muestra en la **Figura 4.10** representa la comparación entre el desplazamiento calculado mediante la ecuaciones que propone la Norma **DIN [3] (4.145)** y el desplazamiento calculado mediante el uso del software Abaqus (**FEA [2]**) utilizando como entrada la ecuación (**4.143**). Se puede observar en la **Figura 4.10** la ínfima diferencia entre los valores de desplazamiento de la estructura dado por las **Ecuaciones (4.145)** y salida del programa **Abaqus [2]** (Alrededor del 2%).

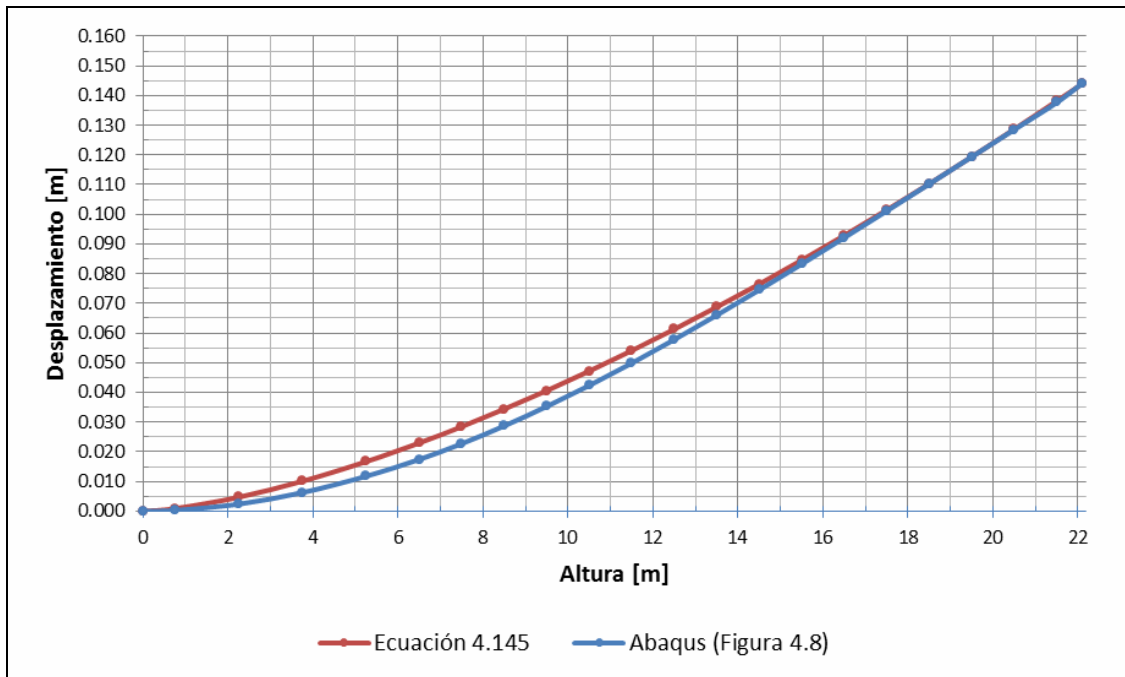


Figura 4. 10 Desplazamiento Transversal al viento según Ecuación 4.145 y Abaqus [2] (Figura 4.8)

Según la **Figura 4.9** extraída del software Abaqus [2] podemos observar que la tensión al empotramiento es cercana a los 118 MPa, el método para el cálculo de dicha tensión es basado en la teoría de Von Mises.

$$\sigma = 118 \text{Mpa} = 118 \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (4.146)$$

El coeficiente de Seguridad a Fluencia se obtiene reemplazando (4.43) y (4.146) en la **Ecuación 4.45**:

$$CS = \frac{235}{118} \quad (V.3-4.45)$$

$$CS \approx 2 \quad (4.147)$$

La carga de viento debido a excitación en dirección perpendicular al viento (**Y**) producida por desprendimiento de vórtice no producirá la falla de la estructura, estando está dimensionada con un de Coeficiente de Seguridad a fluencia de 2. Resta realizar la verificación de vida a la fatiga.

Análisis de vida a la fatiga:

El detalle de la teoría en la que se realiza el análisis de vida a la fatiga aquí presentada, parte de un método de cálculo extraído del Compendio de Cálculo Estructural (Massa [5]).

A continuación se realizará el cálculo correspondiente:

1. Límite de fatiga de la probeta de ensayo S'_e :

$$S'_e = 0,5 \cdot S_u \quad (4.148)$$

Reemplazando (4.43) en la ecuación (4.148):

$$S'_e = 0,5 \cdot 414 \frac{N}{mm^2} \quad (V.1-4.148)$$

$$S'_e = 207 \frac{N}{mm^2} \quad (4.149)$$

2. Factor de forma:

Sabiendo que está sometida a esfuerzos flectores no rotativos y como $D_e > 250mm$

$$f_T = 0,6 \quad (4.150)$$

3. Factor de superficie:

$$f_S = a_1 (S_u)^{b_1} \quad (4.151)$$

Para aceros laminados en caliente:

$$a_1 = 57,7 \quad (4.152)$$

$$b_1 = 0,718 \quad (4.153)$$

Reemplazando (4.43), (4.152) y (4.153) en la ecuación (4.151):

$$f_S = 57,7 \cdot (414)^{-0,718} \quad (V.1-4.151)$$

$$f_S = 0,76 \quad (4.154)$$

4. Resistencia a la fatiga real S_e :

$$S_e = f_T \cdot f_S \cdot f_1 \cdot f_2 \cdots f_n \cdot S'_e \quad (4.155)$$

Reemplazando (4.149), (4.150) y (4.154) en la ecuación (4.155):

$$S_e = 0,6 \cdot 0,76 \cdot 207 \frac{N}{mm^2} \quad (V.1-4.155)$$

$$S_e = 94,4 \frac{N}{mm^2} \quad (4.156)$$

5. Ciclos de vida limitada a fatiga.

$$N = \left(\frac{a}{S_N} \right)^c \quad (4.157)$$

Donde:

$$a = \frac{(0,9 \cdot S_u)^2}{S_e} \quad (4.158)$$

$$b = \frac{1}{3} \cdot \log_{10} \left(\frac{0,9 \cdot S_u}{S_e} \right) \quad (4.159)$$

$$c = \frac{1}{b} \quad (4.160)$$

Reemplazando (4.43) y (4.156) en la ecuación (4.158):

$$a = \frac{(0,9 \cdot 414)^2}{94,4} \quad (V.1-4.158)$$

$$a = 1470,8 \quad (4.161)$$

Reemplazando (4.43) y (4.156) en la ecuación (4.159):

$$b = \frac{1}{3} \cdot \log_{10} \left(\frac{0,9 \cdot 414}{94,4} \right) \quad (V.1-4.159)$$

$$b = 0,198 \quad (4.162)$$

Reemplazando (4.162) en la ecuación (4.160):

$$c = \frac{1}{0,198} \quad (4.160)$$

$$c = 5,05 \quad (4.163)$$

Reemplazando (4.161) y (4.163) en la ecuación (4.157):

$$N = \left(\frac{1470,82}{S_N} \right)^{5,05} \quad (4.164)$$

Reemplazando (4.146) en la ecuación (4.164):

$$N = \left(\frac{1470,82}{118} \right)^{5,05} \quad (V.1-4.164)$$

$$N = 341.327$$

(4.165)

Esto nos indica que la estructura de análisis tiene una vida a la fatiga estimada en 341 mil ciclos con un Coeficiente de Seguridad a fatiga de valor unitario. Por ello es necesaria la presencia en la estructura de un absorbedor de vibraciones para disminuir las amplitudes de desplazamiento y así extender la vida útil de la chimenea.

4.7. Conclusiones del Capítulo.

En presente capítulo se realizó la aplicación de las Normas estableciendo un análisis de los fenómenos que produce el viento sobre las estructuras, también se utilizó el programa de cálculo de elementos finitos (**Abaqus [2]**).

Se determinaron las cargas de viento en dirección del viento (**X**) junto con el desplazamiento máximo que puede ocurrir en esas condiciones de carga. Podemos determinar que las cargas que se obtuvieron en las dos normas son similares e introducen en la estructura solicitaciones casi de la misma magnitud, con la salvedad que las dos zonas eólicas bajo el enfoque que brindan las normas son completamente diferentes; lo que nos deriva a recabar más información para determinar cuál de las dos zonas de viento es más intensa desde el punto de vista de la carga de viento.

En el análisis de las cargas en dirección perpendicular al viento (**Y**) dado por la Norma **DIN [3]** y los resultados que se obtuvieron exponen que la estructura fallará por fatiga, lo cual justifica la implementación de un dispositivo absorbedor de vibraciones.

También se reforzó la información proporcionadas por las normas con un análisis de elementos finitos; dando como resultado que las ecuaciones provenientes del análisis de carga perpendicular a la dirección del viento (**Y**) de la Norma **DIN [3]** y el análisis de elementos finitos son similares. Esto nos sirvió de gran utilidad en la estimación de vida a la fatiga que se extrae de las simulaciones numéricas realizadas en Matlab **[6]** del próximo capítulo.

4.8. Resumen del Capítulo

En este capítulo se realizó el análisis numérico de los fenómenos que produce el viento sobre las estructuras; bajo un enfoque de las distintas normas utilizadas. También se reforzó la información proporcionadas por las normas con análisis de elementos finitos, se obtuvo una correlación entre los resultados obtenidos por la Norma **DIN [3]** y las correspondientes salidas del Software de elementos finitos. De las normas se extrajeron las condiciones de máxima solicitación, se determinó que en la estructura de análisis es necesaria la instalación de un sistema absorbedor de vibraciones para prolongar la vida de la estructura a fatiga. Los resultados dados por las normas son de condiciones de máximo no pudiéndose obtener la variación de la carga con respecto a la variación de la velocidad de viento, esto será estudiado el próximo capítulo.

4.9. Referencias

- ¹ INTI, “CIRSOC 102, Reglamento Argentino de acción del viento sobre las construcciones”, INTI, Buenos Aires, 2005.
- ² Dassault Systemes, “Abaqus CAE”, Dassault Systemes, France, 2010.
- ³ DIN, “1055-4, Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 4: Windlasten”, DIN, Berlin, 2005.
- ⁴ DIN, “4133, Schornsteine aus Stahl”, DIN, Berlin, 2005.
- ⁵ Massa, J.C., “COMPENDIO de Cálculo Estructural”, Departamento de Estructuras FCEfyN UNC, Córdoba, 2007.
- ⁶ The MathWorks, “Matlab 7.0 R14”, MathWorks, USA, 2007.

Capítulo 5 Modelización Numérica

5.1. Introducción.

En el capítulo anterior se realizó la aplicación de las normativas vigentes a la estructura de análisis de este Proyecto Integrador; de ellas se obtuvieron las cargas de viento y los desplazamientos que éstas provocan en la estructura en dirección del viento, se determinaron las tensiones utilizando un Software de cálculo de elementos finitos. Se realizó una aplicación de la norma DIN [1] para determinar los desplazamientos perpendiculares a la dirección del viento producidos por desprendimiento de vórtice y se hizo un análisis de vida a la fatiga; dando como resultado que la estructura bajo excitación trasversal por desprendimiento de vórtices tendrá una vida limitada a fatiga.

En el presente capítulo se modeliza el fenómeno de *desprendimiento de vórtices* en la estructura de análisis obteniendo su repuesta a la variación de la frecuencia de la fuente excitatriz, y la alteración de la respuesta de la estructura al incorporarle un sistema absorbedor de vibraciones.

Para ello se recurrió a bibliografía especializada donde se pudiera establecer los parámetros que rigen el fenómeno de desprendimiento de vórtice; para luego modelar dicho fenómeno en una rutina de cálculo en Matlab [2] y así poder determinar los distintos parámetros del absorbedor que den un desempeño eficiente.

5.2. Objetivos

Los objetivos de este capítulo son:

1. Determinar los parámetros que rigen el fenómeno de desprendimiento de vórtice.
2. Modelizar el fenómeno en la estructura de análisis.
3. Obtención de la respuesta de la estructura a la variación de la excitación.
4. Estimar la vida de la estructura sin absorbedor utilizando estadísticas meteorológicas.
5. Modelizar el fenómeno en la estructura de análisis con absorbedor.
6. Obtención de parámetros reducidos del absorbedor que den la respuesta más eficiente
7. Estudio de la respuesta de la estructura de análisis con los parámetros reducido de los absorbedores más eficientes.

5.3. Símbolos

5.3.1. Simbología Local Modelización Numérica.

Símbolo	Descripción	Unidad
A_f	Área proyectada sobre un plano normal a la dirección del viento.	m^2
D	Diámetro del cilindro.	m
C_L	Coefficiente de sustentación.	---
$[C]$	Matriz de amortiguamiento sin absorbedor	Ns/m
$[C]_{c/abs}$	Matriz de amortiguamiento con absorbedor	Ns/m
$F(t)$	Fuerza de sustentación oscilante.	N
$[F]$	Matriz de flexibilidad sin absorbedor.	m/N
$[K]$	Matriz de rigidez sin absorbedor.	N/m
$[K]_{c/abs}$	Matriz de rigidez con absorbedor.	N/m
L	Longitud.	m
$[M]$	Matriz de masa sin absorbedor.	Kg
$[M]_{c/abs}$	Matriz de masa con absorbedor.	Kg
U_{ref}	Velocidad de referencia (situada a 10 m de la superficie del terreno).	m/s
U	Velocidad del viento.	m/s
S_t	Número de Strouhal.	----
Re	Número de Reynolds.	----
$\{f_e\}$	Vector carga externa sin absorbedor.	N
$\{f_e\}_{c/abs}$	Vector carga externa con absorbedor..	N
f_n	Frecuencia natural de la estructura	Hz
f_s	Frecuencia de desprendimiento de Vórtice.	Hz
j	Número de tramo	---
m	Masa por unidad de Longitud	Kg/m
z_j	Altura sobre el nivel del terreno del tramo j .	m
z_{min}	Altura mínima.	m
δ_r	Decremento Logarítmico de la estructura.	----
ρ	Densidad del fluido.	Kg/m ³
ζ	Relación de amortiguamiento.	----
ω	Frecuencia de vibración de la estructura	rad/s
ω_n	Frecuencia natural de la estructura.	N/m ²
ω_s	Frecuencia de desprendimiento de vórtice.	rad/s

Tabla 5. 1 Simbología Local para el Capítulo 5

5.4. Vibraciones inducidas por vórtices

Para un mejor entendimiento del fenómeno que se simuló en el Software Matlab [2] se realizó en este capítulo una recopilación de teoría brindada por bibliografía especializada (Blevins [3]), esta información es descrita a continuación.

5.4.1. Introducción teórica

1. *Flujo a través de un cilindro circular.*

Cuando una partícula de fluido fluye a hacia el borde de ataque de un cilindro, la presión en la partícula de fluido crece desde la presión de corriente libre hasta la presión de estancamiento. La elevada presión del fluido en las cercanías del borde de ataque impulsa el fluido alrededor del cilindro a medida que se desarrolla la capa límite en ambos lados del cilindro. Sin embargo, a elevados números de Reynolds, la elevada presión no es suficiente para forzar el flujo alrededor de la parte trasera del cilindro. Cerca de la sección mas amplia del cilindro, la capa limite se separa de cada lado de la superficie del cilindro, formando dos capas de corte que, aguas abajo del flujo, se unen a la estela. Debido a que la porción de capas de corte más internas, que se encuentra en contacto con el cilindro, se mueven mucho más lento que la porción de capas de corte más externas, que se encuentran en contacto con el flujo libre, las capas de corte se pliegan unas sobre las otras y se juntan formando vórtices arremolinados [4]. Se llama “calle de vórtice” a un patrón regular de vórtices que están siendo arrastrados en la estela.

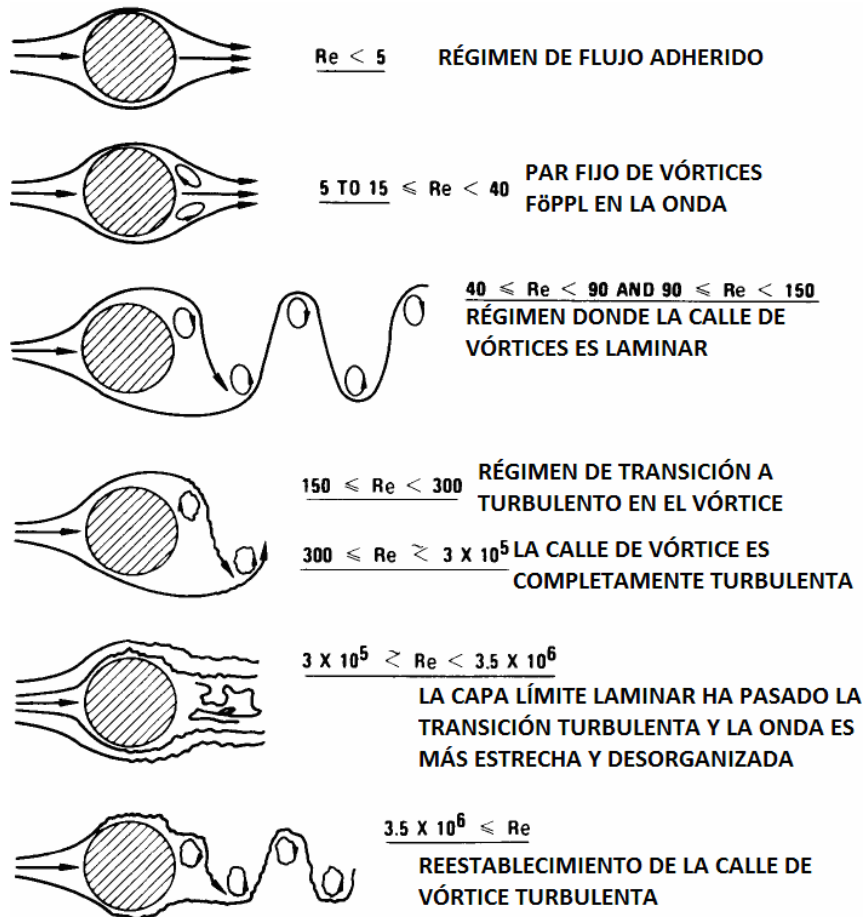
El desprendimiento de vórtices de un cilindro circular liso en un flujo estacionario subsónico es una función del número de Reynolds, como ya sabemos el Número de Reynolds está basado en la velocidad del fluido sin interrupciones (libre), de la viscosidad del fluido y del diámetro del cilindro. En la **Figura 5.1** [5] se muestra como es el flujo a través de un cilindro circular a medida que varía el número de Reynolds.

A valores bajos del número de Reynolds ($Re=5$), el flujo copia el contorno del cilindro. En el rango de $5 \leq Re \leq 45$, el flujo se separa de la parte trasera del cilindro y un par simétrico de vórtices se forma en la estela próxima. La longitud de desprendimiento de vórtices en sentido de la corriente aumenta linealmente con el número de Reynolds, llegando a una longitud de tres diámetros de cilindro para $Re=45$. Si continúa aumentando, la estela se convierte en inestable y uno de los vórtices se aleja del cilindro. Se forma una estela periódica de vórtices escalonados con direcciones opuestas [6].

Entre $Re=150$ y 300 los vórtices que se alejan del cilindro se convierten en turbulentos, a pesar que la capa límite del cilindro permanece laminar [7]. El rango $300 < Re < 1.5 \cdot 10^5$ es llamado subcrítico, en este rango la capa límite laminar se separa a 80 grados atrasado de la nariz del cilindro y el desprendimiento de vórtice es grande y periódico. En el rango de transición, $1,5 \cdot 10^5 < Re < 3,5 \cdot 10^6$, la capa límite del cilindro se convierte a turbulenta, el punto de separación se mueve a 140 grados atrasado, y el coeficiente de arrastre del cilindro cae a $0,3$. En el rango de transición, la burbujas de separación laminar y efectos tridimensionales interrumpen en el proceso regular de

desprendimiento y amplía el espectro de frecuencia de desprendimiento para cilindros de superficie lisa [8, 9, 10, 11, 12].

En el rango de Reynolds supercrítico, $Re > 3,5 \cdot 10^6$, el desprendimiento de vórtice es regular restablecido con una capa límite turbulenta.



Fuente: BLEVINS [3]

Figura 5. 1 Régimen de flujo a través de un cilindro circular- Lienhard [5]

2. Número de Strouhal

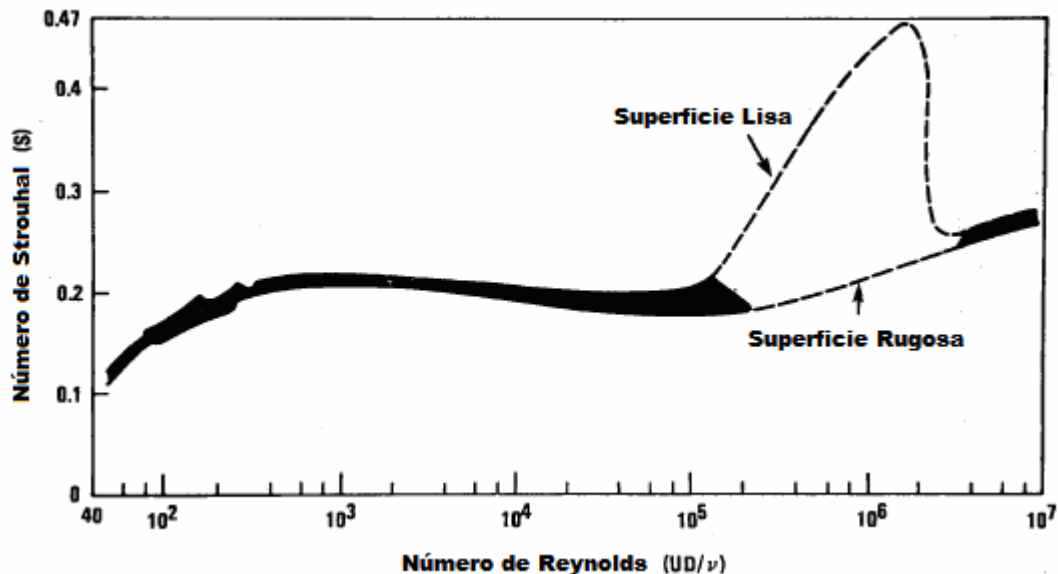
El número de Strouhal (St) es una constante adimensional proporcional a la frecuencia predominante de los desprendimientos de vórtices f_s y la velocidad del flujo libre U dividido el diámetro del cilindro D :

$$f_s = \frac{St \cdot U}{D} \quad (5.1)$$

Ecuación 3-2 Blevins [3]

El número de Strouhal St para un cilindro circular en flujo subsónico estacionario es una función del número de Reynolds y en un grado menor, de la rugosidad de la superficie y la turbulencia del fluido. El número de Strouhal varía con respecto al número de Reynolds, tal como se ve en la **Figura 5.2**, se puede ver que para régimen de transición en cilindros de superficie lisa donde el número de Reynolds está situado entre $2 \cdot 10^5 < Re < 2 \cdot 10^6$ tiene una estela caótica desorganizada y de alta frecuencia y el

número de Strouhal es tan alto como $St=0,5$, en cambio en superficies rugosas la estela es organizada y periódica con un número de Strouhal de $St=0,25$.



Fuente: BLEVINS [3]

Figura 5. 2 Variación del número de Strouhal según el Re para cilindros circulares- [5, 8 y 11]

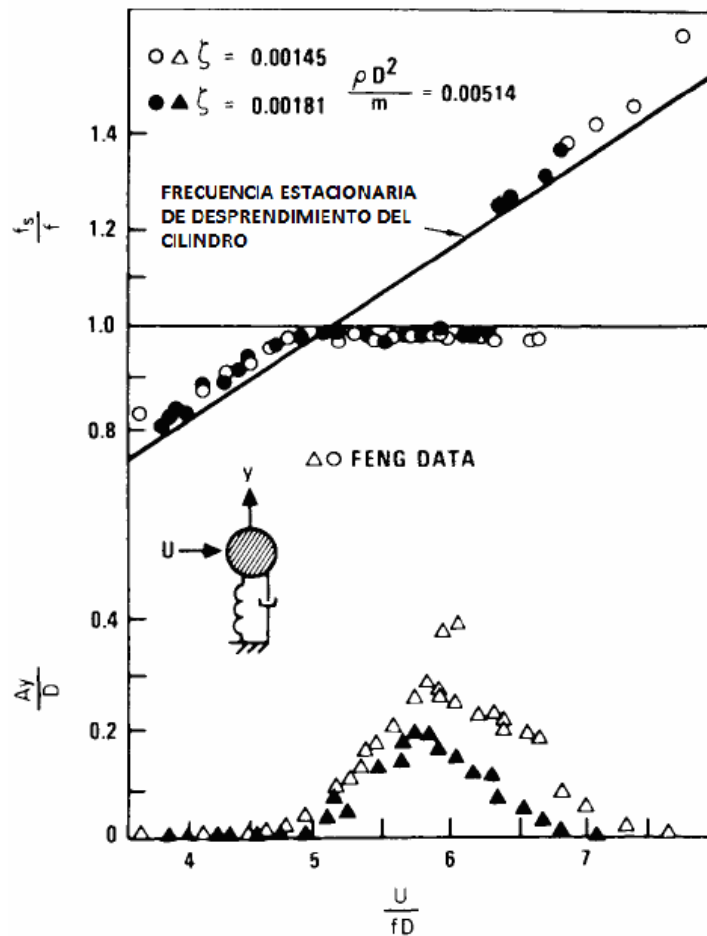
3. Desprendimiento de Vórtices (*Lock-In*).

La descripción del fenómeno de desprendimiento de vórtices descrito hasta aquí da la impresión que el desprendimiento de vórtice es un proceso estacionario, armónico y bidimensional. Desafortunadamente, esto no es completamente así. El desprendimiento de vórtice de un cilindro estacionario en un número de Reynolds elevado no ocurre a una sola y determinada frecuencia, sino que más bien ronda en una estrecha banda de frecuencias con un rango de amplitudes y no es constante a lo largo de toda la longitud (Jones [11]).

El énfasis que pone este capítulo está basado en la predicción de vibraciones inducidas por desprendimiento de vórtice en cilindros. Sin embargo, tanto como el desprendimiento de vórtices impone una fuerza sobre el cilindro, el cilindro también impone una fuerza sobre el fluido.

A medida que la velocidad de flujo incrementa o disminuye de modo que la frecuencia de desprendimiento de vórtices f_s se aproxima a la frecuencia natural f_n de una estructura elástica, la frecuencia de desprendimiento de vórtices repentinamente se bloquea a la frecuencia de la estructura (Feng [13]). Las vibraciones resultantes ocurren en las cercanías de la frecuencia natural de la estructura. En este fenómeno llamado *Lock-in*, las oscilaciones en resonancia de la estela cercana le introduce una energía substancial a la estructura y pueden resultar vibraciones de gran amplitud.

La vibración transversal de traslación de un cilindro circular montado elásticamente es mostrada en la **Figura 5.3** para dos niveles de amortiguamiento. La vibración transversal fundamental ocurre generalmente en el rango de velocidad reducida $4 < U/(f_n D) < 8$, pero la vibración también puede ocurrir en sub y súper armónicos de la frecuencia de desprendimiento (Feng [13]).



Fuente: BLEVINS [3]

Figura 5.3 Respuesta de las vibraciones inducidas en un cilindro soportado por resortes – (Feng [12])

La parte inferior de la **Figura 5.3** muestra la respuesta medida de la amplitud de la vibración A_y como una función de la velocidad de flujo. La amplitud máxima del cilindro se produce en la condición de resonancia $U/(fD) \sim 5,5$. La parte superior de la **Figura 5.3** muestra la frecuencia de vórtices. La frecuencia de desprendimiento aumenta con velocidad según lo predicho hasta que es igual a la frecuencia natural del cilindro en $U/fD = 5$ y con ello ese manifiestan grandes amplitudes en la vibración de los cilindros. La frecuencia de desprendimiento es sostenida por la frecuencia natural del cilindro. El desprendimiento persiste hasta que la velocidad se incremente hasta $U/fD = 6,5$ en cuyo punto *Lock-in* se rompe y la frecuencia de desprendimiento bruscamente vuelve a su valor natural. En general, cuanto mayor sea la respuesta estructural a desprendimiento de vórtices, mayor será el rango de *Lock-in*.

$$f_n \approx f_s = \frac{St \cdot U}{D} \quad \text{También} \quad 5 \leq \frac{U}{f_s \cdot D} \leq 6,5 \quad (5.2)$$

La vibración transversal de los cilindros próxima a la frecuencia de desprendimiento de vórtice organiza la estela. La vibración incrementa la correlación del desprendimiento de vórtice a lo largo del eje del cilindro. La correlación es una medida de la tridimensionalidad del flujo en la estela del cilindro y una correlación unitaria, significa

que estamos en presencia de un flujo bidimensional. Un incremento en la amplitud de las vibraciones transversales (a la dirección del viento) también incrementa la capacidad de que la vibración ingrese en *Lock-in* a la frecuencia de desprendimiento.

La vibración de un cilindro en frecuencias cercanas a la frecuencia de desprendimiento influye en el patrón y fase de los vórtices. Los vórtices tienden a desprenderse del cilindro en la parte donde la amplitud de vibración está en su máximo desplazamiento. Existe un abrupto corrimiento de fase entre el desprendimiento y el movimiento del cilindro cuando la frecuencia de vibración del cilindro pasa a través de la frecuencia natural.

Para la vibración en frecuencias levemente por debajo la frecuencia de desprendimiento, los vórtices se desprenden en el lado opuesto al que experimenta desplazamiento máximo. Para frecuencias de vibración levemente superiores a la frecuencia desprendimiento, los vórtices se desprenden del mismo lado que el desplazamiento máximo. El cambio de fase contribuye a un fenómeno de histéresis donde el rango de *Lock-in* depende de si la frecuencia de desprendimiento se aproxima por encima o por debajo de la frecuencia de vibración.

La vibración transversal de un cilindro en o cerca de la frecuencia de desprendimiento de vórtice tiene un gran efecto sobre el desprendimiento de vórtice. La vibración del cilindro puede:

1. Aumenta la fuerza de los desprendimientos de vórtices.
2. Aumentar la envergadura de la correlación de la estela.
3. Provoca que la frecuencia de desprendimiento de vórtices se mude a la frecuencia natural de vibración del cilindro. Esto se denomina sincronización o *Lock-in*.
4. Alterar la fase, secuencia y el patrón de los vórtices en la estela.

4. Fuerza de Sustentación.

La fuerza de sustentación oscilante impuesta a un solo cilindro circular de longitud L y diámetro D , en un *flujo transversal uniforme* de velocidad U , debido al desprendimiento de vórtices está dada por:

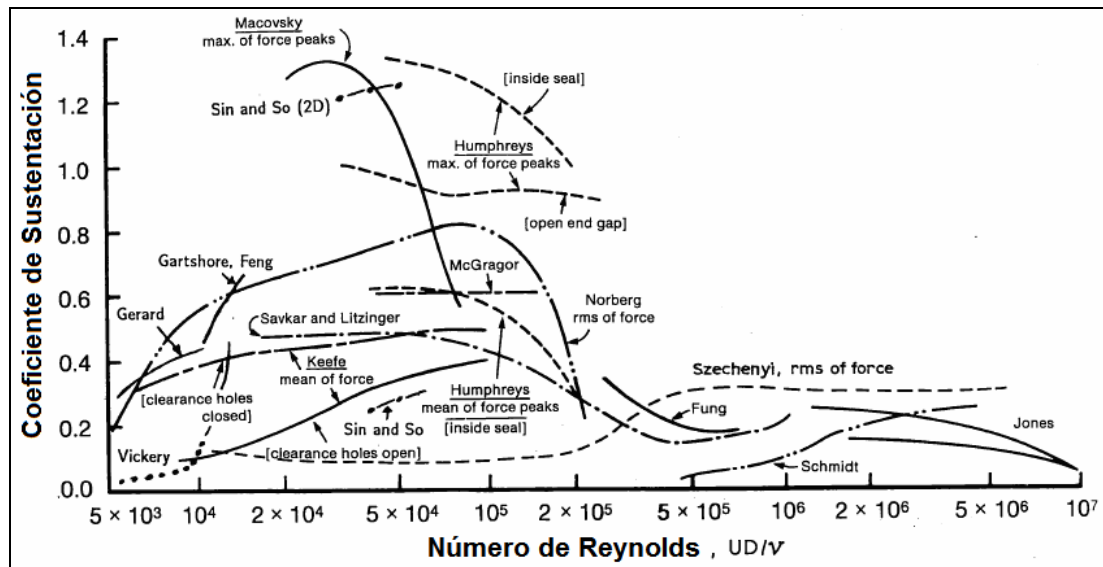
$$F(t) = \frac{1}{2} \rho \cdot U^2 \cdot C_L \cdot D \cdot L \cdot \sin(2\pi f_s \cdot t) \quad (5.3)$$

Ec. 3-6 Blevins [3]

La frecuencia de desprendimiento en rad/s

$$\omega_s = 2\pi \cdot f_s \quad (5.4)$$

El coeficiente de sustentación C_L es una función del número de Reynolds y del movimiento del cilindro. Las mediciones experimentales de C_L muestran una considerable dispersión con valores típicos que van desde 0,1 a 1,0 (**Ver Figura 5.4**).



Fuente: BLEVINS [3]

Figura 5. 4 Variación del Coeficiente de sustentación C_L para cilindros circulares (Blevins [3])

Tanto la amplitud de la respuesta estructural como el rango de velocidad sobre la cual **Lock-in** persiste son funciones del parámetro de atenuación reducido adimensional δ_r :

$$\delta_r = \frac{2m \cdot (2\pi \cdot \zeta)}{\rho \cdot D^2} \quad (5.5)$$

Ec. 3-12 Blevins [3]

Donde:

m Masa por unidad de longitud del cilindro, incluidas las masas agregadas.

ζ Relación de amortiguamiento para vibraciones en el modo de interés, ordinariamente medido en fluido quieto.

ρ Densidad del fluido

D Diámetro del cilindro.

El δ_r bajo, mayor será la amplitud de la respuesta estructural y mayor será la gama de velocidades de flujo en el que ocurre Lock-in (**Ver Figura 5.3**).

Con toda la información hasta aquí presentada podemos simular numéricamente el fenómeno de desprendimiento de vórtice mediante una rutina en el programa Matlab [2], a continuación se detallan las ecuaciones y consideraciones realizadas.

5.4.2. Simulación del Sistema de análisis sin absorbedor

Con la introducción teórica (5.3.1) se procedió a simular el fenómeno de vibraciones transversales producidas por desprendimiento de vórtice utilizando una rutina de cálculo del programa Matlab [2], con el objeto de obtener su repuesta a la variación de la fuente excitatriz.

De la teoría desarrollada en 5.3.1 rescatamos que la frecuencia de desprendimiento de vórtice es una función de la velocidad del viento; y como ya se estudió anteriormente en el análisis normativo, la velocidad del viento es función de la altura con respecto al suelo (Ver Figura 5.5). Demostrado esto, para poder introducir un absorbedor de vibraciones y medir su eficiencia dentro de la estructura de análisis primero determinamos la amplitud de la repuesta de la estructura sin absorbedor para distintas velocidades del viento tomando como base la velocidad de referencia definida en la Norma DIN [1].

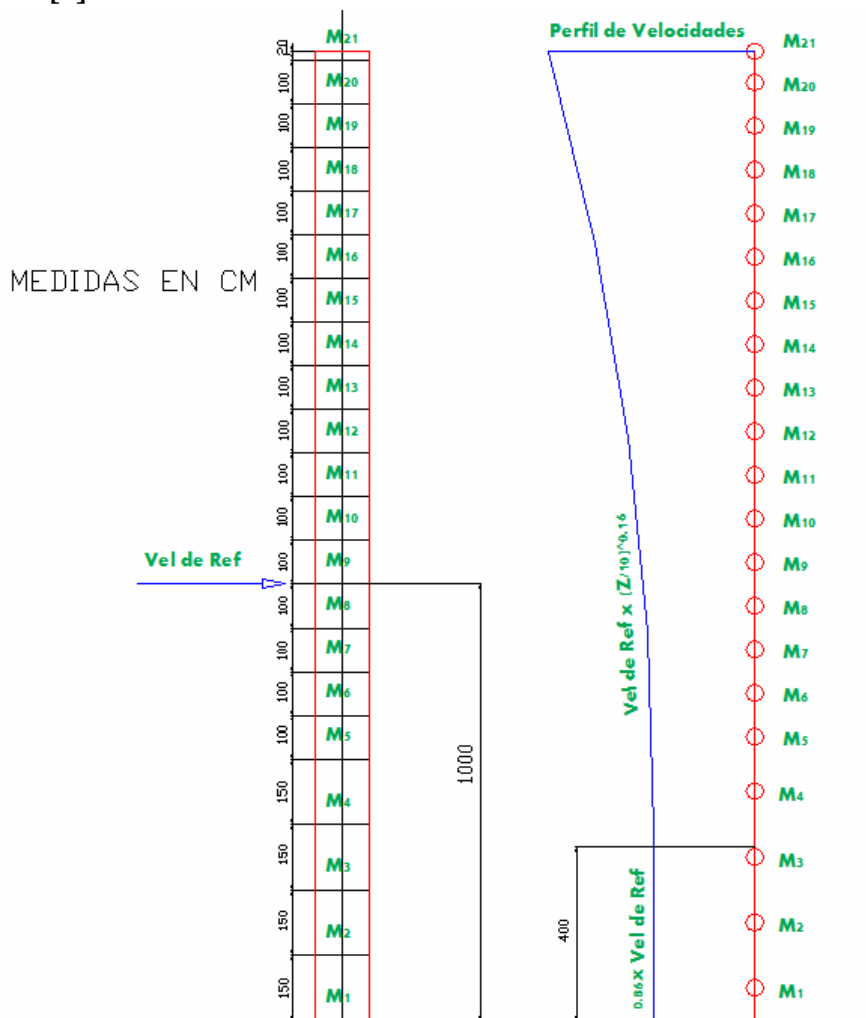


Figura 5. 5 Perfil de velocidad del viento

Para determinar la respuesta de la estructura de análisis ello debemos resolver el siguiente sistema de ecuaciones:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{f\} \quad (5.6)$$

El estudio de la estructura de análisis (chimenea) en Matlab [2] se realizan las siguientes consideraciones iniciales:

1. La estructura de análisis está empotrada en el extremo inferior.
2. La estructura de análisis está libre en su extremo superior.

Utilizando lo ya calculado en el Capítulo 2 (2.6.2) del sistema propuesto (Ver Figura 2.20) tenemos ya determinado lo siguiente:

- Matriz de Rigidez $[K]$ (2.6.2.2).
- Matriz de Masa $[M]$ (2.6.2.3).
- Los Vectores y Valores Propios (2.6.2.4).

Seguidamente se determinó la matriz de Amortiguamiento $[C]$, el vector de carga externa $\{f\}$ y establecimos el rango donde aparece el fenómeno de *Lock-in*.

1. Determinación de la Matriz de Amortiguamiento sin absorbedor $[C]$

Para determinar la matriz de amortiguamiento de la estructura sin absorbedor $[C]$ se asumió que la estructura de análisis posee amortiguamiento proporcional (Ver Amortiguamiento Proporcional en el Anexo II de este Proyecto Integrador). Para calcular $[C]$ es necesario conocer el coeficiente de amortiguamiento de la estructura, que por ahora es desconocido, pero la Norma DIN [1] provee un valor de decremento logarítmico extraído de otra norma alemana; la Norma DIN 4133 [14] establece para estructuras metálicas, como chimeneas, un valor de decremento logarítmico de amortiguación de:

$$\delta_s = 0,025 \quad (5.7)$$

En base de (5.7) podemos calcular el factor de amortiguamiento ξ como:

$$\xi = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2\pi}{\delta_s}\right)^2}} \quad (5.8)$$

Reemplazando (5.7) en la ecuación (5.8):

$$\xi = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2\pi}{0,025}\right)^2}} \quad (V.1-5.8)$$

$$\xi = 0.0039788 \cong 0.004 \quad (5.9)$$

Utilizando las dos primeras frecuencias naturales obtenidas con la rutina de cálculo Cap2_2 presentada en el Capítulo 2 (Valores propios):

$$\omega_{21} = 16,45 \quad (5.10)$$

$$\omega_{20} = 99,32 \quad (5.11)$$

Suponemos que $\xi = \xi_1 = \xi_2$. obtenemos los factores α_1 y α_2 reemplazando (5.9), (5.10) y (5.11) en la ecuación II.13:

$$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1/16,45 & 16,45 \\ 1/99,32 & 99,32 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_0 \\ \alpha_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,004 \\ 0,004 \end{bmatrix} \quad (V.1-II.13)$$

Resolviendo el sistema de dos ecuaciones, tenemos:

$$\begin{bmatrix} \alpha_0 \\ \alpha_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,1142 \\ 6,7 \cdot 10^{-5} \end{bmatrix} \quad (5.12)$$

Reemplazando los valores (5.12) en la ecuación II.11 (Anexo II) podemos calcular la matriz de amortiguación del sistema sin absorbedor (5.13):

$$[C] = 0,1142[M] + 6,7 \cdot 10^{-5}[K] \quad (5.13)$$

2. Determinación del vector de carga externa $\{f_e(t)\}$ debido a desprendimiento de vórtice

La componente j del vector de carga externa se determinó de la siguiente manera:

$$\{f_{ej}(t)\} = \left[\frac{1}{2} \rho \cdot U_j^2 \cdot C_L \cdot D \cdot L_j \cdot \sin(2\pi f_{sj} \cdot t) \right] \quad (5.14)$$

ρ Densidad del fluido, en este caso aire.

$$\rho = 1,25 \frac{Kg}{m^3} \quad (5.15)$$

U_j La velocidad del viento al baricentro del tramo j .

La variación de la velocidad del viento con respecto a la altura está dada por las ecuaciones del perfil de velocidades media de la norma DIN [1] para la categoría de terreno II (Ver Figura 3.33). Alteramos la nomenclatura para hacerla acorde a las ecuaciones dadas por la bibliografía consultada (utilizamos U para referirnos a las velocidades).

Para $z \leq 4 m$

$$U_j = 0,86 \cdot U_{ref} \quad (5.16)$$

Para $z > 4 \text{ m}$

$$U_j = U_{ref} \cdot \left(\frac{z_j}{10} \right)^{0,16} \quad (5.17)$$

L_j Longitud del tramo j .

D Diámetro exterior de la estructura de análisis.

$$D = 1,23 \text{ m} \quad (5.18)$$

C_L Coeficiente de sustentación.

Para el cálculo del valor del coeficiente de sustentación C_L , la bibliografía consultada para la elaboración de este capítulo demuestra con datos experimentales que el valor de C_L depende del número de Reynolds Re y de las interpretaciones de distintos autores de las teorías experimentales, estos se presentaron en la **Figura 5.4**. En este Proyecto Integrador se utilizó la teoría de **Szechenyi [15] (Figura 5.4)** para obtener los valores de C_L de la estructura debido que esta teoría presenta los valores más conservativos para Re mayores a 10^5 (donde el fenómeno es más intenso en nuestra estructura de análisis).

Como la velocidad del viento es una variable dependiente de la altura del baricentro del tramo **(5.16)** y **(5.17)**, el coeficiente de sustentación es función de la velocidad de referencia U_{ref} , la viscosidad cinemática del aire fue expuesta en **(4.95)** y el diámetro en **(5.18)**. Con ello se calculó el respectivo Número de Reynolds para cada tramo:

$$Re(z_j) = \frac{U_j \cdot D}{\nu} \quad (5.19)$$

Para $z \leq 4 \text{ m}$

Reemplazando **(4.95)**, **(5.16)** y **(5.18)** en la **Ecuación 5.19**:

$$Re(z_j) = \frac{0,86 \cdot U_{ref} \cdot 1,23}{15 \cdot 10^{-6}} \quad (V.1-5.19)$$

$$Re(z_j) = 70520 \cdot U_{ref} \quad (5.20)$$

Para $z > 4 \text{ m}$

Reemplazando **(4.95)**, **(5.17)** y **(5.18)** en la **Ecuación 5.19**:

$$Re(z_j) = \frac{U_{ref} \cdot \left(\frac{z_j}{10} \right)^{0,16} \cdot 1,23}{15 \cdot 10^{-6}} \quad (V.2-5.19)$$

$$\operatorname{Re}(z_j) = 56730 \cdot U_{ref} \cdot (z_j)^{0,16} \quad (5.21)$$

Con las expresiones (5.20), (5.21) y la Figura 5.4, se obtiene C_L para cada tramo j .

f_{sj} Frecuencia de desprendimiento de vórtice del tramo j .

Partiendo de la Ecuación 5.1 la frecuencia de desprendimiento de vórtice para el tramo j es:

$$f_{sj} = \frac{St_j \cdot U_j}{D} \quad (5.22)$$

Para $z \leq 4 \text{ m}$

Reemplazando (5.16) y (5.18) en la Ecuación 5.22:

$$f_{sj} = \frac{St_j \cdot 0,86 \cdot U_{ref}}{1,23} \quad (\text{V.1-5.22})$$

$$f_{sj} = 0,699 \cdot St_j \cdot U_{ref} \quad \text{Hz} \quad (5.23)$$

Para $z > 4 \text{ m}$

Reemplazando (5.17) y (5.18) en la Ecuación 5.22:

$$f_{sj} = \frac{St_j \cdot U_{ref} \cdot \left(\frac{z_j}{10}\right)^{0,16}}{1,23} \quad (\text{V.2-5.22})$$

$$f_{sj} = 0,562 \cdot St_j \cdot U_{ref} \cdot (z_j)^{0,16} \quad \text{Hz} \quad (5.24)$$

El valor del número de Strouhal del tramo j (St_j) se extrajo de la Figura 5.2 para cilindros lisos, ya que la parte superior de la estructura de análisis es de acero inoxidable, utilizando el número de Reynolds del tramo dada por las expresiones (5.20) y (5.21) y la curva correspondiente a un material de superficie lisa obtenemos el respectivo número de Strouhal. El valor del St no es constante, lo que nos indica que la frecuencia de desprendimiento de vórtice, en nuestro caso, depende de la posición dentro de la estructura de análisis (altura) y su correspondiente valor en el perfil de velocidad.

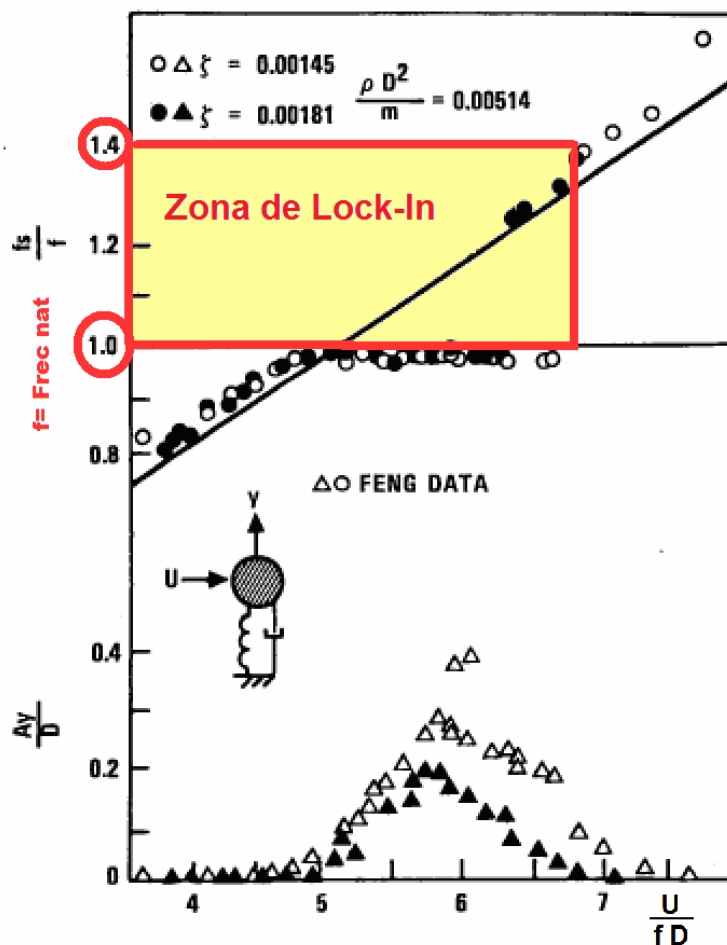
3. Determinación de la Zona de Lock-In.

Como se explicó anteriormente el fenómeno de *Lock-In* es un bloqueo de la frecuencia de desprendimiento de vórtice, este es un fenómeno que aparece debido a la interacción entre el fluido y la estructura; esto se da cuando la frecuencia de desprendimiento de vórtice se aproxima a la frecuencia natural de la estructura, este fenómeno persiste hasta una velocidad dada, cuando se supera dicha velocidad este bloqueo se rompe retomando la frecuencia de desprendimiento como si se tratara de un cilindro estacionario (Ver Figura 5.5), según la bibliografía consultada para estructuras de bajo coeficiente de amortiguamiento el *Lock-In* se produce cuando la relación de frecuencia se encuentra en el siguiente rango:

$$1 \leq \frac{f_{vj}}{f_n} \leq 1,4 \quad (5.25)$$

Donde:

f_n Frecuencia natural de la estructura.



Fuente: BLEVINS [3]

Figura 5. 6 Zona de Lock-In

En el intervalo de velocidades donde se cumple la condición de en *Lock-in* (**Ecuación 5.25**) la frecuencia de desprendimiento de vórtices es la frecuencia natural de la estructura:

$$f_s \approx f_n \quad (5.26)$$

4. Determinación de las condiciones de la Rutina de cálculo

Con lo demostrado hasta aquí ya reunimos toda la información necesaria para realizar la rutina de cálculo en Matlab [2], como es evidente en las ecuaciones del fenómeno siempre está presente la velocidad de referencia del viento U_{ref} que a través de las ecuaciones (5.23) y (5.24) dan las frecuencias de desprendimiento de vórtice de cada tramo. Esto complica la resolución numérica en una rutina de cálculo ya que el vector de carga externa $\{f_e(t)\}$ es un vector compuesto por funciones armónicas de frecuencias diferentes.

Esta dificultad pudo ser superada sin perder mucha precisión en la modelización del fenómeno aplicado a nuestra estructura de análisis. Utilizando una característica demostrada en el Capítulo 2 (2.6.2.5), como se puede observar en la **Figura 2.22** la respuesta de la estructura de análisis es pequeña salvo en la zona en que la frecuencia excitatriz produce la resonancia. Dicho esto nos dio la pauta de la región más importante a la hora de realizar la simulación dicha zona es la definida en las proximidades de:

$$\frac{\omega}{\omega_n} \approx 1 \quad (5.27)$$

En base a la expresión (5.27) los elementos del vector de fuerzas externas se componen de la siguiente manera:

- a) Determinación Amplitud de la fuerza externa basándonos en la ecuación (5.14).

$$\{f_{ej}\} = \left[\frac{1}{2} \rho \cdot U_j^2 \cdot C_L \cdot D \cdot L_j \right] \quad (5.28)$$

- b) Cálculo de la frecuencia de desprendimiento en los límites de tramo según las ecuaciones (5.23) y (5.24). (Ver **Lineamientos en 4.4**), haciendo un recorrido a través de la estructura desde la parte superior hasta la parte inferior, se establecen las siguientes condiciones:

- Si la frecuencia de desprendimiento del límite superior del tramo j está dentro del rango establecido en la ecuación (5.25), pero no lo cumple el límite superior del tramo $j-1$, establecemos el factor P_j como un parámetro que toma en cuenta la proporción del tramo j que se encuentra en Lock-In:

$$P_j = \frac{f_{sj} - f_{sj-1}}{\ell_j} \cdot (1 - f_{sj-1}) \quad 0 \leq X_j \leq 1 \quad (5.29)$$

$$\omega = \omega_n$$

- Si la frecuencia de desprendimiento de los límites superiores de los tramos j y $j-1$ están dentro del rango establecido en la ecuación (5.25) el tramo j que se encuentra completamente en Lock-In.

$$P_j = 1 \quad (5.30)$$

$$\omega = \omega_n$$

- Si la frecuencia de desprendimiento del límite superior del tramo j supera el límite superior del rango establecido en la ecuación (5.25), pero límite superior del tramo $j-1$ lo cumple, restablecemos el factor P_j como un parámetro que toma en cuenta la proporción del tramo j que se encuentra en Lock-In:

$$P_j = \frac{f_{sj} - f_{sj-1}}{\ell_j} \cdot (1,4 - f_{sj-1}) \quad 0 \leq X_j \leq 1 \quad (5.31)$$

$$\omega = \omega_n$$

- Si la frecuencia de desprendimiento de los límites superiores de los tramos j y $j-1$ no están dentro del rango establecido en la ecuación (5.25) el tramo j que se encuentra completamente fuera del fenómeno de Lock-In, por lo que se consideró, para que no existan discontinuidades en la gráfica, que las cargas que actúan en estas condiciones tienen la frecuencia de resonancia pero la proporción del tramo donde se produce la resonancia es pequeña (**0,5% de la longitud del tramo**).

$$P_j = 0,005 \quad (5.32)$$

$$\omega = \omega_n$$

Con todo lo anterior reformulamos el vector carga externa como:

$$\{f_{ej}(t)\} = \left[\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U_j^2 \cdot C_L \cdot D \cdot P_j \cdot L_j \right] \cdot e^{i\omega t} \quad (5.33)$$

Para la resolución del sistema de ecuaciones **5.6** se utilizó el método de Fourier, si la carga externa de es la siguiente forma:

$$\{f_{ej}(t)\} = F_{ej} \cdot e^{i\omega t} \quad (5.34)$$

La respuesta del sistema es:

$$\begin{aligned} x(t) &= X \cdot e^{i\omega t} \\ \dot{x}(t) &= i\omega \cdot X \cdot e^{i\omega t} \\ \ddot{x}(t) &= -\omega^2 \cdot X \cdot e^{i\omega t} \end{aligned} \quad (5.35)$$

Reemplazando **(2.67)**, **(2.71)**, **(5.13)**, **(5.33)** y **(5.35)** en la ecuación **5.6**.

$$[M][\ddot{x}(t)] + [\alpha_0[M] + \alpha_1[K]][\dot{x}(t)] + [K][x(t)] = \{f_{ej}(t)\} \quad (5.36)$$

Despejando:

$$[X] = [-[M]\omega^2 + [\alpha[M] + \beta[K]]i\omega + [K]]^{-1} \{F_{ej}\} \quad (5.37)$$

A través de una rutina de Matlab **[2]** resolviendo la ecuación **5.37** se obtiene la *respuesta en velocidad de referencia* de la estructura de análisis. Se arrojan los siguientes resultados:

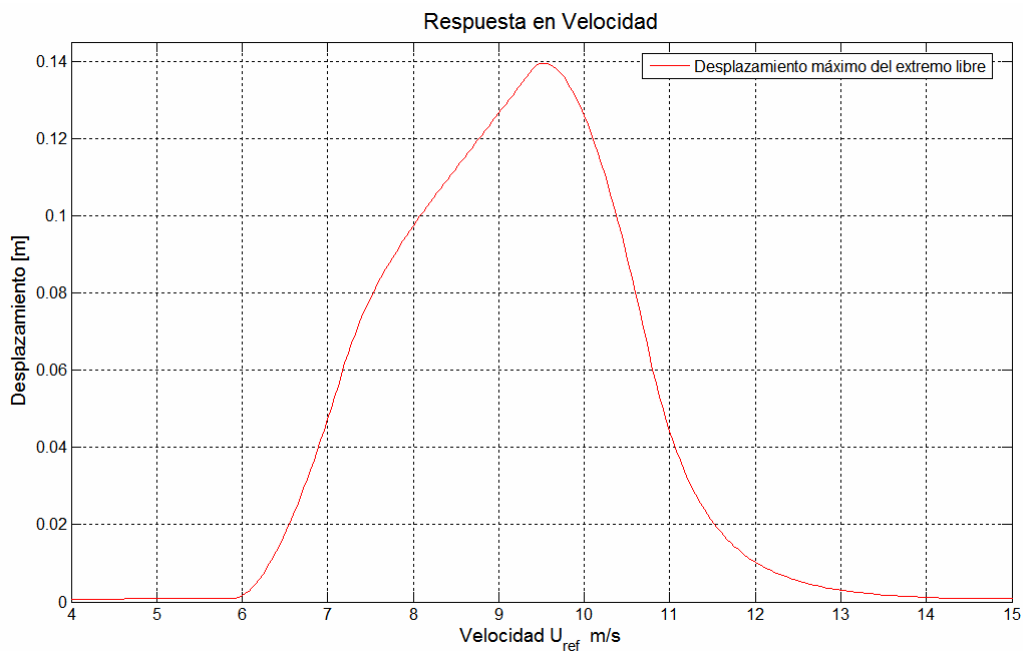


Figura 5. 7 Respuesta en velocidad de la Chimenea sin Absorbedor

Como podemos observar en la **Figura 5.7** la respuesta máxima que nos da la simulación partiendo de la teoría descrita en este Capítulo es de **0,14 metros**, valor muy similar al que se obtiene en la Norma DIN [1] de **0,145 metros (4.145)**. Esta pequeña diferencia nos permite considerar nuestra simulación como apropiada al fenómeno.

$$\max y_F = 0,14 \text{ m} \quad (5.38)$$

Se utilizó un análisis en respuesta en velocidad de referencia U_{ref} debido a que el fenómeno de desprendimiento de vórtices ocurre a diferentes frecuencias de desprendimiento dentro de la estructura, por ello para unificar criterios y ya demostrado en las ecuaciones anteriores; el fenómeno de desprendimiento de vórtice depende de la velocidad del viento en el tramo correspondiente. A los resultados obtenidos se les realizó un el análisis tensional, de desplazamientos y de vida a la fatiga procedimos a adaptar la **Ecuación 3.48** y **3.49** reemplazando el valor de desplazamiento máximo en dirección transversal del viento y_{max} obtenida en Matlab [2] ya que se consideraron estas ecuaciones de alta utilidad debido a su precisión mencionada anteriormente.

5. Fuerza sobre la altura media del tramo.

Reemplazamos la (4.49), (4.127), (4.138) y (5.38) en la **Ecuación 3.48**;

$$F_i(s_j) = 151,1 \cdot \ell_i \cdot (2 \cdot \pi \cdot 2,618)^2 \cdot \left(\frac{s_j}{22,2} \right)^{1,5} \cdot 0,14 \quad (\text{V.2-3.48})$$

$$F_i(s_j) = 5724 \cdot \ell_j \cdot \left(\frac{s_j}{22,2} \right)^{1,5} \quad (5.39)$$

6. Amplitud en dirección transversal a la dirección del viento.

Reemplazamos (4.127) y (5.38) en la **Ecuación 4.144**;

$$y(s_j) = \left(\frac{s_j}{22,2} \right)^{1,5} \cdot 0,145 \quad (5.40)$$

7. *Tabla resumen.*

Tramo	Long, de tramo l [m]	Cota al baricentro del tramo [m]	Ecuación número	Fuerza del viento en Y [N]	Fuerza del Viento por unidad de longitud [N/m]	Desplazamiento en Y (5.40) [Cm]
1	1,5	0,75	(5.39)	54,34	36,23	0,09
2	1,5	2,25		282,35	188,23	0,45
3	1,5	3,75		607,51	405,01	0,97
4	1,5	5,25		1006,35	670,90	1,61
5	1	6,5		924,24	924,24	2,22
6	1	7,5		1145,54	1145,54	2,75
7	1	8,5		1382,12	1382,12	3,32
8	1	9,5		1633,06	1633,06	3,92
9	1	10,5		1897,58	1897,58	4,55
10	1	11,5		2175,02	2175,02	5,22
11	1	12,5		2464,80	2464,80	5,92
12	1	13,5		2766,42	2766,42	6,64
13	1	14,5		3079,42	3079,42	7,39
14	1	15,5		3403,41	3403,41	8,17
15	1	16,5		3738,03	3738,03	8,97
16	1	17,5		4082,95	4082,95	9,80
17	1	18,5		4437,87	4437,87	10,65
18	1	19,5		4802,52	4802,52	11,53
19	1	20,5		5176,64	5176,64	12,42
20	1	21,5		5560,00	5560,00	13,34
21	0,2	22,1		1158,87	5794,36	13,91

Tabla 5. 2 Tabla de fuerzas y desplazamientos Transversales a la dirección del viento

8. *Análisis de tensiones y desplazamientos:*

Como continuación del análisis de los resultados que se extrajeron de la **Tabla 5.2** al utilizar las ecuaciones de la Norma DIN [1] adaptadas a los resultados de la rutina de cálculo, se emplearon las cargas de viento dadas por las **Ecuación 5.39** como elementos de entrada para el análisis de elementos finitos (**FEA**) en el Software Abaqus [16], los resultados arrojados por el programa fueron:

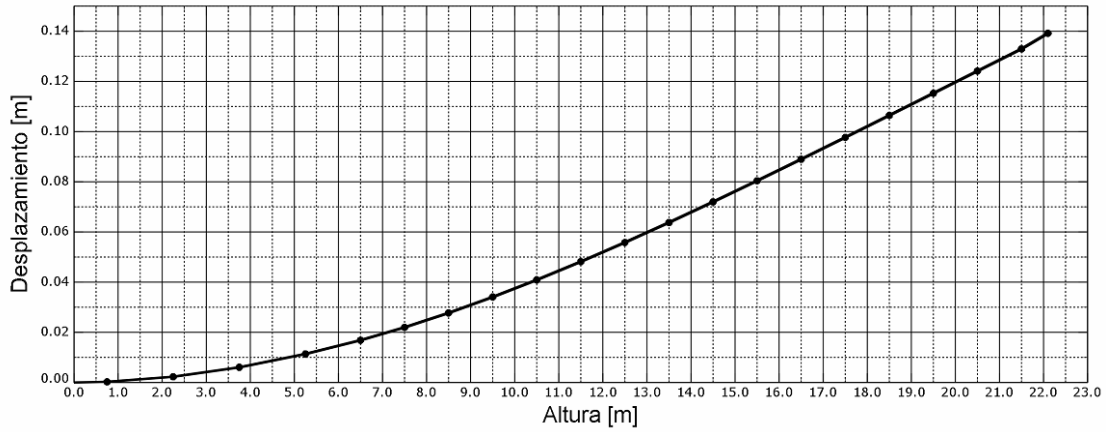


Figura 5. 8 Desplazamiento Transversal al viento (Y) en función de la altura, Análisis Estático en Abaqus [16] según Ecuación 5.39.

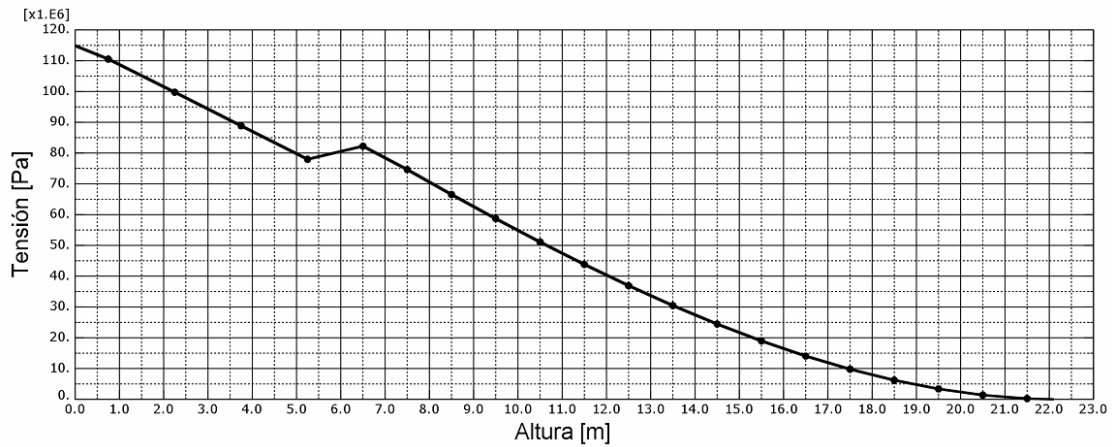


Figura 5. 9 Tensión en función de la altura debido a cargas en dirección transversal al viento. Análisis Estático en Abaqus [16] según Ecuación 5.39.

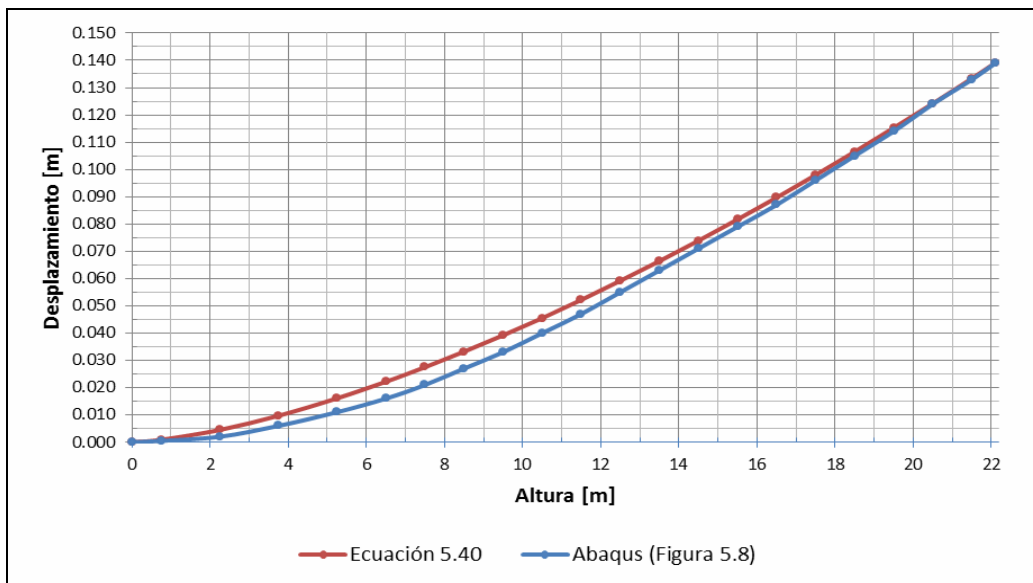


Figura 5. 10 Comparativa desplazamiento Transversal al viento según Ecuación 5.40 y Figura 5.8

A partir de lo obtenido por el Software Abaqus [16] se realiza una comparativa de la información mediante un cruce de gráficas, lo que se muestra en la **Figura 5.10** representa la comparación entre el desplazamiento calculado mediante la ecuación (5.40) y el desplazamiento calculado mediante el uso del software Abaqus (FEA) [16] utilizando como entrada la ecuación (5.39). Se puede observar en la **Figura 5.10** la ínfima diferencia debido a pequeños redondeos entre los valores de desplazamiento de la estructura dado por las **Ecuaciones (5.40)** y salida del programa **Abaqus [16]** (Alrededor del 1% en el extremo).

Según la **Figura 5.9** que se extrae del software Abaqus [16] podemos observar que la tensión al empotramiento es de 115 MPa, el método para el cálculo de dicha tensión es basado en la teoría de Von Mises.

Y la sollicitación es de:

$$\sigma = 115 \text{ Mpa} = 115 \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (5.41)$$

El coeficiente de Seguridad a Fluencia se obtiene reemplazando (4.43) y (5.41) en la **Ecuación 4.45**:

$$CS = \frac{235}{115} \quad (\text{V.4-4.45})$$

$$CS = 2,04 \quad (5.42)$$

La carga de viento debido a excitación en dirección perpendicular al viento (**Y**) producida por desprendimiento de vórtice no producirá la falla de la estructura, estando está dimensionada con un de Coeficiente de Seguridad a fluencia de 2,04. Resta realizar la verificación de vida a la fatiga.

9. Análisis de vida a la fatiga a máxima sollicitación:

Utilizando lo expuesto en el Capítulo anterior, la vida a fatiga se calcula de la siguiente manera:

Reemplazando (5.41) en la ecuación (4.164):

$$N = \left(\frac{1470,82}{115} \right)^{5,05} \quad (\text{V.2-4.164})$$

$$N = 388.733 \quad (5.43)$$

Desde el punto de vista de la resistencia a carga excitatriz que da como resultado el máximo desplazamiento que se puede dar en el fenómeno, se puede estimar la vida en 388 mil ciclos, ya que la fuerza excitatriz tiene una frecuencia que coincide con la frecuencia natural (4.49) de la estructura, lo que significa para estimar una vida a la fatiga de:

$$t = \frac{N}{f_n} = \frac{388733}{2,618} \approx 150000 \text{seg} \cong 2500 \text{ Minutos} \quad (5.44)$$

De la Ecuación 5.44 podemos estimar una condición de mínima vida a la fatiga debido a que resulta ser el caso más desfavorable desde el punto de vista de la amplitud del desplazamiento producido por las vibraciones transversales. El agente externo que produce la carga es el viento, este agente por tratarse de un fenómeno natural, presenta una aleatoriedad dependiendo de las condiciones climáticas del día, época del año, etc. Para el estudio de la influencia del viento sobre la estructura se recurrió a los aportes que proveen las estaciones meteorológicas; La estación consultada es la perteneciente a la Municipalidad de Bouwer en la **Figura 5.11** (situada a 20 km al sur de Córdoba Capital en Zona Rural del departamento Santa María), de la que se pudieron extraer valores estadísticos de las condiciones climáticas del segundo semestre del año 2015 [17].



Estación Meteorológica OMXS

Este modelo de Estaciones Meteorológicas permiten medir en su configuración base los siguientes parámetros:

- Temperatura ambiente.
- Humedad relativa ambiente.
- Presión Atmosférica.
- Punto de rocío.
- Velocidad y Dirección de viento.
- Registro de lluvia.

Fuente: OMXOM [17]

Figura 5. 11 Estación Meteorológica de Bouwer

Debido a lo que se demostró hasta ahora es necesaria la presencia en la estructura de un absorbedor de vibraciones para disminuir las amplitudes de desplazamiento; y así extender la vida útil de la chimenea.

10. Análisis de vida a la fatiga utilizando información estadística:

Para determinar el rango de velocidad de viento donde se producen tensiones superiores al límite de fatiga; lo que trae aparejado vida limitada, es necesario conocer el desplazamiento del extremo donde se comienzan a producirse tensiones superiores al límite de fatiga, para ello se construyó la **Tabla 5.3**.

Desplazamiento Extremo Libre	Tensión en el Empotramiento (Von Mises)	Vida a la Fatiga
[m]	[MPa]	[N Ciclos]
0,08	66	$>10^6$
0,09	74	$>10^6$
0,10	82	$>10^6$
0,11	90	$\approx 9,8 \cdot 10^5$
0,12	98	$\approx 7 \cdot 10^5$
0,13	106	$\approx 5,1 \cdot 10^5$
0,14	115	$\approx 3,9 \cdot 10^5$

Tabla 5. 3 Vida a la fatiga en relación al desplazamiento del extremo libre

De la **Tabla 5.3** se puede observar que el daño por fatiga se manifiesta a partir de un desplazamiento del extremo libre de 0,11 metros, en base a ello y utilizando la **Figura 5.7** se establecieron los rangos de velocidad de referencia del viento donde aparecen tensiones en las estructura que producen daño por fatiga, dichos rangos se expusieron en la **Figura 5.12**.

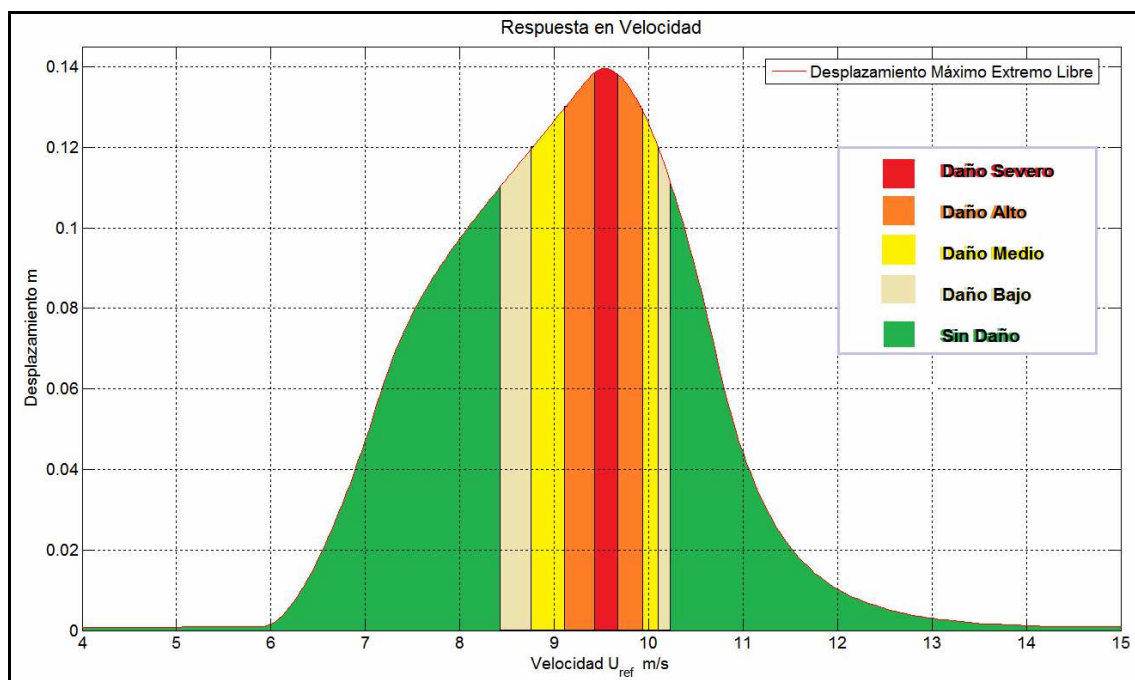


Figura 5. 12 Estratificación del daño debido a carga en dirección transversal al viento que ocasiona Reducción de la vida en Fatiga en función de la Velocidad de Referencia del Viento.

De la estación meteorológica se extrajeron datos de las condiciones climáticas del segundo semestre del año 2015 (Julio-Diciembre), la estación toma muestras de la velocidad del viento en un intervalo de 10 minutos (600 Segundos) realiza un promedio y registra ese valor de velocidad como representativo del intervalo, mediante el uso de planillas de cálculo se analizaron 26367 intervalos pertenecientes al segundo semestre del 2015 y se construyó la **Tabla 5.4**.

Tipo de Carga	Rango de Desplazamiento Extremo Libre [m]	Rango de Velocidad (Inferior) [m/s]	Rango de Velocidad (Superior) [m/s]	Ocurrencia Nº de Intervalos [n]	Tiempo de Ocurrencia [Minutos]	Tipo de Daño
1	[0,11-0,12]	[8,4-8,8]	[10,1-10,2]	99	990	Bajo
2	[0,12-0,13]	[8,8-9,1]	[9,9-10,1]	63	630	Medio
3	[0,13-0,14]	[9,1-9,5]	[9,7-9,9]	74	740	Alto
4	[0,14]	[9,5-9,7]		18	180	Severo

Tabla 5. 4 Estadísticas Generales brindadas por la Estación Meteorológica (Julio-Diciembre 2015)

Para determinar el daño por fatiga aplicamos la regla de Miner-Palmgren (Massa [18]) que establece que cada nivel de tensiones consume una parte proporcional de la vida en fatiga para ese nivel. La Regla de Miner establece que la falla por fatiga ocurre cuando la suma de los daños parciales es igual a la unidad.

$$\sum_{i=1}^{i=k} \frac{n_i}{N_i} = 1 \quad (5.45)$$

Donde:

- n_i Número de ciclos aplicados en el nivel de tensiones i
- N_i Vida en fatiga cuando solo se aplica el nivel de tensiones i .

Utilizando lo proporcionado por las **Tablas 5.3** y **5.4** teniendo en cuenta que la vibración se produce a la frecuencia de resonancia (5.27) y los intervalos son de 10 minutos de duración (600 segundos), la Ecuación 5.45 queda de la forma:

$$2,618 \cdot 600 \cdot \left(\frac{99}{9,8 \cdot 10^5} + \frac{63}{7 \cdot 10^5} + \frac{74}{5,1 \cdot 10^5} + \frac{18}{3,9 \cdot 10^5} \right) = 0,6 \quad (5.46)$$

Según los datos extraídos, la estructura sin absorbedor tiene una vida remanente a la fatiga estimada en un 40% si se considera que el viento proviene de la misma dirección (se adoptó una única dirección de carga por razones conservativas). Lo que indica que la chimenea, pasadas estas condiciones climáticas y sin absorbedor, ya presenta un daño importante en su vida a la fatiga.

Se realizó un análisis más detallado sobre la información estadística brindada por la estación meteorológica evaluando el daño a fatiga (%), de ella se construyó la **Tabla 5.5**.

Año 2015													
Tipo de Carga	Julio		Agosto		Septiembre		Octubre		Noviembre		Diciembre		Daño Tipo de Carga %
	Daño		Daño		Daño		Daño		Daño		Daño		
	n	%	n	%	n	%	n	%	n	%	n	%	
1	7	1,12	24	3,85	12	1,92	28	4,49	18	2,89	10	1,60	15,87
2	2	0,45	5	1,12	4	0,90	18	4,04	24	6,39	10	2,24	14,14
3	3	0,92	4	1,23	3	0,92	18	5,54	40	12,3	6	1,85	22,79
4	0	0	0	0	0	0	5	2,01	10	4,03	3	1,21	7,25
Total %	2,49		6,20		3,75		16,09		24,62		6,90		60,05
Acum.	2,49		8,70		12,44		28,53		53,14		60,05		

Tabla 5. 5 Análisis Mes a Mes del porcentaje de Daño a Fatiga (Julio-Diciembre 2015)

Como se puede observar en la **Tabla 5.5**, los meses de Octubre y Noviembre acumulan cargas de viento que provocan un daño a fatiga mayor al 40% de la Vida en Fatiga de la estructura de análisis. Otra particularidad importante es que en los últimos 5 meses del 2015 los intervalos donde la velocidad del viento produce reducción de la vida en fatiga se presentan en promedio al menos una vez al día.

5.4.3. Simulación del Sistema de análisis con absorbedor

De lo obtenido anteriormente (**5.4.1 y 5.4.2**) se prosiguió con el análisis de la estructura a la cual se le adicionó un sistema absorbedor de vibraciones, para dicho análisis se utilizó lo desarrollado en los párrafos anteriores añadiendo una modificación en las matriz de rigidez, amortiguación y masa, las cuales deben tener en consideración la rigidez, amortiguación e inercia que introduce al sistema la presencia del absorbedor.

En la **Figura 5.13** se muestra el esquema del sistema con absorbedor, en este caso el sistema absorbedor esta aplicado en el grado de libertad dinámico 21 (GLD 21), con el perfil de velocidad de viento.

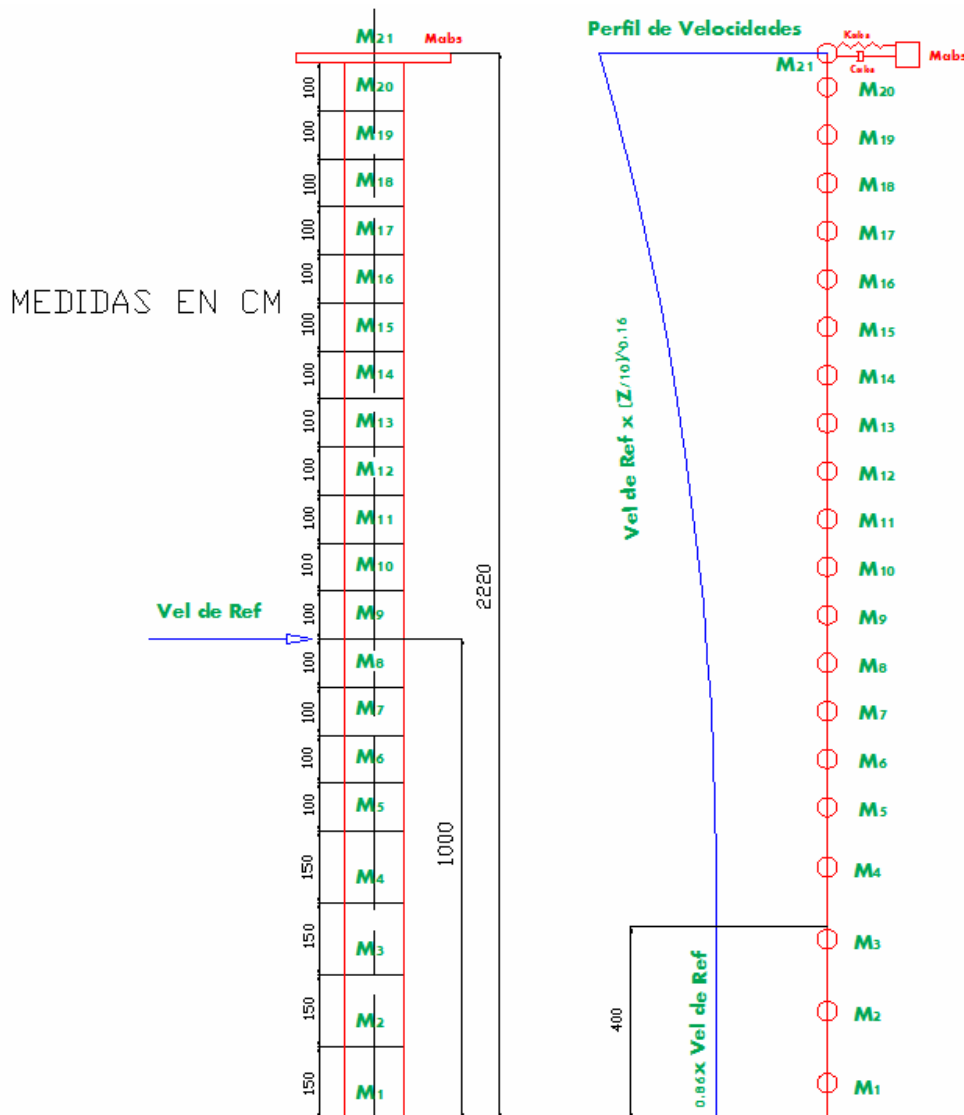


Figura 5. 13 Modelo propuesto de múltiples grados de libertad dinámicos (22 GLD)

Consideraciones:

1) Del caso de la chimenea sin absorbedor de vibraciones se obtienen de ella los siguientes datos para el cálculo de la estructura con absorbedor adherido a ella:

- a) Matriz de Flexibilidad 21 GLD.
- b) Matriz de Rigidez 21 GLD.
- c) Matriz de Masa 21 GLD.
- d) Frecuencias Naturales y modos de Vibrar del sistema de 21 GLD.
- e) Matriz de Amortiguamiento estructural 21 GLD.
- f) Vector de fuerzas externas $\{f_e(t)\}$
- g) Frecuencias de desprendimiento de vórtice f_s .

2) Debido a que el absorbedor puede ser instalado en cualquier punto de la estructura, lo cual influirá en los efectos que produce en la chimenea, debemos considerarlos dentro de la matriz de amortiguamiento y Rigidez del sistema de 22 GLD.

1. Determinación de la Matriz de Masa con absorbedor $[M]_{c/abs}$.

Cada elemento de la matriz se calcula como la masa contenida en la sección, el elemento (22,22) de la matriz es la masa del Absorbedor.

$$[M]_{c/Abs} = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & m_{21} & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & m_{22} \end{bmatrix} \quad (5.47)$$

2. Determinación de la Matriz de Rigidez con absorbedor $[K]_{c/abs}$.

Utilizando la matriz de Rigidez calculada en el sistema sin absorbedor como base, a la cual se le agrega la rigidez que introduce el sistema Absorbedor que actúa sobre el grado de libertad sobre el que está instalado, por lo tanto el efecto de la rigidez dada por el sistema Absorbedor depende de la posición que ocupa dentro de la estructura, para el caso genérico suponiendo que actúa sobre el grado de libertad dinámico j .

$$[K]_{c/Abs} = \begin{bmatrix} k_{1,1} & k_{1,2} & \dots & k_{1,j} & \dots & 0 \\ k_{2,1} & k_{2,2} & \dots & k_{2,j} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \dots & \vdots \\ k_{j,1} & k_{j,2} & \dots & k_{j,j} + k_{22,22} & \dots & k_{j,22} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & k_{22,j} & 0 & k_{22,22} \end{bmatrix} \quad (5.48)$$

Donde $k_{22,22} = k_{abs}$ es la rigidez del absorbedor

Donde:

$$k_{22,j} = k_{j,22} = -k_{22,22} = -k_{abs} \quad \text{Para todo valor de } j=1, 2, 3, \dots, 21.$$

3. Determinación de la Matriz de Amortiguación con absorbedor $[C]_{c/abs}$.

Del mismo modo con el que se procedió en la determinación de la Matriz de Rigidez con absorbedor, utilizamos la matriz de $[C]$ calculada en el sistema sin absorbedor como base, a la cual se le agrega la Amortiguación que introduce el sistema Absorbedor que actúa sobre el grado de libertad sobre el que está instalado, por lo tanto el efecto de la amortiguación dada por el sistema Absorbedor depende de la posición que ocupa dentro de la estructura, para el caso genérico suponiendo que actúa sobre el grado de libertad dinámico j .

$$[C]_{c/Abs} = \begin{bmatrix} c_{1,1} & c_{1,2} & \cdots & c_{1,j} & \cdots & 0 \\ c_{2,1} & c_{2,2} & \cdots & c_{2,j} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \cdots & \vdots \\ c_{j,1} & c_{j,2} & \cdots & c_{j,j} + c_{22,22} & \cdots & c_{j,22} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & c_{22,j} & 0 & c_{22,22} \end{bmatrix} \quad (5.49)$$

Donde $c_{22,22} = c_{abs}$ es el coeficiente de amortiguamiento del absorbedor y:

$$c_{22,j} = c_{j,22} = -c_{22,22} = -c_{abs} \quad \text{Para todo valor de } j=1, 2, 3, \dots, 21.$$

4. Determinación del Vector de fuerzas externas con absorbedor $\{f_e(t)\}_{c/abs}$.

Partiendo de la Ecuación (5.33) y considerando que la carga exterior sobre el sistema absorbedor es nula, el vector de carga externa de la estructura con absorbedor quedó de la siguiente forma:

$$\{f_{ej}(t)\}_{c/abs} = \frac{1}{2} \cdot \rho \begin{bmatrix} U_1^2 \cdot C_{L1} \cdot D \cdot P_1 \cdot L_1 \\ \vdots \\ U_{21}^2 \cdot C_{L21} \cdot D \cdot P_{21} \cdot L_{21} \\ 0 \end{bmatrix} \cdot e^{i\omega t} \quad (5.50)$$

5. Determinación de las condiciones de la Rutina de cálculo

En esta parte se procedió del mismo modo que para la estructura sin absorbedor de vibraciones, para no repetir lo ya explicado solo se mencionaron las ecuaciones que diferencian el cálculo de un sistema de 21 GLD del otro de 22 GLD. Las ecuaciones que se reutilizaron para el cálculo de la respuesta del sistema con absorbedor dinámico fueron desde la expresión (5.27) hasta la (5.33).

El sistema de ecuaciones que rige la respuesta de la estructura con un sistema absorbedor de vibraciones es:

$$[M]_{c/Abs} [\ddot{x}(t)] + [C]_{c/Abs} [\dot{x}(t)] + [K]_{c/Abs} [x(t)] = \{f_e(t)\}_{c/abs} \quad (5.51)$$

Para la resolución del sistema de ecuaciones 5.51 se utilizó el método de Fourier, si la carga externa de es la siguiente forma:

$$\{f_{ej}(t)\} = \{F_{ej}\} \cdot e^{i\omega t} \quad (5.52)$$

La respuesta del sistema es:

$$\begin{aligned} \{x(t)\} &= \{X\} e^{i\omega t} \\ \{\dot{x}(t)\} &= \{X\} i\omega e^{i\omega t} \\ \{\ddot{x}(t)\} &= -\{X\} \omega^2 e^{i\omega t} \end{aligned} \quad (5.53)$$

Reemplazando (5.47), (5.48), (5.49), (5.50) y (5.53) en la ecuación 5.51.

$$[M][\ddot{x}(t)] + [\alpha_0[M] + \alpha_1[K]][\dot{x}(t)] + [K][x(t)] = \{f_{ej}(t)\} \quad (5.54)$$

Despejando:

$$[X] = [[M]_{c/Abs} \omega^2 + [C]_{c/Abs} i\omega + [K]_{c/Abs}]^{-1} \{F_{ej}\} \quad (5.55)$$

A través de una rutina de Matlab [2] resolviendo la ecuación (5.55) se obtiene la *respuesta en velocidad de referencia* de la estructura de análisis. De la rutina de cálculo podemos obtener, además de los desplazamientos del sistema primario (estructura de análisis sin absorbedor), la respuesta del sistema con el absorbedor para evaluar su eficiencia, como también el estado de la estructura sometida a tensiones y su coeficiente de seguridad a fluencia.

Los resultados obtenidos se cargaran en el software de elementos finitos Abaqus [16] para realizar un análisis tensional.

6. Simulación numérica

Para realizar la simulación numérica de la estructura con el sistema absorbedor instalado se construyeron dos rutinas de cálculo en el software Matlab [2], esto nos permitía conocer la respuesta en velocidad del viento del sistema completo compuesto por la chimenea más el sistema absorbedor, estas brindaron la información necesaria para la selección de los parámetros del sistema absorbedor. Dichas rutinas son:

- Resolución general del sistema utilizando parámetros adimensionales. **Cap5_1.**
- Resolución particular en base de los parámetros adimensionales seleccionados. **Ca5_2.**

a. Resolución General del sistema utilizando parámetros adimensionales:

La rutina de cálculo **Cap5_1** que resuelve numéricamente el sistema de ecuaciones diferenciales (5.55) basándose en los parámetros reducidos obtenidos en el Capítulo 2. Para la determinación de la masa, rigidez y amortiguamiento del sistema absorbedor redefinimos los parámetros adimensionales:

$$\begin{aligned} \text{Rigidez reducida:} & \quad k_c = 216850N/m \\ \text{Frecuencia natural:} & \quad \omega_{nc} = 16,4503 \text{ rad/s (2,618 Hz)} \\ \text{Masa reducida:} & \quad m_c = 801,33 \text{ Kg} \end{aligned} \quad (5.56)$$

La relación de masa m_r está definida en este caso como:

$$m_r = \frac{m_{22}}{m_c} \quad (5.57)$$

Donde:

m_{22} Masa del absorbedor en Kg.

m_c Masa reducida de la estructura de análisis (ver 2.6.2)

La masa del absorbedor.

Reemplazando m_c de (5.53) en la **Ecuación 5.54**:

$$m_{22} = 801,33 \cdot m_r \quad (5.58)$$

La rigidez del absorbedor

La relación de frecuencias naturales:

$$\omega_{nr} = \frac{\omega_{n2}}{\omega_{nc}} \quad (5.59)$$

Donde:

ω_{n2} Frecuencia Natural asociada al absorbedor en Rad/s.

ω_{nc} Frecuencia Natural de la estructura de análisis ver (2.6.2)

Como:

$$\omega_{nc} = \sqrt{\frac{k_c}{m_c}} \quad (5.60)$$

y

$$\omega_{n2} = \sqrt{\frac{k_{22}}{m_{22}}} \quad (5.61)$$

Reemplazando la **Ecuaciones (5.53), (5.57) y (5.58)** en la **Ecuación 5.56** despejando k_{22} .

$$k_{22} = 216850 \cdot \omega_{nr}^2 \cdot m_r \quad (5.62)$$

El amortiguamiento del absorbedor.

La relación de amortiguamiento crítico asociado al absorbedor será:

$$\zeta_2 = \frac{c_{22}}{2m_{22} \cdot \omega_{n2}} \quad (5.63)$$

c_{22} Amortiguamiento asociado al absorbedor en Rad/s.

ω_{n2} Frecuencia Natural asociada al absorbedor en Rad/s.

Reemplazando la **Ecuaciones (5.56), (5.58) y (5.62)** en la **Ecuación 5.63** despejando c_{22} .

$$c_{22} = 26363,8 \cdot m_r \cdot \omega_{nr} \cdot \zeta_2 \quad (5.64)$$

Con las ecuaciones **(5.58), (5.62) y (5.64)** determinamos los parámetros del sistema absorbedor. La rutina de cálculo **Cap5_1** opera de la siguiente manera:

1. El usuario indica el rango de la relación de frecuencias naturales, el grado de libertad en el que está aplicado el absorbedor (se analizó aplicado sobre el **GLD 19, 20 y 21**) y la relación de amortiguamiento asociado al Absorbedor.
2. La rutina calcula la masa del absorbedor m_{22} en base a la relación de masa considerando la masa m_c como la masa reducida de la chimenea utilizando **(5.58)**.
3. La rutina obtiene la rigidez del sistema absorbedor en base a la expresión **(5.62)**.
4. La rutina determina el valor del coeficiente de amortiguación del absorbedor c_{22} utilizando la expresión **(5.64)**.
5. La rutina realiza un barrido en **relación de masa (5.57)**, calcula desplazamientos máximos para cada relación de masa y devuelve los siguientes gráficos:
 - Máxima respuesta del sistema principal (máximo desplazamiento del extremo libre).
 - Máxima respuesta del Absorbedor, (máximo desplazamiento).
 - Coeficiente de seguridad a fluencia.
 - Reducción del desplazamiento del extremo libre (relación de la respuesta con Absorbedor Versus respuesta sin Absorbedor) indica a que porcentaje de la respuesta original ha sido reducida mediante la implementación de un sistema absorbedor (η).

Se estudiaron las gráficas de respuesta máxima del sistema principal (chimenea) para una determinada relación de amortiguamiento crítico del absorbedor ξ_2 y un rango de relación de frecuencias naturales, según la posición del sistema absorbedor. A modo de ejemplo se presentan las salidas de la rutina **Cap5_1** para el caso en el que el sistema absorbedor está instalado en el grado de libertad dinámico **20**.

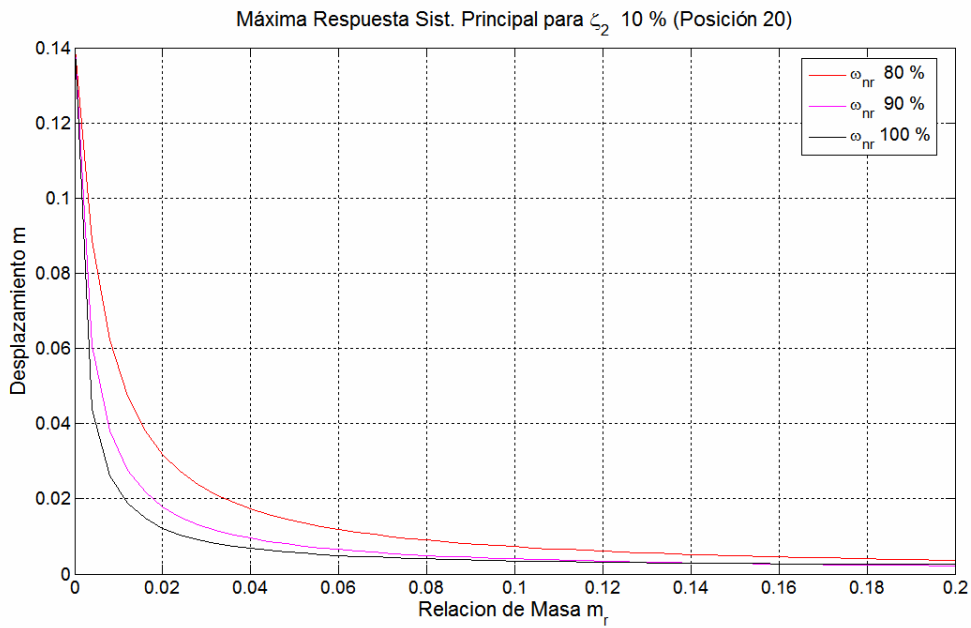


Figura 5. 14 Respuesta máxima de la chimenea en función de la relación de masa Absorbedor en posición 20

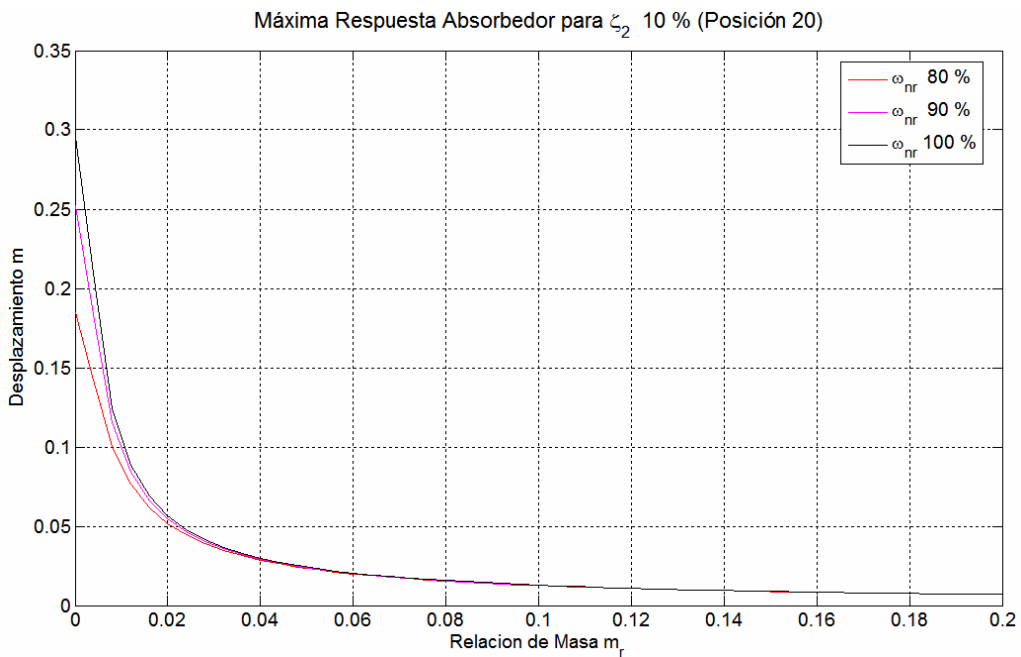


Figura 5. 15 Respuesta máxima del absorbedor en función de la relación de masa, Absorbedor en posición 20

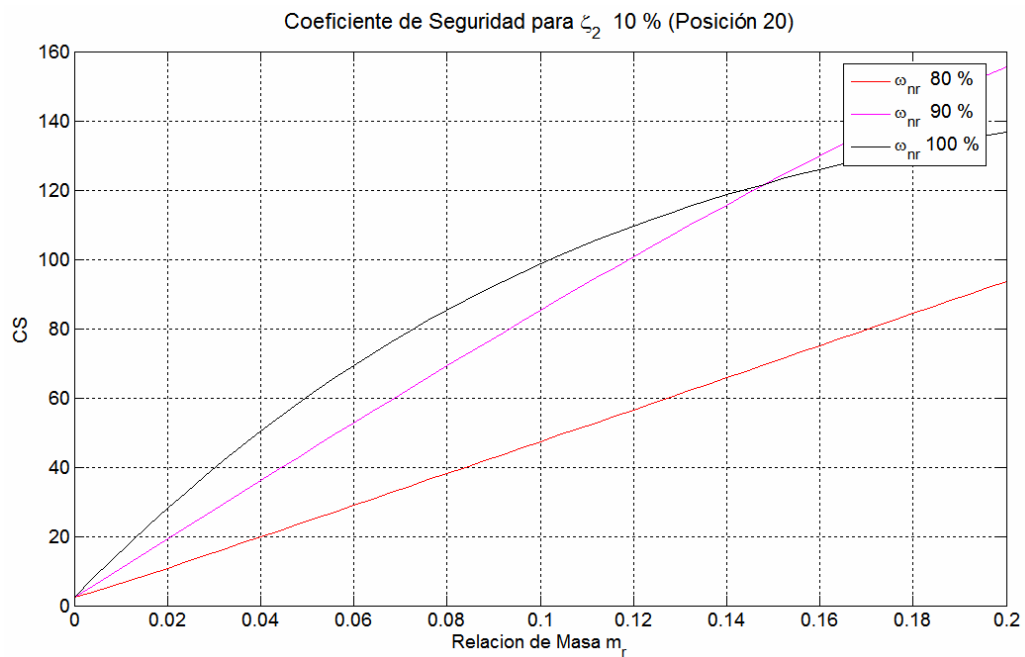


Figura 5. 16 Coeficiente de seguridad a fluencia en función de la relación de masa, Absorbedor en posición 20

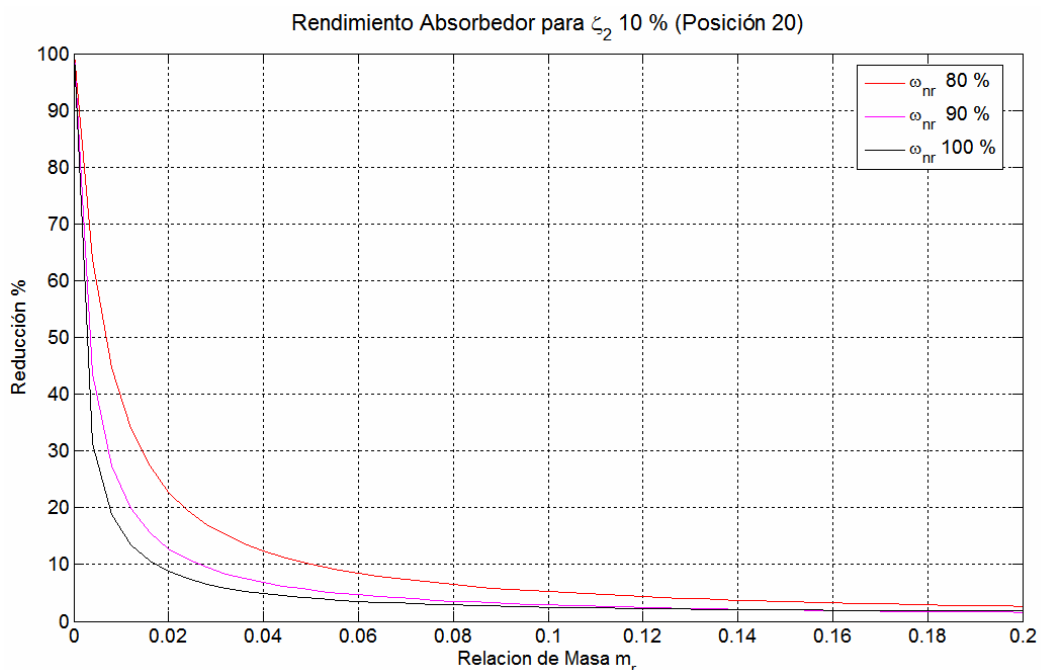


Figura 5. 17 Reducción del desplazamiento debido al absorbedor en función de la relación de masa, Absorbedor en posición 20.

Para acotar el gran número de combinaciones de parámetros que son solución del problema a un cierto rango que permita seleccionar los parámetros de forma directa y eficiente, dejando de lado posibles errores en la determinación de los mismos, se procedió a seleccionar, en primer lugar, el parámetro más general del sistema absorbedor, como lo es la relación de masa de allí se seleccionaron los otros parámetros

que rigen el fenómeno (Relación de frecuencia natural y relación de amortiguamiento crítico del absorbedor). De los gráficos presentados en las Figuras **Figura 5.14** a la **Figura 5.17**, se pudo determinar los valores que se utilizaran de aquí en adelante:

1. Relación de masa de $m_r = 0,08$.
2. Rango de relación de frecuencia natural ω_r : 80 – 100 %.
3. Rango de Relaciones de amortiguamiento crítico del absorbedor ζ_2 : 5 – 20 %.

Estos valores se seleccionaron debido a que la respuesta del absorbedor es aceptable y posee una cierta flexibilidad al valor que tomen los otros dos parámetros (ω_r y ζ_2), de modo que a la hora de materializar los elementos del dispositivo absorbedor se pueda contar con un margen de seguridad que asimile desviaciones no consideradas en la etapa de diseño.

La rutina de cálculo permite capturar valores en cualquier relación de masa determinada, por ello se decidió condensar la información que puede ser obtenida de los gráficos en una tabla que expone los valores más relevantes para la relación de masa seleccionada, en este caso $m_r = 0,08$, y la posición del absorbedor dentro de la estructura de análisis **Ver Tablas 5.6 a 5.8**. Estas tablas nos permitieron observar las variaciones de la respuesta con el objetivo de poder contar con cierta flexibilidad en la selección de los parámetros de la etapa constructiva del absorbedor.

		$m_r = 0,08$						
GLD	ζ_2 %	ω_{nr} %	δ_{21} m	δ_{22} m	η %	CS Fluencia	k_{22} N/m	c_{22} Ns/m
21	5	80	0,0079	0,0150	5,680	43,274	11101	83,56
		90	0,0036	0,0151	2,594	94,776	14050	194,01
		100	0,0027	0,0152	1,952	125,965	17346	104,5
	10	80	0,0082	0,0148	5,897	41,679	11101	167,1
		90	0,0045	0,0150	3,257	75,466	14050	188,0
		100	0,0038	0,0151	2,708	90,788	17346	208,9
	15	80	0,0087	0,0146	6,238	39,403	11101	250,7
		90	0,0056	0,0148	4,012	61,261	14050	282,0
		100	0,0049	0,0150	3,491	70,411	17346	313,4
	20	80	0,0093	0,0145	6,634	37,052	11101	334,2
		90	0,0066	0,0147	4,747	51,779	14050	376,0
		100	0,0059	0,0149	4,234	58,051	17346	417,8

Tabla 5. 6 Absorbedor aplicado al GLD 21 (22,1 metros)

		$m_r = 0,08$						
GLD	ζ_2	ω_{nr}	δ_{21}	δ_{22}	η	CS	k_{22}	c_{22}
	%	%	m	m	%	Fluencia	N/m	Ns/m
20	5	80	0,0087	0,0157	6,224	39,492	11101	83,56
		90	0,0040	0,0158	2,842	86,480	14050	194,01
		100	0,0028	0,0158	2,024	121,415	17346	104,5
	10	80	0,0090	0,0154	6,448	38,123	11101	167,1
		90	0,0050	0,0156	3,553	69,181	14050	188,0
		100	0,0040	0,0157	2,880	85,342	17346	208,9
	15	80	0,0095	0,0152	6,806	36,115	11101	250,7
		90	0,0061	0,0154	4,368	56,269	14050	282,0
		100	0,0052	0,0156	3,752	65,512	17346	313,4
	20	80	0,0101	0,0151	7,228	34,018	11101	334,2
		90	0,0072	0,0153	5,164	47,602	14050	376,0
		100	0,0064	0,0155	4,573	53,751	17346	417,8

Tabla 5. 7 Absorbedor aplicado al GLD 20 (21,5 metros)

		$m_r = 0,08$						
GLD	ζ_2	ω_{nr}	δ_{21}	δ_{22}	η	CS	k_{22}	c_{22}
	%	%	m	m	%	Fluencia	N/m	Ns/m
19	5	80	0,0100	0,0152	7,142	34,417	11101	83,56
		90	0,0046	0,0158	3,264	75,312	14050	194,01
		100	0,0030	0,0164	2,155	114,085	17346	104,5
	10	80	0,0103	0,0164	7,372	33,344	11101	167,1
		90	0,0057	0,0166	4,053	60,651	14050	188,0
		100	0,0044	0,0167	3,177	77,376	17346	208,9
	15	80	0,0108	0,0161	7,757	31,689	11101	250,7
		90	0,0069	0,0164	4,967	49,485	14050	282,0
		100	0,0059	0,0166	4,195	58,599	17346	313,4
	20	80	0,0115	0,0159	8,213	29,927	11101	334,2
		90	0,0082	0,0162	5,862	41,929	14050	376,0
		100	0,0072	0,0164	5,144	47,784	17346	417,8

Tabla 5. 8 Absorbedor aplicado al GLD 19 (20,5 metros)

Referencias de las tablas Tabla 5.6, Tabla 5.7 y Tabla 5.8:

GLD Grado de libertad dinámico donde está conectado el sistema absorbedor.

ζ_2 Relación de amortiguamiento crítico del sistema Absorbedor.

ω_{nr}	Relación de frecuencias naturales (%).
δ_{21}	Desplazamiento máximo del extremo libre (m).
δ_{22}	Desplazamiento máximo del Absorbedor (m).
η	Rendimiento del Absorbedor, reducción del desplazamiento del extremo libre de la estructura de análisis con y sin absorbedor (%).
CS	Coefficiente de seguridad a fluencia debido a la tensión que se da para el máximo desplazamiento
k_{22}	Valor de la rigidez asociada al absorbedor (N/m).
c_{22}	Valor del amortiguamiento asociado al absorbedor (Ns/m).

Se resaltaron valores de los parámetros que a nuestro punto de vista dan los resultados más eficientes en absorción de vibraciones inducidas por el viento. Estos valores son un punto de partida para el diseño mecánico del sistema absorbedor de vibraciones, ya que nos permite adaptarnos a las diferencias entre los valores que aparecen en la realidad y las simulaciones numéricas.

Visto esto a continuación se desarrollara el programa que calcula la respuesta particular con los parámetros seleccionados resaltados en las tablas **Tabla 5.7**.

b. Resolución particular en base de los parámetros adimensionales seleccionados:

La rutina de cálculo (**Cap5_2**) que resuelve numéricamente las ecuaciones diferenciales (5.37) y (5.55) basándose en los parámetros reducidos ya seleccionados con las mismas consideraciones de la rutina explicada anteriormente.

Ésta rutina de cálculo opera de la siguiente manera (**Cap5_2**):

1. El usuario indica la relación de frecuencias naturales, el grado de libertad en el que está aplicado el absorbedor (se analizó aplicado sobre el **GLD 19, 20 y 21**) y la relación de amortiguamiento asociado al Absorbedor.
2. La rutina calcula la masa del absorbedor m_{22} (**5.58**) en base a la relación de masa considerando la masa m_c como la masa reducida de la chimenea.
3. La rutina calcula la rigidez del sistema absorbedor en base a la rigidez reducida de la en chimenea (**5.62**).
4. La rutina determina el valor del coeficiente de amortiguación del absorbedor utilizando la ecuación presentada anteriormente (**5.64**).
5. La rutina hacia un barrido en velocidad de referencia. Calcula desplazamientos para cada frecuencia de excitación y devuelve los siguientes gráficos:
 - Respuesta en frecuencia del sistema principal sin el sistema absorbedor contrastando con el sistema completo con absorbedor, (máximo desplazamiento del extremo libre).

- Contraste entre la relación porcentual de la respuesta en frecuencia del sistema con absorbedor y sistema sin Absorbedor.
- Coeficiente de seguridad del sistema con Absorbedor.
- Respuesta en frecuencia del sistema Absorbedor.
- Ampliación donde el rendimiento del Absorbedor es máximo.
- Respuesta en velocidad del extremo libre de la estructura de análisis y del Absorbedor.

En base a esta rutina se determinaron analíticamente las sollicitaciones a la que estarían sometidas la estructura con su sistema absorbedor y así poder calcular los puntos de anclaje como los mecanismos en el cual operará nuestro sistema, como también determinar las tensiones de los elementos elásticos y de amortiguación del absorbedor; evitando posibles colisiones entre el Absorbedor y la chimenea. A modo de ejemplo se exponen las salidas de la rutina **Cap5_2** con los parámetros de la **Tabla 5.9**.

GLD	m_r	ω_{nr}	ζ_2
	%	%	%
20	8	100	5
			10
			15

Tabla 5.9 Absorbedor aplicado al GLD 20

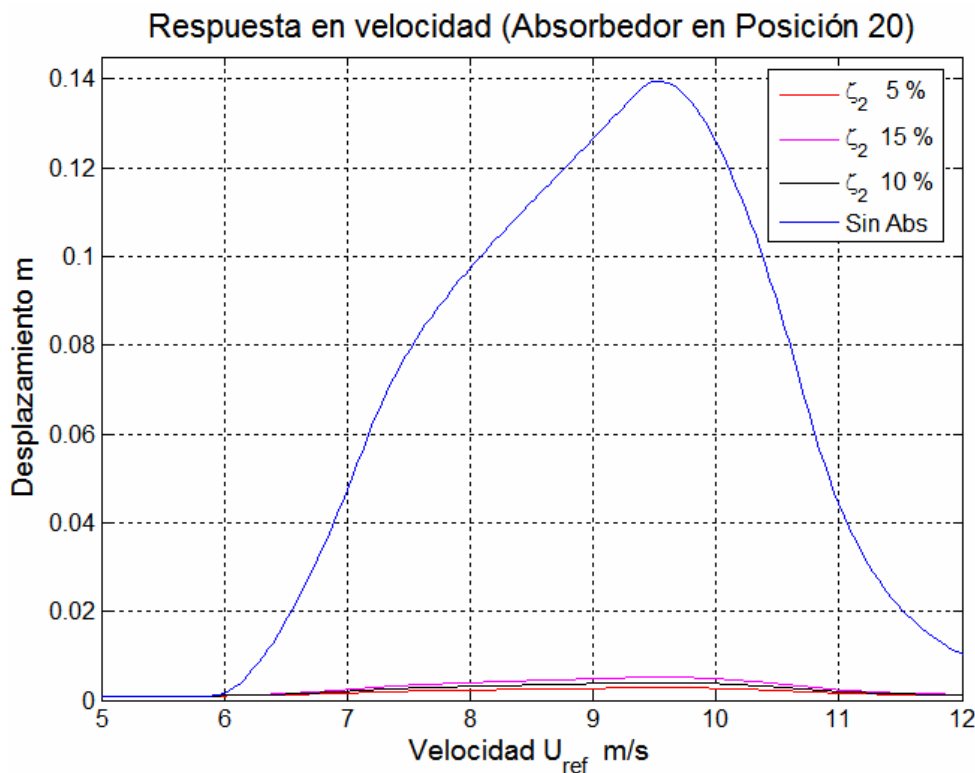


Figura 5.18 Salida 1 de la rutina de cálculo de la Tabla 5.9.
Respuesta en velocidad del extremo libre del sistema principal.

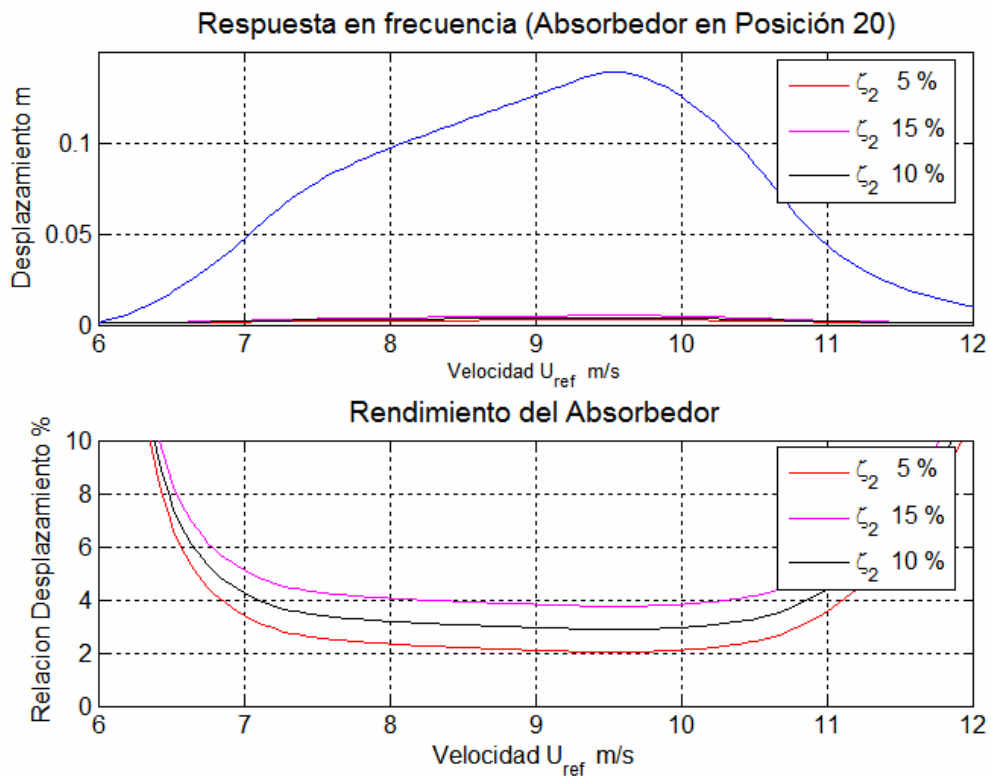


Figura 5. 19 Salida 2 de la rutina de cálculo de la Tabla 5.9.
Comparativa de Respuesta en velocidad del extremo libre del sistema principal y reducción de las amplitudes del desplazamiento utilizando un absorbedor de vibraciones.

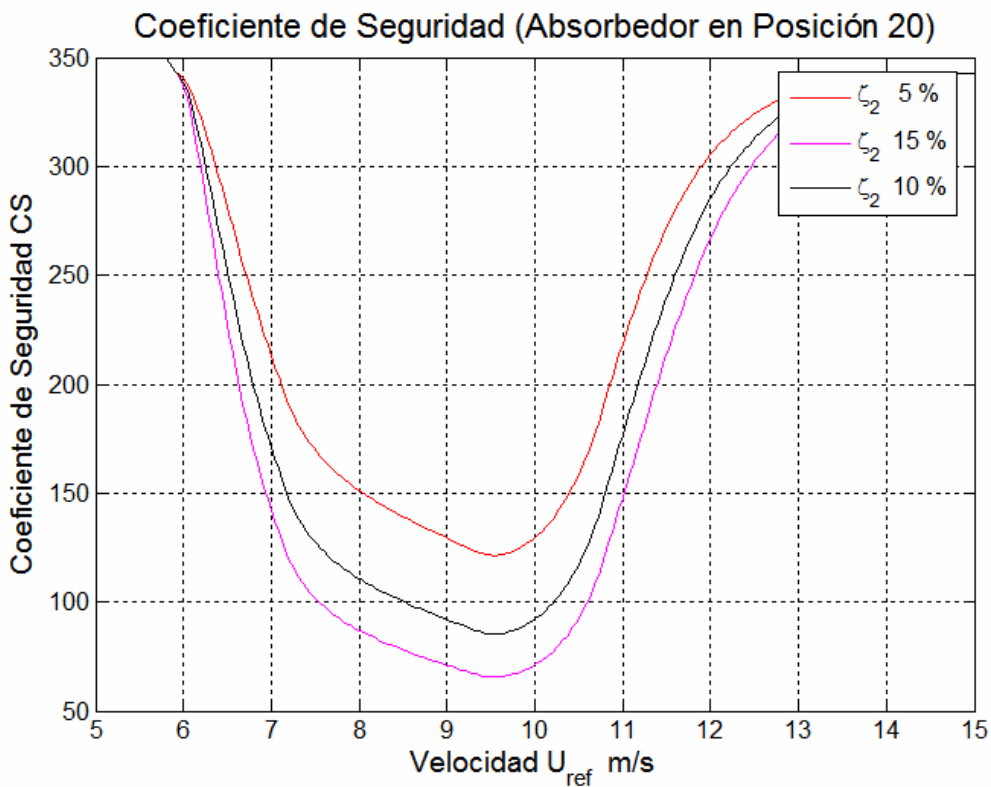


Figura 5. 20 Salida 3 de la rutina de cálculo de la Tabla 5.9.
Coeficiente de Seguridad a Fluencia en el empotramiento

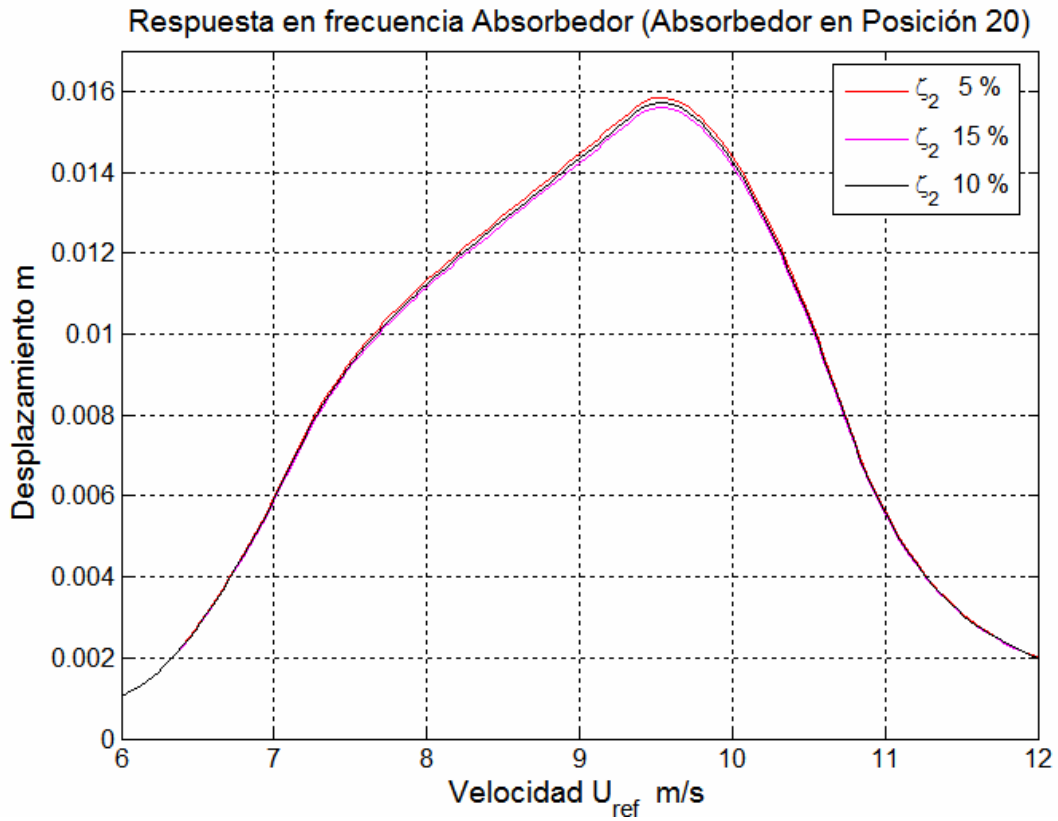


Figura 5. 21 Salida 4 de la rutina de cálculo de la Tabla 5.9.
Respuesta en velocidad del absorbedor

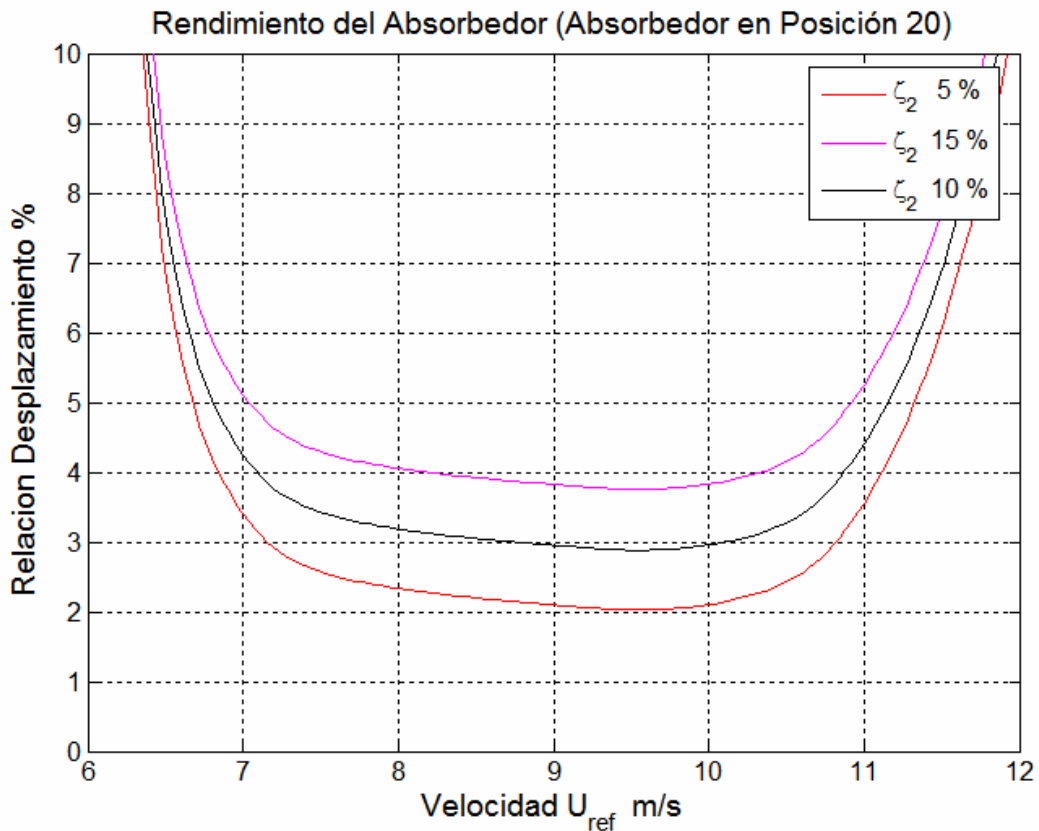
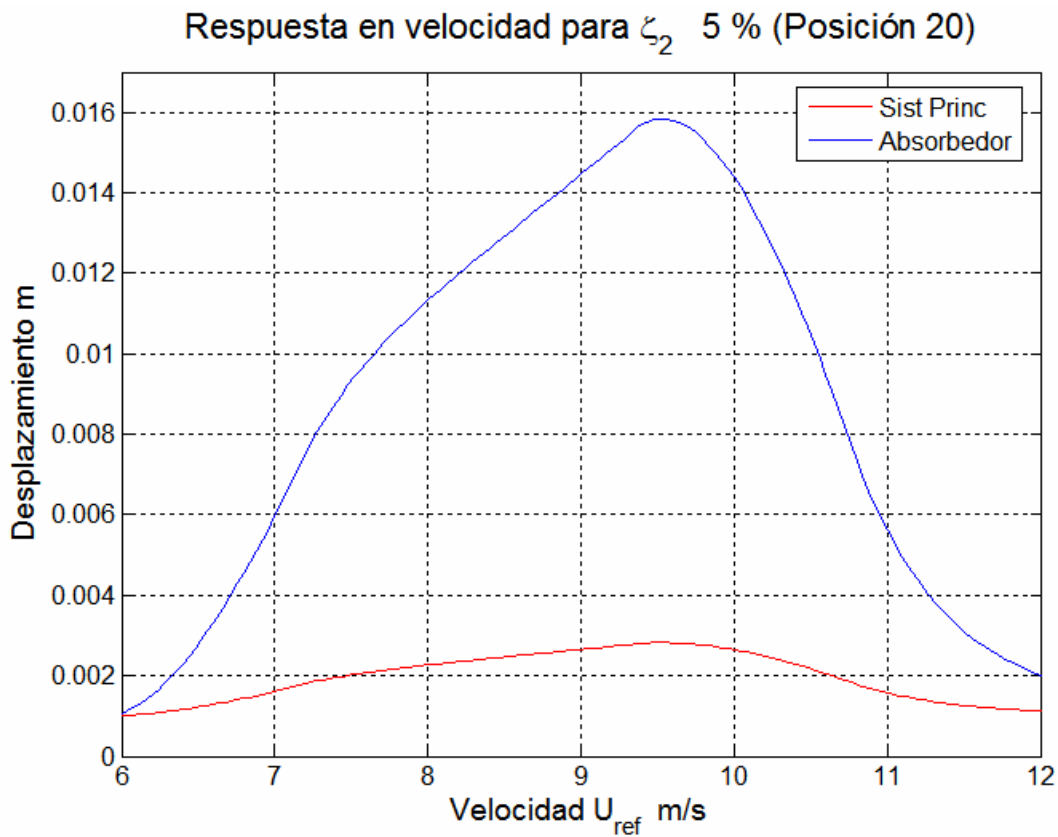


Figura 5. 22 Salida 5 de la rutina de cálculo de la Tabla 5.9.
Rendimiento del absorbedor.



**Figura 5. 23 Salida 6 de la rutina de cálculo de la Tabla 5.9.
Respuesta en velocidad del extremo libre del sistema principal y el absorbedor.**

7. Selección de los parámetros adimensionales del absorbedor.

En base a todo lo expuesto anteriormente se establecieron los valores de los parámetros seleccionados para el diseño del absorbedor (ver **Tabla 5.10**):

$m_r = 0,08; m_{22} = 64 \text{ Kg}$								
GLD	ζ_2 %	ω_{nr} %	δ_{21} m	δ_{22} m	η %	CS Fluencia	k_{22} N/m	c_{22} Ns/m
21	5	100	0,0027	0,0152	1,952	125,965	17346	104,5
20	5	100	0,0028	0,0158	2,024	121,415	17346	104,5
19	5	100	0,0030	0,0164	2,155	114,085	17346	104,5

Tabla 5. 10 Parámetros seleccionados

Se seleccionaron este grupo de parámetros debido a que con ellos se obtiene la menor amplitud de la respuesta de la estructura debido a desprendimiento de vórtices y un sistema absorbedor que no introduce un peso adicional considerable a la estructura.

5.5. Análisis de tensiones y de vida a la fatiga

En lo desarrollado anteriormente se obtuvieron la combinación de parámetros que debe poseer el sistema absorbedor de vibraciones para que la respuesta de la estructura de análisis sea mínima. En las **Tabla 5.10** se colocaron los valores de los parámetros que a nuestro punto de vista dan los resultados más eficientes en la absorción de vibraciones inducidas por el viento. De dichas tablas se extrajeron los desplazamientos máximos de la estructura de análisis con el fin de realizar un análisis tensional y de vida a la fatiga.

Es evidente que el desplazamiento debido al efecto transversal por desprendimiento de vórtice es muy pequeño; aproximadamente 3 mm de deflexión máxima en una estructura de 22200 mm de longitud. Pero en el presente proyecto Integrador se calcularon sin mucho grado de detalle los Coeficientes de Seguridad a fatiga, con el fin de tener una aproximación de la magnitud de dichos coeficientes

1. Absorbedor aplicado al GLD 21 (22,1 metros)

De la **Tabla 5.10** extraemos los siguientes valores de desplazamiento máximo:

$$y_{\max} = 0,0027 \text{ m} \quad (5.65)$$

Fuerza sobre la altura media del tramo.

Reemplazamos la (4.49), (4.127), (4.138) y (5.65) en la **Ecuación 3.48**;

$$F_i(s_j) = 151,1 \cdot \ell_i \cdot (2\pi \cdot 2,618)^2 \cdot \left(\frac{s_j}{22,2} \right)^{1,5} \cdot 0,0027 \quad (V.3-3.48)$$

$$F_i(s_j) = 110,4 \cdot \ell_j \cdot \left(\frac{s_j}{22,2} \right)^{1,5} \quad (5.66)$$

Amplitud en dirección transversal a la dirección del viento.

Reemplazamos (4.127) y (5.65) en la **Ecuación 4.144**;

$$y(s_j) = \left(\frac{s_j}{22,2} \right)^{1,5} \cdot 0,0027 \quad (5.67)$$

Tabla resumen.

Tramo	Long, de tramo l	Cota al baricentro del tramo	Ecuación número	Fuerza del viento en Y	Fuerza del Viento por unidad de longitud	Desplazamiento en Y (5.67)
	[m]	[m]		[N]	[N/m]	[Cm]
1	1,5	0,75	(5.65)	1,05	0,70	0,00
2	1,5	2,25		5,45	3,63	0,01
3	1,5	3,75		11,72	7,81	0,02
4	1,5	5,25		19,41	12,94	0,03
5	1	6,5		17,82	17,82	0,04
6	1	7,5		22,09	22,09	0,05
7	1	8,5		26,66	26,66	0,06
8	1	9,5		31,49	31,49	0,08
9	1	10,5		36,60	36,60	0,09
10	1	11,5		41,95	41,95	0,10
11	1	12,5		47,54	47,54	0,11
12	1	13,5		53,35	53,35	0,13
13	1	14,5		59,39	59,39	0,14
14	1	15,5		65,64	65,64	0,16
15	1	16,5		72,09	72,09	0,17
16	1	17,5		78,74	78,74	0,19
17	1	18,5		85,59	85,59	0,21
18	1	19,5		92,62	92,62	0,22
19	1	20,5		99,84	99,84	0,24
20	1	21,5		107,23	107,23	0,26
21	0,2	22,1		22,35	111,75	0,27

Tabla 5. 11 Tabla de fuerzas y desplazamientos (absorbedor en GLD 21)

Utilizando los valores de la **Tabla 5.11** se extrajo del software Abaqus [16] la tensión al empotramiento es de 2 MPa, el método para el cálculo de dicha tensión es basado en la teoría de Von Mises.

$$\sigma = 2Mpa = 2 [N/mm^2] \tag{5.68}$$

El coeficiente de Seguridad a Fluencia se obtiene reemplazando (4.43) y (5.68) en la **Ecuación 4.45**:

$$CS = \frac{235}{2} \tag{V.5-4.45}$$

$$CS = 117,5 \tag{5.69}$$

Definimos el Coeficiente de Seguridad a fatiga:

$$CS_{fat} = \frac{S_e}{\sigma} \quad (5.70)$$

El coeficiente de Seguridad a Fatiga se obtiene reemplazando (4.156) y (5.68) en la **Ecuación 5.72**:

$$CS_{fat} = \frac{94,4}{2} \quad (V.1-5.70)$$

$$CS_{fat} = 47,2 \quad (5.71)$$

2. Absorbedor aplicado al GLD 20 (21,5 metros)

De la **Tabla 5.10** extraemos los siguientes valores de desplazamiento máximo:

$$y_{max} = 0,0028 \text{ m} \quad (5.72)$$

Fuerza sobre la altura media del tramo.

Reemplazamos la (4.49), (4.127), (4.138) y (5.72) en la **Ecuación 3.48**:

$$F_i(s_j) = 151,1 \cdot \ell_i \cdot (2\pi \cdot 2,618)^2 \cdot \left(\frac{s_j}{22,2}\right)^{1,5} \cdot 0,0028 \quad (V.4-3.48)$$

$$F_i(s_j) = 114,5 \cdot \ell_j \cdot \left(\frac{s_j}{22,2}\right)^{1,5} \quad (5.73)$$

Amplitud en dirección transversal a la dirección del viento.

Reemplazamos (4.127) y (5.72) en la **Ecuación 4.144**:

$$y(s_j) = \left(\frac{s_j}{22,2}\right)^{1,5} \cdot 0,0028 \quad (5.74)$$

Tabla resumen.

Tramo	Long, de tramo l [m]	Cota al baricentro del tramo [m]	Ecuación número	Fuerza del viento en Y [N]	Fuerza del Viento por unidad de longitud [N/m]	Desplazamiento en Y (5.74) [Cm]
1	1,5	0,75	(5.73)	1,09	0,72	0,00
2	1,5	2,25		5,65	3,76	0,01
3	1,5	3,75		12,15	8,10	0,02
4	1,5	5,25		20,13	13,42	0,03
5	1	6,5		18,48	18,48	0,04
6	1	7,5		22,91	22,91	0,05
7	1	8,5		27,64	27,64	0,07
8	1	9,5		32,66	32,66	0,08
9	1	10,5		37,95	37,95	0,09
10	1	11,5		43,50	43,50	0,10
11	1	12,5		49,30	49,30	0,12
12	1	13,5		55,33	55,33	0,13
13	1	14,5		61,59	61,59	0,15
14	1	15,5		68,07	68,07	0,16
15	1	16,5		74,76	74,76	0,18
16	1	17,5		81,66	81,66	0,20
17	1	18,5		88,76	88,76	0,21
18	1	19,5		96,05	96,05	0,23
19	1	20,5		103,53	103,53	0,25
20	1	21,5		111,20	111,20	0,27
21	0,2	22,1		23,18	115,89	0,28

Tabla 5. 12 Tabla de fuerzas y desplazamientos (absorbedor en GLD 20)

Utilizando los valores de la **Tabla 5.12** se extrajo del software Abaqus [16] la tensión al empotramiento es de 2,15 MPa, el método para el cálculo de dicha tensión es basado en la teoría de Von Mises.

$$\sigma = 2,15\text{Mpa} = 2,15 \text{ [N/mm}^2\text{]} \tag{5.75}$$

El coeficiente de Seguridad a Fluencia se obtiene reemplazando (4.43) y (5.75) en la **Ecuación 4.45**:

$$CS = \frac{235}{2,15} \tag{V.6-4.45}$$

$$CS = 109,3 \tag{5.76}$$

El coeficiente de Seguridad a Fatiga se obtiene reemplazando (4.156) y (5.75) en la **Ecuación 5.70**:

$$CS_{fat} = \frac{94,4}{2,15} \quad (\text{V.2-5.70})$$

$$CS_{fat} = 43,9 \quad (\text{5.77})$$

3. *Absorbedor aplicado al GLD 19 (20,5 metros)*

De la **Tabla 5.10** extraemos los siguientes valores de desplazamiento máximo:

$$y_{\max} = 0,003 \text{ m} \quad (\text{5.78})$$

Fuerza sobre la altura media del tramo.

Reemplazamos la (4.49), (4.127), (4.138) y (5.78) en la **Ecuación 3.48**;

$$F_i(s_j) = 151,1 \cdot \ell_i \cdot (2\pi \cdot 2,618)^2 \cdot \left(\frac{s_j}{22,2}\right)^{1,5} \cdot 0,003 \quad (\text{V.5-3.48})$$

$$F_i(s_j) = 122,6 \cdot \ell_j \cdot \left(\frac{s_j}{22,2}\right)^{1,5} \quad (\text{5.79})$$

Amplitud en dirección transversal a la dirección del viento.

Reemplazamos (4.127) y (5.78) en la **Ecuación 4.144**;

$$y(s_j) = \left(\frac{s_j}{22,2}\right)^{1,5} \cdot 0,003 \quad (\text{5.80})$$

Tabla resumen.

Tramo	Long, de tramo	Cota al baricentro del tramo	Ecuación número	Fuerza del viento en Y	Fuerza del Viento por unidad de longitud	Desplazamiento en Y (5.80)
	[m]	[m]		[N]	[N/m]	[Cm]
1	1,5	0,75	(5.79)	1,16	0,78	0,00
2	1,5	2,25		6,05	4,03	0,01
3	1,5	3,75		13,02	8,68	0,02
4	1,5	5,25		21,56	14,38	0,03
5	1	6,5		19,81	19,81	0,05
6	1	7,5		24,55	24,55	0,06
7	1	8,5		29,62	29,62	0,07
8	1	9,5		34,99	34,99	0,08
9	1	10,5		40,66	40,66	0,10
10	1	11,5		46,61	46,61	0,11
11	1	12,5		52,82	52,82	0,13
12	1	13,5		59,28	59,28	0,14
13	1	14,5		65,99	65,99	0,16
14	1	15,5		72,93	72,93	0,18
15	1	16,5		80,10	80,10	0,19
16	1	17,5		87,49	87,49	0,21
17	1	18,5		95,10	95,10	0,23
18	1	19,5		102,91	102,91	0,25
19	1	20,5		110,93	110,93	0,27
20	1	21,5		119,14	119,14	0,29
21	0,2	22,1		24,83	124,16	0,30

Tabla 5. 13 Tabla de fuerzas y desplazamientos (absorbedor en GLD 19)

Utilizando los valores de la **Tabla 5.13** se extrajo del software Abaqus [16] la tensión al empotramiento es de 2,3 MPa, el método para el cálculo de dicha tensión es basado en la teoría de Von Mises.

$$\sigma = 2,3Mpa = 2,3 [N/mm^2] \tag{5.81}$$

El coeficiente de Seguridad a Fluencia se obtiene reemplazando (4.43) y (5.81) en la **Ecuación 4.45**:

$$CS = \frac{235}{2,3} \tag{V.7-4.45}$$

$$CS = 102,2 \tag{5.82}$$

El coeficiente de Seguridad a Fatiga se obtiene reemplazando (4.156) y (5.81) en la Ecuación 5.70:

$$CS_{fat} = \frac{94,4}{2,3} \quad (\text{V.3-5.70})$$

$$CS_{fat} = 41 \quad (\text{5.83})$$

Resumiendo los coeficientes de seguridad calculados en la **Tabla 5.14**.

GLD	CS	CS _{fat}
21	117,5	47,2
20	109,3	43,9
19	102,2	41

Tabla 5. 14 Resumen de los CS

5.6. Conclusión del capítulo

En presente capítulo se realizó la simulación numérica del fenómeno de desprendimiento de vórtice, para ello se recurrió a bibliografía especializada la cual sirvió de gran ayuda en la comprensión del fenómeno; determinando la relación entre los distintos parámetros que rigen el desprendimiento de vórtice.

Conociendo la naturaleza del fenómeno se logró simular sus efectos mediante rutinas de cálculo en Matlab [2] en la estructura de análisis, obteniendo la respuesta de esta con resultados acordes a lo que fue proporcionado por la Norma DIN [1].

Se determinó que el fenómeno de desprendimiento de vórtice se desarrolla a velocidades de referencia bajas, lo que incrementa las posibilidades de que se manifieste periódicamente. Además se realizó una investigación de las probabilidades de ocurrencia de velocidades de viento que provoquen desprendimiento de vórtice dentro de un semestre utilizando la información disponible en la estación meteorológica consultada (Julio-Diciembre del 2015); obteniéndose que la estructura está en riesgo de fallar por fatiga dado que es frecuente la aparición de velocidades de viento que provocan en la estructura el fenómeno de desprendimiento de vórtices dentro del rango de Lock-in. Por lo que se justifica el uso de un sistema absorbedor de vibraciones.

A partir de los resultados obtenidos entre los métodos de cálculo se pudo modelar la estructura de análisis con un sistema absorbedor de vibraciones instalado a ella. Con las rutinas de cálculo se obtuvieron los parámetros del sistema absorbedor de vibraciones que producen en la estructura principal desplazamientos muy reducidos con respecto a la estructura sin absorbedor, con ello se determinaron los coeficientes de seguridad del sistema con el absorbedor dando valores más que conservativos.

5.7. Resumen de Capítulo

En este capítulo se realizó una simulación numérica del fenómeno de desprendimiento de vórtice; bajo un enfoque teórico dado por la bibliografía consultada. Se realizó un análisis estadístico de la velocidad del viento en una zona rural similar a la perteneciente al emplazamiento de la estructura de estudio; verificando el potencial de riesgo de falla de la chimenea por fatiga. Se obtuvo la respuesta de la estructura con y sin sistema absorbedor de vibraciones, se determinaron los parámetros más efectivos para la absorción de vibraciones dejando el terreno preparado para la materialización de los resultados obtenidos en este capítulo. En el próximo capítulo se detalla el procedimiento de diseño del sistema absorbedor de vibraciones.

5.8. Referencias

- ¹ DIN, “1055-4, Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 4: Windlasten”, DIN, Berlin, 2005.
- ² The MathWorks, “Matlab 7.0 R14”, MathWorks, USA, 2007.
- ³ Blevins, R., “Flow-Induced Vibrations”, Krieger Publishing Company, Malabar, 2001.
- ⁴ Williamson, C., Roshko, A., “Vortex Formation in the Wake of an Oscillating Cylinder”, Journal of Fluids and Structures, 2, pp. 355-381, 1988.
- ⁵ Lienhard, J., “Synopsis of Lift, Drag and Vortex Frequency Data for Rigid Circular Cylinders”, Washington State University, College of Engineering, Research Division Bulletin 300, 1966.
- ⁶ Nishioka, M., Sato, H. “Mechanism of Determination of the Shedding Frequency of Vortex Behind a Cylinder at Low Reynolds Number”, Journal of Fluids Mechanics, 89, pp. 49-60, 1978.
- ⁷ Roshko, A., “On the Drag and Vortex Shedding Frequency of Two-Dimensional Bluff Bodies”, NACA TM 3159, 1954.
- ⁸ Roshko, A., “On the Wake and Drag of Bluff Bodies”, Journal of Aeronautical Sciences, 22, pp. 124-135, 1955.
- ⁹ Farell, C., Blessmann, J., “On Critical Flow around Smooth Circular Cylinders”, Journal of Fluids Mechanics, 136, pp. 375-391, 1983.
- ¹⁰ Bearman, P., “On Vortex Shedding from a Circular Cylinders in the Critical Reynolds Numbers Regime”, Journal of Fluids Mechanics, 37, pp. 577-586, 1969.
- ¹¹ Jones, G., “Aerodynamics Forces on a Stationary and Oscillating Circular Cylinder at High Reynolds Number”, NASA, 1969.

¹² Achenbach, E., Heinecke, E., “On Vortex Shedding from Smooth and Roungh Circular Cylinders in the Range of Reynolds 6×10^3 to 5×10^6 ,” Journal of Fluids Mechanics, 109, pp. 239-251, 1981.

¹³ Feng, C., “The Measurement of Vortex-Induced Effects in Flow Past Stationary and Oscillating Circular and D-Section Cylinders”, University of British Columbia, 1968.

¹⁴ DIN, “4133, Schornsteine Aus Stahl”, DIN, Berlin, 2005.

¹⁵ Szechenyi, E., “Supercritical Reynolds Simulations of Two-Dimensional Flow over Cylinders”, Journal of Fluids Mechanics, 70, pp. 529-542, 1975.

¹⁶ Dassault Systemes, “Abaqus CAE”, Dassault Systemes, France, 2010.

¹⁷ <http://clima.omixom.com>

¹⁸ Massa, J.C., “COMPENDIO de Cálculo Estructural”, Departamento de Estructuras FCEFyN UNC, Córdoba, 2007.

Capítulo 6 Diseño mecánico del absorbedor

6.1. Introducción

En el presente capítulo se realiza el diseño y cálculo estructural del sistema encargado de absorber las vibraciones a la que es sometida la estructura de análisis en base a lo determinado en los capítulos anteriores.

6.2. Objetivos

Este capítulo tiene como principal objetivo el de determinar la configuración física de los elementos que cumplan con los requisitos funcionales y de resistencia, para ello se procede de la siguiente manera:

1. Establecer una metodología de proyecto
2. Determinar la configuración más apropiada
3. Planos de conjunto
4. Planos de detalle
5. Memoria de cálculo verificando los componentes

Una vez reunida toda esta información podemos concluir el presente proyecto integrador dejando suficiente contenido teórico y técnico para el diseño y construcción del dispositivo absorbedor de vibraciones.

6.3. Metodología de Proyecto

Para condensar toda la información presentada en los capítulos anteriores y así entrar de lleno a un análisis ordenado para establecer la configuración física del sistema absorbedor de vibraciones de acuerdo a los requerimientos de diseño, como también económicos y de viabilidad constructiva. Este apartado tiene como finalidad establecer bases de la etapa de diseño de este Proyecto Integrador.

A. Entendimiento del problema del proyecto.

El problema de diseño se basa en apariciones de fallas no previstas en estructuras de acero de pared delgada, estas fallas son atribuidas al efecto de fatiga de los materiales que son producidas por fuerzas alternativas generadas por el viento, dichas fuerzas son producto del efecto de desprendimiento de vórtice.

La velocidad de viento para la cual la frecuencia del vórtice está en fase con una de las frecuencias naturales de la estructura se llama velocidad del viento crítica.

Según lo estudiado el capítulo anterior la velocidad crítica del viento en la estructura de análisis es baja, como 9 m/s (**Ver Figura 5.7**), es probable que ocurra todos los días (dependiendo de la zona) con lo cual se **puede esperar un elevado número de ciclos de vibración** por lo que la estructura puede fallar por **fatiga**.

La fatiga de una estructura depende principalmente del número de ciclos de vibración y de la amplitud de la vibración. Así que la única manera de reducir las tensiones de fatiga es mediante la reducción de la respuesta de la estructura.

B. Requerimientos del consumidor.

Los requerimientos del consumidor, dado todo lo expuesto anteriormente, es analizar la estructura y diseñar un absorbedor de vibraciones para maximizar la vida a la fatiga, puesto que este tipo de falla puede ocurrir repentinamente produciendo daños catastróficos a las instalaciones y dejar en lucro cesante la planta.

C. Competitividad y competencias.

Existen en el mercado tres empresas destacadas que se dedican a los sistemas absorbentes de vibraciones, dos de origen alemán con representantes en Argentina y Brasil y otra con origen en el Reino Unido.

- GERB, Origen: Alemania [1].
- MAURER, Origen: Alemania [2].
- MULTITECH, Origen: Reino Unido [3].

D. Requisitos de ingeniería.

Los requisitos que necesita ingeniería para el desarrollo del dispositivo absorbedor de vibraciones son los siguientes:

1. Rigidez del absorbedor.
2. Amortiguación del absorbedor.
3. Masa del absorbedor.
4. Demanda de desplazamiento para vida infinita en fatiga.

Los parámetros equivalentes de los requerimientos de ingeniería ya fueron determinados en el capítulo anterior (**Tabla 5.10**).

E. Objetivos de ingeniería

1. Disminución considerable de la amplitud de las oscilaciones en resonancia
2. Diseño del absorbedor de configuración simple.
3. Materiales comerciales que resistan medio ambiente corrosivo.

6.4. Proyecto conceptual

Con la visión amplia dada en la metodología de proyecto se realizó un enfoque más cercano sobre la configuración final del dispositivo absorbedor de vibraciones, para ello se estableció lo siguiente:

A. Desarrollo de conceptos:

En esta parte del análisis sólo se enumeran los conceptos en los cuales fueron evaluadas las distintas configuraciones de las soluciones potenciales propuestas, estas se estudiaron en base a los siguientes conceptos:

1. Configuración.
2. Peso.
3. Sintonización.
4. Materiales Comerciales.
5. Costo.

Configuración: En este concepto se valoró la viabilidad técnica constructiva, dando prioridad a aquellos diseños de menor complejidad.

Peso: En este concepto se establece la valoración del diseño más compacto y liviano, con el objeto de no introducir carga muerta innecesaria a la estructura de análisis.

Sintonización: Este concepto fija su interés en la capacidad del diseño de alterar las propiedades de sus elementos, de modo tal que se ajuste a cambios que sean necesarios realizarle en el momento de la instalación sobre la estructura (Parámetros Regulables).

Materiales comerciales: Este concepto se fijó como pauta de que los diseños deben estar contruidos, en su gran mayoría, con materiales que se encuentren comercialmente en el mercado y sean de fácil acceso.

Costo: En este concepto se tuvo en cuenta que los costos de fabricación del sistema absorbedor de vibraciones no sean tan elevados.

B. Descomposición funcional.

Los elementos funcionales presentes en todas las configuraciones de los dispositivos absorbedores de vibraciones son tres, estos son:

1. Elementos de Masa o inercial.
2. Elementos de Rigidez o elásticos.
3. Elementos Disipativos o de amortiguación.

C. Generar conceptos.

En base a lo anteriormente planteado más lo investigado en Internet se pudieron generar 3 conceptos de sistema absorbedor los cuales se denominan en esta instancia como solución A, B y C. Esquemáticamente presentaremos cada uno.

- **Solución A.**

Esta propuesta de solución cuenta de un péndulo alojado en un recinto cerrado que se coloca en la estructura principal, donde la masa del mismo puede regularse aumentando o disminuyendo con el agregado o extracción de elementos; también se permite cambiar el centro de gravedad del sistema para ajustar su frecuencia natural. En su extremo libre posee una pieza con perforaciones que va sumergida en aceite, este elemento es el encargado de proporcionar el coeficiente de amortiguación dada por la fricción del aceite al atravesar el cuerpo.

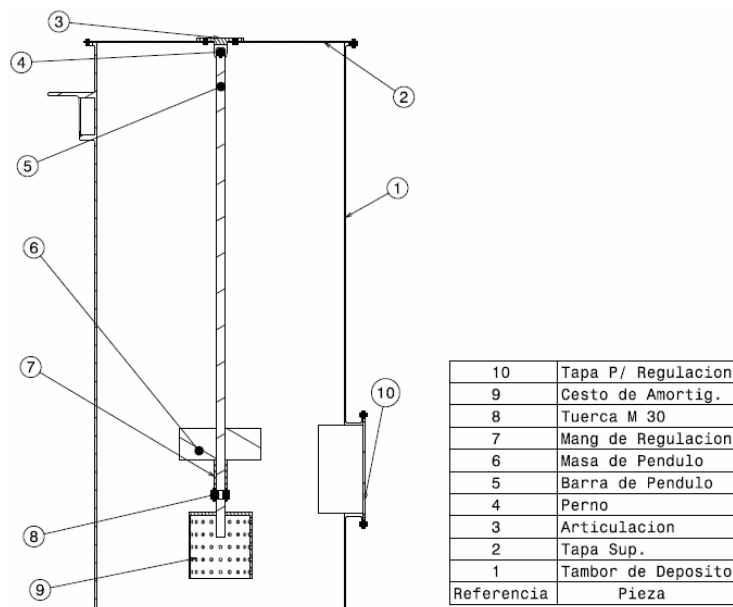
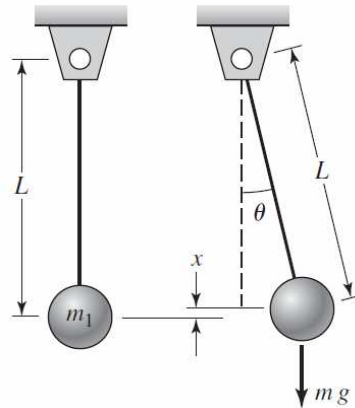


Figura 6. 1 Esquema de sistema para la solución A

Seguidamente estudiamos sus propiedades reducidas:

La solución A puede analizarse de la misma manera que un péndulo simple; además es una de las configuraciones que manifiestan viabilidad en su construcción e implementación debida a su sencillez.



Fuente: Balachandran & Magrab [4]

Figura 6. 2 Diagrama de cuerpo libre de la solución A (Péndulo Simple)

Para determinar si este sistema se adapta a los parámetros de diseño que debe poseer el sistema absorbedor, se deben determinar las propiedades equivalentes del sistema; esto es que el sistema absorbedor debe tener ciertas propiedades para que se adapte de forma óptima a la reducción de vibraciones del sistema principal (chimenea).

Utilizando las ecuaciones de Lagrange donde T es la energía cinética del sistema y V la energía potencial, elegimos a x y θ como coordenadas generalizadas considerando desplazamientos positivos, con origen en la posición de equilibrio estático **Figura 6.2**.

La inercia rotacional total con respecto al punto O es:

$$J_0 = \frac{2}{5}mr^2 + mL^2 \quad (6.1)$$

La energía cinética T de este sistema tomando θ como coordenada generalizada será debe estar en el dibujo:

$$T = \frac{1}{2}J_0\dot{\theta}^2 \quad (6.2)$$

Reemplazando (6.2) en la ecuación (6.3):

$$T = \frac{1}{2}\left(\frac{2}{5}mr^2 + mL^2\right)\dot{\theta}^2 \quad (6.3)$$

La energía potencial de este sistema para pequeños valores de θ será:

$$V = \frac{1}{2}mgL\theta^2 \quad (6.4)$$

Las propiedades equivalentes de inercia y rigidez del sistema se expresan respectivamente por medio de:

$$m_e = \frac{2}{5}mr^2 + mL^2 \quad (6.5)$$

$$k_e = mgL$$

La frecuencia natural del sistema se calcula como:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k_e}{m_e}} \quad (6.6)$$

Introduciendo las ecuaciones en la ecuación y simplificando tenemos:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{gL}{\frac{2}{5}r^2 + L^2}} \quad (6.7)$$

- **Solución B.**

Esta propuesta de solución cuenta de una bola de masa conocida que tiene libertad de moverse dentro de un cuenco lleno de fluido viscoso.

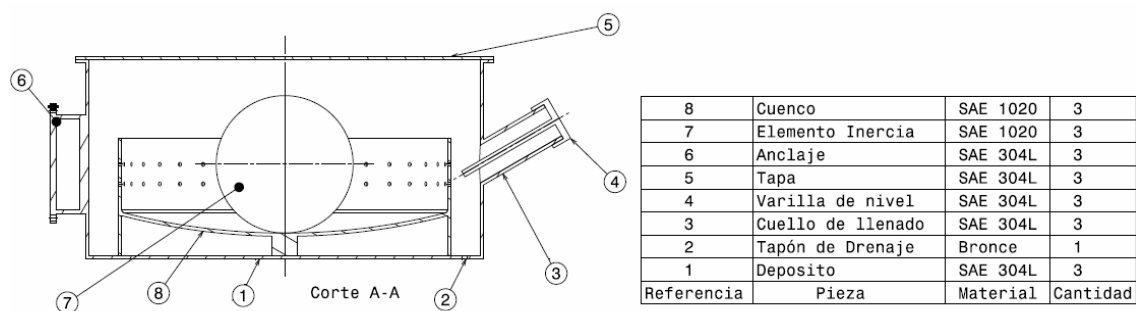
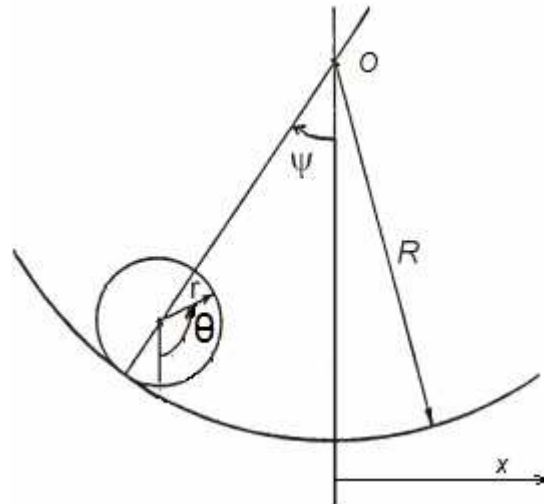


Figura 6. 3 Esquemas de sistema para la solución B

Seguidamente estudiamos sus propiedades reducidas:



Fuente: Miroš & Shota [5]

Figura 6. 4 Diagrama de cuerpo libre de la solución B

Para determinar si este sistema se adapta a nuestras solicitudes de diseño se deben determinar las propiedades equivalentes del sistema; el dispositivo absorbedor debe tener las propiedades reducidas adecuadas para que se adapte de forma óptima al sistema principal (chimenea).

Utilizando las ecuaciones de Lagrange donde T es la energía cinética del sistema y V la energía potencial, elegimos a x , ψ y θ como coordenadas generalizadas considerando desplazamientos positivos, con origen en la posición de equilibrio estático.

La inercia rotacional total con respecto al punto O es:

$$J_0 = \frac{2}{5}mr^2 \quad (6.8)$$

La energía cinética de este sistema tomando x y θ como coordenadas generalizadas será:

$$T = \frac{1}{2}J_0\dot{\theta}^2 + \frac{1}{2}m\dot{x}^2 \quad (6.9)$$

Para pequeños desplazamientos

$$\begin{aligned} x &= r\theta \\ \dot{x} &= r\dot{\theta} \\ \ddot{x} &= r\ddot{\theta} \end{aligned} \quad (6.10)$$

Reemplazando

$$T = \frac{1}{2}\left(\frac{2}{5}mr^2 + mr^2\right)\dot{\theta}^2 \quad (6.11)$$

La energía potencial de este sistema para pequeños valores de ψ será:

$$V = \frac{1}{2}mg(R-r)\psi^2 \quad (6.12)$$

Para pequeños desplazamientos

$$x = (R-r)\psi \quad (6.13)$$

Reemplazando (6.10) en (6.13):

$$(R-r)\psi = r\theta \quad (6.14)$$

Despejando

$$\psi = \frac{r\theta}{(R-r)} \quad (6.15)$$

Reemplazando (6.15) en (6.12):

$$V = \frac{1}{2}mg(R-r)\frac{r^2}{(R-r)^2}\theta^2 \quad (6.16)$$

Las propiedades equivalentes de inercia y rigidez del sistema se expresan respectivamente (Ecuaciones 6.11 y 6.16) por medio de:

$$m_e = \frac{2}{5}mr^2 + mr^2 = \frac{7}{5}mr^2 \quad (6.17)$$
$$k_e = mg\frac{r^2}{(R-r)}$$

Introduciendo las ecuaciones (6.17) en la ecuación (6.6) y simplificando:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{mgr^2}{(R-r)\left(\frac{2}{5}mr^2 + mr^2\right)}} \quad (6.18)$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{g}{(R-r)\left(\frac{2}{5} + 1\right)}} \quad (6.19)$$

- **Solución C.**

Esta propuesta de solución cuenta con un péndulo en forma anular por fuera de la chimenea, sujeta por cables de acero, este dispositivo está ligado a la chimenea por medio de resortes circulares que le proporcionan rigidez necesaria y también a través de amortiguadores viscosos de aceite, que son los encargados de disipar la energía del sistema.



Figura 6. 5 Esquema de sistema para la solución C

Seguidamente estudiando sus propiedades reducidas utilizando el modelo dado por la **Figura 6.6**:

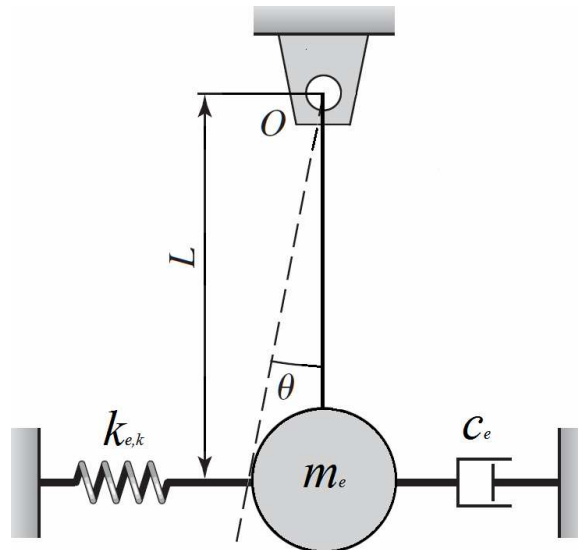


Figura 6. 6 Diagrama de cuerpo libre de la solución C

Donde:

- $k_{e,k}$ Rigidez Equivalente debido a los elementos elásticos.
- c_e Amortiguamiento Equivalente debido a los elementos disipativos.
- m_e Masa Equivalente de los elementos de Inercia.
- L Longitud del péndulo.

La energía cinética de este sistema tomando a x y θ como coordenadas generalizadas será:

$$T = \frac{1}{2}m\dot{x}^2 + \frac{1}{2}J_G\dot{\theta}^2 \quad (6.20)$$

La componente de la energía cinética correspondiente a la inercia rotacional es nula (**Ecuación 6.20**) para este caso de péndulo ya que este no rota con respecto a su centro de gravedad (ver **Figura 6.7**).

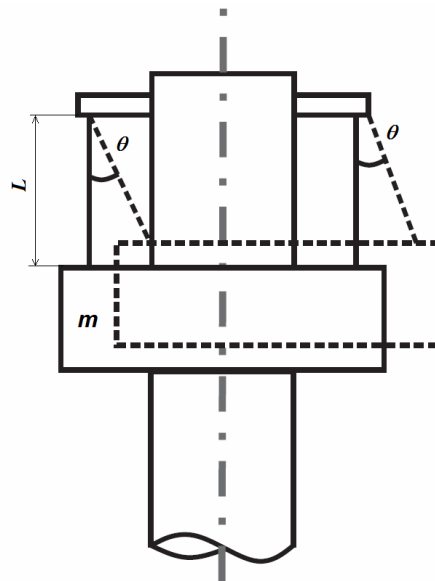


Figura 6. 7 Esquema de movimiento del péndulo - Solución C

Por lo tanto la ecuación de la energía cinética del sistema (**6.20**) finalmente es de la forma:

$$T = \frac{1}{2}m\dot{x}^2 \quad (6.21)$$

La energía potencial de este sistema será:

$$V = \frac{1}{2}[k_{e,k}x^2 + mgL\theta^2] \quad (6.22)$$

Para pequeños desplazamientos

$$\begin{aligned} x &= L\theta \\ \theta &= \frac{x}{L} \end{aligned} \quad (6.23)$$

Reemplazando (6.23) en la ecuación (6.22):

$$V = \frac{1}{2} \left[k_{e,k} + \frac{mg}{L} \right] x^2 \quad (6.24)$$

Donde:

$$k_e = \left[k_{e,k} + \frac{mg}{L} \right] \quad (6.25)$$

Introduciendo las ecuaciones (6.17) en la ecuación (6.6) y simplificando:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k_e}{m_e}} \quad (6.26)$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{\left(k_{e,k} + \frac{mg}{L} \right)}{m_e}} \quad (6.27)$$

Para determinar la Rigidez Equivalente debido a los elementos elásticos $k_{e,k}$ y el Amortiguamiento Equivalente c_e ; se supone un sistema donde un anillo está situado alrededor de la chimenea el cual es ligado a través de tres conjuntos, igualmente espaciados a 120° que poseen resortes y un amortiguador. **Ver Figura 6.8.**

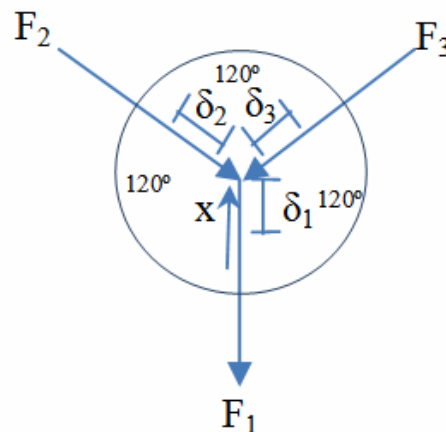


Figura 6. 8 Diagrama de fuerzas - Solución C

Moviendo el punto de unión de los resortes una cantidad x , el desplazamiento de cada resorte será:

$$\delta_1 = x$$

$$\delta_2 = x \cos(60) \quad (6.28)$$

$$\delta_3 = x \cos(60)$$

La fuerza correspondiente en cada resorte será:

$$F_1 = k_1 x$$

$$F_2 = k_2 x \cos(60) \quad (6.29)$$

$$F_3 = k_3 x \cos(60)$$

Realizando la sumatoria de fuerzas en dirección a x se obtiene:

$$F = F_1 + F_2 \cos(60) + F_3 \cos(60)$$

$$F = k_1 x + k_2 x \cos(60) \cos(60) + k_3 x \cos(60) \cos(60) \quad (6.30)$$

$$F = [k_1 + 0,25k_2 + 0,25k_3]x$$

$$F = k_{e,k} x$$

Donde:

$$k_{e,k} = k_1 + 0,25k_2 + 0,25k_3 \quad (6.31)$$

Si tomamos la premisa que los resortes deben tener igual rigidez obtenemos:

$$\begin{aligned} k &= k_1 = k_2 = k_3 \\ k_{e,k} &= 1,5k \end{aligned} \quad (6.32)$$

Al mismo resultado se llega con el amortiguamiento equivalente.

$$c_e = 1,5c \quad (6.33)$$

La masa equivalente del sistema es la masa del aro del absorbedor m .

$$m_e = m \quad (6.34)$$

D. Escoger el mejor concepto

Para la selección de los conceptos que mejor se adapten a los requerimientos se aplicaron las ecuaciones recientemente desarrolladas en este capítulo y así se obtuvieron las respectivas propiedades equivalentes y a partir de ellas determinar las dimensiones físicas que deben poseer los elementos que forman el sistema absorbedor.

De lo calculado en el capítulo anterior (**Tabla 5.10**) los parámetros seleccionados del absorbedor que disminuyen notablemente la respuesta de la estructura son los siguientes:

$$m_e = 64 \text{ Kg} \quad (6.35)$$

$$k_e = 17346 \text{ N/m} \quad (6.36)$$

$$c_e = 104,5 \text{ Ns/m} \quad (6.37)$$

La relación de frecuencias naturales del sistema completo debe ser de valor unitario, esto significa que la frecuencia natural del absorbedor es la misma de la estructura principal, por ello la frecuencia natural del absorbedor de vibraciones es:

$$\omega_n = 2,618 \text{ Hz} \quad (6.38)$$

- **Solución A.**

De lo expuesto anteriormente el sistema absorbedor debe poseer las propiedades reducidas que se adapten a las requeridas para el diseño del absorbedor, para ello como primera medida se calculará la rigidez del sistema tal lo presenta la ecuación **6.5**.

Reemplazando **(6.35)** y **(6.36)** en la ecuación **(6.5)**:

$$\begin{aligned} \frac{2}{5}mr^2 + mL^2 &= 64 \text{ Kg} \\ mgL &= 17346 \text{ N/m} \end{aligned} \quad (6.39)$$

Resultando que:

$$mL = 1768,2 \text{ Kg} \cdot m \quad (6.40)$$

La ecuación **6.40** pone en evidencia que la rigidez equivalente dada por la energía potencial no es suficiente para satisfacer la demanda del diseño, por lo que se debió introducir elementos elásticos al diseño de la solución **A**, quedando de esta forma similar al presentado en la **Figura 6.6**; por lo que se debió recalcular la ecuación de la energía potencial de este nuevo sistema (ya que la energía cinética queda sin alteraciones, ecuación **(6.3)**).

La ecuación de la energía potencial será:

$$V = \frac{1}{2} [k_{e,k} x^2 + mgL\theta^2] \quad (6.41)$$

Para pequeños desplazamientos

$$\begin{aligned} x &= L\theta \\ \theta &= \frac{x}{L} \end{aligned} \quad (6.42)$$

Reemplazando **(6.42)** en la ecuación **(6.41)**:

$$V = \frac{1}{2} [k_{e,k} L^2 \theta^2 + mgL\theta^2] \quad (6.43)$$

Las propiedades reducidas del sistema utilizando la masa equivalente m_e de la ecuación **(6.5)** y extrayendo la rigidez equivalente k_e de la ecuación **(6.43)** serán:

$$\begin{aligned} k_e &= k_{e,k} L^2 + mgL \\ m_e &= \frac{2}{5} mr^2 + mL^2 \end{aligned} \quad (6.44)$$

Se consideró que el péndulo está conformado por una esfera de acero cuya masa será:

$$m = \frac{4}{3} \pi \rho r^3 \quad (6.45)$$

Reemplazando **(6.35)**, **(6.36)** y **(6.45)** en la ecuación **(6.44)**:

$$\begin{aligned} k_e &= k_{e,k} L^2 + \frac{4}{3} \pi \rho r^3 gL = 17346 \text{ N/m} \\ m_e &= \frac{4}{3} \pi \rho r^3 \left(\frac{2}{5} r^2 + L^2 \right) = 64 \text{ Kg} \end{aligned} \quad (6.46)$$

Con las ecuaciones (6.46) se construyó la **Tabla 6.1** de la cual se pueden observar todas las opciones de variables que se adaptan a lo solicitado para el diseño del absorbedor:

Radio de la Esfera r [m]	Masa de la esfera m [Kg]	Longitud del Péndulo L [m]	Rigidez Exterior $k_{e,k}$ [N/m]
0,07	11,21	2,39	2992,4
0,08	16,73	1,96	4453,0
0,09	23,82	1,64	6320,7
0,10	32,67	1,40	8644,2
0,11	43,49	1,21	11473,0
0,12	56,46	1,06	14858,5
0,13	71,78	0,94	18855,1
0,14	89,65	0,84	23522,0
0,15	110,27	0,76	28926,2

Tabla 6. 1 Conjunto de variables que se adaptan a las propiedades reducidas de la Solución A

Esto da como resultado que la **solución A es viable** como posible diseño del absorbedor de vibraciones. Solo resta determinar la configuración del elemento disipador (amortiguador) para el sistema que plantea la solución A.

- **Solución B.**

Para saber si este modelo de solución cumple las condiciones que se requiere para el absorbedor; con las mismas condiciones que la solución **A** se calcularon la diferencia de radios que debe existir entre el cuenco y la esfera:

$$(R - r) = \frac{g}{\left(\frac{7}{5}\right)\omega_n^2} = \frac{9,81}{\left(\frac{7}{5}\right)(2\pi(2,618))^2} = 0,026m \quad (6.47)$$

Como se puede observar, diferencias de radios entre el cuenco y la esfera es de 25,4 mm, ahora determinaremos la masa equivalente del sistema absorbedor. Al tratarse de una esfera, su masa (m) está determinada por su volumen y la densidad del material con el que está construido, reemplazando (6.45) en la Ecuación (6.17):

$$m_e = \frac{7}{5} \frac{4}{3} \pi \rho r^3 \quad (6.48)$$

Despejando el radio de la esfera r :

$$r = \sqrt[5]{\frac{15 m_e}{28 \pi \rho}} \quad (6.49)$$

Si consideramos una esfera de acero:

$$r = \sqrt[5]{\frac{15 \cdot 64}{28 \cdot 7800 \pi}} \quad (6.50)$$

$$r = 0,269m \quad (6.51)$$

La masa de la esfera es:

$$m = \frac{4}{3} \pi 7800 (0,269)^3 = 636Kg \quad (6.52)$$

La expresión (6.52) da como resultado que la masa de la esfera debe ser de 636 Kg. Lo cual, por este gran peso, no hace viable aplicar este diseño de absorbedor a la estructura de análisis, por ende **se rechaza** la **solución B** como posible modelo de diseño del absorbedor de vibraciones.

- **Solución C.**

De igual modo que se procedió a las soluciones **A** y **B** se calcularon los valores de los parámetros que debe poseer el diseño mostrado en la solución **C**.

Reemplazando (6.36) en la ecuación (6.32), tenemos:

$$k = k_1 = k_2 = k_3 = \frac{17346}{1,5} \quad (V.1-6.32)$$

$$k = k_1 = k_2 = k_3 = 11564 \text{ N/m} \quad (6.53)$$

Reemplazando (6.37) en la ecuación (6.33), se tiene que:

$$c = \frac{104,5}{1,5} \quad (V.1-6.33)$$

$$c = c_1 = c_2 = c_3 = 69,7 \text{ Ns/m} \quad (6.54)$$

La masa equivalente del sistema es la masa del aro del absorbedor m , según la ecuación (6.34).

$$m_e = m = 64 \text{ Kg} \quad (6.55)$$

La **solución C** presenta parámetros que son acordes a lo definido en el desarrollo de los conceptos, para el desarrollo del presente proyecto se seleccionó la **Solución C** ya que es la **más viable** desde el punto de vista de los autores. Existiendo abundante bibliografía que permitió el dimensionamiento y análisis tensional de todos los elementos componentes del absorbedor, pudiendo realizar un diseño sencillo pero altamente duradero.

6.5. Diseño del absorbedor

Esta etapa se determinan el tipo de la configuración física de cada uno de los elementos presentes en el absorber de la solución seleccionada (**C**), como ya lo hemos mencionado, los tres elementos principales que lo componen son:

1. Elemento de inercia.
2. Elementos de disipación.
3. Elementos elásticos.

Aparte de los tres elementos principales debemos verificar otros elementos auxiliares a los anteriormente nombrados, por ello se realizó la también una verificación de resistencia mecánica a los elemento se sujeción y de las uniones soldadas.

6.5.1. Diseño del elemento de inercia

Según los valores reducidos seleccionados para los elementos que componen el absorbedor, establece que la masa reducida del anillo absorbedor de la solución **C** debe ser igual a:

$$m_e = m = 64 \text{ Kg} \quad (6.56)$$

El elemento de inercia que compone el sistema absorbedor que se diseñó, está compuesto por un tubo anular fraccionado en tres partes para facilitar su montaje (**Figura 6.9**), este elemento está sujeto por medio de cables de acero a la estructura principal (chimenea), vinculado a través de los resortes y amortiguadores viscosos.

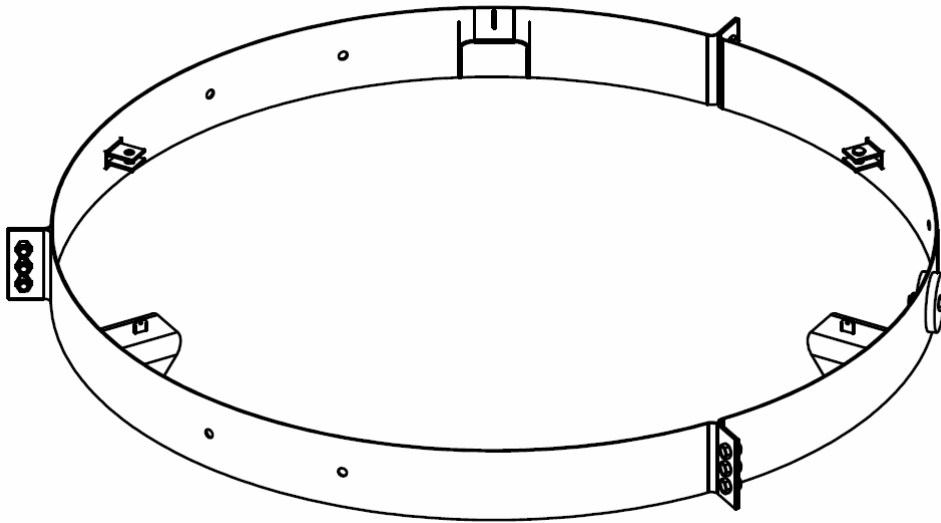


Figura 6. 9 Esquema de la configuración del elemento de inercia

Para el determinar la dimensión del elemento de inercia se partió de un anillo base de 2 metros de diámetro medio y 180mm de altura construido con chapas de acero inoxidable AISI 304 de 4mm de espesor, en base a los productos presentes en el mercado local de acero inoxidable (Famiq S.R.L [6]).

La masa de un anillo circular de 2 metros de diámetro medio, 180mm de alto y 4mm de espesor es de 36 Kg, mas las placas de unión entre las fracciones en la que fue dividido el anillo y los elementos de anclaje para los cables de sujeción y los amortiguadores dan, en conjunto, una masa de 46,5 Kg. Este último valor de masa es un aproximativo del valor final de la masa del elemento de inercia; ya que se previó en el diseño el uso de elementos de lastre como adición al anillo base, distribuidos de forma equilibrada para alcanzar la masa requerida por los cálculos. Estas masas de lastre se determinaron de tres diferentes valores, estos son 2,2, 1 y 0,5 Kg.

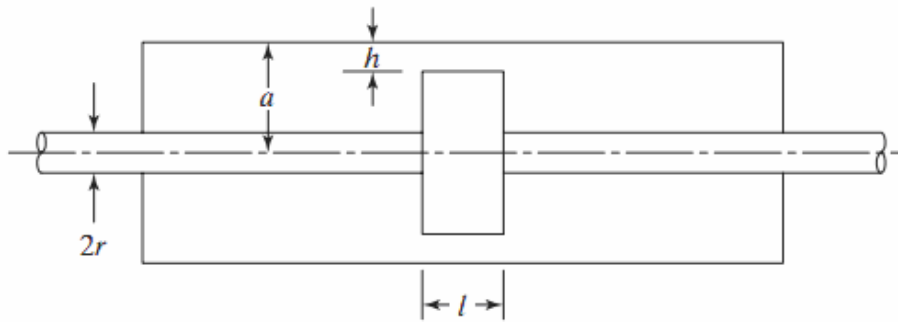
6.5.2. Diseño de los elementos de disipación

El elemento disipador que se diseñó en este Proyecto Integrador, es del tipo de los amortiguadores viscosos. En la bibliografía consultada (Rao [7]) se presenta una forma de cálculo para determinar las dimensiones de los componentes del amortiguador viscoso (Figura 6.10). En el diseño se utilizó un amortiguador de doble vástago para obtener las mismas propiedades de amortiguamiento en las dos direcciones del movimiento, haciéndolo de doble efecto. De los cálculos realizados el amortiguamiento del sistema absorbedor debe ser:

$$c_e = 1,5 \cdot c = 104,5 \text{ Ns/m} \quad (6.57)$$

Por ende cada amortiguador debe poseer las siguientes características:

$$c = 69,7 \text{ Ns/m} \quad (6.58)$$



Fuente: Rao [7]

Figura 6. 10 Esquema del amortiguador viscoso

Se calculan las dimensiones del amortiguador en base a la ecuación rectora (6.59) para el caso expuesto es extraída de Rao [7]:

$$c = \frac{6\pi\mu l}{h^3} \left[\left(a - \frac{h}{2} \right)^2 - r^2 \right] \left[\frac{a^2 - r^2}{a - \frac{h}{2}} - h \right] \quad (6.59)$$

Elegimos un aceite industrial utilizado frecuentemente, **ISO VG 68**. Con las siguientes propiedades a 20°C:

$$\nu = 68 \cdot 10^{-5} \frac{m^2}{s} \quad (6.60)$$

$$\rho = 890,5 \frac{Kg}{m^3} \quad (6.61)$$

$$\mu = \rho \cdot \nu = 6,052 \cdot 10^{-2} \frac{Kg}{m \cdot s} \quad (6.62)$$

Para la determinación de los parámetros se realizó una planilla Excel (**Tabla 6.2**) donde se colocaron diámetros estándar de tubos para transmisión de fluido, según norma ASTM A52 schedule 40 (Hardval [8]) y se selecciona según el espacio disponible en el conjunto chimenea con absorbedor.

D Nominal [Pulgadas]	c [Ns/m]	Viscosidad (μ) [m^2/s]	a [m]	h [m]	l [m]	r [m]
2	70,81	$6,8 \cdot 10^{-5}$	0,0265	0,001	0,105	0,0125
2,5	70,85	$6,8 \cdot 10^{-5}$	0,0315	0,001	0,068	0,0125
3	70,52	$6,8 \cdot 10^{-5}$	0,0395	0,001	0,04	0,0125
3,5	70,61	$6,8 \cdot 10^{-5}$	0,0450	0,001	0,03	0,0125

Tabla 6. 2 Planilla de Cálculo para la obtención de las dimensiones del amortiguador viscoso

De lo calculado se selecciona el tubo de tres pulgadas ya que es el que mejor se adapta al diseño propuesto. Para verificar las partes constitutivas se determinó la presión p a la cual será sometido el amortiguador:

$$p = \frac{F}{A} \quad (6.63)$$

La fuerza se calculó con el valor del amortiguamiento como el producto del coeficiente de amortiguamiento y la velocidad:

$$F = c \cdot v_0 \quad (6.64)$$

La respuesta entre el aborbedor y la chimenea se consideró en contrafase y de forma sinusoidal, extrayendo las amplitudes máximas en resonancia dadas en la **Tabla 5.8**, el desplazamiento relativo es:

$$\delta_{22} = 0,017 \cdot \sin(2\pi \cdot 2,618 \cdot t) \text{ m} \quad (6.65)$$

Derivando la ecuación (6.60) con respecto al tiempo determinamos la amplitud de la velocidad como:

$$v_0 = 0,017 \cdot (2\pi \cdot 2,618) = 0,28 \frac{m}{s} \quad (6.66)$$

El coeficiente de amortiguamiento extraído de la **Tabla 6.2** es:

$$c = 70 \frac{N \cdot s}{m} \quad (6.67)$$

Reemplazando (6.66) y (6.67) en la ecuación (6.54):

$$F = 70 \cdot 0,28 = 19,6 N \quad (6.68)$$

Como la carga es excesivamente baja, lo cual a partir de esto no se realizan cálculos adicionales de resistencia de materiales.

En definitiva las dimensiones requeridas para el diseño para el absorbedor son extraídas de la **Tabla 6.2**:

$$\begin{aligned} 2a &= 53 \text{ mm} \\ h &= 1 \text{ mm} \\ l &= 40 \text{ mm} \\ 2r &= 25 \text{ mm} \end{aligned} \quad (6.69)$$

Donde:

- Diámetro interior del cilindro ($2a$)
- Huelgo (h)
- Longitud del Pistón (l)
- Diámetro del vástago ($2r$)

6.5.3. Diseño de los elementos elásticos

El elemento elástico que se diseñó en este Proyecto Integrador, es del tipo resorte helicoidal de compresión, formado por alambre redondo de acero inoxidable AISI 304. Para el cálculo del resorte se emplearon los lineamientos seguidos en el libro de diseño en ingeniería mecánica de Shigley (Budynas & Keith Nisbett [9]).

De los cálculos realizados en el capítulo anterior, la rigidez del sistema absorbedor debe ser:

$$k_e = 17346 \text{ N/m} \quad (6.70)$$

De la Ecuación (6.71) la rigidez del sistema propuesto en la solución C es:

$$k_e = \left[k_{e,k} + \frac{mg}{L} \right] \text{ N/m} \quad (6.71)$$

Y la rigidez de cada resorte es:

$$k = 1,5 \cdot k_{e,k} \text{ N/m} \quad (6.72)$$

Como el absorbedor esta sujeto a través de cables de acero, como ya se demostró anteriormente se introduce una rigidez extra debido a la energía potencial gravitatoria, para determinar el valor de la rigidez del resorte se construyo la **Tabla 6.3** donde se sintoniza el absorbedor a la frecuencia natural para diversas longitudes de péndulo y se obtiene el valor acorde de la rigidez que debe ser proporcionada por el resorte.

Longitud del Péndulo L [m]	$k_{e,k}$ [N/m]	k [N/m]
0,4	15774	10516
0,45	15948	10632
0,50	16088	10725
0,55	16203	10802
0,60	16298	10865
0,65	16378	10919
0,70	16448	10965
0,75	16508	11005

Tabla 6. 3 Rigidez k del resorte necesaria según longitud del péndulo

Se recomiendan algunas condiciones de diseño a saber:

1. Rigidez de un resorte:

La rigidez de un resorte está definida como:

$$k = \frac{d^4 \cdot G}{8 \cdot D^3 \cdot N_a} \quad (6.73)$$

Donde:

- d Diámetro del alambre que conforma el resorte.
- G Modulo de Corte del material (AISI 304).
- D Diámetro medio del resorte
- N_a Número de espiras activas del resorte

Al tratarse de resortes de compresión, en este diseño se decidió utilizar el cilindro del amortiguador viscoso como contenedor de los resortes; por ello para el diseño del resorte se debe partir de un diámetro mayor al diámetro del vástago y menor al diámetro de la camisa del cilindro del amortiguador, por ende el diámetro interno del resorte (D menos d) y el diámetro exterior del resorte (D más d) debe ser:

$$\begin{aligned} 25mm &\leq D - d \\ 53mm &\geq D + d \end{aligned} \quad (6.74)$$

El modulo de corte G del AISI 304 es:

$$G = 69 \cdot 10^9 \text{ Pa} \quad (6.75)$$

Con estos valores se construyó la **Tabla 6.4** donde se determina k del resorte para diferentes configuraciones utilizando la ecuación (6.73).

Diámetro del Alambre d [mm]	Diámetro medio del resorte D [mm]	Número de espiras Activas N_a [n]	Rigidez del resorte k [N/m]
2,0	27	3	2337
2,5	27	3	5706
3,0	28	3	10608
3,5	29	5	10614
4,0	29	9	10059
4,5	30	12	10916
5,0	30	19	10508

Tabla 6. 4 Rigidez del resorte según sus dimensiones

Según las **Tablas 6.3 y 6.4** el valor más acorde al necesario en este proyecto final es el resorte que reúne las siguientes características:

$$\begin{aligned}d &= 3,5mm \\ D &= 29mm \\ N_a &= 5\end{aligned}\tag{6.76}$$

Dando una rigidez k de:

$$k = 10614 \frac{N}{m}\tag{6.77}$$

Paso siguiente fue verificar que se verifiquen diversas condiciones de diseño y de resistencia.

2. Índice de Resorte C :

$$4 \leq C \leq 12\tag{6.78}$$

$$C = \frac{D}{d}\tag{6.79}$$

El índice C está definido como relación entre el diámetro medio del resorte y el diámetro del alambre, ya que para índices más bajos son más difíciles de formar pudiendo provocar agrietamientos en la superficie, mientras que los resortes con índices más altos suelen enredarse con bastante frecuencia por lo que necesitan empaque individual.

Reemplazando (6.76) en la ecuación (6.79) resulta:

$$C = \frac{29mm}{3,5mm} = 8,3\tag{6.80}$$

Verifica correctamente

3. Intervalo de espiras activas:

$$3 \leq N_a \leq 15 \quad (6.81)$$

El intervalo de espiras activas establecidas en el intervalo definido en la Ecuación (6.81) ya que se mantiene la linealidad cuando un resorte está a punto de cerrarse. Éste tipo de resortes es idealmente lineal, en la práctica es casi lineal, pero no en cada extremo de la curva de fuerza-deflexión. La fuerza de resorte no se puede reproducir para deflexiones pequeñas, y cerca de la cerradura comienza el comportamiento no lineal a medida que el número de espiras activas disminuye. El resorte seleccionado posee 5 espiras activas.

Verifica correctamente

4. Factor de Curvatura:

Determinamos el factor de curvatura, que es una corrección a suponer que el resorte permanece recto. Sin embargo, la curvatura del alambre incrementa el esfuerzo en el interior del resorte y lo disminuye sólo un poco en el exterior.

$$K_b = \frac{4 \cdot C + 2}{4 \cdot C - 3} \quad (6.82)$$

Reemplazando (6.80) en la ecuación (6.82) resulta

$$K_b = \frac{4 \cdot 8,3 + 2}{4 \cdot 8,3 - 3} = 1,2 \quad (6.83)$$

5. Resistencia mínima a la tensión:

La ecuación para el cálculo de la resistencia mínima a la tensión.

$$S_{ut} = \frac{A}{d^m} \quad (6.84)$$

De la **Figura 6.11** para acero inoxidable obtenemos:

$$A = 2065 \text{MPa} \cdot \text{mm}^m \quad (6.85)$$

$$m = 0,263 \quad (6.86)$$

Material	ASTM núm.	Exponente m	Diámetro, pulg	A , kpsi · pulg ^m	Diámetro, mm	A , MPa · mm ^m	Costo relativo del alambre
Alambre de piano*	A228	0.145	0.004-0.256	201	0.10-6.5	2 211	2.6
Alambre T y R en aceite†	A229	0.187	0.020-0.500	147	0.5-12.7	1 855	1.3
Alambre estirado duro‡	A227	0.190	0.028-0.500	140	0.7-12.7	1 783	1.0
Alambre al cromo vanadio§	A232	0.168	0.032-0.437	169	0.8-11.1	2 005	3.1
Alambre al cromo silicio¶	A401	0.108	0.063-0.375	202	1.6-9.5	1 974	4.0
Alambre inoxidable 302#	A313	0.146	0.013-0.10	169	0.3-2.5	1 867	7.6-11
		0.263	0.10-0.20	128	2.5-5	2 065	
		0.478	0.20-0.40	90	5-10	2 911	
Alambre de bronce fosforado**	B159	0	0.004-0.022	145	0.1-0.6	1 000	8.0
		0.028	0.022-0.075	121	0.6-2	913	
		0.064	0.075-0.30	110	2-7.5	932	

*La superficie es lisa, sin defectos y tiene un acabado brillante y lustroso.

†Tiene escamas ligeras debido al tratamiento térmico, que se deben remover antes del galvanizado.

‡La superficie es lisa y brillante sin marcas visibles.

§Alambre revenido de calidad aeronáutica; también se obtiene recocido.

¶Revenido a Rockwell C49, pero se puede obtener sin revenir.

#Acero inoxidable tipo 302.

**Temple CA510.

Fuente: Budynas & Keith Nisbett [9]

Figura 6. 11 Constantes A y m de la resistencia de tensión mínima

Reemplazando (6.85) y (6.86) en la ecuación (6.84):

$$S_{ut} = \frac{2065 \text{ MPa} \cdot \text{mm}^m}{(3,5 \text{ mm})^{0,263}} = 1485,36 \text{ MPa} \quad (6.87)$$

6. Esfuerzo de torsión:

Luego de la **Figura 6.12**, donde se enumera la equivalencia del esfuerzo de torsión al de tensión empleando un cálculo por energía de distorsión:

$$S_{sy} = 0,35 \cdot S_{ut} \quad (6.88)$$

Material	Porcentaje máximo de la resistencia a la tensión	
	Antes de la remoción de la deformación (incluye K_W o K_B)	Después de la remoción de la deformación (incluye K_s)
Alambre de piano y acero al carbono estirado en frío	45	60-70
Acero al carbono templado y revenido y acero de baja aleación	50	65-75
Aceros inoxidables austeníticos	35	55-65
Aleaciones no ferrosas	35	55-65

Fuente: Budynas & Keith Nisbett [9]

Figura 6. 12 Esfuerzos de torsión máximos permisibles de resortes helicoidales de compresión en aplicaciones estáticas

Reemplazando (6.87) en la ecuación (6.88):

$$S_{sy} = 0,35 \cdot 1485,36 \text{MPa} = 520 \text{MPa} \quad (6.89)$$

7. Fuerza Máxima admisible:

Se calcula la fuerza máxima que soportará el resorte:

$$F_s = \frac{\pi \cdot d^3 \cdot S_{sy}}{8 \cdot K_b \cdot D} \quad (6.90)$$

Reemplazando (6.76), (6.83) y (6.89) en la ecuación (6.90):

$$F_s = \frac{\pi \cdot (0,0035 \text{m})^3 \cdot 520 \cdot 10^6 \text{Pa}}{8 \cdot 1,2 \cdot 0,029 \text{m}} = 2589 \text{N} \quad (6.91)$$

8. Fuerza Máxima de operación:

Se limita el punto de operación del resorte como:

$$F_{\max} = \frac{7}{8} F_s \quad (6.92)$$

Definiendo por lo tanto,

$$F_s = (1 + \varepsilon) F_{\max} \quad (6.93)$$

$$\varepsilon \geq 0,15 \quad (6.94)$$

Se recuerda que el desplazamiento máximo del absorbedor es de 17mm más una precarga de 3mm, por lo que la fuerza actuante sobre el resorte será de:

$$F_{\max} = k \cdot x$$

$$F_{\max} = 10614 \frac{\text{N}}{\text{m}} \cdot 0,02 \text{m} = 212,2 \text{N} \quad (6.95)$$

Por lo que la fuerza ejercida es aproximadamente un 8% de la fuerza máxima admisible, esto es:

$$F_{\max} = 0,08 \cdot F_s$$

Verifica correctamente

9. Longitud Sólida:

La longitud sólida se calcula para resorte amolado y escuadrado (según la **Figura 6.13**) como:

$$L_s = d \cdot N_t \quad (6.96)$$

Y el número total de espiras:

$$N_t = N_a + 2 \quad (6.97)$$

Término	Tipo de extremos de resortes			
	Plano	Plano y esmerilado	A escuadra y cerrado	A escuadra y esmerilado
Espiras de extremo, N_e	0	1	2	2
Espiras totales, N_t	N_a	$N_a + 1$	$N_a + 2$	$N_a + 2$
Longitud libre, l_0	$pN_a + d$	$p(N_a + 1)$	$pN_a + 3d$	$pN_a + 2d$
Longitud sólida, L_s	$d(N_t + 1)$	dN_t	$d(N_t + 1)$	dN_t
Paso, p	$(l_0 - d)/N_a$	$l_0/(N_a + 1)$	$(l_0 - 3d)/N_a$	$(l_0 - 2d)/N_a$

Fuente: Budynas & Keith Nisbett [9]

Figura 6. 13 Fórmulas para calcular las dimensiones de resortes de compresión

Reemplazando (6.76) en la ecuación (6.96):

$$L_s = 0,0035m \cdot 7 = 0,00245 = 24,5mm \quad (6.98)$$

10. Factor de Seguridad al cierre:

El factor de seguridad al cierre n_s , lo que implica que mínimamente el resorte deberá ser un veinte por ciento más alto que su altura sólida (espiras en contacto).

$$n_s \geq 1,2 \quad (6.99)$$

El espacio que se posee en el amortiguador (**Figura 6.14**) es de 50mm, la precarga que colocaremos será de 3mm adicionales por lo que la longitud libre del resorte seleccionado será de:

$$L_t = 48mm \quad (6.100)$$

Con lo que el factor de seguridad de la longitud sólida será de:

$$n_s = \frac{48}{24,5} = 1,96 > 1,2 \quad (6.101)$$

Verifica correctamente

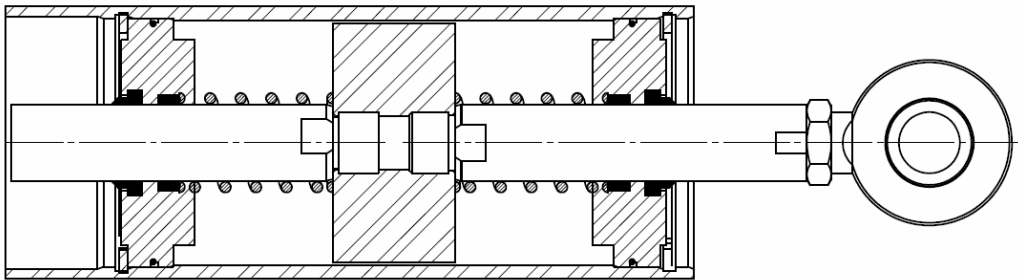


Figura 6. 14 Esquema del amortiguador viscoso con los resortes incorporados

11. Resistencia a la fatiga:

Por último, se debe calcular la resistencia a la fatiga del resorte. Se descubrió que el tamaño, el material y la resistencia a la tensión no tienen efecto en los límites de resistencia a la fatiga de alambre de resortes de acero en tamaño menores a 10mm.

Por éste motivo, se emplea como resistencia alterna y media admisible:

$$S_{sa} = 398MPa \text{ y } S_{sm} = 534MPa \quad (6.102)$$

Se utilizó una pretensión de 3mm por lo que la fuerza de pretensión es:

$$F_p = 10614 \frac{N}{m} \cdot 0,003m$$

$$F_p = 32N \quad (6.103)$$

12. Componente alterna de la Fuerza:

Se tomó a ésta cuya componente de fuerza mínima igual a cero y la fuerza máxima será la ya mencionada en la ecuación (6.95).

$$F_a = \frac{F_{m\acute{a}x} - F_{m\acute{i}n}}{2} \quad (6.104)$$

$$F_a = \frac{212,2N - 0N}{2} = 106,1N \quad (6.105)$$

13. Componente media de la Fuerza:

$$F_m = \frac{F_{m\acute{a}x} + F_{m\acute{i}n}}{2} \quad (6.106)$$

$$F_m = \frac{170N + 0N}{2} = 106,1N \quad (6.107)$$

14. Componente alterno del esfuerzo cortante:

La componente alternante del esfuerzo cortante:

$$t_a = K_b \cdot \frac{8 \cdot F_a \cdot D}{\pi \cdot d^3} \quad (6.108)$$

Reemplazando (6.76), (6.83) y (6.105) en la ecuación (6.108):

$$t_a = 1,2 \cdot \frac{8 \cdot 106,1N \cdot 0,029m}{\pi \cdot (0,0035m)^3} = 219MPa \quad (6.109)$$

15. Componente media del esfuerzo cortante:

La componente media del esfuerzo cortante:

$$t_m = K_b \cdot \frac{8 \cdot F_m \cdot D}{\pi \cdot d^3} \quad (6.110)$$

Reemplazando (6.76), (6.83) y (6.107) en la ecuación (6.110):

$$t_m = 1,2 \cdot \frac{8 \cdot 106,1N \cdot 0,029m}{\pi \cdot (0,0035m)^3} = 219MPa \quad (6.111)$$

16. Modulo de ruptura por torsión a fatiga:

El módulo de ruptura por torsión en fatiga es:

$$S_{su} = 0,67 \cdot S_{ut} \quad (6.112)$$

$$S_{su} = 0,67 \cdot 1485,36MPa = 995,2MPa \quad (6.113)$$

17. Criterio de falla de Goodman:

Utilizando el criterio de falla de Goodman:

$$S_{se} = \frac{S_{sa}}{1 - \left(\frac{S_{sm}}{S_{su}} \right)} \quad (6.114)$$

Reemplazando (6.102) y (6.113) en la ecuación (6.114):

$$S_{se} = \frac{398MPa}{1 - \left(\frac{534MPa}{995,2MPa} \right)} = 389,2MPa \quad (6.115)$$

La componente de la amplitud a la resistencia S_{saf} del criterio de Goodman es:

$$S_{saf} = \frac{r \cdot S_{se} \cdot S_{su}}{r \cdot S_{su} + S_{se}} \quad (6.116)$$

$$r = \frac{\tau_a}{\tau_m} \quad (6.117)$$

Reemplazando (6.109) y (6.111) en la ecuación (6.117):

$$r = 1 \quad (6.118)$$

Reemplazando (6.113), (6.115) y (6.118) en la ecuación (6.116):

$$S_{saf} = \frac{389,2MPa \cdot 995,2MPa}{389,2MPa + 995,2MPa} = 279,8MPa \quad (6.119)$$

18. Factor de seguridad a la fatiga:

El factor de seguridad a la fatiga está dado por:

$$n_f = \frac{S_{sa}}{\tau_a} \quad (6.120)$$

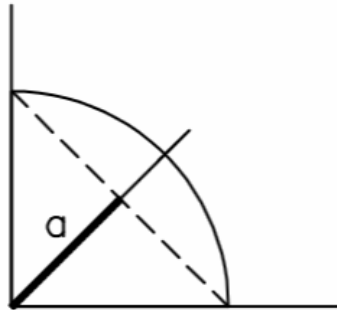
Reemplazando (6.109) y (6.119) en la ecuación (6.120):

$$n_f = \frac{279,8MPa}{219MPa} = 1,3 \quad (6.121)$$

Verifica, el resorte se adapta a las solicitaciones.

6.5.4. Cálculo de Soldadura según NBE EA-95

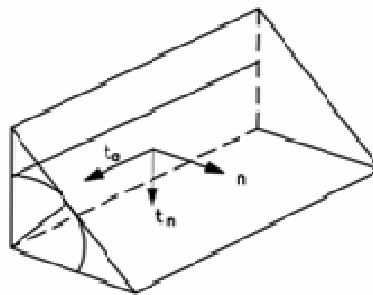
Se asimila el cordón de soldadura a un triángulo isósceles y se toma como sección de cálculo la definida por la altura del triángulo isósceles, por ser la de menor sección.



Fuente: NBE EA-95 [10]

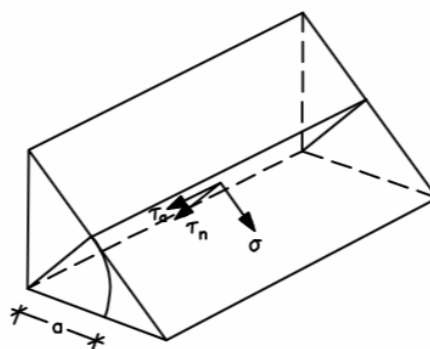
Figura 6. 15 Perfil de soldadura

Se supone tensiones constantes a lo largo del plano definido por la altura “ a ”, cuya superficie es $a.l$, con l longitud de cordón de soldadura.



Fuente: NBE EA-95 [10]

Figura 6. 16 Perfil de soldadura, diagrama de direcciones



Fuente: NBE EA-95 [10]

Figura 6. 17 Tensiones del perfil de soldadura

La condición de seguridad de una soldadura, por ende, será la que las tensiones de comparación σ_c obtenidas de las acciones ponderadas sean inferiores a la resistencia de cálculo del acero.

$$\sigma_c = \sqrt{\sigma^2 + 1,8 \cdot (\tau_n^2 + \tau_a^2)} \leq \sigma_u \quad (6.122)$$

La tensión de comparación σ_c está referida al plano de la garganta de la soldadura, en general resulta más sencillo para el cálculo proyectar la sección de garganta sobre una de las caras del cordón. La relación resulta:

$$\sigma = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot (n + t_n) \quad (6.123)$$

$$\tau_n = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot (n - t_n) \quad (6.124)$$

$$\tau_a = t_a \quad (6.125)$$

UNION CON CORDONES LONGITUDINALES Y TRANSVERSALES (Caso 1) (Figura 6.18)

Consideramos que el esfuerzo cortante actúa solamente en aquellos cordones cuya longitud es paralela a la fuerza actuante y que puede ser considerado como distribuido uniformemente sobre su garganta actuante por lo tanto:

$$t_a = \tau_a = \frac{F}{2 \cdot a \cdot L_z} \leq \sigma_u \quad (6.126)$$

Por otro lado los cordones restantes están sometidos al esfuerzo flector, tenemos en cuenta el área total de la sección de garganta del cordón.

$$n = \frac{M}{W}; \quad \sigma_n = \tau_n = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot n \quad (6.127)$$

Tenemos entonces:

$$\sigma_c = \sqrt{\sigma_n^2 + 1,8 \cdot \tau_n^2} = \sqrt{\frac{2,8 \cdot n^2}{2}} = 1,18 \cdot n = 1,18 \frac{M}{W} \leq \sigma_u \quad (6.128)$$

$$W = a \cdot L1 \cdot L2 \quad (6.129)$$

En nuestro caso el cordón de soldadura es de **5mm**, las dimensiones de la estructura de la **Figura 6.18** son:

$$\begin{aligned}
 a &= 2,5 \text{ mm} \\
 e &= 0,3 \text{ m} \\
 L1 &= 0,105 \text{ m} \\
 L2 &= 0,14 \text{ m} \\
 F &= 215,82 \text{ N}
 \end{aligned}
 \tag{6.130}$$

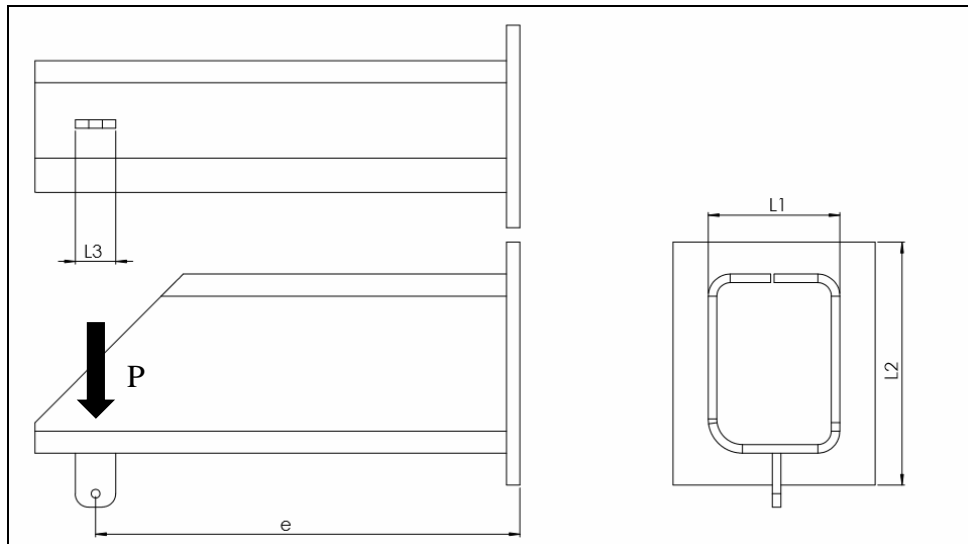


Figura 6. 18 Travesaño de sujeción

Se utiliza Acero inoxidable 304L con límite de fluencia σ_u de 170 MPa. Para los cordones laterales tenemos:

$$t_a = \tau_a = \frac{215,82}{2 \cdot 0,0025 \cdot 0,14} \leq \sigma_u
 \tag{6.131}$$

$$t_a = \tau_a = 0,31 \leq 170 \text{ MPa}
 \tag{6.132}$$

Verifica correctamente.

Por otro lado los cordones sometidos a flexión:

$$W = 0,0025 \cdot 0,105 \cdot 0,14 = 3,675 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3
 \tag{6.133}$$

$$M = F \cdot e = 215,82 \cdot 0,3 = 64,75 \text{ Nm}
 \tag{6.134}$$

$$\sigma_c = 1,18 \cdot \frac{64,75}{3,675 \cdot 10^{-5}} \leq \sigma_u
 \tag{6.135}$$

$$\sigma_c = 2,08 \leq 170 \text{ MPa}
 \tag{6.136}$$

Lo cual también verifica correctamente

Por último calculamos la soldadura de la oreja que sostiene el cable. Es una unión con cordones frontales sometidos a tracción.

$$n = \frac{F}{2 \cdot L3 \cdot a} \quad (6.137)$$

Sustituyendo (6.137) en las ecuaciones (6.123) y (6.124):

$$\sigma = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \left(\frac{F}{2 \cdot L3 \cdot a} \right) \quad (6.138)$$

$$\tau_n = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \left(\frac{F}{2 \cdot L3 \cdot a} \right) \quad (6.139)$$

$$\tau_a = 0 \quad (6.140)$$

Reemplazamos (6.138), (6.139) y (6.140) en Ecuación (6.122):

$$\sigma_c = \sqrt{\left(\frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \left(\frac{F}{2 \cdot L3 \cdot a} \right) \right)^2 + 1,8 \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \left(\frac{F}{2 \cdot L3 \cdot a} \right) \right)^2} \leq \sigma_u \quad (6.141)$$

$$\sigma_c = 1,18 \cdot \left(\frac{F}{2 \cdot L3 \cdot a} \right) \leq \sigma_u \quad (6.142)$$

$$\sigma_c = 1,18 \cdot \left(\frac{215,82}{2 \cdot 0,03 \cdot 0,0025} \right) \leq \sigma_u \quad (6.143)$$

$$\sigma_c = 1,7 \leq 170 \text{ MPa} \quad (6.144)$$

Lo cual verifica para la carga necesaria, los cálculos de soldadura del punto de sujeción del elemento de inercia (aro del absorbidor) no se realizará, ya que las dimensiones son la misma de las que posee al caso recientemente analizado.

UNION CON CORDONES LONGITUDINALES Y TRANSVERSALES (Caso 2) (Figura 6.19)

En nuestro caso el cordón de soldadura es de **5mm**, las dimensiones de la estructura de la **Figura 6.19** son:

$$\begin{aligned}
 a &= 2,5 \text{ mm} \\
 e &= 0,06 \text{ m} \\
 L1 &= 0,17 \text{ m} \\
 L2 &= 0,17 \text{ m} \\
 F &= 490,5 \text{ N}
 \end{aligned}
 \tag{6.145}$$

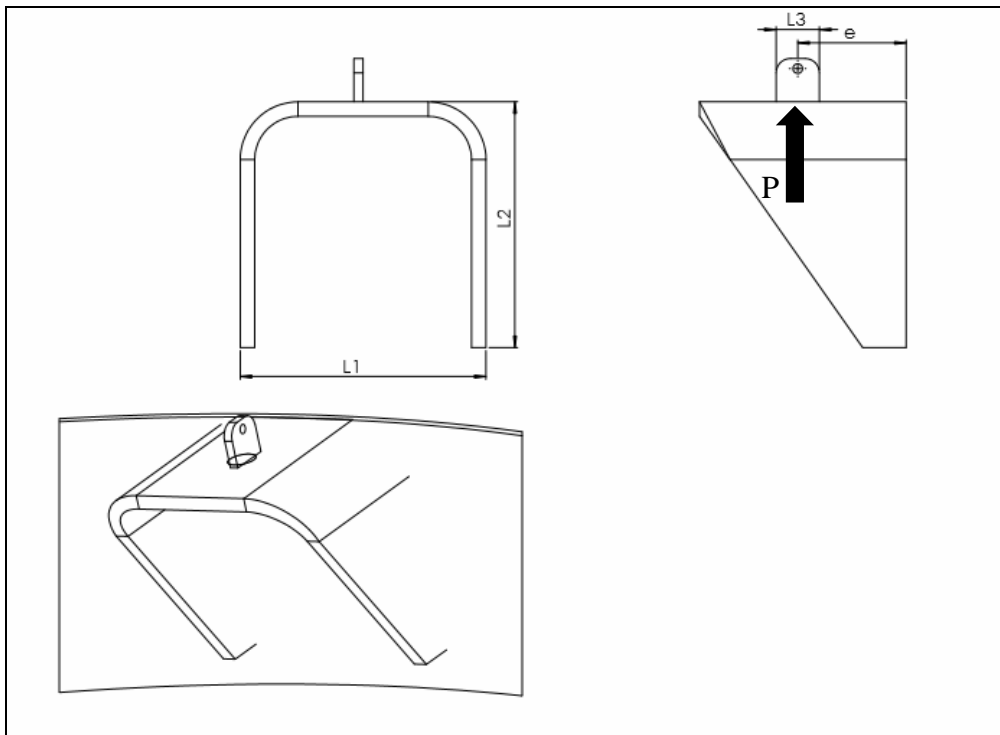


Figura 6. 19 Punto de sujeción del Elemento de Inercia

Para los cordones laterales tenemos:

$$t_a = \tau_a = \frac{490,5}{2 \cdot 0,0025 \cdot 0,17} \leq \sigma_u
 \tag{6.146}$$

$$t_a = \tau_a = 0,31 \leq 170 \text{ MPa}
 \tag{6.147}$$

Verifica correctamente.

Por otro lado los cordones sometidos a flexión:

$$W = 0,0025 \cdot 0,105 \cdot 0,14 = 7,255 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3
 \tag{6.148}$$

$$M = F \cdot e = 490,5 \cdot 0,06 = 29,43 \text{ Nm} \quad (6.149)$$

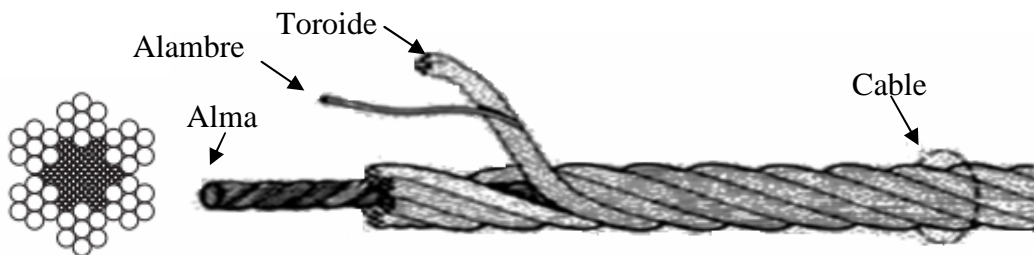
$$\sigma_c = 1,18 \cdot \left(\frac{29,43}{7,255 \cdot 10^{-5}} \right) \leq \sigma_u \quad (6.150)$$

$$\sigma_c = 0,41 \leq 170 \text{ MPa} \quad (6.151)$$

Lo cual también verifica correctamente.

6.5.5. Verificación de cable se sujeción

Los cables metálicos que utilizaremos son con arrollamiento tipo torzal regular, como se ilustra en la **Figura 6.18**. El torzal regular, es el estándar aceptado, tiene el alambre enrollado en una dirección para constituir los toroides y los toroides torcidos en la dirección opuesta, a fin de formar el cable. En el cable terminado, los alambres visibles están colocados casi paralelos al eje del cable. Los cables de torzal regular no se tuercen y son fáciles de manejar.



Fuente: Cables del Mediterráneo [11]

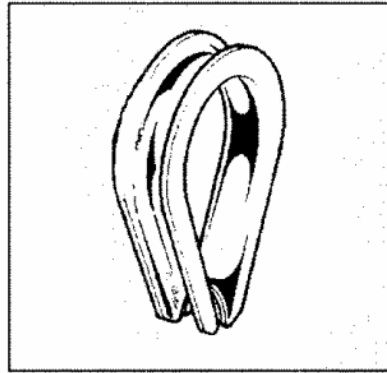
Figura 6. 20 Cable metálico tipo torzal

Se selecciona el cable a partir de un catálogo del fabricante, Cables del Mediterráneo [11]. Utilizando un cable de 5mm de diámetro nominal, compuesto por 19 toroides de 7 alambres cada uno, de acero inoxidable AISI 316 ya que posee bajo porcentaje de carbono y un contenido adecuado de molibdeno, haciéndolo resistente a la corrosión.

El cable seleccionado posee una carga mínima a la rotura de 1420 *kgf* cada uno. Ya que utilizamos tres cables, tenemos un coeficiente de seguridad de:

$$CS = \frac{1420 \cdot 3}{66} \cong 65 \quad (6.152)$$

Asimismo, para resguardar el cable y aumentar su durabilidad se utilizan guardacabos (**Figura 6.21**) que se seleccionan del catálogo del fabricante ya mencionado.

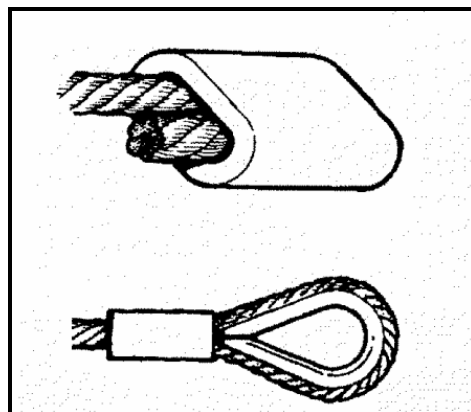


Fuente: Cables del Mediterráneo [11]

Figura 6. 21 Guardacabos

Como la elección del cable es de suma importancia, también lo es la fijación o terminación de los mismos. Es por esto que se debe emplear fijaciones de elevados módulos elásticos y alta resistencia.

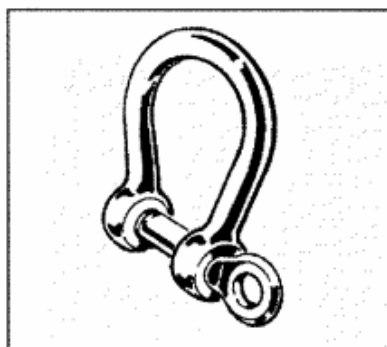
Para cables flexibles, un método muy utilizado es el de prensado de casquillos (**ver Figura 6.22**)



Fuente: Cables del Mediterráneo [11]

Figura 6. 22 Casquillo

A su vez se colocará grilletes que soportan 300 kgf (**Figura 6.23**) para sostener la estructura del absorbedor.



Fuente: Cables del Mediterráneo [11]

Figura 6. 23 Grillete Lira

6.6. Estudio de Costos

Se realizó un estudio de costos, el cual se separa en tres grandes partes. El absorbedor, donde se colocaron los elementos constituyentes de la estructura diseñada. En una segunda instancia se calculan los costos de las piezas que integran el elemento de disipación. Por último, se tiene en cuenta el valor del montaje y alquiler de maquinarias. Los precios están expresados en pesos argentinos y fueron obtenidos mediante la consulta en empresas dedicadas a la metalúrgica y venta de insumos. Se tuvo en cuenta tanto la materia prima como el proceso y mano de obra (**Tabla 6.5**).

	Elemento	Plano Nº	Cant.	Costo unit.	Costo total
Absorbedor	Soporte soldado chimenea absorbedor	602	3	908	2724
	Soporte soldado aro amortiguador	603	3	430	1290
	Soporte soldado chimenea amortiguador	604	3	710	2130
	Soporte aro absorbedor	507	3	442	1326
	Aro absorbedor (anillo + soldado)	601	3	2300	6900
	Lastre 2,25kg	509	6	526	3156
	Lastre 1kg	509	6	260	1560
	Lastre 0,5kg	509	6	160	960
	Cable armado	508	3	520	1560
	Lira	Comercial	6	720	4320
	Bulón M20x70 cal. 12.9	Comercial	3	35	105
	Tuerca autofrenante	Comercial	12	9	108
	Bulón M20x30 cal. 12.9	Comercial	9	26	234
	Subtotal				26373
Amortiguador	Guía	514	6	340	2040
	Pistón	515	3	148	444
	Resorte	518	6	170	1020
	Seeger	Comercial	6	40	240
	Tubo	511	3	328	984
	Vástago delantero	512	3	390	1170
	Vástago trasero	513	3	276	828
	Rótula	Comercial	3	930	2790
	Sellos	Comercial	3	56	168
	Armado		3	180	540
	Subtotal				10224
Montaje	Mano de obra montaje y soldado				6300
	Alquiler maquinarias				4200
	Subtotal				10500
Total				36597	

Tabla 6. 5 Análisis de Costos de Fabricación del Absorbedor

Las empresas consultadas para provisión de materiales o servicios necesarios para la fabricación y montaje del sistema absorbedor de vibraciones pertenecen al ámbito local y se detallan en la **Tabla 6.6**.

Proveedor	Rubro	Ubicación
GA.BE.BA.DI	Fundición gris y nodular	Las varillas
Acerco	Hierros y Chapas	Córdoba Capital
Bulonera Norte	Ferretería industrial	Córdoba Capital
Cyclo SRL	Acero inoxidable chapa y barra	Córdoba Capital
Pucheta Hernán Héctor Ricardo	Cables de acero y elementos de izaje	Córdoba Capital
Horizon Sudamérica	Alquiler de Equipos de elevación	Córdoba Capital
Maquinarias Arco	Alquiler de Herramientas	Córdoba Capital
Hydrom SRL	Óleo Hidráulica	Córdoba Capital

Tabla 6. 6 Empresas a las que se les solicitó cotización

6.7. Conclusión del Capítulo

En presente capítulo se realizó una investigación sobre las diferentes configuraciones de los sistemas absorbedores y podemos poner en evidencia que existe una gran diversidad de soluciones a este problema, dichos sistemas solución son, en algunos casos, simples y en otros ya poseen un grado de complejidad más importante.

Se establecieron los lineamientos de diseño identificando cada parte del sistema absorbedor y en base a cálculos teóricos se pudieron determinar sus propiedades. Se seleccionó aquella configuración más simple. Se realizaron los correspondientes planos de conjunto y de detalle (Ver **Anexo III**) y se verificaron estructuralmente junto con los componentes auxiliares al mismo.

Se determinaron costos del sistema absorbedor recapitulando información sobre los proveedores de materiales y equipos disponibles en el mercado nacional, teniendo en cuenta los costos industriales para la fabricación del absorbedor.

6.8. Resumen del Capítulo

El capítulo 6 básicamente establece los lineamientos que llevaron al diseño mecánico del absorbedor, se analizaron distintas alternativas, se evaluaron la viabilidad de las mismas y se llegó a la selección de aquella propuesta de solución que, al criterio de los autores, resultó más apropiada para este proyecto.

6.9. Referencias

¹ http://www.gerb.com/index_sp.php

² <http://www.maurer-soehne.com/>

³ <http://www.multitech-vibration-control.co.uk/>

⁴ Balachandran, B., Magrab, E., “Vibrations”, Cengage Learning, Toronto, 2009.

⁵ Miroš, P., Shota, U., “Tuned Ball Absorber acting in one direction”, Institute of Theoretical and Applied Mechanics of the Academy of Sciences of the Czech Republic, Prague, 2005.

⁶ <http://www.famiq.com.ar/>

⁷ Rao, S., “Mechanical Vibrations”, Prentice Hall, Upper Saddle River, 2011.

⁸ <http://www.hardval.com.ar/canos.html>

⁹ Budynas, R., Keith Nisbett, J., “Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley”, McGraw Hill, México, 2008.

¹⁰ Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente, “NBE EA-95, Estructura de Acero en Edificación”, Gobierno de España, Madrid, 1996.

¹¹ <http://www.cablesmed.com/>

Conclusiones del Proyecto Integrador

Durante el desarrollo de este Proyecto Integrador los autores pudieron comprender la importancia de la evaluación de los efectos de las vibraciones inducidas por el viento sobre estructuras esbeltas. Para ello fue necesario realizar una investigación general de las acciones del viento sobre las estructuras, recurriéndose, en primer lugar, a normativas o estándares vigentes a nivel nacional y del extranjero con un importante esfuerzo de interpretación de dichos estándares y, en segundo lugar, a la bibliografía especializada afín al tema. Se llegó a percibir la complejidad del tema de este trabajo, ya que se trató con un fenómeno de la naturaleza, cuyas acciones son capaces de producir efectos resonantes sobre estructuras provocando daño o el colapso de las construcciones y acarrear pérdidas económicas, materiales y en el peor de los casos, humanas.

En relación a los objetivos del presente Proyecto Integrador, se cumplieron de forma satisfactoria obteniendo:

1. La determinación del conjunto de parámetros de un sistema absorbedor de vibraciones que mantiene a la estructura de estudio dentro de amplitudes de desplazamientos aceptables, garantizando una vida infinita en fatiga.
2. La configuración física del sistema absorbedor de vibraciones, con sus respectivos planos de conjunto, de detalle y de fabricación. Logrando un sistema de baja complejidad constructiva, bajo mantenimiento y alta durabilidad en el tiempo.

Con respecto al primer objetivo logrado en este Proyecto Integrador se pudieron establecer una serie de parámetros que dan como resultado vida infinita en fatiga de la estructura de estudio, considerando una flexibilidad para los mismos cuando estos requieran ser materializados, permitiendo una sintonización con la chimenea; dado que los parámetros reducidos de la estructura han sido calculados a través de diversos métodos (Métodos numéricos, Análisis de Elementos Finitos) y no sobre mediciones en la estructura real, obteniendo como resultado valores aproximados a la realidad.

Según el segundo objetivo logrado en este Proyecto Integrador se pudo determinar la configuración física de los elementos que componen el sistema absorbedor de vibraciones, estos elementos dan al sistema los valores que son requeridos por el primer objetivo del presente Proyecto Integrador, además se verificó la resistencia de los elementos del absorbedor a las sollicitaciones debidas a la operación del mismo sobre la estructura.

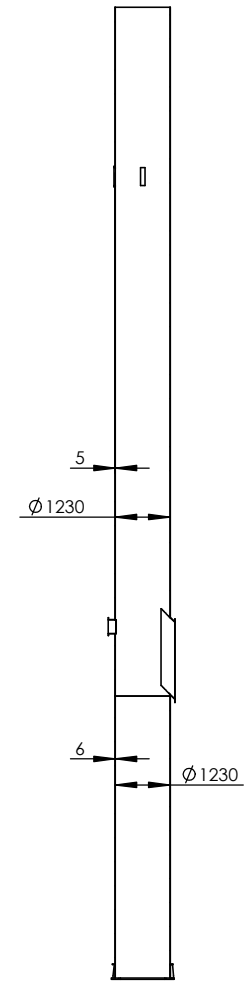
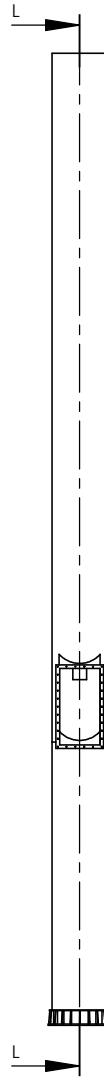
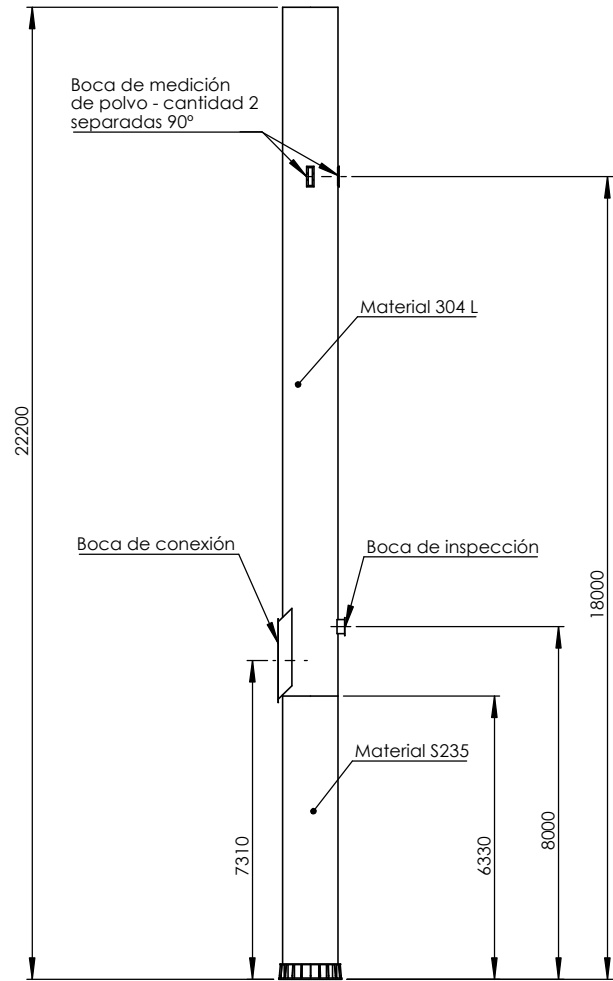
Si bien, lo desarrollado en este trabajo no requiere de complejidad tecnológica, se realizó una investigación y no se ha encontrado públicamente antecedentes de diseño y desarrollo de un sistema similar en el país, puede deberse a su complejidad teórica, así como también a las alternativas utilizadas comúnmente en las estructuras. Como ventaja principal se puede mencionar que el espacio necesario para la implementación es reducido y en altura. Las limitaciones de éste tipo de sistema están asociadas al sistema principal y se necesitan instrumentos de medición para el sintonizado y puesta a punto.

Finalmente, se puede dar como finalizado este Proyecto Integrador, dejando a través de la presente el fruto de tantos años de estudio; aunque el Proyecto Integrador sea una asignatura obligatoria para la obtención del título de grado, permite al estudiante tomar experiencia con desafíos que presenta la realidad, incentivando la investigación y búsqueda de herramientas adicionales a las que son enseñadas a lo largo de la carrera.

Ambos autores ya se encuentran insertos dentro del mercado laboral, uno desempeñando tareas de planificación de mantenimiento desde hace tres años y el otro abocado a tareas de diseño de producto hace ya más de cuatro años; a través de la siguiente se aprovecha para enviar un mensaje de sincero agradecimiento a aquellas personas que de forma directa o indirecta contribuyeron con la formación académica de los autores, siendo estos familiares, compañeros, amigos, directores del Proyecto, etc.

ANEXO I

Estructura de Estudio



CORTE L-L

Sin previa autorización se prohíbe la construcción de la pieza representada. Propiedad de FCFyN						Fecha: 22/12/2015
Material:						Dibujó:
Tratamiento Superficial	Rev. A	Escala 1:120	Tol. no Espec. ±5	Proyec. ISO 128		Revisó:
Trat. Térmico/ espesor						Aprobó:
Peso						Conjunto N°
Dureza						Sub Conjunto N°
Estructura de análisis del PI						Plano N° 1

ANEXO II

Amortiguamiento Estructural

Anexo II: Amortiguamiento Estructural

Matriz de amortiguamiento Estructural:

La matriz de amortiguamiento estructural se calcula a partir de las dimensiones estructurales, secciones de los elementos y amortiguamiento del material usado. No es práctico calcular la matriz de amortiguamiento de la misma manera que la rigidez, pues a diferencia del modulo de elasticidad, las propiedades de amortiguamiento del material no está bien establecidas, además esta matriz no tiene en cuenta la energía disipada por ejemplo en las conexiones metálicas (fricción, microgrietas, elementos no estructurales, etc.). Esta matriz se calcula a partir de las relaciones de amortiguamiento modal.

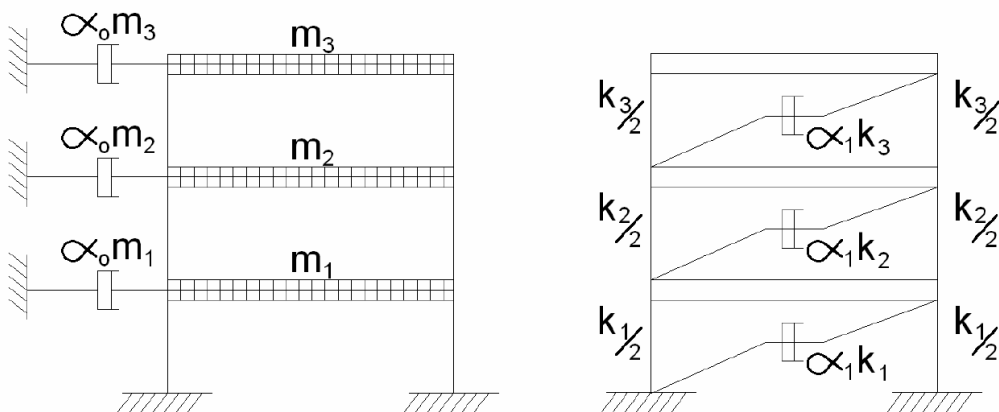
Utilizado en el análisis modal clásico de sistemas lineales. Se seguirá el siguiente procedimiento para armar la matriz de amortiguamiento modal para estructuras con ξ calculados experimentalmente.

Amortiguamiento de Rayleigh

La masa y la rigidez son proporcionales al amortiguamiento.

$$[C] = \{\alpha_o\}[m] \quad y \quad [C] = \{\alpha_1\}[k] \quad (\text{II-1})$$

A continuación se representa el modelo físico (**Figura II-1**).



Fuente: Chopra [1]

Figura II. 1 Modelo físico del Amortiguamiento de Rayleigh

El amortiguamiento proporcional a la rigidez representa la energía disipada en la deformación, mientras que el amortiguamiento proporcional a la masa representa el aire, el cual es despreciable para la mayoría de estructuras pequeñas, aunque ninguno de los dos amortiguamientos es apropiados en aplicaciones prácticas.

Relacionando ξ para un sistema con amortiguamiento generalizado, proporcional a la masa α_o , por el n -avo modo:

$$C_n = \alpha_o m_n \quad (\text{II-2})$$

Y el coeficiente de amortiguación modal:

$$C_n = 2m_n \xi_n \omega_n \quad (\text{II-3})$$

$$\xi_n = \frac{C_n}{2m_n \omega_n} = \frac{\alpha_o m_n}{2m_n \omega} = \frac{\alpha_o}{2} \frac{1}{\omega} \quad (\text{II-4})$$

ξ es inversamente proporcional a la frecuencia natural para el modo i -ésimo:

$$\alpha_o = 2\xi_i \omega_i \quad (\text{II-5})$$

Para sistemas con amortiguamiento proporcional a la rigidez:

$$C_n = \alpha_1 k_n = \alpha_1 \omega^2 m_n \quad (\text{II-6})$$

Pero:

$$C_n = 2m_n \xi \omega \quad (\text{II-7})$$

$$2m_n \xi \omega = \alpha_1 \omega^2 m_n \quad (\text{II-8})$$

$$\xi = \frac{\alpha_1}{2} \omega \quad (\text{II-9})$$

De la **Ecuación II-9** podemos ver que ξ aumenta linealmente con la frecuencia natural. Para el modo j -ésimo **Ecuación II-10**.

$$\alpha_1 = \frac{2\xi_j}{\omega_j} \quad (\text{II-10})$$

La variación del amortiguamiento con la frecuencia, no es consistente con los datos experimentales, que indican el mismo amortiguamiento para diferentes modos de vibración.

El amortiguamiento de Rayleigh es:

$$[C] = \alpha_o [m] + \alpha_1 [k] \quad (\text{II-11})$$

Para el n -avo modo de vibración:

$$\xi_n = \frac{\alpha_o}{2} \frac{1}{\omega_n} + \frac{\alpha_1}{2} \omega_n \quad (\text{II-12})$$

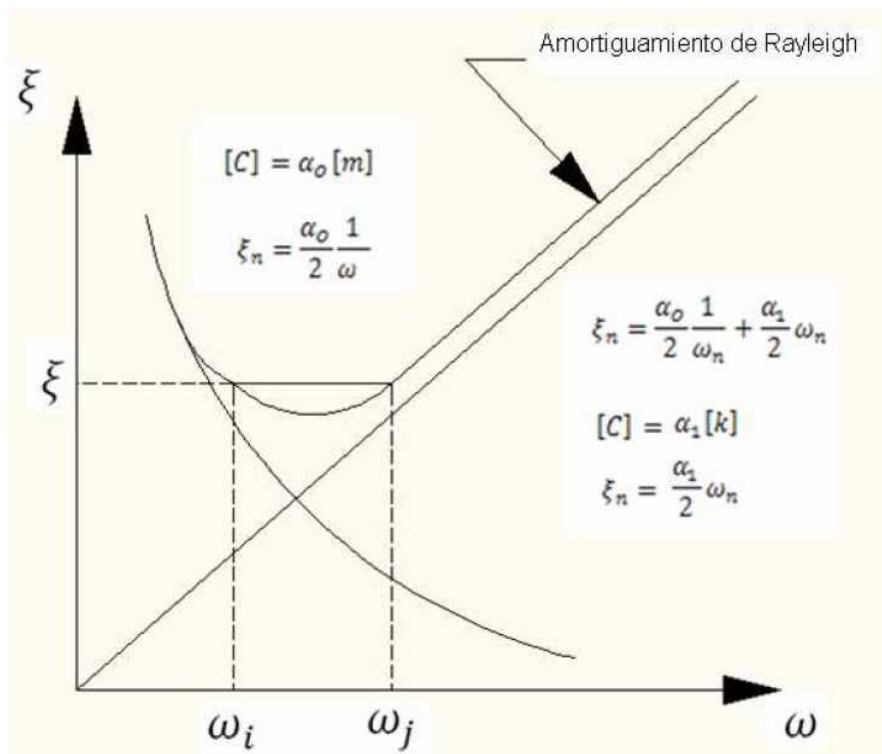
α_0 y α_1 Son determinantes específicamente para el modo i y j , en forma matricial:

$$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1/\omega_i & \omega_i \\ 1/\omega_j & \omega_j \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \alpha_0 \\ \alpha_1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \xi_i \\ \xi_j \end{Bmatrix} \quad (\text{II-13})$$

Despejando α_0 y α_1 , asumiendo que los 2 modos (i y j) tienen el mismo coeficiente de amortiguamiento ξ .

$$\alpha_0 = \xi \frac{2\omega_i\omega_j}{\omega_i + \omega_j} \quad \alpha_1 = \xi \frac{2}{\omega_i + \omega_j} \quad (\text{II-14})$$

Para aplicar este procedimiento, el amortiguamiento en cada modo se escoge para asegurar valores razonables de ξ en todos los modos que contribuyen significativamente a la respuesta dinámica, como se observa en la **Figura II-2** la variación del amortiguamiento con la frecuencia natural:



Fuente: Chopra [1]

Figura II. 2 Variación del coeficiente de amortiguación en función de la frecuencia natural

Referencia:

¹ Chopra, A., “Dinámica de las Estructuras”, Pearson, Nueva York, 2014.

ANEXO III

Planos de Diseño

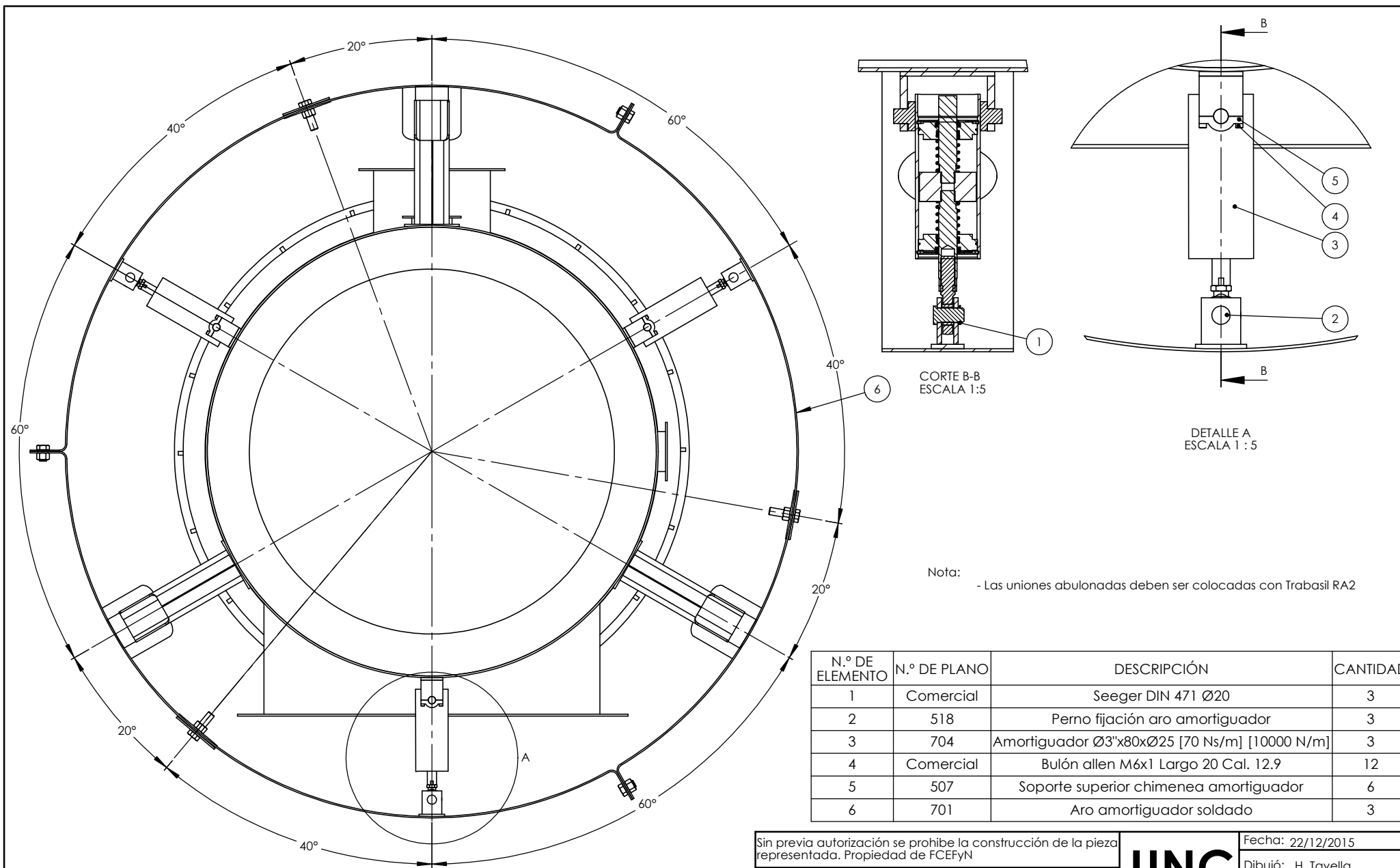
Anexo III: Planos de Diseño

Índice de Planos

Se enumera a continuación, una lista con los planos realizados para la construcción del absorbedor, diseñado en el presente trabajo final. Para una comprensión y localización más sencilla se ha realizado una codificación en el número de plano:

- 7XX – Conjuntos ensamblados
- 6XX – Subconjuntos soldados
- 5XX – Piezas

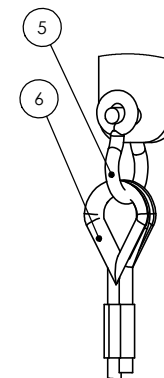
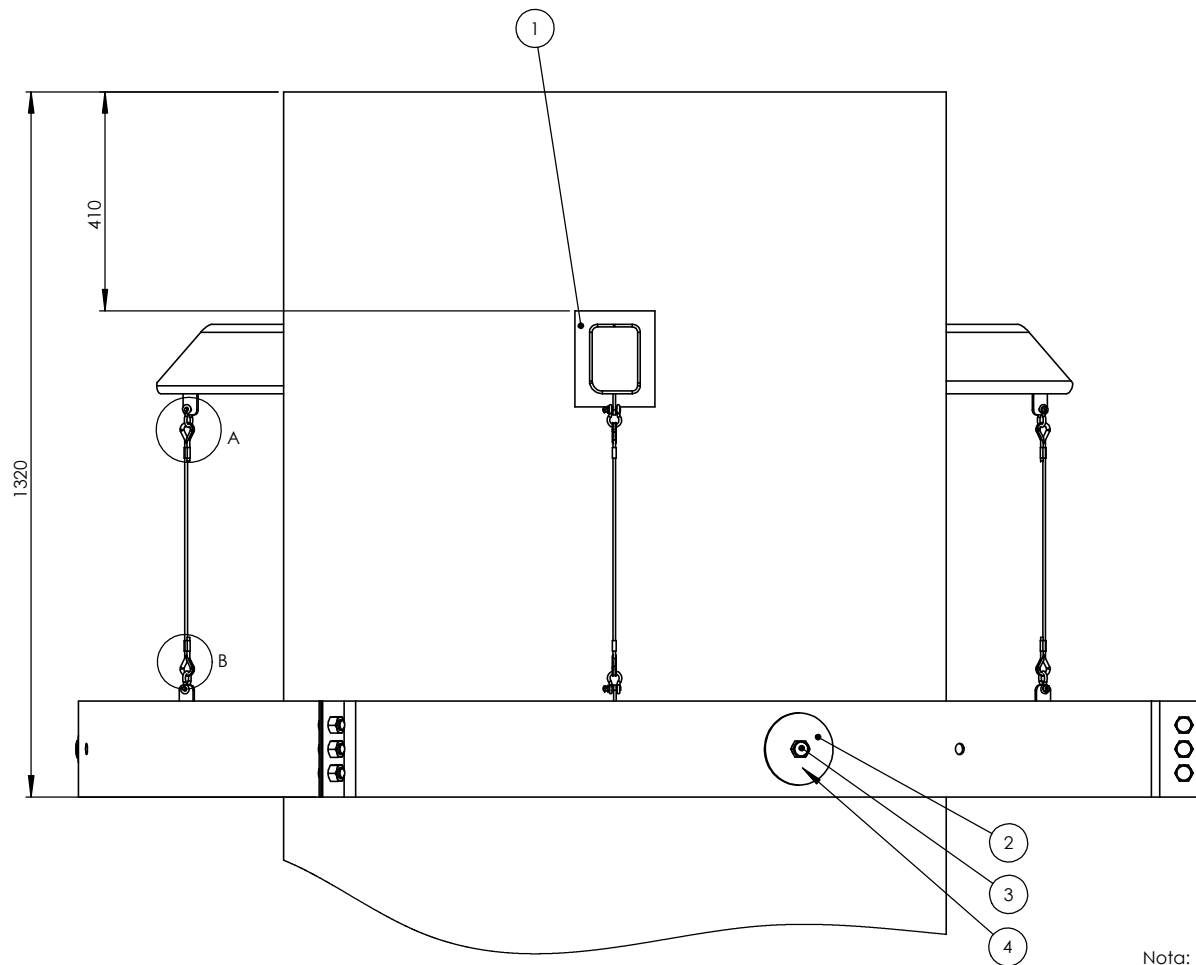
Hoja	Plano Nº	Descripción
AIII-2	701	Montaje plano A
AIII-3	702	Montaje plano B
AIII-4	703	Montaje plano C
AIII-5	704	Amortiguador
AIII-6	601	Aro absorbedor soldado
AIII-7	602	Soporte soldado chimenea absorbedor
AIII-8	603	Soporte soldado aro amortiguador
AIII-9	604	Soporte soldado chimenea amortiguador
AIII-10	605	Tubo soldado amortiguador
AIII-12	501	Soporte chimenea absorbedor
AIII-13	502	Base soporte chimenea absorbedor
AIII-14	503	Soporte aro chimenea
AIII-15	504	Soporte aro amortiguador
AIII-16	505	Base soporte aro amortiguador
AIII-17	506	Soporte chimenea amortiguador
AIII-18	507	Soporte superior chimenea amortiguador
AIII-19	508	Aro absorbedor
AIII-20	509	Cable armado
AIII-21	510	Lastre
AIII-22	511	Fijación tubo
AIII-23	512	Tubo
AIII-24	513	Vástago delantero
AIII-25	514	Vástago trasero
AIII-26	515	Guía
AIII-27	516	Pistón
AIII-28	517	Base soporte chimenea amortiguador
AIII-29	518	Perno fijación aro amortiguador
AIII-30	519	Resorte
AIII-31	520	Soporte superior chimenea amortiguador



Nota: - Las uniones abulonadas deben ser colocadas con Trabisil RA2

N.º DE ELEMENTO	N.º DE PLANO	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	Comercial	Seeger DIN 471 Ø20	3
2	518	Perno fijación aro amortiguador	3
3	704	Amortiguador Ø3"x80xØ25 [70 Ns/m] [10000 N/m]	3
4	Comercial	Bulón allen M6x1 Largo 20 Cal. 12.9	12
5	507	Soporte superior chimenea amortiguador	6
6	701	Aro amortiguador soldado	3

Sin previa autorización se prohíbe la construcción de la pieza representada. Propiedad de FCEfyN					UNC FCEfyN		Fecha: 22/12/2015 Dibujó: H. Tavella Revisó: E. Lupi Aprobó: H. Tavella
Material:							
Tratamiento Superficial	Rev.	Escala	Tol. no Espec.	Proyec. ISO 128			
	A	1:10	+5				
Trat. Térmico/ espesor		Montaje plano A				Plano N°	701
Peso						Plano N°	
Dureza						Plano N°	



DETALLE A
ESCALA 1 : 2

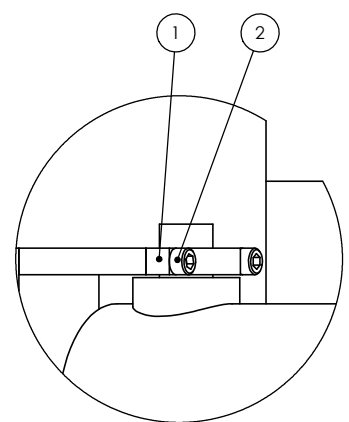
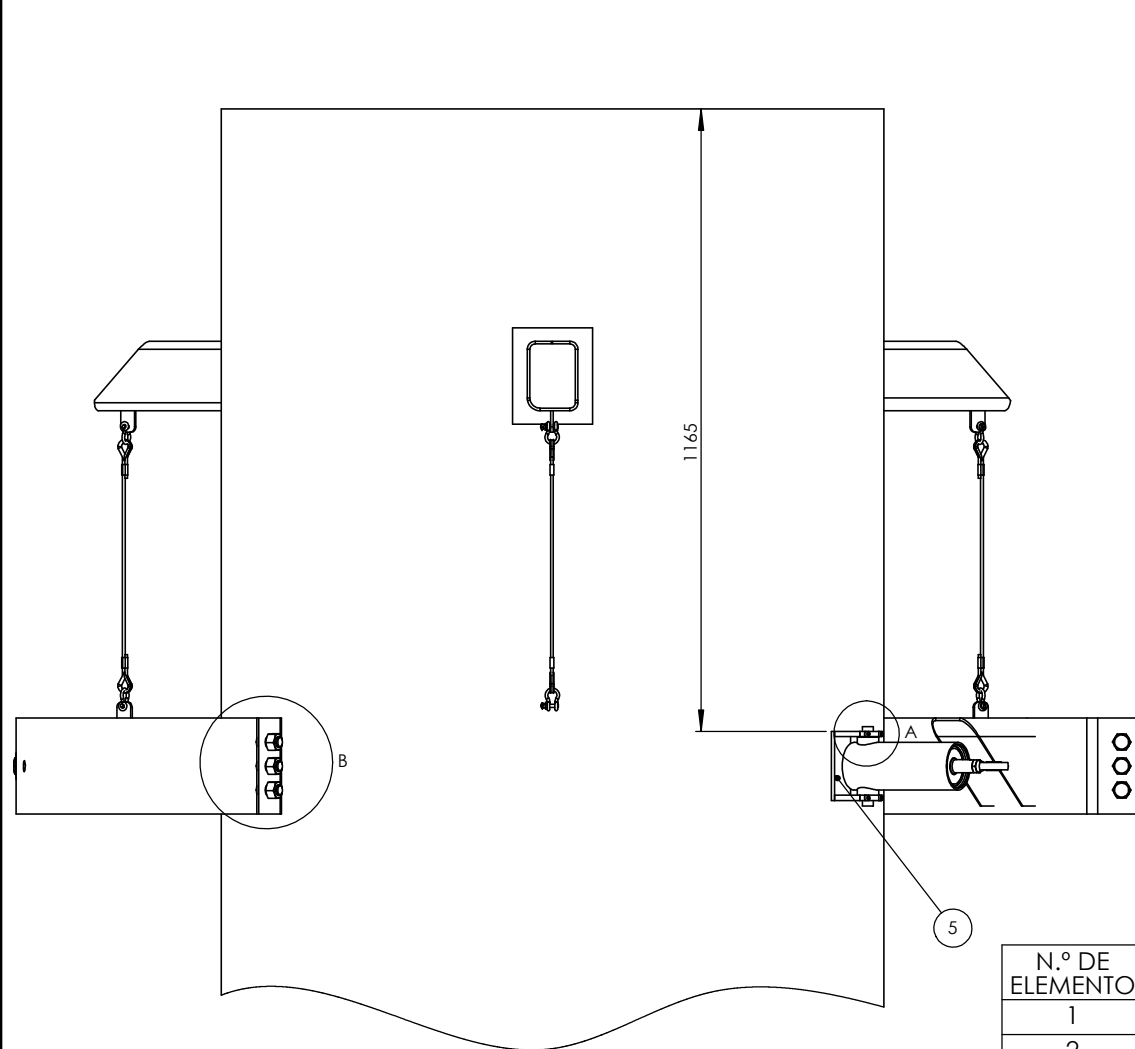


DETALLE B
ESCALA 1 : 2

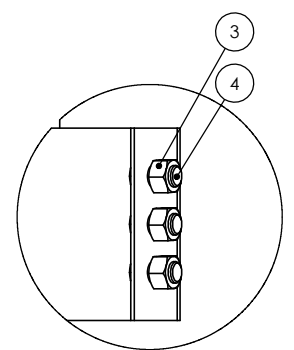
Nota:
 - Colocar seguro en grillete
 - Las uniones abulonadas deben ser colocadas con Trabisil RA2

N.º DE ELEMENTO	N.º DE PLANO	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	602	Soporte soldado chimenea absorbedor	3
2	510	Lastre	6
3	Comercial	Bulón exagonal M20x2,5 largo 70 Cal. 12.9	3
4	Comercial	Tuerca autofrenante M20x2,5	3
5	Comercial	Grillete lira M6 Acero inoxidable	6
6	509	Cable armado	3

Sin previa autorización se prohíbe la construcción de la pieza representada. Propiedad de FCFyN					UNC FCFyN	Fecha: 22/12/2015
Material:						Dibujó: H. Tavella
Tratamiento Superficial	Rev. A	Escala 1:10	Tol. no Espec. ±5	Proyec. ISO 128		Revisó: E. Lupi
Traf. Termico/ espesor	Montaje plano B					Aprobó: H. Tavella
Peso						Plano N° 702
Dureza						Plano N°



DETALLE A
ESCALA 1 : 2



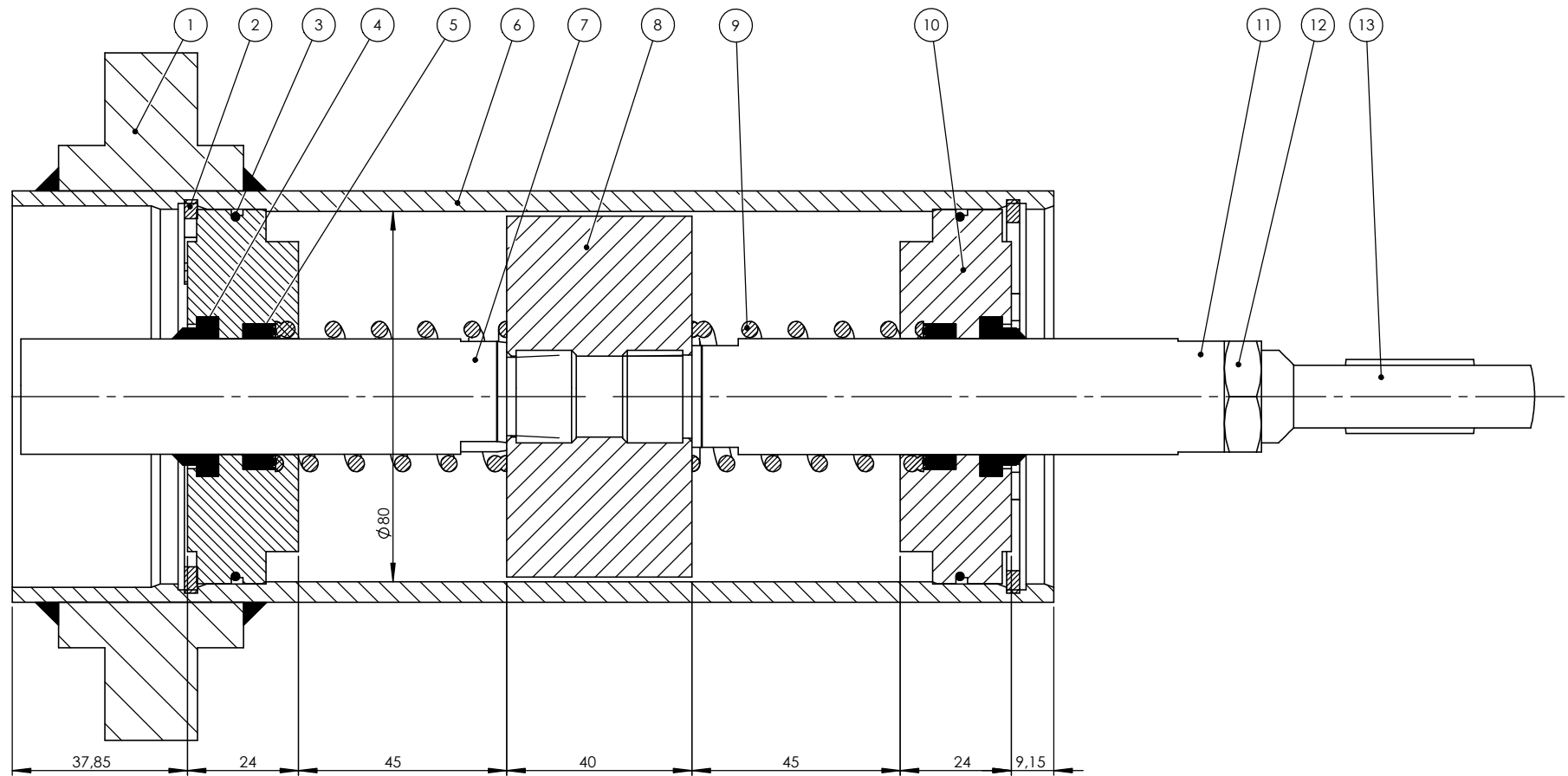
DETALLE B
ESCALA 1 : 5

Nota:
 - Las uniones abulonadas deben ser colocadas con Trabisil RA2
 - Se han suprimido componentes del conjunto para una mejor comprensión del plano

N.º DE ELEMENTO	N.º DE PLANO	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	507	Soporte superior chimenea amortiguador	6
2	Comercial	Bulón alen M6x1 Cal. 12.9	12
3	Comercial	Tuerca autofrenante M20x2,5	12
4	Comercial	Bulón exagonal M20x2,5 Largo 30 Cal. 12.9	9
5	604	Soporte soldado chimenea amortiguador	3

Sin previa autorización se prohíbe la construcción de la pieza representada. Propiedad de FCFyN					Fecha: 22/12/2015	
Material:					Dibujó: H. Tavella	
Tratamiento Superficial	Rev. A	Escala 1:10	Tol. no Espec. +5	Proyec. ISO 128	Revisó: E. Lupi	
Traf. Termico/ espesor					Aprobó: H. Tavella	
Peso					Plano N° 703	
Dureza					Plano N°	
Montaje plano C					Plano N°	

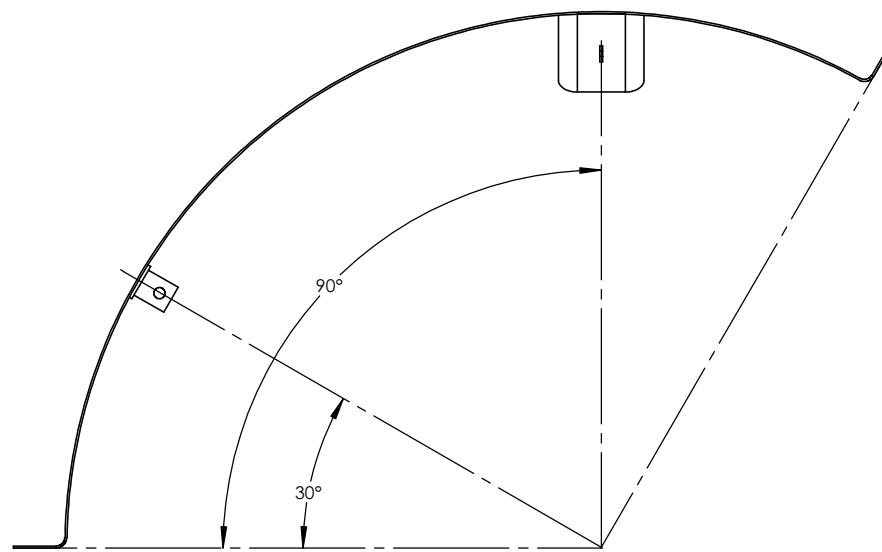
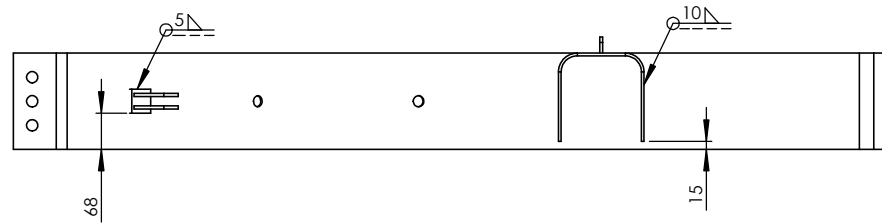




N.º DE ELEMENTO	N.º DE PLANO	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	511	Fijación tubo	2
2	Comercial	Seeguer DIN 472 Ø80	2
3	Comercial	Arosello 2-041	2
4	Comercial	Wiper D-1000	2
5	Comercial	Polypack 1250.1000.250B	2
6	512	Tubo	1
7	514	Vástago Trasero	1
8	516	Pistón	1
9	519	Resorte	2
10	515	Guía	2
11	513	Vástago delantero	1
12	Comercial	Tuerca M16x2 Largo 8	1
13	Comercial	Cabeza de articulación SA 20 C - SKF	1

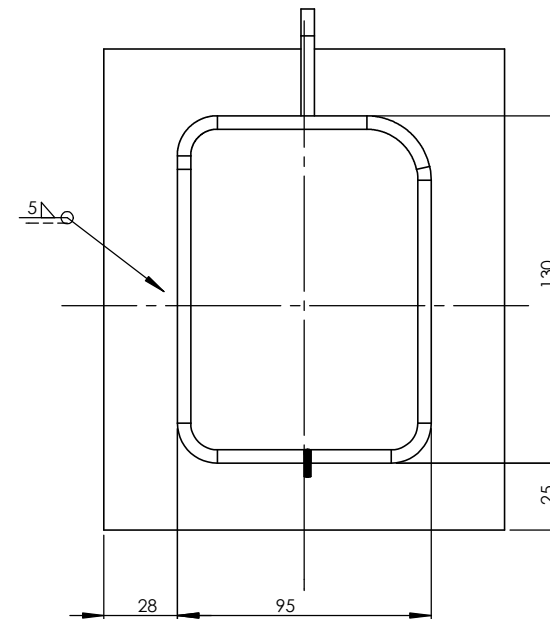
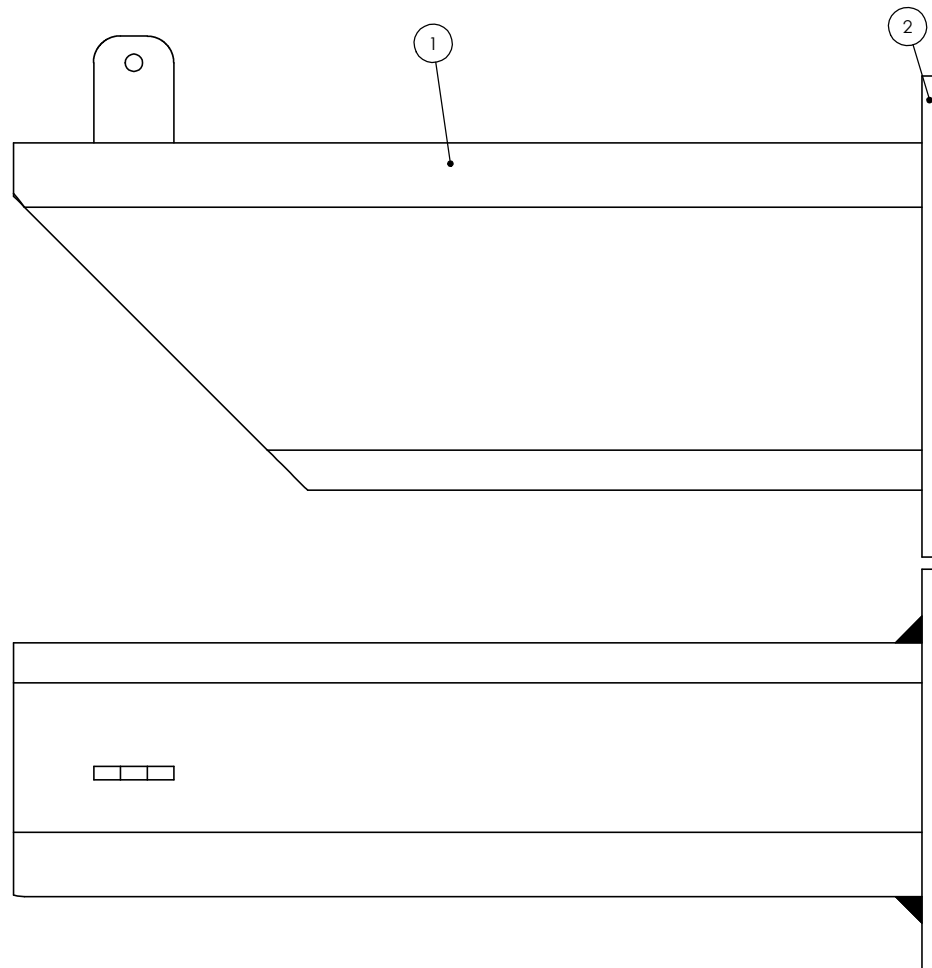
NOTA:
 -Para sellar la rosca usar Trabisil RA2
 -El conjunto debe ser pintado con pintura Epoxi

Sin previa autorización se prohíbe la construcción de la pieza representada. Propiedad de FCFyN					Fecha: 22/12/2015	
Material:					Dibujó: H. Tavella	
Tratamiento Superficial					Plano Nº	Revisó: E. Lupi
4					Escala	Aprobó: H. Tavella
2:1					Tol. no Espec.	Plano Nº 704
+0,5					Proyec. ISO 128	Plano Nº
Trat. Termico/ espesor					Amortiguador Ø3"x90xØ25 [70 Ns/m][10000 N/m]	
Peso 6,2 Kg					Plano Nº	
Dureza					Plano Nº	



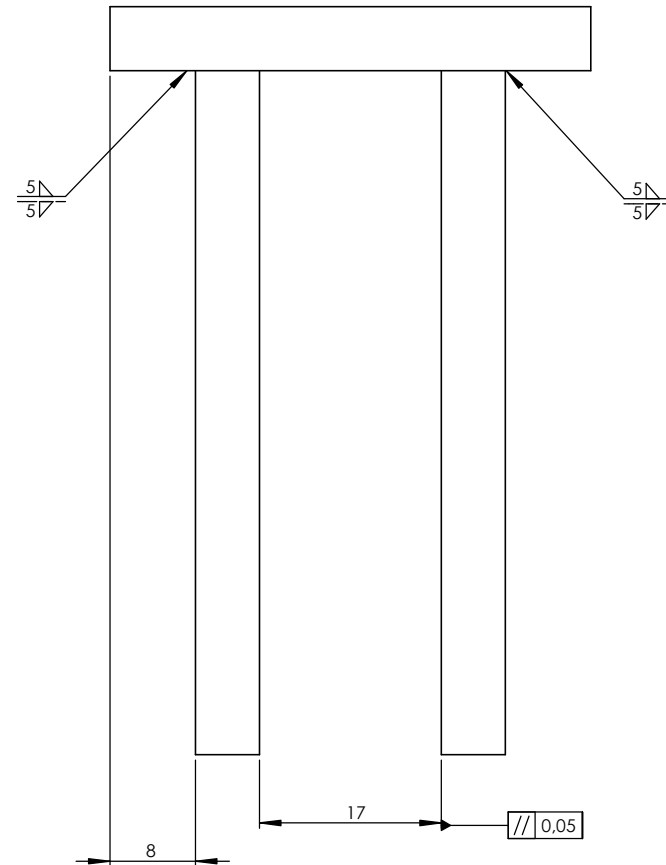
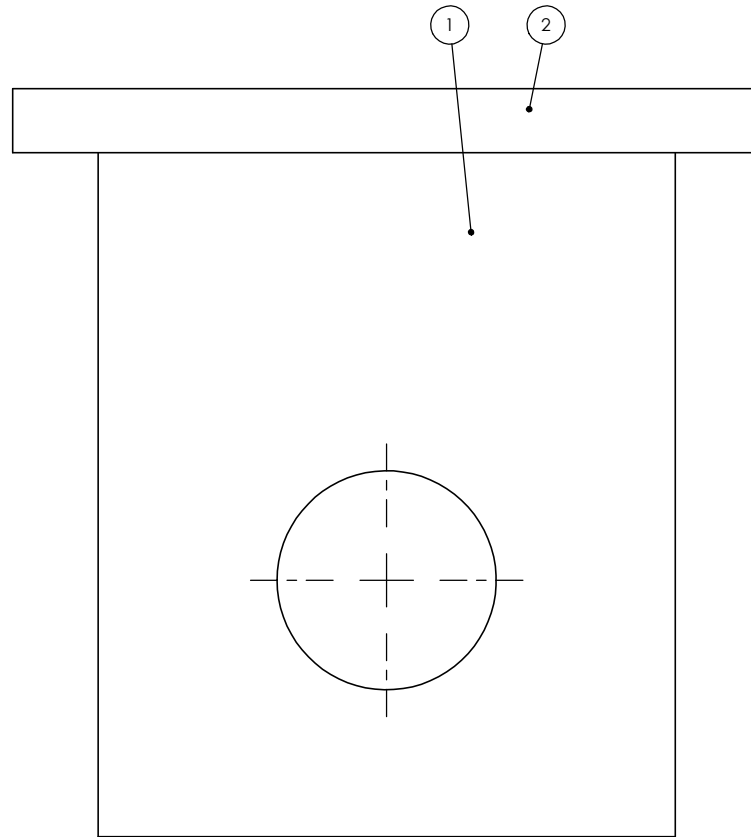
N.º DE ELEMENTO	N.º DE PLANO	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	508	Aro absorbedor	1
2	504	Soporte aro amortiguador	1
3	603	soporte soldado aro amortiguador	1

Sin previa autorización se prohíbe la construcción de la pieza representada. Propiedad de FCFyN						Fecha: 22/12/2015
						Dibujó: H. Tavella
						Revisó: E. Lupi
Tratamiento Superficial	Rev A	Escala 1:10	Tol. no Espec. ±5	Proyec. ISO 128	Aprobó: H. Tavella	
Trat. Termico/ espesor		Montaje plano A			Plano N°	701
Peso 15,4 Kg		Aro absorbedor soldado			Plano N°	601
Dureza					Plano N°	



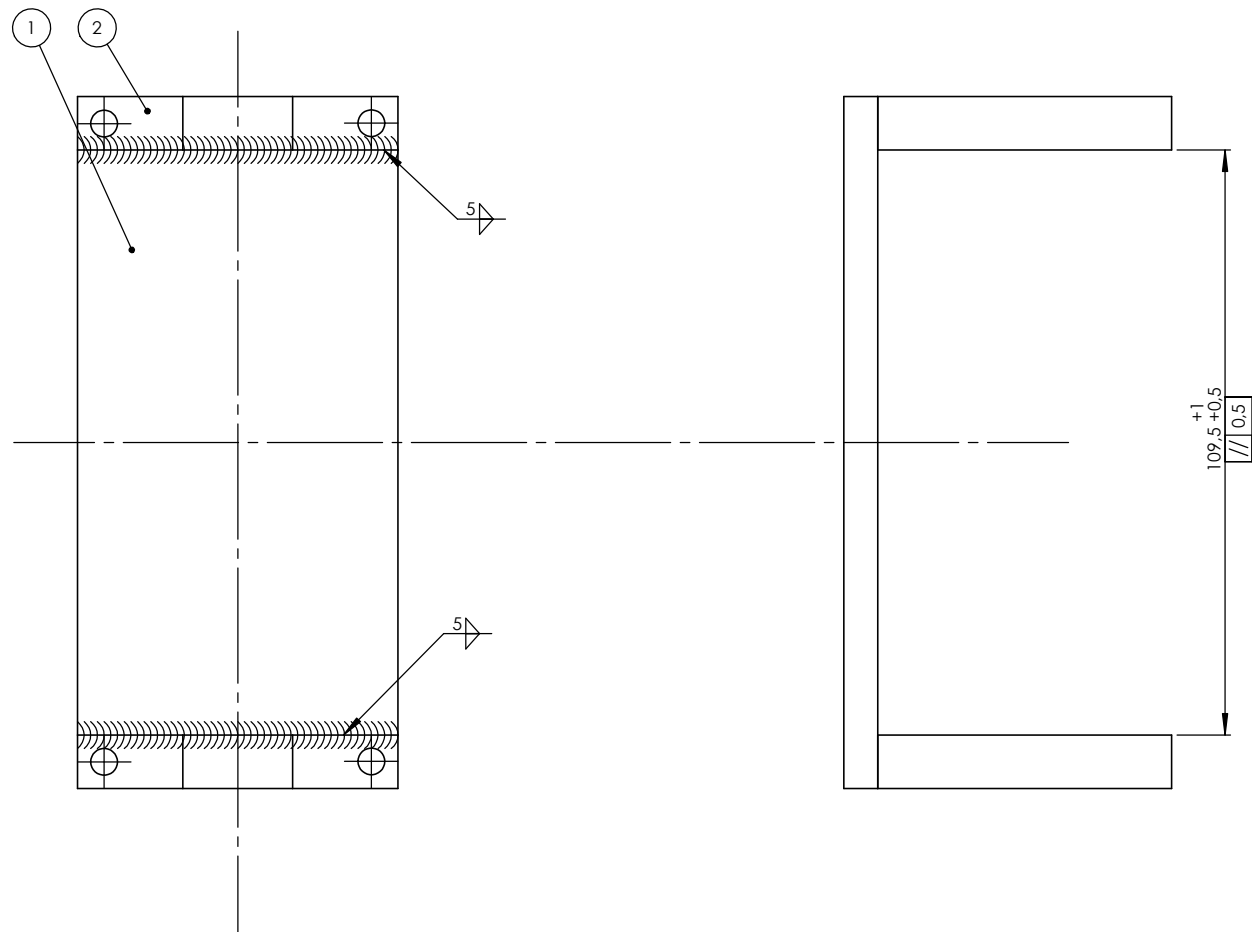
N.º DE ELEMENTO	PLANO N.º	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	501	Soporte chimenea absorbedor	1
2	502	Base soporte chimenea absorbedor	1

Sin previa autorización se prohíbe la construcción de la pieza representada. Propiedad de FCFyN						Fecha: 22/12/2015
Material:						Dibujó: H. Tavella
Tratamiento Superficial	Rev. A	Escala 1:2	Tol. no Espec. ±1	Proyec. ISO 128		Revisó: E. Lupi
Trat. Termico/ espesor					Montaje plano B	Aprobó: H. Tavella
Peso 6 Kg					Soporte Soldado chimenea absorbedor	Plano N° 702
Dureza						Plano N° 602
						Plano N°




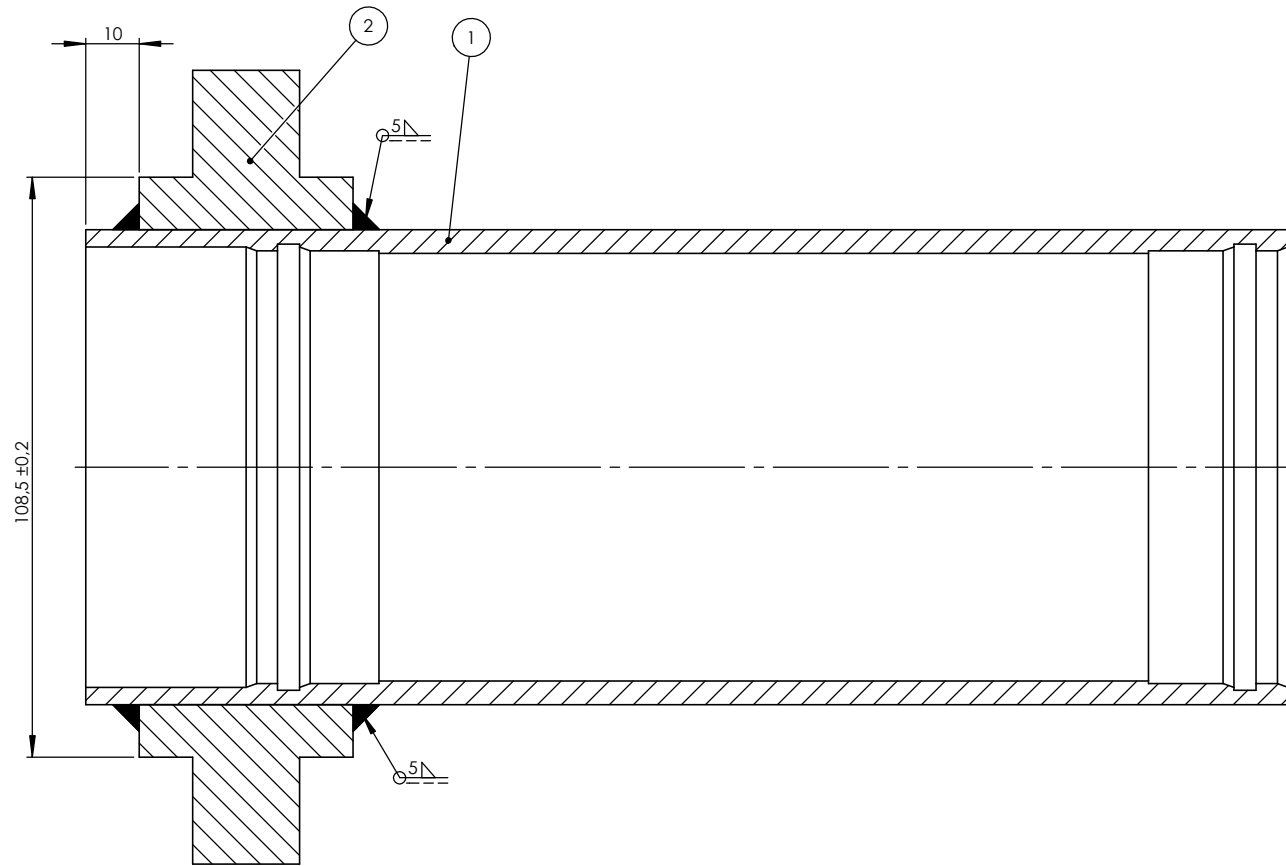
N.º DE ELEMENTO	N.º DE PLANO	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	504	Soporte aro amortiguador	2
2	505	Base soporte aro amortiguador	1

Sin previa autorización se prohíbe la construcción de la pieza representada. Propiedad de FCEfyN					UNC FCEfyN	Fecha: 22/12/2015
Material:						Dibujó: H. Tavella
Tratamiento Superficial	Rev. A	Escala 2:1	Tol. no Espec. +0,5	Proyec. ISO 128		Revisó: E. Lupi
Traf. Termico/ espesor	Montaje plano A					Aprobó: H. Tavella
Peso	Soporte soldado aro amortiguador				Plano N° 701	
Dureza					Plano N° 603	
					Plano N°	



N.º DE ELEMENTO	N.º DE PLANO	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	517	Base soporte chimenea amortiguador	1
2	506	Soporte chimenea amortiguador	2

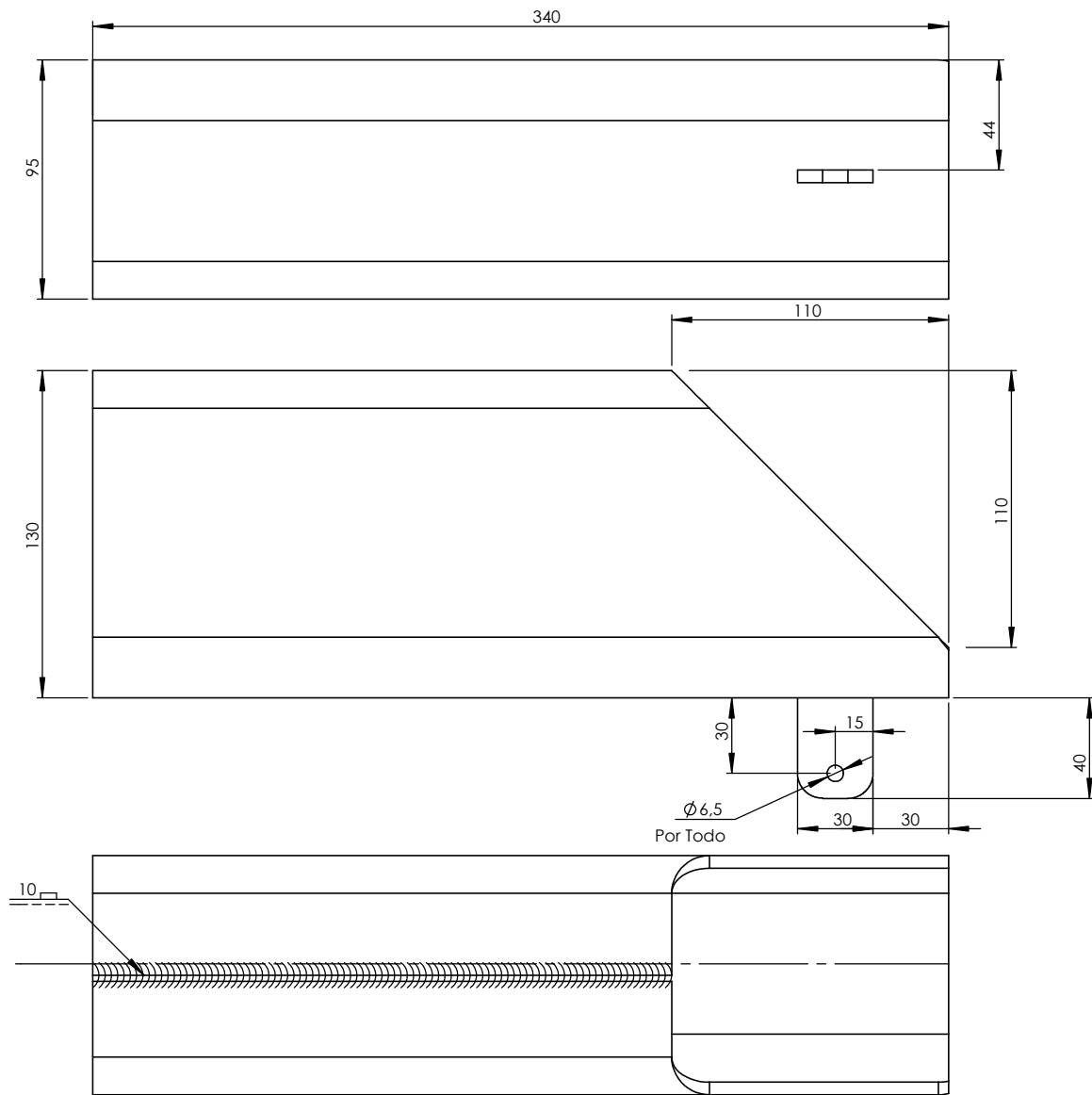
Sin previa autorización se prohíbe la construcción de la pieza representada. Propiedad de FCFyN							Fecha: 22/12/2015	
Material:							Dibujó: H. Tavella	
Tratamiento Superficial	Rev. A	Escala 2:1	Tol. no Espec. +0,5	Proyec. ISO 128	Revisó: E. Lupi		Aprobó: H. Tavella	
Trat. Térmico/ espesor		Montaje plano C			Plano N° 703			
Peso 0,9 Kg		Soporte soldado chimenea amortiguador			Plano N° 604			
Dureza					Plano N°			



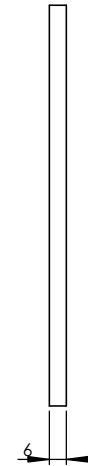
N.º DE ELEMENTO	N.º DE PLANO	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	512	Tubo	1
2	511	Fijación tubo	2

Sin previa autorización se prohíbe la construcción de la pieza representada. Propiedad de FCFyN					Fecha: 22/12/2015	
Material:					Dibujó: H. Tavella	
Tratamiento Superficial	Rev. A	Escala 1:1	Tol. no Espec. +0.5	Proyec. ISO 128	Revisó: E. Lupi	
Traf. Termico/ espesor	Amortiguador Ø3"x80xØ25 [70 Ns/m] [10000 N/m]				Aprobó: H. Tavella	
Peso 0,14 Kg	Camisa Soldada Amortiguador				Plano N° 704	
Dureza					Plano N° 605	
					Plano N°	

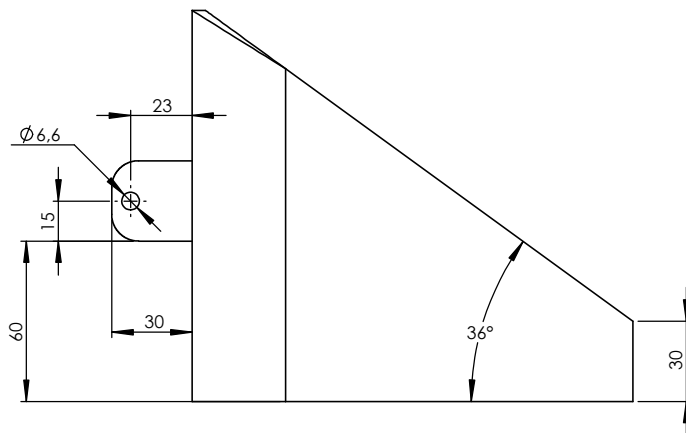
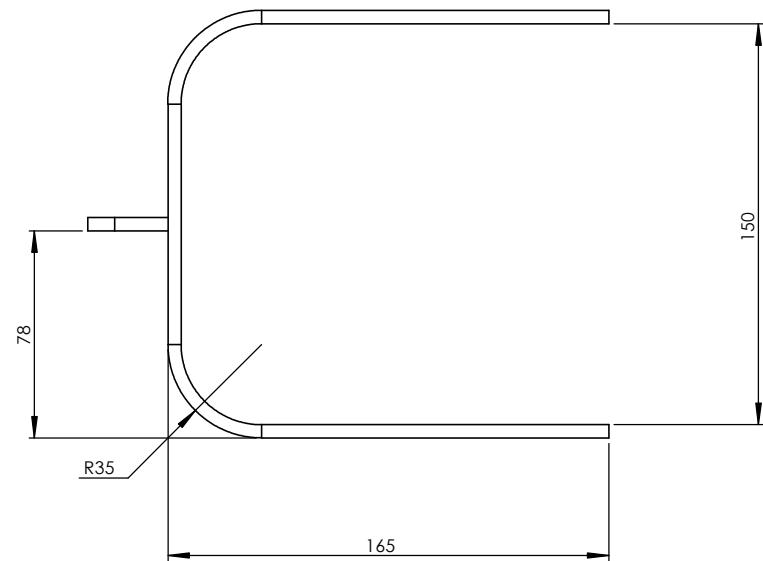
UNC
FCFyN



Sin previa autorización se prohíbe la construcción de la pieza representada. Propiedad de FCFyN						Fecha: 22/12/2015
Material: Chapa 304 L 6mm espesor						Dibujó: H. Tavella
Tratamiento Superficial	Rev. A	Escala 1:2	Tol. no Espec. ± 5	Proyec. ISO 128		Revisó: E. Lupi
Traf. Termico/ espesor	Montaje plano B					Aprobó: H. Tavella
Peso 4,7 Kg	Soporte Soldado chimenea absorbedor					Plano N° 602
Dureza	Soporte chimenea absorbedor					Plano N° 501

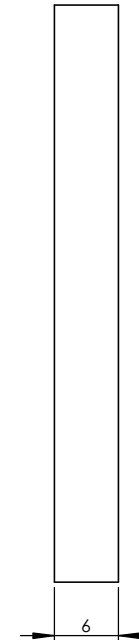
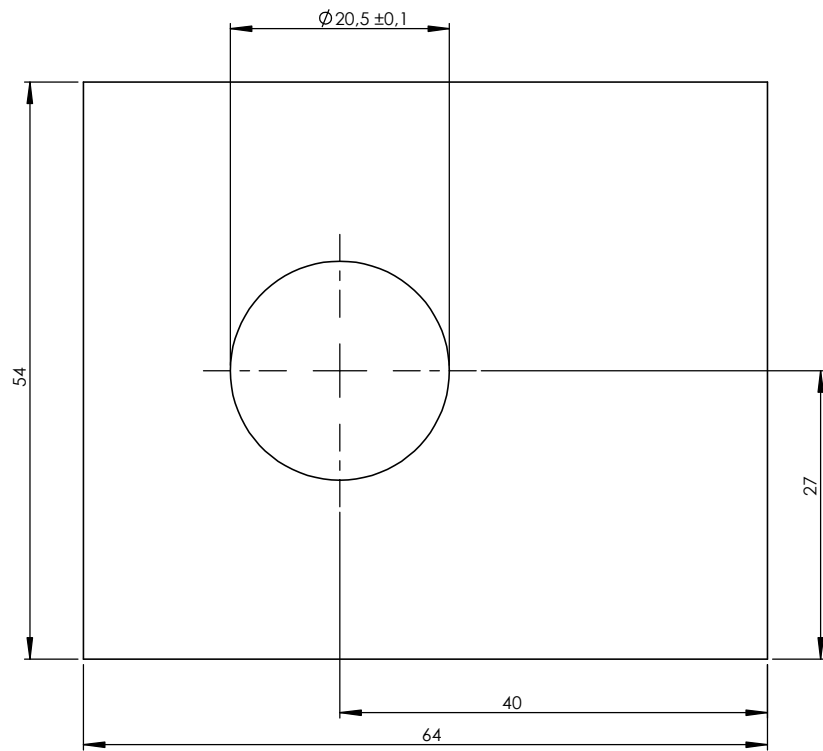


Sin previa autorización se prohíbe la construcción de la pieza representada. Propiedad de FCFyN					UNC FCFyN	Fecha: 22/12/2015
Material: Chapa 304 L 6mm espesor						Dibujó: H. Tavella
Tratamiento Superficial	Rev.	Escala	Tol. no Espec.	Proyec. ISO 128		Revisó: E. Lupi
	A	1:2	+0,2			Aprobó: H. Tavella
Trat. Termico/ espesor		Montaje plano B				Plano N° 702
Peso 1,4 Kg		Soporte soldado chimenea absorbedor				Plano N° 602
Dureza		Base Soporte Cable Absorbedor				Plano N° 502

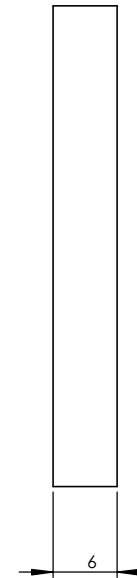
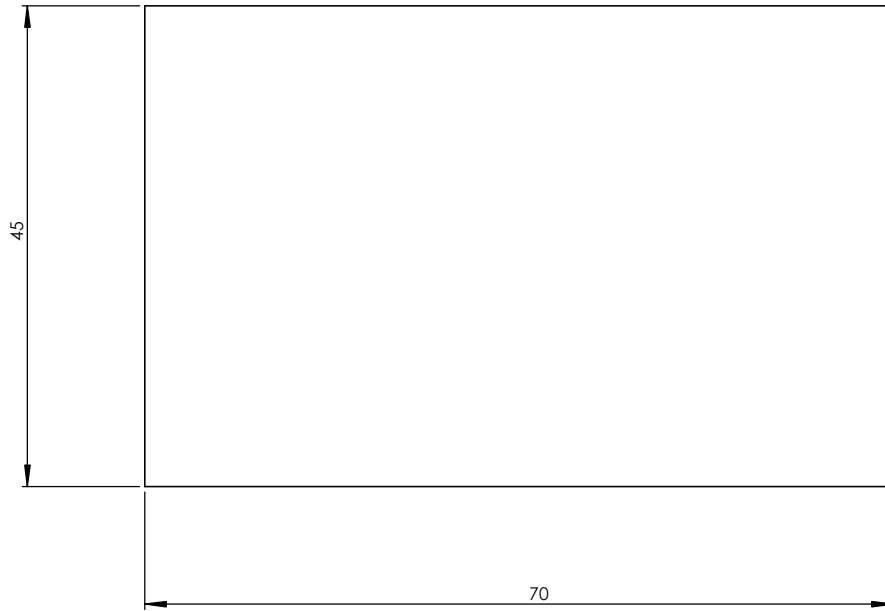


Sin previa autorización se prohíbe la construcción de la pieza representada. Propiedad de FCFyN					Fecha: 22/12/2015	
Material: AISI 304L Esp. 6mm					Dibujó: H. Tavella	
Tratamiento Superficial	Rev. A	Escala 2:1	Tol. no Espec. +0,5	Proyec. ISO 128	Revisó: E. Lupi	
Traf. Termico/ espesor					Aprobó: H. Tavella	
Montaje plano A					Plano N°	701
Peso 1,9 Kg					Plano N°	
Dureza	Soporte soldado aro chimenea				Plano N°	503

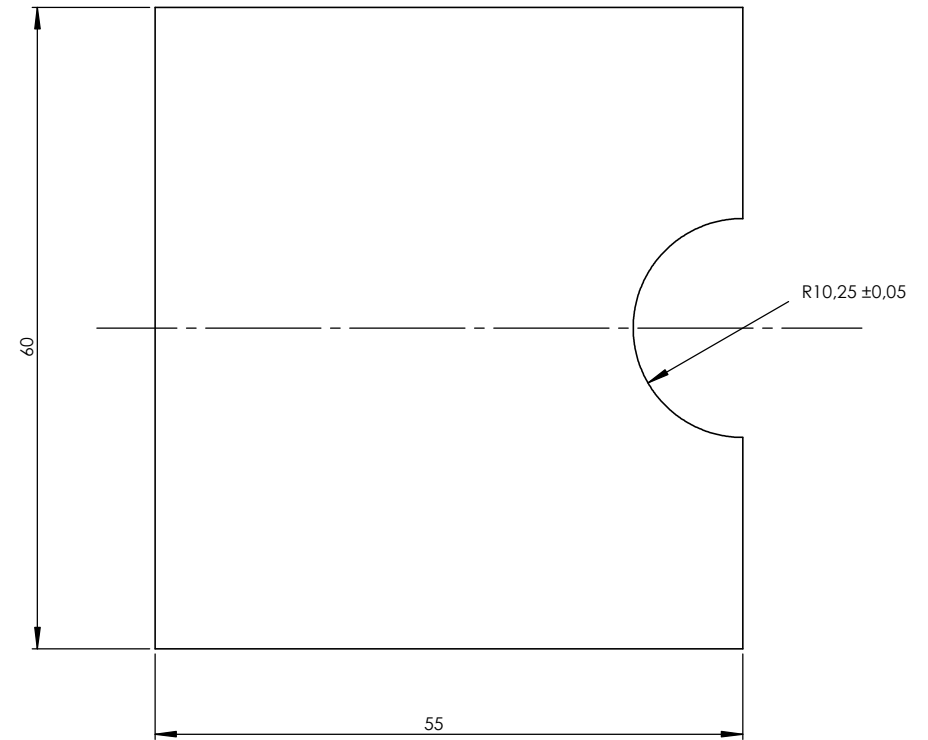
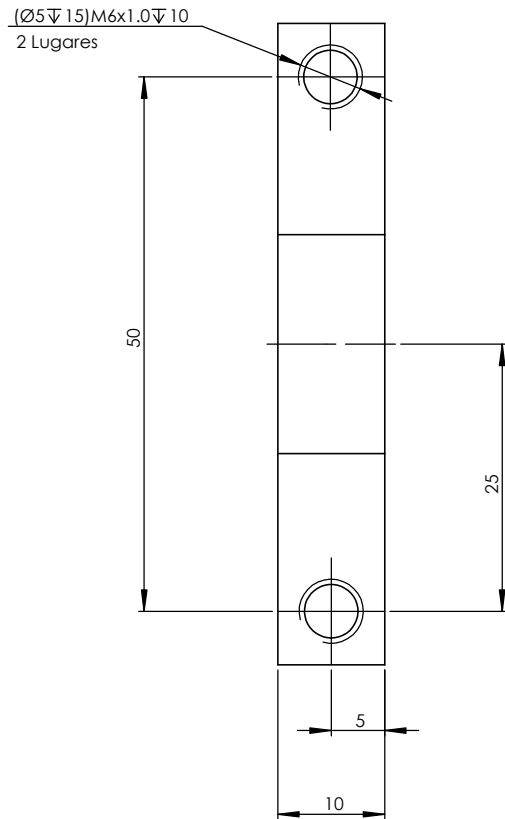
UNC
FCFyN



Sin previa autorización se prohíbe la construcción de la pieza representada. Propiedad de FCEfYN					UNC FCEfYN	Fecha: 22/12/2015
Material: AISI 316L espesor 6mm						Dibujó: H. Tavella
Tratamiento Superficial	Rev A	Escala 2:1	Tol. no Espec. +0,2	Proyec. ISO 128 		Revisó: E. Lupi
Traf. Termico/ espesor	Montaje plano A					Aprobó: H. Tavella
Peso 0,16 Kg	Soporte soldado aro amortiguador					Plano N° 701
Dureza	Soporte aro amortiguador					Plano N° 603
						Plano N° 504

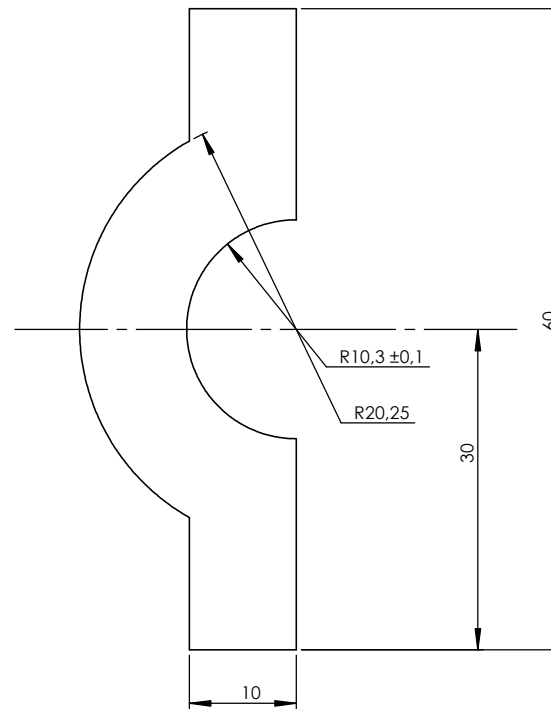
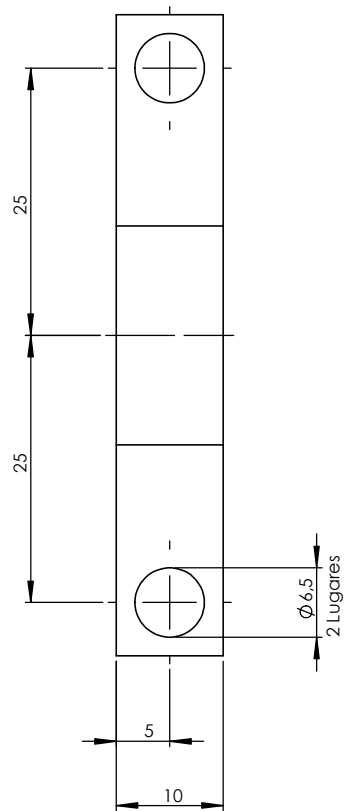


Sin previa autorización se prohíbe la construcción de la pieza representada. Propiedad de FCFyN						Fecha: 22/12/2015
Material: AISI 316L Espesor 6						Dibujó: H. Tavella
Tratamiento Superficial	Rev. A	Escala 2:1	Tol. no Espec. +0,5	Proyec. ISO 128		Revisó: E. Lupi
Traf. Termico/ espesor	Montaje plano A					Aprobó: H. Tavella
Peso 0,15 Kg	Soporte soldado chimenea amortiguador					Plano N° 701
Dureza	Base soporte chimenea amortiguador					Plano N° 604
						Plano N° 505



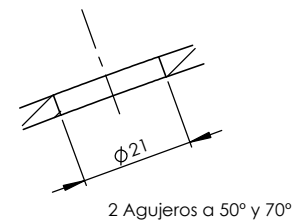
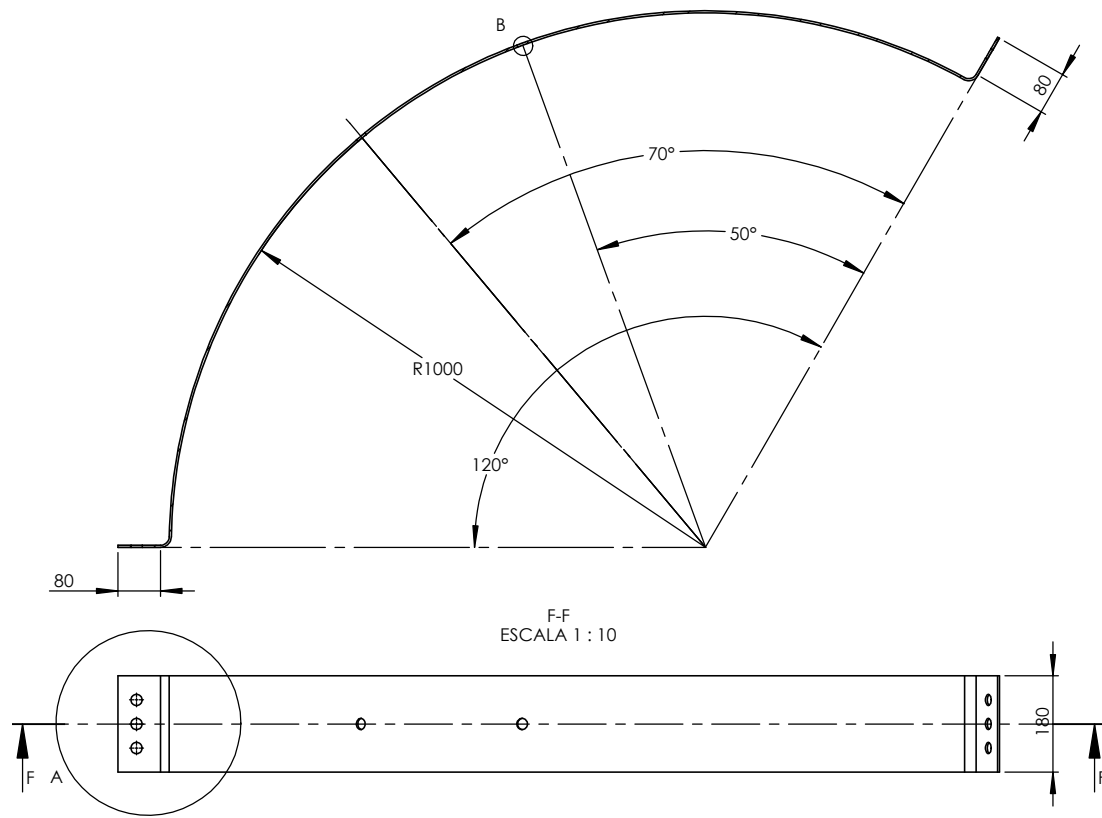
CORTE A-A

Sin previa autorización se prohíbe la construcción de la pieza representada. Propiedad de FCFyN					UNC FCFyN	Fecha: 22/12/2015
Material: AISI 316L espesor 10mm						Dibujó: H. Tavella
Tratamiento Superficial	Rev. A	Escala 2:1	Tol. no Espec. +0,2	Proyec. ISO 128		Revisó: E. Lupi
Traf. Termico/ espesor	Montaje plano C					Aprobó: H. Tavella
Peso 0,25 Kg	Anillo soldado absorbedor					Plano N° 703
Dureza	Soporte chimenea amortiguador					Plano N° 604
						Plano N° 506

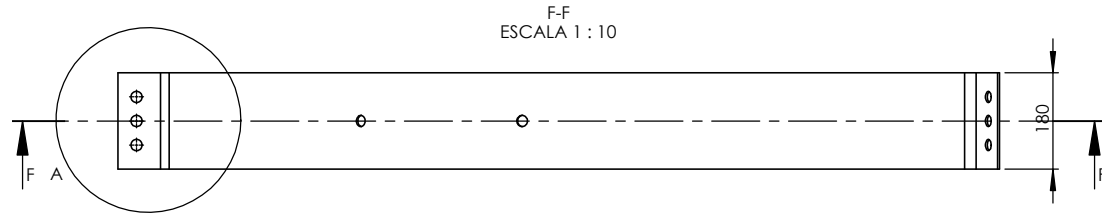


CORTE A-A

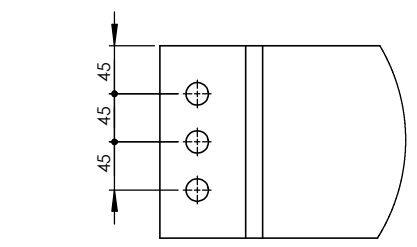
Sin previa autorización se prohíbe la construcción de la pieza representada. Propiedad de FCEfYN						Fecha: 22/12/2015
Material: AISI 316L espesor 10mm						Dibujó: H. Tavella
Tratamiento Superficial	Rev. A	Escala 2:1	Tol. no Espec. +0,2	Proyec. ISO 128		Revisó: E. Lupi
Traf. Termico/ espesor	Montaje plano C					Aprobó: H. Tavella
Peso 0,53 Kg						Plano N° 703
Dureza	Soporte superior chimenea amortiguador					Plano N° 507



DETALLE B
ESCALA 1 : 1



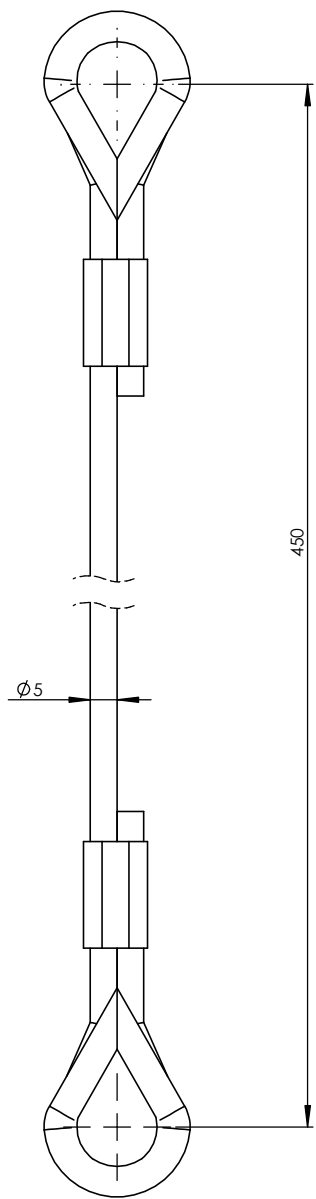
F-F
ESCALA 1 : 10



DETALLE A
ESCALA 1 : 5

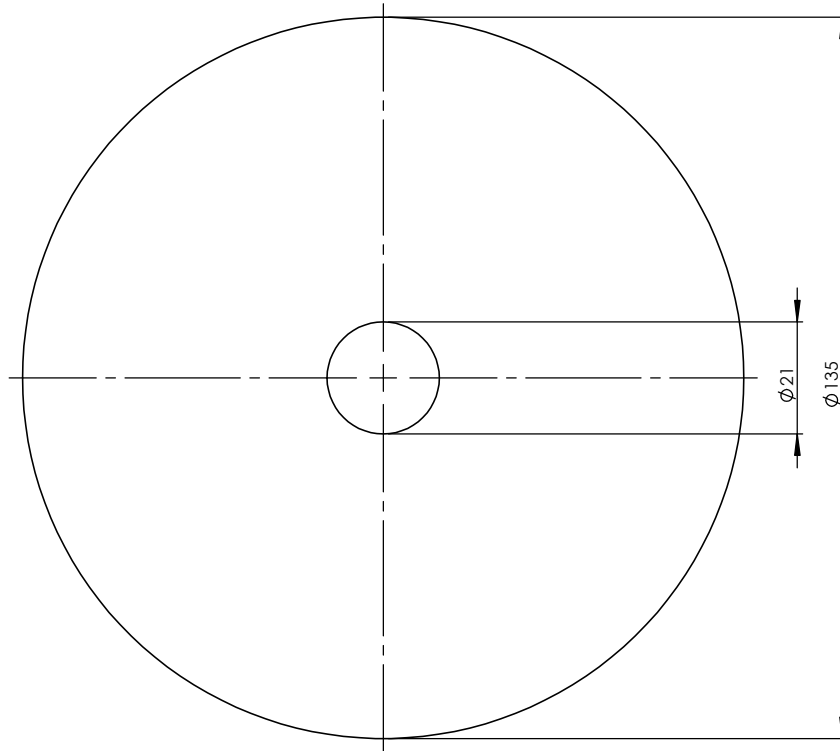
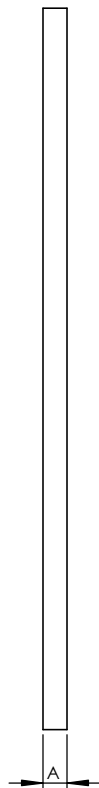
Ambos Extremos

Sin previa autorización se prohíbe la construcción de la pieza representada. Propiedad de FCEFyN							Fecha: 22/12/2015	
Material: Chapa 304L Espesor 4mm							Dibujó: H. Tavella	
Tratamiento Superficial	Rev A	Escala	Tol. no Espec. ±5	Proyec. ISO 128			Revisó: E. Lupi	
Trat. Termico/ espesor							Aprobó: H. Tavella	
Peso 13 Kg					Montaje plano A		Plano N° 701	
Dureza					Aro absorbedor soldado		Plano N° 601	
					Anillo Absorbedor		Plano N° 508	



Sin previa autorización se prohíbe la construcción de la pieza representada. Propiedad de FCEfyN					Fecha: 22/12/2015	
Material: Cable AISI 316L Ø5					Dibujó: H. Tavella	
Tratamiento Superficial		Rev. A	Escala 2:1	Tol. no Espec. +0,2	Proyec. ISO 128	Revisó: E. Lupi
Trat. Termico/ espesor		Amortiguador Ø3"x80xØ25 [70 Ns/m][10000 Ns/m]			Aprobó: H. Tavella	
Peso 0,11 Kg					Plano N° 704	
Dureza		Cable armado			Plano N° 509	

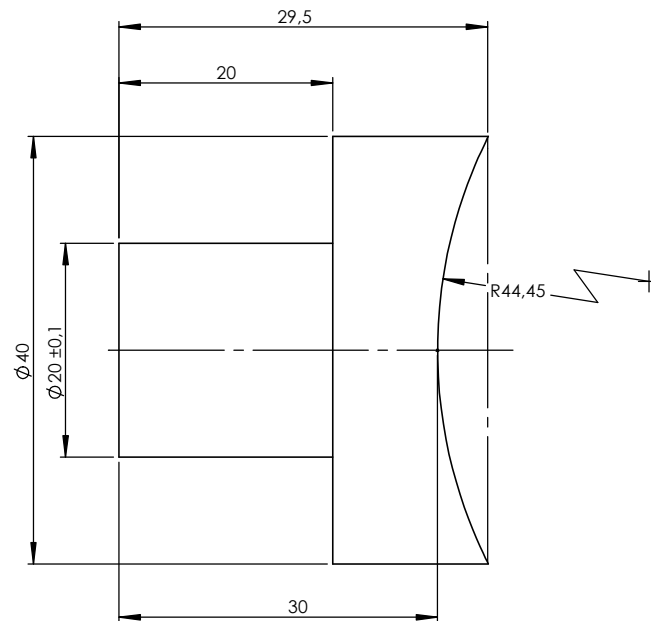
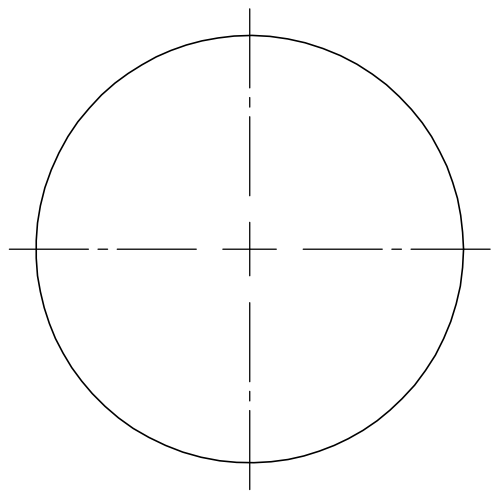
UNC
FCEfyN



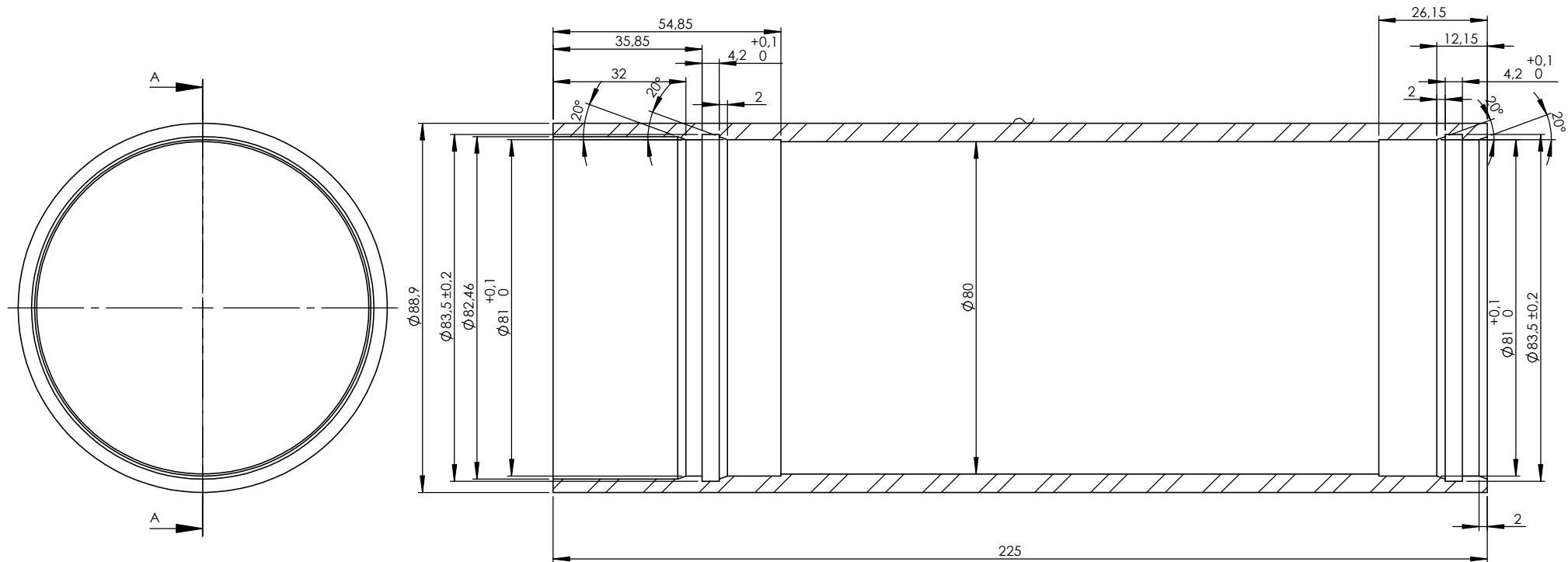
Peso	A
2,25 Kg	20
1 Kg	9
0,5 Kg	4,5

Sin previa autorización se prohíbe la construcción de la pieza representada. Propiedad de FCEfYN					Fecha: 22/12/2015	
Material: AISI 304L ØLam.135mm					Dibujó: H. Tavella	
Tratamiento Superficial	Rev.	Escala	Tol. no Espec.	Proyec. ISO	Revisó: E. Lupi	
	A	2:1	+0,5	128	Aprobó: H. Tavella	
Trat. Termico/ espesor		Montaje plano B			Plano N°	702
Peso					Plano N°	
Dureza				Soporte soldado aro chimenea		Plano N° 510

UNC
FCEfYN



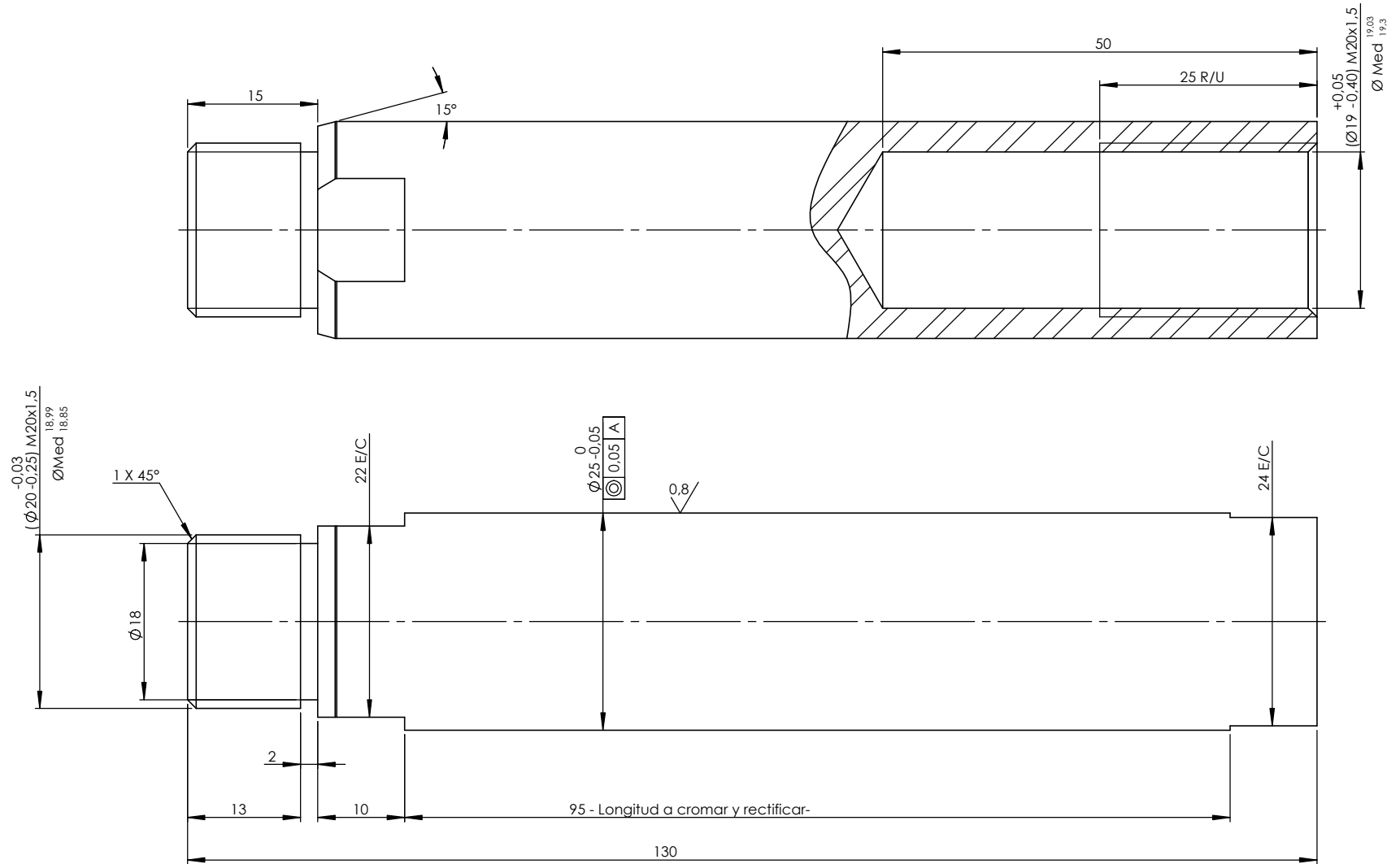
Sin previa autorización se prohíbe la construcción de la pieza representada. Propiedad de FCEFYN					UNC FCEFYN	Fecha: 22/12/2015
Material: SAE 1020 ØLam. 41,2						Dibujó: H. Tavella
Tratamiento Superficial	Rev. A	Escala 2:1	Tol. no Espec. +0,5	Proyec. ISO 128		Revisó: E. Lupi
Traf. Termico/ espesor Temple por inducción 48-52Rc	Amortiguador Ø3"x80xØ25 [70 Ns/m] [10000 N/m]					Aprobó: H. Tavella
Peso 0,14 Kg	Tubo soldado amortiguador					Plano N° 704
Dureza	Fijación tubo					Plano N° 605
						Plano N° 511



CORTE A-A

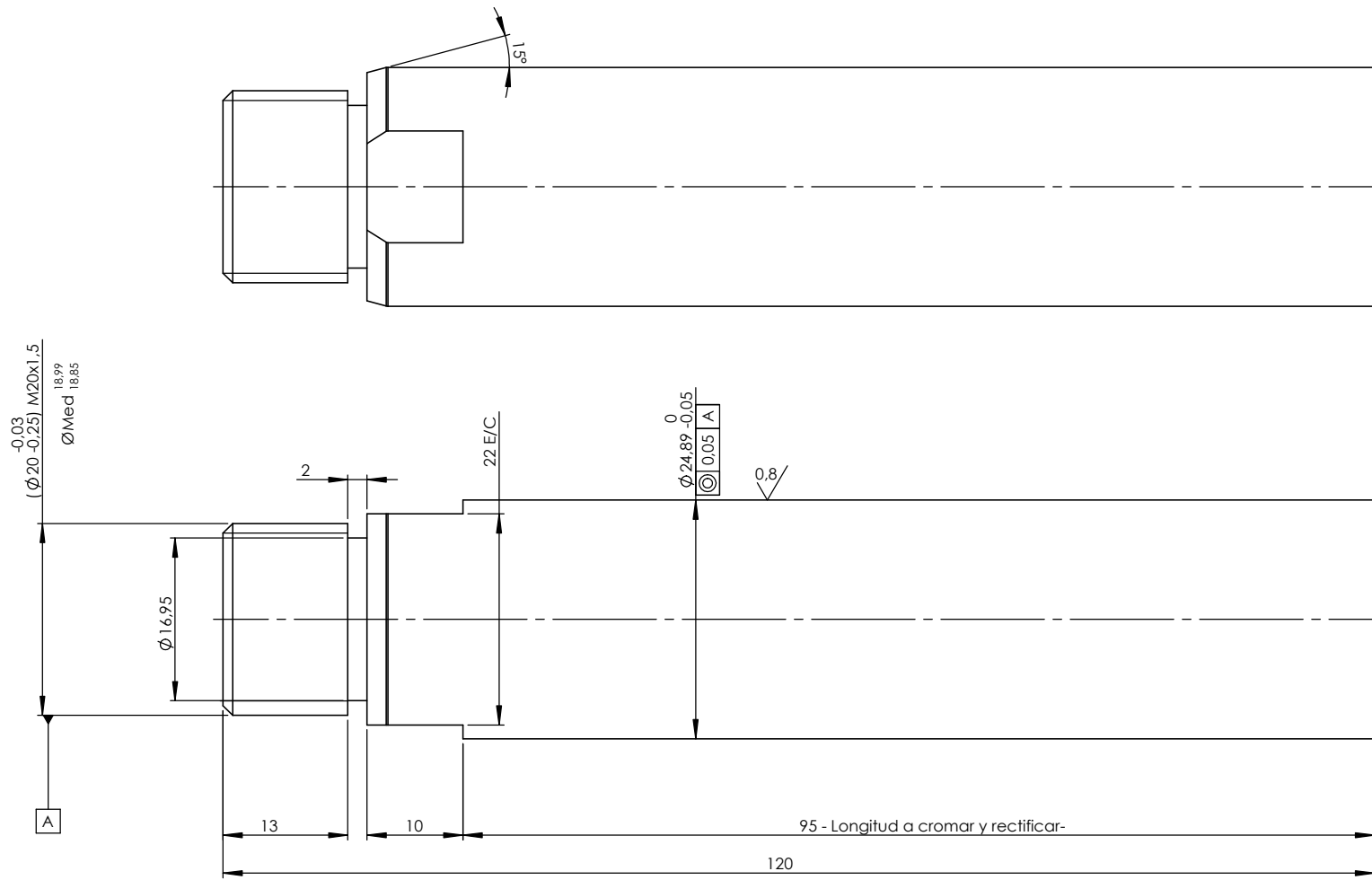
Sin previa autorización se prohíbe la construcción de la pieza representada. Propiedad de FCFyN					Fecha: 22/12/2015	
Material: Tubo con costura ASTM A53 Sch 40 $\phi 88,9 \times 5,49$					Dibujó: H. Tavella	
Tratamiento Superficial	Rev. A	Escala 2:1	Tol. no Espec. $\pm 0,5$	Proyec. ISO 128	Revisó: E. Lupi	
Trat. Termico/ espesor					Aprobó: H. Tavella	
Amortiguador $\phi 3'' \times 80 \times \phi 25$ [70 Ns/m][10000 N/m]					Plano N°	704
Peso 1,8 Kg					Plano N°	605
Dureza					Plano N°	512

UNC
FCFyN



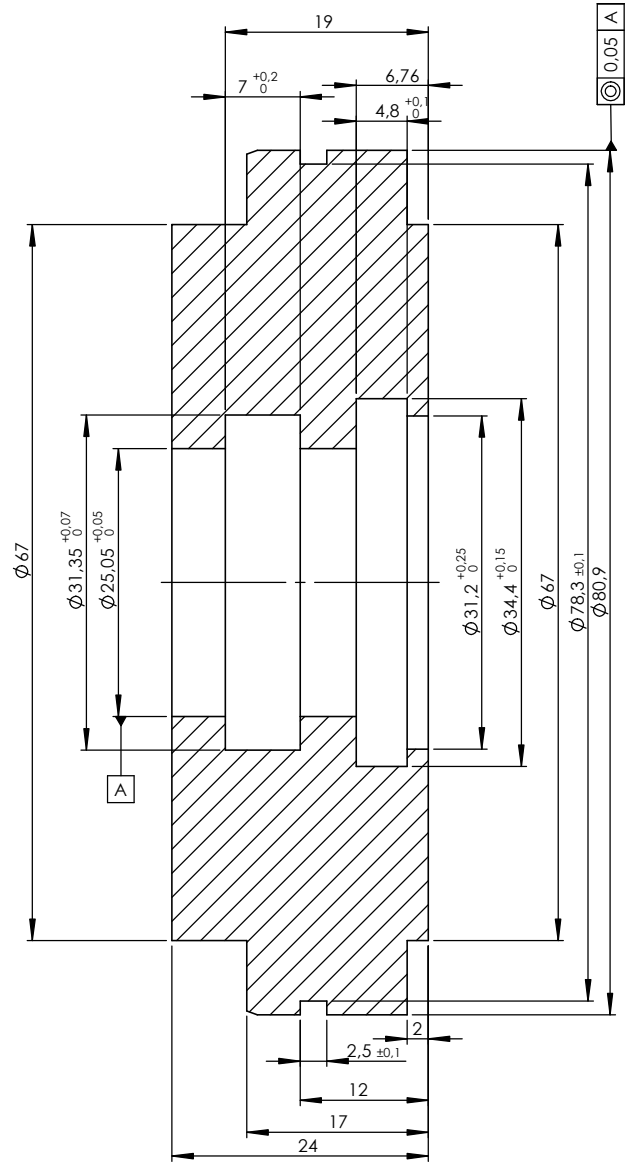
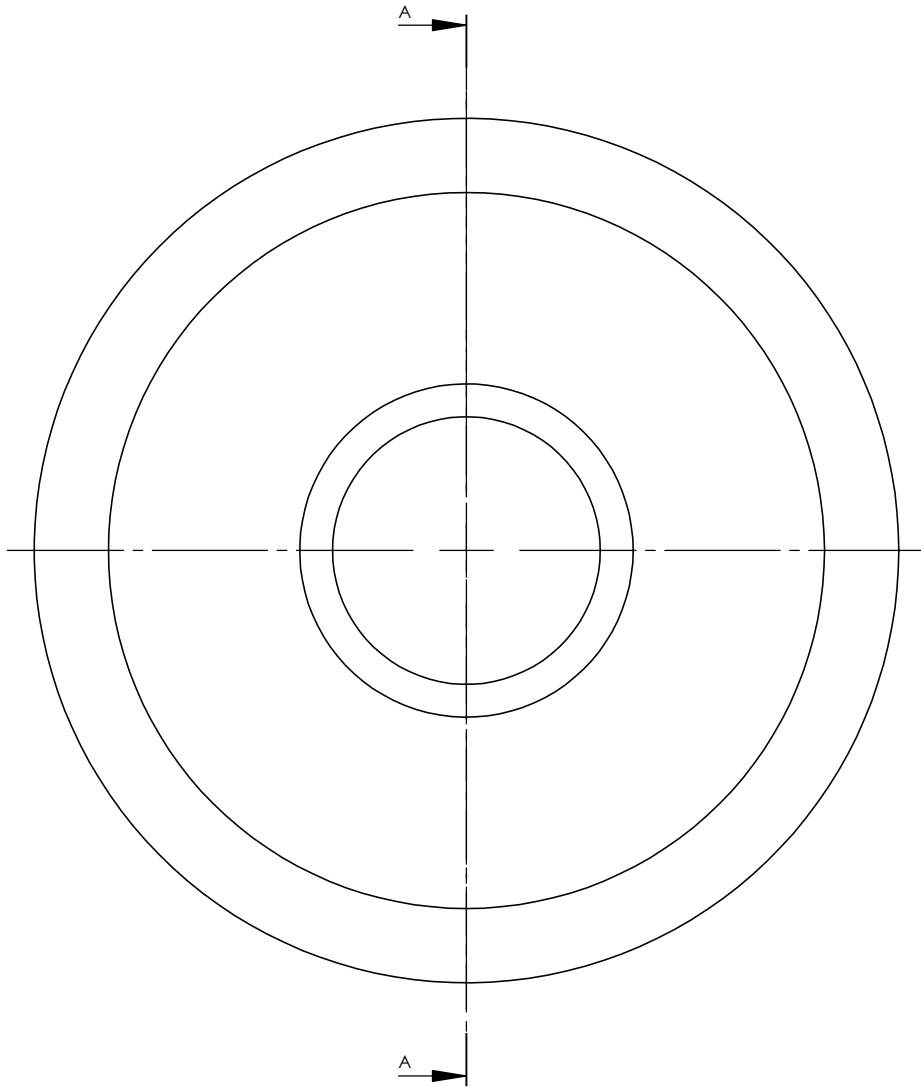
CORTE A-A

Sin previa autorización se prohíbe la construcción de la pieza representada. Propiedad de FCEfyN					Fecha: 22/12/2015	
Material: AISI 316L ØLam. 24,5					Dibujó: H. Tavella	
Tratamiento Superficial	Rev.	Escala	Tol. no Espec.	Proyec. ISO	Revisó: E. Lupi	
Cromo duro 30/35 mic.	A	2:1	+0,2	128	Aprobó: H. Tavella	
Trat. Termico/ espesor		Amortiguador Ø3"x80xØ25 [70 Ns/m][10000 Ns/m]			Plano N° 704	
Peso 0,38 Kg					Plano N°	
Dureza	Vástago delantero			Plano N° 513		



CORTE A-A

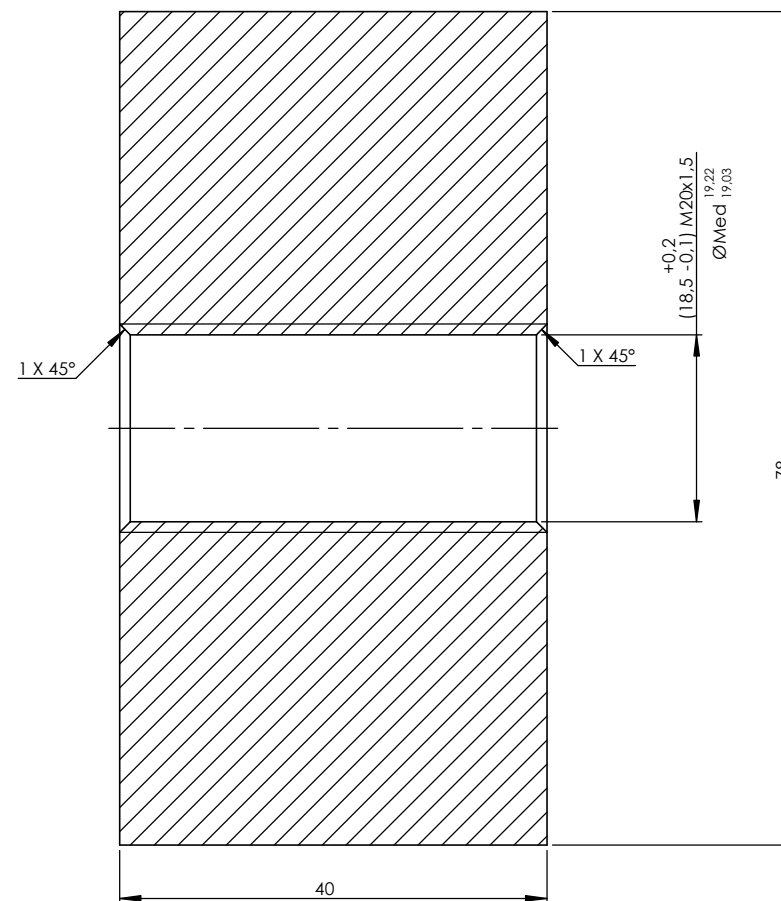
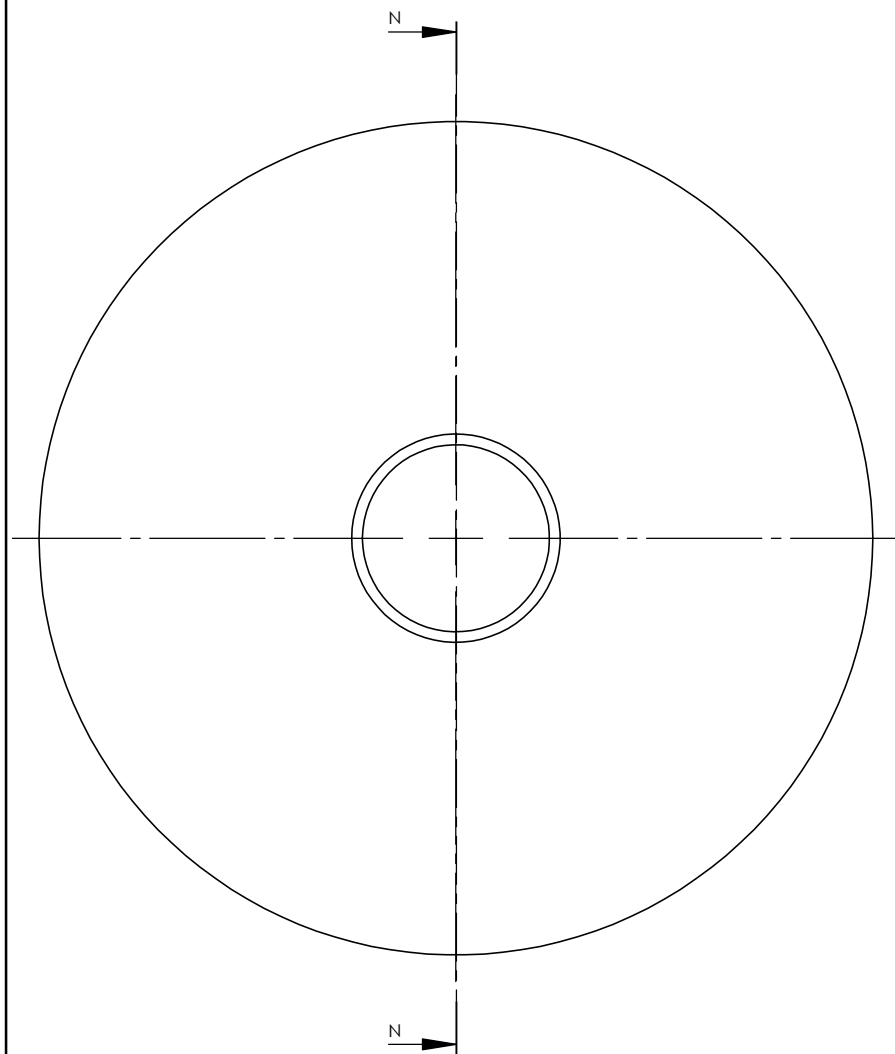
Sin previa autorización se prohíbe la construcción de la pieza representada. Propiedad de FCEFYN					Fecha: 22/12/2015		
Material: AISI 316L ØLam. 25,4					Dibujó: H. Tavella		
Tratamiento Superficial	Rev	Escala	Tol. no Espec.	Proyec. ISO	Revisó: E. Lupi		
Cromo duro 30/35 mic.	A	2:1	+0,2	128	Aprobó: H. Tavella		
Trat. Termico/ espesor		Amortiguador Ø3"x80xØ25 [70 Ns/m][10000 N/m]				Plano N°	704
Peso 0,40 Kg						Plano N°	
Dureza	Vástago trasero				Plano N°	514	



CORTE A-A

Sin previa autorización se prohíbe la construcción de la pieza representada. Propiedad de FCEFYN					Fecha: 22/12/2015	
Material: Fundición gris SAE 120					Dibujó: H. Tavella	
Tratamiento Superficial	Rev. A	Escala 2:1	Tol. no Espec. +0.5	Proyec. ISO 128	Revisó: E. Lupi	
Trat. Termico/ espesor					Aprobó: H. Tavella	
Peso 0,66 Kg					Pieza N° 704	
Dureza					Pieza N°	
Guía Vástago					Pieza N° 515	

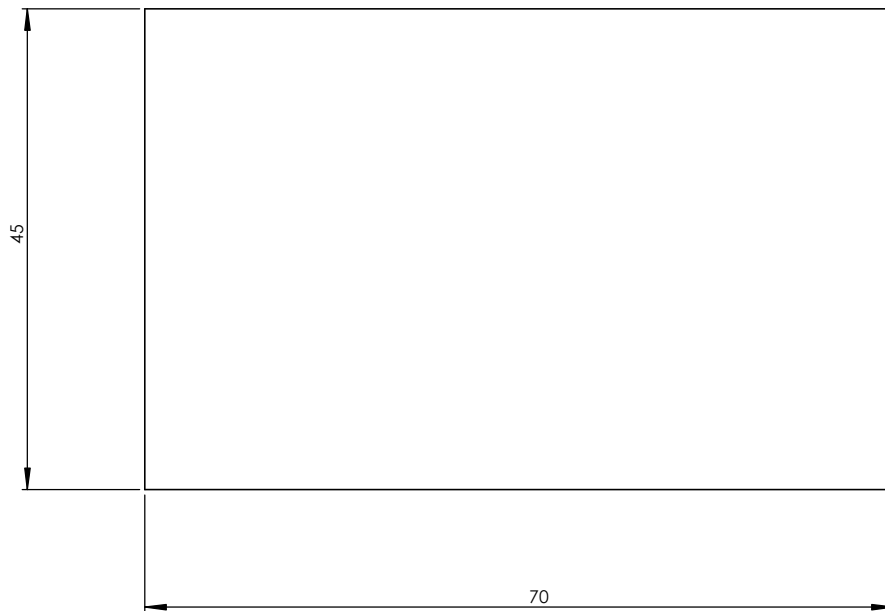
UNC
FCEFYN



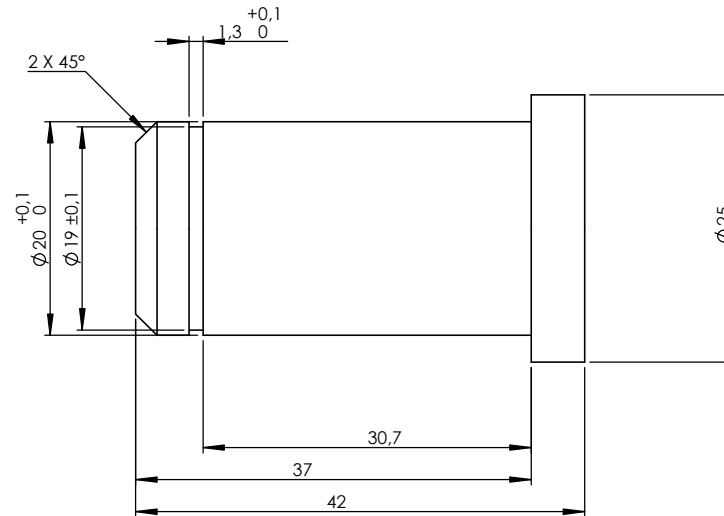
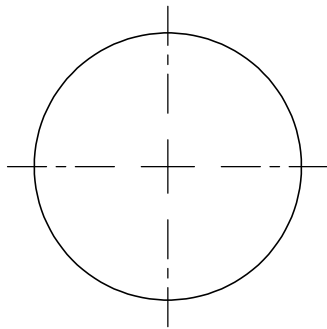
CORTE A-A

Sin previa autorización se prohíbe la construcción de la pieza representada. Propiedad de FCEFYN					Fecha: 22/12/2015	
Material: SAE 1040 ØLam. 80					Dibujó: H. Tavella	
Tratamiento Superficial	Rev.	Escala	Tol. no Espec.	Proyec. ISO	Revisó: E. Lupi	
Cromo duro 30/35 mic.	A	2:1	+0,2	128	Aprobó: H. Tavella	
Traf. Termico/ espesor	Amortiguador Ø3"x80xØ25 [70 Ns/m] [10000 N/m]				Plano N° 704	
Peso	1,5 Kg				Plano N°	
Dureza					Plano N° 516	

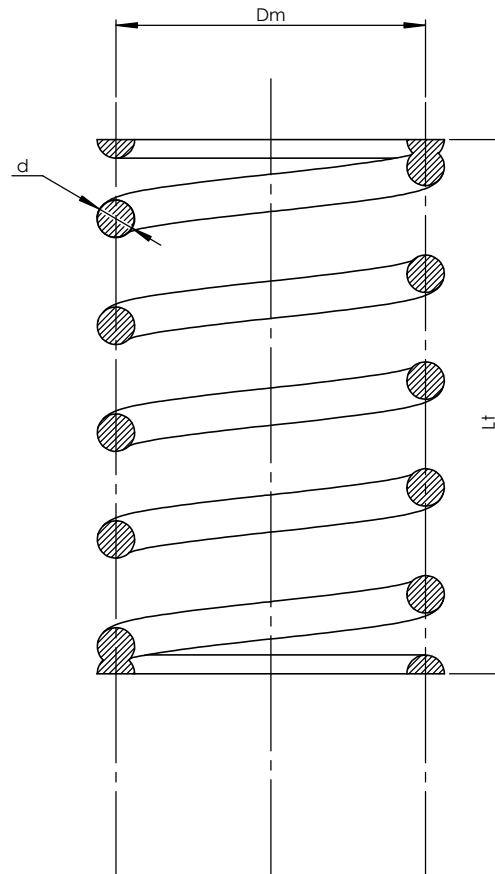
UNC
FCEFYN



Sin previa autorización se prohíbe la construcción de la pieza representada. Propiedad de FCFyN						Fecha: 22/12/2015
Material: AISI 316L Espesor 6						Dibujó: H. Tavella
Tratamiento Superficial	Rev. A	Escala 2:1	Tol. no Espec. +0,5	Proyec. ISO 128		Revisó: E. Lupi
Traf. Termico/ espesor	Montaje plano A					Aprobó: H. Tavella
Peso 0,15 Kg	Soporte soldado chimenea amortiguador					Plano N° 701
Dureza	Base soporte chimenea amortiguador					Plano N° 604
						Plano N° 517



Sin previa autorización se prohíbe la construcción de la pieza representada. Propiedad de FCEfYN					UNC FCEfYN	Fecha: 22/12/2015
Material: AISI 316L ØLam. 30						Dibujó: H. Tavella
Tratamiento Superficial	Rev. A	Escala 2:1	Tol. no Espec. +0,2	Proyec. ISO 128		Revisó: E. Lupi
Traf. Termico/ espesor	Montaje plano A					Aprobó: H. Tavella
Peso 0,11 Kg						Plano N° 701
Dureza	Perno fijación aro amortiguador					Plano N° 518



Diámetro medio (Dm)	29
Diámetro de alambre (d)	3,5
Espiras útiles (Na)	5
Longitud total sin carga (Lt)	48 ± 1
Longitud sólida (Ls)	24,5 ± 1

Sin previa autorización se prohíbe la construcción de la pieza representada. Propiedad de FCEFYN				UNC FCEFYN	Fecha: 22/12/2015
Material: AISI 304L ØLam. 3,5mm					Dibujó: H. Tavella
Tratamiento Superficial	Rev. A	Escala 2:1	Tol. no Espec. +0,5	Proyec. ISO 128	Revisó: E. Lupi
Trat. Termico/ espesor				Amortiguador Ø3"x80xØ25 [70 Ns/m][10000 Ns/m]	Aprobó: H. Tavella
Peso 0,04 Kg					Plano N° 704
Dureza		Resorte			Plano N° 519

ANEXO IV

Rutinas de Cálculo en Matlab

Anexo IV: Rutinas de Cálculo en Matlab

Rutina Cap2_1

% Resolución del ejercicio de prueba 2.5.3.

% --> Resuelve la Ecuación 2-43 utilizando los Parámetros adimensionales
% --> de la Ecuación 2-50 <--%

clear all

mr=0.1; omnr=1; cita1=0.1; cita2=0.0; f=1;

% mr Relación de masa suponemos $m_1=1$
% omnr Relación de frecuencias naturales
% cita Relación de amortiguamiento
% f Fuerza externa

param=[mr omnr cita1 cita2];

S=2; % Selector de parámetros S--> param

iterator=[1 0.9 0.7]; % Valores de iteración

I=100*iterator;

for p=1:3

```
if S==1
    mr=iterator(p);
elseif S==2
    omnr=iterator(p);
elseif S==3
    cita1=iterator(p);
elseif S==4
    cita2=iterator(p);
else
end
```

% Ecuación 2-50

```
m1=1; % asignamos valor de la masa
k1=1; % asignamos valor de la rigidez
w1=(k1/m1)^0.5;
m2=mr*m1; % asignamos valor ya que m1=1
w2=omnr*w1;
k2=w2*w2*m2; % de las relaciones adimensionales
c1=2*cita1; % de las relaciones adimensionales es cero
```

$c_2=2*c_1^2*m_2*w_2$; % de las relaciones dimensionales

```
for s=1:150
    om = 0.014*(s-1);
    G1=c1*i;      % asigna el numero imaginario i
    G2=c2*i;      % asigna el numero imaginario i

    % A (ecuación 2-43)

    A=[((k1+k2)-(om*om*m1)+((G1+G2)*om)),((-G2*om)-k2);((-G2*om)-
    k2),(k2-(om*om*m2)+((G2*om)))]];
    B=inv(A);
    C=[f;0];
    D=B*C;
    D=abs(D);
    equis1(s,p)=D(1,1);
    equis2(s,p)=D(2,1);
    h(s,1)=om;
end
```

end

% Grafica: depende del Selector --> S

```
if S==1
    plot(h(:,1),equis1(:,1),'r',h(:,1),equis1(:,2),'k--',h(:,1),equis1(:,3),'b');
    xlabel('\Omega');
    ylabel('Desplazamiento Sistema Principal');
    legend(['m_r ',sprintf('%3.0f %%',I(1,1))],[ 'm_r ',sprintf('%3.0f
    %%',I(1,2))],[ 'm_r ',sprintf('%3.0f %%',I(1,3))])
    title('Respuesta en frecuencia')
    axis([0,2,0,7])
    grid

elseif S==2
    plot(h(:,1),equis1(:,1),'r',h(:,1),equis1(:,2),'k--',h(:,1),equis1(:,3),'b');
    xlabel('\Omega');
    ylabel('Desplazamiento Sistema Principal');
    legend(['\omega_n_r ',sprintf('%3.0f %%',I(1,1))],[ '\omega_n_r ',sprintf('%3.0f
    %%',I(1,2))],[ '\omega_n_r ',sprintf('%3.0f %%',I(1,3))])
    title('Respuesta en frecuencia')
    axis([0,2,0,8])
    grid

elseif S==3
    plot(h(:,1),equis1(:,1),'r',h(:,1),equis1(:,2),'k--',h(:,1),equis1(:,3),'b');
    xlabel('\Omega');
    ylabel('Desplazamiento Sistema Principal');
    legend(['\zeta_1 ',sprintf('%3.0f %%',I(1,1))],[ '\zeta_1 ',sprintf('%3.0f
    %%',I(1,2))],[ '\zeta_1 ',sprintf('%3.0f %%',I(1,3))])
    title('Respuesta en frecuencia')
    axis([0,2,0,6])
```

```
grid
elseif S==4
    plot(h(:,1),equis1(:,1),'r',h(:,1),equis1(:,2),'k--',h(:,1),equis1(:,3),'b');
    xlabel('\Omega');
    ylabel('Desplazamiento Sistema Principal');
    legend(['\zeta_2 ',sprintf('%3.0f%%',I(1,1))],[ '\zeta_2 ',sprintf('%3.0f
    %%',I(1,2))],[ '\zeta_2 ',sprintf('%3.0f%%',I(1,3))])
    title('Respuesta en frecuencia')
    axis([0,2,0,6.5])
    grid
else
end
return
```

Rutina Cap2_2

% Respuesta en frecuencia de la estructura por Trabajos Virtuales
% CAPITULO 2 (21GLD) --> 2.6.2. <---

```
clear all
```

```
Altura=[0 0.75 2.25 3.75 5.25 6.5 7.5 8.5 9.5 10.5 11.5 12.5 13.5 14.5 15.5 16.5 17.5
18.5 19.5 20.5 21.5 22.2 22.2];
```

```
Lam=[1.5 1.5 1.5 1.5 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0.2]; % Longitud de tramo
```

```
for sn1=1:21
```

```
    Alturaprom(sn1)=(Altura(sn1)+Altura(sn1+1))*0.5;
```

```
    Lm(sn1)=Alturaprom(sn1);
```

```
    Lat(sn1)=(Altura(sn1+1)-Altura(sn1));
```

```
    Lap(sn1)=Altura(sn1+1);
```

```
    LapI=6; % Cota de división de propiedades de inercia Cambio de sección
```

```
end
```

```
mx2=153.94; % Masa por unidad de longitud Kg/m (2.81)
```

```
mx1=180; % Masa por unidad de longitud Kg/m (2.82)
```

```
I=0.0043208165; I1=0.0036094862; % Inercias [m^4] (2.71)
```

```
% Modulo de elasticidad de los materiales. [Kgf/m^2] (2.71)
```

```
E=21000000000; E3=19000000000;
```

```
% Calculo de la matriz de desplazamiento bajo carga unitaria
```

% (Matriz de flexibilidad método de las fuerzas) (2.6.2.1)

```

for j=1:21
    for y=1:21
        if y==j
            if Lap(y)<Lap(5);
                k=Lap(y);
                io=(Lap(y));
                s=Lap(y);
                o1=(1/(E*I))*((1/3)*s*io*k);

                O(y,j)=o1;
                A(y,j)=O(y,j);
            else
                k=Lap(y)-LapI;
                io=(Lap(y))-LapI;
                s=Lap(y)-LapI;
                o1=(1/(E3*I1))*((1/3)*s*io*k);
                s11=LapI;
                i11=(Lap(y)-LapI);
                i22=Lap(y);
                k11=Lap(j)-LapI;
                k22=Lap(j);
                o3=(1/(E*I))*(1/6)*s11*((2*i11*k11)+(i11*k22)+(i22*k11)+
                (2*i22*k22));
                O(y,j)=o1+o3;
                A(y,j)=O(y,j);
            end
        elseif y<j

            if Lap(y)<Lap(5)
                s=Lap(y);
                io=(Lap(y));
                k1=Lap(j)-Lap(y);
                k2=Lap(j);

                q1=(1/6)*(1/(E*I))*s*io*((k1+(2*k2)));

                Q11(y,j)=q1;
                A(y,j)=Q11(y,j);
            else
                s=Lap(y)-LapI;
                io=(Lap(y)-LapI);
                k1=Lap(j)-Lap(y);
                k2=Lap(j)-LapI;

                q1=(1/6)*(1/(E3*I1))*s*io*((k1+(2*k2)));

                s11=LapI;
                i11=Lap(y)-LapI;
    
```

```

        i22=Lap(y);
        k11=Lap(j)-LapI;
        k22=Lap(j);

        q3=(1/(E*I))*(1/6)*s11*((2*i11*k11)+(i11*k22)+(i22*k11)
        +(2*i22*k22));

        Q11(y,j)=q1+q3;
        A(y,j)=Q11(y,j);
    end
else
    if Lap(j)<Lap(5)
        s=Lap(j);
        k=Lap(j);
        i1=Lap(y)-Lap(j);
        i2=Lap(y);

        p=(1/(E*I))*(1/6)*s*(i1+(2*i2))*k;

        P(y,j)=p;
        A(y,j)=P(y,j);
    else
        s=Lap(j)-LapI;
        k=Lap(j)-LapI;
        i1=Lap(y)-Lap(j);
        i2=Lap(y)-LapI;

        p1=(1/(E3*I1))*(1/6)*s*(i1+(2*i2))*k;

        s11=LapI;
        i11=Lap(y)-LapI;
        i22=Lap(y);
        k11=Lap(j)-LapI;
        k22=Lap(j);

        p2=(1/(E*I))*(1/6)*s11*((2*i11*k11)+(i11*k22)+(i22*k11)+
        (2*i22*k22));

        P1(y,j)=p1+p2;
        A(y,j)=P1(y,j);
    end
end
end
end
for qw=1:21
    if qw<=4
        M(qw,qw)=(mx1*Lam(qw)); % Matriz Masa --> (2.85) <--
    Else
        M(qw,qw)=(mx2*Lam(qw)); % Matriz Masa --> (2.85) <--
    end
end

```

```
end
end

% Cálculo de vectores y valores propios.

Af=A';
Ak1=inv(Af); % --> (2.78) <--
Ak=(9.81)*Ak1; % Transforma la Matriz de rigidez de [Kgf/m] a [N/m]

K=Ak; % Matriz Rigidez en Sistema Internacional

K1=K;

[V D]=eig(K,M); % Cálculo vectores y valores propios --> (2.86) <--

for tt=1:21
    V1=V'; % Matriz Transpuesta de los Modos de Vibrar
    brut=V1*M*V;
    Vnor(:,tt)=(1/(sqrt(brut(tt,tt))))*V(:,tt); % Normalización con respecto a la
                                                matriz masa se usa diagonal principal
    V2(tt,:)=Vnor(:,tt)'; % Transpuesta
    Mort(tt,tt)=V2(tt,:)*M*Vnor(:,tt); % Masa Ortonormal
    Kort(tt,tt)=V2(tt,:)*K*Vnor(:,tt); % Rigidez Ortonormal
    Db4(tt)=(1/(2*3.14159))*(sqrt(D(tt,tt))); % Frecuencias naturales en Hz
    D4(tt)=D(tt,tt);
end

% Fuerza exterior aplicada al extremo libre

Fza=zeros(21,1);
Fza(21,1)=1;

% Resolución del sistema de ecuaciones.

for sm=1:2000
    s=((0.01*(sm)))i; % Frecuencia
    om1(sm)=(0.01*sm); % Frecuencia para el Grafico.

    MM=M;
    MAT=K1+(s*s*MM);
    MAT2=inv(MAT);
    MAT3=MAT2*Fza;
    displ=MAT3;
    displabs=abs(displ);
    des(sm)=displabs(21,1);
end

% Gráficos

plot(om1(1,:),des(1,:),'r');
xlabel('Frecuencia \omega rad/s');
```

```
ylabel('Desplazamiento m');  
title('Respuesta en frecuencia')  
legend('Sin Abs')  
axis([15,18,0,0.004])  
grid
```

```
return
```

Rutina Cap2_3

```
% Resolución del utilizando parámetros reducidos --> 2.7.3 <--
```

```
clear all
```

```
mr=0.15; omnr=0.869; cita1=0.0; cita2=0.22; f=1;
```

```
citaop=0.217; % Balachandran (2.104)
```

```
% omnr relación de frecuencias naturales  
% cita relación de amortiguamiento
```

```
iteratorC2=[0.2 0.217 0.24 citaop];  
iteratorWr=[0.869 0.869 0.869 0.869];  
iteratorMr=[0.15 0.15 0.15 0.15];
```

```
omnrg=100*iteratorC2;  
mr1=100*mr;  
omnr1=omnr*100;
```

```
% Utilizamos los parámetros adimensionales (2.50)
```

```
for p=1:4
```

```
    cita2=iteratorC2(p); % itera entre los valores de cita2  
    m1=786.23;          % asignamos valor de la masa reducida  
    k1=216850;         % asignamos valor de la rigidez reducida  
    w1=(k1/m1)^0.5;  
    m2=iteratorMr(p)*m1;  
    w2=iteratorWr(p)*w1;  
    k2=w2*w2*m2;      % Relaciones adimensionales  
    c1=2*cita1;       % Relaciones adimensionales  
    c2=2*cita2*m2*w2 % Relaciones adimensionales  
    c2s(p)=c2;
```



```
for s=1:200
    om = 0.15*(s-1);
    G1=c1*i; % asigna el numero imaginario i
    G2=c2*i; % asigna el numero imaginario i
    A=[((k1+k2)-(om*om*m1)+((G1+G2)*om)),((-G2*om)-k2);((-G2*om)-
    k2),(k2-(om*om*m2)+((G2*om)))]; % --> Ecuación 2.43 <--

    B=inv(A);
    C=[f;0];
    D=B*C;
    D=abs(D);
    equis1(s,p)=D(1,1);
    equis2(s,p)=D(2,1);
    h(s,1)=om;
end
end

plot(h(:,1),equis1(:,1),'r',h(:,1),equis1(:,2),'b--',h(:,1),equis1(:,3),'k');
xlabel('\omega rad/s');
ylabel('Desplazamiento m');
title(['Respuesta en frecuencia para m_r',sprintf('%3.0f%% ',mr1(1,1))])
legend(['\zeta_2 ',sprintf('%3.1f%%',omnrg(1,1))],[ '\zeta_2 ',sprintf('%3.1f
%%',omnrg(1,2))],[ '\zeta_2 ',sprintf('%3.1f%%',omnrg(1,3))]
grid

figure

plot(h(:,1),equis1(:,1),'r',h(:,1),equis1(:,2),'b--',h(:,1),equis1(:,3),'k');
xlabel('\omega rad/s');
ylabel('Desplazamiento m');
title('Comparativa de Respuestas en frecuencia')
legend(['\zeta_2 ',sprintf('%3.1f%% m_r 5%%',omnrg(1,1))],[ '\zeta_2 ',sprintf('%3.1f
%% m_r 10%%',omnrg(1,2))],[ '\zeta_2 ',sprintf('%3.1f%% m_r 15%%',omnrg(1,3))]
grid

figure

plot(h(:,1),equis1(:,4),'m');
xlabel('\omega rad/s');
ylabel('Desplazamiento m');
title(['Respuesta en frecuencia para m_r',sprintf('%3.0f%% ',mr1(1,1))])
legend(['\zeta_2 ',sprintf('%3.1f%%',omnrg(1,4))]
grid

return
```

Rutina Cap5_1

% Resolución de Sistema de 22 GLD (Solución General)

clear all

Altura=[0 0.75 2.25 3.75 5.25 6.5 7.5 8.5 9.5 10.5 11.5 12.5 13.5 14.5 15.5 16.5 17.5
18.5 19.5 20.5 21.5 22.2 22.2];

Lam=[1.5 1.5 1.5 1.5 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0.2]; % Longitud de tramo

for sn1=1:21

Alturaprom(sn1)=(Altura(sn1)+Altura(sn1+1))*0.5;

Lm(sn1)=Alturaprom(sn1);

Lat(sn1)=(Altura(sn1+1)-Altura(sn1));

Lap(sn1)=Altura(sn1+1);

LapI=6; % Cota de division de propiedades de inecia Cambio de seccion

end

mx2=153.94; % Masa por unidad de longitud Kg/m (2.81)

mx1=180; % Masa por unidad de longitud Kg/m (2.82)

mx1=151.1; % Kg/m

masaredA=806.75; % Masa reducida ABAQUS

masaredM=801.33; % Masa reducida MATLAB

ny1=2.618; % Frec Natural Hz

ny1rad=2*3.14159*ny1; % Frec Natural Rad/s

ymax=0.1439; % Desplazamiento Max DIN 1055-4

St=0.18; % Strouhal

Diam=1.23; % Diametro m

Velreson=ny1*(Diam/St); % Velocidad Critica

SigmaR=414; % Rotura N/mm^2

SigmaF=235; % Fluencia N/mm^2

omr=[0.80 0.90 1]; % Relacion de Frec Naturales

mmasa=115; % Masa del Absorbedor (al cuete)

cita=[0.2]; % Relacion de amortiguamiento critico del Absorbedor

omnrg=100*omr;

citag=100*cita;

pos=19; % Posicion del Absorbedor

mrreq=0.08; % Para sacar la fuerza en relaciones requeridas

Agpos=mrreq/0.004;

I=0.0043208165; I1=0.0036094862; % Inercias [m^4]

E=21000000000; E3=19000000000; % Seleccion del modulo de elasticidad de los
materiales. [Kgf/m^2]

% Calculo de la matriz de desplazamiento bajo carga unitaria
% (Matriz de flexibilidad metodo de las fuerzas)

```
for j=1:21
    for y=1:21
        if y==j
            if Lap(y)<Lap(5);
                k=Lap(y);
                io=(Lap(y));
                s=Lap(y);
                o1=(1/(E*I))*((1/3)*s*io*k);

                O(y,j)=o1;
                A(y,j)=O(y,j);
            else
                k=Lap(y)-LapI;
                io=(Lap(y))-LapI;
                s=Lap(y)-LapI;
                o1=(1/(E3*I1))*((1/3)*s*io*k);
                s11=LapI;
                i11=(Lap(y)-LapI);
                i22=Lap(y);
                k11=Lap(j)-LapI;
                k22=Lap(j);
                o3=(1/(E*I))*(1/6)*s11*((2*i11*k11)+(i11*k22)+(i22*k11)+
                (2*i22*k22));
                O(y,j)=o1+o3;
                A(y,j)=O(y,j);
            end
        elseif y<j

            if Lap(y)<Lap(5)
                s=Lap(y);
                io=(Lap(y));
                k1= Lap(j)-Lap(y);
                k2=Lap(j);

                q1=(1/6)*(1/(E*I))*s*io*((k1+(2*k2)));

                Q11(y,j)=q1;
                A(y,j)=Q11(y,j);
            else
                s=Lap(y)-LapI;
                io=(Lap(y)-LapI);
                k1=Lap(j)-Lap(y);
                k2=Lap(j)-LapI;

                q1=(1/6)*(1/(E3*I1))*s*io*((k1+(2*k2)));

                s11=LapI;
```

```

        i11=Lap(y)-LapI;
        i22=Lap(y);
        k11=Lap(j)-LapI;
        k22=Lap(j);
        q3=(1/(E*I))*(1/6)*s11*((2*i11*k11)+(i11*k22)+(i22*k11)+
        (2*i22*k22));

        Q11(y,j)=q1+q3;
        A(y,j)=Q11(y,j);
    end
else
    if Lap(j)<Lap(5)
        s=Lap(j);
        k=Lap(j);
        i1=Lap(y)-Lap(j);
        i2=Lap(y);

        p=(1/(E*I))*(1/6)*s*(i1+(2*i2))*k;

        P(y,j)=p;
        A(y,j)=P(y,j);
    else
        s=Lap(j)-LapI;
        k=Lap(j)-LapI;
        i1=Lap(y)-Lap(j);
        i2=Lap(y)-LapI;

        p1=(1/(E3*I1))*(1/6)*s*(i1+(2*i2))*k;

        s11=LapI;
        i11=Lap(y)-LapI;
        i22=Lap(y);
        k11=Lap(j)-LapI;
        k22=Lap(j);

        p2=(1/(E*I))*(1/6)*s11*((2*i11*k11)+(i11*k22)+(i22*k11)+
        (2*i22*k22));

        P1(y,j)=p1+p2;
        A(y,j)=P1(y,j);
    end
end
end
end

for qw=1:21
    if qw<=4
        M(qw,qw)=(mx1*Lam(qw)); % Matriz Masa --> (2.85) <--
    else
        M(qw,qw)=(mx2*Lam(qw)); % Matriz Masa --> (2.85) <--
    end
end

```

end

M1=M;

Bejl=A;

for ejl=1:21

Bejl(ejl,22)=A(ejl,pos);

Bejl(22,ejl)=A(ejl,pos);

end

% Cálculo de vectores y valores propios.

Af=A';

Af1=(1/9.81)*Af; % Transforma la Matriz de Flexibilidad de [m/Kgf] a [m/N]

Ak1=inv(Af);

Ak=(9.81)*Ak1; % Transforma la Matriz de rigidez de [Kgf/m] a [N/m]

K=Ak; % Matriz Rigidez

K1=K;

% calculo vectores y valores propios. De la chimenea sola es para calcular alfa y beta.

[V D]=eig(K,M);

for tt=1:21

V1=V' % Matriz Transpuesta de los Modos de Vibrar

brut=V1*M*V;

% Normalizacion con respecto a la matriz masa se usa diagonal principal

Vnor(:,tt)=(1/(sqrt(brut(tt,tt))))*V(:,tt); V2(tt,:)=Vnor(:,tt)'; % Transpuesta

Mort(tt,tt)=V2(tt,:)*M*Vnor(:,tt); % Masa Ortonormal

Kort(tt,tt)=V2(tt,:)*K*Vnor(:,tt); % Rigidez Ortonormal

Db4(tt)=(1/(2*3.14159))*(sqrt(D(tt,tt))); % Frecuencias naturales en Hz

D4(tt)=D(tt,tt); % Frecuencias ordenadas en forma de vector

end

% Amortiguamiento de Rayleigh

D1=sqrt(D(21,21)); % Ultima Frecuencia Natural

D2=sqrt(D(20,20)); % penúltima Frecuencia Natural

DD=0.5*[(1/D1) D1; (1/D2) D2];

DD1=inv(DD);

coefamort=0.004;

JJ=DD1*[coefamort;coefamort]; % alfa y beta

KK=Ak;

CC1=((JJ(1,1).*M)+(JJ(2,1).*KK));

C1a=CC1;

for ite=1:3

B1=zeros(21,50);

B1a=zeros(21,1);

for ag=1:50

reldemas(ag)=0.004*(ag);

reldemas1(ag+1)=reldemas(ag);

Masaabs=reldemas(ag)*masaredM; % Masa del absorbedor

Kabs(ite)=((ny1rad*omr(ite))^2)*Masaabs; % Rigidez del absorbedor.

Cabs(ite)=2*Masaabs*(ny1rad*omr(ite))*(cita(1)); % Amortiguación del absorbedor.

% Masa del absorbedor a la matriz de masa del sistema

M1(22,22)=Masaabs;

K2s=Bej1; % Parte de la matriz de flexibilidad Bej1

K2s(22,22)=(9.81/Kabs(ite)); % Elemento (22,22)

K2s1=inv(K2s);

K2s2=9.81*K2s1; % Matriz de Rigidez con absorbedor

C1a(pos,pos)=CC1(pos,pos)+(Cabs(ite));

% Agrega la amortiguación del Absorbedor a la matriz de amortiguación

C1a(pos,22)=(-Cabs(ite));

C1a(22,pos)=(-Cabs(ite));

C1a(22,22)=(Cabs(ite));

if ag==Agpos

KabsSal(ite)=Kabs(ite); % Rigidez requerida.

CabsSal(ite)=Cabs(ite); % Amortiguamiento requerido.

else

end

% Resolucion del sistema de ecuaciones.

for sm=1:300

s=((0.05*(sm))*i); % Frecuencia

om1(sm)=((0.05*sm)); % Freceuncia para el Grafico.

MM=M1;

CC=C1a;

% Calculo de las frecuencias de desprendimiento de vortice
(Frecuencias de excitacion)

velo(sm)=(0.05*sm); % Velocidad de Referencia (10 m)

```

for wais=1:21
    if Lap(wais)<4
        velo1(sm,wais)=0.86*velo(sm); % Velocidad media en
        el tramo
        velo2(sm,wais)=velo1(sm,wais);
    else
        velo1(sm,wais)=(velo(sm))*((Lap(wais)/10)^0.16);
        % Velocidad media en el tramo
        velo2(sm,wais)=(velo(sm))*(((Lap(wais)+
        (0.5*Lam(wais)))/10)^0.16); % Parte superior del
        tramo
    end

    Reyn(sm,wais)=((velo1(sm,wais)*Diam)/(15*10^-6));

    if Reyn(sm,wais)>0 && Reyn(sm,wais)<=1e5
        CL(sm,wais)=0.12;
    elseif Reyn(sm,wais)>1e5 && Reyn(sm,wais)<=2e5
        CL(sm,wais)=(0.12)+(((Reyn(sm,wais)-
        1e5)*0.04)/(1e5));
    elseif Reyn(sm,wais)>2e5 && Reyn(sm,wais)<=4e5
        CL(sm,wais)=0.16+(((Reyn(sm,wais)-2e5)*0.13)/(2e5));
    elseif Reyn(sm,wais)>4e5 && Reyn(sm,wais)<=5e5
        CL(sm,wais)=0.29+(((Reyn(sm,wais)-4e5)*0.08)/(1e5));
    else
        CL(sm,wais)=0.37;
    end

    Fza(wais,1)=CL(sm,wais)*0.5*1.25*((velo1(sm,wais))^2)*
    (1.23*(Lam(wais))); % Fuerza de Von Karman
end

```

% Para calcular las frecuencias en los topos de tramo

```

for ws=1:21
    if Reyn(sm,ws)<=1e5
        St1(sm,ws)=0.2;
    elseif Reyn(sm,ws)>=1e5 && Reyn(sm,ws)<=2e5
        St1(sm,ws)=0.2+(((Reyn(sm,ws)-1e5)*0.06)/(1e5));
    elseif Reyn(sm,ws)>2e5 && Reyn(sm,ws)<=4e5
        St1(sm,ws)=0.26+(((Reyn(sm,ws)-2e5)*0.09)/(2e5));
    elseif Reyn(sm,ws)>4e5 && Reyn(sm,ws)<=6e5
        St1(sm,ws)=0.35+(((Reyn(sm,ws)-4e5)*0.04)/(2e5));
    elseif Reyn(sm,ws)>6e5 && Reyn(sm,ws)<=8e5
        St1(sm,ws)=0.39+(((Reyn(sm,ws)-6e5)*0.03)/(2e5));
    elseif Reyn(sm,ws)>8e5 && Reyn(sm,ws)<=1e6
        St1(sm,ws)=0.42+(((Reyn(sm,ws)-8e5)*0.02)/(2e5));
    elseif Reyn(sm,ws)>1e6 && Reyn(sm,ws)<=1.8e6
        St1(sm,ws)=0.44+(((Reyn(sm,ws)-1e6)*0.03)/(8e5));
    end
end

```

```
elseif Reyn(sm,ws)>1.8e6 && Reyn(sm,ws)<=2e6
    St1(sm,ws)=0.45+(((2e6-Reyn(sm,ws))*0.02)/(2e5));
elseif Reyn(sm,ws)>2e6 && Reyn(sm,ws)<=2.1e6
    St1(sm,ws)=0.26+(((2.1e6-Reyn(sm,ws))*0.19)/(1e5));
else
    St1(sm,ws)=0.26;
end
end
for ws1=1:21
    frec2(sm,ws1)=(1/ny1)*St1(sm,ws1)*(velo2(sm,ws1)/Diam);

    % inverso de St

    if frec2(sm,ws1)>=1 && frec2(sm,ws1)<1.4
        frec1(sm,ws1)=(2*3.14159)*ny1; % Lock-In
    else
        frec1(sm,ws1)=(2*3.14159)*St1(sm,ws1)*(velo2(sm,ws1)/Diam);
    end
end

% Para calcular las frecuencias promedio

for wi=1:21
    if Lap(wi)<4
        frec(wi)=frec1(wi);
    else
        frec(wi)=0.5*(frec1(wi)+frec1(wi-1));
    end

    Fza1(wi,1)=Fza(wi,1); % Vector Fuerza de Von Karman
    Fza2(wi,1)=Fza1(wi,1);
end
for ttt=1:21 %POTENCIADOR%
    if Reyn(sm,ttt)>=5.5e5 && Reyn(sm,ttt)<=6.66e5
        Pot(sm,ttt)=((Reyn(sm,ttt)-5.5e5)/(6.66e5-5.5e5));
    elseif Reyn(sm,ttt)>=6.66e5 && Reyn(sm,ttt)<=8.72e5
        Pot(sm,ttt)=1;
    elseif Reyn(sm,ttt)>=8.72e5 && Reyn(sm,ttt)<=1e6
        Pot(sm,ttt)=((1e6-Reyn(sm,ttt))/(1e6-8.72e5));
    else
        Pot(sm,ttt)=0.0;
    end

    frec3(sm)=ny1rad*i;
end
frec32(sm)=frec31(sm)*i;

for tt1=1:21
```



```
Fza2(tt1,1)=Fza2(tt1,1)*Pot(sm,tt1);
Fza1(tt1,1)=Fza1(tt1,1)*Pot(sm,tt1);
end

Fza1(22,1)=0;      % Fuerza sobre el Absorbedor

MAT=K2s2+(frec3(sm)*CC)+(frec3(sm)*frec3(sm)*MM); % Acá
cambio por K1
MATE=KK+(frec3(sm)*CC1)+(frec3(sm)*frec3(sm)*M); % Sin
absorbedor

MAT2=inv(MAT);      % Con absorbedor
MATE2=inv(MATE);    % Sin absorbedor

MAT3=MAT2*(Fza1);   % Con absorbedor
MATE3=MATE2*Fza2;   % Sin absorbedor

despl=MAT3;
DESPL=MATE3;

desplabs=(abs(despl))+0.001;      % con absorbedor
DESPLABS=(abs(DESPL))+0.001;

desplabs22(ite,sm)=desplabs(22,1); % con absorbedor

for tg=1:21
    desplabs1(tg,1)=desplabs(tg); % con absorbedor de la
    chimenea 21 GLD
    DESPLABS(tg,1)=DESPLABS(tg);
end

desplts(ite,sm)=desplabs(20,1); % Elemento 20 % con absorbedor
desplts1(ite,sm)=desplabs(21,1); % Elemento 21 % con absorbedor
DESPLTS1(sm)=DESPLABS(21,1);

% Para sacar máximo

J(21,1)=desplabs1(21,1);

if B1(21,ag)<J(21,1)
    B1(:,ag)=desplabs1(:,1); % Respuesta Máxima con absorbedor
    omm=sm;
    velom=velo(sm);

% Relación de masa requerida

if ag==Agpos
    % desplazamiento del primario a relacion requerida
    Bmr(:,ite)=B1(:,ag);
```

```

                                % desplaz del Abs cuando el primario es maximo.
                                Bmr22(1,ite)=desplabs22(ite,omm);
                                else
                                end
                                else
                                end

                                J1(21,1)=DESPLABS(21,1);

                                if B1a(21,1)<J1(21,1)
                                    % Respuesta Maxima sin absorbedor
                                    B1a(:,1)=DESPLABS(:,1);
                                else
                                end
                                end

                                B11(ite,1)=0;
                                B11(ite,ag+1)=max(desplts1(ite,:));           %GLD 21 Con Absorbedor
                                B22(ite,1)=0;
                                B22(ite,ag+1)=max(desplabs22(ite,:));       %GLD 22 (Absorbedor)
                                if ag==Agpos
                                    % Maximo del Abs en Relacion de masa requerida
                                    Bmr22a(1,ite)=B22(ite,ag+1);
                                end
                                end

                                % Solo calcula tensiones %
                                Momento=(22.2/(Af1(21,21)))*B1(21,:);      % Momento flector
                                Momentoa=(22.2/(Af1(21,21)))*B1a(21,1);    % Momento flector S/Abs

                                % Tension, Ecuacion de Navier N/mm^2.

                                Tension(ite,:)=((0.5*Diam)/(I*(1000000)))*Momento;
                                Tensiona(ite,:)=((0.5*Diam)/(I*(1000000)))*Momentoa;
                                Rotura(ag)=SigmaR;                            % Rotura
                                Fluencia(ag)=SigmaF;                          % Fluencia

                                % Coeficiente de Seguridad S/Abs

                                CS(ite,1)=(SigmaF)/(Tensiona(ite,:));

                                for hj=1:50
                                    % Coeficiente de Seguridad C/Abs
                                    CS(ite,hj+1)=(SigmaF)/(Tension(ite,hj));
                                end

                                B11(ite,1)=max(DESPLTS1);           % Elemento GLD 21 Sin Absorbedor
                                for yo=1:51
                                    REL(ite,yo)=(100/B11(ite,1))*(B11(ite,yo)); % Reducción
                                end
                                end
```

end

for kl=1:3

B22(kl,1)=((B22(kl,2)-B22(kl,3))*2)+B22(kl,3); % Interpola

end

% Graficos

plot(reldemas1(1,:),B11(1,:),'r',reldemas1(1,:),B11(2,:),'m',reldemas1(1,:),B11(3,:),'k');
xlabel('Relacion de Masa m_r');

ylabel('Desplazamiento m');

title(['Máxima Respuesta Sist. Principal para \zeta_2 ',sprintf('%3.0f %% (Posición
%.0f)',citag(1,1),pos)])

legend(['\omega_n_r ',sprintf('%3.0f %%',omnrg(1,1))],['\omega_n_r ',sprintf('%3.0f
%%',omnrg(1,2))],['\omega_n_r ',sprintf('%3.0f %%',omnrg(1,3))])

grid

figure

plot(reldemas1(1,:),B22(1,:),'r',reldemas1(1,:),B22(2,:),'m',reldemas1(1,:),B22(3,:),'k');
xlabel('Relacion de Masa m_r');

ylabel('Desplazamiento m');

title(['Máxima Respuesta Absorbedor para \zeta_2 ',sprintf('%3.0f %% (Posición
%.0f)',citag(1,1),pos)])

legend(['\omega_n_r ',sprintf('%3.0f %%',omnrg(1,1))],['\omega_n_r ',sprintf('%3.0f
%%',omnrg(1,2))],['\omega_n_r ',sprintf('%3.0f %%',omnrg(1,3))])

grid

figure

plot(reldemas1(1,:),CS(1,:),'r',reldemas1(1,:),CS(2,:),'m',reldemas1(1,:),CS(3,:),'k');
xlabel('Relacion de Masa m_r');

ylabel('CS');

title(['Coeficiente de Seguridad para \zeta_2 ',sprintf('%3.0f %% (Posición
%.0f)',citag(1,1),pos)])

legend(['\omega_n_r ',sprintf('%3.0f %%',omnrg(1,1))],['\omega_n_r ',sprintf('%3.0f
%%',omnrg(1,2))],['\omega_n_r ',sprintf('%3.0f %%',omnrg(1,3))])

grid

figure

plot(reldemas1(1,:),REL(1,:),'r',reldemas1(1,:),REL(2,:),'m',reldemas1(1,:),
REL(3,:),'k');

xlabel('Relacion de Masa m_r');

ylabel('Reducción %');

title(['Rendimiento Absorbedor para \zeta_2 ',sprintf('%3.0f %% (Posición
%.0f)',citag(1,1),pos)])

```
legend(['\omega_n_r ',sprintf('%3.0f %%',omnrg(1,1))],['\omega_n_r ',sprintf('%3.0f %%',omnrg(1,2))],['\omega_n_r ',sprintf('%3.0f %%',omnrg(1,3))])
```

grid

```
pos          % Posición del Absorbedor  
mrreq       % Para sacar la fuerza en relaciones requeridas
```

Agpos

```
for sal=1:3
```

```
    Salida1(1,sal)=omnrg(sal);  
    Salida2(1,sal)=Bmr(21,sal);  
    Salida3(1,sal)=Bmr22a(1,sal);  
    Salida4(1,sal)=REL(sal,Agpos+1);  
    Salida5(1,sal)=CS(sal,Agpos+1);  
    Salida6(1,sal)=KabsSal(sal);  
    Salida7(1,sal)=CabsSal(sal);
```

```
end
```

Salida1

Salida2

Salida3

Salida4

Salida5

Salida6

Salida7

```
return
```

Rutina Cap5_2

```
% Resolución de Sistema de 22 GLD (Solución Particular)
```

```
clear all
```

```
Altura=[0 0.75 2.25 3.75 5.25 6.5 7.5 8.5 9.5 10.5 11.5 12.5 13.5 14.5 15.5 16.5 17.5  
18.5 19.5 20.5 21.5 22.2 22.2];
```

```
Lam=[1.5 1.5 1.5 1.5 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0.2]; % Longitud de tramo
```

```
for sn1=1:21
```

```
    Alturaprom(sn1)=(Altura(sn1)+Altura(sn1+1))*0.5;  
    Lm(sn1)=Alturaprom(sn1);  
    Lat(sn1)=(Altura(sn1+1)-Altura(sn1));  
    Lap(sn1)=Altura(sn1+1);  
    LapI=6;      % Cota de division de propiedades de inercia Cambio de seccion
```

```
end
```

```
mx2=153.94;      % Masa por unidad de longitud Kg/m (2.81)  
mx1=180;        % Masa por unidad de longitud Kg/m (2.82)  
ny1=2.618;     % Frec Natural Hz
```

```
ny1rad=2*3.14159*ny1; % Frec Natural Rad/s
ymax=0.1439;
St=0.18; % Strouhal
Diam=1.23; % Diametro m
Velreson=ny1*(Diam/St); % Velocidad Critica
SigmaR=414; % Rotura N/mm^2
SigmaF=235; % Fluencia N/mm^2

omr=1; % Relacion de Frec Naturales
mma=0.08*801.33; % Masa del Absorbedor
cita=[0.00 0.15 0.1]; % Relacion de amortiguamiento critico del Absorbedor
SS=2; % Selector de parametro a graficar en figura 6

pos=20; % Posicion del Absorbedor
reldmas=100*omr;
citag=100*cita;
citags=citag(1,SS);

B1=[0];

for po=1:3

masas(1,po)=mma; % Masa del absorbedor
rigidez(1,po)=((ny1rad*omr)^2)*mma; % Rigidez del absorbedor.
amortig(1,po)=2*mma*(ny1rad*omr)*(cita(po)); % Amortiguacion del
absorbedor.

end

I=0.0043208165; I1=0.0036094862; % Inercias [m^4]
E=21000000000; E3=19000000000; % Seleccion del modulo de elasticidad de los
materiales. [Kgf/m^2]

% Calculo de la matriz de desplazamiento bajo carga unitaria
% (Matriz de flexibilidad metodo de las fuerzas)
for j=1:21
for y=1:21
if y==j
if Lap(y)<Lap(5);
k=Lap(y);
io=(Lap(y));
s=Lap(y);
o1=(1/(E*I))*((1/3)*s*io*k);

O(y,j)=o1;
A(y,j)=O(y,j);
else
k=Lap(y)-LapI;
io=(Lap(y))-LapI;
s=Lap(y)-LapI;
o1=(1/(E3*I1))*((1/3)*s*io*k);
```

```
s11=LapI;  
i11=(Lap(y)-LapI);  
i22=Lap(y);  
k11=Lap(j)-LapI;  
k22=Lap(j);  
o3=(1/(E*I))*(1/6)*s11*((2*i11*k11)+(i11*k22)+(i22*k11)+  
(2*i22*k22));  
O(y,j)=o1+o3;  
A(y,j)=O(y,j);  
end  
  
elseif y<j  
  
if Lap(y)<Lap(5)  
s=Lap(y);  
io=(Lap(y));  
k1=Lap(j)-Lap(y);  
k2=Lap(j);  
  
q1=(1/6)*(1/(E*I))*s*io*((k1+(2*k2)));  
  
Q11(y,j)=q1;  
A(y,j)=Q11(y,j);  
else  
s=Lap(y)-LapI;  
io=(Lap(y)-LapI);  
k1=Lap(j)-Lap(y);  
k2=Lap(j)-LapI;  
  
q1=(1/6)*(1/(E3*I1))*s*io*((k1+(2*k2)));  
  
s11=LapI;  
i11=Lap(y)-LapI;  
i22=Lap(y);  
k11=Lap(j)-LapI;  
k22=Lap(j);  
q3=(1/(E*I))*(1/6)*s11*((2*i11*k11)+(i11*k22)+(i22*k11)+  
(2*i22*k22));  
  
Q11(y,j)=q1+q3;  
A(y,j)=Q11(y,j);  
end  
else  
if Lap(j)<Lap(5)  
s=Lap(j);  
k=Lap(j);  
i1=Lap(y)-Lap(j);  
i2=Lap(y);  
  
p=(1/(E*I))*(1/6)*s*(i1+(2*i2))*k;
```

```
P(y,j)=p;
A(y,j)=P(y,j);
else
s=Lap(j)-LapI;
k=Lap(j)-LapI;
i1=Lap(y)-Lap(j);
i2=Lap(y)-LapI;

p1=(1/(E3*I1))*(1/6)*s*(i1+(2*i2))*k;

s11=LapI;
i11=Lap(y)-LapI;
i22=Lap(y);
k11=Lap(j)-LapI;
k22=Lap(j);

p2=(1/(E*I))*(1/6)*s11*((2*i11*k11)+(i11*k22)+(i22*k11)+
(2*i22*k22));

P1(y,j)=p1+p2;
A(y,j)=P1(y,j);
end
end
end
end
```

Bejl=A; % Matriz de flexibilidad con Absorbedor

```
for ejl=1:21
    Bejl(ejl,22)=A(ejl,pos);
    Bejl(22,ejl)=A(ejl,pos);
end
```

A1=Bejl; % Cambio con Absorbedor

```
for ite=1:3
    Masaabs=masas(ite); % Masa del absorbedor
    Kabs=rigidez(ite); % Rigidez del absorbedor.
    Cabs=amortig(ite); % Amortiguacion del absorbedor.
    A1(22,22)=(9.81/(Kabs)); % Elemento (22,22)

    for qw=1:21
        if qw<=4
            M(qw,qw)=(mx1*Lam(qw)); % Matriz Masa --> (2.85) <--
        else
            M(qw,qw)=(mx2*Lam(qw)); % Matriz Masa --> (2.85) <--
        end
    end
end
```

```
M1=M;
M1(22,22)=Masaabs; % Masa del absorbedor a la matriz de masa del sistema
```

% Cálculo de vectores y valores propios.

```
Af=A';  
Af1=(1/9.81)*Af; % Transforma la Matriz de Flexibilidad de [m/Kgf] a [m/N]  
Ak1=inv(Af);  
Ak=(9.81)*Ak1; % Transforma la Matriz de rigidez de [Kgf/m] a [N/m]
```

```
K=Ak; % Matriz Rigidez
```

```
AfB=A1';  
Af1B=(1/9.81)*AfB; % Transforma la Matriz de Flexibilidad de [m/Kgf] a [m/N]  
Ak1B=inv(AfB);  
AkB=(9.81)*Ak1B; % Transforma la Matriz de rigidez de [Kgf/m] a [N/m]
```

```
K1=AkB;
```

% calculo vectores y valores propios. De la chimenea sola es para calcular alfa y beta.

```
[V D]=eig(K,M);
```

```
for tt=1:21  
    V1=V'; % Matriz Transpuesta de los Modos de Vibrar  
    brut=V1*M*V;
```

% Normalización con respecto a la matriz masa, se usa diagonal principal

```
Vnor(:,tt)=(1/(sqrt(brut(tt,tt))))*V(:,tt);  
V2(tt,:)=Vnor(:,tt)'; % Transpuesta  
Mort(tt,tt)=V2(tt,:)*M*Vnor(:,tt); % Masa Ortonormal  
Kort(tt,tt)=V2(tt,:)*K*Vnor(:,tt); % Rigidez Ortonormal  
Db4(tt)=(1/(2*3.14159))*(sqrt(D(tt,tt))); % Frecuencias naturales en Hz  
% Frecuencias ordenadas en forma de vector  
D4(tt)=D(tt,tt);  
end
```

% Amortiguamiento de Rayleigh

```
D1=sqrt(D(21,21)); % Ultima Frecuencia Natural  
D2=sqrt(D(20,20)); % Penúltima Frecuencia Natural  
DD=0.5*[(1/D1) D1; (1/D2) D2];  
DD1=inv(DD);  
coefamort=0.004;  
JJ=DD1*[coefamort;coefamort]; % alfa y beta
```

```
KK=Ak;
```

```
CC1=((JJ(1,1).*M)+(JJ(2,1).*KK));
```

```
C1a=CC1;
```


% Agrega la amortiguacion del Absorbedor a la matriz de amortiguación

```
C1a(pos,pos)=CC1(pos,pos)+(Cabs);  
C1a(pos,22)=(-Cabs);  
C1a(22,pos)=(-Cabs);  
C1a(22,22)=(Cabs);
```

% Resolucion del sistema de ecuaciones.

```
for sm=1:1024  
    s=((0.04*(sm))*i); % Frecuencia  
    om1(sm)=(0.04*sm); % Freceuncia para el Grafico.  
    MM=M1;  
    CC=C1a;  
  
    % Calculo de las frecuencias de desprendimiento de vortice (Frecuencias de  
    % excitacion)  
  
    velo(sm)=(0.04*sm); % Velocidad de Referencia (10 m)  
  
    for wais=1:21  
        if Lap(wais)<4  
            velo1(sm,wais)=0.86*velo(sm); % Velocidad media en el tramo  
            velo2(sm,wais)=velo1(sm,wais);  
        else  
            velo1(sm,wais)=(velo(sm))*((Lap(wais)/10)^0.16);  
            % Velocidad media en el tramo  
            velo2(sm,wais)=(velo(sm))*(((Lap(wais)+  
            (0.5*Lam(wais)))/10)^0.16); % Parte superior del tramo  
        end  
  
        Reyn(sm,wais)=((velo1(sm,wais)*Diam)/(15*10^-6));  
  
        if Reyn(sm,wais)>0 && Reyn(sm,wais)<=1e5  
            CL(sm,wais)=0.12;  
        elseif Reyn(sm,wais)>1e5 && Reyn(sm,wais)<=2e5  
            CL(sm,wais)=(0.12)+(((Reyn(sm,wais)-1e5)*0.04)/(1e5));  
        elseif Reyn(sm,wais)>2e5 && Reyn(sm,wais)<=4e5  
            CL(sm,wais)=0.16+(((Reyn(sm,wais)-2e5)*0.13)/(2e5));  
        elseif Reyn(sm,wais)>4e5 && Reyn(sm,wais)<=5e5  
            CL(sm,wais)=0.29+(((Reyn(sm,wais)-4e5)*0.08)/(1e5));  
        else  
            CL(sm,wais)=0.37;  
        end  
  
        Fza(wais,1)=CL(sm,wais)*0.5*1.25*((velo1(sm,wais))^2)*  
        (1.23*(Lam(wais))); % Fuerza de Von Karman  
    end  
  
    % para calcular las frecuencias en los topes de tramo
```

```
for ws=1:21
    invSt(ws)=velo2(ws)/(Diam*ny1);           % inverso de St

    if invSt<=5;
        if invSt<6,5;
            frec1(ws)=(2*3.14159)*St*(velo2(ws)/Diam); % Frecuencia de
            excitacion %
        else
            frec1(ws)=(2*3.14159)*ny1; % Lock-In

        end
    else
        frec1(ws)=(2*3.14159)*St*(velo2(ws)/Diam);
    end
end
```

% Para calcular las frecuencias en los topes de tramo

```
for ws=1:21
    if Reyn(sm,ws)<=1e5
        St1(sm,ws)=0.2;
    elseif Reyn(sm,ws)>=1e5 && Reyn(sm,ws)<=2e5
        St1(sm,ws)=0.2+(((Reyn(sm,ws)-1e5)*0.06)/(1e5));
    elseif Reyn(sm,ws)>2e5 && Reyn(sm,ws)<=4e5
        St1(sm,ws)=0.26+(((Reyn(sm,ws)-2e5)*0.09)/(2e5));
    elseif Reyn(sm,ws)>4e5 && Reyn(sm,ws)<=6e5
        St1(sm,ws)=0.35+(((Reyn(sm,ws)-4e5)*0.04)/(2e5));
    elseif Reyn(sm,ws)>6e5 && Reyn(sm,ws)<=8e5
        St1(sm,ws)=0.39+(((Reyn(sm,ws)-6e5)*0.03)/(2e5));
    elseif Reyn(sm,ws)>8e5 && Reyn(sm,ws)<=1e6
        St1(sm,ws)=0.42+(((Reyn(sm,ws)-8e5)*0.02)/(2e5));
    elseif Reyn(sm,ws)>1e6 && Reyn(sm,ws)<=1.8e6
        St1(sm,ws)=0.44+(((Reyn(sm,ws)-1e6)*0.03)/(8e5));
    elseif Reyn(sm,ws)>1.8e6 && Reyn(sm,ws)<=2e6
        St1(sm,ws)=0.45+(((2e6-Reyn(sm,ws))*0.02)/(2e5));
    elseif Reyn(sm,ws)>2e6 && Reyn(sm,ws)<=2.1e6
        St1(sm,ws)=0.26+(((2.1e6-Reyn(sm,ws))*0.19)/(1e5));
    else
        St1(sm,ws)=0.26;
    end
end

for ws1=1:21
    frec2(sm,ws1)=(1/ny1)*St1(sm,ws1)*(velo2(sm,ws1)/Diam);
    % inverso de St

    if frec2(sm,ws1)>=1 && frec2(sm,ws1)<1.4
        frec1(sm,ws1)=(2*3.14159)*ny1; % Lock-In
    else
```

```
frec1(sm,ws1)=(2*3.14159)*St1(sm,ws1)*(velo2(sm,ws1)/Diam);  
end  
end
```

% Para calcular las frecuencias promedio

```
for wi=1:21  
if Lap(wi)<4  
frec(wi)=frec1(wi);  
else  
frec(wi)=0.5*(frec1(wi)+frec1(wi-1));  
end  
  
Fza1(wi,1)=Fza(wi,1); % Vector Fuerza de Von Karman  
Fza2(wi,1)=Fza1(wi,1);  
end
```

```
for ttt=1:21 %POTENCIADOR%  
if Reyn(sm,ttt)>=5.5e5 && Reyn(sm,ttt)<=6.66e5  
Pot(sm,ttt)=((Reyn(sm,ttt)-5.5e5)/(6.66e5-5.5e5));  
Busca(sm)=sm;  
elseif Reyn(sm,ttt)>=6.66e5 && Reyn(sm,ttt)<=8.72e5  
Pot(sm,ttt)=1;  
elseif Reyn(sm,ttt)>=8.72e5 && Reyn(sm,ttt)<=1e6  
Pot(sm,ttt)=((1e6-Reyn(sm,ttt))/(1e6-8.72e5));  
else  
Pot(sm,ttt)=0.0;  
end
```

```
frec3(sm)=ny1rad*i;  
end
```

```
if Reyn(sm,21)>=5.5e5  
if Reyn(sm,1)>=1e6  
frec31(sm)=frec1(sm,20);  
else  
frec31(sm)=ny1rad;  
end  
else  
frec31(sm)=frec1(sm,20);  
end
```

```
frec32(sm)=frec31(sm)*i;
```

```
for tt1=1:21  
Fza2(tt1,1)=Fza2(tt1,1)*Pot(sm,tt1);  
Fza1(tt1,1)=Fza1(tt1,1)*Pot(sm,tt1);  
end
```

```
Fza1(22,1)=0; % Fuerza sobre el Absorbedor
```

```
MAT=K1+(frec3(sm)*CC)+(frec3(sm)*frec3(sm)*MM);

% Sin absorbedor

MATE=KK+(frec32(sm)*CC1)+(frec32(sm)*frec32(sm)*M);

MAT2=inv(MAT);           % Con absorbedor
MATE2=inv(MATE);        % Sin absorbedor

MAT3=MAT2*Fza1;         % Con absorbedor
MATE3=MATE2*Fza2;      % Sin absorbedor

despl=MAT3;
DESPL=MATE3;

if sm<=148
    DESPLABS=abs(DESPL)+((0.001/148)*sm);
    desplabs=abs(despl)+((0.001/148)*sm);
else
    DESPLABS=abs(DESPL)+(0.001);
    desplabs=abs(despl)+(0.001);
end

desplabs22(ite,sm)=desplabs(22,1);    % Con absorbedor

for tg=1:21
    desplabs1(tg,1)=desplabs(tg);      % Con absorbedor
    DESPLABS(tg,1)=DESPLABS(tg);
end

desplts(ite,sm)=desplabs(20,1);       % Elemento 20 % Con absorbedor
desplts1(ite,sm)=desplabs(21,1);     % Elemento 21 % Con absorbedor
DESPLTS1(sm)=DESPLABS(21,1);

% Para sacar máximo

J=DESPLABS;

if B1<J
    B1=J;
    omm=sm;
    velom=velo(sm);
else
end

% Fuerzas que producen esos desplazamientos
Fuerzas1=desplabs(21)/(Af1(21,21));
% Momento producido por esas fuerzas
Momento=22.2*Fuerzas1;
% Tension, Ecuacion de Navier N/mm^2.
Tension(ite,sm)=((Momento)*0.5*Diam)/(I*(1000000));
Rotura(sm)=SigmaR;           % Rotura
```

```

Fluencia(sm)=SigmaF;                                % Fluencia
CS(ite,sm)=(SigmaF)/(Tension(ite,sm));              % Coeficiente de Seguridad
REL(ite,sm)=100*(desplts1(ite,sm)/DESPLTS1(sm));
end
end
y=ifft(DESPLTS1(148:248));
yy=real(y);
tiempo=10/101:10/101:10;

% Graficos

plot(om1(1,:),desplts1(1:),'r',om1(1,:),desplts1(2:),'m',om1(1,:),desplts1(3:),'k',om1(
1,:),DESPLTS1(1:),'b');
xlabel('Velocidad v_r_e_f m/s');
ylabel('Desplazamiento m');
title(['Respuesta en velocidad ',sprintf('(Absorbedor en Posición %.0f)',pos)])
legend(['\zeta_2 ',sprintf('%3.0f %%',citag(1,1))],[ '\zeta_2 ',sprintf('%3.0f
%%',citag(1,2))],[ '\zeta_2 ',sprintf('%3.0f %%',citag(1,3))], 'Sin Abs')
axis([5,12,0,0.145])
grid

figure

subplot(2,1,1),plot(om1(1,:),desplts1(1:),'r',om1(1,:),desplts1(2:),'m',om1(1,:),desplts1(
3:),'k',om1(1,:),DESPLTS1(1:),'b');
xlabel('Velocidad v_r_e_f m/s');
ylabel('Desplazamiento m');
title(['Respuesta en frecuencia ',sprintf('(Absorbedor en Posición %.0f)',pos)])
legend(['\zeta_2 ',sprintf('%3.0f %%',citag(1,1))],[ '\zeta_2 ',sprintf('%3.0f
%%',citag(1,2))],[ '\zeta_2 ',sprintf('%3.0f %%',citag(1,3))])
axis([6,12,0,0.15])
grid

subplot(2,1,2),plot(om1(1,:),REL(1:),'r',om1(1,:),REL(2:),'m',om1(1,:),REL(3:),'k');
xlabel('Velocidad v_r_e_f m/s');
ylabel('Reducción %');
title('Reducción del Desplazamiento')
legend(['\zeta_2 ',sprintf('%3.0f %%',citag(1,1))],[ '\zeta_2 ',sprintf('%3.0f
%%',citag(1,2))],[ '\zeta_2 ',sprintf('%3.0f %%',citag(1,3))])
axis([6,12,0,10])
grid

figure

plot(om1(1,:),CS(1:),'r',om1(1,:),CS(2:),'m',om1(1,:),CS(3:),'k');
xlabel('Velocidad v_r_e_f m/s');
ylabel('Coeficiente de Seguridad CS');
title(['Coeficiente de Seguridad ',sprintf('(Absorbedor en Posición %.0f)',pos)])
legend(['\zeta_2 ',sprintf('%3.0f %%',citag(1,1))],[ '\zeta_2 ',sprintf('%3.0f
%%',citag(1,2))],[ '\zeta_2 ',sprintf('%3.0f %%',citag(1,3))])
axis([5,15,50,350])

```

grid

figure

```
plot(om1(1,:),desplabs22(1,:),'r',  
om1(1,:),desplabs22(2,:),'m',om1(1,:),desplabs22(3,:),'k');  
xlabel('Velocidad v_r_e_f m/s');  
ylabel('Desplazamiento m');  
title(['Respuesta en frecuencia Absorbedor ',sprintf('(Absorbedor en Posición  
%.0f)',pos)])  
legend(['\zeta_2 ',sprintf('%3.0f%%',citag(1,1))],['\zeta_2 ',sprintf('%3.0f  
%%',citag(1,2))],['\zeta_2 ',sprintf('%3.0f%%',citag(1,3))])  
axis([6,12,0,0.01])  
grid  
axis([6,12,0,0.01])  
figure
```

```
plot(om1(1,:),REL(1,:),'r',om1(1,:),REL(2,:),'m',om1(1,:),REL(3,:),'k');  
xlabel('Velocidad v_r_e_f m/s');  
ylabel('Reducción %');  
title(['Reducción del Desplazamiento ',sprintf('(Absorbedor en Posición %.0f)',pos)])  
legend(['\zeta_2 ',sprintf('%3.0f%%',citag(1,1))],['\zeta_2 ',sprintf('%3.0f  
%%',citag(1,2))],['\zeta_2 ',sprintf('%3.0f%%',citag(1,3))])  
axis([6,12,0,10])  
grid
```

figure

```
plot(om1(1,:),desplts1(SS,:),'r',om1(1,:),desplabs22(SS,:),'b');  
xlabel('Velocidad v_r_e_f m/s');  
ylabel('Desplazamiento m');  
title(['Respuesta en velocidad para \zeta_2 ',sprintf('%3.0f%% (Posición  
%.0f)',citags,pos)])  
legend('Sist Princ','Absorbedor')  
axis([6,12,0,0.01])  
grid
```

figure

```
plot(velo(1,:),DESPLTS1(1,:),'r');  
xlabel('Velocidad v_r_e_f m/s');  
ylabel('Desplazamiento m');  
title('Respuesta en Velocidad')  
legend('Sin Abs')  
axis([4,15,0,0.145])  
grid
```

return