



*Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos,
Canales y Puertos.*
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



MODELO PARAMÉTRICO Y ANÁLISIS ESTRUCTURAL COMPARATIVO DEL PUENTE ARCO DE LAS OBLATAS

Trabajo realizado por:

Carlos Pérez Barata

Dirigido:

Guillermo Capellán Miguel

Javier Sánchez Haro

Titulación:

**Máster Universitario en Ingeniería d
Caminos, Canales y Puertos**

Santander, febrero de 2022

TRABAJO FIN DE MASTER



ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN	1
1.1	PLANTEAMIENTO Y OBJETIVO DEL TRABAJO	1
1.2	ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO	2
2.	PUENTE ARCO DE LAS OBLATAS	3
3.	MODELO PARAMÉTRICO.....	7
3.1	INTRODUCCIÓN	7
3.2	DESCRIPCIÓN DEL MODELO PARAMÉTRICO.....	7
4.	OOFEM	24
4.1	DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA DE CÁLCULO.....	24
4.2	ESTRUCTURA DEL PROBLEMA EN OOFEM	26
4.3	JUSTIFICACIÓN DEL USO DE OOFEM COMO PROGRAMA DE CÁLCULO	27
5.	INTERFASE GRASSHOPPER – OOFEM	28
6.	ANÁLISIS ESTÁTICO DEL PUENTE DE LAS OBLATAS	43
6.1	ACCIONES CONSIDERADAS	43
6.1.1	Peso propio.....	43
6.1.2	Cargas muertas	44
6.1.3	Sobrecarga de uso	48
6.1.4	Sobrecarga de Nieve	50
6.2	EXTRACCIÓN DE RESULTADOS	53
6.2.1	Problemática de extracción de datos.....	54
6.2.2	Hoja de cálculo para extracción de resultados	56
6.3	RESULTADOS	59
6.3.1	Análisis estático: Hipótesis 1. Vehículo pesado en apoyo 1.....	59
6.3.2	Análisis estático: Hipótesis 1. Vehículo pesado en cuarto de luz 1.	63



6.3.3	Análisis estático: Hipótesis 1. Vehículo pesado en centro de luz.	66
6.3.4	Análisis estático: Hipótesis 1. Vehículo pesado en cuarto de luz 2.	68
6.3.5	Análisis estático: Hipótesis 1. Vehículo pesado en apoyo 2.....	70
6.3.6	Envolventes de esfuerzos	72
7.	ANÁLISIS DINÁMICO DEL PUENTE DE LAS OBLATAS	74
7.1	INTRODUCCIÓN.....	74
7.2	CÁLCULO DE MODOS DE VIBRACIÓN MEDIANTE OOFEM	75
7.3	CALCULO DINÁMICO EN OOFEM.	79
7.3.1	Estructura y alimentación del modelo de cálculo.	79
7.4	ANÁLISIS DINÁMICO DEL PUENTE ARCO DE LAS OBLATAS	82
7.4.1	Análisis de velocidades de paso.	82
7.4.2	Influencia de la variación del peralte del arco.....	95
8.	RESUMEN DE RESULTADOS	103
8.1	VARIACIÓN DE VELOCIDAD DE PASO DEL VEHÍCULO	103
8.2	VARIACIÓN DE PERALTE DEL ARCO.....	104
8.3	ESTUDIO DEL PESO PROPIO	104
9.	CONCLUSIONES	106
9.1	CONCLUSIONES RELATIVAS A LAS HERRAMIENTAS PARAMÉTRICAS COMBINADAS CON LA HERRAMIENTA OOFEM	106
9.2	CONCLUSIONES SOBRE EL ANÁLISIS DINÁMICO EN OOFEM	107
9.3	SOBRE EL COMPORTAMIENTO DEL PUENTE ARCO DE LAS OBLATAS.....	108
9.4	ALTERNATIVA ÓPTIMA	108
	BIBLIOGRAFÍA	110

**ÍNDICE DE ILUSTRACIONES**

Ilustración 1: Integración en el entorno del puente arco de Las Oblatas	3
Ilustración 2: Plano de Sección transversal por centro del puente.	4
Ilustración 3: Planta espejo de fondo del tablero.	5
Ilustración 4: Esquema de apoyos de la cimbra del tablero.	5
Ilustración 5: Visualización de Rhino y Grasshopper en pantallas extendidas	8
Ilustración 6: Generación de una línea en Rhino - Grasshopper	8
Ilustración 7: Representación de movimiento en Grasshopper.	9
Ilustración 8: Generación de polilínea.	9
Ilustración 9: Mitad de sección de tablero	10
Ilustración 10: Sección transversal completa del tablero	10
Ilustración 11: Comando AMoments	10
Ilustración 12: Comando Orient	11
Ilustración 13: Comando Extrude	11
Ilustración 14: Arranque del tablero	11
Ilustración 15: Sección del tramo central del tablero.....	12
Ilustración 16: Rehundido lateral del tablero	12
Ilustración 17: Semi-sección horizontal. Detalle de los aligeramientos parabólicos.	13
Ilustración 18: Comando ArrLinear	13
Ilustración 19: Aligeramientos de los jabalcones	13
Ilustración 20: Paso 1 modelización de diafragmas transversales.	14
Ilustración 21: Paso 2 modelización de diafragmas transversales.	14
Ilustración 22: Diafragmas transversales.	14
Ilustración 23: Meseta para los apoyos	15



Ilustración 24: Apoyos	15
Ilustración 25: Relleno en estribos.....	15
Ilustración 26: Abatimiento del ala superior en estribo.	16
Ilustración 27: Detalle de apoyos	16
Ilustración 28: Forma final del tablero.....	17
Ilustración 29: Parámetros modificables del tablero.....	17
Ilustración 30: Regresión a función parabólica del arco de Las Oblatas.	18
Ilustración 31: Sección transversal del arco. (Corte vertical)	18
Ilustración 32: Bordes clave para la generación del arco.....	19
Ilustración 33: Comando Boundary Volume.....	19
Ilustración 34: Arco completo de $x=0$ a $x=50,06$ m	20
Ilustración 35: Recorte de péndolas mediante Trim with brep.....	20
Ilustración 36: Aceras	21
Ilustración 37: Estribo	21
Ilustración 38: Vista en planta del modelo paramétrico final.....	22
Ilustración 39: Vista en alzado del modelo paramétrico final.	22
Ilustración 40: Vista de perfil del modelo paramétrico final.....	22
Ilustración 41: Perspectiva del modelo paramétrico	23
Ilustración 42: Estructura general de OOFEM.....	25
Ilustración 43: Formato de Input de datos en OOFEM.....	26
Ilustración 44: Discretización del Puente de las Oblatas.	28
Ilustración 45: Definición de nodos en formato OOFEM.....	29
Ilustración 46: Ubicación de sección para cada elemento del arco.	30
Ilustración 47: Planos perpendiculares al arco	30
Ilustración 48: Secciones del arco.	31



Ilustración 49: Sección considerada en el modelo de cálculo para el tablero.	31
Ilustración 50: Utilidad del comando “Concat”	32
Ilustración 51: Numeración de elementos en Grasshopper	33
Ilustración 52: Coordenadas en formato OOFEM. Forma de eliminar caracteres innecesarios	33
Ilustración 53: Ejemplo de inserción de elementos en OOFEM	34
Ilustración 54: Formato de inserción de secciones en OOFEM	34
Ilustración 55: Formato de inserción de materiales en OOFEM	34
Ilustración 56: Formato de inserción de condiciones de contorno en OOFEM	35
Ilustración 57: Función temporal constante	35
Ilustración 58: Representación básica de PiecewiseLinFunction	36
Ilustración 59: PiecewiseLinFunction separación entre instantes de diferente magnitud	36
Ilustración 60: Formato de inserción de Sets en OOFEM	36
Ilustración 61: Secciones en formato OOFEM	37
Ilustración 62: Caracterización de materiales en formato OOFEM.	37
Ilustración 63: Sets de nodos en los que existe diafragma transversal.	38
Ilustración 64: Vista general de la extracción de cargas y condiciones de contorno	38
Ilustración 65: Detalle de composición de cargas para su introducción en OOFEM	39
Ilustración 66: Lista de agrupación de condiciones de contorno y cargas.	39
Ilustración 67: Recuento de elementos dentro del modelo de cálculo	40
Ilustración 68: Conexión de características del modelo paramétrico para su inserción en OOFEM	40
Ilustración 69: Vista completa del modelo de cálculo	41
Ilustración 70: Copiado de datos en la lista a texto	41



Ilustración 71: Input en formato texto en Bloc de notas	42
Ilustración 72: Código en formato OOFEM para la caracterización de los materiales ..	43
Ilustración 73: Código en formato OOFEM para la introducción del efecto del peso propio en el cálculo	44
Ilustración 74: Espesor del pavimento.	45
Ilustración 75: Parte de la sección completa que no contribuye frente a esfuerzos	46
Ilustración 76: Proceso de extracción de la carga de peso muerto para los puntos del tablero cercanos a los estribos.	46
Ilustración 77: Extracción del volumen y carga de los diafragmas en Grasshopper	47
Ilustración 78: Sección de diafragmas que aportan carga muerta.	48
Ilustración 79: Distribución de carriles virtuales	48
Ilustración 80: Tabla 4.1-b para el valor característico de la sobrecarga de uso según el carril virtual	49
Ilustración 81: Sobrecarga de uso distribuida para aceras.	49
Ilustración 82: Dimensiones de ancho de acera.....	50
Ilustración 83: Sobrecarga de nieve sobre un terreno horizontal.	50
Ilustración 84: Combinación de acciones en situación persistente o transitoria.	51
Ilustración 85: Posición de sobrecarga de uso para la determinación de las envolventes de esfuerzos en diferentes casos de análisis.....	53
Ilustración 86: Cargas representativas de los diafragmas	53
Ilustración 87: OOFEM input manual. Ejecutar el código.....	54
Ilustración 88: Cambio de separador de decimales mediante el uso de opciones avanzadas de Excel.	54
Ilustración 89: Utilidad para eliminar la problemática de diferente separador de decimales entre OOFEM y Excel.....	55



Ilustración 90: OOFEM. Detalles del análisis y desglose de componentes que representan resultados en el fichero de salida del programa de cálculo para nodos.	55
Ilustración 91: OOFEM. Desglose de componentes que representan resultados en el fichero de salida del programa de cálculo para elementos.....	56
Ilustración 92: Primer componente del ejemplo de extracción separación de componentes dentro de un texto a componentes independientes	56
Ilustración 93: Segundo componente del ejemplo de separación de componentes dentro de un texto a componentes independientes	57
Ilustración 94: Extracción de texto sin generar celdas en blanco debido a espacios excesivos en el texto de origen.	57
Ilustración 95: Representación de cortantes provenientes de diferentes elementos para un mismo nodo	58
Ilustración 96: Ejemplo de tabla resumen de resultados para una hipótesis cualquiera.	58
Ilustración 97: Ley de axiles. Hipótesis 1. $f=15,7m$. Escala: $1m/3.333 KN$	59
Ilustración 98: Ley de cortantes. Hipótesis 1. $f=15,7m$. Escala: $1m/500 KN$	60
Ilustración 99: Ley de flectores. Hipótesis 1. $f=15,7m$. Escala: $1m/2.500 KN.m$	60
Ilustración 100: Diferencias de función funicular para carga uniforme (a) y peso propio (b) Fuente: (1).....	61
Ilustración 101: Reproducción de la maqueta funicular de la iglesia de la colonia Güell usada por Gaudí expuesta en el Museo del Templo de la Sagrada Familia	62
Ilustración 102: Dedución de relación entre incremento de la tangente de la función que define el arco con el incremento de la tangente de las fuerzas. Fuente: (2).....	63
Ilustración 103: Ley de axiles. Hipótesis 1. Carga en cuarto de luz 1. $f=15,7m$. Escala: $1m/3.333 KN$	64



Ilustración 104: Ley de cortantes. Hipótesis 1. Carga en cuarto de luz 1 para $f=15,7m$. Escala: $1m/500 KN$	64
Ilustración 105: Ley de flectores. Hipótesis 1. Carga en cuarto de luz 1 para $f=15,7m$. Escala: $1m/2.500 KN.m$	65
Ilustración 106: Ley de axiles. Hipótesis 1. Carga en centro de luz. $f=15,7m$. Escala: $1m/3.333 KN$	66
Ilustración 107: Ley de cortantes. Hipótesis 1. Carga en centro de luz para $f=15,7m$. Escala: $1m/500 KN$	66
Ilustración 108: Ley de flectores. Hipótesis 1. Carga en centro de luz para $f=15,7m$. Escala: $1m/2.500 KN.m$	67
Ilustración 109: Ley de axiles. Hipótesis 1. Carga en cuarto de luz. $f=15,7m$. Escala: $1m/3.333 KN$	68
Ilustración 110: Ley de cortantes. Hipótesis 1. Carga en cuarto de luz 2 para $f=15,7m$. Escala: $1m/500 KN$	68
Ilustración 111: Ley de flectores. Hipótesis 1. Carga en cuarto de luz 2 para $f=15,7m$. Escala: $1m/2.500 KN.m$	69
Ilustración 112: Ley de axiles. Hipótesis 1. Carga en apoyo 2. $f=15,7m$. Escala: $1m/3.333$ KN	70
Ilustración 113: Ley de cortantes. Hipótesis 1. Carga en apoyo 2 para $f=15,7m$. Escala: $1m/500 KN$	70
Ilustración 114: Ley de flectores. Hipótesis 1. Carga en apoyo 2 para $f=15,7m$. Escala: $1m/2.500 KN.m$	71
Ilustración 115: Envolventes de esfuerzos axiles. Análisis estático. Escala $1m/3.333 KN$	72



Ilustración 116:Envolventes de esfuerzos cortantes. Análisis estático. Escala 1m/500 KN	72
Ilustración 117:Envolventes de flectores. Análisis estático. Escala 1m/2.500 KN	73
Ilustración 118: Modos de vibración 1-6 para una viga simple de 10 metros de luz. Obtenidos mediante OOFEM.	74
Ilustración 119: Fórmula de Javier Sánchez Haro para el cálculo de la aceleración para el paso de una carga con velocidad conocida.....	75
Ilustración 120: Código para la determinación de los modos de vibración. OOFEM	75
Ilustración 121: Output de OOFEM para la obtención de los modos de vibración 1-6 de una viga simple.	76
Ilustración 122: Desplazamientos para modos de vibración. OOFEM.....	76
Ilustración 123: Código de búsqueda de " dof 3" en archivos de texto mediante CMD.	77
Ilustración 124: Resultado de búsqueda de " dof 3" en archivos de texto mediante CMD.	77
Ilustración 125: Búsqueda de " dof 3" exportada a archivo de texto mediante CMD. ..	78
Ilustración 126: Frecuencia de la carga móvil según el modo de vibración.	78
Ilustración 127: Rigidez de la viga según el modo de vibración.	78
Ilustración 128: Detalles del código para efectuar un análisis dinámico de integración directa en OOFEM.	79
Ilustración 129: Discretización mediante cargas en nodos (en rojo) de la carga móvil real (en azul). Carga viva en centro de luz.....	80
Ilustración 130:Discretización mediante cargas en nodos (en rojo) de la carga móvil real (en azul). Carga viva en 3/4 de luz.	81



Ilustración 131: Aceleración del nodo en centro de luz. Comparación resultado teórico vs modelo de OOFEM.....	82
Ilustración 132: Extracción de esfuerzos del archivo .out de OOFEM. Instante 1.	83
Ilustración 133: Macro para copiar un rango de celdas en diferentes ubicaciones.	84
Ilustración 134: Código final para extraer datos de análisis dinámico.	84
Ilustración 135: Tablas dinámicas para envolventes de esfuerzos.	85
Ilustración 136: Tablas dinámicas para seguimiento de esfuerzos por instante.	85
Ilustración 137: Seguimiento de esfuerzos por cada instante.....	85
Ilustración 138: Conector de todas las tablas dinámicas para el cambio de instante.....	85
Ilustración 139: Análisis dinámico. V= 40 km/h. Comparación de envolventes de axiles. Escala 1m/5.000 KN	86
Ilustración 140: Análisis dinámico. V= 40 km/h. Comparación de envolventes de cortantes. Escala 1m/500 KN	87
Ilustración 141: Análisis dinámico. V= 40 km/h. Comparación de envolventes de flectores. Escala 1m/10.000 KN.m	88
Ilustración 142: Análisis dinámico. V= 20 km/h. Comparación de envolventes de axiles. Escala 1m/5.000 KN	89
Ilustración 143: Análisis dinámico. V= 20 km/h. Comparación de envolventes de cortantes. Escala 1m/500 KN	89
Ilustración 144: Análisis dinámico. V= 20 km/h. Comparación de envolventes de flectores. Escala 1m/10.000 KN.m	90
Ilustración 145: Análisis dinámico. V= 5 km/h. Comparación de envolventes de axiles. Escala 1m/5.000 KN	91
Ilustración 146: Análisis dinámico. V= 5 km/h. Comparación de envolventes de cortantes. Escala 1m/500 KN	91



Ilustración 147: Análisis dinámico. $V= 5$ km/h. Comparación de envolventes de flectores. Escala 1m/10.000 KN.	92
Ilustración 148: Análisis dinámico. $V= 1$ km/h. Comparación de envolventes de axiles. Escala 1m/5.000 KN	93
Ilustración 149: Análisis dinámico. $V= 5$ km/h. Comparación de envolventes de cortantes. Escala 1m/5.000 KN	93
Ilustración 150: Análisis dinámico. $V= 1$ km/h. Comparación de envolventes de flectores. Escala 1m/5.000 KN	94
Ilustración 151: Vista general del puente arco de las Oblatas para el caso original.	95
Ilustración 152: Envolventes de axiles. Escala 1m/5.000 KN.....	95
Ilustración 153: Envolventes de cortantes. Escala 1m/500 KN.....	96
Ilustración 154: Envolventes de flectores. Escala 1m/10.000 KN.m	96
Ilustración 155: Vista general del puente arco de las Oblatas para el caso de $f/L = 1/6$. 97	
Ilustración 156: $f/L = 1/6$. Envolventes de axiles. Escala 1m/5.000 KN	97
Ilustración 157: $f/L = 1/6$. Envolventes de cortantes. Escala 1m/500 KN	98
Ilustración 158: $f/L = 1/6$. Envolventes de flectores. Escala 1m/10.000 KN.m.....	99
Ilustración 159: Vista general del puente arco de las Oblatas para el caso de $f/L=1/8$. . 99	
Ilustración 160: $f/L=1/8$. Envolventes de axiles. Escala 1m/5.000 KN	100
Ilustración 161 $f/L=1/8$. Envolventes de cortantes. Escala 1m/500 KN	100
Ilustración 162: $f/L=1/8$. Envolventes de flectores. Escala 1m/10.000 KN.m.....	101
Ilustración 163: Reacciones en los apoyos (N) para $f = 15,7$ m.....	105
Ilustración 164: Reacciones en los apoyos (N) para $f = 8,34$ m.....	105
Ilustración 165: Reacciones en los apoyos (N) para $f = 6,26$ m.....	105
Ilustración 167: Alternativas adoptadas en configuración de flecha/luz del arco. $1/8, 1/6$ y $1/3$	108



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Coeficientes parciales de seguridad para comprobaciones resistentes IAP-11	44
Tabla 2: Detalle de la estructura de las aceras voladas	45
Tabla 3: Valor de sobrecargas de uso	49
Tabla 4: Resumen de cargas consideradas para el análisis.	51
Tabla 5: Hipótesis más desfavorables para el Puente de las Oblatas.....	52
Tabla 6: Resumen de cargas. Combinación para la hipótesis nº1.	52
Tabla 7: Resumen de axiles para los puntos más singulares del arco. Hipótesis nº1 de combinación de acciones. $f=15,7m$	59
Tabla 8: Resumen de cortantes para los puntos más singulares del arco. Hipótesis nº1 de combinación de acciones. $f=15,7m$	60
Tabla 9: Resumen de flectores para los puntos más singulares del arco. Hipótesis nº1 de combinación de acciones. $f=15,7m$	61
Tabla 10: Resumen de axiles para los puntos más singulares del arco. Hipótesis nº1. Carga en cuarto de luz 1. $f=15,7m$	64
Tabla 11: Resumen de cortantes para los puntos más singulares del arco. Hipótesis nº1. Carga en cuarto de luz 1. $f=15,7m$	65
Tabla 12: Resumen de flectores para los puntos más singulares del arco. Hipótesis nº1. Carga en cuarto de luz 1. $f=15,7m$	65
Tabla 13: Resumen de axiles para los puntos más singulares del arco. Hipótesis nº1. Carga en centro de luz para $f=15,7m$	66
Tabla 14: Resumen de cortantes para los puntos más singulares del arco. Hipótesis nº1. Carga en centro de luz. $f=15,7m$	67



Tabla 15: Resumen de flectores para los puntos más singulares del arco. Hipótesis nº1. Carga en centro de luz. $f=15,7m$	67
Tabla 16:Resumen de axiles para los puntos más singulares del arco. Hipótesis nº1. Carga en cuarto de luz 2 para $f=15,7m$	68
Tabla 17: Resumen de cortantes para los puntos más singulares del arco. Hipótesis nº1. Carga en cuarto de luz 2. $f=15,7m$	69
Tabla 18:Resumen de flectores para los puntos más singulares del arco. Hipótesis nº1. Carga en cuarto de luz 2. $f=15,7m$	69
Tabla 19: Resumen de axiles para los puntos más singulares del arco. Hipótesis nº1. Carga en apoyo 2 para $f=15,7m$	70
Tabla 20:Resumen de cortantes para los puntos más singulares del arco. Hipótesis nº1. Carga en apoyo 2. $f=15,7m$	71
Tabla 21: Resumen de flectores para los puntos más singulares del arco. Hipótesis nº1. Carga en apoyo 2. $f=15,7m$	71
Tabla 22: Desglose de componentes para la obtención de la aceleración en el nodo central. $L= 10m$. $P=10KN$. $V=20(m/s)$	78
Tabla 23: Aceleración teórica para centro de luz. $L=10 m$. $P=10KN$. $V= 20 m/s$	79
Tabla 24: Resumen de axiles para los puntos más singulares del puente. Análisis dinámico. $V= 40 km/h$	87
Tabla 25: Resumen de cortantes para los puntos más singulares del puente. Análisis dinámico. $V= 40 km/h$	87
Tabla 26: Resumen de flectores para los puntos más singulares del puente. Análisis dinámico. $V= 40 km/h$	88
Tabla 27: Resumen de axiles para los puntos más singulares del puente. Análisis dinámico. $V= 20 km/h$	89



Tabla 28: Resumen de cortantes para los puntos más singulares del puente. Análisis dinámico. $V=20$ km/h.	90
Tabla 29: Resumen de flectores para los puntos más singulares del puente. Análisis dinámico. $V=20$ km/h.	90
Tabla 30: Resumen de axiles para los puntos más singulares del puente. Análisis dinámico. $V=5$ km/h.	91
Tabla 31: Resumen de cortantes para los puntos más singulares del puente. Análisis dinámico. $V=5$ km/h.	92
Tabla 32: Resumen de flectores para los puntos más singulares del puente. Análisis dinámico. $V=5$ km/h.	92
Tabla 33: Resumen de axiles para los puntos más singulares del puente. Análisis dinámico. $V=1$ km/h.	93
Tabla 34: Resumen de cortantes para los puntos más singulares del puente. Análisis dinámico. $V=1$ km/h.	94
Tabla 35: Resumen de flectores para los puntos más singulares del puente. Análisis dinámico. $V=1$ km/h.	94
Tabla 36: Resumen de axiles para los puntos más singulares del puente. Análisis dinámico. $f=15,7$ m.	95
Tabla 37: Resumen de cortantes para los puntos más singulares del puente. Análisis dinámico. $f=15,7$ m.	96
Tabla 38: Resumen de flectores para los puntos más singulares del puente. Análisis dinámico. $f=15,7$ m.	97
Tabla 39: Resumen de axiles para los puntos más singulares del puente. Análisis dinámico. $f=8,34$ m.	98



Tabla 40: Resumen de cortantes para los puntos más singulares del puente. Análisis dinámico. $f=8,34$ m.	98
Tabla 41: Resumen de flectores para los puntos más singulares del puente. Análisis dinámico. $f= 8,34$ m.	99
Tabla 42: Resumen de axiles para los puntos más singulares del puente. Análisis dinámico. $f=6,26$ m.	100
Tabla 43: Resumen de cortantes para los puntos más singulares del puente. Análisis dinámico. $f=6,26$ m.	101
Tabla 44: Resumen de flectores para los puntos más singulares del puente. Análisis dinámico. $f=6,26$ m.	101
Tabla 45: Variación del peso propio para los diferentes casos de estudio respecto el caso original	105

**RESUMEN**

Título del TFM: MODELO PARAMÉTRICO Y ANÁLISIS ESTRUCTURAL COMPARATIVO DEL PUENTE ARCO DE LAS OBLATAS

Autor: Carlos Pérez Barata

Directores: Guillermo Capellán Miguel

Javier Sánchez Haro

Convocatoria: febrero de 2022

Palabras clave: Puente, arco, Oblatas, antifunicularidad, BIM, modelado, paramétrico, Grasshopper, OOFEM, dinámico, cortante, momento, flector, axil, flecha, modelo de cálculo, carga, móvil, análisis, comparativo.

Planteamiento del problema: El motivo del siguiente Trabajo Fin de Máster es caracterizar el comportamiento de los puentes arco, en concreto el Puente Arco de Las Oblatas, frente a variaciones en sus características geométricas y condiciones de contorno. El objetivo se alcanzará desarrollando un modelo cuya característica principal sea la sencilla modificación de su geometría y la extracción del modelo de cálculo del propio programa de diseño para generar una herramienta con mayor versatilidad. Otro de los objetivos será determinar la respuesta estructural del puente frente a cargas dinámicas obteniendo esfuerzos y desplazamientos para las diferentes hipótesis a analizar.

Desarrollo de las soluciones adoptadas: Para cumplir con los objetivos planteados, se desarrollará un modelo paramétrico del Puente Arco de Las Oblatas. El modelo se construirá mediante la herramienta Grasshopper, que permite una fácil relación entre parámetros, de tal manera que el usuario puede definir hasta qué punto el modelo es versátil en cuanto a la determinación de diferentes geometrías para la estructura. Una vez generado el modelo, se deberá generar un modelo de cálculo que incluya las características definidas en el modelo paramétrico. Para ello es necesario desarrollar una interfase en el propio Grasshopper para discretizar todas las características del puente a un formato que el programa de cálculo admita para el análisis. Ya que el software de cálculo (OOFEM) opera por código introducido en archivos de texto, el resultado final de la interfase entre ambos programas debe ser un texto que recoja todas las características que exija el código utilizado por OOFEM para definir las. Una vez generado el modelo de cálculo, se calculan las envolventes derivadas del estado estático de la combinación persistente, se determinan sus esfuerzos para tres peraltes del arco diferentes y se visualiza la tendencia de funcionamiento del puente arco. Seguidamente se llevan a cabo los mismos casos de análisis, pero en este caso frente a una carga móvil. Esto genera una problemática dentro del software, ya que, a priori, no presenta ninguna herramienta para definir el movimiento de una carga en el espacio para un análisis de una duración fijada. Sin embargo, se consigue modelar el paso de la carga viva mediante funciones temporales aplicadas a cargas fijas. El fin del análisis dinámico es establecer



la influencia de una carga móvil frente al caso estático. Además, se estudiará la influencia en la estructura de la velocidad de paso de la carga, comparando los resultados por velocidades.

Conclusiones: Las herramientas paramétricas como Grasshopper, constituyen una solución para el modelado que impacta en gran medida en la manera de enfocar las diferentes alternativas de diseño de estructuras, beneficiándose de poder modificar el modelo paramétrico al antojo del usuario y, mediante una interfase entre el programa de modelización y OOFEM, el de cálculo. Esto resulta en un ahorro de tiempo significativo y en una era en la que la producción y la inmediatez forman parte del día a día de la ingeniería, el tiempo es un bien muy preciado. La conexión entre la herramienta de modelado paramétrico y el software de cálculo OOFEM es óptima, ya que Grasshopper posee la capacidad de traspasar las características del modelo al mismo formato de entrada que éste admite, el formato texto. Esa es la principal ventaja de utilizar herramientas paramétricas que encajen correctamente con las necesidades de alimentación del programa de cálculo; puede automatizarse la entrada de datos a OOFEM directamente desde el modelo 3D del puente de manera que las variaciones geométricas, de condiciones de contorno, cargas o características de los materiales se actualicen en el modelo de cálculo de manera sencilla y, sobre todo, rápida sin la necesidad de generar otro modelo de cálculo que incluya esas nuevas características. El programa carece de la capacidad para realizar un análisis dinámico modal mas puede estudiarse el efecto dinámico sobre la estructura mediante módulos como DIIDynamic que hacen uso de métodos de integración directa como el método de Newmark para hallar la respuesta estructural. La simulación de las cargas vivas es posible, pudiendo configurar la velocidad de estudio de manera sencilla teniendo en cuenta la posición de los nodos de paso. Por lo tanto, el uso de OOFEM para este tipo de análisis es adecuado. El efecto dinámico de la carga viva influye de manera notable en los esfuerzos, llegando a quintuplicar los resultantes del estudio estático en caso del cortante. Estos tienden al estado estático cuando se disminuye la velocidad de la carga.

Las alternativas estudiadas para la variación de la flecha del arco traen consigo distintas maneras de trabajar de la estructura. Como ya se ha comentado en el documento, el funcionamiento del Puente Arco de las Oblatas consiste de un arco que absorbe parte de las cargas transmitidas por el tablero para reconducirlas a los apoyos únicamente por axil ya que el arco toma una directriz antifunicular de cargas. Sin embargo, al variar las características de la flecha del arco, se modifica el funcionamiento de la estructura.

En primer lugar, para una relación flecha/luz del arco de 1/6, toda la estructura presenta mayores axiles, el arco tracciona el tablero hasta un 86% más ya que la componente horizontal de los axiles transmitidos a los apoyos es mayor. Sin embargo, en cuanto a los demás esfuerzos sufridos por el arco, estos se ven reducidos, en un 140% en el caso de los momentos flectores y una reducción del 11% del cortante en clave. Esto, debido a que la línea de presiones se encuentra más centrada en la sección, adoptando un mejor funcionamiento antifunicular y funcionando casi exclusivamente a compresión. Además, la opción de decantarse por el peralte 1/6 reduciría el volumen de material utilizado en un 4,4% reduciendo las reacciones verticales en los apoyos y por tanto transmitiendo menores tensiones al terreno. Sin embargo, el hecho de que el tablero se



encuentre más traccionado implicaría una reducción del coeficiente de seguridad frente a tracciones en el tablero, por lo que sería conveniente el aumento de la cuantía de pretensado longitudinal para abordar esos esfuerzos. En cuanto a la alternativa con relación 1/8, los esfuerzos axiales siguen aumentando de manera drástica hasta un 141% para el tablero siguiendo la tendencia de traccionar más el tablero cuanto menor es el peralte. En cuanto a los momentos, estos aumentan respecto a la opción de peralte 1/6 y respecto al peralte original. En este caso, en un 36% lo que indica un distanciamiento de las líneas de presiones y por lo tanto mayor excentricidad para la clave del arco y para el arranque. Por otro lado, el peralte de 1/8 presenta menor uso de material llegando hasta una reducción en volumen del 6,3% por lo que las tensiones transmitidas al terreno serían menores aún. La opción de peralte 1/6 presenta mayores beneficios que tanto la disposición original como la opción de peralte 1/8, la cual aumenta el axil en el tablero aún más, por lo que la cuantía de pretensado, en contraposición debería ser mayor aún. Por otro lado, la relación flecha luz 1/8 genera una mayor excentricidad de la línea de presiones en el arco, haciendo aparecer mayores momentos que en la configuración original.

En conclusión, para las hipótesis realizadas en el presente trabajo, la opción de peralte 1/6 resulta ser la mejor configuración flecha/luz para el puente.

Bibliografía:

1. Pamplona, Ayuntamiento de. Parque Fluvial de Pamplona. [En línea] Ayuntamiento de Pamplona. [Citado el: 05 de 01 de 2022.] http://www.parquefluvialdepamplona.es/parquefluvial/es/rio_arga/rochapea_index.asp?Hito=rochapea_puente_oblatas.
2. Patzák, Borek. ACTA POLYTECHNIA. [En línea] 06 de 2004. [Citado el: 09 de 01 de 2022.] <https://ojs.cvut.cz/ojs/index.php/ap/article/view/618/450>.
3. —. *OOFEM. Input data format specification*. Praga : Faculty of Civil Engineering, Department of Structural Mechanics, 2018.
4. *EHE - 08 Instrucción de Hormigón Estructural*. s.l. : Ministerio de Fomento, 2011.
5. *Instrucción sobre las acciones a consideraren el proyecto de puentes de carretera: IAP-11*. s.l. : Ministerio de fomento. Dirección General de Carreteras, 2012.
6. APUNTES. APUNTES, Revista digital de Arquitectura. *Revista digital de Arquitectura*. [En línea] 04 de Octubre de 2019. [Citado el: 08 de Febrero de 2022.] <http://apuntesdearquitecturadigital.blogspot.com/2019/10/el-arquitecto-gaudi-y-la-catenaria-las.html>.
7. *Arcos. Funicularidad*. Torres, Javier. s.l. : Revista de Edificación, Marzo de 1989, Revista de Edificación, pág. 16.
8. Haro, Javier Sánchez. *Desarrollo de teoría sobre impactos. Método simplificado de cálculo de impactos en estructuras*. 2017.

**ABSTRACT**

Master's Thesis Title: PARAMETRIC MODEL AND COMPARATIVE STRUCTURAL ANALYSIS OF THE OBLATAS ARCH BRIDGE

Author: Carlos Pérez Barata

Directors: Guillermo Capellán Miguel

Javier Sanchez Haro

Call: February 2022

Keywords: Bridge, arch, Oblatas, antifunicularity, BIM, modeling, parametric, Grasshopper, OOFEM, dynamic, shear, moment, bending, axial, deflection, calculation model, load, mobile, analysis, comparative.

Statement of the problem: The reason for the following Master's Thesis is to characterize the behavior of arch bridges, specifically the Las Oblatas Arch Bridge, in the face of variations in its geometric characteristics and boundary conditions. The objective will be achieved by developing a model whose main characteristic is the simple modifiability of its geometry and the extraction of the calculation model from the design program itself to generate a tool with greater versatility. Another objective will be to determine the structural response of the bridge against dynamic loads, achieving stresses and displacements for the different hypotheses to be analyzed.

Development of the adopted solutions: To meet the stated objectives, a parametric model of the Las Oblatas Arch Bridge will be developed. The model will be built using the Grasshopper tool, which allows an easy relationship between parameters, in such a way that the user can define to what extent the model is versatile in terms of determining different geometries for the structure. Once the model has been generated, a calculation model must be generated that includes the characteristics defined in the parametric model. For this, it is necessary to develop an interface in Grasshopper itself to discretize all the characteristics of the bridge to a format that the calculation program admits for the analysis. Since the calculation software (OOFEM) operates by code entered in text files, the final result of the interface between both programs must be a text that collects all the characteristics required by the code used by OOFEM to define them. Once the calculation model is generated, the envelopes derived from the static state of the persistent combination are calculated and their efforts are determined for three different arch depths and the operating trend of the arch bridge is displayed. The same analysis cases are then carried out, but in this case against a moving load. This generates a problem within the software, since, at first glance, it does not have any tool to define the movement of a charge in space for an analysis of a fixed duration. However, it is possible to model the trace of the load through time functions applied to fixed loads. The purpose of the dynamic analysis is to establish the influence of a moving load versus the static case. In addition, the influence



on the structure relative to speed of the load will be studied, comparing the results by speeds.

Conclusions: Parametric tools such as Grasshopper constitute a modeling solution that has a great impact on the way of approaching the different structural design alternatives, benefiting from being able to modify the model at the user's whim. This results in significant time savings and in an era where production and immediacy are part of everyday engineering, time is a precious commodity. The connection between the parametric modeling tool and the OOFEM calculation software is optimal, since Grasshopper has the ability to transfer the characteristics of the model to the same input format that it supports, the text format. That is the main advantage of using parametric tools that fit correctly with the needs of the calculation program; Data input to OOFEM can be automated directly from the 3D model of the bridge so that geometric variations, boundary conditions, loads or material characteristics are updated in the calculation model easily and, above all, quickly without the need to generate another calculation model that includes these new characteristics. The program lacks the capacity to perform a modal dynamic analysis, but the dynamic effect on the structure can be studied through modules such as DIIDynamic that make use of direct integration methods such as the Newmark method to find the structural response. The simulation of live loads is possible, being able to configure the speed in a simple way taking into account the position of the nodes. Therefore, the use of OOFEM for this type of analysis is appropriate. The dynamic effect of the live load has a notable influence on the stresses, reaching five times those resulting from the static study in the case of shear. These tend to the static state when the speed of the load is decreased.

The alternatives studied for the variation of the arrow of the bow bring with them different ways of working with the structure. As has already been mentioned in the document, the operation of the Arco de las Oblatas Bridge consists of an arch that absorbs part of the loads transmitted by the deck to redirect them to the supports only axially, since the arch takes an antifunicular load guideline. However, by varying the characteristics of the arrow of the bow, the operation of the structure is modified.

In the first place, for a sag/arch span ratio of $1/6$, the entire structure has greater axial forces, the arch pulls the deck up to 86% more since the horizontal component of the axial forces transmitted to the supports is greater. However, as for the other forces suffered by the arch, these are reduced, by 140% in the case of bending moments and a reduction of 11% in the key shear. This is due to the fact that the pressure line is more centered in the section, adopting a better antifunicular function and operating almost exclusively in compression. In addition, the option of opting for the $1/6$ cant would reduce the volume of material used by 4.4%, reducing the vertical reactions at the supports and therefore transmitting less stress to the ground. However, the fact that the deck is more stressed would imply a reduction in the safety coefficient against traction in the deck, so it would be advisable to increase the amount of longitudinal prestress to address these efforts. As for the alternative with a $1/8$ ratio, the axial forces continue to increase drastically up to 141% for the deck, following the trend of pulling more on the deck the lower the cant. As for the moments, these increase with respect to the $1/6$ superelevation option and with respect to the original superelevation. In this



case, by 36%, which indicates a distance between the pressure lines and, therefore, a greater eccentricity for the keystone of the arch and for the base. On the other hand, the 1/8 cant presents less use of material, reaching a reduction in volume of 6.3%, so the stresses transmitted to the ground would be even lower.

The 1/6 superelevation option presents greater benefits than both the original layout and the 1/8 superelevation option, which increases the axial in the deck even more, so the amount of prestress, in contrast, should be even greater. On the other hand, the 1/8 span ratio generates a greater eccentricity of the pressure line in the arch, causing greater moments to appear than in the original configuration.

In conclusion, for the hypotheses made in the present work, the 1/6 superelevation option turns out to be the best deflection/span configuration for the bridge.



1. INTRODUCCIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO Y OBJETIVO DEL TRABAJO

La ingeniería, guiada por las necesidades de producción, se encuentra inmersa en una constante búsqueda de la optimización de procesos. Por ello, periódicamente, tanto la metodología como los procesos de estudio y análisis de los diferentes problemas de la ingeniería cambian para dar solución a esta cuestión. Es la búsqueda del ahorro de recursos la que en la gran mayoría de los casos lleva a la automatización de los procesos, resultando en mejores rendimientos y en la reducción de plazos por la eliminación de trabajos repetitivos y, en consecuencia, menores costes.

Para ello, juegan un papel crucial las metodologías que hacen uso de herramientas paramétricas. En lo que a la ingeniería estructural concierne, es muy común al realizar diferentes análisis, la necesidad de ajuste de tanto la geometría del modelo tridimensional a analizar, como las condiciones de contorno, cargas a soportar etc. Para ello es necesario en la mayoría de casos, volver a introducir la geometría de estudio junto con todas las características que forman parte del análisis aun si éstas no van a ser modificadas.

Por ello, las herramientas paramétricas nos posibilitan identificar parámetros básicos sobre los que construir el análisis y, en caso de estos necesitar de modificación, realizar los cambios sin ningún tipo de reestructuración del problema y de manera totalmente automática. Una característica crucial de las herramientas paramétricas es la capacidad de ajuste de la parametrización, es decir, proporciona la habilidad de cuantificar la cantidad de parámetros que son objeto de ajuste, llegando hasta la parametrización completa si fuera necesario.

Este trabajo tiene como objetivo la aplicación de todas las bondades del modelado paramétrico en 3D para una estructura existente, el puente arco de Las Oblatas, en Pamplona, sobre el río Arga. Además, el modelo generado mediante las herramientas Rhino y Grasshopper, será el primer modelo 3D del puente.

Por otro lado, haciendo uso de las ventajas de los programas anteriormente citados, se realizará una conexión automatizada entre el programa de modelado y el de cálculo, necesario para realizar el análisis que envuelve este trabajo. De esa manera, el segundo obtendría todos los datos necesarios para realizar el análisis de manera automatizada frente a posibles cambios tanto de geometría como de propiedades y características de los materiales, así como de acciones y condiciones de contorno.

El objetivo final del trabajo involucrará, mediante el uso de las herramientas comentadas en los párrafos anteriores, el estudio de diferentes alternativas surgidas a partir de la geometría original de la estructura tanto a nivel estético como estructural, para así determinar qué alternativa sería la idónea tanto por influencias de la tendencia de diseño actual como por exigencias tensionales.



1.2 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

En este apartado se describirá brevemente el contenido de cada uno de los capítulos en los que se divide el documento.

En el Capítulo 1, se introducirá el tema de estudio y se presentarán los diferentes objetivos, así como se explicará la estructura que sigue el documento.

En el segundo Capítulo se describirá brevemente el puente arco de las Oblatas describiendo su función como estructura urbana y sus características geométricas principales.

El Capítulo 3 tratará sobre la descripción del modelo paramétrico construido a través de la herramienta de modelado Grasshopper. En él se expone con detalle el proceso de construcción y las dificultades encontradas para la composición del modelo.

El Capítulo 4 describe el programa de cálculo en el que se basarán los análisis realizados mientras que el Capítulo 5 por su parte lo conformará la explicación sobre la interfase o conexión ente tanto la herramienta de modelado como la de cálculo.

El Capítulo 6 lo conforma el análisis estático del puente arco de las Oblatas mientras que el Capítulo 7 estará compuesto por la explicación de todas las características necesarias para realizar un análisis dinámico de estructuras en OOFEM, así como la exposición de resultados basados en el análisis de la influencia de la velocidad de la carga viva y el peralte del arco sobre la estructura.

Finalmente, en el capítulo 8 se resumen las conclusiones derivadas de todo el estudio.



2. PUENTE ARCO DE LAS OBLATAS

El objetivo de este capítulo es describir las características principales del puente arco de Las Oblatas, en Pamplona.

En primer lugar, debe de comprenderse la utilidad de dicha estructura y cómo esta juega un papel clave dentro de la ordenación urbanística de la ciudad. El puente, cuya fecha de inicio de construcción data de 1992, se ubica ligeramente al este del centro de la ciudad. La estructura es de vital importancia para conectar el tráfico rodado y peatonal del barrio de Rochapea con tanto el Casco Viejo, como con los barrios más al suroeste de la ciudad: Mendabaldea y San Juan (1). Por otro lado, el puente se integra dentro de uno de los múltiples espacios verdes que atesora la ciudad, siendo envuelto por el Paseo Kosterapea, así como de sus diferentes parques y espacios naturales como se puede apreciar en la siguiente figura.



Ilustración 1: Integración en el entorno del puente arco de Las Oblatas

La estructura se define como un puente arco de tablero inferior. El tablero tiene una longitud entre ejes de apoyo de 50,06 metros y los esfuerzos son transmitidos al terreno mediante dos estribos idénticos que envuelven tanto el cajón central como los voladizos alcanzando una altura máxima de hasta diez metros desde base de zapata.

El arco de la estructura es un arco laminar de sección variable, tanto la cota de la directriz como las medidas de la sección varían de manera parabólica. Trabaja como un arco de baja rigidez, por lo que soporta pocos casos de carga diferentes al antifuncular que hace que el elemento trabaje casi exclusivamente a compresión. Esto se debe a que, por la geometría del arco, este no es capaz de soportar esfuerzos cortantes, momentos flectores o torsores, por lo que estos deben de ser asumidos por otros elementos del puente. Entre ellos se encuentra el cajón central y los apoyos empotrados frente a esfuerzos torsores. El cajón es apoyado por las péndolas para distribuir las cargas hacia el arco y ser asumidas como compresión por el mismo. El arco a su vez transmite parte de dicha compresión como esfuerzo horizontal al tablero, lo que hace necesaria la



disposición de un pretensado longitudinal en el mismo de 15 tendones constituidos por 12 cordones de diámetro 0.6" en el ala superior y 16 cordones de las mismas características en el ala inferior.

La sección transversal del tablero mantiene un ancho constante de 27,70 metros incluyendo las estructuras metálicas que sostienen las aceras en ambos lados. Sin embargo, el elemento singular de la sección es el cajón central.

De canto 2,80 metros, está compuesto por hormigón HP-40 y se caracteriza por tener diferente ancho de almas en la sección entre el apoyo y el primer diafragma y el resto del puente, variando este en 30 cm.

En la cara exterior de las almas se observa un pequeño rehundido que discurre por casi toda la luz del puente, abatiéndose al llegar a la altura de los apoyos.

Las péndolas conectan el arco con el ala superior del cajón con una inclinación de 12% respecto a la vertical que es a su vez la inclinación con la que prosiguen las almas del cajón.

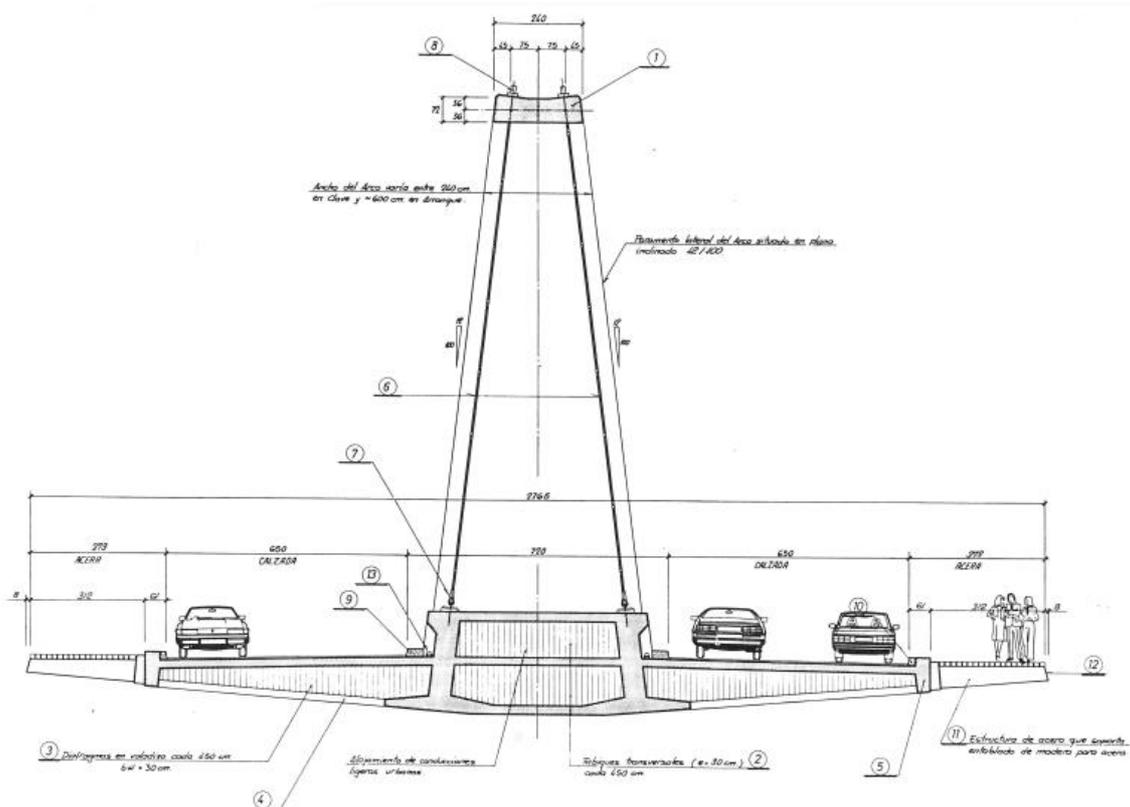


Ilustración 2: Plano de Sección transversal por centro del puente.

El entorno del puente permite el tránsito por debajo del tablero. Es así como se pueden apreciar las principales características del fondo, como los aligeramientos. Estos son una expresión tanto estética como de optimización, ya que, el material entre los diafragmas apenas aporta características resistentes para soportar los esfuerzos torsores generados por la calzada.



Por el contrario, es en los diafragmas donde se concentran estos esfuerzos, por lo que es en estas secciones donde a su vez se encuentran 4 tendones de pretensado transversal compuestos de 9 cordones de diámetro 0,6''.

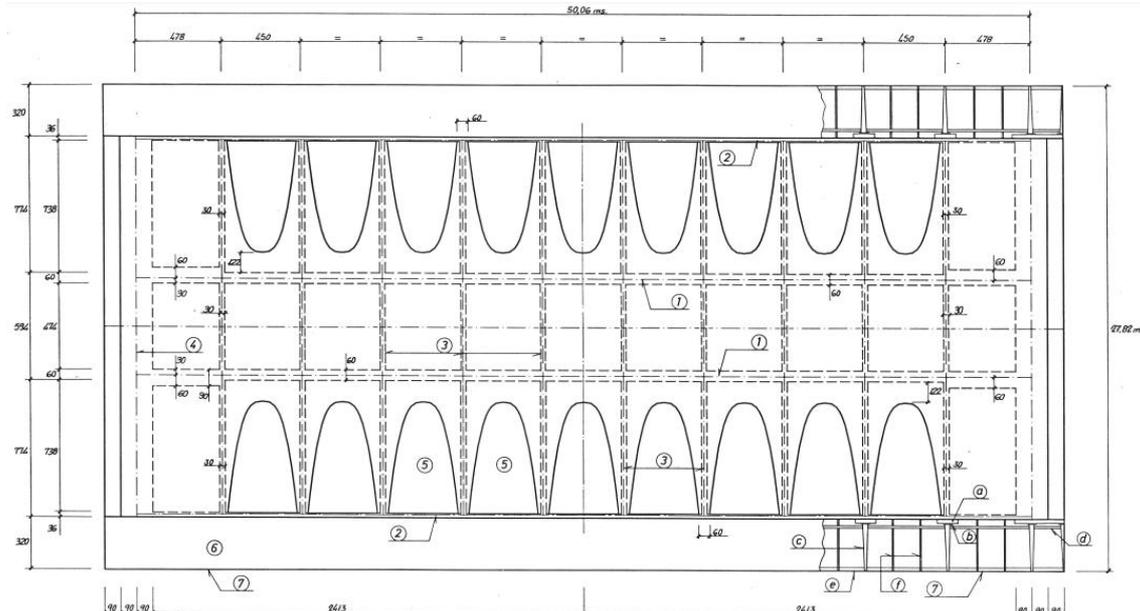


Ilustración 3: Planta espejo de fondo del tablero.

En cuanto a la ejecución de la estructura, un conjunto de 16 apoyos provisionales fue diseñado para realizar el tablero sobre cimbra. Ocho de ellos se apoyarían sobre las almas de la viga medular, siendo espaciados 13,50 metros longitudinalmente entre pares de apoyos, y los ocho apoyos restantes se disponen bajo los nervios de borde. De esa manera, cada conjunto de apoyos estaría constituido de dos apoyos bajo nervios de borde y dos apoyos bajo las almas de la viga medular.

Posterior al hormigonado y fraguado de la pieza, se tesan los tendones transversales. De esa manera, los voladizos del tablero se despegan de los apoyos de borde y el tablero queda apoyado en su totalidad en los apoyos centrales. En estos apoyos, debe haber un contacto directo mediante placas de neopreno zunchado con el intradós del tablero, para así facilitar la retirada de la totalidad de la cimbra.

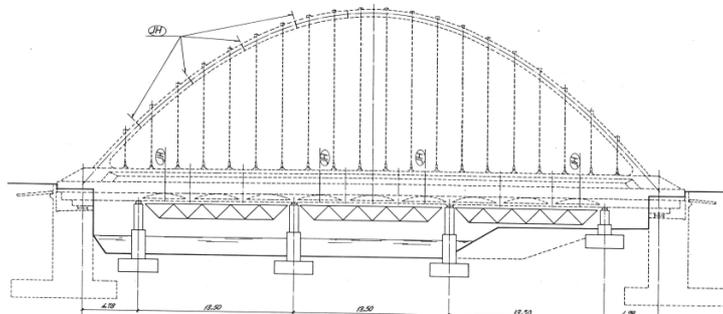


Ilustración 4: Esquema de apoyos de la cimbra del tablero.

El arco se ejecuta sobre una cimbra ligera que nace del tablero ya hormigonado y con el pretensado longitudinal y transversal ya aplicados. Esta cimbra deberá estar apoyada en



el tablero de manera que las cargas se transmitan lo más directamente posible a los apoyos provisionales bajo el tablero.

La estructura quedará apoyada sobre los apoyos provisionales hasta que el arco entre en carga en la operación de apertura de clave.

Este proceso se ejecuta cuando todas las dovelas del arco se encuentran hormigonadas y fraguadas salvo la dovela central de 120 centímetros. Por otro lado, en cuanto al pretensado, al contrario de los tendones longitudinales, los tendones transversales deben estar completamente inyectados antes de iniciar la operación. Los tendones longitudinales deben estar tesados, pero no inyectados. Es entonces cuando los gatos elevan suavemente la presión hasta las 394 toneladas que es cuando el arco comenzará a despegarse de su cimbra. Al llegar a los 495 MPa por gato, se alcanzará la fuerza de enclavamiento definitiva, se fijarán los semiarcos y se procederá al hormigonado de la dovela central. La operación resulta en el levantamiento de la viga medular, momento en el que se podrán retirar los apoyos provisionales.



3. MODELO PARAMÉTRICO

3.1 INTRODUCCIÓN

El modelado convencional supuso un avance en cuanto al cálculo de estructuras se refiere. Sin embargo, como ya se ha comentado en el Capítulo 1, la manera convencional de modelar las estructuras carece de flexibilidad para realizar cambios en la geometría.

Aprovechando el modelado paramétrico, se elimina esa deficiencia ya que las características del modelo son modificables. Aunque es cierto que la generación del modelo puede llegar a ser tediosa en un principio, el resultado final ahorra una gran cantidad de tiempo ya que se puede llevar a cabo un análisis de la geometría y como esta afecta a la estructura sin tener que generar diferentes modelos para cada una de las modificaciones que se requieran realizar.

Así, el usuario puede definir qué cantidad de parámetros quiere establecer como variables y ser los demás dependientes de estos mismos, de manera que el modelo se vuelva a generar de manera automática una vez variada la magnitud del mismo. Un ejemplo de parámetros parametrizables de gran interés en caso de los puentes arco, sería la relación flecha/luz, crítica para el buen funcionamiento del mismo.

Si bien existen parámetros de mayor importancia, todas las características del puente son parametrizables.

Una vez modelado el puente, la herramienta también permite extraer los datos necesarios para la posterior conexión con el modelo de cálculo. Es tal la ventaja del paramétrico, que es posible extraer del mismo de manera automatizada, datos como la inercia de las secciones o incluso acciones, útiles en posteriores fases de estudio.

La herramienta elegida para el modelado ha sido Rhino 6 en conjunto con un plugin del mismo que es la piedra angular del modelado paramétrico, Grasshopper. Ambas herramientas se combinan de tal manera que Rhino actuará en este caso como instrumento de visualización del trabajo realizado en Grasshopper.

3.2 DESCRIPCIÓN DEL MODELO PARAMÉTRICO.

En primer lugar, se expondrá la interfaz y el método de inserción de datos dentro del programa. Al iniciar Rhino, para visualizar a su vez el plugin Grasshopper, es preciso activarlo en el apartado Tools o Herramientas de Rhino.

Una vez estén ambos programas abiertos, puede empezarse a modelar. Es cierto que, para visualizar el trabajo realizado en Grasshopper, es muy recomendable tener una segunda pantalla conectada a nuestro PC. Esto ahorrará muchísimo tiempo a la hora de modelar ya que como Grasshopper es un plugin del propio Rhino, no es posible cambiar de pestañas con un atajo del teclado y habrá que hacerlo de manera manual.

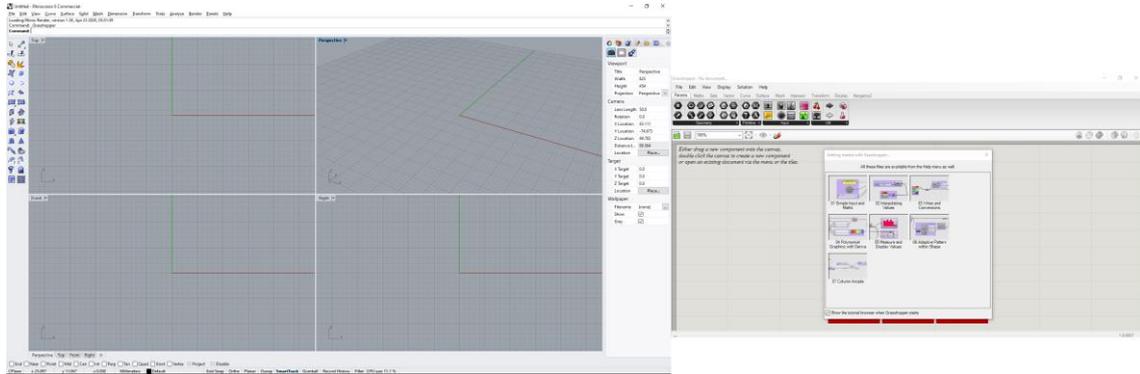


Ilustración 5: Visualización de Rhino y Grasshopper en pantallas extendidas

Una vez se visualicen ambas pantallas, es momento de comenzar a modelar. Para empezar, en el caso del Puente arco de Oblatas uno de los elementos más singulares sino el más singular excluyendo el arco, es la viga medular.

Para ella se plantea una sección constante que se extruirá a lo largo de su directriz la distancia entre ejes de los apoyos (50,06 m). Para comenzar, es importante definir el punto de partida, ya que dependerá de este la facilidad con la que las características de la sección son parametrizables. En este caso se da comienzo a la composición de la sección por el ala superior. Es importante identificar las simetrías en el modelo, ya que esto será muy útil a la hora de modelar el puente. Para la sección del tablero, por lo tanto, únicamente se dibujará media sección y posteriormente, se generará la otra mitad mediante el eje de simetría de la sección.

Se comienza por generar las líneas que componen el contorno de la sección. Las geometrías en Grasshopper están definidas por sus componentes más básicos. Así, el tipo de línea por el que se ha optado necesita de los puntos de inicio y final y estos mismos de sus coordenadas.



Ilustración 6: Generación de una línea en Rhino - Grasshopper

Una vez sabido cómo se generan las líneas, se compone el contorno de la sección, controlando los parámetros que se quieran poder modificar en un futuro. Por ejemplo, para parametrizar la sección respecto al canto del ala superior, todas las demás medidas deberán estar influidas por la variación de dicho parámetro. En definitiva, la sección debe cambiar en bloque, sin que haya partes de la misma que queden en su posición inicial.

Un ejemplo de este requisito, es el ancho del ala superior. Cuando se varía el mismo, los elementos como los jalalcones, las alas de la viga medular, el ala inferior etc., deben



modificar su dimensión ya que, si únicamente cambiara el ancho de la viga medular, se reduciría el ancho de la calzada del puente. En realidad, la clave del modelado reside en comprender cómo el modelo debe comportarse frente a alteraciones en las dimensiones y para ello, la modificación de las coordenadas de manera que todas ellas estén conectadas entre sí para reaccionar a cualquier cambio en la estructura es fundamental. Eso se consigue estableciendo relaciones tan sencillas como sumas y restas. Por ejemplo, si el ancho del alma es de 90 cm, se debe realizar una línea con la inclinación del alma en primer lugar y posteriormente una paralela de esta, que se consigue moviéndola esos 90 cm. Es esta herramienta “Move” la que hace posible los desplazamientos. Es necesario para ello, introducir el elemento a mover y su vector de movimiento. Si quiere desplazarse el elemento 90 cm en el eje X el vector será (90,0,0) si se trabaja con milímetros.



Ilustración 7: Representación de movimiento en Grasshopper.

La sección es hueca; está aligerado por cuatro oquedades. En este momento es cuando se debe pensar en la manera en la que se va a abordar la parametrización del tablero y la interacción de los parámetros entre sí.

Para generar la sección se debe partir de un contorno. Este estará compuesto por líneas. Es posible generar el contorno con una polilínea, lo que generaría muchísimos menos datos ya que se agruparían todas las líneas en una sola y solo se deberían modelar las esquinas de la sección para después agruparlas en un “Merge” conectado a “Polyline”. La importancia de el orden en el que se agrupan los puntos de inicio y fin de cada línea se refleja en el resultado final de la misma, ya que, la polilínea se dibuja según el orden de conexión de los puntos a “Merge”.

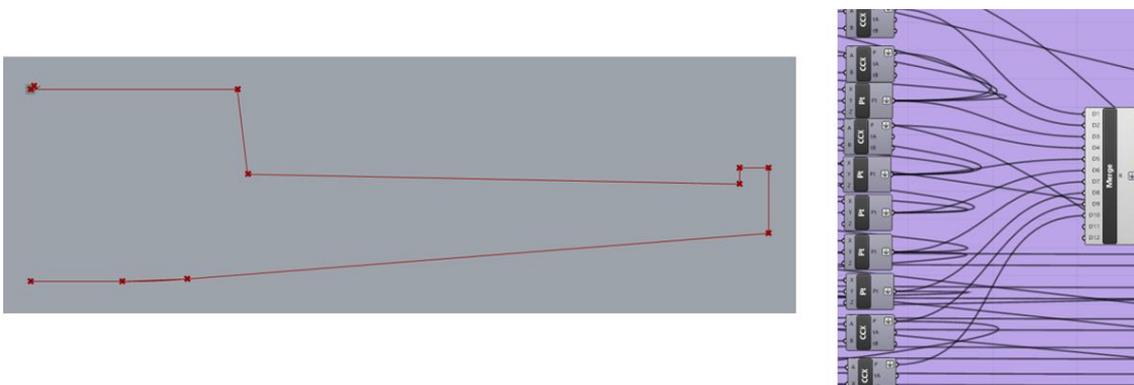


Ilustración 8: Generación de polilínea.

Para extruir una sección, esta debe tener la característica de superficie, por lo que, para representar esos aligeramientos, se debe generar una superficie “Boundary” con el contorno y posteriormente restar “RDiff” las superficies de las oquedades a la sección



maciza. De esa manera, se obtiene la forma final a extruir. Antes de esto, debe realizarse la simetría de la sección ya que, si se hace el intento ejecutar el comando de superficie, al no ser esta una superficie cerrada, no funcionará.

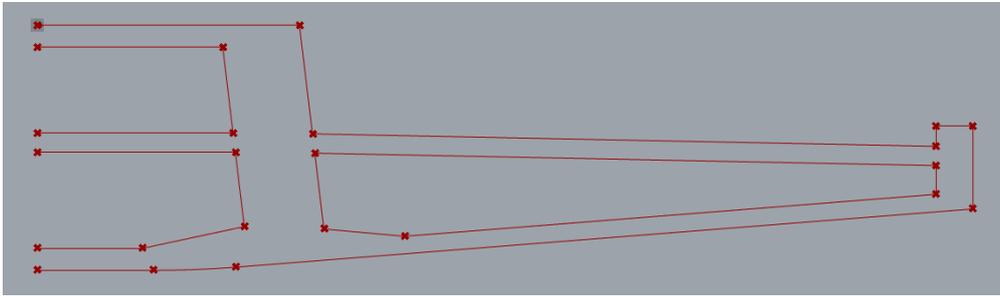


Ilustración 9: Mitad de sección de tablero

La sección completa se muestra en la ilustración 10.

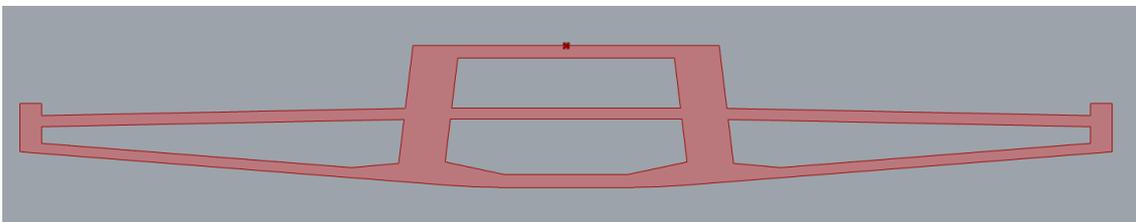


Ilustración 10: Sección transversal completa del tablero

Para extruir la sección debe existir una directriz. En este caso, el centro de gravedad de la sección puede servir para generar una línea directriz. Para ello, puede hacerse uso de "AMoments".

La herramienta analiza la superficie y calcula tanto áreas como inercias o posición del centro de gravedad, por lo que, con este último se consigue el centro de gravedad, la partida para extruir la sección. La Ilustración 11 muestra el comando *AMoments* y su estructura de salida de datos.

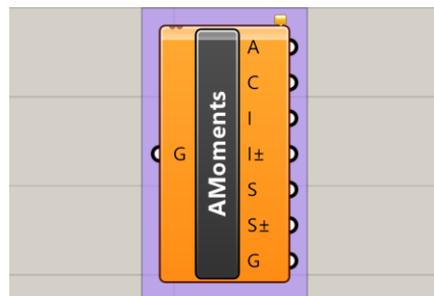


Ilustración 11: Comando *AMoments*

La elección del centro de gravedad como eje de extrusión de la sección radica en que, según planos, tanto la directriz del tablero como la del arco, se encuentran a la altura del centro de gravedad tanto de las secciones del arco como las del tablero y estas directrices coinciden en los apoyos.



En el modelo existen tres diferentes tipos de sección: una sección maciza, una sección de ancho de almas igual a sesenta centímetros y otra sección de ancho de alma igual a 90 centímetros. Esto se debe a que la sección del tablero no es constante y tiene variaciones en el ancho del alma. Además, los diafragmas o nervios transversales, son macizos.

Un inconveniente es el haber formado la sección en el plano XY. Esto causa que haya que orientar la sección para poder extruirla a lo largo del eje X. Para orientar la sección al plano yz debe usarse la opción “Orient” dándole el plano en el que se encuentra dibujada la sección (XY) y un plano hacia el cual orientar la pieza (YZ) y un punto donde posicionar la pieza según una referencia. En la Ilustración 12 se muestra el comando Orient.

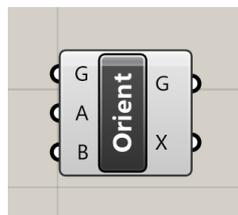


Ilustración 12: Comando Orient

En el caso de la sección del tablero, se orienta la superficie hacia el plano yz teniendo como referencia el centro de gravedad de la pieza. Es por ello que hay que recolocar la pieza de manera que las coordenadas (0,0,0) coincidan con el centro de gravedad “Move” generando un vector de dirección desde las coordenadas del centroide hasta el origen. La directriz es simplemente un vector dirección que describe la distancia de la luz entre ejes de apoyo. En la Ilustración 13 se muestra el comando “Extrude”



Ilustración 13: Comando Extrude

Una vez obtenida la directriz y la sección orientadas, el siguiente paso es extruir la sección conectándola y conectando el vector de dirección. Como se puede observar en la Ilustración 10, la sección tiene dos almas del mismo espesor en toda su longitud, cosa que no se corresponde con la realidad para toda su luz, pero sí en los primeros metros desde los apoyos. Por ello, esta sección solo se extruye en esos primeros metros.

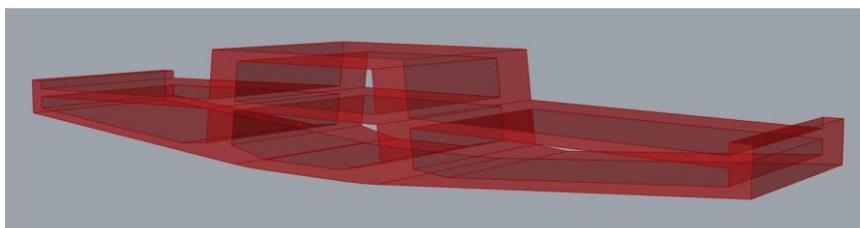


Ilustración 14: Arranque del tablero



La sección del tablero en su tramo central tiene las almas más delgadas, por lo que es necesario hacer uso de otra superficie que incluya esa característica para poder extruir esa parte del tablero. Para el modelado de esta sección se coge como referencia la sección base. Así, los dos únicos cambios a realizar son dos puntos que hacen que el alma sea más estrecha en su mitad inferior.

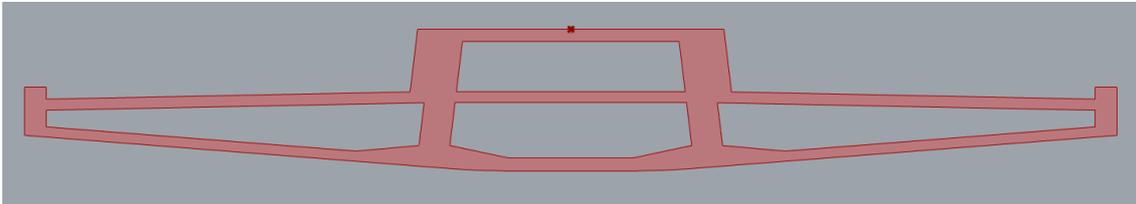


Ilustración 15: Sección del tramo central del tablero.

Esta superficie se extruirá en toda la longitud del tablero (50,06m) ya que, la única diferencia de la sección en la ilustración 10 y la Ilustración 15, es el ancho del alma inferior y por lo tanto ambas figuras pueden fusionarse salvando dicha diferencia en la sección exacta según planos.

Otra de las características sobre la que ya se ha comentado en el documento, es el rehundido lateral en el alma superior.

Para ejecutar la misma, se ha optado por generar un bloque, de ahora en adelante Brep, de manera que se ubique en la posición exacta para después al restarle al tablero completo dicho Brep "SDiff", resulte el rehundido final como se puede apreciar en la Ilustración 16.

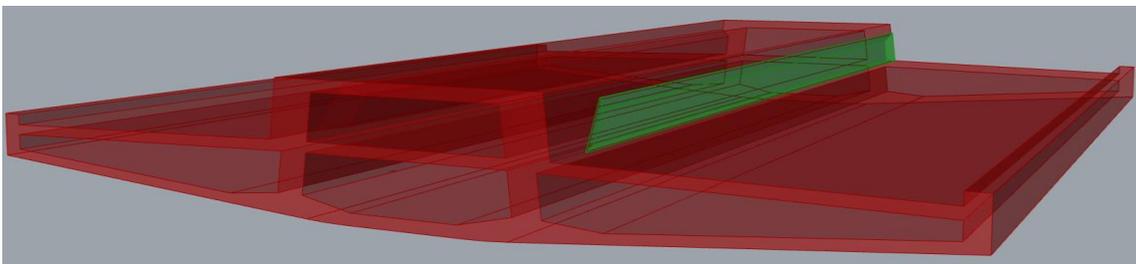


Ilustración 16: Rehundido lateral del tablero

Al no ser la sección del bloque que constituye el rehundido lateral constante, este se modela completo, sin necesidad de extrusiones, de manera que el contorno sea lo que defina el Brep.

Todas las características del tablero que no sean objeto de ser extruidas por una sección constante, deberán de ser añadidas "SUnion" al Brep principal del tablero. Esto no será una excepción para los aligeramientos de los jабalcones. Para ello, se generan unos volúmenes a partir de la forma parabólica que viene definida en el plano de Semi- Sección horizontal como se puede apreciar en la Ilustración 17.

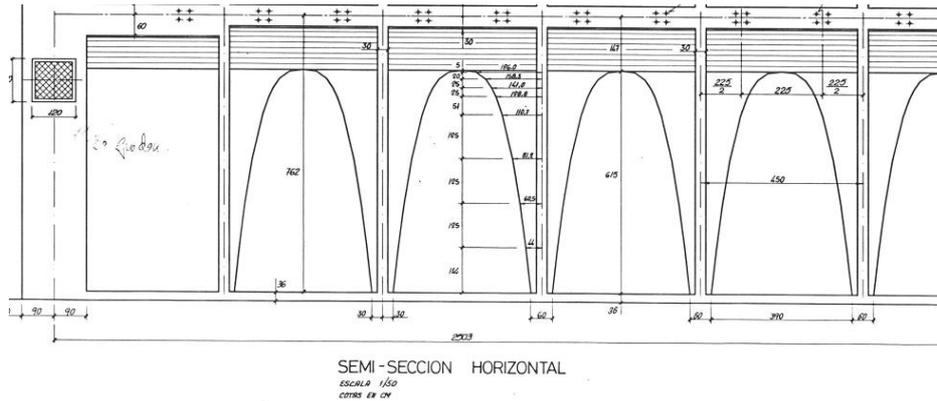


Ilustración 17: Semi-sección horizontal. Detalle de los aligeramientos parabólicos.

Para ello, se ha de generar en primer lugar la forma parabólica. Esta vez la parábola se definirá por coordenadas, para posteriormente, con el contorno, definir una superficie y extruirla. Ese Brep se replica generando un array de la cantidad de aligeramientos que constituyen el tablero “ArrLinear”. Este comando repite el mismo bloque a lo largo de una directriz el número de veces que se especifique por el usuario. Es importante definir que, el número de aligeramientos vendrá condicionado por la cantidad de nervios transversales que existan en el tablero. En las Ilustraciones 18 y 19 se muestran el comando ArrLinear y el resultado final de los bloques que crean los aligeramientos respectivamente.

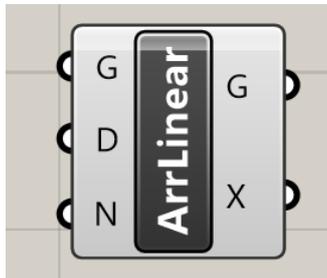


Ilustración 18: Comando ArrLinear

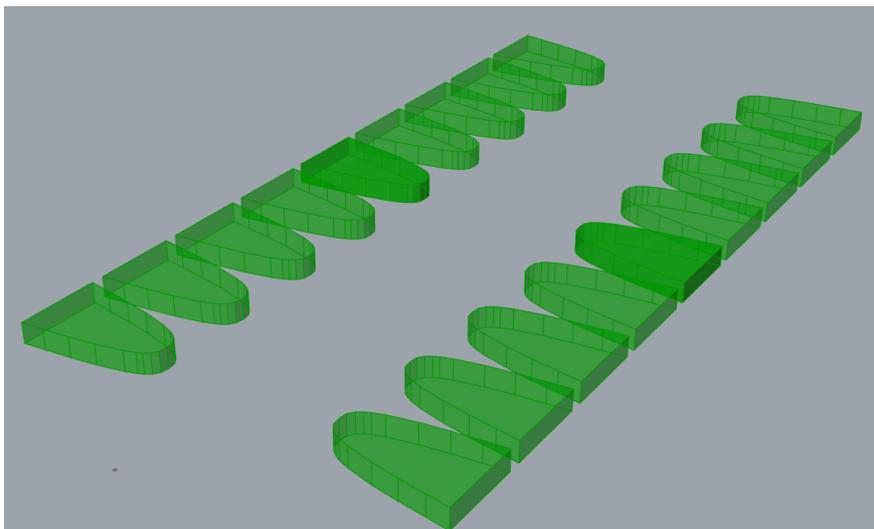


Ilustración 19: Aligeramientos de los jalalcones



Para terminar con los elementos a añadir a la sección principal del tablero, debe añadirse de la misma manera en la que se han generado los aligeramientos de los jabalcones; diafragmas transversales y todos los elementos necesarios para completar la zona de los apoyos.

De los elementos citados anteriormente, los más difíciles de ejecutar son los diafragmas transversales, ya que, para generarlos debe extruirse una sección del tablero maciza y rebanar la misma con planos extruidos la distancia igual al ancho los diafragmas, separados entre sí una distancia igual a la marcada por planos.

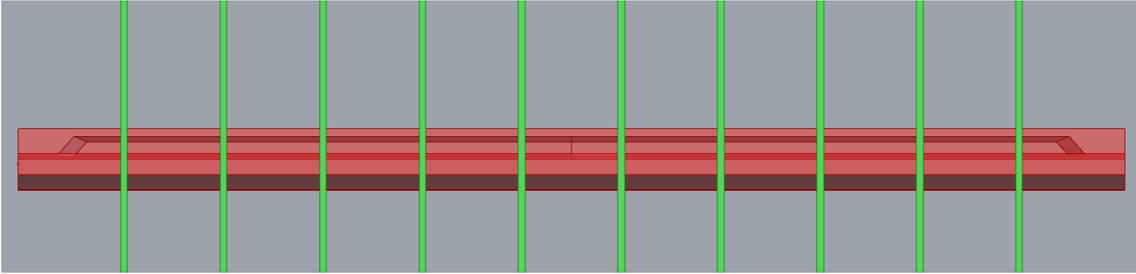


Ilustración 20: Paso 1 modelización de diafragmas transversales.

Posteriormente usar el comando “SDiff” para sustraer el bloque de la Ilustración 21 al bloque macizo.

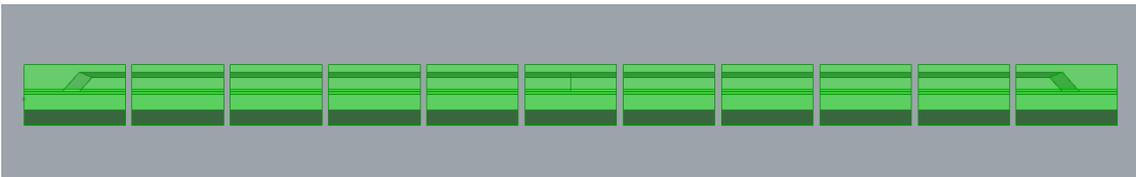


Ilustración 21: Paso 2 modelización de diafragmas transversales.

Como resultado, se obtienen los diafragmas transversales mostrados en la figura 16.

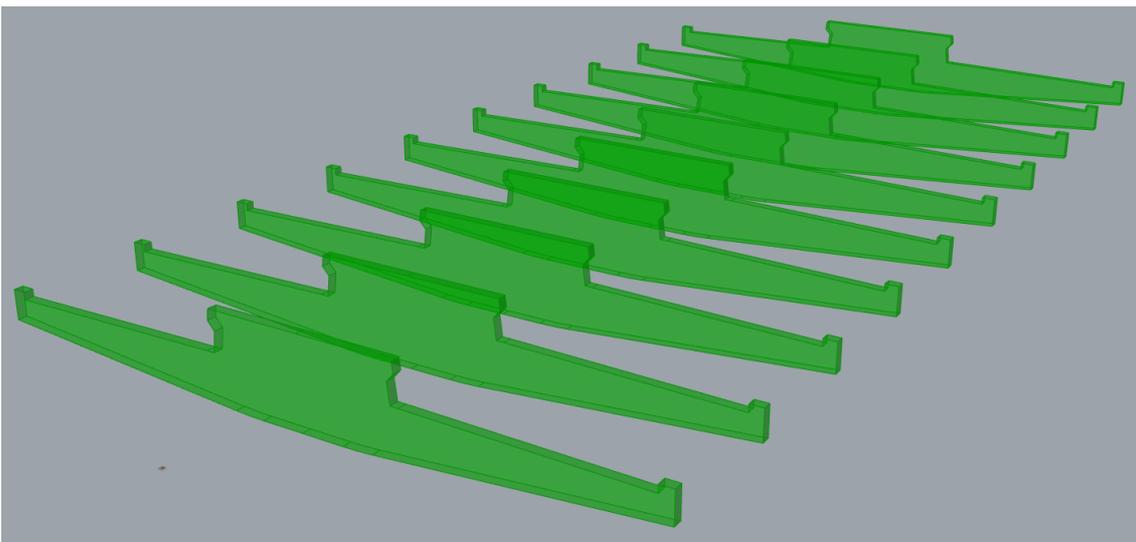


Ilustración 22: Diafragmas transversales.

Una vez terminados los diafragmas, únicamente es cuestión de añadir los diferentes detalles en los apoyos. Para ello se procederá de la misma manera que con el rehundido



lateral en el alma superior. Generando un Brep y luego uniéndolo con el cuerpo principal.

En la zona de apoyos, a la sección principal habría que añadirle la base donde los apoyos. Este se genera creando una sección rectangular en el plano XZ y extruyéndola a lo largo del eje Y para después colocarla a la cota indicada por planos. En concreto el plano de detalle de la zona de apoyos.

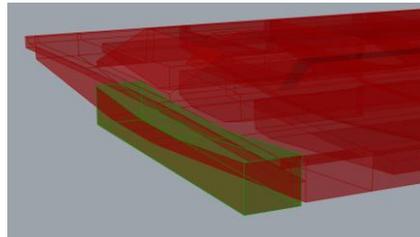


Ilustración 23: Meseta para los apoyos

Para los apoyos simplemente se extruyen en el eje Z los mismos con las dimensiones especificadas en planos y se colocan mediante el comando "Move" en su posición final. La Ilustración 24 muestra resaltados en verde los apoyos de uno de los estribos.

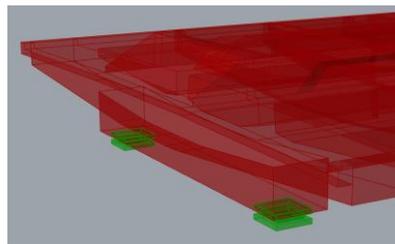


Ilustración 24: Apoyos

En la zona de apoyos, la sección del tablero es maciza. Por lo tanto, debe de haber una transición desde la sección hueca a la maciza. Por ello, se debe de añadir un relleno al tablero. Este es generado de igual manera que la base de los apoyos. Para fusionarlo con el tablero completo, se hace uso del comando "SUnion" que une ambos sólidos. Al unir sólidos es recomendable usar "Flatten" para que, al unir ambas piezas, no queden contornos de ningún tipo y que sea un único sólido el resultante.

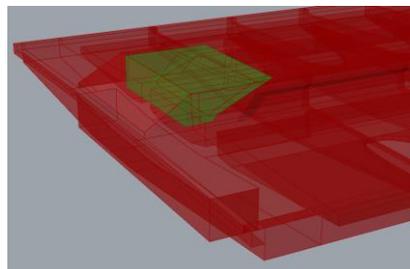


Ilustración 25: Relleno en estribos

El último detalle es el del abatimiento del ala superior. Se genera por diferencia entre un plano con la inclinación oportuna y el propio sólido del tablero. La Ilustración 26



muestra el abatimiento. El resultado final de los detalles del apoyo se expone en la Ilustración 27.

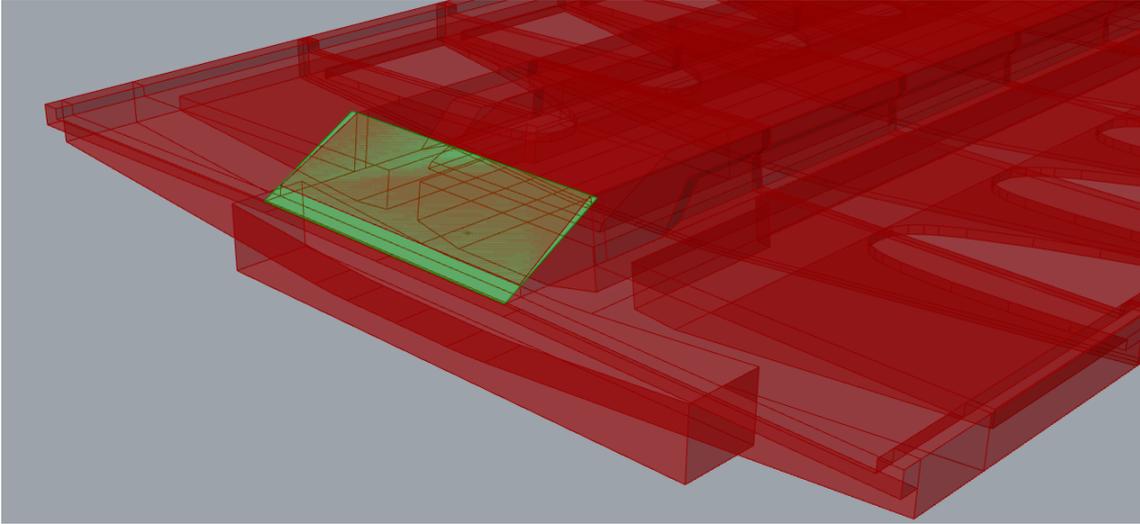


Ilustración 26: Abatimiento del ala superior en estribo.

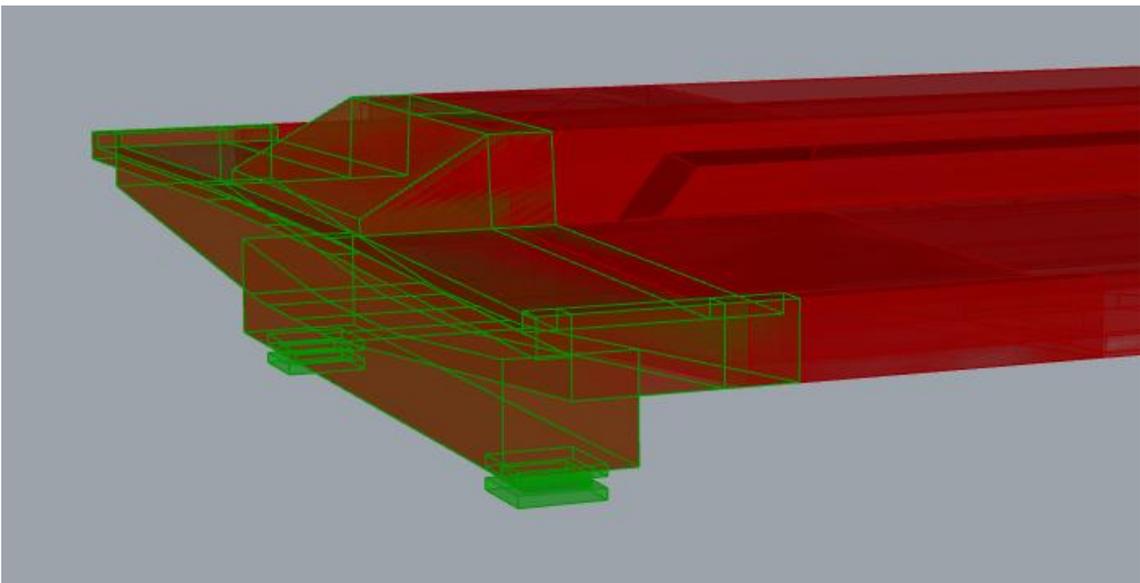
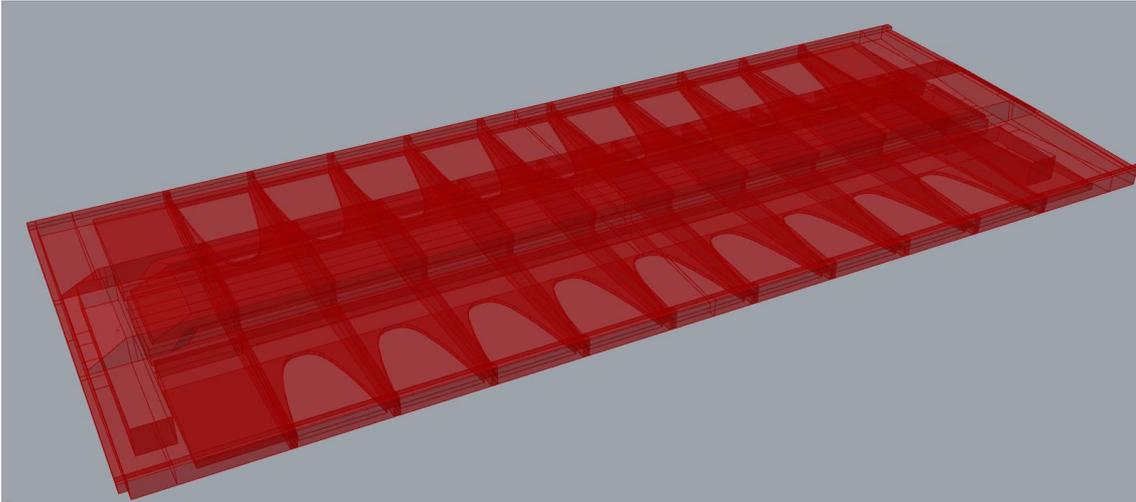


Ilustración 27: Detalle de apoyos

Al terminar todos los detalles se unen estos mediante la herramienta “Merge” y en caso de que fuera necesario, se puede utilizar la cualidad “Flatten”. En Grasshopper al utilizar “Merge” los datos a agrupar se ordenan en listas, por lo tanto, aunque a la hora de seleccionarlos el comando “Merge” abarca todas las listas, estas ordenan los datos de cada lista, pero no la totalidad de los datos.

Para ello, se utiliza la herramienta “Flatten” que combina todas las listas en una sola. Esta herramienta es muy útil cuando se manejan diferentes elementos, ya que, al unirlos, no quedarán diferencias entre unos y otros, sino que formarán un único sólido.

El resultado final del tablero es el que se muestra en la Ilustración 28.

*Ilustración 28: Forma final del tablero.*

Ya que el objetivo es componer un modelo paramétrico, se debe diseñar de manera que al realizar cambios en los parámetros seleccionados se muestre la modificación del puente completo. Para la sección del tablero, los parámetros modificables son los mostrados en la figura 29. Además, la luz del puente también es paramétrica, pero es un factor que no solo interactúa con la sección del tablero.

*Ilustración 29: Parámetros modificables del tablero.*

El siguiente paso para completar el modelo, es generar el arco. Si este tuviera una sección constante, podría simplemente modelarse el eje directriz del arco de manera que la sección se pudiera extruir a lo largo del mismo. Sin embargo, la sección del arco es variable. En primer lugar, es de vital importancia determinar la manera en la que varía cada una de sus medidas para tener claro cómo abordar el problema.

Para ello se introducen las coordenadas que definen tanto la variación en canto como en ancho de sección y también las coordenadas de la directriz del arco en una tabla de Excel, se grafican las funciones y se realiza una regresión a una función parabólica.

Los resultados reflejan que, al ser el $R^2 = 1$ los diferentes parámetros varían su magnitud de manera parabólica, como se muestra en la Ilustración 30.

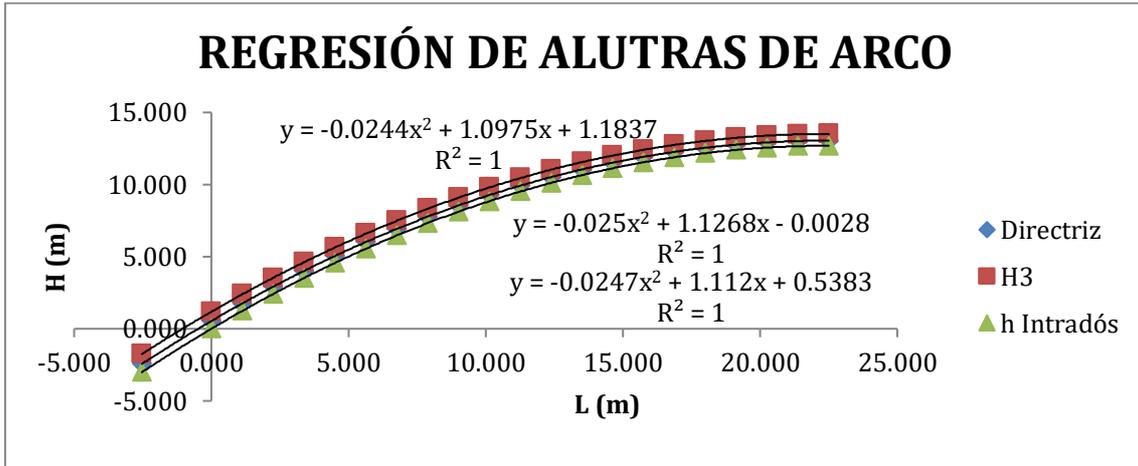


Ilustración 30: Regresión a función parabólica del arco de Las Oblatas.

Los parámetros estudiados son h1, b1 y h3, ya que las demás medidas de la sección del arco son una combinación de las medidas anteriores y distancias que se mantienen constantes. En la Ilustración 31 se expone la sección del arco. Según planos, se describen las secciones de corte vertical cada 1,125 m. Sin embargo, lo se modela siguiendo la variación parabólica y plasmando esta misma en Grasshopper.

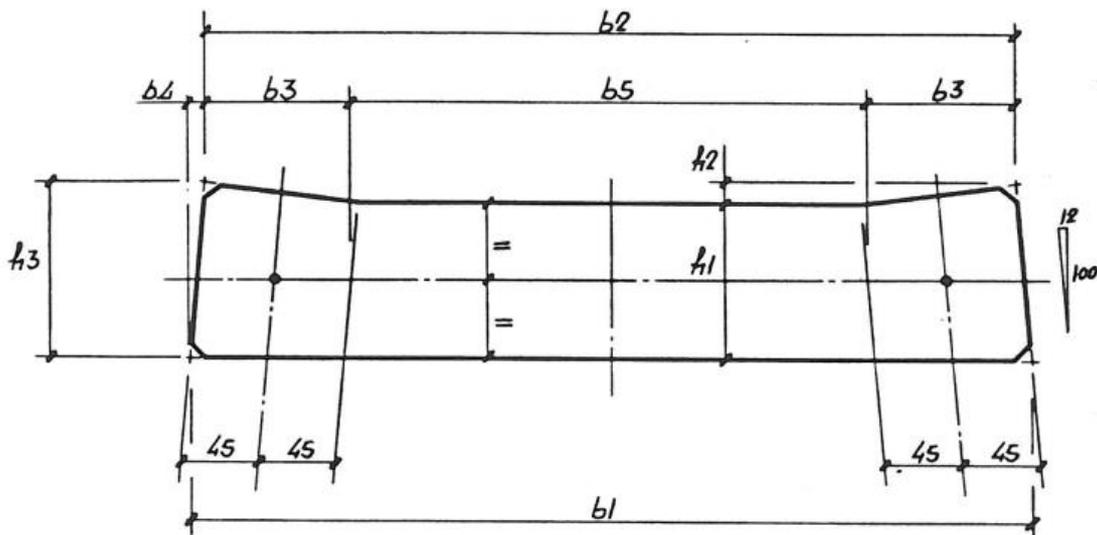


Ilustración 31: Sección transversal del arco. (Corte vertical)

Sabiendo que todos los parámetros del arco varían parabólicamente, se aborda el modelado del arco plasmando los bordes que definen el arco. La otra mitad se generará por simetría. No tendría sentido modelar el arco extruyendo la sección a lo largo de la directriz ya que, las secciones vienen definidas cada 1,125 metros, por lo que la variación no se vería fluida y habría que generar una directriz por cada sección definida.

Como ya se ha comentado, los bordes del arco varían parabólicamente. Dicha forma se puede generar sabiendo un punto de la propia parábola y el vértice de la misma, generando así la ecuación canónica de la parábola. En este caso, es conocido por planos, el vértice (clave del arco) y un punto (por ejemplo, el arranque del arco). En la siguiente imagen se muestran los bordes resaltados en verde.

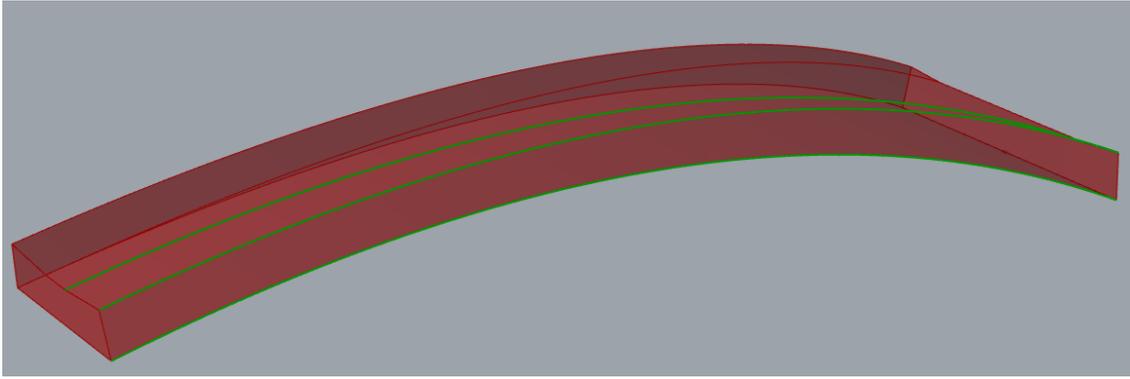


Ilustración 32: Bordes clave para la generación del arco.

En la siguiente ecuación se expone la ecuación canónica de la parábola.

$$(x - h)^2 = -4p * (y - k)$$

Ecuación 1: Ecuación canónica de la parábola.

Sabiendo que el vértice viene definido por las coordenadas (h,k) y que el punto conocido a parte del vértice es (x,y), se despeja p en función de las coordenadas del vértice ya que, las coordenadas del arranque se mantienen constantes, se completa la ecuación. De esa manera se consiguen todas las constantes de la ecuación y es posible utilizarla para definir la parábola mediante "Eval" que da resultado a una función para diferentes valores de x .

Un problema es, que los bordes varían parabólicamente no solo en un plano XZ, sino que también en X. Por lo tanto, es necesario combinar dos parábolas de 2D para formar una única parábola en 3D que varíe parabólicamente tanto en el eje Y como en el Z, dando como resultado los bordes que definen el arco.

Uniendo estos bordes mediante "Loft", que genera una superficie entre dos curvas, se crea un elemento de las mismas dimensiones del arco, pero hueco. Este espacio vacío se puede convertir en sólido con "BVol". Se alimenta con las fronteras del sólido a generar. Ilustración 33.



Ilustración 33: Comando Boundary Volume

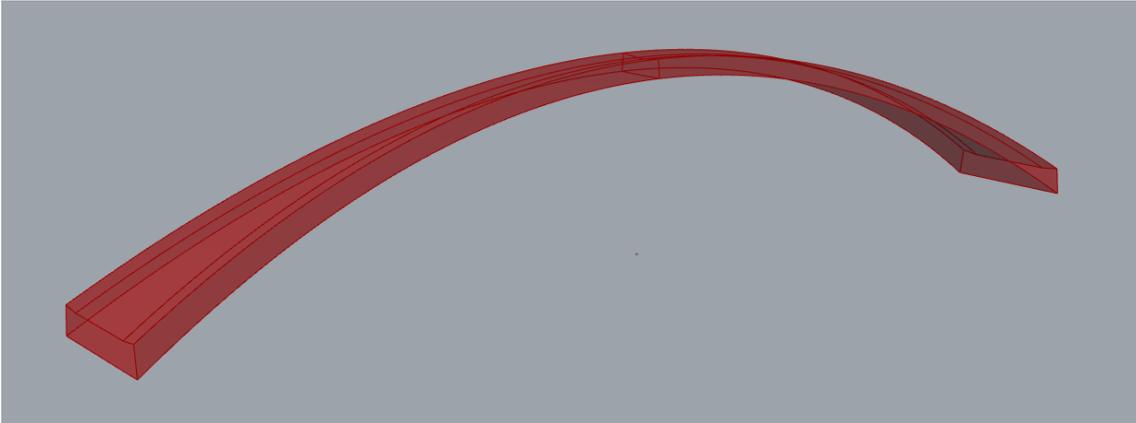


Ilustración 34: Arco completo de $x=0$ a $x=50,06$ m

Este Brep debe fusionarse con el tablero, para, de esta manera, tener el la combinación de arco y tablero, a falta únicamente de las péndolas para definir el puente completo.

Para las péndolas, se orienta una línea con la misma inclinación de los laterales del arco. Con esta orientación se mueve el elemento hasta la posición final de las péndolas respecto al arco mediante el mismo comando usado para generar los jabalcones. Después deben recortarse las líneas con los contornos del tablero y arco definiendo el inicio y el final de las péndolas mediante *“Trim with brep”*. Posteriormente se seleccionan con el comando *“EndPoints”* los puntos donde las péndolas cortan el tablero y el arco. El comando proporciona tanto los puntos donde las líneas que definen las péndolas cortan el trasdós, el intradós, la fibra superior del tablero como la interior. Para usar esos mismos puntos para generar las péndolas, se seleccionan los *“Endpoints”* del del intradós del arco y las de la fibra superior del tablero. La cantidad de péndolas es un parámetro modificable.

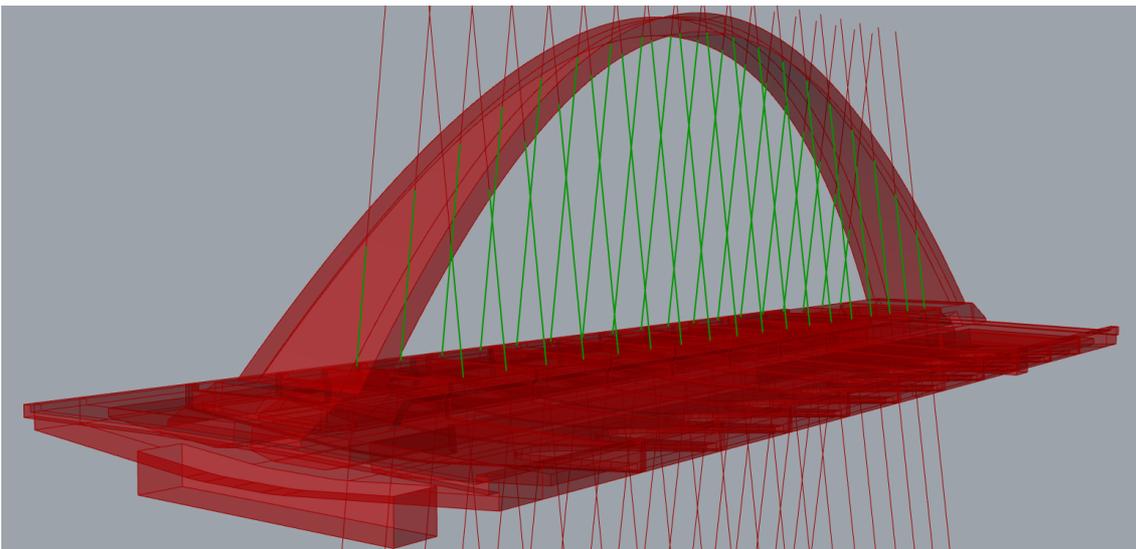
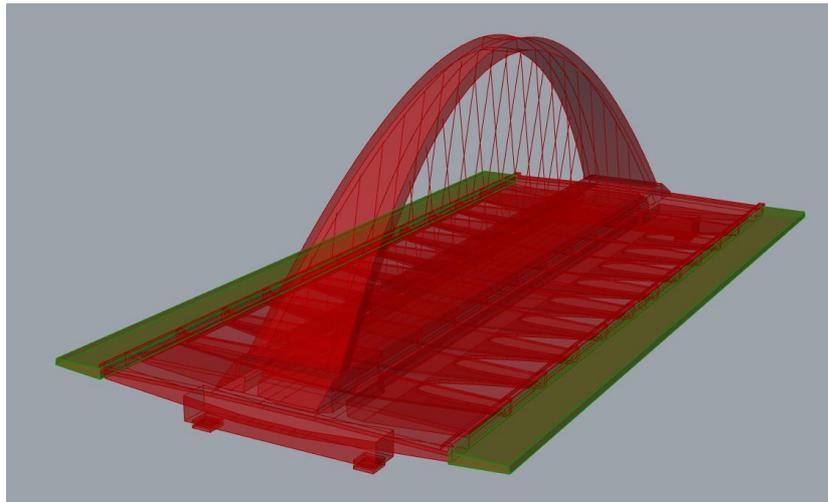


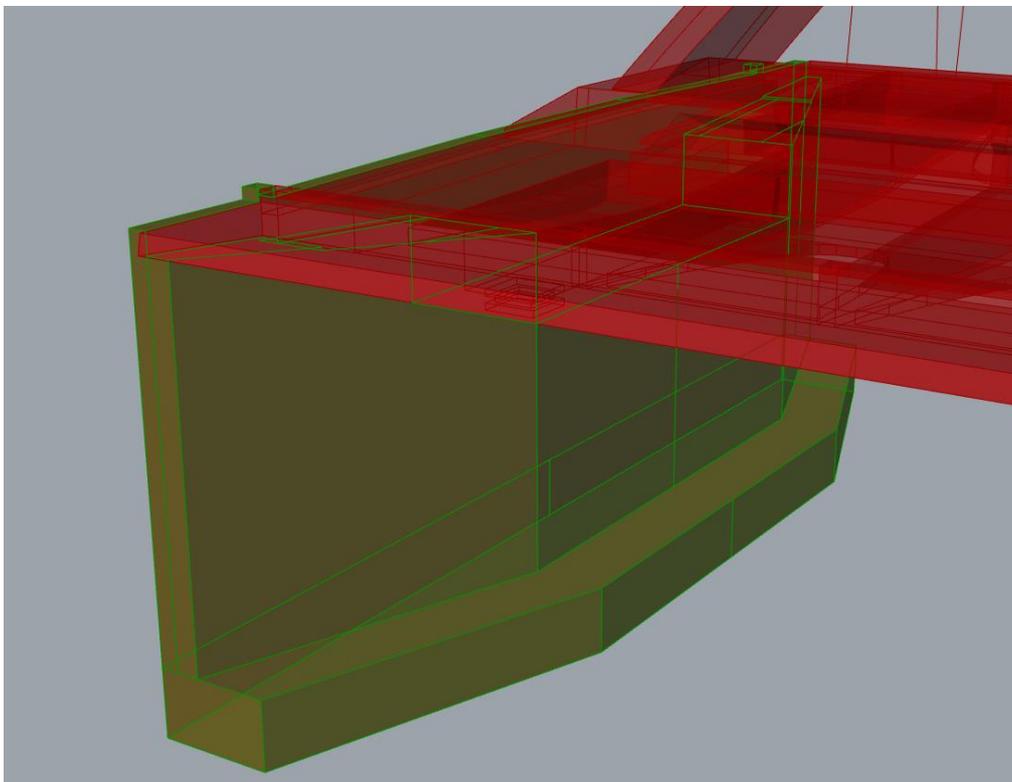
Ilustración 35: Recorte de péndolas mediante *Trim with brep*.

El último paso es modelar las aceras. Estas son una estructura independiente compuestas por ménsulas de acero. En este caso se han modelado extruyendo una sección a lo largo de toda su luz en la posición de las aceras.

*Ilustración 36: Aceras*

Por último, aunque no se vayan a analizar en el modelo de cálculo, se modelizan los estribos. Estos simplemente se realizan extruyendo las secciones de la zapata y del alzado del mismo.

El estribo envuelve todo el ancho del tablero, mas este solo apoya en los neoprenos modelados en la Ilustración 24. Para generar esa envoltura del tablero, se debe ejecutar el “*SDiff*” y luego separar el resultante del estribo una distancia igual a la marcada en planos, ya que el tablero no apoya en todo el estribo, únicamente en sus cuatro apoyos.

*Ilustración 37: Estribo*

El resultado final del modelo se muestra en las Ilustraciones 38, 39, 40 y 41.

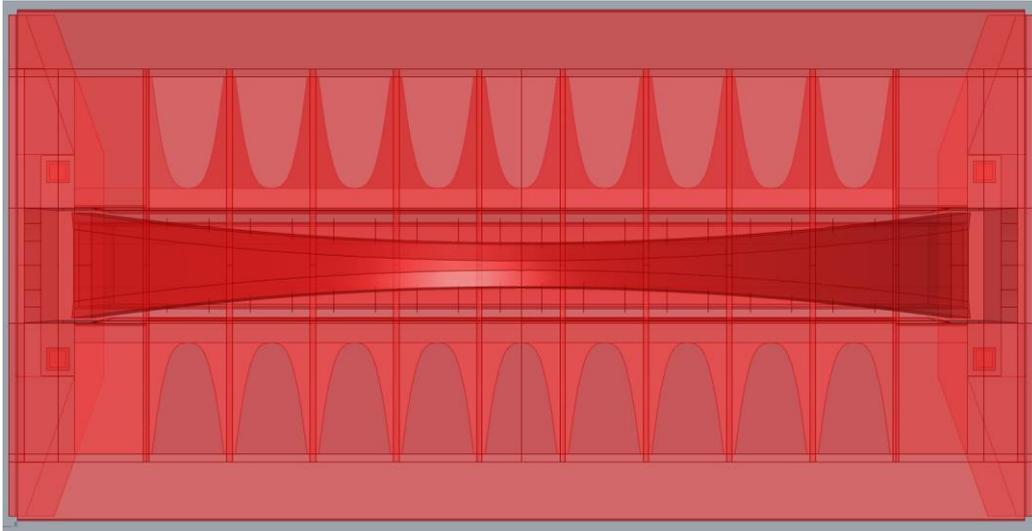


Ilustración 38: Vista en planta del modelo paramétrico final.

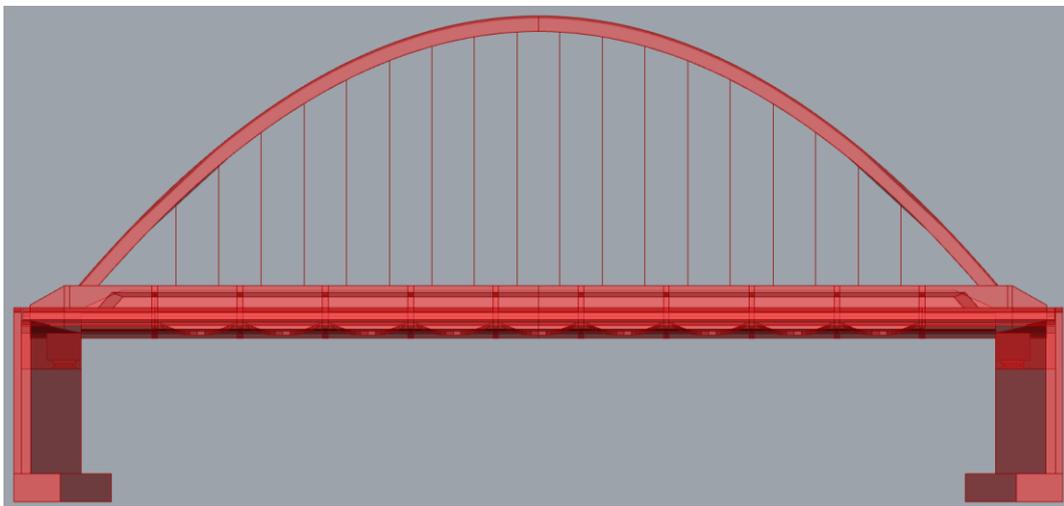


Ilustración 39: Vista en alzado del modelo paramétrico final.

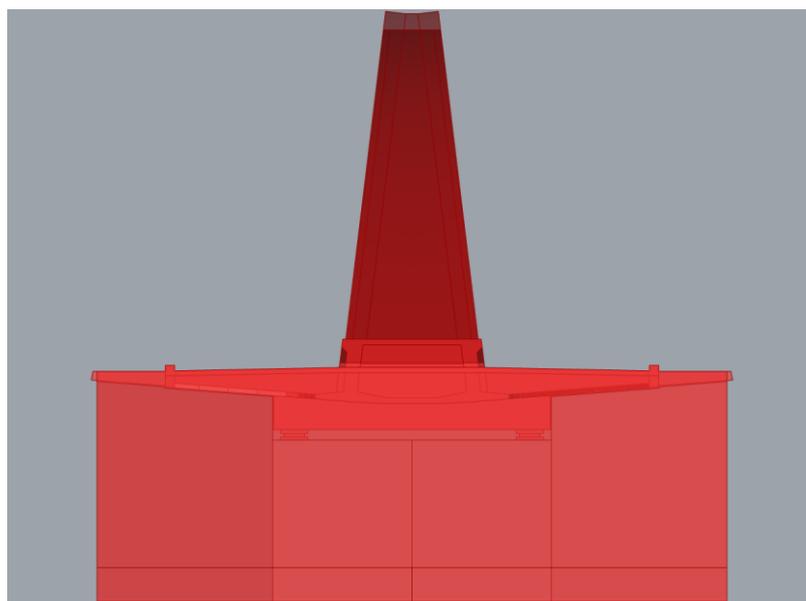


Ilustración 40: Vista de perfil del modelo paramétrico final.

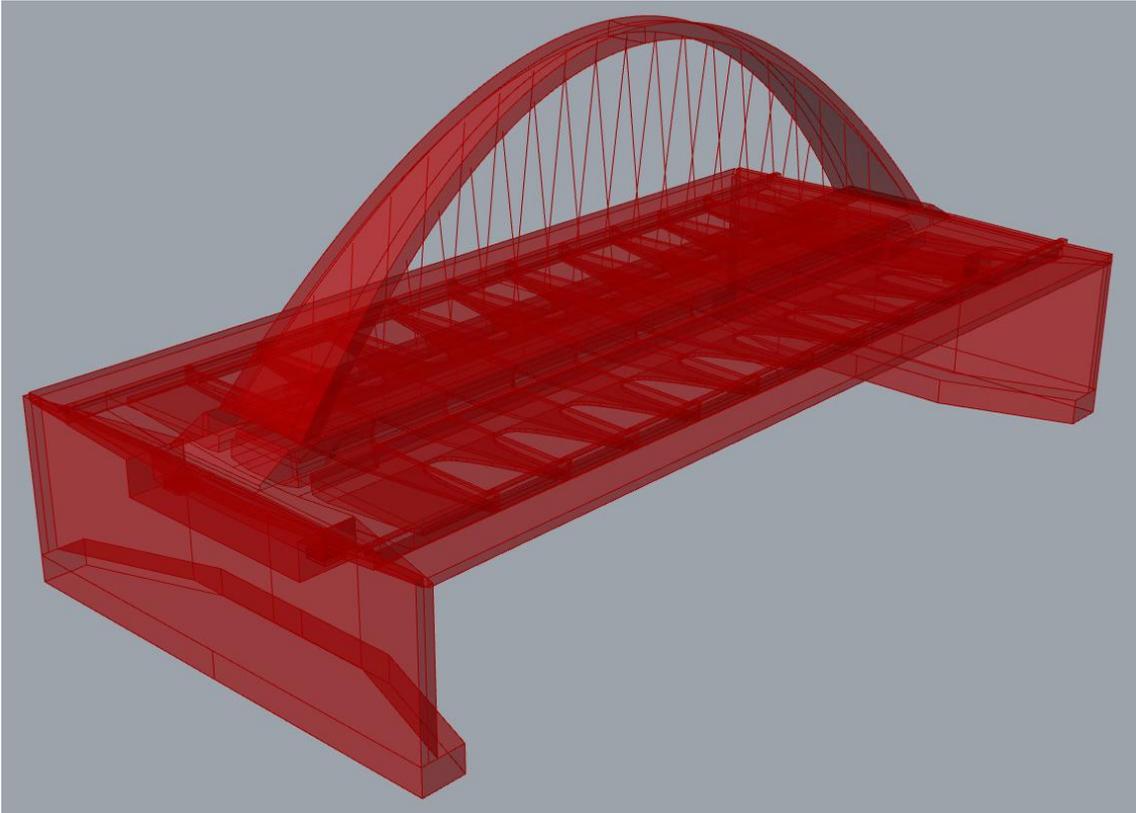


Ilustración 41: Perspectiva del modelo paramétrico



4. OOFEM

4.1 DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA DE CÁLCULO

En los últimos años, la comunidad investigadora ha enfrentado las crecientes demandas para fusionar el poder de la tecnología informática actual con el amplio conocimiento adquirido en ingeniería, matemáticas, física y otras disciplinas, y explotarlos de manera efectiva en el diseño de nuevos materiales y estructuras multifuncionales.

En lugar de apegarse a las fórmulas y disposiciones del código de diseño tradicional (generalmente muy conservadoras), los procedimientos de diseño modernos deben centrarse en optimizar el rendimiento real, teniendo en cuenta múltiples objetivos y criterios, como una probabilidad de fallo suficientemente baja, bajo coste, durabilidad a largo plazo, funcionalidad adecuada y alta utilidad, compatibilidad con el entorno, calidad estética, etc. Esto no es posible sin potentes herramientas de modelado, simulación y optimización que apoyen al diseñador en la toma de decisiones.

El comportamiento de estructuras, sólidos y fluidos se rige por complicados sistemas de ecuaciones diferenciales parciales con condiciones de contorno apropiadas. Un análisis fiable y preciso de este comportamiento, necesario para tomar decisiones prácticas de diseño, optimización, evaluación de riesgos, etc., se basa frecuentemente en una simulación numérica y requiere el desarrollo de herramientas informáticas eficientes.

Estas crecientes demandas de modelado realista que normalmente incluye modelos constitutivos de última generación, técnicas de solución adaptables y de niveles múltiples, traen nuevos problemas de software.

Una característica muy importante de cualquier código computacional moderno es su naturaleza abierta, por lo que debería permitir la implementación sencilla y eficiente de nuevos métodos de solución, algoritmos, modelos de materiales, etc. Un analista o investigador naturalmente quiere trabajar con un código que sea fácilmente aplicable a futuras demandas, fácil de mantener, pero todavía eficiente y portátil a través de muchas plataformas.

El modelado orientado a objetos es una herramienta que se ha utilizado sucesivamente para diseñar e implementar sistemas de software complejos que cumplen los criterios anteriores.

Este código se ha desarrollado activamente durante varios años y se distribuye como software libre bajo licencia pública GNU. (2)

La estructura general consta de varios módulos. El módulo central se llama OOFEMlib. Contiene la definición de clases de elementos finitos fundamentales, que representan, por ejemplo, grados de libertad, nodos, elementos, puntos de integración, condiciones



iniciales y de contorno, modelos constitutivos, solucionadores numéricos, matrices dispersas y problemas bajo consideración.

Sobre el módulo principal, se construyen módulos especializados. Estos módulos contienen clases específicas de la aplicación que implementan la funcionalidad requerida. Por lo general, contienen clases de implementación que representan problemas: elementos finitos específicos, modelos constitutivos, condiciones de contorno y algoritmos de solución. Un ejemplo típico es un módulo de análisis estructural o un módulo de problemas de transporte.

El problema bajo consideración está representado por una clase derivada de la clase EngngModel. Su función es ensamblar la ecuación gobernante y utilizar un método numérico adecuado (representado por una clase derivada de la clase NumericalMethod) para resolver el sistema de ecuaciones.

La discretización del dominio de un problema está representada por la clase Dominio, que mantiene listas de objetos que representan nodos, elementos, modelos de materiales, condiciones de contorno, etc. La clase Dominio es un atributo de la clase EngngModel y, en general, proporciona servicios para acceder a determinados componentes.

Para cada paso de la solución, EngngModel ensambla las ecuaciones gobernantes sumando las contribuciones de los componentes del dominio. Debido a que las ecuaciones gobernantes generalmente se representan numéricamente en forma de matriz, la implementación se basa en representaciones vectoriales y de matriz dispersa para almacenar eficientemente los componentes de estas ecuaciones.

Luego se utiliza un método numérico adecuado, representado por una instancia de la clase derivada de la clase NumericalMethod, para resolver el problema.

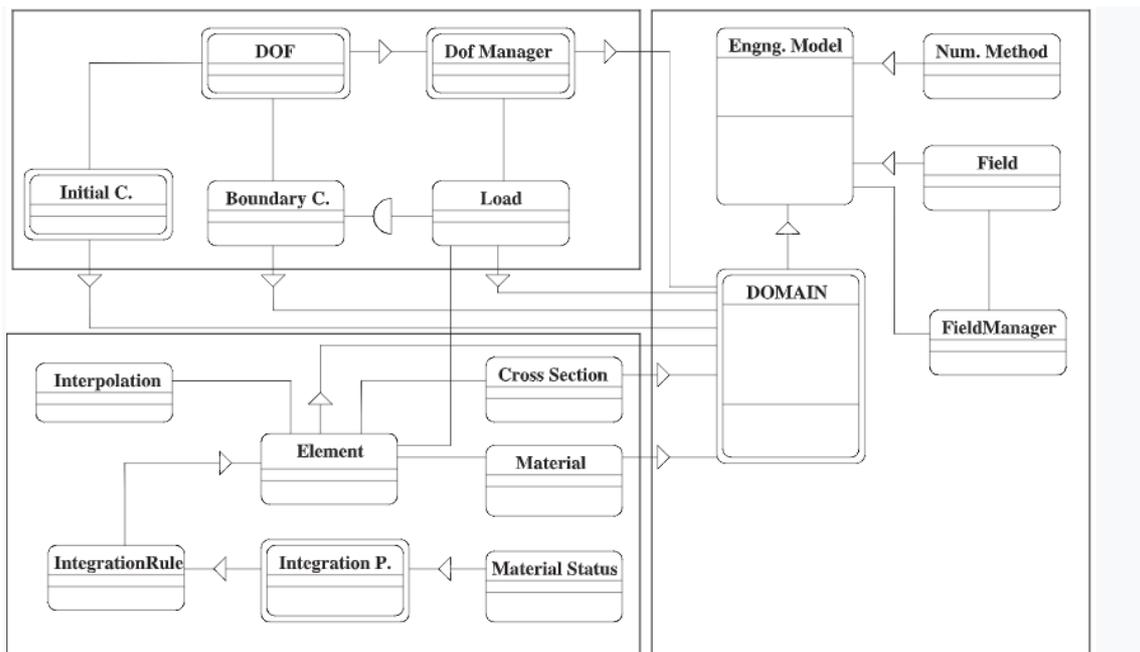


Ilustración 42: Estructura general de OOFEM



4.2 ESTRUCTURA DEL PROBLEMA EN OOFEM

Para comenzar a trabajar con el programa de cálculo, lo primero que debe comprenderse es la manera en la que Oofem es alimentado. Para ello hay que saber en primera instancia, que el programa posee un input en formato .txt, en el que se especifica toda la información necesaria para su funcionamiento.

El formato de entrada de datos se detalla en la Ilustración 43.

<code>viga.out</code>	Nombre del fichero de salida
#	
<code>Carga centrada</code>	Descripción
#	
<code>LinearStatic nsteps 1 nmodules 0</code>	Tipo de análisis
#	
<code>domain 2dBeam</code>	Dominio
#	
<code>OutputManager tstep all dofman all element all</code>	Admin de datos de salida
#	
<code>ndofman 3 nelem 2 ncrosssect 1 nmat 1 nbc 3 nic 0 nltf 1 nset 4</code>	Cantidad de componentes
#	
<code>node 1 coords 3 0.0 0 0</code> <code>node 2 coords 3 10 0 0</code> <code>node 3 coords 3 5 0 0</code>	Definición de nodos
#	
<code>Beam2d 1 nodes 2 1 3</code> <code>Beam2d 2 nodes 2 3 2</code>	Definición de elementos
#	
<code>SimpleCS 1 area 0.01 Iy 8.33e-6 BeamShearCoeff 1.e18 thick 0.1 material 1 set 1</code>	Definición de secciones
#	
<code>IsoLE 1 d 7850 E 2.1e10 n 0.2 tAlpha 0.000012</code>	Definición de materiales
#	
<code>BoundaryCondition 1 loadTimeFunction 1 dofs 2 1 3 values 2 0 0 set 2</code> <code>BoundaryCondition 2 loadTimeFunction 1 dofs 1 3 values 1 0 set 3</code> <code>NodalLoad 3 loadTimeFunction 1 dofs 3 1 3 5 Components 3 0 -10 0 set 4</code>	Condiciones de contorno
#	
<code>ConstantFunction 1 f(t) 1.0</code>	Funciones temporales
#	
<code>Set 1 allelements</code> <code>Set 2 nodes 1 1</code> <code>Set 3 nodes 1 2</code> <code>Set 4 nodes 1 3</code>	Agrupaciones de componentes
#	

Ilustración 43: Formato de Input de datos en OOFEM

A continuación, se definirán todos los apartados del Input de OOFEM:

1. **Nombre y ubicación del fichero de salida:** El texto de la primera línea significa el nombre del fichero de salida. Si no se le especifica la ruta de salida, el fichero se ubicará directamente en la misma carpeta que el Input.
2. **Descripción:** El segundo apartado es una pequeña descripción del análisis a ejecutar. Esta línea no aporta datos para el programa, es meramente informativo para el usuario, ya que, a medida que se van ejecutando más y más chequeos, puede llegar a ser confuso el manejar tantos ficheros de texto.
3. **Tipo de análisis:** Indica el tipo de análisis estructural que se va a ejecutar; estático, dinámico, etc. En este apartado se definen las diferentes características del tipo de análisis. En el caso dinámico: número de instantes tsteps, discretización temporal deltaT, y método de integración directa ddtScheme.
4. **Dominio:** Describe el dominio en el que se trabaja: 2dBeam, 3d, 2dPlaneStress, etc.
5. **Administrador de datos de salida:** Permite filtrar los datos de salida



6. **Cantidad de componentes:** Indica la cantidad de cada uno de los componentes: nodos, elementos, secciones, materiales, condiciones de contorno, funciones temporales etc.
7. **Nodos:** Se especifican en este grupo las coordenadas de los nodos.
8. **Elementos:** Se recogen las características de los elementos. Por ejemplo, si los elementos son tipo viga, nodos de inicio y fin, sección etc.
9. **Secciones:** Reúne las características de todas las secciones del modelo: área, inercia, el espesor, tipo de material...
10. **Materiales:** Registro de materiales empleados en el modelo y sus características, como son densidad, módulo de elasticidad, módulo de Poisson, coeficiente de dilatación térmica.
11. **Condiciones de contorno:** El siguiente apartado recoge El tipo de condiciones de contorno aplicadas a la estructura. En este caso vienen definidas por los grados de libertad a coartar o condicionar. Aquí caben también las cargas a aplicar y la aplicación del peso propio.
12. **Funciones temporales:** Se describen las funciones empleadas para indicar la variación en el tiempo de ciertos inputs.
13. **Agrupaciones de componentes o sets:** Los sets son grupos de elementos o nodos o de características de los dos anteriores que sirven para aplicarle las mismas condiciones o características al grupo en el apartado de Condiciones de contorno.

4.3 JUSTIFICACIÓN DEL USO DE OOFEM COMO PROGRAMA DE CÁLCULO

Como ya se ha podido deducir en los apartados anteriores, OOFEM es un programa que presenta ciertas complicaciones hasta que el usuario se familiariza tanto con los archivos input como con la manera de ejecutarlos. También el hecho de que carezca de interfaz, puede parecer un argumento en contra del programa de cálculo, ya que esto dificulta la visualización de resultados y depende del postprocesado de los datos con un programa externo para ello, como puede ser Excel.

Sin embargo, el que el programa introduzca las características del ensayo vía texto ejecutable por CMD, presenta oportunidades de automatización de procesos que merecen la pena explorar.

Además, OOFEM es un programa libre para cualquier usuario que quiera hacer uso de él, disponible online y en continuo desarrollo.

Estas dos ventajas combinado con software capaz de modelar y extraer los datos del modelo paramétrico elegido, pueden ser una gran combinación para realizar un profundo análisis de la estructura y comprender su comportamiento con mayor exactitud y en un plazo más corto de lo acostumbrados por programas convencionales.

Es por ello que, se propone generar una conexión entre Rhino – Grasshopper y OOFEM de manera que ambos programas funcionen como uno solo pudiendo así variar las características del modelo e instantáneamente obtener un input para el análisis en oofem.



5. INTERFASE GRASSHOPPER – OOFEM

Una vez generado el modelo paramétrico y comprendido de qué diferentes elementos se componen los archivos que alimentan el programa de cálculo OOFEM, es el momento de componer el fichero de entrada para el caso que nos ocupa.

El programa Grasshopper, permite ejecutar cálculos para la estimación de volúmenes no contributivos para el análisis longitudinal del puente, por ejemplo, los diafragmas o nervios transversales. Estos volúmenes servirán para introducir la acción del peso propio de esos elementos como carga exterior.

En primer lugar, se debe discretizar el modelo tridimensional a uno bidimensional. Para ello se posicionarán nodos y elementos que unen esos mismos nodos. Como ya se ha expuesto en el Capítulo 4, los elementos viga deben ser alimentados con las características que componen un elemento viga: momentos de inercia, área, canto de sección y material. Para ello es preciso extraer esos datos del modelo.

Se debe establecer un criterio de discretización del modelo, en este caso, el criterio adoptado es generar un nodo por cada péndola tanto en el arco como en el tablero, así como uno más entre esos dos.

En la Ilustración 44 se muestra la discretización del modelo.

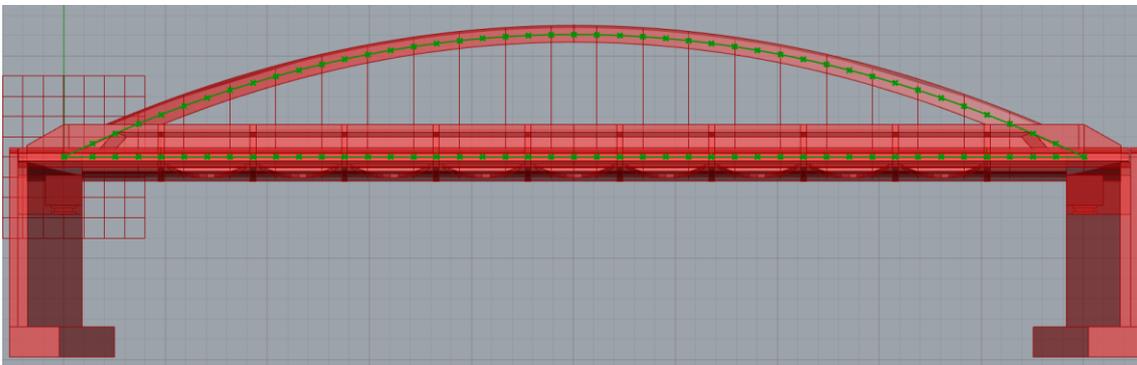


Ilustración 44: Discretización del Puente de las Oblatas.

El modelo 2D está compuesto por 88 nodos que generan 108 elementos.

Para organizar los nodos de manera legible para OOFEM lo que es necesario es obtener las coordenadas de cada nodo. En el caso del puente de las Oblatas, se dividen los nodos en diferentes grupos. En primer lugar, la zona del tablero central. Posteriormente los dos arranques desde los apoyos, finalmente los nodos pertenecientes al arco.

Todos estos ya están definidos en listas que se han necesitado en pasos anteriores para definir tanto la directriz del arco como la del tablero. Sin embargo, sus coordenadas deben recogerse en formato de input de oofem.



Para encadenar las coordenadas referentes a los nodos, el comando “Rep” que sustituye un elemento en el texto por otro, hace posible librarse de componentes como los paréntesis o las comas permitiendo encadenar las tres coordenadas separadas por espacios entre sí, que es como OOFEM las reconoce. En la Ilustración 45 se distingue el método para eliminar estos patrones.

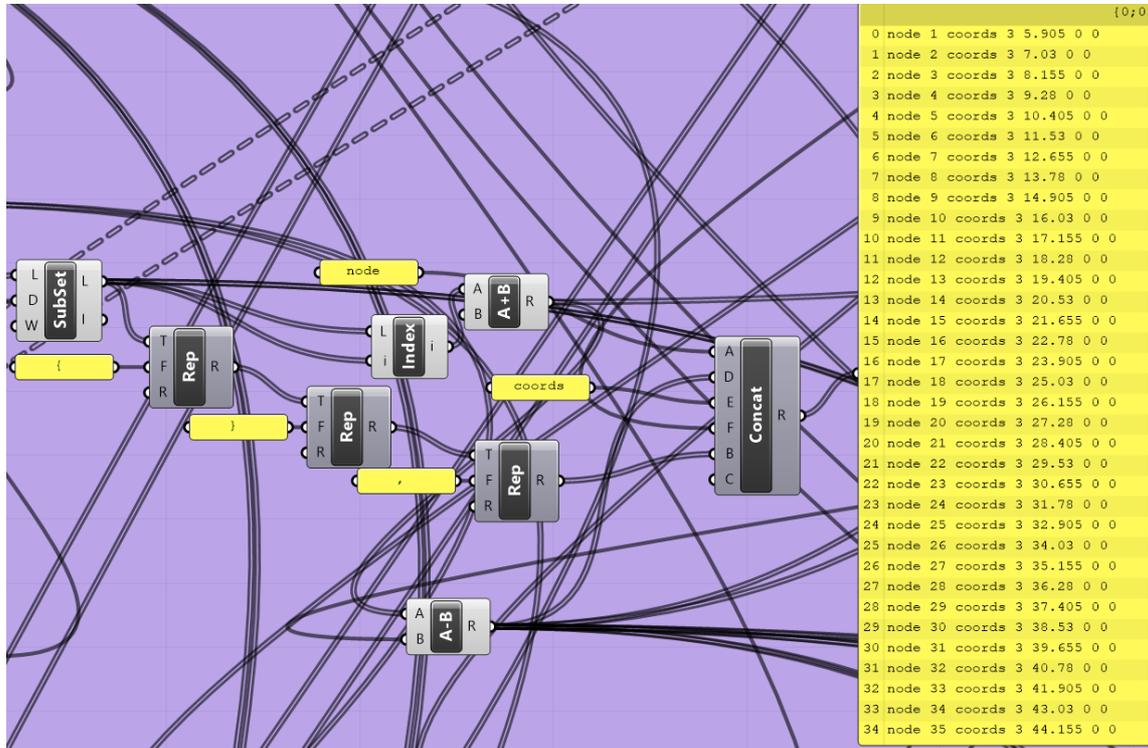


Ilustración 45: Definición de nodos en formato OOFEM.

Estos últimos deben caracterizarse adecuadamente con las particularidades ya mencionadas anteriormente. Para la primera de ellas, el área, puede hacerse uso de un comando que se denomina “Sec”, que genera la sección de corte entre un plano y un sólido.

La importancia de este paso reside en saber qué sección debe asignarse a cada elemento. Como ya se ha mencionado, los elementos existen con inicio y fin en los nodos, por lo tanto, si la sección es variable a lo largo de un mismo elemento, la sección característica del mismo, será la media. Es cierto que, por ejemplo, el arco varía de manera parabólica, pero se desprecia a efectos prácticos.

Para obtener las características de las secciones medias de los elementos, debe encontrarse en primer lugar, el punto medio entre los dos nodos que componen la viga.

Con el fin de encontrar dicho punto, se crea una polilínea a través de todos los puntos del arco. De manera que se genera un arco poligonal. Esta polilínea ha de descomponerse en las líneas que la componen para encontrar el punto medio de cada una de ellas. Sin embargo, ese punto no se corresponde con el punto medio entre los dos nodos del arco ya que la poligonal no es coincidente con la directriz del arco. Para



encontrar esos puntos medios definitivamente, se hace uso del comando “CurveCP”, que encuentra el punto más cercano de un punto cualquiera, perteneciente a una curva.

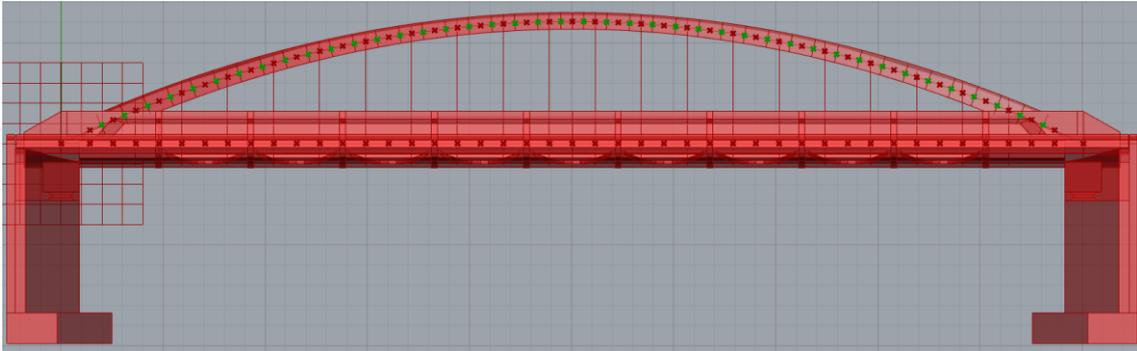


Ilustración 46: Ubicación de sección para cada elemento del arco.

Para encontrar las características de las secciones ubicadas en esos puntos, hay que hacer que planos intersequen el arco perpendicularmente a su directriz. Para ello se usa “PFrame” que genera planos perpendiculares a una determinada directriz y en un punto determinado que elige el usuario.

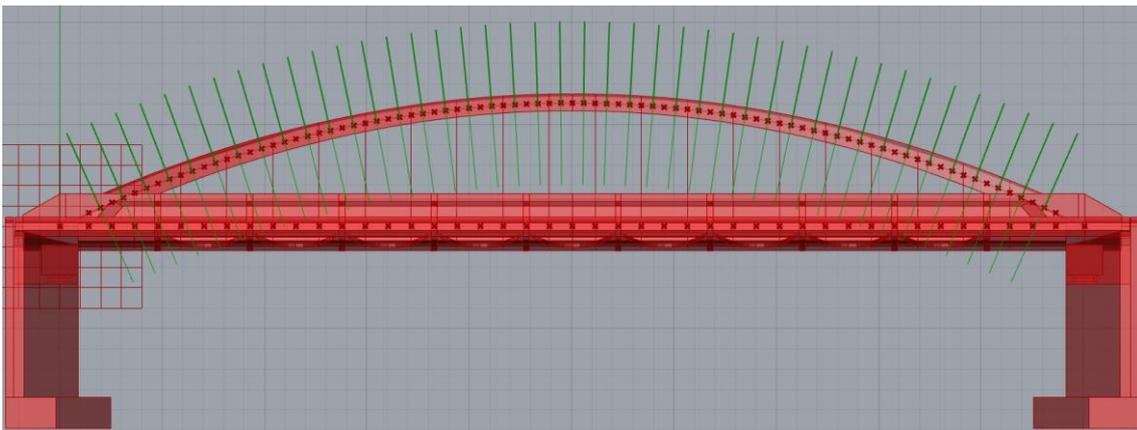


Ilustración 47: Planos perpendiculares al arco

Una vez obtenidos estos planos, es cuestión de realizar la intersección de los mismos con el Brep del arco, generando los contornos de las secciones resultantes. De éstas pueden extraerse los momentos de inercia mediante el comando “AMoments”.

En la siguiente ilustración se muestran las secciones resultantes del corte con los planos perpendiculares.

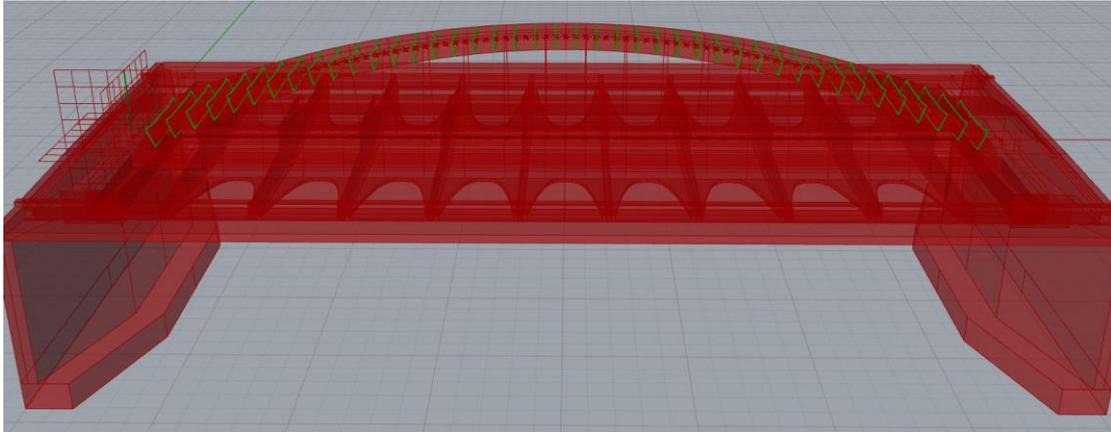


Ilustración 48: Secciones del arco.

Para el caso del tablero, ya que únicamente existen de dos tipos de secciones, Solo se utilizarán esas mismas. Para el arranque del tablero en ambos estribos se aplicará la sección con almas anchas y para el resto del tablero se aplicará la sección con almas reducidas en su parte inferior. Ilustraciones 10 y 15 respectivamente. Sin embargo, no debe considerarse la sección completa como contributiva ya que, en su mayor parte los esfuerzos recaerán en la viga medular. Para tener eso en cuenta, únicamente se ha considerado la sección de ancho igual a cuatro veces su canto.

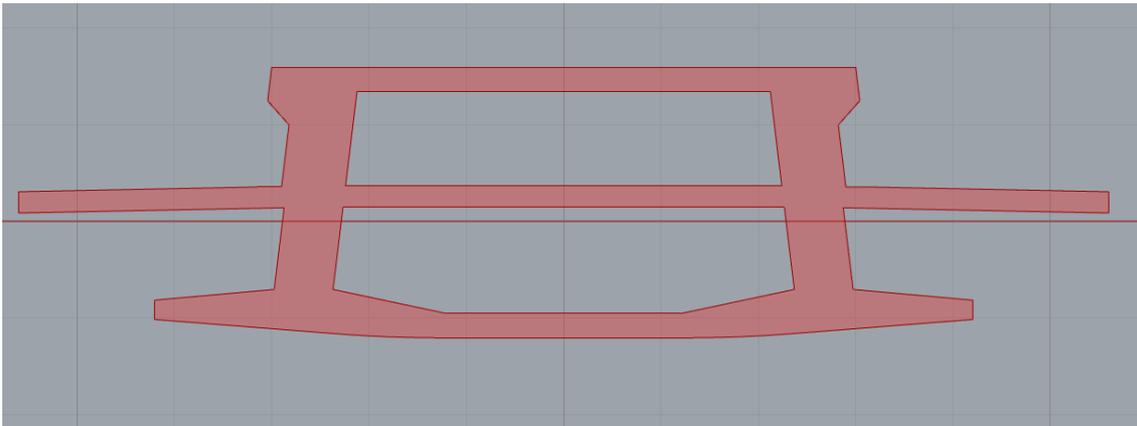


Ilustración 49: Sección considerada en el modelo de cálculo para el tablero.

Para el caso de las péndolas, se seleccionan los nodos que componen el inicio y fin de las mismas y con estas generar una viga con las características de las péndolas.

El programa OOFEM solo admite input en formato texto, por lo que todos los datos extraídos del modelo, deben ordenarse de tal manera que el programa pueda leerlo y no generar errores. Para ello, el comando “Concat”, que simplemente enlaza diferentes elementos tipo texto, puede resultar muy útil.

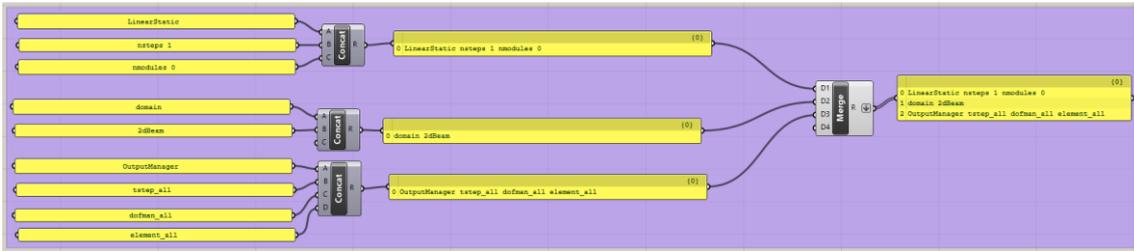


Ilustración 50: Utilidad del comando "Concat"

El fin de todas estas modificaciones es generar una herramienta de tratamiento de datos relacionados con el modelo que, a pesar de ser ardua la manera en la que esta herramienta se construye, solo requiera de ser fabricarse una sola vez, para posteriormente trabajar de manera automática y organizara, de tal manera que al final del proceso, obtengamos el modelo final para introducir en OOFEM. Es por ello que hay que adaptar los datos de Grasshopper al formato admisible por OOFEM.

Se describirán todas las maneras de seleccionar las características del modelo y transformarlos al formato .txt de entrada a OOFEM.

Para empezar, es crucial identificar todos los nodos de la estructura. En este caso, el tablero está discretizado en tres tramos cuyas características seccionales son diferentes. Para los dos tramos cercanos a los apoyos, se cuenta con una sección de alma ancha y para el tramo central, con una de sección más fina en cuanto a las almas en su mitad inferior.

Para replicar este fenómeno, se dividirán los nodos en tres grupos. Los dos márgenes y el centro del tablero. Esto ayudará a que, a la hora de asociarle una sección a los elementos, sea fácil distinguir qué elementos deben componerse con qué sección. Un nodo en OOFEM está compuesto por las siguientes partes (3):

- Palabra "**node**". Indica a OOFEM que los datos siguientes corresponden a un nodo, o como se denomina por el programa, dofman.
- **Número** de nodo. Se asocia un número a cada nodo, este no puede ser repetido y deben de ser números contiguos, es decir, no puede haber una discontinuidad en la numeración (1,2,3,4...n). Para ello, deben escogerse los nodos que definen cada una de las listas y posteriormente numerarlos. Esto se ejecuta mediante el comando "*ListItem*" que extrae el número que asigna Grasshopper a cada uno de los elementos de sus listas. Es importante numerar no solo los nodos sino todos los componentes del archivo, ya que, Grasshopper, por defecto, numera sus listas comenzando por el número cero, por lo que se debe extraer el número de la lista y posteriormente sumarle una unidad para que la numeración comience por uno y no por cero, que OOFEM no lee. Esto viene definido en la Ilustración 51.

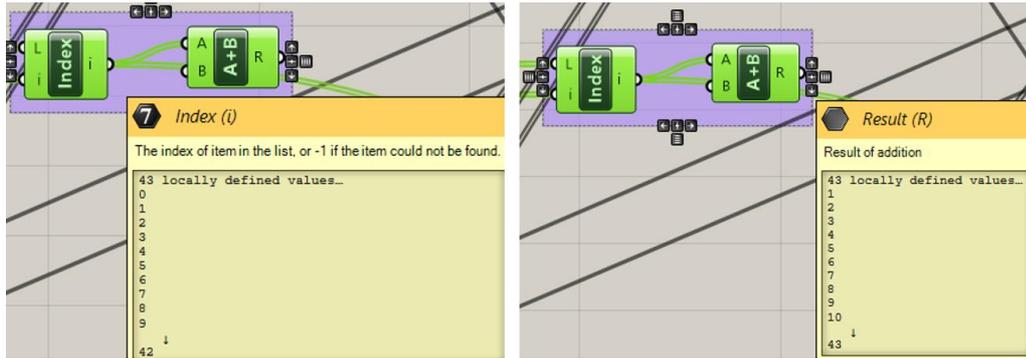


Ilustración 51: Numeración de elementos en Grasshopper

- Palabra “**coords**”. Indica que a continuación se especifican las coordenadas
- **Número** de coordenadas. Ya que pueden hacerse análisis en 2 o 3 dimensiones, se debe especificar la cantidad de coordenadas a introducir.
- **Coordenadas**. Se especifica la coordenada del nodo. En este caso, las coordenadas vienen definidas por el propio modelo de Grasshopper ya que, la información de los nodos en este programa se agrupa, como todos sus datos, en listas. Por lo tanto, se debe generar una lista con los nodos que interesen. Una buena praxis sería no generar una lista que incluya todos los nodos desordenados, sino que, teniendo en cuenta las cargas que se aplicarán más adelante, se creen las listas por separado. Por ejemplo, si se va a ejecutar un análisis de carga estática en diferentes puntos del tablero para visualizar la influencia de la misma, debe fijarse un criterio para la localización de dicha carga puntual y agrupar los nodos que se ubiquen en la posición fijada por ese criterio. Por otro lado, las coordenadas en OOFEM deben ir espaciadas y sin ningún carácter especial, como lo pueden ser comas o paréntesis. Para ello existe un comando para la edición del texto de las listas, “**Rep**” que sustituye elementos de la lista por otros. Si se quiere eliminar, un elemento, se reemplaza por un espacio vacío o simplemente no se conecta nada a ese input del comando.

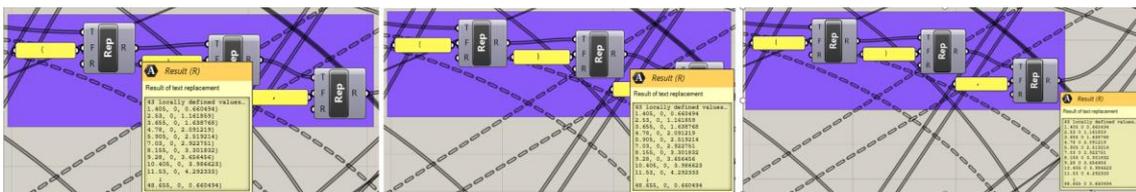


Ilustración 52: Coordenadas en formato OOFEM. Forma de eliminar caracteres innecesarios

Todas las secciones del modelo se agrupan en una lista usando el comando “**Merge**” y uniendo todas las listas que contienen áreas (arco, tablero, péndolas...).

El siguiente componente son los elementos en el caso de estudio el dominio de OOFEM será 2dBeam, por lo que, estará compuesta por dos nodos.

Las características a introducir en el modelo de cálculo son las siguientes:

- Palabra “**Beam2d**”. Indica al programa el tipo de componente que se va a definir.
- **Número** de elemento. Como ya se ha comentado en el apartado descriptivo de los nodos, comenzando por el número uno.



- Palabra “nodes”. Para definir qué nodos forman parte del elemento viga.
- Números de los nodos donde inicia y termina el elemento. (ej 87 5).
- crossSect. Número de sección transversal del elemento.

La Ilustración 53 muestra un elemento viga en formato OOFEM.

Beam2d 1 nodes 2 79 36 crossSect 3

Ilustración 53: Ejemplo de inserción de elementos en OOFEM

Posteriormente se extraerán las secciones y sus características principales, que son las siguientes:

- Palabra “**SimpleCS**”. Para que OOFEM identifique que se trata de una sección.
- Numeración de la sección.
- Palabra “**área**” seguido del valor del área. Para ello, deben recabarse las diferentes secciones a utilizar en el modelo. Para este caso, como se ha comentado anteriormente, se utilizarán un total de 47 secciones que comprenden desde la sección de las péndolas, que, al ser un análisis en dos dimensiones, debe duplicarse sus características, como las dos diferentes secciones del tablero y las 44 secciones que sirven para definir la variación geométrica del arco que vienen definidas en la Ilustración 48.
- “**Iy**” seguido del valor del momento de inercia seccional respecto al eje Y. El valor se obtiene del comando “**AMoments**” ya mencionado.
- “**Ik**” seguido del valor de inercia a torsión.
- **BeamShearCoefficient**. Coeficiente de corrección frente a distorsión. Se adoptará un valor de 1e18.
- **thick** seguido del valor del canto de la sección.
- **material** seguido del número identificativo del material que compone la viga.

La ilustración 54 muestra el formato de secciones de OOFEM.

SimpleCS 1 area 9.112869 Iy 7.286181 Ik 70.106807 BeamShearCoeff 1.e18 thick 2.8 material 1

Ilustración 54: Formato de inserción de secciones en OOFEM

Los materiales por otro lado se definen de la siguiente forma:

- **IsoLE**.
- Número identificativo del material.
- **d** seguido del valor de la densidad del material.
- **E** seguido del valor del Módulo de Young del material.
- **n** seguido del valor del coeficiente de Poisson del material.
- **tAlpha** seguido del valor del coeficiente de dilatación térmica del material.

IsoLE 1 d 2400 E 3089105000 n 0.2 tAlpha 1.2e-5

Ilustración 55: Formato de inserción de materiales en OOFEM



En cuanto a las condiciones de contorno, estas agrupan tanto cargas como imposiciones de movimiento en los apoyos, peso propio etc. El formato de todas ellas sin embargo no difiere en gran medida.

- En primer lugar, se encuentra el nombre del tipo de condición de contorno: **BoundaryCondition**, **Deadweight**, **ConstantEdgeLoad**, **NodalLoad**. Posteriormente se numeran las condiciones.
- A cada una de ellas debe conectárseles una función temporal, que describe cual va a ser la variación de dicha condición. Si es una carga varía el valor de la carga, si es una imposición a desplazamiento, variará el desplazamiento del apoyo o nodo. Esto se define asignando un **loadTimeFunction** seguido del número identificativo de la función temporal.
- **dofs**. A cuantos y a qué grados de libertad afecta. El programa discretiza los grados de libertad del uno al seis siendo el uno desplazamiento en el eje X, el 2 desplazamiento en el eje Y, el 3 desplazamiento en el eje Z. Los números 4,5,6 están reservados para giro respecto del eje X, giro respecto del eje Y, y giro respecto del eje Z respectivamente. Por lo que por ejemplo el peso propio afectará al eje Z, por lo que es el dof 3.
- **components**. Valor de las condiciones de contorno. Estas deben concordar con los grados de libertad si la condición afecta al eje Z y en el apartado de dofs se escribe 1 3 5, para representar la interacción con dicho eje el valor de componets debe ser 0. Por lo que, en realidad, el apartado de dofs tiene información de más ya que se puede simplemente aludir al dof 3.
- **set** al que quiere aplicarse esta condición de contorno. Los sets contienen nodos o elementos, por lo que en realidad lo que se define es la ubicación de las condiciones.

```
BoundaryCondition 1 loadTimeFunction 1 dofs 2 3 4 values 1 0.0 set 2  
Deadweight 2 loadTimeFunction 1 dofs 3 1 3 5 components 3 0.0 -10.78 0.0 set 1  
ConstantEdgeLoad 3 loadTimeFunction 1 Components 3 0 -287583.8 0 loadType 3 set 39
```

Ilustración 56: Formato de inserción de condiciones de contorno en OOFEM

Las funciones temporales controlan la variación de las condiciones de contorno para un análisis extendido en el tiempo. Por ello, deben definirse con sumo cuidado y cerciorarse de que funcionan correctamente.

En primer lugar, existen las funciones temporales constantes, asignables a las condiciones que no cambian de valor en el tiempo y mantienen su valor original.

ConstantFunction 1 f(t) 1.0

Ilustración 57: Función temporal constante

En cuanto al caso de condiciones que varían magnitud, debemos hacer uso de **PiecewiseLinFunction** si la variación es lineal.

Este tipo de función es clave para el estudio de cargas móviles y consiste en crear una función con pares de valores tiempo y el tanto por uno de condición aplicada. De manera que el siguiente ejemplo, **PiecewiseLinFunction 1 npoints 3 t 3 1 2 3 f(t) 0 1 0** quedaría graficada en la siguiente figura.

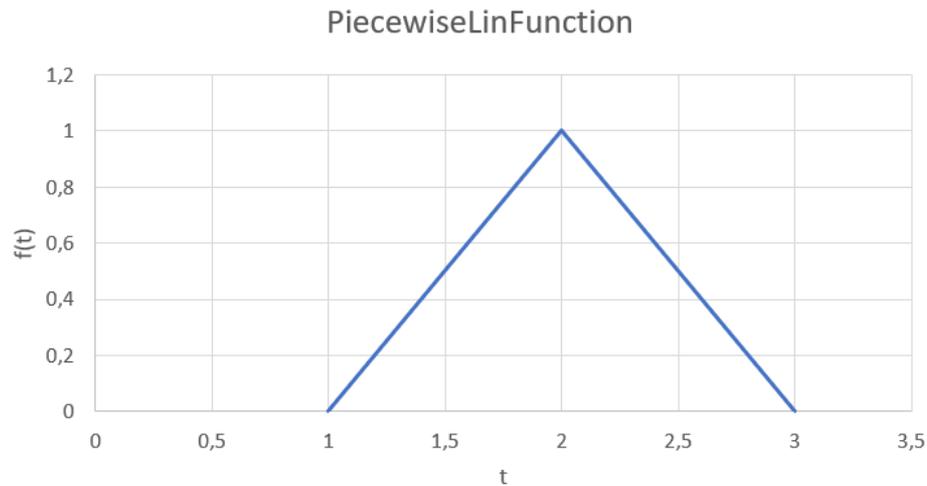


Ilustración 58: Representación básica de PiecewiseLinFunction

Npoints representa el número de parejas $t - f(t)$ que van a introducirse. Después, debe escribirse **t** y los instantes de tiempo seleccionados. Ya que, el ejemplo anterior es para tres instantes de tiempo divididos entre sí a igual magnitud. En caso contrario podría resultar de la siguiente manera. PiecewiseLinFunction 1 npoints 3 t 3 1 2.50 3 f(t) 0 1 0.

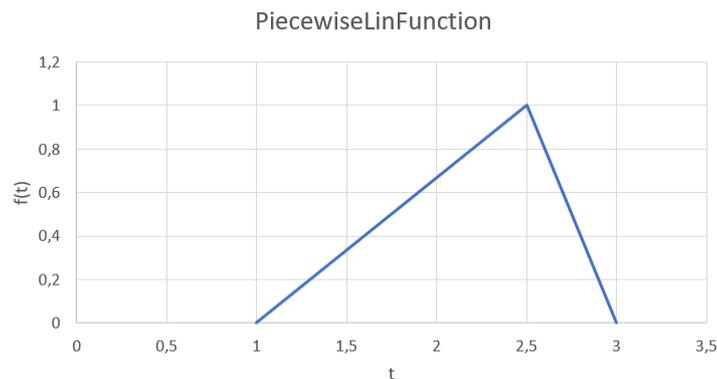


Ilustración 59: PiecewiseLinFunction separación entre instantes de diferente magnitud

Se comentará en capítulos posteriores sobre la importancia de esta función y la combinación con las cargas.

Por último, se deben asignar los nodos o elementos deseados a los **Set**. La composición de los sets es la siguiente:

- Set.
- Nº de set.
- nodes o elementedges (toda la longitud del elemento para cargas distribuidas).
- Cantidad de nodos o elementedges.
- Número identificativo del elemento que se quiere agrupar.

Set 3 elementedges 2 107 1

Ilustración 60: Formato de inserción de Sets en OOFEM



A continuación, se muestra cómo se generan las diferentes listas de estos componentes del fichero en Grasshopper comenzando por las secciones.

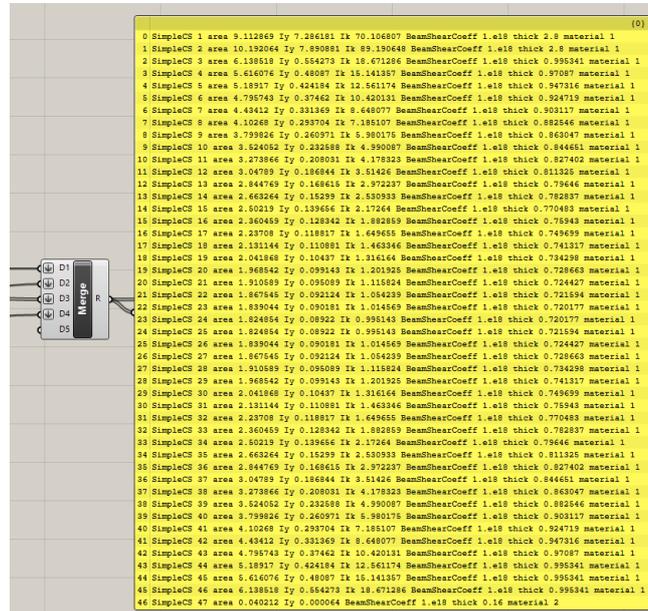


Ilustración 61: Secciones en formato OOFEM

Otro de los componentes del fichero de entrada son los materiales. En este caso, únicamente tendremos dos tipos de materiales, el acero y el hormigón. Por lo que solo debemos generar una lista incluyendo esos materiales (Ilustración 62).

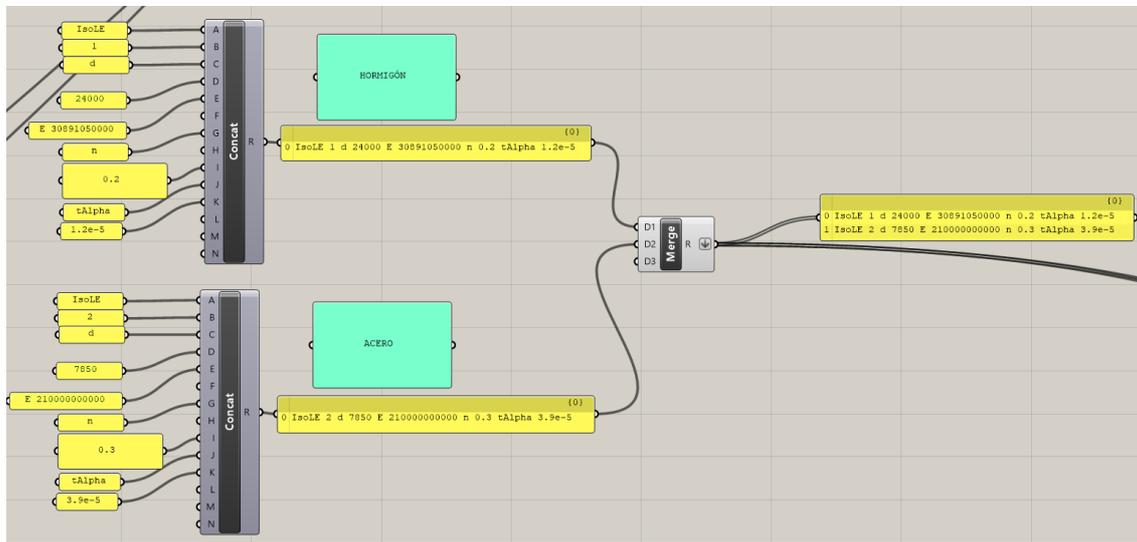


Ilustración 62: Caracterización de materiales en formato OOFEM.

De esta manera, tanto el módulo de elasticidad como la densidad son modificables de una manera extremadamente sencilla.

El siguiente aspecto a concretar son las cargas a introducir. En este caso los tipos de cargas serán repartidas y puntuales. Para ello se han de seleccionar los grupos de nodos y elementos sobre los que se quieren disponer las cargas, también llamados sets. En estos sets se pueden agrupar nodos o elementos. De tal manera que si asignamos una



carga a un set que incluye un número de nodos, a todos ellos se les aplicará esa carga. En la Ilustración 63 se muestra el ejemplo de los sets que indican en qué nodos existe diafragma o nervio transversal.

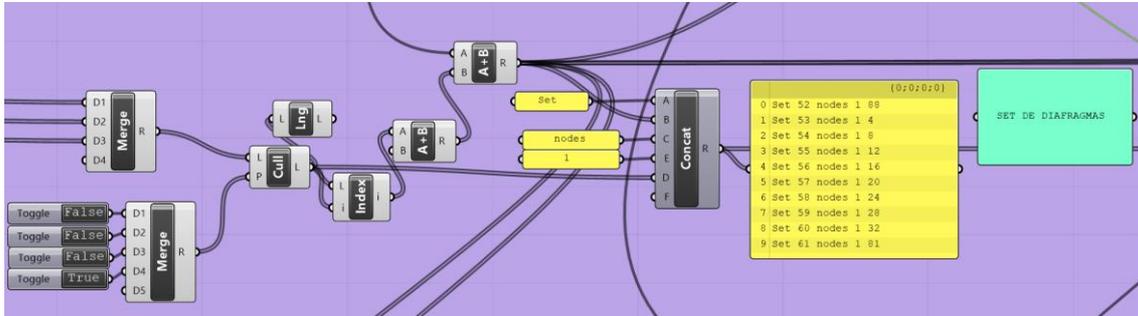


Ilustración 63: Sets de nodos en los que existe diafragma transversal.

En cuanto a las cargas aplicadas, parte de ellas se extraen del modelo, pero el resultado final se extrae de combinaciones e hipótesis en una hoja de cálculo.

En la siguiente Ilustración se muestra la red de recogida de datos para la conversión de las cargas en formato OOFEM.

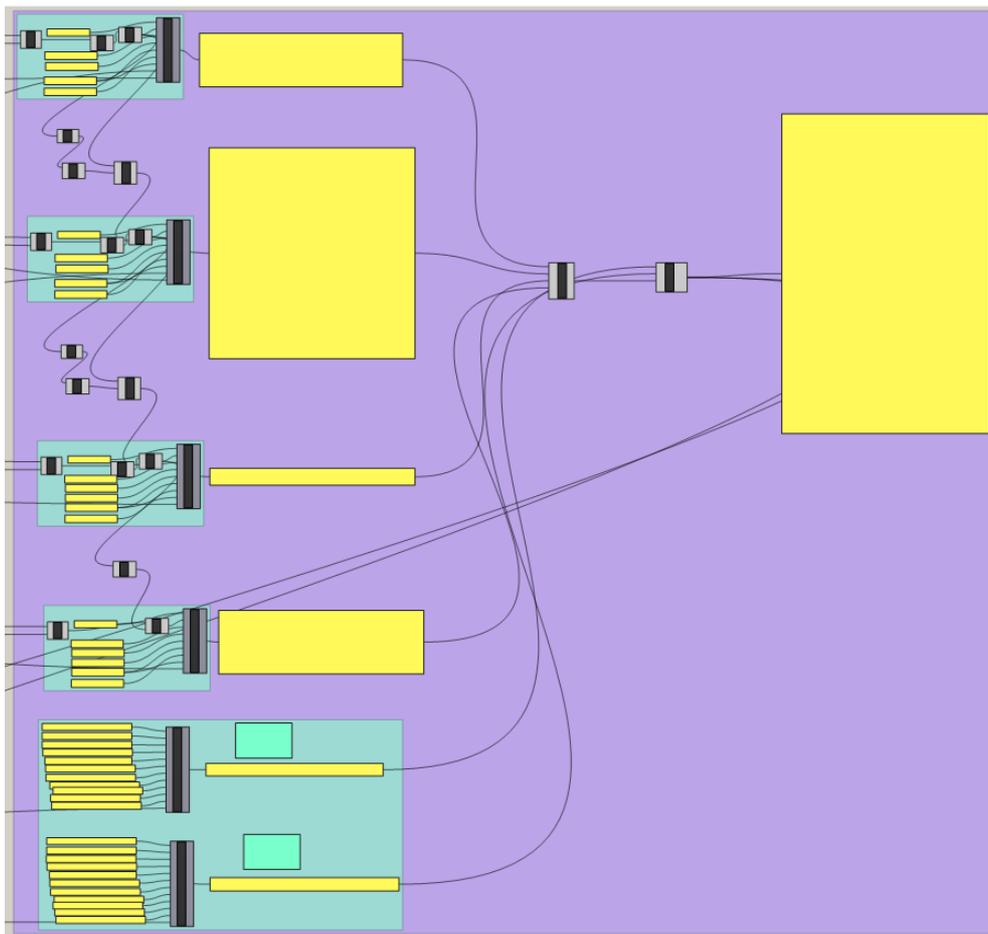


Ilustración 64: Vista general de la extracción de cargas y condiciones de contorno.

Por otro lado, en este apartado es donde también se introducen las condiciones de contorno de la estructura. En el caso del puente de oblatas los apoyos están únicamente



sujetos al empotramiento en torsión. En este caso, al ser un análisis longitudinal, no se tendrán en cuenta ese tipo de esfuerzos, por lo que las condiciones de contorno únicamente son de desplazamiento en el eje Z igual a cero en los apoyos.

En la Ilustración 65 se muestra en detalle la elaboración del formato de cargas para su posterior lectura en OOFEM.

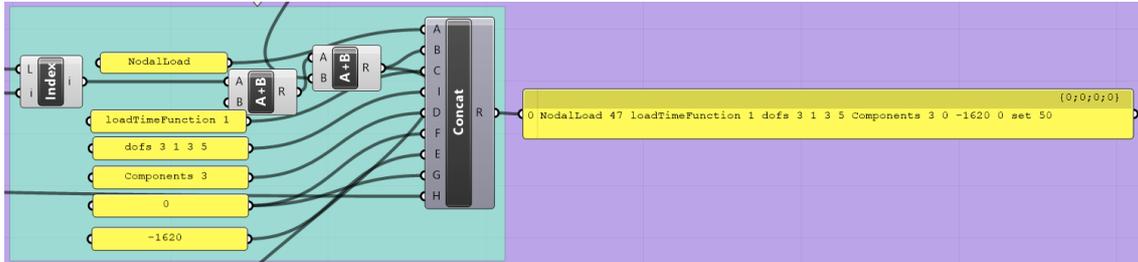


Ilustración 65: Detalle de composición de cargas para su introducción en OOFEM

Para el caso de las condiciones de contorno, es preciso seleccionar un set que contenga el nodo sobre el que se quiere aplicar dichas condiciones, en este caso, los apoyos. Estos se pueden agrupar en un mismo set o separarlos en uno cada uno. Es de gran ayuda tener los nodos individualizados en un set propio, ya que, ofrece un amplio abanico de posibilidades de cargar el modelo con acciones independientes a cada nodo.

En la ilustración 66, se muestra la agrupación de cargas y condiciones de contorno completa.

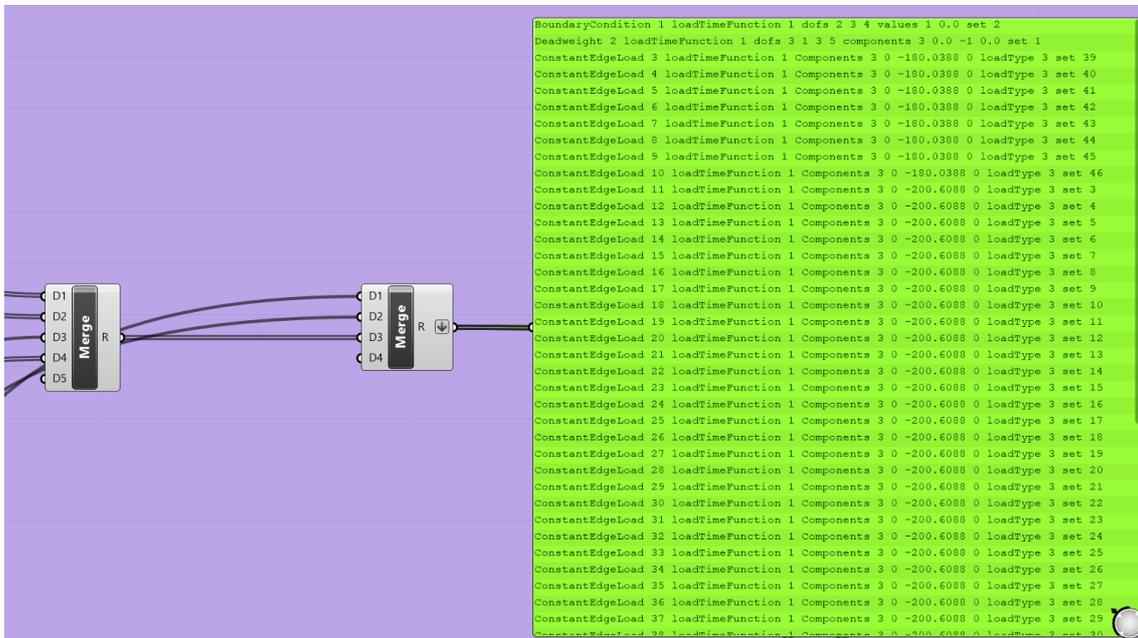


Ilustración 66: Lista de agrupación de condiciones de contorno y cargas.

Después de organizar todas las características del modelo en listas y de unir todos los datos que estas contienen, se genera un amplio texto que es el que se deberá introducir en el fichero de texto del input de OOFEM.



El último paso sería realizar un recuento de todos los elementos incluidos en el fichero con el comando "List Length" asociado a cada una de las listas que se unen en el formato final del modelo de cálculo en formato texto.

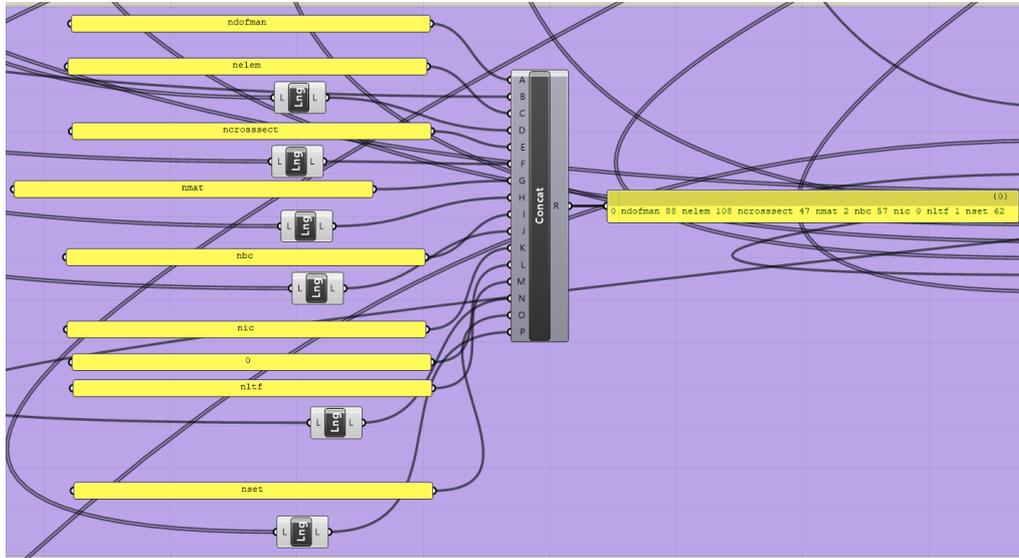


Ilustración 67: Recuento de elementos dentro del modelo de cálculo

Todo lo que se ha comentado anteriormente en cuanto a componentes del fichero debe conectarse entre sí para formar el fichero final, ya que, por ahora únicamente se han generado listas individuales para cada componente, por lo que es hora de construir la lista final. Para ello, debe ejecutarse el comando Merge y conectar las diferentes listas en orden de lectura de OOFEM, que es el marcado por el recuento de elementos de la Ilustración 68. El resultado es el siguiente.

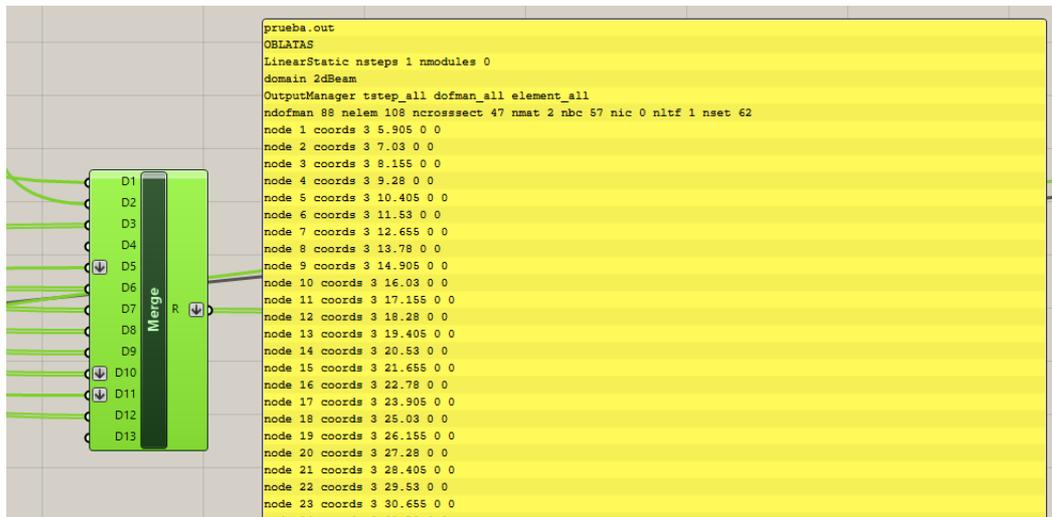


Ilustración 68: Conexión de características del modelo paramétrico para su inserción en OOFEM

La vista general de la construcción del modelo a introducir en OOFEM se muestra en la Ilustración 69.

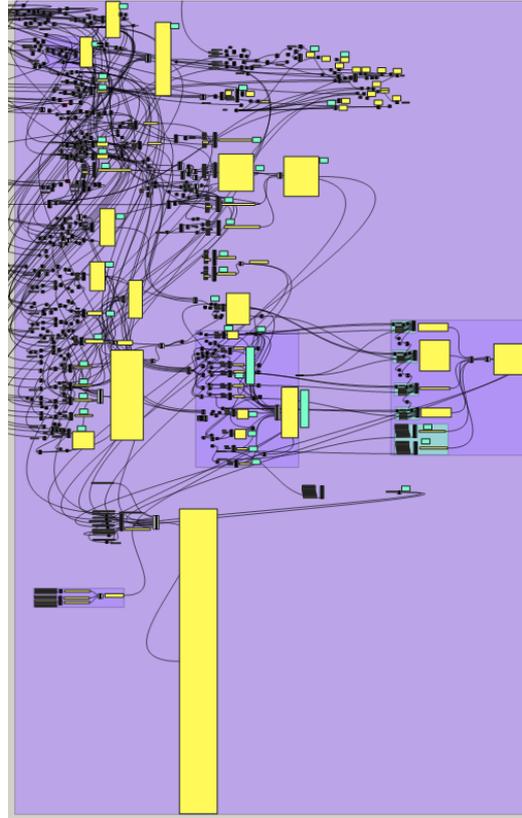


Ilustración 69: Vista completa del modelo de cálculo

Para crear el fichero .txt simplemente se ejecuta el bloc de notas y se inserta el contenido de la lista final en él copiando el texto.

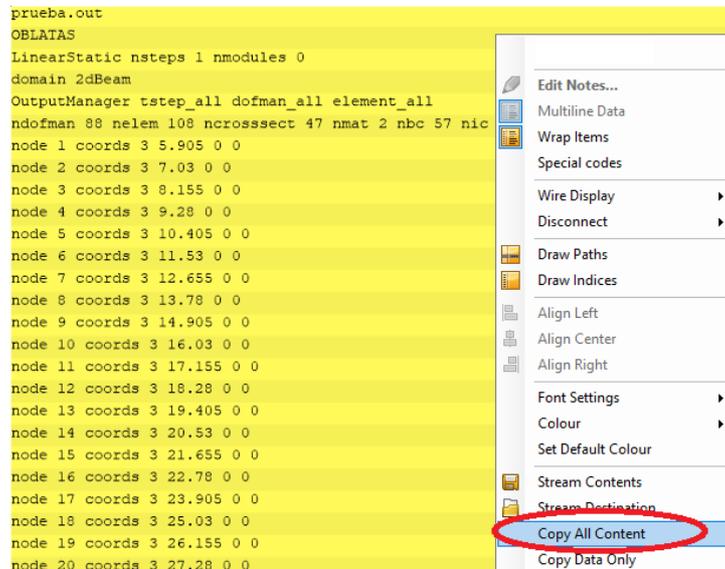


Ilustración 70: Copiado de datos en la lista a texto



```
OBLATAS
LinearStatic nsteps 1 nmodules 0
domain 2dBeam
OutputManager tstep_all dofman_all element_all
ndofman 88 nelem 108 ncrosssect 47 nmat 2 nbc 57 nic 0 nltf 1 nset 62
node 1 coords 3 5.905 0 0
node 2 coords 3 7.03 0 0
node 3 coords 3 8.155 0 0
node 4 coords 3 9.28 0 0
node 5 coords 3 10.405 0 0
node 6 coords 3 11.53 0 0
node 7 coords 3 12.655 0 0
node 8 coords 3 13.78 0 0
node 9 coords 3 14.905 0 0
node 10 coords 3 16.03 0 0
node 11 coords 3 17.155 0 0
node 12 coords 3 18.28 0 0
node 13 coords 3 19.405 0 0
node 14 coords 3 20.53 0 0
```

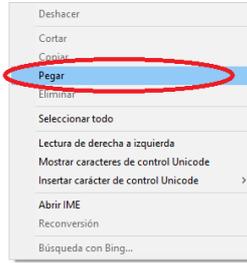


Ilustración 71: Input en formato texto en Bloc de notas



6. ANÁLISIS ESTÁTICO DEL PUENTE DE LAS OBLATAS

Ya que el objetivo es comparar los esfuerzos a los que se ve sometida la estructura para el caso estático y el dinámico, el primer paso es realizar completar el modelo de cálculo con las acciones consideradas para el caso estático.

6.1 ACCIONES CONSIDERADAS

El modelo se somete a un total de 11 estados de carga. El primero corresponde a la situación de peso propio de la estructura; los 10 estados de carga restantes corresponden a diferentes posiciones de la sobrecarga de uso contemplada en la IAP-11.

6.1.1 Peso propio.

El peso propio tanto del tablero como del arco son obtenidos por OOFEM relativo a las características de materiales y secciones que se introducen en el programa. Para ello es necesario aportar estos datos al programa:

- **ISOLE**.
- Número identificativo del material.
- **d** seguido del valor de la densidad del material. Para el hormigón, se considera 2400 kg/m^3 mientras que para el acero de las péndolas se considera 7850 kg/m^3 .
- **E** seguido del valor del Módulo de Young del material. Al módulo de elasticidad del acero se le asigna un valor de $2.1 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ mientras que, para el hormigón, es necesario calcularlo de acuerdo con el Artículo 39.6 relativo al Módulo de deformación longitudinal del hormigón. El hormigón en todo el puente tiene características de **HA-40**.

$$E_{cm} = 8.500^3 \sqrt{f_{cm}} = 8.500^3 \sqrt{f_{ck} + 8} = 8.500^3 \sqrt{40 + 8} = 30891.05 \text{ MPa} \quad (4)$$

- **n** seguido del valor del coeficiente de Poisson del material.
- **tAlpha** seguido del valor del coeficiente de dilatación térmica del material.

De esta manera se caracterizan los materiales. Para tener en cuenta al peso propio y que funcione como carga, que es lo que ejecuta el **"Deadweight"**, debe introducirse en el modelo en Newtons, por lo que, si la densidad es descrita en Kg, debe multiplicarse por $9,81 \text{ m/s}^2$.

```
ISOLE 1 d 2400 E 30891050000 n 0.2 tAlpha 1.2e-5  
ISOLE 2 d 7850 E 210000000000 n 0.3 tAlpha 3.9e-5
```

Ilustración 72: Código en formato OOFEM para la caracterización de los materiales

Para introducir el efecto del peso propio, es necesario ejecutar otra línea de código.



Deadweight 2 loadTimeFunction 1 dofs 3 1 3 5 components 3 0.0 -13.25 0.0 set 1

Ilustración 73: Código en formato OOFEM para la introducción del efecto del peso propio en el cálculo

En el caso concreto de la ilustración 73, el factor -13.25 corresponde al efecto del coeficiente de seguridad parcial en la TABLA 6.2-b de la Norma IAP-11 (5) para el peso propio y al paso de Kilogramos a Newton.

ACCIÓN		EFECTO	
		FAVORABLE	DESFAVORABLE
Permanente de valor constante (G)	Peso propio	1,0	1,35
	Carga muerta	1,0	1,35
Permanente de valor no constante (G*)	Pretensado P_1	1,0	1,0 / 1,2 ⁽¹⁾ / 1,3 ⁽²⁾
	Pretensado P_2	1,0	1,35
	Otras presolicitaciones	1,0	1,0
	Reológicas	1,0	1,35
	Empuje del terreno	1,0	1,5
	Asientos	0	1,2 / 1,35 ⁽³⁾
	Rozamiento de apoyos deslizantes	1,0	1,35
	Variable (Q)	Sobrecarga de uso	0
	Sobrecarga de uso en terraplenes	0	1,5
	Acciones climáticas	0	1,5
	Empuje hidrostático	0	1,5
	Empuje hidrodinámico	0	1,5
	Sobrecargas de construcción	0	1,35

Tabla 1: Coeficientes parciales de seguridad para comprobaciones resistentes IAP-11

6.1.2 Cargas muertas

Se denomina carga muerta a toda aquella que son propias de elementos no estructurales y que gravitan sobre los estructurales tales como: pavimentos, aceras, elementos de contención, dotaciones viales y de la estructura, conductos de servicios etc.

Para reproducir el efecto de dichos elementos, se convertirán en cargas exteriores que emulen su efecto. En el caso del puente de las oblatas, las cargas muertas son las siguientes:

- **Voladizos de aceras.** Para el cálculo de la carga que introducirían los diferentes elementos de la estructura que compone la acera, es necesario acudir a los planos que definen la misma, para así deducir que distribución de carga aplicar basándose en los diferentes materiales que componen el voladizo.

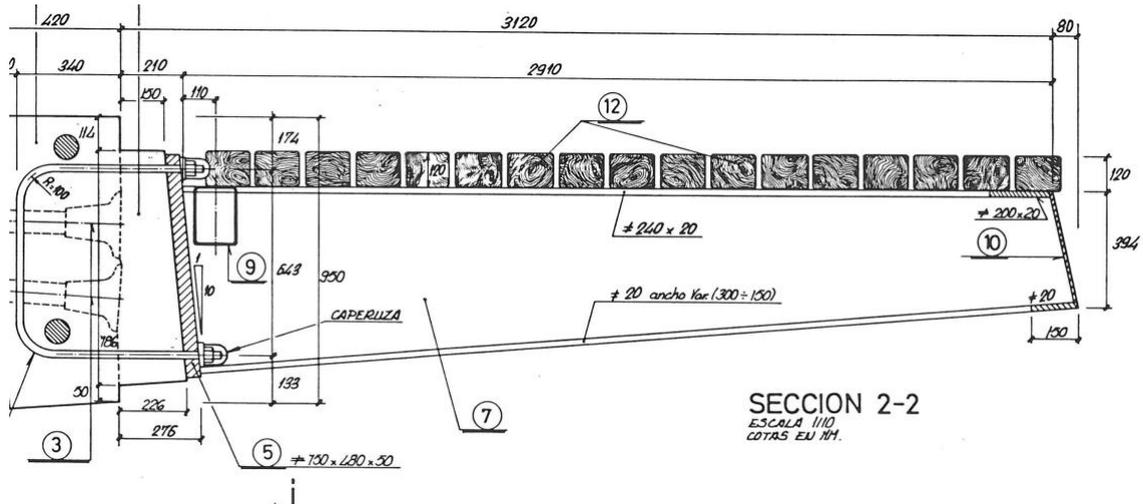


Tabla 2: Detalle de la estructura de las aceras voladas

En primer lugar, se distingue que la estructura está compuesta tanto por madera como por acero. Se determina el área de los tablonces de madera y posteriormente se calcula el peso por metro lineal de la misma. Para el caso de la estructura metálica, se debe calcular el peso completo de uno de sus nervios y dividir el mismo por el espaciamiento entre dos de los nervios. Así, se obtiene el peso por metro lineal de cada elemento que compone la acera.

$$9,81 \text{ N/kg} * 2 \text{ ud} * (400 \text{ kg/m}^3 * 0,306 \text{ m}^2 (\text{madera}) + (7850 \text{ kg/m}^3 (\text{acero}) * 0,01492 \text{ m}^2 * 2,910 \text{ m}) / 4,5 \text{ m}) / 1000 \approx 4 \text{ KN/ml}$$

- **Pavimento:** Se calcula el valor del peso del espesor de la capa de pavimento en la calzada. Para ello se determina el ancho de calzada, que para este caso de estudio es de 13 metros de ancho y el espesor de capa de pavimento es de cinco centímetros. Teniendo en cuenta que el peso específico para la mezcla bituminosa es de 23 KN/m³ se realizan los cálculos siguientes:

$$0,05 \text{ m} * 13 \text{ m} * 23 \text{ KN/m}^3 = 14,95 \text{ KN/ml}$$

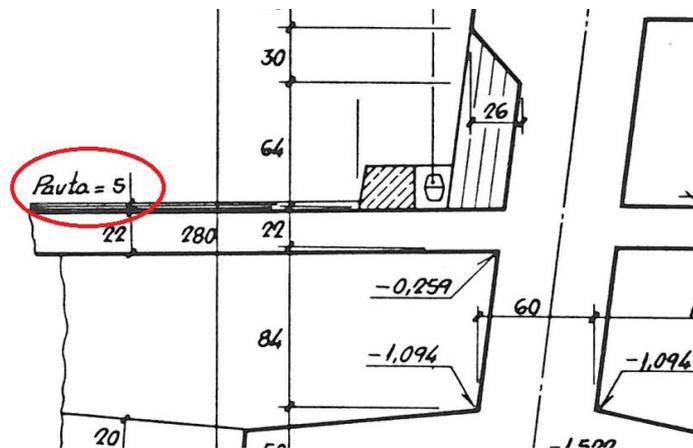


Ilustración 74: Espesor del pavimento.



- Sección del puente no contributiva en el análisis longitudinal. Como se ha establecido en el Capítulo 5, contar con que la totalidad de la sección trabajará para resistir las tensiones, sería no estar del lado de la seguridad; es por ello que se utiliza la sección mostrada en la Ilustración 49. Sin embargo, el resto de la sección que hemos despreciado del aporte de características resistentes a la sección, sí que sigue formando parte de la estructura, por lo que, deberá tenerse en cuenta ya que aporta peso a la misma. Es por definición una carga muerta.

Para encontrar el valor de la carga distribuida que genera esa parte de la sección, se requiere de Grasshopper una vez más. Son estos aspectos en los que destaca el uso de una herramienta paramétrica; hace posibles cálculos de cargas automatizados teniendo en cuenta el área de la sección en este caso. Para este caso, también se han tenido en cuenta la parte correspondiente a los aligeramientos parabólicos de la Ilustración 17 cuya carga hay que extraer de la carga distribuida longitudinalmente. En la Ilustración 75 se muestra la parte no contributiva de la sección. Es evidente que el valor de la carga distribuida de este elemento debe ser duplicada ya que existen dos idénticos, uno en cada extremo de la sección.

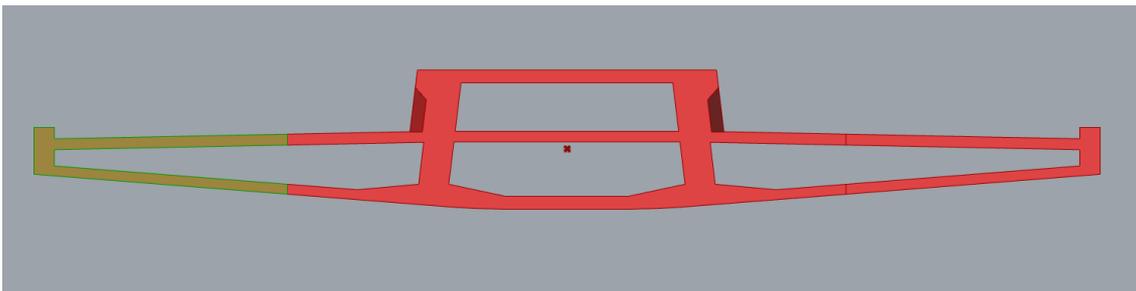


Ilustración 75: Parte de la sección completa que no contribuye frente a esfuerzos

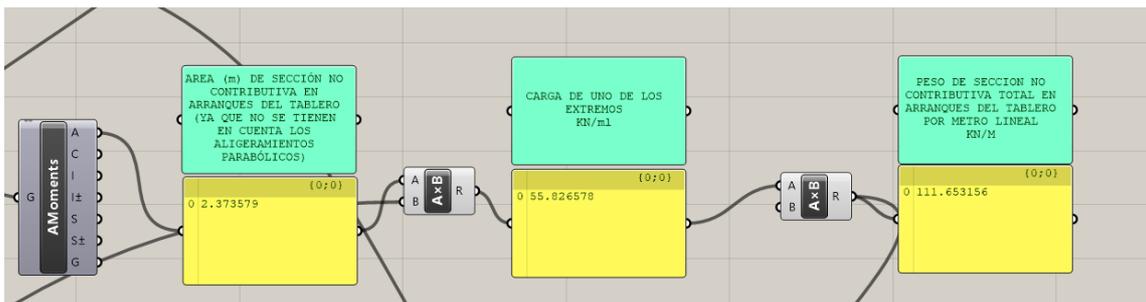


Ilustración 76: Proceso de extracción de la carga de peso muerto para los puntos del tablero cercanos a los estribos.

El proceso consiste en calcular el área de esa parte de la sección y calcular con ella la carga distribuida y posteriormente duplicarla para tener en cuenta ambos lados de la estructura. Resultando en:

$$2,364m^2 * 2,4t/m^3 * 9,81KN/t * 2 = 111,65 KN/ml$$

Para el resto del tablero, hay que tener en cuenta que existe parte del jalcón que está aligerado, por lo tanto, hay que restarle su influencia.



En la estructura existen 18 aligeramientos. Se calculará el peso total de todos ellos y este se distribuirá por los 40,5 metros que constituyen la parte del tablero central en la que se va a utilizar esta carga muerta.

- **Peso total de los aligeramientos parabólicos del puente.**

$$15,09 \text{ m}^2 * 0,2 \text{ m} * 18 \text{ ud} * 23,52 \text{ KN/m}^3 = 1277,5 \text{ KN}$$

- **Peso total de la porción en la Ilustración 75:**

$$111,65 \text{ KN/ml} * 40,5 \text{ m} = 4521,95 \text{ KN}$$

- **La resultante de esta carga muerta será la diferencia de ambas.**

$$(4521,95 \text{ KN} - 1277,5 \text{ KN})/40,5 \text{ m} = \mathbf{80,11 \text{ KN/ml}}$$

Por lo tanto, el total de las cargas muertas será la suma de todas las cargas distribuidas anteriormente calculadas.

- **Para los arranques del tablero:**

$$4 \text{ KN/ml} + 14,95 \text{ KN/ml} + 111,65 \text{ KN/ml} = \mathbf{130,60 \text{ KN/ml}}$$

- **Para el tablero central:**

$$4 \text{ KN/ml} + 14,95 \text{ KN/ml} + 80,11 \text{ KN/ml} = \mathbf{99,06 \text{ KN/ml}}$$

- **Diafragmas transversales:**

Para emular el efecto de los diafragmas transversales, se calcula la carga puntual que representa el peso de los mismos. Para ello, se debe hacer uso de Grasshopper para conocer el volumen de la parte de los diafragmas que no se solapa con la sección base del cálculo. Para ello se ejecuta el siguiente comando:

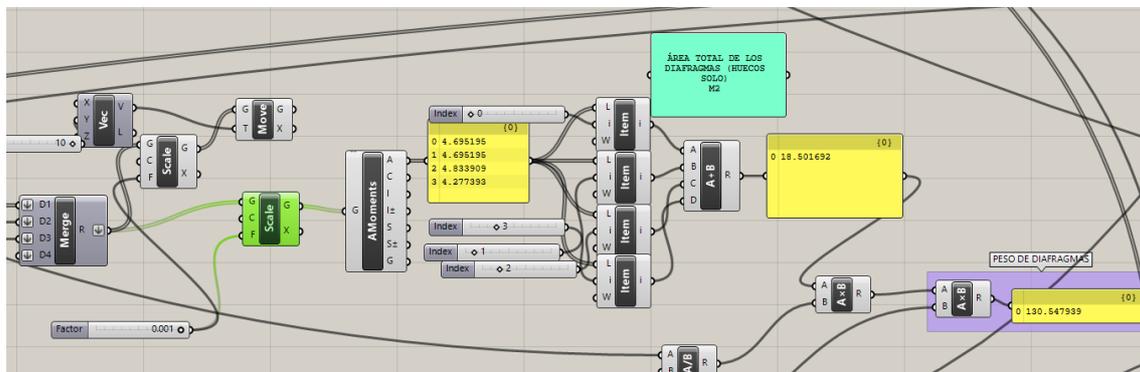


Ilustración 77: Extracción del volumen y carga de los diafragmas en Grasshopper

La carga representa el peso de los diafragmas de 30 cm de espesor y de sección mostrada en la Ilustración 78.

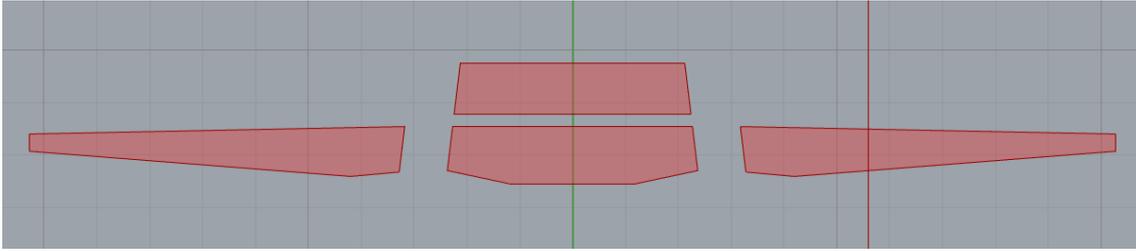


Ilustración 78: Sección de diafragmas que aportan carga muerta.

El valor final de la carga será:

$$18,5 \text{ m}^2 * 0,30 \text{ m} * 24 \text{ KN/m}^3 = \mathbf{130,55 \text{ KN}}$$

6.1.3 Sobrecarga de uso

Se calcularán de acuerdo al apartado 4.1 de la IAP-11.

En primer lugar, se deben dividir en carriles virtuales según lo establecido en el punto 4.1.1 de la norma. Para el Puente arco de Las Oblatas, se divide la calzada en los carriles de tres metros de ancho, como el ancho para el tráfico rodado son 13 metros, se obtendrán cuatro carriles virtuales y un metro de área remanente.

Lo explicado en el párrafo anterior se puede visualizar en la Ilustración 79.

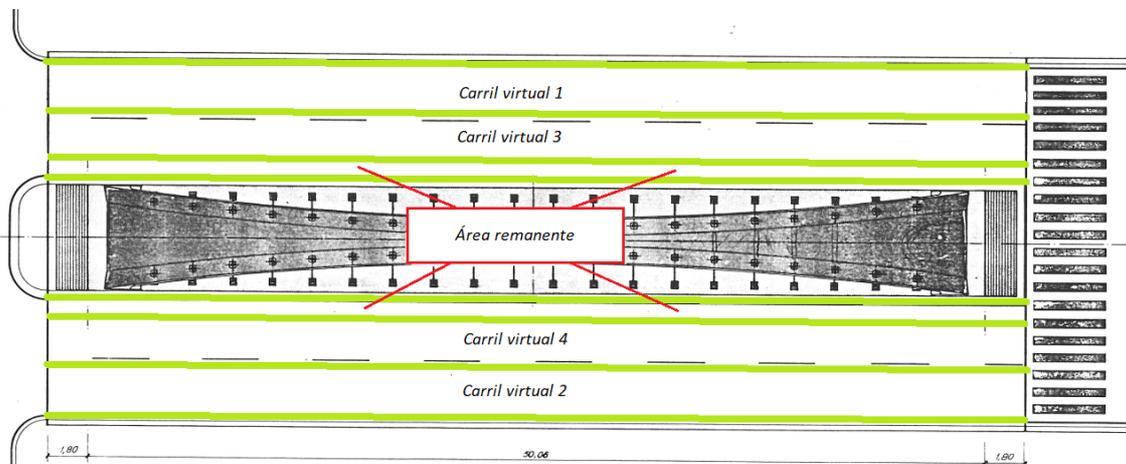


Ilustración 79: Distribución de carriles virtuales

Para el cálculo de la sobrecarga de uso repartida, hay que tener en cuenta lo indicado en la siguiente tabla.



TABLA 4.1-b VALOR CARACTERÍSTICO DE LA SOBRECARGA DE USO

SITUACIÓN	VEHÍCULO PESADO $2Q_{ik}$ [kN]	SOBRECARGA UNIFORME q_{ik} (ó q_{rk}) [kN/m ²]
Carril virtual 1	2 · 300	9,0
Carril virtual 2	2 · 200	2,5
Carril virtual 3	2 · 100	2,5
Otros carriles virtuales	0	2,5
Área remanente (q_{rk})	0	2,5

Ilustración 80: Tabla 4.1-b para el valor característico de la sobrecarga de uso según el carril virtual

Por lo que las sobrecargas para cada carril y el resultado final de todas ellas se muestra en la siguiente tabla.

Para los vehículos pesados, al tener 3 o más carriles virtuales, el resultado será una carga puntual de **1200 kN**.

	Vehículo pesado	Sobrecarga uniforme
Carril virtual 1	2 * 300 KN	9 KN/m ² * 3 m = 27 KN/ml
Carril virtual 2	2 * 200 KN	2,5 KN/m ² * 3 m = 7,5 KN/ml
Carril virtual 3	2 * 100 KN	2,5 KN/m ² * 3 m = 7,5 KN/ml
Carril virtual 4	0	2,5 KN/m ² * 3 m = 7,5 KN/ml
Área remanente	0	2,5 KN/m ² * 1 m = 2,5 KN/ml
TOTAL	1200 KN	52 KN/ml

Tabla 3: Valor de sobrecargas de uso

Para el caso de la sobrecarga uniforme de las aceras, se debe acudir al apartado 4.1.2.2 de la Instrucción IAP-11. En la que se especifica lo siguiente:

4.1.2.2 Cargas verticales en zonas de uso peatonal

En las zonas de uso peatonal de los puentes (aceras, rampas y escaleras), se supondrá aplicada una sobrecarga uniforme de 5 kN/m² en las zonas más desfavorables, longitudinal y transversalmente, para el efecto en estudio.

Ilustración 81: Sobrecarga de uso distribuida para aceras.

Por lo tanto, se aplicarán esos 5 KN/m² al total del área de las aceras.

El ancho de aceras viene definido en la siguiente Ilustración.

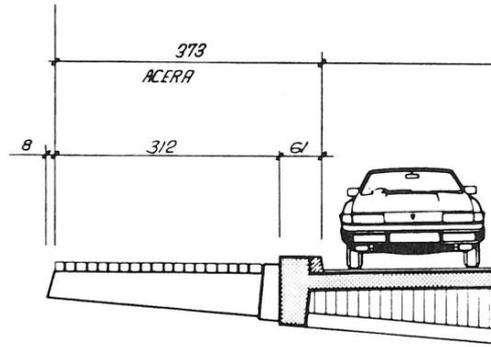


Ilustración 82: Dimensiones de ancho de acera

Por lo tanto, la carga por metro lineal correspondiente a las aceras será:

$$5 \text{ KN/m}^2 * 3,73 \text{ m} * 2 = 37,3 \text{ KN/ml}$$

Por lo que, la sobrecarga de uso total teniendo en cuenta tanto la influencia de la carga uniforme de los carriles virtuales y las áreas remanentes, sería $37,3 \text{ KN/ml} + 52 \text{ KN/ml} = 89,3 \text{ KN/ml}$.

6.1.4 Sobrecarga de Nieve

Para la sobrecarga de nieve, debe adquirirse el valor representado en la siguiente Ilustración. Ya que el puente se ubica en Pamplona y la carga repartida está tabulada, se hará uso de ella.

CAPITAL	ALTITUD [m]	s_s [kN/m ²]	CAPITAL	ALTITUD [m]	s_s [kN/m ²]	CAPITAL	ALTITUD [m]	s_s [kN/m ²]
Albacete	690	0,6	Guadalajara	680	0,6	Pontevedra	0	0,3
Alicante	0	0,2	Huelva	0	0,2	Salamanca	780	0,5
Almería	0	0,2	Huesca	470	0,7	San Sebastián	0	0,3
Ávila	1130	1,0	Jaén	570	0,4	Santander	0	0,3
Badajoz	180	0,2	León	820	1,2	Segovia	1000	0,7
Barcelona	0	0,4	Lleida	150	0,5	Sevilla	10	0,2
Bilbao	0	0,3	Logroño	380	0,6	Soria	1090	0,9
Burgos	860	0,6	Lugo	470	0,7	Tarragona	0	0,4
Cáceres	440	0,4	Madrid	660	0,6	Tenerife	0	0,2
Cádiz	0	0,2	Málaga	0	0,2	Teruel	950	0,9
Castellón	0	0,2	Murcia	40	0,2	Toledo	550	0,5
Ciudad Real	640	0,6	Ourense	130	0,4	Valencia	0	0,2
Córdoba	100	0,2	Oviedo	230	0,5	Valladolid	690	0,4
A Coruña	0	0,3	Palencia	740	0,4	Vitoria	520	0,7
Cuenca	1010	1,0	Palma de Mallorca	0	0,2	Zamora	650	0,4
Girona	70	0,4	Palmas, Las	0	0,2	Zaragoza	210	0,5
Granada	690	0,5	Pamplona	450	0,7	Ceuta y Melilla	0	0,2

Ilustración 83: Sobrecarga de nieve sobre un terreno horizontal.



Antes de adoptar ese valor como válido, debe fijarse la atención en el apartado 4.4.2 en el que se define el valor de la sobrecarga de nieve sobre tableros como q_k y a su vez este mismo valor está relacionado con el extraído de la Ilustración 83.

$$q_k = 0,8 * s_k = 0,8 * 0,7 \text{ KN/m}^2 = 0,56 \text{ KN/m}^2$$

El ancho del tablero es de 27,68 metros por lo que la sobrecarga característica de nieve será:

$$0,56 \text{ KN/m}^2 * 27,68 \text{ m} = 15,5 \text{ KN/ml}$$

RESUMEN DE CARGAS

	Arranques del tablero	Centro del tablero
Peso propio	Calculado dentro de OOFEM	
Cargas muertas	130,60 KN/ml	99,06 KN/ml
Sobrecarga de uso	89,3 KN/ml	
Sobrecarga de nieve	15,5 KN/ml	
Vehículos pesados	1200 KN	
Diafragmas	130,55 KN	

Tabla 4: Resumen de cargas consideradas para el análisis.

Para el análisis del puente en estático, tanto las cargas distribuidas por metro lineal como las puntuales, no son combinables en sus valores característicos, ya que, se ha de realizar una combinación de las mismas teniendo en cuenta los valores de los coeficientes parciales de seguridad y los factores de simultaneidad definidos en la TABLA 6.2-b y TABLA 6.1-a respectivamente y para la combinación de acciones persistente.

6.3.1.1 En situación persistente o transitoria

La combinación de acciones se hará de acuerdo con la expresión siguiente (*combinación fundamental*):

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \sum_{m \geq 1} \gamma_{G,m} G_{k,m}^* + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$$

donde:

- $G_{k,j}$ valor característico de cada acción permanente
- $G_{k,m}^*$ valor característico de cada acción permanente de valor no constante
- $Q_{k,1}$ valor característico de la acción variable dominante
- $\psi_{0,i} Q_{k,i}$ valor de combinación de las acciones variables concomitantes con la acción variable dominante
- γ_G, γ_Q coeficientes parciales

Ilustración 84: Combinación de acciones en situación persistente o transitoria.



Para ello deberán realizarse tantas hipótesis o combinaciones como sea necesario, considerando en cada una de ellas, una de las acciones variables como dominante y el resto como concomitantes.

Existen enésimas hipótesis de carga, sin embargo, todas ellas se pueden resumir en dos más desfavorables para la estructura ya que tanto el peso propio como la carga muerta son acciones permanentes y de efecto desfavorable, por lo que el coeficiente de seguridad parcial a aplicar será 1,35 para ambas.

HIPÓTESIS DE CARGAS

Hipótesis 1 Sobrecarga de uso dominante y acción climática concomitante

Hipótesis 2 Sobrecarga de uso concomitante y acción climática dominante

Tabla 5: Hipótesis más desfavorables para el Puente de las Oblatas

De éstas dos hipótesis la más desfavorable es la Hipótesis N^o1.

Como resultado se obtienen las estas diferentes cargas ya amplificadas por el coeficiente de seguridad parcial aplicable a cada uno de ellas.

RESUMEN DE CARGAS

	Arranques del tablero	Centro del tablero
Peso propio	Calculado dentro de OOFEM * 13,24	
Cargas muertas	176,31 KN/ml	133,731 KN/ml
Sobrecarga de uso	120,56 KN/ml	
Sobrecarga de nieve	18,6 KN/ml	
Vehículos pesados	1620 KN	
Diafragmas	176, 24 KN	
TOTAL POR METRO	315, 47 KN/ml	272, 891 KN/ml

Tabla 6: Resumen de cargas. Combinación para la hipótesis n^o1.

El resultado de las cargas correspondientes a diafragmas se deberá posicionar en el modelo de cálculo, en los nodos en los que aparezca un diafragma en la estructura.

Para el tren de cargas, deberá de realizarse un análisis para hallar las envolventes de esfuerzos para cada una de las posiciones de la carga de vehículos pesados.

En este caso, las posiciones serán en los apoyos y cada cuarto de luz de tal manera que se analiza un punto intermedio entre el centro de luz y los apoyos, así como estos dos últimos.

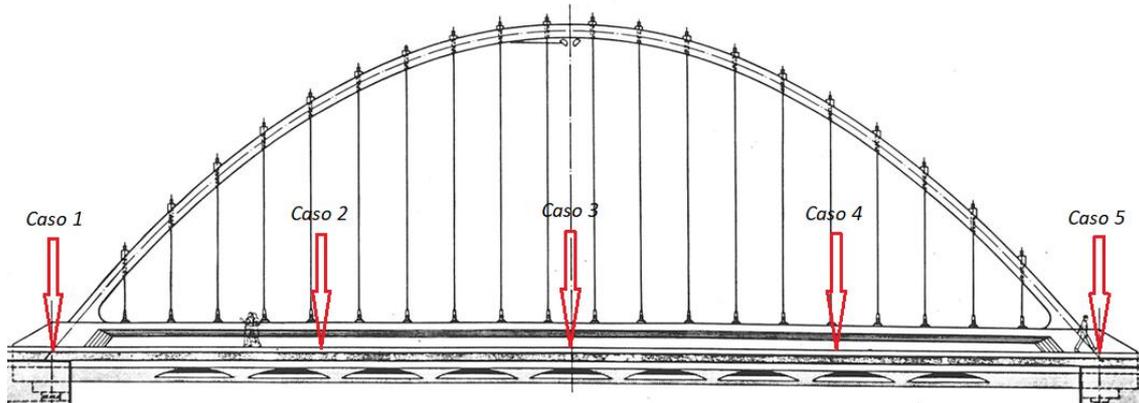


Ilustración 85: Posición de sobrecarga de uso para la determinación de las envolventes de esfuerzos en diferentes casos de análisis

En la siguiente ilustración se muestran las cargas referentes a los nervios transversales ubicadas en sus posiciones.

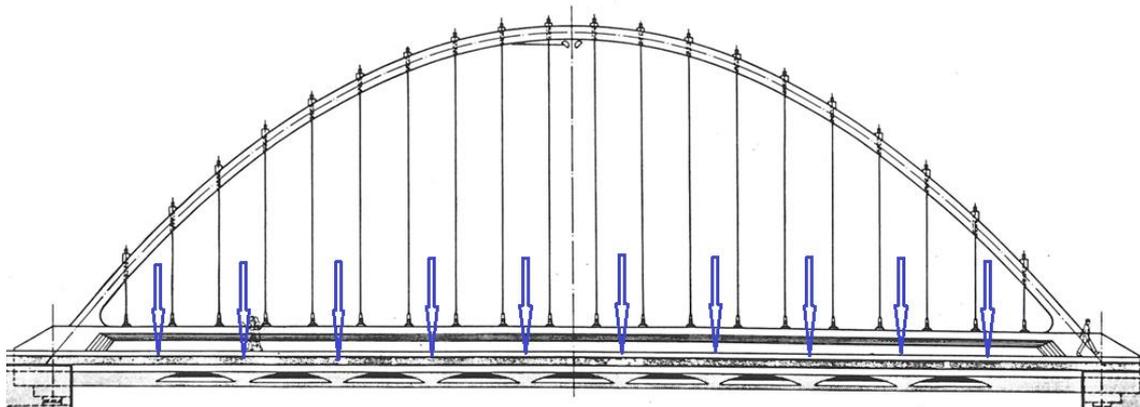


Ilustración 86: Cargas representativas de los diafragmas

6.2 EXTRACCIÓN DE RESULTADOS

Una vez calculadas las cargas a aplicar, se comienza el análisis de las hipótesis de carga.

Para comenzar, lo más importante es comprender cómo representa OOFEM los resultados y por qué es necesario un programa externo para el tratamiento de los mismos.

Como ya se ha explicado con anterioridad, el programa de cálculo opera mediante el símbolo del sistema. Por lo tanto, así como el archivo de entrada está definido por un .txt, el archivo de salida también tendrá el mismo formato, pero con diferente organización. Así pues, se organizará una hoja de cálculo de manera que ésta extraiga los valores de los esfuerzos y desplazamientos de la estructura del texto de salida de OOFEM y transformarlos en datos interpretables visualmente.

Cómo ejecutar los archivos para comenzar el cálculo viene definido en el propio manual de usuario de OOFEM. En la Ilustración 87 se muestra el apartado del manual de usuario para la entrada de datos en el que se explica cómo ejecutar un archivo de entrada.



1.1 Running the code

The program can be executed by typing `oofem [option [parameter]] ...` on the command line prompt with the following command line options:

-v	Prints oofem version.
-f string	path to oofem input file name, if not present, program interactively reads this parameter. When invoking the solver in parallel mode, only base name of input file should be specified, the partition name is appended automatically. On the other hand, the partition name is not appended to output file name, as specified in output file record (see section 2.1).
-r int	Restarts the analysis from given solution step. The corresponding context file (*.osf) must exist.
-rn	Turns on the equation renumbering. Default is off.
-ar int	Restarts the adaptive computation from given solution step. Requires the corresponding context file (*.osf) and domain input file (*.din) to exist. The domain input file describes the new mesh, its syntax is identical to syntax of input file, but it does not contain the output file record, job description record and analysis record.
-l int	Sets threshold for log messages (Errors=0, Warnings=1, Relevant=2, Info=3, Debug=4).
-go string	Redirect the standard output stream (stdout) to given file.
-qe string	Redirect standard error stream (stderr) to given file.
-c	Forces the creation of context file for each solution step.

Ilustración 87: OOFEM input manual. Ejecutar el código.

6.2.1 Problemática de extracción de datos

El principal problema de tener resultados en formato texto es que, para que los programas como Excel, con el que se van a organizar los datos de salida de los análisis, reconozcan esos resultados, debe pasarse del formato texto al de número.

Existen dos problemas con esto último, el primero, el texto de salida se organiza en Excel en una sola columna, por lo que los datos no están separados. El segundo, oofem trabaja con un sistema de numeración en el que se emplea el punto en lugar de la coma para separar decimales de números enteros, esto se puede solucionar modificando el separador decimal de coma a punto en Excel.

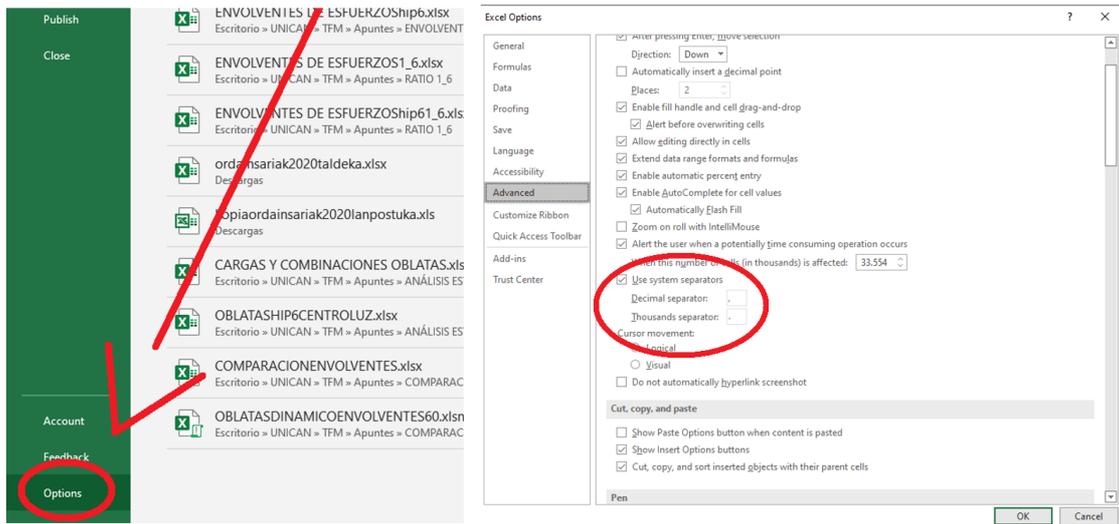


Ilustración 88: Cambio de separador de decimales mediante el uso de opciones avanzadas de Excel.

Sin embargo, no se optará por esta medida para el cambio de separador decimal, sino que se optará por la utilidad de "Buscar y reemplazar" de Excel mostrada en la siguiente Ilustración. Con ella simplemente se buscará el punto y se reemplazará por coma.



Si el archivo tiene una cantidad importante de datos en formato texto esta utilidad es más lenta que el simple hecho de cambiar el separador de decimales. Por lo contrario, en textos de salida como el del análisis estático es mucho más práctico el uso de "Buscar y reemplazar".

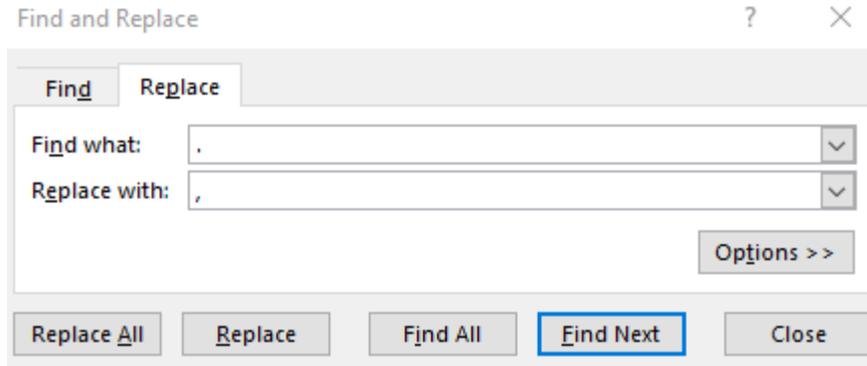


Ilustración 89: Utilidad para eliminar la problemática de diferente separador de decimales entre OOFEM y Excel

6.2.1.1 Formato de salida de OOFEM.

Antes de dar solución al primero de los obstáculos mencionado en el primer párrafo de este apartado, es importante conocer el formato de salida de OOFEM. En la Ilustración 90 se muestra el formato para la salida de desplazamientos de cada nodo e información sobre el análisis.

```

ctte.out: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
##### www.oofem.org ###
##### #
# # # # # # # #
# # # # # # # #
# # # # # # # #
# # # # # # # #
##### # #
# # # # # # # # OOFEM ver. 2.5
##### # # Copyright (C) 1994-2017 Borek Patzak
#####

Starting analysis on: Mon Jan 10 13:06:01 2022
PRUEBA DE DENSIDAD
=====
Output for time 1.0000000e+00
=====
Output for domain 1

DofManager output:
Node 1 ( 1):
dof 1 d 0.0000000e+00
dof 3 d 0.0000000e+00
dof 5 d 1.83426942e-02

```

----- Versión de OOFEM

----- Fecha de inicio del análisis

----- Descripción del análisis

----- Instante de tiempo del análisis

----- Dominio

----- Salida de grados de libertad

----- Valor de desplazamientos

Ilustración 90: OOFEM. Detalles del análisis y desglose de componentes que representan resultados en el fichero de salida del programa de cálculo para nodos.

Para conocer las tensiones, se debe acudir al segundo apartado del fichero, donde se puede ver:



Element output:	Salida de elementos
beam element 1 (1) :	Número de elemento
local displacements 0.0000e+00 0.0000e+00 1.8343e-02 0.0000e+00 -1.7994e-02 1.7316e-02	Desplazamientos y esfuerzos
local end forces 0.0000e+00 3.8504e+03 1.4140e-11 0.0000e+00 -3.0803e+03 -3.4654e+03	en los nodos extremos
GP 1.1 : strains 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00 -1.7423e-04 0.0000e+00 0.0000e+00 -4.2905e-24 0.0000e+00	
GP 1.2 : stresses 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00 -3.0478e+02 0.0000e+00 0.0000e+00 -3.4654e+03 0.0000e+00	
GP 1.3 : strains 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00 -6.9044e-04 0.0000e+00 0.0000e+00 -4.2905e-24 0.0000e+00	
GP 1.4 : stresses 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00 -1.2078e+03 0.0000e+00 0.0000e+00 -3.4654e+03 0.0000e+00	
GP 1.5 : strains 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00 -1.3639e-03 0.0000e+00 0.0000e+00 -4.2905e-24 0.0000e+00	
GP 1.6 : stresses 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00 -2.3859e+03 0.0000e+00 0.0000e+00 -3.4654e+03 0.0000e+00	
GP 1.7 : strains 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00 -1.8802e-03 0.0000e+00 0.0000e+00 -4.2905e-24 0.0000e+00	
GP 1.8 : stresses 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00 -3.2889e+03 0.0000e+00 0.0000e+00 -3.4654e+03 0.0000e+00	

Ilustración 91: OOFEM. Desglose de componentes que representan resultados en el fichero de salida del programa de cálculo para elementos.

En cuanto a los desplazamientos y esfuerzos, el programa los proporciona en los nodos extremos. Sin embargo, este no describe ni qué esfuerzo corresponde a qué valor ni tampoco qué desplazamiento corresponde a qué valor. OOFEM proporciona tanto para los desplazamientos como para los esfuerzos, seis valores. Los primeros tres corresponden a desplazamiento horizontal, desplazamiento vertical y giro respecto al eje Y. En cuanto a los tres siguientes valores, estos son los mismos valores, pero para el segundo nodo que compone la viga.

Para los esfuerzos, se corresponden con axil, cortante y momento flector, para ambos nodos.

6.2.2 Hoja de cálculo para extracción de resultados

Una vez pegado el texto-resultado del análisis y solucionado el inconveniente del formato de decimales, debe fabricar una herramienta que extraiga el texto de interés del total de texto de cada una de las celdas. Por ejemplo, además de los esfuerzos, el número de elemento o nodo puede ser de interés a la hora de organizar los resultados posteriormente.

Teniendo una celda con texto en su interior, una manera de cercar los datos de interés es buscar mediante el comando "Encontrar" los espacios vacíos entre los componentes del texto; el comando requiere de texto a buscar, texto inicial y posición inicial de búsqueda. El comando devuelve un número, que indica la posición del espacio en el texto. Para encontrar el siguiente espacio, simplemente se debe establecer como posición de salida para el siguiente "Encontrar" la posición del anterior espacio.

Es muy habitual que en el texto se encuentren diferentes espacios seguidos, Por lo que hay que encontrar el último espacio antes del siguiente elemento de texto dentro de la celda. Esto se consigue sumando a la posición del anterior espacio una cantidad de unidades necesarias para encontrar un espacio no contiguo al anterior.

En la Ilustración 92 se muestra un ejemplo de extracción de las componentes de un texto por separado.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1												
2		TEXTO DE EJEMPLO		=FIND(" ";\$B\$2;1)	10	11	19	TEXTO	DE			EJEMPLO
3				FIND(find_text; within_text; [start_num])								

Ilustración 92: Primer componente del ejemplo de extracción separación de componentes dentro de un texto a componentes independientes



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1												
2		TEXTO DE EJEMPLO		1	=FIND(" ";\$B\$2;D2+1)			19	TEXTO	DE		EJEMPLO

Ilustración 93: Segundo componente del ejemplo de separación de componentes dentro de un texto a componentes independientes

El primer comando “Encontrar” devuelve el número de la posición del espacio en blanco en la frase. El segundo, comienza la búsqueda donde el primero la terminó más una unidad, de lo contrario devolvería el mismo valor. Así sucesivamente.

En cuanto a extraer el texto, se utilizará el comando “Extraer” que extrae el texto ubicado entre las diferentes posiciones proporcionadas por los “Encontrar” anteriores.

En el caso de la celda K2 en la Ilustración 93, se encuentra en blanco ya que entre “DE” y “EJEMPLO”, existen dos espacios en blanco. Para evitar celdas en vacías, en estos casos se suma más de una unidad en el comando correspondiente a la búsqueda de G2 en la Ilustración 92. De esa manera:

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1											
2		TEXTO DE EJEMPLO		1	7	10	19		TEXTO	DE	EJEMPLO

Ilustración 94: Extracción de texto sin generar celdas en blanco debido a espacios excesivos en el texto de origen.

Los resultados derivados del fichero de salida de OOFEM, no son más que texto, por lo que se puede proceder de igual forma. Los valores de interés en este caso serán los esfuerzos y desplazamientos, que, aunque tienen apariencia de número, Excel los considera texto, por lo que no será posible realizar ninguna operación con ellos en la celda de extracción. Estos datos se almacenarán en tablas donde se relacionará el número de elemento con los nodos asociados al mismo.

Es importante considerar, que, aunque el output de OOFEM proporcione nodos i y j, si se construyen las tablas de manera adecuada, ordenando los nodos de acuerdo con la numeración asignada a la hora de construir el modelo paramétrico en Grasshopper, desplazamientos del nodo j de un elemento, serán los mismos que los del nodo i del elemento contiguo, por lo que en realidad, únicamente podría tenerse en cuenta el nodo i de los elementos, y considerarse el nodo j del último elemento tanto del arco como del tablero ya que estos no tienen elementos contiguos en una de las direcciones para el caso de desplazamientos.

Para los esfuerzos, se calcula una media entre el nodo j del elemento J y el nodo i del elemento J+1. De esa manera, se obtienen los esfuerzos medios, ya que un elemento y otro no tienen mismos esfuerzos para el mismo nodo; son similares, pero de signo contrario.

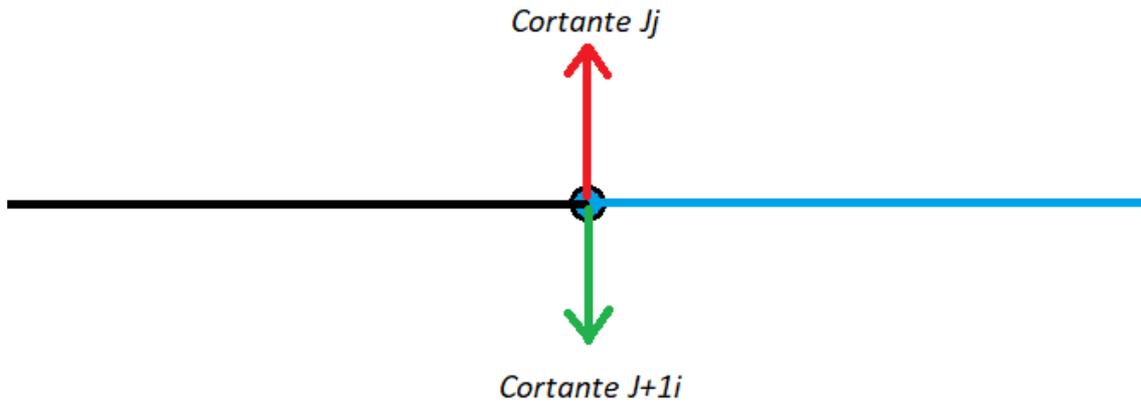


Ilustración 95: Representación de cortantes provenientes de diferentes elementos para un mismo nodo

El resultado se organiza en tablas atendiendo al orden de los nodos para el tablero y para el arco. En la Ilustración 96 se muestra una tabla tipo de resultados para los esfuerzos de estudio.

ESFUERZOS PUENTE ARCO DE LAS OBLATAS									
TABLERO				ARCO					
X (m)	Y (m)	Axil (KN)	Cortante (KN)	Momentos(KNm)	X (m)	Y (m)	Axil (KN)	Cortante (KN)	Momentos(KNm)
0	0	-10209,00	2007,80	-1035,00	0	0	15616,00	-234,19	1053,80
1,405	0	-9758,40	1334,90	1313,30	1,405	1,690969	15554,00	-61,61	267,29
2,53	0	-9908,50	796,07	2511,90	2,53	2,974545	15727,00	122,90	-1,07
3,655	0	-10059,00	961,69	3104,40	3,655	4,195507	15175,00	-34,96	69,59
4,78	0	-10067,00	277,56	3868,80	4,78	5,353855	15171,00	205,78	-112,21
5,905	0	-10604,00	694,96	3917,60	5,905	6,449589	14520,00	-80,58	102,73
7,03	0	-10470,00	226,60	4436,00	7,03	7,482709	14560,00	263,30	-121,20
8,155	0	-10202,00	703,99	4427,40	8,155	8,453216	13895,00	-125,51	177,40
9,28	0	-10336,00	92,02	4956,00	9,28	9,36111	13864,00	235,63	-83,66
10,405	0	-10202,00	630,51	4796,10	10,405	10,20639	13254,00	-184,64	186,62
11,53	0	-10470,00	162,15	5241,90	11,53	10,98906	13280,00	224,31	-118,60
12,655	0	-10067,00	762,35	5160,90	12,655	11,70911	12682,00	-170,43	129,64
13,78	0	-10067,00	150,39	5755,10	13,78	12,36655	12710,00	287,21	-145,31
14,905	0	-10336,00	774,13	5660,80	14,905	12,96138	12178,00	-201,09	172,66
16,03	0	-10202,00	305,77	6268,30	16,03	13,49359	12201,00	290,23	-114,65
17,155	0	-10067,00	941,35	6348,80	17,155	13,9632	11866,00	-223,80	195,03
18,28	0	-10336,00	329,38	7144,40	18,28	14,37018	11904,00	301,39	-112,37
19,405	0	-10202,00	983,42	7251,50	19,405	14,71456	11616,00	-241,35	204,45
20,53	0	-10202,00	515,06	8094,40	20,53	14,99632	11663,00	301,36	-108,06
21,655	0	-10202,00	1190,30	8410,30	21,655	15,21547	11433,00	-250,21	207,89
22,78	0	-10336,00	578,34	9486,00	22,78	15,372	11371,00	324,26	-105,52
23,905	0	-10202,00	1268,70	9873,10	23,905	15,46592	11393,00	-259,16	229,92
25,03	0	-10336,00	800,33	11037,00	25,03	15,49723	11393,00	319,73	-91,21
26,155	0	-10470,00	-122,21	11674,00	26,155	15,46592	11452,00	-260,73	237,91
27,28	0	-10336,00	-734,18	11273,00	27,28	15,372	11433,00	316,36	-88,67
28,405	0	-10336,00	-42,69	10184,00	28,405	15,21547	11552,00	-265,23	236,05
29,53	0	-10336,00	-511,05	9872,10	29,53	14,99632	11588,00	304,16	-102,07
30,655	0	-10067,00	167,67	9033,70	30,655	14,71456	11904,00	-251,90	214,47
31,78	0	-10336,00	-444,30	8958,80	31,78	14,37018	11925,00	282,49	-116,71
32,905	0	-10202,00	208,24	8195,50	32,905	13,9632	12356,00	-210,99	179,44
34,03	0	-10336,00	-260,13	8166,40	34,03	13,49359	12434,00	280,96	-106,94
35,155	0	-10336,00	338,69	7610,30	35,155	12,96138	12877,00	-177,55	199,43
36,28	0	-10202,00	-273,28	7727,80	36,28	12,36655	12925,00	277,00	-76,17
37,405	0	-10336,00	265,30	7156,90	37,405	11,70911	13462,00	-199,84	229,61
38,53	0	-10067,00	-203,06	7191,90	38,53	10,98906	13407,00	249,70	-88,90
39,655	0	-10202,00	289,58	6700,00	39,655	10,20639	13945,00	-146,51	189,27
40,78	0	-10202,00	-322,38	6762,40	40,78	9,36111	13937,00	227,49	-74,16
41,905	0	-10202,00	115,62	6136,20	41,905	8,453216	14515,00	-129,04	180,95
43,03	0	-10202,00	-352,75	6002,80	43,03	7,482709	14497,00	222,98	-95,86
44,155	0	-10067,00	-1,14	5342,50	44,155	6,449589	15071,00	-81,72	158,68
45,28	0	-9908,50	-613,08	5073,50	45,28	5,353855	15042,00	178,06	-72,22
46,405	0	-10059,00	-521,09	4082,50	46,405	4,195507	15502,00	11,77	105,70
47,53	0	-9758,40	-1060,00	3194,70	47,53	2,974545	15494,00	241,44	10,34
48,655	0	-10059,00	-2223,40	989,71	48,655	1,690969	15552,00	450,02	274,28
50,06	0	0,00	0,00	0,00	50,06	0	0,00	0,00	0,00

Ilustración 96: Ejemplo de tabla resumen de resultados para una hipótesis cualquiera.

El objetivo será calcular el valor de los esfuerzos para todas las hipótesis y posteriormente generar las envolventes derivadas del análisis.



6.3 RESULTADOS

En este apartado se expondrán las diferentes leyes de esfuerzos resultantes del cálculo del análisis de las 5 diferentes posiciones de la carga viva. En las siguientes ilustraciones y tablas se muestran tanto los esfuerzos a lo largo de todo el puente como en centro de luz, clave del arco y apoyos.

6.3.1 Análisis estático: Hipótesis 1. Vehículo pesado en apoyo 1.

Se presentan los resultados derivados del análisis del Caso 1 de posición de carga de vehículo pesado, mostrado en la Ilustración 97.

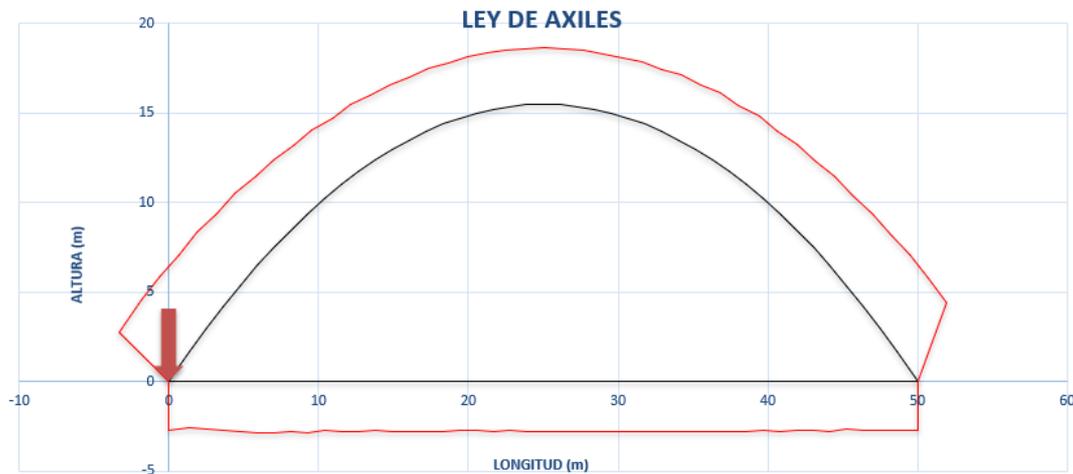


Ilustración 97: Ley de axiles. Hipótesis 1. $f=15,7m$. Escala: $1m/3.333 KN$

Para los puntos singulares como los mencionados se registran las siguientes cargas.

RESUMEN DE AXILES

Apoyo 1	$-9.157,90 KN$
Centro de luz tablero	$-9.127,80 KN$
Clave del arco	$10.453,00 KN$
Arranque arco	$14.243,00 KN$

Tabla 7: Resumen de axiles para los puntos más singulares del arco. Hipótesis n°1 de combinación de acciones. $f=15,7m$.



Ilustración 98: Ley de cortantes. Hipótesis 1. $f=15,7m$. Escala: $1m/500 KN$

RESUMEN DE CORTANTES

Apoyo 1	2.298,70 KN
Centro de luz tablero	-80,07 KN
Clave del arco	287,94 KN
Arranque arco	383,27 KN

Tabla 8: Resumen de cortantes para los puntos más singulares del arco. Hipótesis nº1 de combinación de acciones. $f=15,7m$.

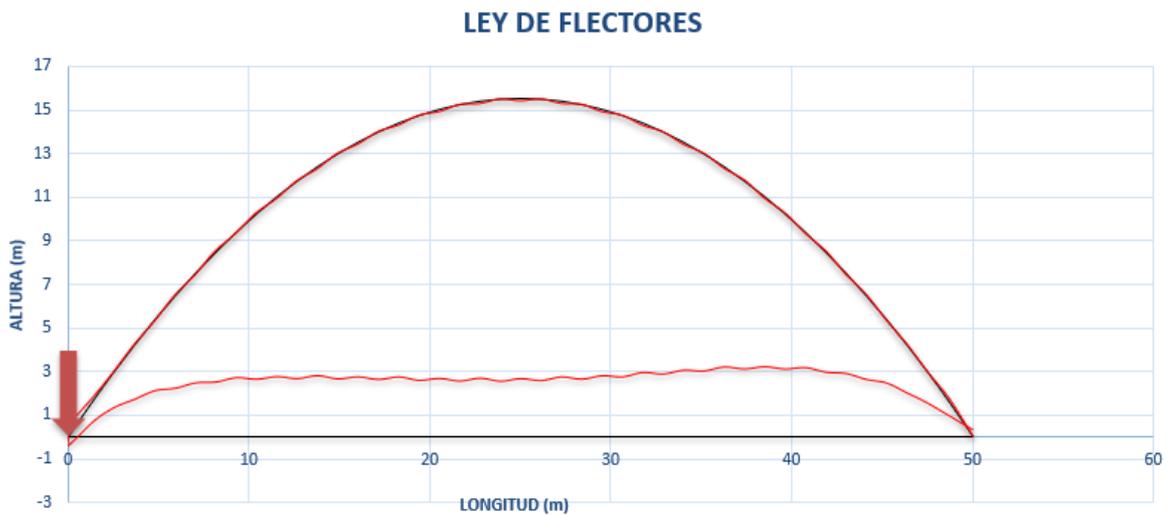


Ilustración 99: Ley de flectores. Hipótesis 1. $f=15,7m$. Escala: $1m/2.500 KN.m$

**RESUMEN DE FLECTORES**

Apoyo	0 KN.m
Centro de luz tablero	$6.714,14 \text{ KN.m}$
Clave del arco	$-121,55 \text{ KN.m}$
Arranque arco	$899,60 \text{ KN.m}$

Tabla 9: Resumen de flectores para los puntos más singulares del arco. Hipótesis n°1 de combinación de acciones. $f=15,7\text{m}$

Como se puede observar en la Ilustración 97, los resultados representan el funcionamiento claro del puente arco cuyo arco apoya en los estribos. Este tipo de puente tiene un funcionamiento básico que consiste en conducir los esfuerzos de manera que la resultante de fuerzas, coincida con la directriz del arco. Esto hace que, en condiciones ideales, el arco trabaje únicamente por compresión simple.

6.3.1.1 Conceptos sobre la antifunicularidad

Para comprender el porqué del funcionamiento de un arco, es necesario comprender el concepto de antifunicularidad de una estructura.

Para cada conjunto de cargas existe una forma concreta del arco en este caso para la que únicamente trabaja a compresión simple. La palabra antifunicular deriva de la palabra funicular, que se refiere a los cables suspendidos por los extremos, que trabajan a tracción, por lo que el término antifunicular se refiere a la forma simétrica de estos y trabajo igual solo que a compresión.

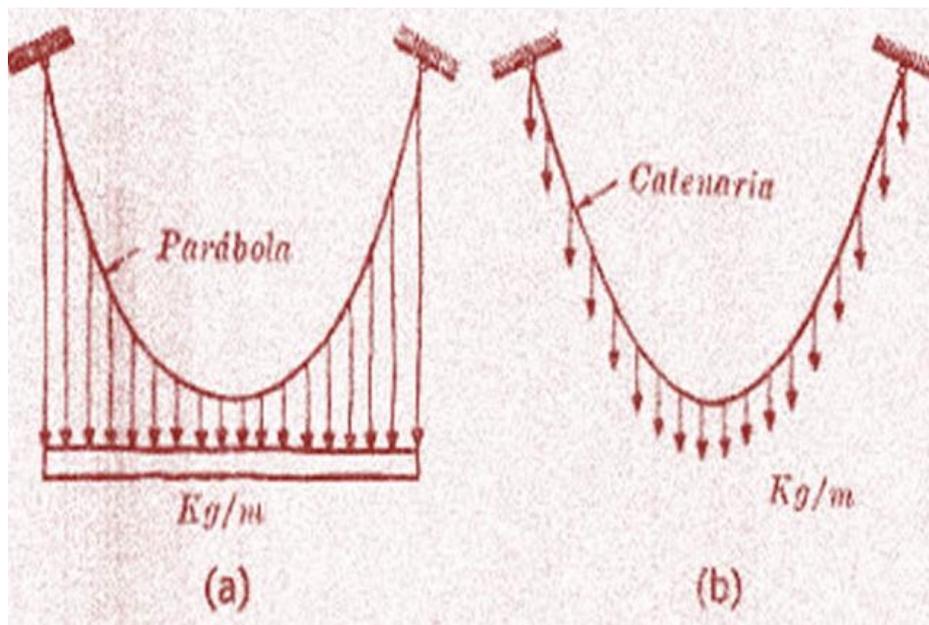


Ilustración 100: Diferencias de función funicular para carga uniforme (a) y peso propio (b) Fuente: (1)



En cuanto a las geometrías según el conjunto de cargas, para un arco que soporta únicamente su peso propio y de espesor constante, la directriz forma una catenaria, que precisamente es la forma que adquiere un cable bajo su peso propio, pero invertida.



Ilustración 101: Reproducción de la maqueta funicular de la iglesia de la colonia Güell usada por Gaudí expuesta en el Museo del Templo de la Sagrada Familia

Sin embargo, el caso del puente introduce una carga uniformemente distribuida perteneciente a la gravitación del tablero. Esta acción, modifica la geometría funicular a una parábola (ver Ilustración 101). Es por ello que, como se ha demostrado en la Ilustración 30, el arco tiene directriz parabólica.

Sin embargo, las estructuras están sometidas a diferentes estados de carga, no siempre coincidente con el estado funicular, por lo que la estructura también estará sometida a los demás esfuerzos (flector, axil...).

Físicamente la funicularidad representa que el incremento de inclinación de la tangente de la estructura es igual que el incremento de la tangente de la fuerza. En la Ilustración 103 se deduce la expresión que describe la frase anterior mediante un ejemplo de un arco sometido a una carga uniformemente distribuida en su longitud.

La variación de la tangente del arco viene definida por la diferencia entre las tangentes de los ángulos α_1 y α_2 .

α_1 y α_2 en la sección b. de la Ilustración 103 se definen como la tangente del arco en x_1 y x_2 respectivamente. La variación de la tangente por lo tanto será la diferencia entre esas dos. Que se corresponde con y'' para dx .

En la sección c. se calcula la variación de la resultante por acción de una carga uniformemente repartida externa que afecta al arco. Para una distancia dx en el eje x , la tangente de α_1 es la componente vertical de la carga partido la componente horizontal. Sin embargo, para α_2 , la componente vertical cambiará por efecto de una carga igual a $P \cdot dx$. Por lo que la variación de tangente resulta: $\Delta tg \alpha_1 = P \cdot \frac{dx}{H}$.



Como se puede deducir, como para que la estructura sea antifunicular de cargas tanto la variación de tangente en la directriz de la estructura como la variación de la tangente de la carga debe ser igual, se establece una relación para que la estructura sea antifunicular:

$$y'' = P/H$$

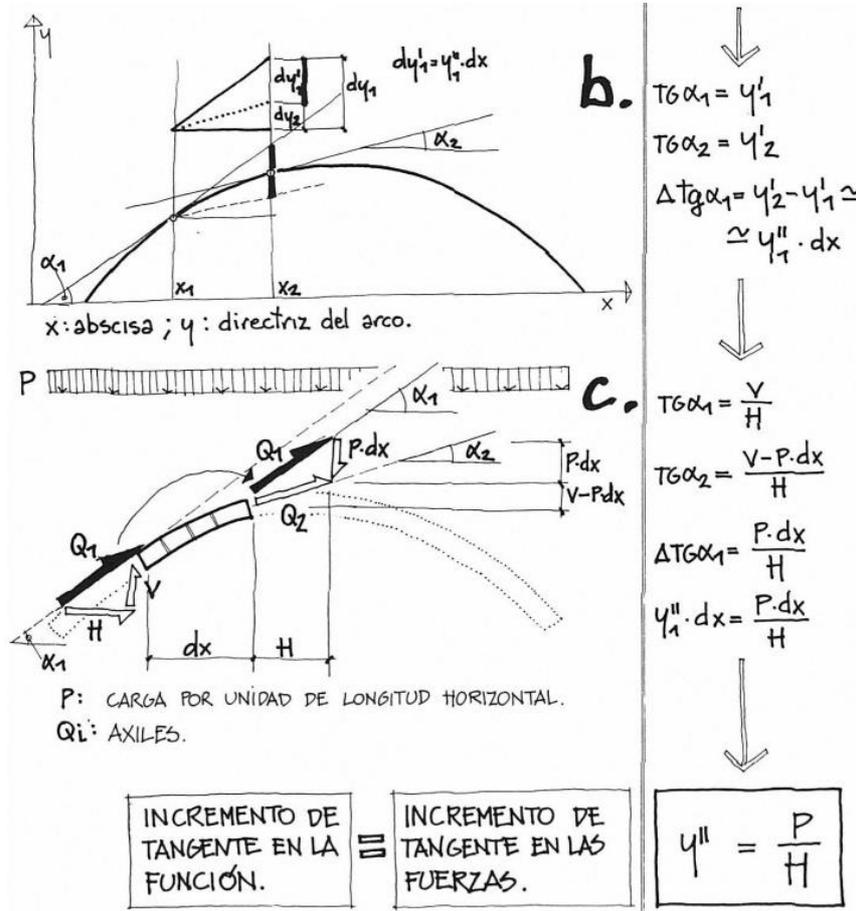


Ilustración 102: Deducción de relación entre incremento de la tangente de la función que define el arco con el incremento de la tangente de las fuerzas. Fuente: (2)

En el caso del puente de oblatas, la acción que hace que la componente vertical de la carga varíe es la carga del tablero transmitida a través de las péndolas.

6.3.2 Análisis estático: Hipótesis 1. Vehículo pesado en cuarto de luz 1.

Se presentan los resultados derivados del análisis del Caso 1 de posición de carga de vehículo pesado, mostrado en la Ilustración 104.

Una vez entendido el funcionamiento del arco y el porqué de la función parabólica para definir su directriz, se mostrarán los resultados para las diferentes posiciones de sobrecarga de uso para el vehículo pesado.

Los resultados para la posición de carga en el primer cuarto de luz son de:

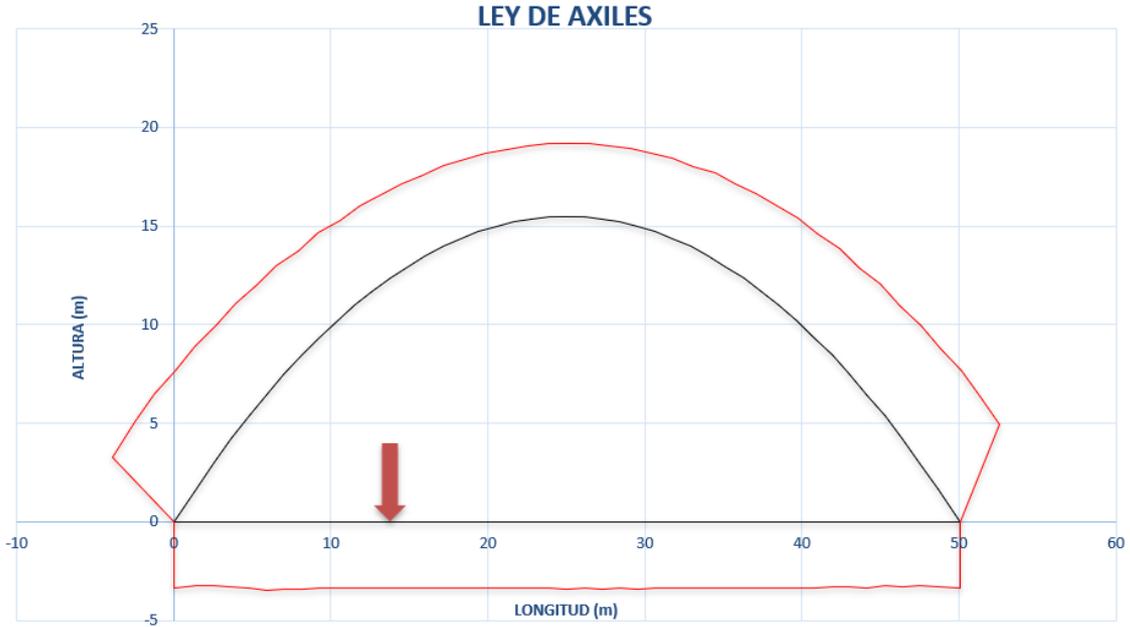


Ilustración 103: Ley de axiles. Hipótesis 1. Carga en cuarto de luz 1. $f=15,7m$. Escala: $1m/3.333 KN$

RESUMEN DE AXILES

Apoyo 1	-11.110,00 KN
Centro de luz tablero	-11.410,00 KN
Clave del arco	12.307,00 KN
Arranque arco	17.053,00 KN

Tabla 10: Resumen de axiles para los puntos más singulares del arco. Hipótesis nº1. Carga en cuarto de luz 1. $f=15,7m$.

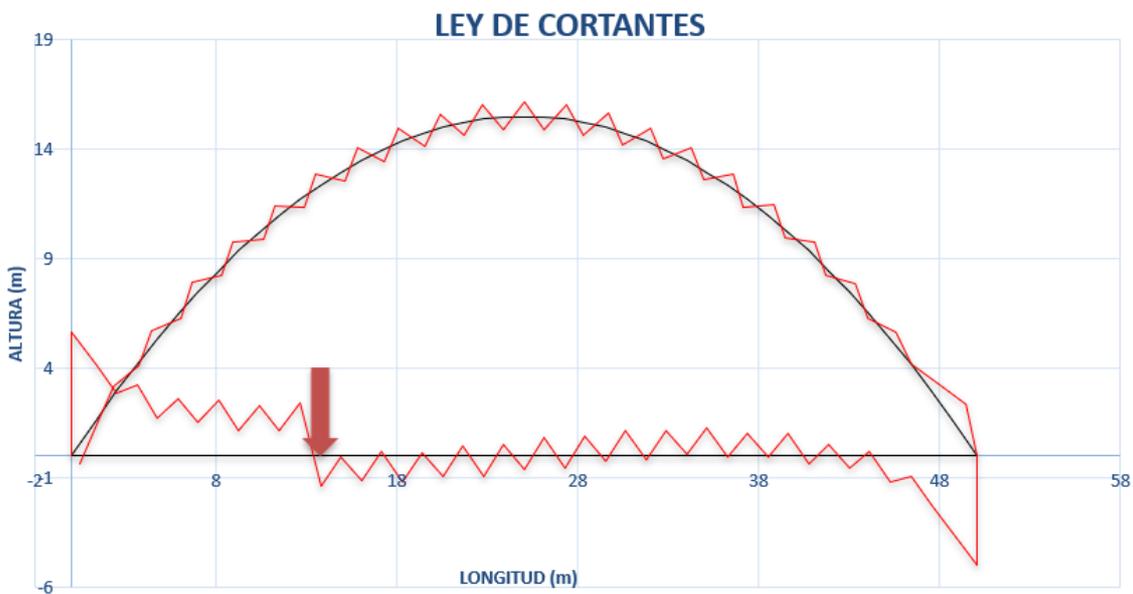


Ilustración 104: Ley de cortantes. Hipótesis 1. Carga en cuarto de luz 1 para $f=15,7m$. Escala: $1m/500 KN$

**RESUMEN DE CORTANTES**

Apoyo 1	2.837,40 KN
Centro de luz tablero	-299,03 KN
Clave del arco	339,27 KN
Arranque arco	506,51 KN

Tabla 11: Resumen de cortantes para los puntos más singulares del arco. Hipótesis nº1. Carga en cuarto de luz 1. $f=15,7m$.

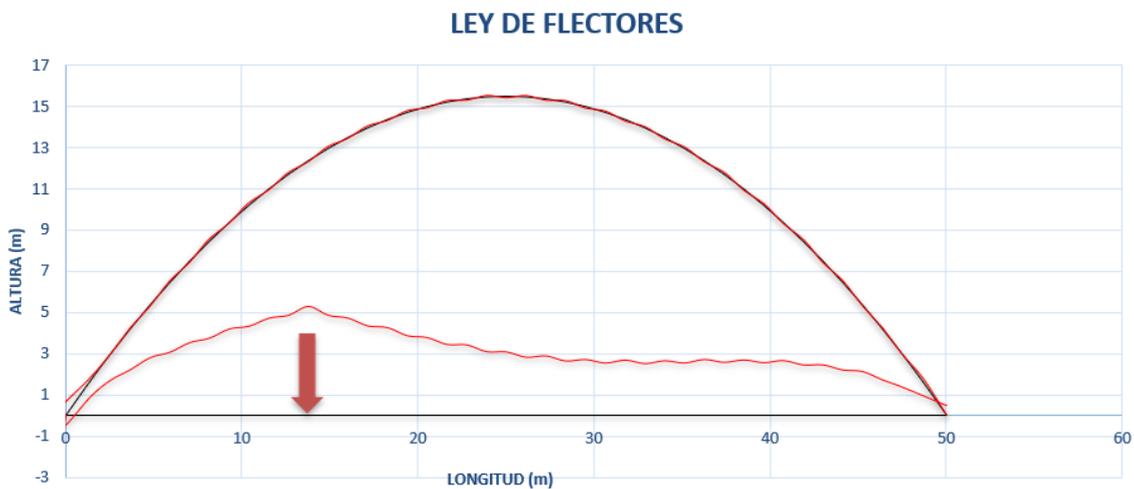


Ilustración 105: Ley de flectores. Hipótesis 1. Carga en cuarto de luz 1 para $f=15,7m$. Escala: $1m/2.500 KN.m$

RESUMEN DE FLECTORES

Apoyo	0 KN.m
Centro de luz tablero	7.671,20 KN.m
Clave del arco	-147,18 KN.m
Arranque arco	1.204,80 KN.m

Tabla 12: Resumen de flectores para los puntos más singulares del arco. Hipótesis nº1. Carga en cuarto de luz 1. $f=15,7m$.

Con respecto a la posición en los apoyos, se puede apreciar que tanto los esfuerzos axiales como el momento en centro de luz ha aumentado considerablemente, esto debido a el funcionamiento del arco ya que la carga ubicada en el apoyo 1 no inducía ningún tipo de momento ni axil adicional.



6.3.3 Análisis estático: Hipótesis 1. Vehículo pesado en centro de luz.

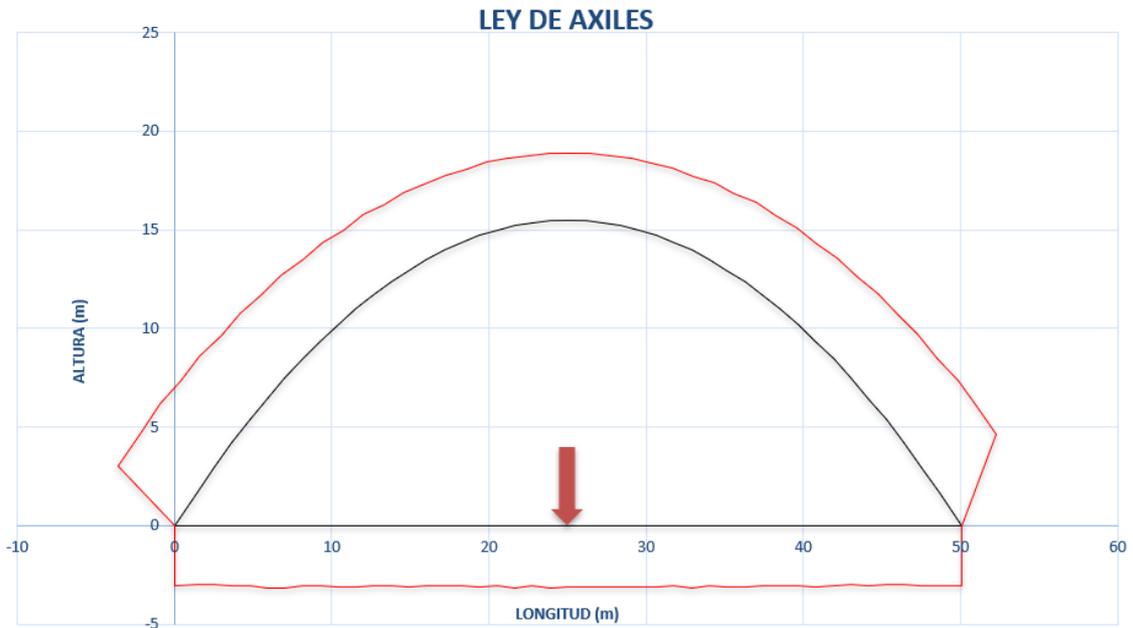


Ilustración 106: Ley de axiles. Hipótesis 1. Carga en centro de luz. $f=15,7m$. Escala: $1m/3.333 KN$

RESUMEN DE AXILES

Apoyo 1	-10.059,00 KN
Centro de luz tablero	-10.336,00 KN
Clave del arco	11.367,00 KN
Arranque arco	15.648,00 KN

Tabla 13: Resumen de axiles para los puntos más singulares del arco. Hipótesis nº1. Carga en centro de luz para $f=15,7m$.

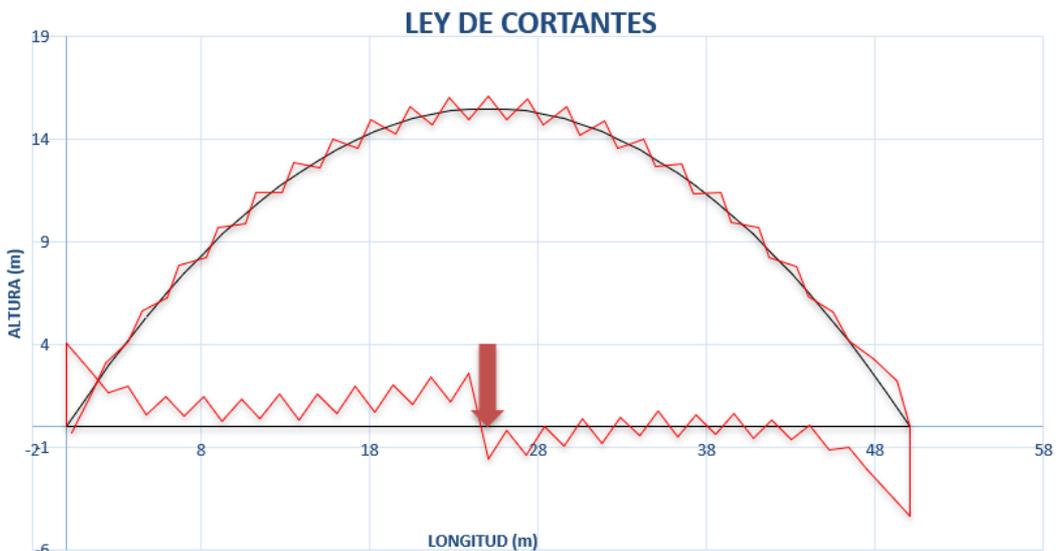


Ilustración 107: Ley de cortantes. Hipótesis 1. Carga en centro de luz para $f=15,7m$. Escala: $1m/500 KN$



RESUMEN DE CORTANTES

Apoyo 1	2.041,10 KN
Centro de luz tablero	-779,05 KN
Clave del arco	316,29 KN
Arranque arco	445,76 KN

Tabla 14: Resumen de cortantes para los puntos más singulares del arco. Hipótesis n°1. Carga en centro de luz. $f=15,7m$.

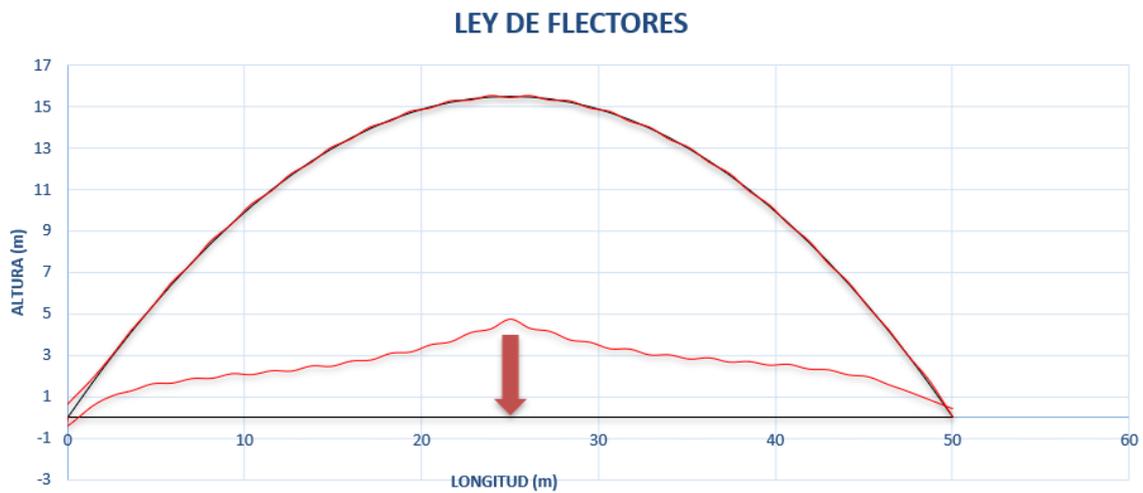


Ilustración 108: Ley de flectores. Hipótesis 1. Carga en centro de luz para $f=15,7m$. Escala: $1m/2.500 KN.m$

RESUMEN DE FLECTORES

Apoyo	0 KN.m
Centro de luz tablero	11.908,00 KN.m
Clave del arco	-89,44 KN.m
Arranque arco	1.502,70 KN.m

Tabla 15: Resumen de flectores para los puntos más singulares del arco. Hipótesis n°1. Carga en centro de luz. $f=15,7m$.



6.3.4 Análisis estático: Hipótesis 1. Vehículo pesado en cuarto de luz 2.

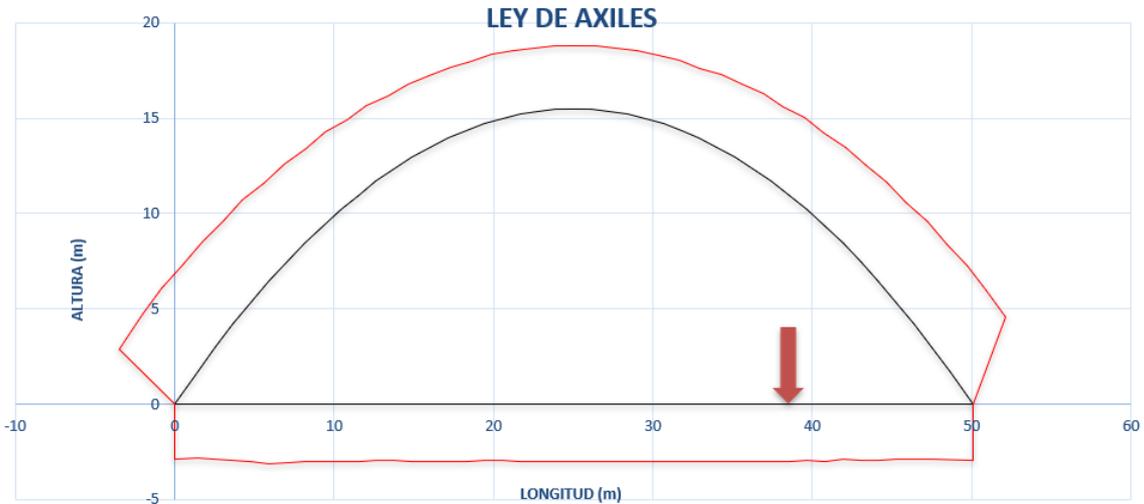


Ilustración 109: Ley de axiles. Hipótesis 1. Carga en cuarto de luz. $f=15,7m$. Escala: $1m/3.333 KN$

RESUMEN DE AXILES

Apoyo 1	-9.608,30 KN
Centro de luz tablero	-9.933,20KN
Clave del arco	11.044,00 KN
Arranque arco	15.137,00 KN

Tabla 16: Resumen de axiles para los puntos más singulares del arco. Hipótesis nº1. Carga en cuarto de luz 2 para $f=15,7m$.

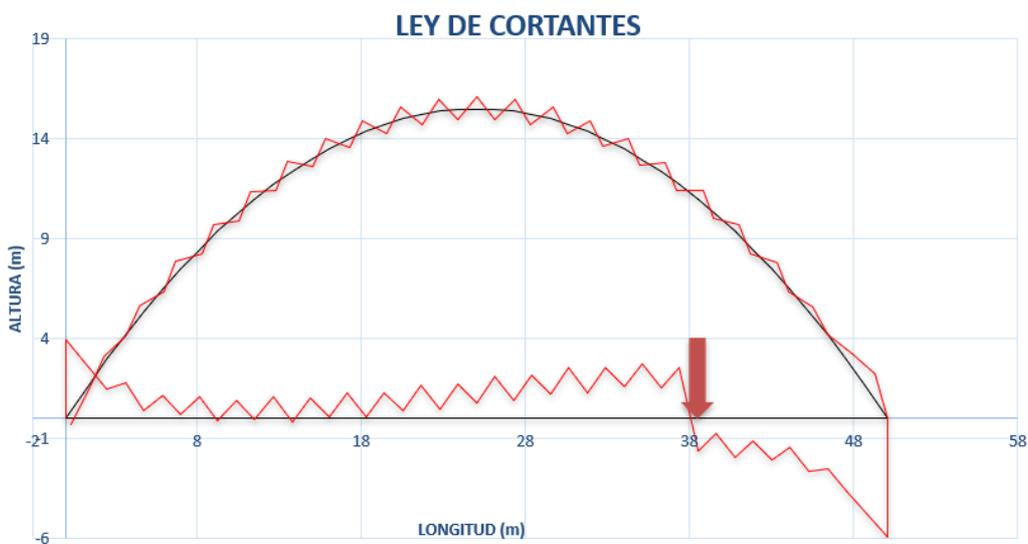


Ilustración 110: Ley de cortantes. Hipótesis 1. Carga en cuarto de luz 2 para $f=15,7m$. Escala: $1m/500 KN$

**RESUMEN DE CORTANTES**

Apoyo 1	1.961,60 <i>KN</i>
Centro de luz tablero	399,50 <i>KN</i>
Clave del arco	311,75 <i>KN</i>
Arranque arco	421,77 <i>KN</i>

Tabla 17: Resumen de cortantes para los puntos más singulares del arco. Hipótesis nº1. Carga en cuarto de luz 2. $f=15,7m$.

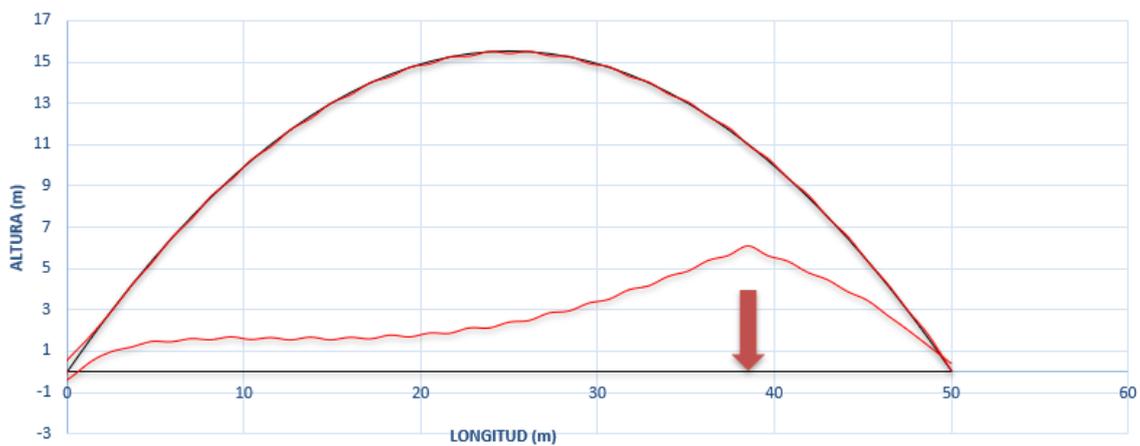
LEY DE FLECTORES

Ilustración 111: Ley de flectores. Hipótesis 1. Carga en cuarto de luz 2 para $f=15,7m$. Escala: $1m/2.500 KN.m$

RESUMEN DE FLECTORES

Apoyo	0 <i>KN.m</i>
Centro de luz tablero	6013,90 <i>KN.m</i>
Clave del arco	-141,81 <i>KN.m</i>
Arranque arco	1003,00 <i>KN.m</i>

Tabla 18: Resumen de flectores para los puntos más singulares del arco. Hipótesis nº1. Carga en cuarto de luz 2. $f=15,7m$.



6.3.5 Análisis estático: Hipótesis 1. Vehículo pesado en apoyo 2

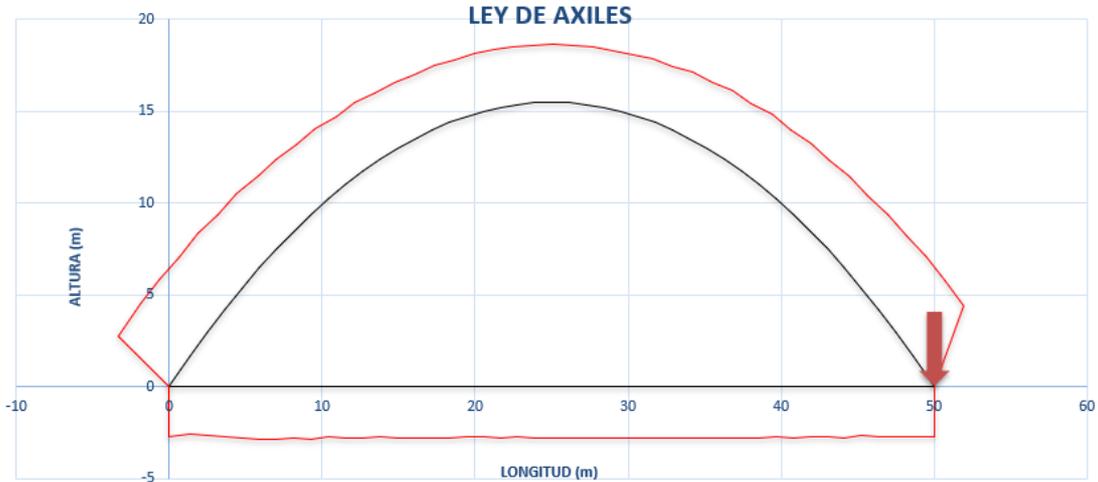


Ilustración 112: Ley de axiles. Hipótesis 1. Carga en apoyo 2. $f=15,7m$. Escala: $1m/3.333 KN$

RESUMEN DE AXILES

Apoyo 1	$-9.608,30 KN$
Centro de luz tablero	$-9.933,20KN$
Clave del arco	$11.044,00 KN$
Arranque arco	$15.137,00 KN$

Tabla 19: Resumen de axiles para los puntos más singulares del arco. Hipótesis n°1. Carga en apoyo 2 para $f=15,7m$.

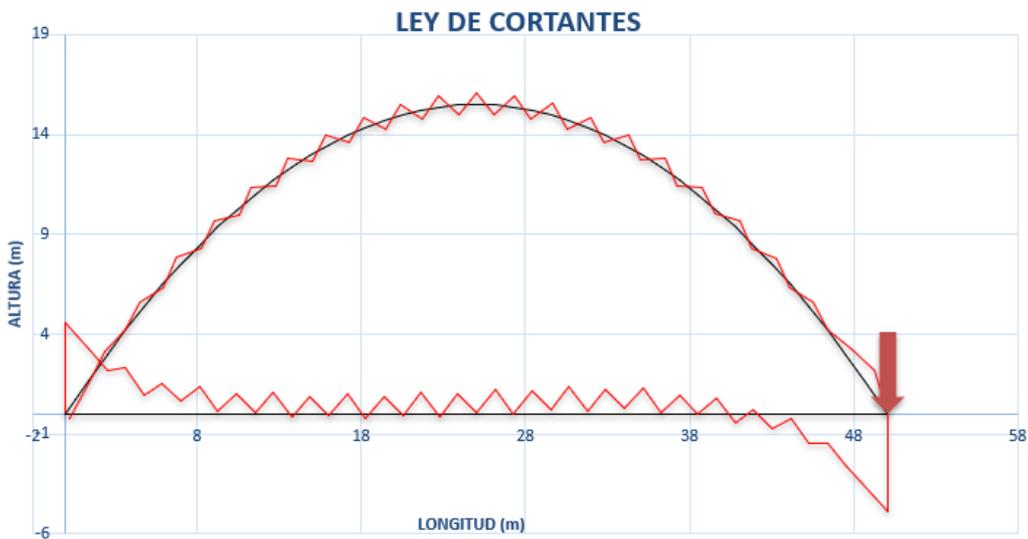


Ilustración 113: Ley de cortantes. Hipótesis 1. Carga en apoyo 2 para $f=15,7m$. Escala: $1m/500 KN$

**RESUMEN DE CORTANTES**

Apoyo 1	1.961,60 KN
Centro de luz tablero	399,50 KN
Clave del arco	311,75 KN
Arranque arco	421,77 KN

Tabla 20: Resumen de cortantes para los puntos más singulares del arco. Hipótesis nº1. Carga en apoyo 2. $f=15,7m$.

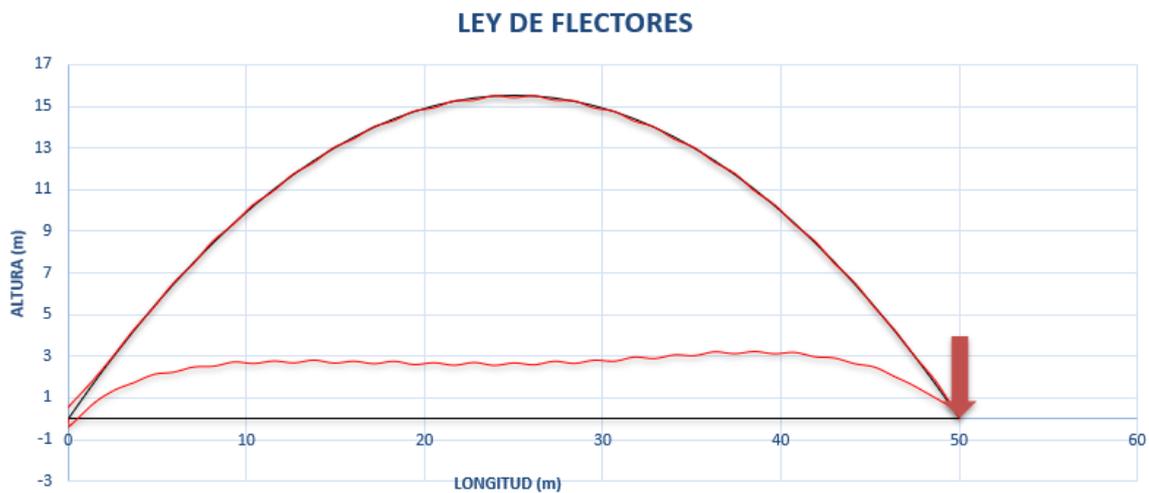


Ilustración 114: Ley de flectores. Hipótesis 1. Carga en apoyo 2 para $f=15,7m$. Escala: $1m/2.500 KN.m$

RESUMEN DE FLECTORES

Apoyo	0 KN.m
Centro de luz tablero	6013,90 KN.m
Clave del arco	-141,81 KN.m
Arranque arco	1003,00 KN.m

Tabla 21: Resumen de flectores para los puntos más singulares del arco. Hipótesis nº1. Carga en apoyo 2. $f=15,7m$.



6.3.6 Envolventes de esfuerzos

En las siguientes ilustraciones se muestran las envolventes de esfuerzos derivados de los casos de cargas anteriores.

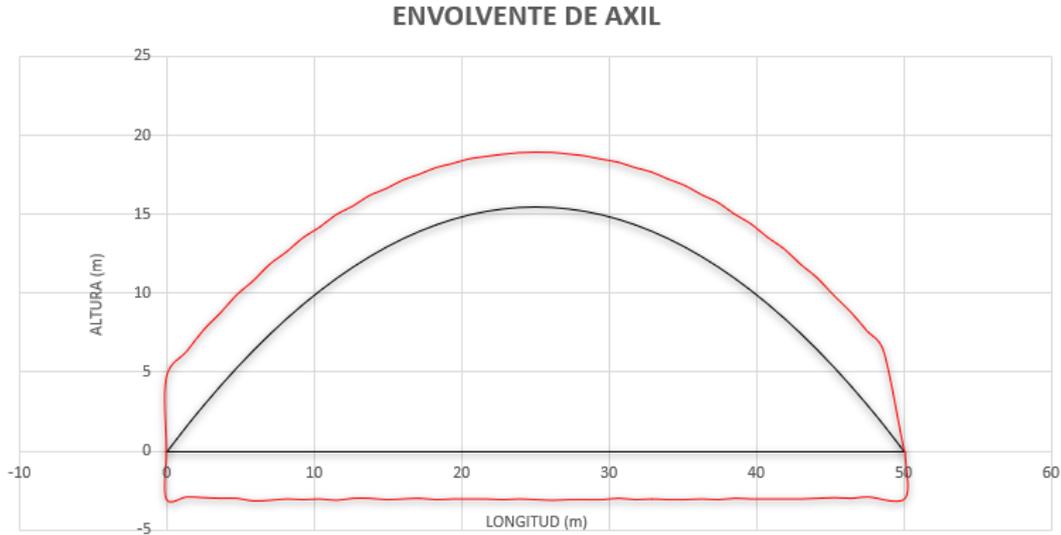


Ilustración 115: Envolventes de esfuerzos axiales. Análisis estático. Escala 1m/3.333 KN

RESUMEN DE AXILES

Apoyo 1	-11.110,00 KN
Centro de luz tablero	-11.410,00 KN
Clave del arco	12.307,00 KN
Arranque arco	11.053,00 KN

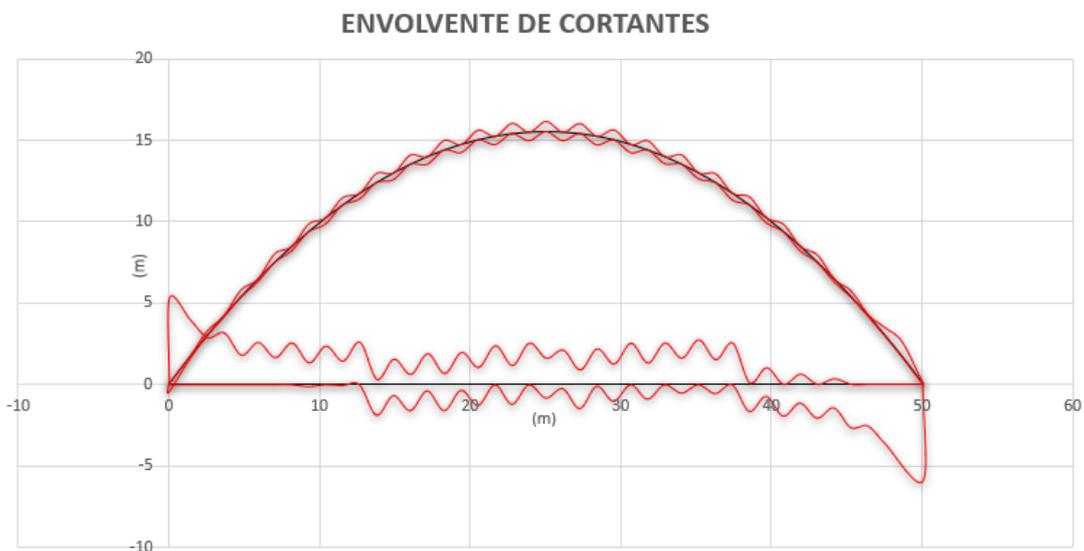
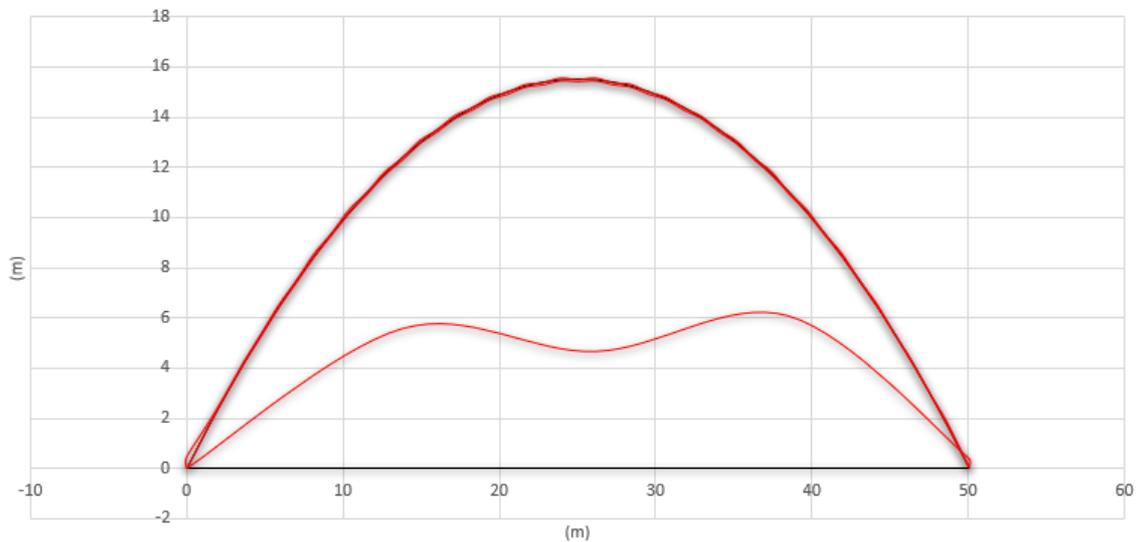


Ilustración 116: Envolventes de esfuerzos cortantes. Análisis estático. Escala 1m/500 KN

**RESUMEN DE CORTANTES**

Apoyo 1	2.839,40 <i>KN</i>
Centro de luz tablero	779, <i>KN</i>
Clave del arco	339,27 <i>KN</i>
Arranque arco	306,51 <i>KN</i>

ENVOLVENTE DE MOMENTOS*Ilustración 117: Envolturas de flectores. Análisis estático. Escala 1m/2.500 KN***RESUMEN DE FLECTORES**

Apoyo	0 <i>KN.m</i>
Centro de luz tablero	11.908,00 <i>KN.m</i>
Clave del arco	-147,18 <i>KN.m</i>
Arranque arco	1.502,70 <i>KN.m</i>



7. ANÁLISIS DINÁMICO DEL PUENTE DE LAS OBLATAS

7.1 INTRODUCCIÓN

El objetivo de este análisis será comprender el comportamiento del Puente Arco de las Oblatas frente a una carga dinámica como lo es el paso de las cargas vivas sobre el tablero.

Una carga dinámica es aquella que se aplica de manera instantánea sobre la estructura. Así, la estructura no es capaz de deformarse como lo haría con una carga estática aplicada de manera paulatina. Es decir, la estructura reacciona a un “impacto” y absorbe parte de la energía aplicada por el mismo, como energía cinética. Si se asimila la estructura a un muelle:

$$F = K * d$$

Tendiendo esto en cuenta, en el momento de aplicación de la carga, el muelle no absorbe toda la energía en forma de deformación, sino que parte de ella se transforma en energía cinética. Generando fuerzas dinámicas derivadas de la aceleración.

Estas fuerzas de inercia o fuerzas dinámicas, se definen como;

$$m * a = Fi$$

y son contrarias a la aceleración.

Por otro lado, una estructura tiene infinitas maneras de vibrar libremente para las cuales las dos fuerzas citadas anteriormente se anulan entre sí denominados modos de vibración. Esas formas de vibrar llevan asociadas unas frecuencias naturales de vibración.

Es la suma de estos modos de vibración asociado cada uno de ellos a un coeficiente de influencia, que resulta en todas las diferentes formas de vibrar que tiene una estructura, según la carga que se le aplique.

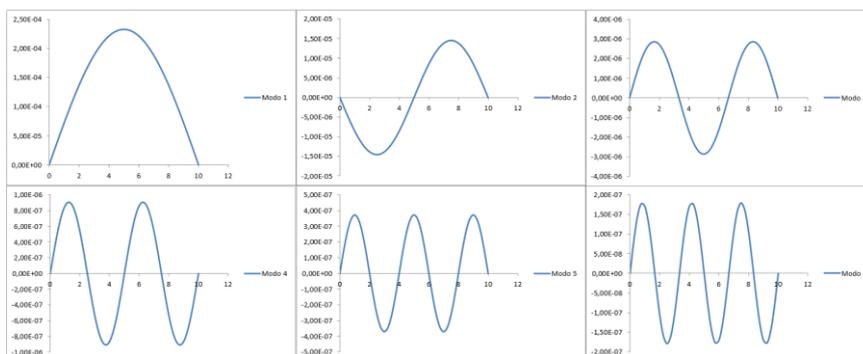


Ilustración 118: Modos de vibración 1-6 para una viga simple de 10 metros de luz. Obtenidos mediante OOFEM.



7.2 CÁLCULO DE MODOS DE VIBRACIÓN MEDIANTE OOFEM

Las expresiones analíticas que definen las aceleraciones, parámetro extremadamente sensible en el análisis y muy dependiente de las características de discretización del modelo, se definen mediante un sumatorio de la influencia de cada modo de vibración en particular. Es por ello que, para cerciorarse de que el código del programa de cálculo está trabajando de la forma que debería, es necesario conocer los modos de vibración de la estructura y sus frecuencias para realizar la comprobación.

$$\ddot{u}_{i,j}(t) = \delta_i \left[\frac{P/i}{K_i} \frac{w_i \Omega_i}{1 - (\frac{\Omega_i}{w_i})^2} \right] \sin(w_i(t - t')) + \delta_i \left[-\frac{P/i}{K_i} \frac{\Omega_i^2}{1 - (\frac{\Omega_i}{w_i})^2} \right] \sin(\Omega_i(t - t')) \quad t' \leq t \leq t''$$

Ilustración 119: Fórmula de Javier Sánchez Haro para el cálculo de la aceleración para el paso de una carga con velocidad conocida.

Para conocer dichos modos y poder comprobar el comportamiento del modelo de cálculo, se realizó un ejemplo con una viga biapoyada simple de diez metros de luz. El código para la determinación de los modos de vibración es el siguiente.

```
eigen_beam2d.out
Eigen vibration of simply supported beam
#LinearStatic 1 nsteps 1
EigenValueDynamic nroot 6 rtolv 1.e-6
domain 2dBeam
OutputManager timestep_all dofman_all element_all
ndofman 41 nelem 40 ncrosssect 1 nmat 1 nbc 2 nic 0 nltf 1 nset 3
node 1 coords 3 0 0 0
node 2 coords 3 0.25 0 0
node 3 coords 3 0.5 0 0
node 4 coords 3 0.75 0 0
node 5 coords 3 1.00 0 0
node 6 coords 3 1.25 0 0
node 7 coords 3 1.5 0 0
node 8 coords 3 1.75 0 0
node 9 coords 3 2 0 0
node 10 coords 3 2.25 0 0
node 11 coords 3 2.5 0 0
node 12 coords 3 2.75 0 0
node 13 coords 3 3 0 0
node 14 coords 3 3.25 0 0
node 15 coords 3 3.5 0 0
node 16 coords 3 3.75 0 0
```

Ilustración 120: Código para la determinación de los modos de vibración. OOFEM

Los elementos distintivos de este código con el de un análisis estático simple se encuentra en la fila nº 4 donde se establece que el análisis estará basado en encontrar los modos de vibración de la estructura definida; en concreto los modos uno al seis.



El parámetro rtoiv significa la tolerancia de la iteración a efectuar para encontrar los modos de vibración, por defecto 1e-6.

Nroot por otro lado, es la cantidad de modos de vibración que se desean conocer. Para este análisis solo se necesitan cinco modos, ya que con esa información se obtiene una aproximación bastante precisa al resultado de integración directa.

La estructura a analizar se introduce de manera normal, teniendo en cuenta las condiciones de contorno y las características de los materiales a emplear. Una vez calculados los modos, el resultado del fichero de salida es el siguiente:

```
##### www.oofem.org ###
##### # #
# # # # # # # #
# # # # ##### # # #
# # # # # # # #
# # # # # # # # OOFEM ver. 2.5
##### # # Copyright (C) 1994-2017 Borek Patzak
#####

Starting analysis on: Fri Feb 11 17:06:01 2022

Eigen vibration of simply supported beam

Output for time 1.000e+00

Eigen Values (Omega^2) are:
-----
2.17067174e+02 3.47307754e+03 1.75825153e+04 5.55699434e+04 1.35671438e+05
2.81338190e+05
```

Ilustración 121: Output de OOFEM para la obtención de los modos de vibración 1-6 de una viga simple.

En primer lugar, el output proporciona los valores de las frecuencias (al cuadrado) asociadas a cada modo de vibración. Las frecuencias se calculan en postprocesado haciendo la raíz cuadrada de los valores aportados por el programa.

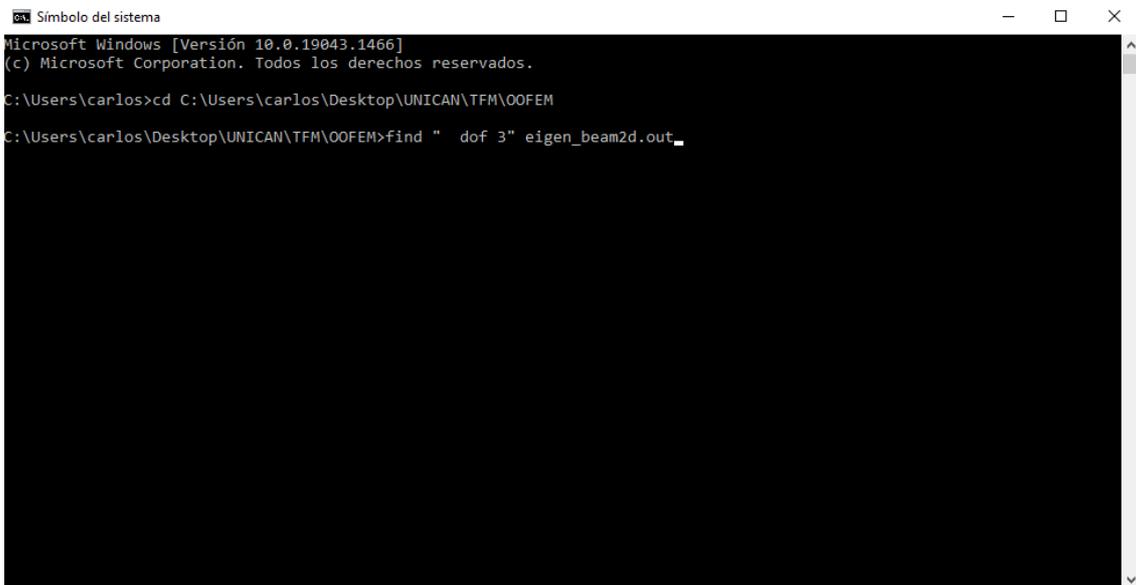
Seguidamente se muestran los valores de los desplazamientos por cada grado de libertad de la estructura. En el caso de una viga biapoyada simple, conviene fijarse en el desplazamiento en el eje Z. Para ello se deben obtener únicamente los valores asociados al Dof 3.

```
Node      1 (      1):
dof 1    d  0.00000000e+00
dof 3    d  0.00000000e+00
dof 5    d -7.30526395e-05
Node      2 (      2):
dof 1    d  4.51146517e-30
dof 3    d  1.82443896e-05
dof 5    d -7.28274425e-05
```

Ilustración 122: Desplazamientos para modos de vibración. OOFEM



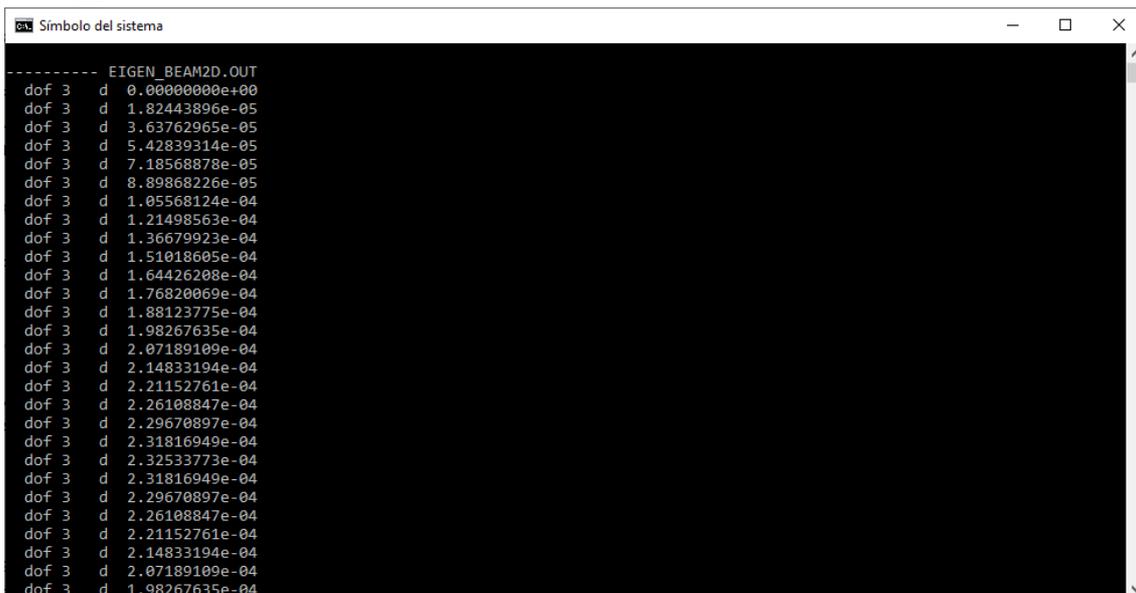
Sin embargo, organizar una hoja de cálculo para extraer todos los valores de “dof 3” puede llegar a ser una tarea muy ardua por lo que se opta por realizar una búsqueda mediante el CMD.



```
Símbolo del sistema
Microsoft Windows [Versión 10.0.19043.1466]
(c) Microsoft Corporation. Todos los derechos reservados.
C:\Users\carlos>cd C:\Users\carlos\Desktop\UNICAN\TFM\00FEM
C:\Users\carlos\Desktop\UNICAN\TFM\00FEM>find " dof 3" eigen_beam2d.out
```

Ilustración 123: Código de búsqueda de " dof 3" en archivos de texto mediante CMD.

Para ello se debe ejecutar el código descrito en la ilustración 124. Como resultado, se obtiene lo mostrado en la Ilustración 125, toda una columna con las filas del archivo de texto que contienen el texto “ dof 3”. Es posible que en archivos .out masivos, la búsqueda abarque más espacio de lo que el CMD puede proporcionar, por lo que la búsqueda completa no se podrá copiar a una hoja de cálculo. Es por ello que se puede ejecutar el comando de la Ilustración 126 y de ese modo exportar los resultados de la búsqueda a un archivo de texto.



```
Símbolo del sistema
----- EIGEN_BEAM2D.OUT
dof 3 d 0.0000000e+00
dof 3 d 1.82443896e-05
dof 3 d 3.63762965e-05
dof 3 d 5.42839314e-05
dof 3 d 7.18568878e-05
dof 3 d 8.89868226e-05
dof 3 d 1.05568124e-04
dof 3 d 1.21498563e-04
dof 3 d 1.36679923e-04
dof 3 d 1.51018605e-04
dof 3 d 1.64426208e-04
dof 3 d 1.76820069e-04
dof 3 d 1.88123775e-04
dof 3 d 1.98267635e-04
dof 3 d 2.07189109e-04
dof 3 d 2.14833194e-04
dof 3 d 2.21152761e-04
dof 3 d 2.26108847e-04
dof 3 d 2.29670897e-04
dof 3 d 2.31816949e-04
dof 3 d 2.32533773e-04
dof 3 d 2.31816949e-04
dof 3 d 2.29670897e-04
dof 3 d 2.26108847e-04
dof 3 d 2.21152761e-04
dof 3 d 2.14833194e-04
dof 3 d 2.07189109e-04
dof 3 d 1.98267635e-04
```

Ilustración 124: Resultado de búsqueda de " dof 3" en archivos de texto mediante CMD.



```
C:\Users\carlos\Desktop\UNICAN\TFM\00FEM>find " dof 3" eigen_beam2d.out > eigen.txt
```

Ilustración 125: Búsqueda de " dof 3" exportada a archivo de texto mediante CMD.

El resultado es un archivo de texto que contiene la información de búsqueda. Este método es más manejable aun siendo pequeñas búsquedas.

Una vez obtenidos los valores de desplazamiento vertical, el resultado de su organización según las coordenadas en el eje X son las mostradas en la Ilustración 119.

La visualización de los modos de vibración no es más que otro modo de cerciorarse del acierto del cálculo, ya que, las vigas biapoyadas tienen los modos de vibración ya tabulados. Lo que realmente interesa es conocer las frecuencias para poder calcular según la fórmula de la Ilustración 120.

Por lo tanto, las frecuencias a considerar son las de los modos de vibración 1,3 y 5. Ya que son los únicos modos de los 6 calculados que afectan al movimiento del nodo central de la viga.

- Modo 1: 14,73 s⁻¹
- Modo 2: 132,60 s⁻¹
- Modo 5: 368,33 s⁻¹

Para el cálculo de los demás parámetros. Se calcularán para cada caso, la frecuencia de la carga, rigidez y si el modo aporta desplazamiento positivo o negativo.

$$\Omega_i = \frac{\pi V}{l}$$

Ilustración 126: Frecuencia de la carga móvil según el modo de vibración.

$$k_i = \frac{CEI}{l^3}$$

Ilustración 127: Rigidez de la viga según el modo de vibración.

Para los modos 1,3 y 5 los resultados de los parámetros a conocer para la aplicación del sumatorio de los modos son:

		ki (N/m)	Ωi (s ⁻¹)	wi (s ⁻¹)	i (modo)	δi (+ o -)	P(N)
v(m/s)	20	83999,66	6,28	14,73	1,00	1,00	-10000,00
L(m)	10	2267990,93	18,85	132,60	3,00	-1,00	-10000,00
E(N/m ²)	2,1E+11	10499958,00	31,42	368,33	5,00	1,00	-10000,00
I(m ⁴)	8,3333E-06						

Tabla 22: Desglose de componentes para la obtención de la aceleración en el nodo central. L= 10m. P=10KN. V=20(m/s)

El resultado proporciona la siguiente gráfica de aceleraciones para 0,5 segundos de análisis.

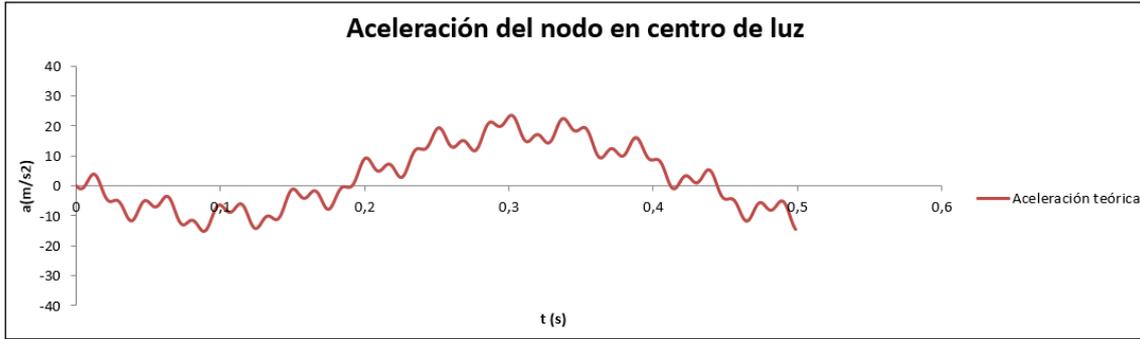


Tabla 23: Aceleración teórica para centro de luz. L=10 m. P=10KN. V= 20 m/s.

7.3 CALCULO DINÁMICO EN OOFEM.

Una vez obtenidos los resultados del método teórico de obtención de las aceleraciones correspondientes al centro de luz para el paso de una carga móvil, se recreará el paso de dicha carga mediante un modelo de cálculo en OOFEM.

Para ello es necesario comprender la estructura y los datos necesarios para alimentar el modelo.

7.3.1 Estructura y alimentación del modelo de cálculo.

Como en cualquier modelo de cálculo en OOFEM, después de tanto la especificación del archivo de salida como la descripción del análisis se establece el módulo a utilizar. Para el caso del análisis dinámico, se optó por DIIDynamic (Direct Implicit Integration).

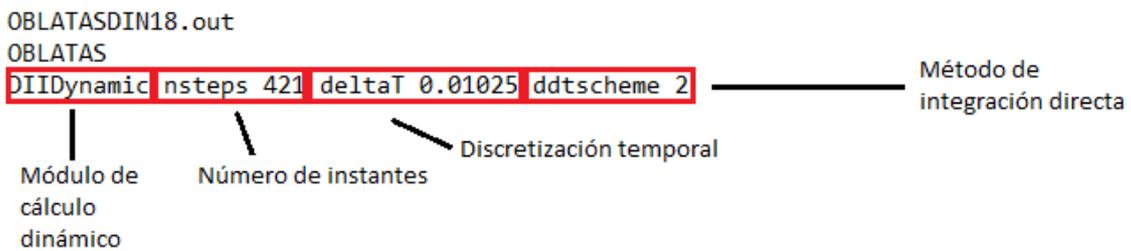


Ilustración 128: Detalles del código para efectuar un análisis dinámico de integración directa en OOFEM.

Los métodos de integración directa devuelven el comportamiento de la estructura teniendo en cuenta el aporte de todos los modos de vibración, por lo que, en OOFEM no puede realizarse un análisis modal. Es por ello que, ddtscheme representa la elección del método de integración. Para este análisis se optará por el método de Newmark (ddtscheme 2).

Nsteps por su parte, define el número de pasos en el tiempo o instantes dentro del análisis. Es un parámetro a definir por el usuario ya que, la discretización temporal puede variar. Para este caso, se opta por 400 instantes para definir correctamente el paso de la carga entre los nodos.

Para comprender el porqué de la definición de deltaT (tiempo entre instantes) se debe definir en primer lugar, como simular una carga móvil en OOFEM.



Las funciones que definen la magnitud de las cargas en el programa, son las funciones temporales. De esa manera, el usuario puede determinar en qué punto en el tiempo la carga aumenta o disminuye.

Una manera de simular el paso de una carga por un nodo es el de la función triangular. La carga toma valor igual a su magnitud total cuando la carga móvil se encuentra encima del nodo de estudio, mientras que toma valor 0 cuando la carga móvil se posiciona encima de alguno de los nodos contiguos y para posiciones de la carga intermedias se distribuye entre los dos nodos de manera lineal.

Se trata de asociar una carga de posición fija en cada nodo, de manera que simule el paso del vehículo pesado. Por ejemplo, si el vehículo estuviera entre dos nodos, se discretizaría como dos cargas fijas en ambos nodos, con valor del 50% de la carga real.

Para generar ese efecto, se debe generar una función temporal que genere una variación lineal entre dos instantes en el tiempo. Es decir que sea definible a trozos. Si $t=1$, $P=0$; si $t=2$ $P=1$; si $t=3$, $P=0$. Formando un triángulo. La función "PiecewiseLinFunction" es la herramienta a emplear en este caso.

PiecewiseLinFunction 1 npoints 3 t 3 1 2 3 f(t) 3 0 1 0

Analizando la línea anterior de código se observa:

- Debe especificarse el número de función.
- npoints indica la cantidad de parejas t-f(t) que existen.
- t acompañado del número de instantes. Se definen los valores de t.
- f(t) el valor de uno a cero indica el tanto por uno de la carga en cada instante t.

Si se puede especificar el valor de la carga para un instante determinado, se pueden generar funciones triangulares para cada nodo del tablero. Por lo que, se puede simular el paso de un vehículo.

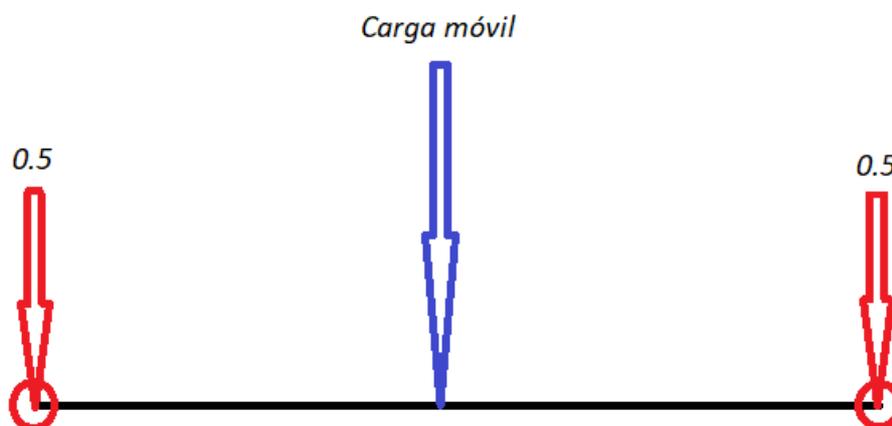


Ilustración 129: Discretización mediante cargas en nodos (en rojo) de la carga móvil real (en azul). Carga viva en centro de luz.



La discretización de la carga en el centro de un elemento es la mostrada en la Ilustración 129.

Sin embargo, para la carga en posición $\frac{3}{4}L$ la discretización sería la mostrada en la Ilustración 130.

Es por ello que esta función juega un papel crucial. En el subapartado en el que se fija el instante para el que se le quiere dar valor a la carga, t , se calculará el calor de t para el cual la carga viva esté posicionada encima de cada nodo.

A cada carga, debe asociársele una función temporal diferente ya que, un nodo sufrirá el paso del vehículo antes que el otro, por lo que las cargas son independientes e individuales para cada nodo, así como su variación.

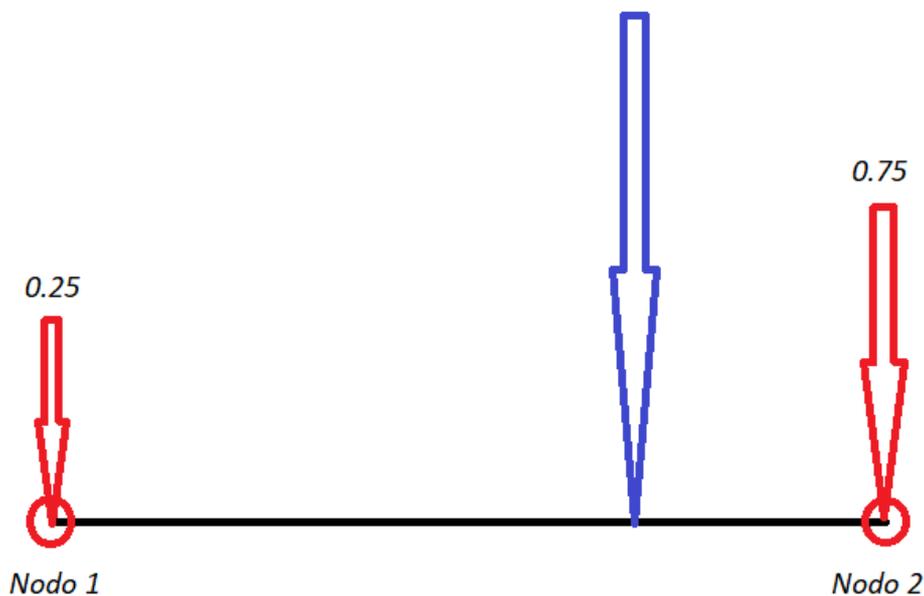


Ilustración 130: Discretización mediante cargas en nodos (en rojo) de la carga móvil real (en azul). Carga viva en $\frac{3}{4}$ de luz.

Cada carga individual asociada a cada nodo, sólo toma el 100% del valor de la carga móvil una vez en todo el análisis, cuando el carro pasa por encima de dicho nodo. Por lo tanto, se calcula el instante t para el cual el vehículo pesado pasa por encima de cada uno de los nodos. Es recomendable asociar las funciones temporales a los nodos de tal manera que la función 1 se asocie con la carga del primer nodo por el que pase la carga y así sucesivamente. De esa manera lo que se genera es una matriz diagonal en el apartado de $f(t)$, donde el valor de la carga fija en los nodos va tomando el 100% del valor de la carga viva consecutivamente, recreando el paso del vehículo.

Es necesario, sin embargo, que el análisis empiece por un número diferente de 0. En este caso, la discretización temporal se define como un décimo del tiempo que tarda el carro en cruzar de un nodo a otro; 0.00125 segundos. El análisis empezará por el instante 0.00125 y por tanto Δt será también 0.00125 segundos. Por lo que n_{steps} será el total de tiempo que transcurre entre el instante que la carga entra en la estructura y el instante en el que sale de ella. En este caso:



$$0.5 \text{ s} / 0.00125 \text{ s} = 400 \text{ instantes}$$

Una vez ejecutado el código, procesando los datos de aceleraciones mediante una hoja de cálculo, los resultados se acoplan a lo calculado teóricamente.

Si bien el resultado teórico sigue la tendencia de los resultados proporcionados por OOFEM, no son totalmente iguales. Esto es debido a que OOFEM usa un módulo de integración directa, por lo que tiene en cuenta todos los modos de vibración en su análisis, mientras que para la aproximación teórica sólo se han tenido en cuenta los modos uno, tres y cinco.

Es por ello que la aproximación es buena para valores medios y no para los picos.

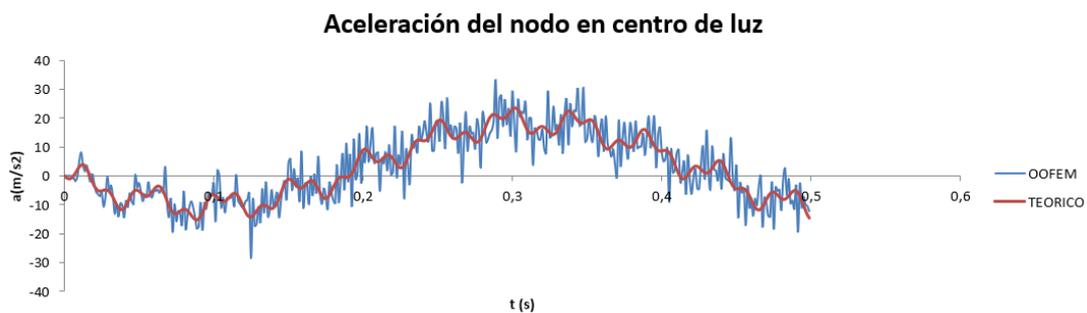


Ilustración 131: Aceleración del nodo en centro de luz. Comparación resultado teórico vs modelo de OOFEM.

7.4 ANÁLISIS DINÁMICO DEL PUENTE ARCO DE LAS OBLATAS

Una vez comprendido el funcionamiento del cálculo dinámico en OOFEM, se compone el modelo de cálculo para el objetivo del documento. El estudio dinámico del puente de las oblatas.

En primer lugar, debe definirse la velocidad a la que se estudiará el paso del vehículo. Se fijan velocidades de 1, 5, 20 y 40 Km/h para apreciar la influencia de la velocidad de paso en el estudio. Por otro lado, y aprovechando las bondades de las herramientas paramétricas con las que se ha diseñado el modelo del que se extraen los datos para el modelo de cálculo, se analizará también la influencia de la variación del peralte del arco.

7.4.1 Análisis de velocidades de paso.

En primer lugar, para componer los diferentes ficheros de entrada, se define la discretización temporal. DeltaT seguirá el mismo criterio de ser la décima parte del tiempo de paso entre nodos contiguos. Por lo que para cada velocidad quedará:

- Velocidad 1 Km/h -> deltaT = 0.405 s
- Velocidad 5 Km/h -> deltaT = 0.081 s
- Velocidad 20 Km/h -> deltaT = 0.02025 s
- Velocidad 40 Km/h -> deltaT = 0.010125 s

Nsteps será igual para todos los análisis.



47,25 m / (v(m/s) * deltaT(s)) + 1 = 421 instantes

Calculando pues, el instante para cada nodo donde la carga toma valor 1 (en tanto por uno) sobre la carga viva, se componen las funciones temporales para cada nodo del tablero. El resto de cargas consideradas en el análisis se mantienen idénticas al caso estático.

7.4.1.1 Extracción y post-procesado de resultados.

La extracción de datos no será diferente de lo explicado en el apartado 6.2.2 del presente documento. Sin embargo, el fichero de texto de salida que contiene los resultados, es supermasivo. Esto deriva en un problema de volumen de datos en Excel.

Un instante del análisis dinámico en Excel ocupa unas mil quinientas filas para el puente de Las Oblatas. Por lo tanto, teniendo 421 instantes, se obtienen como resultado casi setecientas mil filas de resultados. La organización de todos ellos no es solo tediosa, sino que procesarlos en Excel, conlleva una inversión de tiempo considerable por la propia capacidad del programa.

Ya que el copiar el modelo de extracción de datos del caso estático para cada instante en el caso dinámico es inviable. Debe automatizarse el proceso ya que cualquier pequeña modificación conllevaría una pérdida de tiempo considerable copiando y pegando celdas.

Por lo que, haciendo uso de la herramienta Visual Basic se programa un botón que copie el modelo de extracción del primer instante del análisis para los demás instantes y que, además, numere el instante para posterior agilización del proceso de organización de esfuerzos en tablas dinámicas.

Table with columns: INSTANTE, Nodos, Xoro, Yoro, Zoro, X, Z, Alpha, Auxiloro, Auxiloboro, d, Xxiboro, Yxiboro, Zxiboro, Cords, Cords Tablero, Xcorrc, Zcorrc, Xcorrb, Zcorrb, Muxoro, Muxotablero, d, Xxincoro, Yxincoro, Zxincoro, Xxincorb, Yxincorb, Zxincorb, XARCOFA, Y, Tab, Y, arco, F. The table contains numerical data for various nodes and instants.

Ilustración 132: Extracción de esfuerzos del archivo .out de OOFEM. Instante 1.



En la Ilustración 132 se muestra la manera en la que se organizan los resultados por cada instante. En la izquierda, el número de instante para poder visualizar tanto la evolución de las tensiones como la deformada del tablero según la posición de la carga. Por otro lado, los títulos de cada columna deben ser iguales en todos los tsteps para poder realizar las envolventes posteriormente mediante tablas dinámicas.

Para reproducir estas tablas en todos los instantes, una primera aproximación fue generar un código como el que se muestra en la ilustración 133.

```
Sub Button2_Click()  
Dim i As Integer  
For i = 0 To 4  
Range("d3:e5").Copy Cells(7 + i * 4, 4)  
Next  
End Sub
```

Ilustración 133: Macro para copiar un rango de celdas en diferentes ubicaciones.

Dicha macro serviría para copiar el rango de celdas que incluye todas las fórmulas que extraen los datos del texto de cada instante en el siguiente y sucesivos. Sin embargo "Integer" solo abarca números hasta el 32.767 y la longitud de hoja de cálculo en cuanto a filas se refiere, supera con creces esa cantidad.

Existe otro parámetro dimensional, "Long" que llega hasta más de los dos mil millones. Por lo que sirve. El código final es:

```
Sub Button1_Click()  
Dim i As Long  
Application.ScreenUpdating = False  
For i = 0 To 420  
Range("l18:dil590").Copy Cells(18 + i * 1568, 12)  
Next  
Application.ScreenUpdating = True  
End Sub
```

Ilustración 134: Código final para extraer datos de análisis dinámico.

Por otro lado, "Application.ScreenUpdating" es necesario para que la macro no copie todas las fórmulas mientras las calcula, sino que; copie un instante, calcule ese instante y pase al siguiente. Esto proporciona un ahorro en tiempo de procesado de hasta 30 minutos por cada activación de la macro.

Todos los datos son recabados en la pestaña de "TABLAS DINÁMICAS", donde se pueden mostrar tanto las envolventes como el seguimiento instante a instante de la estructura.



Row Labels	Sum of Y tab	Row Labels	Sum of Zaxilar	Max of Zaxilar	Max of Zaxilab	Max of Zarco	Sum of Z	Row Labels	Sum of Z	Max of Zarco	Max of Zcoartar	Max of Zcoartab	Row Labels	Sum of Z	Max of Zarco	Max of Zmocar	Max of Zmocarb
0	0	0	14.40018422	-11.2132	0	0	0	0	0	0.21535043	8.9754	0	0	0	0	0.18330978	-0.020511
1.405	-0.00188222	1.405	5.193311687	-11.1298	0.660494	0.1405	0	0	0.660494	0.801627052	6.978	1.405	0	0.660494	0.69495292	0.54696	
2.53	-0.00364363	2.53	5.728659436	-11.0584	1.161859	0.253	0	0	1.161859	1.610529051	5.7644	2.53	0	1.161859	1.17934635	0.90451	
3.655	-1.09726084	3.655	6.079113743	-11.0022	1.638768	0.3655	0	0	1.638768	1.756847779	5.0592	3.655	0	1.638768	1.658846372	1.1123	
4.78	-1.57078407	4.78	6.526120537	-1.09594	2.091219	0.478	0	0	2.091219	2.763969753	3.3174	4.78	0	2.091219	2.10248921	1.3689	
5.905	-1.88309861	5.905	6.837601132	-1.09098	2.519244	0.5905	0	0	2.519244	3.528402034	4.0702	5.905	0	2.519244	2.544817309	1.5173	
7.03	-2.03249479	7.03	7.266746667	-1.08466	2.922751	0.703	0	0	2.922751	3.637790667	2.5894	7.03	0	2.922751	2.937927566	1.5672	
8.155	-2.50647816	8.155	7.494464837	-1.0819	3.301832	0.8155	0	0	3.301832	3.206503966	4.024	8.155	0	3.301832	3.35618173	1.5887	
9.28	-1.792010917	9.28	7.870101855	-1.07894	3.656456	0.928	0	0	3.656456	4.402049951	2.4402	9.28	0	3.656456	3.667044419	1.5814	
10.405	-3.058939401	10.405	8.051994868	-1.0754	3.986623	1.0405	0	0	3.986623	3.801021313	4.324	10.405	0	3.986623	4.023004643	1.5214	
11.53	-3.071494817	11.53	8.378181735	-1.0709	4.292333	1.153	0	0	4.292333	5.052904681	2.9828	11.53	0	4.292333	4.27911663	1.553	
12.655	-3.5581817	12.655	8.512473211	-1.07056	4.573587	1.2655	0	0	4.573587	4.31749076	4.7894	12.655	0	4.573587	4.611101084	1.5741	
13.78	-3.746112624	13.78	8.786496208	-1.06444	4.830384	1.378	0	0	4.830384	5.616788125	2.8966	13.78	0	4.830384	4.829454231	1.6415	
14.905	-4.55550271	14.905	9.381767412	-1.06246	5.175746	1.4905	0	0	5.175746	4.770398666	3.8742	14.905	0	5.175746	5.788235554	1.759	
16.03	-4.77190031	16.03	9.10988318	-1.06318	5.270607	1.603	0	0	5.270607	6.092829788	2.992	16.03	0	5.270607	5.267397579	1.6379	
17.155	-4.55693095	17.155	9.169521699	-1.06428	5.454033	1.7155	0	0	5.454033	5.1332999	4.2666	17.155	0	5.454033	5.42883047	1.6295	
18.28	-4.92931732	18.28	9.338665923	-1.0609	5.613003	1.828	0	0	5.613003	6.487339323	2.403	18.28	0	5.613003	5.608862218	1.6819	
19.405	-4.55550271	19.405	9.381767412	-1.06246	5.175746	1.9405	0	0	5.175746	5.407897216	3.8742	19.405	0	5.175746	5.788235554	1.759	
20.53	-4.60039718	20.53	9.486464174	-1.0594	5.875751	2.053	0	0	5.875751	6.760501007	2.1632	20.53	0	5.875751	5.851631322	1.8686	
21.655	-4.07560469	21.655	9.525084855	-1.06152	5.943171	2.1655	0	0	5.943171	5.601954563	3.6098	21.655	0	5.943171	5.985696242	1.8778	
22.78	-4.73180544	22.78	9.58807207	-1.05876	6.004313	2.278	0	0	6.004313	6.913229832	1.93796	22.78	0	6.004313	5.998855611	2.05	
23.905	-4.78872788	23.905	9.603187549	-1.06114	6.040998	2.3905	0	0	6.040998	5.898118257	2.8224	23.905	0	6.040998	6.086480313	2.0457	
25.03	-4.786180361	25.03	9.616216502	-1.05984	6.093227	2.503	0	0	6.093227	6.954113776	1.6048	25.03	0	6.093227	6.04901818	2.1253	
26.155	-4.78421724	26.155	9.618269564	-1.06144	6.040998	2.6155	0	0	6.040998	5.700219134	3.0444	26.155	0	6.040998	6.086170989	2.0502	
27.28	-4.76279074	27.28	9.579436876	-1.05924	6.004313	2.728	0	0	6.004313	6.895278228	2.334	27.28	0	6.004313	5.999769605	2.0975	
28.405	-4.721310887	28.405	9.56891138	-1.06212	5.943171	2.8405	0	0	5.943171	5.611699233	3.9796	28.405	0	5.943171	5.986469396	1.9799	
29.53	-4.69992041	29.53	9.477689875	-1.06204	5.875751	2.953	0	0	5.875751	6.717484612	3.3448	29.53	0	5.875751	5.8393312	2.0426	
30.655	-4.57809908	30.655	9.44994417	-1.06338	5.747516	3.0655	0	0	5.747516	5.441217695	4.2838	30.655	0	5.747516	5.979036337	1.831	
31.78	-4.475834443	31.78	9.306708107	-1.06186	5.613003	3.178	0	0	5.613003	6.435799868	3.8822	31.78	0	5.613003	5.612402247	1.8226	
32.905	-4.35252783	32.905	9.255811362	-1.06496	5.454033	3.2905	0	0	5.454033	5.18110453	4.3756	32.905	0	5.454033	5.444405888	1.7509	
34.03	-4.28217463	34.03	9.106355844	-1.0658	5.270607	3.403	0	0	5.270607	6.049845128	3.6896	34.03	0	5.270607	5.26811569	1.6919	
35.155	-4.04263934	35.155	8.978683569	-1.06686	5.062724	3.5155	0	0	5.062724	4.840552593	4.5814	35.155	0	5.062724	5.11293056	1.6411	
36.28	-3.85574939	36.28	8.730468253	-1.06606	4.830384	3.628	0	0	4.830384	5.553055846	3.361	36.28	0	4.830384	4.83706766	1.6762	
37.405	-3.64712622	37.405	8.610928651	-1.06908	4.573587	3.7405	0	0	4.573587	4.418032541	3.9506	37.405	0	4.573587	4.611716479	1.6396	

Ilustración 135: Tablas dinámicas para envolventes de esfuerzos.

Row Labels	Sum of Y tab	Row Labels	Sum of Zaxilar	Sum of Zaxilab	Sum of Zarco	Sum of Z	Row Labels	Sum of Z	Sum of Zarco	Sum of Zcoartar	Sum of Zcoartab	Row Labels	Sum of Z	Sum of Zarco	Sum of Zmocar	Sum of Zmocarb
1.405	0	0	14.2449396	-14134	0	0	0	0	0.10210708	10.0539	0	0	0	0.020204055	-0.037439	
2.53	-0.00194496	2.53	4.49398778	-14204	0	0	0	0	1.500969	1.78277056	8.40	1.405	0	1.500969	1.70869802	0.62099
3.655	-0.00273734	3.655	5.74205377	-142938	0	0	0	0	4.195507	4.309189341	3.2708	3.655	0	4.195507	4.212427081	1.2911
4.78	-0.00344691	4.78	6.344183028	-142529	0	0	0	0	5.353955	5.308979411	1.5044	4.78	0	5.353955	5.37109557	1.44
5.905	-0.004110264	5.905	8.056138773	-14342	0	0	0	0	6.449589	6.421673339	0.177306	5.905	0	6.449589	6.472255405	1.4824
7.03	-0.004676777	7.03	9.354589736	-143688	0	0	0	0	7.482703	7.649774027	-0.4738	7.03	0	7.482703	7.496278976	1.5046
8.155	-0.005197728	8.155	11.03816705	-144138	0	0	0	0	8.452378	9.306891011	-0.40784	8.155	0	8.452378	8.674069532	1.4483
9.28	-0.00555597	9.28	11.5664479	-144404	0	0	0	0	9.38111	9.575274021	-1.78864	9.28	0	9.38111	9.36520972	1.3891
10.405	-0.00578857	10.405	11.82826705	-144892	0	0	0	0	10.206391	9.994847375	-1.38398	10.405	0	10.206391	10.22207163	1.2549
11.53	-0.00592676	11.53	12.76790672	-145203	0	0	0	0	10.989208	11.2890244	-2.2772	11.53	0	10.989208	11.98442028	1.4553
12.655	-0.00612322	12.655	13.45689804	-145532	0	0	0	0	11.709112	11.43985329	-1.67074	12.655	0	11.709112	11.74545472	1.38206
13.78	-0.00644478	13.78	14.10526174	-145865	0	0	0	0	12.369553	12.10867786	-2.8596	13.78	0	12.369553	12.380412	0.98028
14.905	-0.00684729	14.905	14.87975362	-146196	0	0	0	0	13.361308	12.69077189	-3.05059	14.905	0	13.361308	13.9116989	0.97802
16.03	-0.00695871	16.03	15.24672397	-146496	0	0	0	0	13.493534	13.80350067	-2.4739	16.03	0	13.493534	13.4934233	0.54308
17.155	-0.00695883	17.155	15.89898983	-146494	0	0	0	0	13.362795	13.50031627	-1.20522	17.155	0	13.362795	13.3827412	0.37003
18.28	-0.00695847	18.28	16.152371	-14639	0	0	0	0	14.370182	14.73468858	-2.0852	18.28	0	14.370182	14.3847029	0.29558
19.405	-0.00644467	19.405	16.4611351	-146518	0	0	0	0	14.74557	14.28369751	-0.72332	19.405	0	14.74557	14.72589529	0.19466
20.53	-0.00651256	20.53	16.76705986	-146328	0	0	0	0	14.982617	14.96974806	-1.22819	20.53	0	14.982617	14.91773429	0.04964
21.655	-0.00647787	21.655	16.97077478	-146418	0	0	0	0	15.25465	14.72808034	0.28896	21.655	0	15.25465	15.2287796	-0.05894
22.78	-0.006445738	22.78	17.1406781	-146498	0	0	0	0	15.371939	15.68605396	-0.60036	22.78	0	15.371939	15.34746834	-0.075523
23																



En las tres ilustraciones anteriores se muestra la versatilidad de las tablas dinámicas y los gráficos dinámicos a la hora de ordenar los resultados, haciendo posible distintas configuraciones de visualización como lo son el “instante a instante” o la visualización de las envolventes.

7.4.1.2 Velocidad de paso 40 km/h.

Para el análisis de velocidad de paso de 40 km/h frente al caso estático debe calcularse el instante de tiempo en el que la carga pasa por cada nodo que define el tablero. Ello se realiza en una hoja de cálculo.

Ya que para el caso de 40 km/h la discretización temporal escogida son 0.010125 s y al ser este valor la décima parte del tiempo de paso entre nodos de un mismo elemento es conocido el momento en el que la carga viva pasa por cada nodo:

$$t_{i-1} + \text{delta}T * 10 = t_i$$

El instante 1 debe siempre ser deltaT. Por lo que, en este caso, para el tstep 2:

$$t_2 = 0,01025 + 0,01025 * 10 = 0,11275 \text{ s}$$

Se calcula el tiempo t_i para cada uno de los nodos y se asocia una función temporal en la que cuando $t_{\text{análisis}} = t_i$ el valor de la función temporal sea 1 y para los demás instantes valga 0.

Una vez asociada cada carga a su función temporal, se puede ejecutar el código. Y organizando los resultados en tablas dinámicas y comparando estas con los resultados estáticos ya expuestos en el Capítulo 6:



Ilustración 139: Análisis dinámico. $V= 40 \text{ km/h}$. Comparación de envolventes de axiles. Escala 1m/5.000 KN



RESUMEN DE AXILES

	POSITIVO	NEGATIVO
Apoyo 1	160,99 KN	-22.115,00 KN
Centro de luz tablero	1.461,20 KN	-23.446,00 KN
Clave del arco	24.076 KN	-
Arranque arco	21.280 KN	-122,26 KN

Tabla 24: Resumen de axiles para los puntos más singulares del puente. Análisis dinámico. V= 40 km/h.

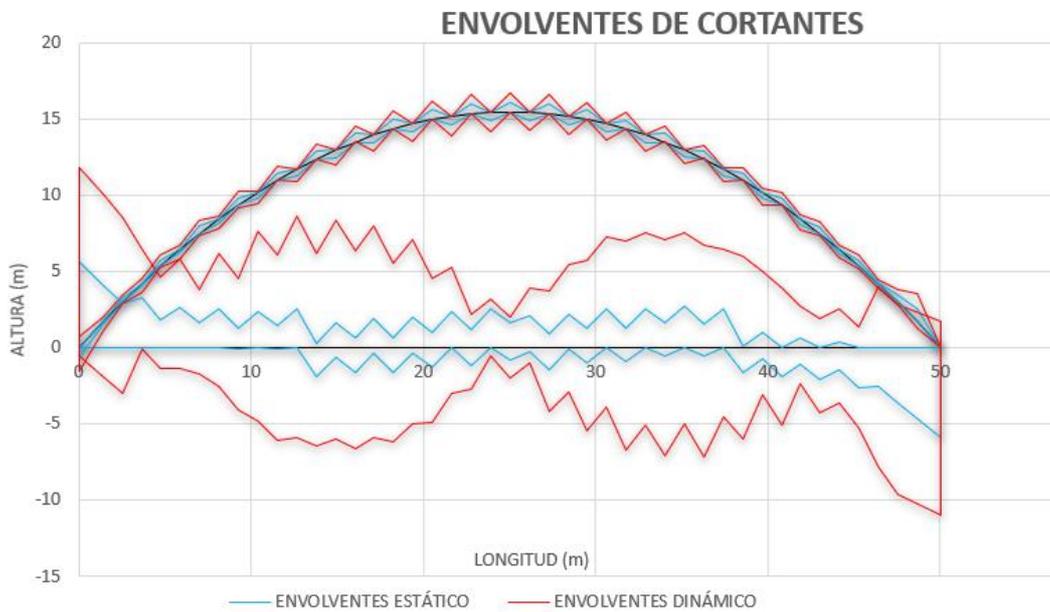


Ilustración 140: Análisis dinámico. V= 40 km/h. Comparación de envolventes de cortantes. Escala 1m/500 KN

RESUMEN DE CORTANTES

	POSITIVO	NEGATIVO
Apoyo 1	5910 KN	-261 KN
Centro de luz tablero	1.411,2 KN	-284,75 KN
Clave del arco	634 KN	-3 KN
Arranque arco	931 KN	-253 KN

Tabla 25: Resumen de cortantes para los puntos más singulares del puente. Análisis dinámico. V= 40 km/h.

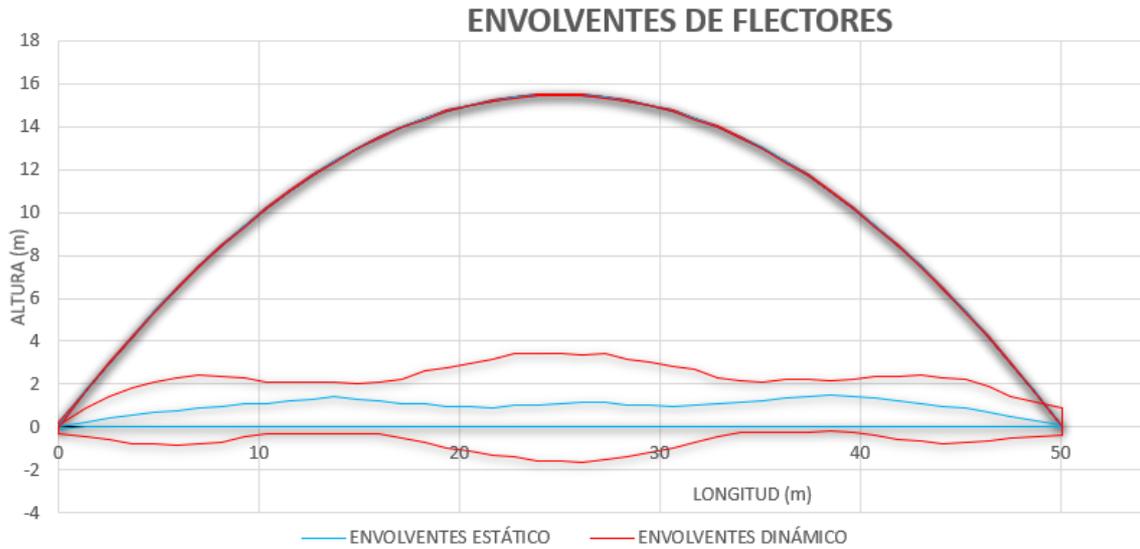


Ilustración 141: Análisis dinámico. V= 40 km/h. Comparación de envolturas de flectores. Escala 1m/10.000 KN.m

RESUMEN DE FLECTORES

	POSITIVO	NEGATIVO
Apoyo 1	-	-
Centro de luz tablero	34.269 KN.m	-15.506 KN.m
Clave del arco	152 KN.m	-463 KN.m
Arranque arco	2.316 KN.m	-606,543 KN.m

Tabla 26: Resumen de flectores para los puntos más singulares del puente. Análisis dinámico. V= 40 km/h.

Como se puede apreciar comparando las tablas resumen de esfuerzos, la carga viva hace que el puente se cargue del orden de más del doble en los puntos singulares escogidos para la comparativa. Sin embargo, a la altura de cuartos de luz, el cortante se dispara hasta 5 veces la magnitud del caso estático.

En cuanto a los momentos flectores, aparecen momentos negativos por la influencia del paso del vehículo pesado.

7.4.1.3 Velocidad de paso 20 km/h.

Para el caso de velocidad de paso 20 km/h se obtienen los siguientes resultados.

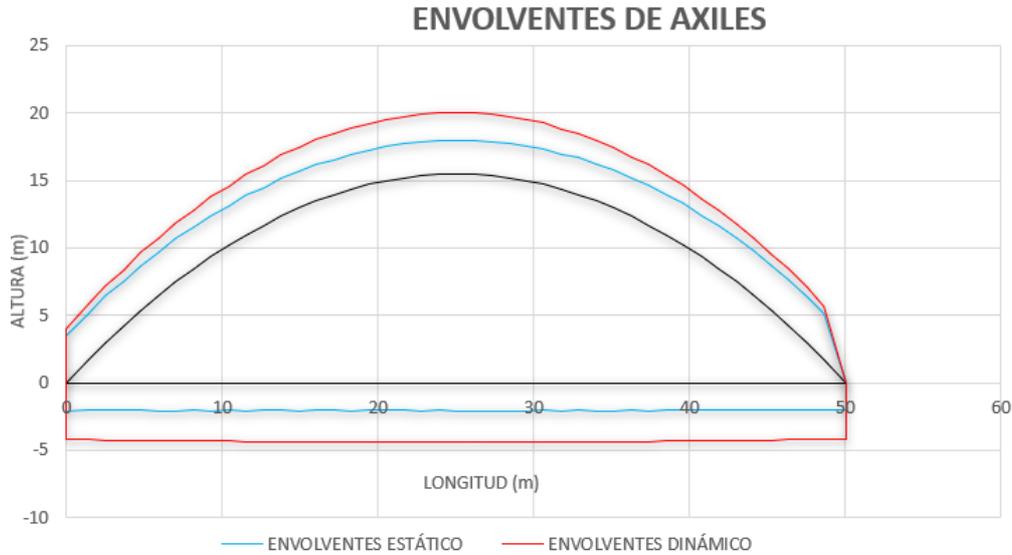


Ilustración 142: Análisis dinámico. $V= 20 \text{ km/h}$. Comparación de envolventes de axiles. Escala $1\text{m}/5.000 \text{ KN}$

RESUMEN DE AXILES

	POSITIVO	NEGATIVO
Apoyo 1	160,99 KN	-20.928,00 KN
Centro de luz tablero	1.461,20 KN	-21.897,00 KN
Clave del arco	22.753 KN	-
Arranque arco	19.911 KN	-122,26 KN

Tabla 27: Resumen de axiles para los puntos más singulares del puente. Análisis dinámico. $V= 20 \text{ km/h}$.

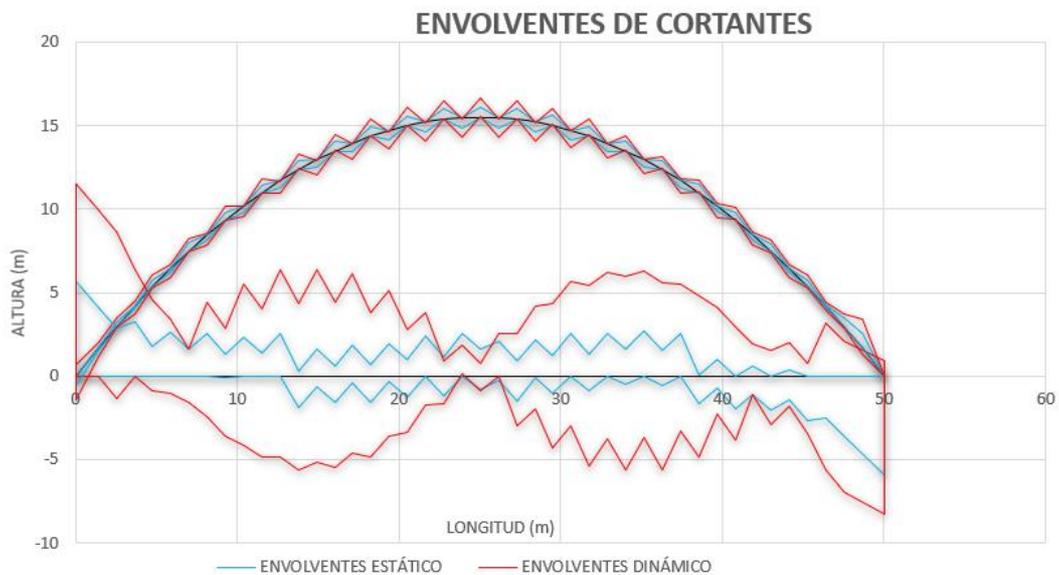


Ilustración 143: Análisis dinámico. $V= 20 \text{ km/h}$. Comparación de envolventes de cortantes. Escala $1\text{m}/500 \text{ KN}$



RESUMEN DE CORTANTES

	POSITIVO	NEGATIVO
Apoyo 1	5.776 KN	-
Centro de luz tablero	907 KN	-
Clave del arco	580 KN	-
Arranque arco	871 KN	-224 KN

Tabla 28: Resumen de cortantes para los puntos más singulares del puente. Análisis dinámico. V= 20 km/h.

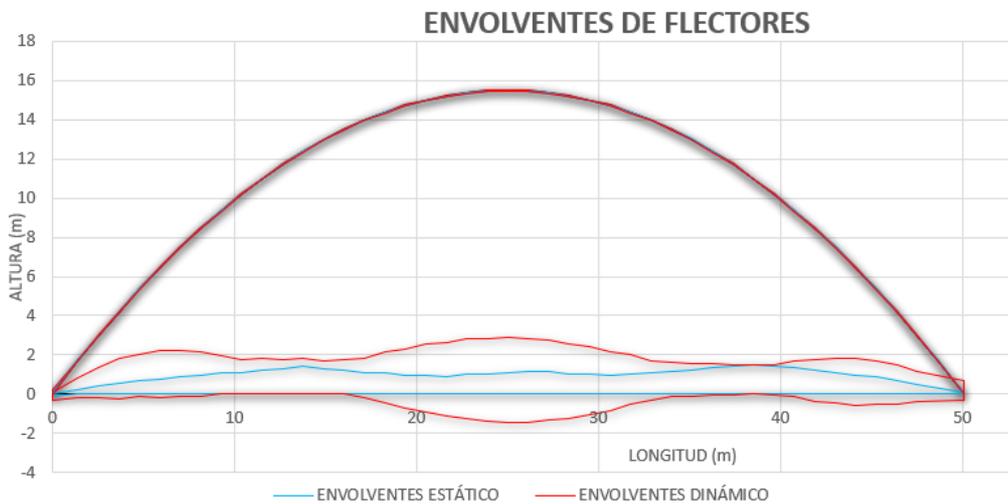


Ilustración 144: Análisis dinámico. V= 20 km/h. Comparación de envolventes de flectores. Escala 1m/10.000 KN.m

RESUMEN DE FLECTORES

	POSITIVO	NEGATIVO
Apoyo 1	-	-
Centro de luz tablero	28.283 KN.m	-14.006 KN.m
Clave del arco	152 KN.m	-375 KN.m
Arranque arco	2.092 KN.m	-579 KN.m

Tabla 29: Resumen de flectores para los puntos más singulares del puente. Análisis dinámico. V= 20 km/h.

Resulta evidente que la velocidad de la carga tiene un gran impacto en la estructura, sobre todo en cortantes y momentos en el centro de luz del tablero y en los momentos de la clave del arco. Además, se aprecia cierta tendencia generalizada a la disminución de esfuerzos. En el siguiente caso de velocidad de paso, se interpretará dicha tendencia.



7.4.1.4 Velocidad de paso 5 km/h.

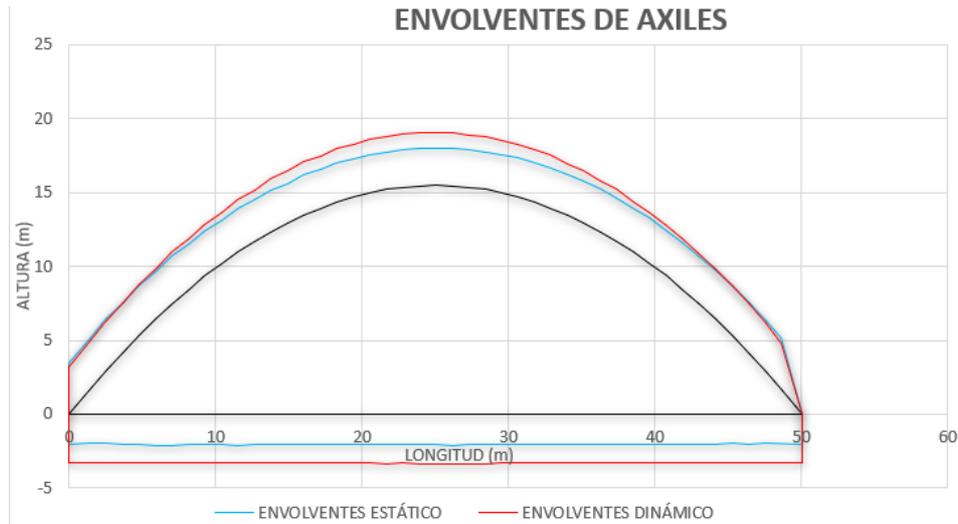


Ilustración 145: Análisis dinámico. V= 5 km/h. Comparación de envolventes de axiles. Escala 1m/5.000 KN

RESUMEN DE AXILES

	POSITIVO	NEGATIVO
Apoyo 1	160,99 KN	-16.356,00 KN
Centro de luz tablero	1.461,20 KN	-16.610,00 KN
Clave del arco	17.809,11 KN	-
Arranque arco	15.664,94 KN	-122,26 KN

Tabla 30: Resumen de axiles para los puntos más singulares del puente. Análisis dinámico. V= 5 km/h.

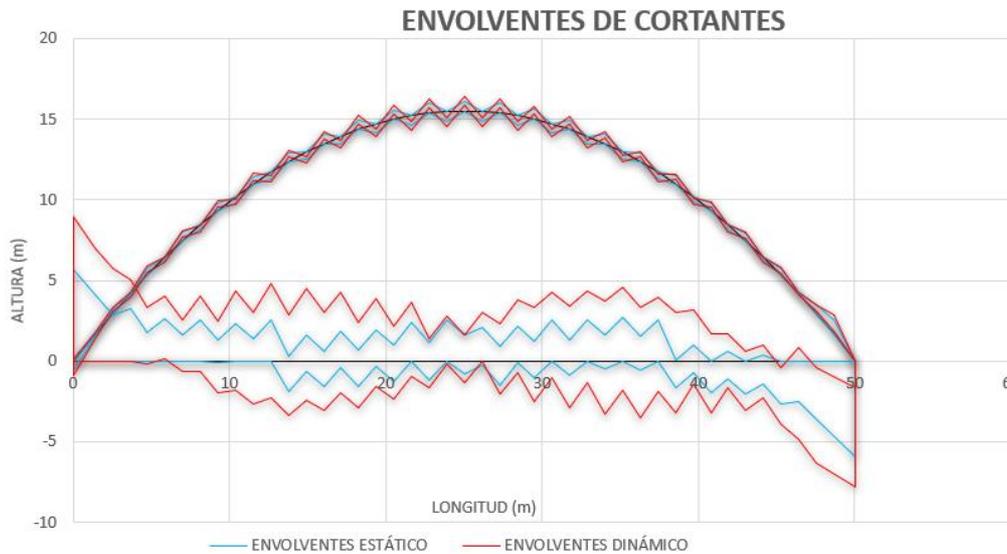


Ilustración 146: Análisis dinámico. V= 5 km/h. Comparación de envolventes de cortantes. Escala 1m/500 KN

**RESUMEN DE CORTANTES**

	POSITIVO	NEGATIVO
Apoyo 1	4.488,2 KN	-
Centro de luz tablero	1.411,2 KN	-100,2 KN
Clave del arco	450,3 KN	-
Arranque arco	575,86 KN	-

Tabla 31: Resumen de cortantes para los puntos más singulares del puente. Análisis dinámico. $V=5$ km/h.

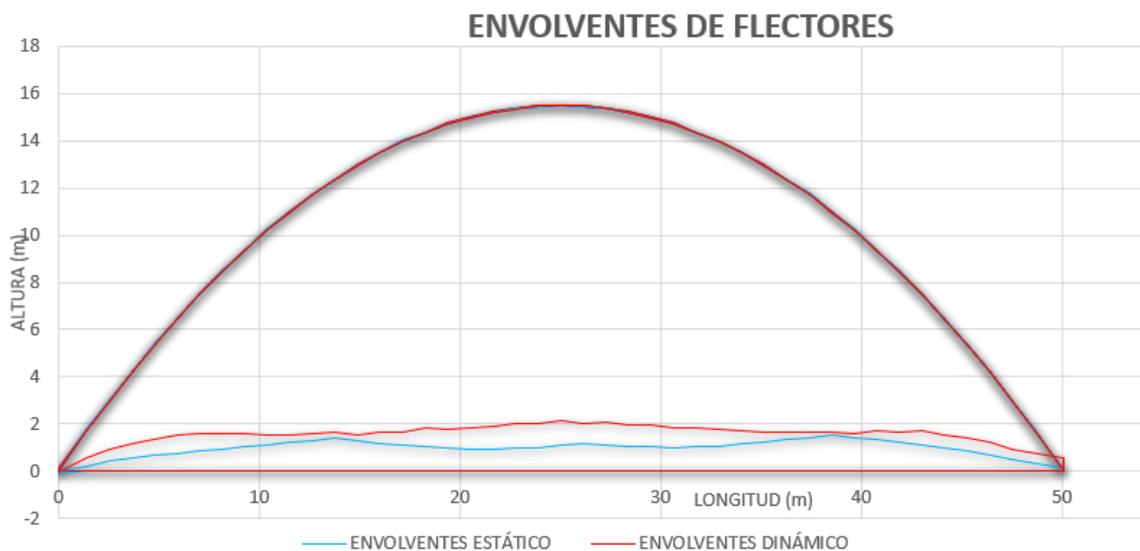


Ilustración 147: Análisis dinámico. $V=5$ km/h. Comparación de envolturas de flectores. Escala 1m/10.000 KN.

RESUMEN DE FLECTORES

	POSITIVO	NEGATIVO
Apoyo 1	-	-
Centro de luz tablero	20.457 KN.m	-
Clave del arco	-	-217 KN.m
Arranque arco	1633 KN.m	-512 KN.m

Tabla 32: Resumen de flectores para los puntos más singulares del puente. Análisis dinámico. $V=5$ km/h.

Se puede apreciar la misma tendencia de disminución de los esfuerzos en el puente. En este caso, si se observan las ilustraciones de esfuerzos pertenecientes a el caso de 5 km/h, respecto al de 20 km/h se distingue una tendencia al estado estático. Esto sucede ya que, al cargar el puente con velocidades bajas, la característica de instantaneidad de la carga dinámica se pierde, tendiendo al estado estático. Esto se puede vislumbrar totalmente en el caso siguiente.



7.4.1.5 Velocidad de paso 1 km/h.

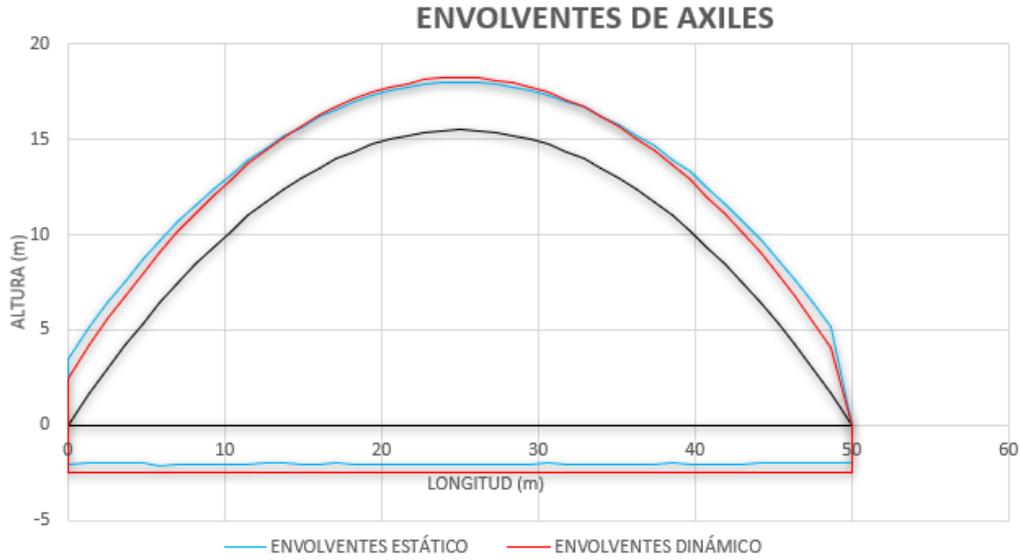


Ilustración 148: Análisis dinámico. V= 1 km/h. Comparación de envolventes de axiles. Escala 1m/5.000 KN

RESUMEN DE AXILES

	POSITIVO	NEGATIVO
Apoyo 1	160,99 KN	-12.444,00 KN
Centro de luz tablero	1.461,20 KN	-12.456,00 KN
Clave del arco	13.666 KN	-
Arranque arco	11.988 KN	-122,26 KN

Tabla 33: Resumen de axiles para los puntos más singulares del puente. Análisis dinámico. V= 1 km/h.

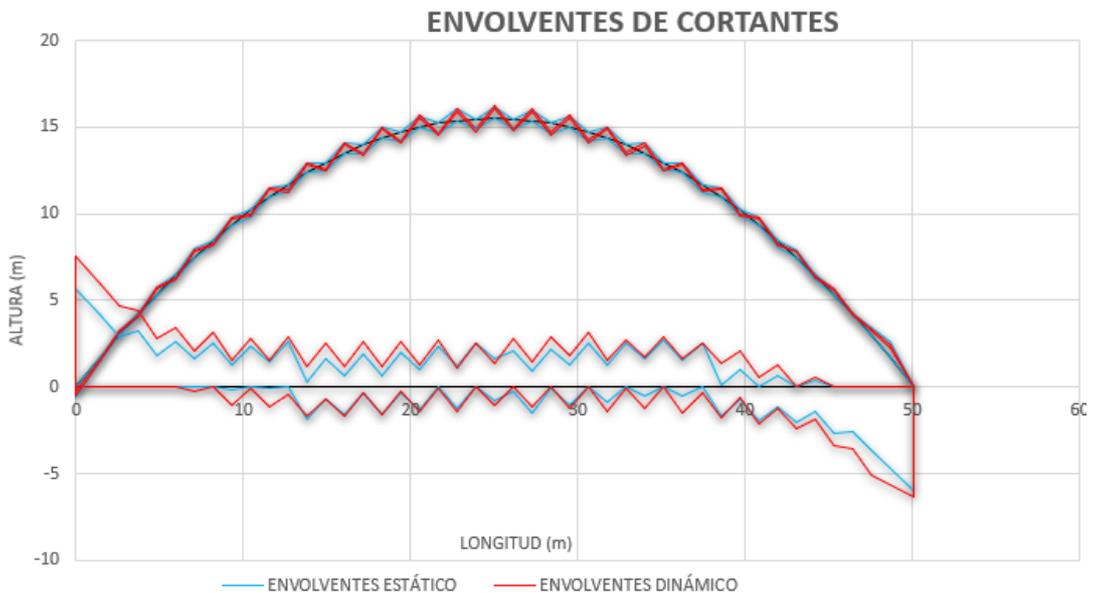


Ilustración 149: Análisis dinámico. V= 5 km/h. Comparación de envolventes de cortantes. Escala 1m/5.000 KN



RESUMEN DE CORTANTES

	POSITIVO	NEGATIVO
Apoyo 1	3.755 KN	-
Centro de luz tablero	885 KN	-
Clave del arco	351 KN	-
Arranque arco	395 KN	-

Tabla 34: Resumen de cortantes para los puntos más singulares del puente. Análisis dinámico. V= 1 km/h.

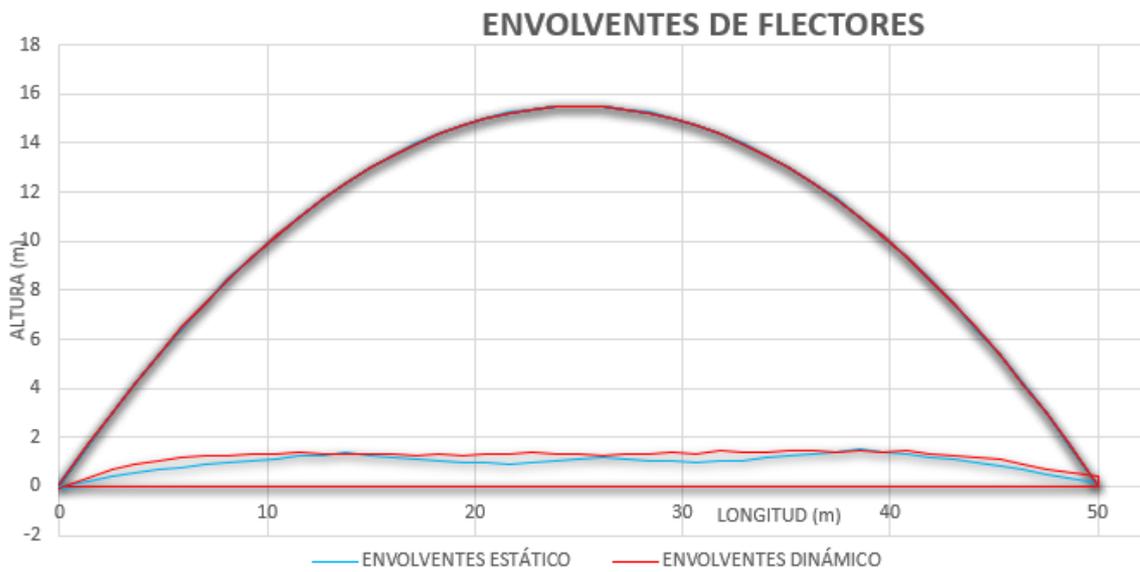


Ilustración 150: Análisis dinámico. V= 1 km/h. Comparación de envolventes de flectores. Escala 1m/5.000 KN

RESUMEN DE FLECTORES

	POSITIVO	NEGATIVO
Apoyo 1	-	-
Centro de luz tablero	12.905 KN.m	-
Clave del arco	-	-159 KN.m
Arranque arco	1597 KN.m	-471 KN.m

Tabla 35: Resumen de flectores para los puntos más singulares del puente. Análisis dinámico. V= 1 km/h.

Las diferencias entre el caso estático y el caso de V= 1 Km/h son mínimas si se visualizan los datos en las Ilustraciones 148,149,150 las diferencias entre uno y otro caso puede ser debido a que la carga aún tiene cierta velocidad, mientras más se acerque la carga a 0 Km/h más se parecerán ambos resultados.



7.4.2 Influencia de la variación del peralte del arco.

7.4.2.1 Peralte original del puente 1/3,3.

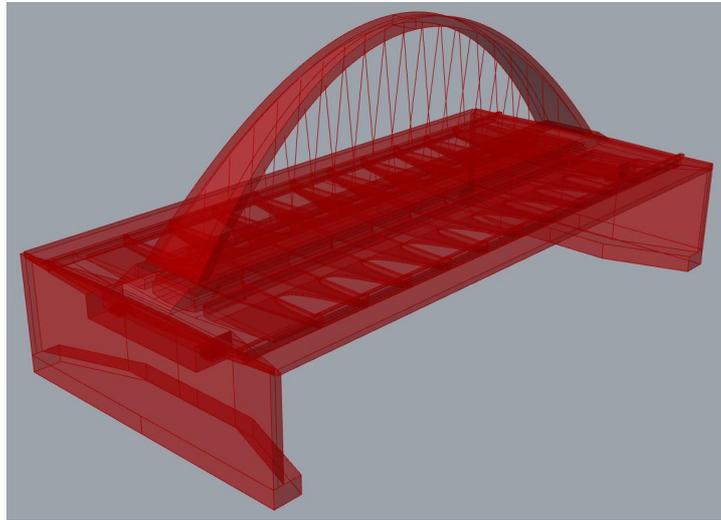


Ilustración 151: Vista general del puente arco de las Oblatas para el caso original.

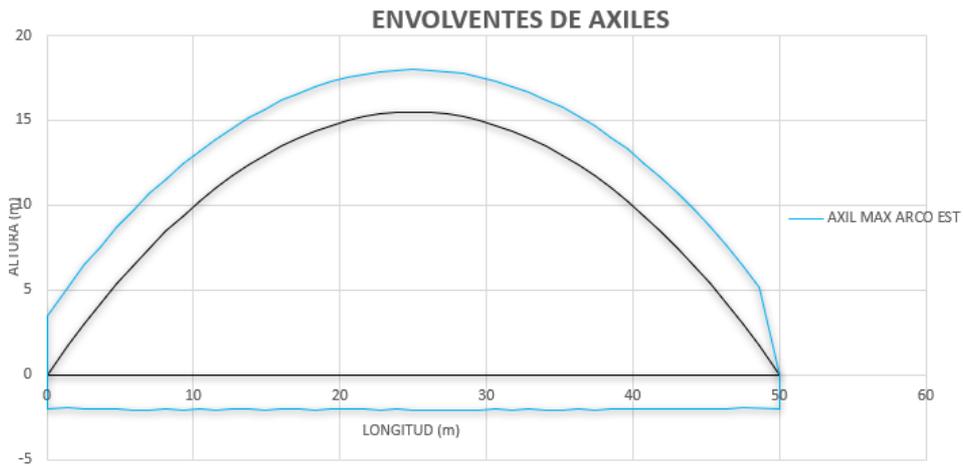


Ilustración 152: Envolventes de axiles. Escala 1m/5.000 KN

RESUMEN DE AXILES

Apoyo 1	-10.209 KN
Centro de luz tablero	-10.202 KN
Clave del arco	12.522 KN
Arranque arco	17.213 KN

Tabla 36: Resumen de axiles para los puntos más singulares del puente.

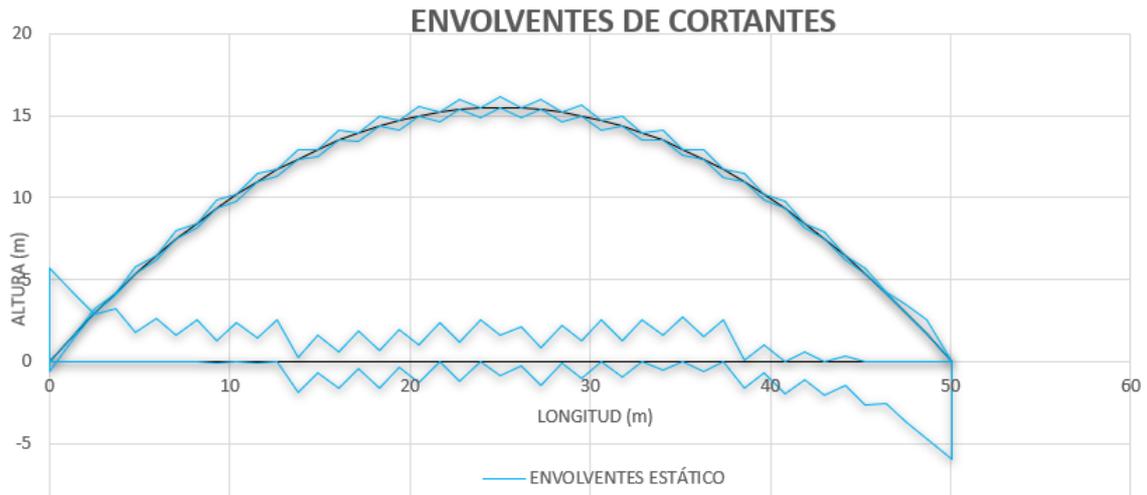


Ilustración 153: Envolventes de cortantes. Escala 1m/500 KN

RESUMEN DE CORTANTES

Apoyo 1	2.837 KN
Centro de luz tablero	1.260 KN
Clave del arco	320 KN
Arranque arco	450 KN

Tabla 37: Resumen de cortantes para los puntos más singulares del puente.

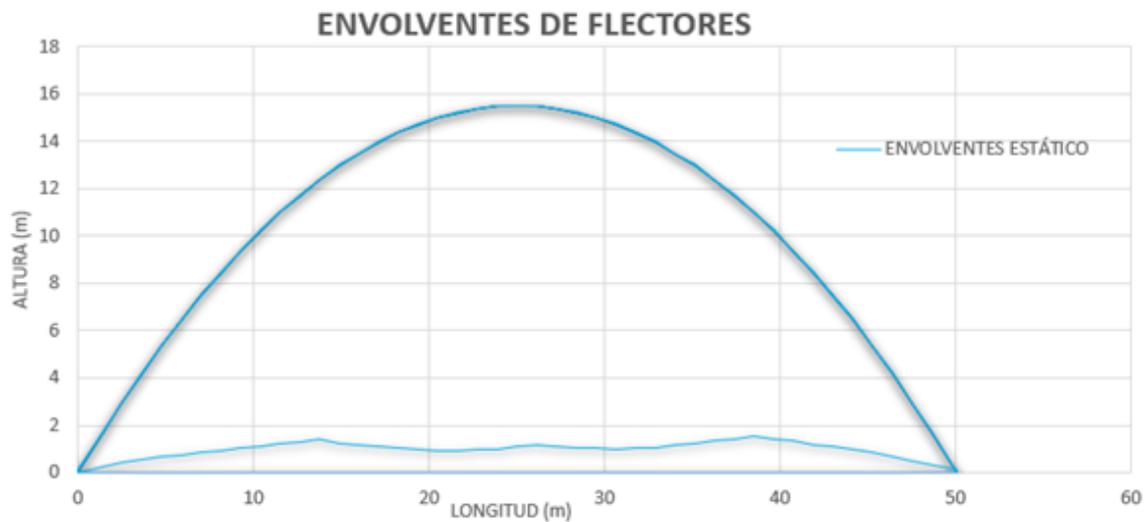


Ilustración 154: Envolventes de flectores. Escala 1m/10.000 KN.m



RESUMEN DE FLECTORES

Apoyo 1	0 KN.m
Centro de luz tablero	10.178 KN.m
Clave del arco	-149 KN.m
Arranque arco	631 KN.m

Tabla 38: Resumen de flectores para los puntos más singulares del puente.

7.4.2.2 Peralte 1/6.

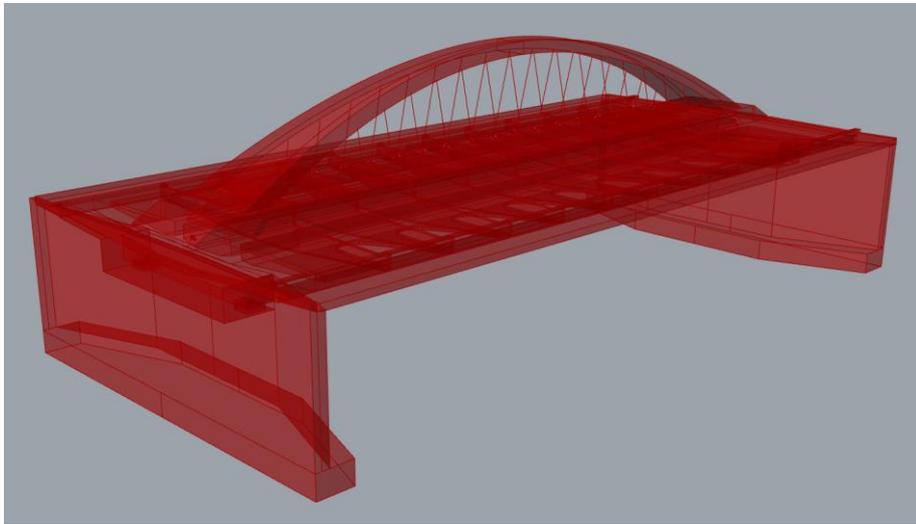


Ilustración 155: Vista general del puente arco de las Oblatas para el caso de $f/L = 1/6$.

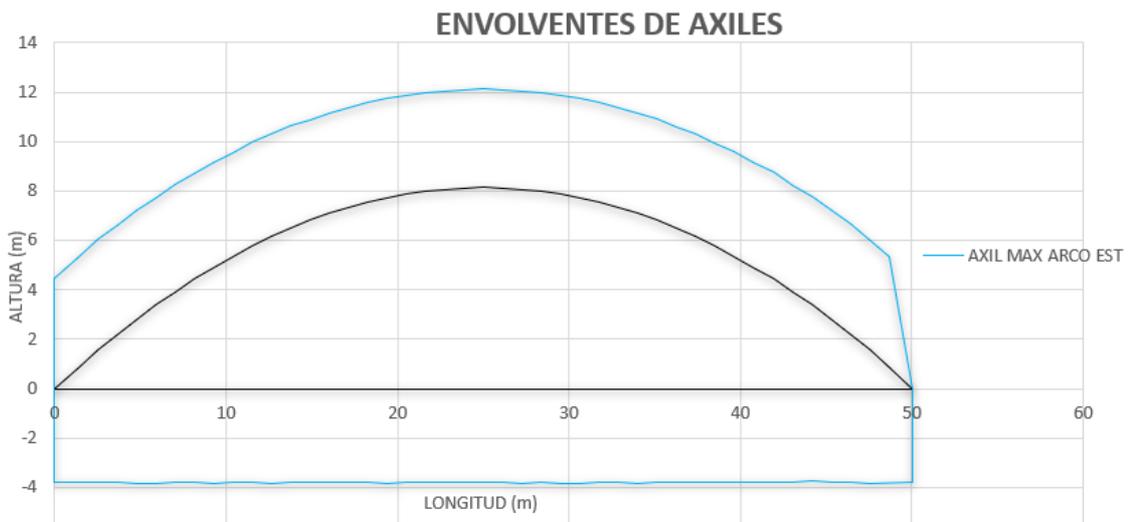


Ilustración 156: $f/L = 1/6$. Envolventes de axiles. Escala 1m/5.000 KN



RESUMEN DE AXILES

Apoyo 1	-19.029 KN
Centro de luz tablero	-18.994 KN
Clave del arco	19.890 KN
Arranque arco	22.215 KN

Tabla 39: Resumen de axiles para los puntos más singulares del puente. $f/L = 1/6$.

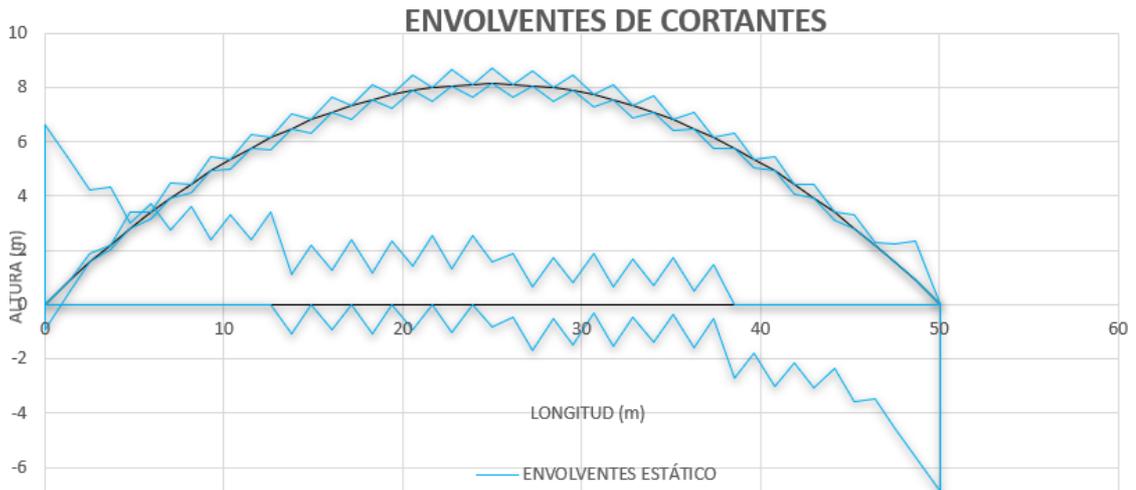


Ilustración 157: $f/L = 1/6$. Envolventes de cortantes. Escala 1m/500 KN

RESUMEN DE CORTANTES

Apoyo 1	3.314 KN
Centro de luz tablero	1260 KN
Clave del arco	286 KN
Arranque arco	717 KN

Tabla 40: Resumen de cortantes para los puntos más singulares del puente. $f/L = 1/6$.

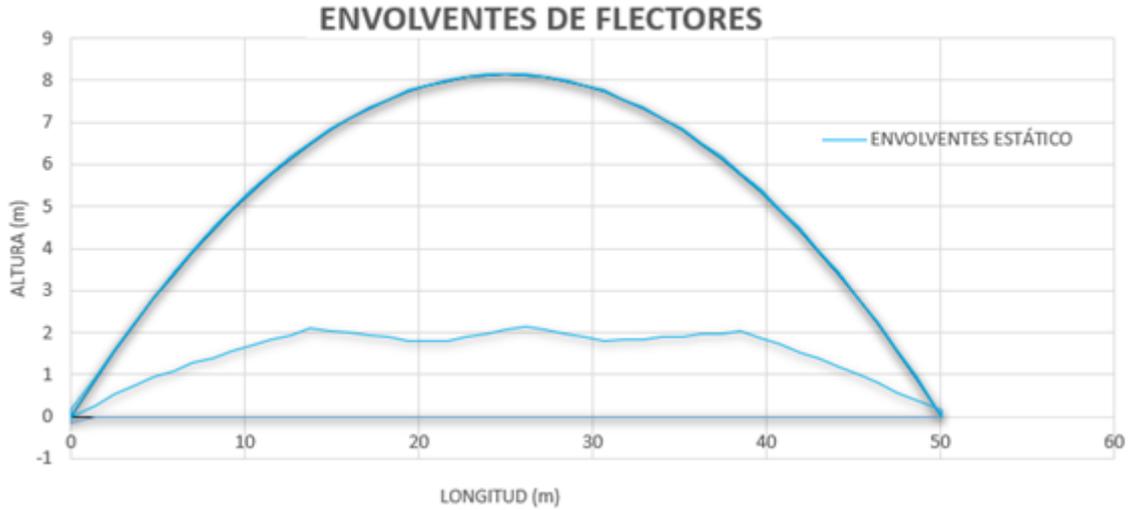


Ilustración 158: $f/L = 1/6$. Envolventes de flectores. Escala 1m/10.000 KN.m

RESUMEN DE FLECTORES

Apoyo 1	0 KN.m
Centro de luz tablero	19.621 KN.m
Clave del arco	61 KN.m
Arranque arco	590 KN.m

Tabla 41: Resumen de flectores para los puntos más singulares del puente. $f/L = 1/6$.

7.4.2.3 Peralte 1/8.

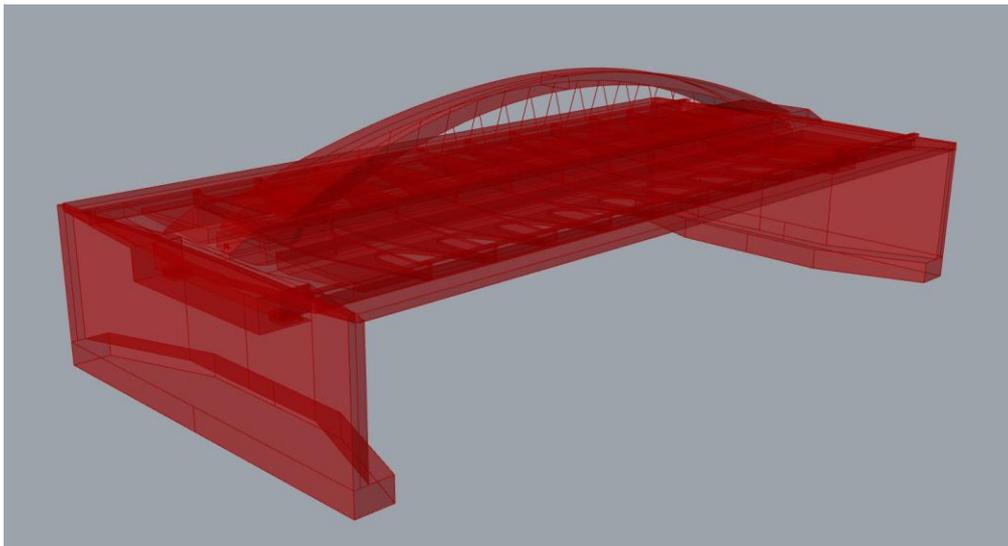


Ilustración 159: Vista general del puente arco de las Oblatas para el caso de $f/L=1/8$.

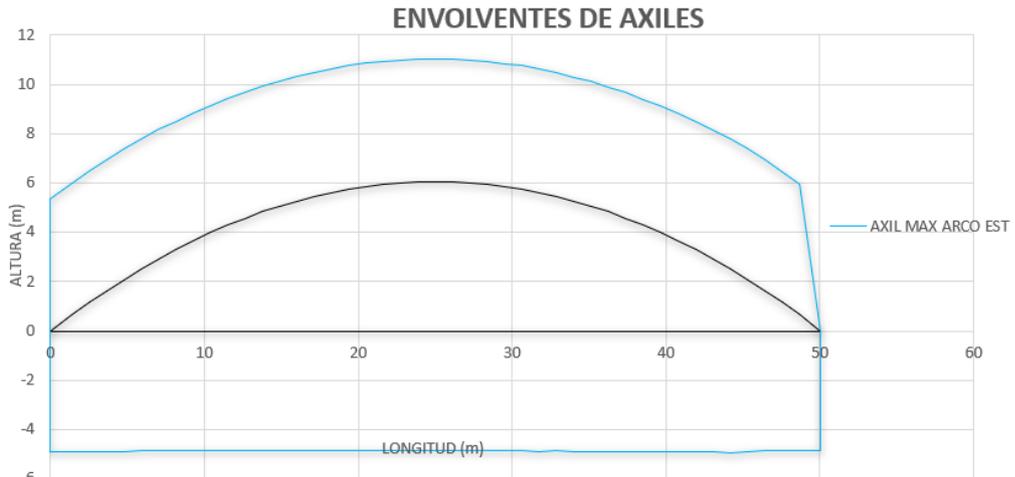


Ilustración 160: $f/L=1/8$. Envolventes de axiles. Escala 1m/5.000 KN

RESUMEN DE AXILES

Apoyo 1	-24.471 KN
Centro de luz tablero	-24.363 KN
Clave del arco	24.848 KN
Arranque arco	26.425 KN

Tabla 42: Resumen de axiles para los puntos más singulares del puente. $f/L=1/8$

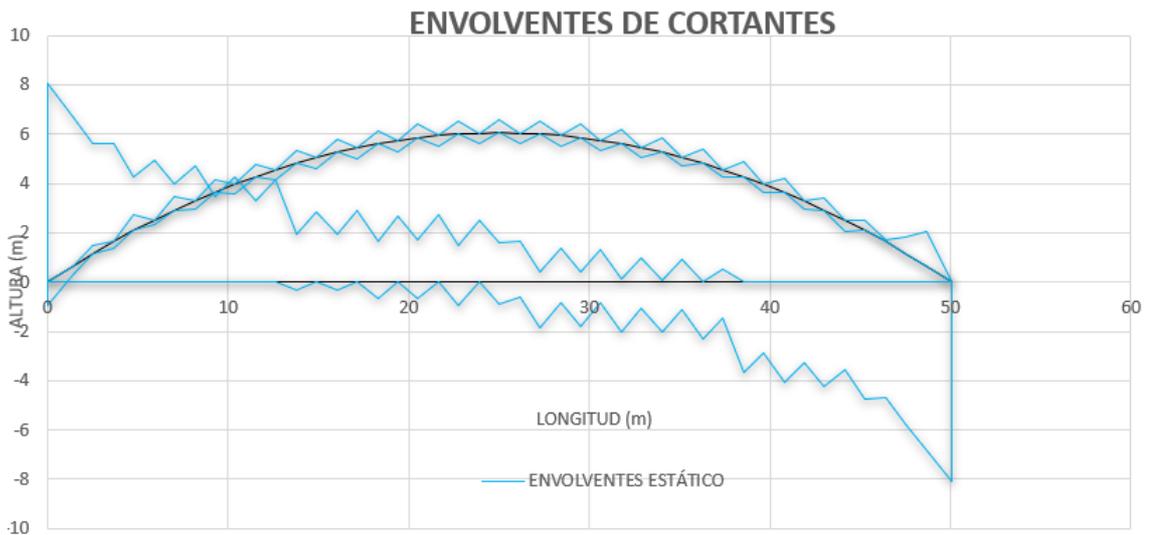
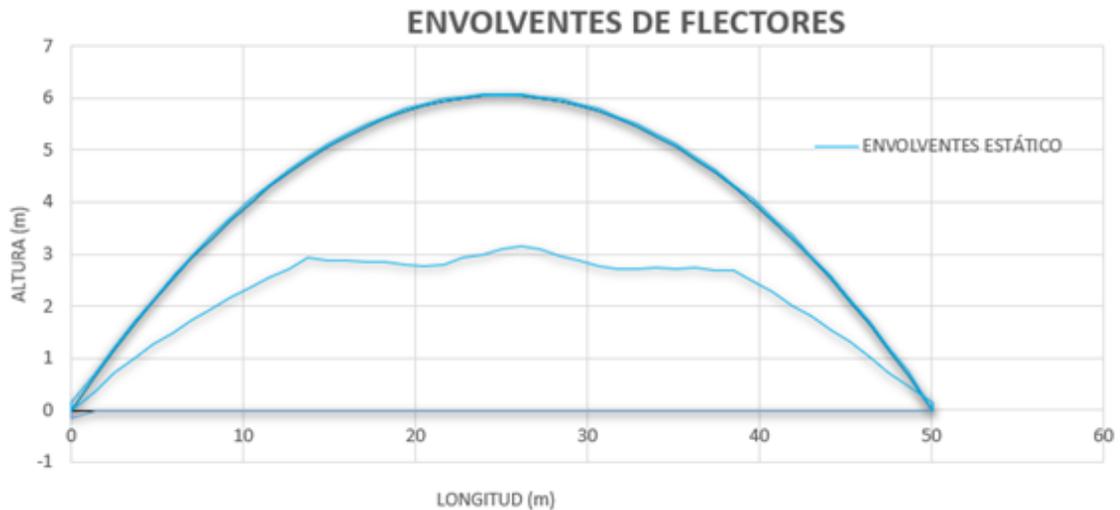


Ilustración 161 $f/L=1/8$. Envolventes de cortantes. Escala 1m/500 KN

**RESUMEN DE CORTANTES**

Apoyo 1	4016 KN
Centro de luz tablero	1.260 KN
Clave del arco	271 KN
Arranque arco	692 KN

Tabla 43: Resumen de cortantes para los puntos más singulares del puente. $f/L=1/8$.*Ilustración 162: $f/L=1/8$. Envolturas de flectores. Escala 1m/10.000 KN.m***RESUMEN DE FLECTORES**

Apoyo 1	0 KN.m
Centro de luz tablero	29.823 KN.m
Clave del arco	202 KN.m
Arranque arco	766 KN.m

Tabla 44: Resumen de flectores para los puntos más singulares del puente. $f/L=1/8$

Estudiando los resultados y visualizando las diferentes tendencias en la estructura, como ya era de esperar, cuanto menor sea el peralte del arco, mayores reacciones horizontales tendrá el puente. Los momentos por otro lado, también se disparan a medida que se disminuye el peralte.

Entre las tres disposiciones estudiadas gracias a la herramienta paramétrica Grasshopper, la idónea en cuanto esfuerzos, es la disposición real con flecha 15,7m. Sin embargo, el peralte es cercana a $1/3$, lo que rompe con la tendencia de diseño actual



resultando menos estético. Por lo que, si el peralte $1/6$ o $1/8$ cumplieran con las comprobaciones seccionales pertinentes, sería una mejor opción para el diseño en la actualidad.



8. RESUMEN DE RESULTADOS

8.1 VARIACIÓN DE VELOCIDAD DE PASO DEL VEHÍCULO

En este apartado se expondrán los resultados de una manera más concreta visualizando en qué porcentaje respecto al caso estático varían los esfuerzos para el caso del paso de la carga viva por la estructura.

Δ AXILES

	<i>V = 40 km/h</i>	<i>V = 20 Km/h</i>	<i>V = 5 Km/h</i>	<i>V = 1 Km/h</i>
Apoyo 1	99%	88%	47%	12%
Centro de luz tablero	105%	92%	46%	9%
Clave del arco	96%	85%	45%	11%
Arranque arco	93%	80%	42%	8%

Δ CORTANTES

	<i>V = 40 km/h</i>	<i>V = 20 Km/h</i>	<i>V = 5 Km/h</i>	<i>V = 1 Km/h</i>
Apoyo 1	108%	103%	58%	32%
Centro de luz tablero	81%	16%	85%	14%
Clave del arco	87%	71%	33%	4%
Arranque arco	204%	185%	88%	29%

Δ FLECTORES

	<i>V = 40 km/h</i>	<i>V = 20 Km/h</i>	<i>V = 5 Km/h</i>	<i>V = 1 Km/h</i>
Apoyo 1	-	-	-	-
Centro de luz tablero	188%	138%	72%	8%
Clave del arco	215%	155%	48%	8%
Arranque arco	54%	39%	9%	6%



8.2 VARIACIÓN DE PERALTE DEL ARCO

Una vez calculados los esfuerzos para las distintas geometrías propuestas, se mostrarán los resultados como variación de esfuerzos frente al estado original de la estructura para un estado de combinación frecuente de carga viva + peso propio + carga muerta.

Δ Esfuerzos para $f/L = 1/6$

	AXIL	CORTANTE	FLECTOR
Apoyo 1	86%	17%	0%
Centro de luz tablero	86%	0%	93%
Clave del arco	59%	-11%	-141%
Arranque arco	29%	59%	-6%

Δ Esfuerzos para $f/L = 1/8$

	AXIL	CORTANTE	FLECTOR
Apoyo 1	140%	42%	0%
Centro de luz tablero	139%	0%	193%
Clave del arco	99%	-15%	36%
Arranque arco	54%	54%	21%

8.3 ESTUDIO DEL PESO PROPIO

Para conocer más a fondo en qué medida afecta el cambio de la geometría a la estructura, se realiza un análisis para determinar el ahorro de material por cada distinta solución.

Para ello, se analiza el puente únicamente a efectos de peso propio y se calculan sus reacciones. Teniendo el modelo dinámico para cada caso de peralte del arco, esto resulta muy sencillo de ejecutar en OOFEM, ya que, con solo eliminar todas las condiciones de contorno excepto las de los apoyos y el peso propio y cambiando el modelo de cálculo a estático, se obtendría el código para el análisis de la influencia de la variación del peralte del arco para las diferentes soluciones adoptadas.



En las siguientes ilustraciones se muestran las diferentes reacciones obtenidas en los apoyos para el caso de cada peralte analizado.

R E A C T I O N S O U T P U T :

```
Node      79 iDof  3 reaction  7.7733e+06  [bc-id: 1]
Node      80 iDof  3 reaction  7.7863e+06  [bc-id: 1]
```

Ilustración 163: Reacciones en los apoyos (N) para $f = 15,7$ m

R E A C T I O N S O U T P U T :

```
Node      79 iDof  3 reaction  7.4649e+06  [bc-id: 1]
Node      80 iDof  3 reaction  7.4039e+06  [bc-id: 1]
```

Ilustración 164: Reacciones en los apoyos (N) para $f = 8,34$ m

R E A C T I O N S O U T P U T :

```
Node      79 iDof  3 reaction  7.2996e+06  [bc-id: 1]
Node      80 iDof  3 reaction  7.2820e+06  [bc-id: 1]
```

Ilustración 165: Reacciones en los apoyos (N) para $f = 6,26$ m

Los diferentes resultados se exponen en la tabla siguiente.

ΔP_p RESPECTO AL CASO ORIGINAL

	KN	(%)
Flecha = 15,7 m	15.559,6	-
Flecha = 8,34 m	14.868,8	4,43%
Flecha = 6,26 m	14.581,6	6,28%

Tabla 45: Variación del peso propio para los diferentes casos de estudio respecto el caso original



9. CONCLUSIONES

En este último capítulo se expondrán las conclusiones relativas a los diferentes análisis realizados y respecto a las metodologías empleadas en el proceso. Aunque algunos de los puntos siguientes ya han sido mencionados en el documento, es de gran importancia señalar las conclusiones obtenidas.

9.1 CONCLUSIONES RELATIVAS A LAS HERRAMIENTAS PARAMÉTRICAS COMBINADAS CON LA HERRAMIENTA OOFEM

Las herramientas paramétricas como Grasshopper, constituyen una solución para el modelado que impacta en gran medida en la manera de enfocar las diferentes alternativas de diseño de estructuras como el Puente de las Oblatas, beneficiándose de **poder modificar el modelo al antojo del usuario**.

Las limitaciones en cuanto a la modificabilidad del modelo son nulas, o, mejor dicho, la limitación la establece el afán del propio usuario por buscar la mayor precisión y desglose de los parámetros a emplear. Esto resulta en un **ahorro de tiempo significativo** y en una era en la que la producción y la inmediatez forman parte del día a día de la ingeniería, el tiempo es un bien muy preciado.

Se ha mostrado que es posible la conexión entre un programa de modelado paramétrico y uno de análisis estructural, en concreto, **Grasshopper, que posee herramientas para extraer características del modelo 3D con las que alimentar el modelo de cálculo con OOFEM**.

La conexión entre la herramienta de modelado paramétrico y el software de cálculo OOFEM es óptima, ya que Grasshopper posee la capacidad de traspasar las características del modelo al mismo formato de entrada que éste admite, el formato texto. Esa es la principal ventaja de utilizar herramientas paramétricas que encajen correctamente con las necesidades de alimentación del programa de cálculo; **puede automatizarse la entrada de datos a OOFEM directamente desde el modelo 3D del puente de manera que las variaciones geométricas, de condiciones de contorno, cargas o características de los materiales se actualicen en el modelo de cálculo de manera sencilla y, sobre todo, rápida sin la necesidad de generar otro modelo de cálculo que incluya esas nuevas características**.

OOFEM no dispone de interfaz para la visualización de datos, por lo que el usuario debe hacer uso de herramientas de procesamiento de datos como hojas de cálculo para divisar los resultados.

Para análisis estáticos o análisis de estructuras sencillas, resulta sencillo organizar y vislumbrar los resultados. Sin embargo, los resultados aportados por estructuras complejas con una cantidad de nodos considerable o el resultado de análisis estáticos son complicados de tratar por la cantidad de datos a organizar y las propias limitaciones



de las hojas de cálculo al tratar datos masivos. Esto puede solucionarse con la herramienta VBA de manera sencilla.

9.2 CONCLUSIONES SOBRE EL ANÁLISIS DINÁMICO EN OOFEM

El programa **carece de la capacidad para realizar un análisis dinámico modal** mas puede estudiarse el efecto dinámico sobre la estructura mediante módulos como DIIDynamic que hacen uso de métodos de integración directa como el método de Newmark para hallar la respuesta estructural.

La simulación de las cargas vivas es posible, pudiendo configurar la velocidad de estudio de manera sencilla teniendo en cuenta la posición de los nodos de paso. Por lo tanto, el uso de OOFEM para este tipo de análisis es adecuado.

El efecto dinámico de la carga viva influye de manera notable en los esfuerzos, llegando a quintuplicar los resultantes del estudio estático en caso del cortante. Sin embargo, estos **tienden al estado estático cuando se disminuye la velocidad de la carga**.

La naturaleza dinámica de la carga hace que, por la vibración del tablero, aparezcan **momentos negativos en el centro** de luz del mismo mientras que en el caso estático no existen.

En cuanto al arco, en este aparecen cortantes mucho mayores dado que el tablero también sufre de una amplificación de estos esfuerzos y por tanto parte de ellos son transmitidos por las péndolas hasta el arco.

A pesar del aumento de tensiones generalizado en la estructura aumentar la velocidad del vehículo pesado, el arco no se enfrenta a momentos significativos en comparación con los sufridos por el tablero, por lo que el comportamiento antifunicular del mismo es claro.

El esfuerzo **axil** tanto del arco como del tablero, se ve **incrementado** ya que, **al soportar el arco mayores cargas transmitidas por las péndolas, este las debe redirigir a los apoyos como axil, traccionando aún más el tablero**. Este efecto puede verse anulado por el pretensado longitudinal del tablero al ser este prácticamente horizontal.

La magnitud de datos de resultado en el estudio dinámico puede llegar a ser tal que no pueda ser analizado por herramientas convencionales como Excel, ya que estos están limitados a la hora de realizar un tratamiento extensivo de datos. El tamaño del fichero de salida dependerá de la discretización temporal.

La organización de resultados mediante tablas dinámicas es crucial para el uso de OOFEM como programa de cálculo. Para comprender el comportamiento de la estructura frente a una carga móvil es necesaria la visualización de tanto los esfuerzos como los desplazamientos por cada instante de tiempo; necesidad que también puede alcanzarse mediante tablas y gráficos dinámicos.



9.3 SOBRE EL COMPORTAMIENTO DEL PUENTE ARCO DE LAS OBLATAS

Los puentes arco constituyen una solución de funcionamiento muy intuitivo y es que **se basan en el concepto básico de la antifunicularidad**. Las características del puente hacen que la carga mayormente debida al tablero, soportada por el arco mediante la acción de las péndolas, sea la indicada para comprimir el arco y traccionar el tablero.

Por otro lado, la influencia del peralte del arco queda muy definida con los casos estudiados y es que los arcos deben tener una relación flecha/luz tal, que permita al arco conducir los esfuerzos de manera que este trabaje a compresión.

Al tender más el arco, aparecen axiles mucho mayores que en el caso del peralte real por la mayor componente horizontal del arco que hace traccionar al tablero en mayor medida que en el caso original.

En cuanto a los momentos en el arco, al disminuir la flecha se comienzan a apreciar flectores positivos en la clave y los momentos negativos en los arranques, que aumentan hasta tres veces el de la alternativa original.

9.4 ALTERNATIVA ÓPTIMA

Las alternativas estudiadas en cuanto a la variación geométrica son las siguientes.

- Peralte 1/6
- Peralte 1/8

A continuación, se mostrarán las imágenes de las diferentes configuraciones propuestas.



Ilustración 166: Alternativas adoptadas en configuración de flecha/luz del arco. 1/8, 1/6 y 1/3.

Las alternativas estudiadas para la variación de la flecha del arco traen consigo distintas maneras de trabajar de la estructura. Como ya se ha comentado en el documento, el funcionamiento del Puente Arco de las Oblatas consiste de un arco que absorbe parte



de las cargas transmitidas por el tablero para reconducirlas a los apoyos únicamente por axil ya que el arco toma una directriz antifunicular de cargas. Sin embargo, al variar las características de la flecha del arco, se modifica el funcionamiento de la estructura.

En primer lugar, para una relación flecha/luz del arco de 1/6, toda la estructura presenta mayores axiles, el arco tracciona el tablero hasta un 86% más ya que la componente horizontal de los axiles transmitidos a los apoyos es mayor. Sin embargo, en cuanto a los demás esfuerzos sufridos por el arco, estos se ven reducidos, en un 140% en el caso de los momentos flectores y una reducción del 11% del cortante en clave. Esto, debido a que la línea de presiones se encuentra más centrada en la sección, adoptando un mejor funcionamiento antifunicular y funcionando casi exclusivamente a compresión.

Además, la opción de decantarse por el peralte 1/6 reduciría el volumen de material utilizado en un 4,4% reduciendo las reacciones verticales en los apoyos y por tanto transmitiendo menores tensiones al terreno.

Sin embargo, el hecho de que el tablero se encuentre más traccionado implicaría una reducción del coeficiente de seguridad frente a tracciones en el tablero, por lo que sería conveniente el aumento de la cuantía de pretensado longitudinal para abordar esos esfuerzos.

En cuanto a la alternativa con relación 1/8, los esfuerzos axiles siguen aumentando de manera drástica hasta un 141% para el tablero siguiendo la tendencia de traccionar más el tablero cuanto menor es el peralte. En cuanto a los momentos, estos aumentan respecto a la opción de peralte 1/6 y respecto al peralte original. En este caso, en un 36% lo que indica un distanciamiento de las líneas de presiones y por lo tanto mayor excentricidad para la clave del arco y para el arranque.

Por otro lado, el peralte de 1/8 presenta menor uso de material llegando hasta una reducción en volumen del 6,3% por lo que las tensiones transmitidas al terreno serían menores aún.

Por lo tanto, tanto por el ahorro de material y por tanto disminución de esfuerzos transmitidos al tablero como por la optimización del funcionamiento del arco, la opción de peralte 1/6 presenta mayores beneficios que tanto la disposición original como la opción de peralte 1/8, la cual aumenta el axil en el tablero aún más, por lo que la cuantía de pretensado, en contraposición debería ser mayor aún. Por otro lado, la relación flecha luz 1/8 genera una mayor excentricidad de la línea de presiones en el arco, haciendo aparecer mayores momentos que en la configuración original.

En conclusión, para las hipótesis realizadas en el presente trabajo, la opción de peralte 1/6 resulta ser la mejor configuración flecha/luz para el puente.



BIBLIOGRAFÍA

1. Pamplona, Ayuntamiento de. Parque Fluvial de Pamplona. [En línea] Ayuntamiento de Pamplona. [Citado el: 05 de 01 de 2022.] http://www.parquefluvialdepamplona.es/parquefluvial/es/rio_arga/rochapea_index.asp?Hito=rochapea_puente_oblatas.
2. Patzák, Borek. ACTA POLYTECHNIA. [En línea] 06 de 2004. [Citado el: 09 de 01 de 2022.] <https://ojs.cvut.cz/ojs/index.php/ap/article/view/618/450>.
3. —. *OOFEM. Input data format specification*. Praga : Faculty of Civil Engineering, Department of Structural Mechanics, 2018.
4. *EHE - 08 Instrucción de Hormigón Estructural*. s.l. : Ministerio de Fomento, 2011.
5. *Instrucción sobre las acciones a consideraren el proyecto de puentes de carretera: IAP-11*. s.l. : Ministerio de fomento. Direccion General de Carreteras, 2012.
6. APUNTES. APUNTES, Revista digital de Arquitectura. *Revista digital de Arquitectura*. [En línea] 04 de Octubre de 2019. [Citado el: 08 de Febrero de 2022.] <http://apuntesdearquitecturadigital.blogspot.com/2019/10/el-arquitecto-gaudi-y-la-catenaria-las.html>.
7. *Arcos. Funicularidad*. Torres, Javier. s.l. : Revista de Edificación, Marzo de 1989, Revista de Edificación, pág. 16.
8. Haro, Javier Sánchez. *Desarrollo de teoría sobre impactos. Método simplificado de cálculo de impactos en estructuras*. 2017.