



**Universidad de Valladolid**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES**

**UNIVERSIDAD DE VALLADOLID**

**ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES**

**Grado en Ingeniería Mecánica**

**Cargas móviles. Aplicación al dimensionado  
de un puente grúa de 30 m y 20 t.**

**Autor:**

**Álvarez-Touchard Vita, Fernando Juan**

**Tutor:**

**Lorenzana Iban, Antolín**

**Construcciones Arquitectónicas, IT y  
MMC y Teoría de  
Estructuras/Mecánica de los Medios  
Continuos y Teoría de Estructuras**

**Valladolid, Junio 2020.**



## **RESUMEN:**

El objetivo de este TFG consiste en realizar el dimensionado de la viga y del pórtico de la viga carril que componen la estructura total de un puente grúa, al igual que estudiar la influencia de determinadas cargas móviles desplazándose sobre dichas estructuras, es importante tener en cuenta dichas cargas en el diseño de las estructuras debido a que durante las operaciones de trabajo, pueden afectar a las mismas.

El desarrollo de este TFG se ha basado en el cálculo teórico-analítico de estructuras apoyado en el software de elementos finitos "SAP2000", permitiendo de esta manera verificar los resultados y obtener determinados valores cuando el primer método no puede ser empleado debido a la complejidad o al volumen de cálculo.

Todo ello desde una perspectiva ingenieril, es decir, teniendo en cuenta la respuesta tensional y frecuencial de las estructuras, pero también el coste económico de su fabricación entre otros factores.

**Palabras clave:** Influencia de cargas móviles en el dimensionado de estructuras.

## **ABSTRACT:**

The objective of this TFG is to carry out the dimensioning of the beam and the gantry of the rail beam that make up the total structure of a bridge crane. As well as studying the influence of certain mobile loads moving on these structures, it is important to take these loads into account in the design of the structures due to the fact that they can affect them during working operations.

The development of this TFG has been based on the theoretical-analytical calculation of structures supported by the finite element software "SAP2000", allowing in this way to verify the results and to obtain certain values when the first method cannot be used due to the complexity or volume of the calculation.

All this from an engineering perspective, that is, taking into account the stress and frequency response of the structures, but also the economic cost of their manufacture, among other factors.

Translated with [www.DeepL.com/Translator](http://www.DeepL.com/Translator) (free version)

**Keywords:** Influence of moving loads on the dimensioning of structures.



## ÍNDICE GENERAL:

<b>Capítulo 1.</b> Introducción y objetivos.....	19
<b>1.1.</b> Cargas móviles en Ingeniería Industrial.....	19
<b>1.2.1.</b> Principales componentes de un puente grúa .....	20
<b>1.2.2.</b> Predimensionado del puente grúa .....	26
<b>1.2.3.</b> Definición precisa del problema de estudio: características geométricas del puente grúa .....	27
<b>1.3.</b> Objetivos.....	29
<b>Capítulo 2.</b> Dimensionado de la viga del puente grúa .....	31
<b>2.1.</b> Dimensionado de la viga del puente grúa como modelo de barras ("Frames").....	32
<b>2.1.1.</b> Estudio de la respuesta de la estructura al aplicar cargas puntuales sobre la misma: .....	32
<b>2.1.2.</b> Dimensionado del perfil de la viga del puente grúa.....	32
<b>2.1.2.1.</b> Selección del perfil.....	32
<b>2.1.1.1.</b> Simplificar la carga total operativa como una fuerza puntual .....	34
<b>2.1.1.1.1.</b> Carga aplicada en el centro de la viga, es decir en $x=15$ metros .....	35
<b>2.1.1.1.2.</b> En uno de los dos extremos de la viga .....	37
<b>2.1.1.1.3.</b> Aplicación del criterio de Von Misses para dimensionar el perfil de la viga de la primera estructura del puente grúa y comprobación de la flecha máxima de la misma .....	39
<b>2.1.1.2.</b> Simplificar la carga total operativa como dos fuerzas puntuales, separadas a una distancia de 1,5 metros (que corresponde a la separación entre los dos ejes del carro que se me mueve por esta primera estructura del puente grúa, es decir la batalla del carro).....	42
<b>2.1.1.2.1.</b> Primera carga situada en $x=14,25$ m, y segunda carga en $x=15,75$ m: .....	44
<b>2.1.1.2.2.</b> Primera carga situada en $x=0,5$ m, y segunda carga en $x=2$ m.....	46
<b>2.1.1.2.3.</b> Aplicación del criterio de Von Misses para dimensionar el perfil de la viga de la primera estructura del puente grúa.....	48
<b>2.2.</b> Concepto y aplicación de las líneas de influencia para la viga del puente grúa .....	51
<b>2.2.1.</b> Línea de influencia generada por una carga móvil unitaria.....	51
<b>2.2.1.1.</b> Cálculo teórico aplicando ecuaciones de equilibrios en una estructura isostática .....	51
<b>2.2.1.2.</b> Aplicando fórmulas de prontuarios .....	52
<b>2.2.1.3.</b> Mediante el software "SAP2000" .....	54
<b>2.2.2.</b> Línea de influencia generada por dos cargas móviles unitaria separadas una distancia fija (tren de cargas).....	55
<b>2.2.2.1.</b> Cálculo teórico mediante equilibrios de una estructura isostática .....	56

2.2.2.2. Aplicando fórmulas de prontuarios .....	57
2.2.3.1. Carga puntual de 20 toneladas.....	58
2.2.3.2. Dos cargas puntuales de valor total 20 toneladas.....	60
<b>2.3. Diagramas de envolventes de esfuerzos cortantes, momentos flectores y desplazamientos de la viga del puente grúa .....</b>	<b>62</b>
2.3.1. Método teórico .....	62
2.3.1.1. Método teórico : Una única fuerza puntual de valor 196000 N.....	63
2.3.1.2. Método teórico : Dos fuerzas puntuales de valor 98000 N cada una .....	65
2.3.2. Cálculo mediante el software de cálculo "SAP2000" .....	68
2.3.2.1. Cálculo mediante el software de cálculo "SAP2000": Una única fuerza puntual de valor 196000 Newtons.....	68
2.3.2.2. Cálculo mediante el software de cálculo "SAP2000": Dos fuerzas puntuales de valor 98000 Newtons cada una.....	69
2.3.3. Comparación entre los diagramas envolventes y los diagramas de esfuerzos para las posiciones críticas del carro sobre la viga del grúa puente .....	71
2.3.3.1. Aplicación de una única carga puntual de valor 196000 N .....	72
2.3.3.1.1. Carro situado en el centro de la viga ( $x=15$ metros).....	72
2.3.3.1.2. Carro situado en el extremo izquierdo de la viga ( $x=1,25$ metros).....	72
2.3.3.2. Aplicación de dos cargas puntuales de valor 98000 N cada una de ellas .....	73
2.3.3.2.1. Carro situado en el centro de la viga ( $x_1=14,25$ metros, $x_2=15,75$ metros).73	
2.3.3.2.2. Carro situado en el extremo izquierdo de la viga ( $x_1=0,5$ metros, $x_2=$ metros).....	73
<b>2.4. Dimensionado de la viga del puente grúa como modelo de chapas ("Shells").Simplificar la carga total operativa como cuatro fuerzas puntuales . Estudio del fenómeno de pandeo lateral y abolladura sobre la viga del puente grúa.....</b>	<b>74</b>
2.4.2. Caso centro de la viga, centro del carro en $x=15$ metros (centro de la viga) .....	74
2.4.3. Caso extremo izquierdo, centro del carro en $x=1,25$ metros (centro de la viga).....	77
2.4.4. Causa del por qué no ha sido empleado un perfil doble "T" para la fabricación de la viga del puente grúa.....	79
2.4.4.1. Perfil doble T de dimensiones y espesores similares a los del perfil tubular rectangular seleccionado.....	80
2.4.4.1.1. Caso centro de la viga, centro del carro en $x=15$ metros (centro de la viga) .....	81
2.4.4.1.2. Caso extremo izquierdo, centro del carro en $x=1,25$ metros (extremo izquierdo de la viga).....	81
2.4.4.2. Selección de un perfil doble "T" en el que no se produzca el fenómeno de pandeo al aplicar la carga máxima operativa en cualquiera de sus dos posiciones más críticas.....	82
2.4.4.2.1. Caso centro de la viga, centro del carro en $x=15$ metros (centro de la viga) .....	82

2.4.4.2.2. Caso extremo izquierdo, centro del carro en $x=1,25$ metros (centro de la viga) .....	82
2.4.5. Dimensionado del carril por el que se mueve el carro que porta la carga sobre la viga del grúa puente.....	83
2.5. Tabla comparativa entre los diferentes valores para la respuesta tensional de la viga del puente grúa proporcionados por el software "SAP2000" .....	87
2.5.1. Perfil tubular rectangular con alas (cajón) de dimensiones $1,4 \times 1 \times 0,01 \times 0,005$ metros .....	87
2.5.1.1. Caso de carga central ( $x=15$ metros) .....	87
2.5.1.2. Caso de carga en el extremo izquierdo ( $x=1,25$ metros) .....	87
2.5.2. Perfil doble "T" .....	88
2.5.2.1. Perfil doble "T" de dimensiones $1,4 \times 1 \times 0,01 \times 0,005$ metros .....	88
2.5.2.1.1. Caso de carga central ( $x=15$ metros).....	88
2.5.2.1.2. Caso de carga en el extremo izquierdo ( $x=1,25$ metros).....	88
2.5.2.2. Perfil doble "T" de dimensiones $1,4 \times 1 \times 0,015 \times 0,008$ metros .....	88
2.5.2.2.1. Caso de carga central ( $x=15$ metros).....	88
2.5.2.2.2. Caso de carga en el extremo izquierdo ( $x=1,25$ metros).....	89
2.6. Tabla comparativa entre los valores para la respuesta tensional de la viga del grúa puente proporcionados por el software "SAP2000", comparados con los obtenidos de manera teórica.....	90
2.6.1. Para el perfil seleccionado en el diseño de la viga del grúa puente, de dimensiones $1,4 \times 1 \times 0,01 \times 0,005$ metros (carril= $0,06 \times 0,03$ metros) .....	91
2.6.2. Para el perfil de tipo doble "T", de dimensiones $1,4 \times 1 \times 0,01 \times 0,005$ metros (carril= $0,06 \times 0,03$ metros) .....	92
2.7. Respuesta frecuencial de la viga del puente grúa al posicionar una masa sobre la viga biapoyada en una determinada posición .....	93
2.7.1. Sin masa .....	95
2.7.2. Con masa en $x=15$ metros (centrada en la viga) .....	96
2.7.3. Con masa en $x=5$ metros (no centrada en la viga) .....	96
2.7.4. Con masa en $x=20$ metros (no centrada en la viga) .....	96
<b>Capítulo 3. Estructura sobre la que se mueve la viga del puente grúa: vigas carril.....</b>	<b>97</b>
3.1. Diseño de la viga carril mediante el software "SAP2000" .....	98
3.1.1. Desplazamiento (flecha) máximo.....	103
3.1.1.1. Para el peso propio de la estructura.....	103
3.1.1.1.1. Perfil vigas "IPE 400", despreciando el carril.....	104

<b>3.1.1.1.2.</b> Perfil vigas "IPE 400"+Carril , siendo las dimensiones del carril de valor 0,05x0,02 metros.....	105
<b>3.1.1.2.</b> Para la carga máxima de la estructura.....	106
<b>3.1.2.</b> Criterio de plastificación de Von Misses.....	106
<b>3.1.1.2.</b> Para la carga máxima de la estructura.....	107
<b>3.1.1.2.2.</b> Perfil vigas "IPE 400"+Carril , siendo las dimensiones del carril de valor 0,05x0,02 metros.....	108
<b>3.1.2.</b> Criterio de plastificación de Von Misses.....	109
<b>3.1.1.</b> Desplazamiento (flecha) máximo.....	113
<b>3.1.1.1.</b> Para el peso propio de la estructura.....	113
<b>3.1.1.2.</b> Para la carga máxima de la estructura.....	113
<b>3.1.2.</b> Criterio de plastificación de Von Misses.....	114
<b>3.1.3.</b> Fenómeno de pandeo lateral y abolladura.....	114
<b>3.1.3.1.</b> Dimensionar viga carril y pilares con un perfil "IPE 400".....	115
<b>3.1.4.</b> Estudio de la respuesta tensional de la viga carril debido a la aceleración del carro de polipasto y a la aceleración de la viga del grúa puente sobre la viga carril de la estructura.....	117
<b>3.1.4.1.</b> Desplazamiento (flecha) máximo.....	119
<b>3.1.4.1.1.</b> Peso propio de la estructura.....	119
<b>3.1.4.1.2.</b> Para la carga máxima de la estructura (Tren de cargas: el valor de cada una de las fuerzas es de 120434 N).....	119
<b>3.1.4.1.3.</b> Aplicación del tren de cargas anterior + Fuerzas generadas por la aceleración del puente grúa.....	120
<b>3.1.4.2.</b> Criterio de plastificación de Von Misses.....	121
<b>3.1.4.2.1.</b> Tren de cargas.....	121
<b>3.1.4.2.2.</b> Tren de cargas + Fuerzas debidas a la aceleración del puente grúa.....	121
<b>3.1.4.3.</b> Fenómeno de pandeo lateral y abolladura.....	124
<b>3.1.5.</b> Estudio de la respuesta tensional de la viga carril debido a la modificación de la aceleración en el eje "y" del pórtico de la viga carril.....	125
<b>3.1.6.</b> Estudio del pórtico de la viga carril como un soporte y un emparrillado.....	129
<b>3.1.6.1.</b> Estudio del pórtico girado 90° para la aplicación de un tren de cargas móvil mediante el software de cálculo "SAP2000".....	138
<b>3.2.</b> Línea de influencia para la viga carril.....	144
<b>3.2.1.</b> Línea de influencia para los factores de carga del fenómeno de pandeo lateral y abolladura.....	146
<b>3.2.1.1.</b> Perfil viga carril y pilares "IPE 400".....	147
<b>3.2.1.1.1.</b> Posición del centro carro en x=6,75 metros sobre la viga del grúa puente.....	147
<b>3.2.1.2.</b> Perfil viga carril y perfil pilares "HEB300".....	149

<b>3.2.1.3.</b> Perfil viga carril y perfil pilares "HEB300". Tren de cargas con cargas en los ejes "x", "y" y "z" .....	151
<b>3.2.2.</b> Líneas de influencia de los pilares del pórtico de la viga carril. ....	152
<b>3.2.3.</b> Línea de influencia del pórtico de la viga carril de la carga en el eje "y" en el pórtico "tumbado" (girado 90° en el eje "x") .....	159
<b>Capítulo 4.</b> Conclusión y líneas de futuro .....	165
Consideraciones adicionales.....	166
<b>Bibliografía y referencias</b> .....	167
<b>Anexo 1:</b> Guía para obtener líneas de influencia de una viga biapoyada mediante el software "SAP2000" .....	169
<b>Anexo 2:</b> Comprobación del criterio de superposición para cualquier tipo de viga .....	185
<b>2.1.</b> Método teórico. Aplicación del principio de superposición .....	186
<b>2.1.1.</b> Fuerza en el eje "x" .....	186
<b>2.1.2.</b> Fuerza en el eje "y" .....	188
<b>2.2.</b> Mediante el software de cálculo "SAP2000" .....	190
<b>2.2.1.</b> Fuerza en el eje "x" .....	190
<b>2.2.2.</b> Fuerza en el eje "y" .....	191
<b>Anexo 3:</b> Planos de definición del puente grúa.....	193



## ÍNDICE DE IMÁGENES:

Imagen 1. Puente grúa monorraíl [1].....	20
Imagen 2. Puente grúa birrail [2].....	20
Imagen 3. Grúa pórtico [3] .....	21
Imagen 4. Grúa semipórtico [4].....	21
Imagen 5. Grúa ménsula [5] .....	21
Imagen 6. Grúa brazo giratorio [6] .....	22
Imagen 7. Viga carril [7] .....	22
Imagen 8. Estructura genérica completa de un puente grúa [8].....	23
Imagen 9. Carro del puente grúa [9].....	24
Imagen 10. [10].....	24
Imagen 11. Testero de la viga del puente grúa [11] .....	24
Imagen 12. [12].....	25
Imagen 13. Gancho del puente grúa [13].....	25
Imagen 14. Cabina del puente grúa [14].....	25
Imagen 15. Vista lateral del puente grúa [15] .....	27
Imagen 16. Vista 3D del carro del puente grúa [16].....	28
Imagen 17. Vista 3D del carro del puente grúa [17].....	28
Imagen 18. Vista perfil del testero del puente grúa [18] .....	29
Imagen 19. Barra biapoyada. Simplificación de la viga del puente grúa .....	31
Imagen 20. Perfil cajón con alas de la viga del puente grúa .....	33
Imagen 21. Criterio de signos positivo empleado en los cálculos .....	35
Imagen 22. Aplicación de una carga centrada puntual en la viga biapoyada .....	35
Imagen 23. Esfuerzos internos en la viga biapoyada .....	35
Imagen 24. Diagramas de esfuerzos de la viga biapoyada.....	36
Imagen 25. Diagrama esfuerzos cortantes "V" .....	36
Imagen 26. Diagrama de momentos flectores "M" .....	36
Imagen 27. Aplicación de una carga puntual en el extremos de la viga biapoyada .....	37
Imagen 28. Esfuerzos internos en la viga biapoyada .....	38
Imagen 29. Diagramas de esfuerzos de la viga biapoyada.....	38
Imagen 30. Diagrama esfuerzos cortantes "V" .....	39
Imagen 31. Diagrama de momentos flectores "M" .....	39
Imagen 32. Vista planta del carro de polipasto .....	43
Imagen 33. Vista lateral del carro de polipasto .....	43
Imagen 34. Aplicación de dos cargas puntuales centradas sobre la viga biapoyada .....	44
Imagen 35. Esfuerzos internos en la viga biapoyada .....	45
Imagen 36. Diagramas de esfuerzos de la viga biapoyada.....	45
Imagen 37. Diagrama esfuerzos cortantes "V" .....	46
Imagen 38. Diagrama de momentos flectores "M" .....	46
Imagen 39. Aplicación de dos cargas puntuales sobre el extremo de la viga biapoyada .....	46
Imagen 40. Esfuerzos internos en la viga biapoyada .....	47
Imagen 41. Diagramas de esfuerzos de la viga biapoyada.....	47
Imagen 42. Diagrama esfuerzos cortantes "V" .....	48
Imagen 43. Diagrama de momentos flectores "M" .....	48

Imagen 44. Aplicación de una carga móvil unitaria sobre la viga biapoyada .....	51
Imagen 45. Esfuerzos internos en la viga biapoyada .....	52
Imagen 46. Tabla prontuario de aplicación de una carga móvil sobre una viga biapoyada [19]	52
Imagen 47. Línea de influencia de las reacciones de los extremos de la viga biapoyada.....	53
Imagen 48. Línea de influencia de los momentos flectores máximo y central de la viga biapoyada .....	53
Imagen 49. Línea de influencia de los desplazamientos máximo y central de la viga biapoyada .....	54
Imagen 50. Línea de influencia de la reacción del extremo izquierdo de la viga biapoyada .....	54
Imagen 51. Línea de influencia de la reacción del extremo derecho de la viga biapoyada .....	54
Imagen 52. Línea de influencia del momento flector central de la viga biapoyada .....	55
Imagen 53. Línea de influencia del desplazamiento central de la viga biapoyada .....	55
Imagen 54. Aplicación de dos cargas móviles unitarias sobre la viga biapoyada.....	56
Imagen 55. Esfuerzos internos de la viga biapoyada .....	56
Imagen 56. Tabla prontuario de aplicación de dos cargas móviles sobre una viga biapoyada [20] .....	57
Imagen 57. Línea de influencia de las reacciones de los extremos de la viga biapoyada .....	57
Imagen 58. Línea de influencia del momento flector máximo y central de la viga biapoyada .	58
Imagen 59. Gráfica de las líneas de influencia de la frecuencia propia .....	59
Imagen 60. Gráfica de las líneas de influencia de la frecuencia propia .....	61
Imagen 61. Tabla prontuario de aplicación de una carga fija y puntual no centrada sobre una viga biapoyada [21] .....	63
Imagen 62. Diagrama de envolventes de esfuerzos cortantes y momentos flectores .....	64
Imagen 63. Diagrama de envolventes del desplazamiento .....	64
Imagen 64. Tabla prontuario de aplicación de dos cargas fijas y puntuales no centradas sobre una viga biapoyada [22] .....	65
Imagen 65. Diagrama de envolventes de esfuerzos cortantes y momentos flectores .....	67
Imagen 66. Diagrama de envolventes del desplazamiento .....	67
Imagen 67. Diagrama de envolventes de esfuerzos cortantes .....	68
Imagen 68. Diagrama de envolventes de momentos flectores .....	68
Imagen 69. Diagrama de envolventes del desplazamiento .....	69
Imagen 70. Diagrama de envolventes de esfuerzos cortantes .....	69
Imagen 71. Diagrama de envolventes de momentos flectores .....	69
Imagen 72. Diagrama de envolventes de esfuerzos cortantes y momentos flectores .....	70
Imagen 73. Diagrama de envolventes de esfuerzos cortantes y momentos flectores .....	71
Imagen 74. Diagrama de envolventes del desplazamiento .....	71
Imagen 75. Diagrama de esfuerzos y de envolventes de esfuerzos cortantes y momentos flectores .....	72
Imagen 76. de esfuerzos y de envolventes de esfuerzos cortantes y momentos flectores.....	72
Imagen 77. de esfuerzos y de envolventes de esfuerzos cortantes y momentos flectores.....	73
Imagen 78. de esfuerzos y de envolventes de esfuerzos cortantes y momentos flectores .....	73
Imagen 79. Perfil doble "T" .....	80
Imagen 80. Vista 3D del carril de la viga del puente grúa.....	83
Imagen 81. Perfil del carril de la viga del puente grúa .....	83
Imagen 82. Diagrama de la tensión eq. de VM en el carril .....	84

Imagen 83. Valor de la tensión eq. de VM máxima en el carril .....	84
Imagen 84. Diagrama de la tensión eq. de VM en el carril .....	84
Imagen 85. Valor de la tensión eq. de VM máxima en el carril .....	84
Imagen 86. Diagrama de la tensión eq. de VM en el carril .....	85
Imagen 87. Valor de la tensión eq. de VM máxima en el carril .....	85
Imagen 88. Diagrama de la tensión eq. de VM en el carril .....	85
Imagen 89. Valor de la tensión eq. de VM máxima en el carril .....	85
Imagen 90. Tabla prontuario aplicación de una carga puntual centrada en una viga biapoyada [23] .....	91
Imagen 91. Vista en detalle de la unión entre el testero y la viga carril [24].....	98
Imagen 92. Vista en perfil del pórtico de la viga carril.....	99
Imagen 93. Vista planta del testero .....	99
Imagen 94. Valor de la carga máxima que soporta el testero más cargado .....	100
Imagen 95. Perfil doble "T" .....	101
Imagen 96. Perfil del carril de la viga carril .....	102
Imagen 97. Vista en detalle de la unión entre la viga carril y un pilar del pórtico .....	102
Imagen 98. Deformada debida al peso propio del pórtico de la viga carril .....	103
Imagen 99. Deformada y valor de los desplazamientos debida al peso propio del pórtico de la viga carril .....	104
Imagen 100. Valor máximo del vano central de la deformada debida al peso propio del pórtico de la viga carril .....	104
Imagen 101. Valor máximo del vano izquierdo de la deformada debida al peso propio del pórtico de la viga carril.....	105
Imagen 102. Valor máximo del vano central de la deformada debida al peso propio del pórtico de la viga carril.....	105
Imagen 103. Valor máximo del vano izquierdo de la deformada debida al peso propio del pórtico de la viga carril .....	105
Imagen 104. Envoltente de la deformada debida al peso propio del pórtico de la viga carril.....	107
Imagen 105. Envoltente y valores de la deformada del pórtico de la viga carril .....	108
Imagen 106. Envoltente y valores de la deformada del pórtico de la viga carril .....	108
Imagen 107. Esfuerzo axil en el pórtico de la viga carril .....	110
Imagen 108. Esfuerzo cortante en el pórtico de la viga carril .....	110
Imagen 109. Momento flector en el pórtico de la viga carril .....	111
Imagen 110. Deformada y valor de los desplazamientos del pórtico de la viga carril.....	113
Imagen 111. Deformada y valor de los desplazamientos del pórtico de la viga carril .....	113
Imagen 112. Deformada y valor de los desplazamientos del pórtico de la viga carril.....	119
Imagen 113. Deformada y valor de los desplazamientos del pórtico de la viga carril .....	119
Imagen 114. Pórtico "tumbado" .....	139
Imagen 115. Tren de cargas definido en "SAP2000" .....	139
Imagen 116. Diagrama de momentos flectores de la viga carril pórtico "tumbado" .....	140
Imagen 117. Diagrama de momentos flectores de los pilares del pórtico "tumbado" .....	140
Imagen 118. Deformada y valor de los desplazamientos del pórtico "tumbado".....	141
Imagen 119. Diagrama de momentos torsores del pórtico "tumbado" .....	141
Imagen 120. Valor de " $\tau_{12}$ " en el perfil debido al momento torsor máximo .....	142
Imagen 121. Valor de " $\tau_{13}$ " en el perfil debido al momento torsor máximo .....	142

Imagen 122. Valor de " $r_{m\acute{a}x}$ " en el perfil debido al momento torsor máximo .....	143
Imagen 123. Línea de influencia de la reacción vertical del primer apoyo .....	144
Imagen 124. Línea de influencia de la reacción vertical del último apoyo .....	144
Imagen 125. Línea de influencia del momento flector del vano central .....	145
Imagen 126. Línea de influencia del esfuerzo cortante del vano central .....	145
Imagen 127. Línea de influencia del esfuerzo axil del vano central .....	145
Imagen 128. Línea de influencia del momento flector del centro del primer vano .....	145
Imagen 129. Línea de influencia del esfuerzo cortante del centro del primer vano .....	145
Imagen 130. Línea de influencia del esfuerzo axil del centro del primer vano .....	146
Imagen 131. Línea de influencia del factor de pandeo del primer modo de vibración para el perfil IPE 400.....	148
Imagen 132. . Línea de influencia del factor de pandeo del primer modo de vibración para el perfil IPE 400.....	149
Imagen 133. Línea de influencia de los factores de pandeo para el perfil HEB 300.....	150
Imagen 134. Línea de influencia del factor de pandeo del primer modo de vibración para el perfil HEB 300 .....	150
Imagen 135. Línea de influencia del factor de pandeo del primer modo de vibración para el perfil HEB 300 .....	151
Imagen 136. Línea de influencia del esfuerzo axil del primer pilar .....	155
Imagen 137. Línea de influencia del desplazamiento del primer pilar .....	155
Imagen 138. Línea de influencia del esfuerzo axil del segundo pilar.....	156
Imagen 139. Línea de influencia del desplazamiento del segundo pilar .....	156
Imagen 140. Línea de influencia del esfuerzo axil del tercer pilar .....	157
Imagen 141. Línea de influencia del desplazamiento del tercer pilar .....	157
Imagen 142. de influencia del esfuerzo axil del último pilar.....	158
Imagen 143. Línea de influencia del desplazamiento del último pilar .....	158
Imagen 144. Línea de influencia de la reacción vertical del apoyo del primer pilar .....	159
Imagen 145. Línea de influencia de la reacción vertical del apoyo del segundo pilar.....	159
Imagen 146. Línea de influencia del momento flector en el eje "1" del apoyo del primer pilar .....	160
Imagen 147. Línea de influencia del momento flector en el eje "1" del apoyo del segundo pilar .....	160
Imagen 148. Línea de influencia del momento flector en el eje "2" del apoyo del primer pilar .....	161
Imagen 149. Línea de influencia del momento flector en el eje "2" del apoyo del segundo pilar .....	161
Imagen 150 Línea de influencia del desplazamiento del punto de unión entre la viga carril y el primer pilar .....	161
Imagen 151. Línea de influencia del desplazamiento del punto de unión entre la viga carril y el segundo pilar.....	162
Imagen 152. Línea de influencia del esfuerzo cortante "2-2" de la sección central.....	162
Imagen 153. Línea de influencia del momento flector "2-2" de la sección central.....	162
Imagen 154. Línea de influencia del momento torsor de la sección central .....	163
Imagen 155. Selección tipo de modelo en "SAP2000".....	169
Imagen 156. Selección rejilla en "SAP2000" .....	169

Imagen 157. Ejes en "SAP2000" .....	170
Imagen 158. Definición del material en "SAP2000" .....	170
Imagen 159. Definición de la sección en "SAP2000" .....	171
Imagen 160. Sección en "SAP2000" .....	171
Imagen 161. Comando "Quick Draw Frame/Cable en "SAP2000" .....	172
Imagen 162. Representación de la viga con su perfil en "SAP2000" .....	172
Imagen 163. Restricciones de los apoyos en "SAP2000" .....	172
Imagen 164. Representación viga biapoyada en "SAP2000" .....	173
Imagen 165. Selección número de divisiones de una barra en "SAP2000" .....	173
Imagen 166. Opciones visuales en "SAP2000" .....	173
Imagen 167. Representación de una viga biapoyada dividida en tramos en "SAP2000" .....	174
Imagen 168. Definición de un camino en "SAP2000" .....	174
Imagen 169. Definición de una carga móvil en "SAP2000" .....	175
Imagen 170. Definición de un patrón de cargas en "SAP2000" .....	176
Imagen 171. Definición del caso de carga móvil en "SAP2000" .....	177
Imagen 172. Casos de carga ya definidos en "SAP2000" .....	177
Imagen 173. Definición de las propiedades de estudio en "SAP2000" .....	178
Imagen 174. Ejecutar el modelo en "SAP2000" .....	178
Imagen 175. Representar línea de influencia de reacciones de determinados puntos de la estructura en "SAP2000" .....	179
Imagen 176. Representar línea de influencia de desplazamientos de determinados puntos de la estructura en "SAP2000" .....	180
Imagen 177. Representar línea de influencia de los tramos de las barras de la estructura en "SAP2000" .....	180
Imagen 178. Representar línea de influencia de de la reacción vertical del primer apoyo en "SAP2000" .....	181
Imagen 179. Representar línea de influencia de de la reacción vertical del último apoyo en "SAP2000" .....	181
Imagen 180. Representar línea de influencia del desplazamiento vertical de la sección central en "SAP2000" .....	182
Imagen 181. Representar línea de influencia del momento flector de la sección central en "SAP2000" .....	182
Imagen 182. Definición de un tren de cargas móviles en "SAP2000" .....	183
Imagen 183. Tabla prontuario aplicación de una carga puntual el extremo de una viga empotrada-libre [22].....	186
Imagen 184. Diagrama de esfuerzos de la viga empotrada-libre .....	187
Imagen 185. Diagrama del desplazamiento vertical de la viga empotrada-libre .....	188
Imagen 186. Diagrama de esfuerzos de la viga empotrada-libre .....	189
Imagen 187. Diagrama del desplazamiento vertical de la viga empotrada-libre .....	189
Imagen 188. Diagrama del esfuerzo cortante de la viga empotrada-libre .....	190
Imagen 189. Diagrama del momento flector de la viga empotrada-libre.....	190
Imagen 190. Diagrama del del desplazamiento vertical de la viga empotrada-libre .....	191
Imagen 191. Diagrama del esfuerzo cortante de la viga empotrada-libre .....	191
Imagen 192. Diagrama del momento flector de la viga empotrada-libre.....	191
Imagen 193. Diagrama del desplazamiento vertical de la viga empotrada-libre .....	192



## ÍNDICE DE TABLAS:

Tabla 1. Resultados de la frecuencia propia obtenidos mediante "SAP2000" .....	59
Tabla 2. Resultados de la frecuencia propia obtenidos mediante "SAP2000" .....	60
Tabla 3. Resultados de los esfuerzos internos y el desplazamientos obtenidos a partir del prontuario .....	63
Tabla 4. Resultados de los esfuerzos internos obtenidos a partir del prontuario .....	65
Tabla 5. Resultados de los desplazamientos obtenidos a partir del prontuario .....	66
Tabla 6. Resultados de los esfuerzos internos obtenidos mediante "SAP2000" .....	69
Tabla 7. Resultados de los esfuerzos internos obtenidos mediante "SAP2000" .....	70
Tabla 8. Comparativa de modelos "Frame" y "Shell" .....	87
Tabla 9. Comparativa de modelos "Frame" y "Shell" .....	87
Tabla 10. Comparativa de modelos "Frame" y "Shell" .....	88
Tabla 11. Comparativa de modelos "Frame" y "Shell" .....	88
Tabla 12. Comparativa de modelos "Frame" y "Shell" .....	88
Tabla 13. Comparativa de modelos "Frame" y "Shell" .....	89
Tabla 14. Comparativa de resultados obtenidos de manera teórica y mediante "SAP2000" .....	92
Tabla 15. Comparativa de resultados obtenidos de manera teórica y mediante "SAP2000" .....	92
Tabla 16. Valores de la frecuencia de vibración sin aplicar masa .....	95
Tabla 17. Valores de la frecuencia de vibración aplicando una masa centrada .....	96
Tabla 18. Valores de la frecuencia de vibración aplicando una masa no centrada .....	96
Tabla 19. Valores de la frecuencia de vibración aplicando una masa no centrada .....	96
Tabla 20. Valores de los esfuerzos internos en la viga carril y en los pilares .....	111
Tabla 21. Valores de la tensión de VM en la viga carril y en los pilares .....	112
Tabla 22. Valores de la tensión de VM en la viga carril y en los pilares .....	114
Tabla 23. Valores del factor de pandeo de la viga carril .....	115
Tabla 24. Valores del factor de pandeo de la viga carril .....	116
Tabla 25. Valores de la tensión de VM en los pilare .....	117
Tabla 26. Valores de los desplazamientos y giros en la viga carril .....	120
Tabla 27. Valores de la tensión de VM en la viga carril .....	121
Tabla 28. Valores de los esfuerzos internos en la viga carril .....	122
Tabla 29. Valores de los esfuerzos internos en la viga carril .....	122
Tabla 30. Valores de los esfuerzos internos en la viga carril .....	122
Tabla 31. Valores de los esfuerzos internos en la viga carril .....	123
Tabla 32.. Valores de los esfuerzos internos en la viga carril .....	123
Tabla 33. Valores de los esfuerzos internos en la viga carril .....	123
Tabla 34. Valores de la tensión de VM en la viga carril .....	124
Tabla 35. Valores de la tensión de VM en la viga carril121 .....	124
Tabla 36. Valores del factor de carga en la viga carril122 .....	125
Tabla 37. Valores de los esfuerzos internos en el pilar .....	126
Tabla 38. Valores de los esfuerzos internos en la viga carril .....	126
Tabla 39. Valores de los esfuerzos internos en el pilar .....	127
Tabla 40. Valores de los esfuerzos internos en la viga carril .....	127
Tabla 41. Valores de los desplazamientos y giros en la viga carril .....	127
Tabla 42. Valores de la tensión de VM en la viga carril .....	128

Tabla 43. Valores de los esfuerzos internos en la viga carril .....	131
Tabla 44. Valores de los esfuerzos internos en la viga carril .....	131
Tabla 45. Valores de los esfuerzos internos en la viga carril .....	131
Tabla 46. Valores de los esfuerzos internos en la viga carril .....	132
Tabla 47. Valores de la tensión de VM en la viga carril .....	132
Tabla 48. Valores de la tensión de VM en la viga carril .....	133
Tabla 49. Valores de la tensión de VM en la viga carril .....	133
Tabla 50. Valores de la tensión de VM en la viga carril .....	133
Tabla 51. Valores de los desplazamientos en la viga carril .....	134
Tabla 52. Valores de los desplazamientos en la viga carril .....	134
Tabla 53. Valores de los desplazamientos en la viga carril .....	134
Tabla 54. Valores de los desplazamientos en la viga carril .....	135
Tabla 55. Valores de los esfuerzos internos en el pilar .....	135
Tabla 56. Valores de los esfuerzos internos en la viga carril .....	136
Tabla 57. Valores de los esfuerzos internos en el pilar .....	136
Tabla 58. Valores de los esfuerzos internos en la viga carril .....	136
Tabla 59. Valores de la tensión de VM en el pilar .....	136
Tabla 60. Valores de la tensión de VM en la viga carril .....	136
Tabla 61. Valores de la tensión de VM en el pilar .....	137
Tabla 62. Valores de la tensión de VM en la viga carril .....	137
Tabla 63. Valores de los desplazamientos en la viga carril .....	137
Tabla 64. Valores de los desplazamientos en la viga carril .....	137
Tabla 65. Valores de los desplazamientos en la viga carril .....	138
Tabla 66. Valores de los desplazamientos en la viga carril .....	138
Tabla 67. Valores de los factores de pandeo en el pórtico de la viga carril .....	147
Tabla 68. Valores de los factores de pandeo en el pórtico de la viga carril .....	148
Tabla 69. Valores de los factores de pandeo en el pórtico de la viga carril .....	150
Tabla 70. Valores de los factores de pandeo en el pórtico de la viga carril .....	151
Tabla 71. Valores de esfuerzos internos y desplazamientos en los pilares.....	153
Tabla 72. Valores de esfuerzos internos y desplazamientos en los pilares.....	153
Tabla 73. Valores de esfuerzos internos y desplazamientos en los pilares.....	154
Tabla 74. Valores de esfuerzos internos y desplazamientos en los pilares.....	154
Tabla 75. Valores de esfuerzos internos y desplazamientos en la viga empotrada-libre .....	187
Tabla 76. Valores de esfuerzos internos y desplazamientos en la viga empotrada-libre .....	189

### Capítulo 1.Introducción y objetivos:

#### 1.1. Cargas móviles en Ingeniería Industrial:

Dentro del ámbito de la Ingeniería Industrial, las cargas móviles se consideran cuasiestáticas, para poder estudiar la influencia de éstas sobre determinadas estructuras debemos seleccionar aquellas en la que durante las operaciones de trabajo o debido a otra serie de circunstancias su diseño deba soportar el desplazamiento de cargas sobre la misma.

Se selecciona como ejemplo de estudio un puente grúa, debido a que durante su funcionamiento, por un lado el carro que transporta la carga máxima operativa del mismo se desplaza por la viga del puente grúa, y esta a su vez se desplaza sobre la viga carril situada en uno de los pórticos.

Por tanto estudiando la influencia generada por las cargas del carro en la viga, y de la viga del puente grúa sobre la viga carril, se está comprobando la influencia de determinadas cargas móviles en el dimensionado y el estudio de una estructura determinada.

En el desarrollo de este TFG se planteará el dimensionado de la viga del puente grúa y de los pórticos de la viga carril.

#### 1.2. Introducción:

Un puente grúa es una máquina cuyo uso está destinado al transporte y elevación de grandes cargas desde un emplazamiento hasta otro. Está constituido por una doble estructura que finaliza en dos testeros sincronizados, dotados con ruedas con dos pestañas que permiten su correcto encarrilamiento, éstos testeros están apoyados en la segunda estructura y deben poder discurrir por la misma.

Incluye un carro automotor, unido a éste se encuentra el polipasto cuyo cableado se descuelga entre ambas estructuras y permite el ascenso y el descenso de la carga.

Es decir, esa doble estructura que compone el puente grúa está formada por la estructura que soporta el carro y permite desplazamientos longitudinales de este sobre la misma, llamada viga del puente grúa, y por una segunda estructura compuesta por dos vigas carriles que permiten mover la primera sobre ésta, de este modo se pueden realizar desplazamientos perpendiculares al eje longitudinal de la viga del puente grúa.

La combinación de los movimientos del carro sobre la primera estructura y la viga carril, permiten actuar sobre cualquier punto de la superficie operativa del puente grúa, delimitada por los testeros en una dirección, y en la otra, delimitada por la longitud de las vigas carril.

La diferencia del puente grúa con una grúa pórtico radica en que en el puente grúa las vigas raíl y el carro se encuentran en el mismo plano horizontal, y la altura de dicho plano delimita la altura máxima operativa de la máquina, sin embargo, en la grúa pórtico no se cumple esta condición. Se debe tener en cuenta lo descrito anteriormente en el dimensionado del puente grúa.

El objetivo principal del TFG trata de dimensionar un puente grúa, para ello, debemos dividirlo en las dos estructuras anteriormente especificadas y calcular ambas por separado, es decir:

- ❖ Estructura sobre la que se mueve el carro automotor (viga del puente grúa).

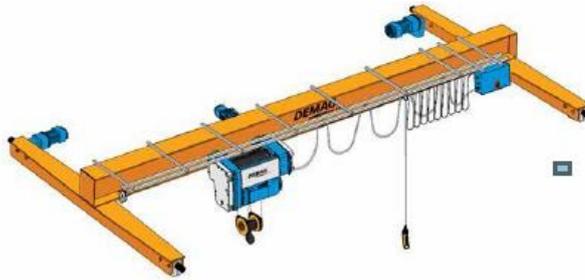
- ❖ Estructura sobre la que se mueve la viga del puente grúa: pórtico de las vigas carril.

### 1.2.1. Principales componentes de un puente grúa:

- Viga del puente grúa: estructura sobre la que se mueve el carro automotor :

Según la normativa vigente "NTP 736", se pueden diferenciar dos tipos de vigas de puente grúa:

- ❖ Grúa monorraíl: está constituida por una única viga.



*Imagen 1. Puente grúa monorraíl [1]*

- ❖ Grúa birrail: está formada por una doble viga donde se apoya el carro que soporta el polipasto.



*Imagen 2. Puente grúa birrail [2]*

Las principales diferencias entre las anteriores son:

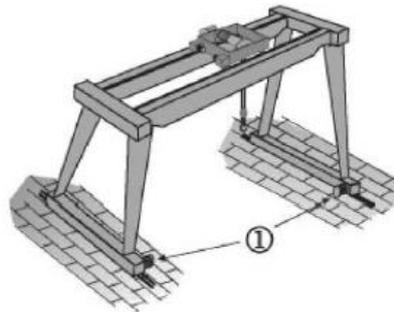
- La grúa birrail está pensada para soportar cargas más grandes (hasta 500 toneladas).
- La grúa monorraíl permite aprovechar toda la altura de la edificación y tiene doble velocidad en todos sus movimientos.

Por lo tanto, en este caso se seleccionará una grúa monorraíl, debido a que como se comentará más adelante, la carga máxima operativa del puente grúa a dimensionar es de 20 toneladas, por lo que se puede utilizar ésta sin ningún problema, permitiendo así, además de aprovechar la altura total de la nave en la que se emplazará el puente grúa y tener la ventaja de la doble velocidad en todos los movimientos de transporte y elevación de la carga, reducir los costes al emplear una menor cantidad de material para su fabricación.

- Viga carril + Estructura de sustentación: estructura sobre la que se mueve la viga del puente grúa: pórtico de las vigas carril.

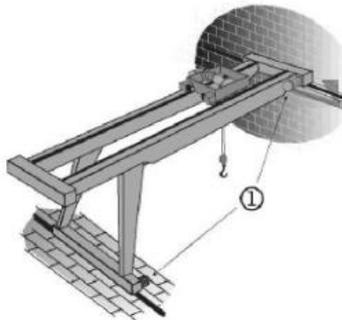
Esta estructura puede ser de los siguientes tipos:

- ❖ Grúa pórtico: grúa cuyo elemento portador está apoyado sobre unos elementos verticales y estos se mueven por un camino de rodadura, éste se diferencia porque los raíles de desplazamiento se encuentran en un plano horizontal bastante inferior al de la primera estructura (viga del puente grúa).



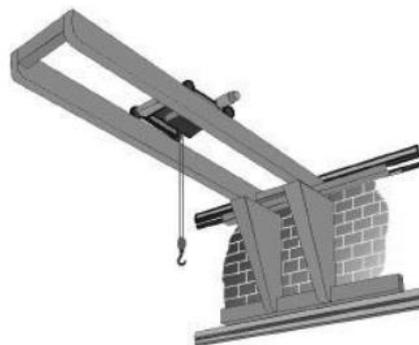
*Imagen 3. Grúa pórtico [3]*

- ❖ Grúa semipórtico: grúa cuyo elemento portador se apoya en uno de sus dos lados sobre unos elementos verticales, igual que en el caso anterior, y el otro lado se apoya sobre una viga raíl, cuyo plano de desplazamiento está aproximadamente a la misma altura que el plano horizontal de la viga del puente grúa.



*Imagen 4. Grúa semipórtico [4]*

- ❖ Grúa ménsula: grúa fijada en un muro sobre dos raíles que se encuentran en el mismo plano vertical, dejando el otro extremo de la estructura libre.



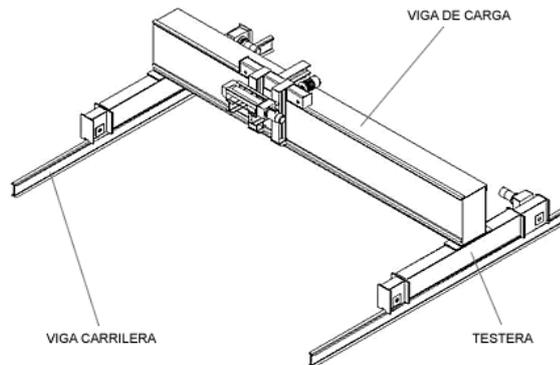
*Imagen 5. Grúa ménsula [5]*

- ❖ Grúa brazo giratorio: grúa capaz de girar sobre su único apoyo, siendo éste una columna giratoria, igual que en el caso anterior el otro extremo queda libre.



**Imagen 6. Grúa brazo giratorio [6]**

- ❖ Vigas carril: vigas sobre las que se desplazan los extremos de la viga del puente grúa ubicadas en el mismo plano horizontal.



**Imagen 7. Viga carril [7]**

La estructura de sustentación es el elemento diseñado para soportar el peso de todo el conjunto. Está formado por pilares sobre los que se apoyan las vigas carril por donde se desplazan los testeros, los cuales están unidos a los extremos de la viga del puente grúa que es la que sustenta el carro de polipasto sobre el que se apoya la carga del puente grúa.

Normalmente en puentes grúa interiores estos pilares coinciden con los que sustentan la estructura de la nave industrial. A pesar de esto, no se tendrán en cuenta las posibles cargas de la nave industrial sobre los pilares en su dimensionado.

En la siguiente imagen se pueden observar las principales estructuras del puente grúa que son objeto de estudio en este TFG, formado por el conjunto de la viga del puente grúa y el pórtico de las vigas carril.

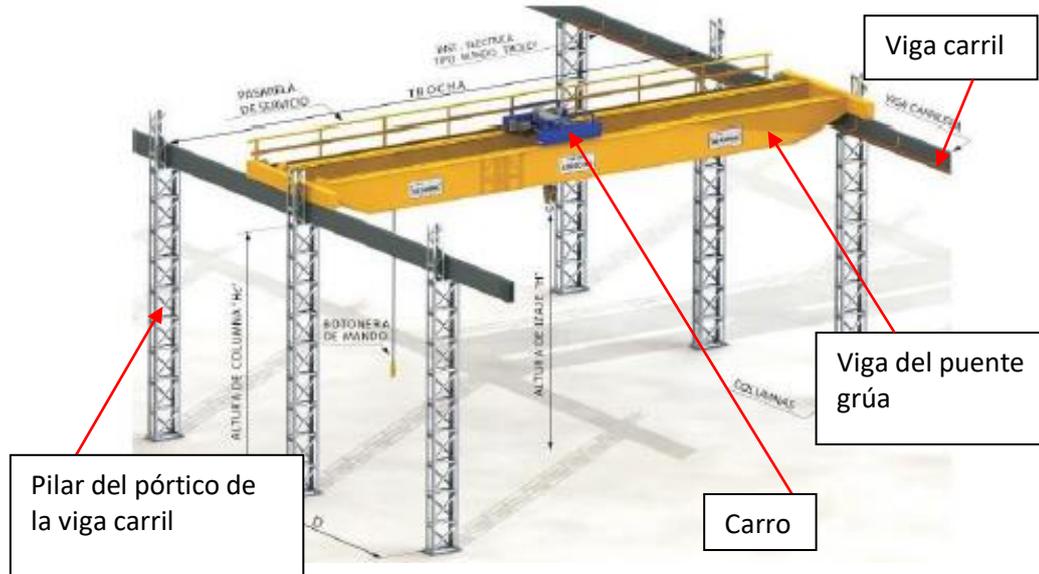


Imagen 8 . Estructura genérica completa de un puente grúa [8]

- Carro:

Se desplaza longitudinalmente sobre la viga del puente grúa. Permite realizar desplazamientos verticales y horizontales de la carga. Unido al carro se encuentra un cable de acero que permite sujetar la carga en sus distintos desplazamientos sobre la viga del puente grúa.

Existen diferentes tipos, su elección depende en gran medida de la luz de la viga del puente grúa, el tipo de puente grúa y la carga máxima operativa de trabajo para la cual ha sido diseñado. Se pueden diferenciar los siguientes:

- Carro abierto: se caracteriza principalmente porque puede soportar grandes cargas debido a que tiene una estructura muy robusta que permite transmitir los esfuerzos que genera la carga útil a sus rodillos de rodadura.
- Carro polipasto: se suele utilizar para cargas de niveles intermedios. Su rodadura desliza sobre dos carriles que permiten la elevación de la carga. La estructura está compuesta por unos travesaños sobre los que se apoya el mecanismo de elevación, traslación y accionamiento, y los rodillos de rodadura apoyan sobre dos largueros.
- Polipasto monorraíl: son empleados para cargas ligeras. Se caracteriza por tener el menor peso propio de los tres tipos de carro de puentes grúa. La estructura está formada por carcasas.

Los principales mecanismos del carro de los puentes grúa son los siguientes:

- Mecanismo de traslación de la carga (a): permiten realizar el movimiento longitudinal del carro sobre la viga del puente grúa.
- Mecanismo de elevación de la carga (b): permite realizar el movimiento de elevación o descenso de la carga mediante un conjunto de motores unidos a cables y poleas.

En la siguiente imagen se pueden apreciar estos dos mecanismos:

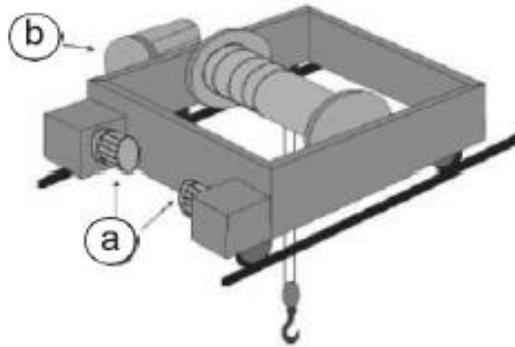
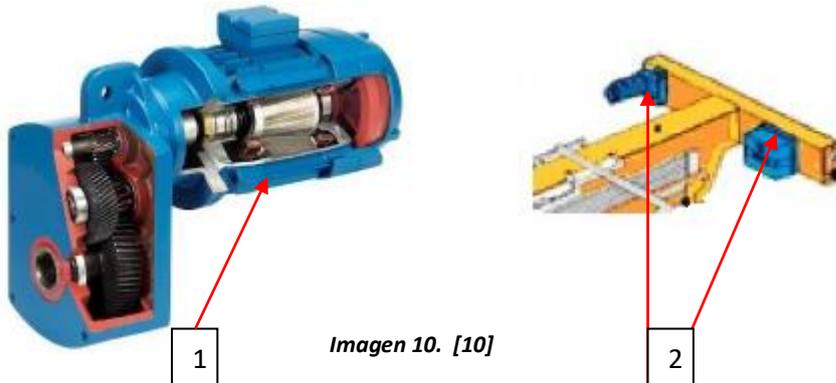


Imagen 9. Carro del puente grúa [9]

- Mecanismos de traslación del puente:

Está formado por los testeros y el conjunto de motores que permiten realizar el desplazamiento longitudinal de la grúa, compuesto por:

- Motor de traslación, rodillos y tope: conjunto de elementos mecánicos unidos a los testeros que permiten mover la viga del puente grúa sobre los carriles de las vigas carril. La función de los topes consiste en evitar que la viga del puente grúa se salga del camino de rodadura de la viga carril, además de evitar grandes impactos al final de este camino.



1) Mecanismo de traslación

2) Topes

- Testeros: elementos unidos a los extremos de la viga del puente grúa a través de pernos. Permiten mover la viga del puente grúa sobre las vigas carril. El desplazamiento se realiza mediante ruedas.



Imagen 11. Testero de la viga del puente grúa [11]

- Otros:

- Botonera y telemando: ambos dispositivos son utilizados para poder manejar el puente grúa desde fuera de la cabina. La botonera se trata de un dispositivo eléctrico unido al puente grúa mediante cables, mientras que el telemando se trata de un dispositivo electrónico inalámbrico.



Imagen 12. [12]

1) Botonera

2) Telemando

- Accesorios de presión: se tratan de elementos auxiliares que tienen como función sustentar la carga, tales como cucharas, ventosas, electroimanes, pulpos y ganchos entre otros.



Imagen 13. Gancho del puente grúa [13]

- Cabina: utilizadas en puentes grúa de grandes dimensiones. Se pueden ubicar en distintas posiciones y permiten manejar el puente grúa desde su interior.



Imagen 14. Cabina del puente grúa [14]

### 1.2.2. Predimensionado del puente grúa:

Para estudiar la influencia de las cargas móviles sobre determinadas estructuras, se decide realizar el dimensionado de la estructura de un puente grúa.

Se debe diseñar la viga del puente grúa y las vigas carril del pórtico del puente grúa. Para poder realizar el dimensionado preciso se realizarán los estudio necesarios explicados en capítulos posteriores de este TFG. Aunque también se puede realizar un primer predimemensionado basado en una serie de especificaciones técnicas.

Para el dimensionado del puente grúa se selecciona la opción de viga carril porque permite el apoyo sobre los pilares de la nave industrial y mantiene el mismo plano horizontal que la viga del puente grúa.

La estructura del puente grúa seleccionado está formado por dos vigas carril que se apoyan sobre los pilares de la estructura.

Lo primero que se debe tener en cuenta es que la estructura de la viga del puente grúa debe sustentar el carro, que es el que carga la suporta la carga del puente grúa, por lo tanto, al tratarse de una viga simplemente biapoyada (imágenes 7 y 8) , el perfil necesario para su diseño es mucho mayor que el necesario en la viga carril.

Como la viga carril es una estructura mucho mayor que descansa sobre los pórticos y éstos sobre la cimentación, el perfil necesario para su diseño es menor que el de la viga del puente grúa porque sujetan la viga del puente grúa repartiendo la carga entre dos vigas carril (sobre las que apoya cada uno de los dos extremos de la viga del puente grúa),.

Como parámetros iniciales para entender el primer predimensionado del puente grúa, se seleccionan 30 metros de luz de la viga del puente grúa, 42 metros de longitud de cada pórtico de viga carril y 20 toneladas como carga máxima operativa.

Es decir, debido a la gran luz de la viga del puente grúa y a la gran carga máxima operativa, se intuye que el perfil de la viga del puente grúa será un perfil de grandes dimensiones para poder soportar la carga de trabajo. Debido a esto, se puede seleccionar en este primer predimensionado un perfil cajón rectangular con alas y con rigidizadores que cumpla las sollicitaciones de diseño.

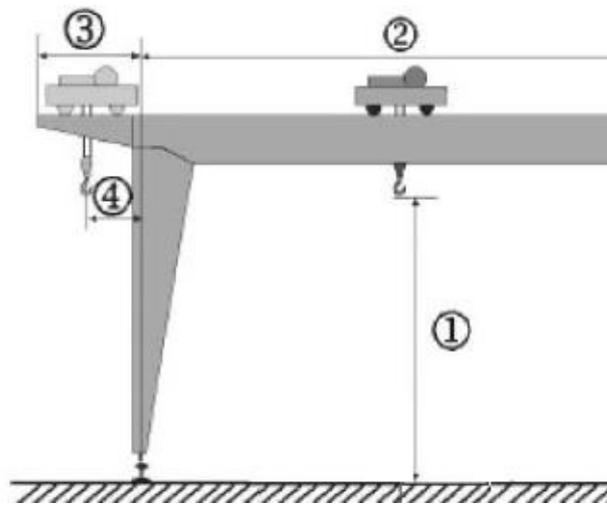
Debido a la longitud inicial de diseño de cada uno de los dos pórticos de la viga carril, el predimensionado inicial del perfil de la viga carril podría ser un perfil doble "T" comercial de menores dimensiones que el anteriormente empleado para la viga del puente grúa.

**1.2.3. Definición precisa del problema de estudio: características geométricas del puente grúa:**

Como parámetros iniciales de diseño para poder dimensionar el resto de las variables del puente grúa, que dependerán de los anteriores, se seleccionan:

Todos estos serán determinantes para poder realizar los estudios necesarios para el dimensionado tanto de la viga del puente grúa como del pórtico de la viga carril, al igual que para estudiar la influencia de la cargas móviles sobre estas estructuras:

- Viga del puente grúa:



*Imagen 15. Vista lateral del puente grúa [15]*

- 1) 8 metros
- 2) 30 metros
- 3) 2,75 metros
- 4) 1,50 metros

- Viga carril:

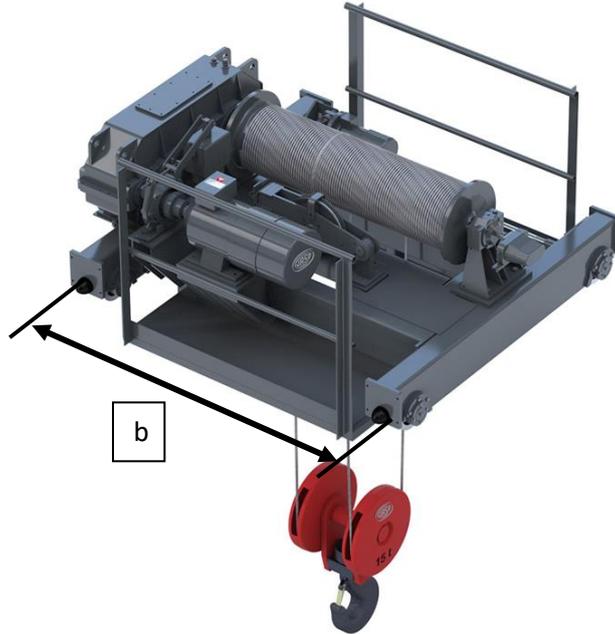
La longitud total del pórtico de la viga carril es de 42 metros. Se apoya sobre unos pilares, colocados cada 6 metros entre sí, además la viga carril como se puede observar en la imagen 15 está a 8 metros de altura, debido a que coincide con el plano horizontal de la viga del puente grúa.

Como se ha dicho anteriormente la carga máxima operativa del puente grúa es de 20 toneladas, es decir 196000 N, al ser esta una carga de gran valor y tener la viga del puente grúa una luz de 30 metros, los resultados del dimensionado de las diferentes estructuras que componen el puente grúa serán de grandes dimensiones.

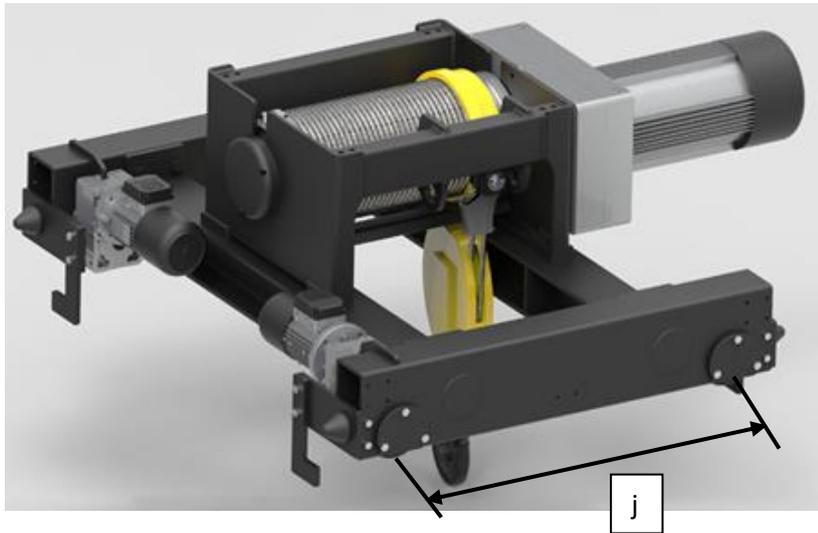
Una carga de 20 toneladas es una carga intermedia entre los puentes grúa de menos carga máxima operativa y los de mayor, por eso se emplea un carro de polipasto.

- Carro de polipasto:

La geometría del carro seleccionado es la siguiente:



*Imagen 16. Vista 3D del carro del puente grúa [16]*



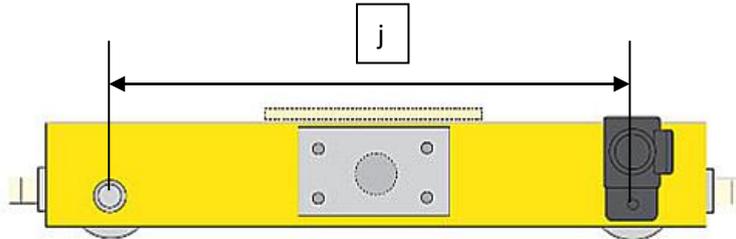
*Imagen 17. Vista 3D del carro del puente grúa [17]*

- $j$  (batalla del carro)= 1,5 m
- $b$  (anchura del carro= vía del carro)=1,6 m

Las dimensiones del carro serán necesarias para poder realizar los estudios de capítulos posteriores, debido a que sobre las ruedas del carro de polipasto se aplicarán las cargas sobre la viga del puente grúa.

- Testero:

Las dimensiones del testero (cabezal) seleccionado son las siguientes:



*Imagen 18. Vista de perfil del testero del puente grúa [18]*

- $j$  (batalla del testero) = 2,5 m

Las dimensiones del testero son necesarias para conocer el punto de aplicación de las cargas sobre la viga carril del puente grúa en los estudios posteriores.

### 1.3. Objetivos:

El objetivo principal de este TFG consiste en estudiar y determinar cómo afectan las cargas móviles a determinadas estructuras cuando estas varían su posición a lo largo de las mismas.

Como estructura de estudio se selecciona un puente grúa. Se estudian las líneas de influencia generadas por determinadas cargas móviles que se desplazan sobre el puente grúa durante las operaciones de trabajo del mismo.

El dimensionado de este puente grúa se ha realizado desde el punto de vista de la seguridad, es decir, una vez conocidas las condiciones iniciales de diseño y las cargas máximas que puede soportar la estructura, se han dimensionado las características geométricas y dimensionales que no estaban fijadas previamente en las condiciones preliminares de diseño anteriormente detalladas.

De esta manera el estudio engloba la aplicación y la influencia de las cargas fijas en determinados puntos más o menos críticos para la estructura y la influencia de las cargas móviles que se desplazan por los diferentes puntos de la misma.

Como se explicará posteriormente, el estudio y el dimensionado del puente grúa refleja las consecuencias de la aplicación de cargas en los diferentes ejes.

El estudio del TFG a grandes rasgos podría dividirse en tres principales partes, una de ellas el dimensionado del puente grúa mediante cargas fijas y mediante cargas móviles, otra

corresponde al estudio de las líneas de influencia generadas por estas cargas en la estructura, y la última corresponde a la respuesta frecuencial de dicha estructura con la aplicación de las anteriores cargas.

Los anteriores estudios se han realizado siempre siguiendo el mismo método, es decir, el estudio se ha basado en calcularlo, siempre que se pueda, de manera teórica-analítica. Después se han vuelto a calcular mediante el software de cálculo "SAP2000", para que de esta manera se puedan comparar los resultados obtenidos de las dos formas y poder validarlos.

Una vez se determinaba la coincidencia entre los resultados obtenidos aplicando los dos métodos anteriores, se procede a calcular aquellas partes del estudio aplicando el software de cálculo únicamente, debido a que la manera teórica-analítica se descarta, o bien por su complejidad o bien por el volumen de cálculo analítico asociado a éste.

Gracias a esta manera de enfocar el estudio, se pueden aceptar como válidos los resultados obtenidos con "SAP2000" debido a que las partes más sencillas del estudio se han realizado también de manera teórica-analítica, y se ha demostrado la validez de los resultados obtenidos.

Por lo tanto, los objetivos del TFG son los siguientes:

1. Dimensionado inicial de la viga del puente grúa y del pórtico de la viga carril aplicando los conocimientos analíticos y teóricos de las estructuras isostáticas y complementando los estudios y comprobaciones realizadas mediante el software de cálculo. Estudiando las tensiones máximas y los desplazamientos (flechas) máximos admisibles para cada estructura.
2. Verificación de los perfiles anteriormente seleccionados, comprobando los fenómenos de pandeo lateral y abolladura del puente grúa.

Todos los estudios se realizarán para las posiciones más críticas de la carga y para la carga máxima operativa del puente grúa, de esta manera siempre se está dimensionado desde el punto de vista de la seguridad.

3. Estudiar la respuesta tensional y frecuencial de las estructuras del puente grúa.
4. Estudiar la influencia de cargas móviles desplazándose por el puente grúa, estudiando las líneas de influencia y los diagramas de envolventes para estas estructuras.

### Capítulo 2. Dimensionado de la viga del puente grúa:

Esta primera estructura se trata de una viga de una determinada sección apoyada en ambos extremos en las vigas carril mediante unos testeros. Para permitir facilitar el cálculo y con ello el dimensionado necesario de dicha viga, se simplifica el problema de esta estructura a una viga biapoyada.

La sección seleccionada se trata de un perfil tubular rectangular (cajón) con alas, que se conformará mediante la soldadura correctamente ejecutada de varias chapas de acero S275.

Para el dimensionado del perfil, se deben conocer las situaciones más críticas y las sollicitaciones de dicha estructura en el momento de entrar en carga, para que de esta manera, se asegure siempre un dimensionado desde el lado de la seguridad.

Como condiciones iniciales para esta viga biapoyada, se selecciona una luz entre sus dos apoyos de 30 metros, y una carga máxima operativa de 20 toneladas, es decir 196000 N.

El carro (polipasto) automotor que se desplaza sobre ésta tiene 4 ruedas, que en el plano de estudio "XZ" corresponderán a dos puntos de apoyo sobre la estructura, que coinciden con los dos ejes de dichas ruedas de apoyo.

Para poder dimensionar correctamente la sección se deben tener en cuenta los siguientes puntos:

- Que no plastifique según el criterio de Von Misses.
- Que la flecha o el desplazamiento máxima no sean excesivos.
- Que no sea inestable (pandeo lateral) y que no se abolle.
- Que no se fatigue: se debería realizar el correspondiente estudio, durante el desarrollo del TFG no se realiza al quedar fuera del alcance del mismo.

Debido a que tanto las cargas como las estructuras del puente grúa se desplazan, los anteriores estudios se realizarán bajo la situación más crítica para cada caso, y buscando además el espesor mínimo que pueda cumplir las sollicitaciones técnicas para así reducir el peso y el coste final de la estructura.

En la siguiente imagen se puede observar el modelo simplificado sobre el que se trabajará en esta estructura del puente grúa. Se trata de simplificar esta viga como una barra biapoyada:



*Imagen 19. Barra biapoyada. Simplificación de la viga del puente grúa*

Para obtener los valores de los esfuerzos, desplazamientos y flechas, tensiones... definir las características del material, la geometría, tanto de la sección como de la estructura, se utiliza el programa de elementos finitos de cálculo de estructuras "SAP2000 v21 1.0".

## 2.1. Dimensionado de la viga del puente grúa como modelo de barras ("Frames"):

### 2.1.1. Estudio de la respuesta de la estructura al aplicar cargas puntuales sobre la misma:

Para el análisis de las tensiones de Von Mises se deben estudiar las combinaciones máximas, pero que no generen tensiones normales ni tangenciales máximas, para ello se deben aplicar fuerzas puntuales (simplificación de la carga real) con el valor de la carga máxima operativa del puente grúa, para las siguientes situaciones:

- **2.1.1.1.** Simplificar la carga total operativa como una fuerza puntual.
- **2.1.1.2.** Simplificar la carga total operativa como dos fuerzas puntuales. Separadas a una distancia de 1,5 m, que corresponde a la separación entre los dos ejes del carro que se mueve por esta estructura del puente grúa.
- **2.4.** Simplificar la carga total operativa como cuatro fuerzas puntuales. Separadas dos a dos 1,5 m que corresponde de nuevo a la separación entre los dos ejes del carro, y dos a dos la anchura del perfil más la longitud de las alas, es decir, las cuatro cargas puntuales representan las cuatro ruedas del carro moviéndose por la viga del puente grúa (este último estudio se desarrollará más adelante).

### 2.1.2. Dimensionado del perfil de la viga del puente grúa:

#### 2.1.2.1. Selección del perfil:

El tipo de perfil seleccionado es un perfil tubular rectangular (cajón) con alas, con diferentes espesores en las alas que en las almas, en el que se soldarán correctamente rigidizadores para evitar el vuelco de la estructura, es decir, que no sufra los fenómenos de pandeo lateral y abolladura cuando esta estructura entra en carga.

Para finalmente obtener el dimensionado del perfil, primero se conformarán las chapas que lo componen y se soldarán adecuadamente entre ellas, obteniendo la geometría final del mismo.

Al tratarse de una viga de 30 metros de longitud, se busca un perfil con espesores pequeños, debido a que interesa reducir el peso de la viga, tanto para reducir la carga total de la misma, como para reducir sus costes de fabricación.

Para evitar también aumentar los costes y el tiempo de fabricación, se seleccionan espesores de chapas comerciales, permitiendo así fabricar este perfil con piezas de catálogo.

Además interesa un perfil cuya inercia en el eje vertical ("z"), sea lo más elevada posible, pues esta, como se verá más adelante está linealmente relacionada con los valores de las tensiones normales y pueden generar la plastificación del perfil.

Al igual que también se busca que las áreas de las almas del perfil no sean excesivamente pequeñas, ya que de nuevo como se verá más adelante, estas están linealmente relacionadas con las tensiones tangenciales, que pueden también provocar la plastificación del perfil, aunque su criticidad es menor que las de las tensiones normales.

## Capítulo 2. Dimensionado de la viga del puente grúa

El ala inferior del perfil es la zona por donde se mueve el carro con la carga aprovechando toda su anchura, es decir, las ruedas del mismo eje estarán separadas " $b+l_{\text{alas}}$ ".

La geometría del perfil seleccionado es la siguiente:

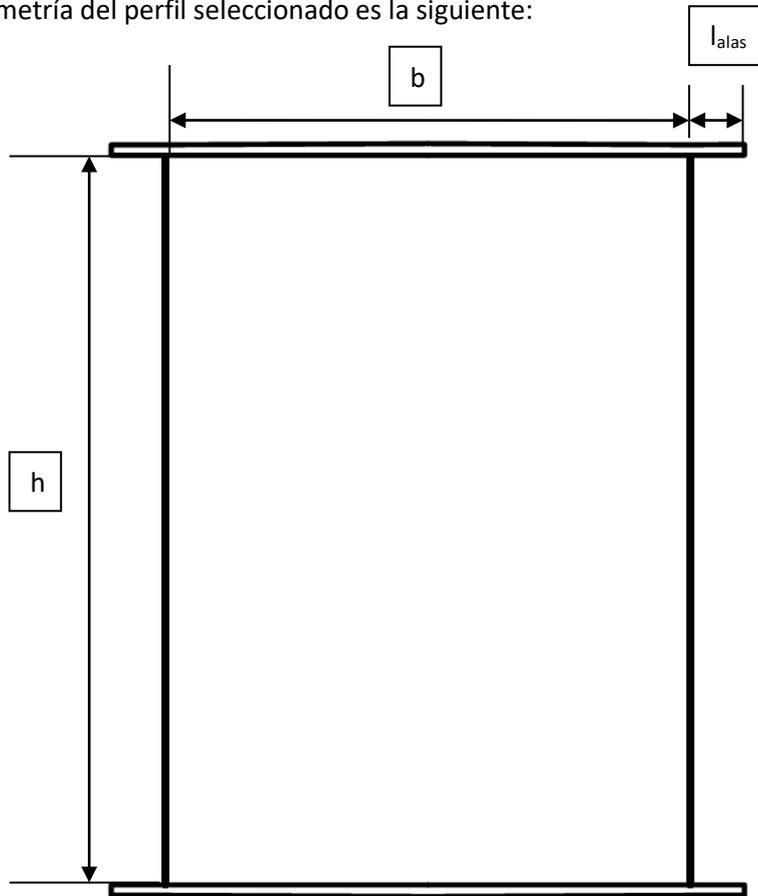


Imagen 20. Perfil cajón con alas de la viga del puente grúa

Se seleccionan como valores de los anteriores parámetros:

- $h$  (canto)= 1,4 m
- $b$  (anchura)= 1m
- $l_{\text{alas}}$ = 0,10 m
- $e_{\text{alas}}$ = 0,01 m
- $e_{\text{almas}}$ = 0,005 m

Una vez seleccionado el perfil, se vuelve al apartado anterior para comprobar si el perfil seleccionado es válido para dichas condiciones de trabajo.

Seleccionando este perfil, se puede calcular la masa total de la viga que se está diseñando para poder conocer así su coste real al igual que la influencia del peso propio de ésta sobre el resto de las estructuras del puente grúa:

- Se calcula el área del perfil:

$$A_{\text{perfil}} = h \cdot b - (h - 2 \cdot e_{\text{alas}}) \cdot (b - 2 \cdot e_{\text{almas}}) + 4 \cdot (l_{\text{ala}} \cdot e_{\text{alas}}) \quad \text{Ec. 1}$$

$$A_{\text{perfil}} = 0,0378 \text{ m}^2$$

- Se calcula la masa de la viga del puente grúa:

$$m_{viga} = A_{perfil} \cdot L_{viga} \cdot \rho_{acero S275} \quad \text{Ec. 2}$$

$$m_{viga} = 0,0378 \text{ m}^2 \cdot 30 \text{ m} \cdot 7849,0474 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 8900,8198 \text{ kg}$$

**2.1.1.1.** Simplificar la carga total operativa como una fuerza puntual:

A su vez, dentro de este análisis, se tienen los siguientes casos de estudio:

- **2.1.1.1.1.** Carga aplicada en el centro de la viga, es decir en  $x=15$  metros.
- **2.1.1.1.2.** Carga aplicada en uno de los dos extremos de la viga, ya que debido a la simetría de la misma, los resultados tensionales serán iguales si se aplica la carga en cualquiera de los dos extremos para la misma posición respecto del centro de la viga.

Cuando se aplica la carga en el centro de la viga, se está estudiando el caso en que las tensiones normales serán máximas porque se genera el valor del máximo momento flector.

Cuando se aplique la carga en uno de los dos extremos, las tensiones tangenciales se harán máximas porque se genera el valor máximo del esfuerzo cortante.

De esta manera con estos dos ensayos sobre la estructura se puede dimensionar el perfil de la viga, cubriendo todas las tensiones máximas, y por tanto dimensionando el perfil para las situaciones más críticas que deberá soportar la estructura cuando trabaje con la carga máxima operativa del puente grúa.

El criterio de plastificación de Von Mises se basa en que la tensión equivalente de Von Mises sea menor o igual que el límite elástico del material.

El límite elástico depende de la estructura interna del material y de las uniones entre las partículas que lo conforman, la viga de esta estructura del puente grúa es de acero del tipo S275, es decir su límite elástico tiene un valor de 275 MPa.

Para calcular la tensión equivalente de Von Mises se aplica la siguiente fórmula:

$$\sigma_{eq.VM} = \sqrt{\sigma_x^2 + 3 \cdot \tau_{xy}^2} \quad \text{Ec. 3}$$

Es decir el criterio de plastificación de Von Mises se reduce a las siguiente expresión:

$$\sigma_{eq.VM} = \sqrt{\sigma_x^2 + 3 \cdot \tau_{xy}^2} \leq \sigma_y$$

Teniendo en cuenta que:

- $\sigma_x$ = tensión normal (N/m<sup>2</sup>)
- $\sigma_{eq.VM}$ =tensión equivalente de Von Mises(N/m<sup>2</sup>)
- $\tau_{xy}$ =tensión tangencial(N/m<sup>2</sup>)
- $\sigma_y$ = límite elástico del material(N/m<sup>2</sup>)

Como criterio de signos positivo, de ahora en adelante se aplicará el siguiente:

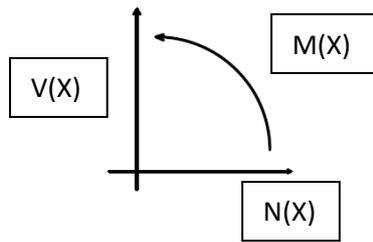


Imagen 21. Criterio de signos positivo empleado en los cálculos

Para el resto de cálculos se debe tener en cuenta que el plano de trabajo en el software "SAP2000" es el plano "XZ", siendo el eje vertical el "z" y el eje horizontal el "x".

2.1.1.1.1. Carga aplicada en el centro de la viga, es decir en x=15 metros:

Para el caso en que se aplica la fuerza de 196000 N en x=15 metros, es decir en el centro de la viga, se pueden calcular sus reacciones y diagramas correspondientes mediante el software o por un procedimiento sencillo de cálculo teórico debido a que se trata de una estructura isostática. En este primer caso se realizará de ambas maneras para asegurar que se están introduciendo correctamente los datos en el programa de cálculo, para así tener la certeza de que se obtiene el correcto resultado tensional de la estructura:

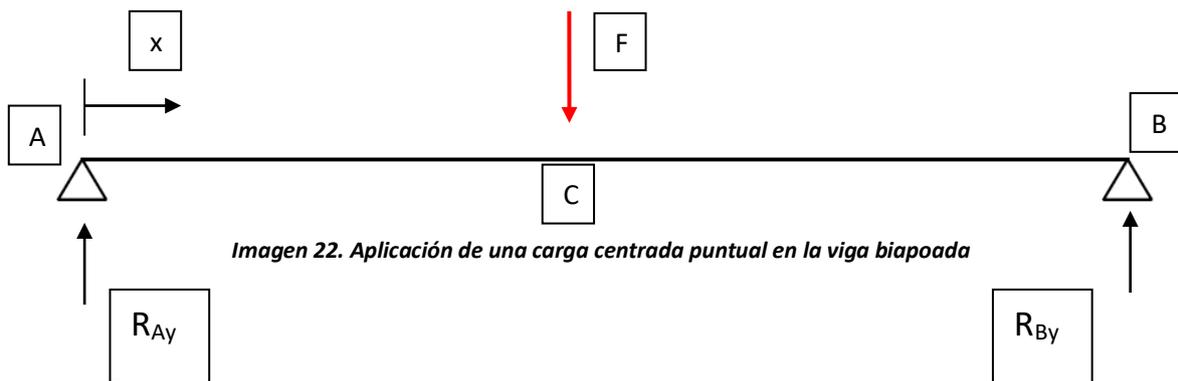


Imagen 22. Aplicación de una carga centrada puntual en la viga biapoyada

2.1.1.1.1.1. Cálculo teórico:

Lo primero es calcular las reacciones mediante un equilibrio:

$$\Sigma M_A = 0 \rightarrow R_{By} \cdot 30 - 196000 \cdot 15 = 0 \rightarrow R_{By} = 98600 \text{ N} \quad \text{Ec. 4}$$

$$\Sigma M_B = 0 \rightarrow -R_{Ay} \cdot 30 + 196000 \cdot 15 = 0 \rightarrow R_{Ay} = 98600 \text{ N} \quad \text{Ec. 5}$$

Ahora se realiza el equilibrio de barras y nudos para calcular los esfuerzos internos de la viga y así poder representar los diagramas de la estructura:

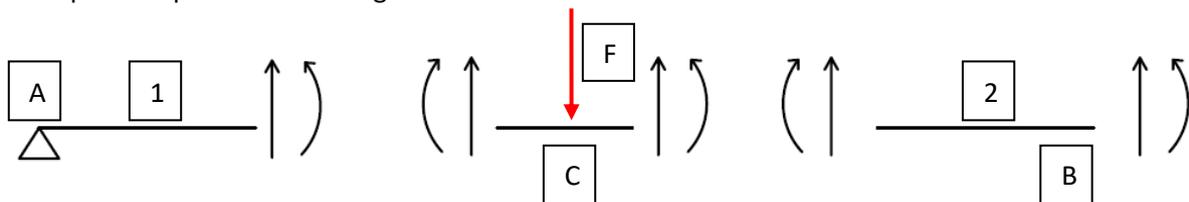


Imagen 23. Esfuerzos internos en la viga biapoyada

$$\begin{array}{lll}
 N_c^1 = 0 \text{ N} & N_c^2 = 0 \text{ N} & N_B^2 = 0 \text{ N} \\
 V_c^1 = 98000 \text{ N} & V_c^2 = 98000 \text{ N} & V_B^2 = 98000 \text{ N} \\
 M_c^1 = 1470000 \text{ N} \cdot \text{m} & M_c^2 = 1470000 \text{ N} \cdot \text{m} & M_B^2 = 0 \text{ N} \cdot \text{m}
 \end{array}$$

Con una longitud del primer tramo de 15 metros y de otros 15 metros el segundo tramo.

Una vez obtenidos los valores de los esfuerzos internos de cada tramo, se dibujan los diagramas de esfuerzos cortantes y momentos flectores. No se tienen en cuenta los esfuerzos axiales, ya que son nulos, debido a que al no haber cargas horizontales exteriores no se generan estos esfuerzos en la estructura.

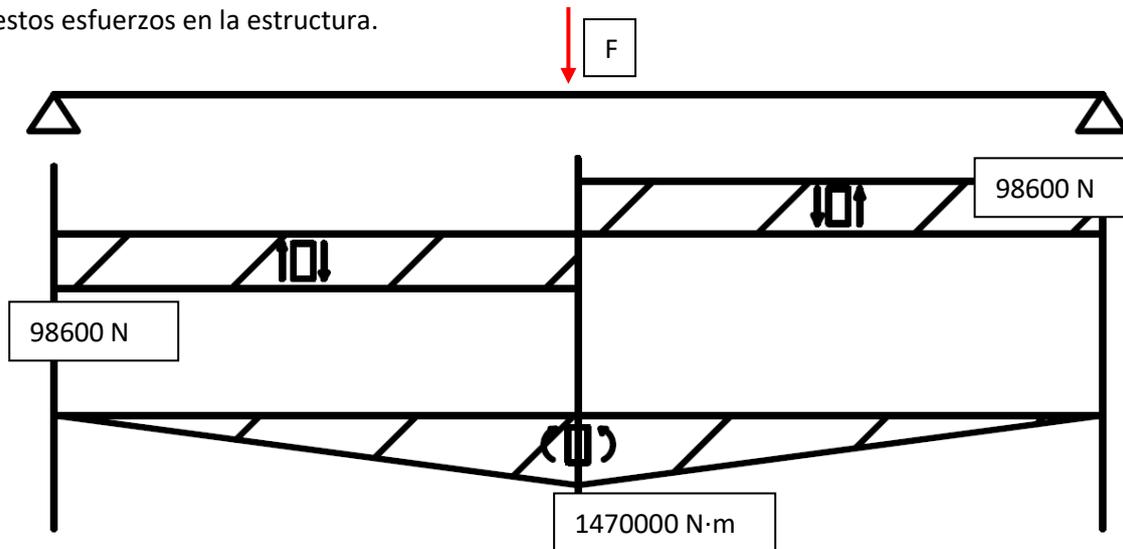


Imagen 24. Diagramas de esfuerzos de la viga biapoyada

#### 2.1.1.1.1.2. Cálculo mediante el software "SAP2000":

Se define la geometría de la viga biapoyada, con 30 metros de longitud y una carga en  $x=15$  metros de valor 196000 N correspondiente a las 20 toneladas de carga máxima operativa del puente grúa.

También se define el material como acero S275, un perfil tubular cualquiera, a pesar de que estos dos últimos datos no afectarán a lo calculado hasta ahora.

Se obtienen los siguientes resultados:

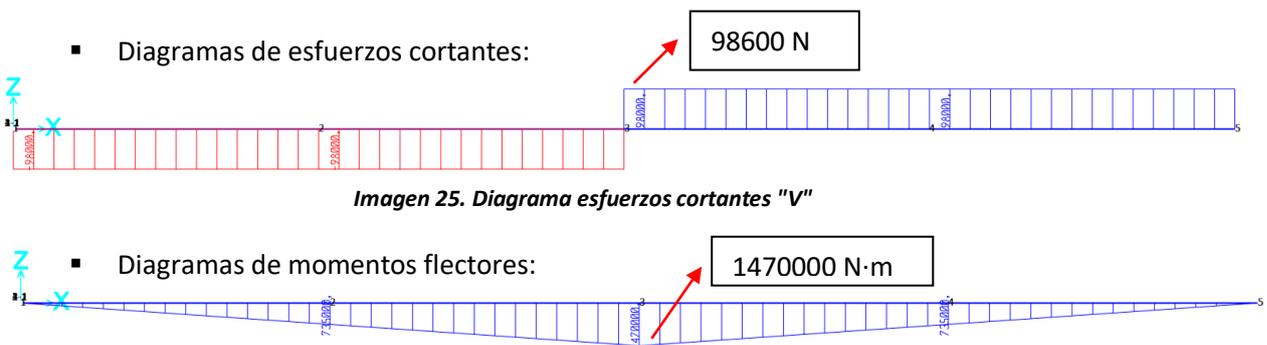


Imagen 25. Diagrama esfuerzos cortantes "V"

Imagen 26. Diagrama de momentos flectores "M"

Como se puede observar los valores obtenidos coinciden con los calculados de manera teórica, con ello se asegura que se han introducido de manera correcta la geometría y las condiciones de contorno de la viga, luego el estudio se puede apoyar fiablemente en el software para poder obtener el resto de valores tensionales de la estructura y así poder dimensionar el perfil necesario para que dicha estructura cumpla los requisitos de carga máxima operativa del puente grúa.

Como se ha dicho anteriormente, este caso de carga es el que hace que las tensiones normales " $\sigma_x$ " sean máximas.

**2.1.1.1.2.** En uno de los dos extremos de la viga:

Este caso de carga, sin embargo, es el que hace máximas las tensiones tangenciales " $\tau_{xy}$ ".

La carga en la situación más crítica en cuanto a tensiones tangenciales estará posicionada lo más cerca del apoyo posible. Esta distancia está limitada por la longitud de los topes de carro del puente grúa, es decir, a pesar de que esta primera estructura del puente grúa mide 30 metros, la distancia real operativa en la que se puede mover la carga es menor, debido a que se ve reducida por la posición más extrema que puede tener el carro en esta estructura.

En el caso de estudio, el centro del carro (que es el punto donde se está posicionando la carga de manera simplificada para realizar los cálculos en este estudio) como máximo se puede posicionar a 1,25 metros de uno de los apoyos, es decir  $x=1,25$  metros en este caso de estudio.

Nuevamente se comparan los resultados obtenidos de manera teórica con los que proporciona el software:

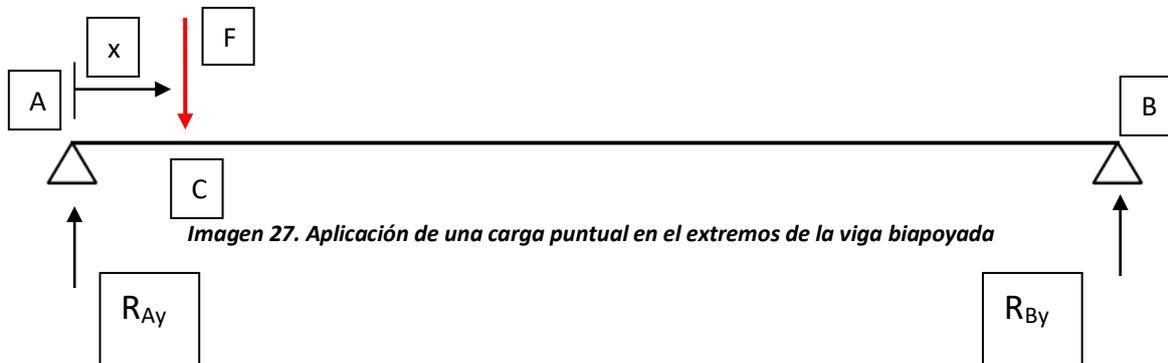


Imagen 27. Aplicación de una carga puntual en el extremos de la viga biapoyada

**2.1.1.1.2.1.** Cálculo teórico:

Lo primero es calcular las reacciones mediante un equilibrio:

$$\Sigma M_A = 0 \rightarrow R_{By} \cdot 30 - 196000 \cdot 1,25 = 0 \rightarrow R_{By} = 8166,66 \text{ N} \quad \text{Ec. 6}$$

$$\Sigma M_B = 0 \rightarrow -R_{Ay} \cdot 30 + 196000 \cdot 28,75 = 0 \rightarrow R_{Ay} = 187833,33 \text{ N} \quad \text{Ec. 7}$$

Ahora se realiza el equilibrio de barras y nudos para calcular los esfuerzos internos de la viga y así poder representar los diagramas de la estructura:

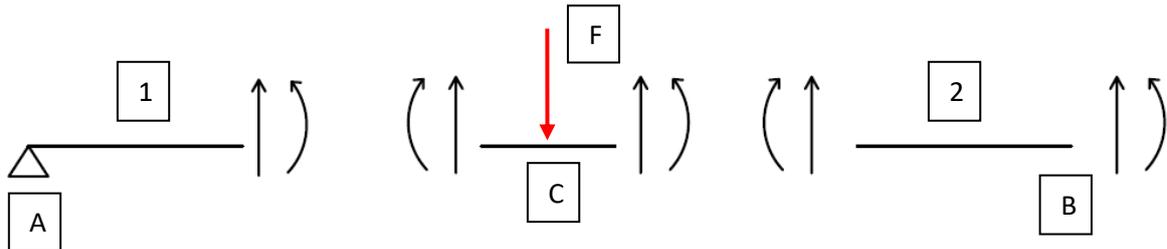


Imagen 28. Esfuerzos internos en la viga biapoyada

$$\begin{array}{lll}
 N_c^1 = 0 \text{ N} & N_c^2 = 0 \text{ N} & N_B^2 = 0 \text{ N} \\
 V_c^1 = 187833 \text{ N} & V_c^2 = 8166,66 \text{ N} & V_B^2 = 8166,66 \text{ N} \\
 M_c^1 = 234791,25 \text{ N} \cdot \text{m} & M_c^2 = 234791,25 \text{ N} \cdot \text{m} & M_B^2 = 0 \text{ N} \cdot \text{m}
 \end{array}$$

Con una longitud del primer tramo de 1,25 metros y de 28,75 metros el segundo tramo.

Una vez obtenidos los valores de los esfuerzos internos de cada tramo, se dibujan los diagramas de esfuerzos cortantes y momentos flectores. Igual que en el caso anterior, los esfuerzos axiales son nulos debido a que al no haber cargas horizontales exteriores, no se generan estos esfuerzos en la estructura.

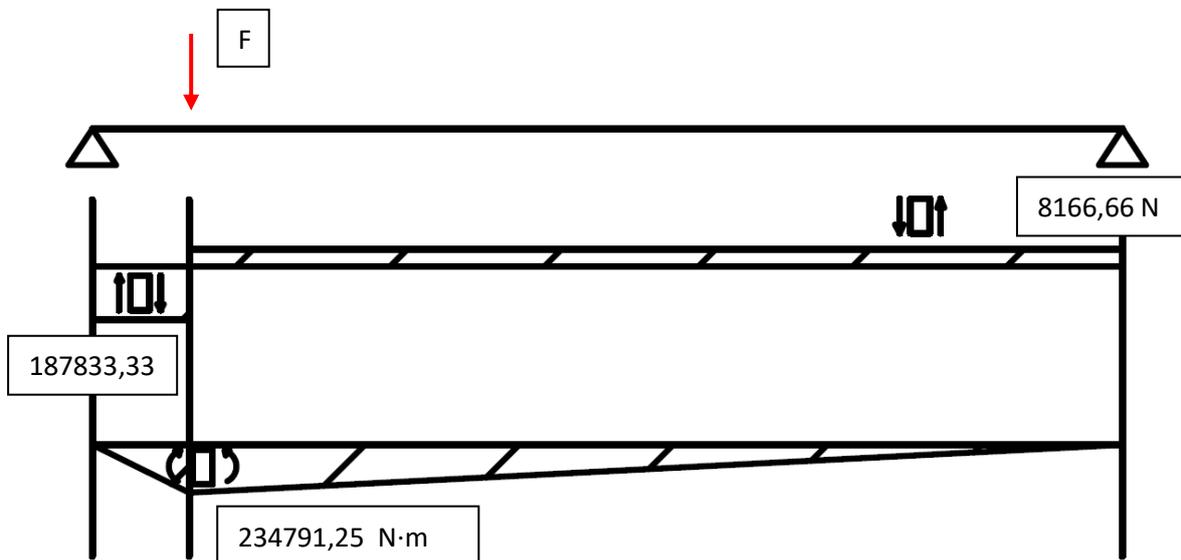


Imagen 29. Diagramas de esfuerzos de la viga biapoyada

#### 2.1.1.1.2.2. Cálculo mediante el software "SAP2000":

Nuevamente se define la geometría de la viga biapoyada, con 30 metros de longitud igual que en el caso anterior, pero esta vez la carga estará en  $x=1,25$  metros y nuevamente será de valor 196000 N correspondiente a las 20 toneladas de carga máxima operativa del puente grúa.

De nuevo se define también el material como acero S275, un perfil tubular cualquiera, a pesar de que estos dos últimos datos no afectarán a lo calculado hasta ahora.

Se obtienen los siguientes resultados:

- Diagramas de esfuerzos cortantes:

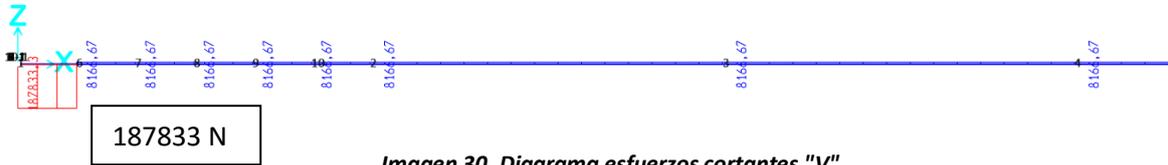


Imagen 30. Diagrama esfuerzos cortantes "V"

- Diagramas de momentos flectores:

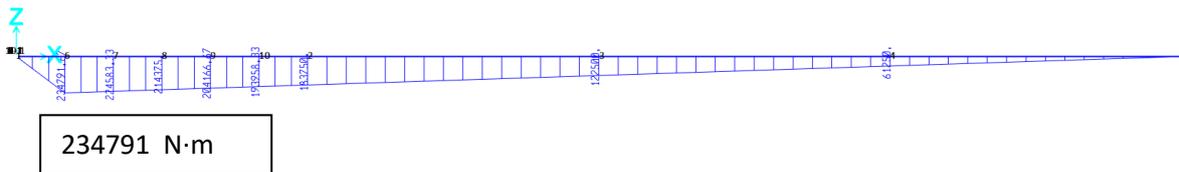


Imagen 31. Diagrama de momentos flectores "M"

Al igual que en el caso anterior, los resultados obtenidos mediante el cálculo teórico y mediante el software "SAP2000" coinciden. De esta manera, se conocen los valores de los máximos esfuerzos cortantes y momentos flectores que tendrá esta estructura del puente grúa cuando éste se cargue con su máxima carga operativa y ésta se encuentre en una de estas dos situaciones límites.

### 2.1.1.1.3. Aplicación del criterio de Von Mises para dimensionar el perfil de la viga de la primera estructura del puente grúa y comprobación de la flecha máxima de la misma:

Como se ha citado anteriormente, el criterio de plastificación de Von Mises se basa en la ecuación 3.

Se conoce que el " $\sigma_y$ " es el límite elástico del material, en este caso acero S275, de valor 275 MPa, es decir 275 N/mm<sup>2</sup>.

La tensión normal a su vez se puede definir como:

$$\sigma_x = \frac{N}{A} + \frac{M_y}{I_z} \cdot y_{m\acute{a}x} \quad \text{Ec. 8}$$

- N= esfuerzo axil (N)
- $M_y$ = momento flector (N·m)
- A= área de la sección (m<sup>2</sup>)
- $I_z$ = inercia en el eje "z" (m<sup>4</sup>)
- $y_{m\acute{a}x}$ =h/2--->h=canto del perfil de la viga (m)

La tensión tangencial se podría calcular en el perfil de la viga según la posición de la carga, pero también se puede aproximar con un pequeño error en la precisión en el resultado como:

$$\tau_{xy} = \frac{V}{A_{alma}} \quad \text{Ec. 9}$$

- V=esfuerzo cortante (N)
- $A_{alma}$ = área del alma del perfil de la viga(m<sup>2</sup>)

Para los dos casos anterior de posición de la carga máxima operativa del puente grúa, los valores máximos de los esfuerzos internos de la barra son:

- Caso carga en el centro de la viga (x=15 metros):

$$M=1470000 \text{ N}\cdot\text{m}$$

$$V= 98000 \text{ N}$$

- Caso carga en extremos de la viga (x=1,25 metros):

$$M=234791,25 \text{ N}\cdot\text{m}$$

$$V= 187833,33 \text{ N}$$

Se selecciona para el primer caso el punto de mayor momento flector para estudiar el valor máximo de la tensión normal " $\sigma_x$ " y en el segundo, el punto de mayor esfuerzo cortante para así estudiar el valor máximo de la tensión tangencial " $\tau_{xy}$ ".

Se aplica el criterio de Von Misses para los dos casos más críticos de la posición de la carga, para así poder dimensionar el perfil de la viga del puente grúa:

Lo primero que se debe hacer es, una vez conocida la geometría del perfil, calcular el valor de la inercia sobre el eje "z", es decir " $I_z$ ", en este caso tiene un valor de 0,0138 m<sup>4</sup>.

Se calculan las tensiones equivalentes de Von Misses para cada caso:

- Caso carga en el centro de la viga (x=15 metros): aplicando las ecuaciones 8 y 9 respectivamente:

Tensión normal--->  $\sigma_x = 74565217,39 \text{ N/m}^2$

Tensión tangencial--->  $\tau_{xy} = 7144927,536 \text{ N/m}^2$

$$\sigma_{eq.VM} = \sqrt{74565217,39^2 + 3 \cdot 7144927,536^2} = 75585194,4 \text{ Pa} = 75,585 \text{ MPa}$$

$$75,585 \text{ MPa} < 275 \text{ MPa}$$

- Caso carga en extremos de la viga (x=1,25 metros):

Tensión normal--->  $\sigma_x = 11909701,09 \text{ N/m}^2$

Tensión tangencial--->  $\tau_{xy} = 13611086,96 \text{ N/m}^2$

$$\sigma_{eq.VM} = \sqrt{11909701,09^2 + 3 \cdot 13611086,96^2} = 26412611,46 \text{ Pa} = 26,413 \text{ MPa}$$

$$26,413 \text{ MPa} < 275 \text{ MPa}$$

Ahora se compara el valor de esta tensión obtenida con el valor del límite elástico del material. Como se observa, al ser menores los valores obtenidos que este último, la viga no plastifica en ninguno de los casos más críticos en cuanto a la posición de su carga máxima operativa.

A pesar de que las tensiones podrían ser mucho mayores y aún así seguiría cumpliendo el criterio de plastificación de Von Mises, es decir se podría reducir el tamaño de la sección del perfil para aligerarla y abaratar los costes. En este caso no se realiza esto, debido a que como se ha dicho anteriormente, además de cumplir el criterio de plastificación de Von Mises, debe cumplir los siguientes aspectos para ser válido:

Que la flecha o el desplazamiento máxima no sean excesivos:

Se debe tener en cuenta que el desplazamiento máximo ("f") de la viga en el eje "z" no puede ser excesivo, en este caso se selecciona como condición a cumplir:

$$\frac{f}{L} < \frac{1}{500} \quad \text{Ec. 10}$$

Es decir:

$$\frac{f}{30} < 2 \cdot 10^{-3}$$

Con el propio software o mediante la aplicación de la expresión del desplazamiento o flecha máxima de un prontuario de estructuras, en este caso para una viga biapoyada con una fuerza puntual en una determinada coordenada de la misma, o de manera teórica:

$$y_{\text{máx}} = \frac{F \cdot b}{9 \cdot E \cdot I \cdot L \cdot \sqrt{3}} \cdot (L^2 - b^2)^{\frac{3}{2}} \quad \text{Ec. 11}$$

Siendo el parámetro "b" la distancia entre el punto de aplicación de la fuerza y el segundo apoyo de la viga, es decir, equivale a la longitud menos el valor de la coordenada longitudinal "x" de la fuerza sobre la viga, aplicando la expresión anterior, se obtiene;

Y para el caso de que la fuerza se encuentre en el centro de la viga:

$$y_{\text{máx}} = \frac{F \cdot L^3}{48 \cdot E \cdot I} \quad \text{Ec. 12}$$

- Caso carga en el centro de la viga (x=15 metros):

$$y_{\text{máx}} = 0,03804 \text{ m}$$

$$\frac{0,03804}{30} = 1,268 \cdot 10^{-3} < 2 \cdot 10^{-3}$$

- Caso carga en extremos de la viga (x=1,25 metros):

$$y_{\text{máx}} = 0,004868 \text{ m}$$

$$\frac{0,004868}{30} = 1,623 \cdot 10^{-4} < 2 \cdot 10^{-3}$$

Posteriormente se comprobará que estos valores cumplen la relación para la cual ha sido dimensionado el perfil de la viga.

Los valores de los desplazamientos máximos calculados mediante el software "SAP2000", son los siguientes:

- Caso carga en el centro de la viga (x=15 metros):

$$y_{m\acute{a}x} = 0,0394 \text{ m}$$

- Caso carga en extremos de la viga (x=1,25 metros):

$$y_{m\acute{a}x} = 0,0049 \text{ m}$$

Para el cálculo de los desplazamientos de los diferentes puntos estudiados en la viga del puente grúa, el material y el perfil de la misma si serán determinantes en sus valores.

Como se puede observar son muy similares a los calculados de manera teórica mediante fórmulas (la diferencia es debido a errores de redondeo de decimales y aplicación de las fórmulas), por lo tanto, se puede concluir que el perfil seleccionado para este primer estudio es correcto, debido a que no plastifica según el criterio de plastificación de Von Misses y sus desplazamientos máximos no son excesivos para la geometría de la viga.

Se selecciona este perfil a pesar de que cumple las condiciones de manera holgada, probablemente se podría seleccionar un perfil de menores dimensiones, pero al no realizar el estudio de fatiga, se prefiere seleccionar un perfil que tenga cierto margen de seguridad para que de esta manera se puedan evitar posibles errores en su dimensionado. Además, para seleccionar este perfil como válido se debe realizar el estudio de pandeo lateral y abolladura, realizado posteriormente.

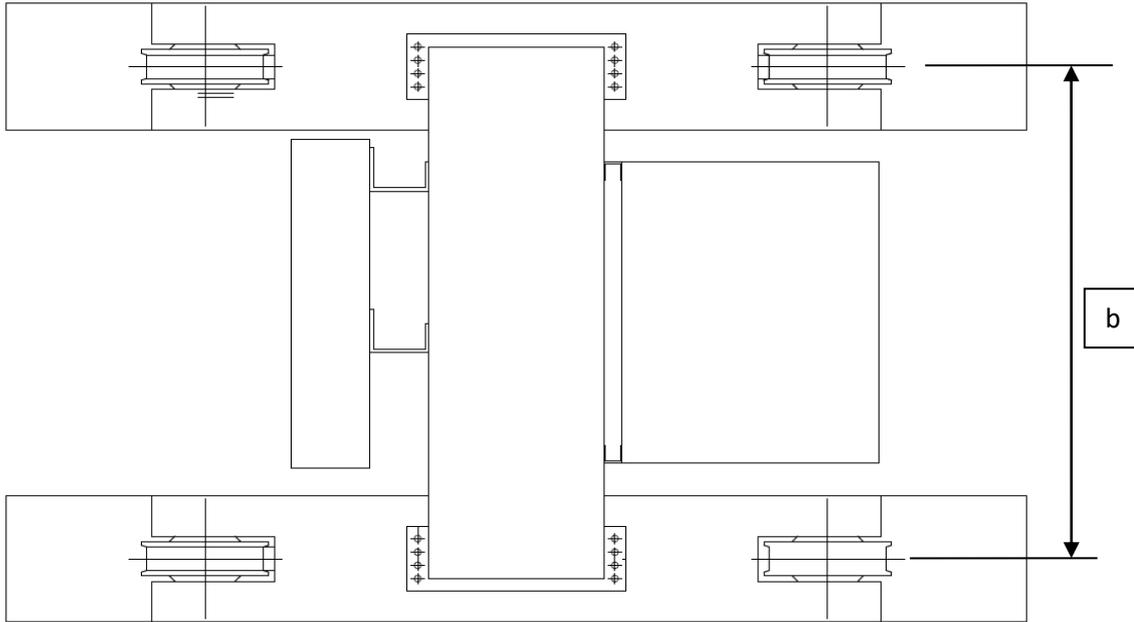
**2.1.1.2.** Simplificar la carga total operativa como dos fuerzas puntuales, separadas a una distancia de 1,5 metros (que corresponde a la separación entre los dos ejes del carro que se mueve por esta primera estructura del puente grúa, es decir la batalla del carro):

A su vez dentro de este análisis, se tienen los siguientes casos de estudio:

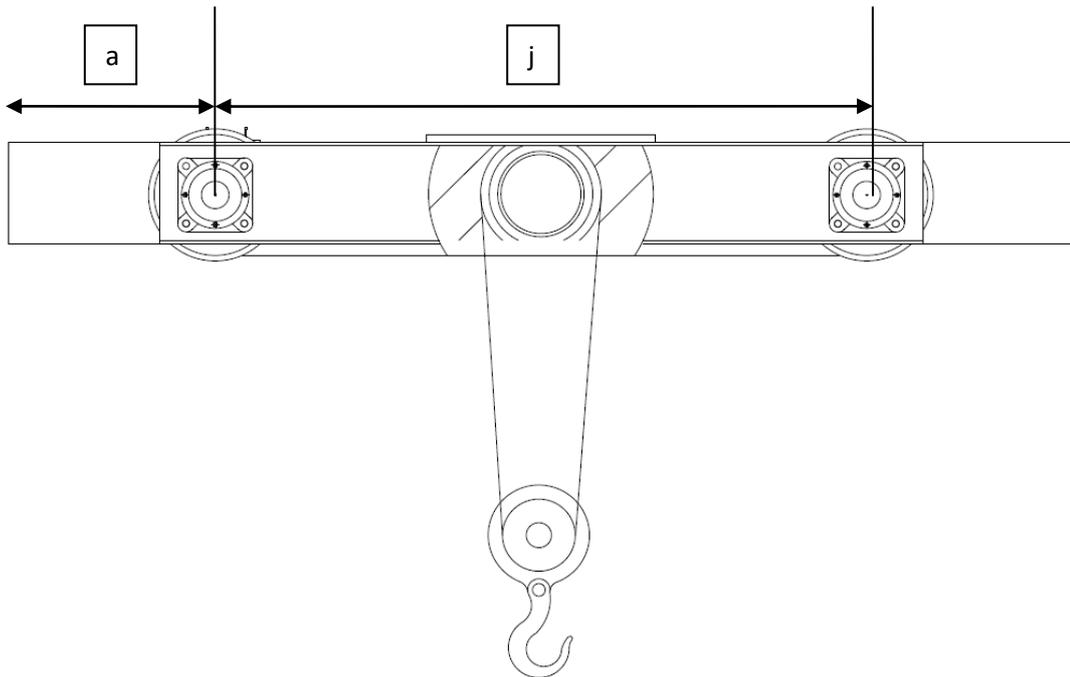
- **2.1.1.2.1.** Primera carga situada en x=14,25 m, y segunda carga en x=15,75 m.
- **2.1.1.2.2.** Primera carga situada en x=0,5 m, y segunda carga en x=2 m.

La posición de las dos fuerzas sobre las que se simplifica el caso de estudio, es debido a la geometría del carro que porta la carga máxima operativa sobre la viga del puente grúa, siendo la geometría del carro la siguiente:

## Capítulo 2. Dimensionado de la viga del puente grúa



**Imagen 32. Vista planta del carro de polipasto**



**Imagen 33. Vista lateral del carro de polipasto**

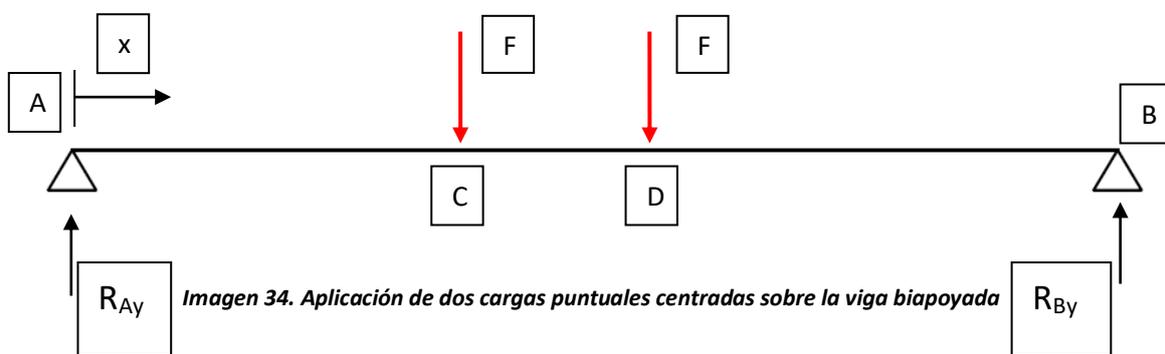
- a (anchura voladizo)=0,5 m
- b (anchura del carro= vía del carro)=1,6m
- j (batalla)= 1,5 m

En este caso, se está simplificando la carga total máxima operativa de 20 toneladas (196000 N), como dos cargas puntuales, por lo tanto, "F" tendrá un valor de 98000 N.

Nuevamente cuando se posiciona el carro en el centro de la viga, se está estudiando el caso en que las tensiones normales son máximas, y cuando se posiciona en uno de los dos extremos de la viga, las tensiones tangenciales se hacen máximas.

De esta manera, se estudian de nuevo los dos casos de carga más crítica. Se aplica el criterio de plastificación de Von Mises de la misma manera que antes para comprobar si el perfil seleccionado no plastifica y por tanto, es válido para fabricar esta estructura del puente grúa.

**2.1.1.2.1.** Primera carga situada en  $x=14,25$  m, y segunda carga en  $x=15,75$  m:



**2.1.1.2.1.1.** Cálculo teórico:

Lo primero es calcular las reacciones mediante un equilibrio:

$$\begin{aligned} \Sigma M_A = 0 &\rightarrow R_{By} \cdot 30 - 98000 \cdot 14,25 - 98000 \cdot 15,75 = 0 && \text{Ec. 13} \\ &\rightarrow R_{By} = 98000 \text{ N} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Sigma M_B = 0 &\rightarrow -R_{Ay} \cdot 30 + 98000 \cdot 14,25 + 98000 \cdot 15,75 = 0 && \text{Ec. 14} \\ &\rightarrow R_{Ay} = 98000 \text{ N} \end{aligned}$$

Ahora se realiza el equilibrio de barras y nudos para calcular los esfuerzos internos de la viga y así poder representar los diagramas de la estructura:

$$\begin{array}{lll}
 N_c^1 = 0 \text{ N} & N_c^2 = 0 \text{ N} & N_D^2 = 0 \text{ N} \\
 V_c^1 = 98000 \text{ N} & V_c^2 = 0 \text{ N} & V_D^2 = 0 \text{ N} \\
 M_c^1 = 1396500 \text{ N} \cdot \text{m} & M_c^2 = 1396500 \text{ N} \cdot \text{m} & M_D^2 = 1396500 \text{ N} \cdot \text{m} \\
 \\ 
 N_D^3 = 0 \text{ N} & & N_B^3 = 0 \text{ N} \\
 V_D^3 = 98000 \text{ N} & & V_B^3 = 98000 \text{ N} \\
 M_D^3 = 1396500 \text{ N} \cdot \text{m} & & M_B^3 = 0 \text{ N} \cdot \text{m}
 \end{array}$$

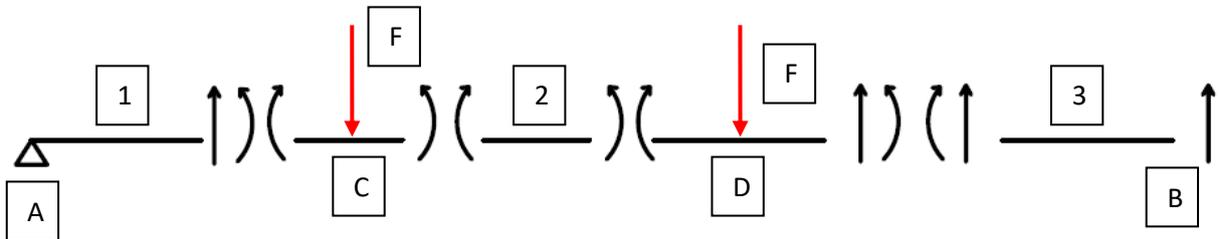


Imagen 35. Esfuerzos internos en la viga biapoyada

Una vez obtenidos los valores de los esfuerzos internos de cada tramo, se dibujan los diagramas de esfuerzos cortantes y momentos flectores. Se obvian los esfuerzos axiales, ya que son nulos, debido a que al no haber cargas horizontales exteriores, no se generan estos esfuerzos en la estructura.

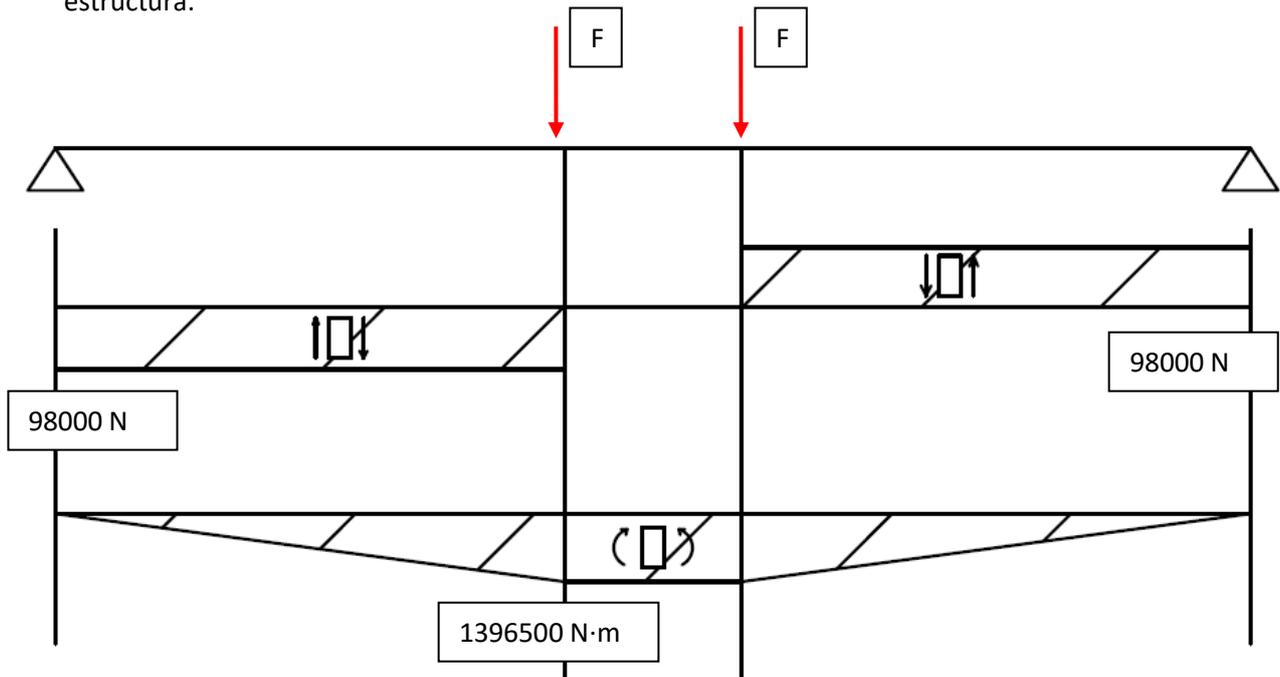


Imagen 36. Diagramas de esfuerzos de la viga biapoyada

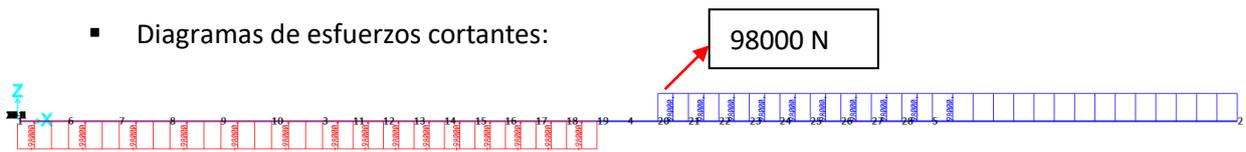
**2.1.1.2.1.2..Cálculo mediante el software "SAP2000":**

De nuevo se define la geometría de la viga biapoyada, con 30 metros de longitud igual que en el caso anterior , pero esta vez la carga esta en  $x=14,25$  metros y tendrá un valor de 98000 N, que corresponde con la fuerza que genera cada uno de los dos ejes del carro. La otra fuerza, del mismo valor que la anterior, se situa en  $x=15,75$  metros.

Nuevamente se definen el material como acero S275 y un perfil tubular cualquiera, a pesar de que estos dos últimos datos no afectarán a lo calculado hasta ahora.

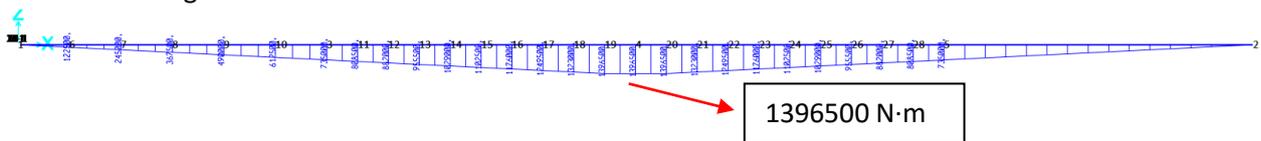
Obtenemos los siguientes resultados:

- Diagramas de esfuerzos cortantes:



*Imagen 37. Diagrama esfuerzos cortantes "V"*

- Diagramas de momentos flectores:

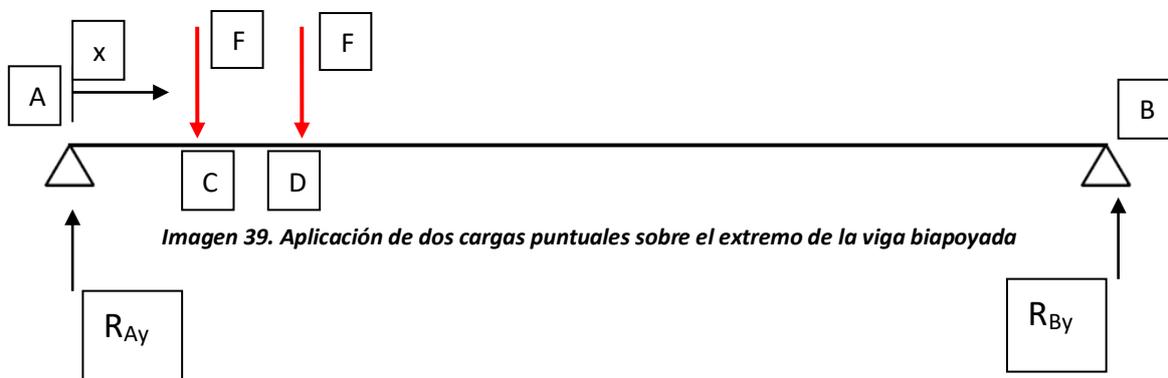


*Imagen 38 Diagrama de momentos flectores "M"*

De nuevo se puede observar que los resultados calculados de manera teórica coinciden con los que proporciona el software "SAP2000".

**2.1.1.2.2. Primera carga situada en  $x=0,5$  m, y segunda carga en  $x=2$  m:**

Nuevamente el valor de la fuerza "F" es de 98000 N.



*Imagen 39. Aplicación de dos cargas puntuales sobre el extremo de la viga biapoyada*

**2.1.1.2.2.1. Cálculo teórico:**

Lo primero es calcular las reacciones mediante un equilibrio:

Capítulo 2. Dimensionado de la viga del puente grúa

$$\begin{aligned} \Sigma M_A = 0 \rightarrow R_{By} \cdot 30 - 98000 \cdot 14,25 - 98000 \cdot 15,75 &= 0 & \text{Ec. 15} \\ \rightarrow R_{By} &= 98000 \text{ N} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Sigma M_B = 0 \rightarrow -R_{Ay} \cdot 30 + 98000 \cdot 14,25 + 98000 \cdot 15,75 &= 0 & \text{Ec. 16} \\ \rightarrow R_{Ay} &= 98000 \text{ N} \end{aligned}$$

Ahora se realiza el equilibrio de barras y nudos para calcular los esfuerzos internos de la viga y así poder representar los diagramas de la estructura:

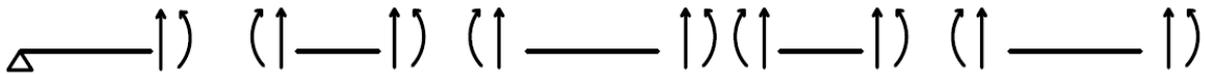


Imagen 40. Esfuerzos internos en la viga biapoyada

$N_c^1 = 0 \text{ N}$	$N_c^2 = 0 \text{ N}$	$N_D^2 = 0 \text{ N}$
$V_c^1 = 187833,33 \text{ N}$	$V_c^2 = 89833,33 \text{ N}$	$V_D^2 = 89833,33 \text{ N}$
$M_c^1 = 93916,65 \text{ N} \cdot \text{m}$	$M_c^2 = 93916,65 \text{ N} \cdot \text{m}$	$M_D^2 = 228666,65 \text{ N} \cdot \text{m}$

$N_c^1 = 0 \text{ N}$	$N_c^2 = 0 \text{ N}$
$V_c^1 = 8166,67 \text{ N}$	$V_c^2 = 8166,66 \text{ N}$
$M_c^1 = 228666,65 \text{ N} \cdot \text{m}$	$M_c^2 = 0 \text{ N} \cdot \text{m}$

Nuevamente una vez obtenidos los valores de los esfuerzos internos de cada tramo, se dibujan los diagramas de esfuerzos cortantes y momentos flectores. Obviando de nuevo los esfuerzos axiales, ya que son nulos, debido a que al no haber cargas horizontales exteriores, no se generan estos esfuerzos en la estructura:

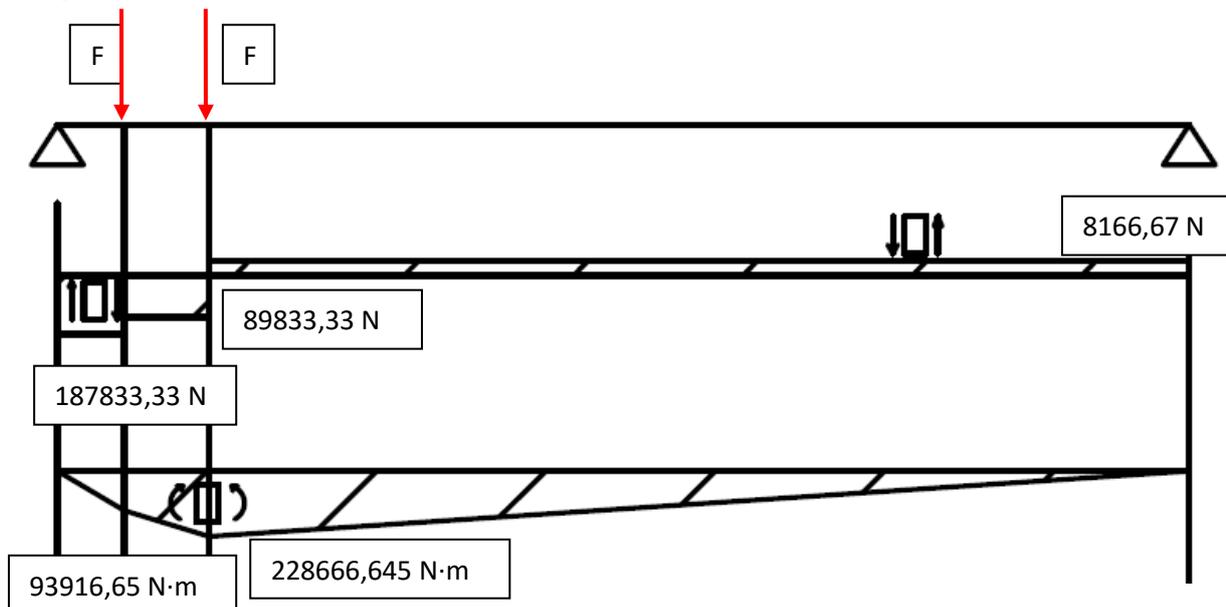


Imagen 41. Diagramas de esfuerzos de la viga biapoyada

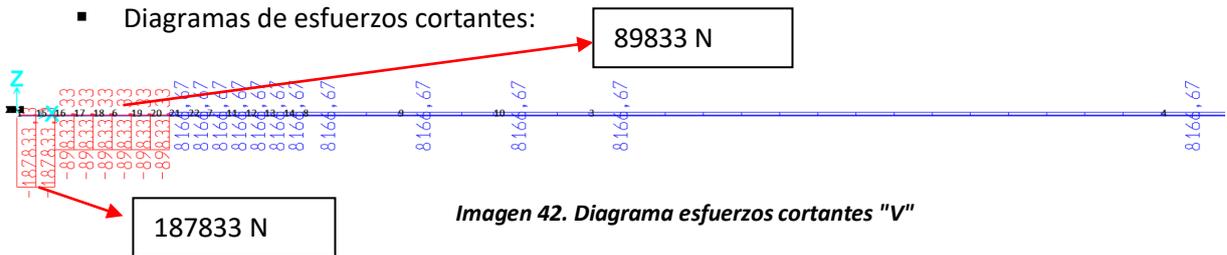
**2.1.1.2.2.2. Cálculo mediante el software "SAP2000":**

De nuevo, se define la geometría de la viga biapoyada, con 30 metros de longitud igual que en el caso anterior, pero esta vez la carga estará en  $x=0,5$  metros y tiene un valor de 98000 N, que corresponde con la fuerza que genera cada uno de los dos ejes del carro. La otra fuerza tiene el mismo valor que la anterior pero se sitúa en  $x=2$  metros.

Se define el material como acero S275, un perfil tubular cualquiera, a pesar de que estos dos últimos datos no afectarán a lo calculado hasta ahora.

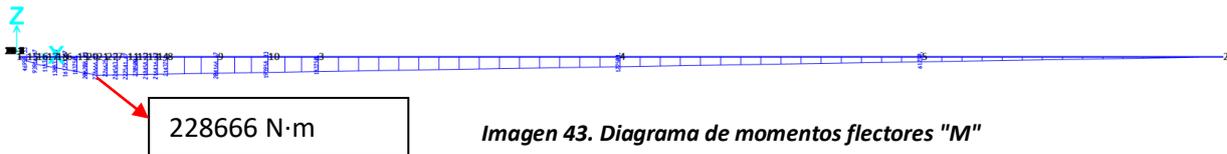
Se obtienen los siguientes resultados:

- Diagramas de esfuerzos cortantes:



*Imagen 42. Diagrama esfuerzos cortantes "V"*

- Diagramas de momentos flectores:



*Imagen 43. Diagrama de momentos flectores "M"*

De nuevo se puede observar que los resultados calculados de manera teórica coinciden con los que proporciona el software "SAP2000".

**2.1.1.2.3. Aplicación del criterio de Von Misses para dimensionar el perfil de la viga de la primera estructura del puente grúa:**

Se aplica el criterio de plastificación de Von Misses de la misma manera que para la simplificación de la carga máxima operativa como una única fuerza puntual.

Los puntos más críticos, anteriormente obtenidos son:

- Caso carga en el centro de la viga (Primera carga situada en  $x=14,25$  m, y segunda carga en  $x=15,75$  m):

$$M=13965000 \text{ N}\cdot\text{m}$$

$$V= 98000 \text{ N}$$

- Caso carga en uno de los extremos (izquierdo) de la viga (Primera carga situada en  $x=0,5$  m, y segunda carga en  $x=2$  m):

$$M=93916,65 \text{ N}\cdot\text{m}$$

$$V= 187833,33 \text{ N}$$

De nuevo se calculan las tensiones equivalentes de Von Mises para cada caso:

- Caso carga en el centro de la viga (Primera carga situada en  $x=14,25$  m, y segunda carga en  $x=15,75$  m):

Tensión normal--->  $\sigma_x = 70836956,5 \text{ N/m}^2$

Tensión tangencial--->  $\tau_{xy} = 7101449,28 \text{ N/m}^2$

$$\sigma_{eq.VM} = \sqrt{70836956,5^2 + 3 \cdot 7101449,28^2} = 71896913,4 \text{ Pa} = 71,896 \text{ MPa}$$

$$71,896 \text{ MPa} < 275 \text{ MPa}$$

- Caso carga en uno de los extremos (izquierdo) de la viga (Primera carga situada en  $x=0,5$  m, y segunda carga en  $x=2$ ):

Tensión normal--->  $\sigma_x = 4763889,06 \text{ N/m}^2$

Tensión tangencial--->  $\tau_{xy} = 13611110,9 \text{ N/m}^2$

$$\sigma_{eq.VM} = \sqrt{4763889,06^2 + 3 \cdot 13611110,9^2} = 24051645,6 \text{ Pa} = 24,052 \text{ MPa}$$

$$24,052 \text{ MPa} < 275 \text{ MPa}$$

Como en el caso anterior, el perfil seleccionado no plastifica, por lo tanto, el dimensionado de la sección de la viga de esta estructura del puente grúa es correcto.

Una vez se ha comprobado que la estructura no sufre el fenómeno de plastificación mediante el criterio de Von Mises en ninguna de las dos anteriores simplificaciones de carga, como se ha dicho anteriormente, se debe comprobar que el perfil seleccionado para la viga del puente grúa no sufre pandeo lateral ni abolladura cuando se aplica sobre ésta la carga máxima operativa. Para determinar si es o no correcto el dimensionado inicial del perfil, este estudio se realizará más adelante.

Previamente a lo anterior, se comprueban los valores de los desplazamientos máximos calculados mediante el software "SAP2000", estos tienen los siguientes valores:

- Caso carga en el centro de la viga ( $x=15$  metros):

$$y_{m\acute{a}x} = 0,0392 \text{ m}$$

- Caso carga en extremos de la viga ( $x=1,25$  metros):

$$y_{m\acute{a}x} = 0,0049 \text{ m}$$

Como se puede observar, los resultados obtenidos mediante el software "SAP2000" para la flecha máxima para cada uno de los dos casos críticos de carga son similares entre las dos simplificaciones de la aplicación de la carga. Por lo tanto se pueden tomar como válidos los resultados obtenidos con cada una de estas.

Se puede concluir que el perfil seleccionado para este segundo estudio, es correcto. Debido a que no plastifica según el criterio de plastificación de Von Mises y sus desplazamientos máximos no son excesivos para la geometría de la viga y cumplen la condición anteriormente impuesta en la ecuación 10.

Tras este primer dimensionado de la viga del puente grúa en el que se han realizado las comprobaciones de flecha o desplazamiento máximos y criterio de plastificación de Von Mises para la carga máxima operativa y las posiciones más críticas de carga, se concluye que el perfil inicialmente seleccionado es un perfil tubular rectangular con alas (cajón) de dimensiones 1,4 x 1 x 0,005 x 0,01 metros.

Hasta ahora solo se realizan estas dos simplificaciones debido a que simplemente se está estudiando el puente grúa como una viga biapoyada, es decir, como una barra. Dentro del software de cálculo, como "Frame", posteriormente se comprobará si el perfil seleccionado es o no válido, verificando si se produce o no el fenómeno de pandeo lateral y abolladura en la viga del puente grúa.

Para esto se diseñará la viga del puente grúa como "chapas" en vez de como una barra, es decir, elementos de área dentro del software, elementos del tipo "Shell". De esta manera se podrá simplificar la carga total como cuatro cargas puntuales desplazándose por la viga del puente grúa.

**2.2. Concepto y aplicación de las líneas de influencia para la viga del puente grúa:**

Una línea de influencia es aquella función que proporciona el valor que se busca para todas aquellas posiciones que toma una carga móvil unitaria a lo largo de toda la estructura. Las líneas de influencia pueden referirse a reacciones, tensiones, frecuencias propias, esfuerzos o deformaciones de cada uno de los nudos y tramos que componen la estructura analizada.

Para esta estructura del puente grúa, al haber simplificado su análisis a una viga biapoyada, se pueden obtener las líneas de influencia de ésta, de tres modos diferentes:

- Calcularlas de manera teórica aplicando ecuaciones de equilibrio de una estructura isostática.
- Aplicando fórmulas de prontuarios.
- Mediante el software "SAP2000".

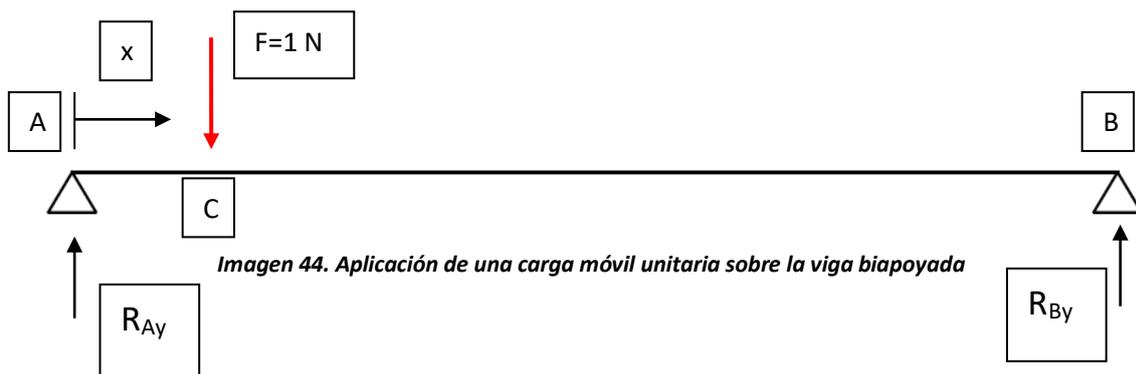
**2.2.1. Línea de influencia generada por una carga móvil unitaria:**

Para este primer análisis de líneas de influencia, se calculan mediante los tres anteriores métodos, para de esta manera asegurar que el programa "SAP2000" proporciona los valores que se necesitan para el estudio.

**2.2.1.1. Cálculo teórico aplicando ecuaciones de equilibrio en una estructura isostática:**

Para poder calcular las líneas de influencia, se aplica una carga móvil unitaria, variando la distancia en el eje "x" de aplicación de la misma. Se puede obtener la expresión en función del valor de "x", para las líneas de influencia de las reacciones de ambos apoyos y del momento flector de la sección central entre otros.

Se debe de tener en cuenta que las expresiones de las líneas de influencia son lineales en cuanto al valor de la fuerza "F". Por lo tanto, se pueden calcular para una fuerza de valor unitario, para obtener el valor de la línea de influencia de cualquier otro valor de fuerza, basta con multiplicar el valor de esa fuerza por el valor de la línea de influencia en el punto de aplicación de la fuerza sobre la viga.



Expresiones de las líneas de influencia para las reacciones en los apoyos:

$$\Sigma M_A = 0 \longrightarrow R_{By} \cdot 30 - 1 \cdot x = 0 \longrightarrow R_{By} = \frac{x}{30} N \quad \text{Ec. 17}$$

$$\Sigma M_B = 0 \longrightarrow -R_{Ay} \cdot 30 + 1 \cdot (L - x) = 0 \longrightarrow R_{Ay} = \frac{(30 - x)}{30} N \quad \text{Ec. 18}$$

Expresiones de la línea de influencia para el momento flector en la sección central:

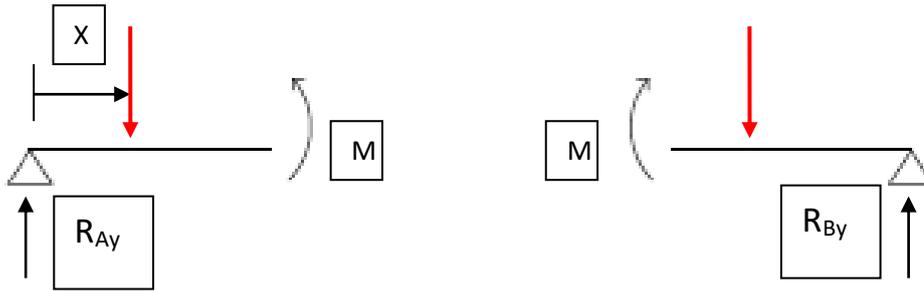


Imagen 45. Esfuerzos internos en la viga biapoyada.

Al estar calculando la línea de influencia para el momento flector de la sección central, cada tramo de la viga mide "L/2", es decir 15 metros, ya que se trata de la sección central de la misma.

Se obtiene la expresión de la línea de influencia para el momento flector de la sección central:

$$M = R_{Ay} \cdot 15 - 1 \cdot (15 - x) \longrightarrow 0 \leq x < 15 \quad \text{Ec. 19}$$

$$M = R_{By} \cdot 15 - 1 \cdot (x - 15) \longrightarrow 15 \leq x \leq 30 \quad \text{Ec. 20}$$

### 2.2.1.2. Aplicando fórmulas de prontuarios:

Para calcularlas mediante este método, se debe acceder a un prontuario de estructuras, y seleccionar una viga biapoyada con una carga móvil que recorra toda la viga variando su posición en el eje longitudinal "x" de la misma.

Se aplican las siguientes expresiones para poder graficar los diagramas de las líneas de influencia variando la posición de la carga unitaria:

Reacciones y solicitaciones	
Reacciones:	$R_A = \frac{Fb}{L}$ $R_B = \frac{Fa}{L}$
Cortantes:	$V_{AC} = \frac{Fb}{L}$ $V_{CB} = -\frac{Fa}{L}$
Flectores:	$M_{AC} = \frac{Fb}{L}x$ $M_{CB} = \frac{Fa}{L}(L-x)$
	$M_{\text{máx}} = M_C = \frac{Fab}{L}$ para $x = a$
Deformaciones	
Giros:	$\varphi_A = -\frac{Fab}{6EIL}(L+b)$ $\varphi_B = \frac{Fab}{6EIL}(L+a)$ $\varphi_C = \frac{Fab}{3EIL}(a-b)$
Elástica:	$y_{AC} = \frac{FLbx}{6EI} \left(1 - \frac{b^2}{L^2} - \frac{x^2}{L^2}\right)$ $y_{CB} = \frac{FLa(L-x)}{6EI} \left(1 - \frac{a^2}{L^2} - \frac{(L-x)^2}{L^2}\right)$
Flèche máxima (a>b):	$y_{\text{máx}} = \frac{Fb}{9EIL\sqrt{3}}(L^2 - b^2)^{3/2}$ para $x = \sqrt{\frac{L^2 - b^2}{3}}$

Para poder graficar las líneas de influencia se deben variar los valores de los parámetros "a" y "b", es decir variar la posición de la carga móvil unitaria en la viga y representar respecto de esta posición el valor de la reacción, momento, desplazamiento...

Se obtienen los siguientes resultados graficando los valores calculados de manera teórica y mediante una hoja de "Excel" para poder dibujar las curvas de cada una de las fórmulas del prontuario:

- Líneas de influencia para las reacciones de los apoyos "Ra" y "Rb":

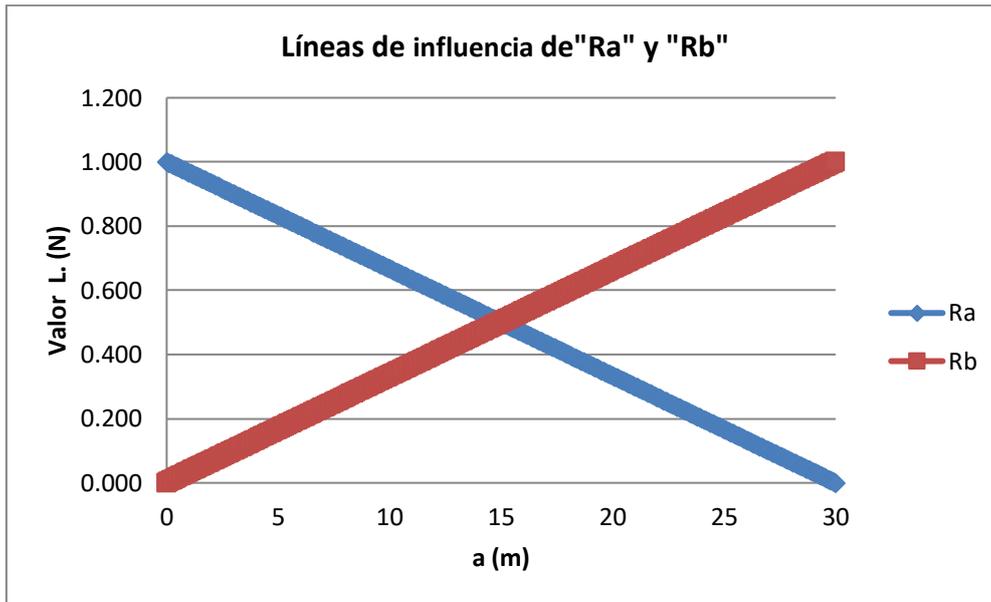


Imagen 47. Línea de influencia de las reacciones de los extremos de la viga biapoyada

- Líneas de influencia para el momento de la sección central ("Mcentral") y el momento máximo de la sección ("Mmáx"):

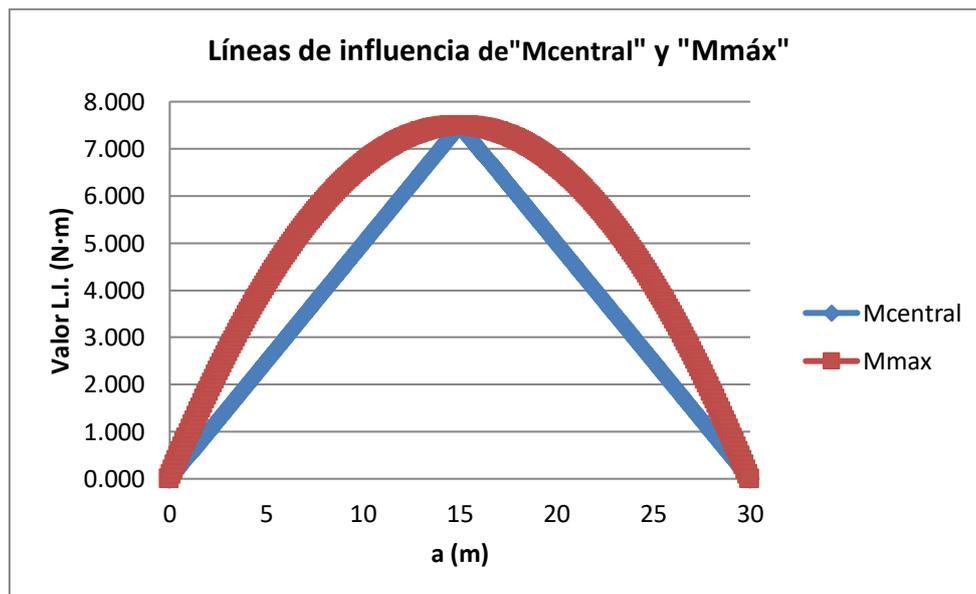


Imagen 48. Línea de influencia de los momentos flectores máximo y central de la viga biapoyada

Las anteriores líneas de influencia son de parámetros estáticos, por lo tanto, ni la geometría de la sección anteriormente dimensionada ni el material con el que estaba formada ("E","I") no afectaban a los cálculos. Ahora se procede a graficar las líneas de influencia del desplazamiento máximo ("delta máx.") y del desplazamiento de la sección central ("delta central"):

- Líneas de influencia para el desplazamiento máximo de la viga ("delta máx.") y el desplazamiento de la sección central ("delta central"):

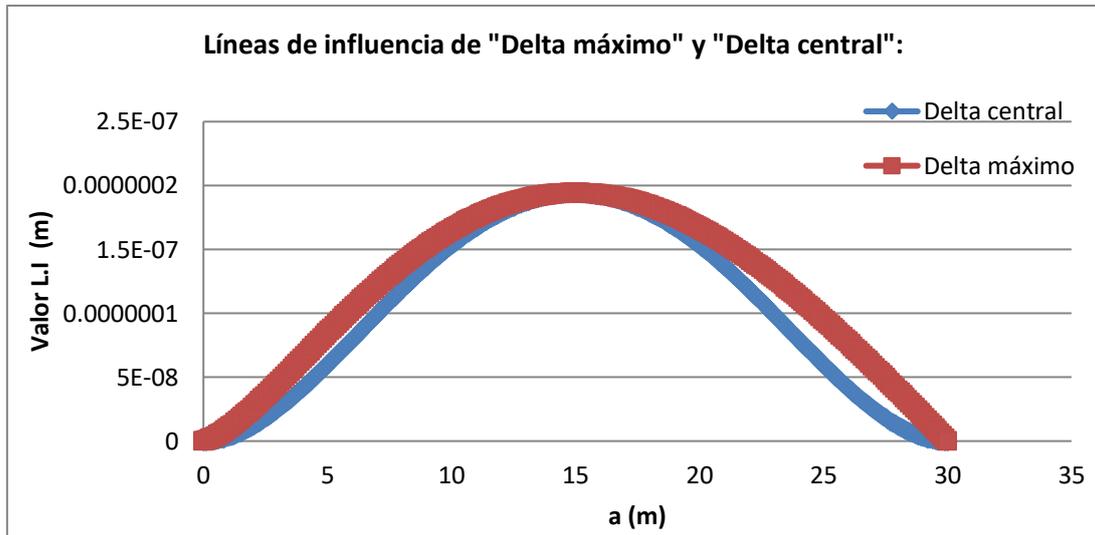


Imagen 49. Línea de influencia de los desplazamientos máximo y central de la viga biapoyada

### 2.2.1.3. Mediante el software SAP 2000:

Aplicando el procedimiento detallado en el "Anexo1: Guía para obtener líneas de influencia de una viga biapoyada mediante el software "SAP2000", se obtienen los siguientes resultados:

- Línea de influencia para la reacción "R<sub>A</sub>":



Imagen 50. Línea de influencia de la reacción del extremo izquierdo de la viga biapoyada

- Línea de influencia para la reacción "R<sub>B</sub>":

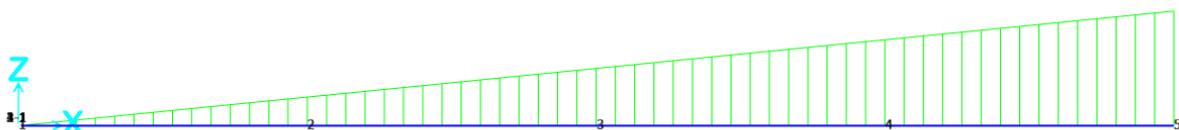
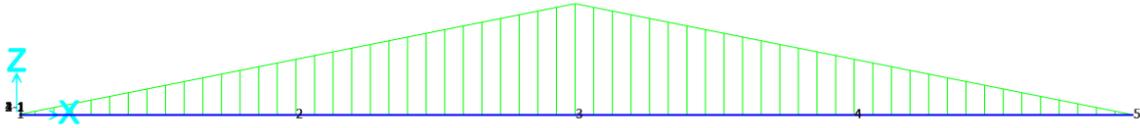


Imagen 51. Línea de influencia de la reacción del extremo derecho de la viga biapoyada

- Línea de influencia para el momento flector en la sección central ("Mcentral"):



*Imagen 52. Línea de influencia del momento flector central de la viga biapoyada*

- Línea de influencia para el desplazamiento de la sección central (delta central):



*Imagen 53. Línea de influencia del desplazamiento central de la viga biapoyada*

Para las líneas de influencia obtenidas mediante el programa de cálculo, es necesario pedir al programa en qué punto o en que barra (tramo) se quiere la línea de influencia. En el caso de ser un punto se tienen las opciones de que sea una reacción o un desplazamiento en los tres ejes. En el caso de ser una barra, se pueden representar cualquiera de sus esfuerzos, tanto el axil, como el cortante, como el flector y el torsor en todos los planos de trabajo de la barra.

Por lo tanto, para poder representar las líneas de influencia de determinados parámetros "máximos" el programa no tiene un comando determinado. Sino que se debería ir anotando los valores máximos en cada punto o en cada tramo de barra, y después representarlos respecto a la distancia longitudinal de la viga. De esta manera quedaría representada la línea de influencia de los parámetros máximos para la viga.

Como se puede comprobar, los valores de las líneas de influencia para los parámetros estudiados para el caso de la viga del puente grúa coinciden obtenidos por los tres diferentes métodos, luego se puede utilizar el software "SAP2000" para obtener las líneas de influencia en las posibles siguientes estructuras estudiadas.

### 2.2.2. Línea de influencia generada por dos cargas móviles unitaria separadas una distancia fija (tren de cargas):

Para este estudio, como se explica en el "**Anexo1**: Guía para obtener líneas de influencia de una viga biapoyada mediante el software "SAP2000", tiene una limitación en cuanto a que solo puede representar las líneas de influencia de una carga móvil unitaria, y no de un tren de cargas móviles.

Entendiéndose por tren de cargas, aquel conjunto de fuerzas que mantienen una distancia fija entre ellas y que se desplazan a través de la viga.

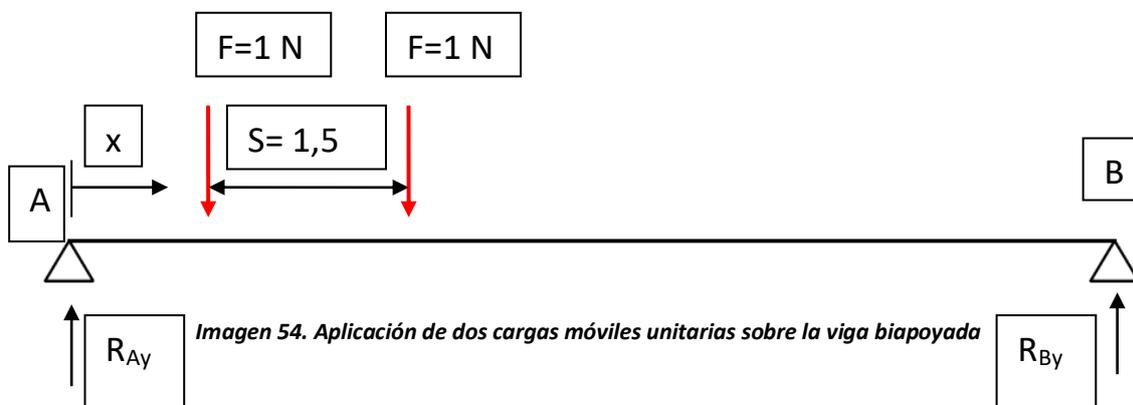
Por lo tanto, estas líneas de influencia generadas por un tren de cargas solo se pueden calcular de dos formas (suficientes para asegurar que el resultado es correcto, es decir, validar el mismo, siempre y cuando sean coincidentes entre sí):

- Calcularlas de manera teórica aplicando ecuaciones de equilibrio de una estructura isostática.
- Aplicando fórmulas de prontuarios.

Al igual que para el caso anterior, se realiza el estudio con cargas de valor unitario. Al ser las líneas de influencia lineales en cuanto al valor de "F", como se ha dicho anteriormente, para obtener el valor de la línea de influencia de un determinado tren de cargas, tan solo habría que multiplicar el valor de cada carga del mismo, por el valor de la línea de influencia en la posición de cada carga respectivamente.

### 2.2.2.1. Cálculo teórico mediante equilibrios de una estructura isostática:

Expresiones de las líneas de influencia para las reacciones en los apoyos:

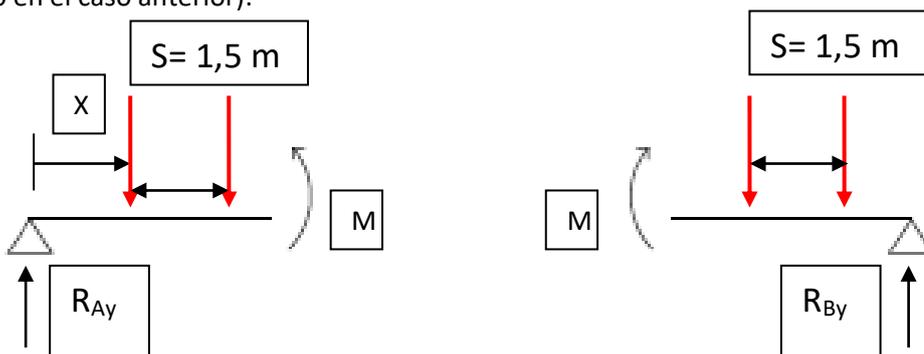


$$\Sigma M_A = 0 \longrightarrow R_{By} \cdot 30 - 1 \cdot x - 1 \cdot (x + S) = 0 \longrightarrow R_{By} = \frac{x + (x + S)}{30} N \quad \text{Ec. 21}$$

$$\Sigma M_B = 0 \longrightarrow -R_{Ay} \cdot 30 + 1 \cdot (30 - x) + 1 \cdot (30 - x - S) = 0 \longrightarrow \quad \text{Ec. 22}$$

$$R_{Ay} = \frac{(30 - x) + (30 - x - S)}{30} N$$

Expresiones de la línea de influencia para el momento flector en la sección central (con F=1 N como en el caso anterior):



$$M = R_{Ay} \cdot 15 - 1 \cdot (15 - x) - 1 \cdot (15 - x - S) \longrightarrow 0 \leq x < 15 \quad \text{Ec. 23}$$

$$M = R_{By} \cdot 15 - 1 \cdot (x - 15 + S) - 1 \cdot (x - 15) \longrightarrow 15 \leq x \leq 30 \quad \text{Ec. 24}$$

**2.2.2.2. Aplicando fórmulas de prontuarios:**

Aplicando las siguientes expresiones se pueden obtener las líneas de influencia para una viga biapoyada (simplificación de la viga del puente grúa) que es recorrida por dos cargas móviles unitarias separadas una distancia fija de "S" metros (tren de cargas).

**Viga simple apoyada - Dos cargas puntuales iguales situadas asimétricamente**

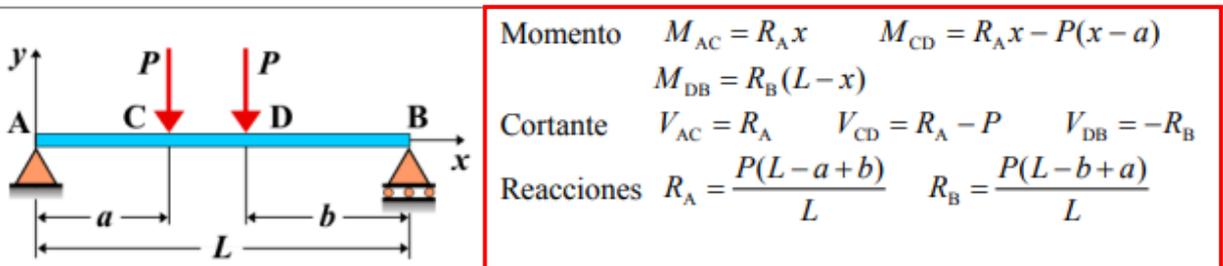


Imagen 56. Tabla prontuario de aplicación de dos cargas móviles sobre una viga biapoyada [20]

- Línea de influencia para la reacción "R<sub>A</sub>" y "R<sub>B</sub>":

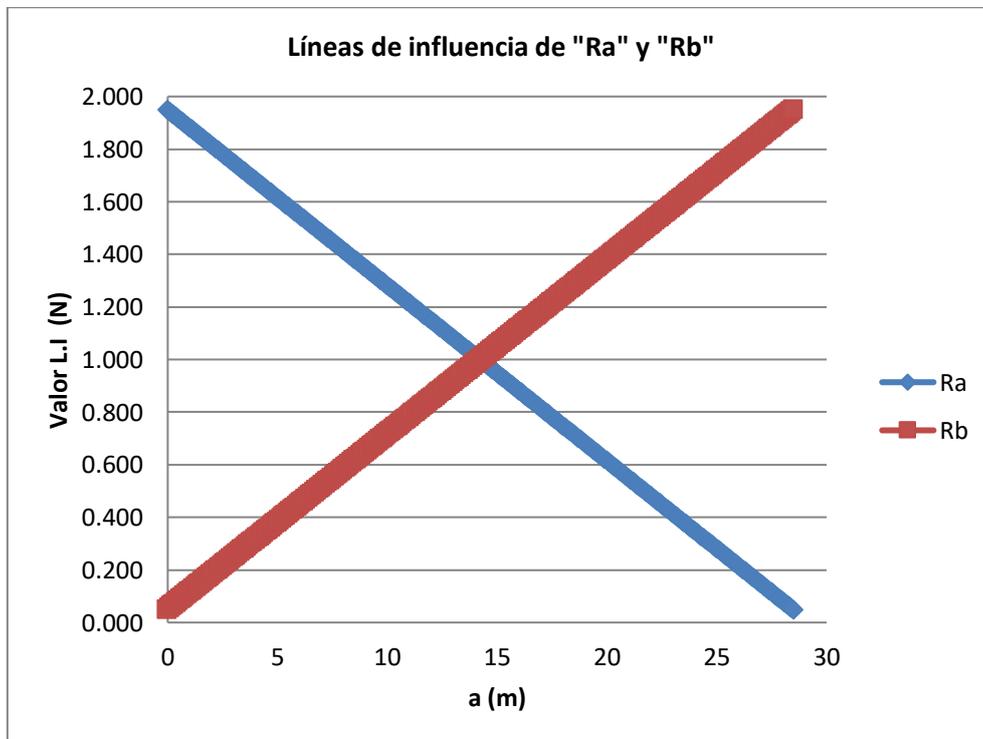
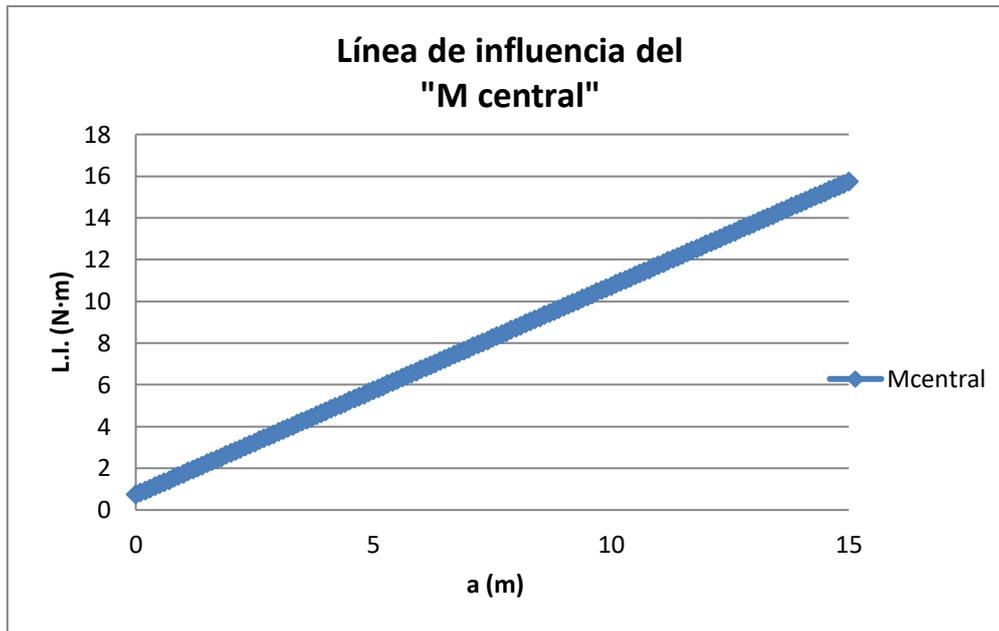


Imagen 57. Línea de influencia de las reacciones de los extremos de la viga biapoyada

- Línea de influencia para el momento flector en la sección central ("M central"):



*Imagen 58. Línea de influencia del momento flector máximo y central de la viga biapoyada*

La grafica de la línea de influencia del momento flector de la sección central está representada hasta el centro de la viga, a partir de ese punto la curva es simétrica hasta el final de la viga del puente grúa.

Como se puede observar, coinciden los resultados obtenido. Por lo tanto, se obtienen las curvas de las líneas de influencia para un tren de cargas móviles a través de la viga del puente grúa.

### 2.2.3. Línea de influencia la frecuencia propia:

Para obtener la línea de influencia de la frecuencia propia de los tres primeros modos de vibración mediante el software de cálculo "SAP2000", se va variando la posición de la masa a lo largo del eje "x" de la viga, y se van graficando los valores de las frecuencias obtenidas.

#### 2.2.3.1. Carga puntual de 20 toneladas:

Se modela la viga del puente grúa, de 30 metros de luz y con el perfil tubular rectangular con alas (cajón) anteriormente dimensionado, se aplica una masa de 20000 kg, es decir 196000 N, que corresponde con la carga máxima operativa del puente grúa.

Esta línea de influencia está relacionada con la primera simplificación que se realizó anteriormente para el diseño del perfil de la viga del puente grúa, en la que se simplifica toda la carga máxima operativa que se aplica sobre la viga (aplicada por el carro de polipasto que se desplaza longitudinalmente por esta) como una única carga puntual.

Se obtienen los siguientes valores:

x (m)	w1 (Hz)	w2 (Hz)	w3 (Hz)
0	3,66818	5,37595	14,48164
2	3,33215	4,87546	10,40894
4	2,69015	3,92648	8,69278
6	2,20508	3,21922	8,8721
8	1,90168	2,77884	9,70588
10	1,71717	2,5112	10,97159
12	1,61098	2,35715	12,59558
14	1,56225	2,28643	14,17896
15	1,55623	2,2777	14,50251
16	1,56225	2,28643	14,17896
18	1,61098	2,35715	12,59558
20	1,71717	2,5112	10,97159
22	1,90168	2,77884	9,70588
24	2,20508	3,21922	8,8721
26	2,69015	3,92648	8,69278
28	3,33215	4,87546	10,40894
30	3,66818	5,37595	14,48164

Tabla 1. Resultados de la frecuencia propia obtenidos mediante "SAP2000"

Existe simetría en el valor de la frecuencia respecto del centro de la viga, es decir, la respuesta de vibración de la viga para sus diferentes modos es simétrica respecto a  $x=15$  metros, cuando la carga se posiciona de manera simétrica respecto de ese punto en una mitad de la viga o en la otra.

Graficando los valores anteriormente obtenidos:

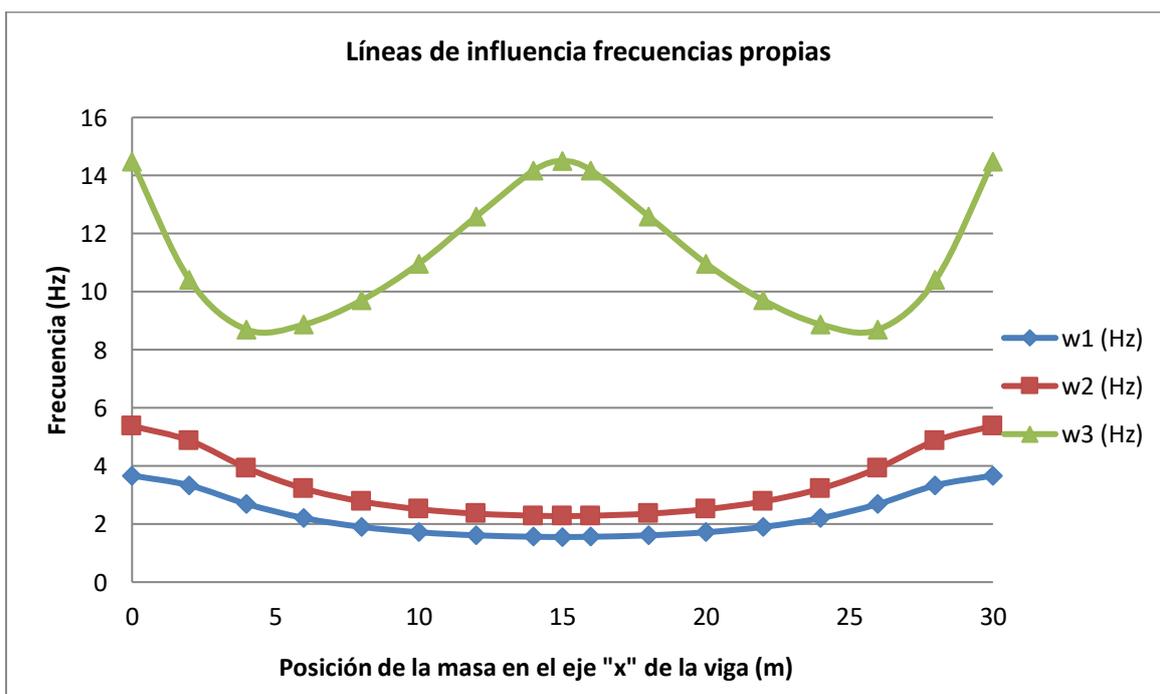


Imagen 59. Gráfica de las líneas de influencia de la frecuencia propia

**2.2.3.2.** Dos cargas puntuales de valor total 20 toneladas:

Esta línea de influencia está relacionada con la segunda simplificación que se realizó para el diseño del perfil de la viga del puente grúa, es decir, se simplifica toda la carga máxima operativa que se aplica sobre la viga (aplicada por el carro de polipasto que se desplaza longitudinalmente sobre la viga) como dos cargas puntuales.

Estas dos cargas puntuales hacen referencia a los dos ejes de las ruedas del carro de polipasto, por lo tanto, cada una de ellas es de 10000 kg, es decir 98000 N, están separadas a 1,5 metros (batalla del carro de polipasto), y sus posiciones extremas dependen del voladizo del carro (topes de la viga del puente grúa), en este caso se seleccionó un carro con un voladizo de valor 0,5 metros.

Para obtener la representación de la línea de influencia de la frecuencia de vibración propia generada por las dos cargas puntuales separadas a una distancia constante, se grafican los valores de la frecuencia para los distintos modos de vibración respecto de la posición del centro del carro.

En esta posición no hay aplicada ninguna fuerza, ya que como se ha dicho anteriormente, las fuerzas puntuales corresponden a las cargas que generan los dos ejes del carro sobre la viga del puente grúa.

De esta manera, se representa el movimiento longitudinal del carro a través de la viga del puente grúa cuando éste entra en carga con su carga máxima operativa para la cual se está diseñando el puente grúa.

Se obtienen los siguientes resultados:

Centro carro (m)	x1 (m)	x2 (m)	w1 (Hz)	w2 (Hz)	w3 (Hz)
1,25	0,5	2	3,48394	5,1034	11,86455
3,25	2,5	4	2,90633	4,24719	9,07972
5,25	4,5	6	2,36016	3,44711	8,79425
7,25	6,5	8	2,00146	2,9252	9,37769
9,25	8,5	10	1,77988	2,60337	10,40312
11,25	10,5	12	1,64797	2,41179	11,73693
13,25	12,5	14	1,57932	2,31208	13,11319
15	14,25	15,75	1,56112	2,28564	13,69292
15,25	14,5	16	1,56149	2,28617	13,67956
17,25	16,5	18	1,59141	2,32965	12,79817
19,25	18,5	20	1,6427	2,45	11,38297
21,25	20,5	22	1,82542	2,6695	10,11344
23,25	22,5	24	2,0759	3,03339	9,18299
25,25	24,5	26	2,47848	3,61973	8,75098
27,25	26,5	28	3,06506	4,48157	9,44124
28,75	28	29,5	3,48389	5,10333	11,8649

**Tabla 2. Resultados de la frecuencia propia obtenidos mediante "SAP2000"**

Graficando los valores anteriormente obtenidos:

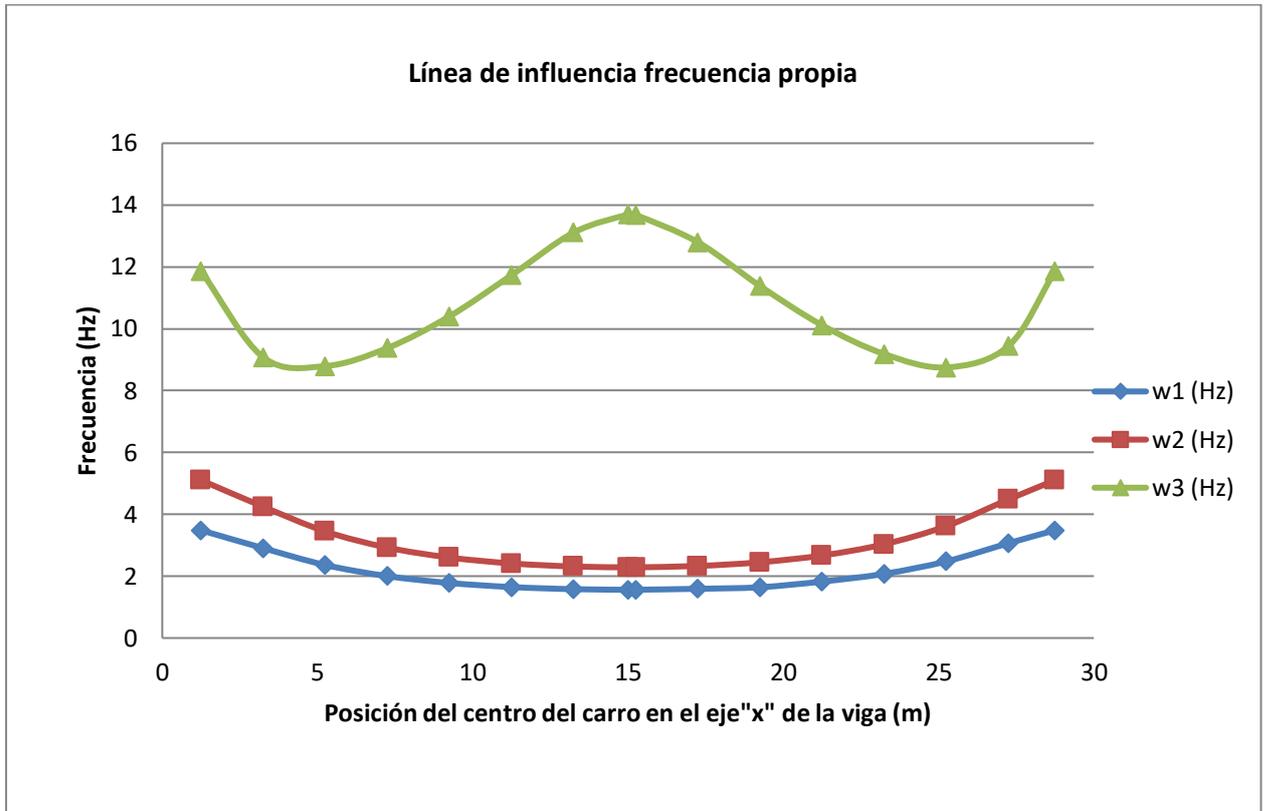


Imagen 60. Gráfica de las líneas de influencia de la frecuencia propia

Nuevamente existe simétrica en el valor de la frecuencia respecto del centro de la viga, es decir, la respuesta de vibración de la viga para sus diferentes modos es simétrica respecto a  $x=15$  metros, cuando las dos cargas puntuales se posicionan de manera simétrica respecto de ese punto en una mitad de la viga o en la otra.

### 2.3. Diagramas de envolventes de esfuerzos cortantes, momentos flectores y desplazamientos de la viga del puente grúa:

En este apartado se obtienen los diagramas de envolventes de los esfuerzos y desplazamientos de una estructura, en este caso, sobre una viga biapoyada, como la de la viga del puente grúa anteriormente dimensionada.

Para obtener los anteriores diagramas de envolventes, se pueden utilizar dos métodos:

- **2.3.1. Método teórico.**
- **2.3.2. Cálculo mediante el software de cálculo "SAP2000".**

Se realiza mediante estos dos métodos para comprobar y asegurar la concordancia de resultados entre estos.

Como se ha dicho anteriormente el estudio del cálculo de los diagramas de envolventes se va a realizar sobre la viga tubular rectangular con alas con alas (cajón) de la viga del puente grúa anteriormente dimensionada. Para obtener las envolventes de los esfuerzos cortantes y momentos flectores, tan solo es necesario conocer la longitud de la viga y la carga que se aplica, sin embargo, para obtener los diagramas de envolventes de los desplazamientos, sí es necesario conocer la sección y el material del perfil, ya que este depende de la inercia y del módulo de elasticidad del mismo.

Para realizar los anteriores casos de estudio en los que lo que se buscaba era dimensionar el perfil cajón necesario para que la viga del puente grúa cumpliera las solicitaciones técnicas cuando éste entrará en carga con su carga máxima operativa, se cargaba la estructura con una carga de 20 toneladas (196000 N) mediante dos aproximaciones:

- Una única fuerza puntual de valor 196000 N.
- Dos fuerzas puntuales de valor cada una de ellas 98000 N, separadas una distancia constante de 1,5 metros (batalla del carro de polipasto) y que simulaban la carga que aplicaba cada uno de los dos ejes del carro de polipasto sobre la viga del puente grúa.

La viga carril tiene 30 metros de longitud, está biapoyada y se fabrica con acero S275 con un perfil cajón de dimensiones 1,4x1x0,01x0,005 metros y con cuatro alas de dimensiones 0,1x0,001 metros, como se ha explicado anteriormente. Las dimensiones de las alas se comprobarán posteriormente durante el estudio del fenómeno de pandeo lateral y abolladura.

#### 2.3.1. Método teórico:

Para obtener los diagramas de envolventes mediante este método se debe calcular el valor del esfuerzo cortante, del momento flector y del desplazamiento en todos los puntos de la viga, de tal manera, que sus expresiones dependen del punto de aplicación de la carga.

Se puede calcular aplicando ecuaciones de equilibrio en la viga o mediante la utilización de las fórmulas ya definidas en prontuarios para vigas biapoyadas.

Como se ha dicho anteriormente, los casos de simplificación y aplicación de la carga sobre la viga del puente grúa son los siguientes:

- **2.3.1.1.** Método teórico : Una única fuerza puntual de valor 196000 Newtons:

Para este caso de estudio se deben aplicar las fórmulas del prontuario de vigas simples biapoyadas, para el caso de aplicación de una única carga en el eje "z" de la viga.

Se aplican las siguientes fórmulas:

<b>VIGA SIMPLE APOYADA: carga puntual F genérica.</b>	
	<b>Reacciones y solicitaciones</b>
	Reacciones: $R_A = \frac{Fb}{L}$ $R_B = \frac{Fa}{L}$ Cortantes: $V_{AC} = \frac{Fb}{L}$ $V_{CB} = -\frac{Fa}{L}$ Flectores: $M_{AC} = \frac{Fb}{L}x$ $M_{CB} = \frac{Fa}{L}(L-x)$ $M_{\max} = M_C = \frac{Fab}{L}$ para $x = a$
	<b>Deformaciones</b>
	Giros: $\varphi_A = -\frac{Fab}{6EIL}(L+b)$ $\varphi_B = \frac{Fab}{6EIL}(L+a)$ $\varphi_C = \frac{Fab}{3EIL}(a-b)$ Elástica: $y_{AC} = \frac{FLbx}{6EI}\left(1 - \frac{b^2}{L^2} - \frac{x^2}{L^2}\right)$ $y_{CB} = \frac{FLa(L-x)}{6EI}\left(1 - \frac{a^2}{L^2} - \frac{(L-x)^2}{L^2}\right)$ Flecha máxima ( $a > b$ ): $y_{\max} = \frac{Fb}{9EIL\sqrt{3}}(L^2 - b^2)^{3/2}$ para $x = \sqrt{\frac{L^2 - b^2}{3}}$

Imagen 61. Tabla prontuario de aplicación de una carga fija y puntual no centrada sobre una viga biapoyada [21]

(El valor del esfuerzo cortante se calcula en valor absoluto)

Se obtienen los siguientes valores:

a (m)	b (m)	Va (N)	Ma (N·m)	Uz (m)
0	30	0	0	0
3	27	19600	529200	0,00493043
6	24	39200	940800	0,01558261
9	21	58800	1234800	0,02684348
12	18	78400	1411200	0,03506087
15	15	98000	1470000	0,03804348
18	12	117600	1411200	0,03506087
21	9	137200	1234800	0,02684348
24	6	156800	940800	0,01558261
27	3	176400	529200	0,00493043
30	0	196000	0	0

Tabla 3. Resultados de los esfuerzos internos y el desplazamientos obtenidos a partir del prontuario

Al graficar los anteriores valores, se obtienen:

- Diagrama de envolventes del esfuerzo cortante ("V") y del momento flector ("M"):

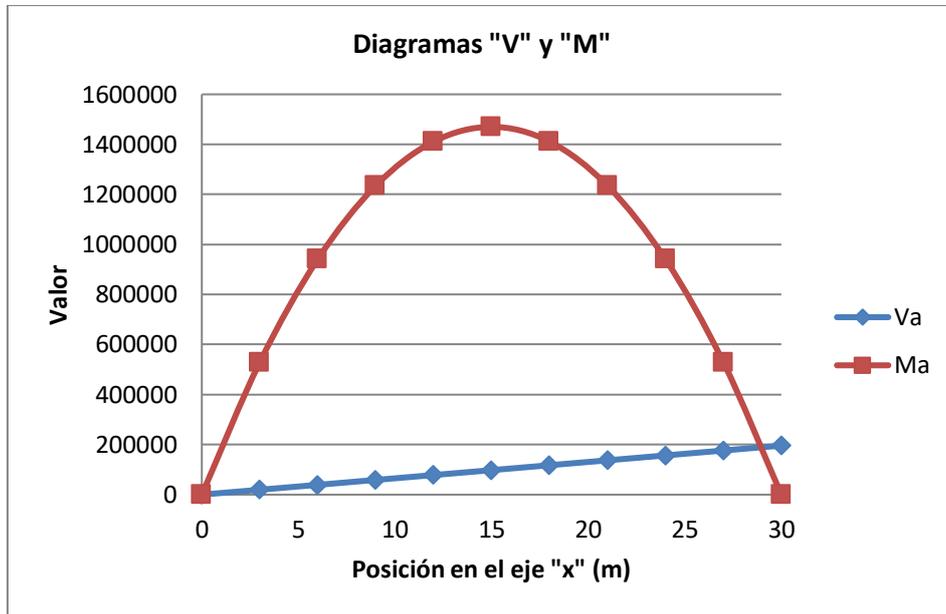


Imagen 62. Diagrama de envolventes de esfuerzos cortantes y momentos flectores

- Diagrama de envolventes del desplazamiento ("Uz"):

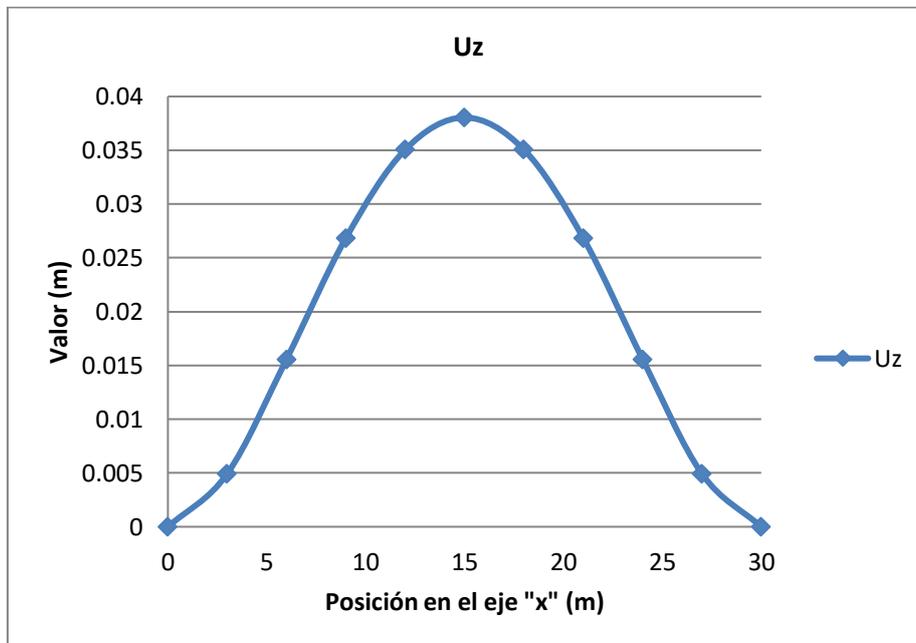


Imagen 63. Diagrama de envolventes del desplazamiento

- **2.3.1.2. Método teórico :** Dos fuerzas puntuales de valor 98000 Newtons cada una:

Para este caso de estudio se aplican las fórmulas del prontuario de vigas simples biapoyada, para el caso de aplicación de dos cargas de igual valor pero simétricamente aplicadas en el eje "z" de la viga.

Se aplican las siguientes fórmulas; para el caso de una viga biapoyada (simplificación utilizada):

**Viga simple apoyada - Dos cargas puntuales iguales situadas asimétricamente**

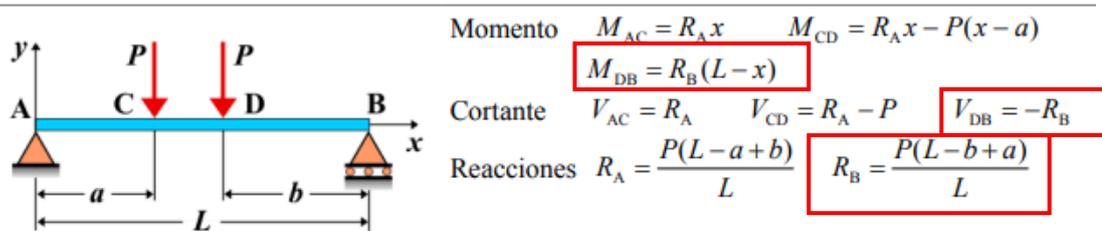


Imagen 64. Tabla prontuario de aplicación de dos cargas fijas y puntuales no centradas sobre una viga biapoyada [22]

(El valor del esfuerzo cortante se calcula en valor absoluto)

Se obtienen los siguientes valores:

a (m)	b (m)	Va (N)	Ma (N·m)
0	30	0	0
1,5	27	14700	396900
4,5	24	34300	823200
7,5	21	53900	1131900
10,5	18	73500	1323000
13,5	15	93100	1396500
16,5	12	112700	1352400
19,5	9	132300	1190700
22,5	6	151900	911400
25,5	3	171500	514500
28,5	0	191100	0

Tabla 4. Resultados de los esfuerzos internos obtenidos a partir del prontuario

Para calcular el desplazamiento en la viga se aplica el criterio de superposición, aplicando la misma fórmula que para el caso de una única fuerza puntual aplicada, se calcula el desplazamiento que produce cada fuerza y se suman ambos cuando sobre la viga ya se están aplicando ambas cargas al mismo tiempo.

Es decir, la envolvente del desplazamiento comienza a graficarse cuando la fuerza del eje derecho del carro se encuentra en el extremo izquierdo de la viga, por lo tanto, en ese punto la fuerza del eje izquierdo de las ruedas del carro aún no se está aplicando sobre la viga, ésta comienza a aplicarse sobre la viga cuando la del eje derecho se encuentra a una distancia de

## Cargas móviles. Aplicación al dimensionado de un puente grúa de 30 m y 20 t

1,5 metros del extremo izquierdo de la viga, que corresponde con la distancia constante que separa ambas fuerzas del tren de cargas (batalla del carro de polipasto).

Se obtienen los siguientes resultados:

<b>a (m)</b>	<b>Uz (m)</b>
0	0
1	0,000316
2	0,00126006
3	0,0031519
4	0,00583993
5	0,00910322
6	0,01273886
7	0,01656199
8	0,02040579
9	0,02412147
10	0,02757826
11	0,03066344
12	0,03328234
13	0,03535829
14	0,03683269
15	0,03766495
16	0,03783252
17	0,03733091
18	0,03617364
19	0,03439227
20	0,03203639
21	0,02917364
22	0,02588969
23	0,02228824
24	0,01849103
25	0,01463784
26	0,01088647
27	0,00741277
28	0,00441062
29	0,00209195
30	0,00068668

**Tabla 5. Resultados de los desplazamientos obtenidos a partir del prontuario**

Al graficar los anteriores valores, se obtienen:

- Diagrama de envolventes del esfuerzo cortante ("V") y del momento flector ("M"):

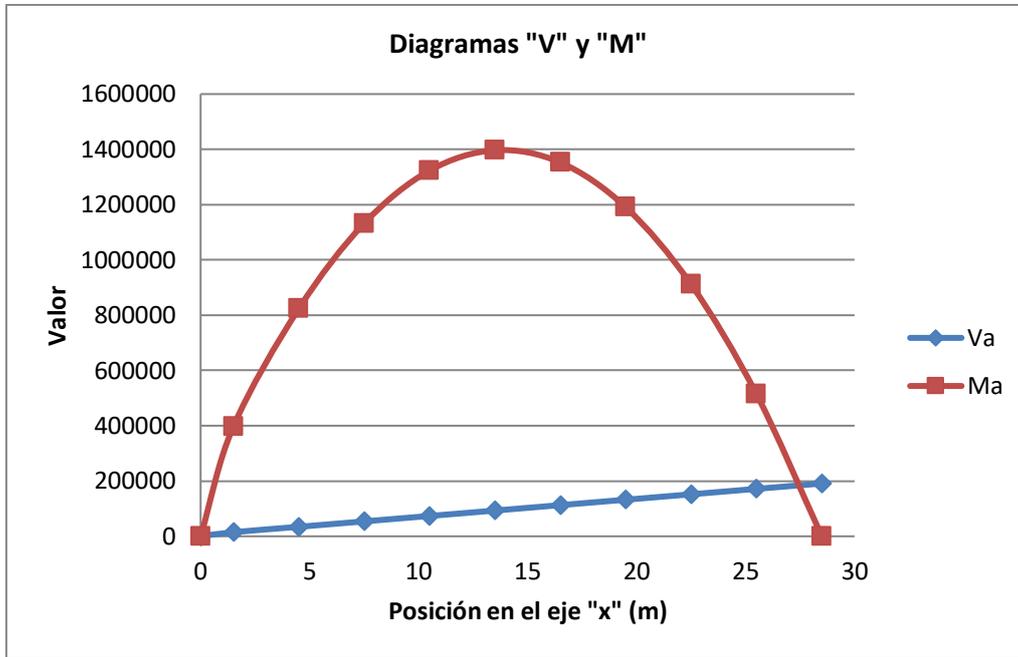


Imagen 65. Diagrama de envolventes de esfuerzos cortantes y momentos flectores

- Diagrama de envolventes del desplazamiento ("Uz"):

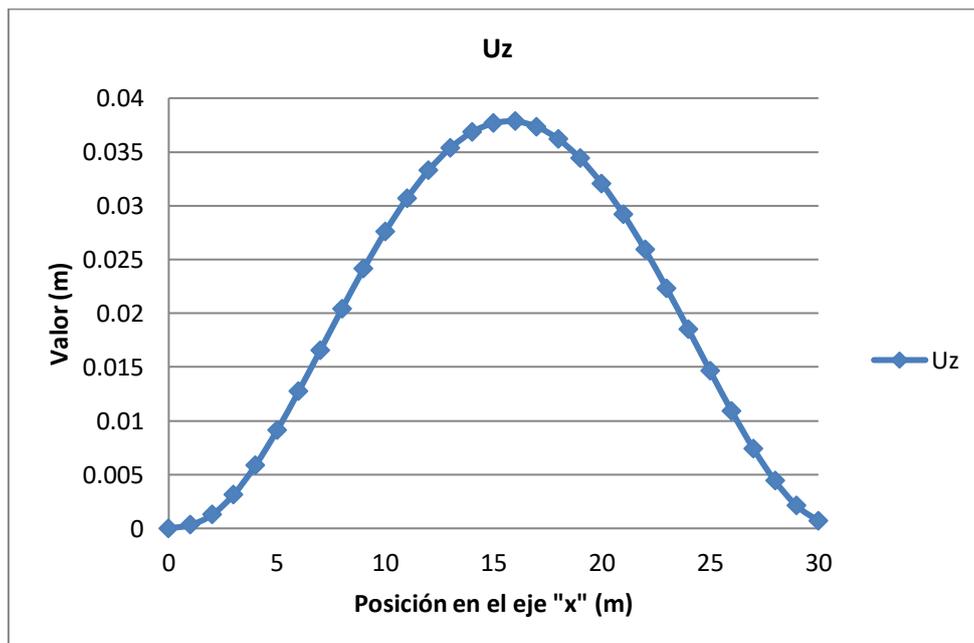


Imagen 66. Diagrama de envolventes del desplazamiento

### 2.3.2. Cálculo mediante el software de cálculo "SAP2000":

Para obtener los diagramas de envolventes mediante el programa de cálculo, como se ha hecho anteriormente para otros casos de estudio, se debe definir el material, en este caso acero S275, y el perfil de la viga del puente grúa, en este caso un perfil cajón con alas de dimensiones anteriormente detalladas.

También se debe definir la geométrica de la viga, en este caso 30 metros, y definir las restricciones en sus extremos, en este caso se trata de una viga biapoyada, es decir, se restringen los desplazamientos en los tres ejes en cada extremo.

Se define el camino que recorrerá la fuerza, en este caso el camino ocupa toda la longitud de la viga, este se define mediante el comando "path" del programa. Además se debe definir también un tren de cargas móvil que se introduce en el programa de cálculo mediante el comando "Vehicle".

Todos los detalles para poder generar un tren de cargas en "SAP2000", se encuentran detallados en "**Anexo1:** Guía para obtener líneas de influencia viga biapoyada con una carga móvil unitaria mediante el software SAP2000".

Como se ha dicho anteriormente, los casos de simplificación y aplicación de la carga sobre la viga del puente grúa son los siguientes:

#### 2.3.2.1. Cálculo mediante el software de cálculo "SAP2000": Una única fuerza puntual de valor 196000 N:

En este caso el tren de cargas definido, solo está formado por una única fuerza puntual de valor 196000 N, se obtienen los siguientes resultados:

- Diagrama de envolventes del esfuerzo cortante ("V"):

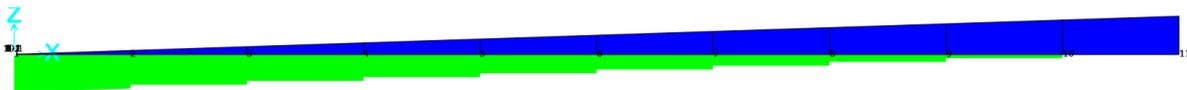


Imagen 67. Diagrama de envolventes de esfuerzos cortantes

- Diagrama de envolventes del momento flector ("M"):



Imagen 68. Diagrama de envolventes de momentos flectores

Los valores obtenidos de las anteriores gráficas son los siguientes:

x (m)	V (N)	M (N·m)
0	0	0
3	19593	529023

Capítulo 2. Dimensionado de la viga del puente grúa

6	39193	940643
9	58793	1234662
12	78393	1411082
15	97993	1469902
18	117593	1411121
21	137193	1234741
24	156793	940760
27	176393	529180
30	196000	0

Tabla 6. Resultados de los esfuerzos internos obtenidos mediante "SAP2000"

Graficando los anteriores valores se obtiene:

- Diagrama de envolventes del desplazamiento ("Uz"): Deformada:

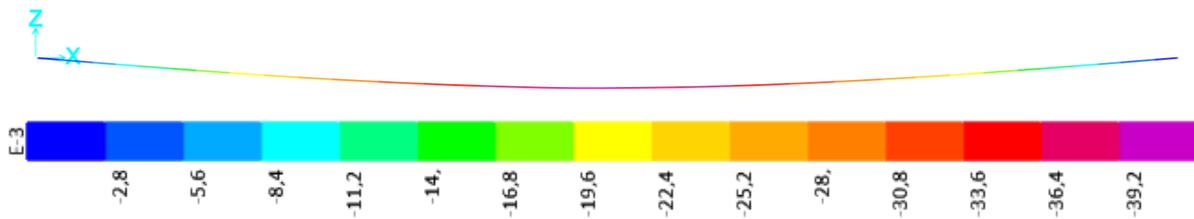


Imagen 69. Diagrama de envolventes del desplazamiento

**2.3.2.2.** Cálculo mediante el software de cálculo "SAP2000": Dos fuerzas puntuales de valor 98000 N cada una:

En este caso el tren de cargas definido está formado por dos cargas puntuales de valor cada una de ellas 98000 N y separadas a una distancia constante de 1,5 metros (batalla del carro de polipasto), se obtienen los siguientes resultados:

- Diagrama de envolventes del esfuerzo cortante ("V"):

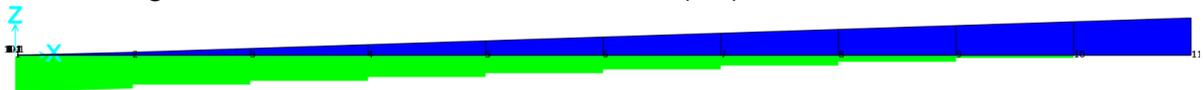


Imagen 70. Diagrama de envolventes de esfuerzos cortantes

- Diagrama de envolventes del momento flector ("M"):

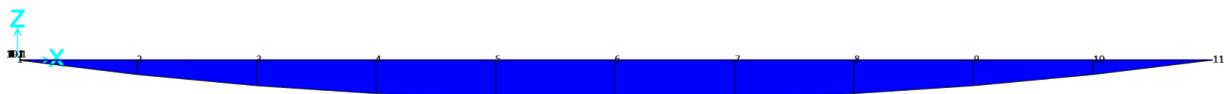
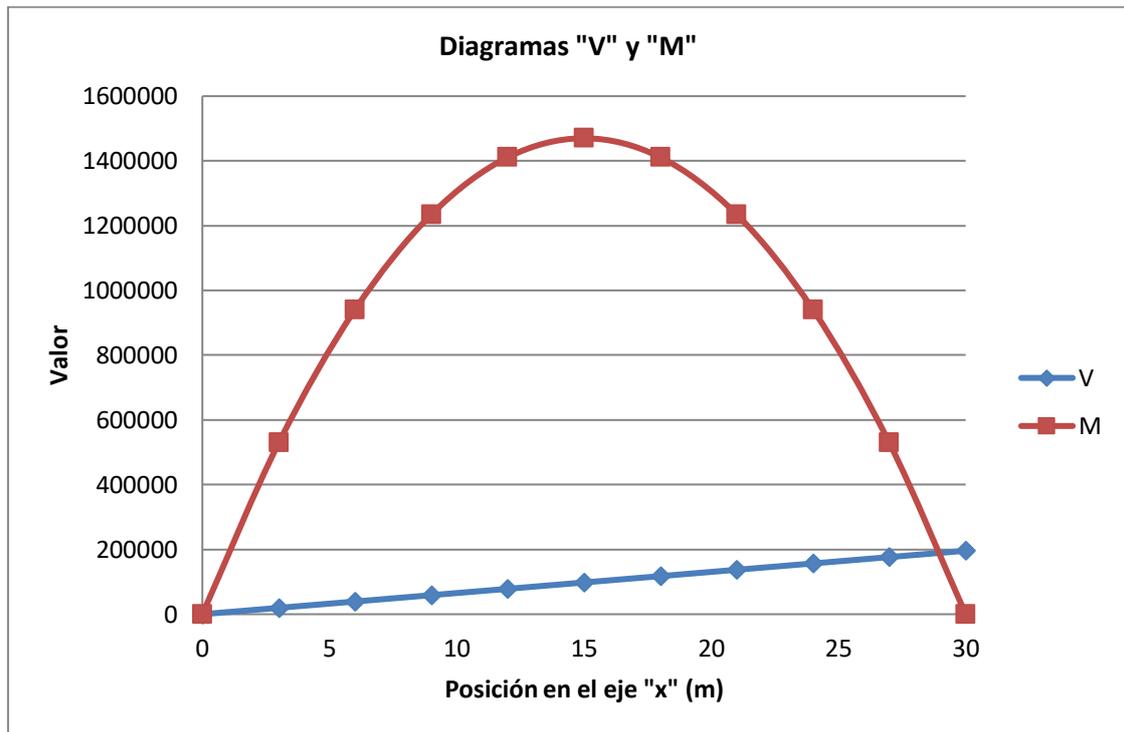


Imagen 71. Diagrama de envolventes de momentos flectores

Graficando sus valores se obtienen:



*Imagen 72. Diagrama de envolventes de esfuerzos cortantes y momentos flectores*

Los valores obtenidos de las anteriores gráficas son los siguientes:

x(m)	V (N)	M (N·m)
0	0	0
3	14693	514372
6	34293	911292
9	53893	1190569
12	73493	1352290
15	93093	1396411
18	112693	1352321
21	132293	1190641
24	151893	911360
27	171493	514480
30	191100	0

*Tabla 7. Resultados de los esfuerzos internos obtenidos mediante "SAP2000"*

Graficando los anteriores valores se obtiene:

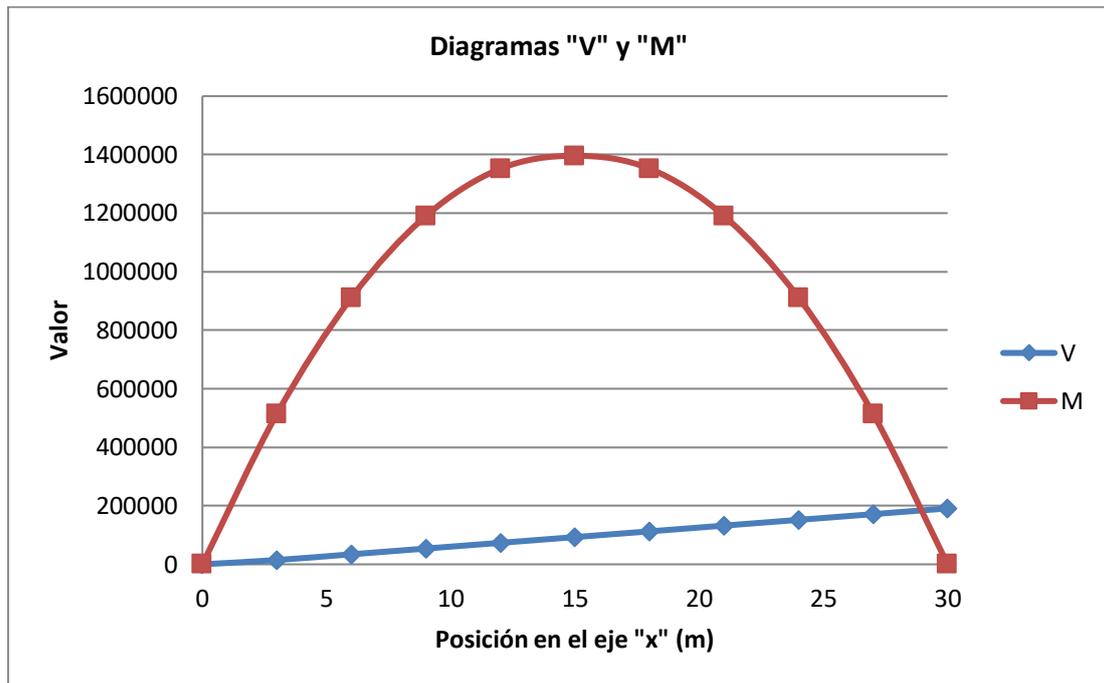


Imagen 73. Diagrama de envolventes de esfuerzos cortantes y momentos flectores

- Diagrama de envolventes del desplazamiento ("Uz"): Deformada:

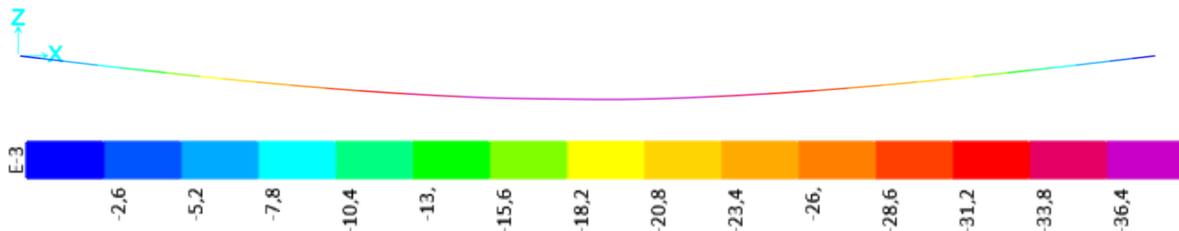


Imagen 74. Diagrama de envolventes del desplazamiento

Como se puede observar, tanto en los diagramas de envolventes del esfuerzos cortante, como en el del momento flector, y en el del desplazamiento en el eje "z" de la viga, existe una gran coincidencia entre los valores obtenidos de un modo teórico, con los valores obtenidos mediante el software de cálculo "SAP2000".

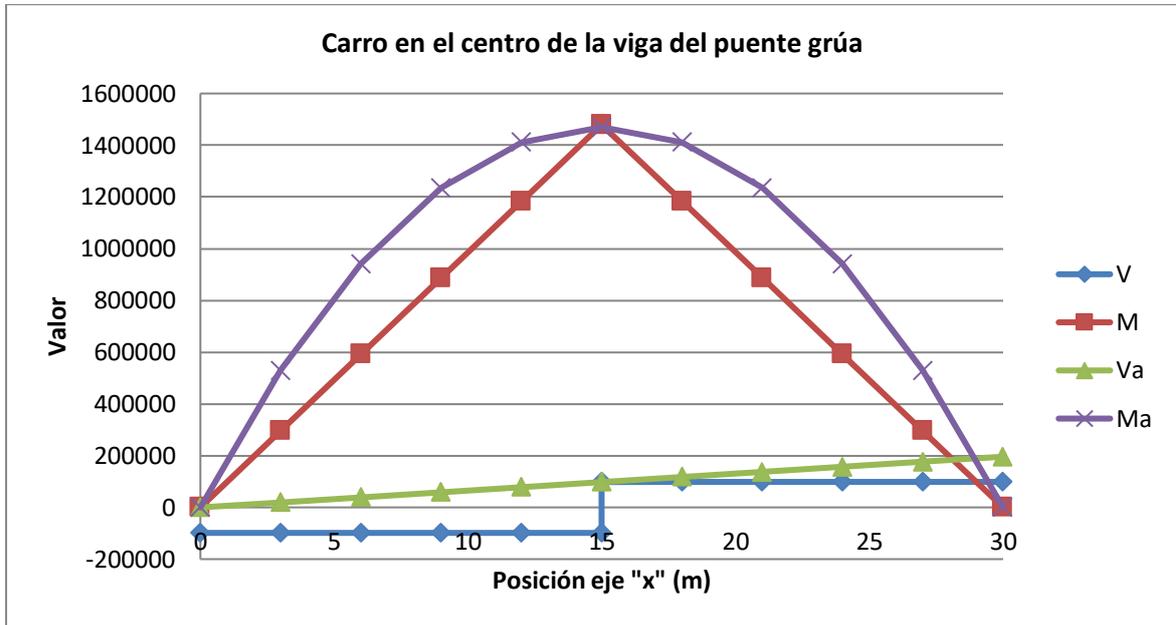
### 2.3.3. Comparación entre los diagramas envolventes y los diagramas de esfuerzos para las posiciones críticas del carro sobre la viga del grúa puente:

Para completar el estudio de los diagramas de las envolventes en esta viga biapoyada del puente grúa, se representan en una misma gráfica los diagramas de las envolventes junto con los diagramas de esfuerzos cortantes y momentos flectores obtenidos anteriormente para los casos de una única carga puntual o dos cargas puntuales, para las dos posiciones críticas de aplicación de la carga, que como se demostró anteriormente son:

- Carro situado en el centro de la viga (x= 15 metros).
- Carro situado en el extremo izquierdo de la viga (x=1,25 metros).

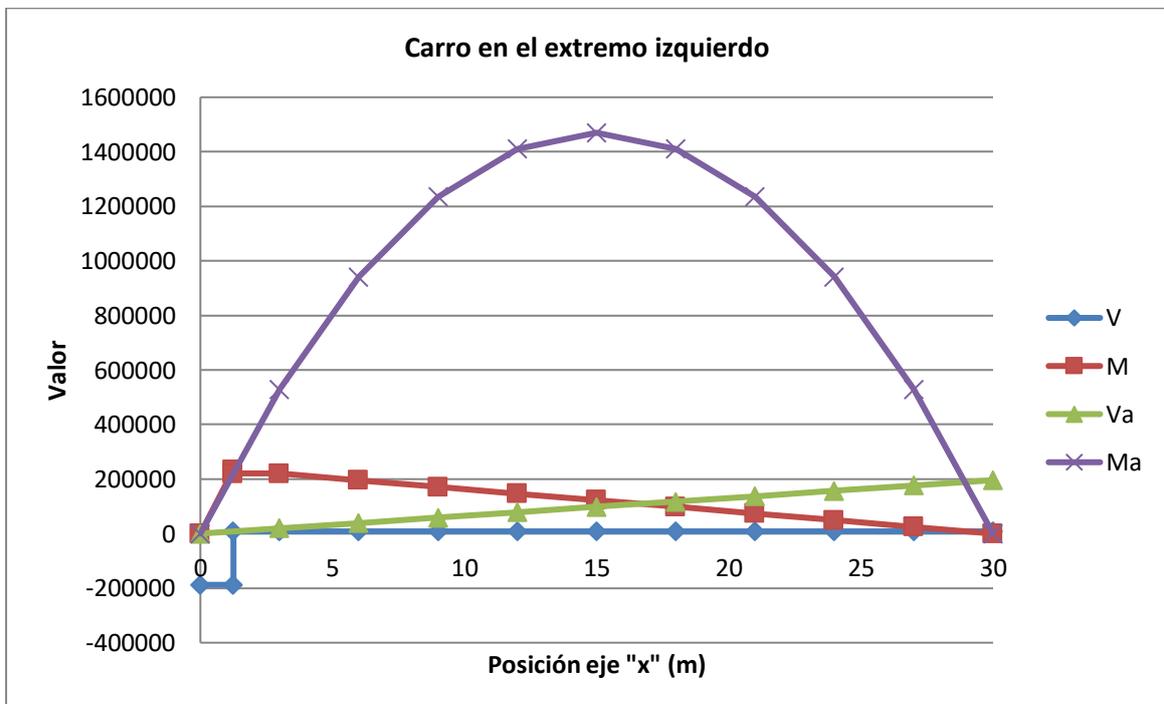
**2.3.3.1.** Aplicación de una única carga puntual de valor 196000 Newtons:

**2.3.3.1.1.** Carro situado en el centro de la viga ( $x=15$  metros):



*Imagen 75. Diagrama de esfuerzos y de envolventes de esfuerzos cortantes y momentos flectores*

**2.3.3.1.2.** Carro situado en el extremo izquierdo de la viga ( $x=1,25$  metros):



*Imagen 76. Diagrama de esfuerzos y de envolventes de esfuerzos cortantes y momentos flectores*

2.3.3.2. Aplicación de dos cargas puntuales de valor 98000 Newtons cada una de ellas:

2.3.3.2.1. Carro situado en el centro de la viga ( $x_1=14,25$  metros,  $x_2=15,75$  metros):

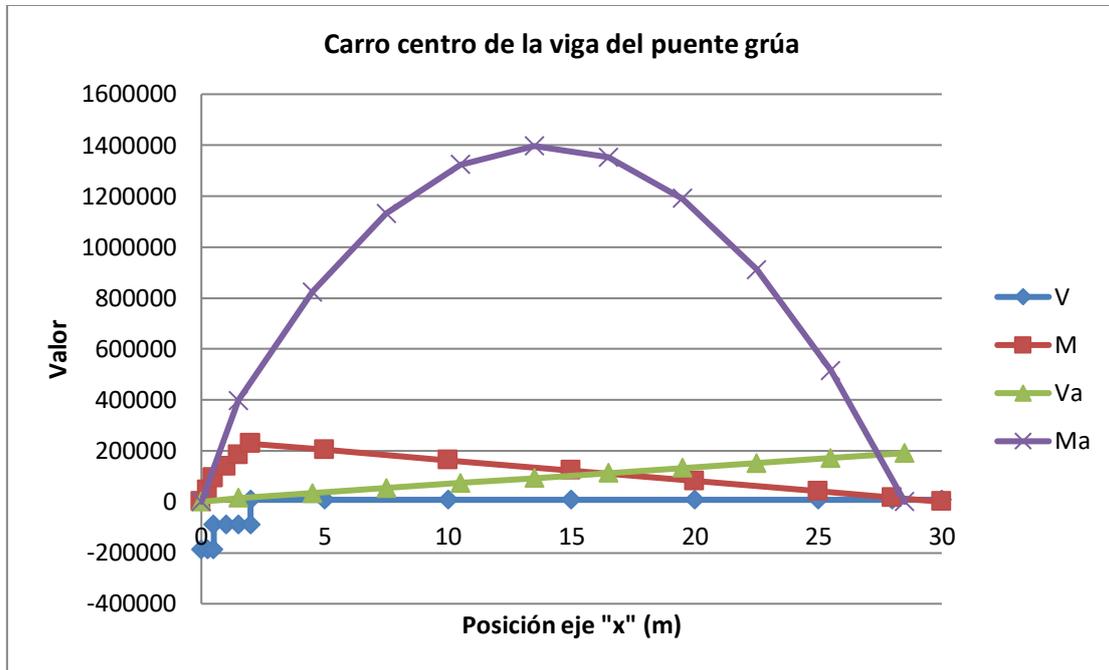


Imagen 77. Diagrama de esfuerzos y de envolventes de esfuerzos cortantes y momentos flectores

2.3.3.2.2. Carro situado en el extremo izquierdo de la viga ( $x_1=0,5$  metros,  $x_2=2$  metros):

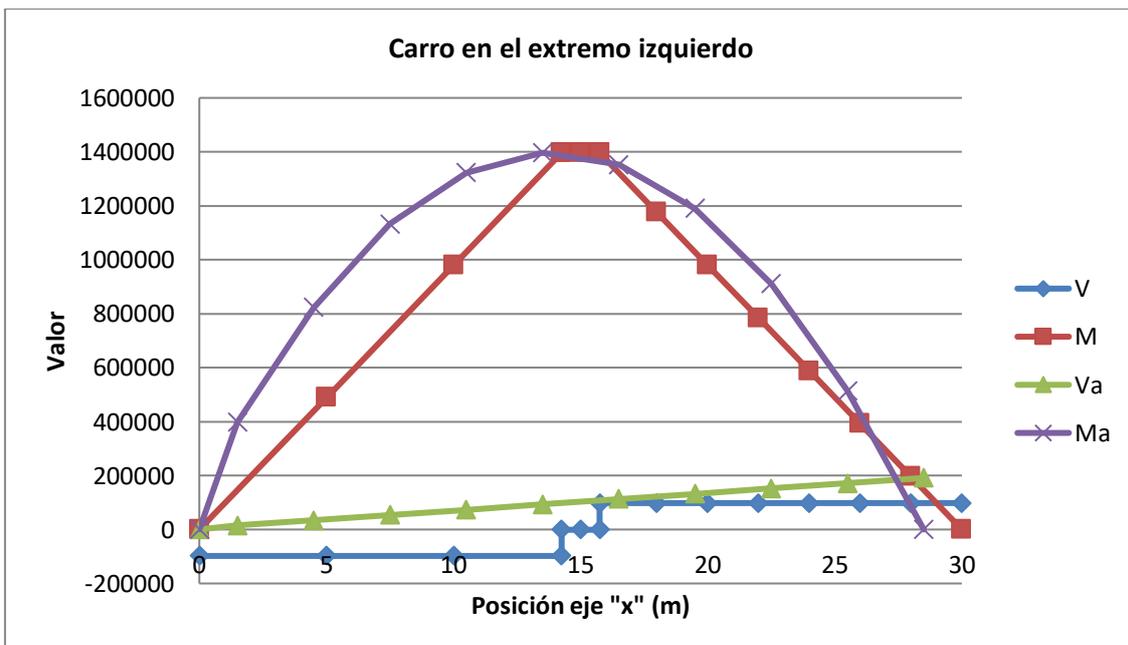


Imagen 78. Diagrama de esfuerzos y de envolventes de esfuerzos cortantes y momentos flectores

**2.4.** Dimensionado de la viga del puente grúa como modelo de chapas ("Shells"). Simplificar la carga total operativa como cuatro fuerzas puntuales. Estudio del fenómeno de pandeo lateral y abolladura sobre la viga del puente grúa:

El perfil seleccionado para la viga del puente grúa, además de cumplir el criterio de plastificación de Von Mises, y que los desplazamientos máximos no sean excesivos en ninguna de las posiciones más críticas de la carga máxima operativa de dicha estructura. No debe sufrir el fenómeno de pandeo lateral (vuelco de la estructura), ni el fenómeno de abolladura del perfil, de nuevo en las posiciones más críticas de la carga y con su carga máxima operativa.

El estudio de los anteriores fenómenos que puede sufrir el perfil de la estructura al entrar en carga, se va a analizar de dos formas:

- Cálculo teórico: aplicando expresiones para calcular las cargas que producen pandeo y abolladura.
- Mediante el software "SAP2000": mediante su módulo de pandeo nos permite representar y calcular los diferentes modos de pandeo lateral y abolladura que sufre la estructura.

Nuevamente, se tienen que analizar los dos casos que producen una respuesta tensional de la estructura más crítica, siendo estos:

- **2.4.2.** Caso del carro en  $x=15$  metros (centro de la viga).
- **2.4.3.** Caso centro del carro en  $x=1,25$  metros (extremo izquierdo de la viga).

**2.4.2.** Caso centro de la viga, centro del carro en  $x=15$  metros (centro de la viga):

En esta situación se posiciona el centro del carro en  $x=15$  metros. Por lo tanto, en  $x=14,25$  metros se sitúa uno de los dos ejes de este, y en  $x=15,75$  metros el otro.

**2.4.2.1.** Cálculo teórico:

Debido a la complejidad de los cálculos necesarios y a la necesidad de la aplicación de normas, para poder aplicar las ecuaciones sería necesario conocer en detalle todos los aspectos de la viga del puente grúa estudiado.

Al tratarse de un diseño de la misma, no se pueden conocer todas sus características finales, por lo tanto, el cálculo del fenómeno de pandeo y abolladura, únicamente se desarrollará mediante el software de cálculo "SAP2000".

Gracias a las anteriores simplificaciones de los casos de carga, y a la similitud entre los resultados calculados de modo teórico y mediante este software, se puede concluir que los resultados que este proporciona para los fenómenos de pandeo lateral y abolladura serán válidos para el diseño de la viga del puente grúa.

### 2.4.2.2. Mediante el software "SAP2000":

Para este tipo de análisis, lo primero con lo que se procede es con definir la geometría del perfil (tubo rectangular con alas), se transforman los elementos "barras" ("Frames") con los que se trabajaba en los anteriores casos de estudio, ya que esto corresponde con transformar un estudio de barras en uno de elementos de área.

Una vez se tienen los elementos de área diferenciados para el alma y el ala (debido a que tienen diferentes espesores) se procede a mallar los diferentes áreas del perfil. Cuanto más líneas de malla haya en cada área más se afinará el resultado, es decir, se aumenta la precisión del resultado cuando más fino sea el mallado, pero tendrá mayor peso el cálculo y el software tardará más tiempo en obtener los resultados.

La forma de mallar los áreas del perfil, también permite situar nodos en diferentes puntos, en los que se posicionan las cuatro fuerzas (49000 N cada una) correspondientes a las cuatro ruedas del carro que porta la carga máxima operativa sobre la viga del puente grúa.

También se debe definir el carril del carro sobre el que se posicionan las cargas, este carril se sitúa en los extremos de las alas inferiores y tiene pequeñas dimensiones, este se fabrica de acero S275, y se ha simplificado a un perfil rectangular a pesar de que en la realidad tendría forma de carril.

Para asegurar que la estructura no vuelca (pandeo lateral) ni se abolla cuando ésta entra en carga, se debe comparar el factor de carga con la unidad. Siempre que éste sea mayor o igual que uno, la estructura no sufre los fenómenos de pandeo ni de abolladura para el estado de cargas actuante.

Es decir, el factor de carga se define como el número por el que se tiene que multiplicar a la carga actuante para que se produzca el vuelco de la estructura.

De los valores obtenidos de este parámetro con el software, solo son necesarios los valores positivos. Debido a que los valores negativos lo que están indicando es que se invierta el sentido de aplicación de la carga para evitar el vuelco de la estructura, y eso no interesa estudiarlo, puesto que la carga que se aplica sobre la viga siempre va a ser una carga gravitatoria (con el mismo sentido que la gravedad) en el eje vertical.

Para asegurar que los resultados obtenidos con el software son correctos, se debe comparar la respuesta de la estructura ante determinadas cargas, antes de proceder con el estudio de las cargas que generan el pandeo, estos casos de estudio son:

- La masa de la propia viga.
- La flecha máxima de la viga debida a su peso propio.
- La flecha máxima debida a una fuerza centrada en la viga de valor la carga operativa máxima.

- La masa de la propia viga:

Para comparar el peso de la viga que se ha definido mediante chapas (comando "Shell" del programa, que genera elementos de área), se deben obtener las reacciones de los apoyos de la viga, cuando sobre ésta no se aplica ningún tipo de carga exterior:

$$\sum R_y = 82206,96 \text{ N}$$

$$\text{Masa de la barra} = \frac{82206,96 \text{ N}}{9,8 \text{ m/s}^2} = 8388,465 \text{ kg}$$

Comparado con los 8900 kg reales de la misma (calculados en la ecuación 2), se asemeja bastante.

- La flecha máxima de la viga debido a su peso propio:

Ambas en  $x=15$  metros, es decir el punto central del alma inferior de la viga:

Calculada mediante el modelo barra (elemento "Frame" del programa):

$$u_z = 0,0109 \text{ m}$$

Calculada mediante el modelo chapa (elemento "Shell" del programa):

$$u_z = 0,0106 \text{ m}$$

Siendo estos dos resultados muy similares, por lo tanto, este parámetro también es correcto.

- La flecha máxima debida a una fuerza centrada de valor la carga operativa máxima:

Calculada mediante los anteriores modelos que simplificaban la fuerza como una única fuerza puntual ( $x=15$  metros):

$$u_z = 0,03804 \text{ m}$$

Calculada aplicando 4 fuerzas puntuales de valor "F/4" de la anterior:

$$u_z = 0,0382 \text{ m}$$

Una vez comprobado lo anterior, se pueden asegurar que la geometría de la viga realizada con los elementos "Shell" (chapa) del programa, coinciden con los de los elementos "Frame" (barra), anteriormente analizado.

Es decir, que la viga conformada como una barra o como un conjunto de chapas soldadas adecuadamente en el programa "SAP2000" se comporta de manera similar, y por tanto, ambos estudios son equivalentes.

## Capítulo 2. Dimensionado de la viga del puente grúa

A la hora de ejecutar los resultados aplicando cuatro cargas puntuales de pandeo, comando "buckling" del programa, se obtienen los siguientes resultados (se analizan 6 modos de pandeo, debido a que son suficientes para analizar el pandeo lateral y la abolladura de la estructura):

- Modo 1 de pandeo--> factor de carga= 0,88099
- Modo 2: de pandeo---> factor de carga=0,88653
- Modo 3: de pandeo---> factor de carga=0,88908
- Modo 4: de pandeo---> factor de carga=0,90316
- Modo 5: de pandeo---> factor de carga=1,13682
- Modo 6: de pandeo---> factor de carga=1,13718

Al ser el valor del factor de carga de los primeros modos de pandeo inferior a la unidad, quiere decir que en la estructura con el perfil seleccionado se produciría el fenómeno de pandeo.

Para solucionar el problema anterior, y poder utilizar el perfil anteriormente dimensionado, se sueldan adecuadamente al propio perfil unas tapas rigidizadoras, una en cada extremo.

Para definir éstas, dentro del software de cálculo se seleccionan los cuatro puntos del rectángulo interior del perfil y se genera un área con las mismas características que las del alma, después se procede a mallar este área para afinar los resultados obtenidos.

Se obtienen los siguientes resultados:

- Modo 1 de pandeo--> factor de carga=1,06216
- Modo 2: de pandeo---> factor de carga=1,06236
- Modo 3: de pandeo---> factor de carga=1,08228
- Modo 4: de pandeo---> factor de carga=1,08254
- Modo 5: de pandeo---> factor de carga=1,09281
- Modo 6: de pandeo---> factor de carga=1,09283

Como se puede observar, ahora los modos de pandeo tienen un factor de carga mayor que la unidad. Por lo tanto, no se produce pandeo lateral ni abolladura en el perfil para esta situación de carga máxima operativa del puente grúa.

### **2.4.3. Caso extremo izquierdo, centro del carro en $x=1,25$ metros (centro de la viga):**

En esta situación se posiciona el centro del carro en  $x=1,25$  metros. Por lo tanto, en  $x=0,5$  metros se sitúa uno de los dos ejes de este, y en  $x=2$  metros el otro.

#### **2.4.3.1. Cálculo teórico:**

Se aplicaría el mismo procedimiento que para el caso anterior, pero como se ha explicado anteriormente, no se calculan estos valores mediante este método debido a su complejidad y a la falta de información de toda la estructura final que se tiene durante el diseño de la misma.

**2.4.3.2.** Mediante el software "SAP 2000":

El procedimiento es el mismo que para el caso anterior, simplemente difiere en los puntos sobre los que se aplican las cargas. Por lo tanto, tan solo hay que realizar una comprobación previa al pandeo, ya que las otras dos son iguales (masa de la viga y flecha máxima de la viga debido a su peso propio) que para el caso anterior:

- La flecha máxima debida a una fuerza en el extremo izquierdo de valor la carga máxima operativa.

Calculada mediante los anteriores modelos que simplificaban la fuerza como una única fuerza puntual ( $x=1,25$  metros):

$$u_z = 0,0049 \text{ m}$$

Calculada aplicando 4 fuerzas puntuales de valor "F/4" de la anterior:

$$u_z = 0,0046 \text{ m}$$

Se ejecuta el modelo que se ha generado, se obtienen los valores calculados para una carga de pandeo ("Buckling"), se obtienen los siguientes resultados:

- Modo 1 de pandeo--> factor de carga= 0,63412
- Modo 2: de pandeo---> factor de carga=0,63443
- Modo 3: de pandeo---> factor de carga=0,85569
- Modo 4: de pandeo---> factor de carga=0,85615
- Modo 5: de pandeo---> factor de carga=1,77549
- Modo 6: de pandeo---> factor de carga=1,80236

Al igual que en el caso anterior los factores de carga de los primeros modos de pandeo son menores que la unidad, por lo tanto, en este caso también se produciría el vuelco de la estructura. Para evitar esto, se procede de la misma manera que anteriormente, posicionando los mismos rigidizadores en los extremos del perfil de la viga, los resultados obtenidos son los siguientes:

- Modo 1 de pandeo--> factor de carga= -2,24247
- Modo 2: de pandeo---> factor de carga=-2,34894
- Modo 3: de pandeo---> factor de carga=-2,72258
- Modo 4: de pandeo---> factor de carga=-2,76404
- Modo 5: de pandeo---> factor de carga=3,1885
- Modo 6: de pandeo---> factor de carga=-3,65986

De todos los anteriores valores de los factores de carga para cada modo de pandeo, se seleccionan para el diseño solo aquellos que son positivos, como se ha explicado anteriormente.

Una vez incorporadas los rigidizadores al perfil, al igual que en el caso anterior, los factores de carga de todos los modos de pandeo son mayores que la unidad, y por lo tanto no se produce el fenómeno de pandeo lateral (vuelco) ni de abolladura en el perfil, en esta situación crítica de la carga máxima operativa del puente grúa.

Una vez estudiadas las dos situaciones más críticas de la posición de la carga máxima operativa y comprobado que no se produce ni pandeo lateral ni abolladura en esta estructura con el perfil seleccionado, bajo la aplicación de la carga máxima operativa del puente grúa. Se puede concluir que respecto al estudio de pandeo lateral y abolladura, la elección del perfil para esta viga del puente grúa es correcto y por tanto cumple las solicitaciones técnicas que requiere dicha estructura.

Por lo tanto, se concluye que el perfil seleccionado en el dimensionamiento inicial es correcto, la viga del puente grúa se dimensiona con un perfil tubular rectangular con alas (cajón) de dimensiones 1,4 x 1 x 0,005 x 0,01 metros de acero S275.

**2.4.4. Causa del por qué no ha sido empleado un perfil doble "T" para la fabricación de la viga del puente grúa:**

A priori la elección de un perfil doble "T", podría haber sido adecuada. Un perfil de este tipo con unas características y dimensiones similares a las del perfil anteriormente seleccionado para el dimensionado de la viga del puente grúa, podía haber cumplido la mayoría de las solicitaciones técnicas que requiere este tipo de estructura.

Es decir, la estructura no plastificaría cuando esta entrara en carga con su carga máxima operativa, según el criterio de plastificación de Von Mises, tanto para la simplificación de aplicación de la carga como una única fuerza puntual o como dos fuerzas puntuales, en cualquiera de los dos casos más críticos anteriormente ya detallados.

El problema de este tipo de perfil para una viga con la geometría y las solicitaciones para las que se está diseñando, radica en el estudio del fenómeno de pandeo lateral y abolladura.

A no ser que se decidiera diseñar con un perfil de grandes dimensiones en cuanto a espesores de las alas y el alma, la estructura al entrar en carga en las situaciones más críticas de la posición de la misma, sufriría el fenómeno de vuelque y abolladura.

Para comprobar la anterior afirmación, se procede a dimensionar la viga del puente grúa con dos perfiles doble "T" de diferentes características dimensionales mediante el software "SA2000" y calcular y obtener los valores de la carga que producen el fenómeno de pandeo y abolladura de la estructura.

Estos dos perfiles son del tipo doble "T", uno de ellos con dimensiones y espesores similares al del perfil seleccionado (cajón con alas), de este modo el peso de la viga es similar al de la viga anteriormente dimensionada, y así mantenemos el coste de la fabricación de la misma, al emplear una cantidad similar de acero. El otro perfil que se comprobará, tendrá espesores mucho mayores, por lo tanto el peso y el coste de la viga, aumentarán.

La diferencia entre estos dos perfiles, radica en que el primer perfil es un perfil viable en cuanto a su fabricación, pero que se demostrará que bajo la carga máxima operativa, se produce el fenómeno de pandeo y abolladura. Por el contrario, en el segundo perfil no se produciría ni el fenómeno de pandeo lateral ni abolladura al aplicar la carga máxima operativa en ninguna de sus dos situaciones más críticas, pero el problema de este perfil, radica en que es inviable para la fabricación de una viga como la que se está diseñando por su elevado peso propio y coste relacionado con la gran cantidad de acero empleado en su fabricación.

Además del problema del precio, el problema de su elevado peso propio hace que la condición de que la flecha máxima no sea excesiva (ecuación 10), no se cumpla tampoco.

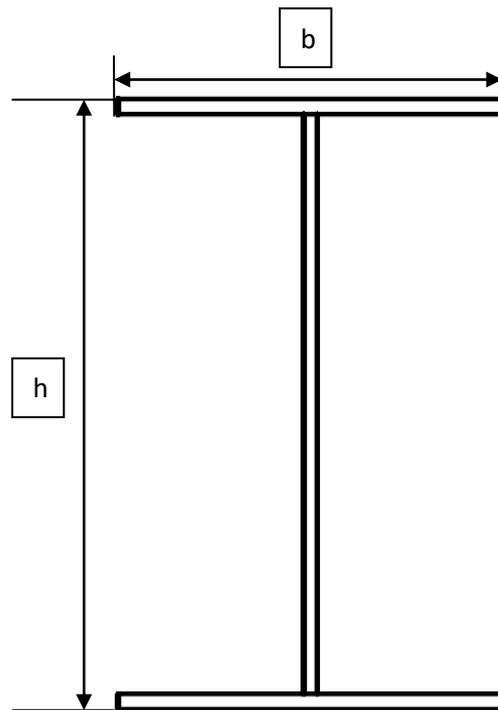
Por lo tanto, tras este estudio se comprobarán las desventajas de seleccionar un perfil doble "T" en vez de un perfil tubular rectangular con alas como el seleccionado para la fabricación de una viga de un puente grúa con las características y dimensiones anteriormente detalladas.

Además, debido a las solicitudes técnicas de diseño, las únicas dimensiones que podemos variar para el perfil son el espesor de las alas y el espesor del alma, esto se debe a la geometría y dimensiones del resto de la nave industrial en la que va inserto el puente grúa. Ésta por construcción y diseño, no permite que la altura del perfil de la viga del puente grúa sea mayor de 1,4 metros, ni que su anchura sea mayor de 1 metro, porque si no se podrían producir posibles colisiones que finalmente provocarían accidentes cuando toda la estructura entrara en carga.

Por tanto, debido a las condiciones de diseño de la viga del puente grúa, entre estos dos perfiles del tipo doble "T", la única diferencia es el espesor de las alas y del alma, es decir, tienen el mismo ancho y el mismo canto.

A pesar de que una solución para evitar el pandeo y no aumentar tanto el peso propio de la viga podría ser mantener el espesor de las alas y el alma y aumentar el canto o la anchura, en el diseño del puente grúa esa solución no es viable, debido a la restricción anteriormente explicada sobre las dimensiones máximas de su anchura y canto.

**2.4.4.1.** Perfil doble T de dimensiones y espesores similares a los del perfil tubular rectangular seleccionado:



*Imagen 79. Perfil doble "T"*

Se seleccionan como valores para los parámetros anteriores:

- $h$  (canto)= 1,4 m
- $b$  (anchura)= 1m
- $e_{\text{alas}}=0,01$  m
- $e_{\text{alma}}=0,005$  m

## Capítulo 2. Dimensionado de la viga del puente grúa

El procedimiento para obtener los valores del factor de carga de cada modo de pandeo de la viga mediante el software "SAP2000", es igual que para el caso del perfil anterior.

Para el perfil seleccionado, sin posicionar rigidizadores, no sería válido para comparar resultados, debido a que el perfil que se ha seleccionado anteriormente, necesitaba rigidizadores para evitar el fenómeno de pandeo lateral y abolladura.

Por lo tanto, el perfil pandearía al aplicar la carga máxima operativa en cualquiera de los dos casos críticos de posición de la carga máxima operativa. Pero esto también ocurría al dimensionar la viga con el perfil tubular rectangular sin rigidizadores en sus dos extremos, por lo tanto no es condición para seleccionar uno u otro.

La diferencia radica en que al posicionar los rigidizadores en la posición sobre el eje "x" justo sobre los apoyos (en los dos extremos de la viga), cuyas condiciones de contorno son iguales a las aplicadas en el perfil anterior (biapoyada), se obtienen los siguientes resultados del factor de carga para los diferentes modos de pandeo de la estructura.

Se analizan los dos casos de posición de la carga más crítica para esta estructura:

### **2.4.4.1.1.** Caso centro de la viga, centro del carro en $x=15$ metros (centro de la viga):

- Modo 1 de pandeo--> factor de carga= 0,75108
- Modo 2: de pandeo---> factor de carga=0,75111
- Modo 3: de pandeo---> factor de carga=0,83734
- Modo 4: de pandeo---> factor de carga=0,83742
- Modo 5: de pandeo---> factor de carga=0,91727
- Modo 6: de pandeo---> factor de carga=0,91741

### **2.4.4.1.2.** Caso extremo izquierdo, centro del carro en $x=1,25$ metros (extremo izquierdo de la viga):

- Modo 1 de pandeo--> factor de carga= 1,53543
- Modo 2: de pandeo---> factor de carga=1,59094
- Modo 3: de pandeo---> factor de carga=3,28319
- Modo 4: de pandeo---> factor de carga=3,56329
- Modo 5: de pandeo---> factor de carga=-4,54589
- Modo 6: de pandeo---> factor de carga=4,62183

Como se puede observar, a pesar de haber posicionado rigidizadores (mismas dimensiones que el alma del perfil) con las mismas características que para el caso del perfil tubular rectangular con alas, la estructura para el caso de carga máxima operativa situada en el centro de la viga, sufre los fenómenos de pandeo lateral y abolladura. Por lo tanto, el perfil seleccionado no sería capaz de cumplir las solicitaciones técnicas para las cuales ha sido diseñada la estructura del puente grúa.

**2.4.4.2.** Selección de un perfil doble "T" en el que no se produzca el fenómeno de pandeo al aplicar la carga máxima operativa en cualquiera de sus dos posiciones más críticas:

Aplicando el mismo procedimiento de cálculo mediante el software "SAP2000", pero de manera iterativa, se seleccionan los valores de las dimensiones del perfil doble "T" capaz de no pandear ni abollarse al aplicar la carga máxima operativa que debe soportar el puente grúa, se obtienen:

- $h$  (canto)= 1,4 m
- $b$  (anchura)= 1m
- $e_{\text{alas}}=0,015$  m
- $e_{\text{alma}}=0,008$  m

Se selecciona un perfil cuyos espesores de las alas y del alma, estén dentro de los espesores comerciales, debido a que sino aumentaría mucho el coste de fabricación de la viga.

Dimensionando la viga del puente grúa con este perfil se obtiene:

**2.4.4.2.1.** Caso centro de la viga, centro del carro en  $x=15$  metros (centro de la viga):

- Modo 1 de pandeo--> factor de carga=2,53404
- Modo 2: de pandeo---> factor de carga=2,53408
- Modo 3: de pandeo---> factor de carga=2,81593
- Modo 4: de pandeo---> factor de carga=2,81636
- Modo 5: de pandeo---> factor de carga=3,07767
- Modo 6: de pandeo---> factor de carga=3,07818

**2.4.4.2.2.** Caso extremo izquierdo, centro del carro en  $x=1,25$ metros (centro de la viga):

- Modo 1 de pandeo--> factor de carga= 7,614
- Modo 2: de pandeo---> factor de carga=8,08118
- Modo 3: de pandeo---> factor de carga=13,4746
- Modo 4: de pandeo---> factor de carga=14,74722
- Modo 5: de pandeo---> factor de carga=16,09
- Modo 6: de pandeo---> factor de carga=16,0983

Al ser los factores de carga de los modos de pandeo mayores que la unidad, se comprueba que no se produciría pandeo lateral ni abolladura. Por lo tanto, en principio se trataría de un perfil adecuado para la fabricación de la viga del puente grúa.

El problema de seleccionar este tipo perfil, radica en que como se acaba de demostrar, para que no pandeé ni se abolle, se debe fabricar un perfil de mayores espesores en las alas y en el alma que si se selecciona un perfil tubular rectangular con alas. Mayores espesores hacen que aumente el área del perfil, y por tanto su volumen y peso. Es decir, se aumenta la cantidad de acero necesaria para su fabricación (y con esto el coste de fabricación) y los desplazamientos máximas de la viga debidos a su propio peso.

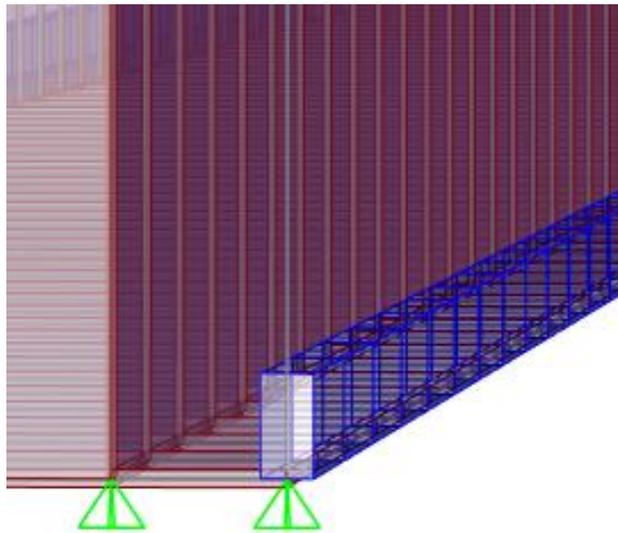
De esta manera quedan demostradas las ventajas de dimensionar y fabricar la viga del puente grúa con un perfil tubular rectangular con alas, frente a un perfil doble "T".

**2.4.5. Dimensionado del carril por el que se mueve el carro que porta la carga sobre la viga del grúa puente:**

Para todos los anteriores casos en los que se estudia el fenómeno de pandeo lateral y abolladura mediante el software "SAP2000", es necesario dimensionar un carril en el que aplicar las cargas.

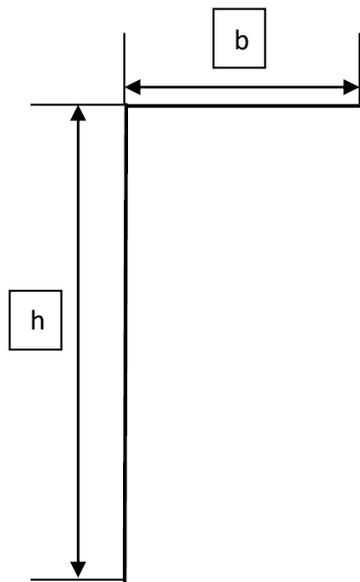
Para el dimensionado de este carril, se selecciona una viga ("Frame") con un perfil rectangular. Las dimensiones de este perfil van a hacer que el carril plantifique o no al entrar en carga.

Este carril se debe posicionar en el punto en el que su extremo inferior se encuentre en la misma cota que el punto central del ala inferior del perfil, es decir, como en la imagen 80:



*Imagen 80. Vista 3D del carril de la viga del puente grúa*

El primer carril que se selecciona se trata de un carril de dimensiones:



*Imagen 81. Perfil del carril de la viga del puente grúa*

○  $h=0,04$  m

○  $b=0,02$  m

Al ejecutar el modelo y obtener los valores de las tensiones equivalentes de Von Mises máximas para el perfil de la viga carril seleccionado, es decir el perfil tubular rectangular con alas de dimensiones 1,4x1x0,01x0,005 metros, se obtienen los siguientes valores:

- Caso carga situada en el centro de la viga:

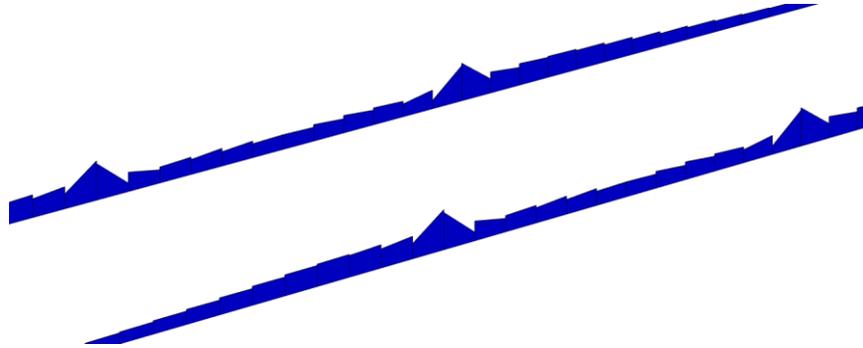


Imagen 82. Diagrama de la tensión eq. de VM en el carril

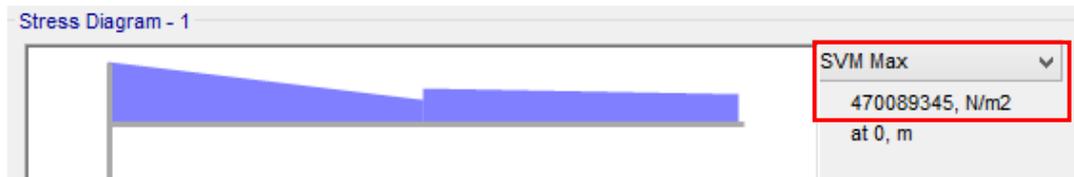


Imagen 83. Valor de la tensión eq. de VM máxima en el carril

$$\sigma_{eq VM} = 470,089 \text{ MPa}$$

- Caso carga situada en el extremo izquierdo de la viga:

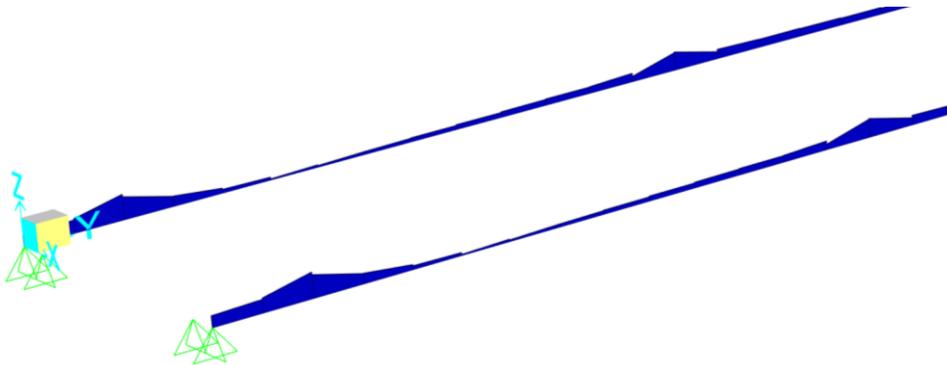


Imagen 84. Diagrama de la tensión eq. de VM en el carril



Imagen 85. Valor de la tensión eq. de VM máxima en el carril

$$\sigma_{eq VM} = 703,471 \text{ MPa}$$

## Capítulo 2. Dimensionado de la viga del puente grúa

Al ser en ambas situaciones de aplicación de la carga máxima operativa la tensión equivalente de Von Misses mayor de 275 MPa (límite elástico del acero S275), el perfil del carril plastificaría según el criterio de Von Misses, por lo tanto el perfil seleccionado no es correcto

Para evitar que plastifique, se aumentan las dimensiones del perfil del carril, se selecciona:

- $h=0,06$  m
- $b=0,03$  m

Se obtiene:

- Caso carga situada en el centro de la viga:

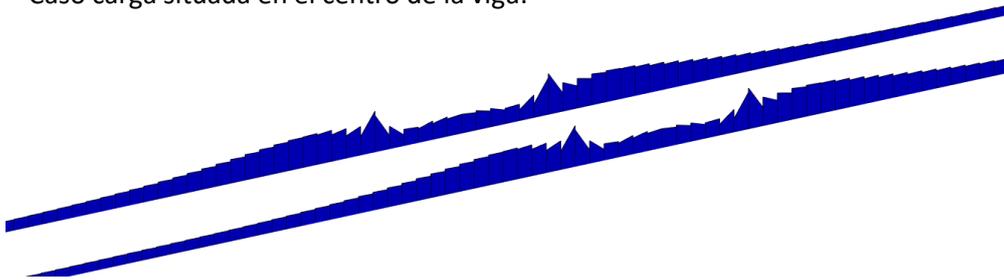


Imagen 86. Diagrama de la tensión eq. de VM en el carril

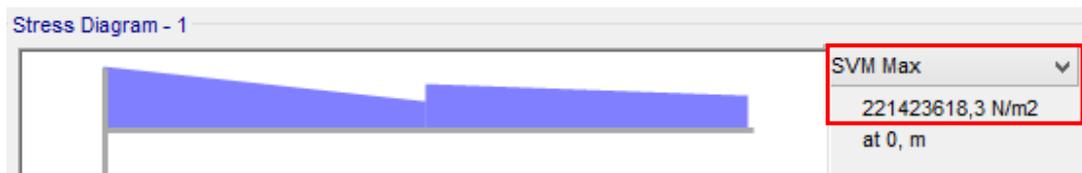


Imagen 87. Valor de la tensión eq. de VM máxima en el carril

$$\sigma_{eq\ VM} = 221,424 \text{ MPa}$$

- Caso carga situada en el extremo izquierdo de la viga:

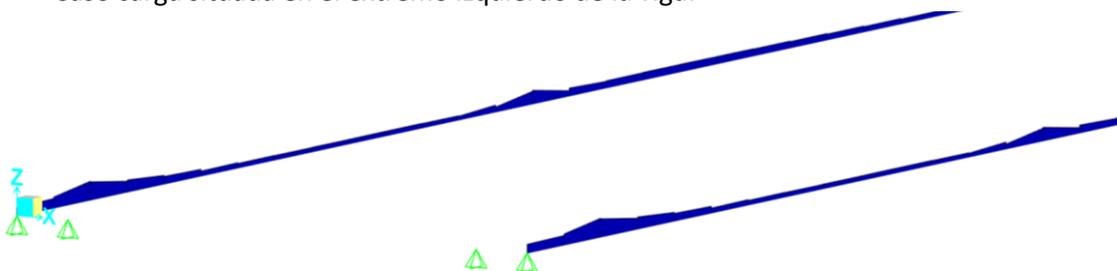


Imagen 88. Diagrama de la tensión eq. de VM en el carril



Imagen 89. Valor de la tensión eq. de VM máxima en el carril

$$\sigma_{eq\ VM} = 211,410 \text{ MPa}$$

Como se puede observar, de esta manera las tensiones equivalentes de Von Mises son inferiores al valor del límite elástico del acero S275 (275 MPa). Por lo tanto el perfil del carril no plastifica según el criterio de Von Mises, al entrar en carga con la carga máxima operativa en cualquiera de las dos situaciones más críticas, es decir, el perfil seleccionado para el carril es correcto.

El único inconveniente de haber tenido que aumentar el perfil del carril, es que se aumenta su área, y por tanto su volumen y peso, es decir, se necesita más cantidad de acero para poder fabricarlo, pero al tratarse de un perfil de dimensiones pequeñas, la cantidad de acero que se debe emplear de más, no es muy grande y por tanto afecta poco a la estructura de la viga del puente grúa final.

Además se ha tenido en cuenta que la modificación del dimensionado del carril genera variaciones en los valores de los factores de carga de pandeo lateral y abolladura, por lo que se ha dimensionado este teniendo en cuenta que estos factores de carga debían ser mayores que la unidad para evitar el fenómeno de vuelque y abolladura.

En cuanto al resto de tensiones equivalentes de Von Mises repartidas por todo el área de la viga no superan el valor de los 275 MPa, que corresponde con el valor límite elástico del acero con el que se fabrica la viga del puente grúa.

Solo se supera este valor en determinados puntos donde se aplica la carga. Es decir, estas tensiones equivalentes de Von Mises máximas que proporciona el software de cálculo "SAP2000" son el resultado de fenómenos de concentración de esfuerzos y tensiones, por lo tanto estos valores no generan plastificación de la estructura mediante el criterio de plastificación de Von Mises.

Si se analizan las tensiones máximas de Von Mises en los carriles para el caso de haber seleccionado un perfil del tipo doble "I", el carril plastificaría al tener tensiones equivalentes de Von Mises máximas mayores que 275 MPa, por lo tanto habría que aumentar todavía más sus dimensiones, aumentando el peso propio y el coste de su fabricación.

2.5. Tabla comparativa entre los diferentes valores para la respuesta tensional de la viga del puente grúa proporcionados por el software "SAP2000":

Una vez realizados todos los cálculos necesarios para el dimensionado del perfil de la viga del puente grúa, se comparan los resultados obtenidos con el software "SAP2000", de dos modos diferentes, con el módulo "Frame", es decir barra, y con el módulo "Shell", es decir diseñando la viga como chapas adecuadamente soldadas, es decir, como elementos de área.

Se realiza la siguiente tabla comparativa para poder comparar estos resultados y obtener el error relativo de cada modelo que proporciona el software "SAP2000" y así poder intentar entender la procedencia de estas diferencias entre los resultados obtenidos:

2.5.1. Perfil tubular rectangular con alas (cajón) de dimensiones 1,4x1x0,01x0,005 metros:

- 2.5.1.1. Caso de carga central (x=15 metros):

	Modelo barra ("FRAME")		Modelo chapa ("SHELL")	Error relativo (%)
	1 F	2 F		
Flecha central (m)	0,0394	0,0392	0,031	21,1
Tensión VM máx viga (MPa)	75,58	71,89	79,07	4,5
Tensión VM carril (MPa)	-	-	221,424	-

Tabla 8. Comparativa de modelos "Frame" y "Shell"

- 2.5.1.2. Caso de carga en el extremo izquierdo (x=1,25 metros):

	Modelo barra ("FRAME")		Modelo chapa ("SHELL")	Error relativo (%)
	1 F	2 F		
Flecha central (m)	0,0049	0,0049	0,004	18,36
Tensión VM máx viga (MPa)	26,41	24,05	20,2	23,51
Tensión VM carril (MPa)	-	-	211,410	-

Tabla 9. Comparativa de modelos "Frame" y "Shell"

2.5.2. Perfil doble "T":

- 2.5.2.1. Perfil doble "T" de dimensiones 1,4x1x0,01x0,005 metros:

2.5.2.1.1. Caso de carga central (x=15 metros):

	Modelo barra ("FRAME")		Modelo chapa ("SHELL")	Error relativo (%)
	1 F	2 F		
Flecha central (m)	0,0514	0,0509	0,0403	21,59
Tensión VM máx viga (MPa)	98,44	93,79	81,05	17,66
Tensión VM carril (MPa)	-	-	489,114	-

Tabla 10. Comparativa de modelos "Frame" y "Shell"

2.5.2.1.2. Caso de carga en el extremo izquierdo (x=1,25 metros):

	Modelo barra ("FRAME")		Modelo chapa ("SHELL")	Error relativo (%)
	1 F	2 F		
Flecha central (m)	0,0063	0,0063	0,051	19,04
Tensión VM máx viga (MPa)	49,54	47,54	46,45	6,23
Tensión VM carril (MPa)	-	-	704,327	-

Tabla 11. Comparativa de modelos "Frame" y "Shell"

- 2.5.2.2. Perfil doble "T" de dimensiones 1,4x1x0,015x0,008 metros:

2.5.2.2.1. Caso de carga central (x=15 metros):

	Modelo barra ("FRAME")		Modelo chapa ("SHELL")	Error relativo (%)
	1 F	2 F		
Flecha central (m)	0,0342	0,034	0,0277	19,01
Tensión VM máx viga (MPa)	65,78	62,66	54,25	17,52
Tensión VM carril (MPa)	-	-	330,085	-

Tabla 12. Comparativa de modelos "Frame" y "Shell"

2.5.2.2.2. Caso de carga en el extremo izquierdo ( $x=1,25$  metros):

	Modelo barra ("FRAME")			Error relativo (%)
	1 F	2 F	Modelo chapa ("SHELL")	
Flecha central (m)	0,0042	0,0042	0,0035	16,67
Tensión VM máx viga (MPa)	31,39	29,96	26,56	15,39
Tensión VM carril (MPa)	-	-	486,406	-

Tabla 13. Comparativa de modelos "Frame" y "Shell"

En las anteriores tablas se puede observar una gran coincidencia entre los resultados obtenidos mediante la simplificación de la estructura como una barra (aplicando una única fuerza puntual, y dos fuerzas puntuales) con los resultados obtenidos simplificando la estructura como un conjunto de chapas adecuadamente soldadas y con los obtenidos simplificando la carga como cuatro fuerzas puntuales.

Respecto al perfil no seleccionado, el del tipo doble "T", se pueden observar los valores obtenidos en las anteriores tablas de valores, a pesar de que no influye en la decisión de un perfil u otro, ya que ya se ha comprobado que tiene más ventajas el diseño de la viga del puente grúa con un perfil tubular rectangular con alas (cajón) que con uno del tipo doble "T".

**2.6.** Tabla comparativa entre los valores para la respuesta tensional de la viga del grúa puente proporcionados por el software "SAP2000", comparados con los obtenidos de manera teórica:

En estas tablas comparativas de resultados, se compararán los valores de tensiones, desplazamientos y frecuencias de vibración obtenidas de una modo teórico, frente a los obtenidos mediante el software "SAP2000" modelando el problema de estudio como un conjunto de chapas soldadas adecuadamente, es decir, con el modelo "SHELL" con el que anteriormente se obtienen los fenómenos de pandeo lateral y abolladura.

De esta manera se vuelve a seguir la misma metodología de estudio que se está aplicando desde el principio del TFG, es decir, comparar los valores que se pueden obtener de manera teórica-analítica, con los que nos proporciona el software de cálculo. Para así poder utilizar los valores que nos proporcione el programa y no se pueden calcular de manera teórica-analítica, para el estudio y diseño del puente grúa.

Se comparan los valores del peso de la viga, de manera teórica se calcula con la siguiente fórmula (ecuación 2):

$$\text{Masa de la viga} = A_{\text{perfil}} \cdot L_{\text{viga}} \cdot \rho_{\text{acero S275}}$$

Mediante el software de cálculo, se calcula:

$$\text{Masa de la viga} = \frac{\sum \text{Reacciones eje "z" en los 4 apoyos de la viga}}{9,8066 \text{ m/s}^2} \quad \text{Ec. 25}$$

Se comparan los valores del desplazamiento máximo obtenidos mediante el programa de cálculo y de manera teórica con la aplicación de las fórmulas de un prontuario de vigas simples, simplificando el problema como una viga biapoyada con una carga distribuida ("q") que corresponde al peso propio y una carga puntual centrada (20 T=196000 N) que corresponde con la aplicación de la carga máxima operativa en la situación crítica de carga centrada en la viga (x=15 m).

Las fórmulas utilizadas del prontuario de vigas son las siguientes:

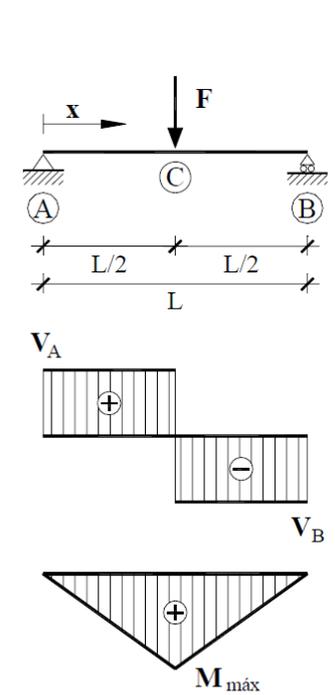
<b>VIGA SIMPLE APOYADA: carga puntual <math>F</math> centrada.</b>	
	<b>Reacciones y solicitaciones</b>
	Reacciones: $R_A = R_B = \frac{F}{2}$ Cortantes: $V_{AC} = \frac{F}{2}$ $V_{CB} = -\frac{F}{2}$ Flectores: $M_{AC} = \frac{F}{2}x$ $M_{CB} = \frac{F}{2}(L-x)$ <div style="border: 1px solid red; padding: 2px; display: inline-block;"> <math>M_{m\acute{a}x} = M_C = \frac{FL}{4}</math> para <math>x = \frac{L}{2}</math> </div>
	<b>Deformaciones</b>
	Giros: $\varphi_A = -\frac{FL^2}{16EI}$ $\varphi_B = \frac{FL^2}{16EI}$ $\varphi_C = 0$ Elástica: $y_{AC} = \frac{FL^2x}{16EI} \left(1 - \frac{4x^2}{3L^2}\right)$ $y_{CB} = \frac{FL^2(L-x)}{12EI} \left(\frac{3}{4} - \frac{(L-x)^2}{L^2}\right)$ Flecha máxima: <div style="border: 1px solid red; padding: 2px; display: inline-block;"> <math>y_{m\acute{a}x} = y_C = \frac{FL^3}{48EI}</math> para <math>x = \frac{L}{2}</math> </div>

Imagen 90. Tabla prontuario aplicación de una carga puntual centrada en una viga biapoyada [23]

Para el cálculo del valor de la carga distribuida "q" que corresponde con el valor del peso propio de la viga, se aplica la siguiente fórmula:

$$q_{\text{peso propio}} = \text{Área}_{\text{perfil}} \cdot g \cdot \rho_{\text{acero S275}} \quad \text{Ec. 26}$$

Se obtienen los siguientes resultados:

- 2.6.1. Para el perfil seleccionado en el diseño de la viga del grúa puente, de dimensiones 1,4x1x0,01x0,005 metros (carril= 0,06x0,03 metros):

		<b>Teórico</b>	<b>SAP 2000</b>	<b>Error relativo (%)</b>
<b>Peso de la viga (kg)</b>		8900,82	8947,75	0,524489397
<b>Frecuencia de vibración (Hz)</b>		5,0548	5,29352	4,509664647
<b>Peso propio:</b>	<b>q=2909,5593 N·m</b>			
	<b>Flecha máx (m)</b>	0,01059	0,0111	4,594594595
	<b>M máx (N·m)</b>	327000		
	<b>Tensión eq. VM (Mpa)</b>	16,6	16,78	1,072705602
<b>F puntual central (x=15 m)</b>				

Cargas móviles. Aplicación al dimensionado de un puente grúa de 30 m y 20 t

<b>Flecha máx (m)</b>	0,038	0,0353	7,105263158
<b>M máx (N·m)</b>	1470000		
<b>Tensión eq. VM (Mpa)</b>	74,6	79,07	5,653218667

*Tabla 14. Comparativa de resultados obtenidos de manera teórica y mediante "SAP2000"*

- **2.6.2.** Para el perfil de tipo doble "T", de dimensiones 1,4x1x0,01x0,005 metros (carril= 0,06x0,03 metros):

		<b>Teórico</b>	<b>SAP 2000</b>	<b>Error relativo (%)</b>
<b>Peso de la viga (kg)</b>		6334,1813	8693,8775	27,14204565
<b>Frecuencia de vibración (Hz)</b>		5,72	5,24842	8,244405594
<b>Peso propio:</b>	<b>q=2070,55 N·m</b>			
	<b>Flecha máx (m)</b>	0,00962872	0,0111	13,25477477
	<b>M máx (N·m)</b>	232938,009		
	<b>Tensión eq. VM (Mpa)</b>	15,09	18,52	18,52051836
<b>F puntual central (x=15 m)</b>				
	<b>Flecha máx (m)</b>	0,0486	0,0403	17,0781893
	<b>M máx (N·m)</b>	1470000		
	<b>Tensión eq. VM (Mpa)</b>	95,27	81,05	14,92599979

*Tabla 15. Comparativa de resultados obtenidos de manera teórica y mediante "SAP2000"*

Como se puede observar en las dos anteriores tablas de valores, existe una gran similitud entre los valores calculados de manera teórica y los obtenidos mediante el software de cálculo "SAP2000". Por lo tanto, se puede concluir que en los casos en los que no se pueda calcular ciertos valores de modo teórico, se pueden tomar como válidos para el diseño del resto del puente grúa, los que nos proporciona el programa.

**2.7.** Respuesta frecuencial de la viga del puente grúa al posicionar una masa sobre la viga biapoyada en una determinada posición:

Ahora se cambia el tipo de análisis de estudio para esta estructura del puente grúa, en este caso se trata de un análisis modal, en el se va a estudiar la respuesta frecuencial que tiene la estructura al posicionar una masa en una determinada posición de la misma.

Para este análisis se puede o bien no posicionar ninguna masa sobre la viga, o bien posicionar una masa en la posición central de esta, o en una posición diferente.

El objetivo de este análisis es poder observar como varía la frecuencia de cada uno de los modos de vibración de la viga al variar el valor de la masa y su posición sobre esta.

De nuevo parte de este análisis puede ser realizado de dos manera diferentes:

- Cálculo teórico.
- Mediante el software "SAP2000".

Además se pueden realizar los siguientes casos de estudio:

- Sin masa.
- Con masa posicionada en x=15 metros (centrada en la viga).
- Con masa posicionada en "x" metros sobre el eje "x" longitudinal de la viga del puente grúa (no centrada en la viga).

Cálculo teórico:

Este método de cálculo solo va a ser válido para el primer modo de vibración, excepto en el primer caso en el que la viga no tiene ninguna masa apoyada, en el que se puede calcular la frecuencia en todos sus diferentes modos de vibración:

- Sin masa:

Para este caso se aplica la siguiente expresión:

$$\omega_i \left( \frac{rad}{s} \right) = \frac{\lambda_i^2}{L^2} \cdot \left( \frac{E \cdot I}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{Ec. 27}$$

También se puede expresar como:

$$f_i \text{ (Hz)} = \frac{\lambda_i^2}{2 \cdot \pi \cdot L^2} \cdot \left( \frac{E \cdot I}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{Ec. 28}$$

- |   |   |
|---|---|
| ○ $\omega$ = frecuencia expresada en radianes por segundo (rad/s) | ○ $\rho$ = densidad del material de la viga             |
| ○ $f$ = frecuencia expresada en herzios (Hz)                      | ○ $E$ = módulo elástico o de Young (N/m <sup>2</sup> )  |
| ○ $\lambda = \pi \cdot i$   | ○ $I$ = inercia del perfil de la viga (m <sup>4</sup> ) |
| ○ $i$ = modo de vibración (i=1,2,3...)                            | ○ $L$ = longitud de la viga                             |

- Con masa en x=15 metros (centrada en la viga).

Para este caso se aplica la siguiente expresión:

$$f_1 = \frac{2}{\pi} \cdot \left[ \frac{3 \cdot E \cdot I}{L^3 \cdot (M_i + 0,4857 \cdot m_b)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{Ec. 29}$$

- $f_1$ = frecuencia del modo 1 expresada en hercios (Hz)
- $M_i$ = masa de la viga (kg)
- $m_b$ =masa colocada en la viga (kg)

- Con masa en "x" metros sobre el eje "x" longitudinal de la viga del grúa puente (no centrada en la viga).

Para este caso se aplican las siguientes fórmulas:

Primero se calculan los parámetros " $\alpha$ " y " $\beta$ ":

$$\alpha = \frac{a}{a+b} \cdot \left[ \frac{(2 \cdot b + a)^2}{12 \cdot b^2} + \frac{a^2}{28 \cdot b^2} - \frac{a \cdot (2 \cdot b + a)}{10 \cdot b^2} \right] \quad \text{Ec. 30}$$

$$\beta = \frac{b}{a+b} \cdot \left[ \frac{(2 \cdot a + b)^2}{12 \cdot a^2} + \frac{b^2}{28 \cdot a^2} - \frac{b \cdot (2 \cdot a + b)}{10 \cdot a^2} \right] \quad \text{Ec. 31}$$

Finalmente se aplica la siguiente expresión para calcular la frecuencia (Hz) de vibración de la viga:

$$f_1 = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left[ \frac{3 \cdot E \cdot I \cdot (a+b)}{a^2 \cdot b^2 (M_i + (\alpha + \beta) \cdot m_b)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{Ec. 32}$$

Para las anteriores fórmulas se debe tener en cuenta:

- $M_i$ = masa colocada en una determinada posición de la viga (kg).
- $m_b$ = masa de la viga (kg).

Para calcular la masa de la viga (" $m_b$ ") en la que se simplifica viga del puente grúa, se aplica la siguiente fórmula:

$$m_b = \rho \cdot A_{sección} \cdot L$$

- $\rho$ =densidad del material del que está fabricado la viga ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
- $A_{sección}$ = área del perfil anteriormente dimensionado ( $\text{m}^2$ )
- $L$ =longitud de la viga (m)

## Capítulo 2. Dimensionado de la viga del puente grúa

Para el caso de estudio la viga está fabricada de acero S275, cuya densidad tiene un valor de  $7849,0474 \text{ kg/m}^3$ , con un área del perfil dimensionado de  $0,182 \text{ m}^2$  y una longitud total de la viga de 30 metros, aplicando la anterior expresión (ecuación 2) se obtiene el peso de la viga:

$$m_b = 7849,0474 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0,182 \text{m}^2 \cdot 30 \text{m} = 8900,8198 \text{ kg}$$

Como ya se había calculado anteriormente.

### Mediante el software "SAP2000":

Para poder obtener las frecuencias de vibración de la viga biapoyada en que se simplifica el estudio de la viga del puente grúa, se debe definir la geometría de la misma, y además el material y la sección. Debido a que la frecuencia depende de valores como el módulo de elasticidad o de Young ("E") y del valor de la inercia sobre el eje vertical "z" ("I<sub>z</sub>").

El tipo de análisis será modal, accediendo al análisis "MODAL" del programa. A diferencia de las anteriores fórmulas que solo eran válidas para obtener las frecuencias del primer modo de vibración (excepto cuando no hubiera masa sobre la viga), se pueden obtener las frecuencias del resto de modos de vibración de esta estructura para cualquier caso de valor y posición de la masa sobre la viga.

Además el software permite obtener estas frecuencias de vibración de esta estructura, añadiendo más de una masa sobre la viga y en cualquier posición sobre la misma.

Por lo tanto, se procede de la misma manera que en los casos de estudio de los diagramas de esfuerzos cortantes y momentos flectores, al igual que para las líneas de influencia de una carga móvil unitaria (explicado anteriormente).

Para comprobar los resultados, se analizan los siguientes casos de estudio:

- **2.7.1.** Sin masa.
- **2.7.2.** Con masa en  $x=15$  metros (centrada en la viga).
- **2.7.3.** Con masa en  $x=5$  metros (no centrada en la viga).
- **2.7.4.** Con masa en  $x=20$  metros (no centrada en la viga).

### **2.7.1.** Sin masa:

Para este primer ejemplo se puede aplicar cualquiera de las 3 fórmulas anteriores (ecuaciones 28, 29 y 32), teniendo en cuenta que cuando aparezca el término " $M_i$ ", su valor será nulo, debido a que no se tiene ninguna masa aplicada sobre la viga:

	Masa (kg)	Posición "x" (m)	Frecuencia (Hz)
<b>Fórmula masa no centrada</b>	0	-	5,4941
<b>Fórmula masa centrada</b>	0	-	5,4942
<b>Fórmula viga sin masa</b>	0	-	5,4547
<b>SAP 2000</b>	0	-	5,46218

*Tabla 16. Valores de la frecuencia de vibración sin aplicar masa*

La frecuencia del modo de vibración que proporciona el programa "SAP2000" y que coincide con los valores que proporcionan las fórmulas es el modo 2.

**2.7.2.** Con masa en x=15 metros (centrada en la viga):

Para este otro caso, solo se pueden aplicar las ecuaciones 29 y 32 (las de masa centrada o masa no centrada, teniendo en cuenta que los términos "a" y "b" tendrán de valor la mitad de la longitud (x=15 metros)).

Se obtienen los siguientes resultados:

	Masa (kg)	Posición "x" (m)	Frecuencia (Hz)
<b>Fórmula masa no centrada</b>	20000	15	2,3163
<b>Fórmula masa centrada</b>	20000	15	2,3163
<b>SAP 2000</b>	20000	15	2,28391

*Tabla 17. Valores de la frecuencia de vibración aplicando una masa centrada*

Para los dos últimos casos, solo se puede aplicar la última fórmula, es decir, la de la masa no centrada sobre la viga, las otras no valen, porque hay masa y porque no se encuentra en el centro de la viga.

**2.7.3.** Con masa en x=5 metros (no centrada en la viga):

	Masa (kg)	Posición "x" (m)	Frecuencia (Hz)
<b>Fórmula masa no centrada</b>	20000	5	3,66464
<b>SAP 2000</b>	20000	5	3,55614

*Tabla 18. Valores de la frecuencia de vibración aplicando una masa no centrada*

**2.7.4.** Con masa en x=20 metros (no centrada en la viga):

	Masa (kg)	Posición "x" (m)	Frecuencia (Hz)
<b>Fórmula masa no centrada</b>	20000	20	2,55944
<b>SAP 2000</b>	20000	20	2,50793

*Tabla 19. Valores de la frecuencia de vibración aplicando una masa no centrada*

Como se puede observar los resultados obtenidos de manera teórica y mediante el software de cálculo "SAP2000" son prácticamente iguales.

De esta manera se comprueba mediante la misma metodología de estudio que los valores teóricos y los valores obtenidos mediante el software coinciden, permitiendo así verificar los resultados obtenidos.

### Capítulo 3. Estructura sobre la que se mueve la viga del puente grúa: vigas carril:

Como se ha dicho anteriormente, la estructura total que se está dimensionando, el puente grúa, está formado por dos estructura, la anteriormente dimensionada, la viga del puente grúa, y por último una segunda estructura sobre la que apoya la anterior, que corresponde con los pórticos de la viga carril.

En este caso, existen dos vigas carril, en cada una de ellas apoyará un extremo de la viga del puente grúa mediante un testero. El perfil de esta estructura, a pesar de estar fabricado con el mismo material que el anterior, acero S275, será de mucha menor dimensión, debido a que ya no es una viga con 30 metros de luz y una carga de 20 toneladas como lo era en el caso anterior.

El perfil seleccionado para dimensionar las vigas carril en este caso es un perfil doble " T", que ahora proporciona más ventajas de las que proporcionaba el diseño de la anterior estructura con este tipo de perfil.

Las dimensiones de este se reducirán, además de porque ahora la carga se reparte entre dos vigas carril y sobre cada una de estas vigas carril no se le aplica tanta carga como sí se aplicaba sobre la viga del puente grúa.

Es decir, la viga carril estudiada estar formada por 3 vanos y 4 apoyo. Estos apoyos a su vez se posicionarán sobre los pilares de la nave industrial donde queda ubicado el puente grúa, repartiendo de esta manera la carga total aplicada y reduciendo la respuesta tensional de esta estructura.

La carga total que tendrán que soportar los dos carriles de los pórticos de las vigas carril es la carga máxima de diseño del puente grúa, es decir 20 toneladas, más la carga que genera el peso de la viga con la que se fabrica el puente grúa. Para esta segunda estructura, bastará con un perfil doble "T" comercial, por lo que se reducirán las dimensiones, el peso y el coste de fabricación de la misma.

Cada una de las dos estructuras que forman las vigas carril del puente grúa, soportarán una carga total equivalente a la mitad de la suma de las 20 toneladas y el peso total de la viga del puente grúa anteriormente dimensionado.

Esta carga se aplicará como una carga puntual en los diferentes puntos de la viga carril. En la realidad, esta carga puntual en verdad se trata de dos carga puntuales, debido a que en cada uno de los extremos de la viga del puente grúa se posicionará un testero unido a dos ruedas que permiten realizar su movimiento a lo largo de la viga carril, por lo tanto cada una de ellas aplicará sobre la viga carril la mitad de la carga que le corresponde a cada testero.

El procedimiento seguido para el dimensionado y estudio del perfil necesario para las vigas carril será similar al que se ha seguido para el caso anterior, es decir, se realizarán ciertas comprobaciones calculadas de un modo teórico, para comparar los resultados de estas con los que proporciona el software "SAP2000" y así poder validar los resultados de este, para que los cálculos que no se puedan comprobar teóricamente puedan ser aceptados como válidos los proporcionados por el programa para poder dimensionar el perfil de las vigas carril.

### 3.1. Diseño de la viga carril mediante el software "SAP2000":

Para el estudio de las vigas carriles mediante el programa de cálculo se dimensionará en este caso únicamente un tramo de la viga carril. A pesar de que la longitud y el número de vanos de la viga carril del puente grúa en realidad sea mayor, lo que interesa es estudiar la respuesta tensional de un número de tramos que sea representativo del resto de la estructura, ya que ésta se repetirá en el resto de tramos.

La longitud total de las vigas carril será de 42 metros, que se trata de la longitud de la nave industrial sobre la que el puente grúa irá ubicado.

El tramo de la viga carril sobre el que se realizará el estudio estará formado por un total de 4 pilares, entre ellos habrá 3 vanos. La altura de los pilares será de 8 metros sobre el nivel del suelo, es decir, la viga carril se encontrará en el mismo plano horizontal que la viga del puente grúa anteriormente dimensionada.

La longitud de cada vano es de 6 metros, formando entre los tres un dintel total de 18 metros. El objetivo del estudio consiste en estudiar los 3 vanos para finalmente demostrar que ninguno de los dos vanos extremos ni el vano central son problemáticos cuando la estructura entra en carga con su carga máxima operativa de 20 toneladas.

Para el dimensionado de los 3 tramos de la viga carril y para el de los pilares, se selecciona inicialmente un perfil doble "T" comercial como se ha dicho anteriormente.

En las uniones entre los pilares y la viga carril se soldarán adecuadamente unos rigidizadores que permitirán así evitar que se produzca el fenómeno de pandeo lateral y abolladura de esta estructura.

En la siguiente imagen se pueden observar la viga carril sobre la que se apoya la viga del puente grúa, por medio de un testero formado por dos ruedas y sus diferentes elementos principales:

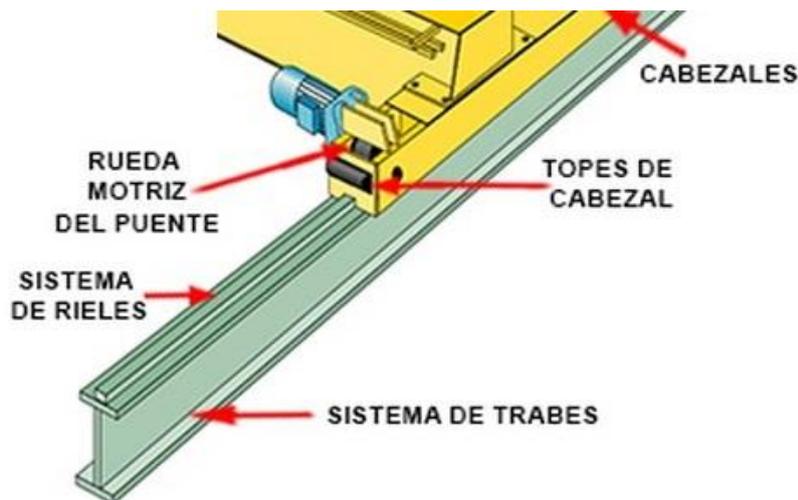


Imagen 91. Vista en detalle de la unión entre el testero y la viga carril [24]

Un croquis de la perspectiva de la los tramos estudiados de la segunda estructura que forma el puente grúa es el siguiente:

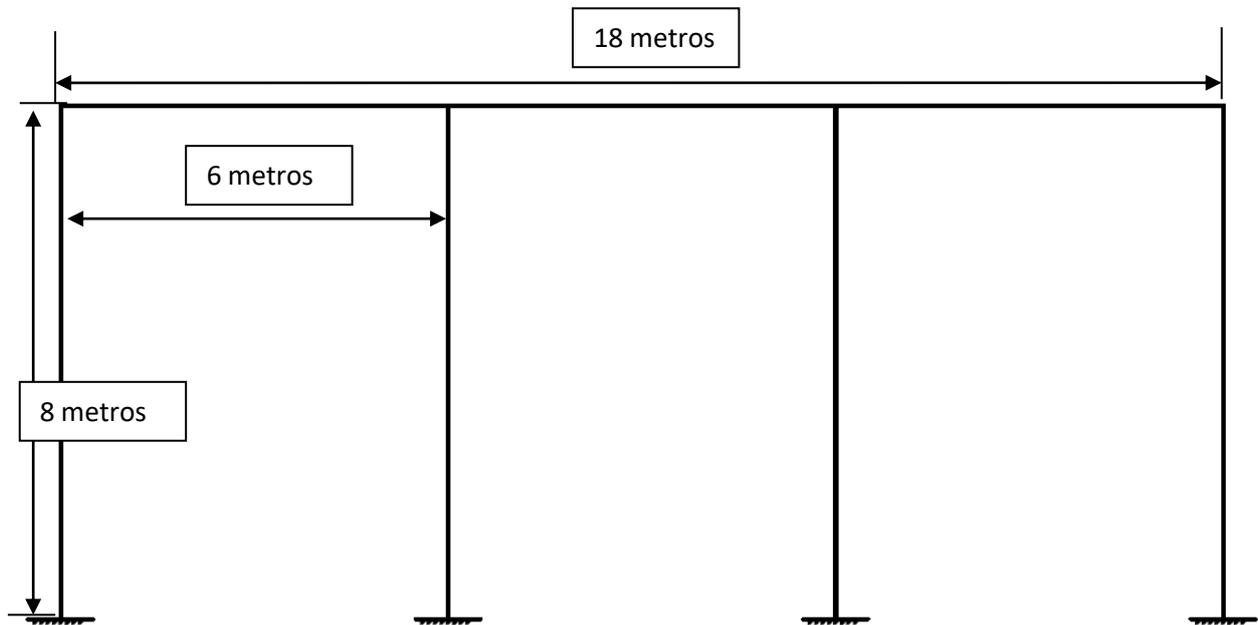


Imagen 92. Vista en perfil del pórtico de la viga carril

Los apoyos de los pilares sobre la cimentación de la nave industrial a efectos de cálculo de la respuesta tensional sobre el tramo de estudio de la viga carril se pueden considerar como empotrados, es decir que restringen tanto los giros como los desplazamientos en los tres ejes.

La carga máxima operativa aplicada sobre la viga carril se aplicará como dos cargas puntuales al tener el testero (cabezal) dos ruedas y este estar unido a los extremos de la viga del puente grúa y se desplaza sobre las vigas carril.

Las dimensiones del testero (cabezal) seleccionado son las siguientes:

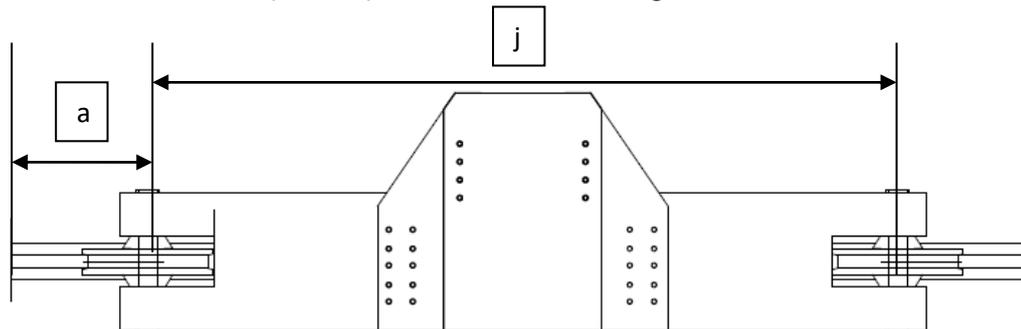


Imagen 93. Vista planta del testero

○ a (anchura voladizo)=0,50 m

○ j (batalla)= 2,5 m

Por lo tanto considerando que la carga total se aplica sobre las ruedas en forma de cargas puntuales, se aplicarán a una distancia de 2,5 metros entre ellas. El valor de cada una de las cargas debe corresponder con el sumatoria de la carga máxima aplicada en el extremo más desfavorable de la viga del puente grúa.

Es decir, no se aplicarán las mismas cargas sobre cada una de las dos vigas carril, a no ser que el carro de polipasto se encuentre en el centro de la viga del puente grúa ( $x=15$  metros). En el caso de que éste esté situado en uno de los extremos, limitando su posición debido a la geometría anteriormente descrita del carro, la fuerza que se aplicará en la viga carril más cercana a la carga será mayor que la que se aplicará sobre la otra viga carril.

Debido a que se está dimensionando la viga carril para que cumpla las condiciones de diseño para la cuál ha sido fabricada y además cumplir desde el lado de la seguridad, se debe analizar la situación más crítica de la posición de la carga, es decir, cuando el carro sustenta la carga máxima operativa del puente grúa de 20 toneladas y además el carro se encuentra en su posición extrema límite.

De esta manera se dimensiona el perfil de la viga carril, el testero y los pilares para la situación más crítica, de mayor carga, y para el resto de situaciones el perfil cumplirá las solicitaciones técnicas ya que tendrá que soportar menos carga.

Se aplica la carga máxima operativa en su posición más extrema, por ejemplo en el caso del extremo izquierdo, anteriormente analizado para el dimensionado de la viga del puente grúa.

Se debe tener en cuenta, además de la carga máxima operativa de 20 toneladas, el peso propio de la viga del puente grúa, que tras su dimensionado es de 8900,8198 kg (aproximado a 10000kg), y además debemos añadir la carga correspondiente al peso del carro de polipasto, cables y motores, para dimensionar desde el lado de la seguridad añadimos 500 kg a las dos anteriores.

Es decir, se aplica en cada uno de los dos ejes del eje del carro que se desplaza longitudinalmente por la viga del puente grúa una fuerza de valor:

$$F_{eje\ del\ carro} = (10000 + 500)kg \cdot 9,8 \frac{m}{s^2} = 102900\ N \quad Ec. 33$$

Mediante el software "SAP2000" se obtiene la reacción en cada uno de los extremos, que será la carga que se aplica sobre cada una de las dos vigas carril (transmitida a esta mediante las ruedas de los testeros):

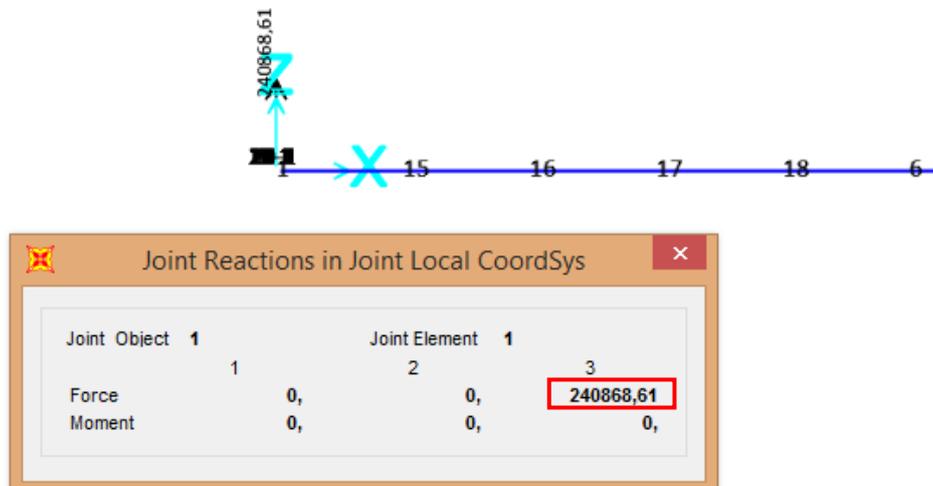


Imagen 94. Valor de la carga máxima que soporta el testero más cargado

### Capítulo 3. Estructura sobre la que se mueve la viga del puente grúa: vigas carril

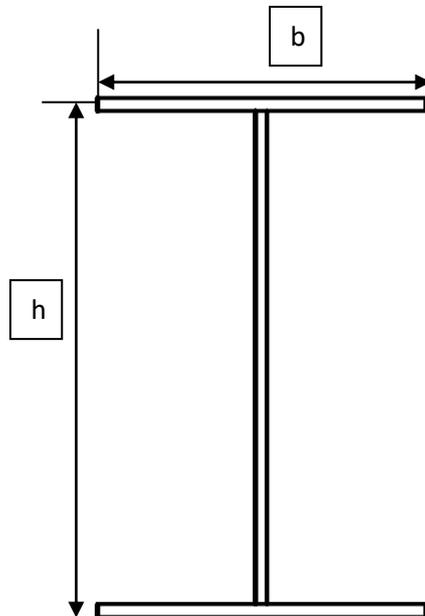
Es decir, en la viga carril en la posición más crítica del carro y con su mayor carga operativa, se aplica una carga de 240868 N. Para obtener el valor de cada una de las dos fuerzas puntuales que se aplican sobre la viga carril mediante las dos ruedas del testero, simplemente se divide este valor entre dos y se obtiene que cada fuerza tiene un valor de 120434 N.

El valor de la reacción del extremo de la derecha es de 52218 N, que al ser una fuerza menor, no se trata de la situación más crítica (mayor fuerza) que se debe estudiar para dimensionar el perfil de las vigas carril, los carriles y los pilares del puente grúa.

Por lo tanto, para realizar el estudio mediante el software de cálculo se define un tren de cargas formado por dos cargas puntuales móviles de valor 120434 N (eje "z") y separadas a una distancia constante de 2,5 metros (batalla del testero).

Aplicando dos fuerzas puntuales en cada una de las dos vigas carriles que componen el puente grúa.

El perfil inicialmente seleccionado (en el predimensionado) es de acero S275 doble "T" comercial, se trata del "IPE 400", y tiene las siguientes dimensiones:



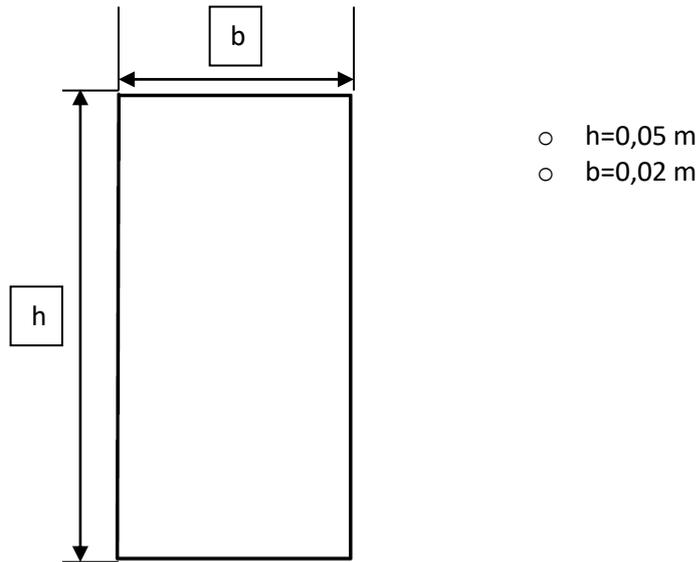
*Imagen 95. Perfil doble "T"*

Se seleccionan como valores para los parámetros anteriores:

- $h$  (canto)= 0,4 m
- $b$  (anchura)= 0,18 m
- $e_{\text{alas}}$ =0,0135 m
- $e_{\text{alma}}$ =0,0086 m

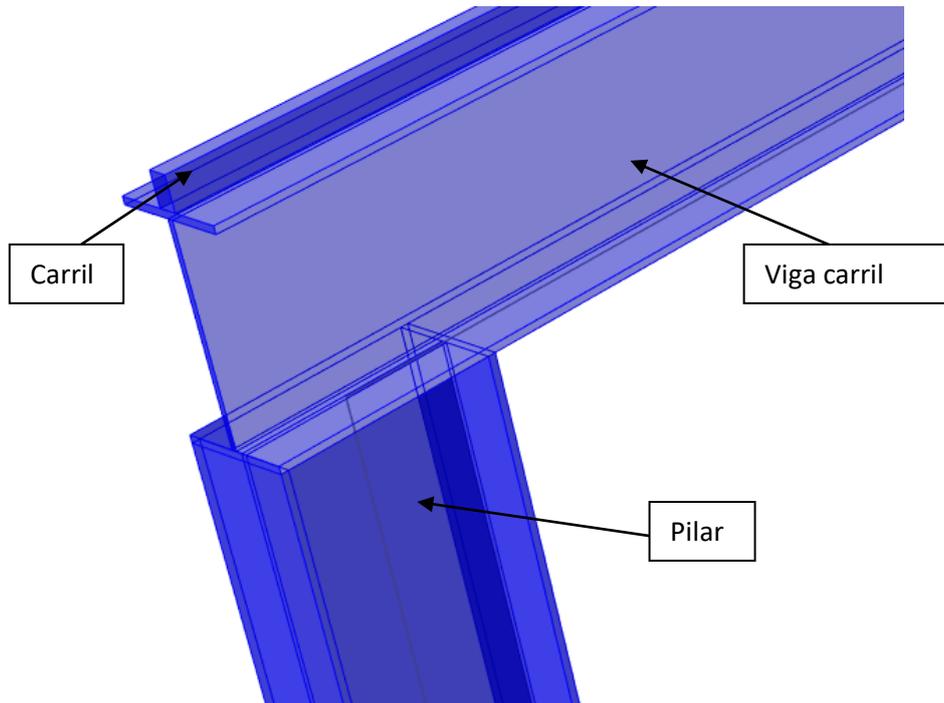
A pesar de que este perfil seleccionado tiene mayores espesores en alas y almas que el perfil tubular rectangular con alas (cajón con alas) seleccionado para el diseño de la viga del puente grúa, las dimensiones de su canto y altura son mucho menores.

Sobre la parte superior y central del ala superior del perfil de la viga carril, se posiciona un carril similar al del anterior estudio, de sección rectangular y acero S275, de dimensiones iniciales:



*Imagen 96. Perfil del carril de la viga carril*

La unión entre los pilares y la viga carril se diseña como la de la siguiente imagen:



*Imagen 97. Vista en detalle de la unión entre la viga carril y un pilar del pórtico*

Las uniones entre los pilares y la viga carril se diseñan como uniones rígidas.

Durante el proceso de fabricación todas las soldaduras entre pilares y vigas se realizan de manera adecuada.

Para el dimensionado del perfil de la viga carril se debe comprobar cuando la estructura entra en carga, para el caso de la carga máxima operativa, los siguientes casos de estudio:

- **3.1.1.** Desplazamiento (flecha) máximo.
- **3.1.2.** Criterio de plastificación de Von Misses.
- **3.1.3.** Fenómeno de pandeo lateral y abolladura.

Además se deben estudiar los casos más desfavorables durante la aplicación de la carga máxima operativa para asegurar que la estructura de la viga carril del puente grúa cumplirá las sollicitaciones técnicas de diseño para las cuales ha sido fabricada.

Perfil "IPE 400":

### 3.1.1. Desplazamiento (flecha) máximo:

El desplazamiento de todos los puntos de la estructura se debe estudiar para los siguientes casos:

- **3.1.1.1.** Para el peso propio de la estructura.
- **3.1.1.2.** Para la carga máxima de la estructura.

En ambos casos la flecha máxima de la estructura debe cumplir la siguiente relación (anteriormente definida en la ecuación 10):

$$\frac{f}{L} < \frac{1}{500}$$

Siendo "f" el desplazamiento máximo y "L" la longitud de la viga carril (longitud de cada uno de los tramos de la viga = 6 metros):

#### 3.1.1.1. Para el peso propio de la estructura:

Para este caso de estudio, solo se debe definir la geometría y dimensiones de la estructura, al igual que el perfil de la viga y de los pilares.

La deformada de la estructura debida a su peso propio obtenida mediante el software "SAP2000" es la siguiente:

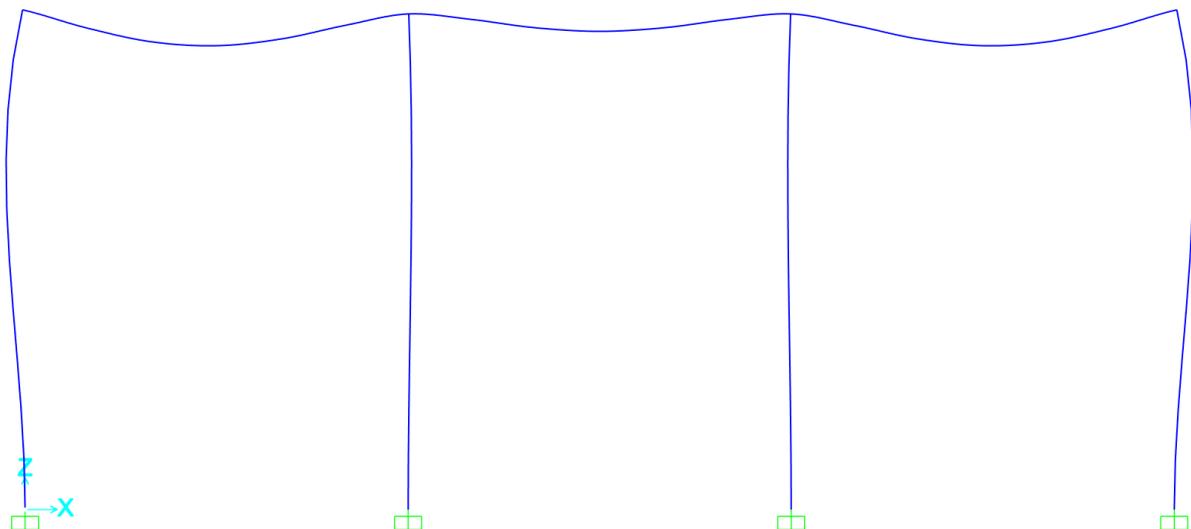
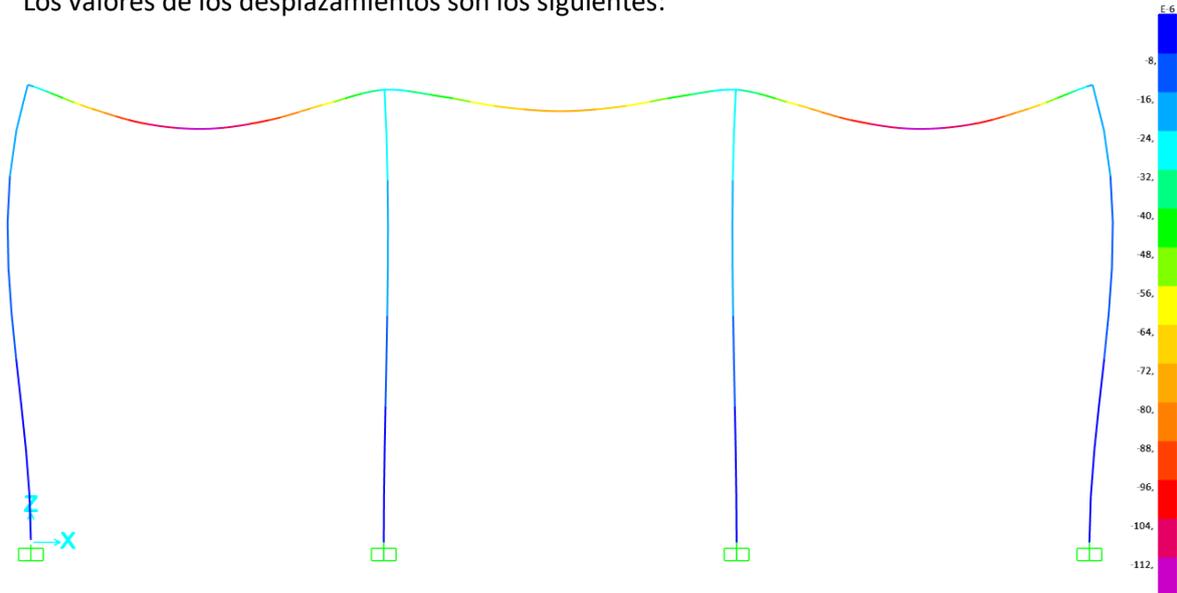


Imagen 98. Deformada debida al peso propio del pórtico de la viga carril

Los valores de los desplazamientos son los siguientes:



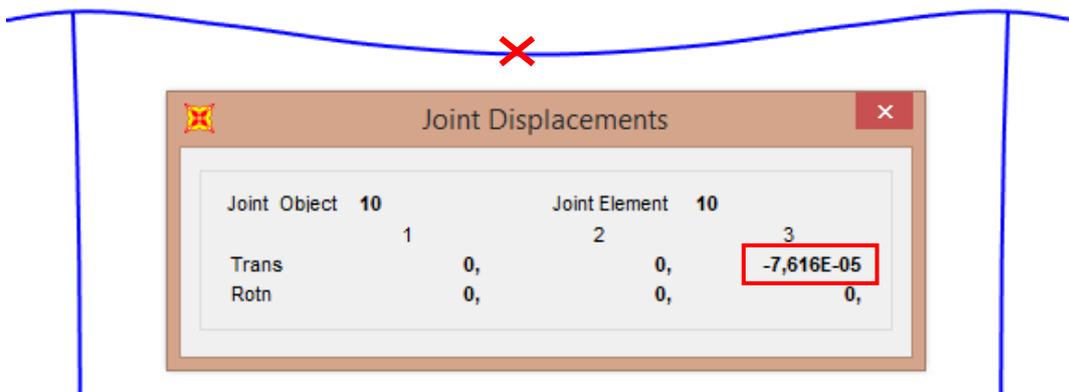
*Imagen 99. Deformada y valor de los desplazamientos debida al peso propio del pórtico de la viga carril*

Como se puede observar existe simetría en el valor de la deformada debida a su peso propio respecto del vano central de la viga carril.

Los valores de los desplazamientos en cada vano son los siguientes:

**3.1.1.1.1.** Perfil vigas IPE 400, despreciando el carril:

- Desplazamiento del punto central del vano del centro de la viga carril:



*Imagen 100. Valor máximo del vano central de la deformada debida al peso propio del pórtico de la viga carril*

- Desplazamiento del punto central del vano izquierdo de la viga carril (el del vano derecho tiene el mismo valor debido a la simetría de la estructura estudiada):

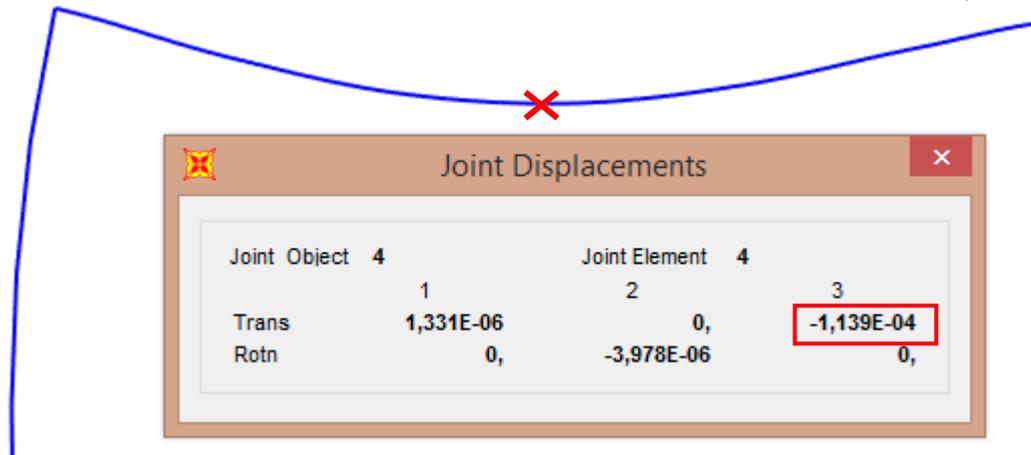


Imagen 101. Valor máximo del vano izquierdo de la deformada debida al peso propio del pórtico de la viga carril

3.1.1.1.2. Perfil vigas IPE 400+Carril , siendo las dimensiones del carril de valor 0,05x0,02 metros:

La deformada es prácticamente igual pero con desplazamientos algo menores, por lo tanto en su representación la curva de deformación es más suave en cada punto.

- Desplazamiento del punto central del vano del centro de la viga carril:



Imagen 102. Valor máximo del vano central de la deformada debida al peso propio del pórtico de la viga carril

- Desplazamiento del punto central del vano izquierdo de la viga carril (el del vano derecho tiene el mismo valor debido a la simetría de la estructura estudiada):

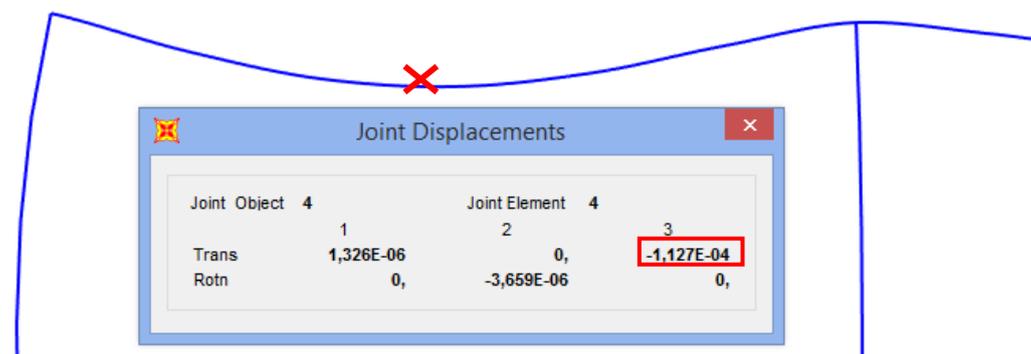


Imagen 103. Valor máximo del vano izquierdo de la deformada debida al peso propio del pórtico de la viga carril

Como se puede observar, los valores de los desplazamientos máximos de cada vano son prácticamente iguales, y para el caso de definir el perfil con el carril o sin él cumplen la relación de máximo desplazamiento.

Para poder cumplir la condición de desplazamiento máximo inicialmente se dimensionará la viga carril teniendo en cuenta el carril, debido a que este hace que se reduzcan los desplazamientos máximos de los puntos de la estructura.

**3.1.1.2.** Para la carga máxima de la estructura:

Para este caso se debe definir el tren de cargas que se desplaza sobre los tres vanos estudiados de la viga carril, explicado posteriormente.

**3.1.2.** Criterio de plastificación de Von Misses:

Al igual que para el diseño de la viga del puente grúa se deben calcular las tensiones equivalentes de Von Misses para los casos más desfavorables de aplicación de la carga, y compararla con el límite elástico del material con el que se fabriquen, en este caso acero S275, cuyo límite elástico tiene un valor de 275 MPa. En este caso, al tratarse de una estructura más compleja que la de la viga del puente grúa (que se podía simplificar el estudio a una viga biapoyada), el cálculo de los esfuerzos cortantes y momentos flectores con los que se calcularán de la misma manera que anteriormente las tensiones equivalentes de Von Misses. Solo podrán ser obtenidos mediante el software de cálculo, y no de un modo teórico como en la viga del puente grúa, debido a que en esta estructura de la viga carril, se complicarían mucho los cálculos.

**3.1.1.2 / 3.1.2.** Introducción de las cargas mediante el software "SAP2000":

Como se concluye en el "**Anexo1:** Guía para obtener líneas de influencia de una viga biapoyada mediante el software "SAP2000", no es capaz de representar las líneas de influencia para un tren de cargas, en vez de una única carga móvil puntual.

A pesar de lo anterior, sí se define un tren de cargas, entendiéndolo como un conjunto de cargas equidistantes que mantienen la distancia entre sí y que se desplazan a través de un camino definido.

Este tren de cargas está constituido por las dos fuerzas puntuales que afectan a cada viga carril, correspondiendo éstas dos fuerzas a la carga que transmite cada una de las dos ruedas del testero de la viga del puente grúa que se apoyan y se desplazan sobre cada una de las dos vigas carril.

Para implementar este tren de cargas, se debe definir una carga móvil con el comando "vehicle" y dentro de esta definir el tren de cargas como dos cargas. La primera carga que corresponde con la carga que aplica la primera rueda ("leading load") y una segunda carga, que corresponde con la segunda rueda, y que se mantiene a una distancia constante de la primera carga ("fixed length").

También se debe definir un camino con el comando "path", formado por los tres vanos de la viga apoyada sobre los cuatro pilares, la forma de implementar en el programa de cálculo el tren de cargas y el camino está detallado en el "**Anexo1:** Guía para obtener líneas de influencia de una viga biapoyada mediante el software "SAP2000".

Como se ha calculado anteriormente, cada una de estas dos cargas tendrá un valor de 120434 N y estarán separadas a una distancia constante (batalla del testero) de 2,5 metros.

Debido a que se está estudiando un tramo de la viga carril, en vez de toda ésta. El camino que se define va desde el extremo izquierdo hasta el derecho de la viga, ocupa los tres vanos en su totalidad, es decir, la rueda de la derecha del testero irá desde la posición  $x=3$  metros hasta el  $x=17,5$  metros, y la de la izquierda del testero irá desde el valor  $x=0,5$  metros hasta el  $x=15$  metros.

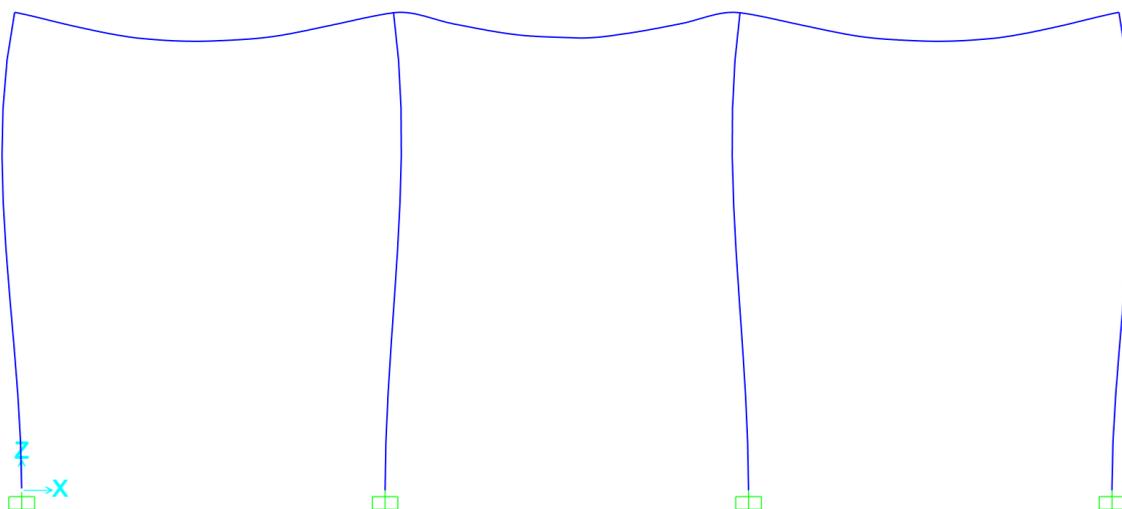
Una vez definida la geometría y dimensiones de la estructura y el tren de cargas que se aplica sobre está, se calcula el modelo. Para este tipo de estudio de cargas móviles ("moving loads"), el software de cálculo proporciona las representaciones y valores de la deformada, diagramas de esfuerzos axiales y cortantes, momentos flectores y el valor de la envolvente de estos.

Por lo tanto con la envolvente de estos valores se puede conocer los puntos más críticos en cuanto a desplazamiento máximo y plastificación de la viga carril, que corresponderán a los puntos donde los valores de la flecha y los esfuerzos y momentos sean mayores.

De esta manera se puede estudiar el fenómeno de plastificación y el desplazamiento máximo, en los puntos más críticos y por tanto más desfavorables para esta estructura.

**3.1.1.2.** Para la carga máxima de la estructura:

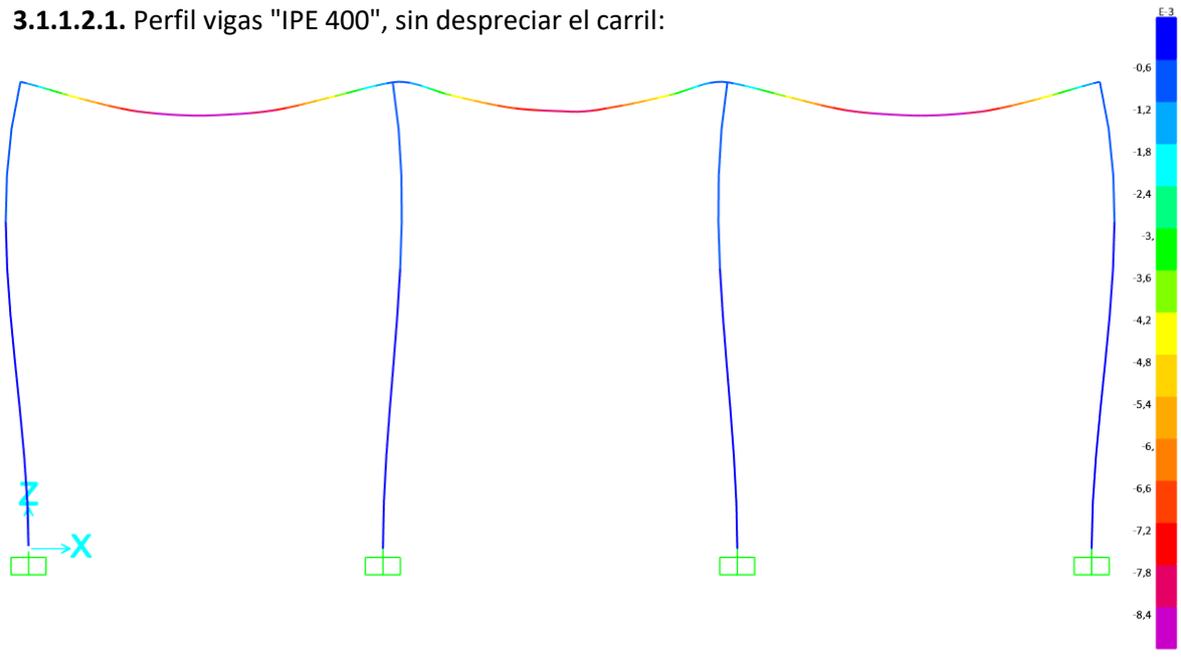
La envolvente de la deformada de la estructura es la siguiente:



**Imagen 104.** Envolvente de la deformada debida al peso propio del pórtico de la viga carril

Los desplazamientos máximos de los puntos más críticos de la estructura son:

**3.1.1.2.1.** Perfil vigas "IPE 400", sin despreciar el carril:

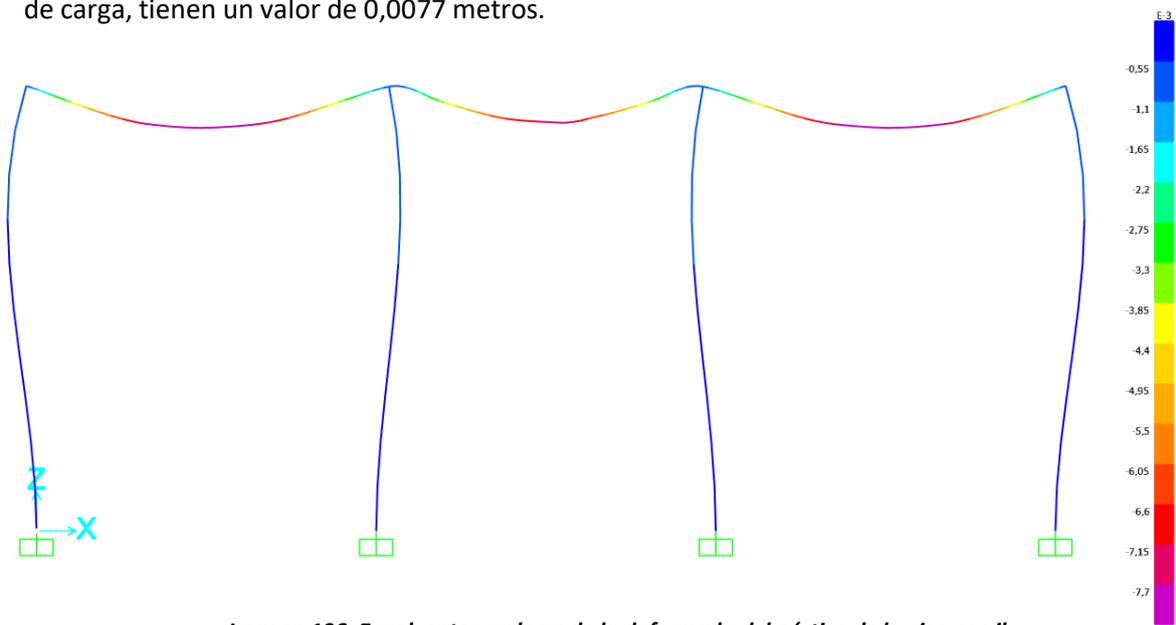


*Imagen 105. Envoltente y valores de la deformada del pórtico de la viga carril*

Con los valores de los desplazamientos máximos de cada punto se aprecia que el punto más crítico es el central del vano izquierdo o el vano derecho de la viga carril, y su valor es de 0,0084 metros.

**3.1.1.2.2.** Perfil vigas "IPE 400"+Carril , siendo las dimensiones del carril de valor 0,05x0,02 metros:

Realizando el mismo procedimiento en el programa de cálculo pero definiendo el carril en la parte superior del ala superior de la viga carril, se obtiene que el desplazamiento de los puntos centrales de los vanos izquierdo y derecho, que son los puntos de mayor flecha para este caso de carga, tienen un valor de 0,0077 metros.



*Imagen 106. Envoltente y valores de la deformada del pórtico de la viga carril*

Teniendo en cuenta que la longitud de cada vano es de 6 metros y cumpliendo la relación de máximo desplazamiento (ecuación 10), se obtiene el desplazamiento máximo de cualquier punto de la viga carril, que tendrá el siguiente valor:

$$f = \left( \frac{1}{500} \right) \cdot L = 0,002 \cdot 6 \text{ m} = 0,012 \text{ metros}$$

Por lo tanto este perfil dimensionado con el carril de acero S275 de dimensiones de 0,05x0,02 metros cumple las condiciones de diseño.

### 3.1.2. Criterio de plastificación de Von Misses:

Una vez aplicado el tren de cargas sobre la estructura se obtiene la envolvente de los valores del momento flector y el esfuerzo cortante. Se aplica de la misma manera el criterio de plastificación de Von Misses que para el caso de diseño de la viga del puente grúa (ecuaciones 3, 8 y 9).

Es decir para que la estructura no plastifique debe cumplir:

$$\sigma_{eq.VM} = \sqrt{\sigma_x^2 + 3 \cdot \tau_{xy}^2} \leq \sigma_y$$

Siendo el valor de la tensión normal:

$$\sigma_x = \frac{N}{A} + \frac{M_y}{I_z} \cdot y_{m\acute{a}x}$$

Y el valor de la tensión tangencial se puede aproximar como:

$$\tau_{xy} = \frac{V}{A_{alma}}$$

Por lo tanto, como se ha dicho anteriormente, se debe buscar dentro de los valores de la envolvente de los esfuerzos cortantes y momentos flectores los valores máximos. Para así estudiar los puntos más críticos de la viga carril cuando el puente grúa entra en carga con su carga máxima operativa.

Se divide cada vano en seis tramos de 1 metro de longitud y se analiza la tensión equivalente en cada uno de ellos, resultante de su combinación máxima de su momento flector y esfuerzo cortante.

Estos tramos de viga se numeran del 1 al 18 de izquierda a derecha, y los cuatro pilares tienen como etiqueta el 19,20,21,22.

Las envolventes de los diagramas de esfuerzos axiales, esfuerzos cortantes y momentos flectores son independientes de la sección de la viga carril, y solo dependen de la geometría y las dimensiones de la estructura además de la carga que se aplica sobre la misma.

Por lo tanto los valores de estos esfuerzos son iguales para cualquier perfil que se estudie en el diseño de la viga carril, a pesar de haber seleccionado en un principio un perfil IPE 400,

posteriormente se demostrará que este además de cumplir holgadamente la condición del desplazamiento o flecha máxima de cualquier punto de la viga, sus tramos están muy lejos de plastificar aplicando este tren de cargas.

Por lo tanto el diseño del perfil de la viga carril será un proceso iterativo en el que se variarán las dimensiones del perfil de la misma. Pero se mantendrán los valores de los esfuerzos axiales y cortantes, al igual que los momentos flectores en los tramos de las vigas y pilares de toda la estructura.

Las envolventes de los diagramas que se obtienen al desplazar el tren de carga a través de la viga son los siguientes:

- Diagrama de esfuerzo axil "N":

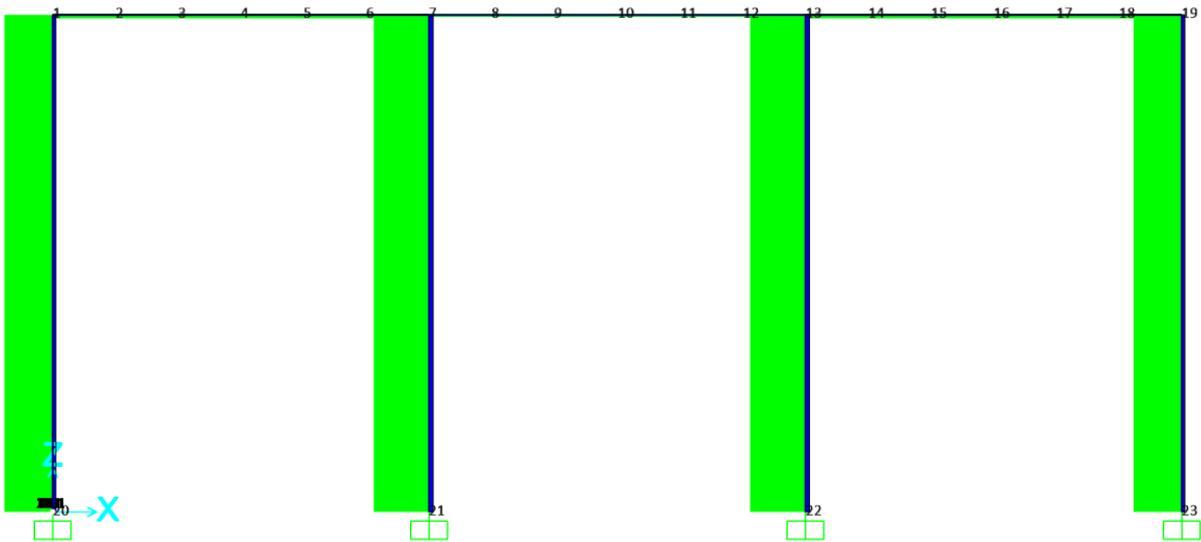


Imagen 107. Esfuerzo axil en el pórtico de la viga carril

- Diagrama de esfuerzo cortante "V":

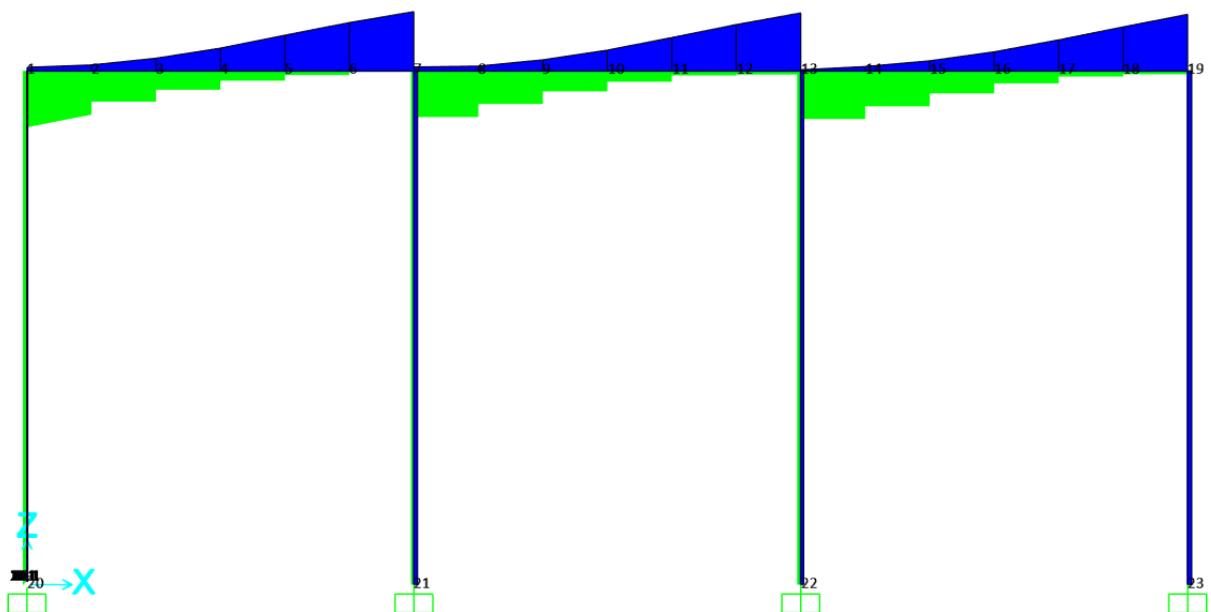
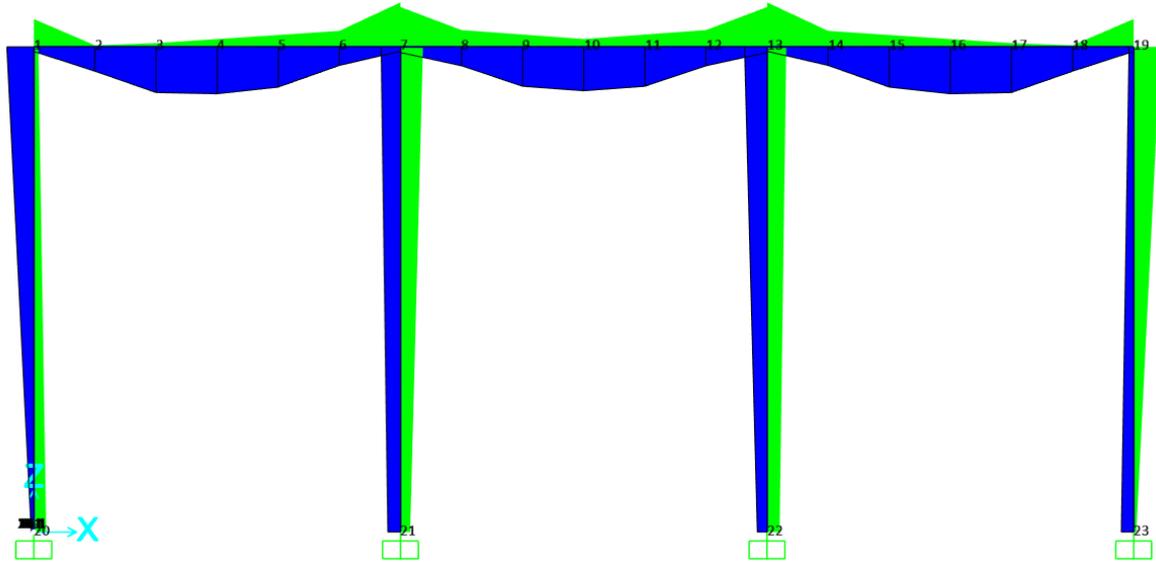


Imagen 108. Esfuerzo cortante en el pórtico de la viga carril

- Diagrama de momento flector "M":



*Imagen 109. Momento flector en el pórtico de la viga carril*

Los valores de estas envolventes para cada tramo de viga y los pilares son los siguientes:

Tramo	N (N)	V (N)	M (N·m)
1	0	19346	68443
2	0	41682	128259
3	0	74949	131687
4	0	117833	112965
5	0	159629	52281
6	0	195827	12598
7	0	15549	53316
8	0	36323	110662
9	0	68449	123282
10	0	110001	110643
11	0	153106	53328
12	0	191578	16042
13	0	14100	52272
14	0	33041	112983
15	0	62790	131745
16	0	102339	128234
17	0	145240	68452
18	0	187022	13150
<b>Pilar 19</b>	11538	2494	75109
<b>Pilar 20</b>	15574	12222	53650
<b>Pilar 21</b>	15574	10077	62784
<b>Pilar 22</b>	11542	13680	34339

*Tabla 20. Valores de los esfuerzos internos en la viga carril y en los pilares*

Una vez se conocen los valores de los esfuerzos axiales, cortantes y momentos flectores, se procede a calcular la tensión equivalente de Von Mises para cada tramo de viga de la viga carril y para cada pilar, se obtiene:

Tramo	$\sigma_{VM}$ (MPa)	Tramo	$\sigma_{VM}$ (MPa)	Pilar	$\sigma_{VM}$ (MPa)
1	52,89	10	102,73	19	58,35
2	99,73	11	92,01	20	43,08
3	107,66	12	104,15	21	49,79
4	106,64	13	40,33	22	28,42
5	94,86	14	87,43		
6	106,17	15	105,41		
7	41,25	16	111,76		
8	86,09	17	94,02		
9	100,44	18	101,47		

**Tabla 21. Valores de la tensión de VM en la viga carril y en los pilares**

Como se había dicho anteriormente el dimensionado de la viga carril y los pilares con acero S275 y un perfil IPE 400, cumpliría el fenómeno de plastificación de Von Mises, al ser cualquiera de las tensiones equivalentes de Von Mises calculadas inferiores al valor del límite elástico de este acero, que es de 275 MPa.

Por lo tanto, a la vista de los resultados obtenidos del desplazamiento o flecha máximo y las tensiones equivalentes de Von Mises de cada tramo de viga y cada pilar, se concluye que este perfil cumpliría las solicitaciones técnicas, pero estaría sobredimensionado. Es decir, se estaría diseñando la viga carril con un perfil mucho mayor del que realmente se necesita para cumplir los objetivos y solicitaciones para lo cual ha sido fabricada.

Esto incrementaría el coste de fabricación del mismo, debido a que se tendría que utilizar mayor cantidad de material.

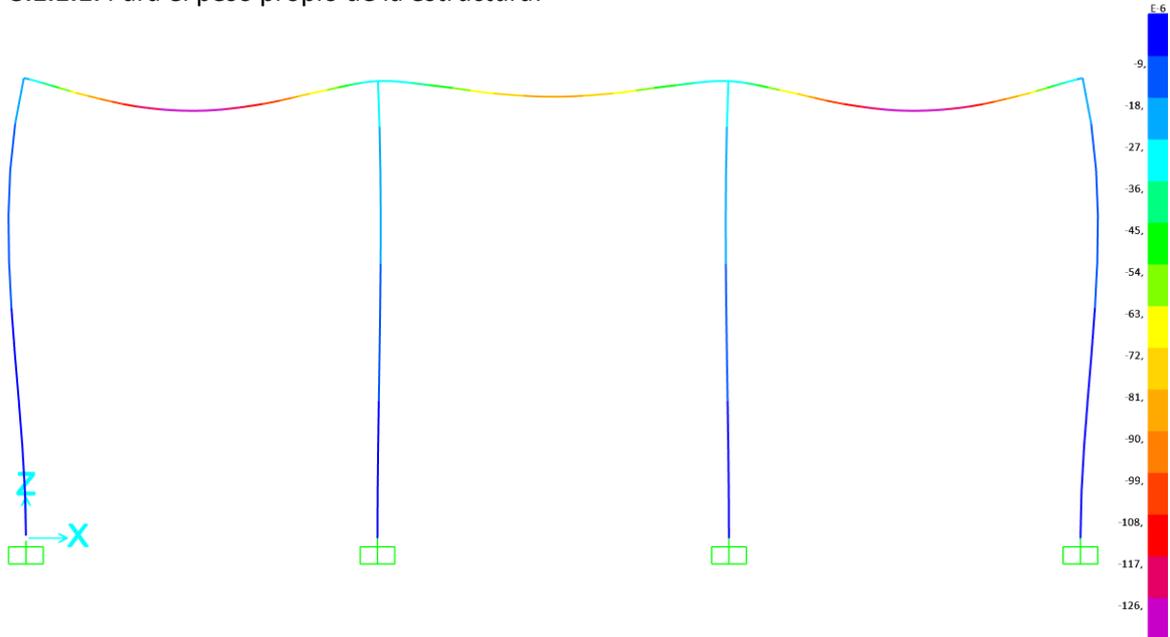
Por lo tanto realizando un proceso iterativo entre los diferentes perfiles del tipo doble "T" comerciales, y teniendo en cuenta el desplazamiento o flecha máxima y la tensión equivalente máxima que puede tener cada tramo del pórtico de la viga carril, se decide comprobar la validez del diseño con el perfil de la viga carril con un IPE 360 para el dimensionado de la viga carril.

Perfil "IPE 360":

**3.1.1. Desplazamiento (flecha) máximo:**

Se estudian los siguientes casos para el valor del desplazamiento de todos los puntos de la estructura:

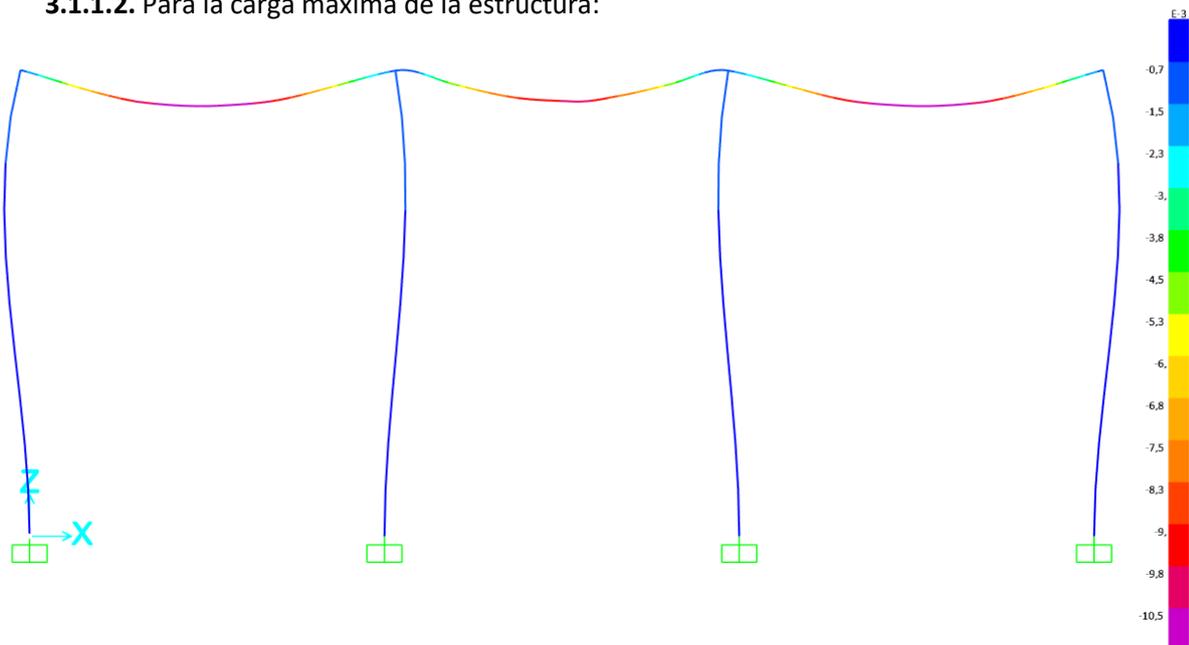
**3.1.1.1. Para el peso propio de la estructura:**



*Imagen 110. Deformada y valor de los desplazamientos del pórtico de la viga carril*

Por lo tanto el valor máximo del desplazamiento corresponde al del punto central del vano izquierdo y del derecho, que tienen un valor de 0,000126 metros.

**3.1.1.2. Para la carga máxima de la estructura:**



*Imagen 111. Deformada y valor de los desplazamientos del pórtico de la viga carril*

El valor del desplazamiento máximo corresponde al centro del vano izquierdo y el derecho y su valor es de 0,0105 metros. A pesar de que en principio cumple la condición de máximo desplazamiento, se decide aumentar el perfil, en vez de utilizar este para el dimensionado, para de esta manera posicionarse en el lado de la seguridad.

Por lo tanto el valor del desplazamiento o flecha máximo a pesar de no ser superior a 0,012 metros, impuesto anteriormente, no se selecciona este perfil debido a lo explicado anteriormente.

A pesar de que no se dimensiona el perfil de la viga carril con este IPE 360, se comprueba su plastificación.

### 3.1.2. Criterio de plastificación de Von Misses:

Como se ha dicho anteriormente los valores de los esfuerzos axiales y cortantes, al igual que los momentos flectores no dependen del perfil de la viga, por lo tanto se conservan los valores anteriores.

Lo que sí dependen del perfil de la viga es la tensión equivalente de Von Misses, debido a que esta depende de la inercia, área del alma y canto del perfil, se obtienen los siguientes resultados para cada tramo de viga y para los pilares:

Tramo	$\sigma_{VM}$ (MPa)	Tramo	VM	Pilar	$\sigma_{VM}$ (MPa)
1	63,1	10	122,73	19	69,54
2	118,98	11	110,17	20	51,32
3	128,49	12	124,81	21	59,32
4	127,41	13	48,11	22	33,86
5	113,58	14	104,31		
6	127,22	15	125,79		
7	49,22	16	133,46		
8	102,72	17	112,51		
9	119,88	18	121,59		

**Tabla 22. Valores de la tensión de VM en la viga carril y en los pilares**

Como se puede observar en la anterior tabla de resultados ninguna de las tensiones equivalentes de ninguno de los tramos de la viga ni de los cuatro pilares es mayor que el límite elástico del acero S275. Por lo tanto, la estructura no plastificaría cuando está entre en carga con su carga máxima operativa, diseñando el pórtico de la viga carril con este perfil.

A pesar de que este perfil no presenta problemas de plastificación, no se selecciona este perfil para el dimensionado. Las dimensiones del perfil seleccionado en este primer estudio para el diseño y fabricación de la viga carril y de sus pilares corresponden a un "IPE 400", de dimensiones 0,40x0,18x0,0135x0,0086 metros (canto x anchura x  $e_{\text{alas}}$  x  $e_{\text{alma}}$ ).

### 3.1.3. Fenómeno de pandeo lateral y abolladura:

Para evitar el fenómeno de pandeo lateral (vuelco de la estructura) y abolladura, se suelen adecuadamente en las uniones entre vigas carril y pilares unos rigidizadores que permiten evitar estos fenómenos y de esta manera no se producen fallos en la estructura cuando ésta

entre en carga con su carga máxima operativa y en ninguna de sus situaciones críticas de posición de carga.

Para analizar el fenómeno de pandeo global con deformaciones de flexión se debe ir posicionando a lo largo del eje "x" de la viga carril el tren de cargas formado por dos cargas puntuales, separadas a una distancia fija, que corresponden con las dos ruedas del testero y la distancia con la batalla de este, que tiene un valor de 2,5 metros.

Se debe asegurar que en el perfil inicialmente seleccionado para dimensionar la viga carril y los pilares no se produce pandeo global en la estructura. Es decir, el factor de carga en todos sus modos de vibración y diferentes posiciones del tren de cargas sobre la viga carril es siempre mayor que la unidad.

Antes de realizar este estudio se concluía que el perfil seleccionado para dimensionar la viga carril y los pilares era un "IPE 400", se analizarán las diferentes posiciones del tren de cargas a lo largo de esta viga carril y se comprobarán los factores de pandeo con la unidad.

El tren de cargas se estudiará en su posición más crítica, es decir, cuando el carro polipasto se encuentra en su posición extremo sobre la viga del puente grúa. De esta manera, sobre la viga carril se aplicaría la mayor carga, y se está contemplando por ello la situación más crítica cuando el puente grúa entra en carga con su carga máxima operativa.

**3.1.3.1. Dimensionar viga carril y pilares con un perfil "IPE 400":**

Se trata del diseño anteriormente seleccionado, ya que cumplía el criterio de plastificación de Von Mises y su desplazamiento o flecha máxima cumplía también la máxima relación de desplazamiento según la longitud de cada vano.

Se analizan las diferentes posiciones del tren de cargas a lo largo de la viga carril, se obtienen los siguientes resultados:

Centro del testero (m)	$x_1$ (m)	$x_2$ (m)	Factores de carga de pandeo					
			1	2	3	4	5	6
1,75	0,5	3	0,74532	4,36969	8,42054	16,67554	42,99456	-71,24392
3,25	2	4,5	0,93051	2,98132	9,80199	12,52089	38,24494	-42,49554
4,75	3,5	6	1,122	4,28156	6,95149	31,20492	-80,43032	97,18897
6,25	5	7,5	1,16154	6,55612	14,56795	40,78006	64,38162	-68,02594
7,75	6,5	9	1,22415	7,1502	8,46673	-17,99063	18,83192	-23,49477
9,25	8	10,5	1,26151	6,0897	9,99631	11,89896	15,23632	-16,47752
10,75	9,5	12	1,19853	6,98994	10,12702	25,64802	-27,22136	-29,89778
12,25	11	13,5	1,14874	6,51048	9,08484	59,49681	80,56238	100,20498
13,75	12,5	15	1,09496	3,44161	7,43304	22,53857	-51,054945	71,13083
15,25	14	16,5	0,89021	3,1442	10,76555	11,36574	39,43499	-49,02715
16,75	15	17,5	0,74532	4,36969	8,42054	16,67554	42,99456	-71,24392

**Tabla 23. Valores del factor de pandeo de la viga carril**

Como se puede observar en las posiciones más cercanas a ambos extremos de la viga carril estudiada, los factores de carga en el modo 1 de vibración de la estructura, son inferiores a la unidad, es decir, se producirá el fenómeno de pandeo global, por lo tanto, el diseño inicialmente seleccionado no es correcto.

**3.1.3.2. Dimensionar viga carril con un perfil "IPE 400" y los pilares con un perfil "HEB200":**

Debido a que el factor de carga para el caso anterior era inferior a la unidad en determinadas posiciones del tren de cargas sobre la viga carril, se debe aumentar la inercia del perfil para evitar el pandeo. Por este motivo, se cambia el diseño de los pilares a un perfil "HEB 200", pero se mantiene el perfil seleccionado para la viga carril.

Se obtienen los siguientes resultados:

Centro testero (m)	x1 (m)	x2 (m)	Factores de carga de pandeo					
			1	2	3	4	5	6
1,75	0,5	3	1,14041	5,35789	9,14465	15,67535	25,12667	28,13365
3,25	2	4,5	1,47807	3,91719	9,06886	15,288347	24,50474	27,86093
4,75	3,5	6	1,5837	6,14722	7,37236	19,19867	27,05549	31,90584
6,25	5	7,5	1,59498	6,7713	14,48176	23,95957	26,84147	31,00879
7,75	6,5	9	1,67508	7,53208	10,36444	19,60685	21,18109	22,18925
9,25	8	10,5	1,7254	7,20635	10,58401	12,89833	17,54495	18,52109
10,75	9,5	12	1,64089	7,22617	12,68674	20,42207	26,83544	27,10958
12,25	11	13,5	1,58507	6,70011	15,12886	18,44452	26,81777	30,68041
13,75	12,5	15	1,57926	4,8959	7,56936	20,31071	25,27173	27,30862
15,25	14	16,5	1,37273	4,00938	10,40277	12,56143	28,06626	28,14398
16,75	15	17,5	1,14041	5,35789	9,14465	15,67535	25,12667	28,13365

**Tabla 24. Valores del factor de pandeo de la viga carril**

Como se puede observar todos los factores de carga para todos los modos de vibración de la estructura y para todas las posiciones del testero a lo largo del eje longitudinal de la viga carril son siempre mayores que la unidad, por lo tanto no se produce el fenómeno de pandeo global en la estructura.

Por lo tanto el dimensionado tras este estudio para la viga carril es el siguiente:

- Viga carril --> Perfil doble "T" tipo "IPE 400" (S275).
- Carril --> Perfil rectangular 0,05x0,02 metros (S275).
- Pilares --> Perfil "H" tipo "HEB200" (S275).

Para asegurar que los perfiles seleccionados son correctos, se comprueba el criterio de plastificación de Von Misses en el perfil del pilar (que es en el que se ha modificado el perfil tras este último estudio). Se procede con el mismo método que anteriormente, además las tensiones se mantienen debido a que no dependen de la sección del perfil, como se ha explicado anteriormente, finalmente se obtiene.

Pilar	$\sigma_{VM}$ (MPa)
19	133,45
20	97,26
21	112,89
22	63,74

**Tabla 25. Valores de la tensión de VM en los pilares**

Las tensiones equivalentes de Von Misses para el perfil de los pilares seleccionado y para el tren de cargas de la situación más crítica son inferiores al límite elástico del acero S275 ( de valor 275 MPa) con el que se fabrican, por lo tanto no se producirá plastificación en los pilares cuando el puente grúa entre en carga con su carga máxima operativa, que se trata de la situación de carga más crítica.

El principal problema de este tipo de diseño es que las uniones de dos perfiles diferentes, como es el caso seleccionado, generan mayor torsión para la misma fuerza aplicada, luego no se recomienda. Es decir, se diseñará la viga con el mismo perfil que los pilares, en principio para que cumpla todos los requisitos previamente especificados, se selecciona inicialmente un perfil "HEB 200" de acero S275.

**3.1.4.** Estudio de la respuesta tensional de la viga carril debido a la aceleración del carro de polipasto y a la aceleración de la viga del grúa puente sobre la viga carril de la estructura:

El perfil seleccionado hasta el momento para los anteriores casos de estudio es correcto, pero si se quiere tener en cuenta cómo reacciona la estructura ante los cambios de velocidades del carro de polipasto al transportar la carga a través de la viga del puente grúa y al variar la velocidad de movimiento de la viga del puente grúa sobre el pórtico de la viga carril, se deben introducir las cargas que generan estas aceleraciones consecuencia de los cambios de velocidades en la estructura.

Se supone una aceleración para este caso de estudio de  $1 \text{ m/s}^2$ , esta es debido a la diferencia de velocidades del carro, es decir, cuando acelera, pasa de estar parado a estar en movimiento con su velocidad normal de trabajo, o cuando éste se frena, pasa de esta velocidad de trabajo a estar detenido en una determinada posición.

Esta aceleración lleva asociada una fuerza que actúa sobre la estructura. Además sobre esta también se aplica la fuerza generada por la carga máxima operativa y el peso de la viga del puente grúa que se aplican sobre las ruedas de los testeros sobre la viga carril en el eje vertical ("z").

Las fuerzas verticales de las ruedas de los testeros tienen el mismo valor que antes, es decir 120434 N. De esta manera se vuelve a estudiar el caso más crítico, cuando el carro de polipasto transportando su carga máxima operativa se encuentre posicionado en uno de los extremos de la viga del puente grúa.

La fuerza generada debido a la aceleración en el eje "x" producida por la aceleración de la viga del puente grúa al desplazarse a lo largo de la viga carril, es la siguiente:

$$F = m \cdot \vec{a} = 25000kg \cdot \frac{1m}{s^2} = 25000 N \quad \text{Ec. 34}$$

Se selecciona como masa que aplica esta fuerza debida a la aceleración, 25 toneladas, que corresponden a las 20 toneladas de la carga máxima operativa, 1 toneladas del peso del carro, cables y motores, y 4 toneladas que corresponden con la mitad del peso de la viga del puente grúa.

La fuerza generada debido a la aceleración en el eje "y" producida por la aceleración del carro de polipasto sobre la viga del puente grúa, es la siguiente (aplicando la ecuación 34):

$$F = m \cdot \vec{a} = 10500kg \cdot \frac{1m}{s^2} = 10500N$$

Se selecciona como masa que aplica esta fuerza debida a la aceleración, 10,5 toneladas, que corresponden a las 10 toneladas de la carga máxima operativa, 0,5 toneladas del peso del carro, cables y motores. Estas dos se dividen entre los dos pórticos de las dos vigas carril de todo el puente grúa, es decir, se divide la carga entre dos, al estar estudiando un único pórtico de la viga carril.

Esta fuerza debida a la aceleración producida al variar la velocidad del puente grúa se aplica en los ejes "x" y "y", es decir el eje longitudinal de la viga carril, y el eje longitudinal de la viga del puente grúa respectivamente.

En este estudio se deberá conocer el punto más crítico en el que se puede posicionar el testero sobre la viga carril para que los momentos flectores y los esfuerzos axiales y cortantes sean máximos para poder así dimensionar el perfil para la situación más adversa.

Por lo tanto para este nuevo caso de estudio, se aplican en cada una de las dos ruedas del testero fuerzas de valor:

- eje "x"--> 12500 N
- eje "y"--> 5250 N
- eje "z"--> 120434 N

Nuevamente este estudio está compuesto por las siguientes comprobaciones:

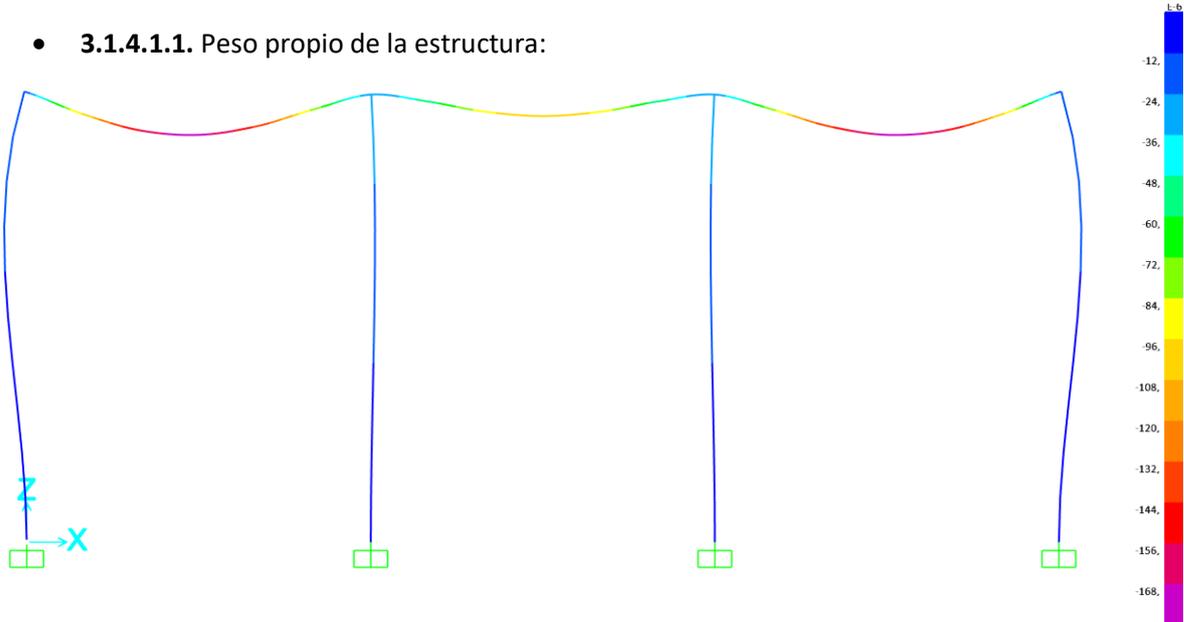
- **3.1.4.1.** Desplazamiento (flecha) máximo.
- **3.1.4.2.** Criterio de plastificación de Von Misses.
- **3.1.4.3.** Fenómeno de pandeo lateral y abolladura.

Es decir, se debe comprobar que para cualquier posición del testero sobre la viga carril los desplazamiento de cualquier punto de la estructura cumplen la relación de máximos desplazamientos permitida para la estructura, que no plastifica según el criterio de Von Misses y que el factor de carga para el fenómeno de pandeo global (con deformaciones de flexión) es mayor que uno, para así evitar que se produzca este fenómeno en la estructura.

Si se comprueba el perfil seleccionado en el estudio del fenómeno de pandeo, es decir el "HEB 200", los factores de carga al introducir estas nuevas fuerzas generadas por las aceleraciones del puente grúa, son menores que la unidad. Es decir, se produciría el fenómeno de pandeo, para evitar esto se dimensiona el perfil de las vigas carril y los pilares, con un perfil "HEB 300" de acero S275 y se realizan todas las comprobaciones anteriores para asegurar que el perfil seleccionado es correcto.

**3.1.4.1. Desplazamiento (flecha) máximo:**

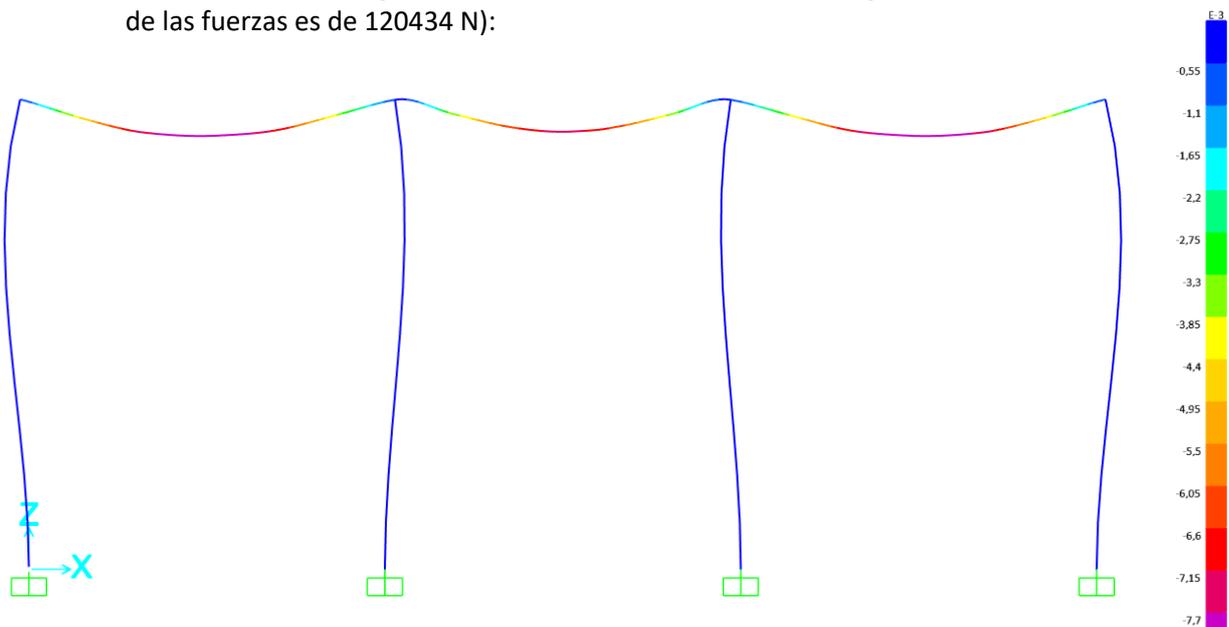
- **3.1.4.1.1. Peso propio de la estructura:**



*Imagen 112. Deformada y valor de los desplazamientos del pórtico de la viga carril*

Como se puede observar el máximo desplazamiento es de 0,000168 metros, que cumple la condición de máximo desplazamiento.

- **3.1.4.1.2. Para la carga máxima de la estructura (Tren de cargas: el valor de cada una de las fuerzas es de 120434 N):**



*Imagen 113. Deformada y valor de los desplazamientos del pórtico de la viga carril*

Como se puede observar el máximo valor del desplazamiento es de 0,0077 metros, que cumple la condición de flecha máxima.

- **3.1.4.1.3.** Aplicación del tren de cargas anterior + Fuerzas generadas por la aceleración del puente grúa:

Para los siguientes casos de posición del centro del testero sobre la viga carril:

- Coincidente con el centro del vano izquierdo de la viga carril.
- Coincidente con el centro del vano central de la viga carril.
- Coincidente con el primer pilar.
- Coincidente con el lateral izquierdo del vano izquierdo de la viga carril.
- Coincidente con el lateral derecho del vano izquierdo de la viga carril.

No se estudia el caso del vano derecho debido a que los resultados obtenidos serán iguales que para el caso del vano izquierdo, debido a la simetría de la estructura que se está estudiando.

	u1 (m)	u2 (m)	u3 (m)	r1 (°)	r2 (°)	r3 (°)
<b>Vano izquierdo</b>	0,0084	0,0483	0,0083	0,00068	0,00085	0,00275
<b>Vano central</b>	0,0068	0,0408	0,0074	0,00246	0,0001	0
<b>Primer pilar</b>	0,007	0,0399	0,0006	0,0074	0,0002	0,00044
<b>Lateral izq vano izq</b>	0,0084	0,054	0,0071	0,00186	0,00073	0,00471
<b>Lateral drcho vano izq</b>	0,007	0,0435	0,0048	0,00159	0,00233	0,00157
<b>Posición: <math>x_1=1,5m/x_2=4m</math></b>	0,0081	0,0524	0,0075	0,00067	0,00201	0,00248

*Tabla 26. Valores de los desplazamientos y giros en la viga carril*

Todos los desplazamiento comprobados para las diferentes posiciones del testero sobre la viga carril son admisibles, excepto el desplazamiento máximo en ele "y" del pórtico de la viga carril:

- En el eje "x" el máximo desplazamiento es de 0,0084 metros, que se trata de un desplazamiento pequeño para las dimensiones del puente grúa sobre este eje.
- En el eje "z" el máximo desplazamiento es de 0,0083 metros, que cumple la condición anteriormente definida, por la cual se atribuía como máximo desplazamiento sobre este eje en la viga carril un valor de 0,012 metros.
- En el eje "y" el máximo desplazamiento es de 0,054 metros, este desplazamiento tiene como relación con la longitud:  $L/u_2=1/148$ , se trata de un valor demasiado elevado para las dimensiones del puente grúa en este eje, se deben modificar los parámetros hasta que la relación " $L/u_2$ " sea menor o igual a 1/500.

Los desplazamientos en el eje "z" cumplen la condición de flecha máxima anteriormente detallada en el eje "x", además de que no son muy elevados, se podrían incluir en la estructura del pórtico de la viga carril cruces de San Andrés que permitirían mantener la estructura más rigidizada y reducir los desplazamientos en el eje "x".

Los desplazamientos más problemáticos se producen en el eje "y", esto es debido principalmente a que al contrario que la carga en el eje "x", no carga de igual manera a todos

los pilares, cargando más a los pilares más cercanos al tren de cargas, esto es debido a que estas cargas se transmiten por flexión en la viga carril.

**3.1.4.2. Criterio de plastificación de Von Misses:**

- **3.1.4.2.1. Tren de cargas:**

Teniendo en cuenta los valores del momento flector y esfuerzos axiles y cortantes anteriormente obtenidos para el tren de cargas formado por dos cargas puntuales de valor cada una de ellas de 120434 N, se obtienen los siguientes resultados de las tensiones equivalentes de Von Misses para el perfil "HEB 300":

Tramo	$\sigma_{VM}$ (MPa)	Tramo	$\sigma_{VM}$ (MPa)	Pilar	$\sigma_{VM}$ (MPa)
1	42,41	10	93,37	19	45,56
2	80,42	11	97,35	20	33,82
3	90,47	12	115,53	21	38,94
4	97,71	13	32,28	22	22,77
5	100,87	14	70,19		
6	117,93	15	87,11		
7	33,12	16	98,09		
8	69,47	17	96,35		
9	84,2	18	112,67		

*Tabla 27. Valores de la tensión de VM en la viga carril*

Como se puede observar ninguna de estas tensiones es mayor que los 275 MPa que tiene como límite elástico el acero S275 con el que se fabricarán la viga carril y los pilares, por lo tanto se puede concluir que para este estudio de carga, la viga carril y los pilares no plastifican.

- **3.1.4.2.2. Tren de cargas + Fuerzas debidas a la aceleración del puente grúa:**

Se realiza el estudio para los mismos casos de posición del centro del testero sobre la viga carril.

Los valores de los momentos flectores y esfuerzos axiles y cortantes debido al tren de cargas de las fuerzas en el eje "z" y a las fuerzas de las aceleraciones en el "x" y en el eje "y" son los siguientes:

Debido a que en este el tren de cargas tiene cargas en los tres ejes, aparecen esfuerzos cortantes y momentos flectores en diferentes planos.

- Esfuerzos cortantes en el plano "2-2" y momentos flectores en el eje "3" de la estructura:

1. En los pilares:

Posición centro del testero (m)	N (N)	V (N)	M (N·m)
Vano izquierdo	89604	19264	143204
Vano central	79964	17005	135010
Primer pilar	31128	7456	218913
Lateral izq vano izq	73697	6072	161128
Lateral drcho vano izq	79095	17023	192441
Posición: $x_1=1,5m/x_2=4m$	88273	19064	131819

*Tabla 28. Valores de los esfuerzos internos en la viga carril*

2. En la viga carril:

Posición centro del testero (m)	N (N)	V (N)	M (N·m)
Vano izquierdo	123827	13477	20691
Vano central	100663	3200	7700
Primer pilar	111712	114726	9271
Lateral izq vano izq	133562	79739	31072
Lateral drcho vano izq	124454	184669	29495
Posición: $x_1=1,5m/x_2=4m$	117504	123069	33340

*Tabla 29. Valores de los esfuerzos internos en la viga carril*

Para estos esfuerzos se obtienen en función de las dimensiones y la inercia del perfil "HEB 300", las siguientes tensiones equivalentes de Von Misses:

1. En los pilares:

Posición centro del testero (m)	$\sigma_{VM}$ (MPa)
Vano izquierdo	64,07
Vano central	57,63
Primer pilar	33,54
Lateral izq vano izq	54,86
Lateral drcho vano izq	60,92
Posición: $x_1=1,5m/x_2=4m$	62,51

*Tabla 30. Valores de los esfuerzos internos en la viga carril*

2. En la viga carril:

Posición centro del testero (m)	$\sigma_{VM}$ (MPa)
Vano izquierdo	75,62
Vano central	60,54
Primer pilar	96,28
Lateral izq vano izq	94,7
Lateral drcho vano izq	134,59
Posición: $x_1=1,5m/x_2=4m$	103,41

*Tabla 31. Valores de los esfuerzos internos en la viga carril*

- Esfuerzos cortantes en el plano "3-3" y momentos flectores en el eje "2" de la estructura:

1. En los pilares:

Posición centro del testero (m)	N (N)	V (N)	M (N·m)
Vano izquierdo	0	5580	44623
Vano central	0	3768	29826
Primer pilar	0	4335	33983
Lateral izq vano izq	0	6693	53301
Lateral drcho vano izq	0	4526	36414
Posición: $x_1=1,5m/x_2=4m$	0	5799	46327

*Tabla 32. Valores de los esfuerzos internos en la viga carril*

2. En la viga carril:

Posición centro del testero (m)	N (N)	V (N)	M (N·m)
Vano izquierdo	0	330	10042
Vano central	0	0	17953
Primer pilar	0	2303	13856
Lateral izq vano izq	0	1443	7033
Lateral drcho vano izq	0	4526	13569
Posición: $x_1=1,5m/x_2=4m$	0	549	9010

*Tabla 33. Valores de los esfuerzos internos en la viga carril*

Para estos esfuerzos se obtienen en función de las dimensiones y la inercia del perfil "HEB 300" las siguientes tensiones equivalentes de Von Misses:

1. En los pilares:

Posición centro del testero (m)	$\sigma_{VM}$ (MPa)
Vano izquierdo	26,8
Vano central	17,92
Primer pilar	20,42
Lateral izq vano izq	32,02
Lateral drcho vano izq	21,87
Posición: $x_1=1,5m/x_2=4m$	27,83

*Tabla 34. Valores de la tensión de VM en la viga carril*

2. En la viga carril:

Posición centro del testero (m)	$\sigma_{VM}$ (MPa)
Vano izquierdo	5,99
Vano central	10,7
Primer pilar	8,37
Lateral izq vano izq	4,28
Lateral drcho vano izq	8,53
Posición: $x_1=1,5m/x_2=4m$	5,38

*Tabla 35. Valores de la tensión de VM en la viga carril*

Como se puede observar ninguna de estas tensiones es mayor que los 275 MPa que tiene como límite elástico en acero S275 con el que se fabrica la viga carril y los pilares. Por lo tanto, se puede concluir que para este estudio de carga, en el que además del la carga en el eje vertical del tren de cargas actúa la fuerza que se genera en los otros dos ejes debido a la aceleración del puente grúa, la viga carril y los pilares no plastifican.

### 3.1.4.3. Fenómeno de pandeo lateral y abolladura:

Se estudia este fenómeno para el tren de cargas (aplicado en el eje "z") y las fuerzas debidas a la aceleración del puente grúa (aplicadas en el eje "x" y en el eje "y").

Para los siguientes casos de posición del centro del testero sobre la viga carril:

Posición centro del testero (m)	Factor de carga
Vano izquierdo	5,98171
Vano central	8,03553
Primer pilar	7,2262
Lateral izq vano izq	4,72052
Lateral drcho vano izq	6,97793
Posición: $x_1=1,5m/x_2=4m$	5,70602

*Tabla 36. Valores del factor de carga en la viga carril*

En la anterior tabla se puede observar que para este caso de estudio de carga todos los factores de carga para el primer modo de vibración de pandeo de la estructura son mayores que uno. Por lo tanto, no se produce el fenómeno de pandeo en la estructura cuando ésta entra en carga con su carga máxima operativa y una aceleración de  $1 \text{ m/s}^2$ , ni si quiera en la posición más crítica del carro en la viga del puente grúa.

**3.1.5.** Estudio de la respuesta tensional de la viga carril debido a la modificación de la aceleración en el eje "y" del pórtico de la viga carril:

Como se ha comprobado anteriormente el desplazamiento máximo en el eje "y" de un punto de la estructura del pórtico de la viga carril supera la relación impuesta como máxima para el valor de este desplazamiento.

Por lo tanto, para poder cumplir la relación se debe reducir el valor del desplazamiento sobre este eje, se tienen dos posibles opciones para conseguirlo:

- Reducir la fuerza aplicada en el eje "y" sobre la viga carril.
- Aumentar el perfil de la viga carril para reducir el valor del desplazamiento.

Ante estas dos posibles opciones, se selecciona la primera, debido a que la segunda llevaría asociado consigo un aumento de la sección del perfil y por tanto un aumento en el coste de fabricación del puente grúa.

Al seleccionar la primera opción, al no poder limitar la carga del puente grúa debido a que es una de sus condiciones iniciales de diseño, para reducir la fuerza sobre el eje "y" en la viga carril solo se puede reducir el valor de la aceleración en este eje.

El valor de la aceleración en este eje para la viga carril está relacionada con la diferencia entre la velocidad máxima y mínima (de detención) del carro de polipasto al desplazarse a través de la viga del puente grúa.

Anteriormente se había definido como aceleración del carro de polipasto,  $1 \text{ m/s}^2$ , ahora se reduce esta hasta un valor de  $0,3 \text{ m/s}^2$  para que la fuerza aplicada sobre este eje tenga el siguiente valor (aplicando la ecuación 34):

$$F = m \cdot \vec{a} = 10500 \text{ kg} \cdot \frac{0,3 \text{ m}}{\text{s}^2} = 3150 \text{ N}$$

Al estar aplicada esta carga sobre las dos ruedas del testero, en cada rueda de este se aplicará una fuerza en el eje "y" de valor 1575 N.

Por lo tanto, para este nuevo caso de estudio se aplica en cada una de las dos ruedas del testero fuerzas de valor:

- eje "x" --> 12500 N
- eje "y" --> 1575 N
- eje "z" --> 120434 N

Se está manteniendo el valor de la carga en todos los ejes menos en el eje "y", por lo tanto, si anteriormente cumplían las condiciones máximas de desplazamientos en el eje "x" y en el eje "z", ahora también lo cumplirán. Se procede a estudiar únicamente la posición del testero que anteriormente tenía el máximo valor de desplazamiento en el eje "y" y que no cumplía la condición de máxima flecha en este eje.

El punto de la posición más crítica del centro del testero sobre la viga carril se encontraba cuando este se situaba en el lateral izquierdo del vano izquierdo del pórtico de la viga carril.

Se procede a analizar la tensión equivalente de Von Mises, factor de carga y máximo desplazamiento para este caso de posición del testero, con la misma metodología aplicada anteriormente, se obtienen los siguientes valores:

- Esfuerzos cortantes en el plano "2-2" y momentos flectores en el eje "3" de la estructura:

Valores de los esfuerzos axiales y cortantes y del momento flector:

1- Pilar:

<b>N (N)</b>	<b>V (N)</b>	<b>M (N·m)</b>
73697	16350	161128

**Tabla 37. Valores de los esfuerzos internos en el pilar**

2- Viga carril:

<b>N (N)</b>	<b>V (N)</b>	<b>M (N·m)</b>
133562	161128	31072

**Tabla 38. Valores de los esfuerzos internos en la viga carril**

Factor de carga: 4,72052, es mayor que la unidad, así que no se produce el fenómeno de pandeo global con deflexiones.

Tensión equivalente de Von Misses:

1- Pilar: 55,61 MPa.

2- Viga carril: 126,68 MPa.

- Esfuerzos cortantes en el plano "3-3" y momentos flectores en el eje "2" de la estructura:

Valores de los esfuerzos axiales y cortantes y del momento flector:

1. Pilar:

	<b>N (N)</b>	<b>V (N)</b>	<b>M (N·m)</b>
<b>Lateral izq vano izq menos</b>	0	2007	15990

*Tabla 39. Valores de los esfuerzos internos en el pilar*

2. Viga carril:

	<b>N (N)</b>	<b>V (N)</b>	<b>M (N·m)</b>
<b>Lateral izq vano izq menos</b>	0	432	1893

*Tabla 40. Valores de los esfuerzos internos en la viga carril*

Tensión equivalente de Von Misses:

1. Pilar: 9,61 MPa.

2. Viga carril: 1,16 MPa.

Como se puede observar ambas son menores que los 275 MPa de valor del límite elástico del acero S275, por lo tanto, no se produce plastificación de la estructura.

Desplazamientos y giros:

<b>u1 (m)</b>	<b>u2 (m)</b>	<b>u3 (m)</b>	<b>r1 (°)</b>	<b>r2 (°)</b>	<b>r3 (°)</b>
0,0084	0,0162	0,0071	0,00056	0,00073	0,00141

*Tabla 41. Valores de los desplazamientos y giros en la viga carril*

Como se puede observar todos los valores de los desplazamientos cumplen las condiciones de máximas fechas en cada eje:

- En el eje "x", el máximo desplazamiento es de 0,0084 metros, nuevamente se trata de un desplazamiento pequeño para las dimensiones del puente grúa sobre este eje.

- En el eje "z" el máximo desplazamiento es de 0,0071 metros que cumple la condición anteriormente definida, por la cual se atribuía como máximo desplazamiento sobre este eje en la viga carril un valor de 0,012 metros.
- En el eje "y" el máximo desplazamiento es de 0,0162 metros, ahora este valor si cumple la relación  $L/u_2 < 1/500$ , ya que el valor de  $L/u_2$  con esta aceleración es de  $2,02 \cdot 10^{-3} > 2 \cdot 10^{-3}$ , que es la relación  $1/500$ .

Una vez seleccionado el perfil "HEB 300" para el diseño tanto de la viga carril como de los pilares y conocidas las fuerzas en los tres ejes de cada una de las dos ruedas del testero, se debe asegurar, además de que se cumple el criterio de plastificación de Von Mises en el plano de trabajo "XZ" como se ha calculado anteriormente, que lo cumple teniendo en cuenta todos los esfuerzos en los diferentes planos generados por las cargas en los tres ejes.

Es decir, debido a las cargas en los tres ejes se generan esfuerzos en los diferentes planos de la estructura. Por lo tanto, se deben de tener en cuenta para realizar el criterio de plastificación de Von Mises todos los esfuerzos además de la torsión generada debida a la carga en el eje "y".

Para comprobar esto, se debe acceder al módulo del software de cálculo de visualización de resultados en este caso "Stress" (tensiones) y representar la "SVM" ( tensión equivalente de Von Mises máxima) para todos los tramos de la viga carril y los pilares).

De nuevo, en este estudio no se puede generar un tren de cargas móviles con las cargas en los tres ejes. Por lo tanto, se comprobarán las anteriores posiciones del testero sobre la viga carril, se obtienen los siguientes resultados:

Posición del centro del testero (m)		$\sigma_{VM}$ (MPa)
Centro vano izq	Viga carril	100,35
	Pilar	63,13
Centro vano central	Viga carril	89,12
	Pilar	57,79
Centro primer pilar	Viga carril	80,81
	Pilar	51,1
Posición: $x_1=1,5m/x_2=4m$	Viga carril	95,54
	Pilar	63,62
Lateral izq vano izq	Viga carril	86,46
	Pilar	55,21
Lateral drcho vano izq	Viga carril	111,42
	Pilar	64,51

Tabla 42. Valores de la tensión de VM en la viga carril

Como se puede observar la tensión equivalente máxima de Von Mises para cualquier posición del testero sobre la viga carril y para todos los tramos de la viga carril y todos los pilares, es siempre menor de 275 MPa, que corresponde con el valor del límite elástico del acero S275 con el que se fabrica esta estructura del puente grúa,.

Por lo tanto, la estructura del pórtico de la viga carril cumple el criterio de plastificación de Von Mises para la carga máxima operativa del puente grúa. Debido a esto, el dimensionado final de los perfiles de los pilares y la viga carril de esta estructura es correcto ya que permite cumplir las solicitaciones técnicas de la misma.

#### 3.1.6. Estudio del pórtico de la viga carril como un soporte y un emparrillado:

Hasta ahora se ha hablado de pórtico para referirse a la estructura que sustenta la viga carril del puente grúa, se define:

- Pórtico: aquella estructura que únicamente se encuentra cargada en su plano, y cuando éste se encuentra sujeto en el eje perpendicular al plano del pórtico, se llama soporte.
- Emparrillado: aquel pórtico que además está cargado en el eje perpendicular a su plano.

Por lo tanto, como se explicará en el apartado "**Anexo 2: Comprobación del criterio de superposición para cualquier tipo de viga**", se podrían calcular los esfuerzos axiales, cortantes, momentos flectores y desplazamientos de los diferentes puntos de toda la estructura de la viga carril, primero para un pórtico únicamente cargado en el eje "x" y en el eje "z" (ya que el plano "XZ" es el de la estructura) y un emparrillado con la carga en el eje "y".

Es decir, al tener un tren de cargas con cargas en los tres ejes de la estructura, se procedería a dividir el problema de estudio en dos, un pórtico y un emparrillado. Para obtener los valores anteriores para la estructura para la aplicación de las cargas en los tres ejes de manera teórica, se aplicaría el principio de superposición entre los resultados de los dos problemas anteriores.

Debido al volumen y complejidad de los cálculos no es viable calcular estos valores para los dos problemas de manera teórica y luego sumarlas aplicando el principio de superposición.

El desarrollo del apartado "**Anexo 2: Comprobación del criterio de superposición para cualquier tipo de viga**", tiene como función demostrar que este método sería válido para obtener los resultados que proporciona el software de cálculo "SAP2000" cuando se cargaba la estructura con el tren de cargas con cargas en los tres ejes. Pero aplicándolo a un caso mucho más sencillo en el que la carga numérica es muy reducida y se puede aplicar de manera viable este método teórico. Para así demostrar la validez de la aplicación del principio de superposición en casos de estudio que se pueden descomponer en diferentes problemas más sencillos.

Como se ha explicado anteriormente el cálculo de la estructura del pórtico de la viga carril mediante la aplicación del método de superposición a dos problemas que se pueden calcular mediante un método teórico es inviable debido al volumen y a la complejidad numérica de la estructura a estudiar.

Por lo tanto se aplicará el principio de superposición a esta estructura mediante el software de cálculo. Anteriormente ya se ha calculado la estructura del pórtico de la viga carril con un tren

de cargas con cargas en los tres ejes para diferentes posiciones del testero. Previo al estudio ya se conocen los resultados que se deben obtener una vez se haya aplicado el principio de superposición a los valores obtenidos en los dos problemas en los que se simplificaba la estructura.

En este estudio se demostrará la posibilidad de simplificar las estructuras en varios problemas de menor complejidad y aplicar el principio de superposición para obtener los resultados finalmente buscados.

Por lo tanto, tenemos que definir en el programa de cálculo los dos problemas en los que simplificamos la estructura, por un lado el soporte y por otro lado el emparrillado.

En ambos, la geometría del pórtico de la viga carril es la misma, es decir, se compone de 4 pilares de 8 metros de longitud, 3 vanos de 6 metros de longitud, y tanto los pilares como la viga carril están fabricados en acero S275 con una sección "HEB 300".

Al igual que antes en la parte inferior de los pilares se colocan los apoyos. En este caso serán empotramientos, ya que al simular la cimentación del puente grúa deben restringir los desplazamientos y los giros en los tres ejes.

Los dos problemas en los que se divide el pórtico de la viga carril son el soporte, en el que se define un tren de cargas con cargas en el eje "x" y en el eje "z", de valor 12500 N y -120434 N (de valor negativo al ser una carga gravitacional) respectivamente.

Por otro lado se define el emparrillado, en el que el tren de cargas solo tiene cargas en el eje "y", de valor 5250 N, a pesar de que en los apartados anteriores finalmente se reducía el valor de esta carga para no superar la condición de máximo desplazamiento en el eje "y". Se realiza este caso de estudio, debido a que el objetivo de este apartado es demostrar la validez del principio de superposición.

En ambos casos, el tren de cargas está formado por dos puntos de aplicación, que corresponden a las ruedas del testero, por lo que la distancia entre estos siempre es constante y de valor 2,5 metros (batalla del testero). Los valores de cargas en cada eje se definieron anteriormente en función de la carga y aceleración del puente grúa.

Los puntos de aplicación de las cargas de cada tren de cargas, son los mismos que para el caso del estudio del pórtico de la viga carril en su totalidad, de esta manera, se pueden comparar los resultados y validar la aplicación del principio de superposición para este caso de estudio.

Es decir se estudian los siguientes casos de posición del centro del testero sobre la viga carril:

- Coincidente con el centro del vano izquierdo de la viga carril.
- Coincidente con el centro del vano central de la viga carril.
- Coincidente con el primer pilar.
- Coincidente con el lateral izquierdo del vano izquierdo de la viga carril.
- Coincidente con el lateral derecho del vano izquierdo de la viga carril.

Se obtienen los valores del esfuerzo axial, del esfuerzo cortante y del momento flector para cada caso:

- Soporte (cargas en el plano "XZ"). Esfuerzos cortantes en el plano "2-2" y momentos flectores en el eje "3" de la estructura:

1) Pilar:

Posición centro del testero (m)	N (N)	V (N)	M (N·m)
Vano izquierdo	143204	19264	89604
Vano central	135010	17005	79964
Primer pilar	218913	7456	31128
Lateral izq vano izq	161128	16350	73697
Lateral drcho vano izq	192441	27023	79095
Posición: $x_1=1,5m/x_2=4m$	117798	8340	57942

Tabla 43. Valores de los esfuerzos internos en la viga carril

2) Viga carril:

Posición centro del testero (m)	N (N)	V (N)	M (N·m)
Vano izquierdo	33191	133911	129071
Vano central	20200	123634	124771
Primer pilar	9271	114726	11712
Lateral izq vano izq	31072	161128	133562
Lateral drcho vano izq	29495	184669	132220
Posición: $x_1=1,5m/x_2=4m$	20840	123069	117504

Tabla 44. Valores de los esfuerzos internos en la viga carril

- Emparrillado (cargas en el eje "Y"). Esfuerzos cortantes en el plano "3-3" y momentos flectores en el eje "2" de la estructura:

1) Pilar:

Posición centro del testero (m)	N (N)	V (N)	M (N·m)
Vano izquierdo	0	5580	44623
Vano central	0	3768	29826
Primer pilar	0	4335	33983
Lateral izq vano izq	0	6693	53301
Lateral drcho vano izq	0	4526	36414
Posición: $x_1=1,5m/x_2=4m$	0	3940	46327

Tabla 45. Valores de los esfuerzos internos en la viga carril

2) Viga carril:

Posición centro del testero (m)	N (N)	V (N)	M (N·m)
Vano izquierdo	0	330	10373
Vano central	0	0	17953
Primer pilar	0	2032	13712
Lateral izq vano izq	0	3806	7033
Lateral drcho vano izq	0	723	13569
Posición: $x_1=1,5m/x_2=4m$	0	549	9834

*Tabla 46. Valores de los esfuerzos internos en la viga carril*

Una vez obtenidos los valores de los esfuerzos axiales y cortantes al igual que los momentos flectores, se procede a comprobar el criterio de plastificación de Von Misses de cada estructura. Aunque al haber mantenido las características geométricas y dimensionales de la estructura del pórtico de la viga carril, y simplemente reducir la carga para cada caso, no plastificará debido a que anteriormente ya se comprobó que la estructura no plastificaba con la aplicación del tren de cargas total para cualquiera de los casos de posición del testero sobre la viga carril.

Se aplica de la misma manera que anteriormente el criterio de plastificación de Von Misses, al igual que la forma de calcular las tensiones equivalentes de Von Misses, se obtienen los siguientes resultados:

- Soporte (cargas en el plano "XZ"). Esfuerzos cortantes en el plano "2-2" y momentos flectores en el eje "3" de la estructura:

1) Pilar:

Posición centro del testero (m)	$\sigma_{VM}$ (MPa)
Vano izquierdo	64,07
Vano central	57,63
Primer pilar	33,54
Lateral izq vano izq	55,61
Lateral drcho vano izq	60,92
Posición: $x_1=1,5m/x_2=4m$	42,73

*Tabla 47. Valores de la tensión de VM en la viga carril*

2) Viga carril:

Posición centro del testero (m)	$\sigma_{VM}$ (MPa)
Vano izquierdo	112,88
Vano central	106,08
Primer pilar	96,28
Lateral izq vano izq	126,68
Lateral drcho vano izq	137,27
Posición: $x_1=1,5m/x_2=4m$	102,82

Tabla 48. Valores de la tensión de VM en la viga carril

- Emparrillado (cargas en el eje "Y"). Esfuerzos cortantes en el plano "3-3" y momentos flectores en el eje "2" de la estructura:

1) Pilar:

Posición centro del testero (m)	$\sigma_{VM}$ (MPa)
Vano izquierdo	26,8
Vano central	17,92
Primer pilar	20,42
Lateral izq vano izq	32,02
Lateral drcho vano izq	21,87
Posición: $x_1=1,5m/x_2=4m$	27,71

Tabla 49. Valores de la tensión de VM en la viga carril

2) Viga carril:

Posición centro del testero (m)	$\sigma_{VM}$ (MPa)
Vano izquierdo	6,18
Vano central	10,7
Primer pilar	8,26
Lateral izq vano izq	4,77
Lateral drcho vano izq	8,1
Posición: $x_1=1,5m/x_2=4m$	5,87

Tabla 50. Valores de la tensión de VM en la viga carril

Como se puede observar todas las tensiones equivalentes de Von Mises son menores que los 275 MPa de límite elástico del acero S275 con el que se fabrica la estructura. Por lo tanto, como ya se había anticipado anteriormente, cualquiera de las dos estructuras en las que se divide el pórtico de la viga carril total, no plastifica para cualquier posición del testero sobre la viga carril.

Además, como se puede observar existe una gran coincidencia entre estos resultados y los obtenidos anteriormente mediante el estudio del pórtico de la viga carril con el tren de cargas total (con cargas en los tres ejes), es decir, se cumple el principio de superposición para esta estructura.

Ahora se procederá a obtener los valores de los desplazamientos de los puntos estudiados anteriormente, pero esta vez para cada uno de los dos casos, se obtienen los siguientes resultados:

- Soporte (cargas en el plano "XZ"):

	<b>u1 (m)</b>	<b>u2 (m)</b>	<b>u3 (m)</b>
<b>Vano izquierdo</b>	0,0083	0	0,0085
<b>Vano central</b>	0,0067	0	0,0074
<b>Primer pilar</b>	0,007	0	0,0006
<b>Lateral izq vano izq</b>	0,0084	0	0,007
<b>Lateral drcho vano izq</b>	0,0077	0	0,0047
<b>Posición: <math>x_1=1,5m/x_2=4m</math></b>	0,0085	0	0,0085

*Tabla 51. Valores de los desplazamientos en la viga carril*

- Emparrillado (cargas en el eje "Y"):

	<b>u1 (m)</b>	<b>u2 (m)</b>	<b>u3 (m)</b>
<b>Vano izquierdo</b>	0	0,0496	0
<b>Vano central</b>	0	0,0408	0
<b>Primer pilar</b>	0	0,0399	0
<b>Lateral izq vano izq</b>	0	0,0572	0
<b>Lateral drcho vano izq</b>	0	0,043	0
<b>Posición: <math>x_1=1,5m/x_2=4m</math></b>	0	0,0531	0

*Tabla 52. Valores de los desplazamientos en la viga carril*

Al aplicar el principio de superposición para los desplazamientos en cada punto de aplicación del testero sobre la viga carril, se obtiene el desplazamiento de cada uno de esos puntos como si se hubiera aplicado el tren de cargas con la carga en los tres ejes, es decir, la estructura del pórtico de la viga carril con el tren de cargas total anteriormente estudiado:

	<b>u1 (m)</b>	<b>u2 (m)</b>	<b>u3 (m)</b>
<b>Vano izquierdo</b>	0,0083	0,0496	0,0085
<b>Vano central</b>	0,0067	0,0408	0,0074
<b>Primer pilar</b>	0,007	0,0399	0,0006
<b>Lateral izq vano izq</b>	0,0084	0,0572	0,007
<b>Lateral drcho vano izq</b>	0,0077	0,043	0,0047
<b>Posición: <math>x_1=1,5m/x_2=4m</math></b>	0,0085	0,0531	0,0085

*Tabla 53. Valores de los desplazamientos en la viga carril*

Anteriormente se obtenía en el caso de estudiar la estructura del pórtico de la viga carril con el tren de cargas en los tres ejes:

	<b>u1 (m)</b>	<b>u2 (m)</b>	<b>u3 (m)</b>
<b>Vano izquierdo</b>	0,0084	0,0483	0,0083
<b>Vano central</b>	0,0068	0,0408	0,0074
<b>Primer pilar</b>	0,007	0,0399	0,0006
<b>Lateral izq vano izq</b>	0,0084	0,054	0,0071
<b>Lateral drcho vano izq</b>	0,007	0,0435	0,0048
<b>Posición: <math>x_1=1,5m/x_2=4m</math></b>	0,0081	0,0524	0,0075

*Tabla 54. Valores de los desplazamientos en la viga carril*

Como se puede observar, los resultados son prácticamente iguales, y las diferencias entre ellos radican en la posición exacta donde se calcula ese desplazamientos o cuestión de redondeo de decimales.

De esta manera, se ha demostrado la validez del principio de superposición debido a la igualdad entre los resultados obtenidos al calcular la estructura con el tren de cargas en su totalidad, y al calcular la estructura como suma de dos estructura iguales pero en las que se divide el tren de cargas, por un lado la carga en el plano "XZ" formando el soporte, y por otro lado, la carga en el eje "y" formando el emparrillado, ambos dos sumados conforman la estructura del pórtico de la viga carril en su totalidad.

Ahora se procede a volver a verificar el principio de superposición para el último caso estudiado anteriormente, es decir, cuando la aceleración del carro de polipasto se reducía desde  $1 \text{ m/s}^2$  a  $0,3 \text{ m/s}^2$ , reduciéndose así la carga en el eje "y" del tren de cargas de los 5250 N a los 1575 N aplicados realmente debido a la condición de flecha máxima impuesta sobre el puente grúa.

Este caso, se estudiará únicamente para el caso de desplazamiento máximo problemático en el eje "y", que correspondía con la posición del testero sobre el lateral izquierdo del vano izquierdo como ya se ha explicado anteriormente.

Se desarrollará el estudio con la misma metodología que antes, es decir, dividir la estructura del pórtico de la viga carril total en dos, el soporte y el emparrillado, aplicar el principio de superposición y comprobar que los valores coinciden.

Este estudio nuevamente se realiza mediante el software de cálculo "SAP2000".

Se obtienen los valores de los esfuerzos axiales, cortantes y momentos flectores:

- Soporte (cargas en el plano "XZ"). Esfuerzos cortantes en el plano "2-2" y momentos flectores en el eje "3" de la estructura:

1) Pilar:

<b>Posición centro del testero (m)</b>	<b>N (N)</b>	<b>V (N)</b>	<b>M (N·m)</b>
<b>Lateral izq vano izq</b>	161128	16350	73697

*Tabla 55. Valores de los esfuerzos internos en el pilar*

2) Viga carril:

Posición centro del testero (m)	N (N)	V (N)	M (N·m)
Lateral izq vano izq	31072	161128	133562

*Tabla 56. Valores de los esfuerzos internos en la viga carril*

- Emparrillado (cargas en el eje "Y"). Esfuerzos cortantes en el plano "3-3" y momentos flectores en el eje "2" de la estructura:

1) Pilar:

Posición centro del testero (m)	N (N)	V (N)	M (N·m)
Lateral izq vano izq	0	2007	15990

*Tabla 57. Valores de los esfuerzos internos en el pilar*

2) Viga carril:

Posición centro del testero (m)	N (N)	V (N)	M (N·m)
Lateral izq vano izq	0	1142	2110

*Tabla 58. Valores de los esfuerzos internos en la viga carril*

Se calculan las tensiones equivalentes de Von Misses:

- Soporte (cargas en el plano "XZ"). Esfuerzos cortantes en el plano "2-2" y momentos flectores en el eje "3" de la estructura:

1) Pilar:

Posición centro del testero (m)	$\sigma_{VM}$ (MPa)
Lateral izq vano izq	55,61

*Tabla 59. Valores de la tensión de VM en el pilar*

2) Viga carril:

Posición centro del testero (m)	$\sigma_{VM}$ (MPa)
Lateral izq vano izq	126,68

*Tabla 60. Valores de la tensión de VM en la viga carril*

- Emparrillado (cargas en el eje "Y"). Esfuerzos cortantes en el plano "3-3" y momentos flectores en el eje "2" de la estructura:

1) Pilar:

Posición centro del testero (m)	$\sigma_{VM}$ (MPa)
Lateral izq vano izq	9,61

*Tabla 61. Valores de la tensión de VM en el pilar*

2) Viga carril:

Posición centro del testero (m)	$\sigma_{VM}$ (MPa)
Lateral izq vano izq	1,43

*Tabla 62. Valores de la tensión de VM en la viga carril*

Como se puede observar no plastificará ningún punto de la estructura, ya que todas las tensiones equivalentes para cualquier posición del testero sobre la viga carril son menores que el límite elástico del acero S275 (275 MPa).

Al igual que antes, previo a realizar el estudio, se conocía que no se iba a producir plastificación en la estructura en ninguno de los dos problemas en los que se divide el pórtico de la viga carril total. Debido a que no se producía plastificación cuando se aplicaba todo el tren de cargas con cargas en los tres ejes, así que para estos casos en los que se conservan las dimensiones y la geometría de la estructura y solo se elimina alguna de las cargas de alguno de los ejes del tren de cargas, no se produce plastificación según el criterio de Von Misses.

Los desplazamientos para este caso de posición del testero sobre la viga carril son los siguientes:

- Soporte (cargas en el plano "XZ"):

	u1 (m)	u2 (m)	u3 (m)
Lateral izq vano izq	0,0084	0	0,007

*Tabla 63. Valores de los desplazamientos en la viga carril*

- Emparrillado (cargas en el eje "Y"):

	u1 (m)	u2 (m)	u3 (m)
Lateral izq vano izq	0	0,0172	0

*Tabla 64. Valores de los desplazamientos en la viga carril*

Aplicando el principio de superposición al soporte y al emparrillado, se obtiene:

	u1 (m)	u2 (m)	u3 (m)
Lateral izq vano izq	0,0084	0,0172	0,007

*Tabla 65. Valores de los desplazamientos en la viga carril*

Anteriormente se obtenían en el caso de estudiar la estructura del pórtico de la viga carril con el tren de cargas en los tres ejes:

	u1 (m)	u2 (m)	u3 (m)
Lateral izq vano izq	0,0084	0,0162	0,0071

*Tabla 66. Valores de los desplazamientos en la viga carril*

Como se puede observar los resultados son prácticamente iguales, y las pequeñas diferencias entre ellos radican en la posición exacta donde se calcula ese desplazamientos o cuestión de redondeo de decimales.

De esta manera, se ha comprobado la validez del principio de superposición para este tipo de estructuras gracias al software de cálculo "SAP2000", debido a la complejidad numérica en el cálculo de la misma.

**3.1.6.1.** Estudio del pórtico girado 90° para la aplicación de un tren de cargas móvil mediante el software de cálculo "SAP2000":

Para poder definir un tren de cargas móvil en el programa de cálculo "SAP2000", la carga debe de estar en el eje "z". Es decir, como se ha estudiado anteriormente, cuando se definían las cargas en el eje "x", "y" y "z", se debía ir estudiando cada posición de las ruedas del testero sobre la viga carril, en vez de poder definir un tren de cargas móvil para obtener así los diagramas de las envolventes como sí se podía hacer cuando se estudiaba la viga carril únicamente carga con fuerzas en el eje "z".

Esta limitación del programa, esta detallada en "**Anexo1:** Guía para obtener líneas de influencia de una viga biapoyada mediante el software "SAP2000".

Por tanto para poder estudiar la carga en el eje "y" como un tren de cargas y no de manera puntual variando la posición de las ruedas del testero cuando se desplaza sobre la viga carril, se debe conseguir que la aplicación de esta fuerza en el software de cálculo sea sobre el eje "z".

Para ello, se debe girar el pórtico de la viga carril 90° sobre el eje sobre el eje "x". De esta manera, la fuerza en el eje "y" del anterior tren de cargas, generada debida a la aceleración del carro de polipasto cuando éste se desplazaba sobre la viga cajón del puente grúa, ahora se trata como cargas en el eje "z" para el programa de cálculo.

Ahora se aplica de manera longitudinal a los pilares del pórtico, por lo tanto se convierte en una fuerza aplicada en el eje "z" para el programa, gracias a esto se puede definir un tren de

### Capítulo 3. Estructura sobre la que se mueve la viga del puente grúa: vigas carril

cargas formado por dos cargas puntuales de valor 1575 N (definida anteriormente) y separadas a una distancia constante de 2,5 metros (batalla del testero).

Para poder girar 90° el pórtico se deben seleccionar todos los puntos y todas las barras que forman la estructura y mediante los comandos "edit"-->"replicate"-->"radial", seleccionando las opciones "parallel to X" y "delete original objects".

De esta manera, la estructura del pórtico gira 90° sobre el eje "x" manteniendo sus apoyos en la parte inferior de los pilares como empotrados, es decir restringiendo los desplazamientos y giros en todos los ejes debido a que estos apoyos corresponden con la cimentación del puente grúa.

El pórtico girado 90° sobre el eje "x" respecto de su posición original es el siguiente:

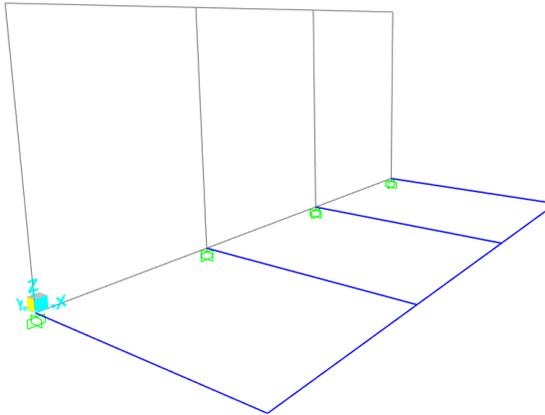


Imagen 114. Pórtico "tumbado"

El tren de cargas aplicado en el software de cálculo es el siguiente:

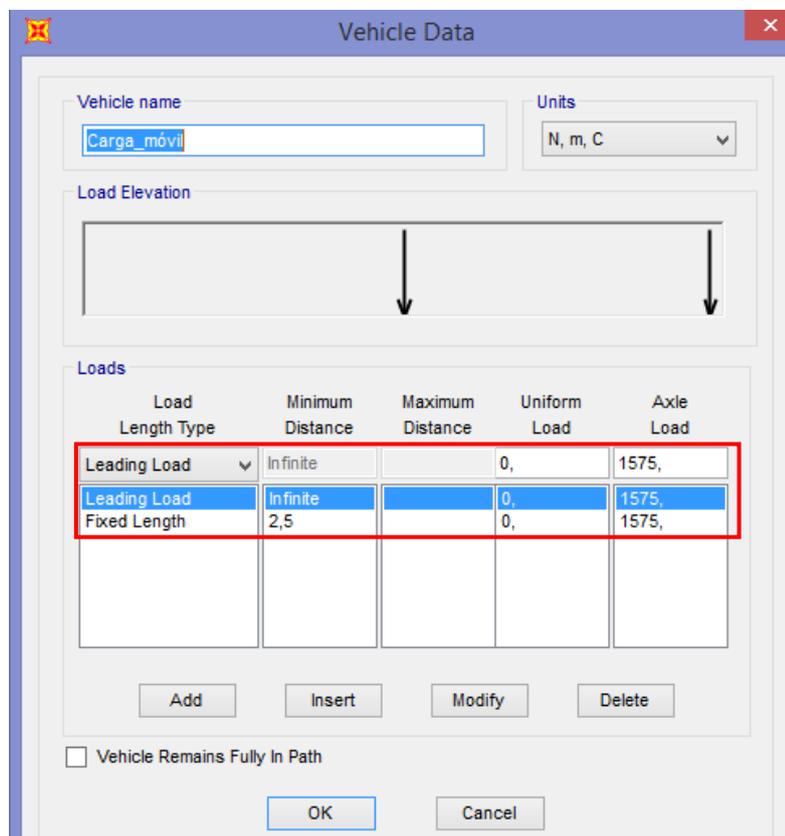
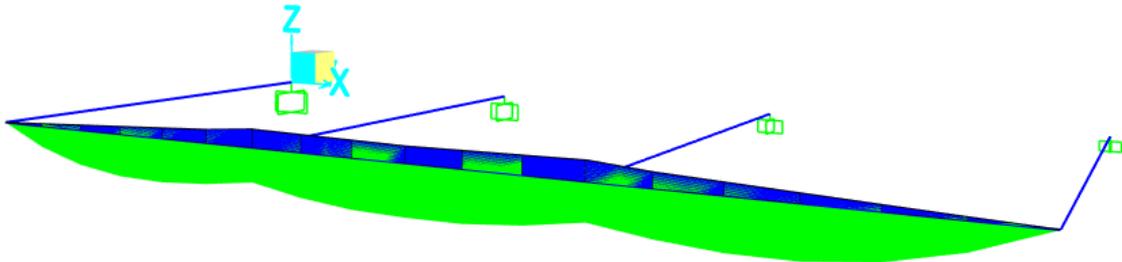


Imagen 115. Tren de cargas definido en "SAP2000"

Al ejecutar el modelo se obtienen los siguientes resultados:

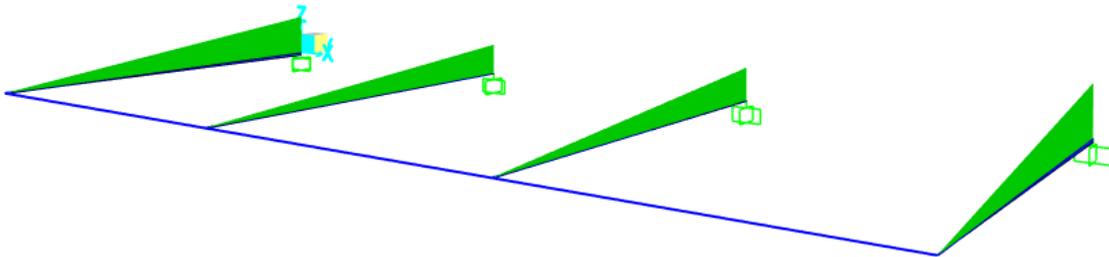
- Diagramas de envolventes de esfuerzos cortantes ("V") y envolventes de momentos flectores ("M"):

Diagrama de momentos "2-2", aparecen esfuerzos cortantes y momentos flectores sobre la viga carril.



*Imagen 116. Diagrama de momentos flectores de la viga carril põrtico "tumbado"*

Diagrama de momentos "3-3", aparecen esfuerzos cortantes y momentos flectores sobre los pilares del põrtico:

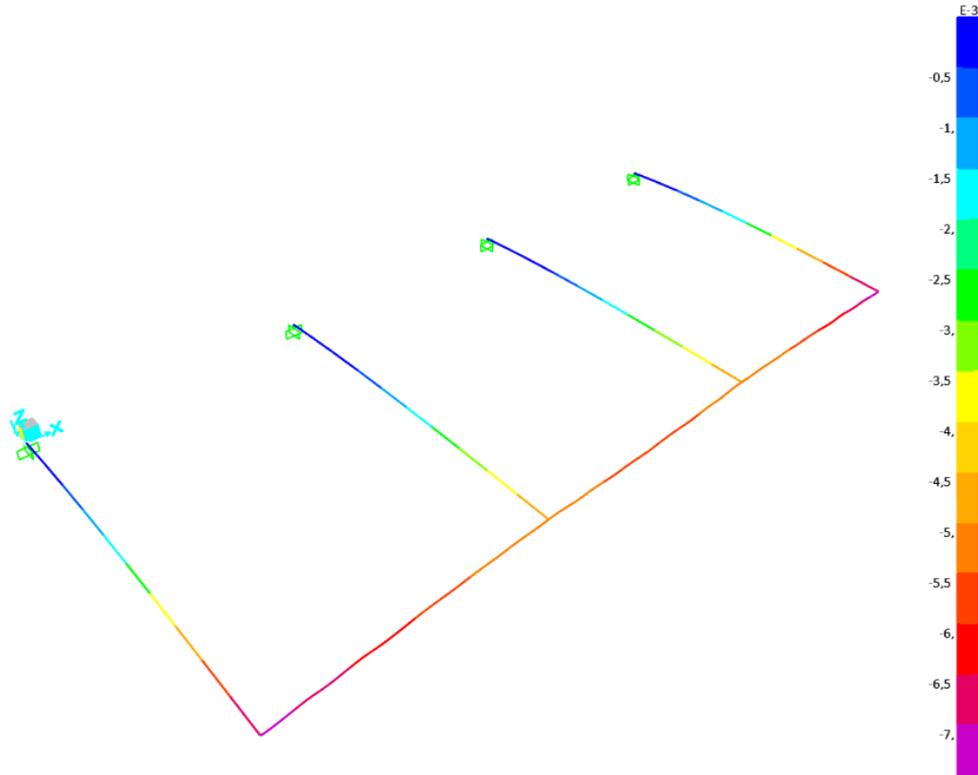


*Imagen 117. Diagrama de momentos flectores de los pilares del põrtico "tumbado"*

Se comprueba el criterio de plastificación de la misma manera que en los anteriores estudios. Al solo aplicar la carga en el eje "y" del total del tren de cargas que genera el testero sobre el põrtico de la viga carril, los valores de los esfuerzos cortantes y momentos flectores son mucho más pequeños que para el caso anteriormente estudiado del põrtico con el tren de cargas total con las cargas en los tres ejes.

En este caso aparecen valores máximos del orden de 1500 N para los esfuerzos cortantes y unos 1600 N·m para los momentos flectores. Por lo tanto, estos valores generan tanto en la viga carril como en los pilares tensiones equivalentes de Von Mises mucho más pequeñas que el límite elástico del acero S275 con el que se fabrica la estructura, es decir, no se produce la plastificación de la misma para este caso de carga.

- Diagramas de envolventes de desplazamientos "Uz" (deformada de la estructura):

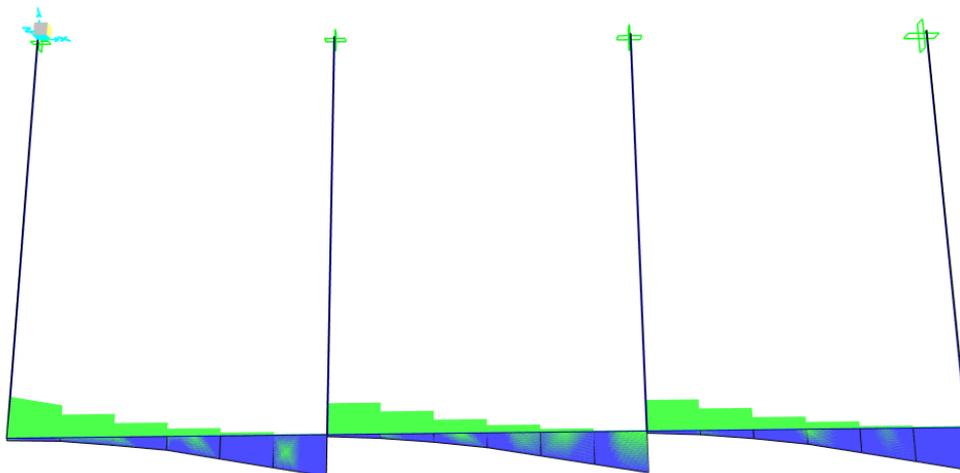


*Imagen 118. Deformada y valor de los desplazamientos del pórtico "tumbado"*

El valor del desplazamiento máximo es de 0,007 metros, que no causa problemas en la estructura.

Los desplazamientos sobre el eje de las "x" es decir "Ux" y en el eje de las "z" es decir "Uz", son muy pequeños y no superan las flechas máximas permitidas en la estructura. Los desplazamientos en los tres ejes son pequeños comparados con el caso de estudio del tren de cargas con carga en los tres ejes, debido a que en este solo se aplica una carga en vez de las tres de manera simultánea.

Al aplicar de esta manera la carga que antes se aplicaba sobre el eje "y" aparece torsión en la estructura:



*Imagen 119. Diagrama de momentos torsores del pórtico "tumbado"*

En la anterior imagen se muestran los puntos más críticos del perfil para la torsión máxima. En el diagrama de envolventes de torsión los resultados máximos se obtenían en la viga carril y tienen valores del orden de los 400 N·m, al no ser muy elevados no se generan problemas de torsión en la estructura.

Accediendo al módulo "Section designer" del programa de cálculo "SAP2000", una vez dibujado el perfil, en este caso un "HEB300" de acero S275, se obtienen los siguientes resultados:

- La tensión " $\tau_{12}$ " se distribuye de la siguiente forma a lo largo del perfil:

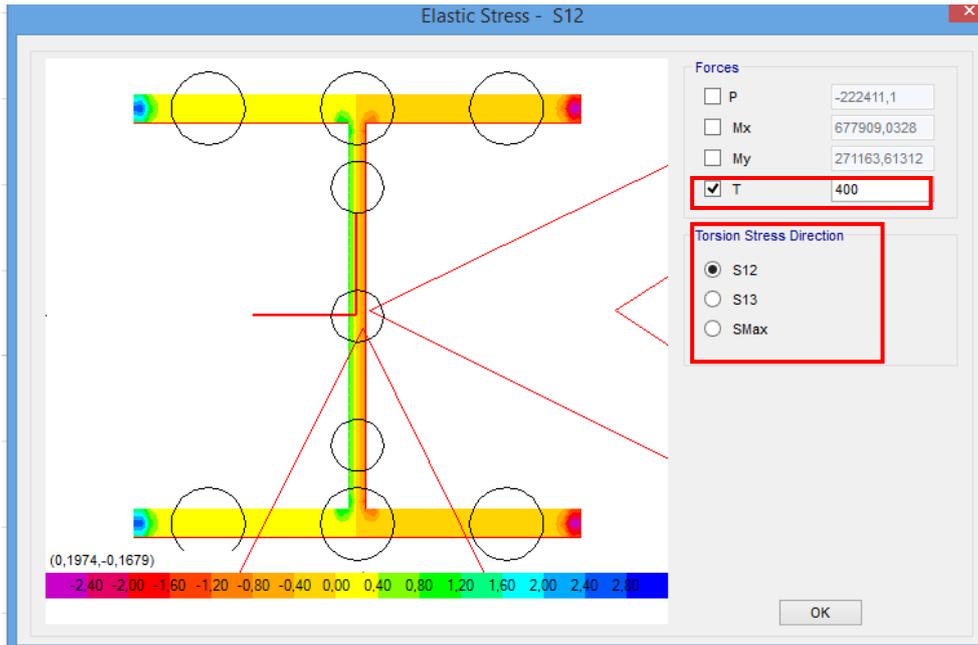


Imagen 120. Valor de " $\tau_{12}$ " en el perfil debido al momento torsor máximo

- La tensión " $\tau_{13}$ " se distribuye de la siguiente forma a lo largo del perfil:

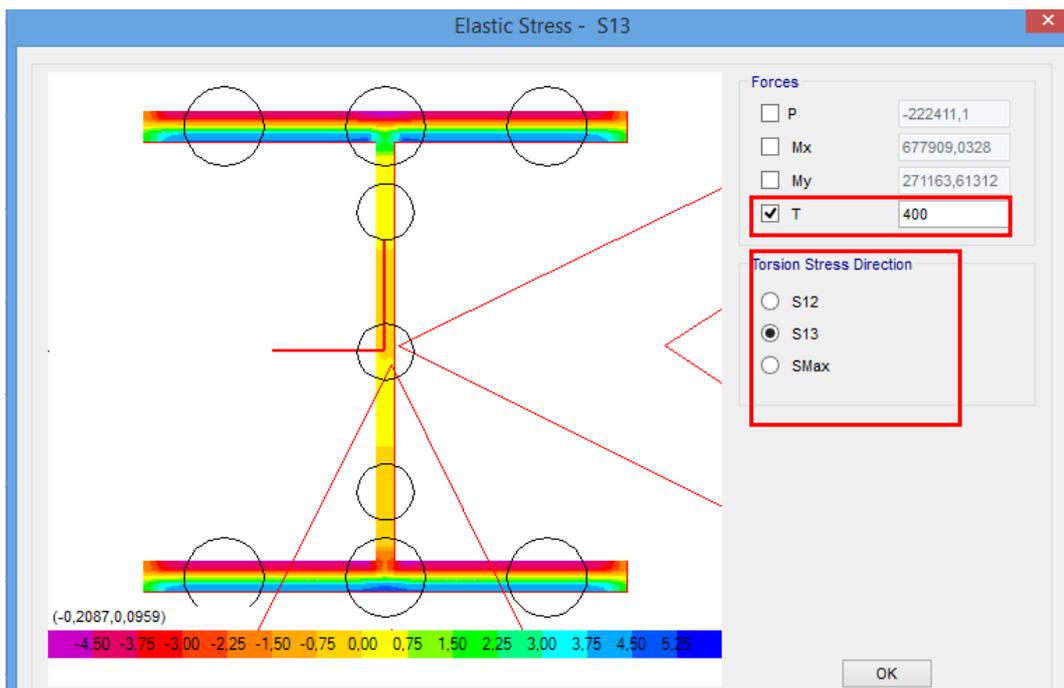
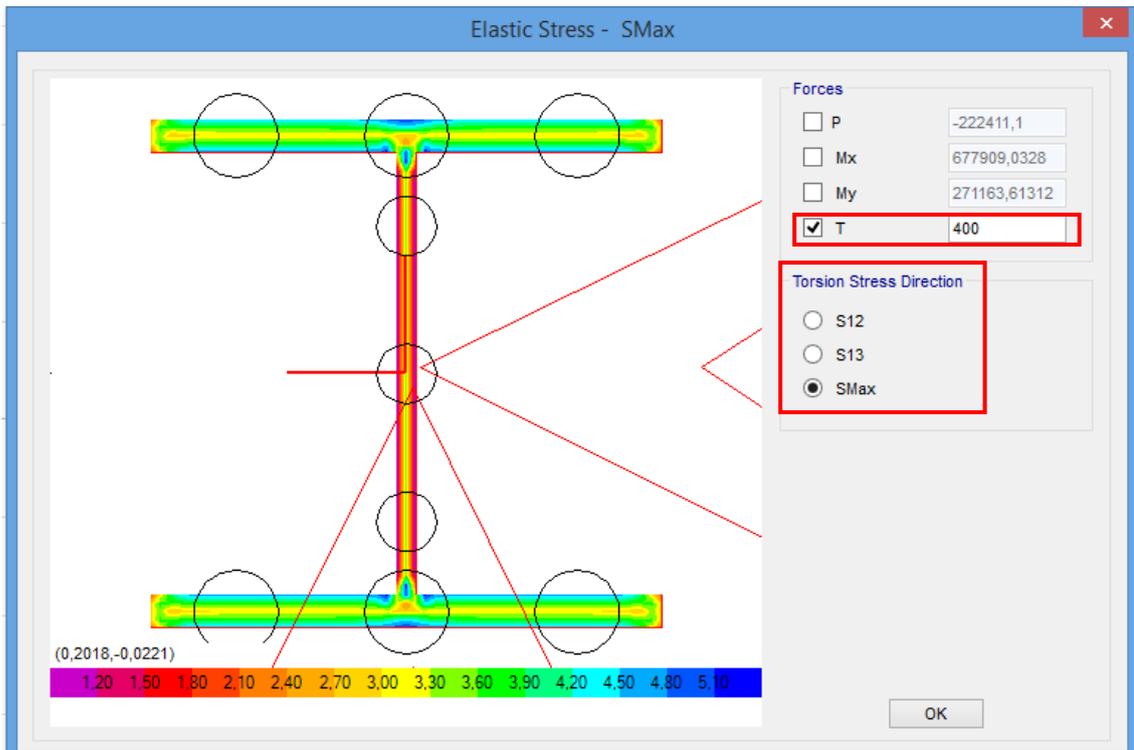


Imagen 121. Valor de " $\tau_{13}$ " en el perfil debido al momento torsor máximo

- La tensión " $\tau_{\text{máx}}$ " se distribuye de la siguiente forma a lo largo del perfil:



**Imagen 122. Valor de " $\tau_{\text{máx}}$ " en el perfil debido al momento torsor máximo**

En el apartado anterior en el que se estudiaba el pórtico de la viga carril con el tren de cargas en los tres ejes, se demostró que el efecto de los esfuerzos en los diferentes planos de la estructura, al igual que la torsión no producía plastificación según el criterio de plastificación de Von Mises. Por lo tanto, para este nuevo estudio en el que solo se tiene en cuenta la carga en el eje "y", no se producirá plastificación debido a que se mantiene la geometría, perfil y dimensiones de la estructura y únicamente se reduce la carga aplicada sobre esta.

### 3.2. Línea de influencia para la viga carril:

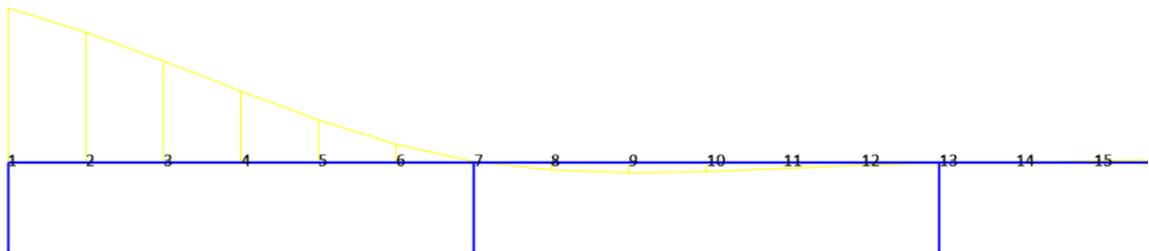
Para el estudio del concepto de la línea de influencia de esta estructura del puente grúa, únicamente se pueden obtener mediante el software de cálculo, debido a que la estructura no es tan sencilla como la viga del puente grúa, que se podía reducir a una viga biapoyada, se aplica un tren de cargas con carga en el eje "z" y de valor unitario.

Gracias a que en anteriores cálculos se comprueba la similitud entre los valores obtenidos mediante el programa "SAP2000" y los calculados de manera teórica, ahora se pueden emplear los valores que proporciona el software para el diseño de esta estructura, aunque no se puedan contrastar con los valores calculados de manera teórica.

Aplicando el procedimiento detallado en el "**Anexo1: Guía para obtener líneas de influencia de una viga biapoyada mediante el software "SAP2000"**", definiendo el camino a través de los tres vanos de la viga que están sujetos sobre los cuatro pilares, se obtienen los siguientes resultados:

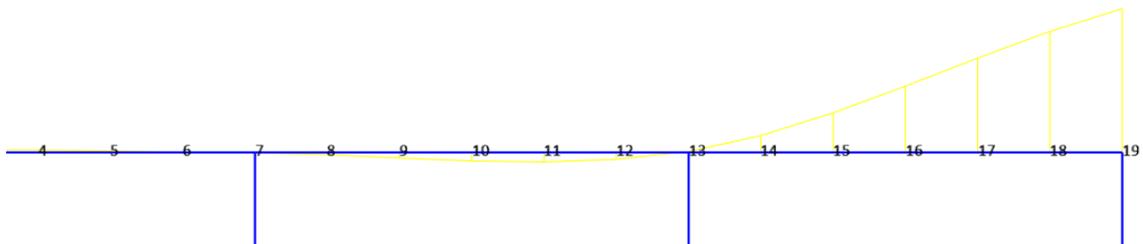
En las imágenes de las líneas de influencia proporcionadas por el software de cálculo, se representa el tramo de las vigas teniendo en cuenta que estas están apoyadas sobre cuatro pilares cuyos extremos están empotrados, restringiendo los giros y los desplazamientos en los tres ejes.

- Línea de influencia para la reacción vertical del apoyo del pilar del extremo izquierdo:



*Imagen 123. Línea de influencia de la reacción vertical del primer apoyo*

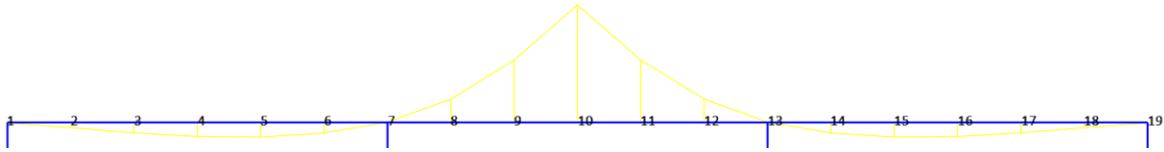
- Línea de influencia para la reacción vertical del apoyo del pilar del extremo derecho:



*Imagen 124. Línea de influencia de la reacción vertical del último apoyo*

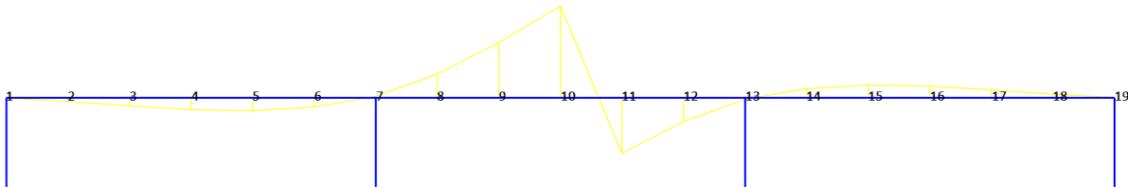
Como se puede observar existe simetría respecto del centro de la viga, por lo tanto, las líneas de influencia del vano izquierdo son simétricas y de igual valor que las del vano derecho.

- Línea de influencia para el momento flector de la sección central del vano central:



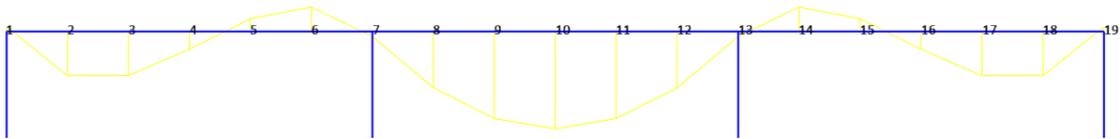
**Imagen 125. Línea de influencia del momento flector del vano central**

- Línea de influencia para el esfuerzo cortante de la sección central del vano central:



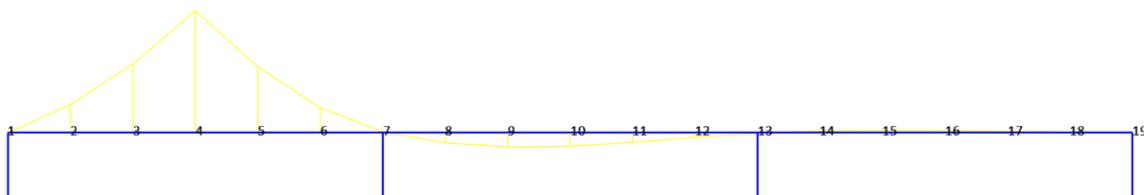
**Imagen 126. Línea de influencia del esfuerzo cortante del vano central**

- Línea de influencia para el esfuerzo axil de la sección central del vano central:



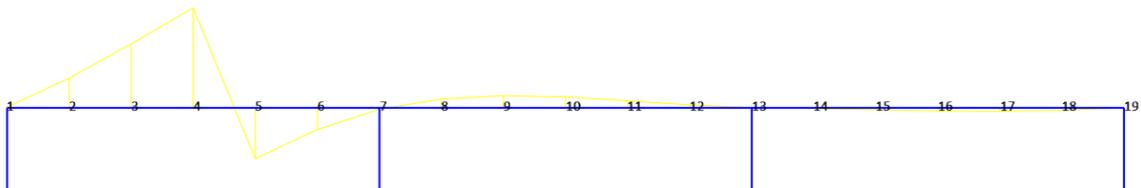
**Imagen 127. Línea de influencia del esfuerzo axil del vano central**

- Línea de influencia para el momento flector de la sección central del vano izquierdo:



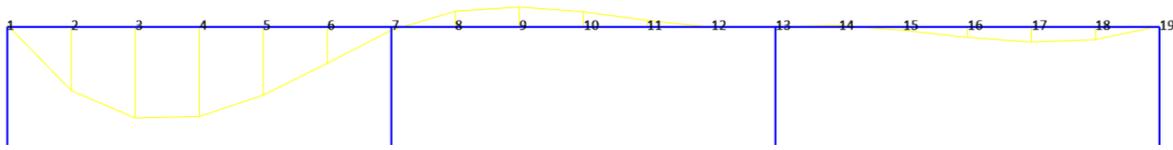
**Imagen 128.. Línea de influencia del momento flector del centro del primer vano**

- Línea de influencia para el esfuerzo cortante de la sección central del vano izquierdo:



**Imagen 129.. Línea de influencia del esfuerzo cortante del centro del primer vano**

- Línea de influencia para el esfuerzo axial de la sección central del vano izquierdo:



*Imagen 130.. Línea de influencia del esfuerzo axial del centro del primer vano*

### 3.2.1. Línea de influencia para los factores de carga del fenómeno de pandeo lateral y abolladura:

Para poder obtener la representación de la línea de influencia de los diferentes factores de carga para el fenómeno de pandeo lateral producido en la viga carril, se deben obtener estos factores variando la posición del tren de cargas en el eje longitudinal de esta viga carril.

Como se ha dicho anteriormente, se dimensiona esta viga carril con magnitudes de entrada como los 8 metros de altura de los pilares, el estudio de 3 vanos y 4 pilares, siendo la distancia entre pilares ( longitud de cada vano) 6 metros, teniendo finalmente un dintel total de 18 metros como se ha explicado anteriormente.

Se estudiaban solo 3 vanos de longitud total 18 metros aunque en el puente grúa real tendrá dos vigas carril de longitud total cada una de 42 metros. Pero ya se ha demostrado que el comportamiento del resto de vanos es igual que el de estos. Además al estudiar 3 vanos, se llega también a la conclusión que el vano central no es más crítico que los vanos de los extremos, aplicable también al resto de vanos centrales que queden entre otros dos (vano central) en la viga carril total de 42 metros.

Tras el estudio del dimensionado del perfil de la viga carril se emplea un perfil de tipo "HEB 300" para la viga carril y para los pilares. Sobre la viga carril se posiciona en su posición superior de su ala superior, un carril del mismo material (acero S275) de dimensiones 0,05x0,02 metros, de esta manera se aseguran que los desplazamientos o la flecha de cualquier punto de esta estructura no sean muy grandes (cumpla las restricciones anteriores impuestas) además de que la misma no plastifique mediante el método plastificación de Von Misses.

Para obtener esta línea de influencia se utiliza el software de cálculo "SAP2000", se debe definir la geometría y dimensiones de la estructura, además del perfil "HEB 300", finalmente seleccionado, y el carril, el material, y los apoyos de los 4 pilares que se comportaban como empotramientos al ser parte de la cimentación de la estructura total.

Como se tiene que ir variando la posición del tren de cargas se debe definir un "load pattern", que haga referencia a la carga y sea del tipo "other", con un factor de escala de 0.

Se tiene que definir un "load cases" y modificar el tipo de carga que se ha definido anteriormente, esta debe ser de tipo "buckling" para que el programa haga el cálculo del fenómeno de pandeo lateral.

Como se ha dicho anteriormente, el tren de cargas está formado por dos cargas puntuales de valor -120424 N, a una distancia constante de 2,5 metros, que corresponde a la batalla del

testero que se desplaza longitudinalmente por la viga carril, al desplazarse la viga del puente grúa.

Primero se estudia el caso en el que el centro del carro de polipasto se encuentra a 6,75 metros del extremo izquierdo de la viga del puente grúa, es decir, se aplican unos 205800 N sobre el testero del extremo izquierdo, por lo tanto, el tren de cargas corresponde con dos cargas puntuales separadas a 2,5 metros (constante) y de valor cada una de ellas de 102900 N.

Primero se realiza este estudio y después se realizará el caso más crítico, es decir, con el que se ha dimensionado anteriormente el perfil de la viga carril, en el que el centro del carro de polipasto se encontraba en su posición extrema (  $x= 1,25$  metros), para de esta manera observar que los factores de carga disminuyen con respecto a este primer estudio. Lógicamente, cuanto más cargas soporte la viga carril y los pilares, menos veces se podrá aumentar la carga hasta que se produzca el fenómeno de pandeo lateral y abolladura.

**3.2.1.1. Perfil viga carril y pilares IPE 400:**

**3.2.1.1.1. Posición del centro carro en  $x=6,75$  metros sobre la viga del grúa puente:**

Esta posición del carro de polipasto en la viga del puente grúa genera una fuerza de valor:  $F=102900$  N.

Se obtienen los siguientes resultados:

Centro carro (m)	x1 (m)	x2 (m)	Factores de carga de pandeo					
			1	2	3	4	5	6
1,75	0,5	3	0,87232	5,11428	9,85539	19,51702	50,32077	-83,38377
3,25	2	4,5	1,13725	3,48367	10,79843	16,09134	51,94151	-51,99848
4,75	3,5	6	1,31319	5,01113	8,13601	36,52219	94,13552	113,74982
6,25	5	7,5	1,35946	7,67327	17,0503	47,72892	75,35215	-79,61745
7,75	6,5	9	1,43274	8,36858	9,90945	-21,0562	22,04085	-27,49824
9,25	8	10,5	1,47647	7,12737	11,69967	13,92653	-17,83257	-19,28526
10,75	9,5	12	1,40276	8,18101	11,85265	30,0184	-31,85983	-34,99231
12,25	11	13,5	1,34448	7,61986	10,63289	69,62498	94,29009	117,27976
13,75	12,5	15	1,28154	4,02806	8,69962	26,37911	-59,75464	83,25141
15,25	14	16,5	1,0419	3,67997	12,59999	13,30245	46,15465	-57,3813
16,75	15	17,5	0,87232	5,11428	9,85539	19,51702	50,32077	-83,38377

**Tabla 67. Valores de los factores de pandeo en el pórtico de la viga carril**

Graficando los anteriores resultados:

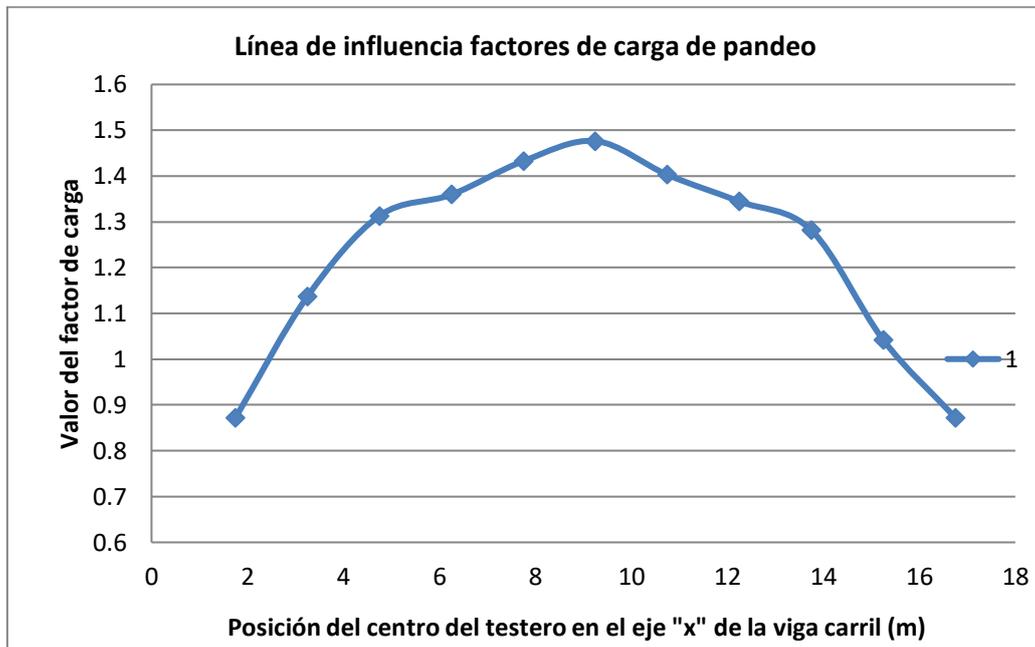


Imagen 131. Línea de influencia del factor de pandeo del primer modo de vibración para el perfil IPE 400

**3.2.1.1.2.** Posición del centro carro en x=1,25 metros sobre la viga del grúa puente:

Esta posición del carro de polipasto en la viga del puente grúa genera una fuerza de valor: F=120434 N.

Para el caso de la situación más crítica de posición de la carga (centro del carro de polipasto en x=1,25 metros en la viga del puente grúa), se obtiene:

Centro carro (m)	x1 (m)	x2 (m)	Factores de carga de pandeo					
			1	2	3	4	5	6
1,75	0,5	3	0,74532	4,36969	8,42054	16,67554	42,99456	-71,24392
3,25	2	4,5	0,93051	2,98132	9,80199	12,52089	38,24494	-42,49554
4,75	3,5	6	1,122	4,28156	6,95149	31,20492	-80,43032	97,18897
6,25	5	7,5	1,16154	6,55612	14,56795	40,78006	64,38162	-68,02594
7,75	6,5	9	1,22415	7,1502	8,46673	-17,99063	18,83192	-23,49477
9,25	8	10,5	1,26151	6,0897	9,99631	11,89896	15,23632	-16,47752
10,75	9,5	12	1,19853	6,98994	10,12702	25,64802	-27,22136	-29,89778
12,25	11	13,5	1,14874	6,51048	9,08484	59,49681	80,56238	100,20498
13,75	12,5	15	1,09496	3,44161	7,43304	22,53857	-51,054945	71,13083
15,25	14	16,5	0,89021	3,1442	10,76555	11,36574	39,43499	-49,02715
16,75	15	17,5	0,74532	4,36969	8,42054	16,67554	42,99456	-71,24392

Tabla 68. Valores de los factores de pandeo en el pórtico de la viga carril

Graficando los anteriores resultados:

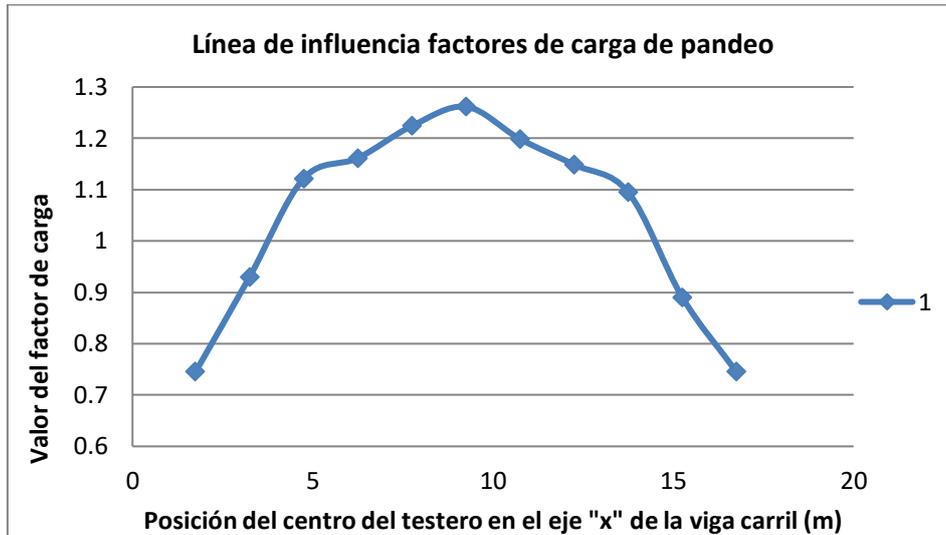


Imagen 132. Línea de influencia del factor de pandeo del primer modo de vibración para el perfil IPE 400

Tras la obtención de los resultados se observa que a mayor carga, menores factores de carga

Como se puede observar, en los primeros modos de pandeo el factor de carga es inferior, por lo tanto se produciría el vuelco de la estructura. Como se ha dicho anteriormente, para evitar esto se posicionan unos rigidizadores en las uniones entre la viga carril y los pilares.

Se ha representado la línea de influencia del factor de carga menor, del modo 1 de la estructura.

**3.2.1.2. Perfil viga carril y perfil pilares "HEB300":**

Ahora se procede a analizar la línea de influencia del factor de carga del fenómeno de pandeo global, con los perfiles que se han seleccionado finalmente para el diseño de la viga carril y de sus pilares. A diferencia del otro caso en el que se dimensionaba con el perfil "IPE 400", en este caso el factor de carga siempre es superior a la unidad, de esta manera se asegura que no se produce pandeo en la estructura.

Los resultados que se obtienen son los siguientes:

Centro testero (m)	Factores de carga de pandeo							
	x1 (m)	x2 (m)	1	2	3	4	5	6
1,25	0	2,5	4,40235	32,53241	37,09264	90,78851	103,8439	105,16582
2,75	1,5	4	5,6987	19,14299	48,60767	50,25842	106,05995	130,36611
4,25	3	5,5	6,984	20,92987	33,77689	89,45398	99,96047	103,13539
5,75	4,5	7	7,24394	28,85842	59,16971	78,7641	100,7674	113,90726
7,25	6	8,5	7,5654	30,89215	60,36105	86,48792	101,9164	121,11766
8,75	7,75	10,25	8,03639	32,62022	47,21348	55,74196	96,34478	97,21644
10,25	9,5	12	7,5654	30,89215	60,36105	86,48792	101,9164	121,11766

Cargas móviles. Aplicación al dimensionado de un puente grúa de 30 m y 20 t

11,75	11	13,5	7,24394	28,85842	59,16971	78,7641	100,7674	113,90726
13,25	12,5	15	6,984	20,92987	33,77689	89,45398	99,96047	103,13539
14,75	14	16,5	5,6987	19,14299	48,60767	50,25842	106,05995	130,36611
16,25	15,5	18	4,40235	32,53241	37,09264	90,78851	103,8439	105,16582

Tabla 69. Valores de los factores de pandeo en el pórtico de la viga carril

Graficando los anteriores resultados:

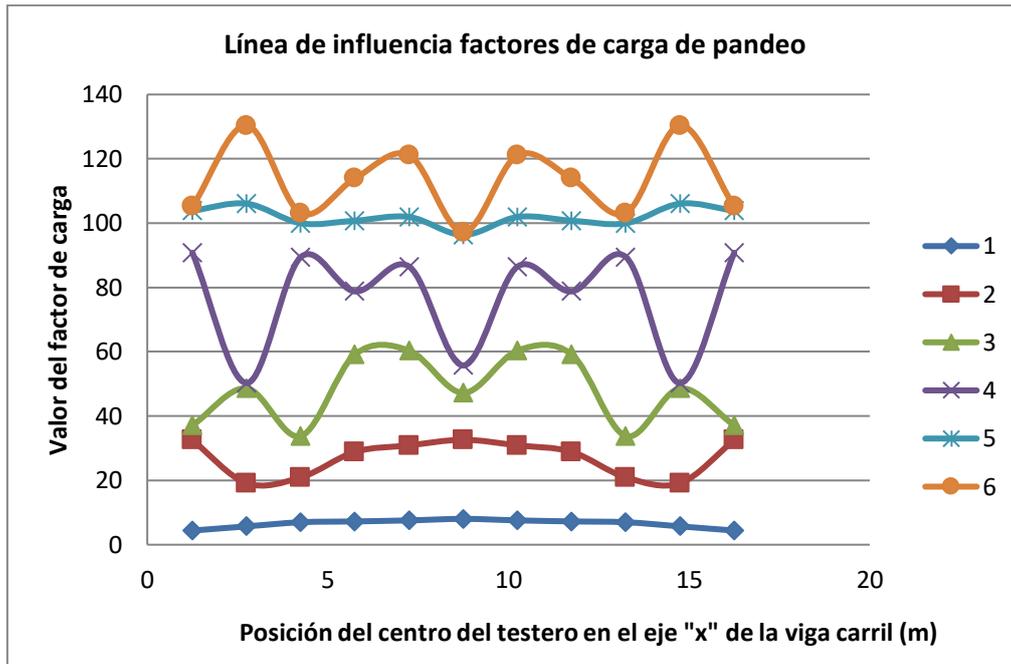


Imagen 133. Línea de influencia de los factores de pandeo para el perfil HEB 300

Se representa la línea de influencia del factor de carga menor, del modo 1 de la estructura:

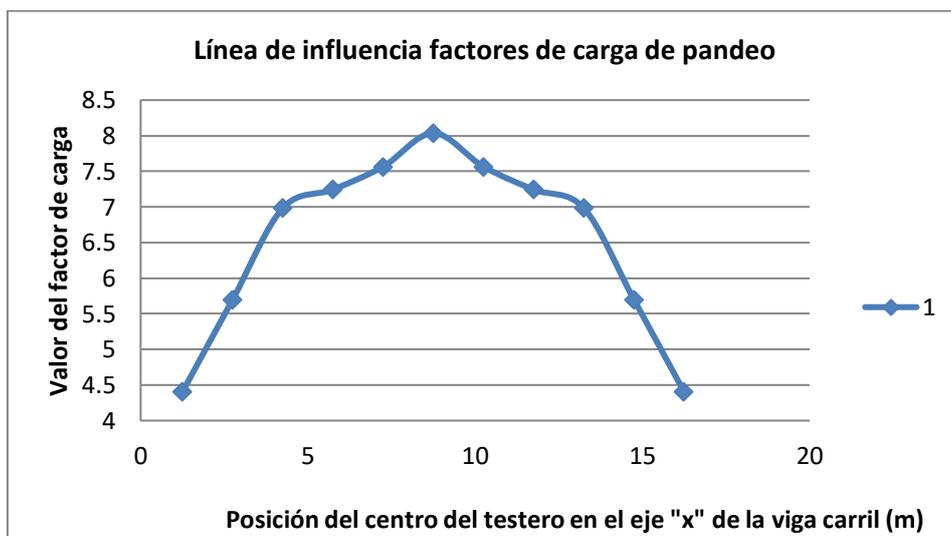


Imagen 134. Línea de influencia del factor de pandeo del primer modo de vibración para el perfil HEB 300

**3.2.1.3.** Perfil viga carril y perfil pilares "HEB300". Tren de cargas con cargas en los ejes "x", "y" y "z":

Este caso de estudio es igual al anterior, es decir se mantiene el perfil "HEB 300" tanto para los pilares como para la viga carril, la diferencia radica en que ahora la carga del tren de cargas no se aplica solo sobre el eje "z" si no que debido a las aceleraciones tanto del carro de polipasto sobre la viga del puente grúa y a las aceleraciones del testero sobre la viga carril, se producen cargas en los ejes "y" y "x" respectivamente.

Los resultados que se obtienen son los siguientes:

Centro testero (m)	x1 (m)	x2 (m)	Factor de carga del modo 1
1,25	0	2,5	4,35002
2,75	1,5	4	5,70602
4,25	3	5,5	6,97793
5,75	4,5	7	7,19341
7,25	6	8,5	7,52391
8,75	7,75	10,25	8,03553
10,25	9,5	12	7,52391
11,75	11	13,5	7,19341
13,25	12,5	15	6,97793
14,75	14	16,5	5,70602
16,25	15,5	18	4,35002

Tabla 70. Valores de los factores de pandeo en el pórtico de la viga carril

Graficando los anteriores resultados:

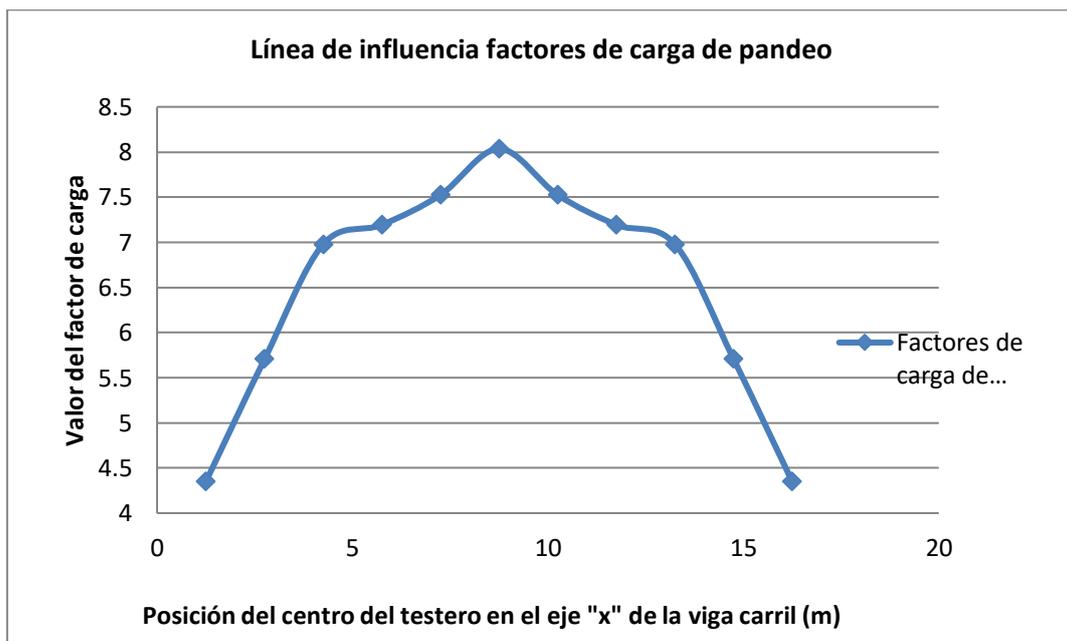


Imagen 135. Línea de influencia del factor de pandeo del primer modo de vibración para el perfil HEB 300

Como ya se había verificado anteriormente, el factor de carga de pandeo global con deflexiones de la viga carril para cualquier posición del testero sobre la viga carril bajo la aplicación de la mayor carga y la mayor aceleración de las condiciones de diseño del puente grúa, siempre es mayor que la unidad, por lo tanto, no se produce el fenómeno de pandeo global con deflexiones en la estructura del pórtico de la viga carril.

### 3.2.2. Líneas de influencia de los pilares del pórtico de la viga carril.

En este estudio se calcularán las líneas de influencia del esfuerzo axil, el esfuerzo cortante, el momento flector y los desplazamientos en los ejes "x", "y" y "z" para cada uno de los 4 pilares que componen la estructura del pórtico de la viga carril analizada, para determinar la influencia que tiene la posición del testero sobre la viga carril en estos valores para cada pilar de la estructura.

El procedimiento para llevar a cabo este estudio es similar al del cálculo de la línea de influencia de los factores de carga anteriormente realizado.

Una vez definida la estructura, sus dimensiones y geometría, el perfil "HEB 300" y el material (acero S275) del pórtico de la viga carril en el programa de cálculo "SAP2000", se irá variando la posición del testero y por lo tanto del tren de cargas (con cargas en los tres ejes) sobre la viga carril y se calcularán los valores anteriormente determinados. De esta manera, se pueden graficar estos en función de la posición del centro del testero en la viga carril.

Este estudio se realiza debido a que la carga en el eje "z" y en el eje "x" afectan de igual manera sobre los 4 pilares, pero a diferencia de estas dos, la carga en el eje "y" afecta de manera diferente a cada uno de los pilares dependiendo de su posición respecto al tren de cargas. De esta manera, se puede analizar la influencia del tren de cargas en cada pilar en función de la posición de cada pilar respecto a este.

El esfuerzo axil y el esfuerzo cortante son constantes en toda la longitud del pilar para cada posición del testero sobre la viga carril, pero el momento flector varía. Debido a esto, se graficará en momento flector de la parte superior del pilar ("M superior"), y el de la parte inferior del pilar ("M base"), en la zona de la cimentación del puente grúa.

Los desplazamientos que se grafican en los tres ejes corresponden al del punto superior de cada pilar, el punto de unión entre el pilar y la viga carril (pero perteneciente al pilar), debido a que el de la parte inferior del pilar, al ser la cimentación y tener restringidos los desplazamientos y giros en los tres ejes, tienen valores nulos.

Se obtienen los siguientes resultados:

- Pilar 1:

Posición centro testero (m)	M			u1 (m)	u2 (m)	u3 (m)	
	N (N)	V (N)	M superior (N·m)				
1,25	-181786	2838	27798	5087	0,0076	0,0202	0,0005
2,75	117798	-8340	57942	-8783	0,0079	0,0165	0,0003

Capítulo 3. Estructura sobre la que se mueve la viga del puente grúa: vigas carril

4,25	-56198	-4495	35699	-265	0,007	0,013	0,0001
5,75	-11251	2245	-595	17364	0,007	0,0099	2,88E-05
7,25	13236	7182	-27139	30317	0,007	0,0072	2,30E-05
8,75	17777	8027	-32088	32134	0,0067	0,0044	4,55E-05
10,25	13236	7182	-27139	30317	0,007	0,0072	2,30E-05
11,75	-11251	2245	-595	17364	0,007	0,0099	2,88E-05
13,25	-56198	-4495	35699	-265	0,007	0,013	0,0001
14,75	117798	-8340	57942	-8783	0,0079	0,0165	0,0003
16,25	-181786	2838	27798	5087	0,0076	0,0202	0,0005

Tabla 71. Valores de esfuerzos internos y desplazamientos en los pilares

- Pilar 2:

Posición centro testero (m)	M			M base (N·m)	u1 (m)	u2 (m)	u3 (m)
	N (N)	V (N)	superior (N·m)				
1,25	-62211	13945	-61782	49784	0,0081	0,0103	0,0002
2,75	131819	19064	-88273	64241	0,0087	0,0112	0,0005
4,25	-192441	17023	-79095	57090	0,0076	0,0119	0,0006
5,75	-218812	8790	-35502	34817	0,0072	0,012	6,00E-04
7,25	-202130	732	7278	13137	0,0068	0,0117	0,0006
8,75	-135010	-3228	27966	2136	0,0064	0,0106	0,0005
10,25	-202130	732	7278	13137	0,0068	0,0117	0,0006
11,75	-218812	8790	-35502	34817	0,0072	0,012	6,00E-04
13,25	-192441	17023	-79095	57090	0,0076	0,0119	0,0006
14,75	131819	19064	-88273	64241	0,0087	0,0112	0,0005
16,25	-62211	13945	-61782	49784	0,0081	0,0103	0,0002

Tabla 72. Valores de esfuerzos internos y desplazamientos en los pilares

- Pilar 3:

Posición centro testero (m)	N (N)	V (N)	M superior (N·m)	M base (N·m)	u1 (m)	u2 (m)	u3 (m)
1,25	11194	7100	-25321	31486	0,0078	0,0023	5,84E-05
2,75	18126	6884	-23364	31714	0,0083	0,0039	1,01E-05
4,25	15927	6028	-20499	27728	0,0072	0,0057	9,37E-06
5,75	-5741	8287	-32861	33442	0,0071	0,0075	1,53E-05
7,25	-52220	12577	-55927	44692	0,0071	0,0091	0,0002
8,75	-129542	17005	-79964	56079	0,007	0,0106	0,0003
10,25	-52220	12577	-55927	44692	0,0071	0,0091	0,0002
11,75	-5741	8287	-32861	33442	0,0071	0,0075	1,53E-05
13,25	15927	6028	-20499	27728	0,0072	0,0057	9,37E-06
14,75	18126	6884	-23364	31714	0,0083	0,0039	1,01E-05
16,25	11194	7100	-25321	31486	0,0078	0,0023	5,84E-05

Tabla 73. Valores de esfuerzos internos y desplazamientos en los pilares

- Pilar 4:

Posición centro testero (m)	N (N)	V (N)	M superior (N·m)	M base (N·m)	u1 (m)	u2 (m)	u3 (m)
1,25	8063	6791	-23694	30641	0,0078	0,0027	9,44E-06
2,75	-9376	7391	-26089	33043	0,0083	0,0017	2,40E-05
4,25	-8155	6443	-22734	28816	0,0072	0,0006	5,14E-06
5,75	-5062	5676	-18954	26461	0,007	0,0007	2,07E-05
7,25	246	4508	-12907	23157	0,0069	0,0023	4,87E-05
8,75	5908	3195	-6325	19236	0,0066	0,0044	1,51E-05
10,25	246	4508	-12907	23157	0,0069	0,0023	4,87E-05
11,75	-5062	5676	-18954	26461	0,007	0,0007	2,07E-05
13,25	-8155	6443	-22734	28816	0,0072	0,0006	5,14E-06
14,75	-9376	7391	-26089	33043	0,0083	0,0017	2,40E-05
16,25	8063	6791	-23694	30641	0,0078	0,0027	9,44E-06

Tabla 74. Valores de esfuerzos internos y desplazamientos en los pilares

Graficando los anteriores resultados:

- Pilar 1:
  - Líneas de influencia del esfuerzo axil ("N"), esfuerzo cortante ("V"), momento flector en la parte superior del pilar("M superior") y momento flector en la parte inferior del pilar("M base"):

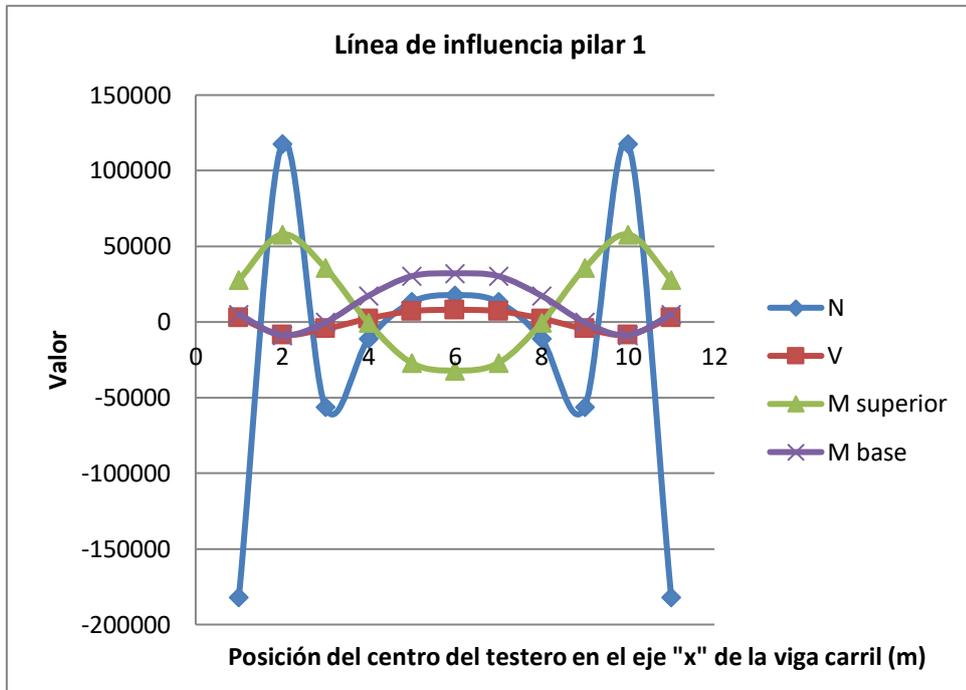


Imagen 136. Línea de influencia del esfuerzo axil del primer pilar

- Líneas de influencia para los desplazamientos en el eje "x" ("u1"), en el eje "y" ("u2") y en el eje "z" ("u3"):

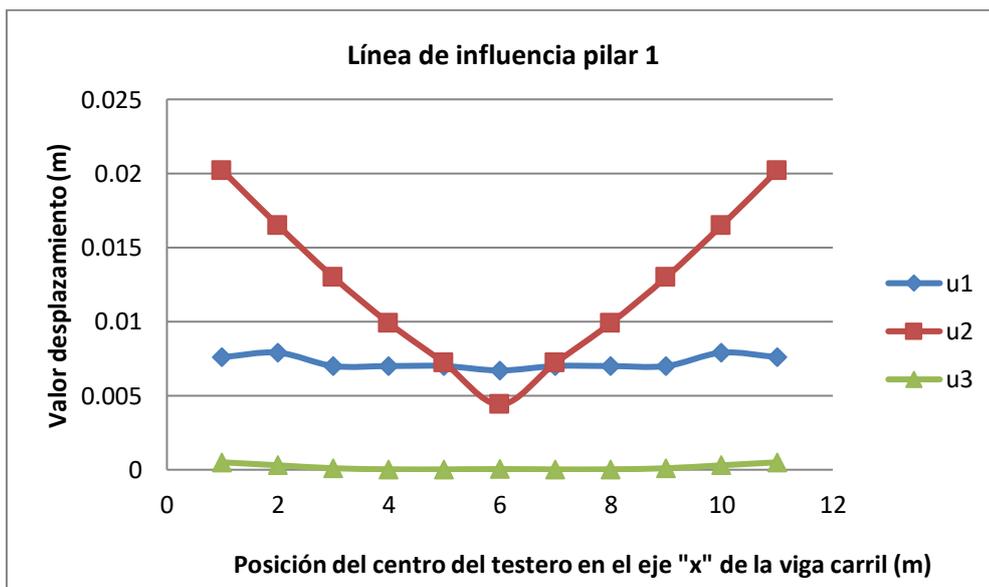


Imagen 137. Línea de influencia del desplazamiento del primer pilar

- Pilar 2:
  - Líneas de influencia del esfuerzo axil ("N"), esfuerzo cortante ("V"), momento flector en la parte superior del pilar("M superior") y momento flector en la parte inferior del pilar("M base"):

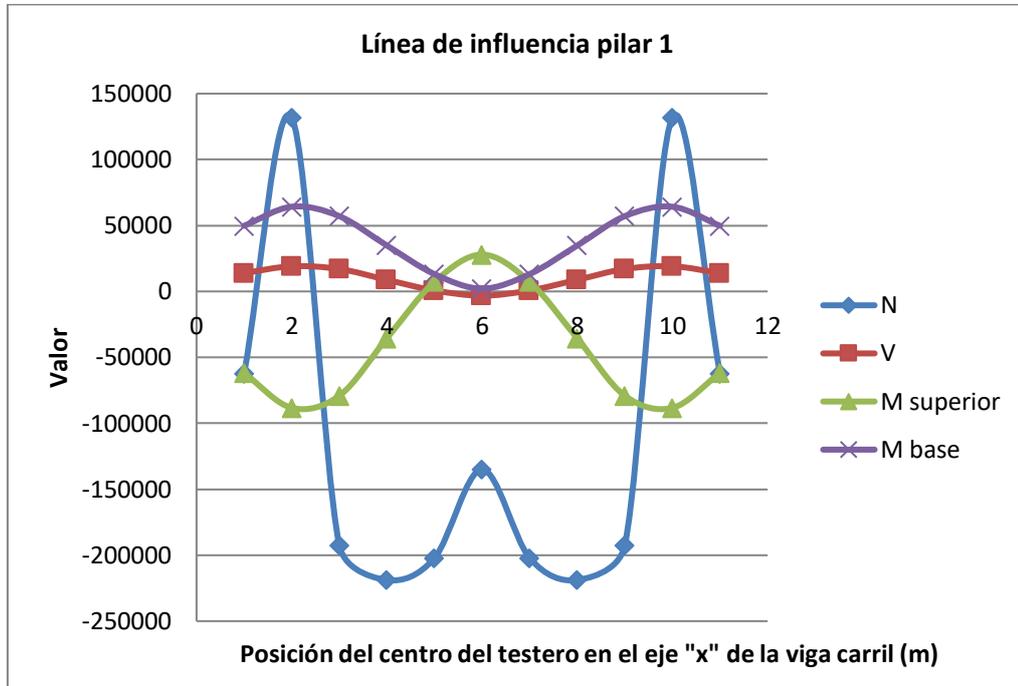


Imagen 138. Línea de influencia del esfuerzo axil del segundo pilar

- Líneas de influencia para los desplazamientos en el eje "x" ("u1"), en el eje "y" ("u2") y en el eje "z" ("u3"):

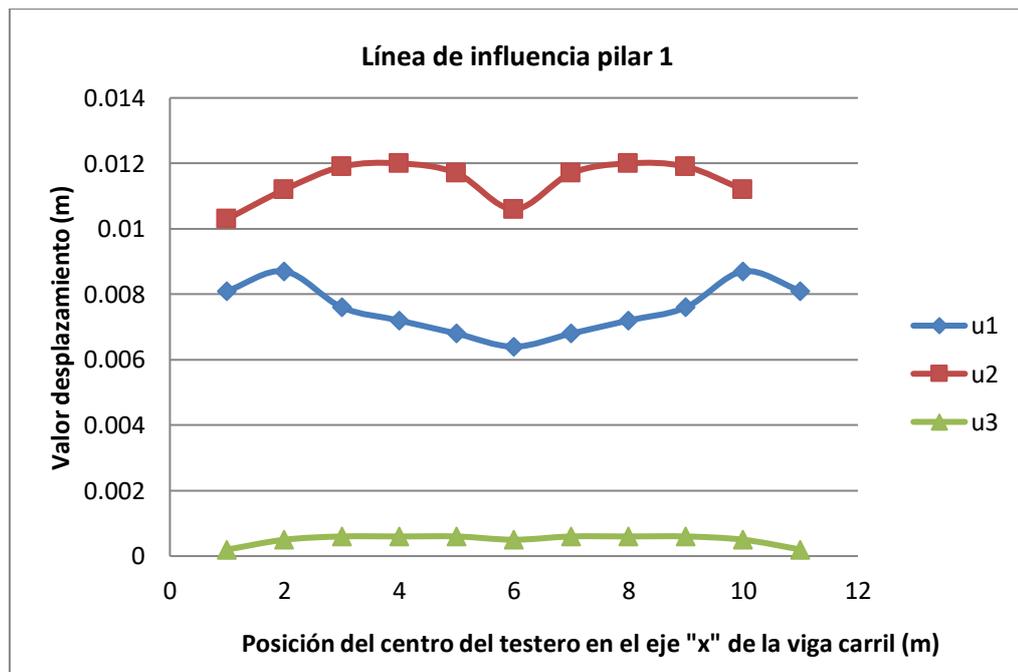


Imagen 139. Línea de influencia del desplazamiento del segundo pilar

- Pilar 3:
  - Líneas de influencia del esfuerzo axil ("N"), esfuerzo cortante ("V"), momento flector en la parte superior del pilar("M superior") y momento flector en la parte inferior del pilar("M base"):

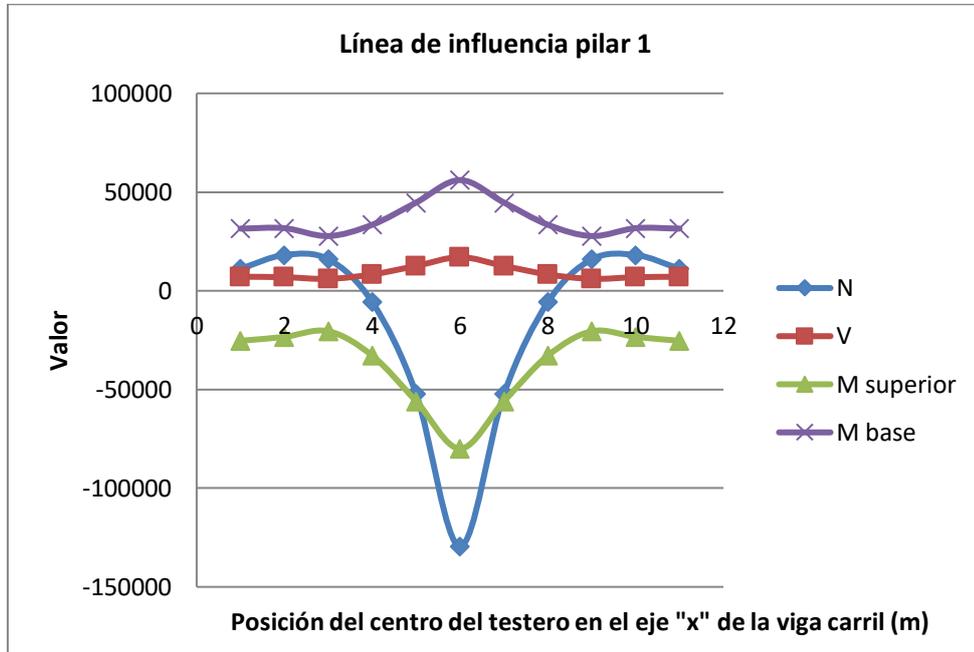


Imagen 140. Línea de influencia del esfuerzo axil del tercer pilar

- Líneas de influencia para los desplazamientos en el eje "x" ("u1"), en el eje "y" ("u2") y en el eje "z" ("u3"):

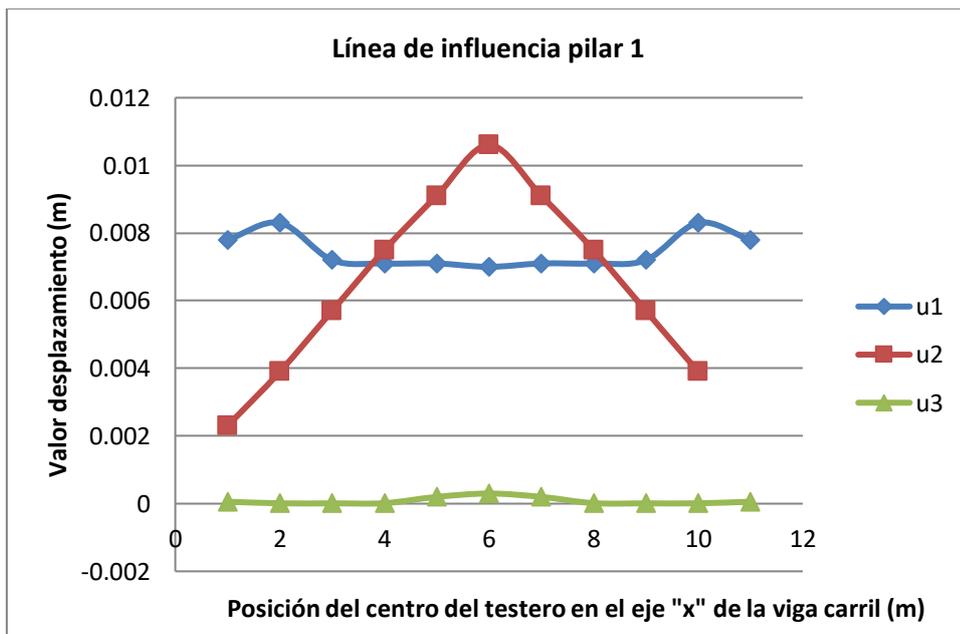


Imagen 141. Línea de influencia del desplazamiento del tercer pilar

- Pilar 4:
  - Líneas de influencia del esfuerzo axil ("N"), esfuerzo cortante ("V"), momento flector en la parte superior del pilar("M superior") y momento flector en la parte inferior del pilar("M base"):

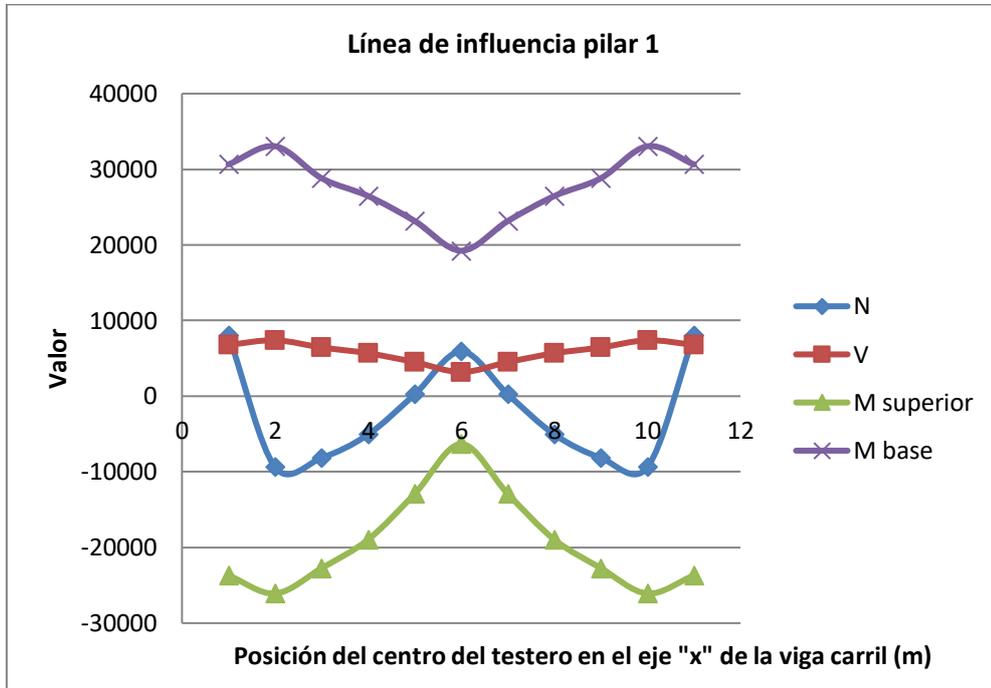


Imagen 142. Línea de influencia del esfuerzo axil del último pilar

- Líneas de influencia para los desplazamientos en el eje "x" ("u1"), en el eje "y" ("u2") y en el eje "z" ("u3"):

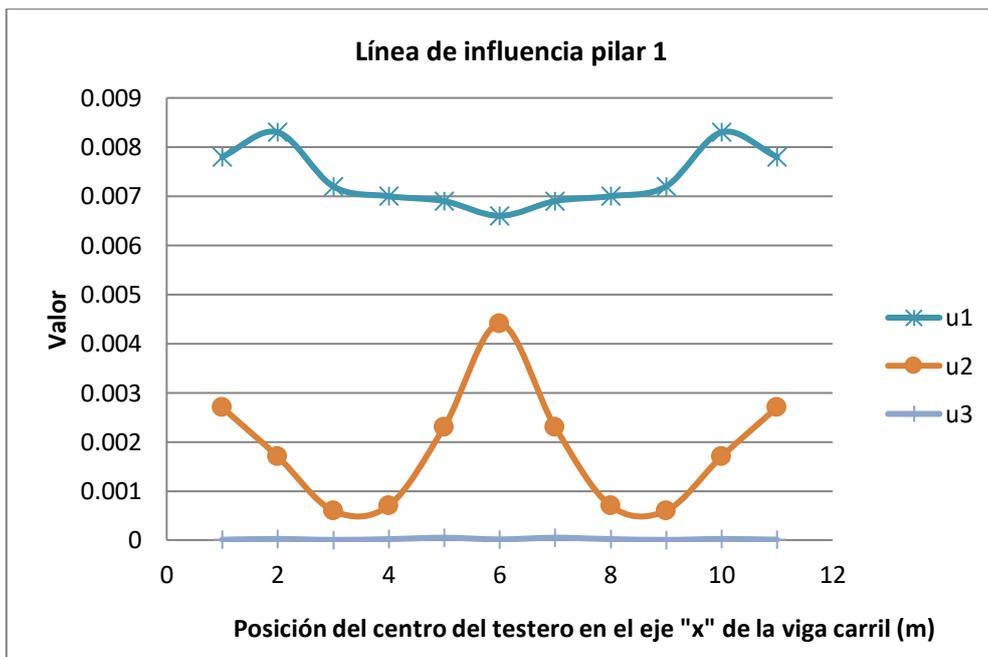


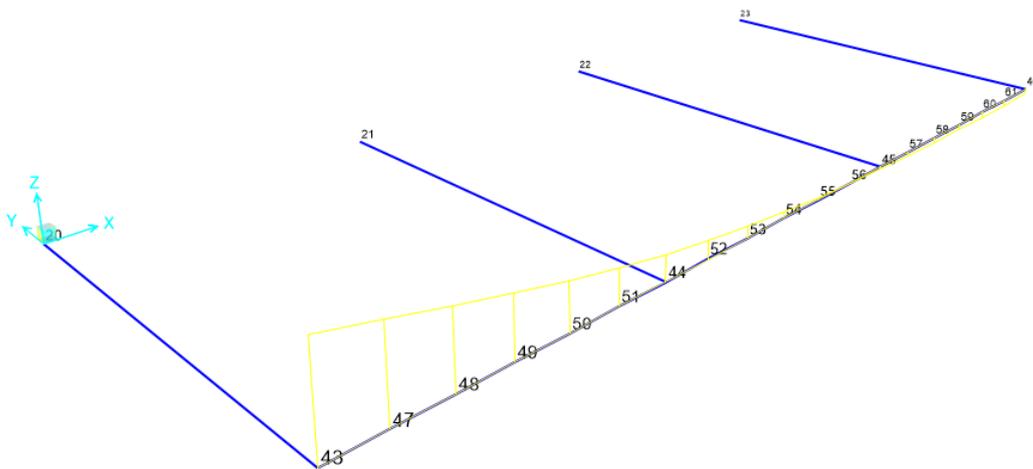
Imagen 143. Línea de influencia del desplazamiento del último pilar

**3.2.3. Línea de influencia del pórtico de la viga carril de la carga en el eje "y" en el pórtico "tumbado" (girado 90° en el eje "x"):**

Gracias a que al haber girado 90° el pórtico de la viga carril sobre el eje "x", la carga sobre el eje "y", ahora el programa de cálculo la tiene en cuenta como una carga en el eje "z", es decir, permite representar un tren de cargas móvil. Por lo tanto se pueden representar las líneas de influencia generadas por esta carga móvil sobre el pórtico de la viga carril.

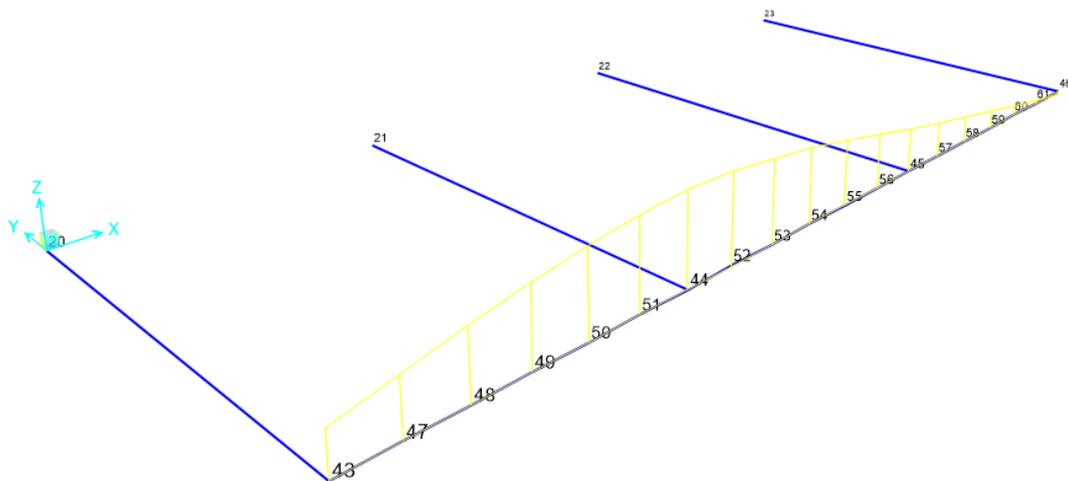
Se representan las siguientes líneas de influencia del pórtico de la viga carril mediante el software de cálculo "SAP2000":

- Línea de influencia de la reacción en el eje "3" para el apoyo del primer pilar:



**Imagen 144. Línea de influencia de la reacción vertical del apoyo del primer pilar**

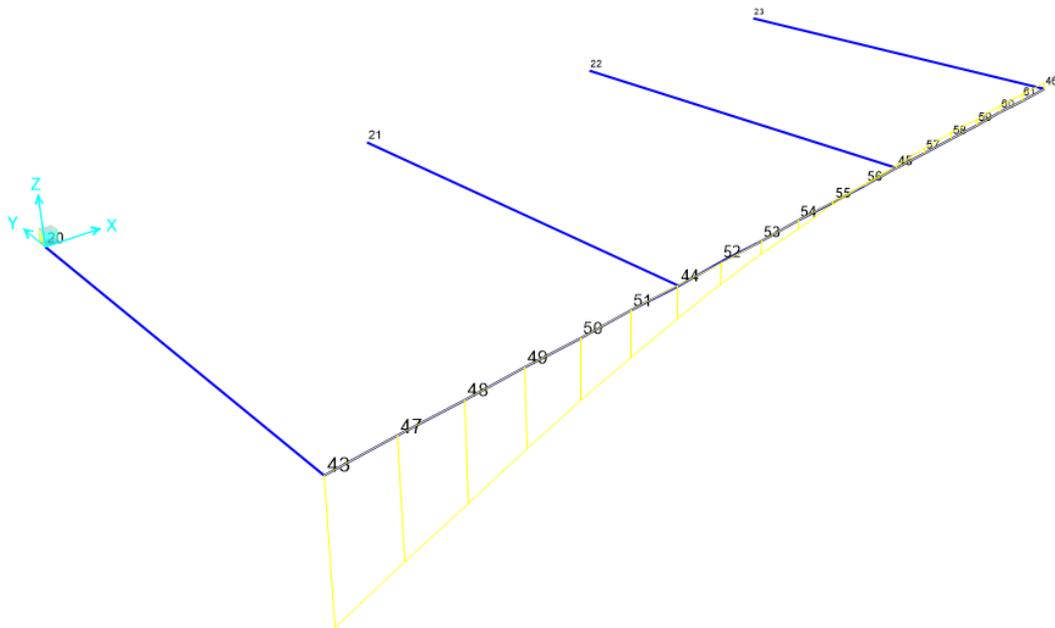
- Línea de influencia de la reacción en el eje "3" para el apoyo del segundo pilar:



**Imagen 145. Línea de influencia de la reacción vertical del apoyo del segundo pilar**

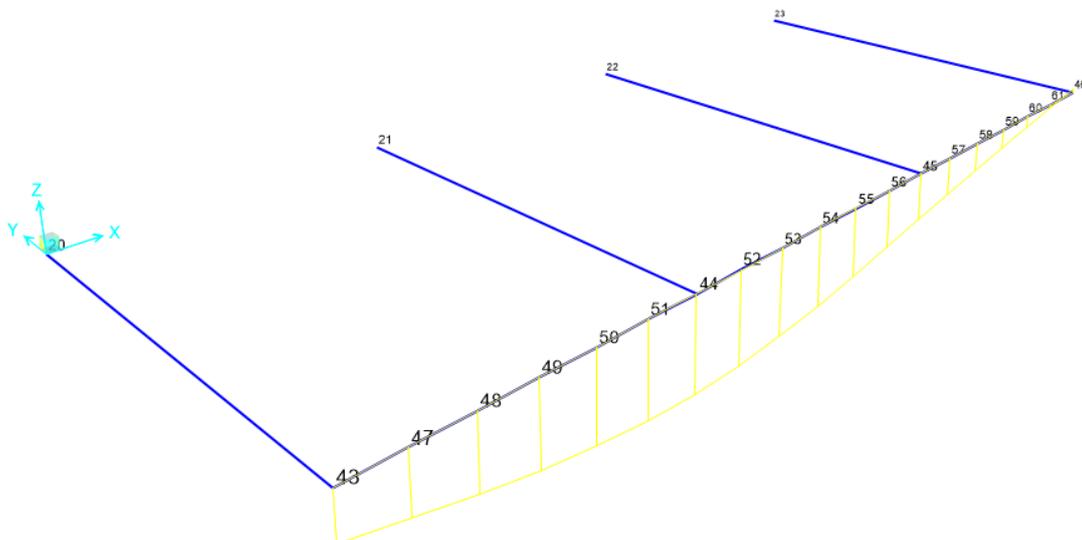
Existe simetría respecto del punto central del pórtico de la viga carril para los valores de las líneas de influencia. En esta caso, son de iguales valores pero simétricas las líneas de influencia de la reacción en el eje "3" para los apoyos del tercer y cuarto pilar, respecto del centro de la viga carril.

- Línea de influencia del momento flector en el eje "1" para el apoyo del primer pilar:



**Imagen 146. Línea de influencia del momento flector en el eje "1" del apoyo del primer pilar**

- Línea de influencia del momento flector en el eje "1" para el apoyo del segundo pilar:

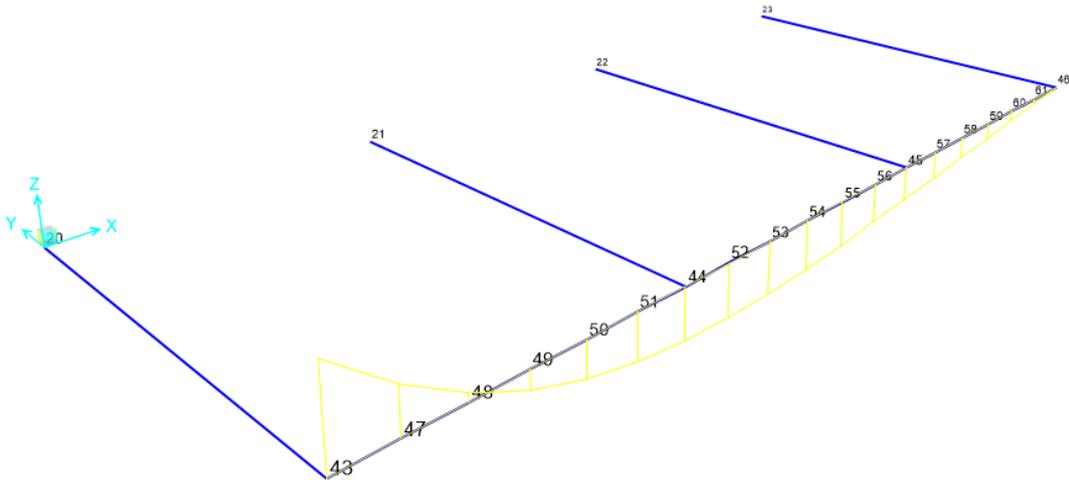


**Imagen 147. Línea de influencia del momento flector en el eje "1" del apoyo del segundo pilar**

De nuevo existe simetría respecto del punto central del pórtico de las viga carril para los valores de las líneas de influencia. En esta caso, las líneas de influencia del momento flector en el eje "3" son de iguales valores pero simétricas para los apoyos del tercer y cuarto pilar, respecto del centro de la viga carril.

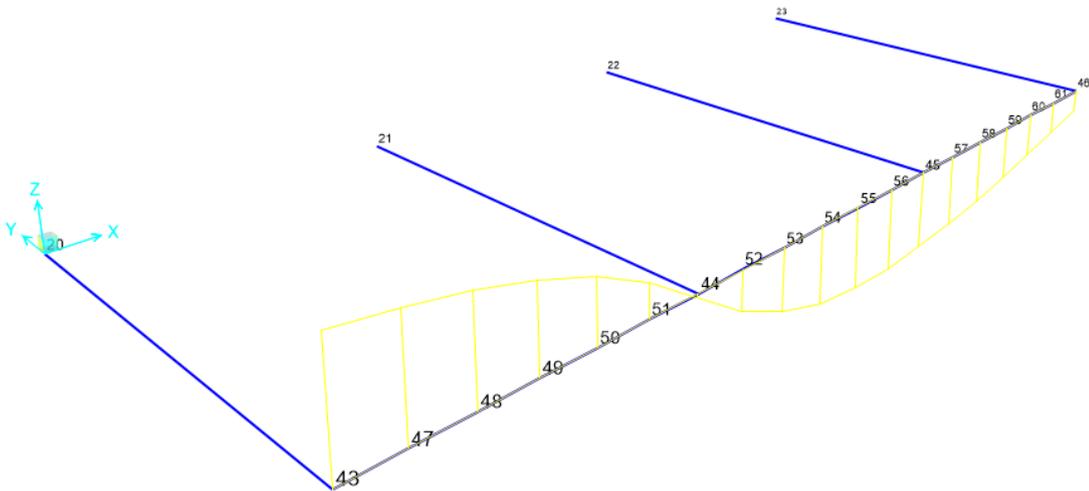
Los mismo ocurre tanto para la línea de influencia del momento flector en el eje "2", como para la línea de influencia del desplazamiento del punto de unión entre la viga carril y los pilares

- Línea de influencia del momento flector en el eje "2" para el apoyo del primer pilar:



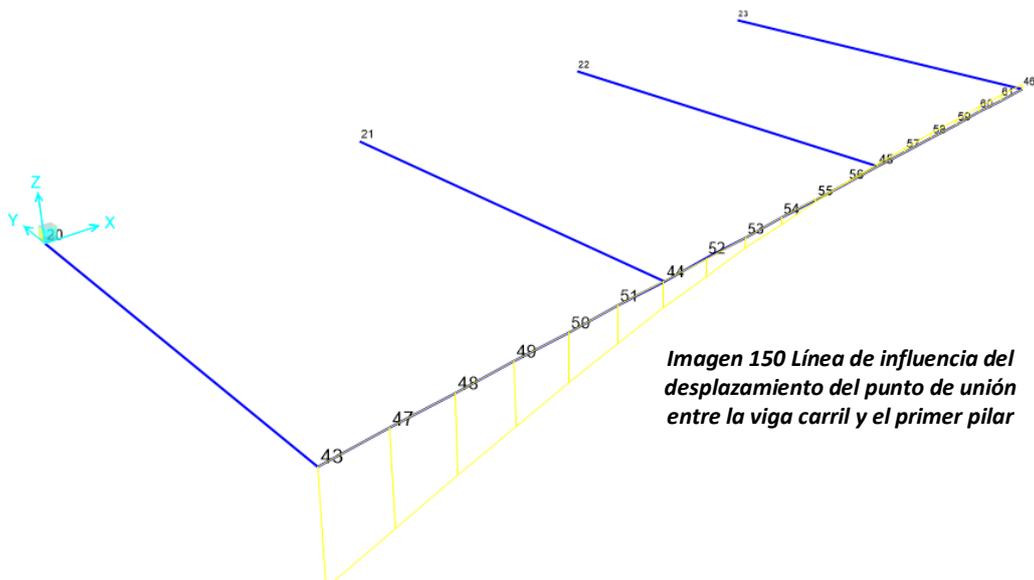
**Imagen 148. Línea de influencia del momento flector en el eje "2" del apoyo del primer pilar**

- Línea de influencia del momento flector en el eje "2" para el apoyo del segundo pilar:



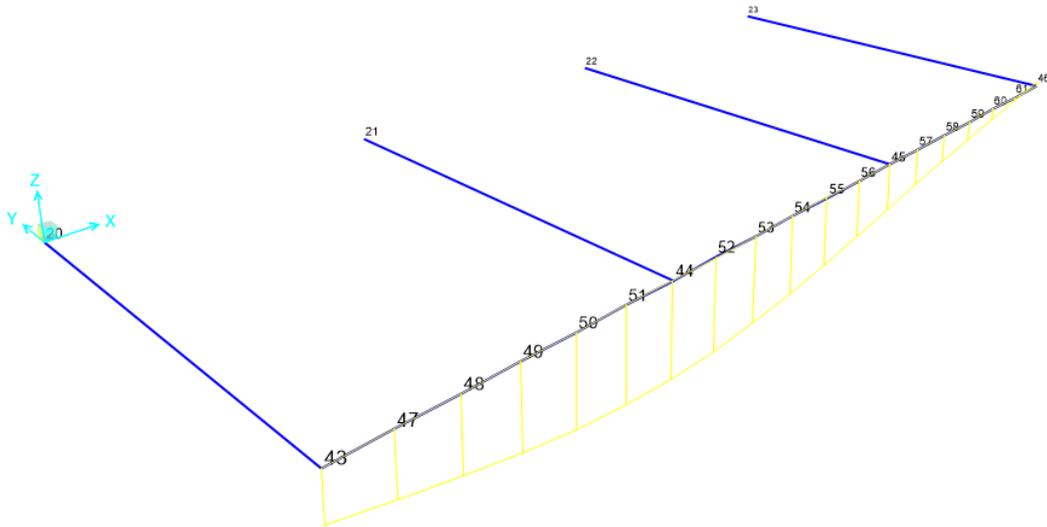
**Imagen 149. Línea de influencia del momento flector en el eje "2" del apoyo del segundo pilar**

- Línea de influencia del desplazamiento en el eje "3" del punto de unión entre la viga carril y el primer pilar:



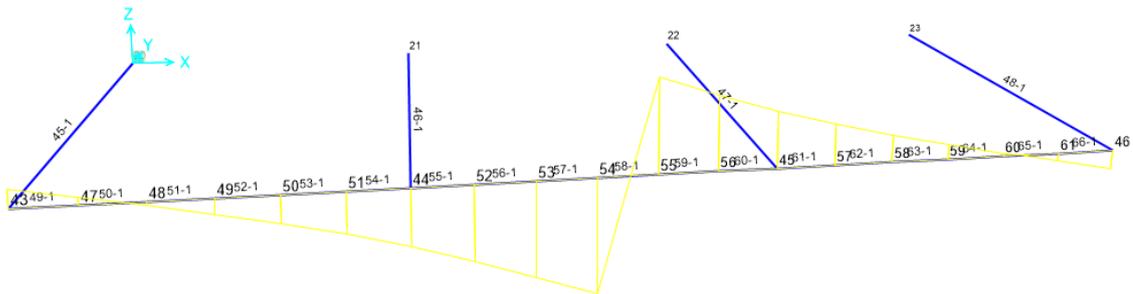
**Imagen 150 Línea de influencia del desplazamiento del punto de unión entre la viga carril y el primer pilar**

- Línea de influencia del desplazamiento en el eje "3" del punto de unión entre la viga carril y el primer pilar para el apoyo del segundo pilar:



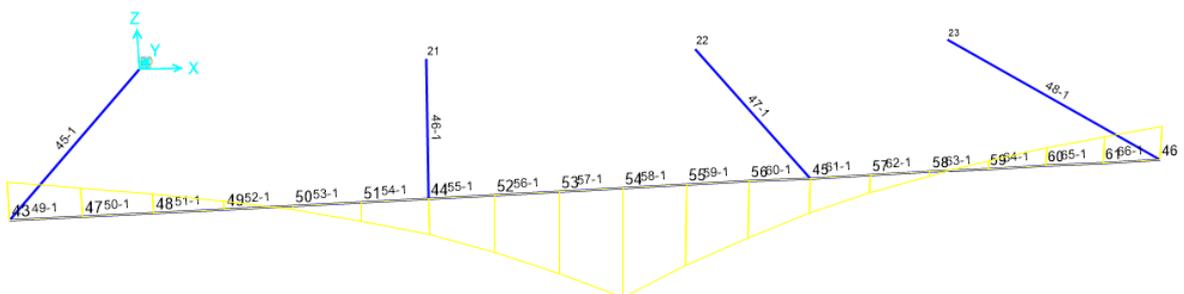
**Imagen 151. Línea de influencia del desplazamiento del punto de unión entre la viga carril y el segundo pilar**

- Línea de influencia del esfuerzo cortante "2-2" de la sección central:



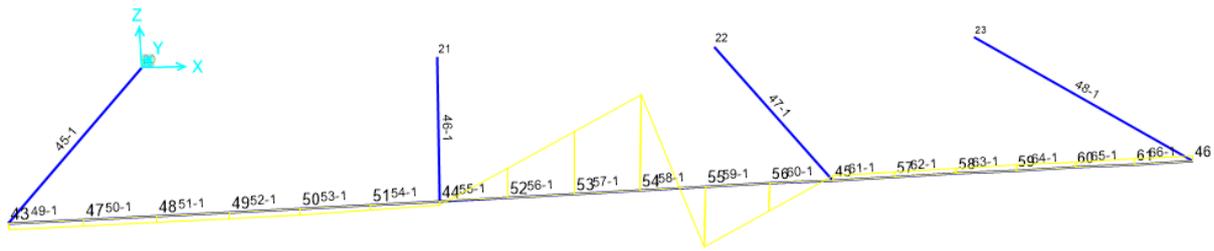
**Imagen 152. Línea de influencia del esfuerzo cortante "2-2" de la sección central**

- Línea de influencia del momento flector "2-2" de la sección central:



**Imagen 153. Línea de influencia del momento flector "2-2" de la sección central**

- Línea de influencia del momento torsor de la sección central:



*Imagen 154. Línea de influencia del momento torsor de la sección central*

Las líneas de influencia se han obtenido para el tren de cargas definido en el eje "y" con un valor de 1575 N, pero como se ha dicho anteriormente y queda explicado en el " **Anexo 1**: Guía para obtener líneas de influencia de una viga biapoyada mediante el software SAP2000", la limitación de este programa a la hora de representar líneas de influencia radica en que no representa las correspondientes a los trenes de cargas, es decir, dos cargas móviles que mantienen una distancia fija, por lo tanto únicamente tiene en cuenta el valor de la primera carga móvil.

Para representar las líneas de influencia pero del tren de cargas en su totalidad, se procedería de la misma manera que se ha realizado anteriormente, es decir, posicionar el tren de cargas como dos cargas puntuales, anotar los valores de las líneas de influencia que se buscan obtener e ir variando la posición del tren de cargas a lo largo de la viga carril, y representar estos valores respecto a la posición en el eje longitudinal de la viga carril.

A pesar de representar los diagramas de las líneas de influencia, también se pueden obtener las tablas de valores para cada punto de la viga carril para conocer el valor exacto dependiendo de cada posición.



### Capítulo 4. Conclusión y líneas de futuro:

El objetivo inicial de este TFG consistía en el estudio de cargas móviles a través de una estructura y el dimensionado de las dos estructuras principales de las que se compone un puente grúa.

Para ello se han realizado diferentes comprobaciones y ensayos críticos para cada estructura del puente grúa, fijando unas condiciones iniciales y dejando de libre selección otros parámetros.

Una vez se procedía con el dimensionado de cada una de las dos estructuras del puente grúa partiendo de las condiciones de diseño necesarias de este, se analizaba la respuesta de cada estructura ya dimensionada y fijadas sus características y propiedades.

La respuesta estudiada ha sido tensional y frecuencial. El dimensionado de cada una de las dos estructuras se ha basado en la aplicación de cargas fijas y puntuales en las posiciones más críticas para la respuesta tensional de cada una de ellas, de esta manera, se está dimensionado desde el lado de la seguridad.

Una vez se había procedido con el dimensionado de cada estructura, se realizaba la obtención y comprobación de las líneas de influencia para las cargas móviles que anteriormente si se simplificaban como cargas fijas puntuales estudiadas en las posiciones más críticas.

Tras realizar el dimensionado de cada estructura se concluye que el proceso del dimensionado es un proceso iterativo, y que además, puede ser válido un dimensionado para una comprobación pero no serlo para otra. De esta manera, es necesario tener en cuenta las condiciones de diseño y las comprobaciones a realizar para no empezar desde cero, sino partir de una base y por tanto de un orden de magnitud.

Para los diferente estudios en este TFG se ha usado como programa de apoyo el programa de cálculo "SAP2000", y siempre siguiendo la misma metodología, es decir, realizar todos los estudios posibles de manera teórica, verificar que los resultados coinciden con los que proporciona el programa de cálculo y, de esta manera, cuando la forma teórica-analítica no sea viable, poder utilizar los resultado que del programa para finalizar cada estudio y poder completar los objetivos del TFG.

Como líneas de futuro podrían existir algunas como por ejemplo completar determinados estudios con cargas, que además de móviles sean dependientes con el tiempo, o aplicar el estudio de las líneas de influencia de las cargas móviles para el diseño y dimensionado de otras estructuras, como puentes o pasarelas para el tránsito de vehículos y de personas.

Al igual que dentro del dimensionado y diseño de las diferentes estructuras del puente grúa, tener en cuenta más restricciones para poder realizar un estudio más detallado o dimensionar determinadas partes y componentes del puente grúa en su totalidad en función de su dependencia con la aplicación de cargas móviles.

Todo esto apoyándose en las diferentes comprobaciones de las estructuras realizadas en este TFG, al igual que en las indicaciones y explicaciones en el manejo del programa de cálculo para la aplicación de cargas fijas puntuales y cargas móviles para los diferentes estudios desarrollados en este TFG.

Consideraciones adicionales:

En cuanto a la realización de este TFG, no conlleva ningún impacto ambiental, debido a que para el desarrollo de este no han sido necesarios la utilización de más útiles diferentes al software de cálculo "SAP2000" y teoría analítica de estructuras.

Debido a la situación vivida durante el desarrollo del mismo, el "COVID-19" y sus medidas de confinamiento han llevado a reducir el estudio del TFG a únicamente la parte analítica y comparación de resultados con el software de cálculo. En un principio estaba pensado también realizar en el laboratorio de estructuras un estudio experimental mediante un robot previamente diseñado en anteriores TFGs, que se desplazaba por una pasarela biapoyada, simulando de esta manera el trascurso de una carga móvil por una estructura, como un vehículo o una persona circulando por un puente o pasarela o simulando el funcionamiento del carro de polipasto por la viga del puente grúa.

En el caso de haber realizado este estudio el impacto ambiental hubiera albergado la fabricación del propio robot, la energía eléctrica consumida al igual que el periodo de vida de los instrumentos empleados, además del reciclaje de los materiales con los que se fabrican.

Para evaluar el coste de este proyecto, se debe tener en cuenta el coste de las licencias del software de cálculo empleado al igual que las horas empleadas para el desarrollo del mismo.

Aproximadamente el salario de un Ingeniero en formación es de 20000 € anuales, con un trabajo realizado de unas 1800 horas al año, es decir la hora tiene un coste de 11,2€.

Para el total de los estudios realizados al igual que una primera toma de contacto y aprendizaje con el programa de cálculo utilizado se emplearon unas 200 horas, para la parte teórico-analítica se han empleado unas 100 horas, y para la parte del desarrollo de todos los estudios realizados, comprobación de resultados y desarrollo del tomo del TFG, se han empleado unas 200 horas, lo que hacen un total de 500 horas necesarias para realizar el proyecto, por lo tanto tiene un coste aproximado de 5600€.

Como se ha comentado anteriormente, esta inversión no es únicamente para el desarrollo de este TFG, ya que gran parte de los estudios realizados permitirán desarrollar otros proyectos que estén relacionados con estructuras sobre las que se aplican cargas móviles, como puentes o pasarelas para el tránsito de vehículos y de personas.

Por todo esto, se considera que se han logrado los objetivos del TFG, ya que se han conseguido las competencias de estudio previamente desarrolladas, al igual que las competencias personales, tales como la organización y planificación de un proyecto a lo largo del tiempo, al igual que el desarrollo del mismo de una manera autónoma, permitiendo desarrollar la capacidad de resolver ciertos problemas que han ido surgiendo durante el desarrollo del mismo, es decir, realizar un estudio de mejora continua.

## **Bibliografía y referencias:**

### **Referencias imágenes:**

Referencias [1]-[15] y [24]--> imágenes e información sobre los diferentes tipos de puentes grúa existentes: <https://www.cursosdemaquinaria.es/pdf/manual-puente-grua.pdf>

Referencias [16]- [17] <https://jasoindustrial.com/es/gruas-especiales/carro-abierto/#0>  
Referencia [18] <https://www.stahlcranes.com/es/productos/componentes-para-grua/vigas-de-testero.html>

Referencias [16], [17] y [18]--> imágenes e información sobre carros y testers de puentes grúa.

Referencias [19]-[23] --> tabla prontuario de vigas simples, utilizada para el cálculo de reacciones, diagramas de envolventes y ecuaciones de las líneas de influencia generadas por determinadas cargas móviles:

<https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/25612/1/Estructuras%20Met%C3%A1licas%20-%20Material%20apoyo.pdf>

### **Enlaces teórico-analítico:**

*Consulta de datos y conocimientos teóricos sobre las estructuras que componen un puente grúa al igual que su mecanismo de trabajo:*

- Componentes de un puente grúa: <https://gpantec.com/gruas-puente/>
- Foros de consulta: <https://www.soloarquitectura.com/foros/threads/apoyar-viga-carril-sobre-mensulas.70730/>
- Diferentes TFGs de años anteriores:

*"Simulación del tránsito peatonal en pasarelas esbeltas. Aplicación a la pasarela del Museo de Ciencia de Valladolid (EII UVA)":*

<https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/16822/TFG-I-358.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

*"Proyecto de edificio industrial con puente grúa para embarcaciones...(UPV)":*

[https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/53491/TFG\\_14362474417824689698499330338098.pdf?sequence=3](https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/53491/TFG_14362474417824689698499330338098.pdf?sequence=3)

De estos TFGs se ha extraído información de puentes grúa ubicados en naves industriales, al igual que el estudio de una pasarela de peatones con el paso de personas, todo esto relacionado con cargas fijas y móviles que afectan a las estructuras.

**Enlaces videos plataforma "Youtube":**

Videos "SAP2000":

- Definir una carga móvil que se desplaza a través de un camino determinado:

<https://www.youtube.com/watch?v=IYA2hi8Bm0w&feature=youtu.be>

- Empleo del módulo "Section designer":

<https://www.youtube.com/watch?v=qdaFaNC8awM>

- Representación de líneas de influencia:

<https://www.youtube.com/watch?v=T8pv-pRsMUg&feature=youtu.be&list=PL8n9kj7GGE9pPY6TrtCKAHQ7gO8LTcYAk>  
<https://www.youtube.com/watch?v=sa9rrOe3ZIk&list=PL8n9kj7GGE9pPY6TrtCKAHQ7gO8LTcYAk&index=2>

- Estudio del fenómeno de pandeo lateral y abolladura de la viga del puente grúa (necesario para el dimensionado del perfil):

<https://www.youtube.com/watch?v=MtdG2RcYIPA>  
<https://www.youtube.com/watch?v=-O5LIQtJvSU&t=457s>  
<https://www.youtube.com/watch?v=J7PzLHw9564&t=381s>

*Enlaces de videos de teoría sobre el dimensionado de los diferentes tipos de puentes grúa existentes:*

<https://www.youtube.com/watch?v=EmdT2z8NDpU&feature=youtu.be>  
<https://www.youtube.com/watch?v=A1-gx8afH3s&t=149s>  
<https://www.youtube.com/watch?v=wbhiFIDCtr0&feature=youtu.be>

*Enlace empleado en el predimensionado de los diferentes subcomponentes que componen la estructura total del puente grúa:*

[https://issuu.com/ghcranesandcomponents/docs/dimensiones\\_y\\_reacciones\\_cas](https://issuu.com/ghcranesandcomponents/docs/dimensiones_y_reacciones_cas)

*Líneas de influencia: teoría y cálculo necesario para su obtención:*

<https://www.youtube.com/watch?v=40eoOUT5THM&t=266s>  
<https://www.youtube.com/watch?v=QYlfH8gFQ8k&feature=youtu.be>  
<https://www.youtube.com/watch?v=j90ddhuLIOM&t=103s>

Para la realización de este TFG también ha sido necesaria la aplicación de la teoría y el cálculo analítico estudiado en asignaturas del grado de Ingeniería Mecánica, todas ellas relacionadas con la resistencia y elasticidad de materiales, al igual que las asignaturas relacionadas con el ámbito de las estructuras

### Anexo 1: Guía para obtener líneas de influencia de una viga biapoyada mediante el software "SAP2000":

1-Lo primero que se debe hacer es inicializar un nuevo modelo dentro del programa :

File --> new model

Tras esto, aparecerá la siguiente ventana:

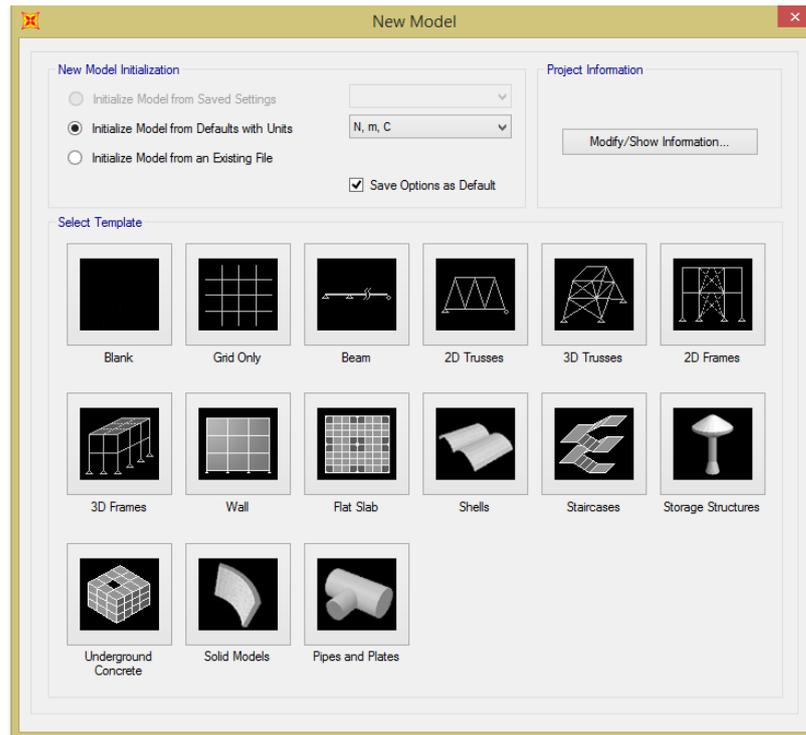


Imagen 155. Selección tipo de modelo en "SAP2000"

Se seleccionan las unidades con las que se quiere trabajar, en este caso las del sistema internacional: "N,m,C". Y se selecciona la opción "Grid Only", para así obtener la cuadrícula que permitirá dibujar la geometría de la estructura.

Tras seleccionar esta opción, aparece una ventana en la que se debe rellenar los valores para poder configurar la malla.

- "Number of Grid Lines" hace referencia al número de líneas de la malla que aparecerán en cada eje.
- "Grid Spacing" hace referencia a la separación entre dichas líneas.

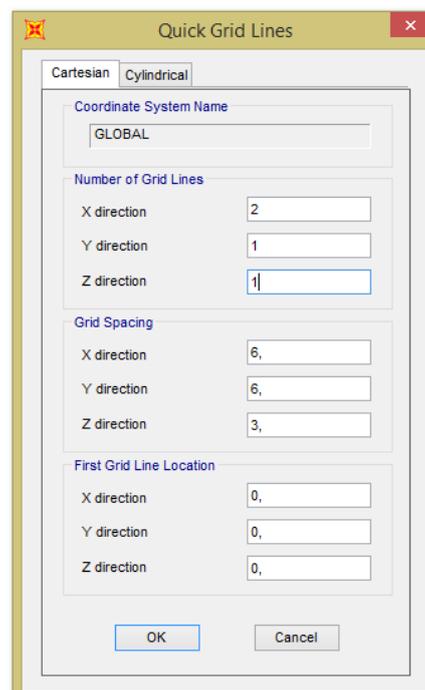


Imagen 156. Selección rejilla en "SAP2000"

El último de los 3 valores, no hace falta configurarlo para este ejercicio.

En el ejemplo se seleccionan 2 líneas en el eje "x" separadas 6 metros (siendo esta la longitud de la viga), que servirán para posicionar los extremos de la viga,

Una en el "z", la del eje "y" es arbitraria en este caso, pues es la tercera dimensión en el espacio, ya que trabajaremos en el plano "XZ".



Imagen 157. Ejes en "SAP2000"

2- Definir el material , para ello debemos seleccionar:

Define --> Materials

Tras esto, aparecerá la siguiente ventana:

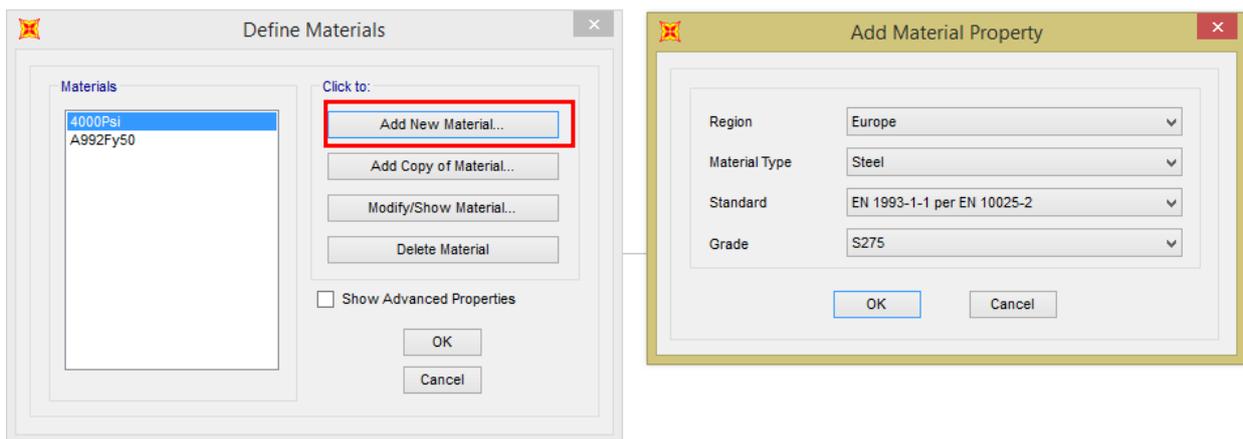


Imagen 158. Definición del material en "SAP2000"

En este ejemplo se selecciona un material, de Europa que cumpla la norma "EN 1993-1 1", en este caso acero "S275".

3-Definir la sección de la viga, para ello:

Define --> Section properties --> Frame sections

## Anexo 1: Guía para obtener líneas de influencia de una viga biapoyada mediante el software "SAP 2000"

Tras esto, aparecerá la siguiente ventana:

Se puede o crear una nueva sección, con el botón "Add New Property", o importar una sección ya creada de la librería del programa, seleccionando "Import New Property":

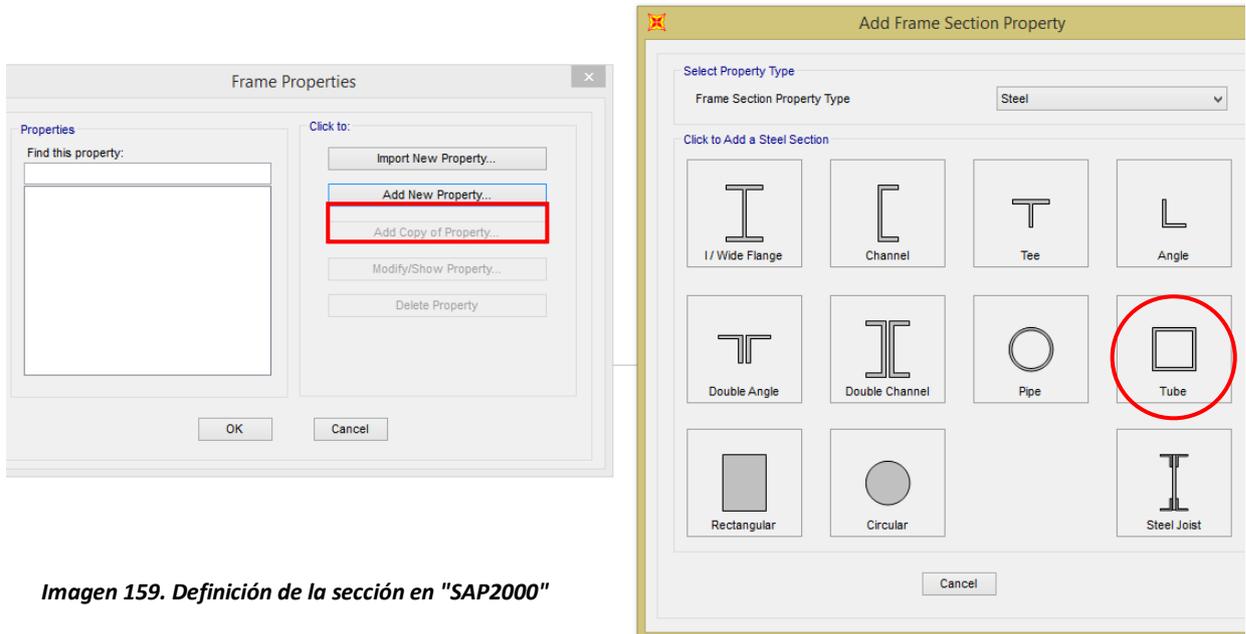


Imagen 159. Definición de la sección en "SAP2000"

En el ejemplo se genera una de tipo tubular cuadrada, en la siguiente ventana se puede dar la geometría que se quiere, al igual que seleccionar el material anteriormente creado, y el "Section Properties" se pueden modificar algunas de sus propiedades:

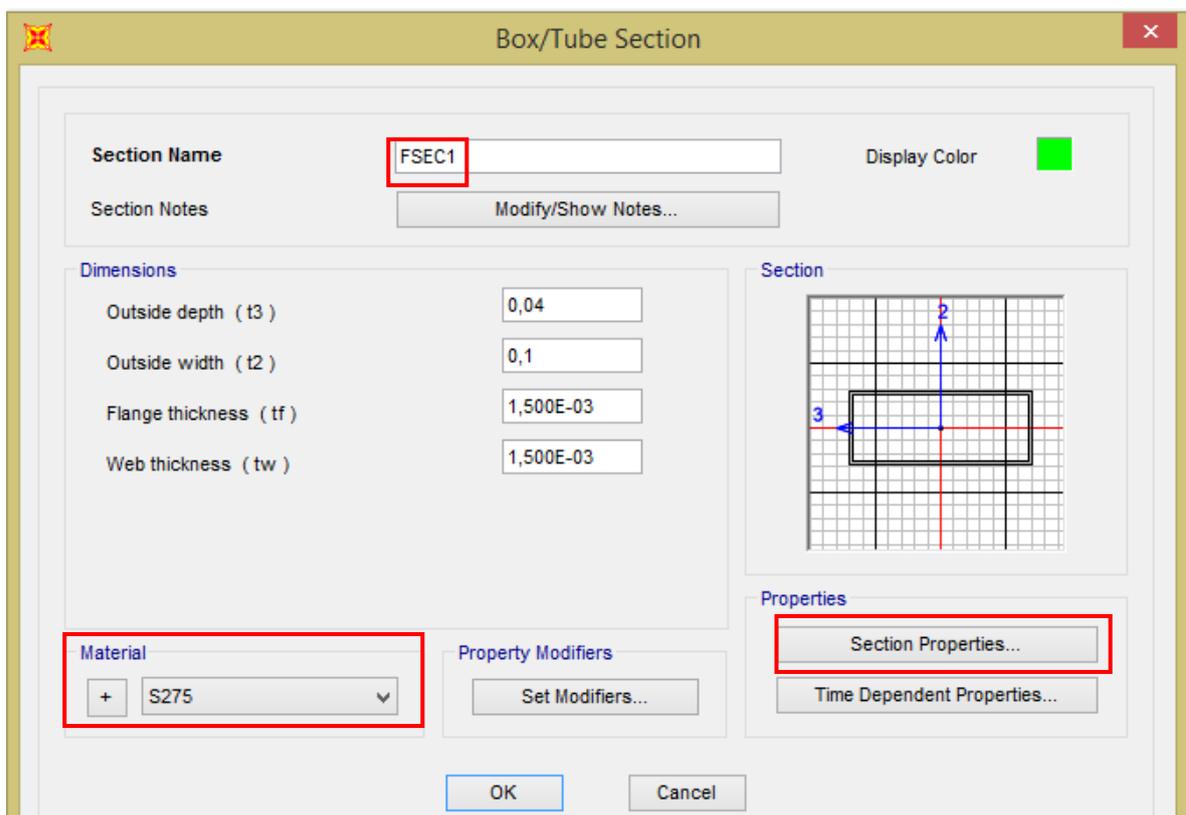


Imagen 160. Sección en "SAP2000"

#### 4-Dibujar la geometría de la viga:

Para ello vamos a utilizar el comando "Quick Draw Frame/Cable" para dibujar sobre la malla creada anteriormente la viga:



Quick Draw Frame/Cable, situado en la parte izquierda del panel de comandos

*Imagen 161. Comando "Quick Draw Frame/Cable en "SAP2000"*

A la hora de dibujar se selecciona el primer y último punto de la viga, teniendo en cuenta que se debe tener seleccionado la sección anteriormente creada.

Line Object Type	Straight Frame
Section	FSEC1
Moment Releases	Continuous
Local Axis Rotation	0,
XY Plane Offset Normal	0,

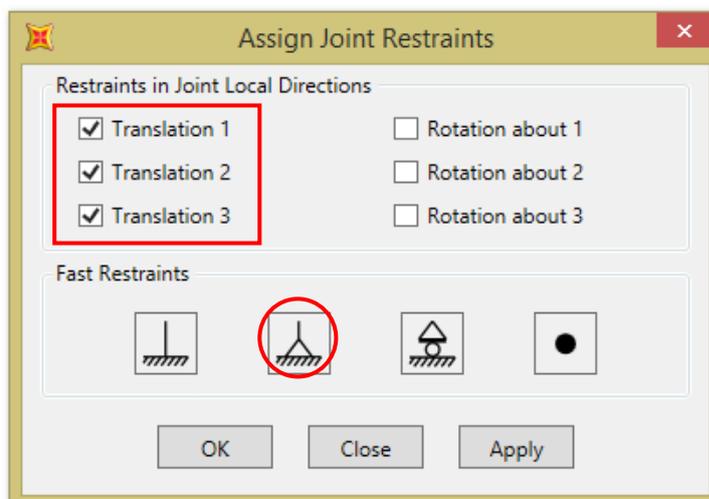


*Imagen 162. Representación de la viga con su perfil en "SAP2000"*

#### 5- Generar los apoyos de la estructura:

Seleccionando cada extremo de la viga, se selecciona:

Assign-->Joint-->Restraints



*Imagen 163. Restricciones de los apoyos en "SAP2000"*

## Anexo 1: Guía para obtener líneas de influencia de una viga biapoyada mediante el software "SAP 2000"

En nuestro ejemplo al ser una viga biapoyada se selecciona la opción de "apoyo fijo", es decir se restringen las traslaciones en todos los ejes , pero no restringimos ningún giro.

Se debe obtener lo siguiente:



Imagen 164. Representación viga biapoyada en "SAP2000"

Ahora se divide la viga en 4 tramos iguales, para afinar el resultado, para ello, con la viga seleccionada:

Edit --> Edit Lines --> Divide Lines

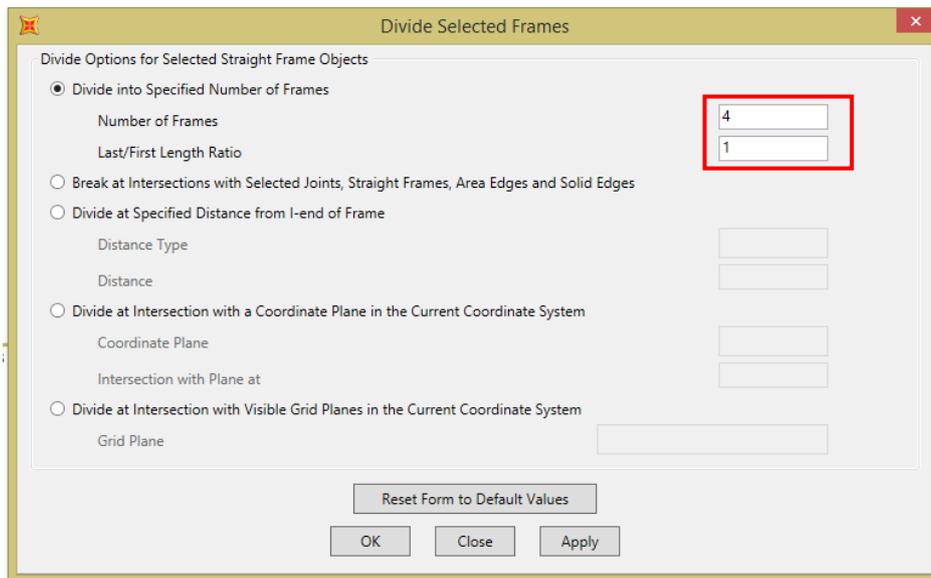


Imagen 165. Selección número de divisiones de una barra en "SAP2000"

Seleccionando este comando:



aparece la siguiente ventana:

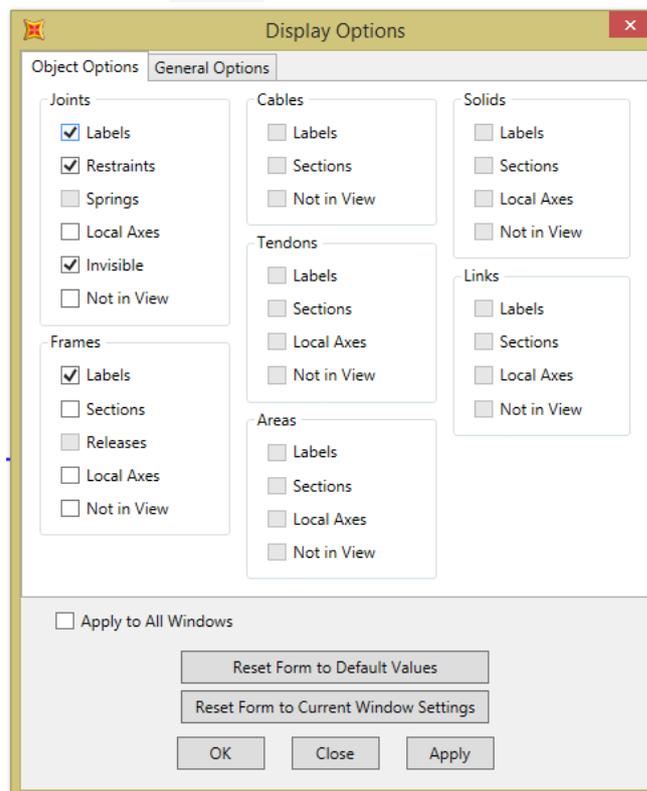


Imagen 166. Opciones visuales en "SAP2000"

En esta se puede seleccionar lo que se quiere visualizar, se selecciona "Labels" en "Joints" y "Frames" para poder ver el número de nodo y barra que SAP asigna a cada elemento de la viga, obtenemos lo siguiente:



Imagen 167. Representación de una viga biapoyada dividida en tramos en "SAP2000"

5-Definir la trayectoria de la carga móvil unitaria que generará las líneas de influencia para la viga biapoyada:

Para ello:

Define --> Moving Loads --> Path

Tras esto, aparecerá la siguiente ventana:

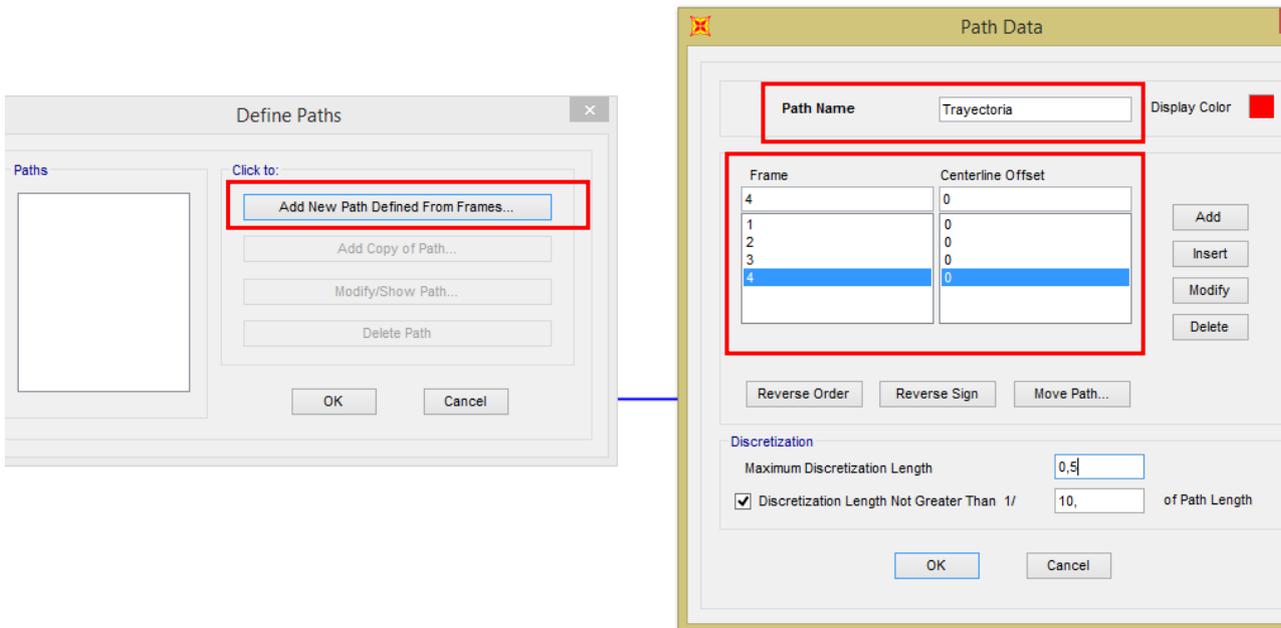


Imagen 168. Definición de un camino en "SAP2000"

En este, ponemos un nombre a la trayectoria y se debe seleccionar cada barra ("Frame") por la que pasará la carga, en el ejemplo la 1,2,3,4 al atravesar toda la viga, con un "centerline offset" de 0 metros siempre, este comando vale para hacer en una misma viga varios carriles, separados a una distancia del eje central de la viga.

## Anexo 1: Guía para obtener líneas de influencia de una viga biapoyada mediante el software "SAP 2000"

En la parte de "Discretization", se debe seleccionar el intervalo mínimo sobre el que realizar cada cálculo para así poder afinar el resultado obtenido:

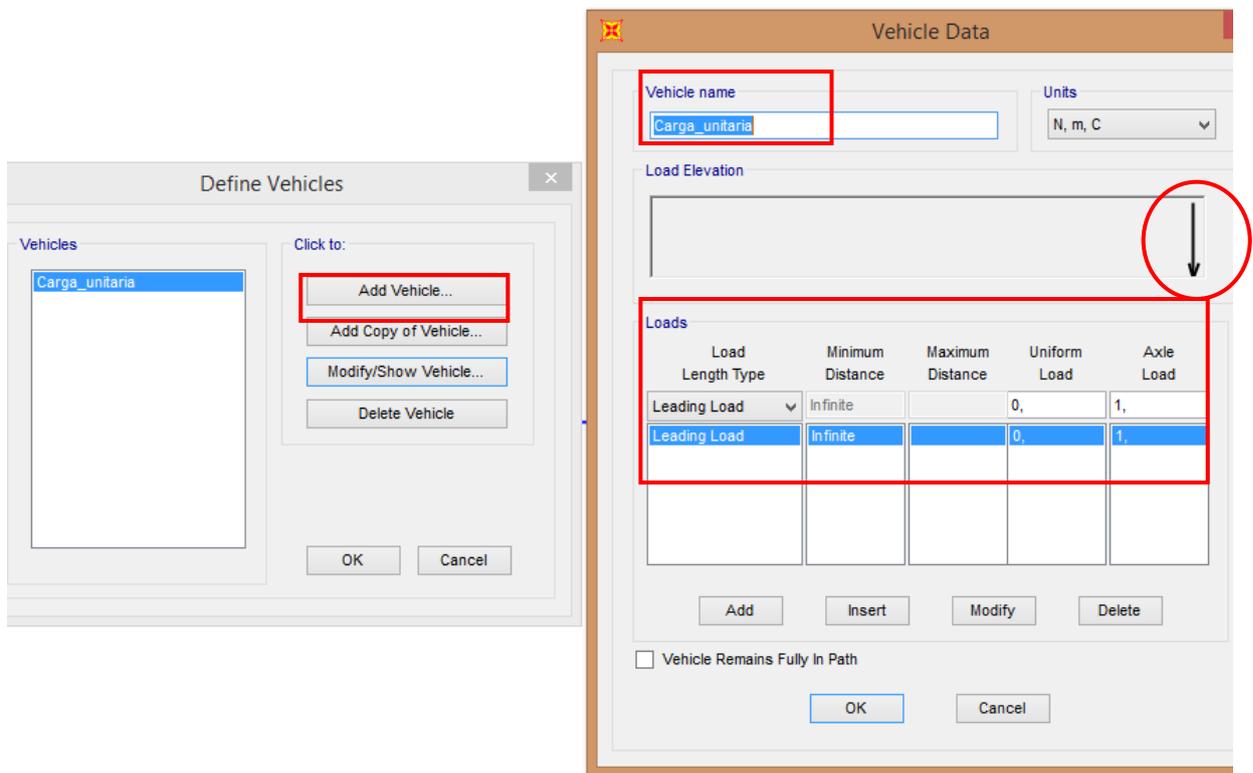
- "Maximun Discretization Length": longitud máxima de discretización.
- "Discretization Length Not Greater Than 1/\_": longitud máxima de discretización, pero respecto a la longitud total de la viga, mediante una fracción de "1/\_":

6-Definir la carga móvil unitaria:

Para ello:

Define --> Moving Loads --> Vehicle

Tras esto, aparecerá la siguiente ventana:



**Imagen 169. Definición de una carga móvil en "SAP2000"**

Aquí se selecciona el nombre de la carga y su valor, en este caso se selecciona la opción "Leading Load", que se refiere a una única carga y en el valor de "Axle Load" ponemos el valor de dicha carga. Es del tipo "Axle Load" ya que es un carga puntual y no distribuida ("Uniform Load").

A la hora de definir la carga, en el caso de no ser una única carga puntual, o ser un tren de cargas más complejo, el programa también nos da las opciones, en el desplegable de "Load Length Type" de:

- "Fixed Length": carga a una longitud fija de la primera carga ("Leading Load").
- "Variable length": carga a una longitud variable de la primera carga ("Leading Load").
- "Trailing Load": carga distribuida.

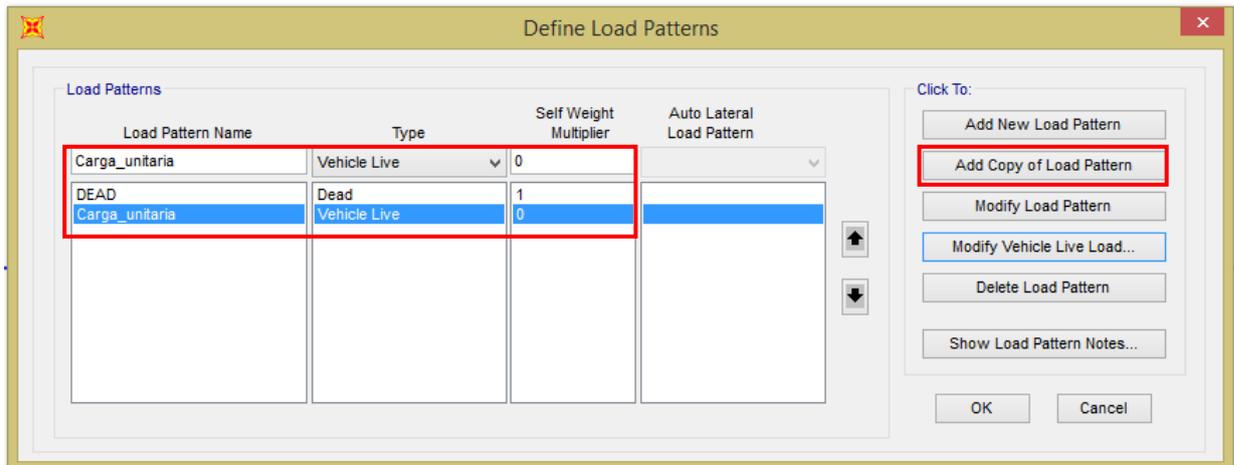
La opción de "Vehicles Remains Fully in Path", solo se selecciona en el caso de que la carga permanezca siempre dentro del camino anteriormente definido.

#### 7-Definir los patrones de carga del problema:

Para ello:

Define-->Load Patterns

Tras esto, aparecerá la siguiente ventana:



**Imagen 170. Definición de un patrón de cargas en "SAP2000"**

Se debe añadir un nuevo patrón de carga, en este caso del tipo "Vehicle Live"(con un multiplicador del peso propio de igual a cero) ya que se trata de una carga en movimiento.

### 8-Definir el caso de carga de la viga:

Para ello:

Define-->Load Cases-->Add new Load Case

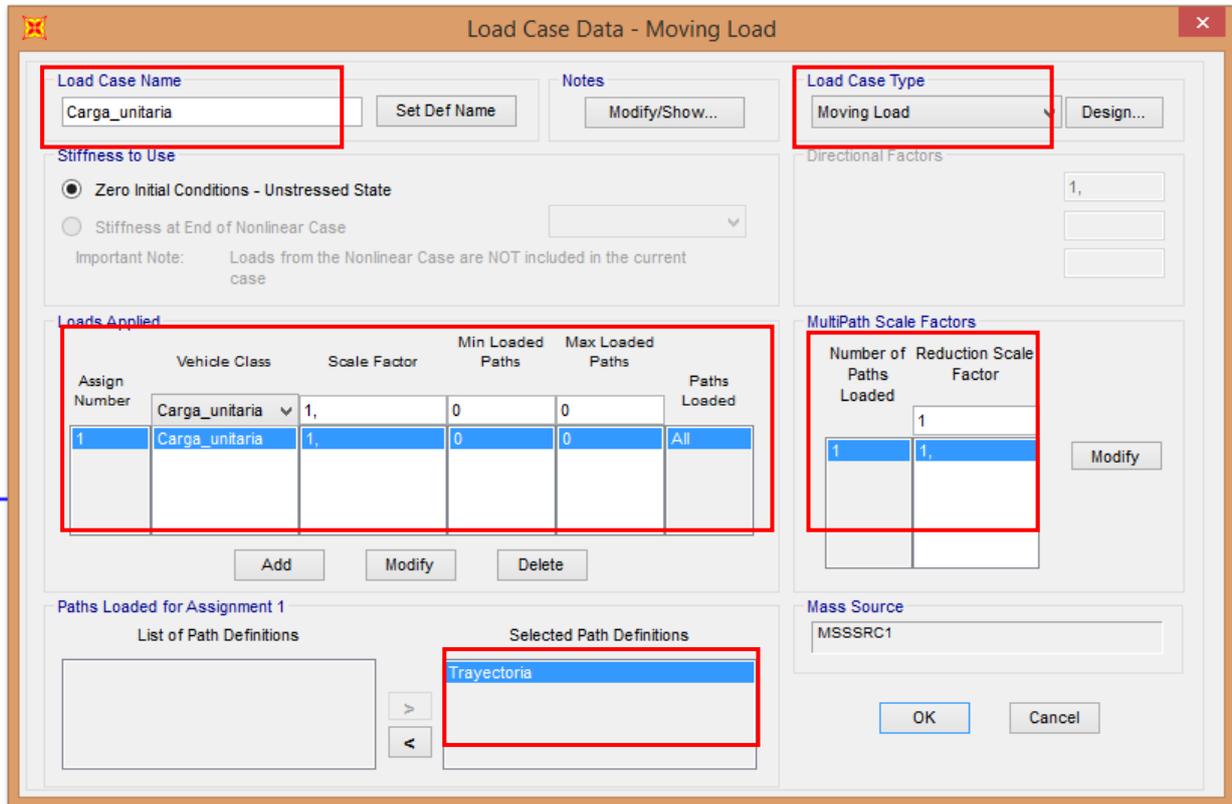


Imagen 171. Definición del caso de carga móvil en "SAP2000"

Se debe definir el nombre del caso de carga, el tipo, en ese caso "Moving Load", al tratarse de una carga móvil, en la pestaña de "Vehicle Class", se selecciona la carga anteriormente definida ("Vehicle").

En la pestaña de "Path" se debe seleccionar el camino que esta sigue a través de la viga. Con un factor de escala de 1 para el camino (debido a que solo tenemos un camino con un carril).

En nuestro ejemplo: "Carga\_unitaria" y "Trayectoria", se obtiene lo siguiente:

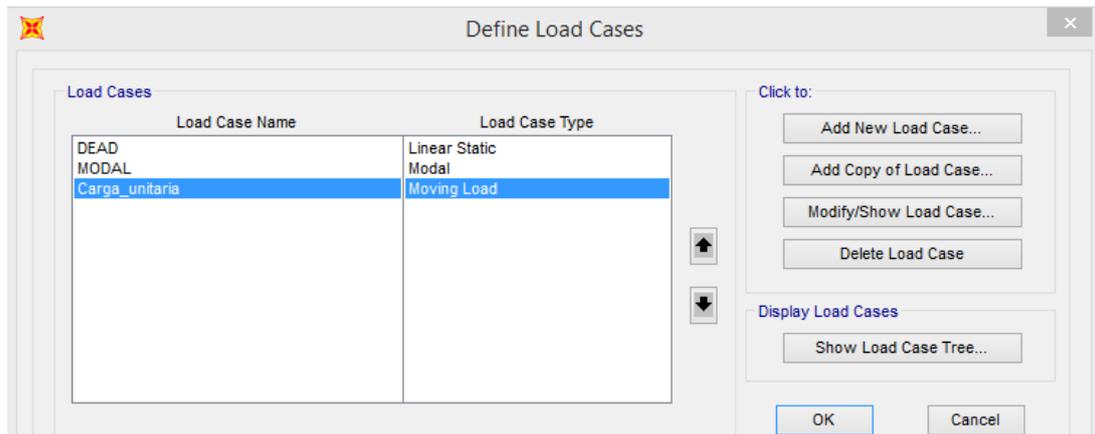


Imagen 172. Casos de carga ya definidos en "SAP2000"

Los casos de carga "DEAD" y "MODAL" se generan automáticamente por el programa y se refieren al peso propio de la estructura y al análisis modal (frecuencias) de la viga respectivamente.

9- Asegurarse de que los cálculos realizados por el programa no se salen del plano de trabajo "XZ":

Para ello:

Analyze --> Set Analyze Options

Tras esto aparecerá la siguiente ventana:

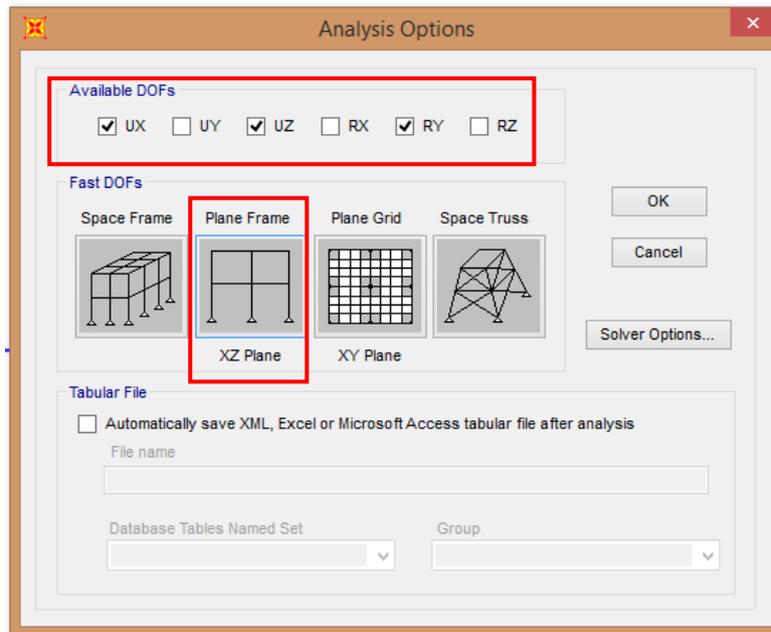


Imagen 173. Definición de las propiedades de estudio en "SAP2000"

Se selecciona la opción "Plane Frame".

10-Ejectar el modelo y los cálculos necesarios.

Para ello hacemos click en el icono:  tras esto aparecerá la siguiente ventana:

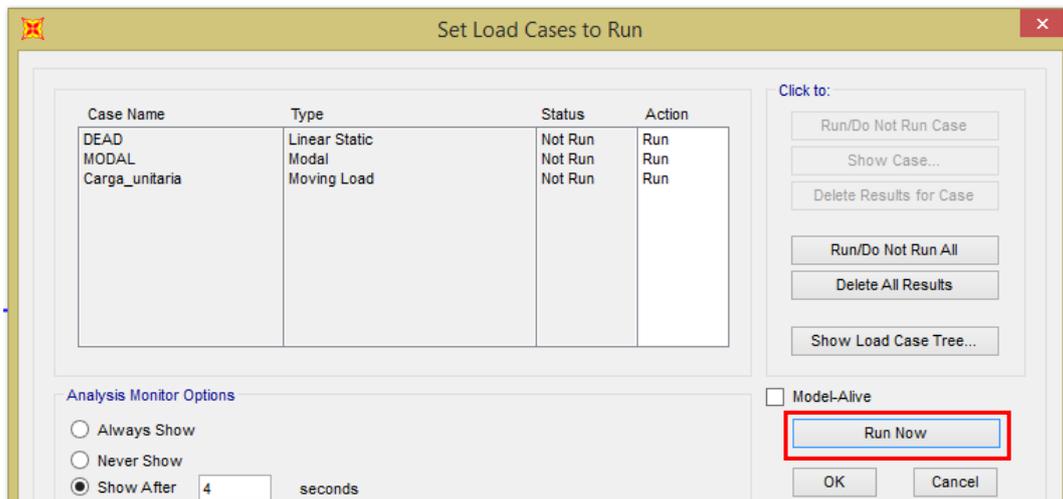


Imagen 174. Ejecutar el modelo en "SAP2000"

## Anexo 1: Guía para obtener líneas de influencia de una viga biapoyada mediante el software "SAP 2000"

Hacemos click en "Run Now" para ejecutar el modelo.

### 11-Obtener las líneas de influencia.

Se debe seleccionar la línea de influencia que se quiere obtener, es decir:

- Si se quiere la línea de influencia de una reacción de uno de los apoyos, o de una fuerza o momento de un punto de la viga, debemos seleccionar la opción "Joint".
- Si se quiere la línea de influencia de una de las barras, se selecciona la opción "Frame".

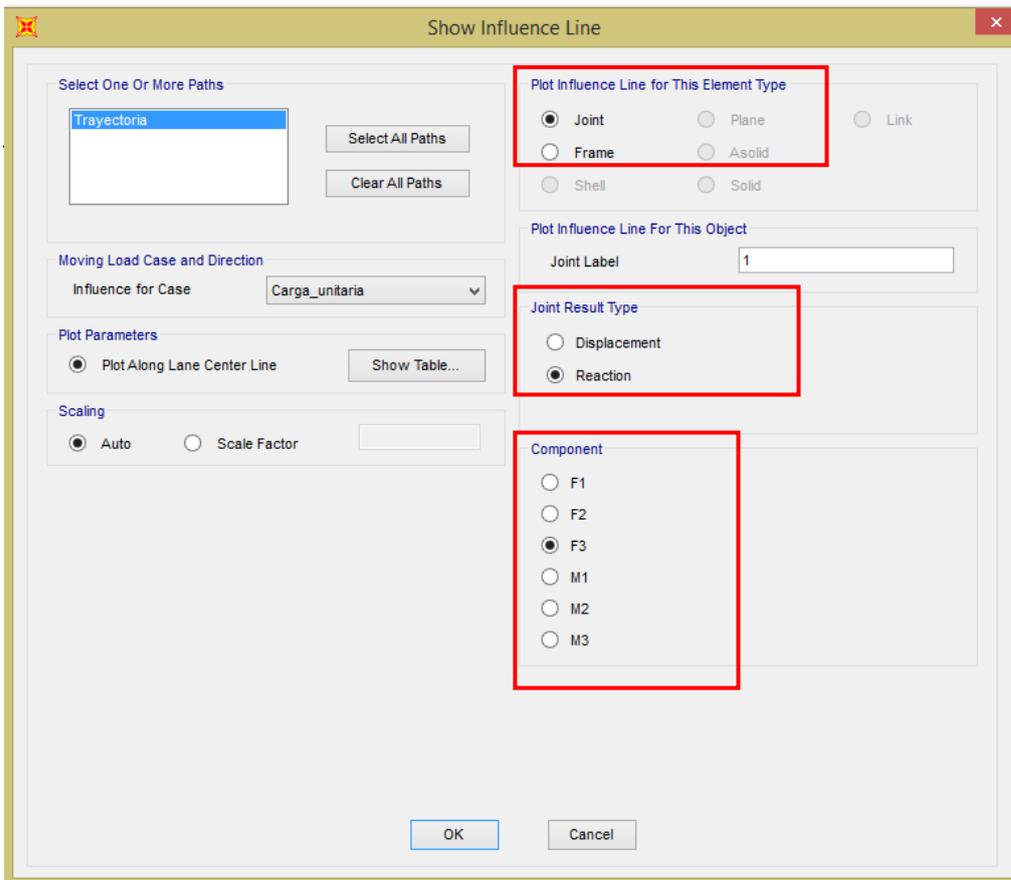
Después se indica la etiqueta o bien del nodo o bien de la barra.

En el caso de "Joint" debemos seleccionar:

- "Displacement". desplazamiento
- "Reaction":reacción

Y después seleccionar la componente sobre la que queremos obtener la línea de influencia, teniendo en cuenta que el plano de trabajo es el "xz", siendo "x"= eje 1, "y"= eje 2, "z"= eje 3.

#### Caso: "Joint"-->"Reaction"



**Imagen 175. Representar línea de influencia de reacciones de determinados puntos de la estructura en "SAP2000"**

Caso: "Joint" --> "Displazament":

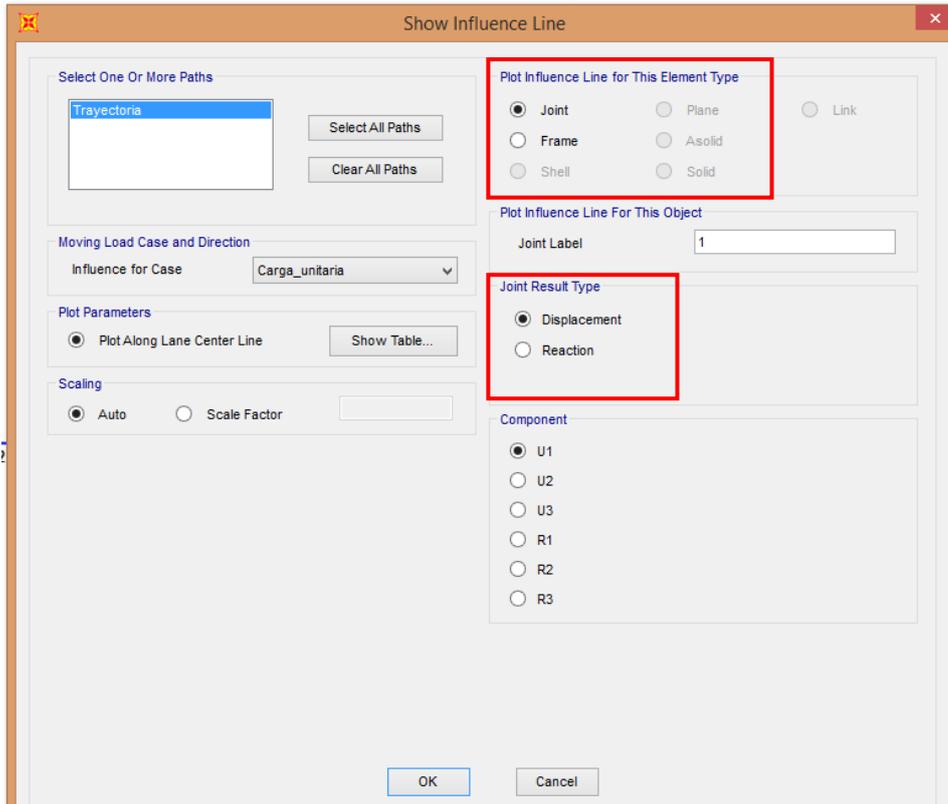


Imagen 176. Representar línea de influencia de desplazamientos de determinados puntos de la estructura en "SAP2000"

Caso: "Frame":

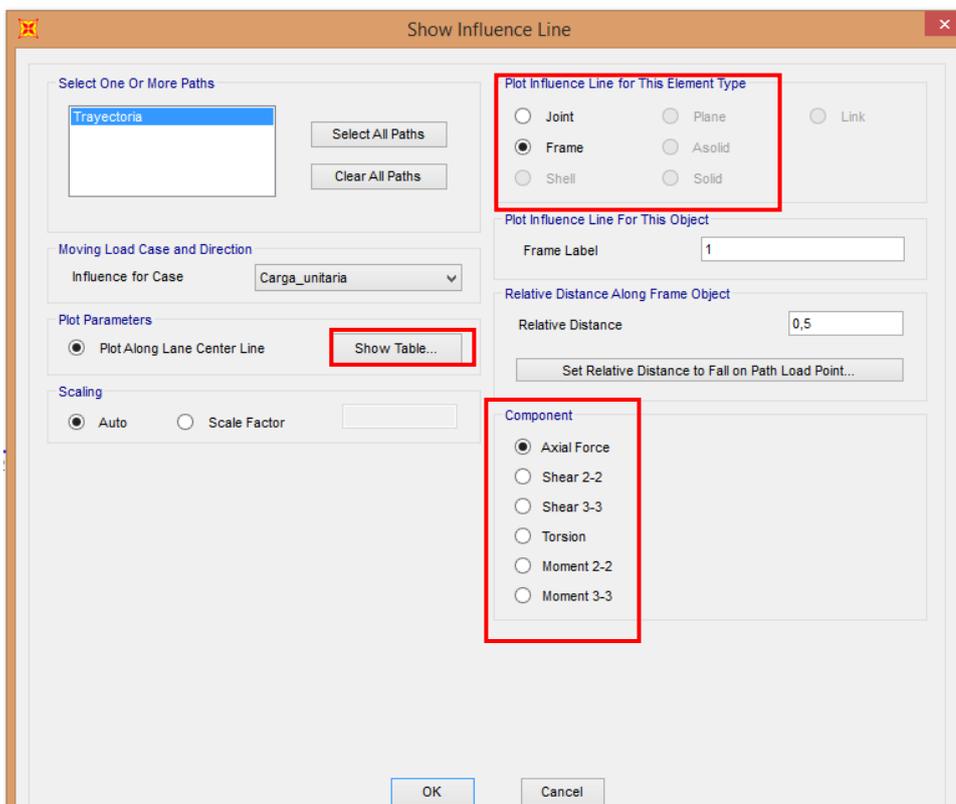


Imagen 177. Representar línea de influencia de los tramos de las barras de la estructura en "SAP2000"

Y seleccionar el tipo de esfuerzo :

- "Axial"= esfuerzo axial,
- "Shear"=esfuerzo cortante.
- "Moment "=momento flector.

En cualquiera de los casos se puede seleccionar la opción "OK" y se representará el diagrama de la línea de influencia seleccionada a lo largo de la viga, o seleccionar la opción "Show Table" y se mostrará una tabla con los valores de la línea de influencia seleccionada en cada caso

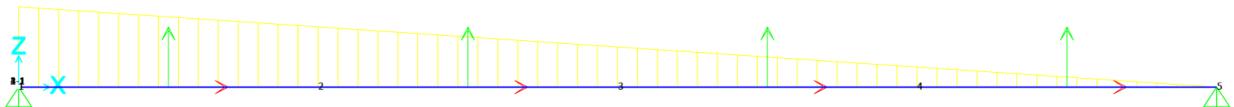
#### 11-Visualizar resultados:

Se debe tener en cuenta que e plano de trabajo es el plano "XZ", por tanto el eje vertical de la viga es el "z":

- ❖ Si se ejecuta la línea de influencia para la reacción en del primer apoyo, es decir:

Joint=1, reaction= F3

Se obtiene:

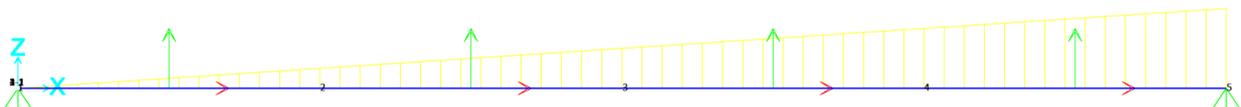


**Imagen 178. Representar línea de influencia de de la reacción vertical del primer apoyo en "SAP2000"**

- ❖ Si se ejecuta la línea de influencia para la reacción en del segundo apoyo, es decir:

Joint=5, reaction= F3

Se obtiene:

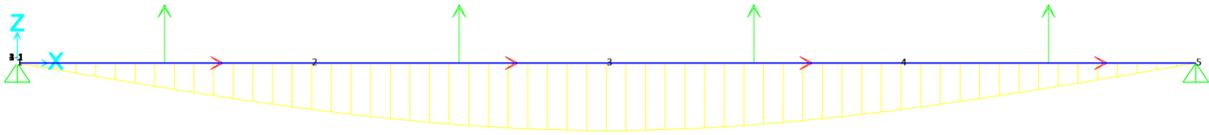


**Imagen 179. Representar línea de influencia de de la reacción vertical del último apoyo en "SAP2000"**

- ❖ Si se ejecuta la línea de influencia para el desplazamiento de la sección central, es decir:

Joint=3, displacement= U3

Se obtiene:

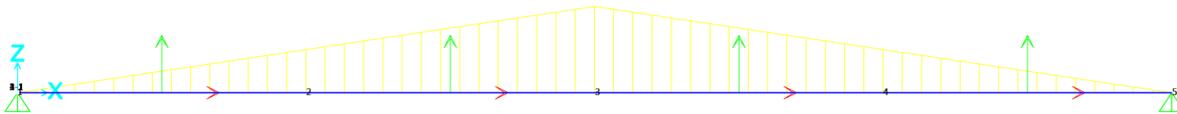


**Imagen 180. Representar línea de influencia del desplazamiento vertical de la sección central en "SAP2000"**

- ❖ Si ejecutamos la línea de influencia para el momento de la sección central, es decir:

Frame 2 (relative distance=1), reaction = M3

Se obtiene:



**Imagen 181. Representar línea de influencia del momento flector de la sección central en "SAP2000"**

## 12-Limitación para obtener otras líneas de influencia:

En el punto 6, de esta guía, se definían las cargas móviles unitarias, en el anterior ejemplo a la viga la recorría una carga móvil unitaria, si se quisieran obtener las líneas de influencia de por ejemplo dos cargas móviles unitarias separadas a una cierta distancia constante, es decir un tren de cargas, similar a la cargas que genera cada eje de un vehículo al recorrer una carretera de un puente por ejemplo, lo lógico sería seleccionar los comandos:

- "Leading Load" : para fijar la primera carga, igual que en el ejemplo anterior.
- "Fixed Length" : para fijar una segunda carga a una distancia fija de la anterior.

De esta manera el programa muestra el tren de cargas que se está haciendo recorrer la viga:

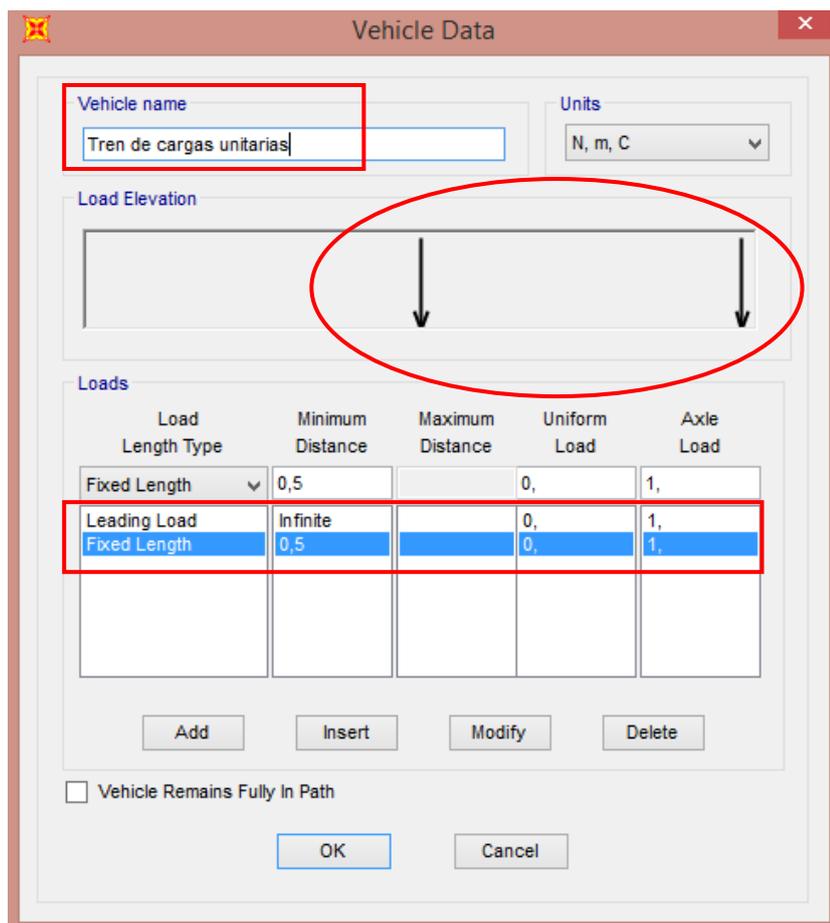


Imagen 182. Definición de un tren de cargas móviles en "SAP2000"

A pesar de que se ha fijado un tren de cargas formado por dos cargas unitarias separados a una distancia constante de 0,5 metros, el programa a la hora de calcular y representar las líneas de influencia solo tiene en cuenta el valor de la carga "Leading Load", es decir se obtiene los mismos resultados que en el ejemplo anterior sin la segunda carga unitaria a una distancia fija de la primera.

Luego para obtener este tipo de líneas de influencia "SAP2000" no es válido, pero pueden ser calculadas de manera teórica mediante equilibrios al tratarse de una viga bayoyada, es decir isostática.



### **Anexo 2: Comprobación del criterio de superposición para cualquier tipo de viga:**

Para el caso de estudio en el que se demostraba que se podía descomponer el pórtico de la viga carril en un soporte más un emparrillado, para obtener el resultado del pórtico total de la viga carril en el que se aplica un tren de cargas que tiene fuerzas en los tres ejes, se debe aplicar el principio de superposición entre los resultados obtenidos en el soporte y en el emparrillado.

Estos cálculos debidos al volumen y complejidad de los mismos se hacen inviables de obtener de manera teórica, por eso se va a realizar un estudio de una viga sencilla, en este caso empotrada libre, y se va a estudiar cómo se procedería a aplicar el principio de superposición al variar el eje de aplicación de la carga, y finalmente se demostrará que los resultados aplicando el método teórico y aplicando el principio de superposición, coinciden con los resultados que proporcionado el software de cálculo "SAP2000".

Se define una viga empotrada en uno de sus extremos, y libre en el otro, de 30 metros de longitud, con el mismo perfil que la viga cajón del puente grúa (cajón con alas de dimensiones 1,4x1x0,01x0,005 metros y las alas de 0,1x0,01 metros) de acero S275, y aplicamos una fuerza en su extremo de 196000 N que corresponden a las 20 toneladas de carga máxima del puente grúa. Estos datos seleccionados no varían los resultados mientras se mantengan iguales para el cálculo teórico y para el cálculo mediante el programa "SAP2000".

La elección de los parámetros geométricos y del valor de la carga aplicada en cada eje, es aleatorio, pudiéndose realizar el estudio variando cualquiera de las condiciones pero siempre manteniendo las mismas entre el método teórico y el método mediante el software de cálculo "SAP2000".

El eje longitudinal de la viga es el eje "z" se carga la viga en el eje "x", y en el eje "y" para después comprobar la superposición de cargas la viga en ambos ejes.

Mediante la aplicación del software se puede comprobar que coinciden los resultados con los obtenidos de manera teórica en el caso de aplicar la carga en un único eje. Además se puede, o aplicar el principio de superposición entre estos resultados para obtener los valores de la aplicación de las cargas en los dos ejes de manera simultánea, o aplicar las cargas en los ejes al mismo tiempo y calcular los valores de esfuerzos axiales y cortantes, momentos flectores y desplazamientos de la viga (deformada).

2.1. Método teórico. Aplicación del principio de superposición:

Se aplican las fórmulas del prontuario de vigas simples, en este caso para una viga empotrada-libre, con la aplicación de una única fuerza puntual:

<b>VIGA SIMPLE EN VOLADIZO: carga puntual <math>F</math> en extremo.</b>	
	<b>Reacciones y solicitaciones</b>
	Reacciones: $R_B = F$
	Cortantes: $V_{AB} = -F$
	Flectores: $M_{CB} = -Fx$ $M_B = -FL$
	<b>Deformaciones</b>
	Giros: $\varphi_A = \frac{FL^2}{2EI}$
	Elástica: $y_{AB} = \frac{F}{6EI}(L-x)^2(2L+x)$
	Flechas: $y_A = \frac{FL^3}{3EI}$

Imagen 183. Tabla prontuario aplicación de una carga puntual el extremo de una viga empotrada-libre [24]

Se obtienen los siguientes resultados:

2.1.1. Fuerza en el eje "x":

z (m)	V 2-2 (N)	M 3 (N·m)	N (N)	Ux (m)
0	-196000	0	0	0,60869565
1	-196000	-196000	0	0,57827214
2	-196000	-392000	0	0,54791626
3	-196000	-588000	0	0,51769565
4	-196000	-784000	0	0,48767794
5	-196000	-980000	0	0,45793076
6	-196000	-1176000	0	0,42852174
7	-196000	-1372000	0	0,39951852
8	-196000	-1568000	0	0,37098873
9	-196000	-1764000	0	0,343
10	-196000	-1960000	0	0,31561997
11	-196000	-2156000	0	0,28891626
12	-196000	-2352000	0	0,26295652

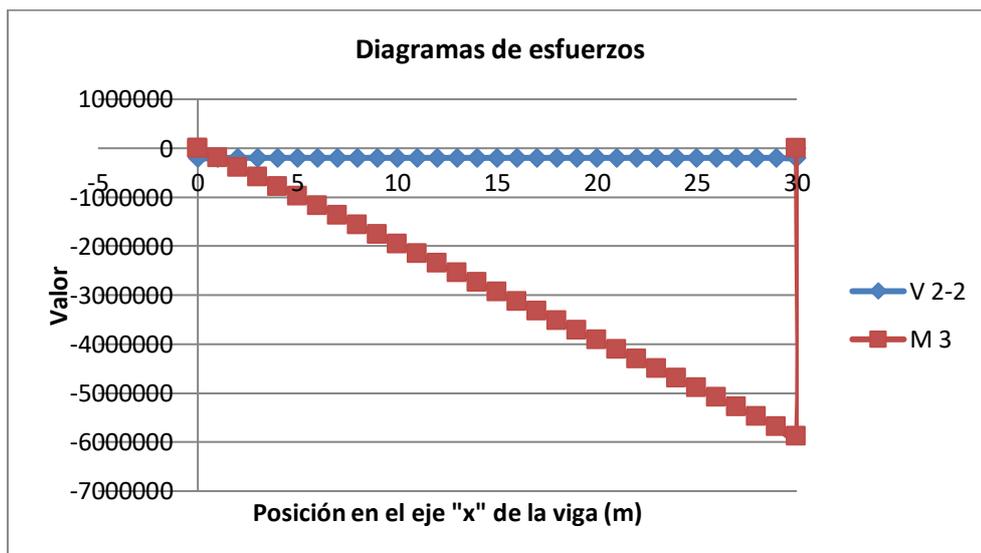
Anexo 2: Comprobación del criterio de superposición para cualquier tipo de viga

13	-196000	-2548000	0	0,23780837
14	-196000	-2744000	0	0,21353945
15	-196000	-2940000	0	0,19021739
16	-196000	-3136000	0	0,16790982
17	-196000	-3332000	0	0,14668438
18	-196000	-3528000	0	0,1266087
19	-196000	-3724000	0	0,1077504
20	-196000	-3920000	0	0,09017713
21	-196000	-4116000	0	0,07395652
22	-196000	-4312000	0	0,0591562
23	-196000	-4508000	0	0,0458438
24	-196000	-4704000	0	0,03408696
25	-196000	-4900000	0	0,0239533
26	-196000	-5096000	0	0,01551047
27	-196000	-5292000	0	0,00882609
28	-196000	-5488000	0	0,00396779
29	-196000	-5684000	0	0,00100322
30	-196000	-5880000	0	0

**Tabla 75. Valores de esfuerzos internos y desplazamientos en la viga empotrada-libre**

Graficando los anteriores resultados se obtienen los diagramas de los esfuerzos cortantes y momentos flectores, y los desplazamientos de los puntos de la viga (deformada):

- Diagramas de esfuerzos cortantes y momentos flectores:



**Imagen 184. Diagrama de esfuerzos de la viga empotrada-libre**

- Desplazamientos de los puntos de la estructura (deformada de la viga):

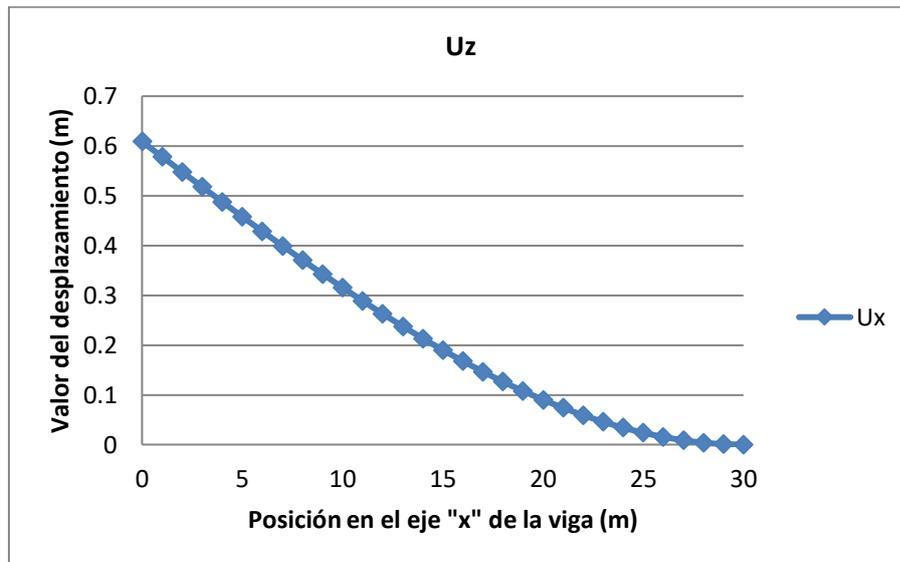


Imagen 185. Diagrama del desplazamiento vertical de la viga empotrada-libre

### 2.1.2. Fuerza en el eje "y":

z (m)	V 3-3 (N)	M 2 (N·m)	N (N)	Uy (m)
0	-196000	0	0	0,60869565
1	-196000	-196000	0	0,57827214
2	-196000	-392000	0	0,54791626
3	-196000	-588000	0	0,51769565
4	-196000	-784000	0	0,48767794
5	-196000	-980000	0	0,45793076
6	-196000	-1176000	0	0,42852174
7	-196000	-1372000	0	0,39951852
8	-196000	-1568000	0	0,37098873
9	-196000	-1764000	0	0,343
10	-196000	-1960000	0	0,31561997
11	-196000	-2156000	0	0,28891626
12	-196000	-2352000	0	0,26295652
13	-196000	-2548000	0	0,23780837
14	-196000	-2744000	0	0,21353945
15	-196000	-2940000	0	0,19021739
16	-196000	-3136000	0	0,16790982
17	-196000	-3332000	0	0,14668438
18	-196000	-3528000	0	0,1266087
19	-196000	-3724000	0	0,1077504
20	-196000	-3920000	0	0,09017713
21	-196000	-4116000	0	0,07395652
22	-196000	-4312000	0	0,0591562
23	-196000	-4508000	0	0,0458438

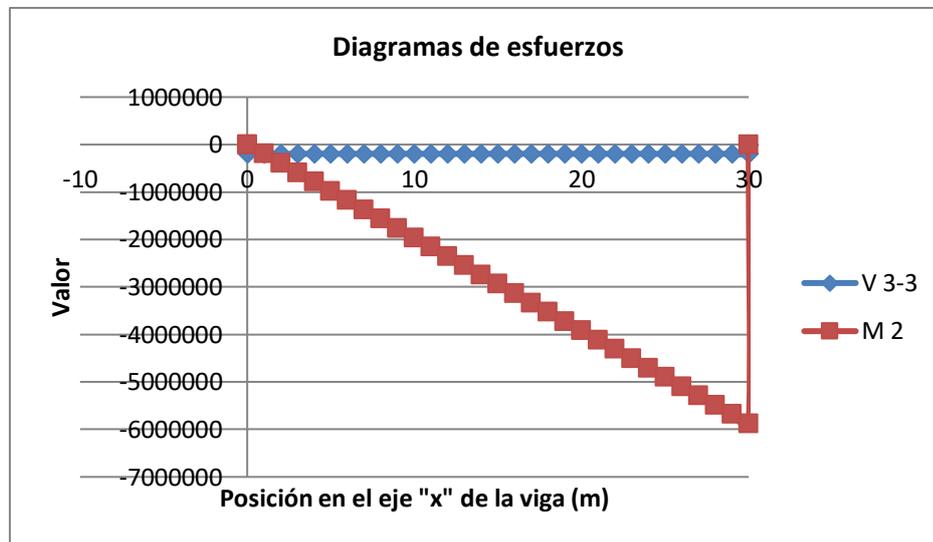
Anexo 2: Comprobación del criterio de superposición para cualquier tipo de viga

24	-196000	-4704000	0	0,03408696
25	-196000	-4900000	0	0,0239533
26	-196000	-5096000	0	0,01551047
27	-196000	-5292000	0	0,00882609
28	-196000	-5488000	0	0,00396779
29	-196000	-5684000	0	0,00100322
30	-196000	-5880000	0	0

**Tabla 76.** Valores de esfuerzos internos y desplazamientos en la viga empotrada-libre

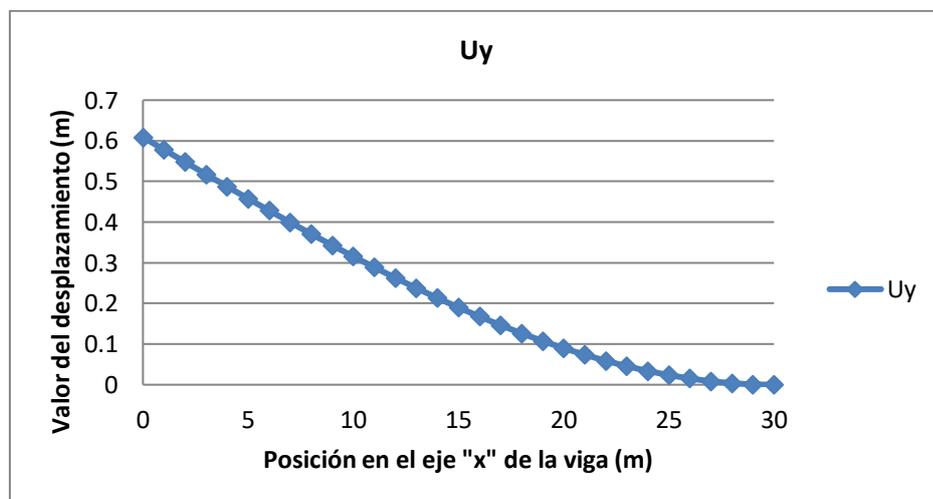
Graficando los anteriores resultados se obtienen los diagramas de los esfuerzos cortantes y momentos flectores, y los desplazamientos de los puntos de la viga (deformada):

- Diagramas de esfuerzos cortantes y momentos flectores:



**Imagen 186.** Diagrama de esfuerzos de la viga empotrada-libre

- Desplazamientos de los puntos de la estructura (deformada de la viga):



**Imagen 187.** Diagrama del desplazamiento vertical de la viga empotrada-libre

## 2.2. Mediante el software de cálculo "SAP 2000":

Para llevar a cabo este método al igual que en los casos anteriores en los que se empleaba el programa de cálculo, se debe definir tanto la geometría de la viga, material y sección de la misma, como la carga aplicada.

Por lo tanto, se define una viga de 30 metros de longitud sobre el eje "z", con uno de sus extremos empotrado (restringiéndose todos los desplazamientos y giros posibles en el espacio), y el otro extremo libre.

Además se define la sección anteriormente detalla mediante el módulo "Section designer" y el material con el que se fabricar la viga como acero S275, y se realizan tres casos de estudio:

- **2.2.1.** Fuerza en el eje "x".
- **2.2.2.** Fuerza en el eje "y".
- **2.2.3.** Fuerza aplicada en el eje "x" y en el eje "y".

El valor de la fuerza aplicada en cada eje es de 196000 N, que como en el método teórico, ésta coincide con el valor de la carga máxima teórica del puente grúa.

### 2.2.1. Fuerza en el eje "x":

Se aplica una fuerza de valor 196000 N en el eje "x" de la viga, en el extremo libre de esta, se obtienen los siguientes resultados:

Los esfuerzos axiales son nulos, debidos a que no se aplica ninguna carga en el eje longitudinal de la viga, en este caso el eje "z".

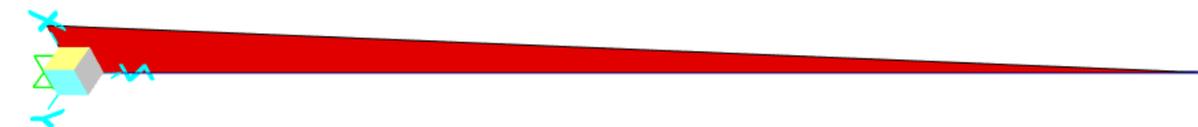
- Diagramas de esfuerzos cortantes:



*Imagen 188. Diagrama del esfuerzo cortante de la viga empotrada-libre*

El esfuerzo cortante es constante y de valor 196000 N. Corresponde con los esfuerzos cortantes en el eje "2-2"

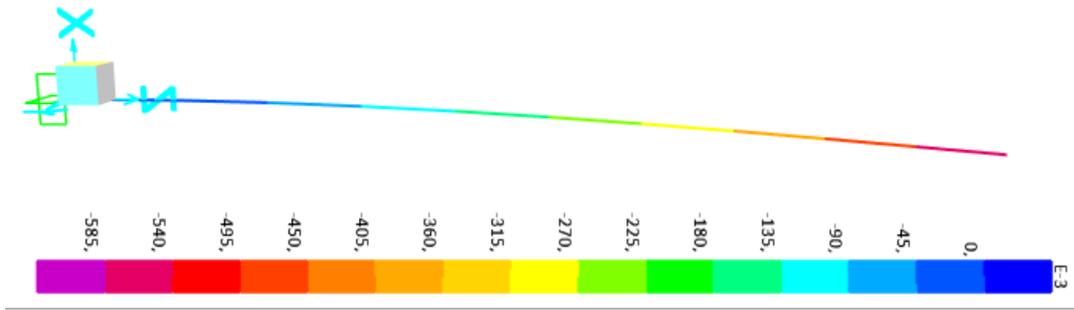
- Diagramas de momentos flectores:



*Imagen 189. Diagrama del momento flector de la viga empotrada-libre*

El diagrama de momento flectores comienza con un valor de 0 N·m y acaba con un valor de -5880000 N·m. Corresponde con el momento flector en el eje "3".

- Desplazamientos "Ux" (deformada de la viga):



**Imagen 190. Diagrama del desplazamiento vertical de la viga empotrada-libre**

El desplazamiento máximo sería de valor 0,585 metros en el eje "x".

### 2.2.2. Fuerza en el eje "y":

Se aplica una fuerza de valor 196000 N en el eje "y" de la viga, en el extremo libre de esta, se obtienen los siguientes resultados:

Nuevamente los esfuerzos axiales son nulos, debidos a que no se aplica ninguna carga en el eje longitudinal de la viga, en este caso el eje "z".

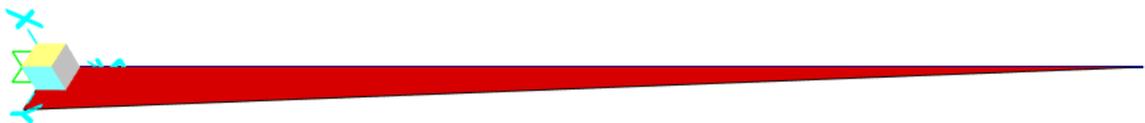
- Diagramas de esfuerzos cortantes:



**Imagen 191. . Diagrama del esfuerzo cortante de la viga empotrada-libre**

El esfuerzo cortante es constante y de valor 196000 N. Corresponde con los esfuerzos cortantes en el eje "3-3"

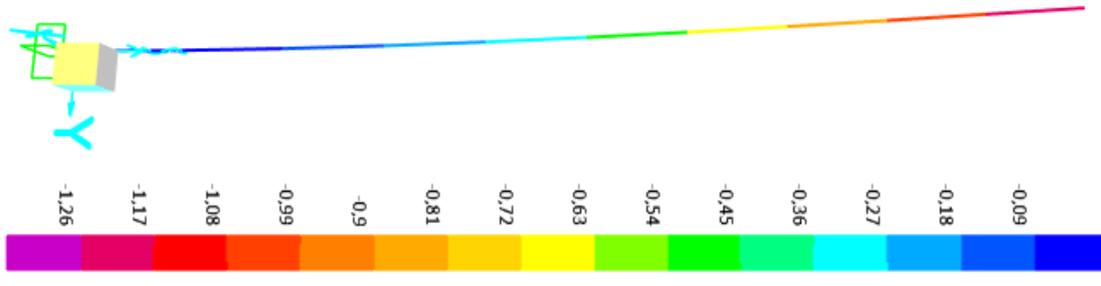
- Diagramas de momentos flectores:



**Imagen 192. Diagrama del momento flector de la viga empotrada-libre**

El diagrama de los momento flectores comienza con un valor de 0 N·m y acaba con un valor de -5880000 N·m. Corresponde con el momento flector en el eje "2".

- Desplazamientos "Uy" (deformada de la viga):



*Imagen 193. Diagrama del desplazamiento vertical de la viga empotrada-libre*

El desplazamiento máximo tiene un valor de 0,585 metros en el eje "y".

Como se puede observar existe un gran nivel de coincidencia entre los valores obtenidos mediante el cálculo teórico y los obtenidos mediante el programa de cálculo.

Para obtener los valores de los diagramas de los esfuerzos cortantes, momentos flectores y desplazamientos (deformada) cuando la viga se carga con una fuerza en el eje "x" y en el eje "y" simultáneamente, se puede o bien aplicar el principio de superposición o emplear nuevamente el software de cálculo.

En cualquiera de los dos casos, al tratarse de un estudio de una viga simple, y las cargas estar aplicadas en diferentes ejes, cada carga tendrá su consecuencia en un eje determinado.

Es decir, la carga en el eje "x" generará esfuerzos cortantes en el eje "2-2", momentos flectores en el eje "3" y desplazamientos de los puntos en el eje "x", mientras que la carga en el eje "y" generará esfuerzos cortantes en el eje "3-3", momentos flectores en el eje "2" y desplazamientos de los puntos en el eje "y".

Por lo tanto, para este caso sencillo de estudio, aplicar el principio de superposición simplemente es sumar lo que aporta cada fuerza en cada eje de la estructura.

En el software de cálculo "SAP2000" se aplica una fuerza de valor 196000 N en el eje "x" y otra con ese mismo valor en el eje "y", y cada fuerza aporta esfuerzos cortantes, momentos flectores y desplazamientos de los puntos (deformada) según su eje de aplicación.

De esta manera, se ha demostrado que los valores obtenidos de la aplicación de fuerzas en diferentes ejes, pueden calcularse o bien de modo teórico aplicando el principio de superposición, o bien aplicando el software de cálculo "SAP2000".

Para este caso de estudio sencillo, se ha podido aplicar el principio de superposición de modo teórico. Pero al haberse demostrado que el programa de cálculo nos ofrece resultados muy similares a los obtenidos, de esta manera, para casos más complejos se puede emplear el software evitando así la posible complejidad en el cálculo necesario para obtener los valores anteriores de un modo teórico-analítico.

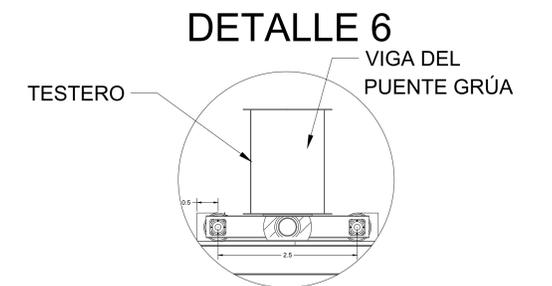
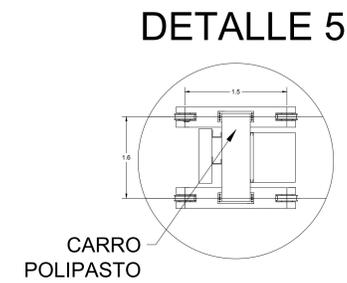
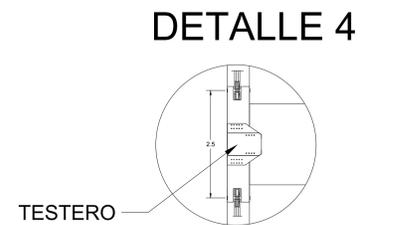
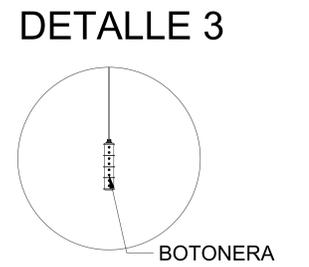
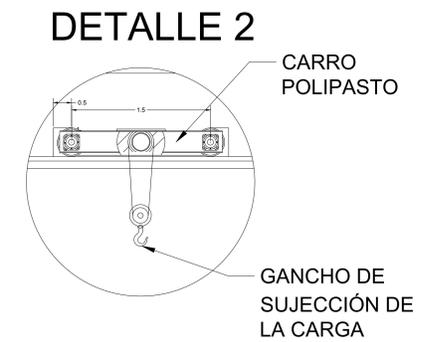
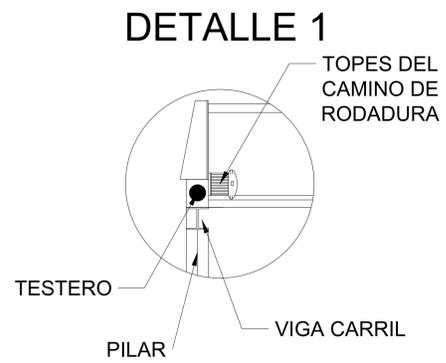
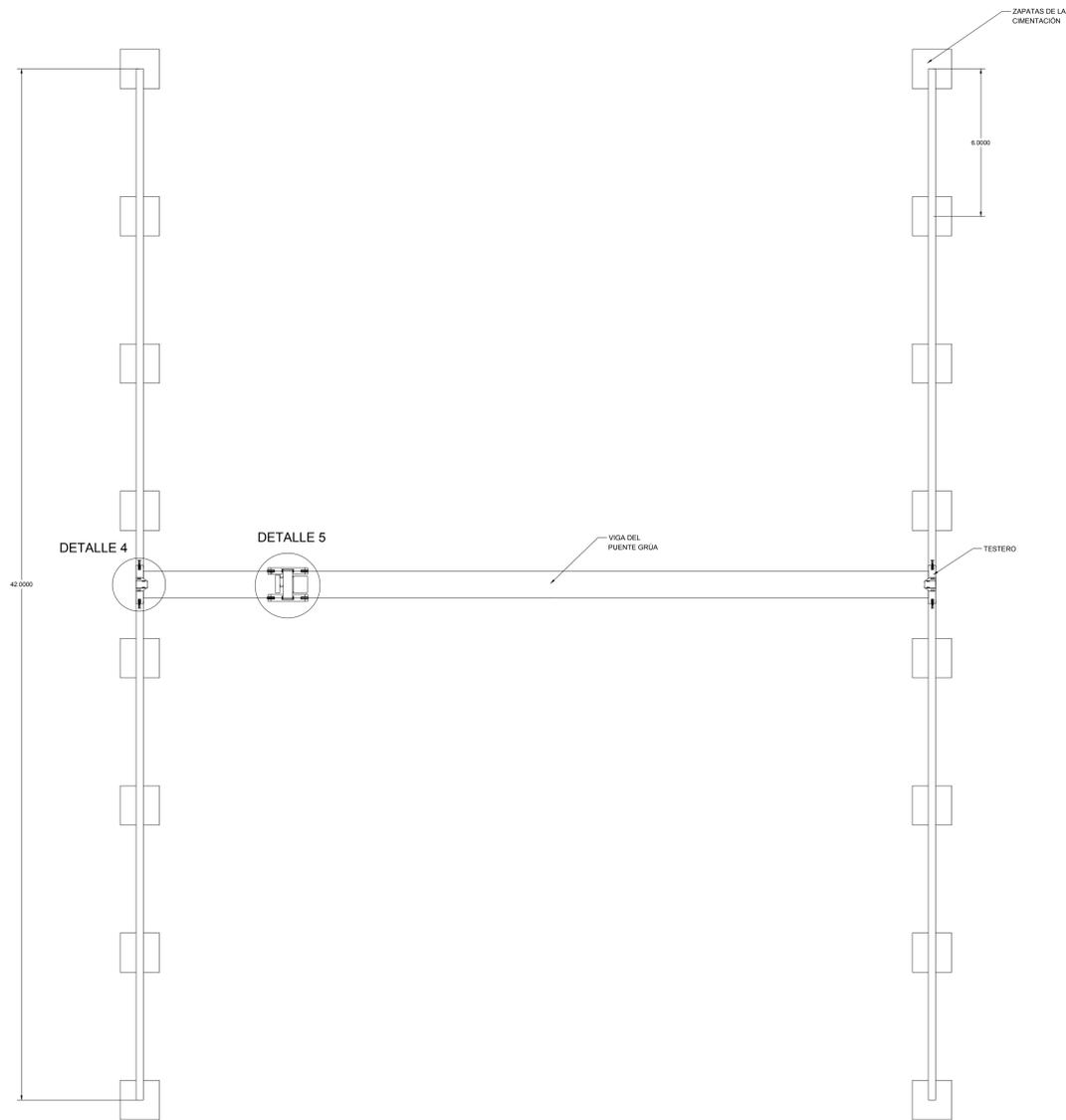
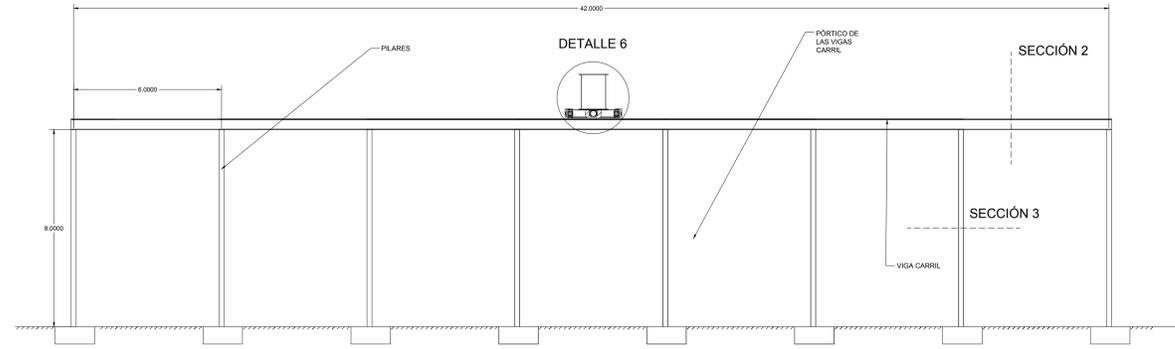
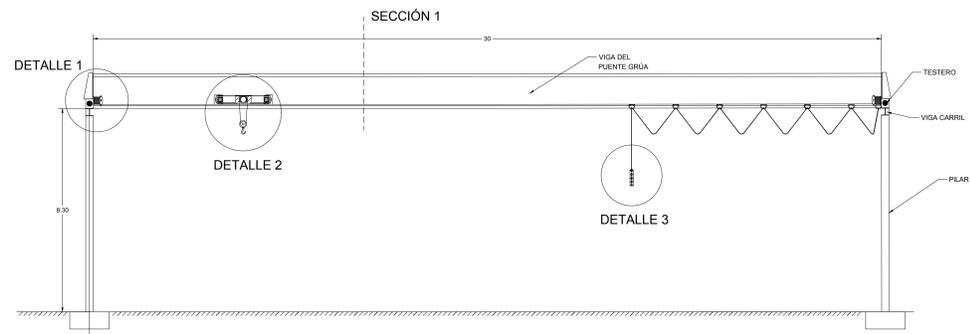
**Anexo 3: Planos de definición del puente grúa:**

Para la correcta definición del puente grúa dimensionado en los capítulos anteriores de este TFG, es necesario realizar los planos que permitan fabricar la estructura una vez ya está diseñada.

Como se ha dicho anteriormente, el dimensionado del puente grúa se ha dividido en dos estructuras a su vez, por un lado la viga del puente grúa, y por otro el pórtico de las vigas carril.

Para la definición de estas dos, en el plano deben aparecer todas sus características geométricas y dimensionales, tanto de las condiciones iniciales que se fijaban en el "**Capítulo 1. Apartado 1.2.3. Definición precisa del problema de estudio: características geométricas del puente grúa**", como las dimensiones de los perfiles obtenidas en los capítulos anteriores.

Para esto, se decide representar en un único plano con formato "A0" todo el conjunto del puente grúa. Realizando detalles que permiten acotar y ver las diferentes partes que componen el conjunto. Además también se realizan secciones, que permiten acotar la geometría y dimensiones de los perfiles tanto para la viga del puente grúa, como para la viga carril y los pilares del pórtico.



	FECHA	NOMBRE	AUTOR	ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES EII UVA
DISEÑO	15/06/20	-	FERNANDO JUAN	ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES EII UVA
DESBURDO	25/06/20	-	ALVAREZ-TOUCHARD	
COMPROBACION	29/06/20	-	VITA	
ESCALA GENERAL	PLANO DEL CONJUNTO DEL PUENTE GRUA Y DETALLES DE SUS DIFERENTES COMPONENTES			PLANO DE CONJUNTO Y DETALLE
DETALLES	ESCALA 4:1			ING. MECÁNICA CURSO 2019-2020