

Trabajo de Fin de Grado Ingeniería Civil

Estudio tipológico y de comportamiento resistente de puentes arco de tablero inferior

Autor: Alejandro Verde Cantero

Tutores: Antonio Martínez de la Concha y
José David Ríos Jiménez

Dpto. Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2019



Trabajo de Fin de Grado
Ingeniería Civil

Estudio tipológico y de comportamiento resistente de puentes arco de tablero inferior

Autor:

Alejandro Verde Cantero

Tutores:

Antonio Martínez de la Concha y José David Ríos Jiménez

Profesor titular

Dpto. de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2019

Trabajo de Fin de Grado: Estudio tipológico y de comportamiento resistente de puentes arco de tablero inferior

Autor: Alejandro Verde Cantero

Tutores: Antonio Martínez de la Concha y
José David Ríos Jiménez

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2019

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis amigos

A mis maestros

Agradecimientos

Mi más sincero y profundo agradecimiento hacía mi familia, pilares fundamentales a lo largo de estos años de aprendizaje y a mis maestros y compañeros por todas las experiencias vividas junto con el aprendizaje que esto conlleva.

Me gustaría resaltar una frase que leí en una entrevista concedida a Don Javier Manterola, gran ingeniero, gran parte de este trabajo es gracias a su bibliografía.

'Lo que he hecho es intentar poner al límite la técnica de mi momento y ese es el motor fundamental del ingeniero'. Javier Manterola, 2017

Alejandro Verde Cantero

Alumno de la escuela de ingenieros de la Universidad de Sevilla

Sevilla, 2019

Resumen

El objeto de este trabajo es estudiar el comportamiento de los puentes arco con tablero inferior, en función de distintas tipologías de sus arcos y diferentes disposiciones de los tirantes. Para ello estudiaremos tanto su flecha máxima como los diferentes modos de pandeo y vibración de la estructura.

Este análisis se ha desarrollado mediante la herramienta informática de MIDAS Civil [3].

En primer lugar, se ha procedido al diseño geométrico del puente a estudiar, para ello, se ha modelado una geometría de puente arco muy similar a uno existente, el Puente Reina Sofía, que se encuentra en Palma del Río, Córdoba, Andalucía, España.

Posteriormente y una vez tenemos un modelo sólido, que se asemeje lo máximo posible a la realidad, se procede a elaborar diferentes modelos, variando la disposición de los tirantes y arcos, hasta 20 modelos distintos, para obtener diferentes respuestas en la estructura. Una vez hemos obtenido esos resultados para cada modelo, los estudiamos, analizamos y comparamos para establecer unas conclusiones de los aspectos más relevantes, como pueden ser su desplazamiento máximo, rigidez o estabilidad.

La idea ha sido obtenida mediante una búsqueda de información sobre un campo tan interesante como es el estudio de puentes, en concreto en los libros de D. Javier Manterola 'Puentes: Apuntes para su diseño, cálculo y construcción. Tomo I [1] y D. Javier Manterola 'Puentes: Apuntes para su diseño, cálculo y construcción. Tomo II. [2].

Índice

Agradecimientos	9
Resumen	11
Índice	13
Índice de Tablas	15
Índice de Figuras	17
1 INTRODUCCIÓN	25
1.1. Objeto	26
2 Elaboración del modelo	27
2.1. Modelo básico	27
2.1.1 Puente arco con tablero inferior	27
2.1.2 ¿Cómo hemos obtenido los diferentes modelos?	28
2.2. Modelos a estudiar	30
2.2.1 En función del arco	30
2.2.2 En función de los tirantes	33
2.3. Modelización en Midas Civil	36
2.3.1 Materiales	36
2.3.2 Secciones	38
2.3.3 Condiciones de contorno	45
2.3.4 Cargas	46
2.4. Parámetros a analizar.	46
3 Resultados	11
3.1 Modelo 1	12
3.1.1 Modelo 1a	12
3.1.2 Modelo 1b	15
3.1.3 Modelo 1c	18
3.1.4 Modelo 1d	22
3.2 Modelo 2	26
3.2.1 Modelo 2a	26
3.2.2 Modelo 2b	29
3.2.3 Modelo 2c	33
3.2.4 Modelo 2d	37
3.3 Modelo 3	42
3.3.1 Modelo 3a	42
3.3.2 Modelo 3b	47
3.3.3 Modelo 3c	51
3.3.4 Modelo 3d	56
3.4 Modelo 4	61
3.4.1 Modelo 4a	61
3.4.2 Modelo 4b	65
3.4.3 Modelo 4c	68

3.4.4	Modelo 4d	73
3.5.	<i>Modelo 5</i>	78
3.5.1	Modelo 5a	78
3.5.2	Modelo 5b	82
3.5.3	Modelo 5c	85
3.5.4	Modelo 5d	89
4	Estudio de los resultados	94
4.1	<i>Según la tipología de arco.</i>	94
4.1.1	Modelos "1"	94
4.1.2	Modelos "2"	95
4.1.3	Modelos "3".	95
4.1.4	Modelos "4"	96
4.1.5	Modelos "5"	96
4.1.6	Conclusiones	96
4.2	<i>Según la disposición de los tirantes</i>	97
4.2.1	Modelos "a"	97
4.2.2	Modelos "b"	97
4.2.3	Modelos "c"	98
4.2.4	Modelos "d"	98
4.2.5	Conclusiones	98
5	Conclusiones y aspectos futuros a desarrollar	100
5.1.	<i>Conclusiones</i>	100
5.2.	<i>Aspectos futuros a desarrollar</i>	101
	Referencias	102

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Parámetros básicos	29
Tabla 2 Detalles elementos principales	45
Tabla 3 Resultados Modelo 1	94
Tabla 4 Resultados Modelo 2	95
Tabla 5 Resultados Modelo 3	95
Tabla 6 Resultados Modelo 4	96
Tabla 7 Resultados Modelo 5	96
Tabla 8 Resultados Modelo a	97
Tabla 9 Resultados Modelo b	97
Tabla 10 Resultados Modelo c	98
Tabla 11 Resultados Modelo d	98

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Puente Reina Sofia	28
Figura 2 Referencia Viga longitudinal	28
Figura 3 Referencia Viga longitudinal II	28
Figura 4 Referencia viga transversal	29
Figura 5 Modelo 1	30
Figura 6 Modelo 2	31
Figura 7 Modelo 3	31
Figura 8 Modelo 4	32
Figura 9 Modelo 5	32
Figura 10 Sección variación tablero	33
Figura 11 Tirantes tipo a	34
Figura 12 Tirantes tipo b	34
Figura 13 Tirantes tipo c	35
Figura 14 Tirantes tipo d	35
Figura 15 Propiedades Acero	36
Figura 16 Propiedades Hormigón	37
Figura 17 Propiedades hormigón II	37
Figura 18 Propiedades Hormigón Ligero	37
Figura 19 Propiedades Material Mixto	38
Figura 20 Sección Viga longitudinal	38
Figura 21 Sección Viga transversal	39
Figura 22 Sección tablero transversal	39
Figura 23 Sección Tablero longitudinal	39
Figura 24 Sección Arco	40
Figura 25 Sección tirantes	40
Figura 26 Sección rigidizadores	40
Figura 27 Vista completa tablero	41
Figura 28 Vigas longitudinales Midas	41
Figura 29 Vigas transversales Midas	42
Figura 30 Tablero transversal Midas	42
Figura 31 Tablero longitudinal Midas	43
Figura 32 Vista tablero completo 3D	43

Figura 33 Vista tablero completo 3D II	44
Figura 34 Vista tablero completo 3D III	44
Figura 35 Condiciones de contorno	45
Figura 36 Coeficiente de pandeo	46
Figura 37 Flecha	12
Figura 38 Modo 1 de pandeo	12
Figura 39 Modo 2 de pandeo	13
Figura 40 Modo 2 de pandeo II	13
Figura 41 Modo 3 de pandeo	13
Figura 42 Modo 3 de pandeo II	14
Figura 43 Modo 1 de vibración	14
Figura 44 Modo 2 de vibración	14
Figura 45 Modo 3 de vibración	15
Figura 46 Flecha	15
Figura 47 Modo 1 de pandeo	15
Figura 48 Modo 2 de pandeo	16
Figura 49 Modo 2 de pandeo II	16
Figura 50 Modo 2 de pandeo III	16
Figura 51 Modo 3 de pandeo	17
Figura 52 Modo 3 de pandeo II	17
Figura 53 Modo 1 de vibración	17
Figura 54 Modo 2 de vibración	18
Figura 55 Modo 3 de vibración	18
Figura 56 Flecha	18
Figura 57 Modo 1 de pandeo	19
Figura 58 Modo 1 de pandeo II	19
Figura 59 Modo 2 de pandeo	19
Figura 60 Modo 2 de pandeo II	20
Figura 61 Modo 3 de pandeo	20
Figura 62 Modo 3 de pandeo II	20
Figura 63 Modo 1 de vibración	21
Figura 64 Modo 2 de vibración	21
Figura 65 Modo 3 de vibración	21
Figura 66 Flecha	22
Figura 67 Modo 1 de pandeo	22
Figura 68 Modo 1 de pandeo II	22
Figura 69 Modo 2 de pandeo	23
Figura 70 Modo 2 de pandeo II	23
Figura 71 Modo 3 de pandeo	23

Figura 72 Modo 3 de pandeo II	24
Figura 73 Modo 1 de vibración	24
Figura 74 Modo 2 de vibración	24
Figura 75 Modo 2 de vibración II	25
Figura 76 Modo 2 de vibración II	25
Figura 77 Modo 3 de vibración	25
Figura 78 Flecha	26
Figura 79 Modo 1 de pandeo	26
Figura 80 Modo 1 de pandeo II	26
Figura 81 Modo 1 de pandeo III	27
Figura 82 Modo 2 de pandeo	27
Figura 83 Modo 3 de pandeo	27
Figura 84 Modo 3 de pandeo II	28
Figura 85 Modo 3 de pandeo III	28
Figura 86 Modo 1 de vibración	28
Figura 87 Modo 2 de vibración	29
Figura 88 Modo 3 de vibración	29
Figura 89 Flecha	29
Figura 90 Modo 1 de pandeo	30
Figura 91 Modo 1 de pandeo II	30
Figura 92 Modo 1 de pandeo III	30
Figura 93 Modo 2 de pandeo	31
Figura 94 Modo 3 de pandeo	31
Figura 95 Modo 3 de pandeo II	31
Figura 96 Modo 3 de pandeo III	32
Figura 97 Modo 1 de vibración	32
Figura 98 Modo 2 de vibración	32
Figura 99 Modo 3 de vibración	33
Figura 100 Flecha	33
Figura 101 Modo 1 de pandeo	33
Figura 102 Modo 1 de pandeo II	34
Figura 103 Modo 1 de pandeo III	34
Figura 104 Modo 2 de pandeo	34
Figura 105 Modo 2 de pandeo II	35
Figura 106 Modo 2 de pandeo III	35
Figura 107 Modo 3 de pandeo	35
Figura 108 Modo 3 de pandeo II	36
Figura 109 Modo 3 de pandeo III	36

Figura 110 Modo 1 de vibración	36
Figura 111 Modo 2 de vibración	37
Figura 112 Modo 3 de vibración	37
Figura 113 Flecha	37
Figura 114 Modo 1 de pandeo	38
Figura 115 Modo 1 de pandeo II	38
Figura 116 Modo 1 de pandeo III	38
Figura 117 Modo 2 de pandeo	39
Figura 118 Modo 2 de pandeo II	39
Figura 119 Modo 2 de pandeo III	39
Figura 120 Modo 3 de pandeo	40
Figura 121 Modo 3 de pandeo II	40
Figura 122 Modo 3 de pandeo III	40
Figura 123 Modo 1 de vibración	41
Figura 124 Modo 2 de vibración	41
Figura 125 Modo 2 de vibración II	41
Figura 126 Modo 2 de vibración III	42
Figura 127 Modo 3 de vibración	42
Figura 128 Flecha	42
Figura 129 Modo 1 de pandeo	43
Figura 130 Modo 1 de pandeo II	43
Figura 131 Modo 1 de pandeo III	43
Figura 132 Modo 2 de pandeo	44
Figura 133 Modo 2 de pandeo II	44
Figura 134 Modo 2 de pandeo III	44
Figura 135 Modo 3 de pandeo	45
Figura 136 Modo 3 de pandeo II	45
Figura 137 Modo 3 de pandeo III	45
Figura 138 Modo 1 de vibración	46
Figura 139 Modo 2 de vibración	46
Figura 140 Modo 3 de vibración	46
Figura 141 Flecha	47
Figura 142 Modo 1 de pandeo	47
Figura 143 Modo 1 de pandeo II	47
Figura 144 Modo 1 de pandeo III	48
Figura 145 Modo 2 de pandeo	48
Figura 146 Modo 2 de pandeo II	48
Figura 147 Modo 2 de pandeo III	49
Figura 148 Modo 3 de pandeo	49

Figura 149 Modo 3 de pandeo II	49
Figura 150 Modo 3 de pandeo III	50
Figura 151 Modo 1 de vibración	50
Figura 152 Modo 2 de vibración	50
Figura 153 Modo 3 de vibración	51
Figura 154 Flecha	51
Figura 155 Modo 1 de pandeo	51
Figura 156 Modo 1 de pandeo II	52
Figura 157 Modo 1 de pandeo III	52
Figura 158 Modo 2 de pandeo	52
Figura 159 Modo 2 de pandeo II	53
Figura 160 Modo 2 de pandeo III	53
Figura 161 Modo 3 de pandeo	53
Figura 162 Modo 3 de pandeo II	54
Figura 163 Modo 3 de pandeo III	54
Figura 164 Modo 1 de vibración	54
Figura 165 Modo 2 de vibración	55
Figura 166 Modo 3 de vibración	55
Figura 167 Modo 3 de vibración II	55
Figura 168 Modo 3 de vibración III	56
Figura 169 Flecha	56
Figura 170 Modo 1 de pandeo	56
Figura 171 Modo 1 de pandeo II	57
Figura 172 Modo 1 de pandeo III	57
Figura 173 Modo 2 de pandeo	57
Figura 174 Modo 2 de pandeo II	58
Figura 175 Modo 2 de pandeo III	58
Figura 176 Modo 3 de pandeo	58
Figura 177 Modo 3 de pandeo II	59
Figura 178 Modo 3 de pandeo III	59
Figura 179 Modo 1 de vibración	59
Figura 180 Modo 2 de vibración	60
Figura 181 Modo 2 de vibración II	60
Figura 182 Modo 2 de vibración III	60
Figura 183 Modo 3 de vibración	61
Figura 184 Flecha	61
Figura 185 Modo 1 de pandeo	61
Figura 186 Modo 2 de pandeo	62

Figura 187 Modo 2 de pandeo II	62
Figura 188 Modo 2 de pandeo III	62
Figura 189 Modo 3 de pandeo	63
Figura 190 Modo 3 de pandeo II	63
Figura 191 Modo 3 de pandeo III	63
Figura 192 Modo 1 de vibración	64
Figura 193 Modo 2 de vibración	64
Figura 194 Modo 3 de vibración	64
Figura 195 Modo 3 de vibración II	65
Figura 196 Flecha	65
Figura 197 Modo 1 de pandeo	65
Figura 198 Modo 2 de pandeo	66
Figura 199 Modo 2 de pandeo II	66
Figura 200 Modo 2 de pandeo III	66
Figura 201 Modo 3 de pandeo	67
Figura 202 Modo 1 de vibración	67
Figura 203 Modo 2 de vibración	67
Figura 204 Modo 3 de vibración	68
Figura 205 Modo 3 de vibración II	68
Figura 206 Flecha	68
Figura 207 Modo 1 de pandeo	69
Figura 208 Modo 1 de pandeo II	69
Figura 209 Modo 1 de pandeo III	69
Figura 210 Modo 2 de pandeo	70
Figura 211 Modo 2 de pandeo II	70
Figura 212 Modo 2 de pandeo III	70
Figura 213 Modo 3 de pandeo	71
Figura 214 Modo 3 de pandeo II	71
Figura 215 Modo 3 de pandeo III	71
Figura 216 Modo 1 de vibración	72
Figura 217 Modo 2 de vibración	72
Figura 218 Modo 2 de vibración II	72
Figura 219 Modo 3 de vibración	73
Figura 220 Flecha	73
Figura 221 Modo 1 de pandeo	73
Figura 222 Modo 1 de pandeo II	74
Figura 223 Modo 1 de pandeo III	74
Figura 224 Modo 2 de pandeo	74
Figura 225 Modo 2 de pandeo II	75

Figura 226 Modo 2 de pandeo III	75
Figura 227 Modo 3 de pandeo	75
Figura 228 Modo 3 de pandeo II	76
Figura 229 Modo 3 de pandeo III	76
Figura 230 Modo 1 de vibración	76
Figura 231 Modo 1 de vibración II	77
Figura 232 Modo 2 de vibración	77
Figura 233 Modo 3 de vibración	77
Figura 234 Modo 1 de vibración II	78
Figura 235 Modo 1 de vibración III	78
Figura 236 Flecha	78
Figura 237 Modo 1 de pandeo	79
Figura 238 Modo 1 de pandeo II	79
Figura 239 Modo 2 de pandeo	79
Figura 240 Modo 2 de pandeo II	80
Figura 241 Modo 3 de pandeo	80
Figura 242 Modo 3 de pandeo II	80
Figura 243 Modo 1 de vibración	81
Figura 244 Modo 2 de vibración	81
Figura 245 Modo 2 de vibración II	81
Figura 246 Modo 3 de vibración	82
Figura 247 Flecha	82
Figura 248 Modo 1 de pandeo	82
Figura 249 Modo 1 de pandeo II	83
Figura 250 Modo 2 de pandeo	83
Figura 251 Modo 2 de pandeo II	83
Figura 252 Modo 3 de pandeo	84
Figura 253 Modo 1 de vibración	84
Figura 254 Modo 2 de vibración	84
Figura 255 Modo 3 de vibración	85
Figura 256 Modo 3 de vibración II	85
Figura 257 Flecha	85
Figura 258 Modo 1 de pandeo	86
Figura 259 Modo 1 de pandeo II	86
Figura 260 Modo 2 de pandeo	86
Figura 261 Modo 2 de pandeo II	87
Figura 262 Modo 3 de pandeo	87
Figura 263 Modo 3 de pandeo II	87

Figura 264 Modo 1 de vibración	88
Figura 265 Modo 1 de vibración II	88
Figura 266 Modo 2 de vibración	88
Figura 267 Modo 3 de vibración	89
Figura 268 Flecha	89
Figura 269 Modo 1 de pandeo	89
Figura 270 Modo 1 de pandeo II	90
Figura 271 Modo 2 de pandeo	90
Figura 272 Modo 2 de pandeo II	90
Figura 273 Modo 3 de pandeo	91
Figura 274 Modo 3 de pandeo II	91
Figura 275 Modo 1 de vibración	91
Figura 276 Modo 1 de vibración II	92
Figura 277 Modo 2 de vibración	92
Figura 278 Modo 3 de vibración	92

1 INTRODUCCIÓN

Cuando emprendas tu viaje a Ítaca pide que el camino sea largo,

- Constantino Cavafis, Ítaca -

Actualmente, teniendo en cuenta la tecnología que tenemos a nuestra disposición, se puede ordenar los puentes en función de “dos” variables fundamentales. Existe una tercera que también es muy importante y se debe tener en cuenta.

- Material utilizado
Principalmente destacan dos, hormigón y acero.
- Tipología estructural empleada
 - Puentes recto o viga
 - Puentes arco
 - Puentes atirantados o colgados
- Proceso constructivo

Atendiendo a su tipología, nos centraremos en la de tipo arco para este trabajo, se divide en tres grandes familias según sea la situación relativa entre arco y tablero.

- Arco tablero superior, transmisión arco-tablero mediante los pilares.
- Arco tablero intermedio, una parte la transfieren los pilares y la otra parte los tirantes.
- Arco tablero inferior, transmisión arco-tablero mediante los tirantes.

Nuestro modelo es un arco con tablero inferior. Tiene una característica especial, no introduce acciones horizontales en el terreno, lo que permite instalarse en cualquier situación resistente del suelo. Aunque, como inconveniente tiene un proceso constructivo más complicado.

Se diferencian dos partes principales, el arco, principal elemento resistente, cuya forma viene determinada como el antifunicular de la carga permanente del puente. En segundo lugar, el tablero cuya geometría viene determinada por las exigencias de la rasante. Ambos elementos trabajan conjuntamente mediante los pilares, que son los que se encargan de transferir la carga del tablero al arco y este a la cimentación.

Esta tipología experimento un parón en su desarrollo debido a los puentes rectos de hormigón pretensado, construidos en avance en voladizo y del puente atirantado que con gran facilidad cubre luces de 200-500 metros. Aquí se puede observar perfectamente las tres variables fundamentales comentadas anteriormente:

- Material: Hormigón pretensado
- Tipología: Puente recto
- Proceso constructivo: Avance en voladizo

El puente arco en general, y el de hormigón en particular ha experimentado un parón prolongado. La utilización de grandes cimbras constituía la dificultad más importante que presentaba la ejecución de estos puentes, ubicados generalmente en zonas de difícil acceso, grandes valles o cursos de agua importantes.

- ¿Cómo se relanzo esta tipología?

Debido a la construcción de arcos de hormigón en avance en voladizo y la recuperación de la celosía como estructura del arco.

- ¿Por qué surge el puente arco y qué ventajas tiene?

Luces cortas: A diferencia del puente recto necesita dos estructuras, arco y tablero, por lo que es menos económico que una sola. En segundo lugar, es más vulnerable que el puente recto a los movimientos horizontales del suelo.

Luces grandes: Debido a lo anterior, el puente arco es útil para grandes luces. Como ya hemos comentado anteriormente, la geometría del arco determina que los esfuerzos que lo solicitan, bajo la acción de la carga permanente (antifunicular), sean casi exclusivamente de compresión. Bajo la sobrecarga de utilización, que no tiene por qué tener una distribución antifunicular, se producen tanto compresiones como flexiones. En la suma de ambos efectos predominan las compresiones para las luces grandes, lo que es más fácil de resistir y eso abarata el coste.

1.1. Objeto

El objeto del presente trabajo es el estudio, análisis y comparación del Puente arco con tablero inferior, basado en diferentes tipologías y disposición tanto del arco como los tirantes.

Para realizar el estudio hemos tomado como modelo de referencia el Puente Reina Sofía, situado en Palma del Río, Córdoba, Andalucía, España.

A partir de este modelo se han modificado tanto la tipología de los arcos como la disposición de sus tirantes para dar lugar a un total de hasta 20 modelos diferentes.

Una vez tenemos estos modelos, hemos procedido mediante la herramienta informática de elementos finitos Midas Civil [3], al modelado de los mismos y posteriormente a la obtención de diferentes variables. Estas variables que vamos a analizar y comparar son la flecha, los modos de pandeo y los modos de vibración.

El motivo de estudiar esta tipología de puentes surge a recomendación del tutor del presente trabajo, Don Antonio Martínez de la Concha, me propone que lea y entienda las diferentes tipologías de Puente que existen y a elección propia, elija la que más le guste, ya que me será más cómodo y resultará más fácil la realización del presente trabajo y la asimilación de diferentes los conceptos que se tratan a lo largo de mismo.

La idea de elaborar diferentes modelos y analizar los diferentes conceptos del presente Proyecto, es propuesta por dicho tutor.

Con ello espero conseguir una mejor comprensión de como se comportan dichas estructuras, antes las cargas propuestas, qué elementos básicos son necesarios para dicha tipología, cuál de los diferentes modelos tiene un mejor comportamiento para cada aspecto a analizar y por supuesto seguir avanzando en la tarea de aprendizaje y manejo con programas informáticos de elementos finitos como el Midas Civil [3].

2 ELABORACIÓN DEL MODELO

*En el término medio esta la virtud
- Aristóteles (Ética a Nicómaco, VI) -*

A lo largo de este capítulo vamos a describir el camino seguido para la realización del modelo. Está dividido en diferentes apartados o diferentes bloques que señalan cada paso o cada etapa de importancia.

A modo de resumen, la estructura que sigue este capítulo es la siguiente:

Primero vamos a introducir someramente los tipos de puentes que vamos a analizar, ya que profundizaremos más sobre ellos posteriormente.

A continuación, indicaremos cómo los hemos elegido, incluyendo la visita a Palma del Río, la cual fue aconsejada por el tutor, para tener una idea sobre un modelo real del tipo de puente que vamos a analizar y a partir de ello, desarrollar los diferentes modelos de estudio en una herramienta informática como es Midas Civil [3]. Por último, las diferentes disposiciones de atirantamientos que afectaran de una forma u otra al comportamiento estructural.

Posteriormente se esquematizan y representan los diferentes modelos que se van a estudiar en este proyecto. Están referenciados según el tipo de arco y disposición de los tirantes para una mejor comprensión a la hora de presentar y comparar los resultados. También reflejaremos cómo hemos realizado esa modelización mediante el programa de elementos finitos, Midas Civil [3], que ha sido la herramienta informática elegida para este estudio.

Por último y no menos importante, indicaremos los diferentes parámetros que vamos a comparar. Básicamente son tres: Flecha, modos de pandeo y modos de vibración.

2.1. Modelo básico

2.1.1 Puente arco con tablero inferior

El tipo de estructura sobre el que se realiza este trabajo es el puente arco con tablero inferior. Lo que vamos a realizar y describir en este capítulo son las diferentes tipologías de arcos y disposiciones de los tirantes para elaborar diferentes modelos que analizaremos y compararemos posteriormente.

Básicamente el puente arco de tablero inferior tiene los siguientes elementos principales:

- Tablero: Para este trabajo es similar al del modelo real, el cual nos ha servido de base, el Puente Reina Sofía. Se mantiene intacto para los diferentes modelos.
- Arcos y tirantes: Son variables para la elaboración de los diferentes modelos y hemos obtenido esas diferentes tipologías y secciones del libro de D. Javier Manterola 'Puentes: Apuntes para su diseño, cálculo y construcción. Tomo II. [2]

2.1.2 ¿Cómo hemos obtenido los diferentes modelos?

Como hemos comentado anteriormente, los diferentes modelos numéricos que hemos realizado están basados en un modelo real de un puente de la misma tipología, el puente Reina Sofía situado en Palma del Río.

Palma del Río, es una ciudad y municipio situada en la provincia de Córdoba, Andalucía, España. Está situada a unos 80 kilómetros de la capital autonómica, Sevilla.

Dado que el objeto de este trabajo no es la elaboración del puente, sino un estudio y comparación de cómo es su respuesta ante diferentes disposiciones tanto de los tirantes, como de los arcos, el profesor nos aconsejó visitar un puente situado en este municipio, con el fin de tomarlo como base ya que es muy similar a lo que necesitamos para realizar el presente trabajo.

Debido a ello, se ha tomado como referencia dicho puente. A continuación, vamos a estudiar la estructura y definir que partes se han tomado iguales y cuales se han variado.

Para empezar el modelo, y como es lógico, realice un breve trabajo de campo, el cual consistió principalmente en visitar en persona el puente Reina Sofía.

La idea fue mediante fotos y medidas de elementos que pudiese tomar porque estuviesen a mi disposición, obtener unas medidas o unos parámetros aproximados de los elementos para posteriormente modelarlo en Midas Civil [3].

Así fue, tuve acceso a la pila donde se apoya el puente, teniendo esa medida y con ayuda de diferentes fotos tomadas estratégicamente obtuve los siguientes parámetros.

- Vigas longitudinales tubulares:

Uno de los principales elementos del puente son dos vigas longitudinales tubulares. Mediante la siguiente imagen podemos tener una idea aproximada del diámetro de dicha viga.

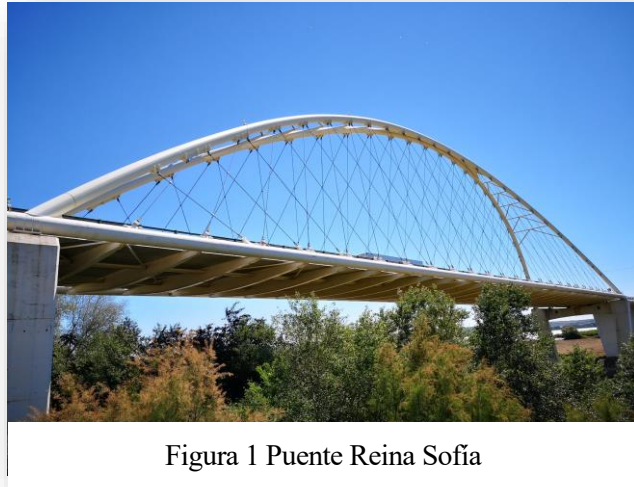


Figura 1 Puente Reina Sofía



Figura 2 Referencia Viga longitudinal



Figura 3 Referencia Viga longitudinal II

En base a ello decido tomar 60 cm de diámetro para la viga longitudinal.

- Vigas transversales doble T:

Estas dos vigas longitudinales principales, tienen como elemento de unión entre ellas unas vigas transversales en forma de doble T y canto variable. En el modelo yo las he incluido con canto constante por sencillez.

De forma análoga hacemos el mismo proceso y obtenemos vigas en doble T con 0,79 metros de canto.

El puente Reina Sofía tiene una luz de unos 130 metros, y cuenta con 24 vigas transversales. Para nuestro modelo que tiene una luz de 100 metros, vamos a disponer 20 vigas transversales, es decir, una viga transversal cada 5 metros.



Figura 4 Referencia viga transversal

- Tablero:

Sobre estas vigas longitudinales se apoya un tablero de hormigón. El modelo de Palma del Río presenta una anchura de unos 13 metros y se encuentra dividido en 5 partes longitudinalmente. Nosotros hemos dispuesto un tablero de hormigón de 10 metros de ancho, también dividido en 5 partes longitudinalmente.

- Arco:

La disposición y morfología de esta estructura respecto al arco, es algo distinta, ya que en nuestro trabajo el arco es una variable.

Como parámetro básico partimos de una flecha de 15 metros con respecto a los 100 metros de luz. Esta relación flecha/luz igual a 1/6.6. La hemos tomado basándonos en los estudios y datos que proporciona el libro de D. Javier Manterola 'Puentes: Apuntes para su diseño, cálculo y construcción. Tomo II. [2]

Más adelante se estudiará detalladamente este aspecto.

- Tirantes:

Al igual que ocurre con el arco, los tirantes también son una variable de estudio, por lo que van a variar para los diferentes modelos. Básicamente conectan las vigas longitudinales y el arco para hacer que trabajen conjuntamente, con el fin de resistir de forma óptima los esfuerzos que se generan.

A continuación, mediante una tabla vamos a mostrar los parámetros básicos a modo de comparación o referencia sobre el puente Reina Sofía y el modelo que hemos adaptado para este trabajo.

	<u>Reina Sofía</u>	<u>Modelo trabajo</u>
<i>Luz</i>	130 metros	100 metros
<i>Ancho del puente</i>	20 metros	12 metros
<i>Ancho del tablero</i>	15 metros	10 metros

Tabla 1 Parámetros básicos

En este apartado básicamente hemos hablado del modelo real que hemos tomado como referencia, es decir, que elementos básicos necesitamos para elaborar el modelo de barras. En los siguientes apartados y capítulos entraremos más en detalle sobre los diferentes modelos numéricos, esto es para tener una idea sobre la geometría y esqueleto de la estructura.

2.2. Modelos a estudiar

En este apartado vamos a definir y referenciar en función de unas etiquetas sencillas, cada modelo que vamos a estudiar, analizar y comparar, en base a su tipología de arco y la disposición de sus tirantes.

La idea es la siguiente, tenemos 5 modelos distintos en función de la tipología de los arcos y otros 4 modelos diferentes en función de la disposición de los tirantes, como resultado final, obtenemos 20 modelos con los que trabajar.

2.2.1 En función del arco

En función de la tipología de su arco vamos a tener cinco modelos diferentes.

Estos diferentes modelos los hemos obtenido del ‘Capítulo 17.3.2.1.- Arcos especiales’ del libro de D. Javier Manterola ‘Puentes: Apuntes para su diseño, cálculo y construcción. Tomo II. [2]

2.2.1.1 2 arcos paralelos

Este primer modelo, al que de aquí en adelante vamos a llamar “Modelo 1”, está formado por 2 arcos paralelos, con una distancia de 12 metros entre ellos.

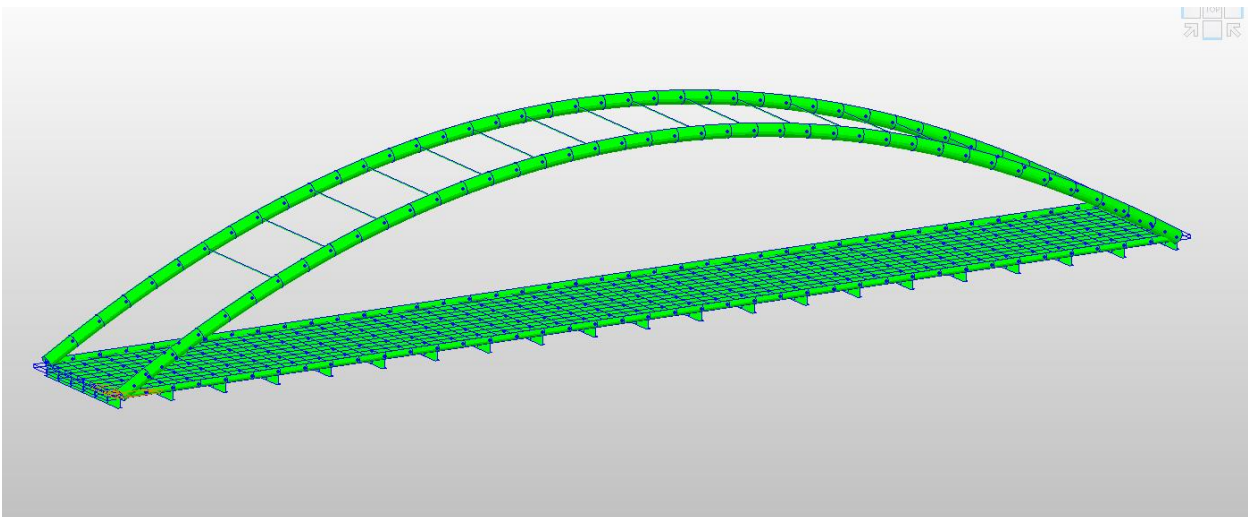


Figura 5 Modelo 1

Tal y como se puede apreciar, esta imagen refleja el tablero, el cual ya ha sido estudiado anteriormente, junto con ambos arcos paralelos y los rigidizadores que unen los arcos.

2.2.1.2 2 arcos paralelos cerrados

A diferencia del modelo anterior, en este caso tenemos los arcos con una inclinación de $21,8^\circ$ respecto a la vertical, hacia en interior de la estructura. En la base los arcos siguen distandose 12 metros.

Esta tipología la vamos a denominar “Modelo 2”.

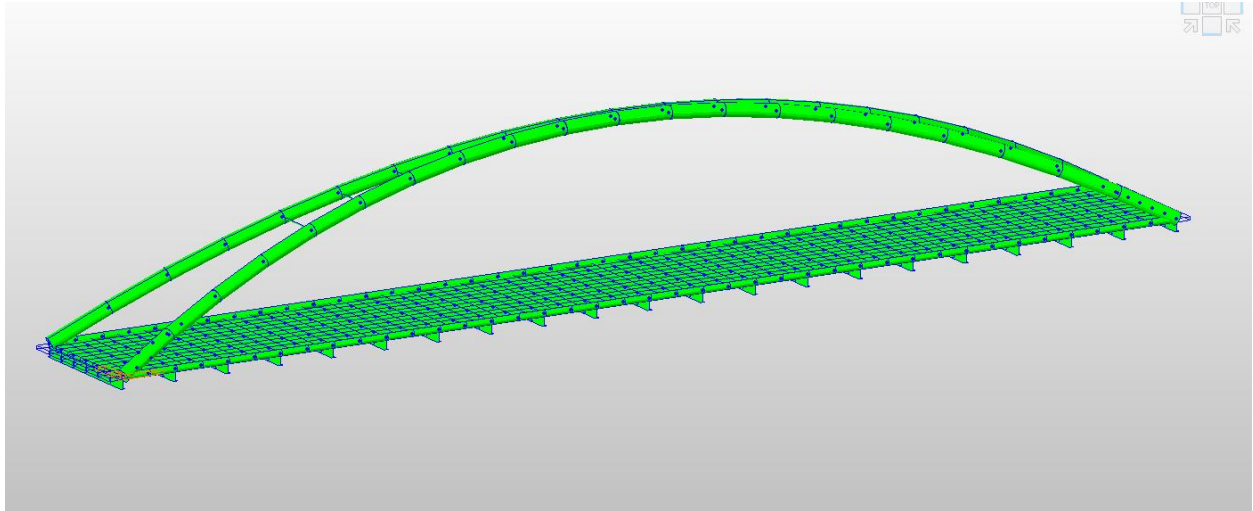


Figura 6 Modelo 2

2.2.1.3 2 arcos paralelos abiertos

El modelo que vamos a describir a continuación, es muy similar a los dos mostrados anteriormente, 2 arcos paralelos en su base e inclinados, con la diferencia de que esta vez se tumban hacia el exterior de la estructura, con la misma inclinación que el Modelo “2”.

Esta tipología la vamos a denominar “Modelo 3”.

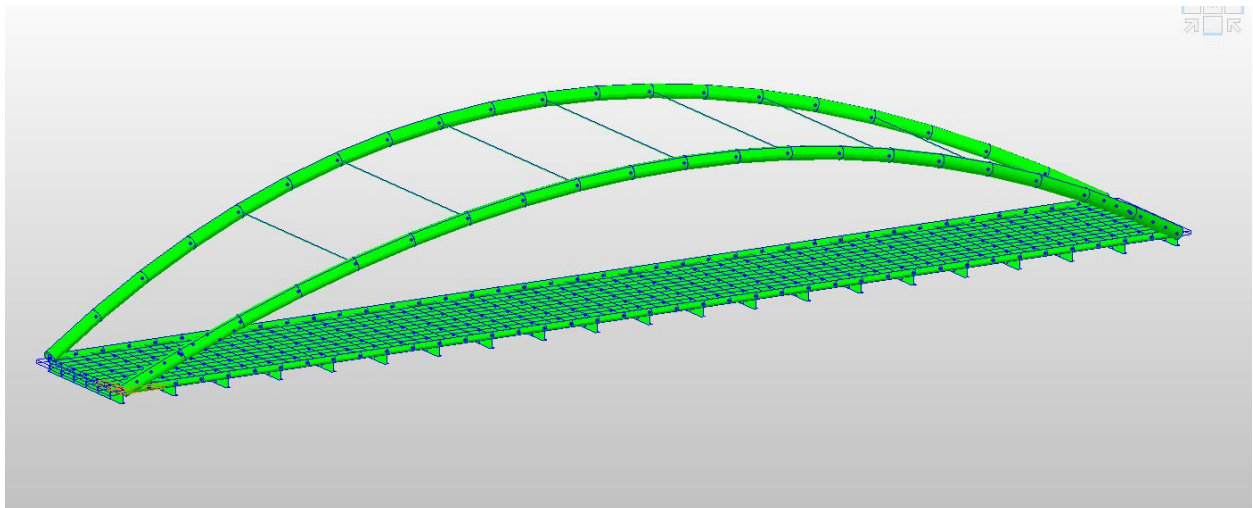


Figura 7 Modelo 3

2.2.1.4 1 solo arco

Por último tenemos una tipología distinta a las anteriores, 1 solo arco situado en el centro del tablero, es decir, a 6 metros de ambos extremos.

Continuando la numeración seguida hasta ahora, esta tipología la denominaremos “Modelo 4”

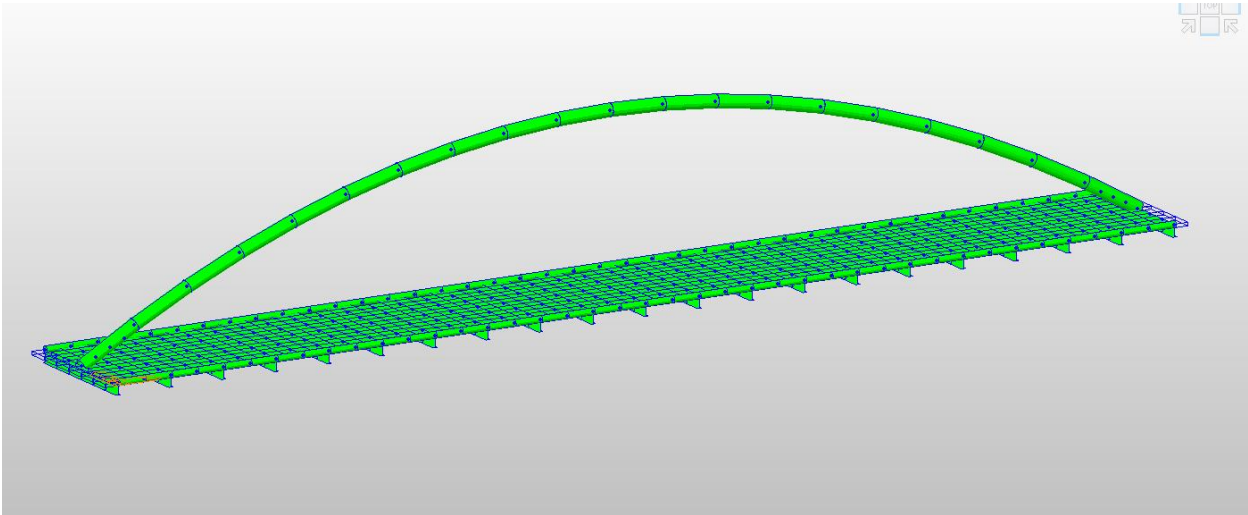


Figura 8 Modelo 4

2.2.1.5 Variación del tablero

Este variante no sería exactamente un cambio en la tipología del arco, ya que lo que cambiamos es el tablero, introducimos un nuevo modelo que consiste en una viga mixta de tipo cajón de acero, con el tablero de hormigón, en lugar de las vigas transversales metálicas con sección de tipo doble T y el tablero de hormigón apoyado sobre estas.

Aun así lo denominamos “Modelo 5”.

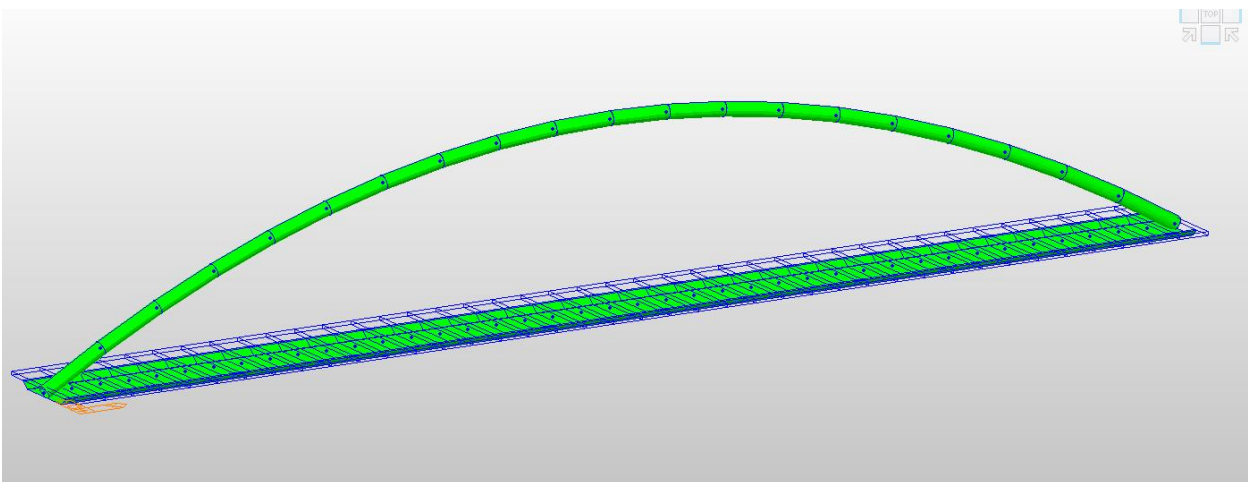


Figura 9 Modelo 5

La sección del tablero es la siguiente:

Section Type : Steel-Tub (Type1)

Slab

Bc	10	m
tc	0.3	m
Hh	0	m

Girder

Hw	0.45	tw	0.1	m
B1	6	B2	5	m
Bf1	0.3	Bf2	0	m
tf1	0.01	tf2	0.1	m
Bf3	0.1	tfp	0.1	m

Stiffener...

Material

Select Material from DB ...

Es / Ec	6.39542	Ds / Dc	3.0792
Ps	0.3	Pc	0.2
Ts / Tc	1.2		

FEM Equation

Display Centroid

Figura 10 Sección variación tablero

Tal y como se puede observar, es similar al tablero que hemos usado para los otros modelos. Seguimos teniendo un ancho de 10 metros para la losa de hormigón, con 30 centímetros de espesor. Lo que varía principalmente es que ahora en vez de tener el tablero sujeto por vigas transversales unidas a vigas longitudinales, tenemos una viga cajón metálica, concretamente de acero S275.

Los materiales se indican en apartados posteriores.

2.2.2 En función de los tirantes

En este subapartado muy relacionado con el anterior, vamos a exponer las diferentes disposiciones de tirantes que vamos a utilizar, 4 en total, para combinar con los 5 modelos de arco y así obtener esos 20 modelos mencionados anteriormente.

Debido a las diferentes tipologías de arcos, y para no ilustrar los tirantes sujetos en el aire, en la “nada”, vamos a ilustrarlos mediante el Modelo 1 de arco.

En este caso en vez de usar números para los diferentes modelos como hemos hecho para los arcos, vamos a utilizar letras.

Las diferentes disposiciones han sido obtenidas del ‘Capítulo 17.3.1.- Arcos de hormigón con tablero intermedio e inferior’ del libro de D. Javier Manterola ‘Puentes: Apuntes para su diseño, cálculo y construcción. Tomo II. [2]

2.2.2.1 Verticales

Esta primera disposición puede ser la mas sencilla o sugerente, consiste en una colocación vertical de los tirantes entre arco y viga longitudinal. La hemos obtenido de la ‘Figura 17.3.01 (1)’ del libro de D. Javier Manterola ‘Puentes: Apuntes para su diseño, cálculo y construcción. Tomo II. [2]

Situamos los tirantes cada 5 metros, coinciden con las vigas transversales en la base, lo que da lugar a 19 tirantes a cada lado de la estructura, unen el arco con las vigas longitudinales.

Este primero correspondería al “tipo a”

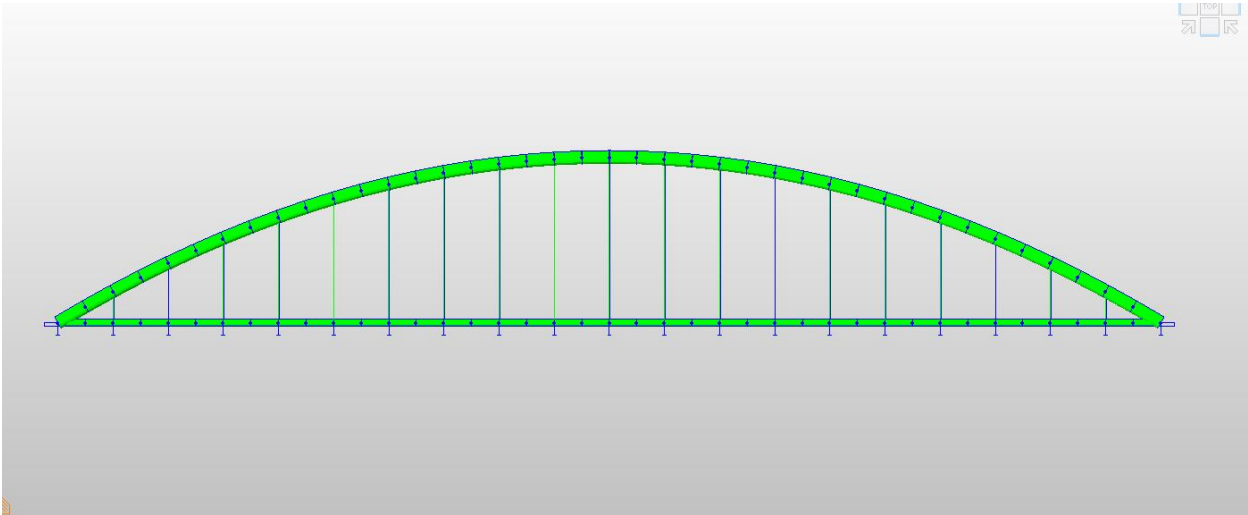


Figura 11 Tirantes tipo a

2.2.2.2 Abanico

Esta segunda tipología la he denominado abanico, ya que la figura que se observa de perfil es muy similar. La hemos obtenido de la ‘Figura 17.3.13 (2)’ del libro de D. Javier Manterola ‘Puentes: Apuntes para su diseño, cálculo y construcción. Tomo II. [2]

La denominamos “tipo b”.

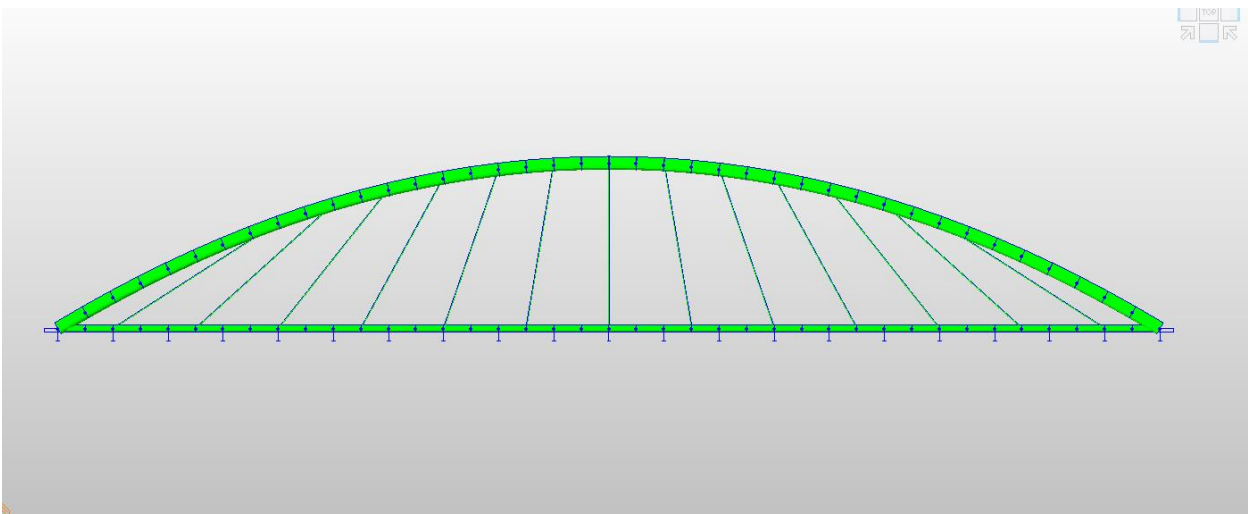


Figura 12 Tirantes tipo b

2.2.2.3 Triángulos

Esta tipología corresponde a una especie de triangulación entre el arco y las vigas longitudinales, podría considerarse como una especie de celosía la que acaban formando conjuntamente estos elementos junto con los tirantes. La hemos obtenido de la 'Figura 17.3.01 (3)' del libro de D. Javier Manterola 'Puentes: Apuntes para su diseño, cálculo y construcción. Tomo II. [2]

La denominamos "tipo c".

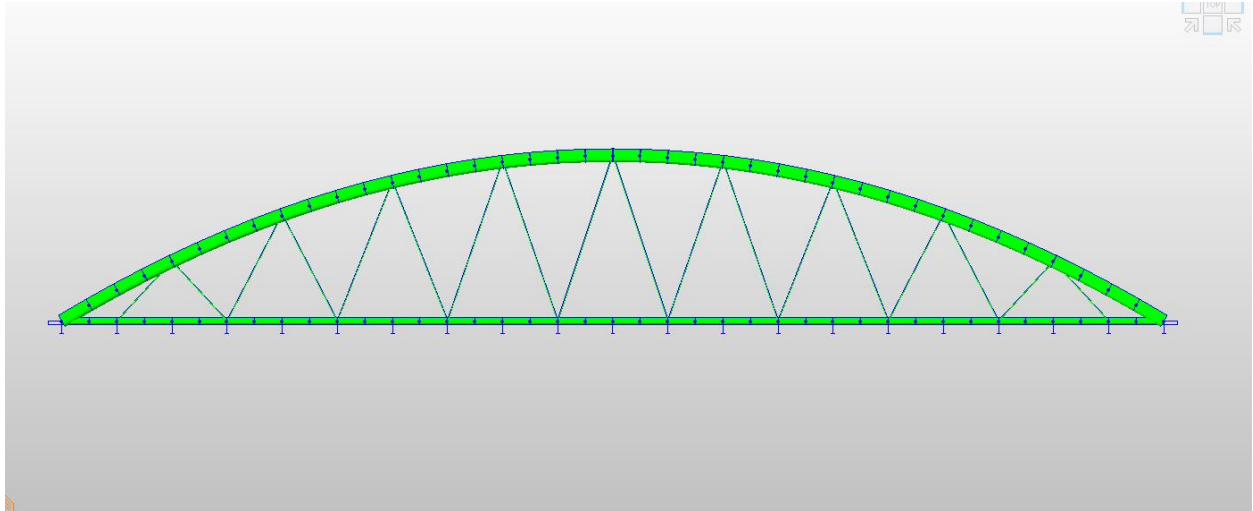


Figura 13 Tirantes tipo c

2.2.2.4 Cruzados

Por último, tenemos una tipología muy parecida a la que se observa en el Puente Reina Sofía, en la que se forma una especie de red entre los tirantes. La hemos obtenido de la 'Figura 17.3.08 (3)' del libro de D. Javier Manterola 'Puentes: Apuntes para su diseño, cálculo y construcción. Tomo II. [2]

Denominamos a esta disposición "tipo d".

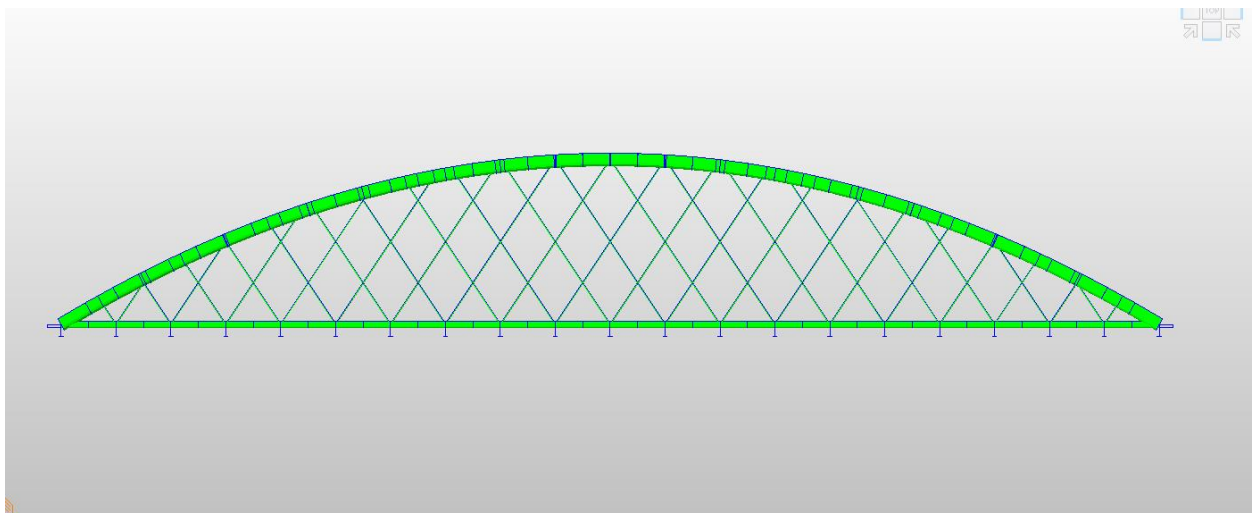


Figura 14 Tirantes tipo d

Una vez tenemos definidos los diferentes modelos, la forma de etiquetarlos o referenciarlos es la siguiente:

- Modelo XY

Donde:

- X corresponde a un número, en función a que tipología de arco nos referimos.
- Y corresponde a una letra, en función de la disposición de tirante que se usa.

2.3. Modelización en Midas Civil

En el siguiente apartado vamos a exponer como hemos modelizado dicha estructura mediante la herramienta informática Midas Civil [3]. En este apartado si vamos a profundizar, detallar y reflejar con más precisión todo lo relativo a la estructura.

2.3.1 Materiales

Este primer apartado refleja que materiales hemos introducido en el programa para modelizar la estructura.

Basicamente son dos: acero y hormigón.

- Acero S275:

Como acero, hemos definido un S275, el cual usaremos para las vigas longitudinales, las vigas transversales, el arco y los tirantes.

Las propiedades son las siguientes:

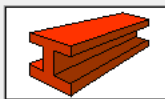
General															
Material ID	1														
Name	S275														
Elasticity Data															
Type of Design	Steel														
															
Type of Material	<input checked="" type="radio"/> Isotropic <input type="radio"/> Orthotropic														
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Steel</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Standard</td> <td>EN05(S)</td> </tr> <tr> <td>DB</td> <td>S275</td> </tr> <tr> <th colspan="2">Concrete</th> </tr> <tr> <td>Standard</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Code</td> <td></td> </tr> <tr> <td>DB</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>		Steel		Standard	EN05(S)	DB	S275	Concrete		Standard		Code		DB	
Steel															
Standard	EN05(S)														
DB	S275														
Concrete															
Standard															
Code															
DB															
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Steel</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Modulus of Elasticity :</td> <td>2.1000e+008 kN/m²</td> </tr> <tr> <td>Poisson's Ratio :</td> <td>0.3</td> </tr> <tr> <td>Thermal Coefficient :</td> <td>6.6667e-006 1/[F]</td> </tr> <tr> <td>Weight Density :</td> <td>76.98 kN/m³</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/> Use Mass Density:</td> <td>7.85 kN/m³/g</td> </tr> </tbody> </table>		Steel		Modulus of Elasticity :	2.1000e+008 kN/m ²	Poisson's Ratio :	0.3	Thermal Coefficient :	6.6667e-006 1/[F]	Weight Density :	76.98 kN/m ³	<input type="checkbox"/> Use Mass Density:	7.85 kN/m ³ /g		
Steel															
Modulus of Elasticity :	2.1000e+008 kN/m ²														
Poisson's Ratio :	0.3														
Thermal Coefficient :	6.6667e-006 1/[F]														
Weight Density :	76.98 kN/m ³														
<input type="checkbox"/> Use Mass Density:	7.85 kN/m ³ /g														

Figura 15 Propiedades Acero

- **Hormigón HA-30:**

El hormigón usado para el tralero corresponde a un HA-30, el cual tiene las siguientes propiedades:

Figura 16 Propiedades Hormigón

Figura 17 Propiedades hormigón II

- **Casos especiales:**

Para la elaboración del modelo hemos tenido que definir un hormigón ligero, que corresponde al mismo que acabamos de definir, HA-30, pero con una densidad nula, por lo que, a efectos de cálculo, no aporta peso a la estructura.

Figura 18 Propiedades Hormigón Ligero

También hemos tenido que definir un material compuesto para el tablero, el cual incluye ambos materiales definidos anteriormente el acero S275 y el hormigón HA-30 ligero.

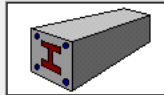
General			
Material ID	4	Name	C30/37
Elasticity Data			
Type of Design	SRC	Steel	
		Standard	EN05(S)
Type of Material	<input checked="" type="radio"/> Isotropic <input type="radio"/> Orthotropic	DB	S275
		Concrete	
		Standard	None
		Code	
		DB	
Steel			
Modulus of Elasticity :	2.1000e+008	kN/m ²	
Poisson's Ratio :	0.3		
Thermal Coefficient :	6.6667e-006	1/[F]	
Weight Density :	76.98	kN/m ³	
<input type="checkbox"/> Use Mass Density:	7.85	kN/m ³ /g	
Concrete			
Modulus of Elasticity :	3.2836e+007	kN/m ²	
Poisson's Ratio :	0.2		
Thermal Coefficient :	5.5556e-006	1/[F]	
Weight Density :	0	kN/m ³	
<input type="checkbox"/> Use Mass Density:	2.549	kN/m ³ /g	

Figura 19 Propiedades Material Mixto

2.3.2 Secciones

A continuación vamos a reflejar las distintas secciones que se pueden encontrar a lo largo de la estructura.

- Viga longitudinal tubular:

Estas vigas son unas de las partes principales de la estructura. Sobre ellas se apoyan las vigas transversales, que son las que soportan el tablero.

Tienen un diametro de 60 centímetros y un espesor de 10 centímetros.

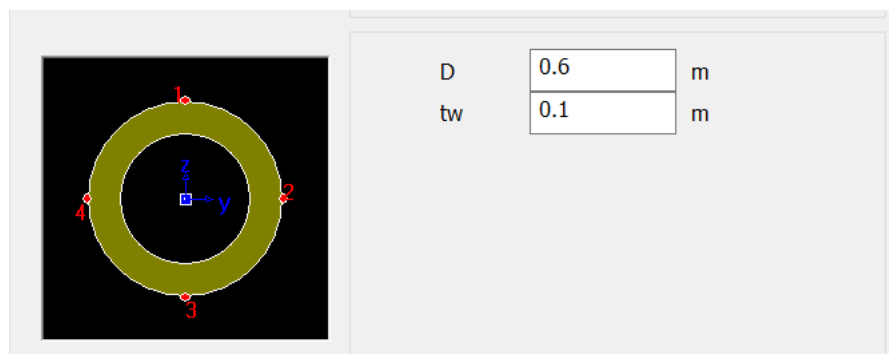


Figura 20 Sección Viga longitudinal

- **Viga transversal:**

Estas vigas, sobre las que se apoya el tablero, las hemos modelado como un elemento mixto. La losa de hormigón las hemos introducido con el material comentado anteriormente como HA-30 ligero, el cual no tiene peso propio. La razón de esto es porque el tablero de hormigón lo introducimos posteriormente mediante elementos longitudinales.

La viga en doble T metálica, es una acero S275.

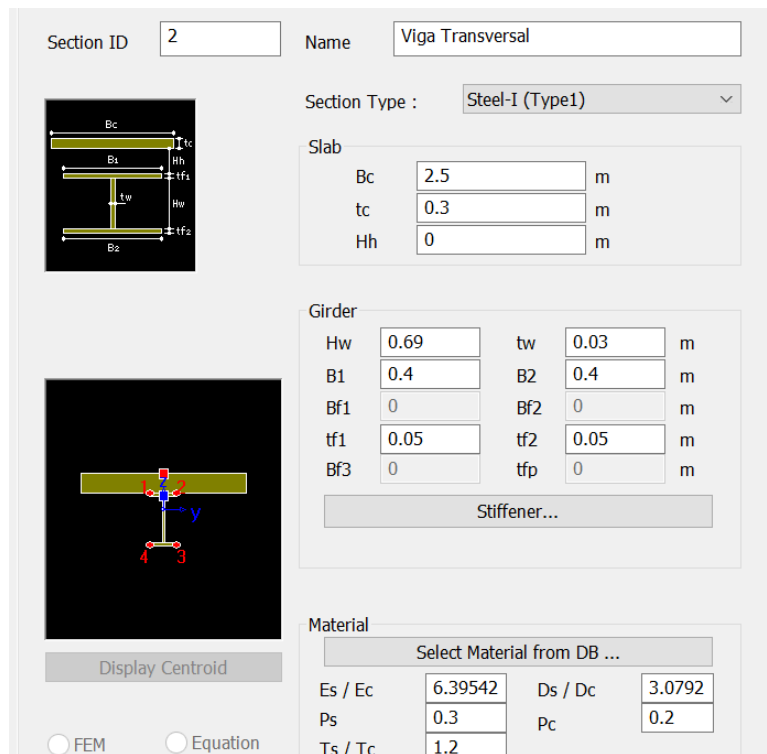


Figura 21 Sección Viga transversal

- **Tablero transversal:**

Estos elementos son básicamente de unión, con el fin de discretizar la estructura en un mayor número de elementos y obtener así un análisis más preciso. También se utiliza el hormigón ligero (HA-30) para este elemento.



Figura 22 Sección tablero transversal

- **Tablero longitudinal:**

Esta sección es bastante importante ya que se utiliza para los elementos que conforman el tablero de la estructura. En este caso si que utilizamos el material HA-30 con todas sus características para estos elementos.

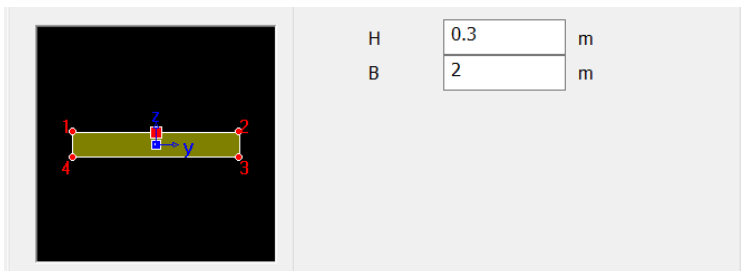


Figura 23 Sección Tablero longitudinal

- Arco:

El arco, que tiene forma tubular, y cuyo material es acero S275, tiene las siguientes dimensiones.

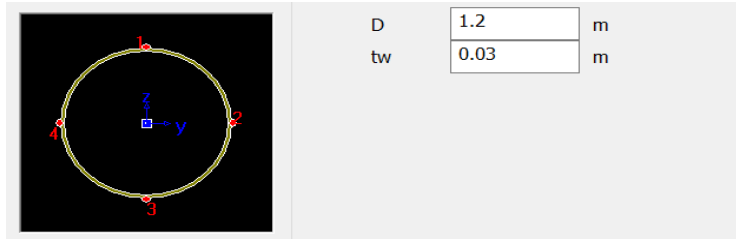


Figura 24 Sección Arco

- Tirantes:

Los tirantes, son de sección circular maciza, logicamente, ya que son cables de acero, que solo trabajan a esfuerzos axiales de tracción.

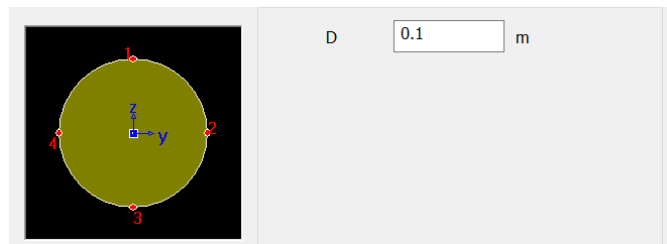


Figura 25 Sección tirantes

- Rigidizadores:

He denominado como rigidizadores a los elementos que unen los arcos entre sí. Son de sección y material similar a los tirantes, con la diferencia de que no trabajan solo a esfuerzos axiales de tracción.

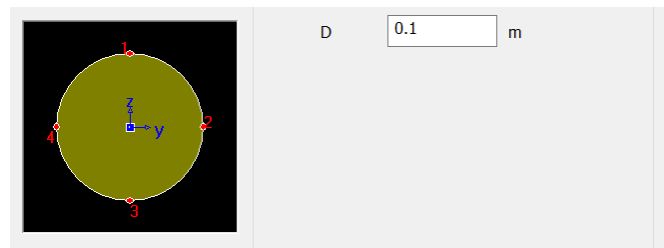


Figura 26 Sección rigidizadores

A modo de resumen, mediante un dibujo básico donde viene reflejado que elemento real hemos usado para cada elemento del modelo de barras, así como la geometría o modelo básico del tablero. En apartados posteriores reflejaremos lo relativo a los arcos y tirantes. Las figuras representan el modelo de barras tal y como lo generamos en Midas Civil [3].

- Vista completa del tablero

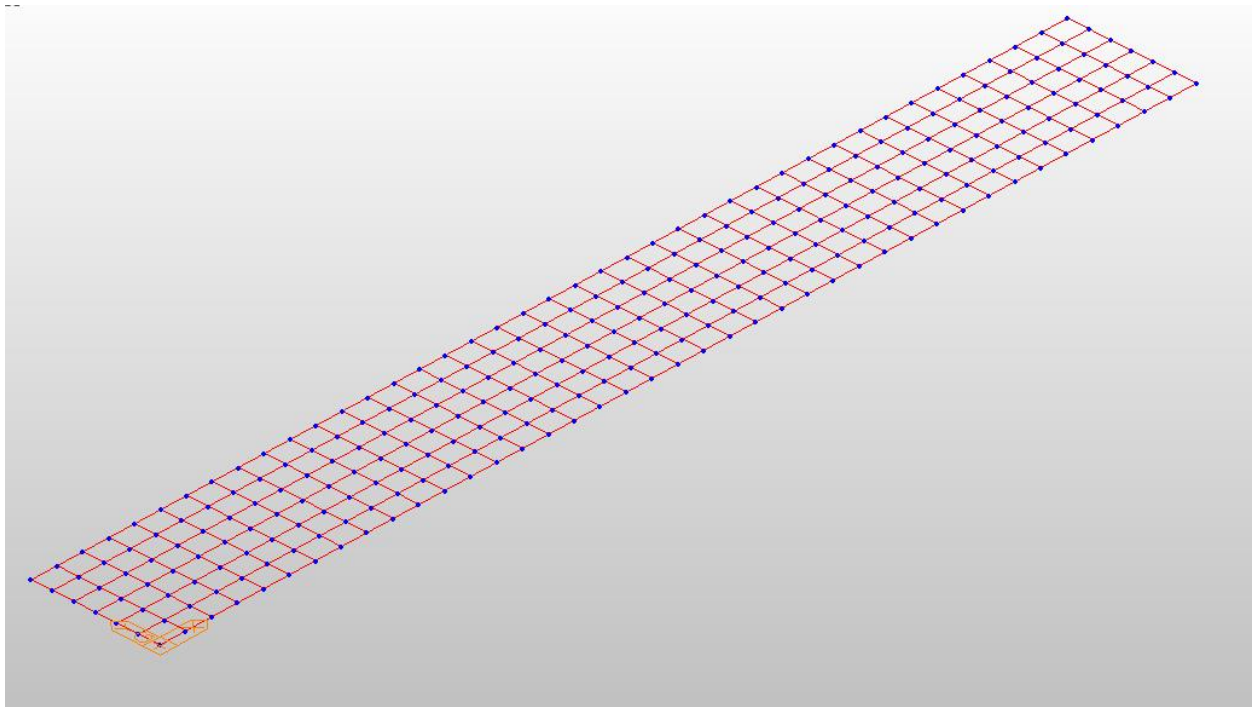


Figura 27 Vista completa tablero

- Vigas longitudinales:

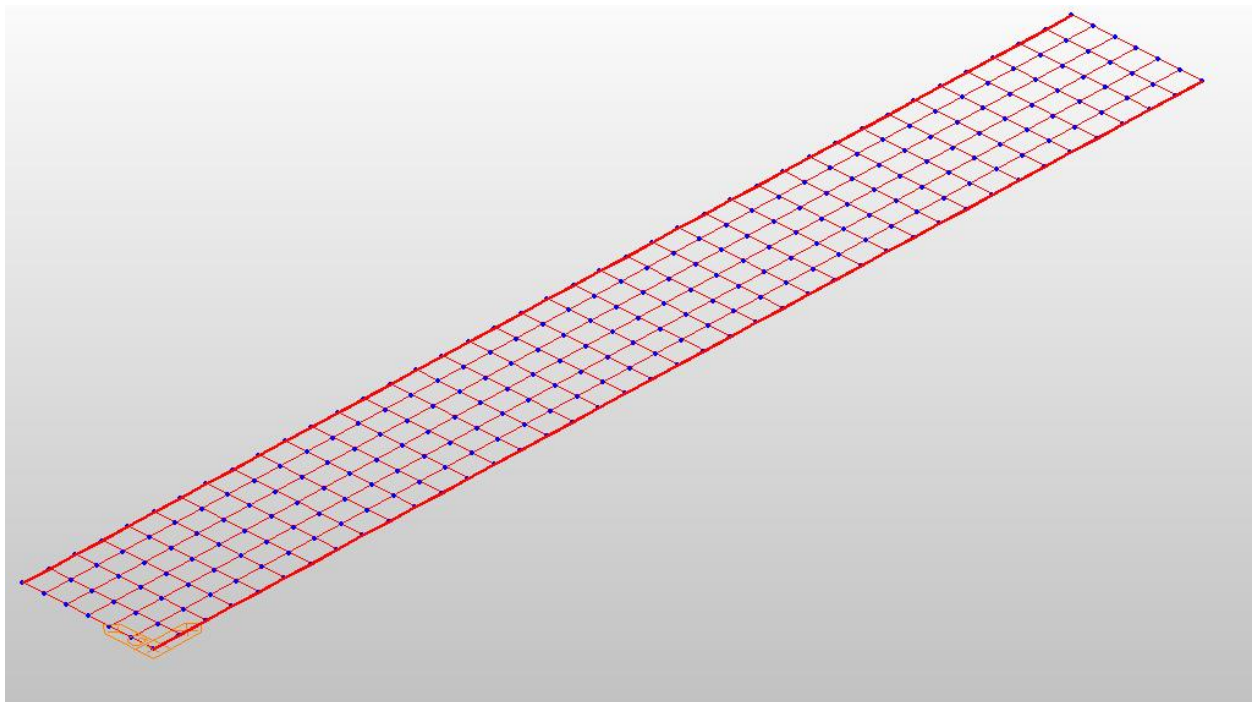


Figura 28 Vigas longitudinales Midas

- Vigas transversales:

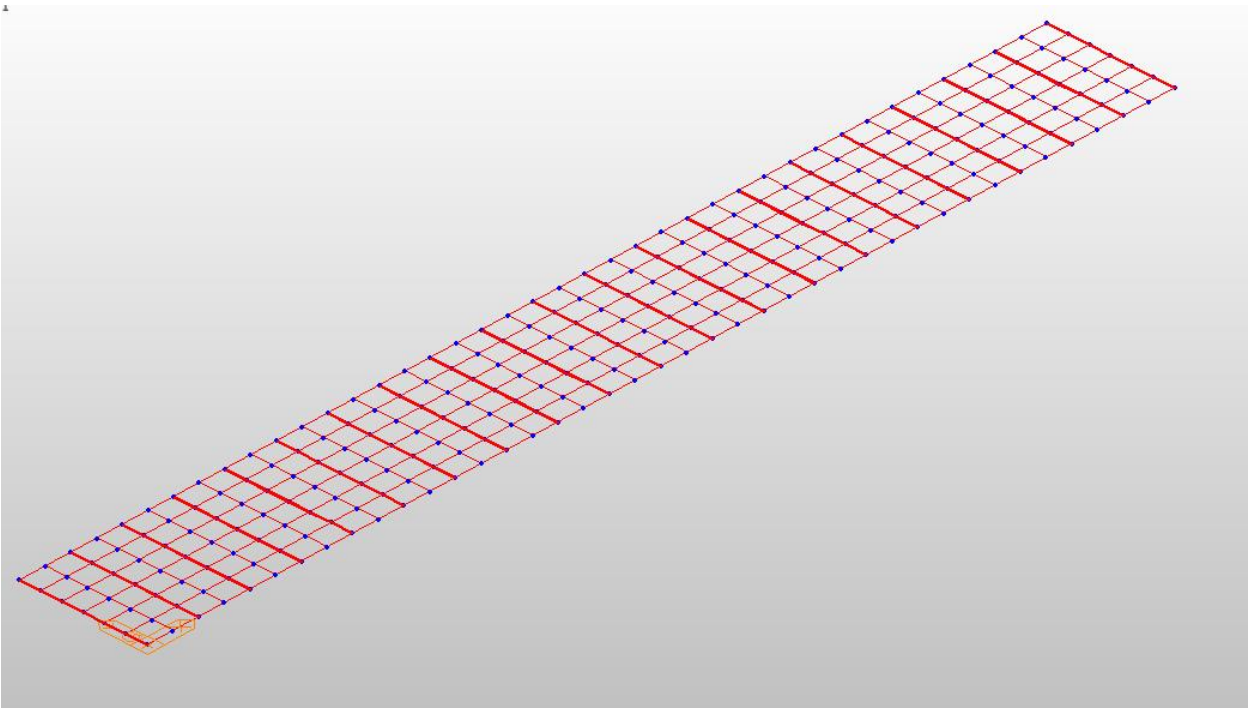


Figura 29 Vigas transversales Midas

- Tablero transversal:

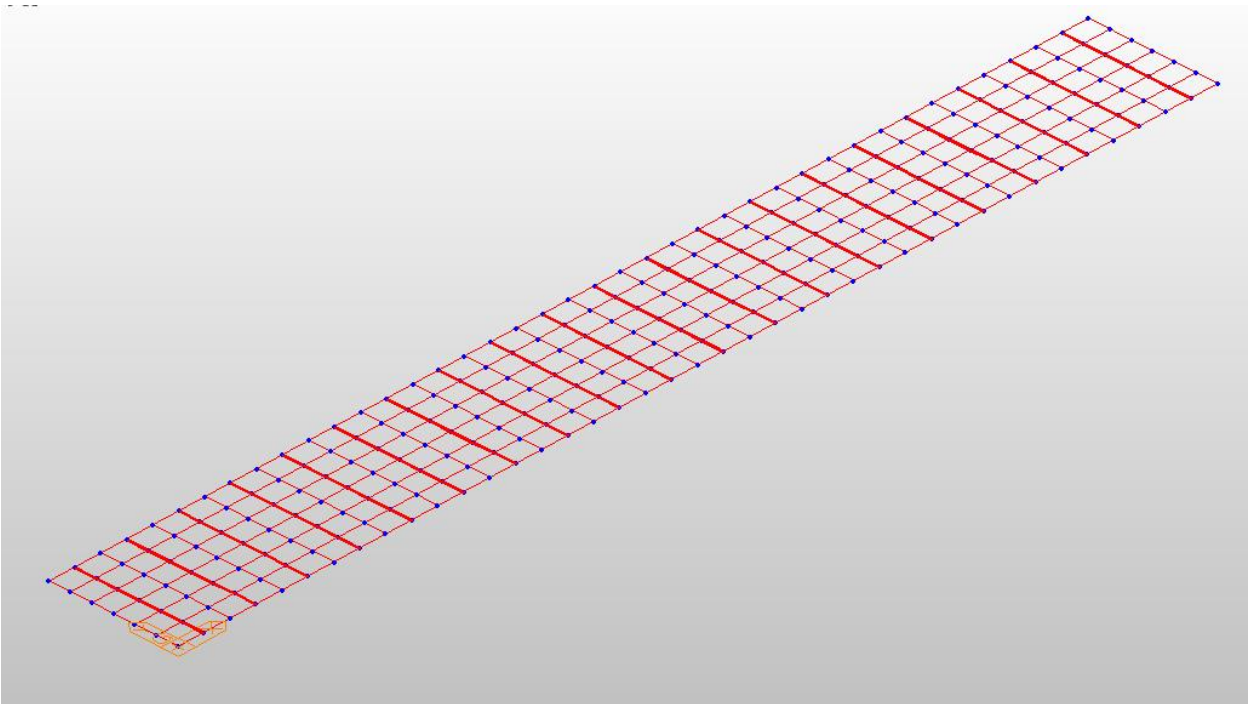


Figura 30 Tablero transversal Midas

- Tablero longitudinal:

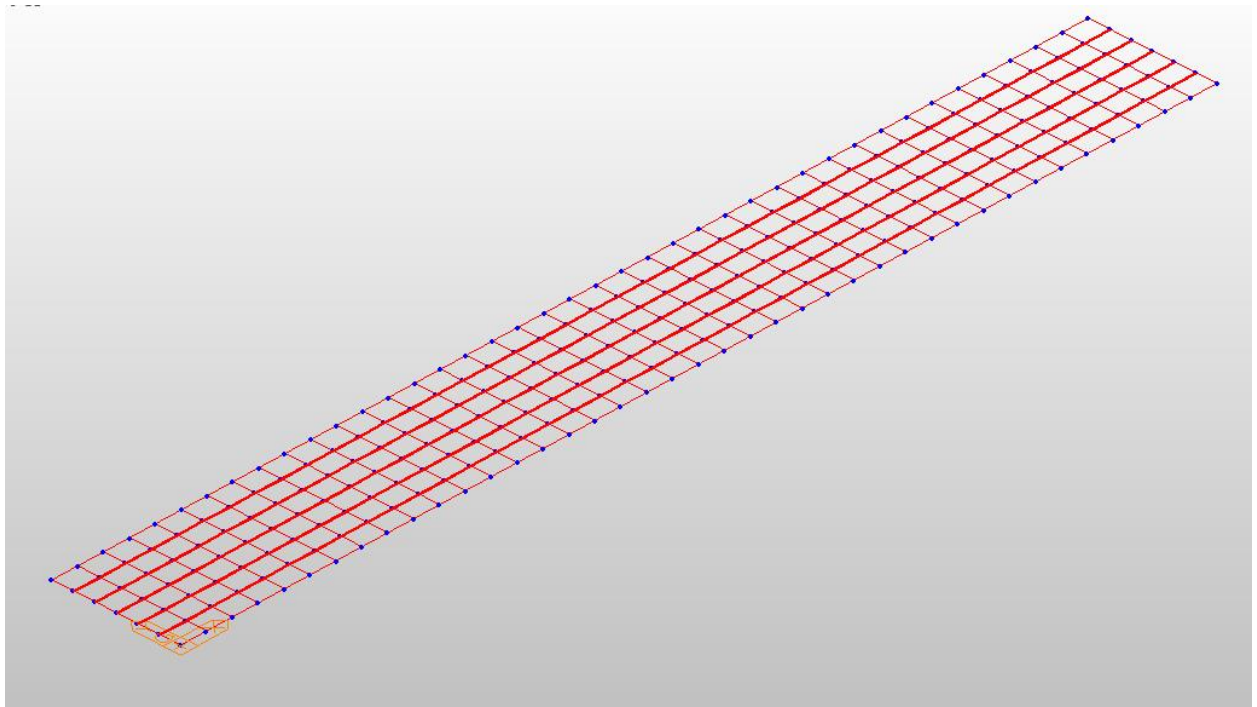


Figura 31 Tablero longitudinal Midas

A continuación vamos a mostrar el modelo 3D, tal y como se vería en la herramienta informática, Midas Civil, elegida para este Proyecto.

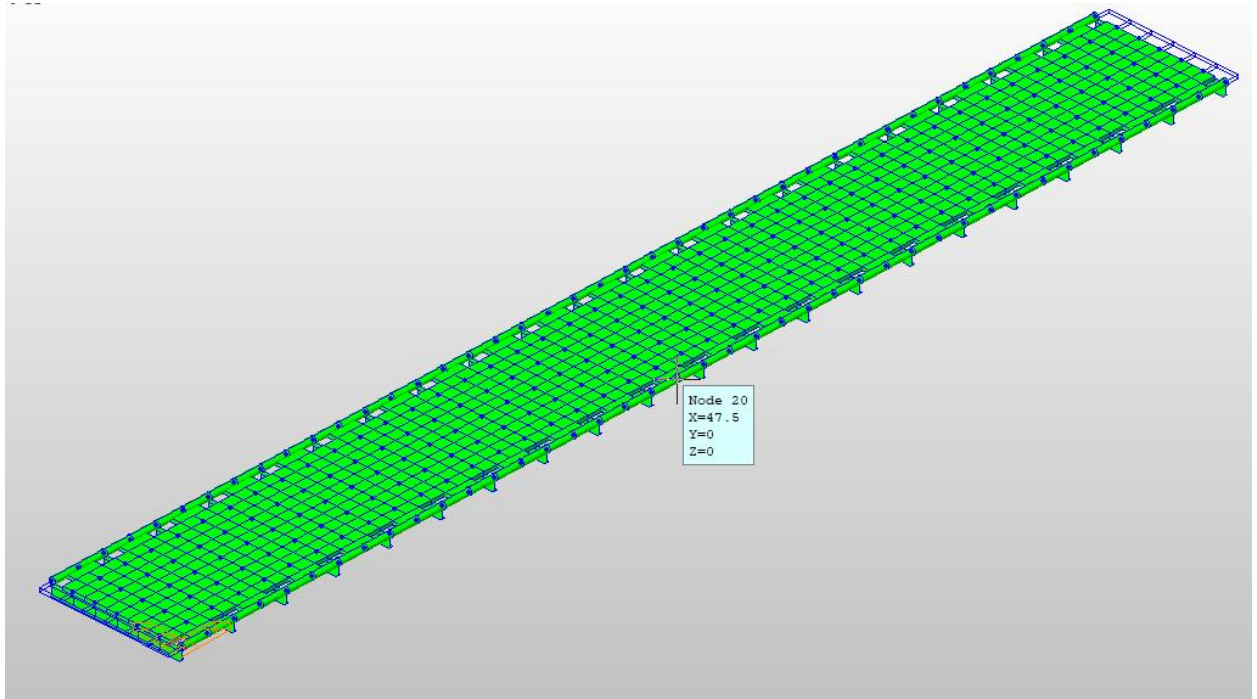


Figura 32 Vista tablero completo 3D

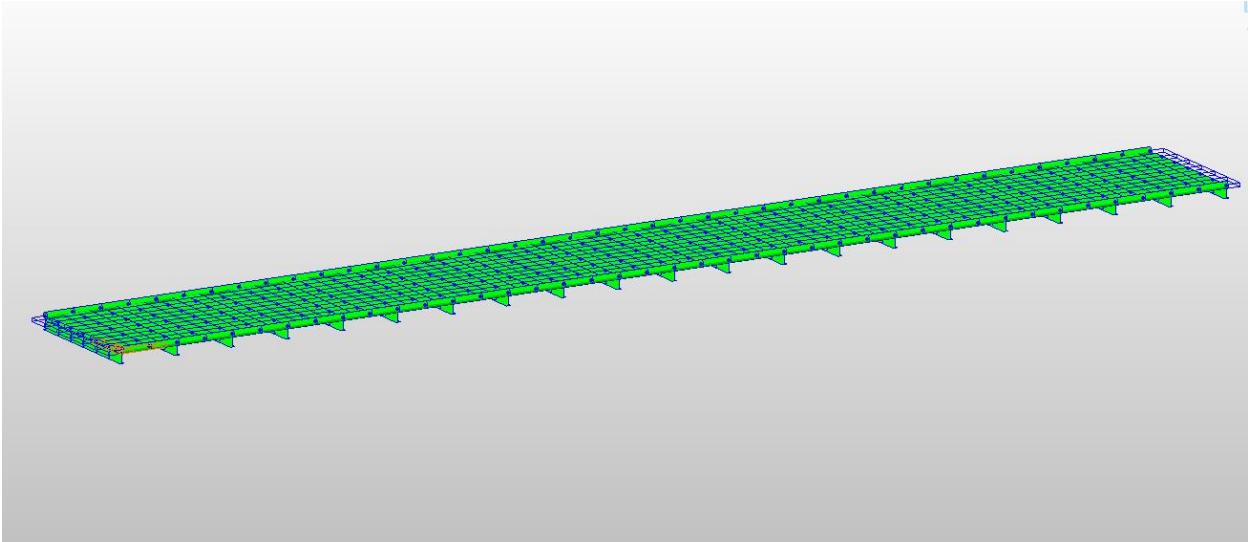


Figura 33 Vista tablero completo 3D II

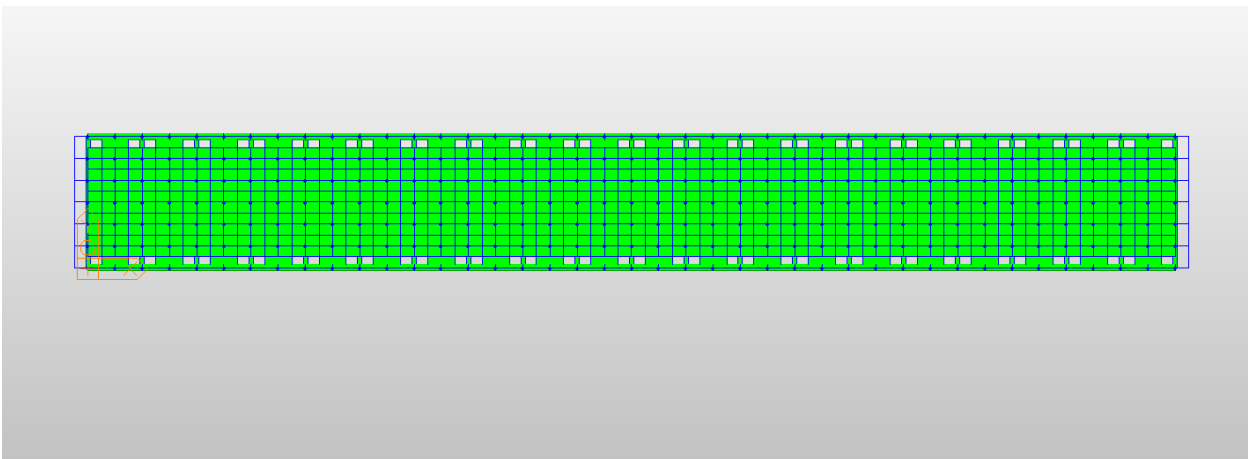


Figura 34 Vista tablero completo 3D III

Por último y a modo de resumen vamos a detallar algunos parámetros básicos de la estructura que se pueden apreciar en las imágenes mostradas.

- Vigas longitudinales:

El ancho de la estructura es de 12 metros. Las vigas longitudinales se encuentran situadas en sus extremos, es decir, con una separación de 12 metros entre ellas.

- Vigas transversales:

La longitud total de la estructura es de 100 metros, y se han colocado 21 vigas transversales (teniendo en cuenta la del origen) a lo largo de la misma, esto da lugar a una viga transversal cada 5 metros.

- Tablero transversal:

Debido a que tenemos una viga transversal cada 5 metros, hemos incluido un elemento situado a 2,5 metros de cada viga transversal para obtener resultados más precisos o completos, es decir, para tener una mayor discretización de la estructura. Colocando un total de 20 elementos con esta sección, recordamos que estos elementos no tienen peso propio.

- Tablero longitudinal:

Estos elementos tienen una anchura de 2 metros y van a lo largo de toda la estructura. Estos elementos son los que conforman el tablero, están situados 1 metro hacia el interior de las vigas longitudinales, con lo que el conjunto de los 5 conforma el tablero de hormigón cuya anchura es de 10 metros.

	Largo	Ancho	Espesor
Vigas longitudinales (metros)	100	0,6 (diámetro)	0,1
Vigas transversales (metros)	12	0,79	Variable
Tablero	100	10	0,3
Arco	100 (planta)	1,2 (diámetro)	0,03
Tirantes	Variable	0,1	0,1 (macizo)
Rigidizadores	Variable	0,1	0,1 (macizo)

Tabla 2 Detalles elementos principales

2.3.3 Condiciones de contorno

La unión de la estructura al terreno es biarticulada, los esfuerzos del tablero se transfieren a las vigas longitudinales, a través de las vigas transversales, que son parte del “esqueleto principal” y estas se encargan de transmitirlos a las pilas de apoyo y posteriormente al terreno. La función del arco junto con los tirantes es ayudar a las vigas longitudinales a resistir estos esfuerzos.

Definimos en el modelo de Midas Civil [3], estas condiciones de contorno, las cuales corresponden a restringir los desplazamientos y el giro de torsión en los extremos de la estructura. En la siguiente figura se muestra donde hemos aplicado esas condiciones de contorno.

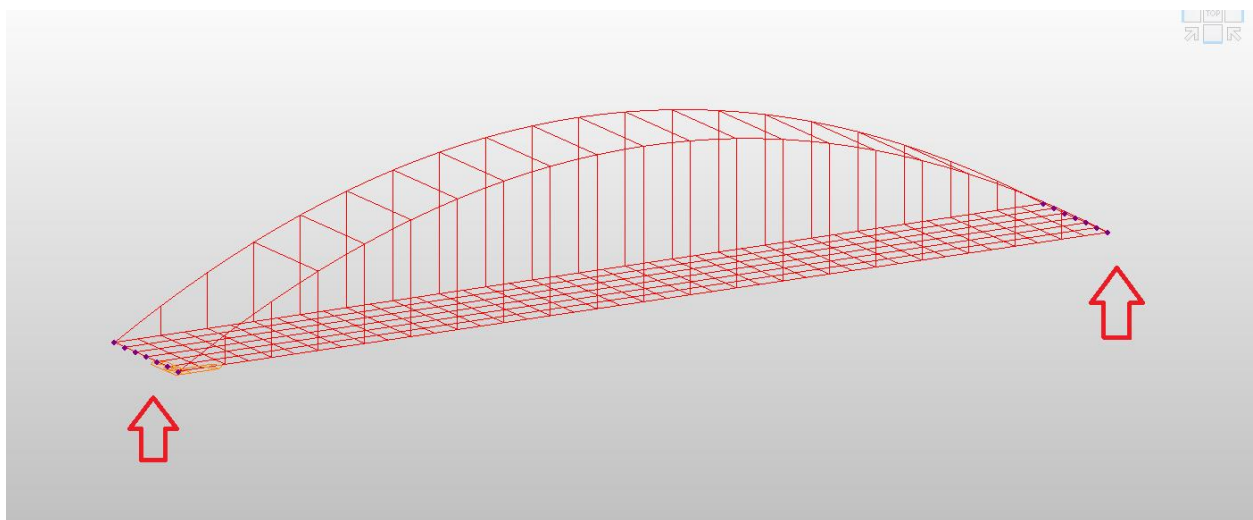


Figura 35 Condiciones de contorno

2.3.4 Cargas

Principalmente tenemos dos cargas actuando sobre la estructura, el peso propio y la carga muerta.

El peso propio es algo intrínseco a la estructura, en concreto a cada elemento que la conforma. Muy sencilla de calcular y de introducir en el programa de Midas Civil [3].

En Segundo lugar tenemos la carga muerta del pavimento que se encuentra sobre el tablero de hormigón. Considerando los siguientes datos:

- Mezcla bituminosa 23 kN/m³
- Espesor de la mezcla 9 centímetros
- Anchura del tablero 10 metros

$$23 \frac{kN}{m^3} \times 0,09 m \times 10 m = 20,7 \frac{kN}{m^3} \quad (2-1)$$

Teniendo en cuenta que subdividimos el tablero en “5” elementos longitudinalmente a lo largo de su longitud, a la hora de introducirlo en Midas Civil, tendremos que dividir entre 5 este valor. Con lo que finalmente ponemos una carga vertical de 4,14 kN/m³ en cada elemento que hemos denominado con la sección “tablero longitudinal”.

2.4. Parámetros a analizar.

En este apartado vamos a indicar los parámetros o resultados que vamos a comparar de la estructura, los cuales obtendremos gracias a la herramienta informática que hemos escogido para este trabajo.

- Flecha: El desplazamiento máximo de la estructura en la dirección vertical, es decir, el eje Z. Los valores obtenidos corresponden a las cargas aplicadas que hemos comentado anteriormente, la acción conjunta tanto del peso propio, como la carga muerta del pavimento.
- Modos de pandeo: Vamos a obtener los 3 primeros modos de pandeo de la estructura. Para ello hemos considerado que actúan el peso propio y la carga muerta del pavimento, hemos tenido que convertir las cargas en masas para poder realizar este análisis dinámico.
- Modos de vibración: De forma análoga vamos a obtener las 3 primeras frecuencias naturales de la estructura. Consideramos que actúan las cargas de peso propio y carga muerta del pavimento, igualmente, hemos tenido que transformar las cargas en masas para poder realizar este análisis.

- Coeficiente de pandeo

Recordamos:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{cr}}}$$

Donde:

A es el área transversal efectiva para el elemento que pretender dimensionarse para resistir el pandeo.

f_y es la **tensión mecánica** máxima usada para caracterizar el comportamiento del material.

N_{cr} es la carga crítica de pandeo del elemento.

Figura 36 Coeficiente de pandeo

Entonces cuanto más alto sea el valor del coeficiente de pandeo puede significar:

- El área transversal efectiva es mayor (Tenemos más material)
- La tensión mecánica máxima del material es mayor (Tenemos un material de mejores características)
- La carga crítica de pandeo es menor

Las dos primeras opciones implican un mayor coste económico, la tercera opción es en función de lo bien que diseñemos y las cargas que tenga que aguantar la estructura.

3 RESULTADOS

Ningún camino de rosas conduce a la gloria.

Jean de la Fontaine, Fables, XIV

A continuación vamos a mostrar los resultados obtenidos en los diferentes modelos. Lo haremos de la siguiente manera, dividimos en diferentes apartados según el modelo de arco que tengamos y a su vez, lo subdividiremos en diferentes subapartados en función de la tipología de tirantes. Los resultados que vamos a analizar son la flecha, los modos de pandeo y modos de vibración de cada estructura.

Junto a las etiquetas de flecha, modo de pandeo o modo de vibración incluiremos los valores de cada factor respectivamente. La longitud en centímetros para la flecha y el factor de pandeo, el cual es adimensional, para los diferentes modos de pandeo.

Las variables que vamos a estudiar para los modos de vibración están íntimamente relacionadas, son la frecuencia y el periodo de la estructura. Concretamente nos vamos a centrar en su frecuencia natural.

¿Por qué es importante este valor? Debido a que si alguna sollicitación provoca en la estructura un modo de vibración cuya frecuencia es igual que la frecuencia natural de la estructura, esta entra en resonancia. Precisamente buscamos esas frecuencias naturales para evitar que la estructura entre en resonancia.

A modo de recordatorio, la frecuencia es igual a la inversa del periodo.

$$f = 1/T \quad (3-1)$$

Donde:

- “f” es la frecuencia de la estructura, normalmente se toma “w” para la frecuencia natural.
- “T” es el periodo de la estructura.

La flecha que obtenemos es para la acción conjunta del peso propio de los elementos de la estructura junto con la carga muerta del pavimento, ambas detalladas en el capítulo anterior.

Para los modos de pandeo y modos de vibración tenemos hemos considerado también la acción conjunta del peso propio y la carga muerta. Para poder realizar este análisis en Midas Civil [3], es necesario convertir esas cargas en masas.

Por último, incluiremos las conclusiones y comentaremos los resultados de los diferentes modelos.

3.1 Modelo 1

En este primer apartado vamos a analizar el modelo de arco 1, correspondiente a dos arcos paralelos.

3.1.1 Modelo 1a

- Flecha: 6,49 centímetros

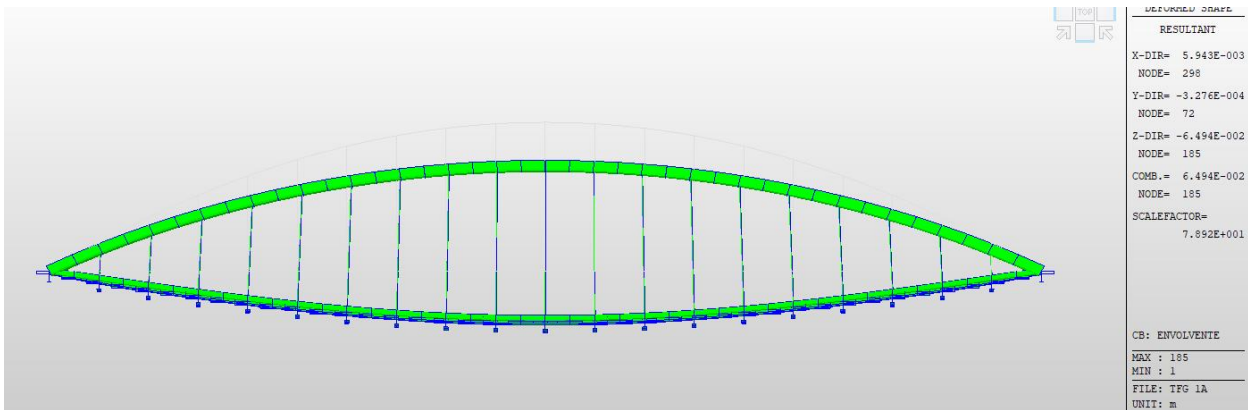


Figura 37 Flecha

- Modos de pandeo
 - o Modo 1: 2,809

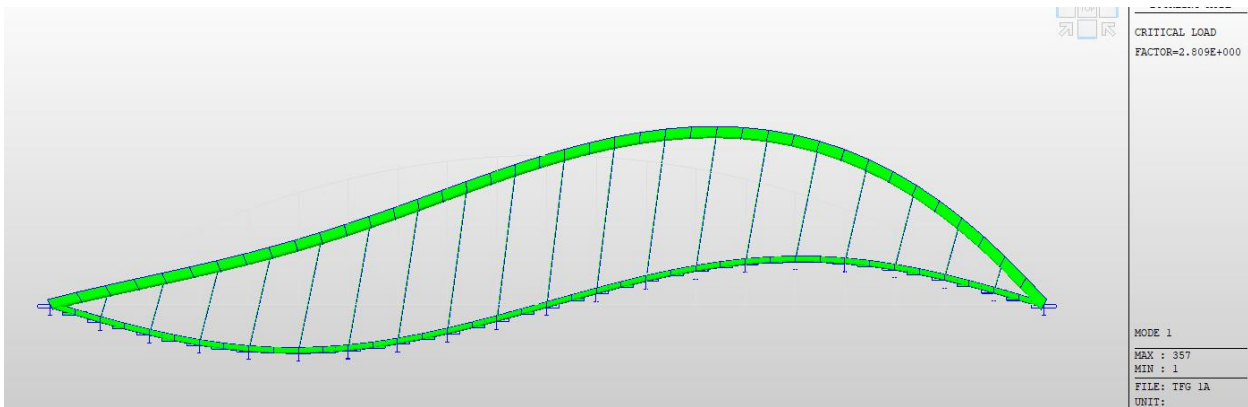


Figura 38 Modo 1 de pandeo

- Modo 2: 3,999

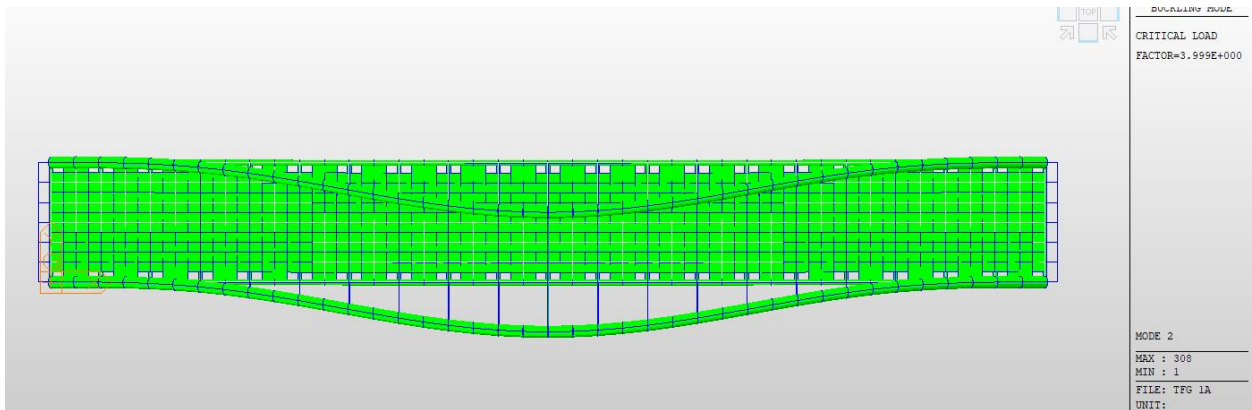


Figura 39 Modo 2 de pandeo

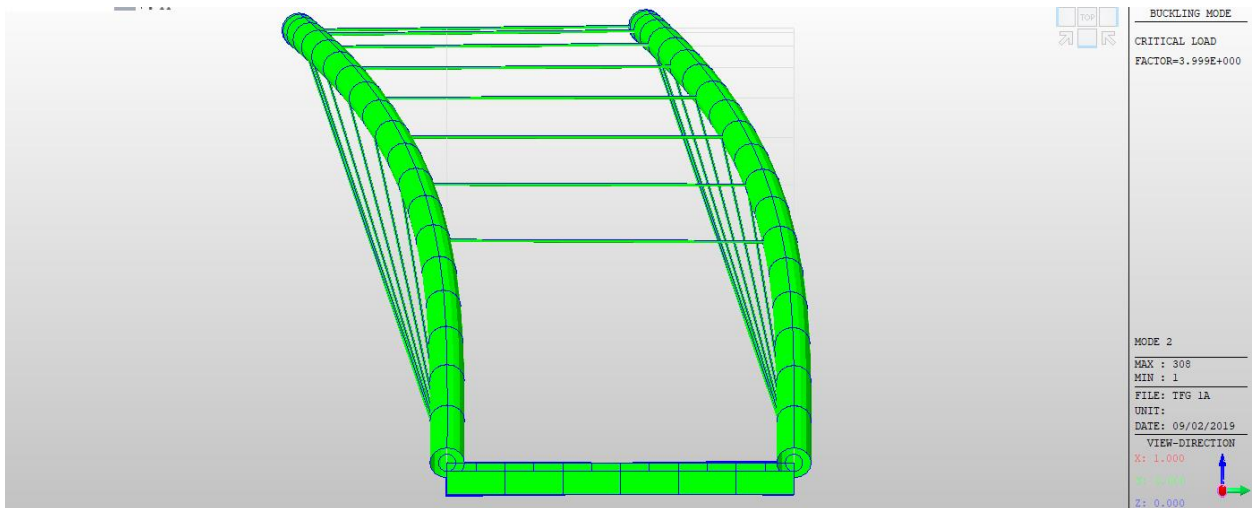


Figura 40 Modo 2 de pandeo II

- Modo 3: 4,093

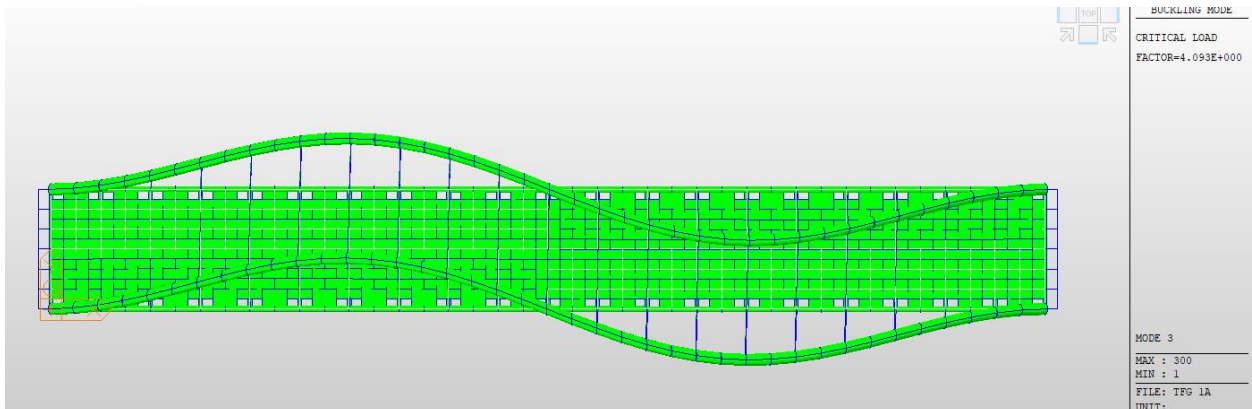


Figura 41 Modo 3 de pandeo

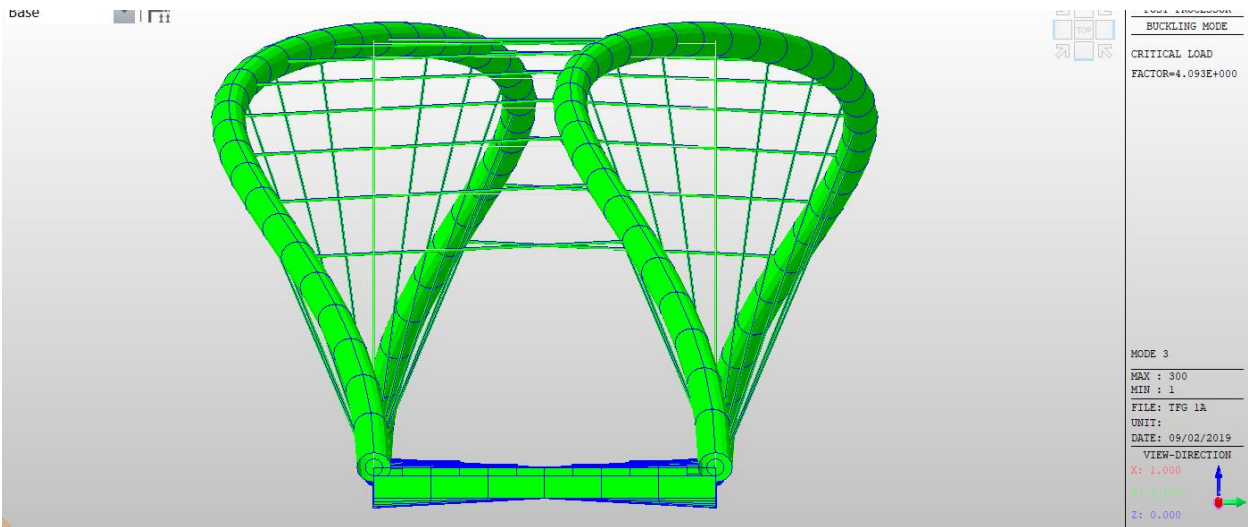


Figura 42 Modo 3 de pandeo II

- Modos de vibración: Frecuencias naturales
 - o Modo 1: (1,452 Hz)



Figura 43 Modo 1 de vibración

- o Modo 2: (3,025 Hz)

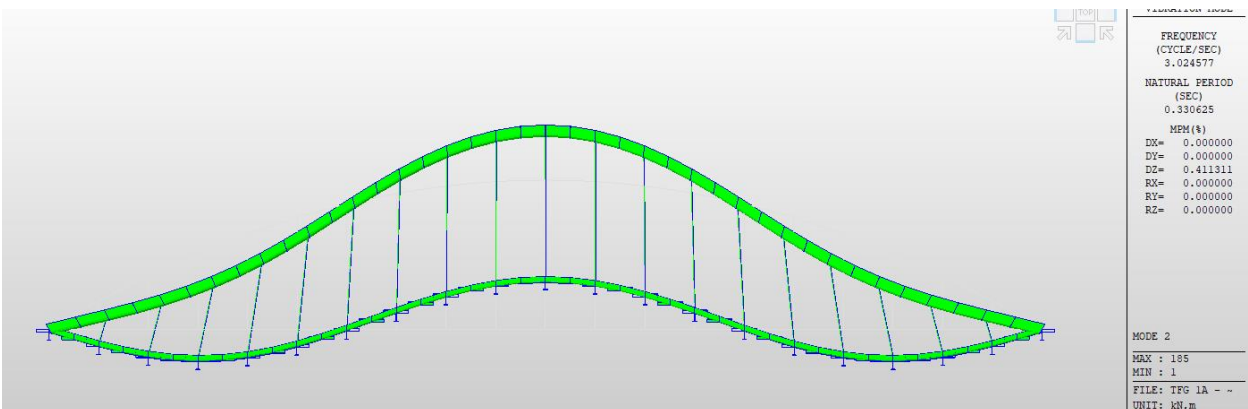


Figura 44 Modo 2 de vibración

- o Modo 3: (5,517Hz)

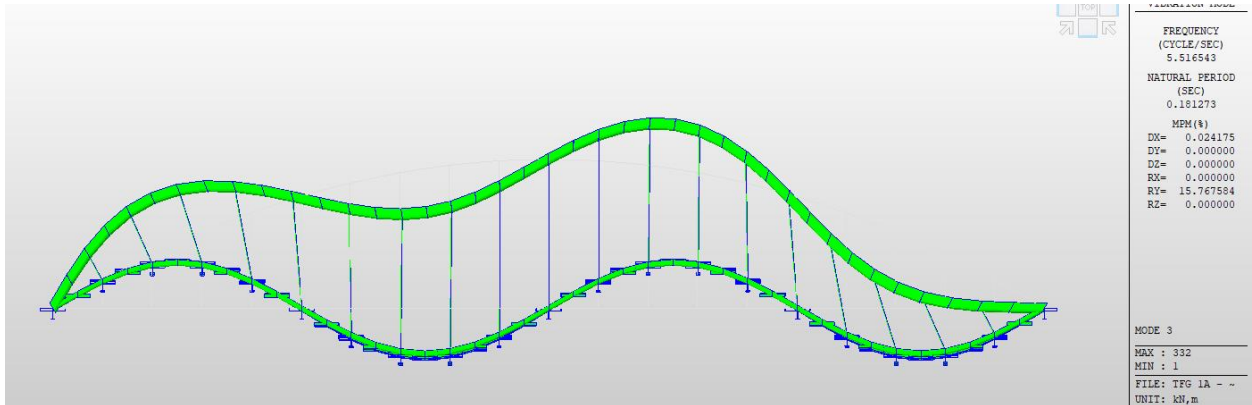


Figura 45 Modo 3 de vibración

3.1.2 Modelo 1b

- Flecha: 34,68 centímetros

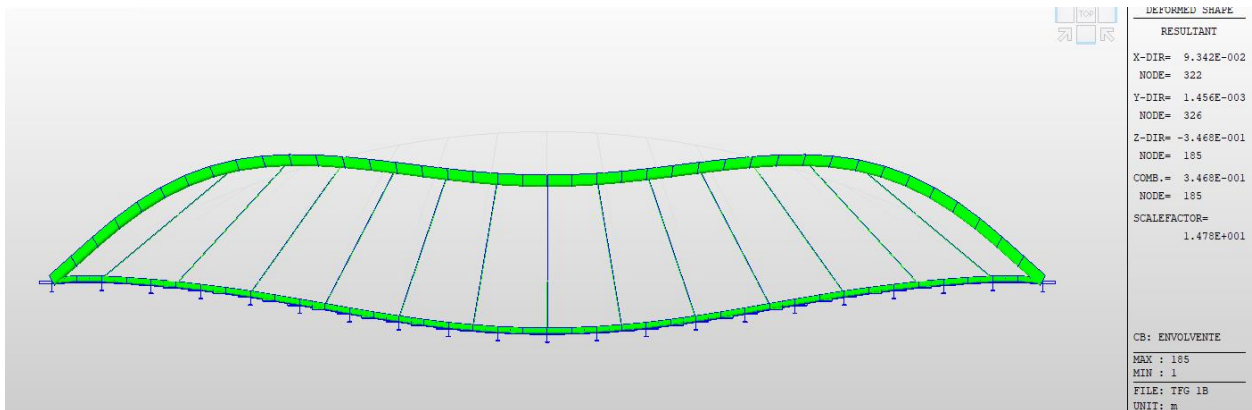


Figura 46 Flecha

- Modos de pandeo

- o Modo 1: 2,175

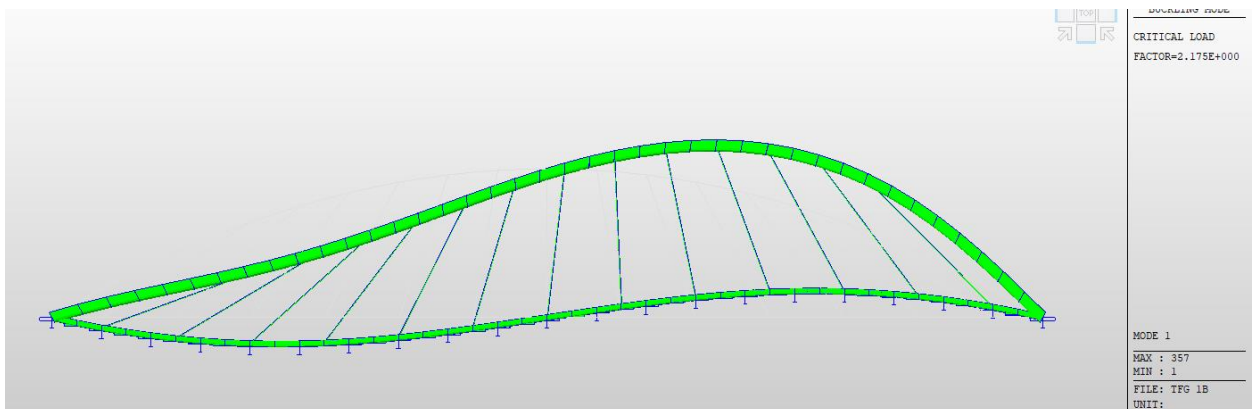


Figura 47 Modo 1 de pandeo

- o Modo 2: 3,855

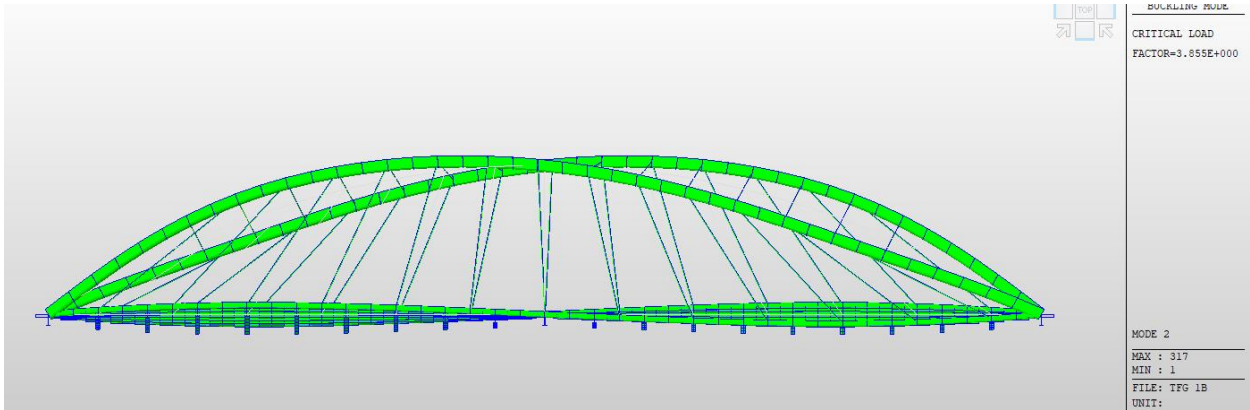


Figura 48 Modo 2 de pandeo

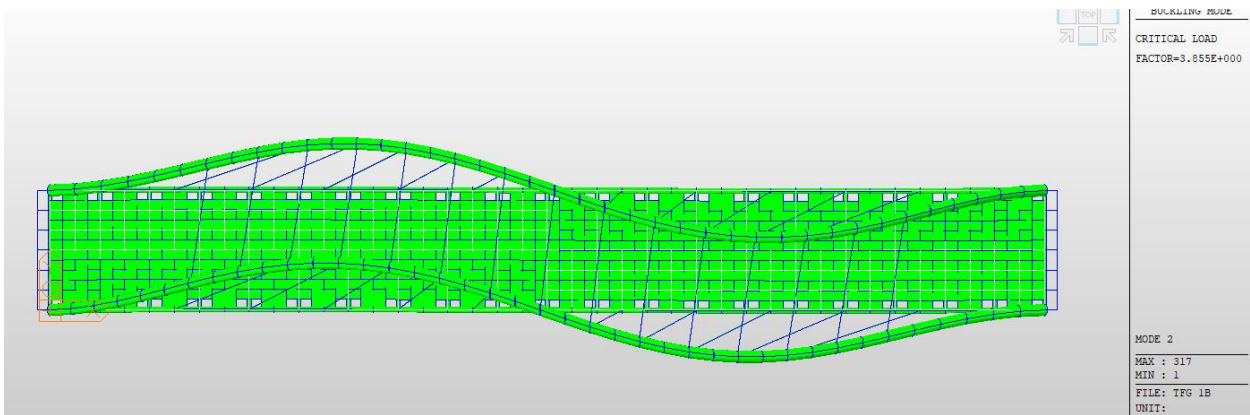


Figura 49 Modo 2 de pandeo II

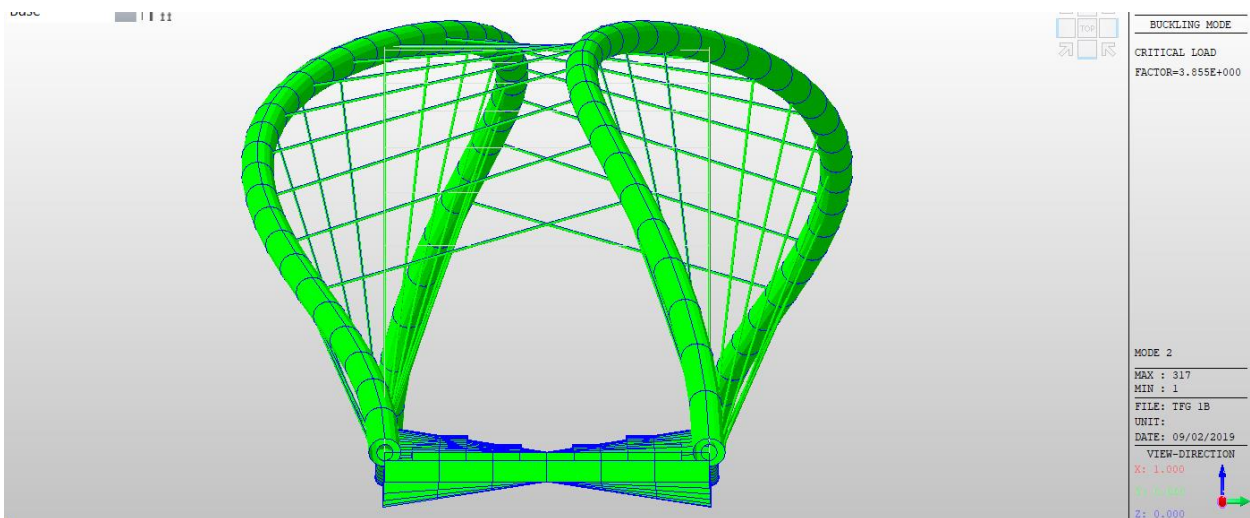


Figura 50 Modo 2 de pandeo III

- o Modo 3: 4,299

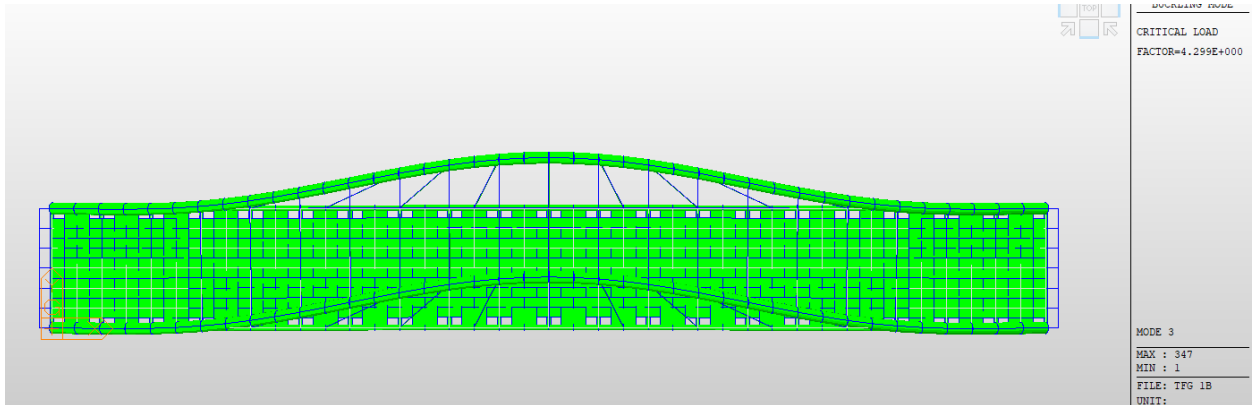


Figura 51 Modo 3 de pandeo

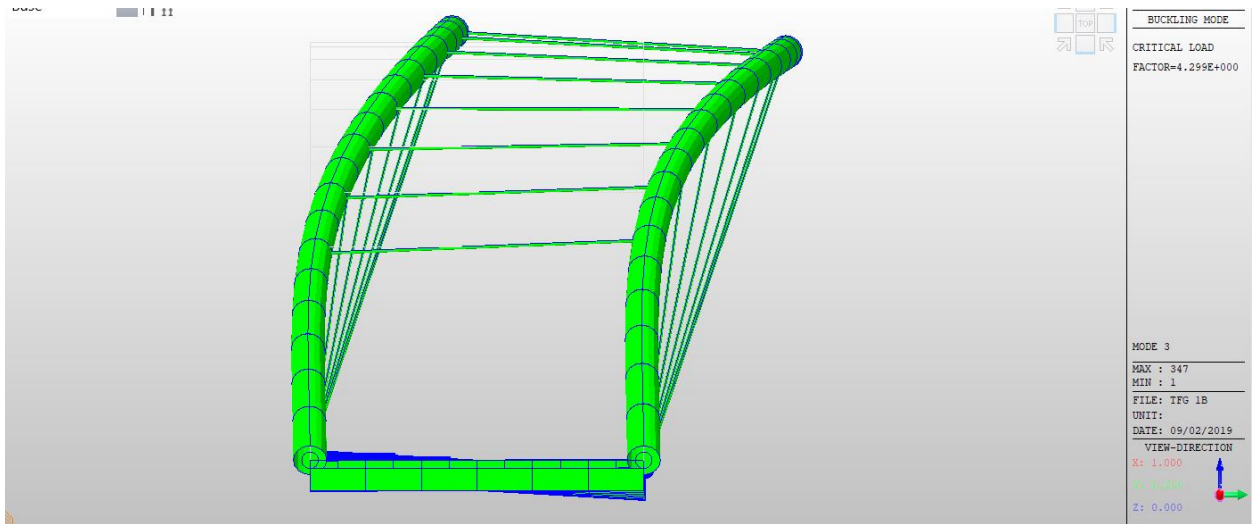


Figura 52 Modo 3 de pandeo II

- Modos de vibración: Frecuencias naturales

- o Modo1: (2,097 Hz)

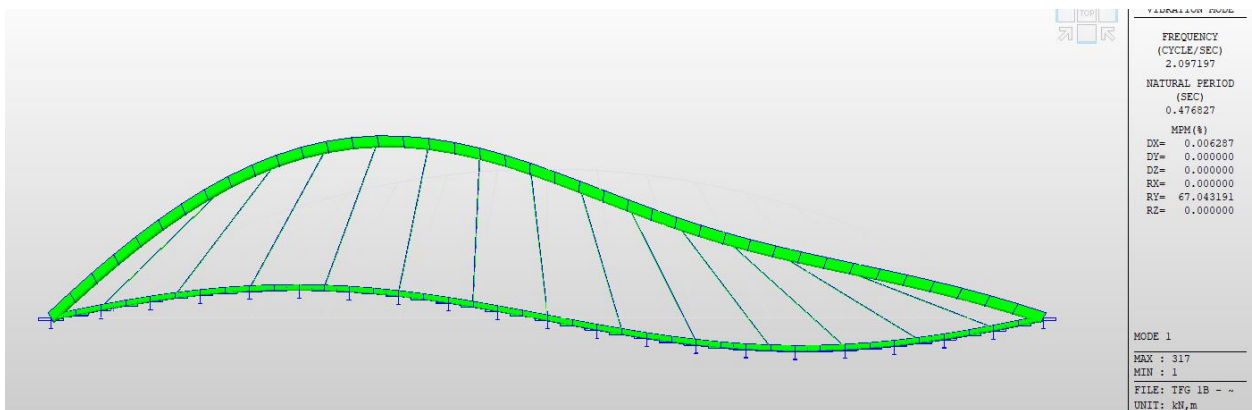


Figura 53 Modo 1 de vibración

o Modo 2: (2,709 Hz)

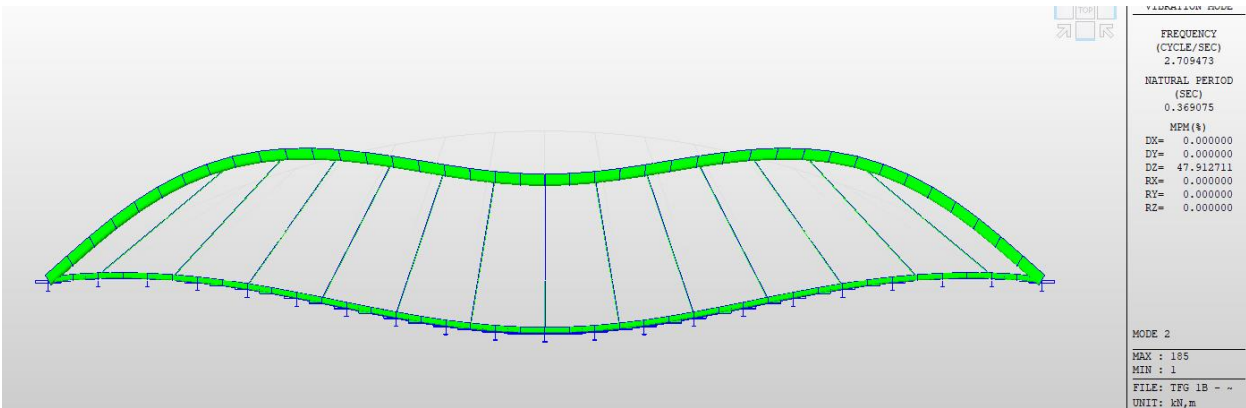


Figura 54 Modo 2 de vibración

o Modo 3: (6,499 Hz)



Figura 55 Modo 3 de vibración

3.1.3 Modelo 1c

- Flecha: 5,964 centímetros

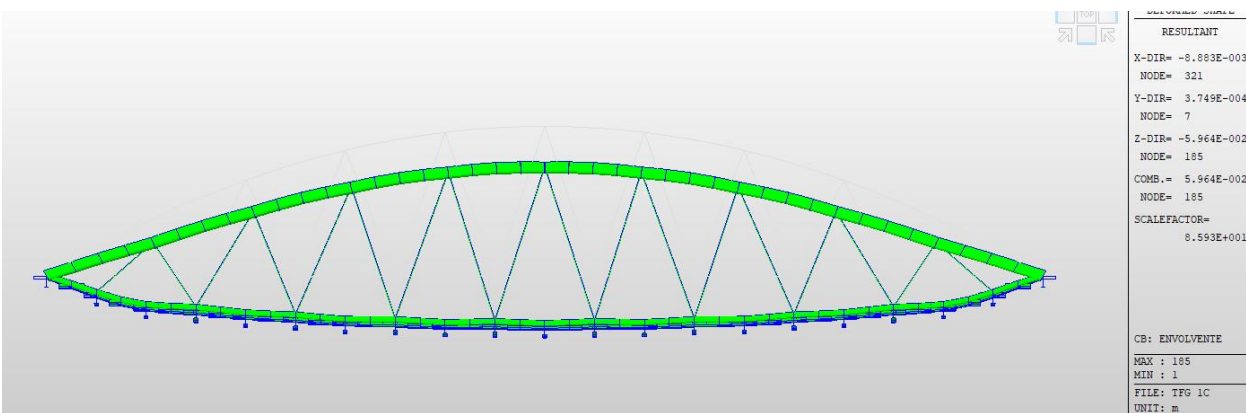


Figura 56 Flecha

- Modos de pandeo
 - o Modo 1: 3,951

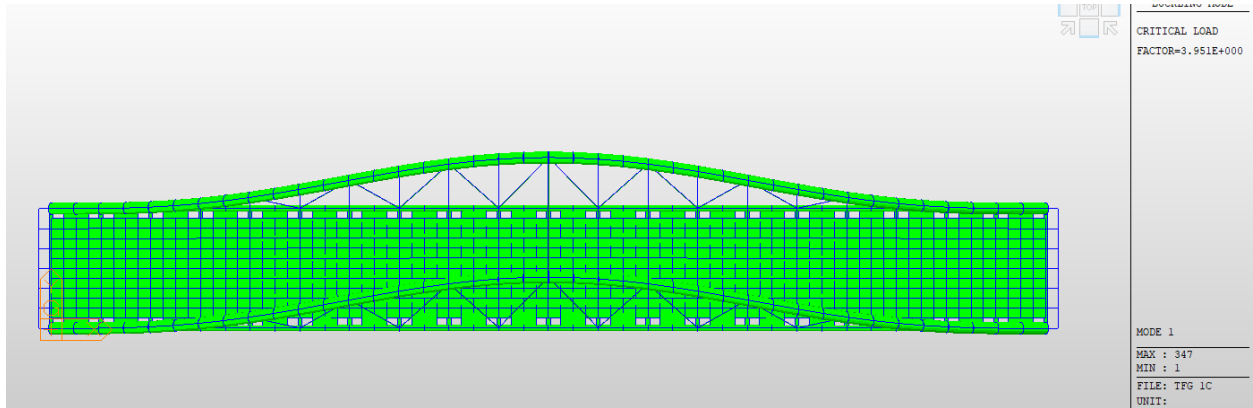


Figura 57 Modo 1 de pandeo

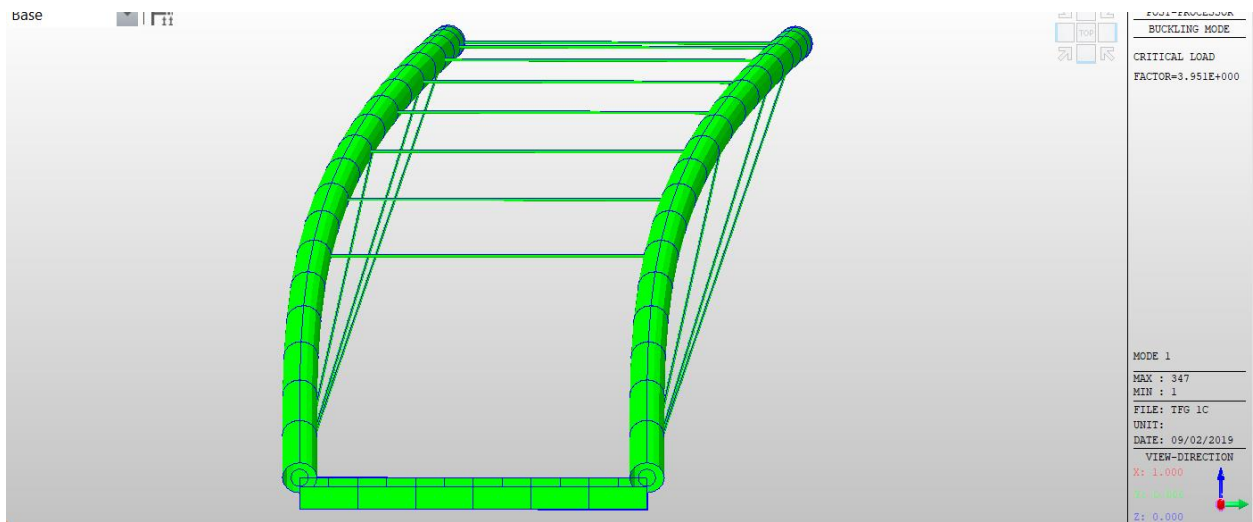


Figura 58 Modo 1 de pandeo II

- o Modo 2: 4,070

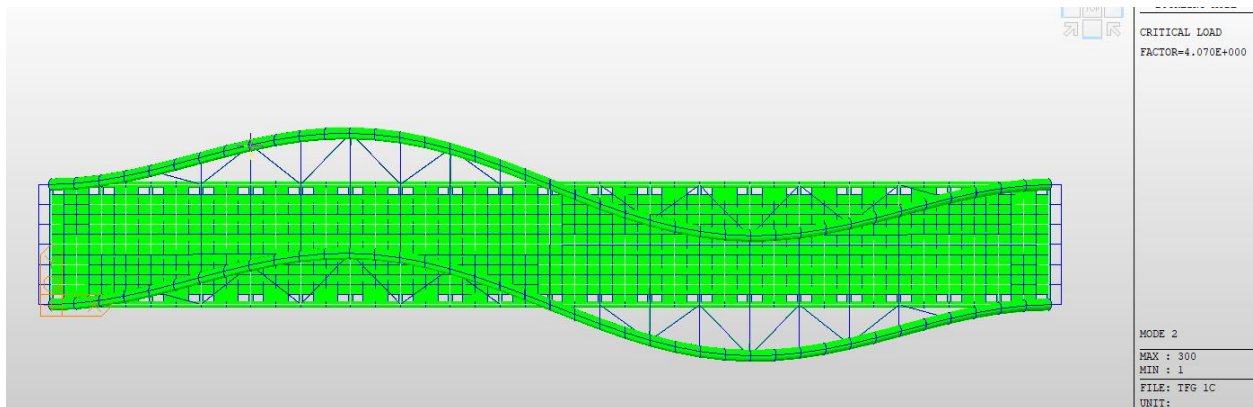


Figura 59 Modo 2 de pandeo

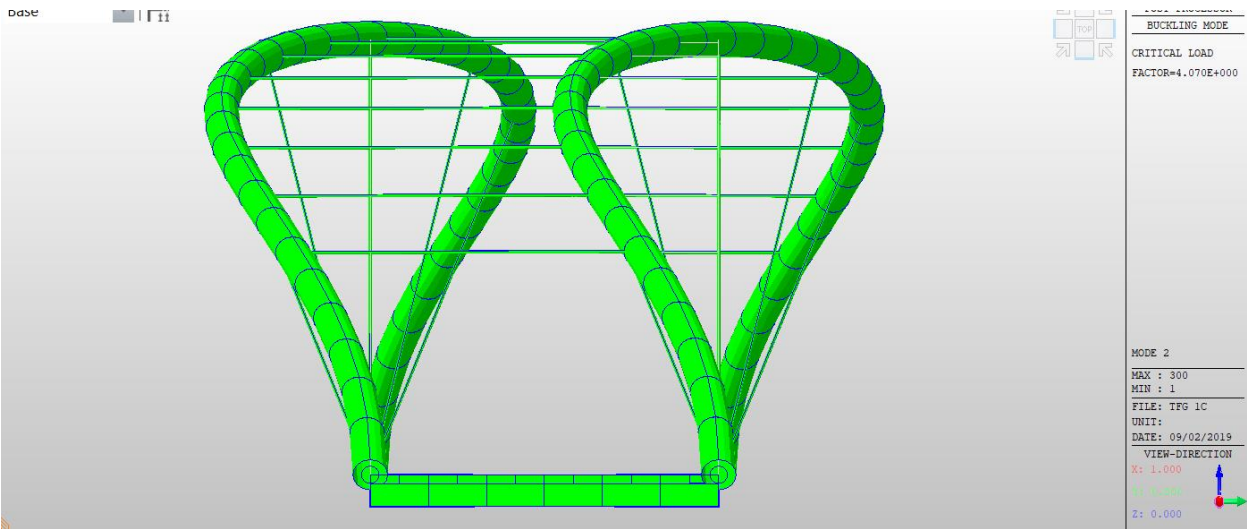


Figura 60 Modo 2 de pandeo II

- o Modo 3: 10,15

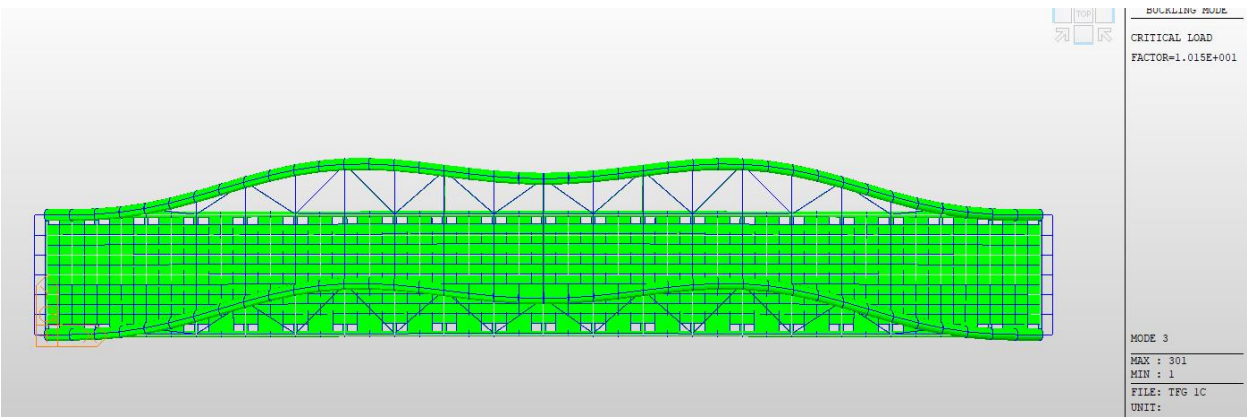


Figura 61 Modo 3 de pandeo

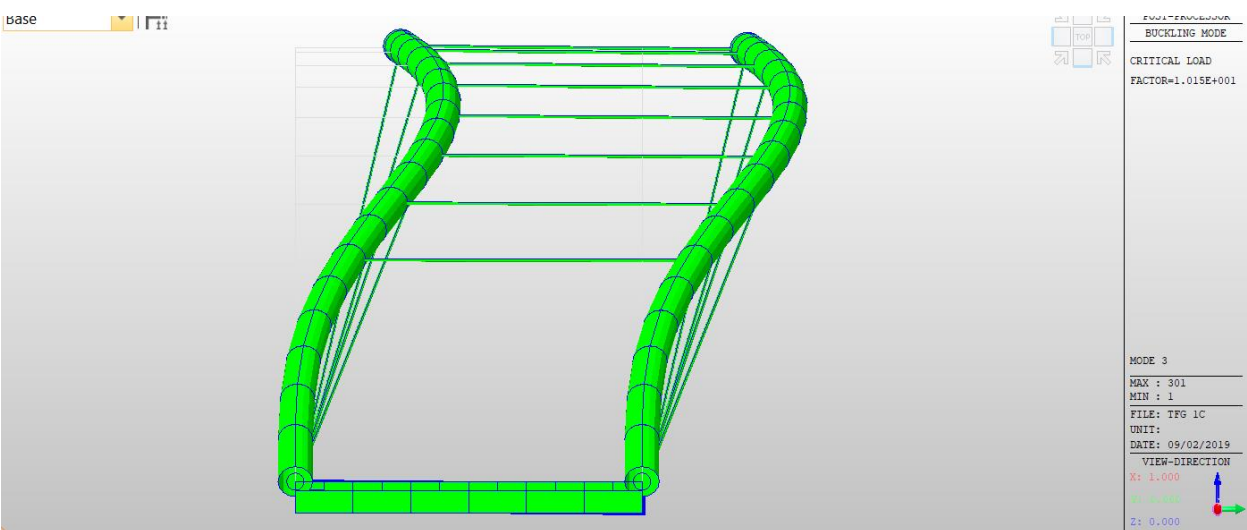


Figura 62 Modo 3 de pandeo II

- Modos de vibración: Frecuencias naturales

- o Modo 1: (6,670 Hz)

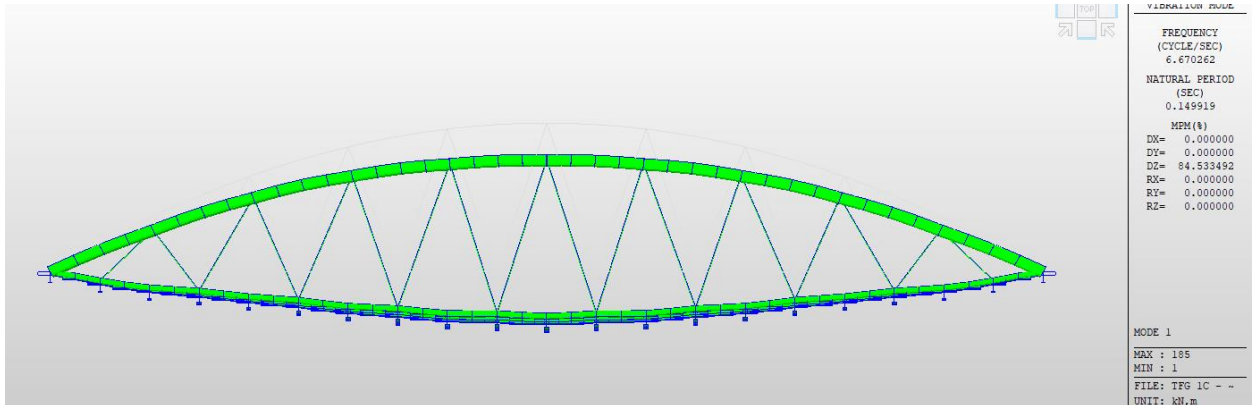


Figura 63 Modo 1 de vibración

- o Modo 2: (6,975 Hz)

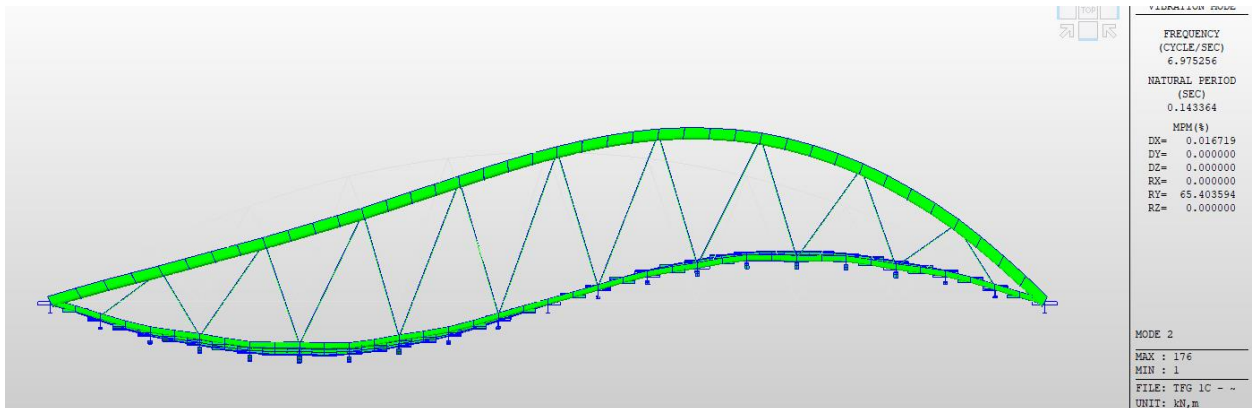


Figura 64 Modo 2 de vibración

- o Modo 3: (9,410 Hz)

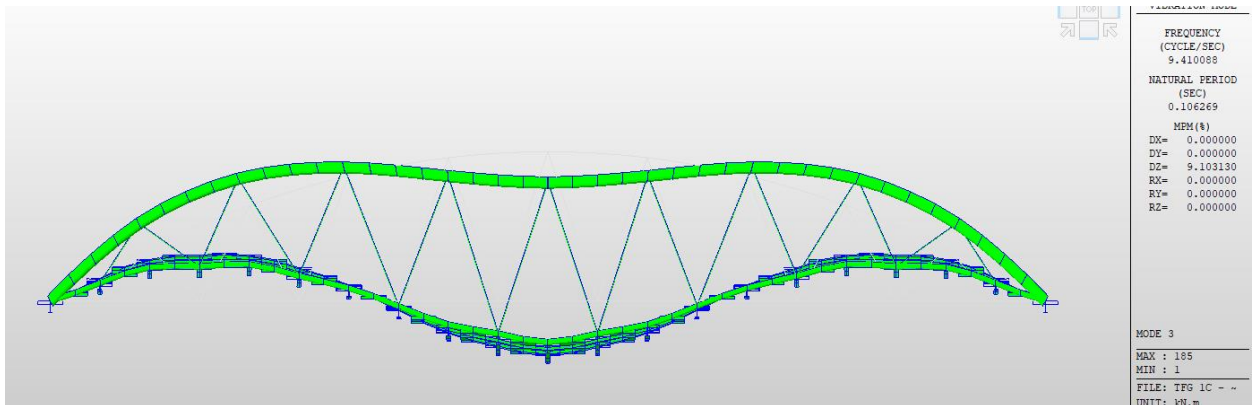


Figura 65 Modo 3 de vibración

3.1.4 Modelo 1d

- Flecha: 5,792 centímetros



Figura 66 Flecha

- Modos de pandeo

- o Modo 1: 3,676

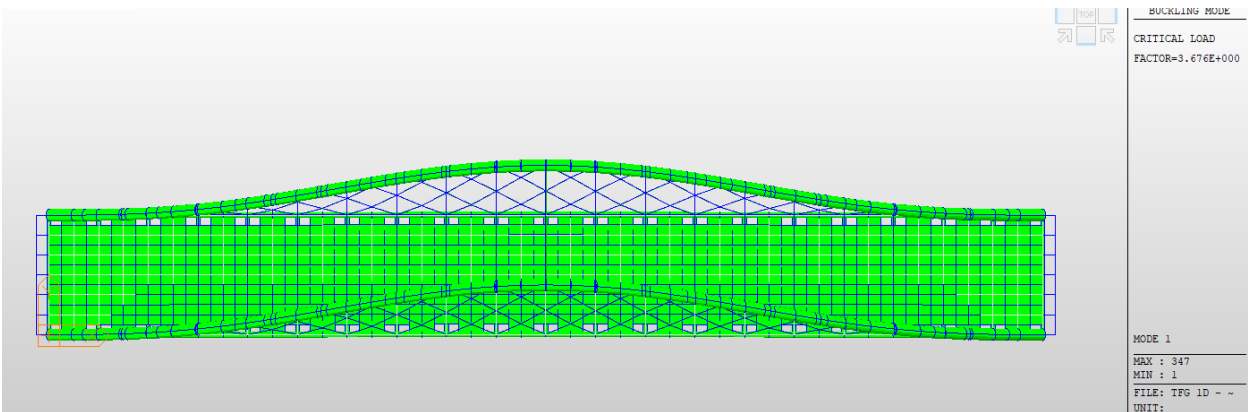


Figura 67 Modo 1 de pandeo

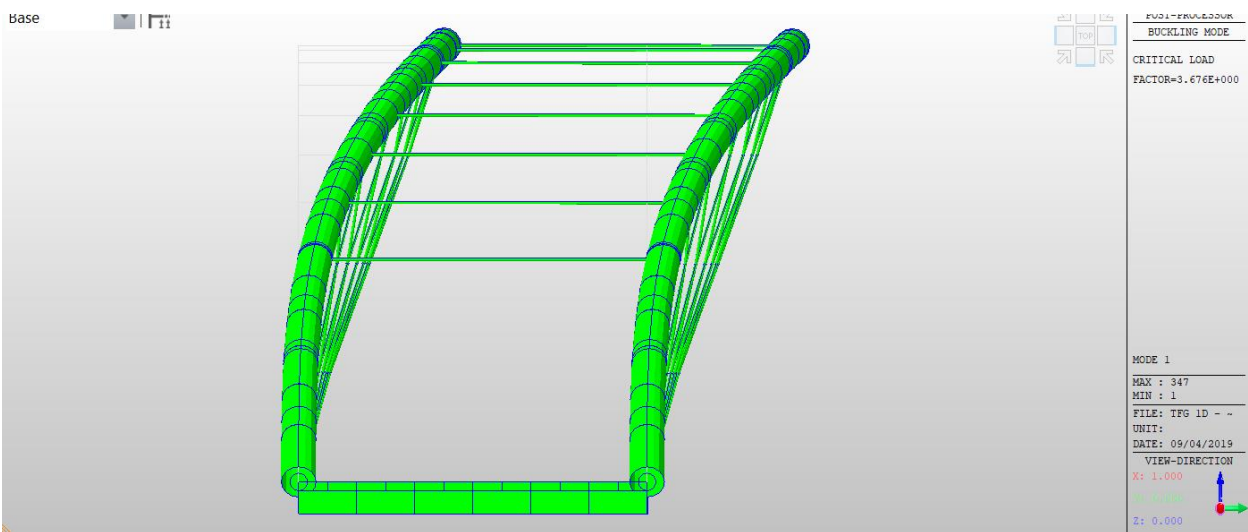


Figura 68 Modo 1 de pandeo II

- Modo 2: 3,947

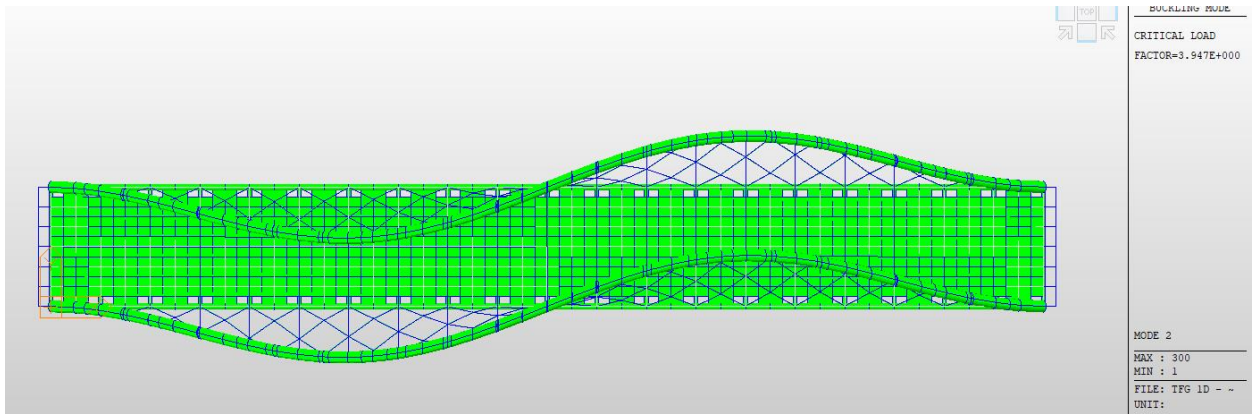


Figura 69 Modo 2 de pandeo

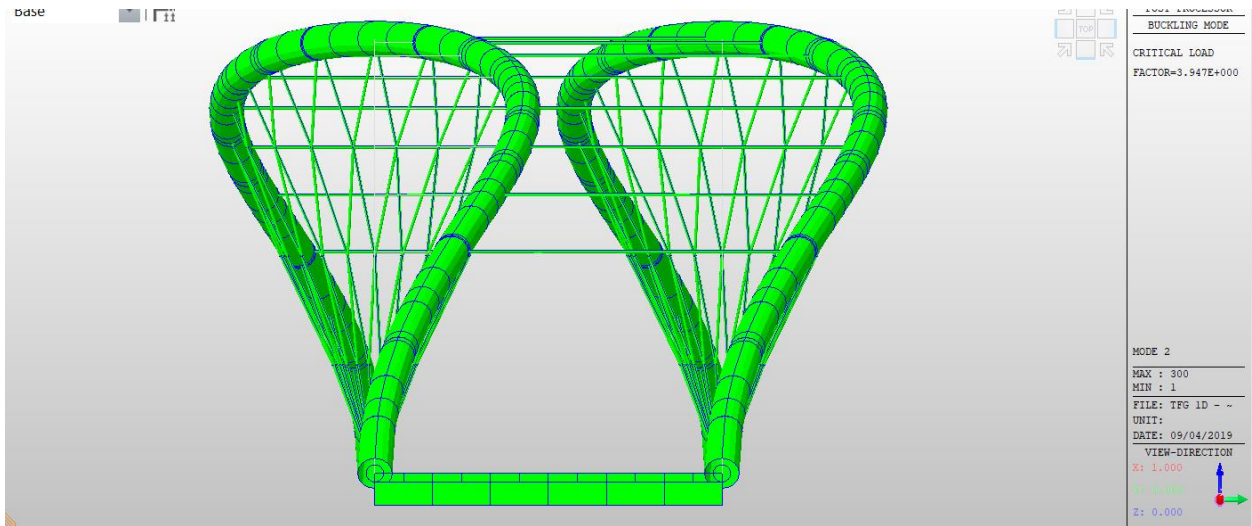


Figura 70 Modo 2 de pandeo II

- Modo 3: 9,445

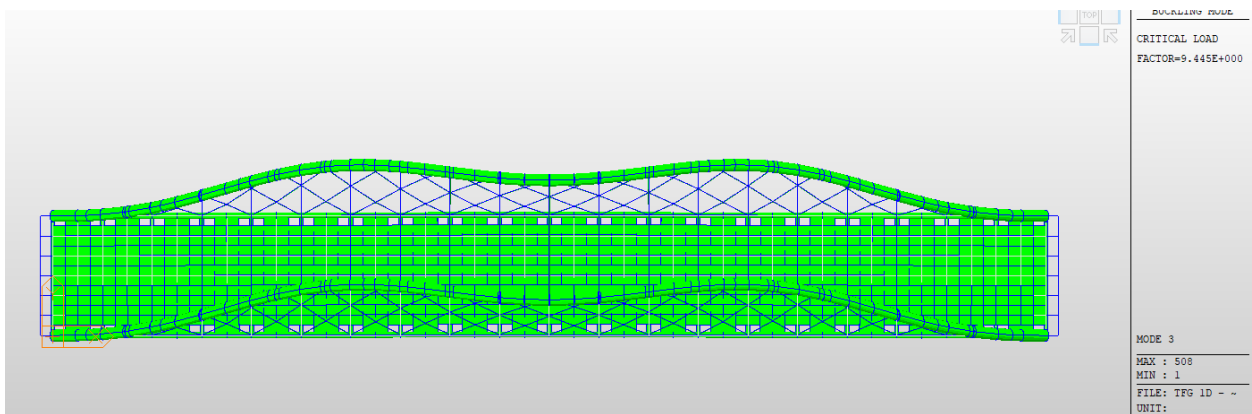


Figura 71 Modo 3 de pandeo

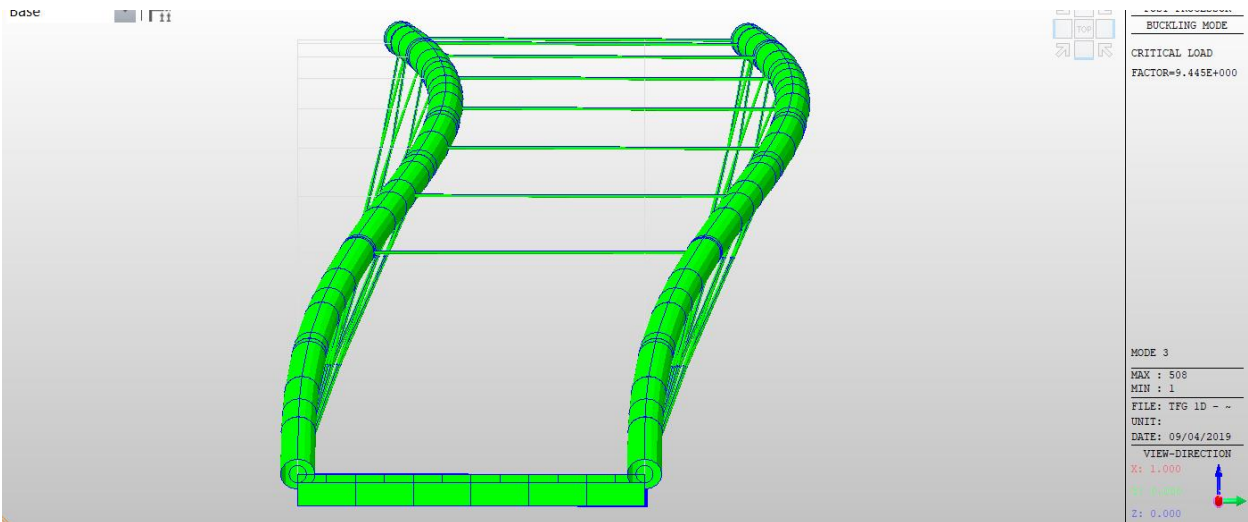


Figura 72 Modo 3 de pandeo II

- Modos de vibración: Frecuencias naturales

- o Modo 1: (6,897 Hz)

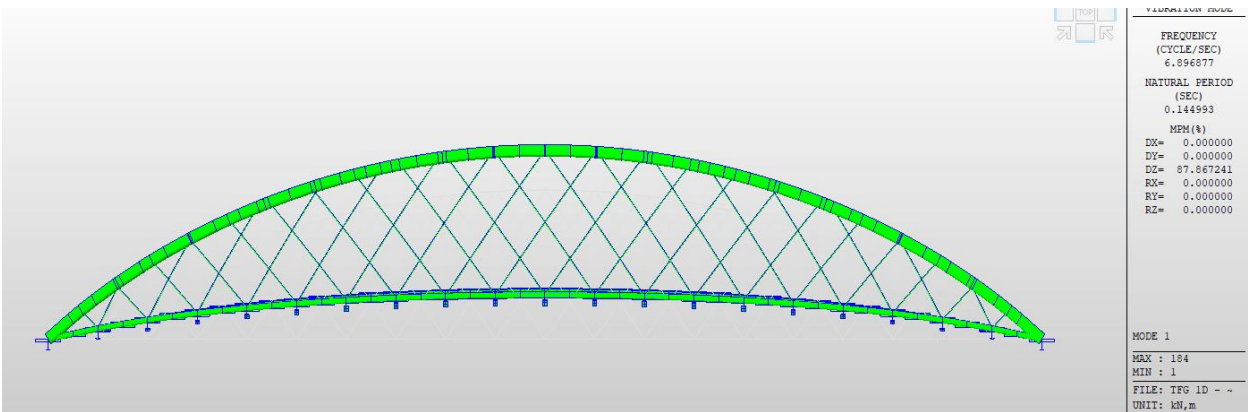


Figura 73 Modo 1 de vibración

- o Modo 2: (9,553 Hz)



Figura 74 Modo 2 de vibración

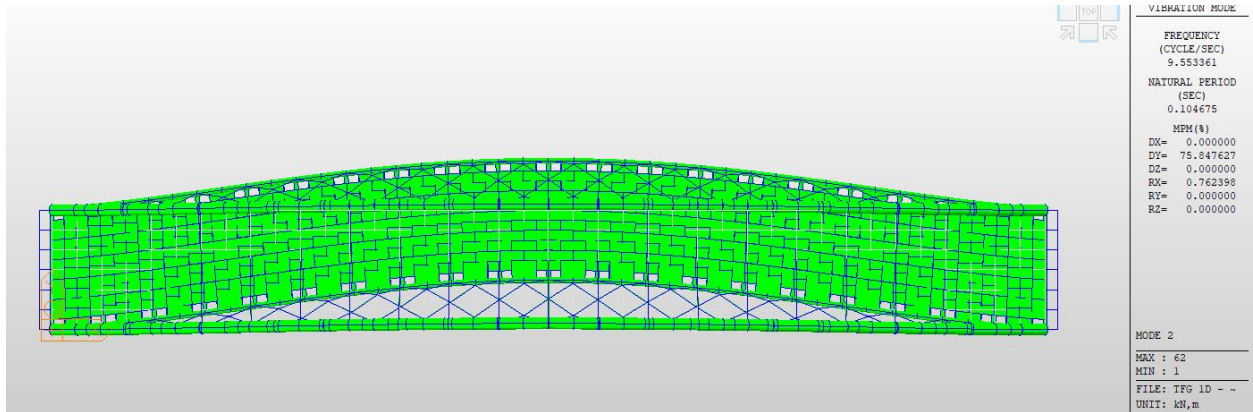


Figura 75 Modo 2 de vibración II

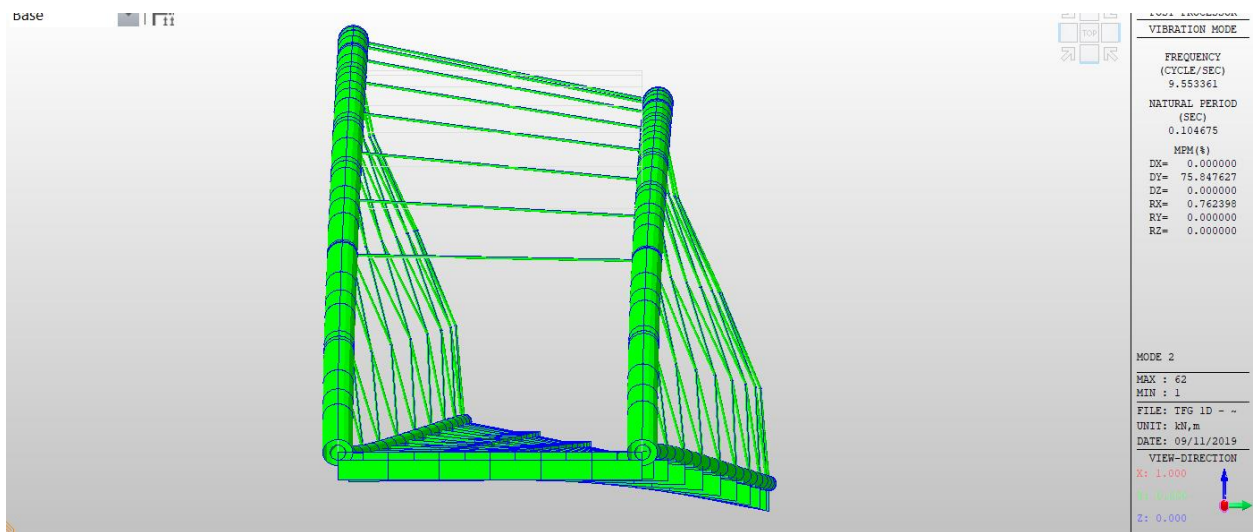


Figura 76 Modo 2 de vibración II

- Modo 3: (10,636 Hz)

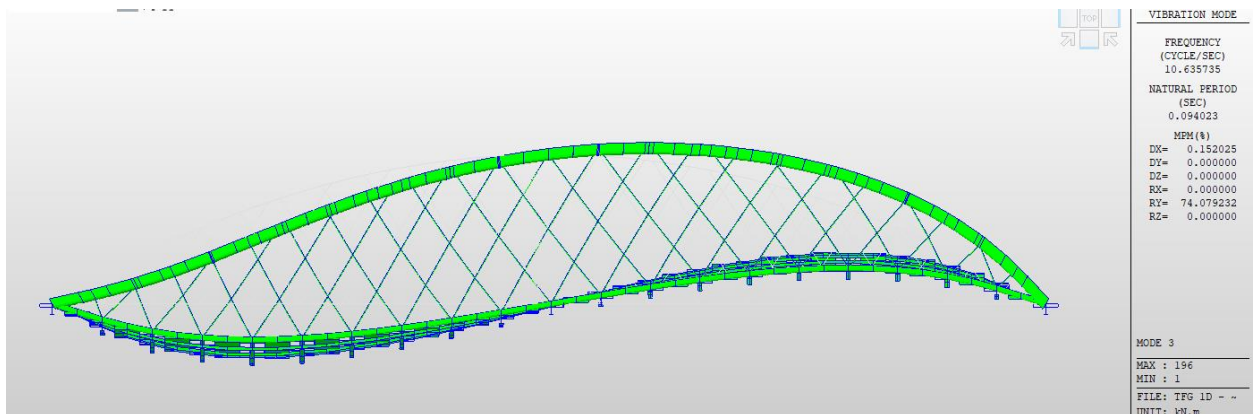


Figura 77 Modo 3 de vibración

3.2 Modelo 2

3.2.1 Modelo 2a

- Flecha: 8,360 centímetros

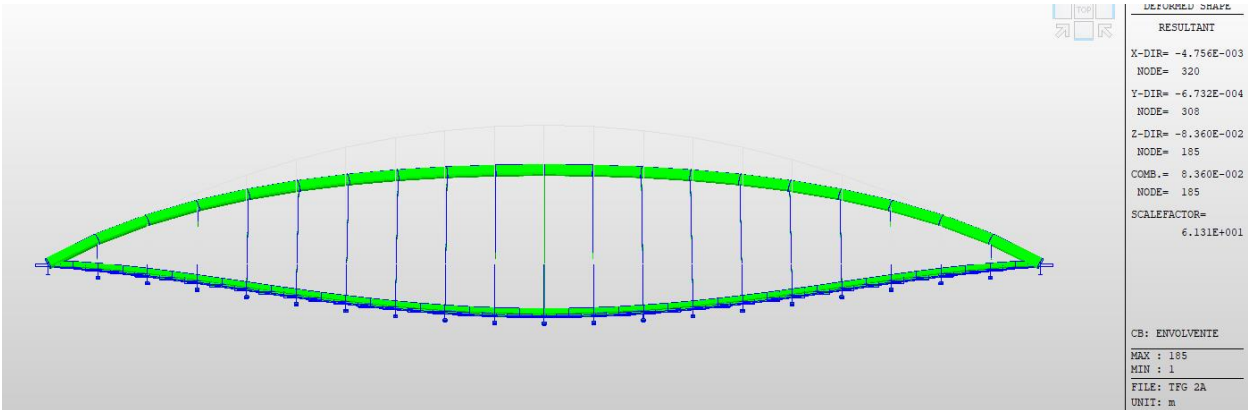


Figura 78 Flecha

- Modos de pandeo

- o Modo 1: 5,078

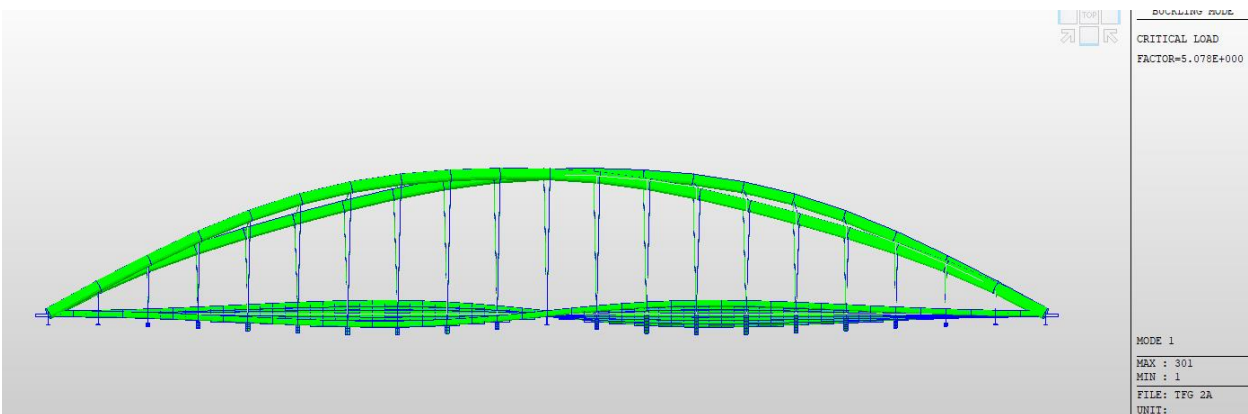


Figura 79 Modo 1 de pandeo

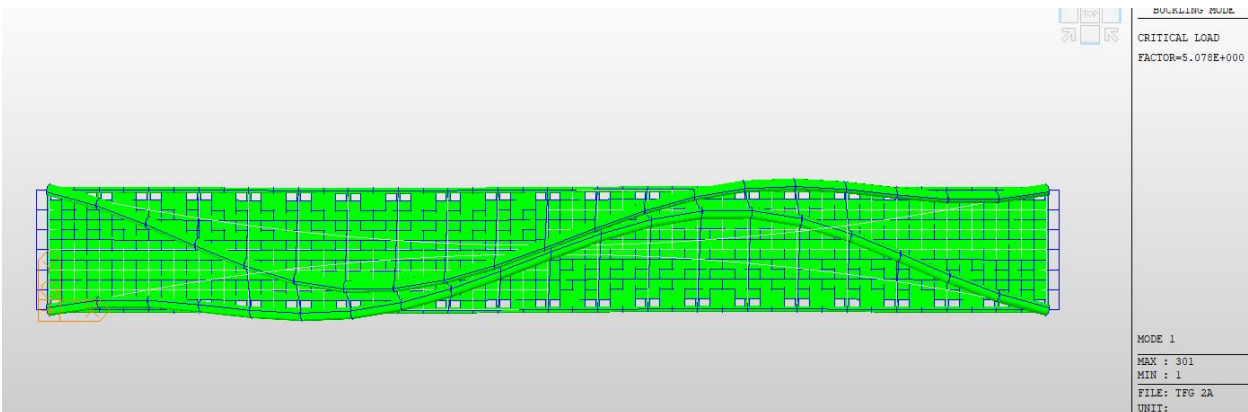


Figura 80 Modo 1 de pandeo II

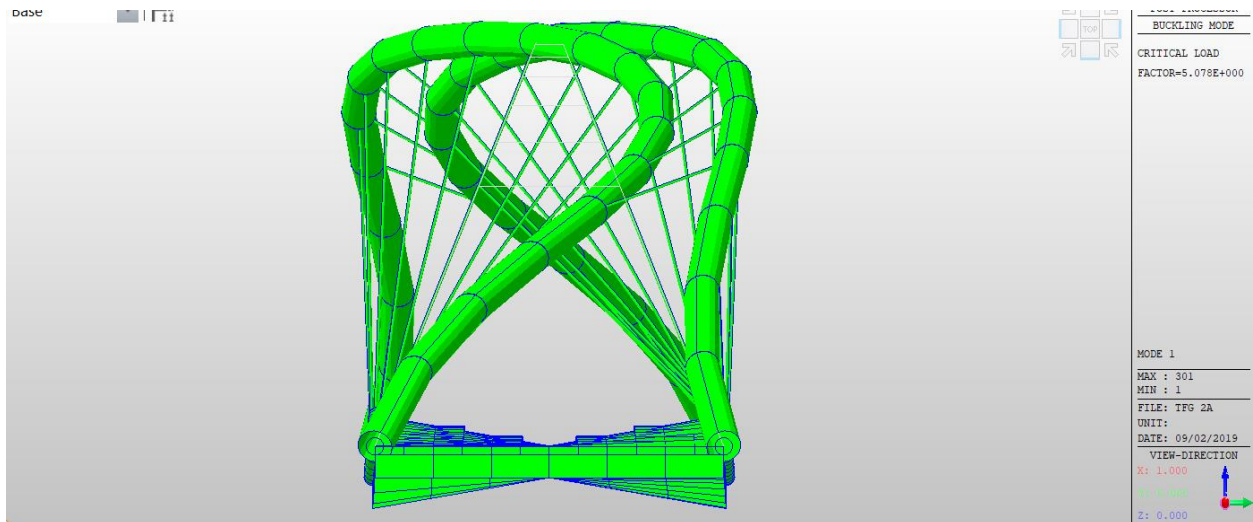


Figura 81 Modo 1 de pandeo III

- Modo 2: 5,137

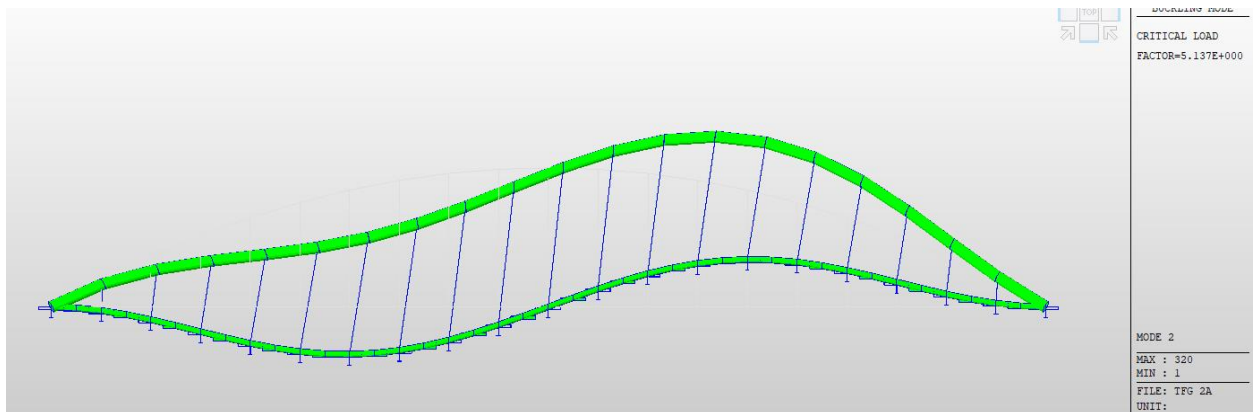


Figura 82 Modo 2 de pandeo

- Modo 3: 6,799

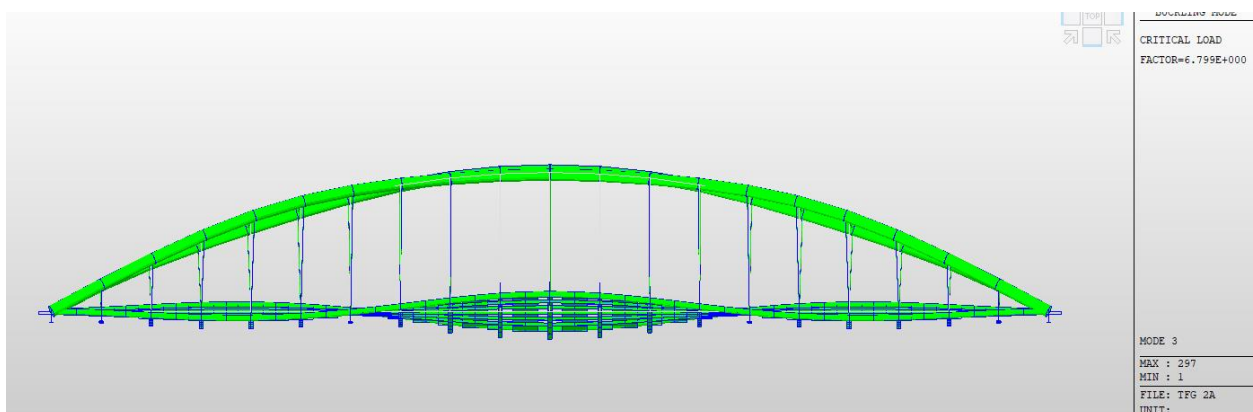


Figura 83 Modo 3 de pandeo

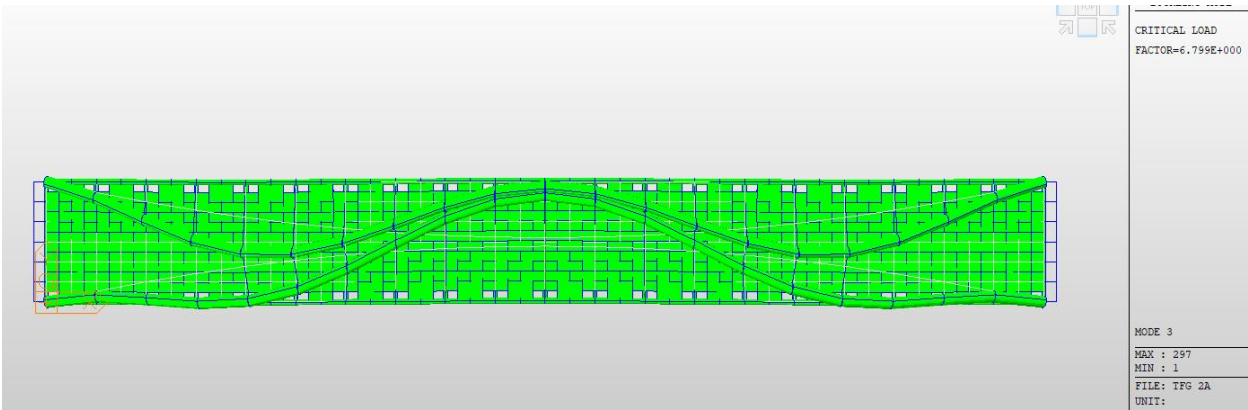


Figura 84 Modo 3 de pandeo II

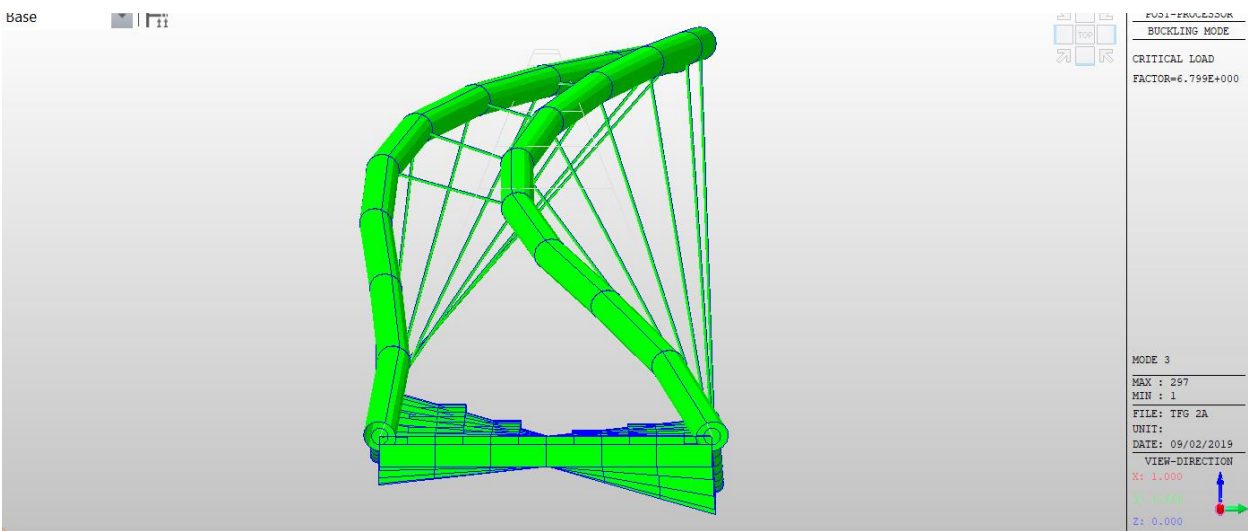


Figura 85 Modo 3 de pandeo III

- Modos de vibración: Frecuencias naturales
 - o Modo 1: (2,193 Hz)

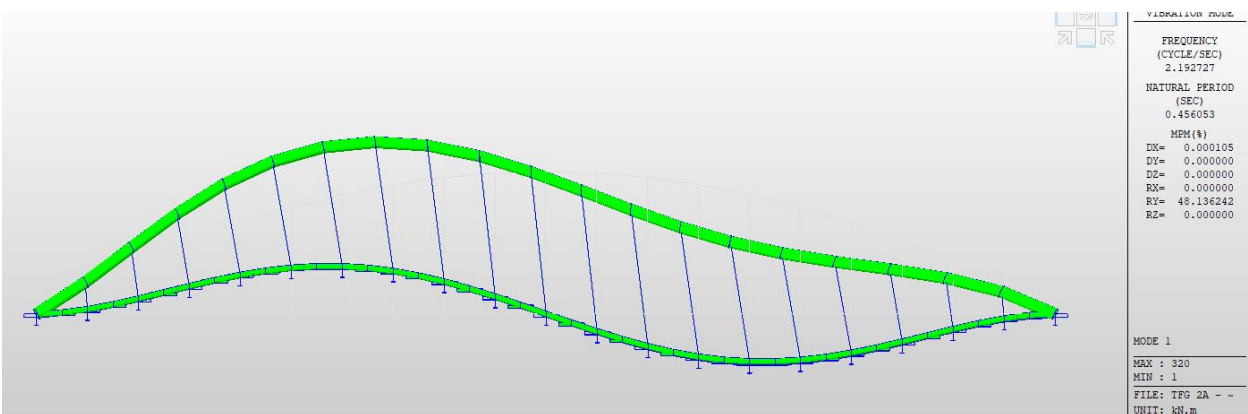


Figura 86 Modo 1 de vibración

○ Modo 2: (3,732 Hz)

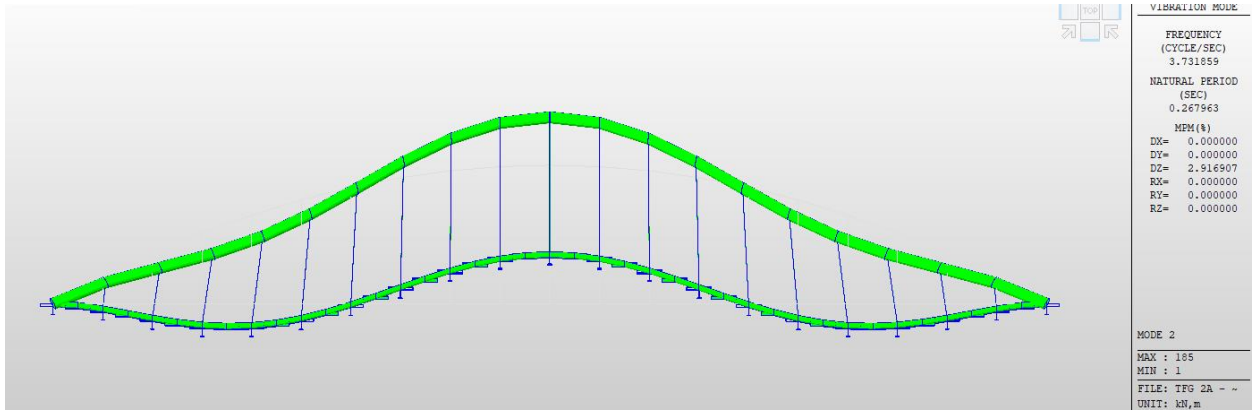


Figura 87 Modo 2 de vibración

○ Modo 3: (6,496 Hz)

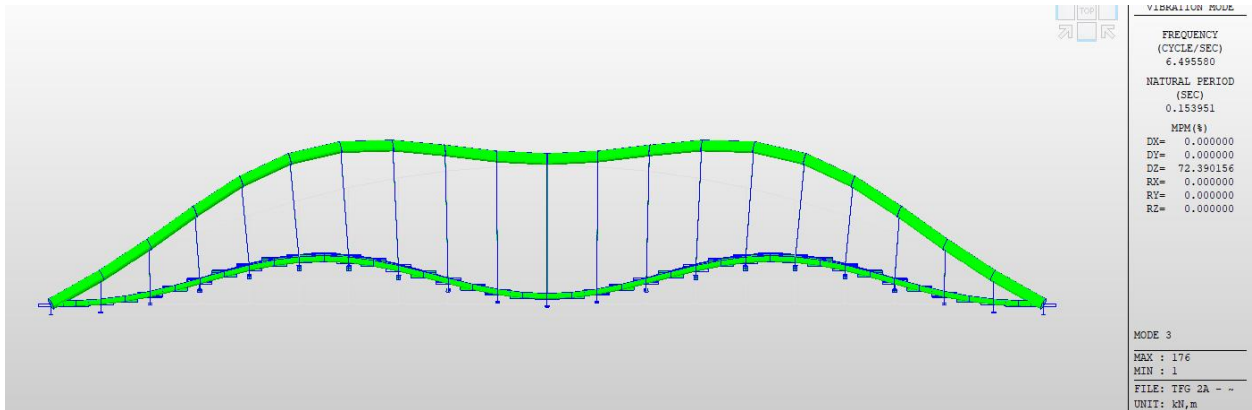


Figura 88 Modo 3 de vibración

3.2.2 Modelo 2b

- Flecha: 29,5 centímetros

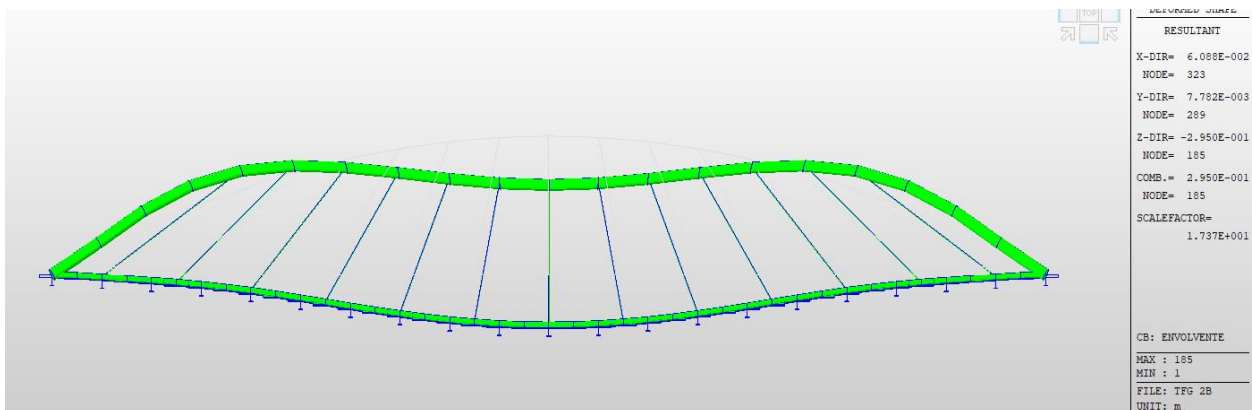


Figura 89 Flecha

- Modos de pandeo

- o Modo 1: 4,186

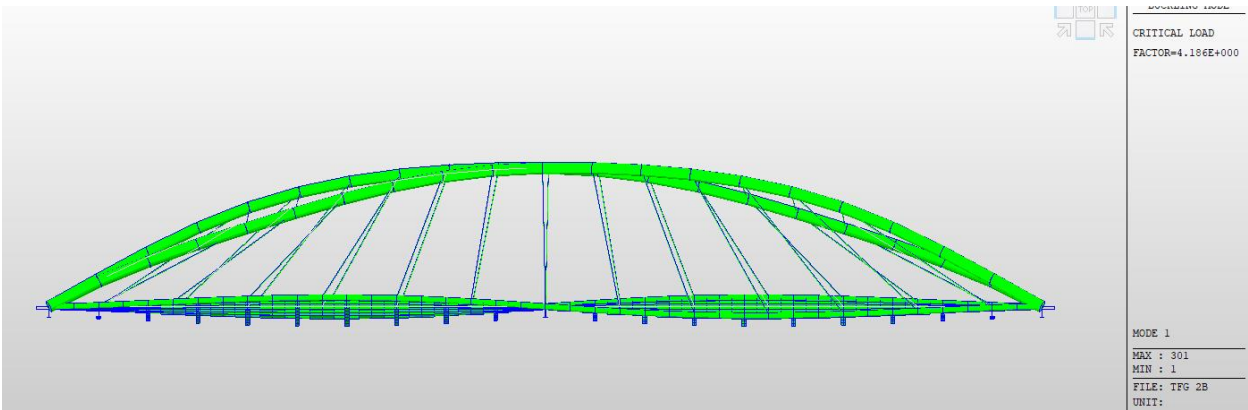


Figura 90 Modo 1 de pandeo

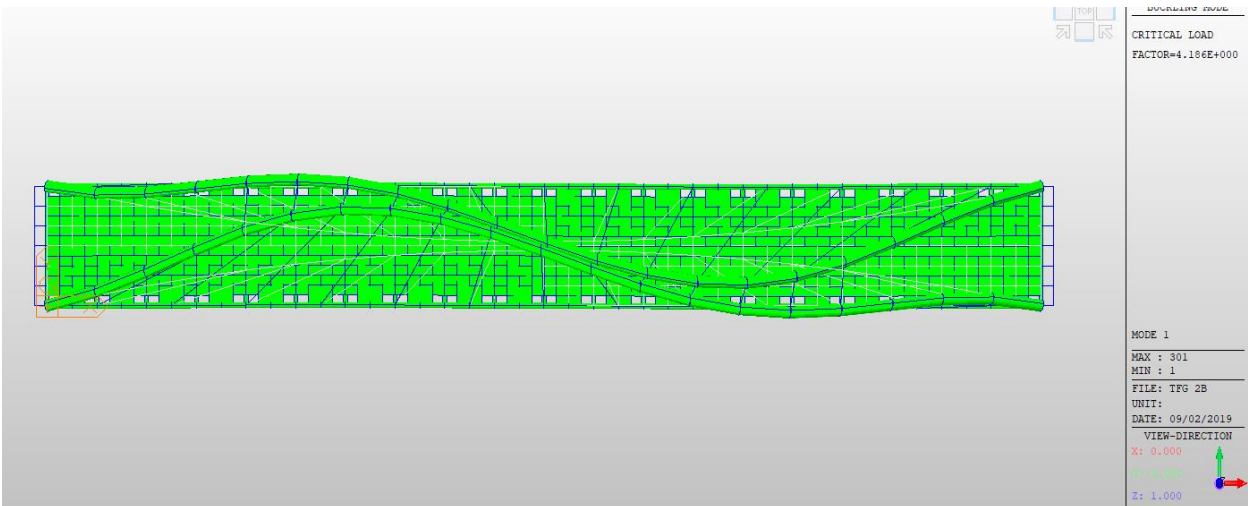


Figura 91 Modo 1 de pandeo II

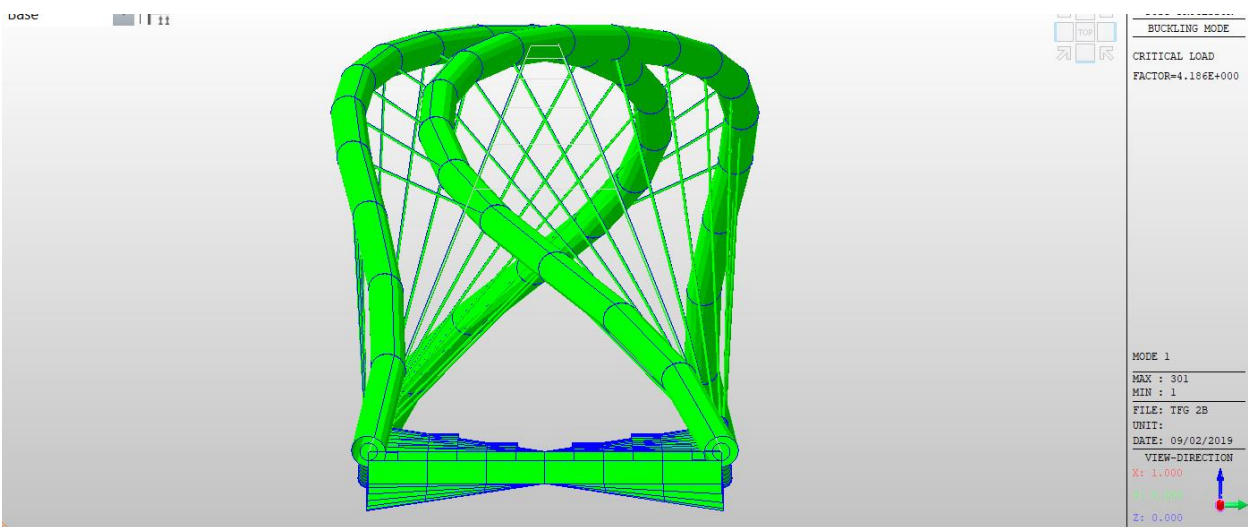


Figura 92 Modo 1 de pandeo III

- Modo 2: 4,399

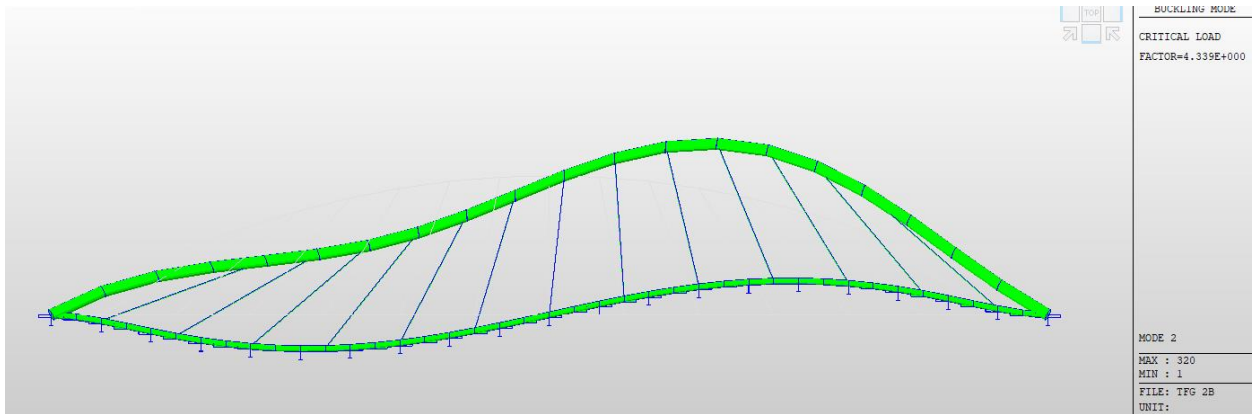


Figura 93 Modo 2 de pandeo

- Modo 3: 5,136

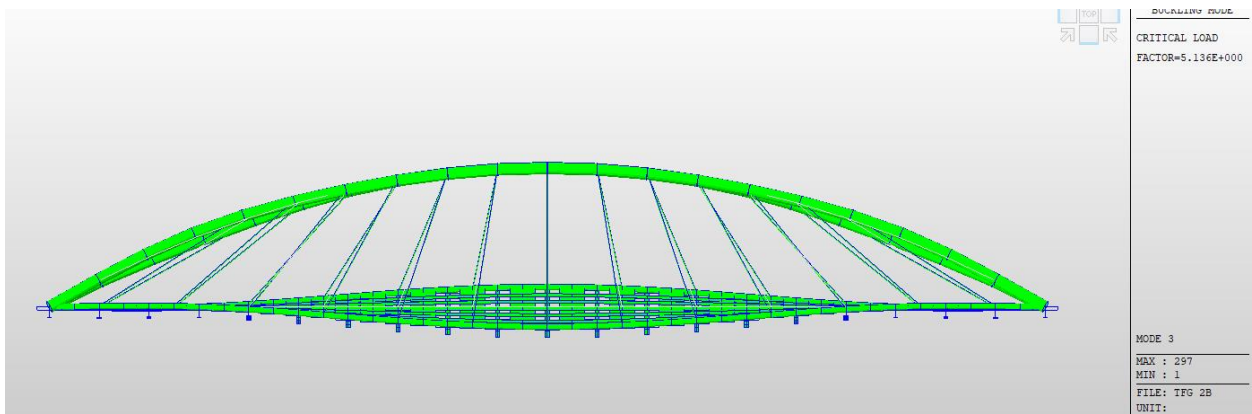


Figura 94 Modo 3 de pandeo

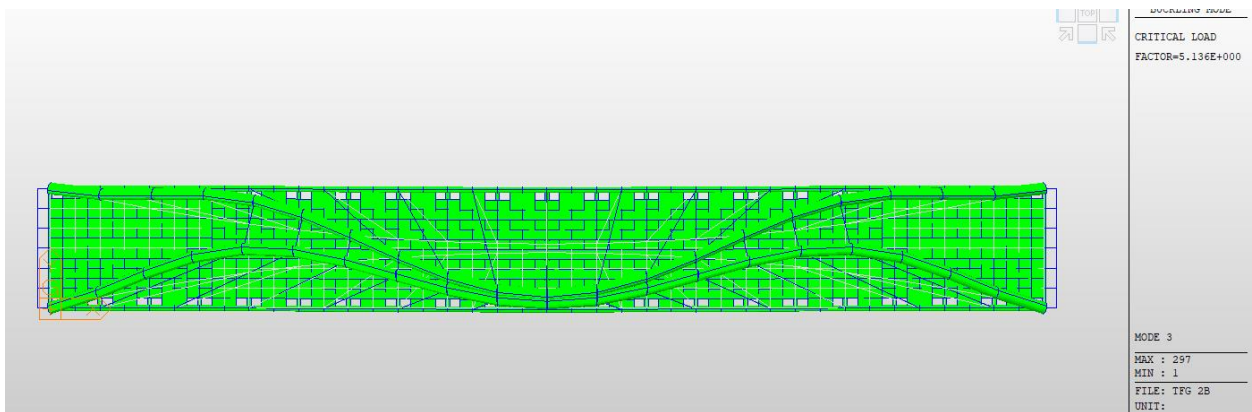


Figura 95 Modo 3 de pandeo II

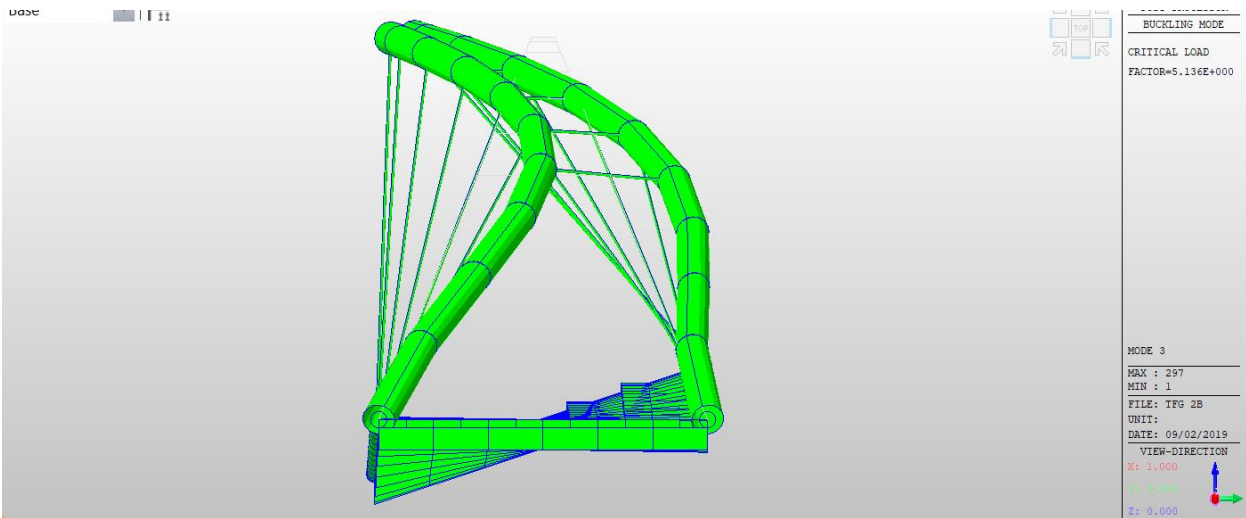


Figura 96 Modo 3 de pandeo III

- Modos de vibración: Frecuencias naturales

- o Modo 1: (2,773 Hz)

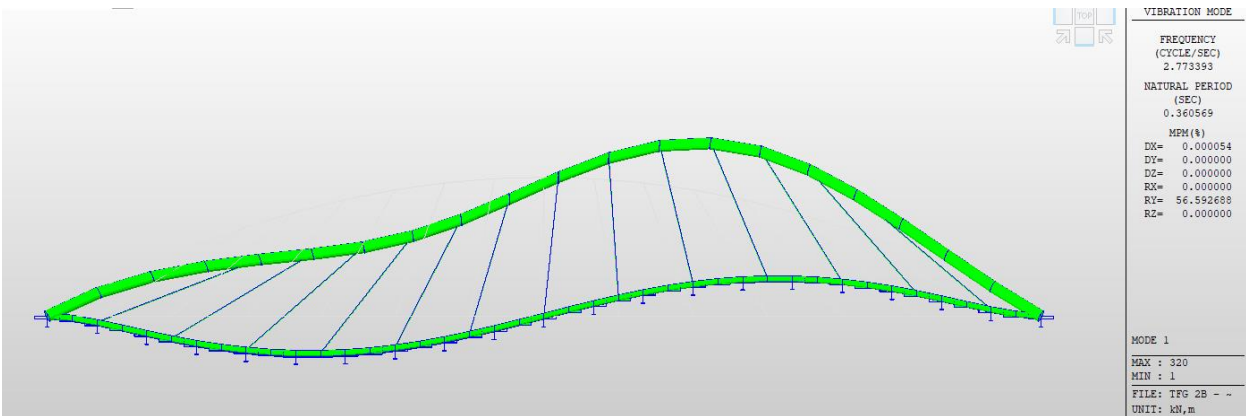


Figura 97 Modo 1 de vibración

- o Modo 2: (2,998 Hz)

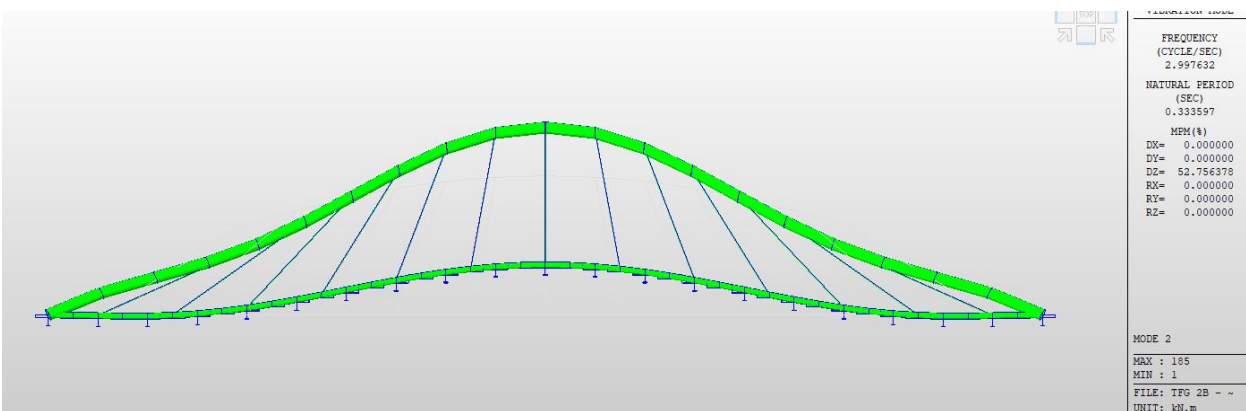


Figura 98 Modo 2 de vibración

o Modo 3: (6,345 Hz)

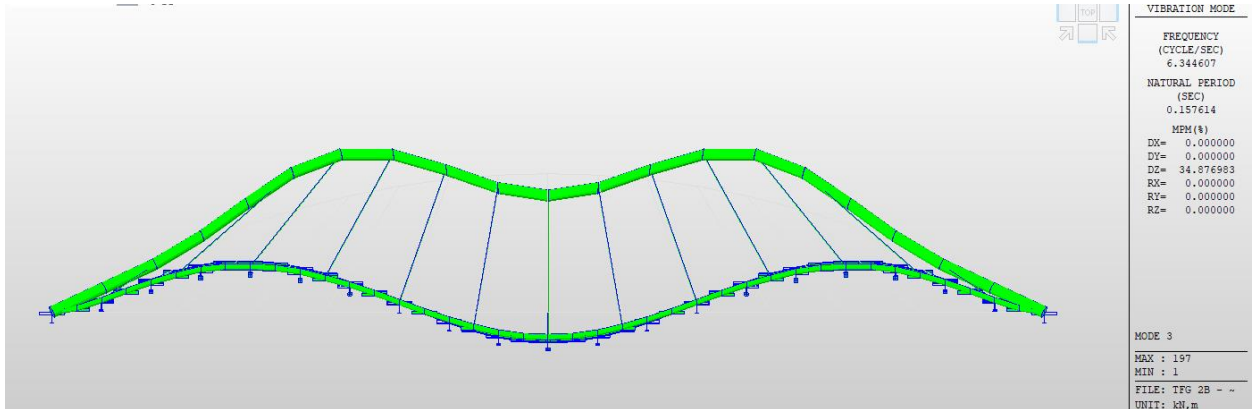


Figura 99 Modo 3 de vibración

3.2.3 Modelo 2c

- Flecha: 6,751 centímetros

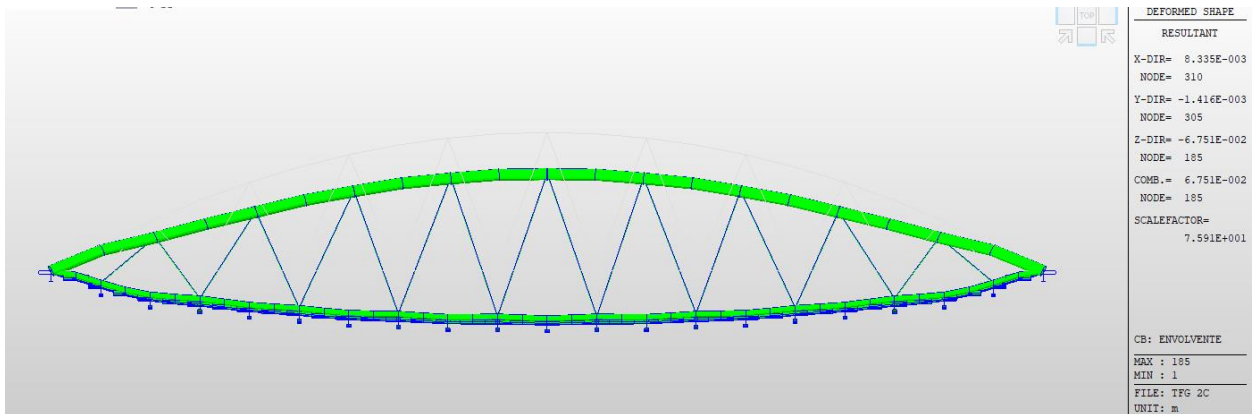


Figura 100 Flecha

- Modos de pandeo

o Modo 1: 6,286

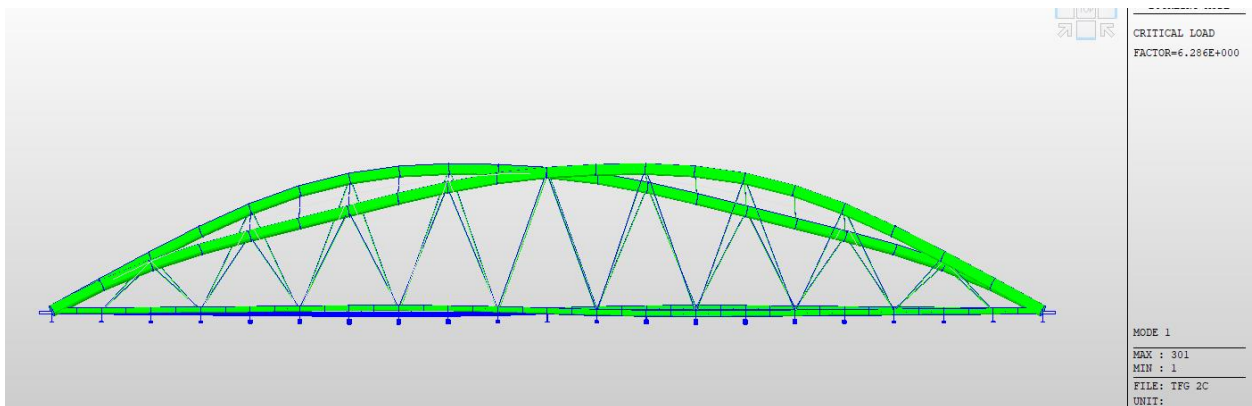


Figura 101 Modo 1 de pandeo

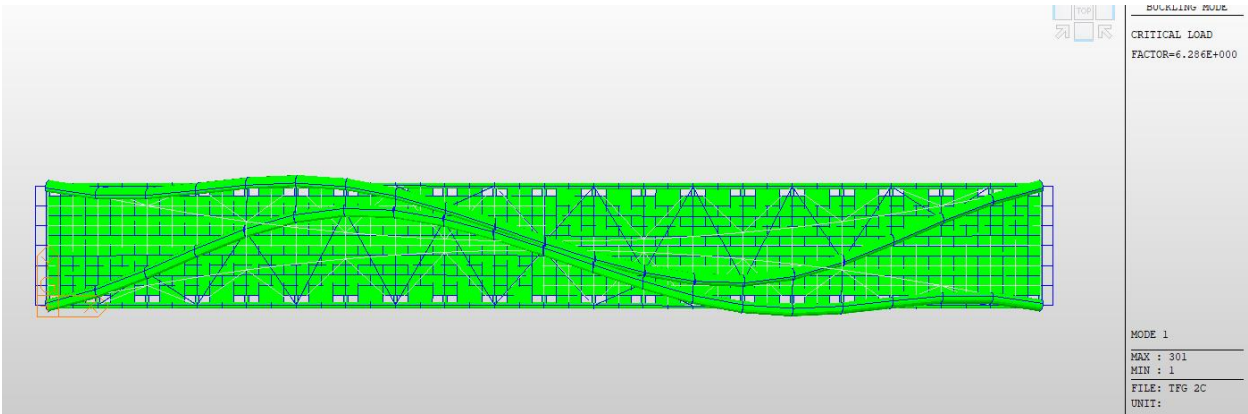


Figura 102 Modo 1 de pandeo II

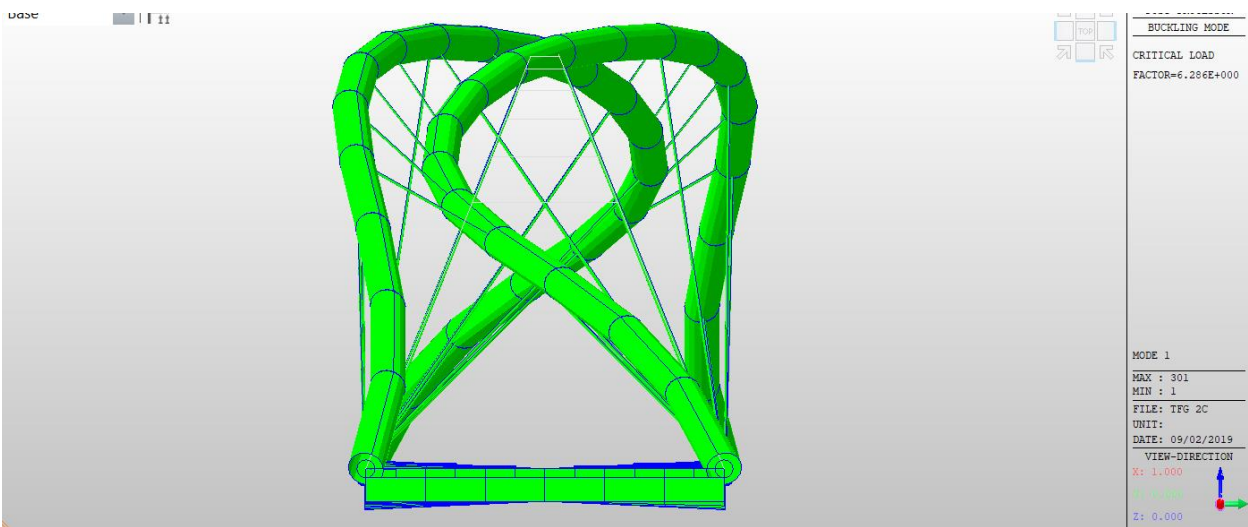


Figura 103 Modo 1 de pandeo III

- o Modo 2: 7,794

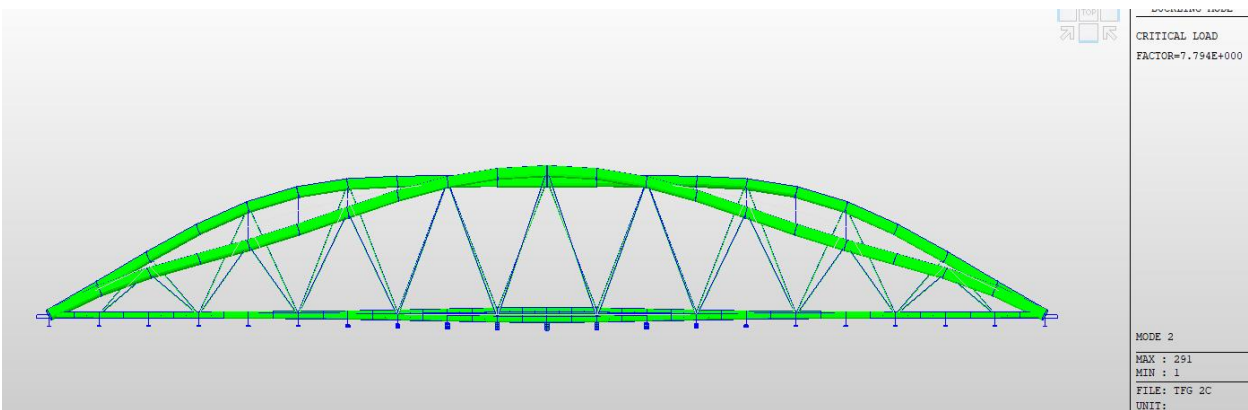


Figura 104 Modo 2 de pandeo

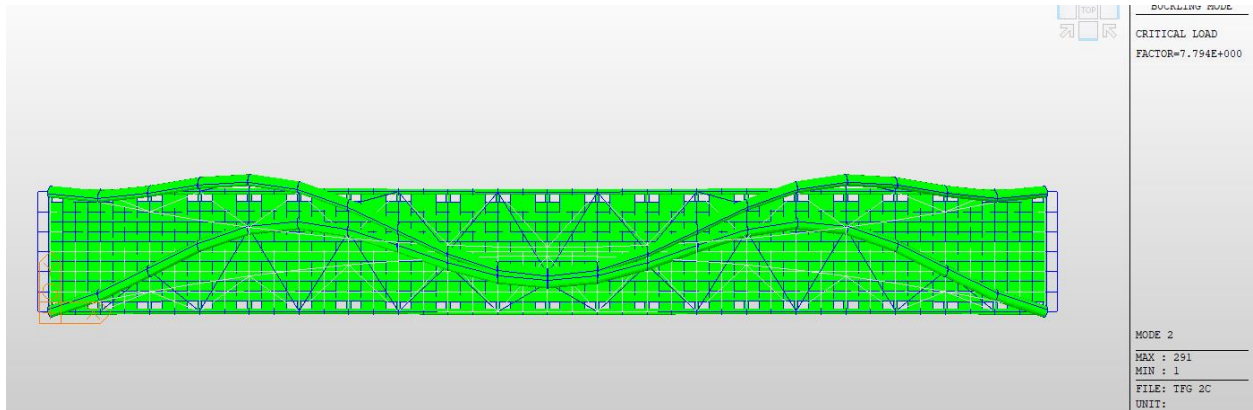


Figura 105 Modo 2 de pandeo II

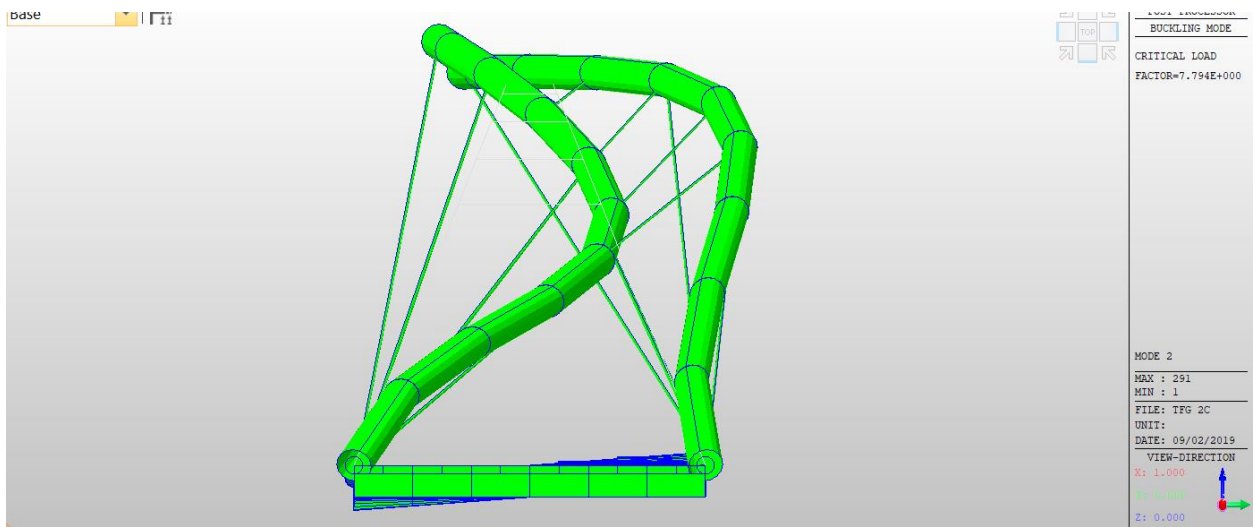


Figura 106 Modo 2 de pandeo III

- o Modo 3: 10,84

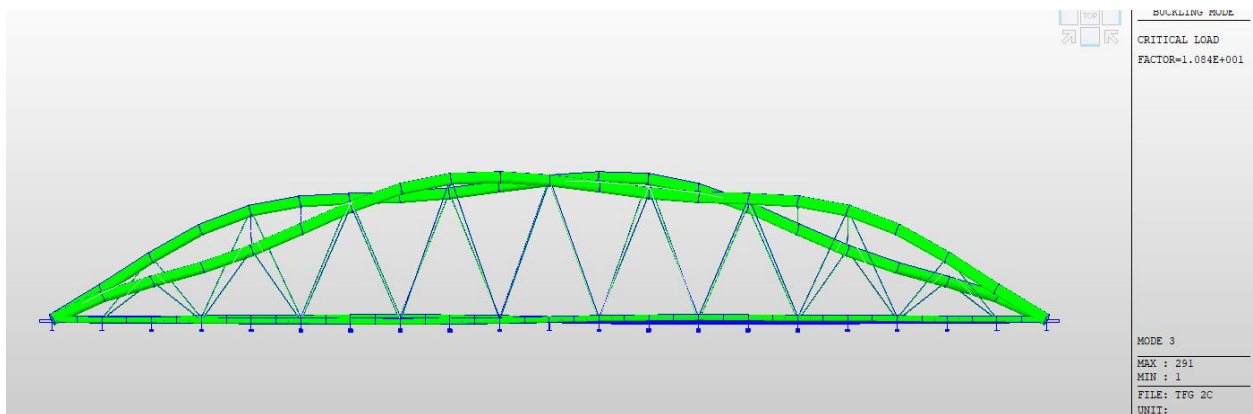


Figura 107 Modo 3 de pandeo

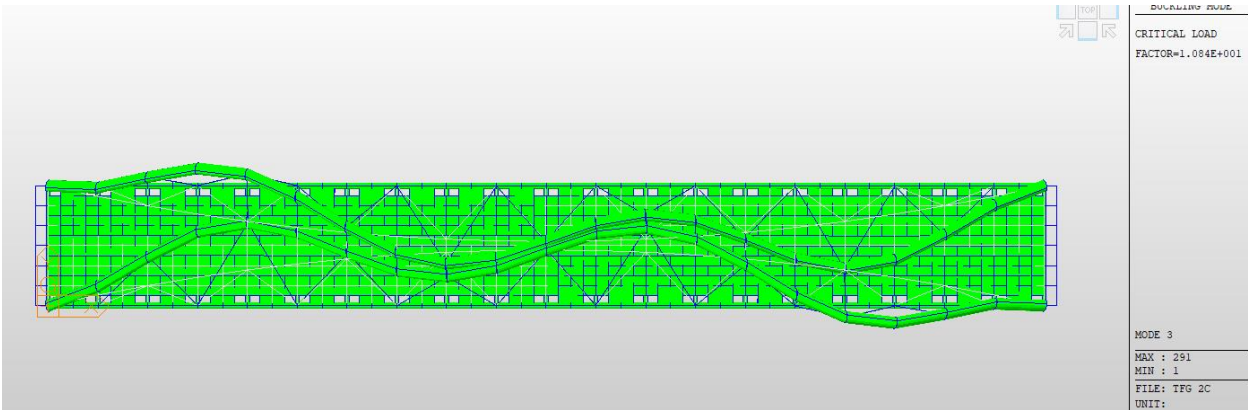


Figura 108 Modo 3 de pandeo II

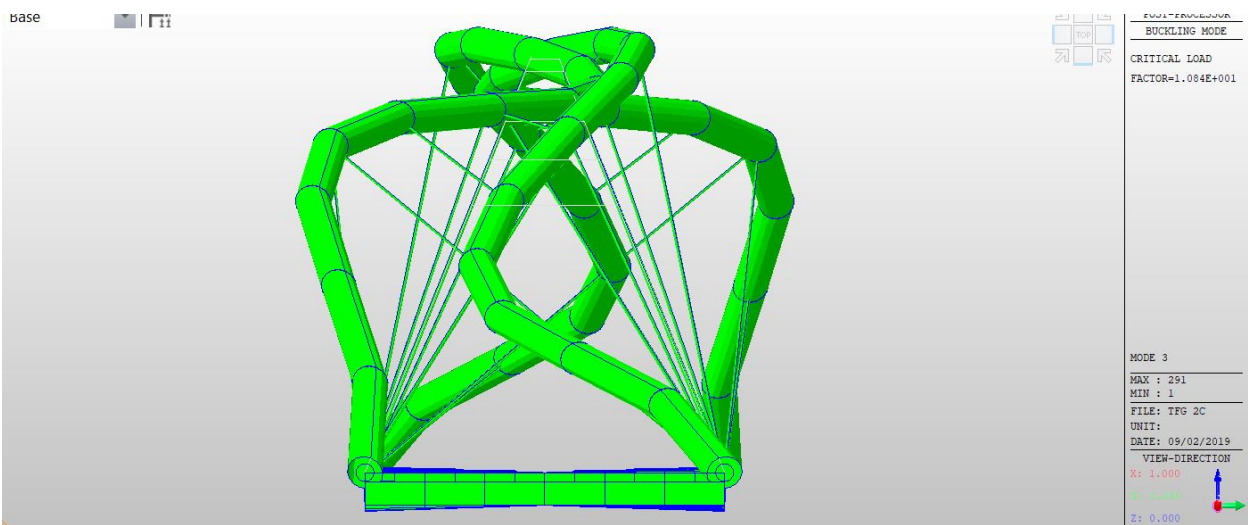


Figura 109 Modo 3 de pandeo III

- Modos de vibración: Frecuencias naturales
 - o Modo1: (6,302 Hz)

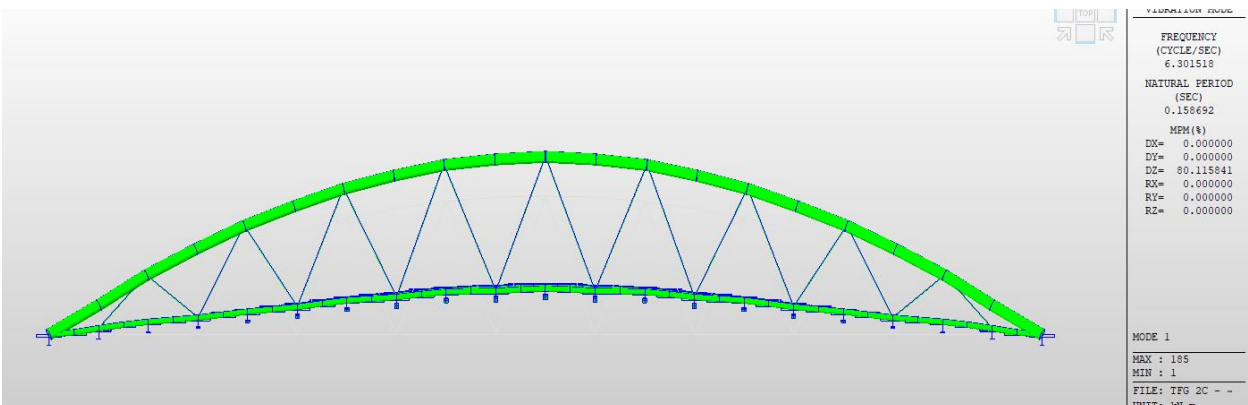


Figura 110 Modo 1 de vibración

- Modo 2: (6,785 Hz)

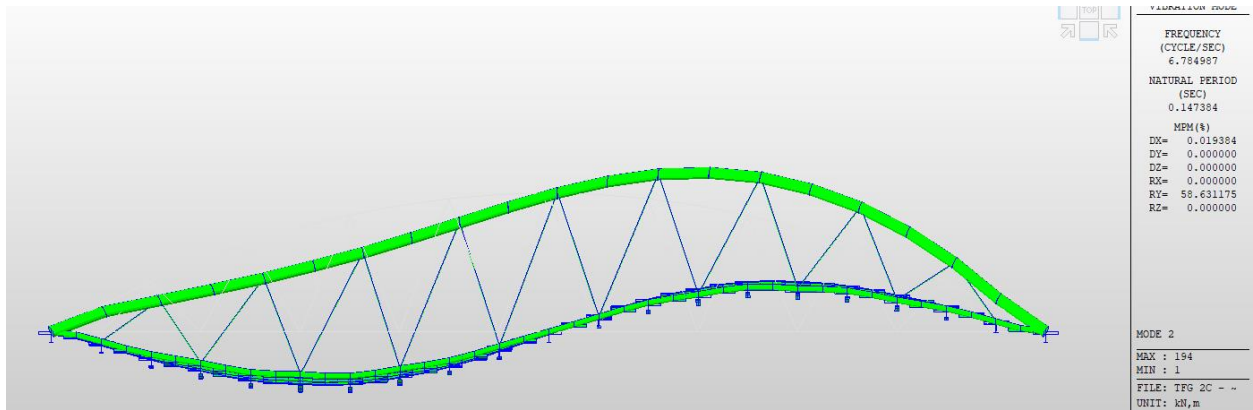


Figura 111 Modo 2 de vibración

- Modo 3: (9,191 Hz)

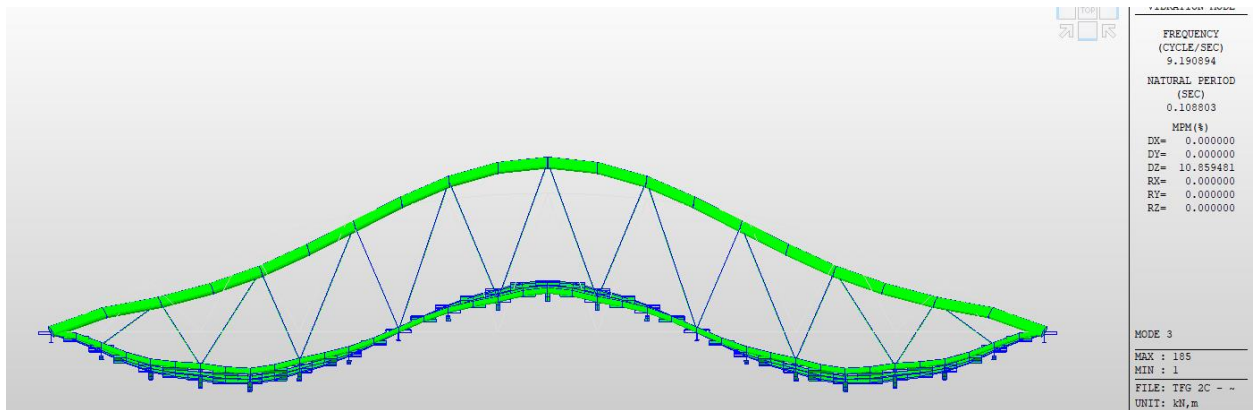


Figura 112 Modo 3 de vibración

3.2.4 Modelo 2d

- Flecha: 7,37 centímetros

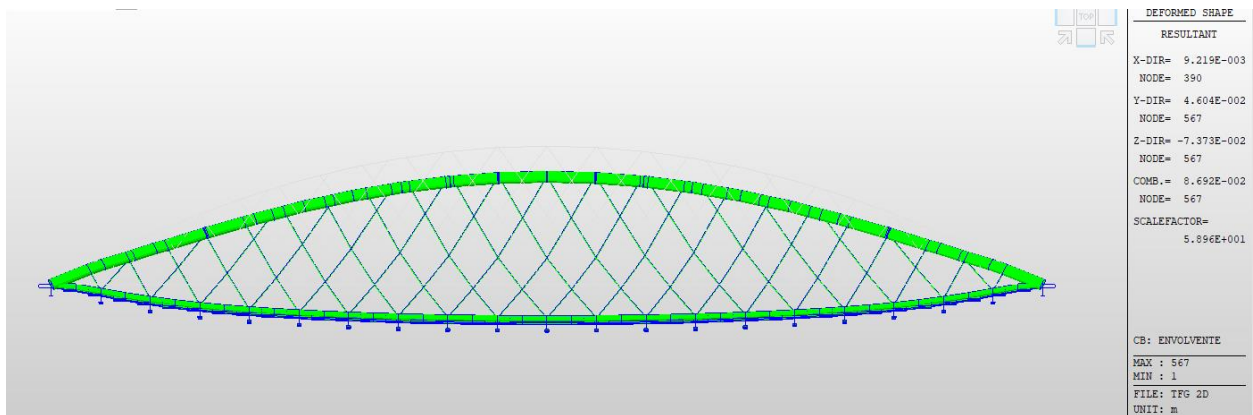


Figura 113 Flecha

- Modos de pandeo
 - o Modo 1: 6,464

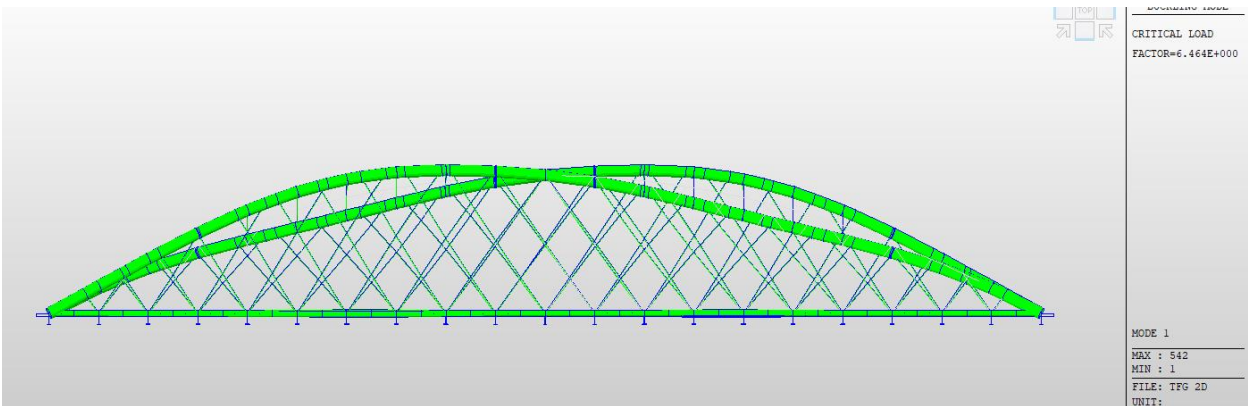


Figura 114 Modo 1 de pandeo

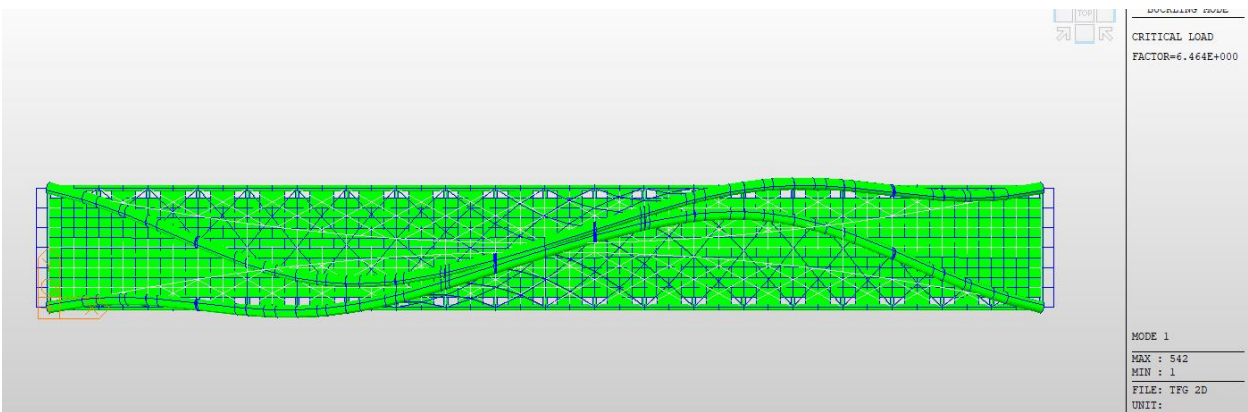


Figura 115 Modo 1 de pandeo II

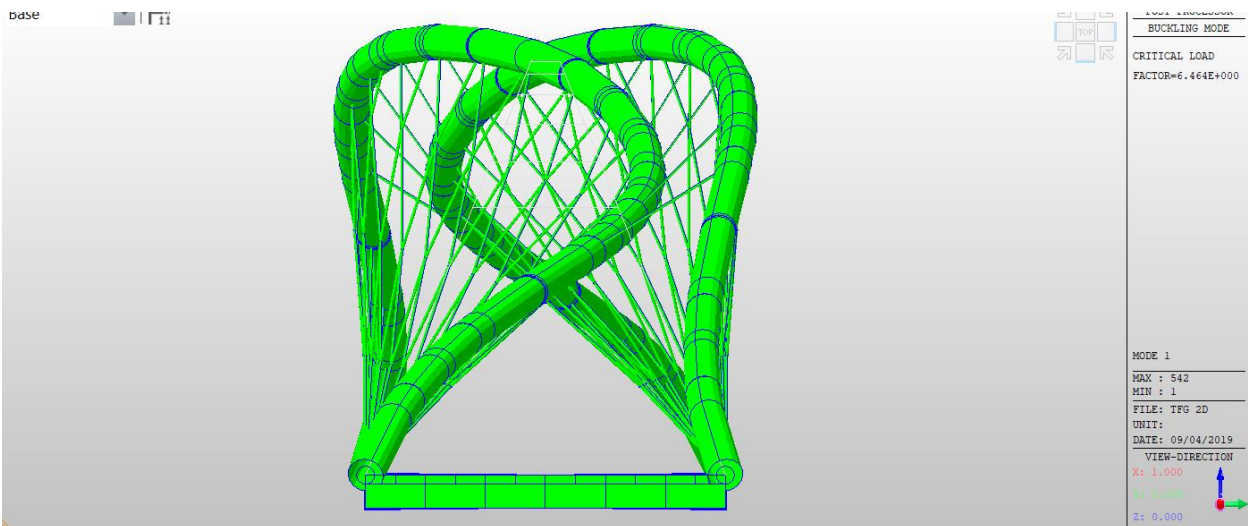


Figura 116 Modo 1 de pandeo III

o Modo 2: 7,764

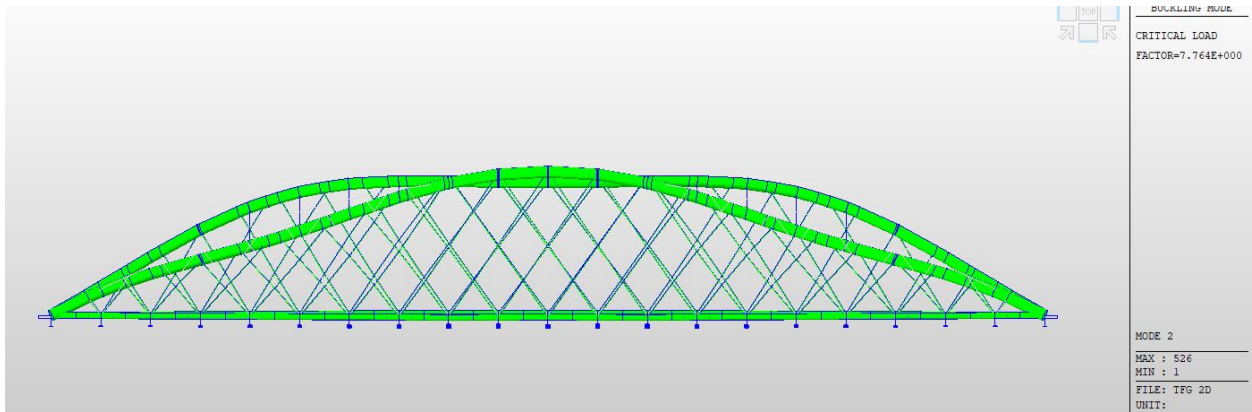


Figura 117 Modo 2 de pandeo

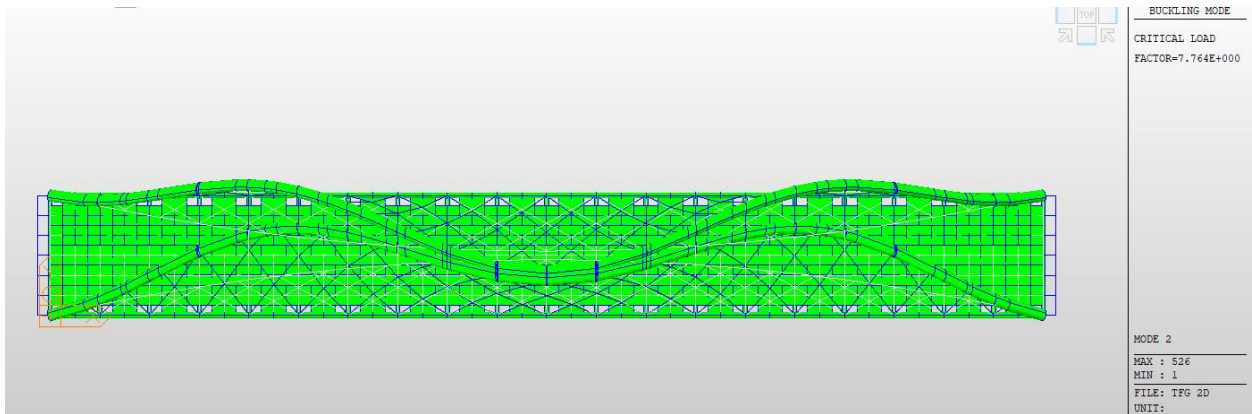


Figura 118 Modo 2 de pandeo II

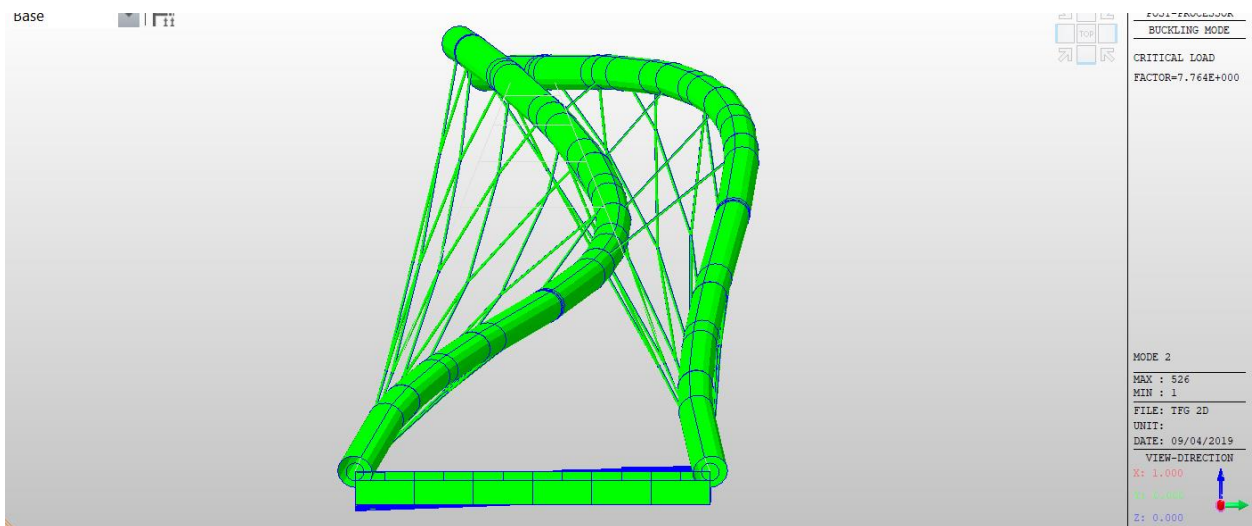


Figura 119 Modo 2 de pandeo III

o Modo 3: 8,414

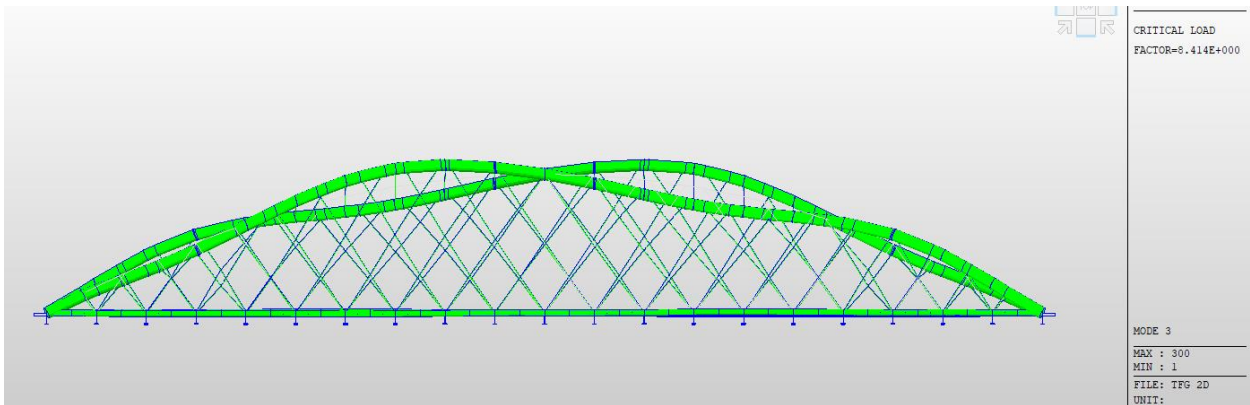


Figura 120 Modo 3 de pandeo

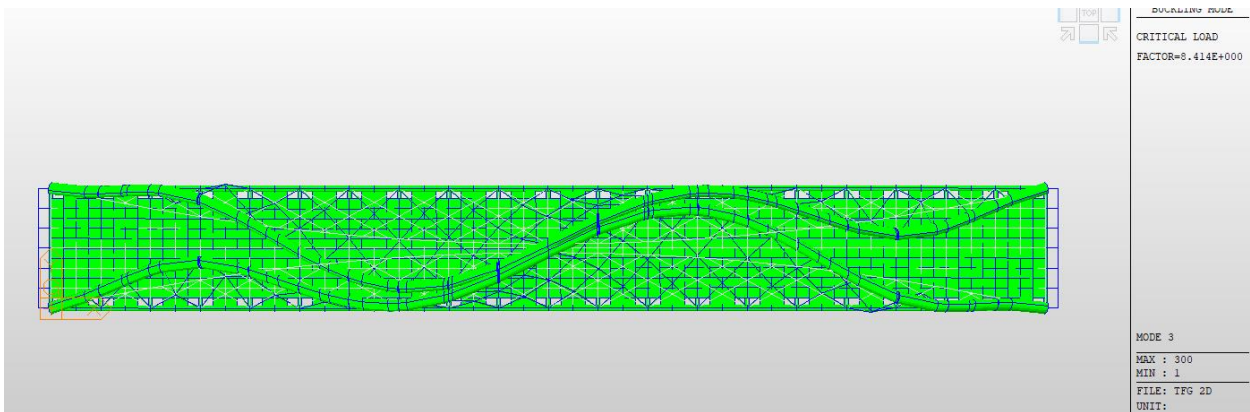


Figura 121 Modo 3 de pandeo II

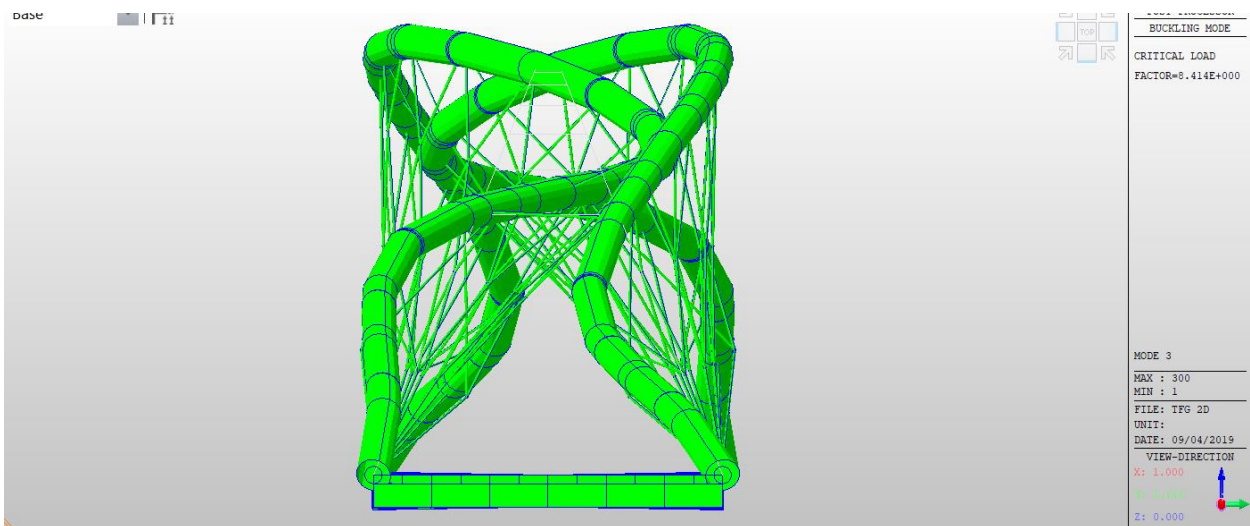


Figura 122 Modo 3 de pandeo III

- Modos de vibración: Frecuencias naturales
 - o Modo 1: (6,617 Hz)

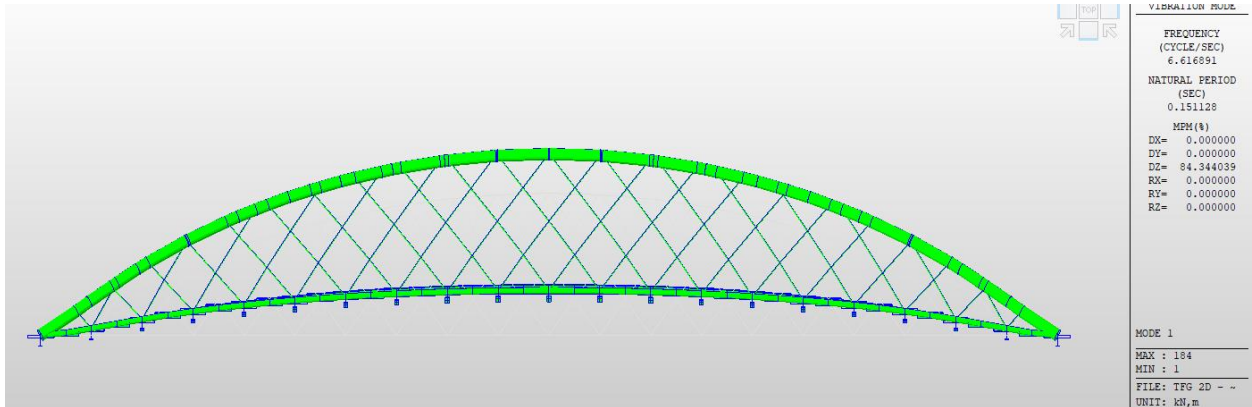


Figura 123 Modo 1 de vibración

- o Modo 2: (9,715 Hz)



Figura 124 Modo 2 de vibración

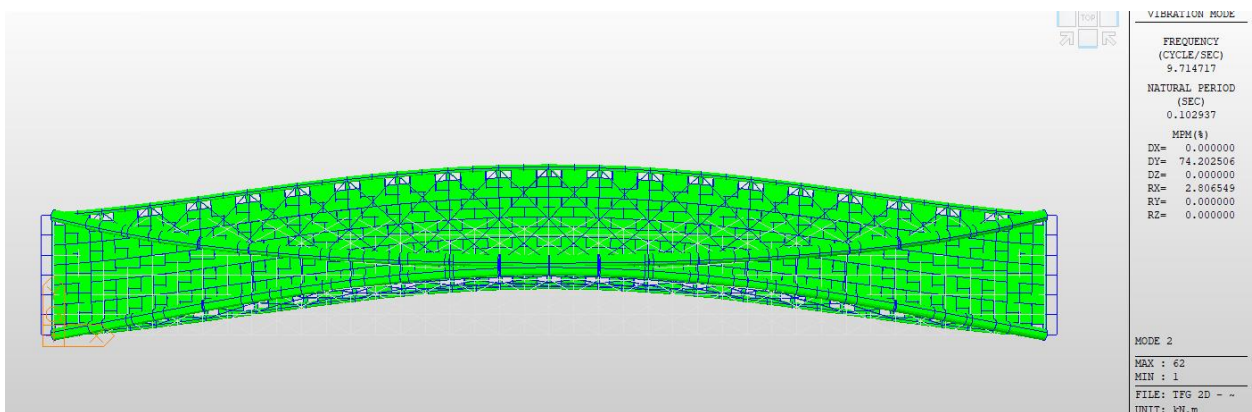


Figura 125 Modo 2 de vibración II

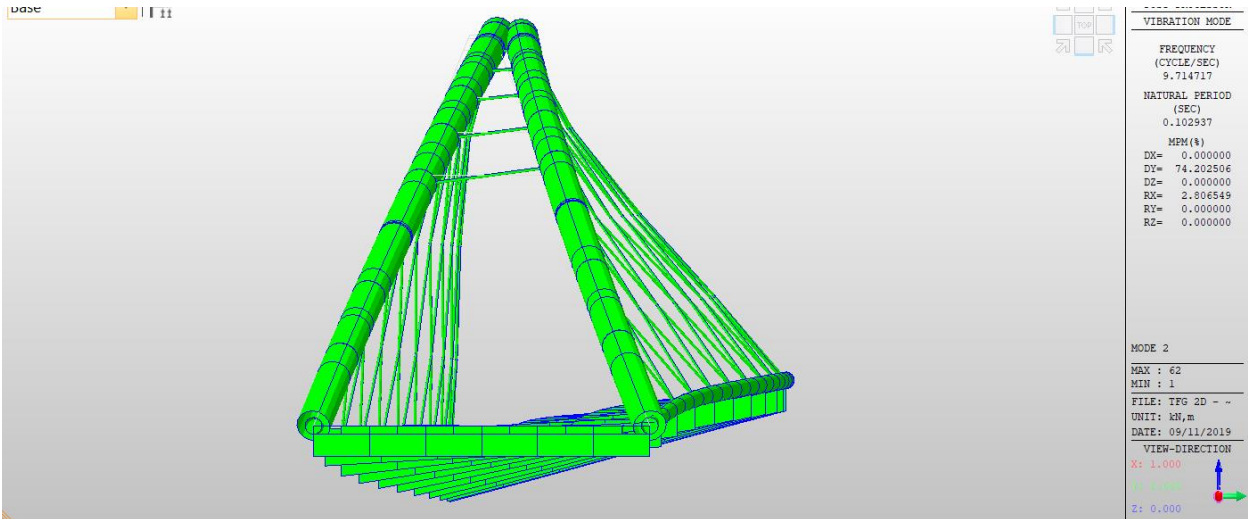


Figura 126 Modo 2 de vibración III

- o Modo 3: (10,325 Hz)

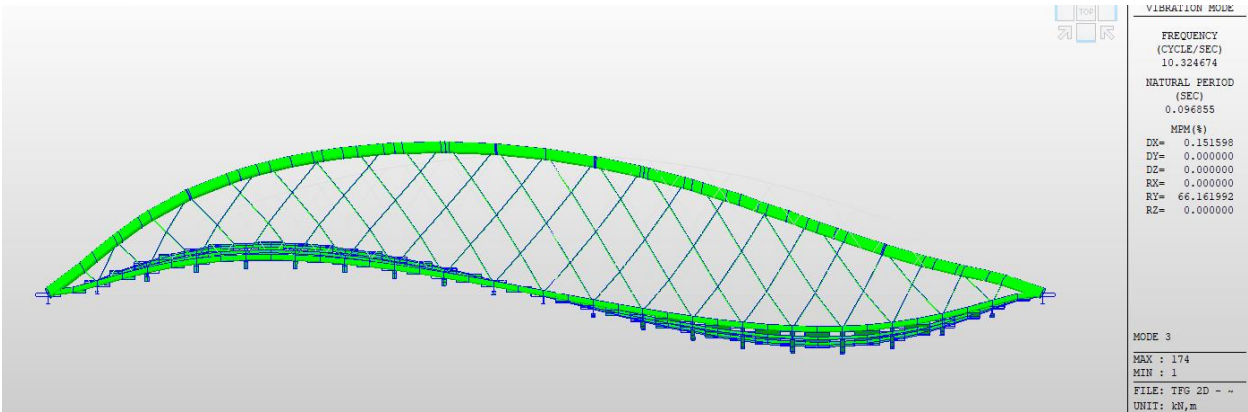


Figura 127 Modo 3 de vibración

3.3. Modelo 3

3.3.1 Modelo 3a

- Flecha: 8,44 centímetros

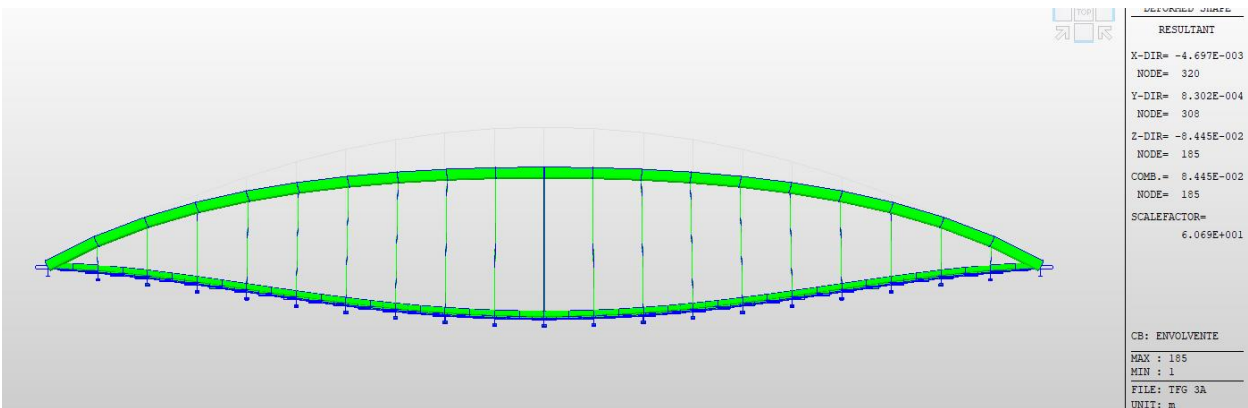


Figura 128 Flecha

- Modos de pandeo
 - o Modo 1: 3,699

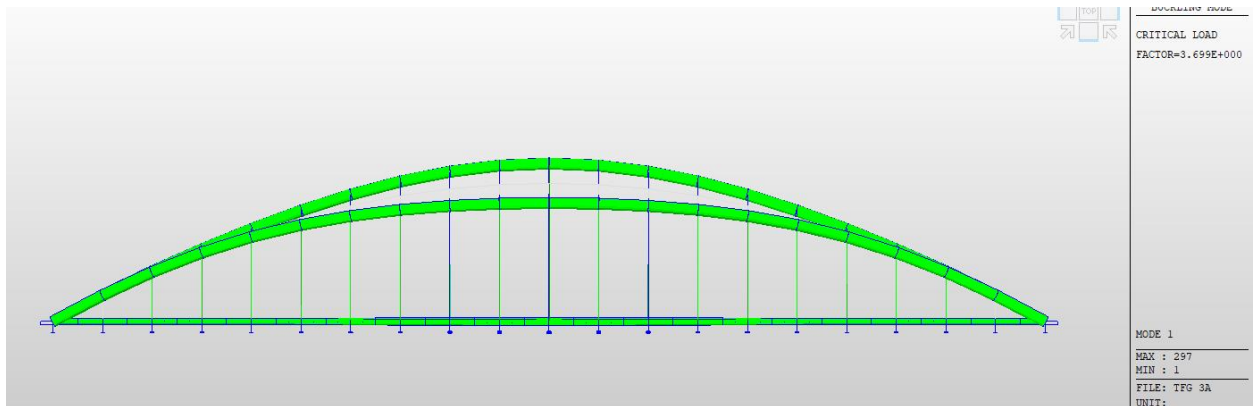


Figura 129 Modo 1 de pandeo

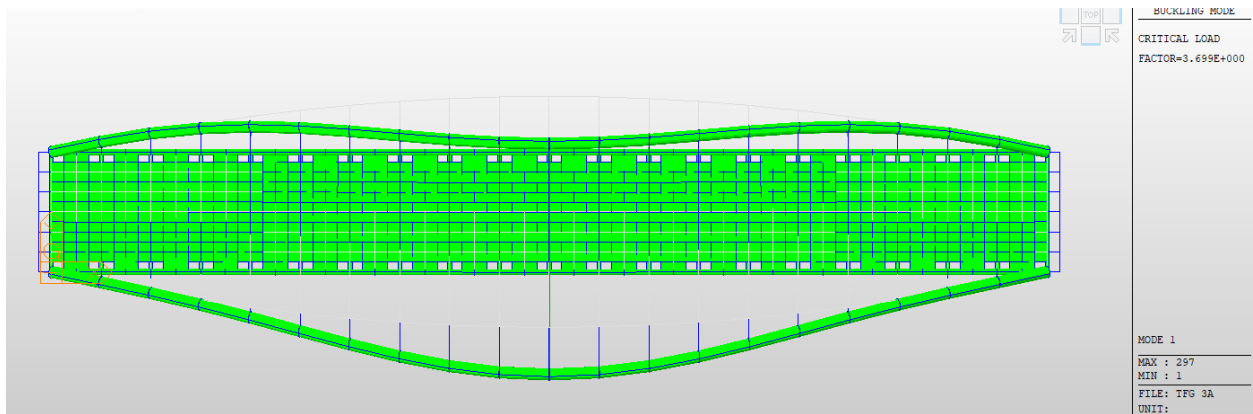


Figura 130 Modo 1 de pandeo II

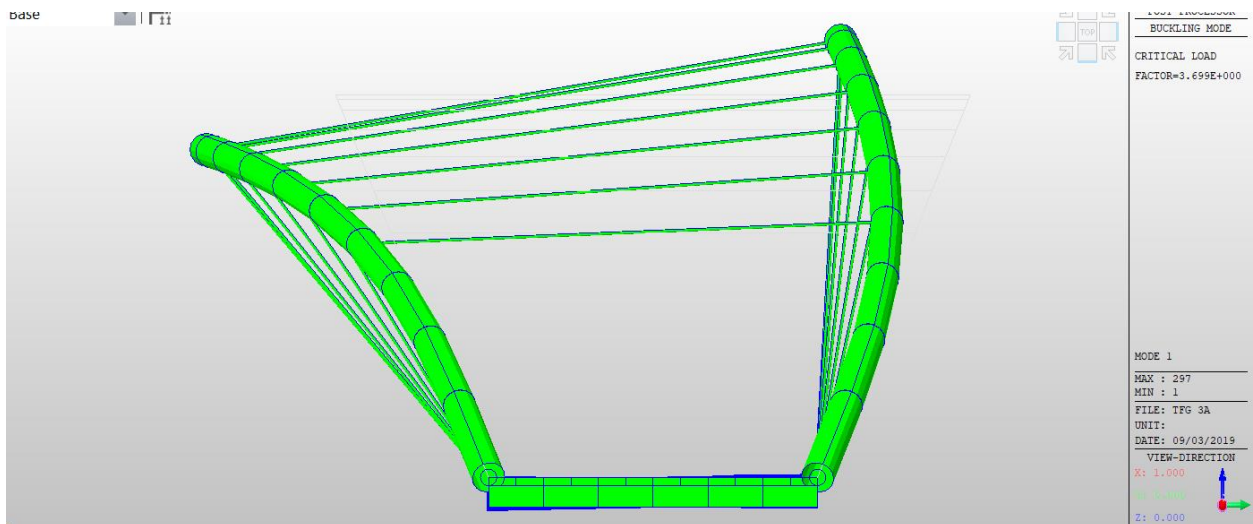


Figura 131 Modo 1 de pandeo III

o Modo 2: 3,833

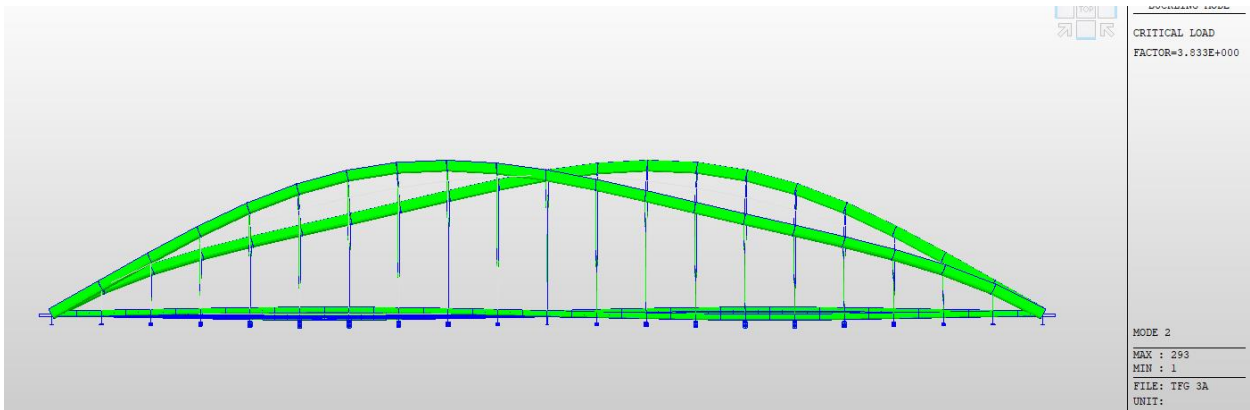


Figura 132 Modo 2 de pandeo

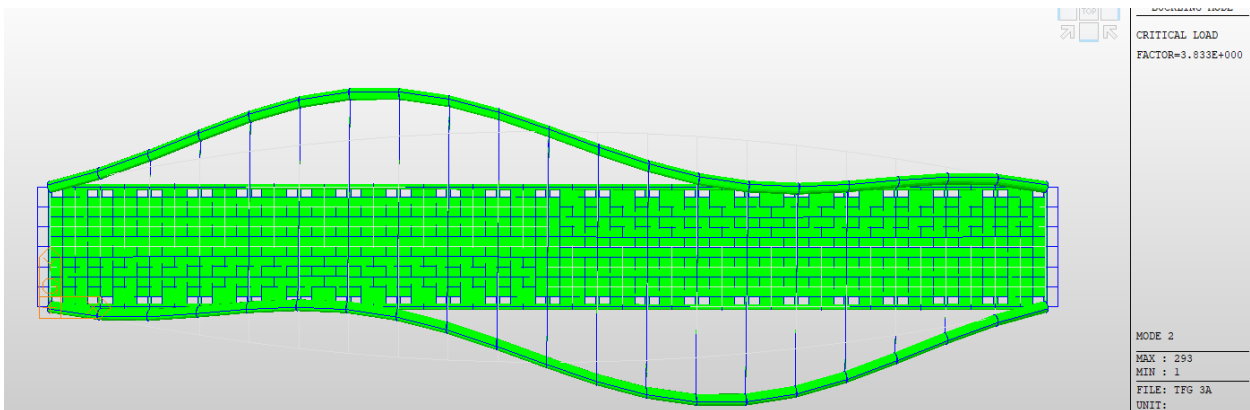


Figura 133 Modo 2 de pandeo II

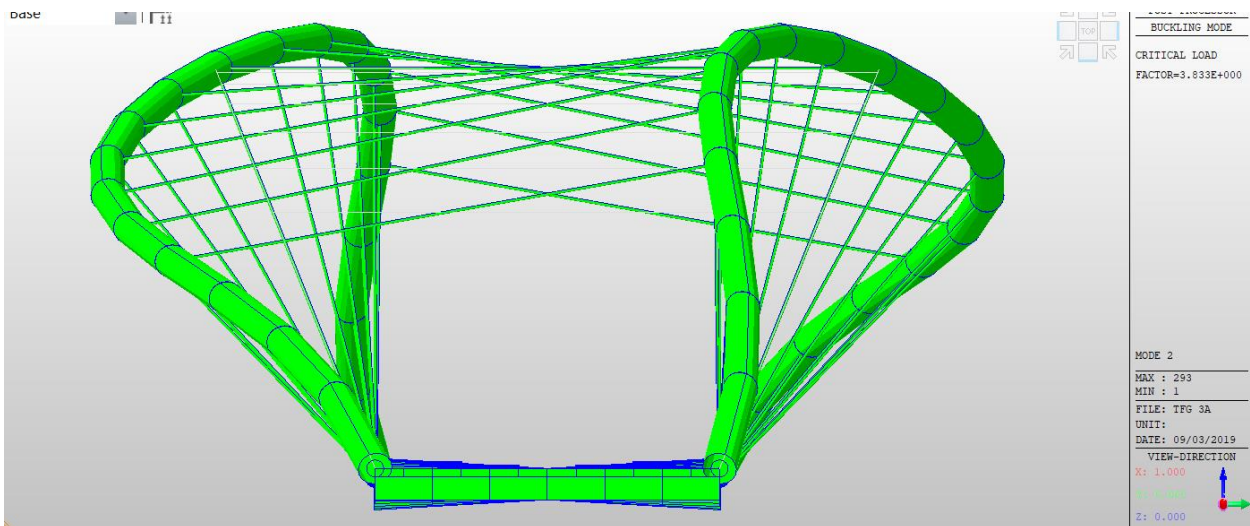


Figura 134 Modo 2 de pandeo III

o Modo 3: 5,072

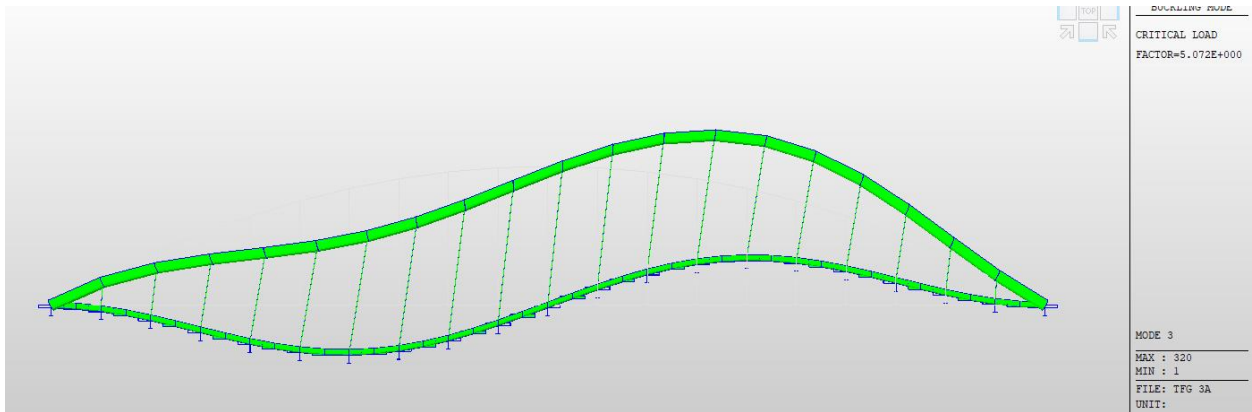


Figura 135 Modo 3 de pandeo

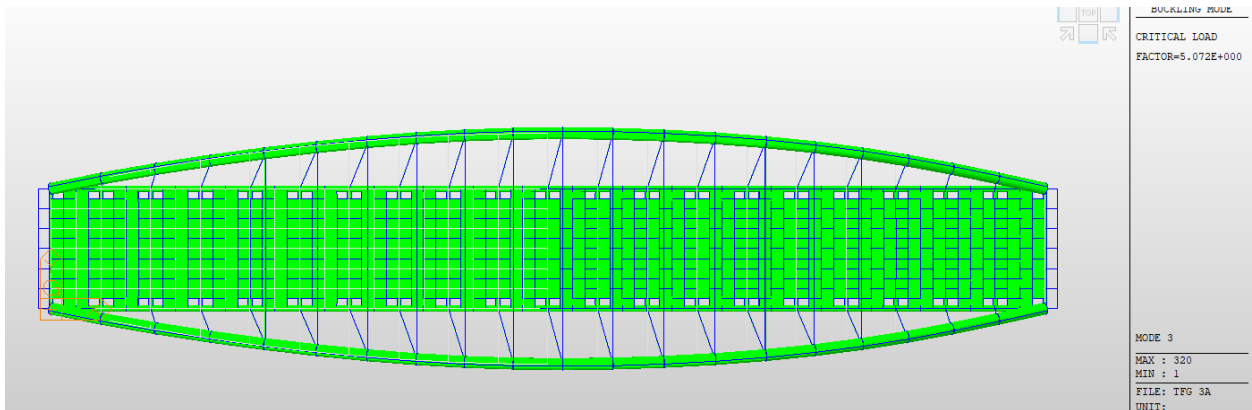


Figura 136 Modo 3 de pandeo II

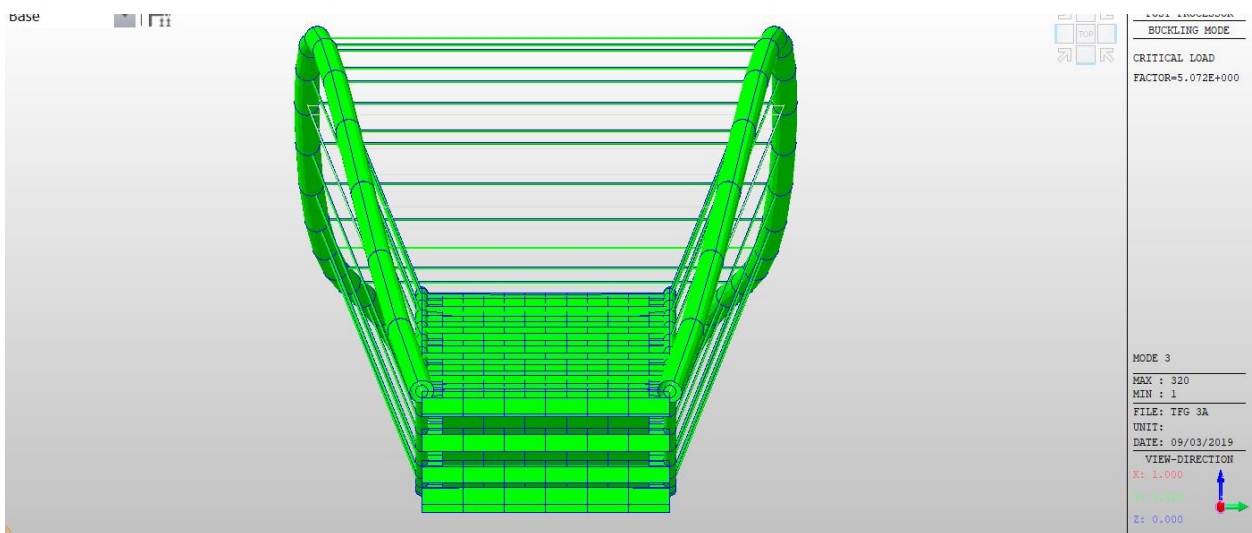


Figura 137 Modo 3 de pandeo III

- Modos de vibración: Frecuencias naturales

- o Modo 1: (2,193 Hz)

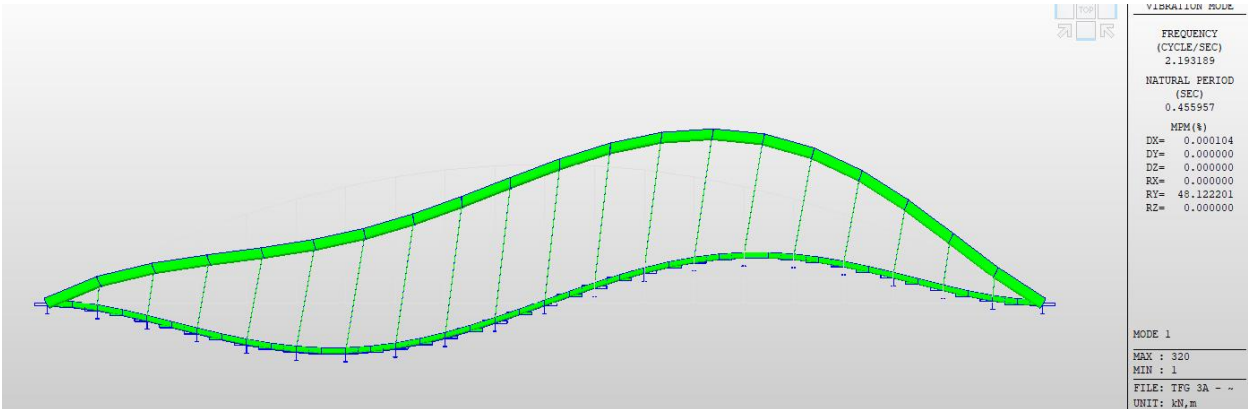


Figura 138 Modo 1 de vibración

- o Modo 2: (3,734 Hz)

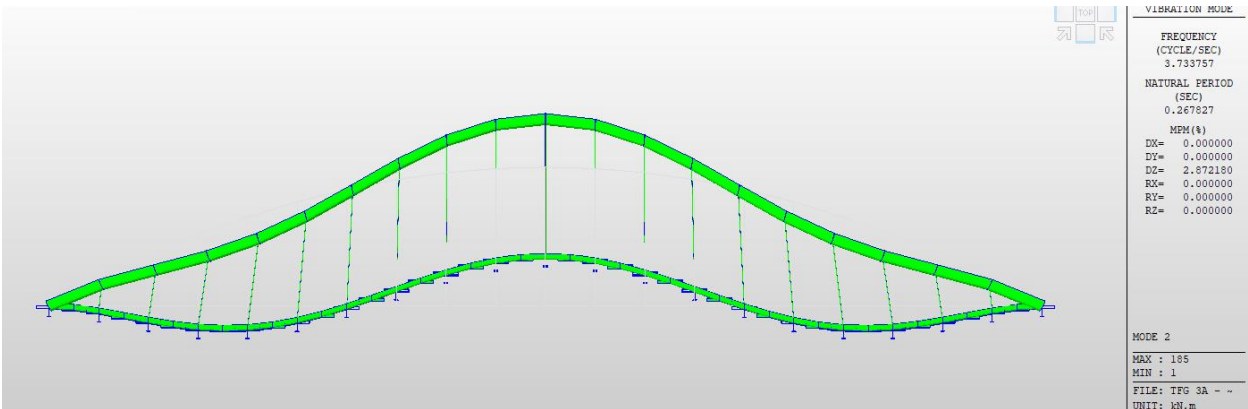


Figura 139 Modo 2 de vibración

- o Modo 3: (6,531 Hz)

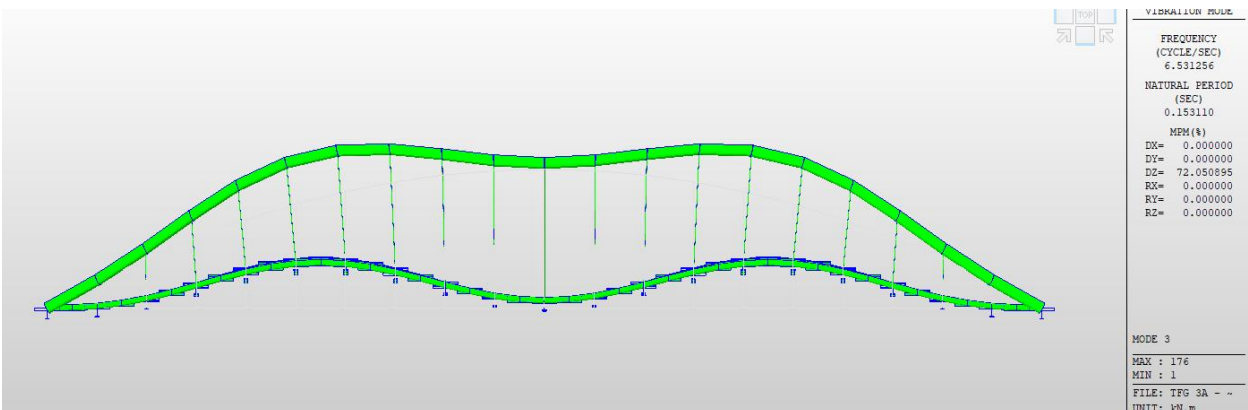


Figura 140 Modo 3 de vibración

3.3.2 Modelo 3b

- Flecha: 29,67 centímetros

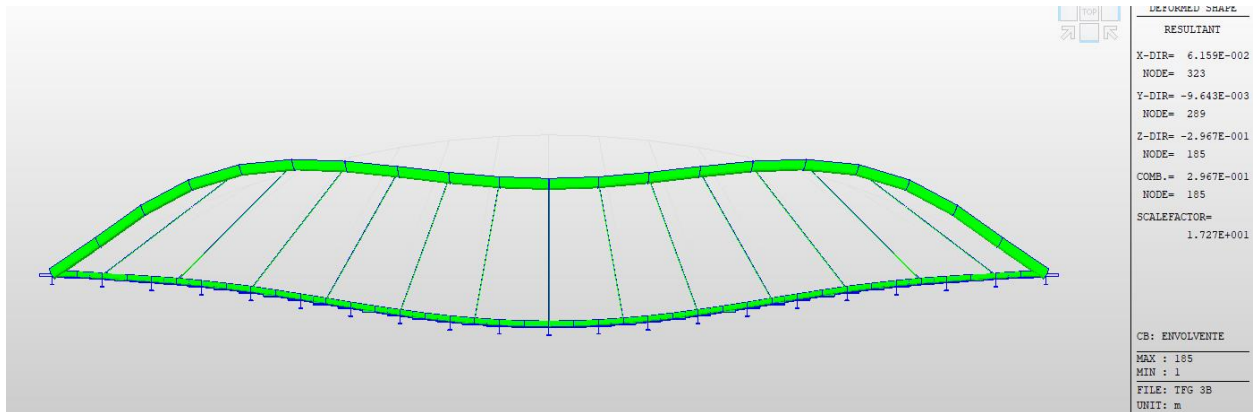


Figura 141 Flecha

- Modos de pandeo
 - o Modo 1: 3,387

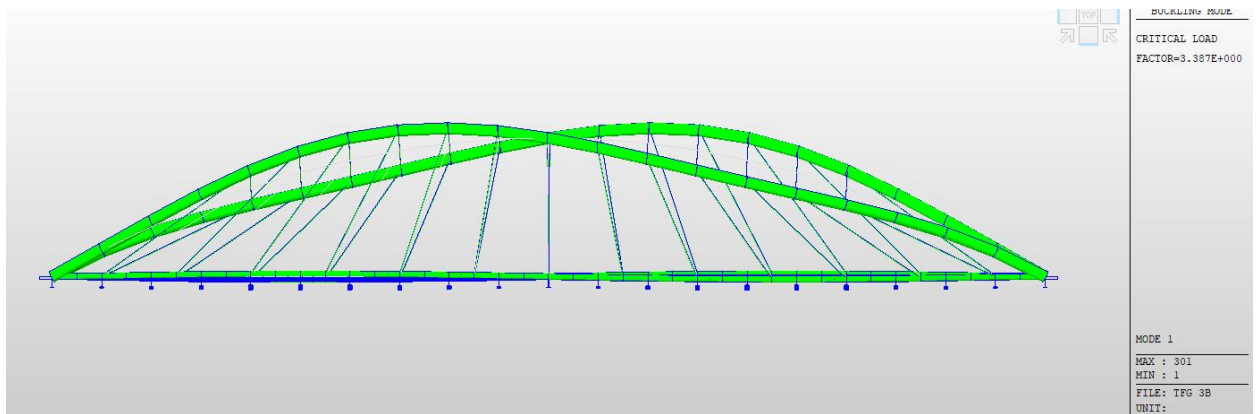


Figura 142 Modo 1 de pandeo

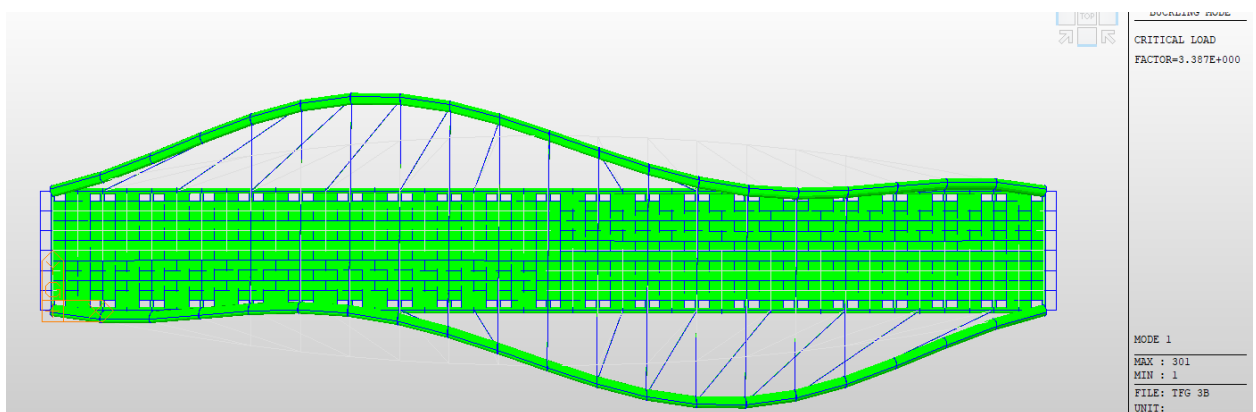


Figura 143 Modo 1 de pandeo II

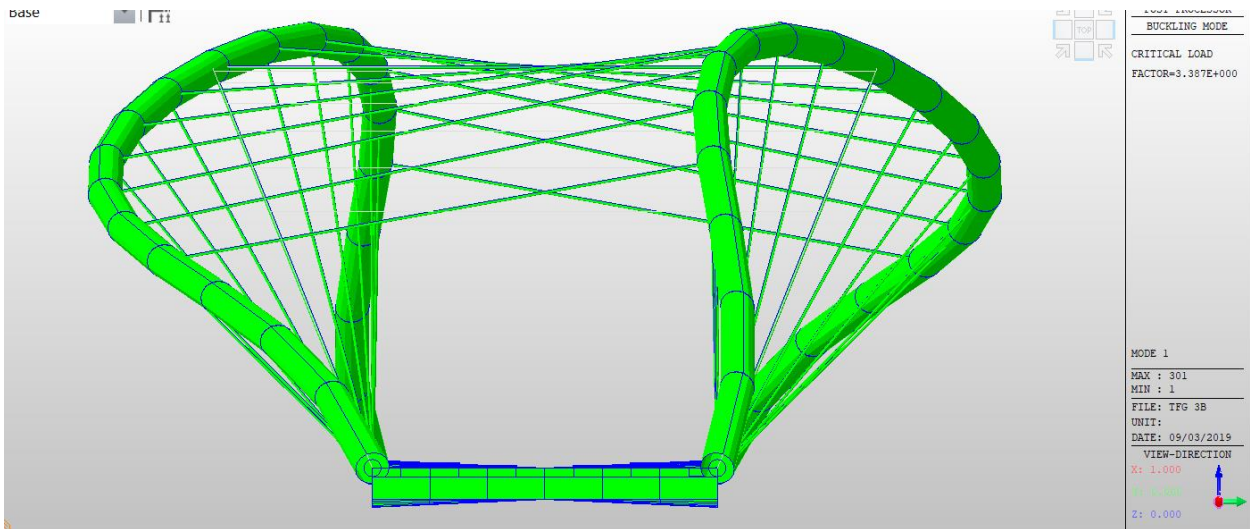


Figura 144 Modo 1 de pandeo III

o Modo 2: 3,501

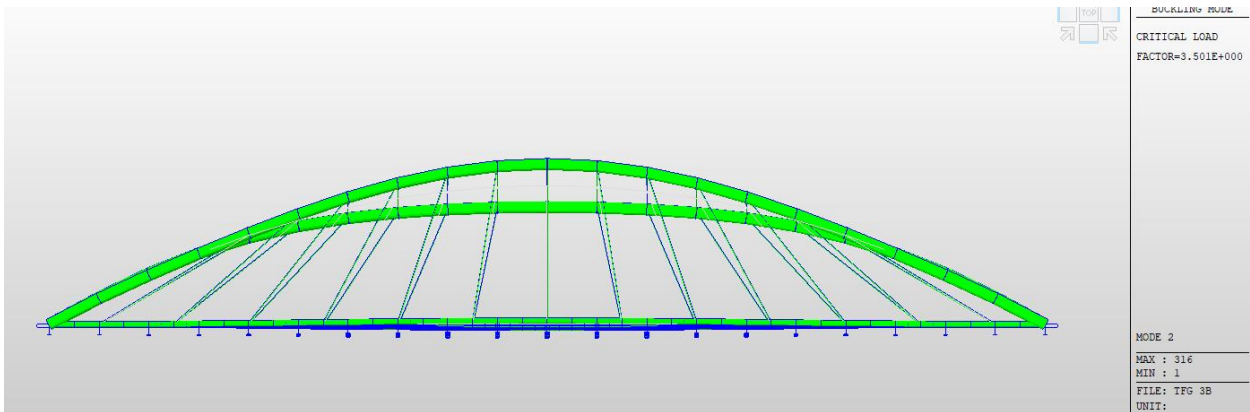


Figura 145 Modo 2 de pandeo

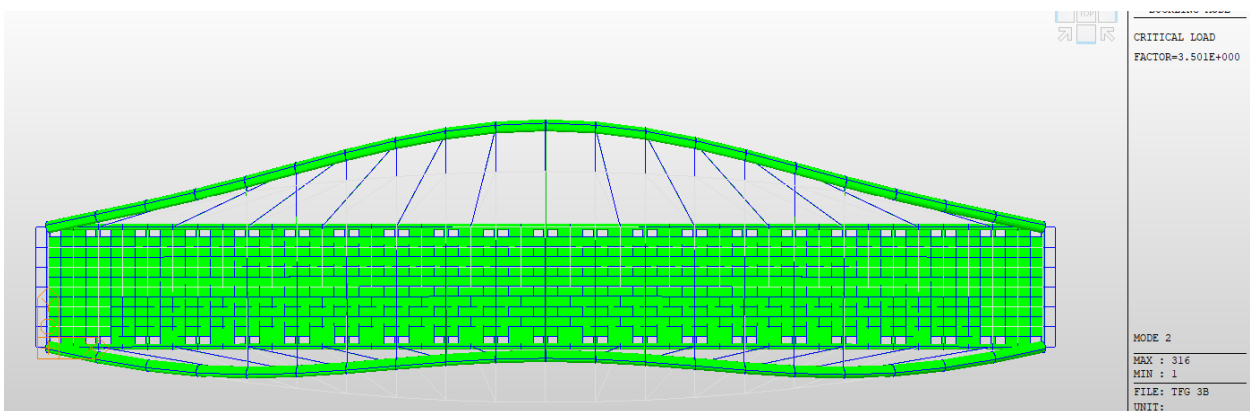


Figura 146 Modo 2 de pandeo II

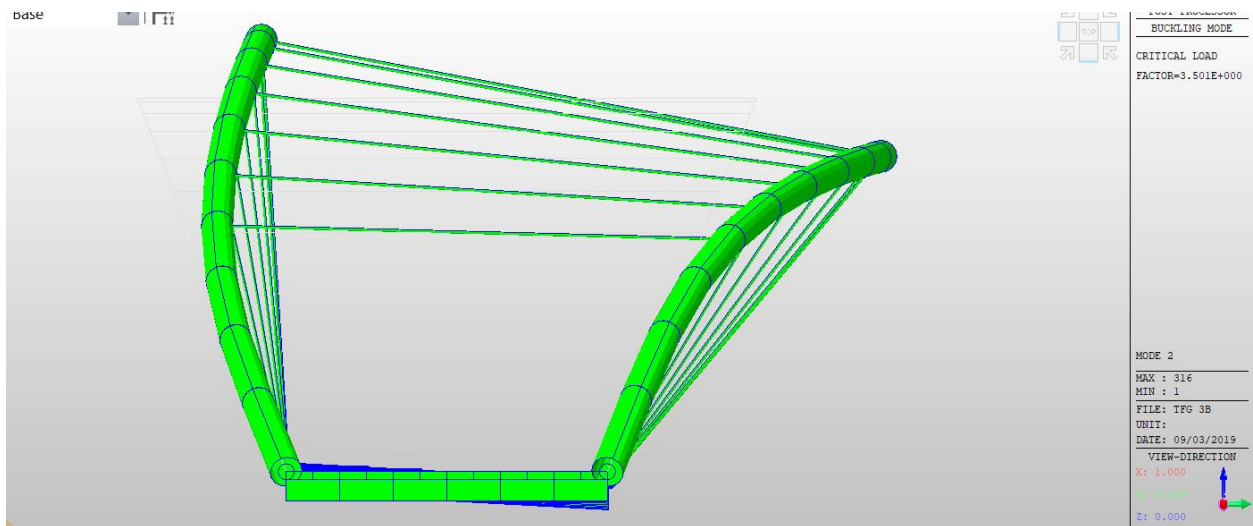


Figura 147 Modo 2 de pandeo III

- o Modo 3: 4,294

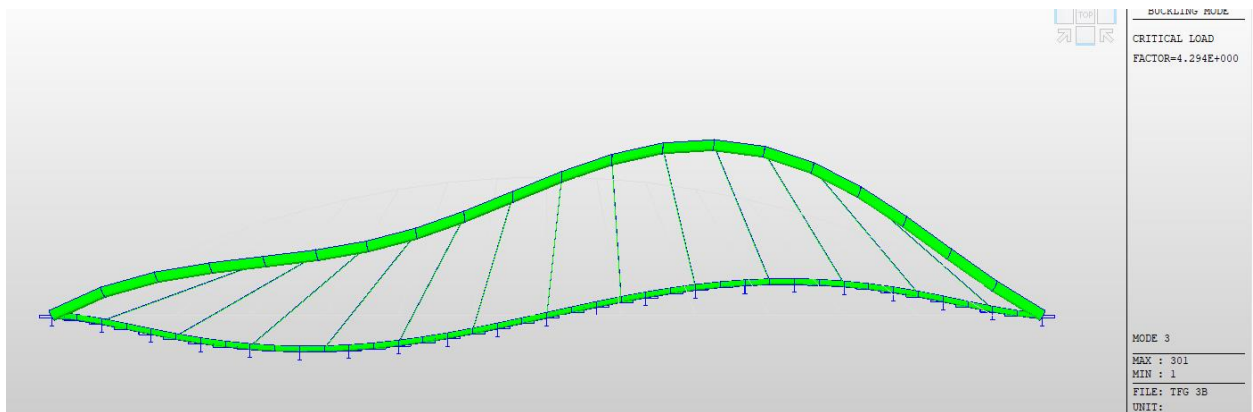


Figura 148 Modo 3 de pandeo

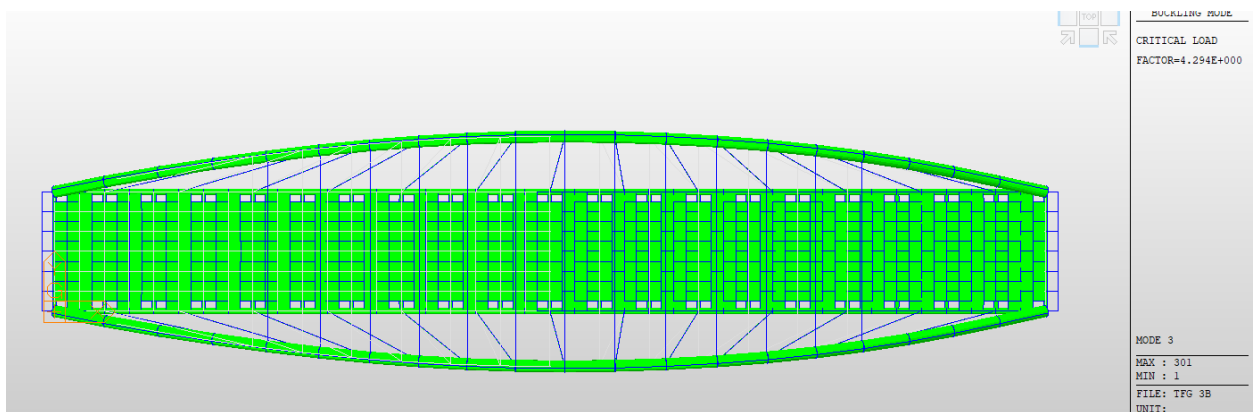


Figura 149 Modo 3 de pandeo II

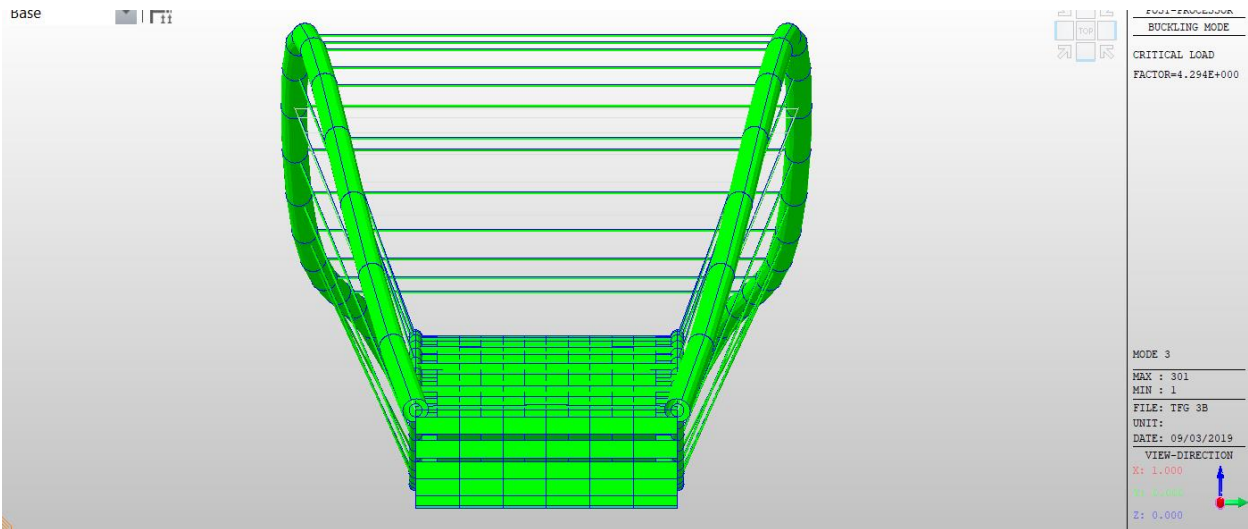


Figura 150 Modo 3 de pandeo III

- Modos de vibración: Frecuencias naturales
 - o Modo 1: (2,773 Hz)

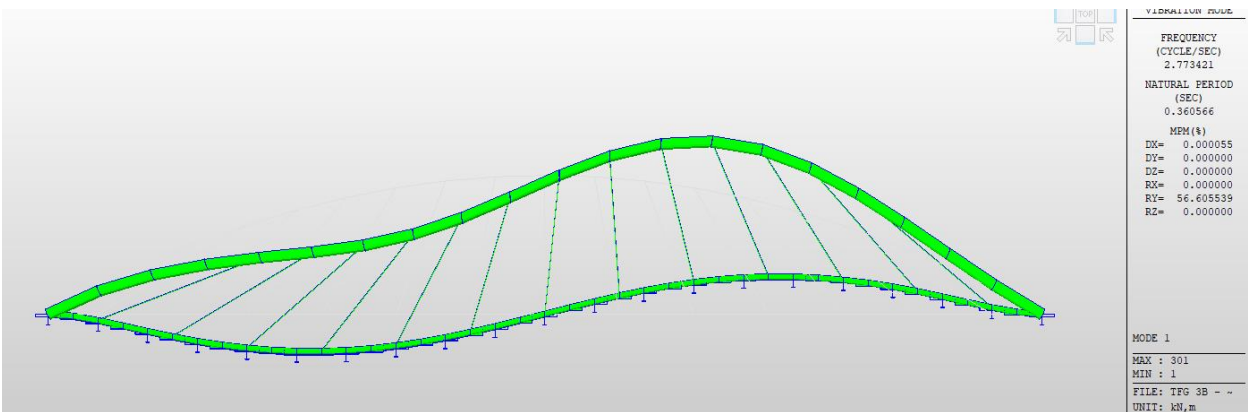


Figura 151 Modo 1 de vibración

- o Modo 2: (2,998 Hz)

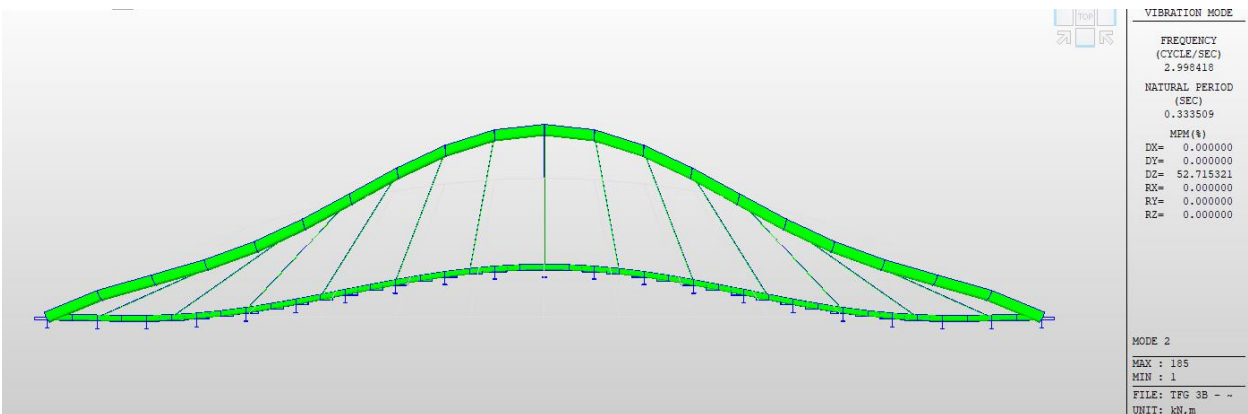


Figura 152 Modo 2 de vibración

- Modo 3: (6,354 Hz)

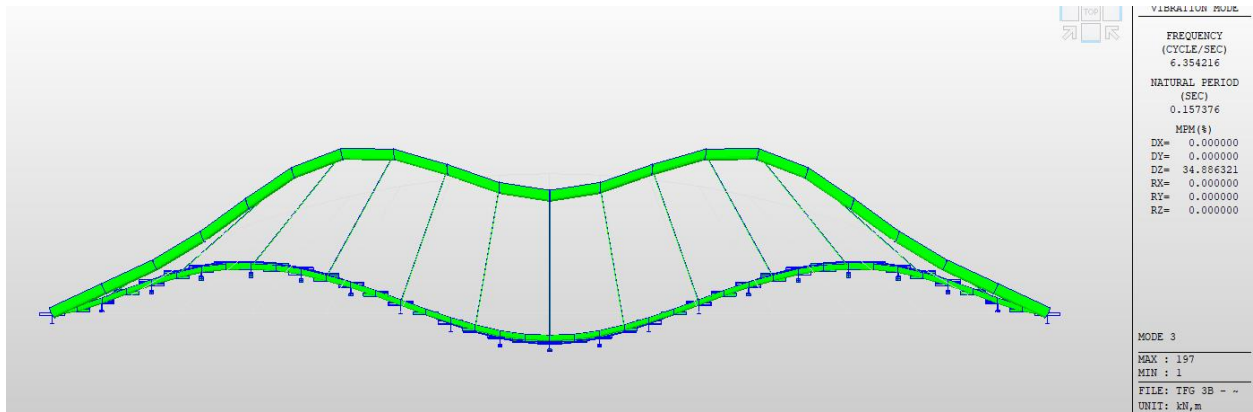


Figura 153 Modo 3 de vibración

3.3.3 Modelo 3c

- Flecha: 6,75 centímetros

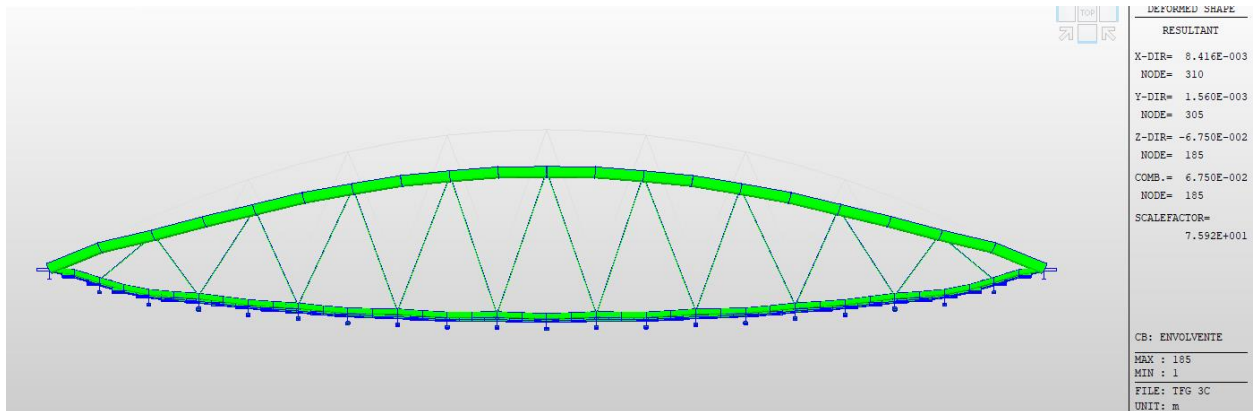


Figura 154 Flecha

- Modos de pandeo

- Modo 1: 3,774

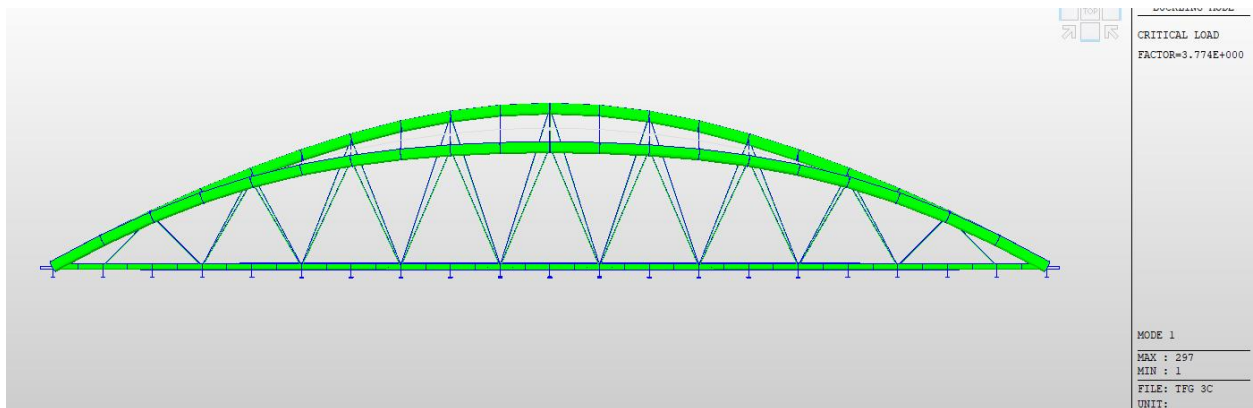


Figura 155 Modo 1 de pandeo

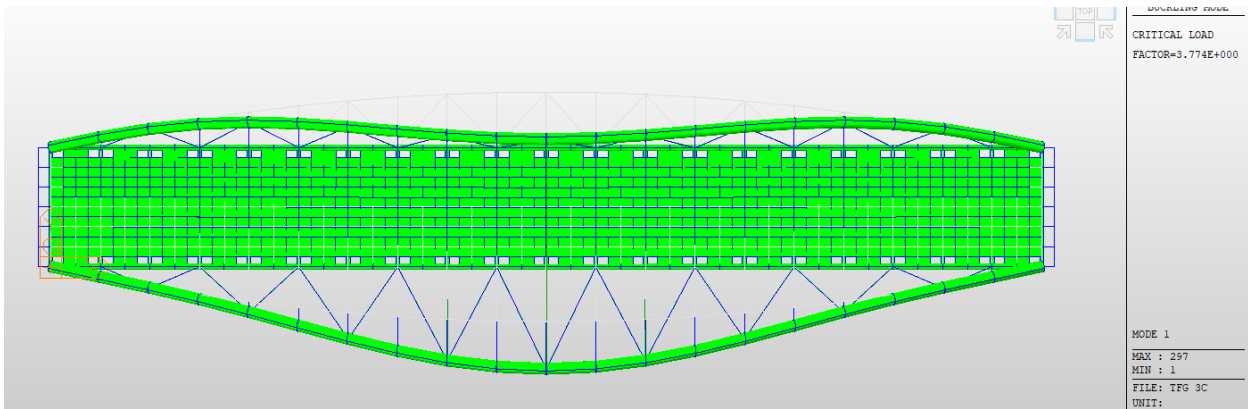


Figura 156 Modo 1 de pandeo II

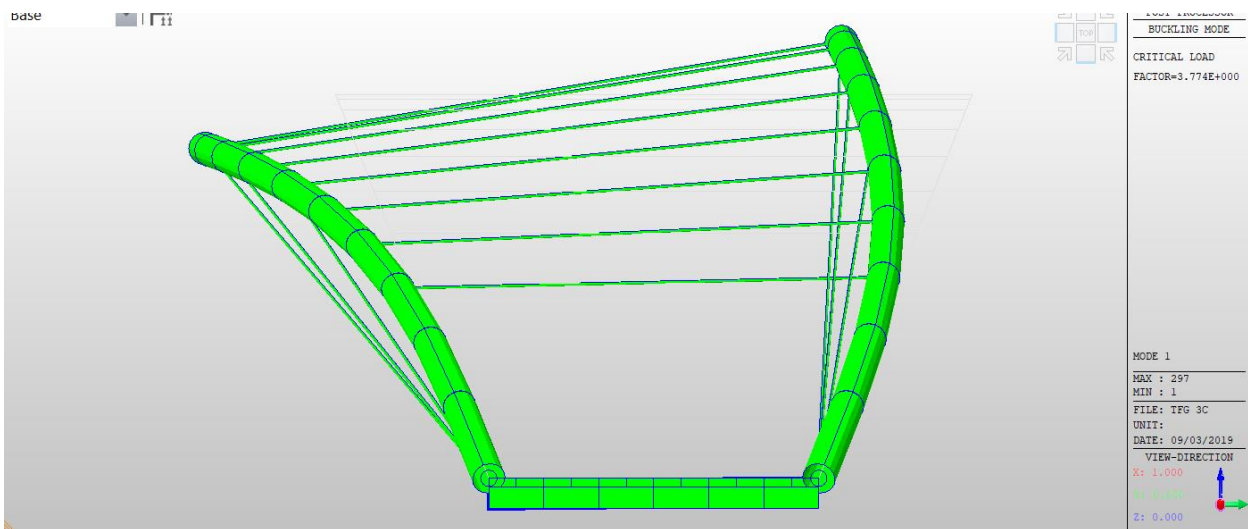


Figura 157 Modo 1 de pandeo III

- o Modo 2: 3,954

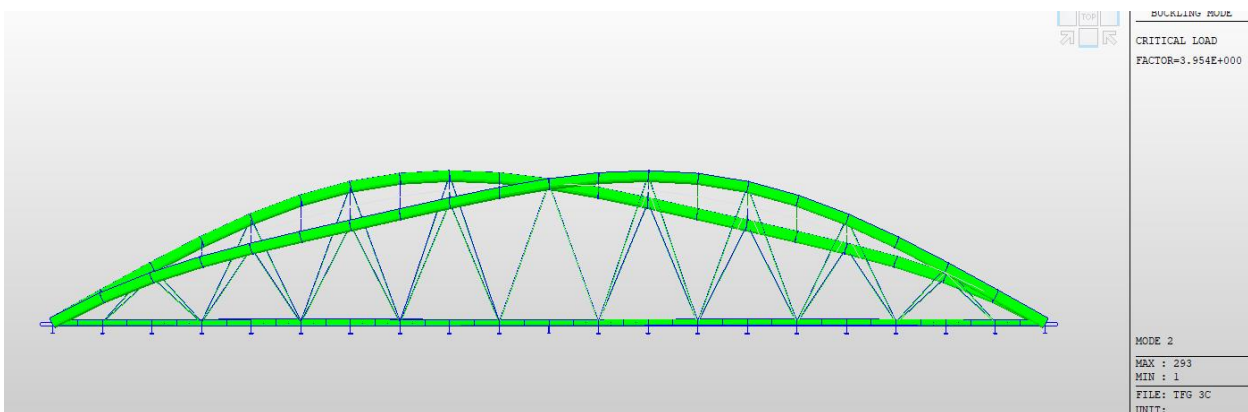


Figura 158 Modo 2 de pandeo

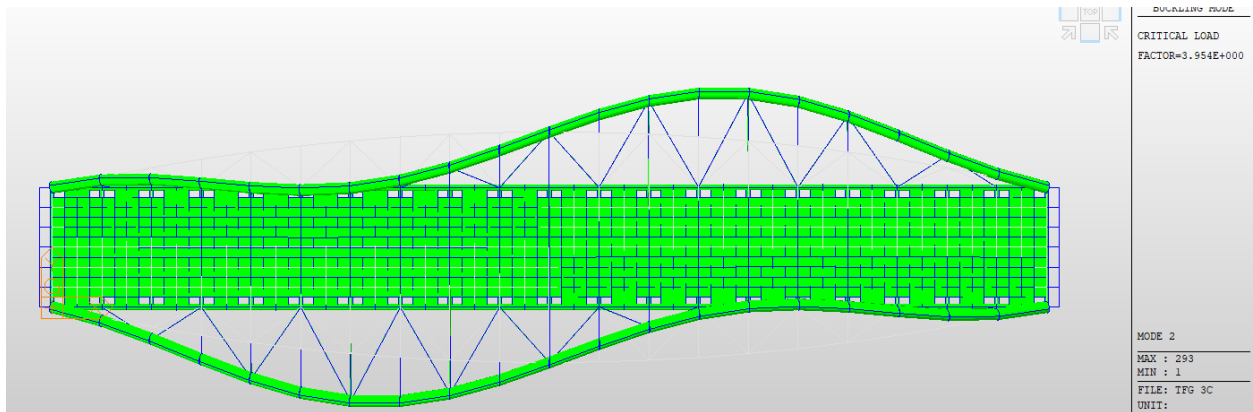


Figura 159 Modo 2 de pandeo II

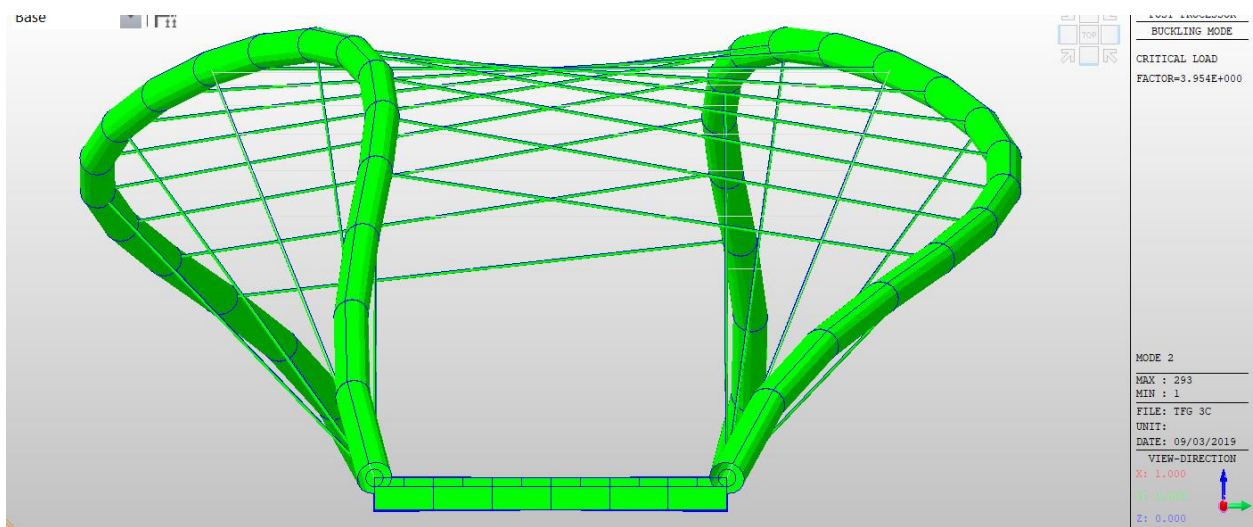


Figura 160 Modo 2 de pandeo III

- o Modo 3: 9,720

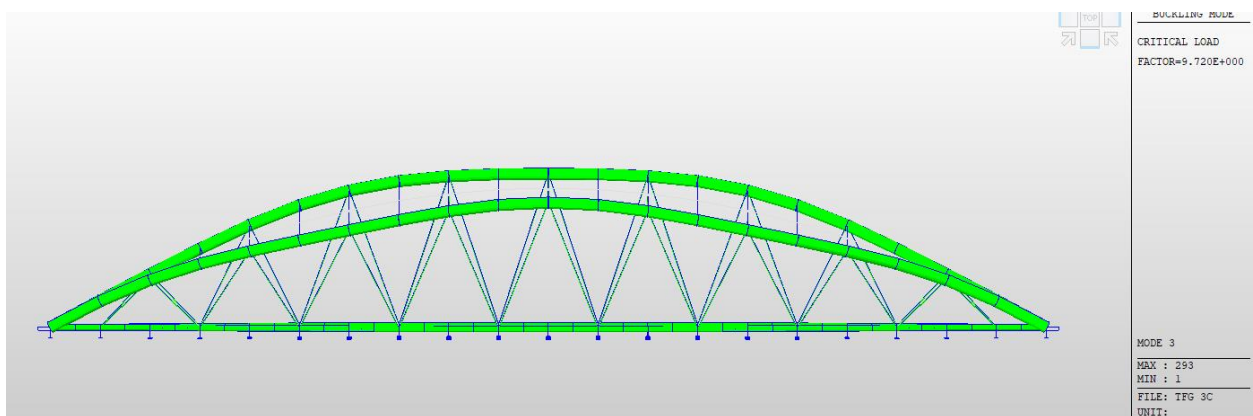


Figura 161 Modo 3 de pandeo

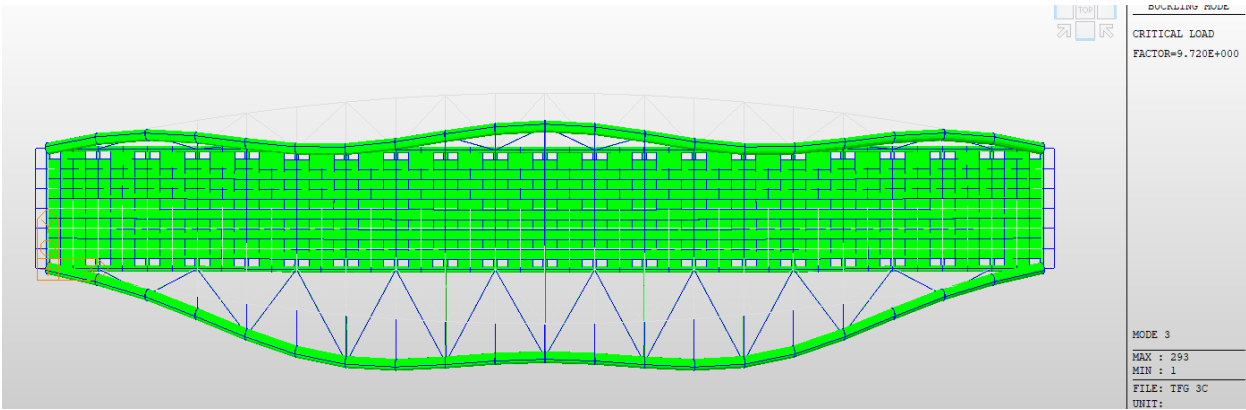


Figura 162 Modo 3 de pandeo II

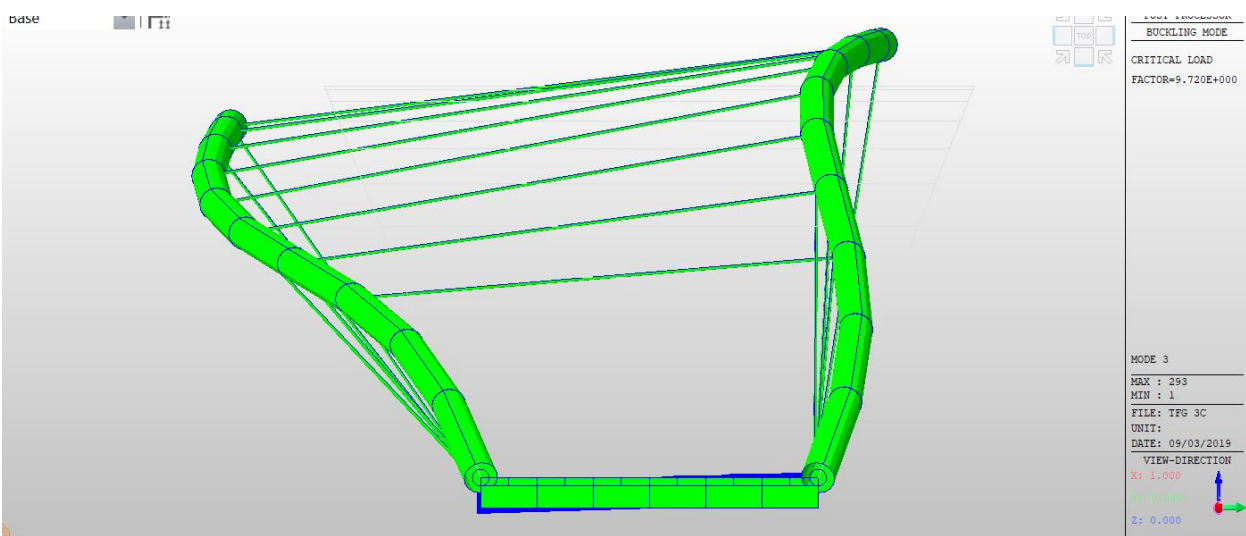


Figura 163 Modo 3 de pandeo III

- Modos de vibración: Frecuencias naturales
 - o Modo 1: (6,340 Hz)

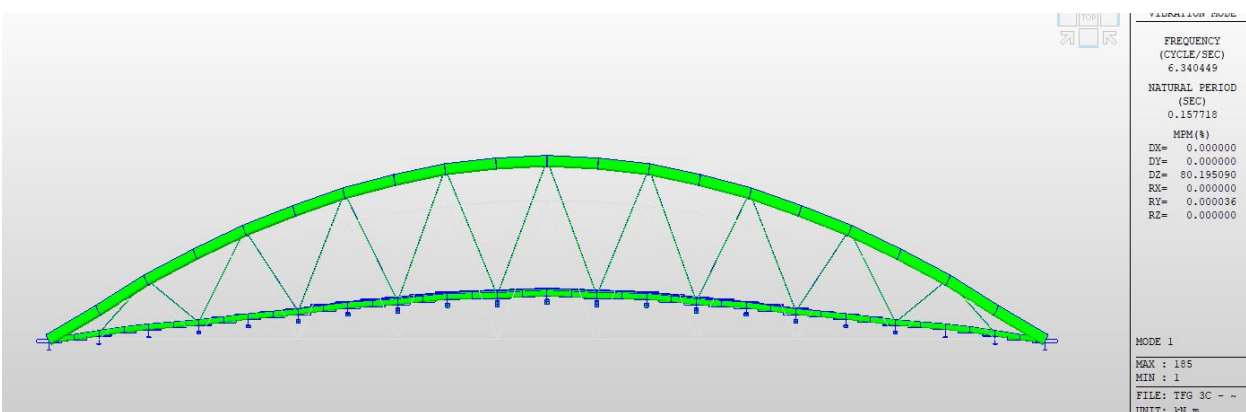


Figura 164 Modo 1 de vibración

- Modo 2: (6,832 Hz)

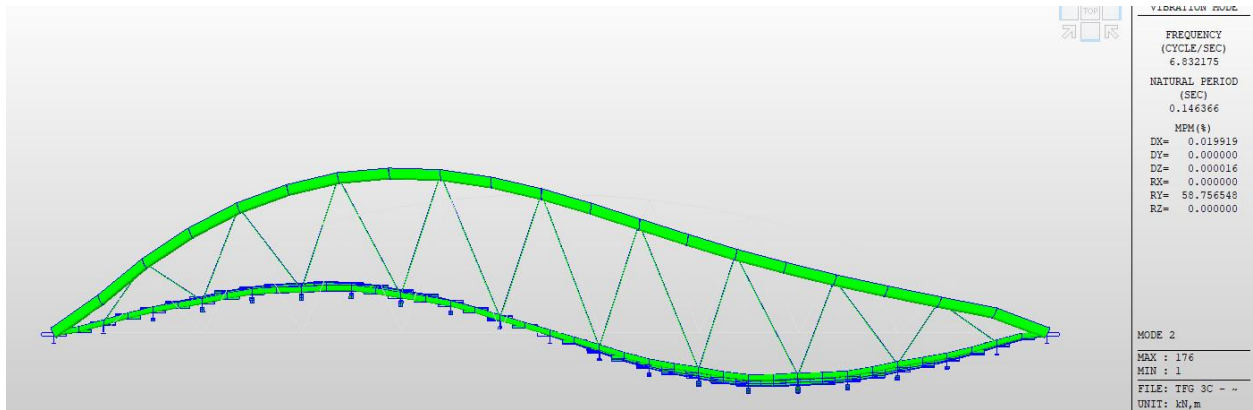


Figura 165 Modo 2 de vibración

- Modo 3: (8,888 Hz)

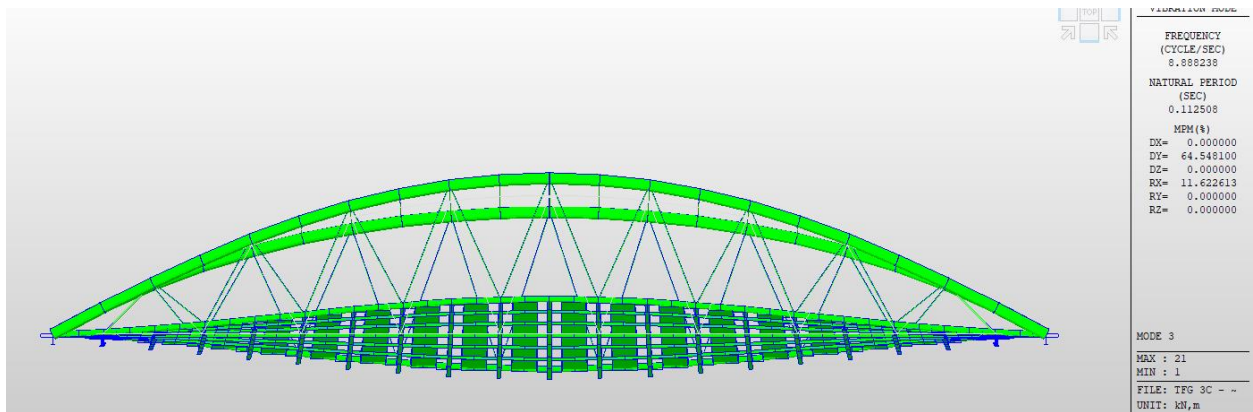


Figura 166 Modo 3 de vibración

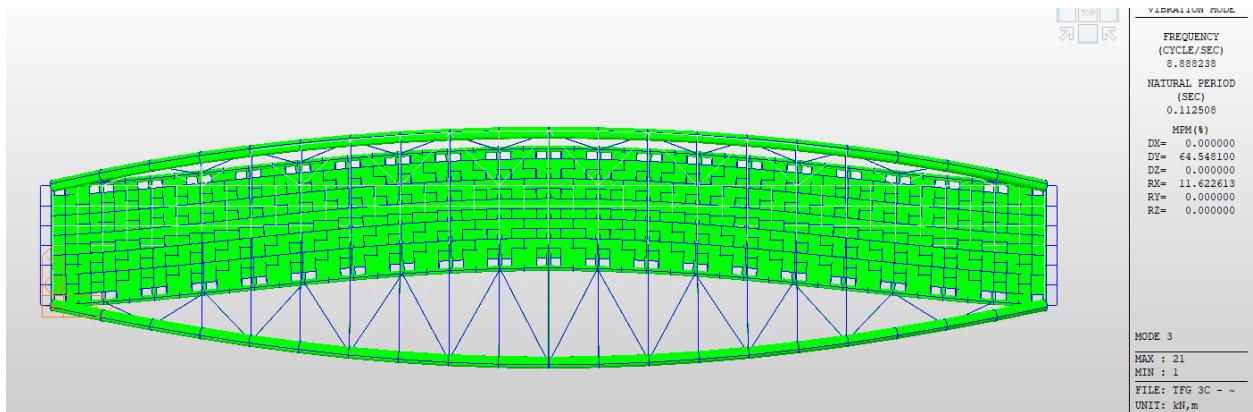


Figura 167 Modo 3 de vibración II

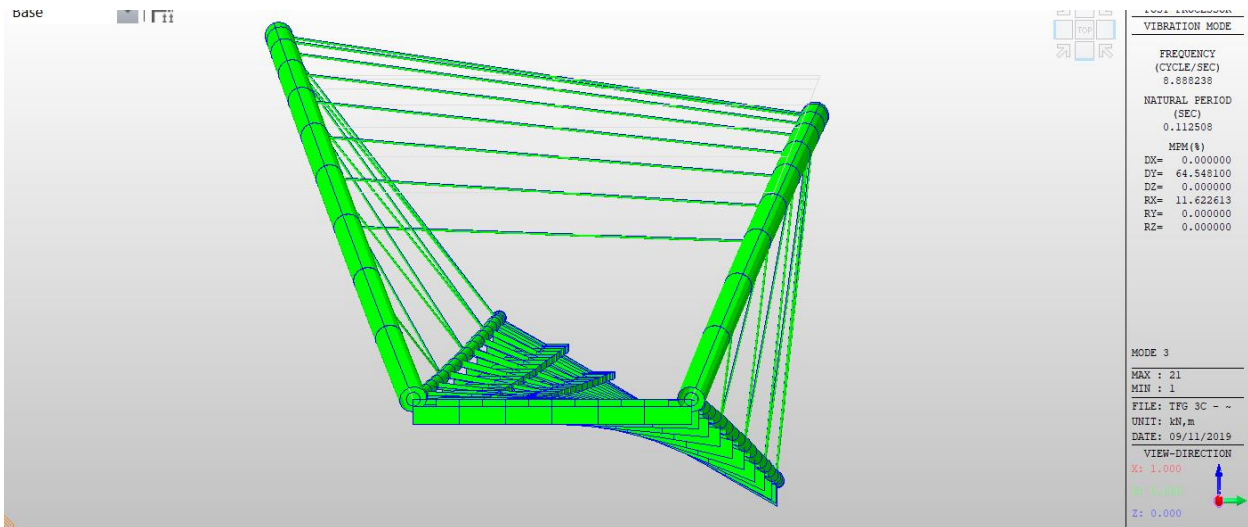


Figura 168 Modo 3 de vibración III

3.3.4 Modelo 3d

- Flecha: 7,39 centímetros

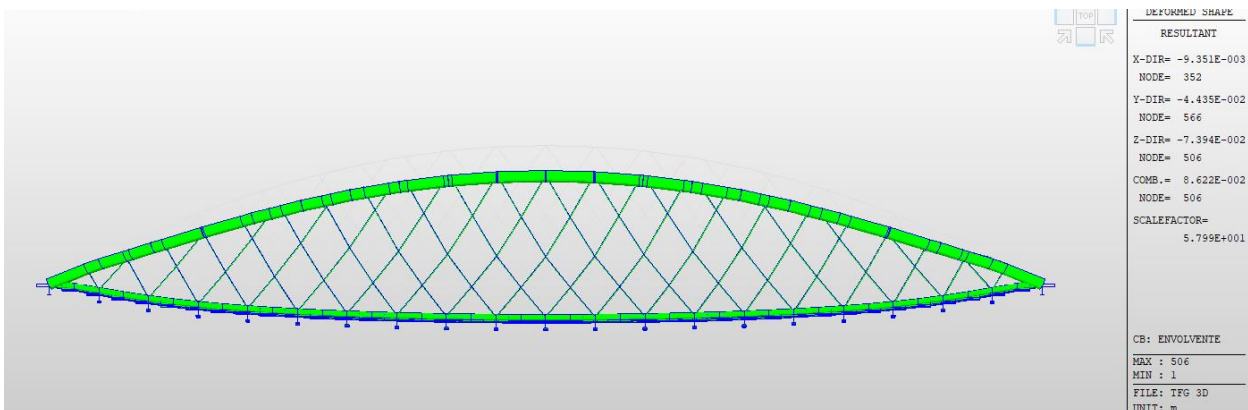


Figura 169 Flecha

- Modos de pandeo
 - o Modo 1: 3,576

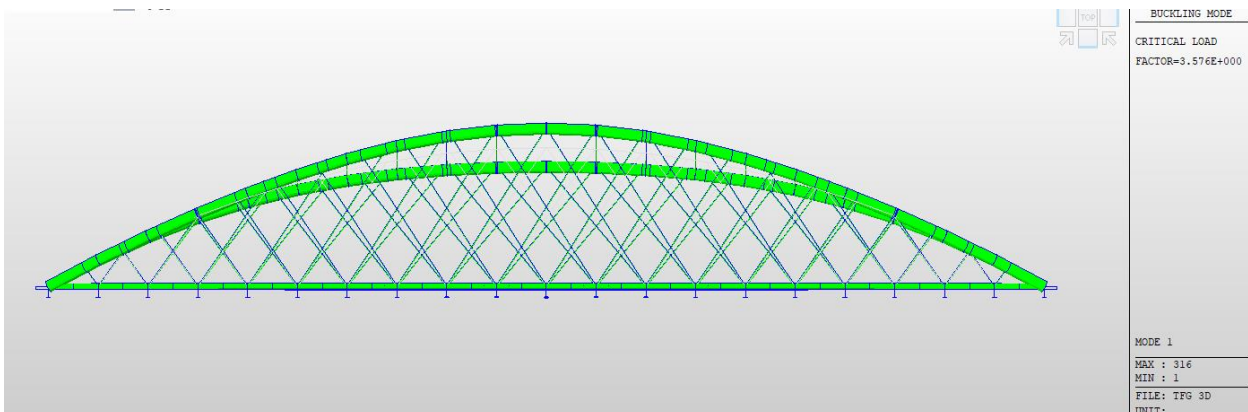


Figura 170 Modo 1 de pandeo

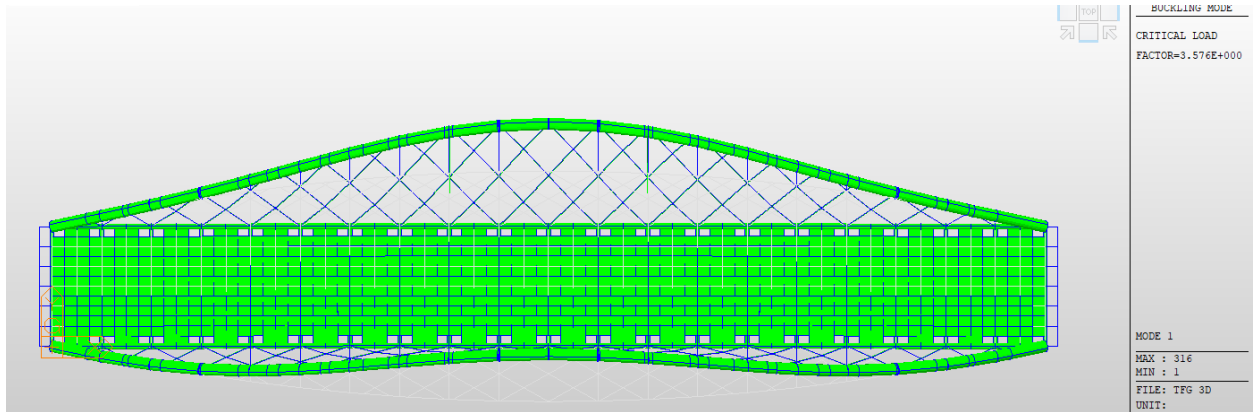


Figura 171 Modo 1 de pandeo II

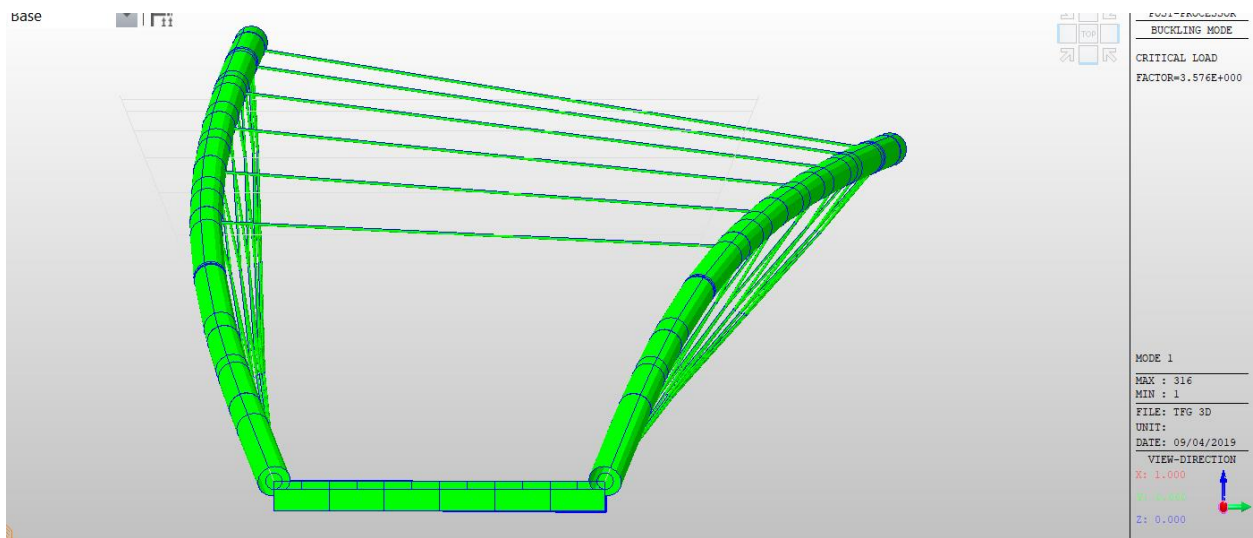


Figura 172 Modo 1 de pandeo III

- o Modo 2: 3,887

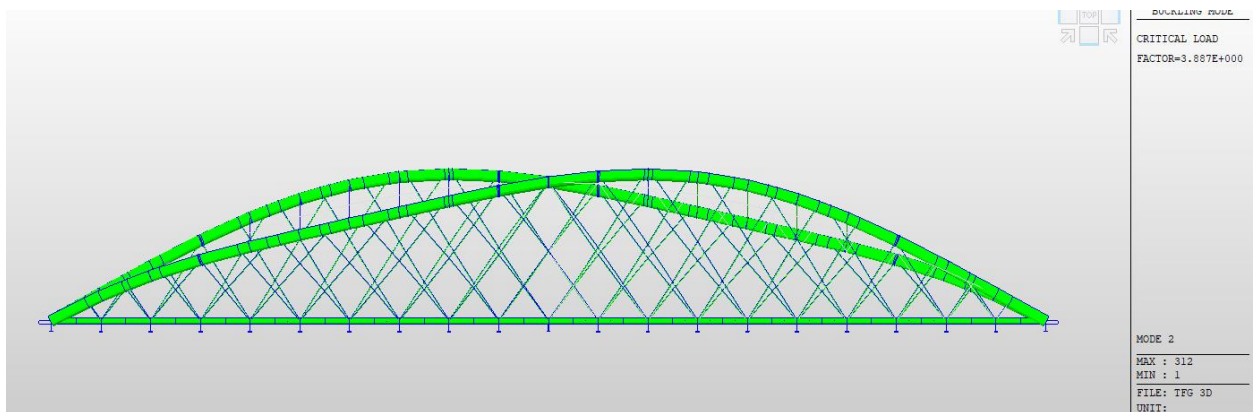


Figura 173 Modo 2 de pandeo

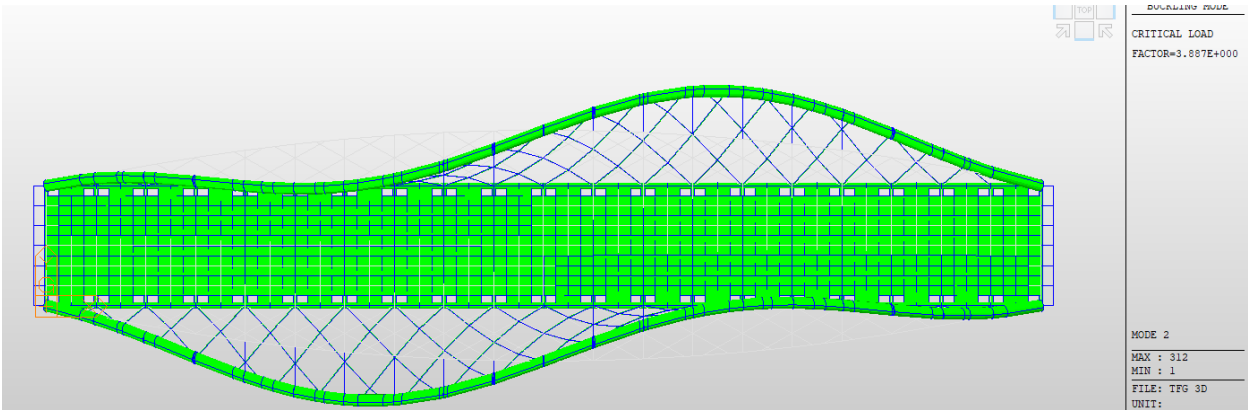


Figura 174 Modo 2 de pandeo II

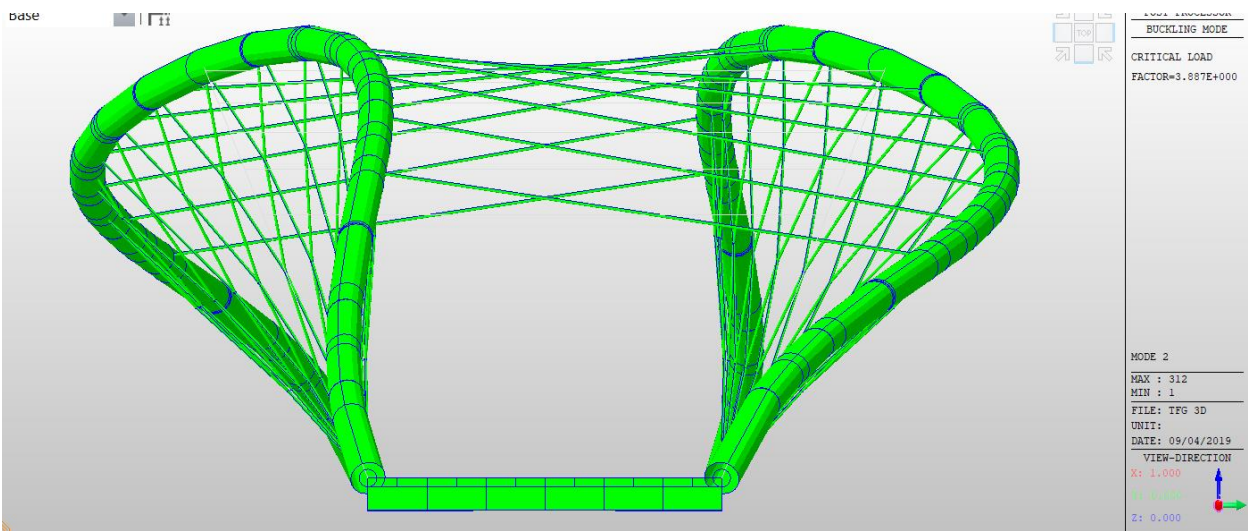


Figura 175 Modo 2 de pandeo III

- Modo 3: 8,201

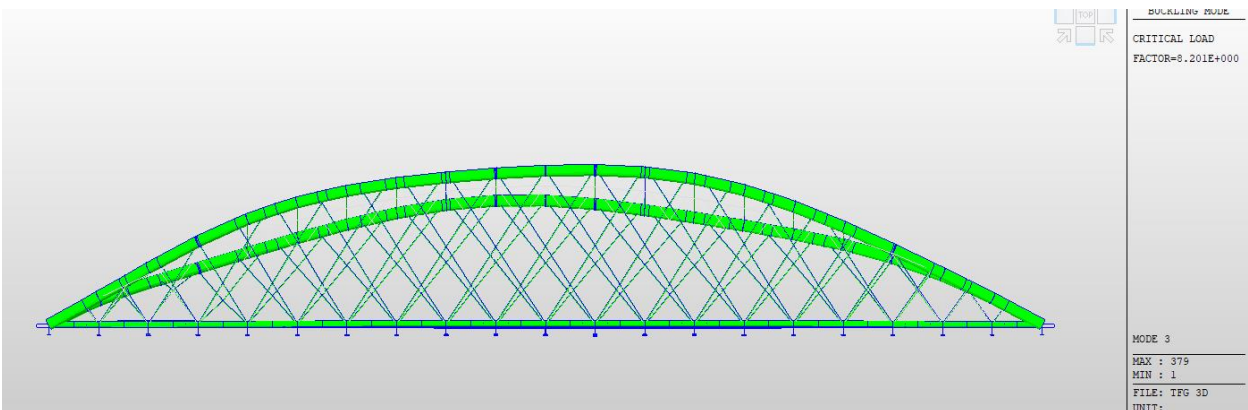


Figura 176 Modo 3 de pandeo

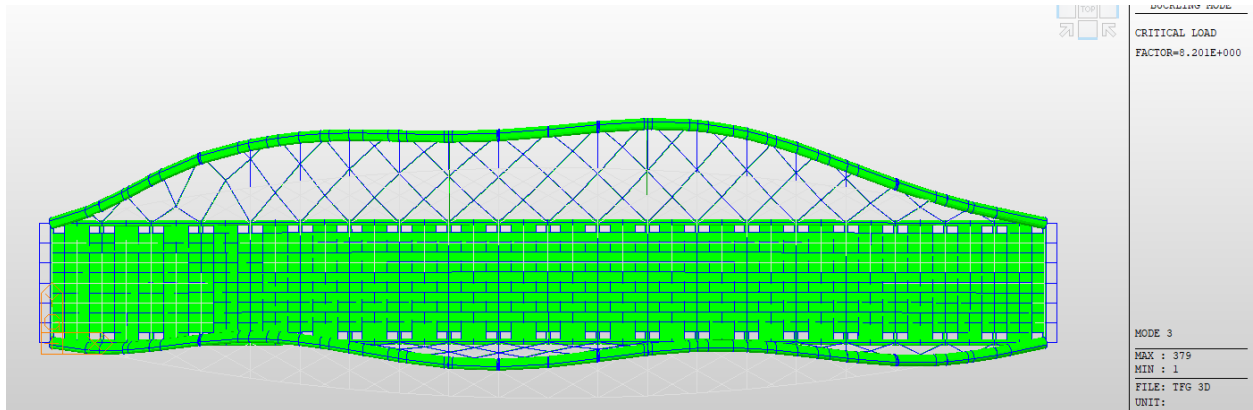


Figura 177 Modo 3 de pandeo II

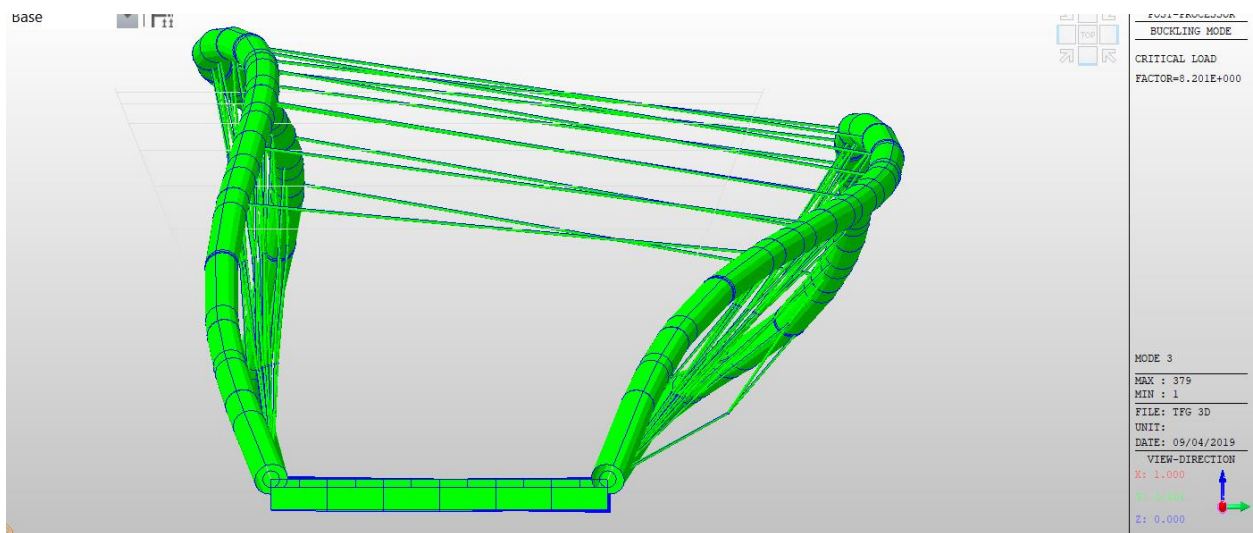


Figura 178 Modo 3 de pandeo III

- Modos de vibración: Frecuencias naturales
 - o Modo 1: (6,648 Hz)

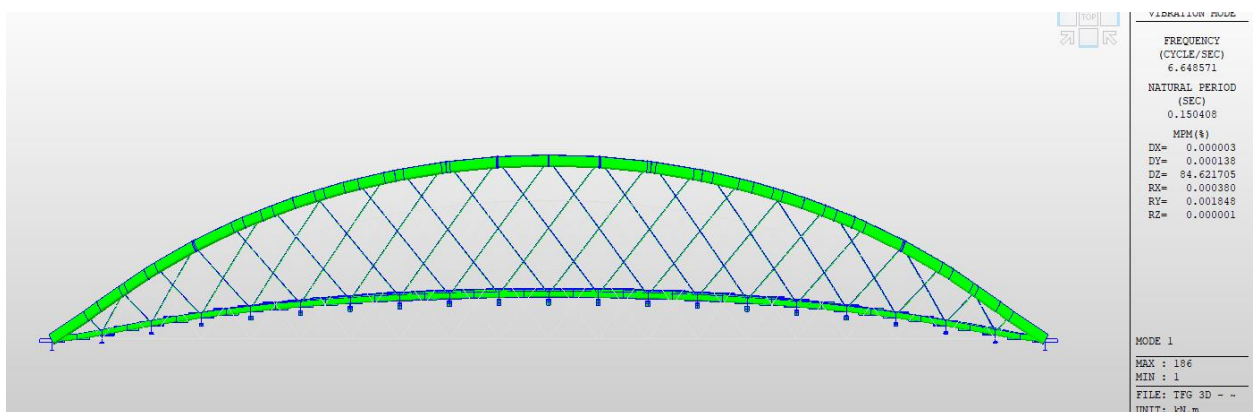


Figura 179 Modo 1 de vibración

o Modo 2: (8,936 Hz)

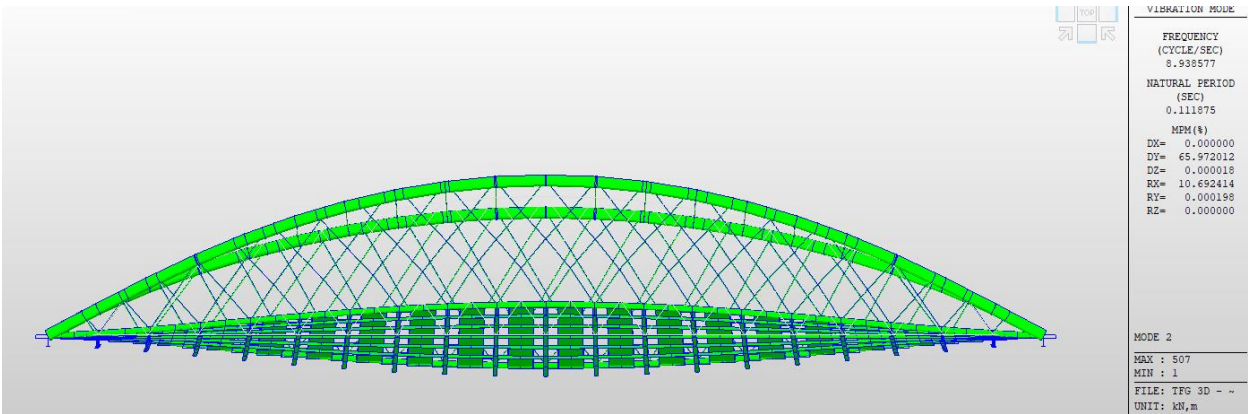


Figura 180 Modo 2 de vibración

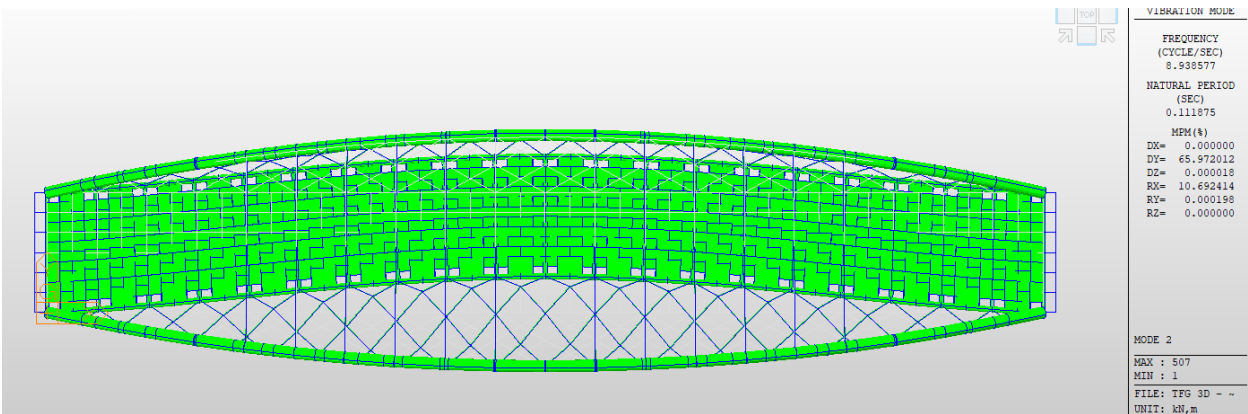


Figura 181 Modo 2 de vibración II

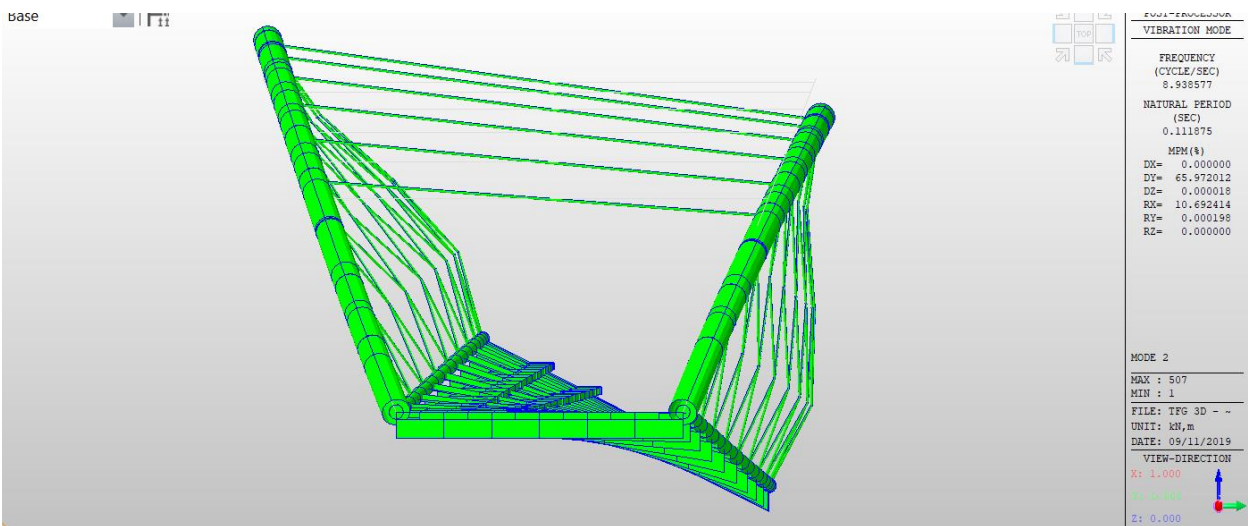


Figura 182 Modo 2 de vibración III

- Modo 3: (10,465 Hz)

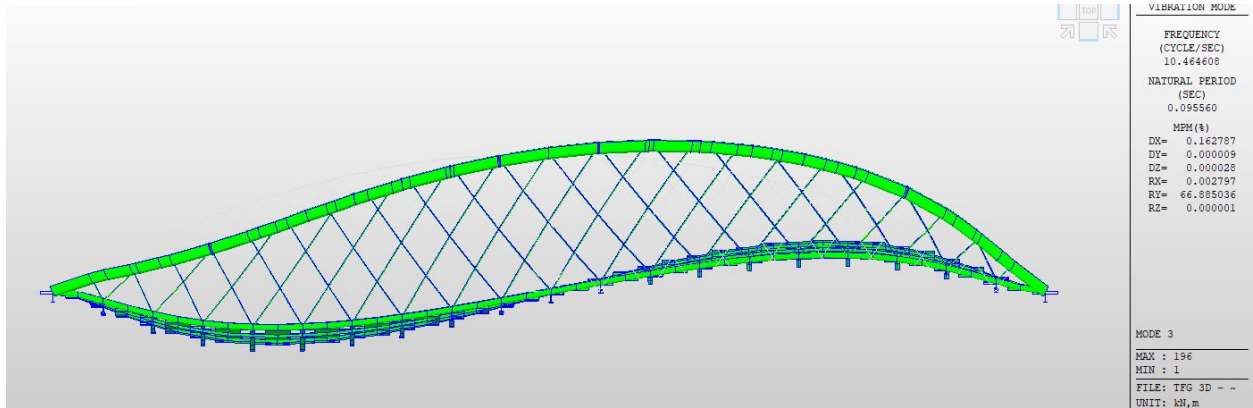


Figura 183 Modo 3 de vibración

3.4. Modelo 4

3.4.1 Modelo 4a

- Flecha: 12,76 centímetros

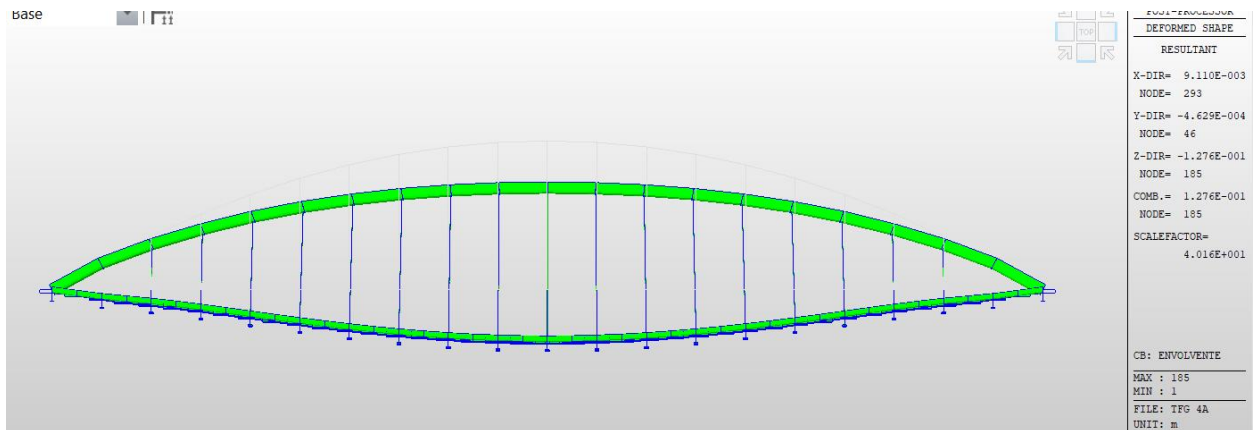


Figura 184 Flecha

- Modos de pandeo

- Modo 1: 3,609

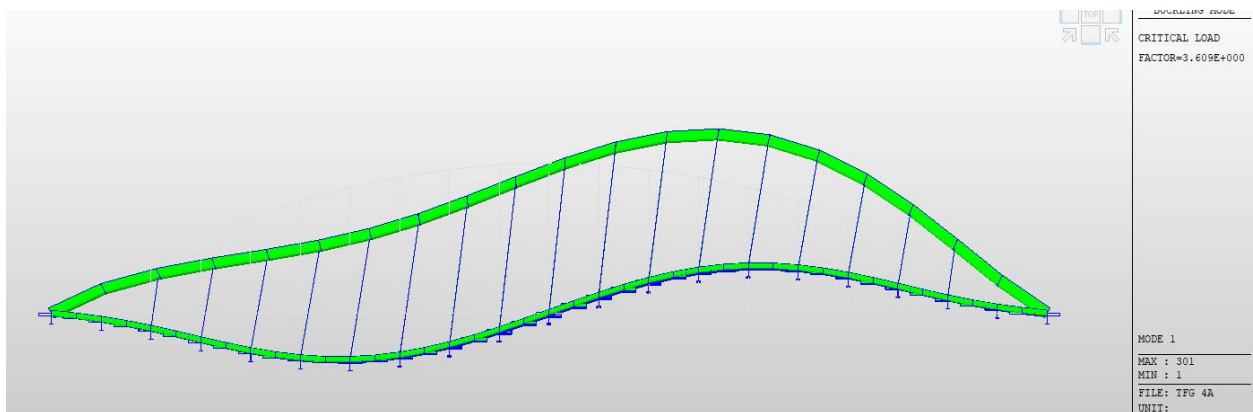


Figura 185 Modo 1 de pandeo

o Modo 2: 3,762

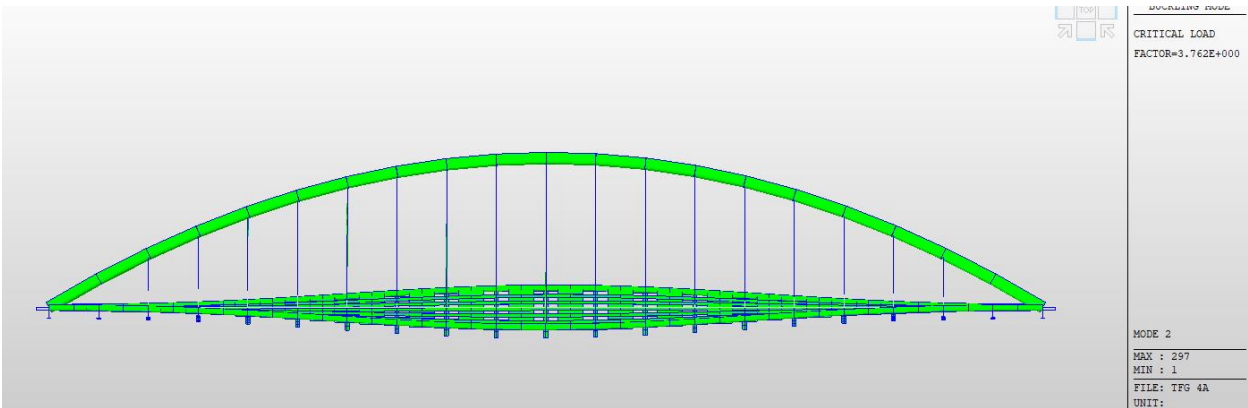


Figura 186 Modo 2 de pandeo

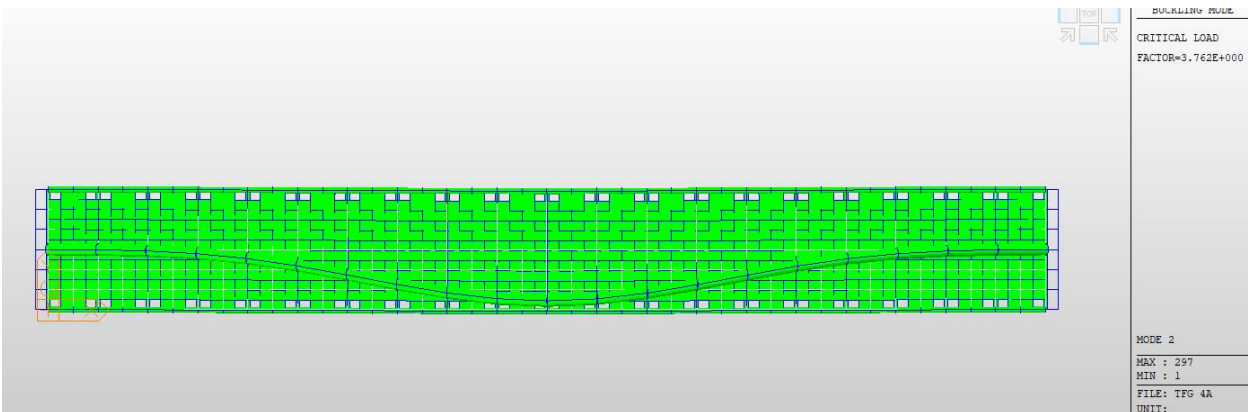


Figura 187 Modo 2 de pandeo II

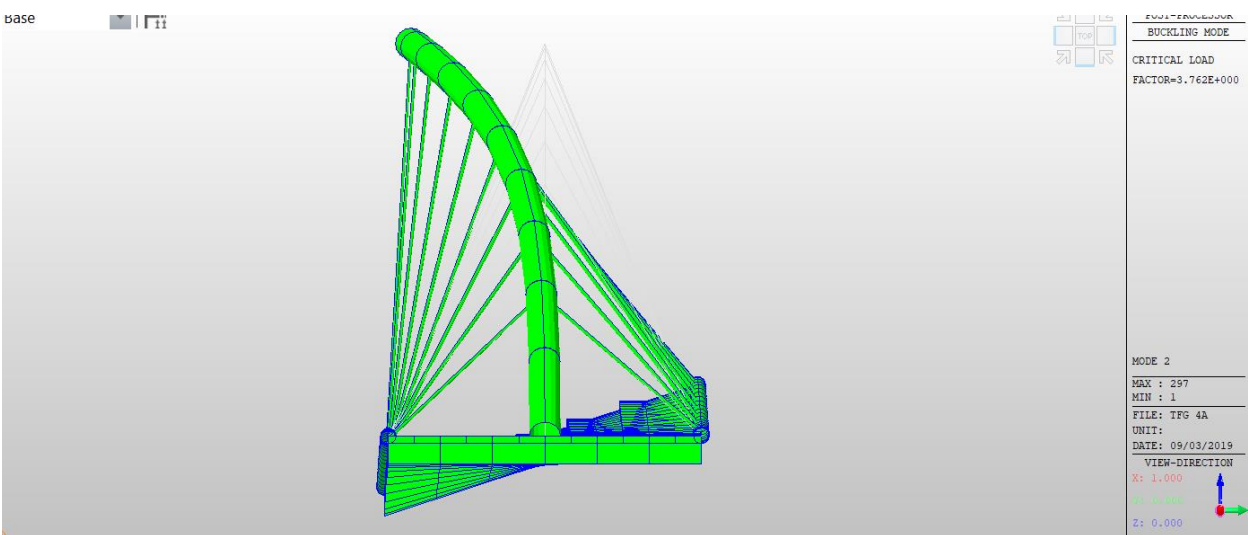


Figura 188 Modo 2 de pandeo III

o Modo 3: 4,083

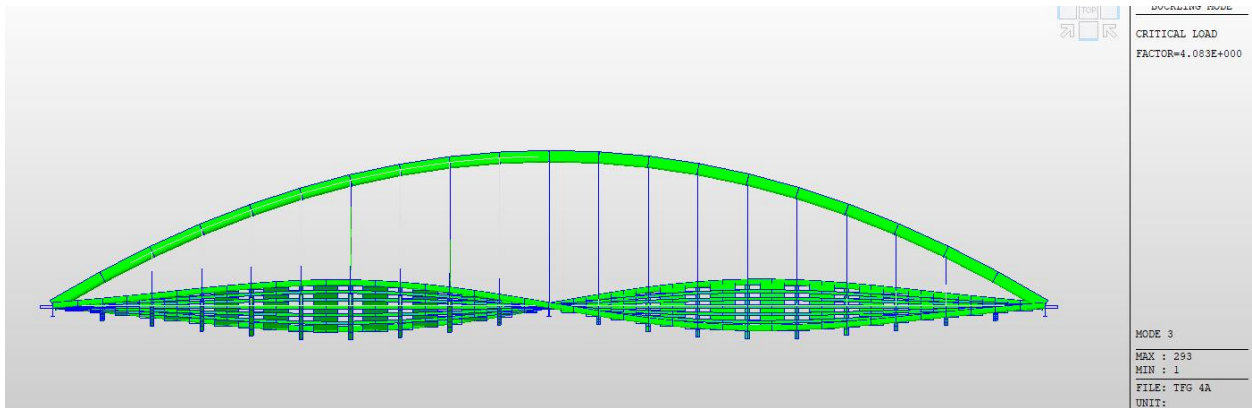


Figura 189 Modo 3 de pandeo

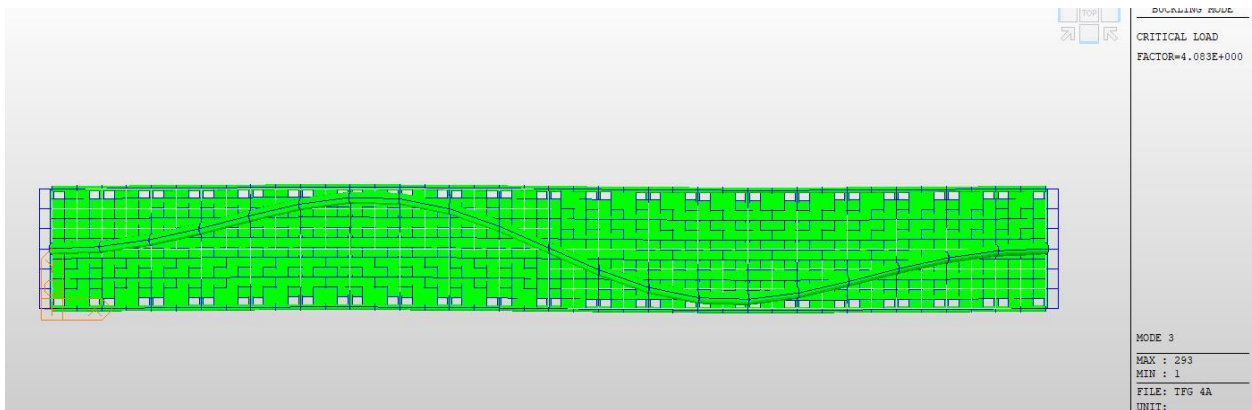


Figura 190 Modo 3 de pandeo II

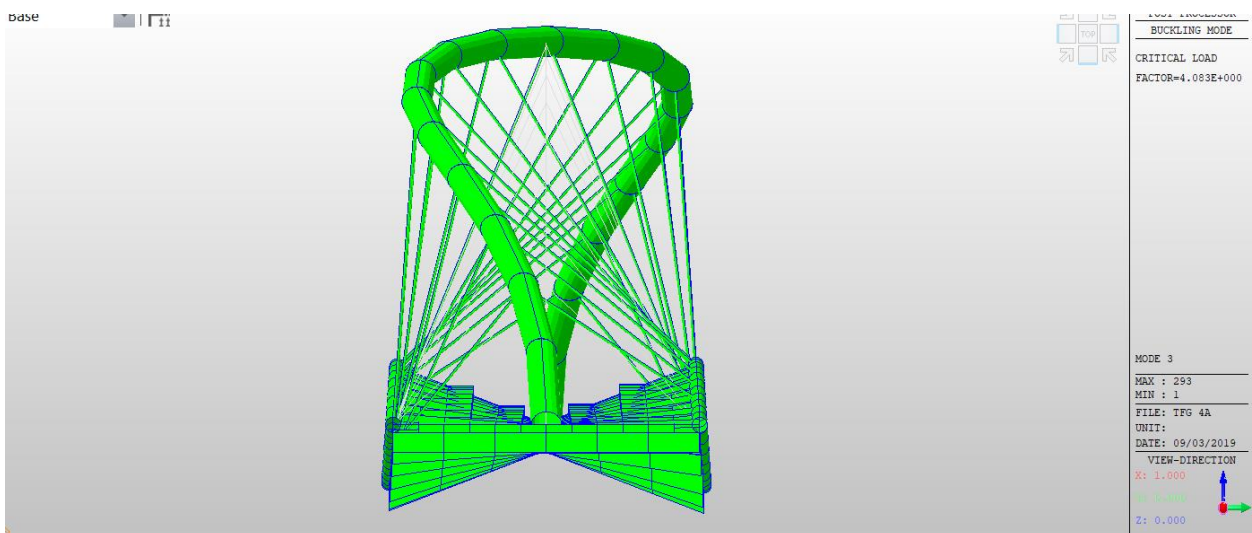


Figura 191 Modo 3 de pandeo III

- Modos de vibración: Frecuencias naturales

o Modo 1: (1,713 Hz)

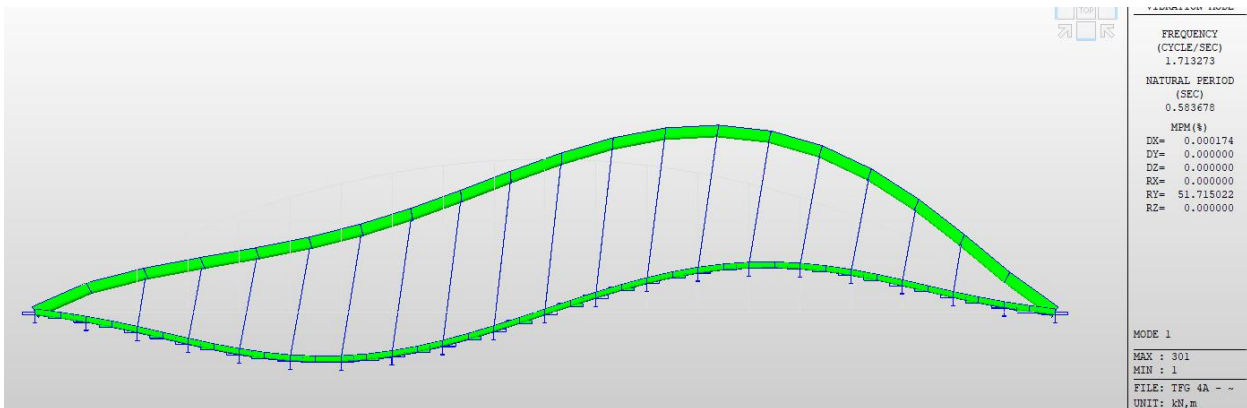


Figura 192 Modo 1 de vibración

o Modo 2: (2,945 Hz)

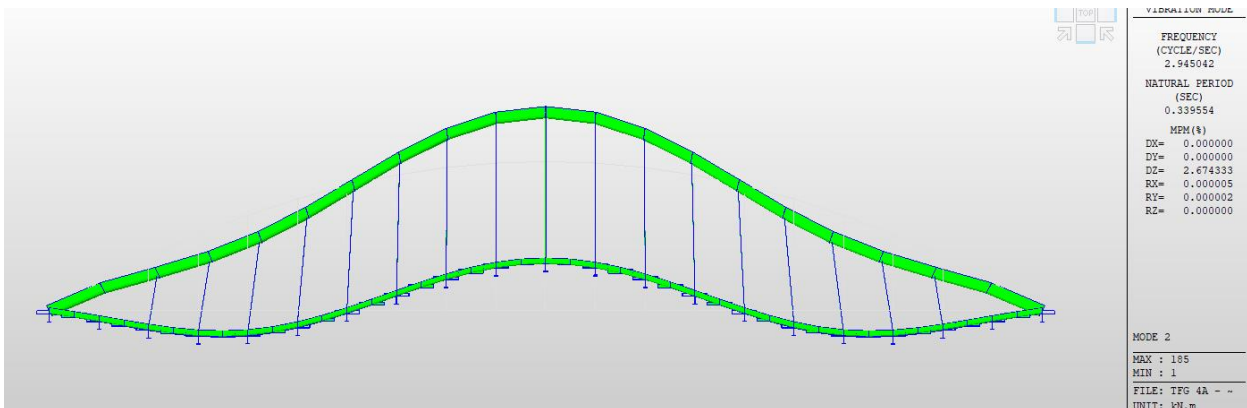


Figura 193 Modo 2 de vibración

o Modo 3: (3,168 Hz)

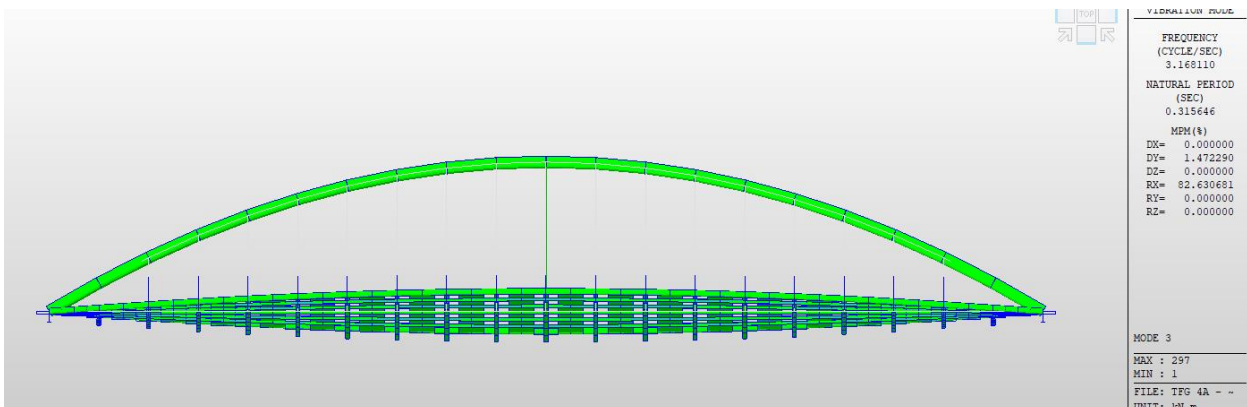


Figura 194 Modo 3 de vibración

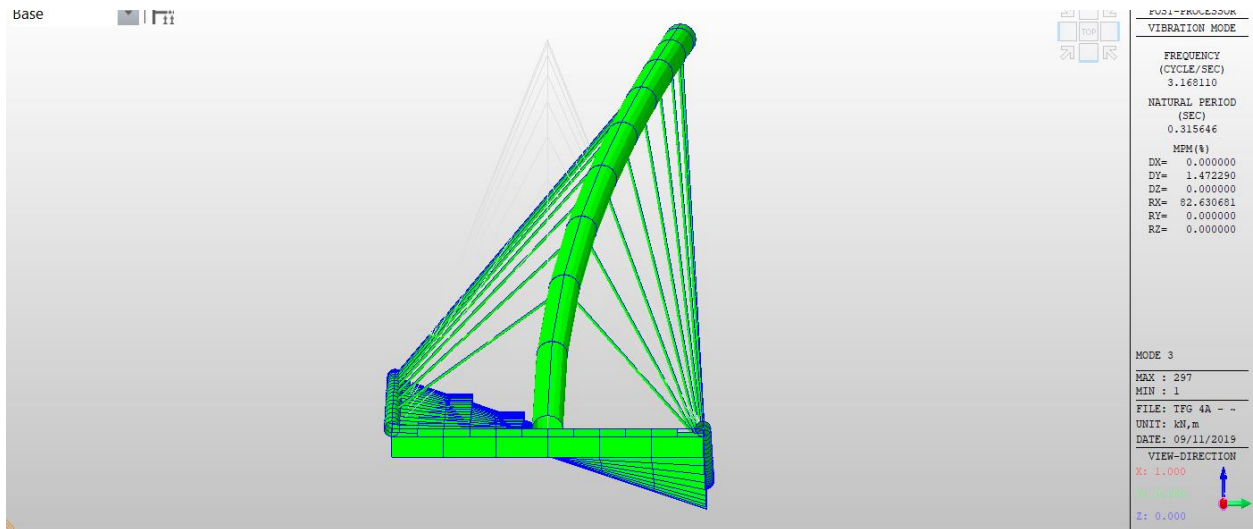


Figura 195 Modo 3 de vibración II

3.4.2 Modelo 4b

- Flecha: 51,01 centímetros

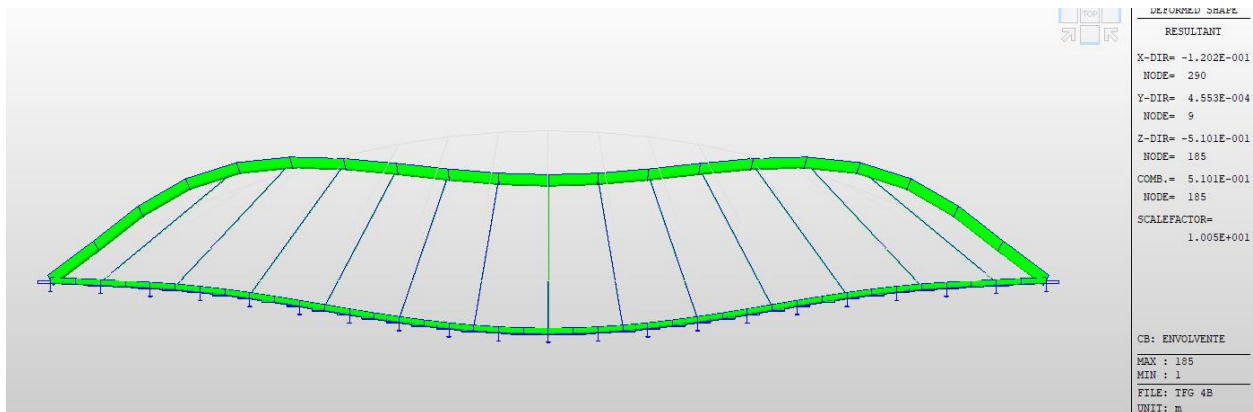


Figura 196 Flecha

- Modos de pandeo

- o Modo 1: 2,537

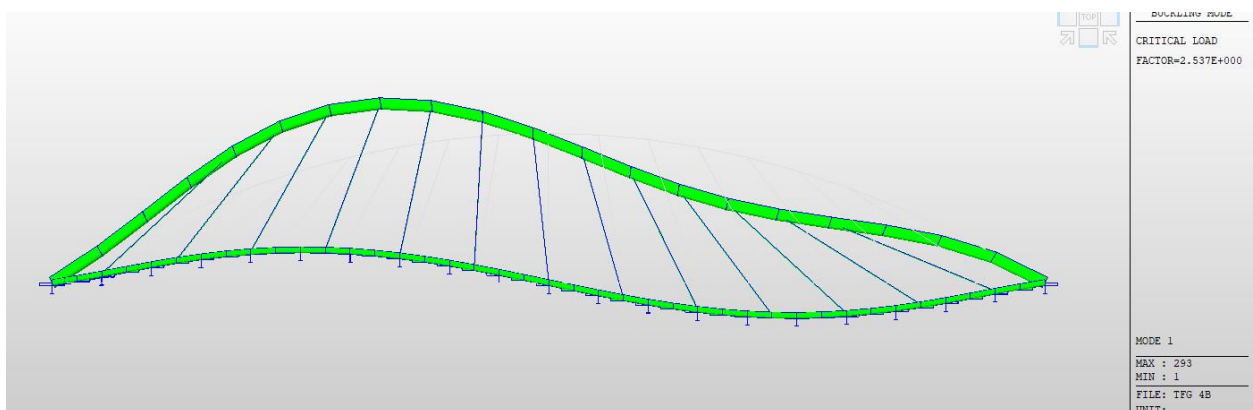


Figura 197 Modo 1 de pandeo

o Modo 2: 2,870

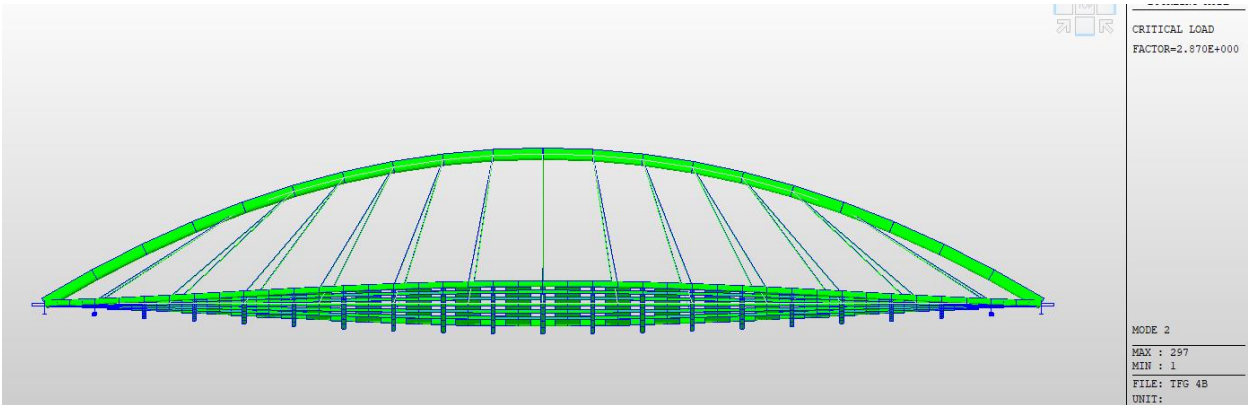


Figura 198 Modo 2 de pandeo

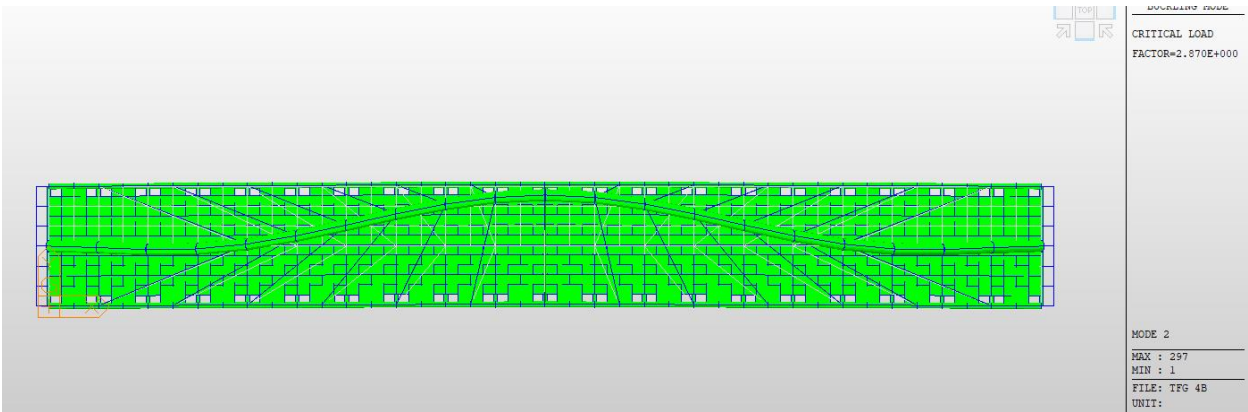


Figura 199 Modo 2 de pandeo II

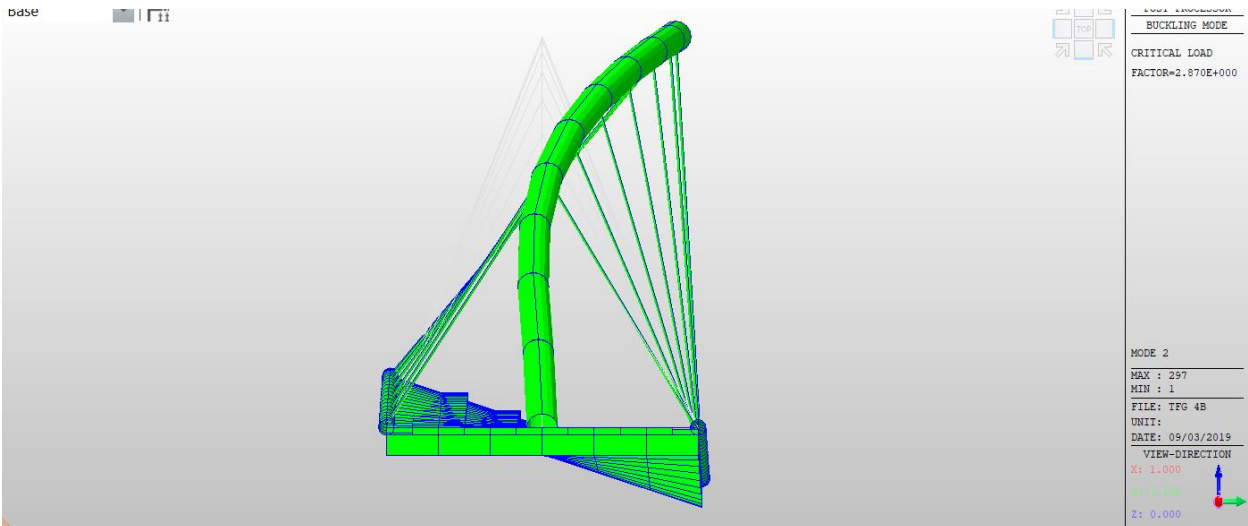


Figura 200 Modo 2 de pandeo III

- Modo 3: 3,279

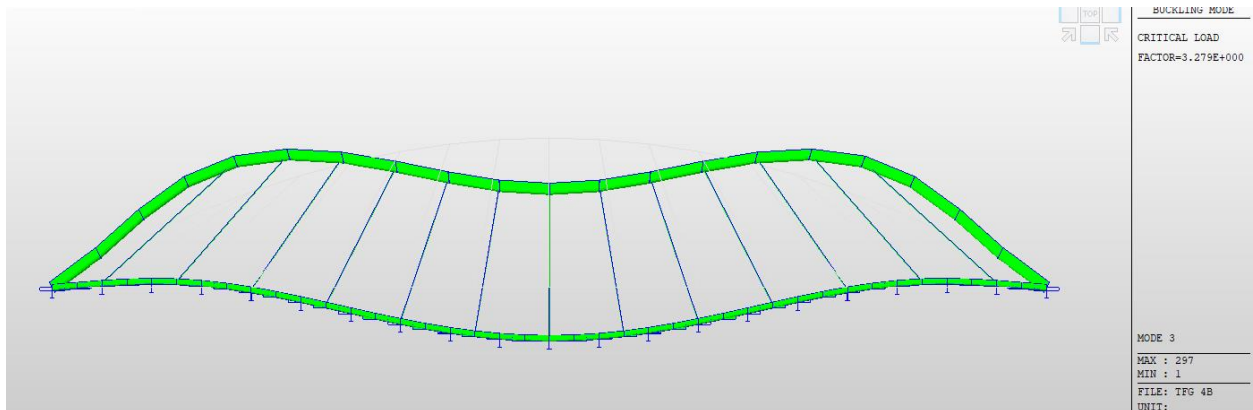


Figura 201 Modo 3 de pandeo

- Modos de vibración: Frecuencias naturales

- Modo 1: (2,033 Hz)

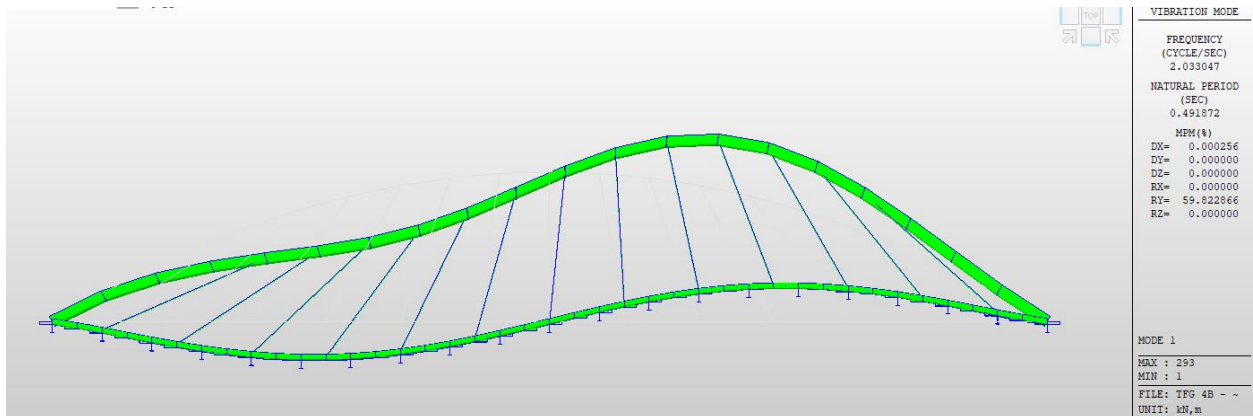


Figura 202 Modo 1 de vibración

- Modo 2: (2,264 Hz)

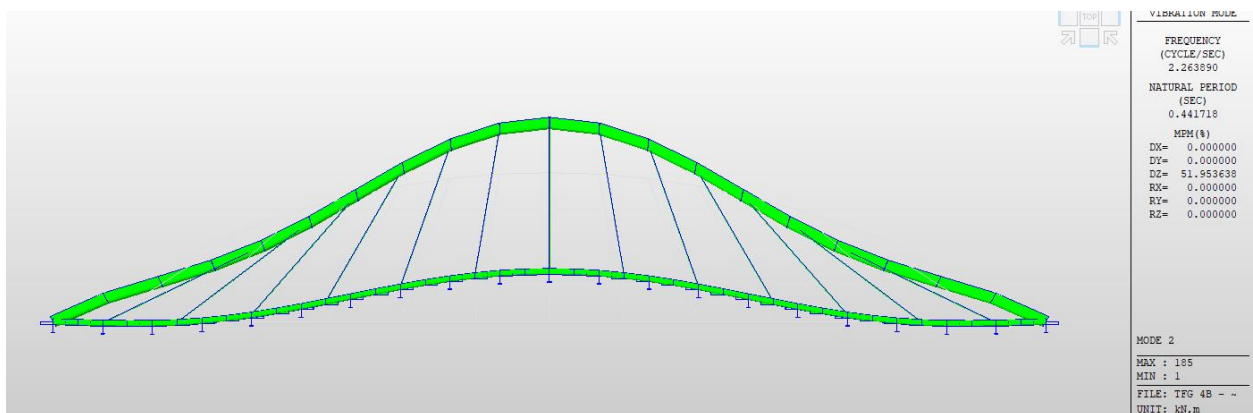


Figura 203 Modo 2 de vibración

o Modo 3: (3,630 Hz)

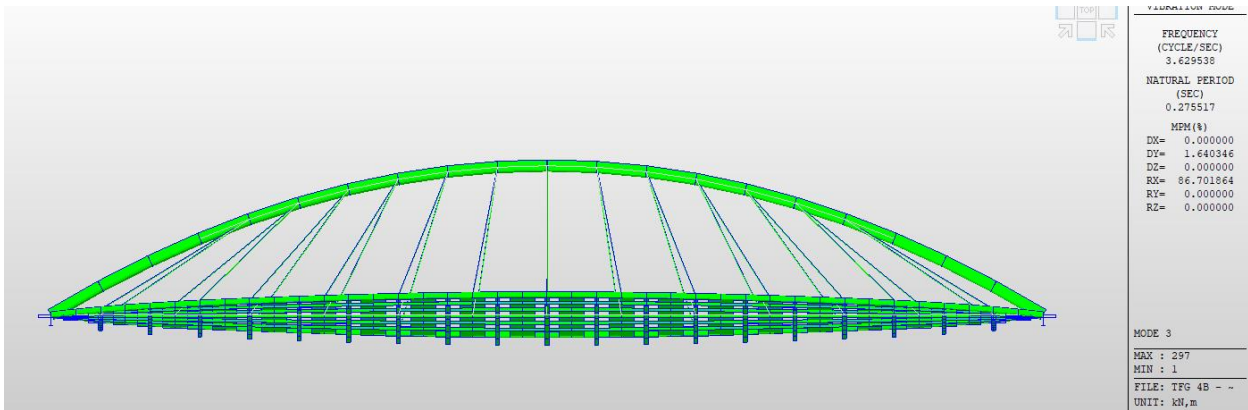


Figura 204 Modo 3 de vibración

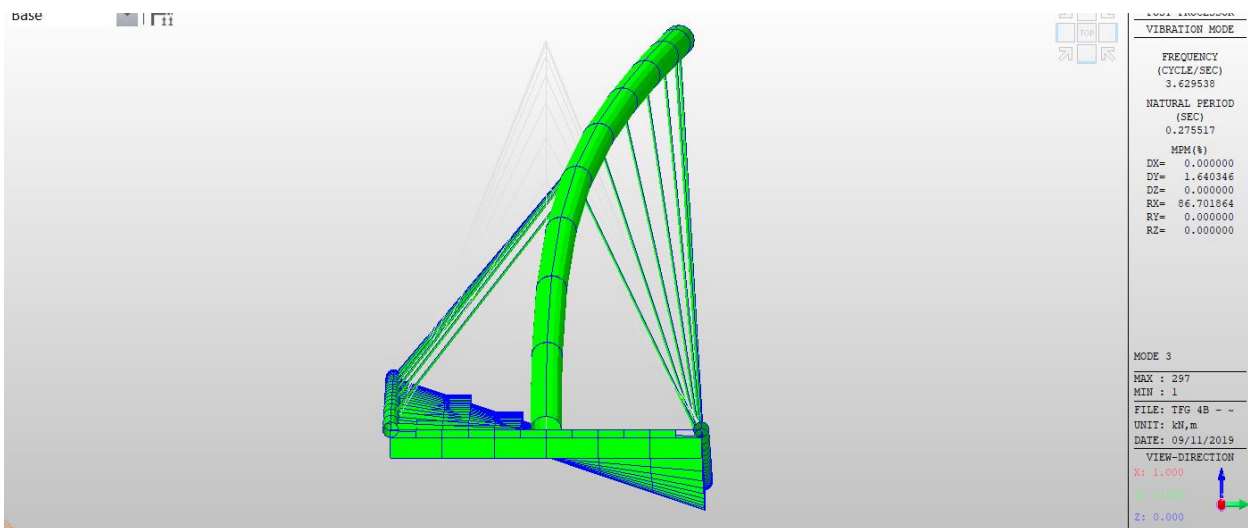


Figura 205 Modo 3 de vibración II

3.4.3 Modelo 4c

- Flecha: 10,65 centímetros

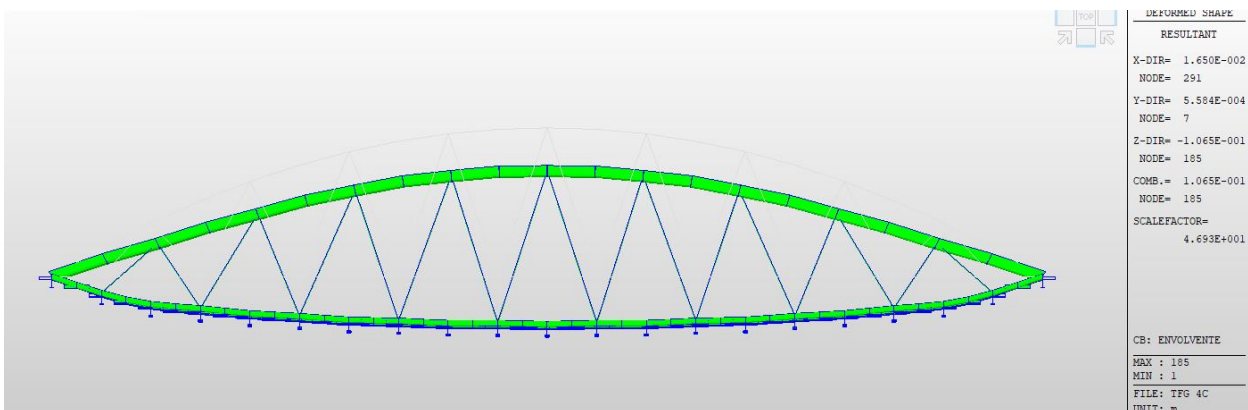


Figura 206 Flecha

- Modos de pandeo

- o Modo 1: 8,583

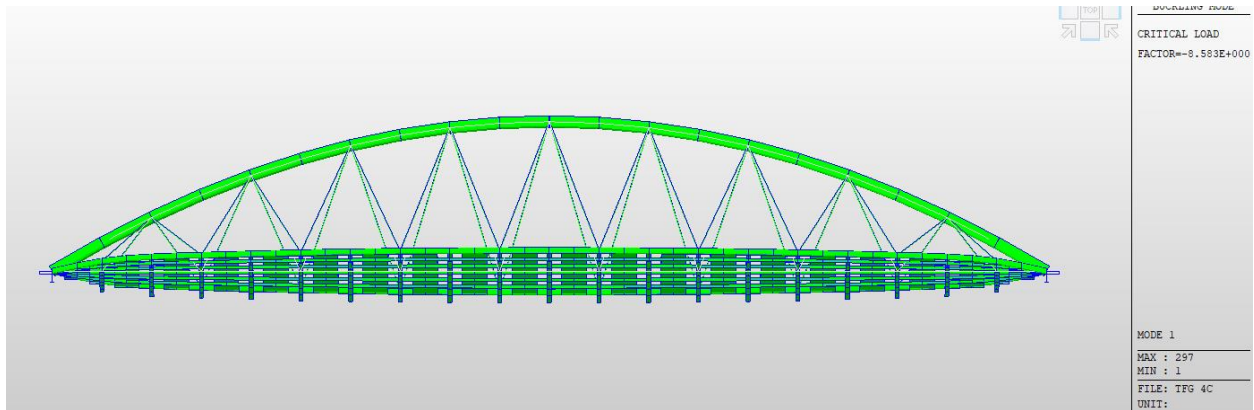


Figura 207 Modo 1 de pandeo

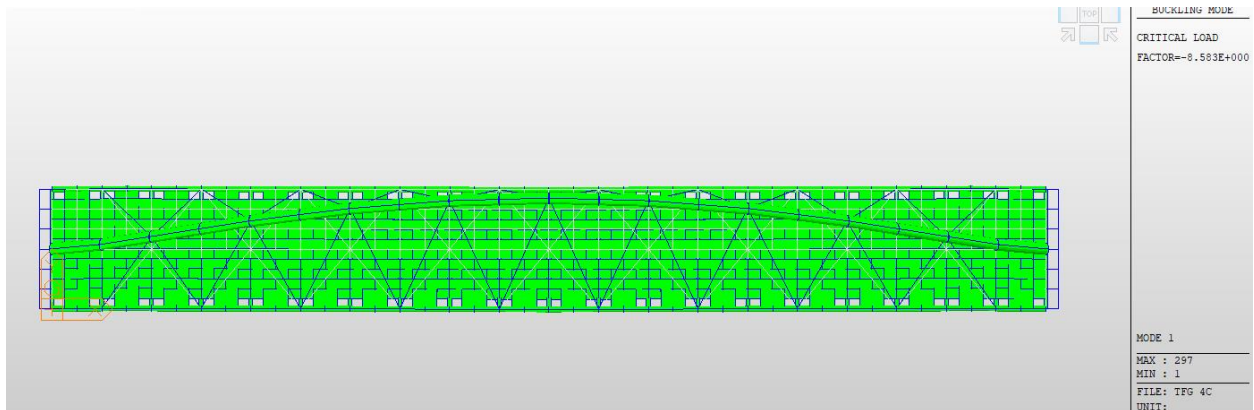


Figura 208 Modo 1 de pandeo II

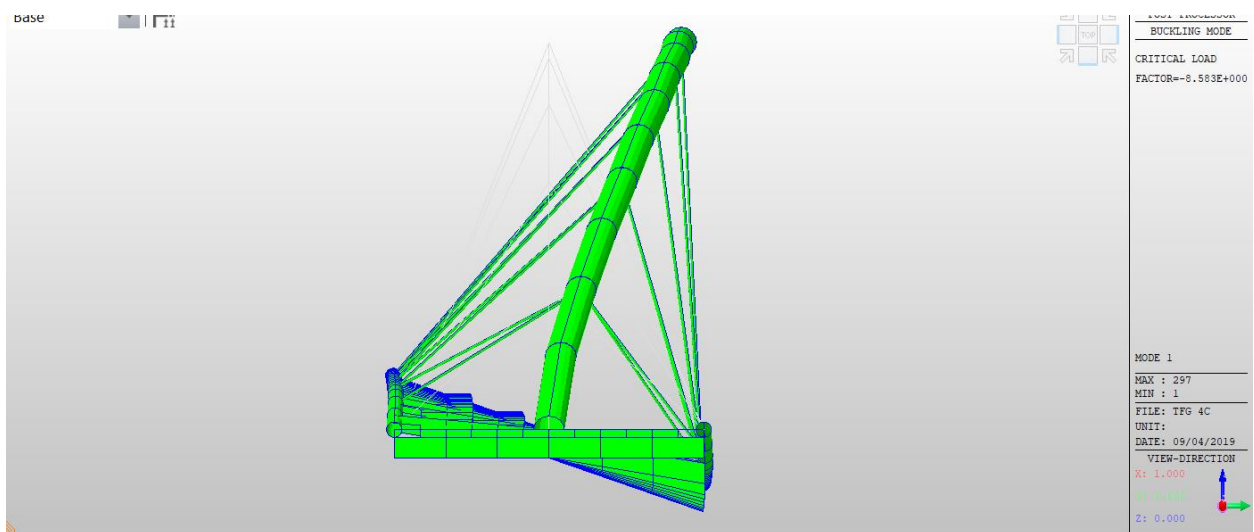


Figura 209 Modo 1 de pandeo III

o Modo 2: 12,64

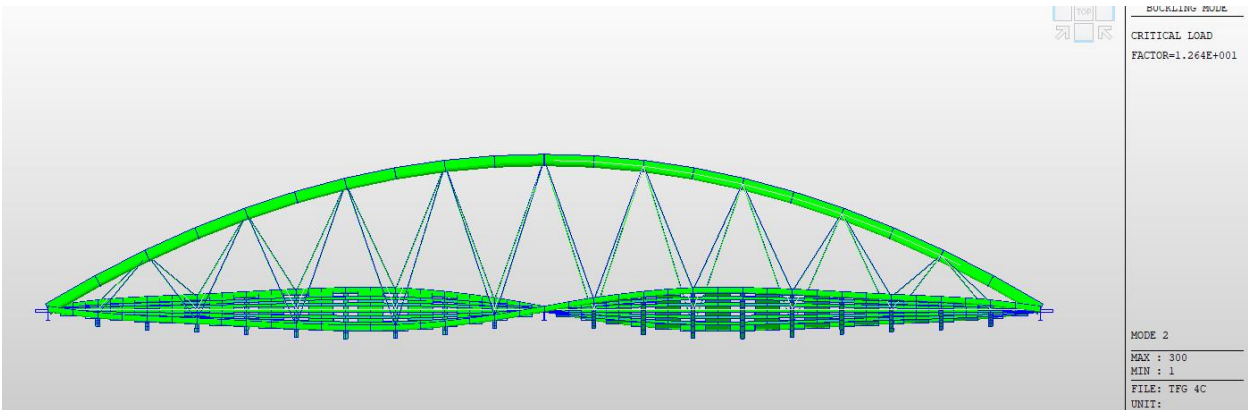


Figura 210 Modo 2 de pandeo

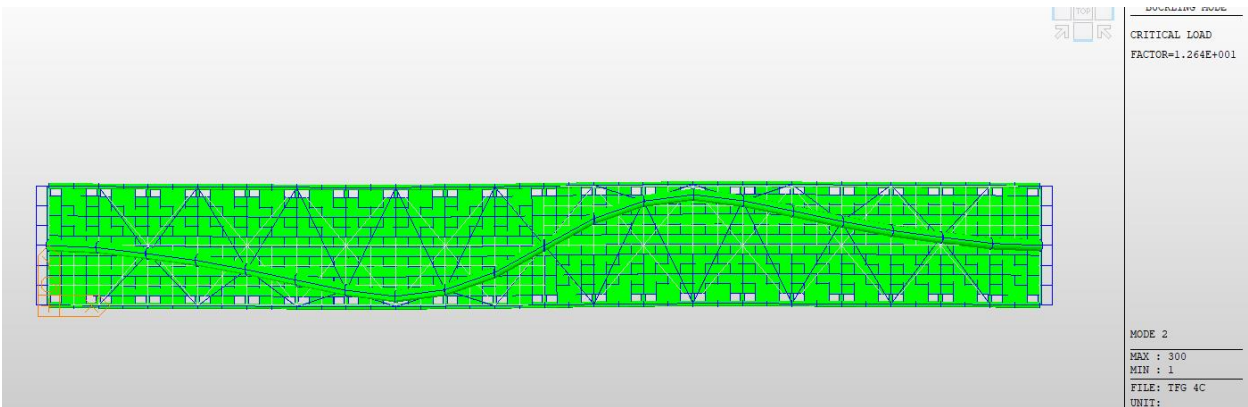


Figura 211 Modo 2 de pandeo II

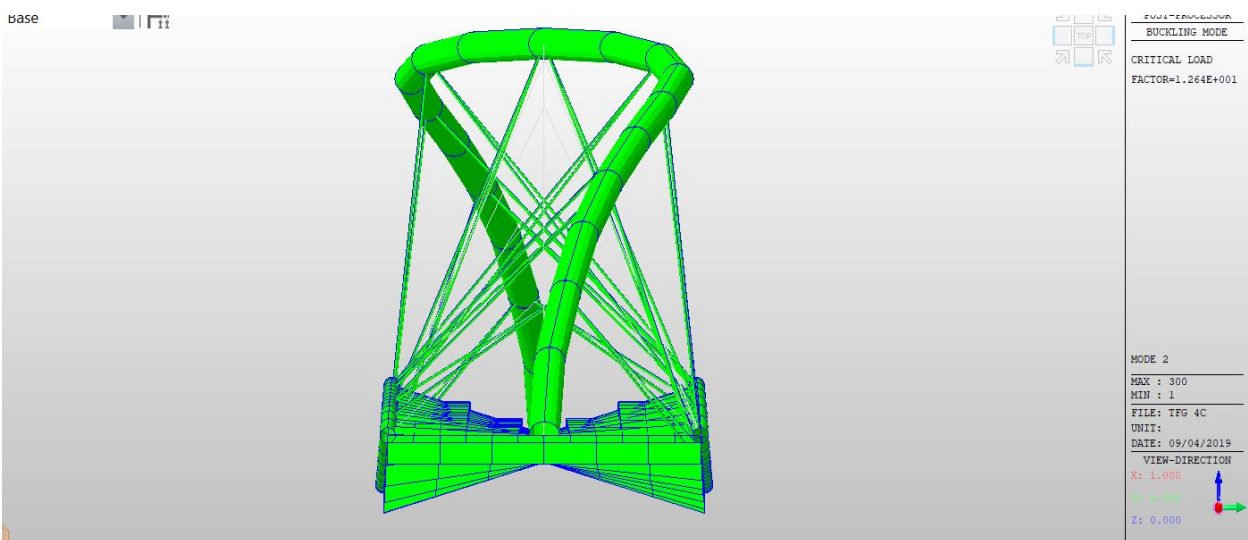


Figura 212 Modo 2 de pandeo III

o Modo 3: 12,94

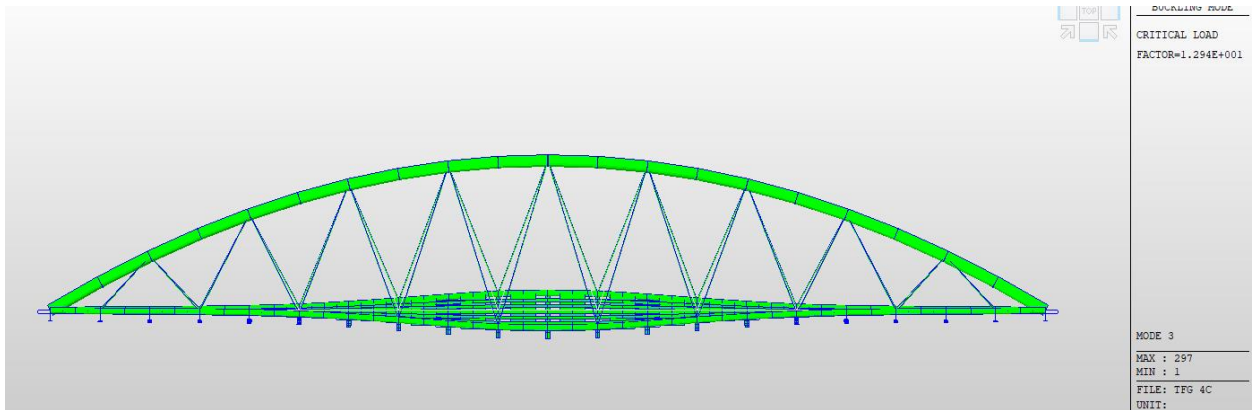


Figura 213 Modo 3 de pandeo

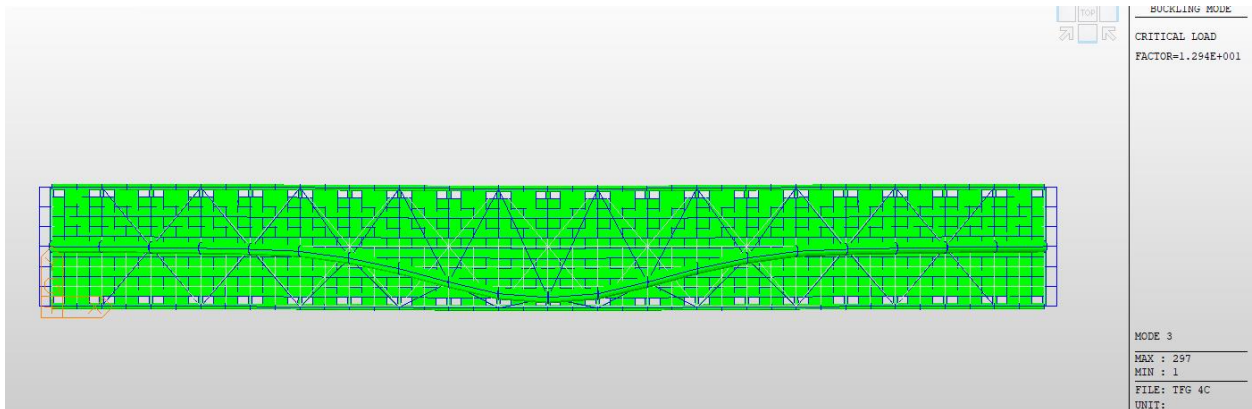


Figura 214 Modo 3 de pandeo II

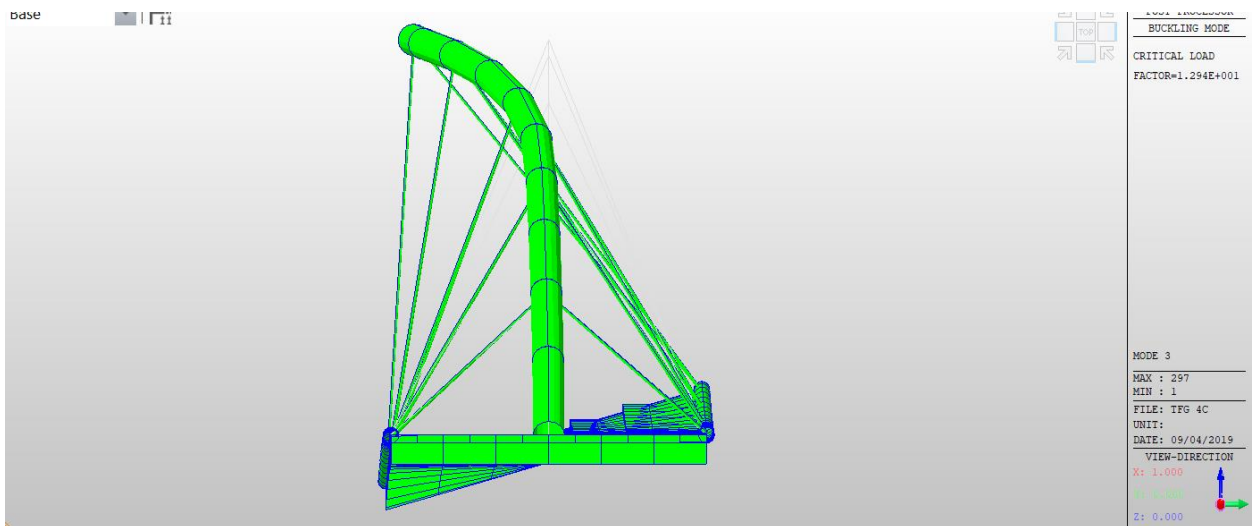


Figura 215 Modo 3 de pandeo III

- Modos de vibración: Frecuencias naturales

- o Modo 1: (4,927 Hz)

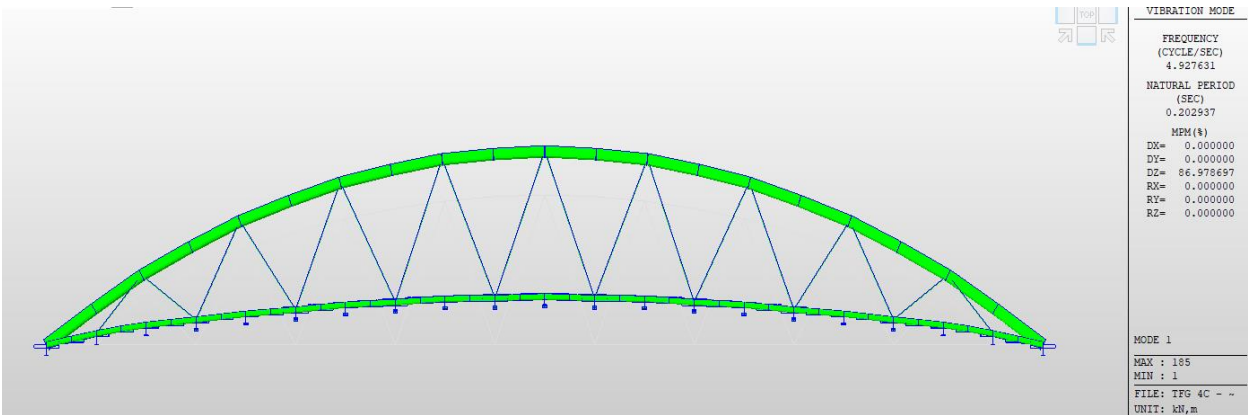


Figura 216 Modo 1 de vibración

- o Modo 2: (5,280 Hz)

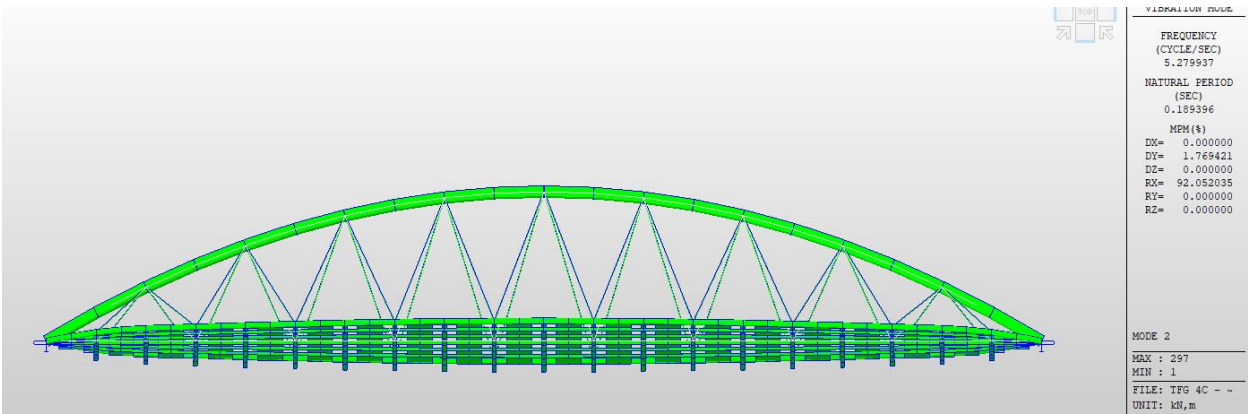


Figura 217 Modo 2 de vibración

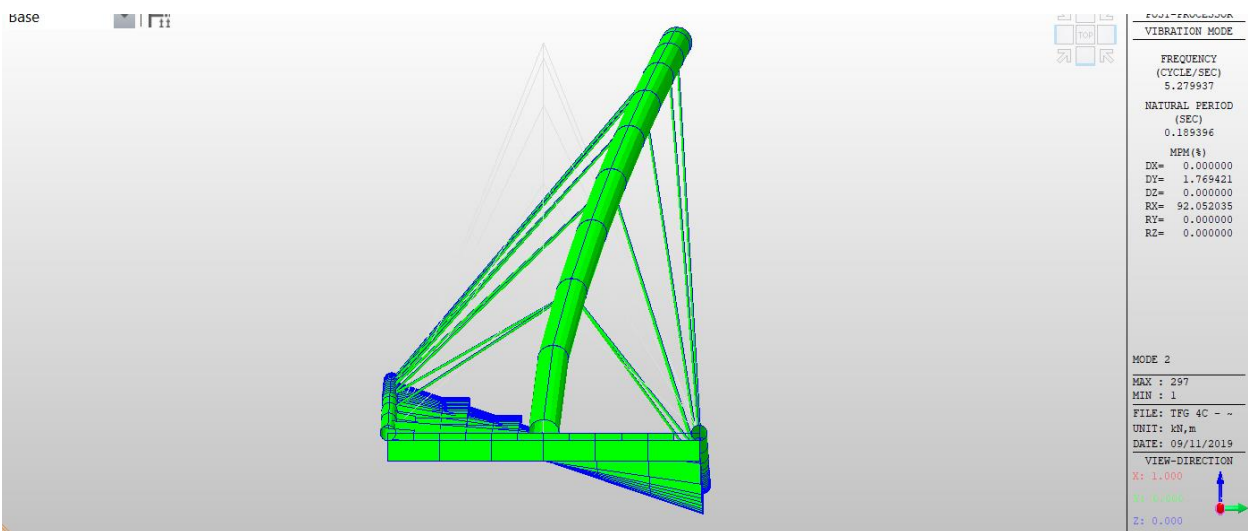


Figura 218 Modo 2 de vibración II

- Modo 3: (6,070 Hz)

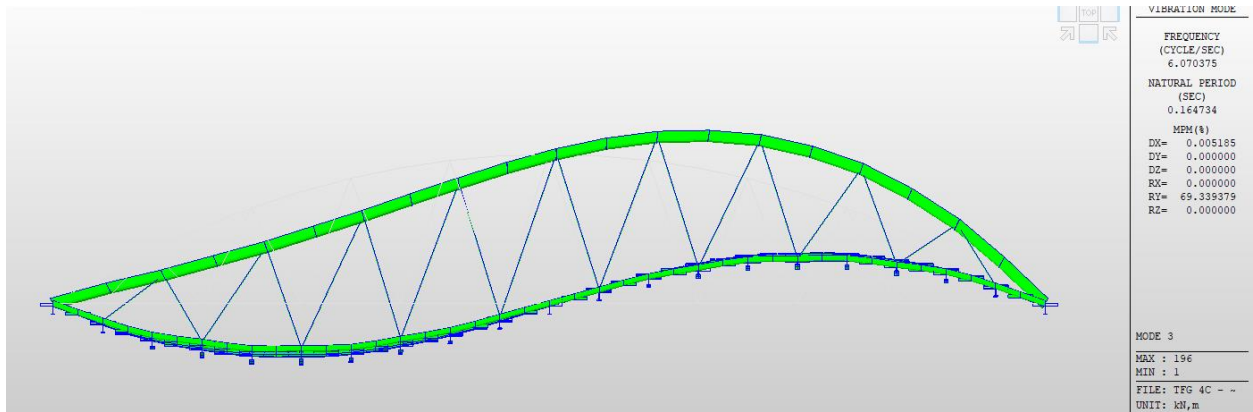


Figura 219 Modo 3 de vibración

3.4.4 Modelo 4d

- Flecha: 10,13 centímetros

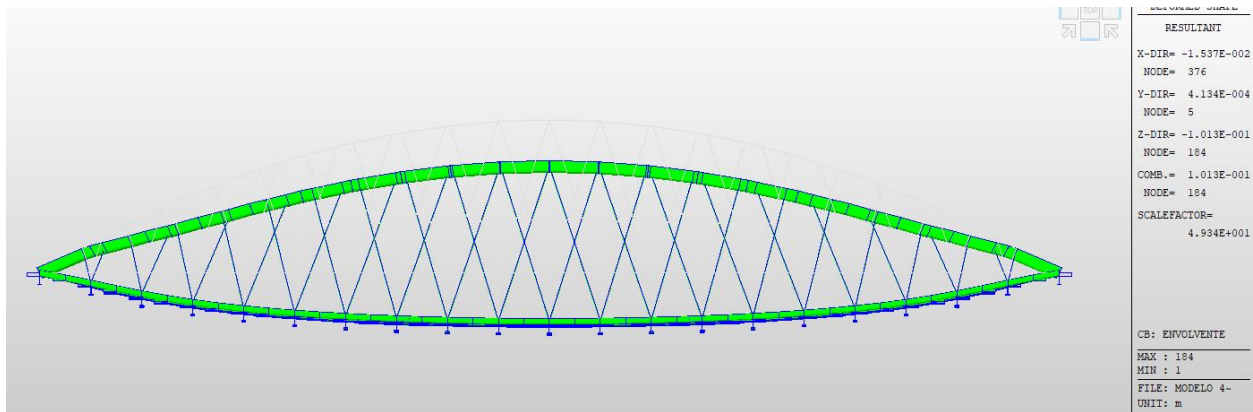


Figura 220 Flecha

- Modos de pandeo
 - Modo 1: 18,51

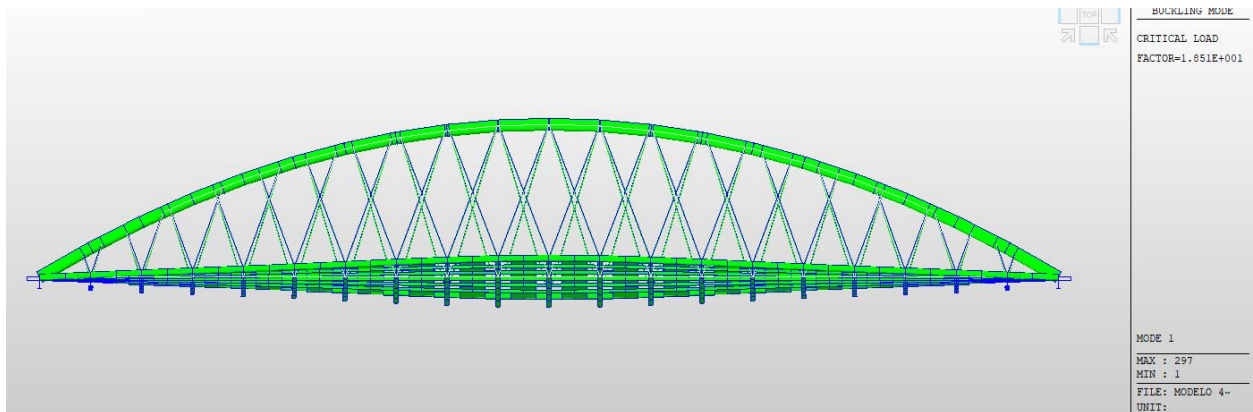


Figura 221 Modo 1 de pandeo

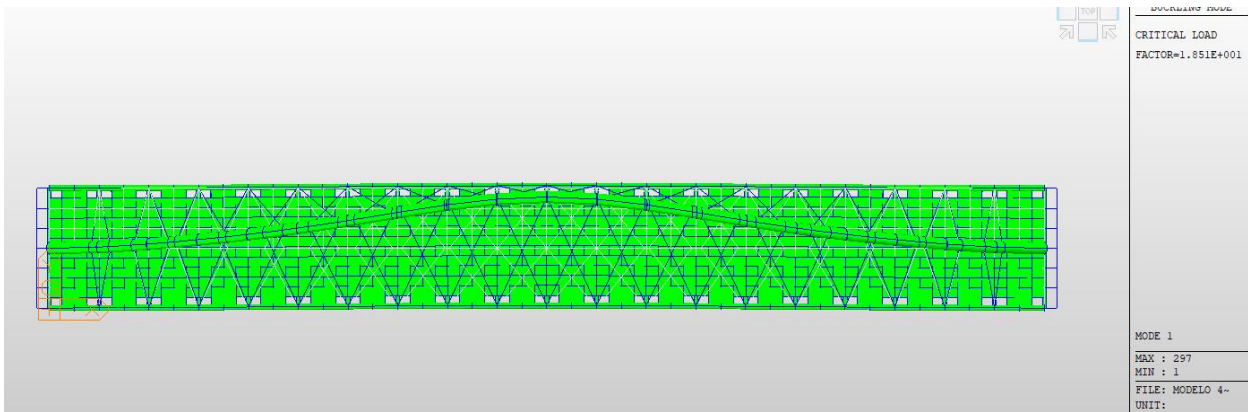


Figura 222 Modo 1 de pandeo II

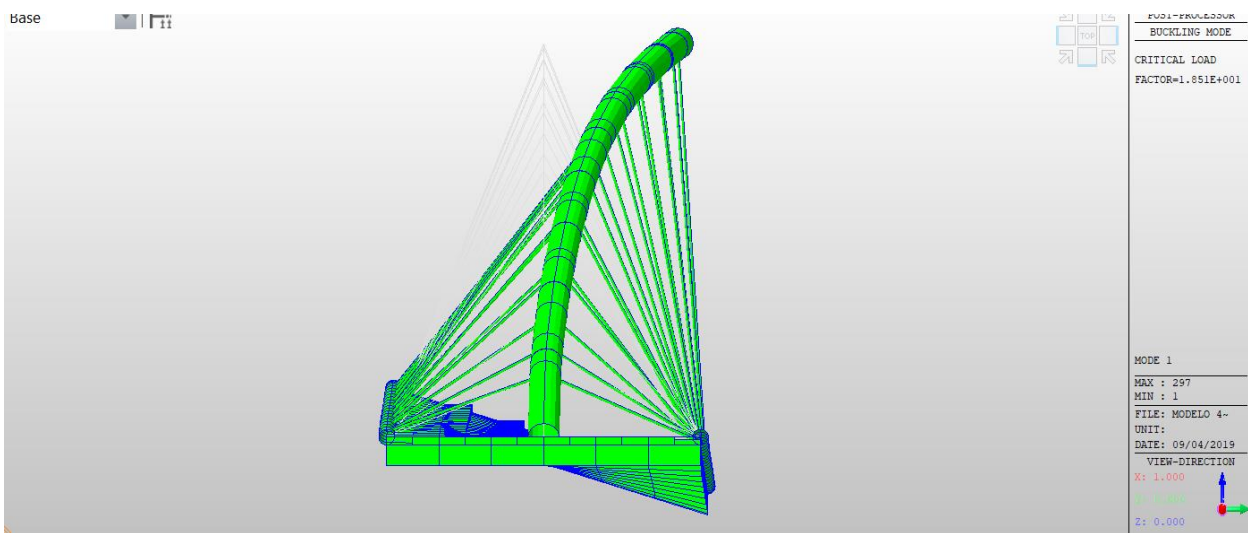


Figura 223 Modo 1 de pandeo III

- o Modo 2: 19,09



Figura 224 Modo 2 de pandeo

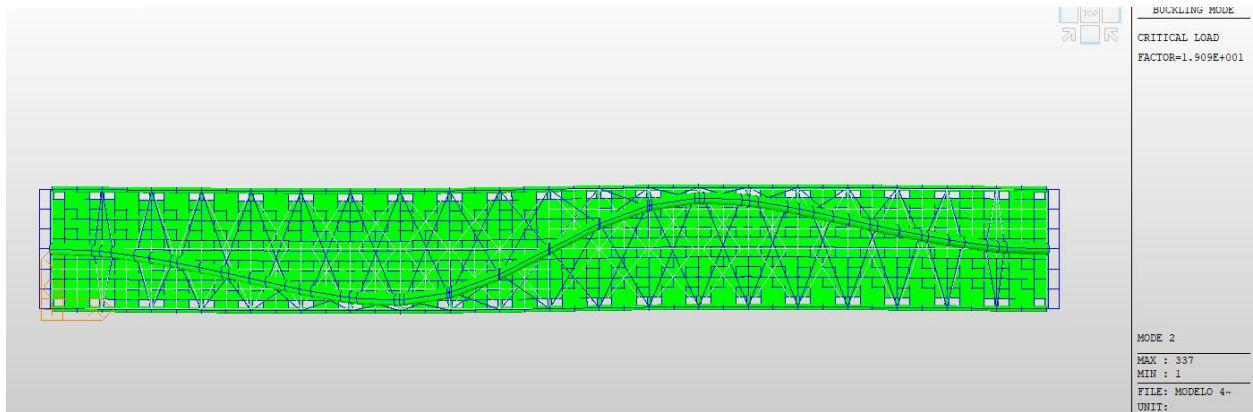


Figura 225 Modo 2 de pandeo II

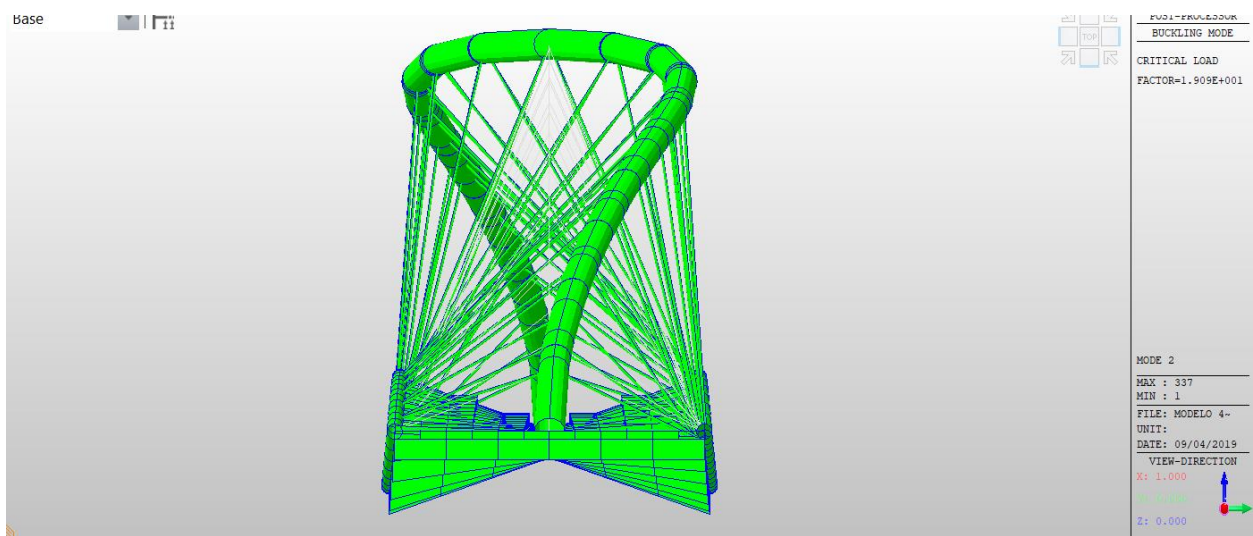


Figura 226 Modo 2 de pandeo III

- o Modo 3: 21,89

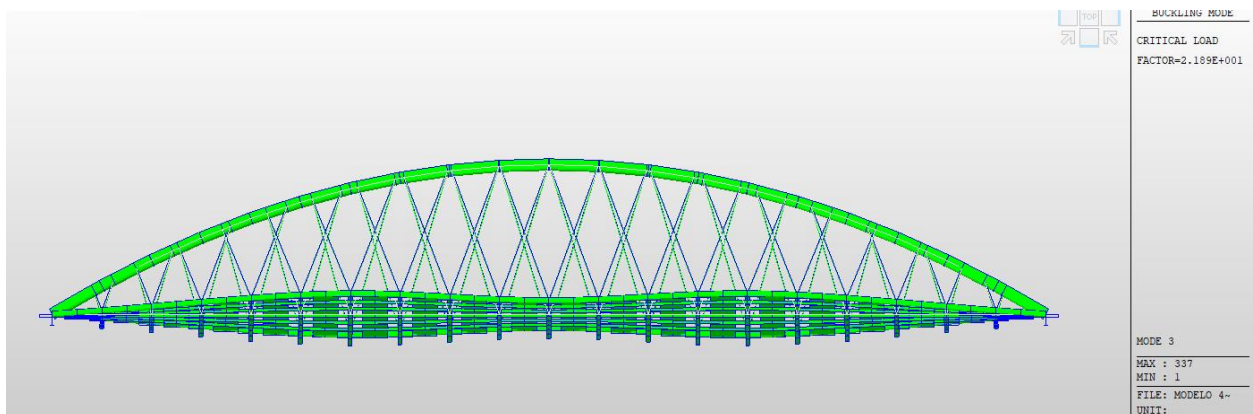


Figura 227 Modo 3 de pandeo

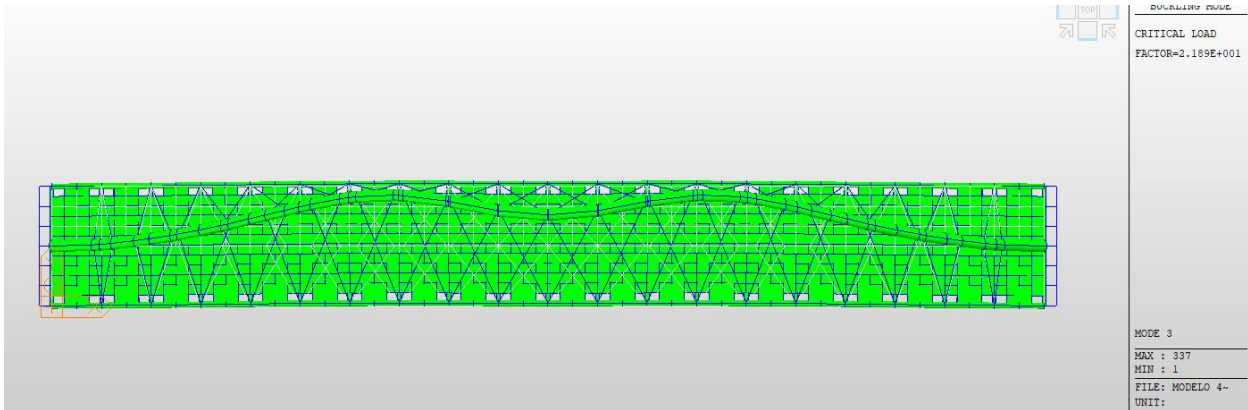


Figura 228 Modo 3 de pandeo II

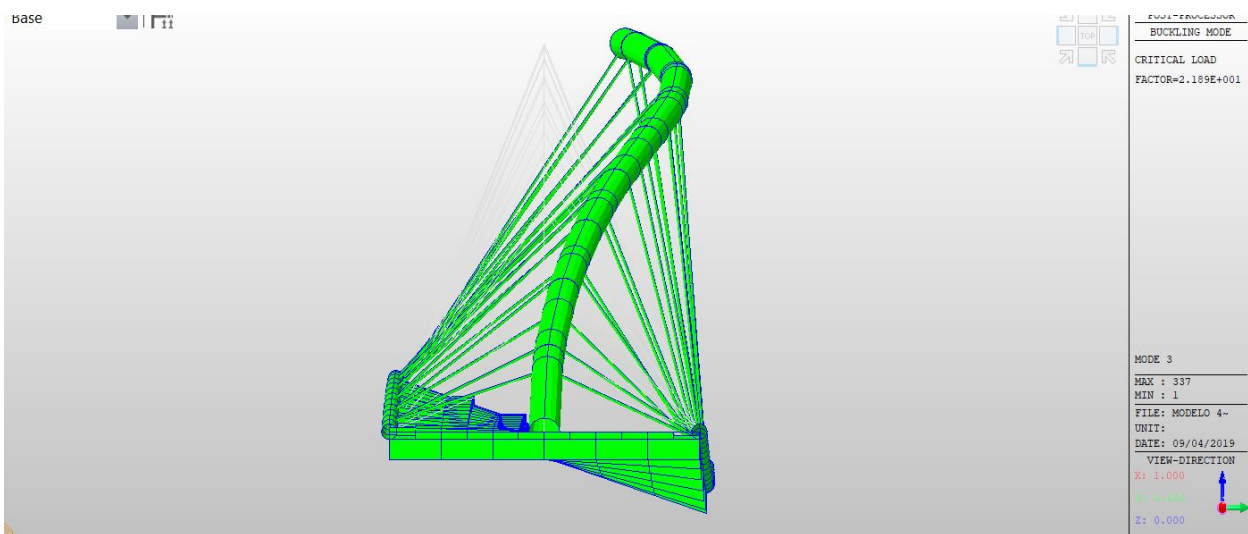


Figura 229 Modo 3 de pandeo III

- Modos de vibración: Frecuencias naturales
 - o Modo 1: (4,763 Hz)

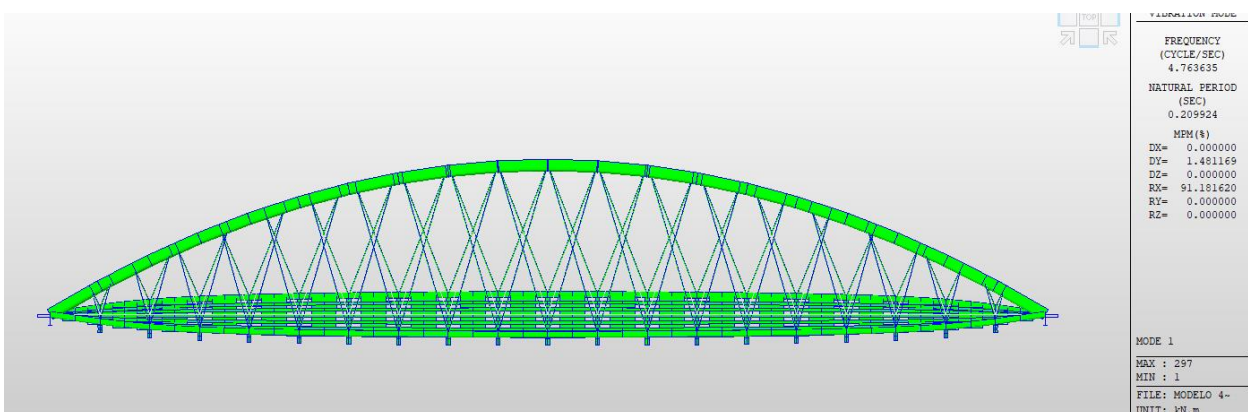


Figura 230 Modo 1 de vibración

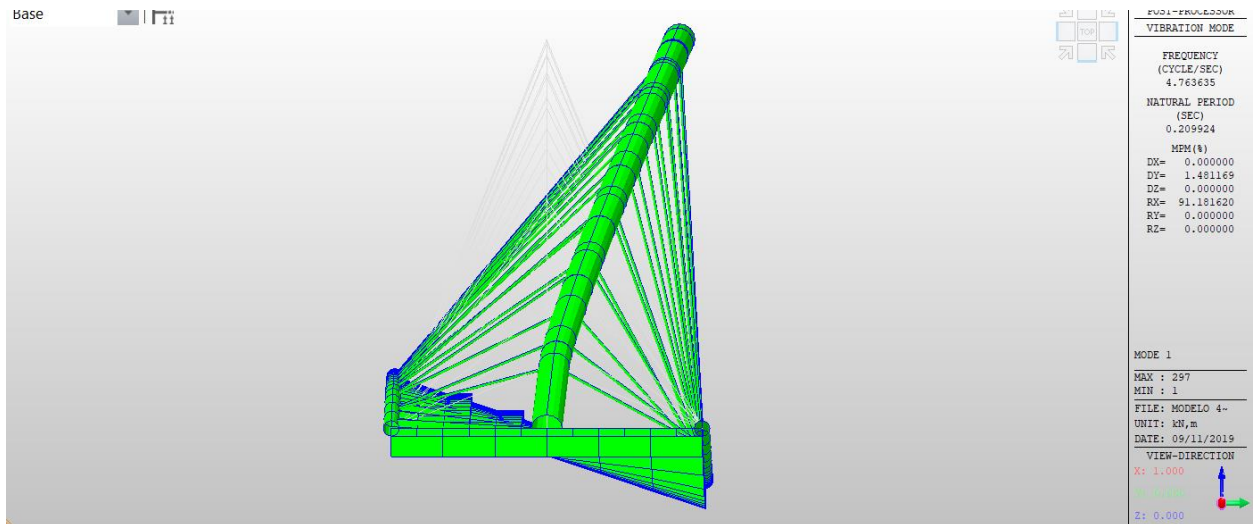


Figura 231 Modo 1 de vibración II

- Modo 2: (5,118 Hz)

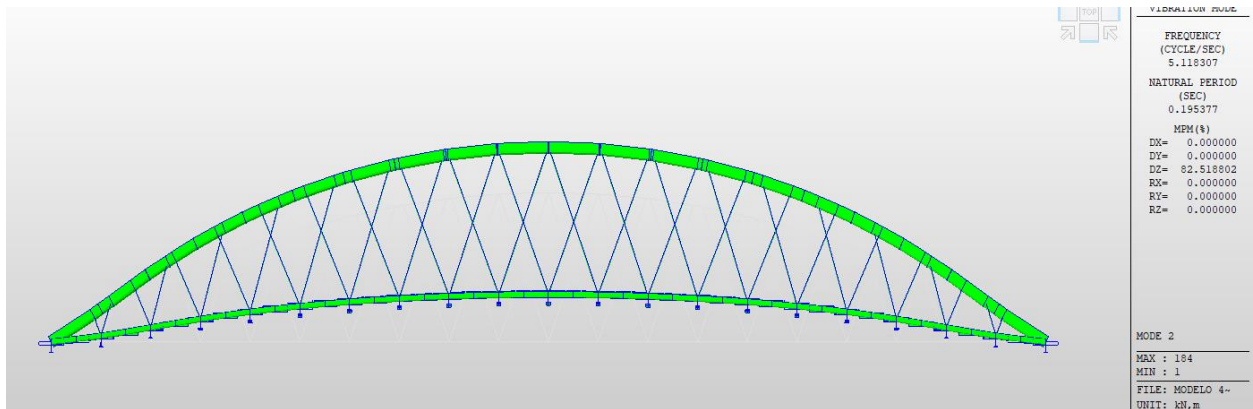


Figura 232 Modo 2 de vibración

- Modo 3: (7,580 Hz)

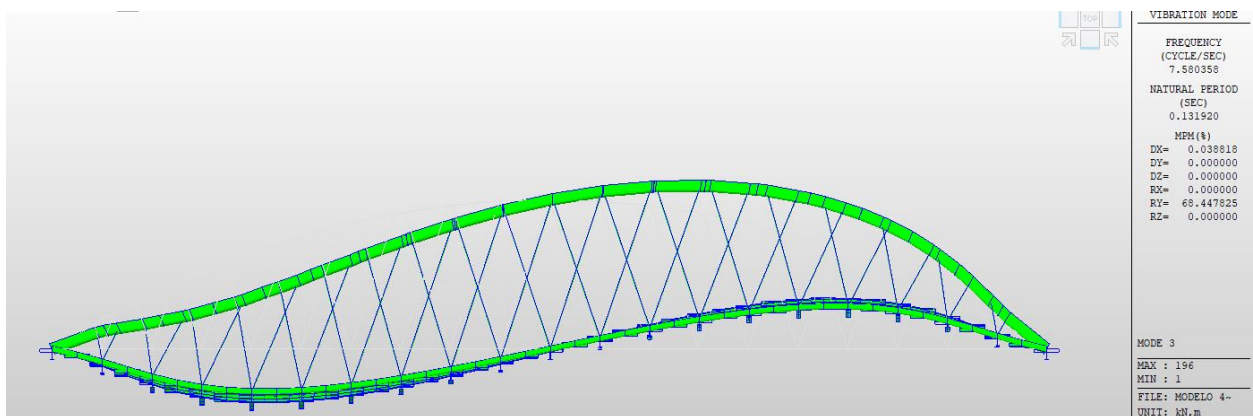


Figura 233 Modo 3 de vibración

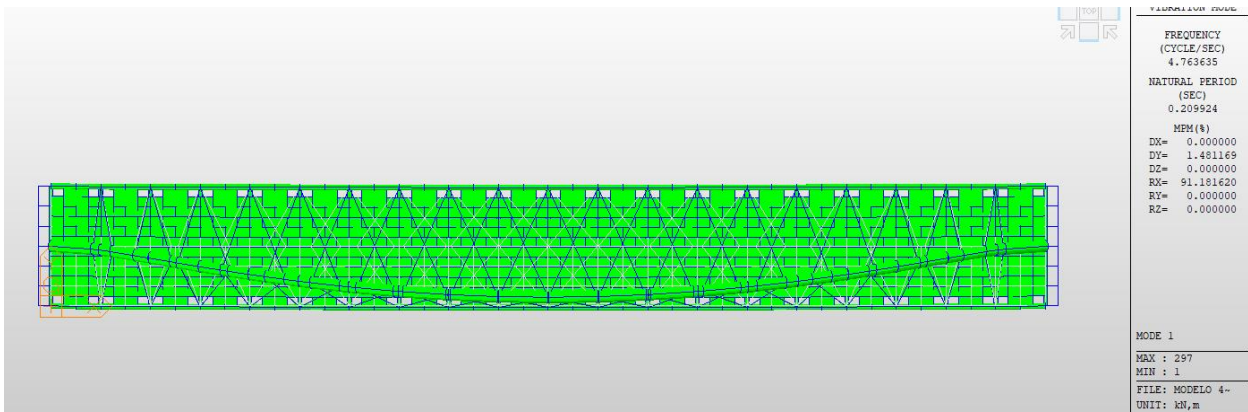


Figura 234 Modo 1 de vibración II

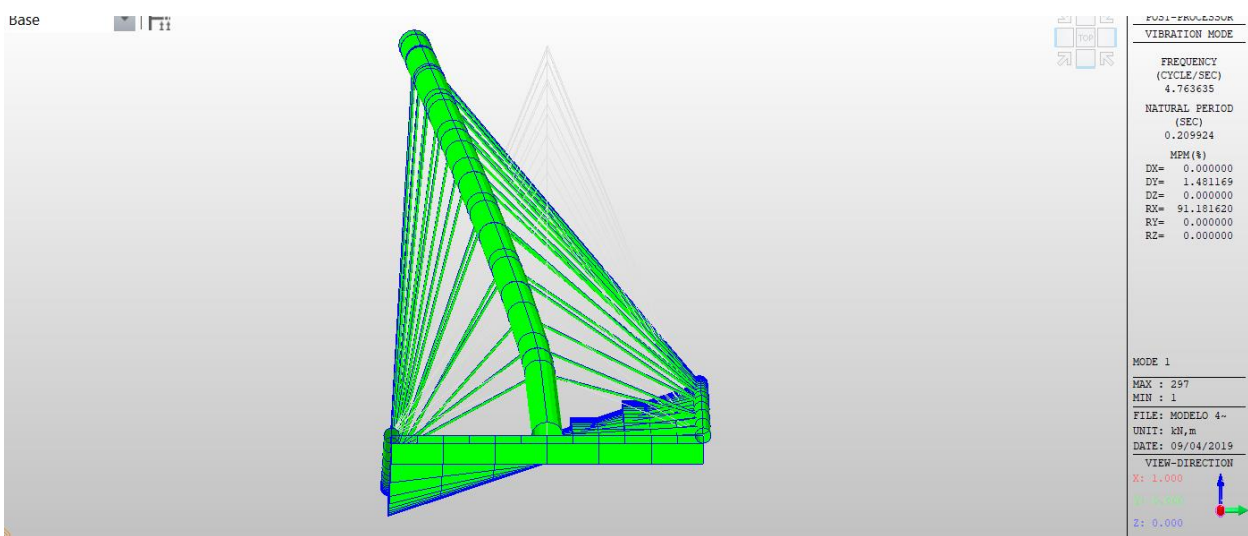


Figura 235 Modo 1 de vibración III

3.5. Modelo 5

3.5.1 Modelo 5a

- Flecha 9,312 centímetros

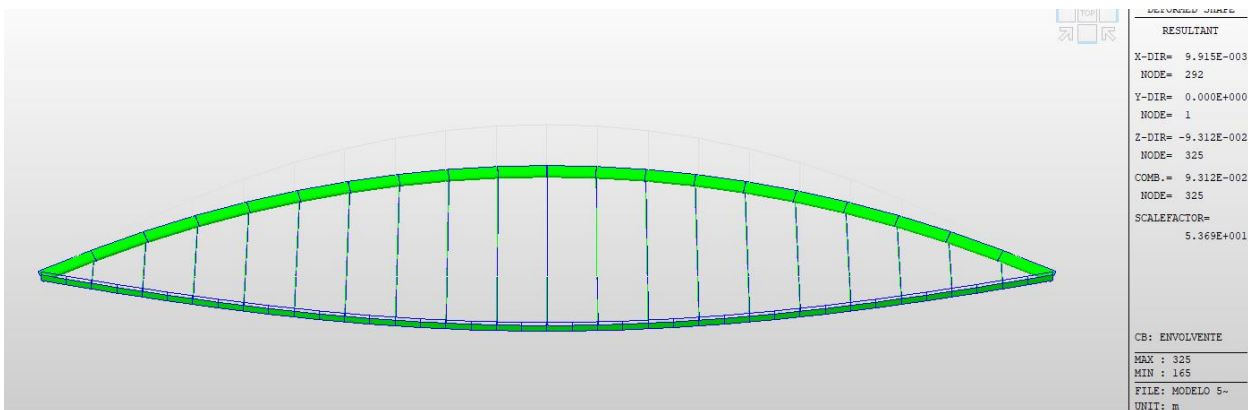


Figura 236 Flecha

- Modos de pandeo
 - o Modo 1: 2,594

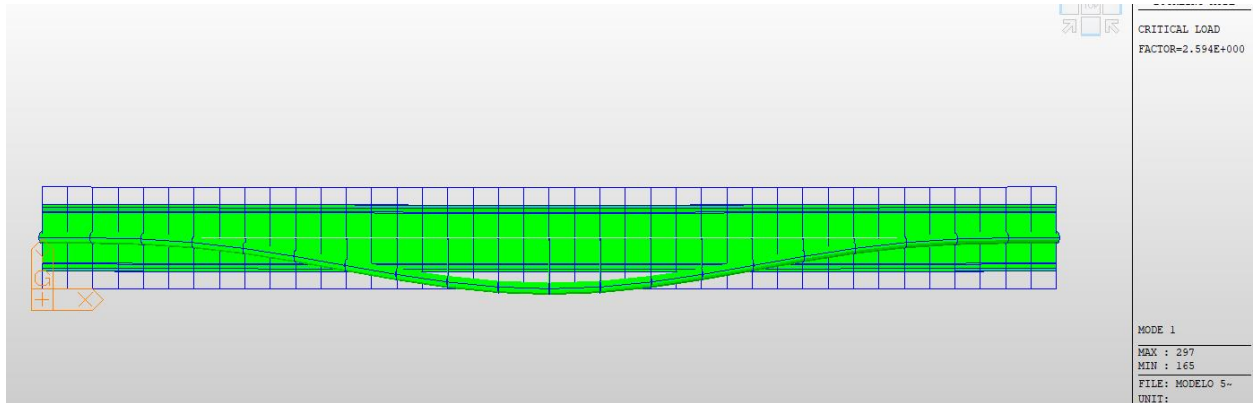


Figura 237 Modo 1 de pandeo

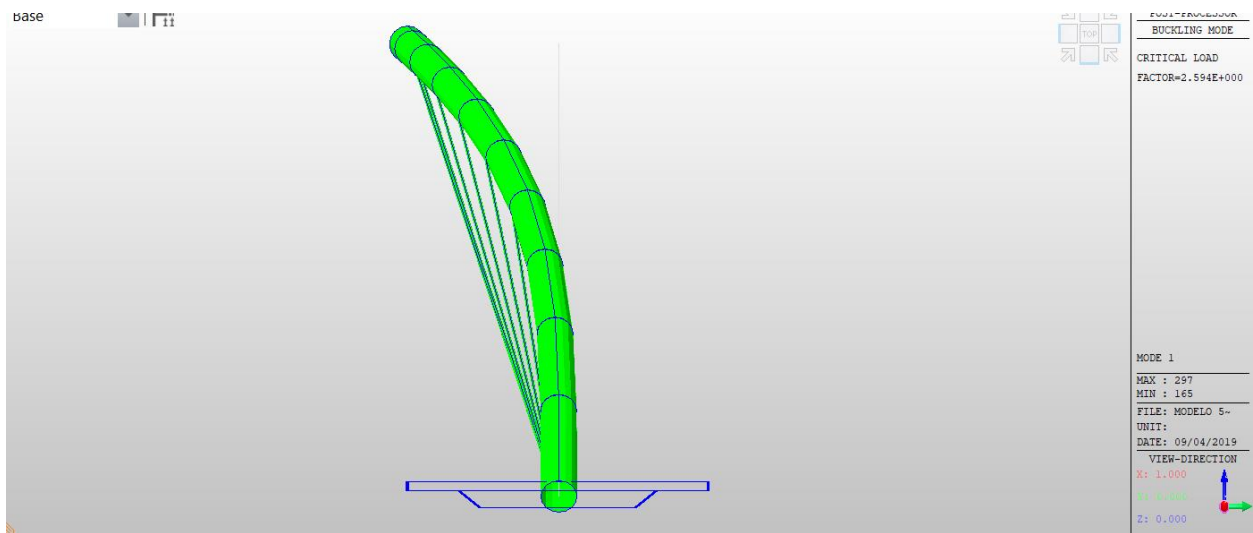


Figura 238 Modo 1 de pandeo II

- o Modo 2: 2,648

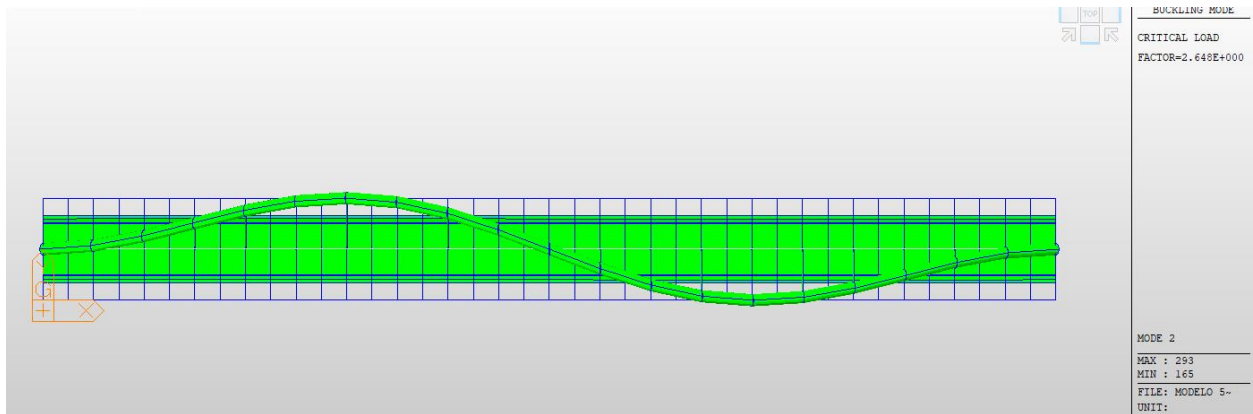


Figura 239 Modo 2 de pandeo

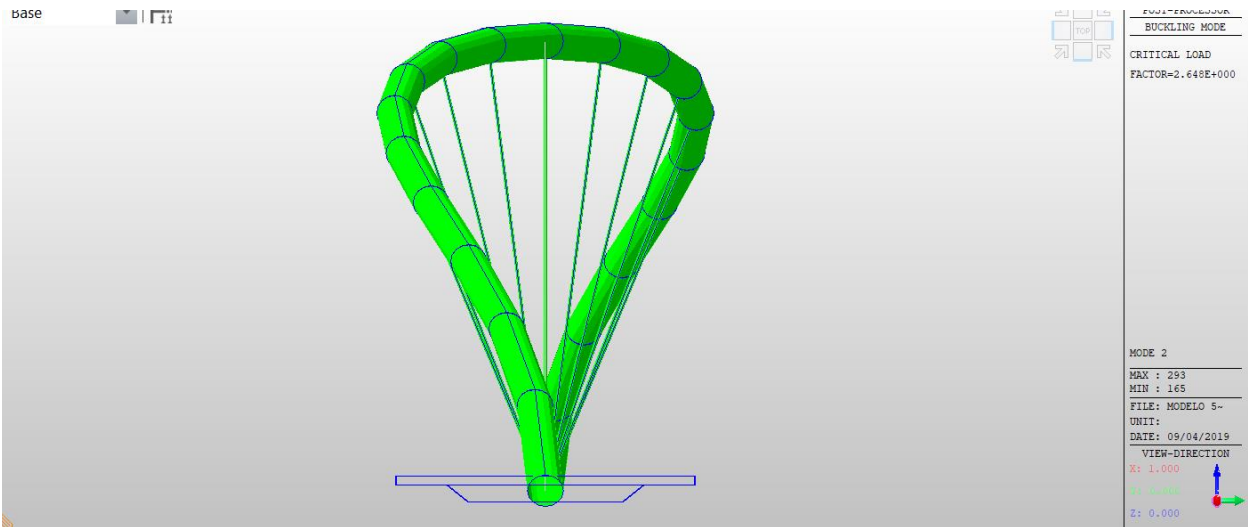


Figura 240 Modo 2 de pandeo II

- o Modo 3: 6,521

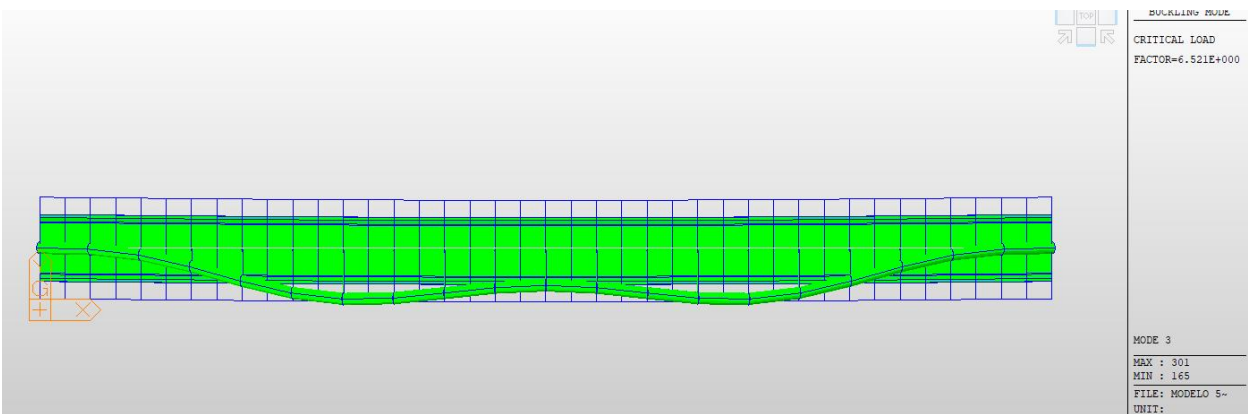


Figura 241 Modo 3 de pandeo

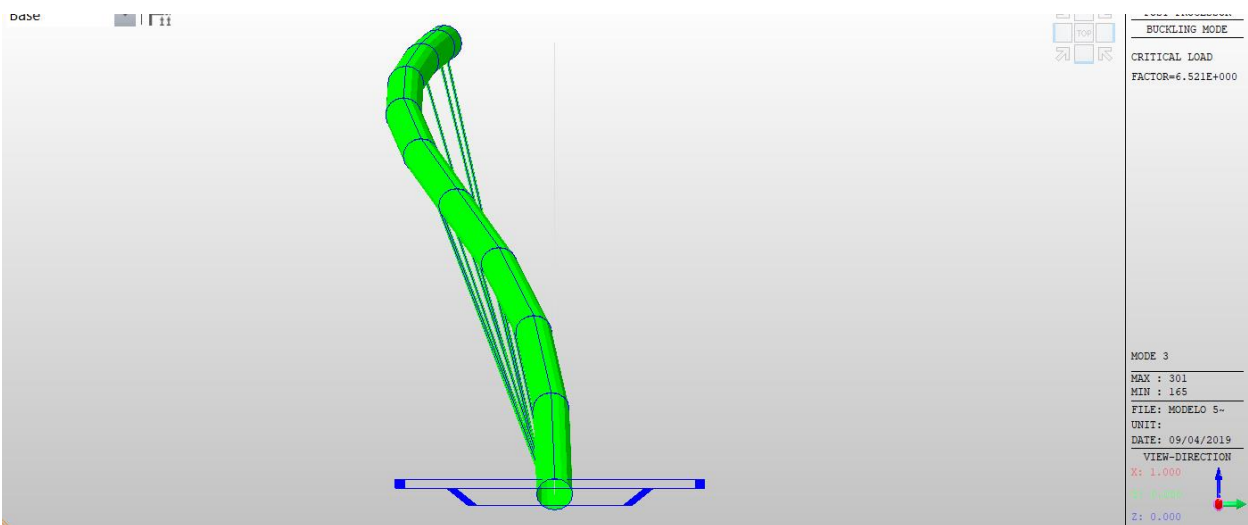


Figura 242 Modo 3 de pandeo II

- Modos de vibración: Frecuencias naturales

- o Modo 1: (2,204 Hz)

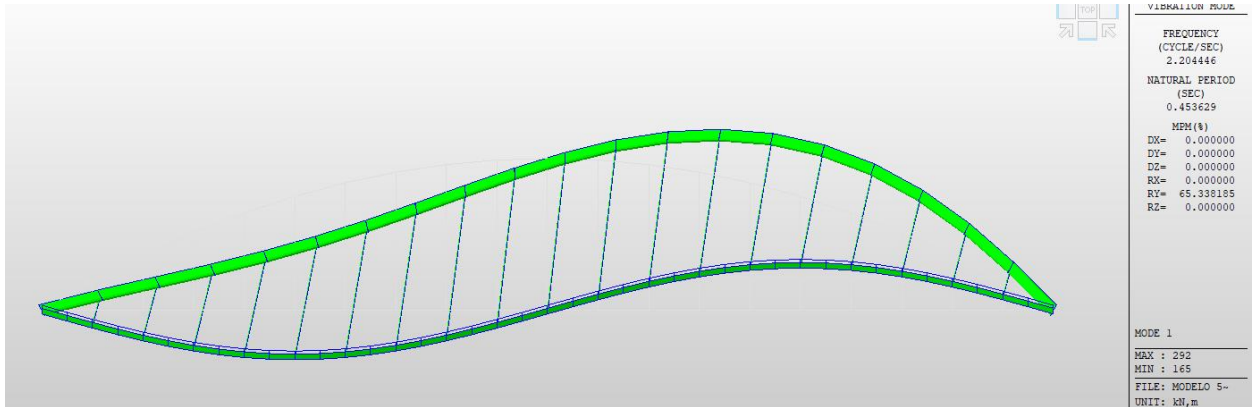


Figura 243 Modo 1 de vibración

- o Modo 2: (3,952 Hz)

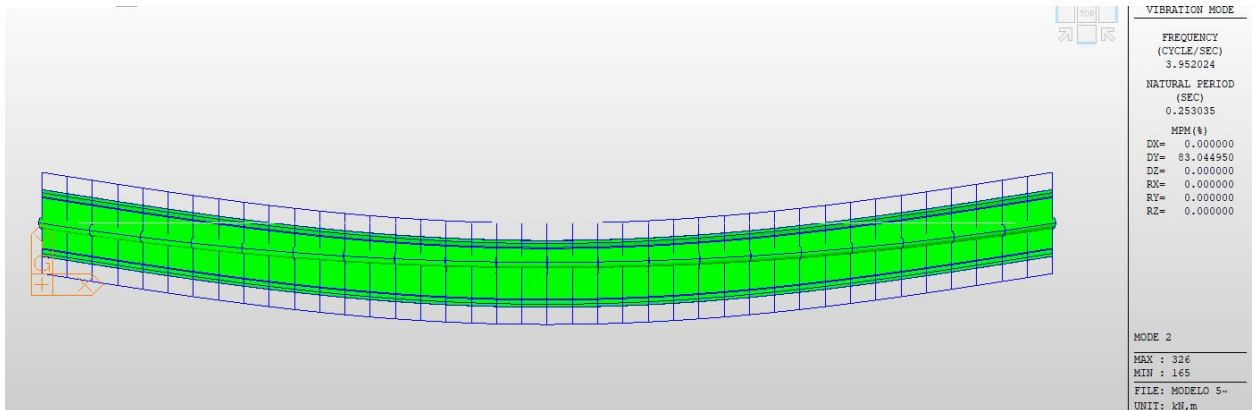


Figura 244 Modo 2 de vibración

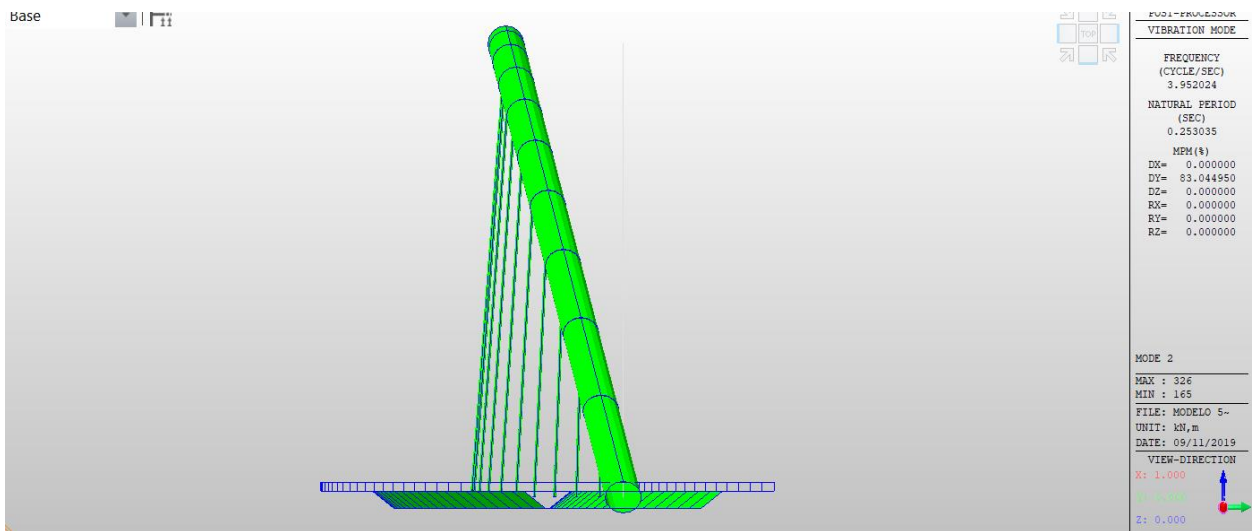


Figura 245 Modo 2 de vibración II

- Modo 3: (4,160 Hz)

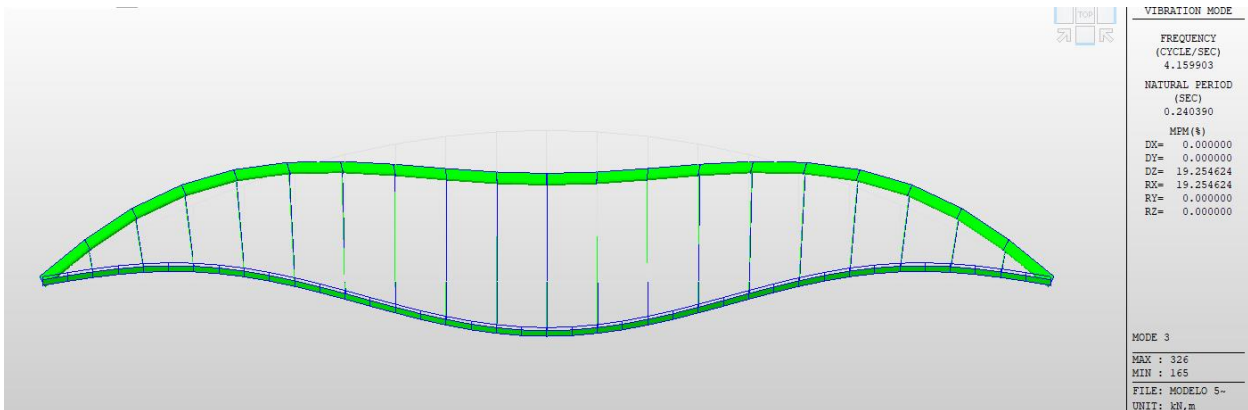


Figura 246 Modo 3 de vibración

3.5.2 Modelo 5b

- Flecha: 37,74 centímetros

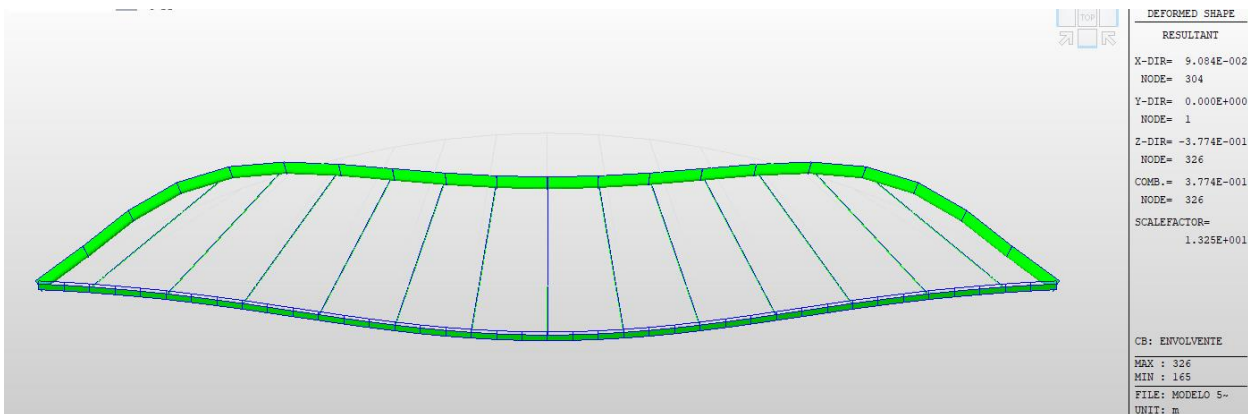


Figura 247 Flecha

- Modos de pandeo
 - Modo 1: 2,378

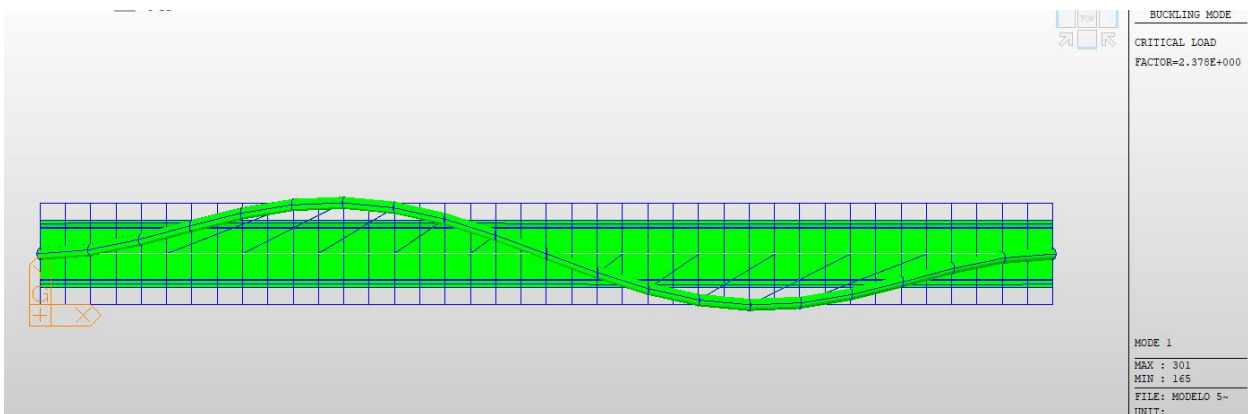


Figura 248 Modo 1 de pandeo

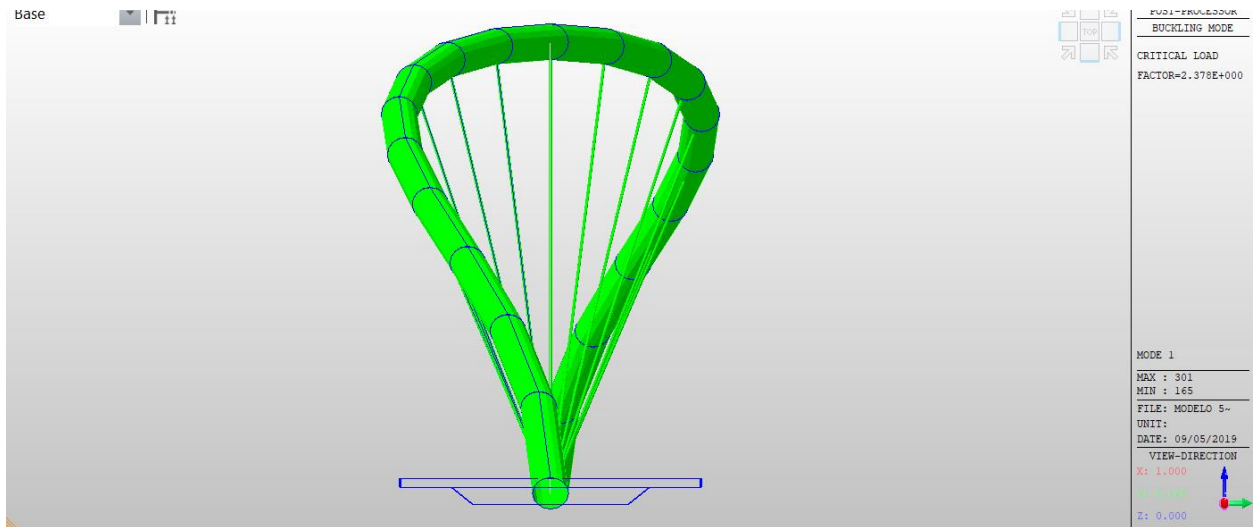


Figura 249 Modo 1 de pandeo II

o Modo 2: 2,393

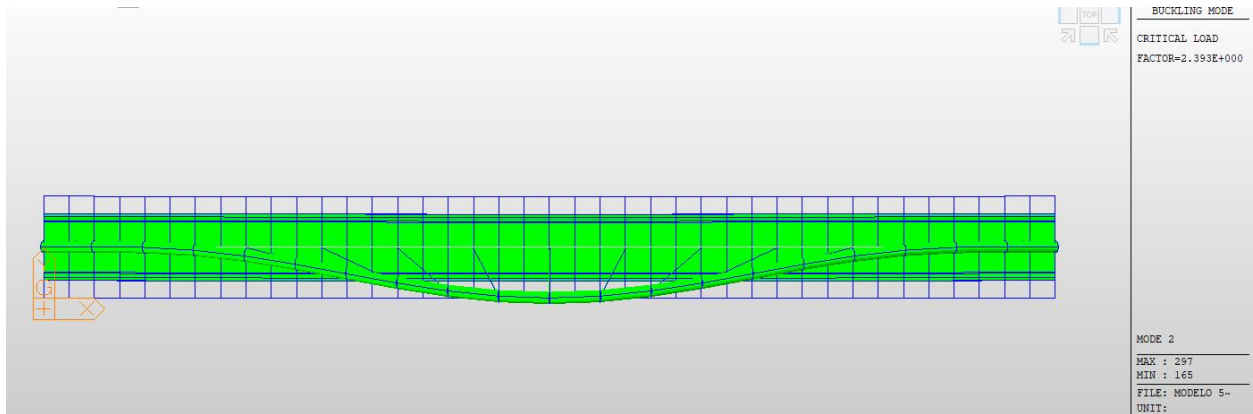


Figura 250 Modo 2 de pandeo

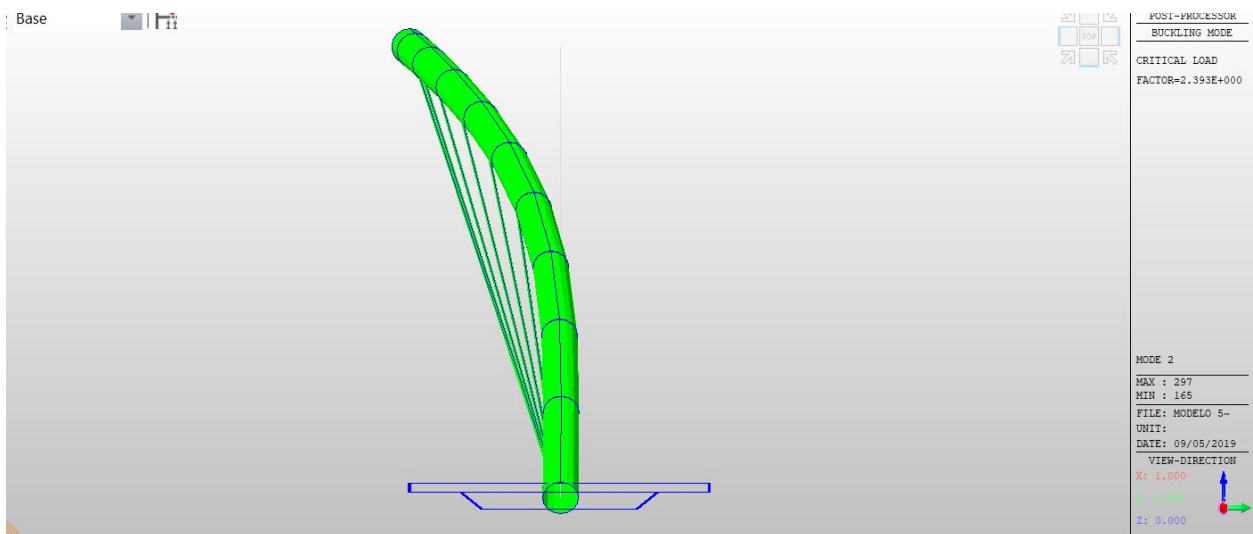


Figura 251 Modo 2 de pandeo II

o Modo 3: 3,283

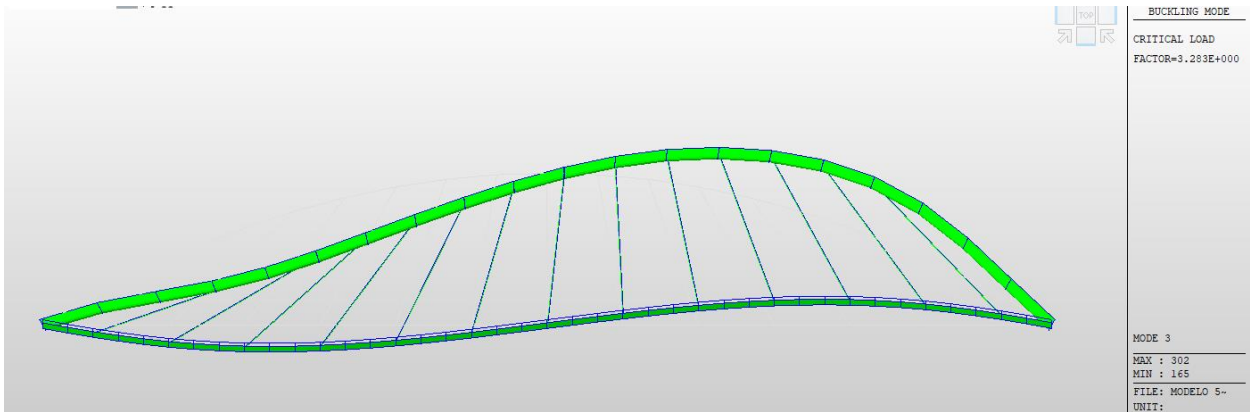


Figura 252 Modo 3 de pandeo

- Modos de vibración: Frecuencias naturales

o Modo 1: (1,737 Hz)

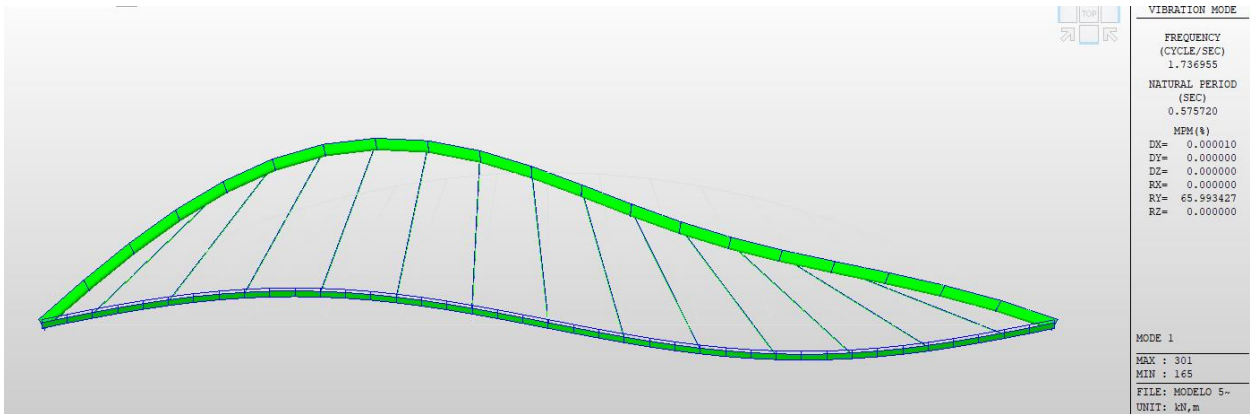


Figura 253 Modo 1 de vibración

o Modo 2: (1,850 Hz)

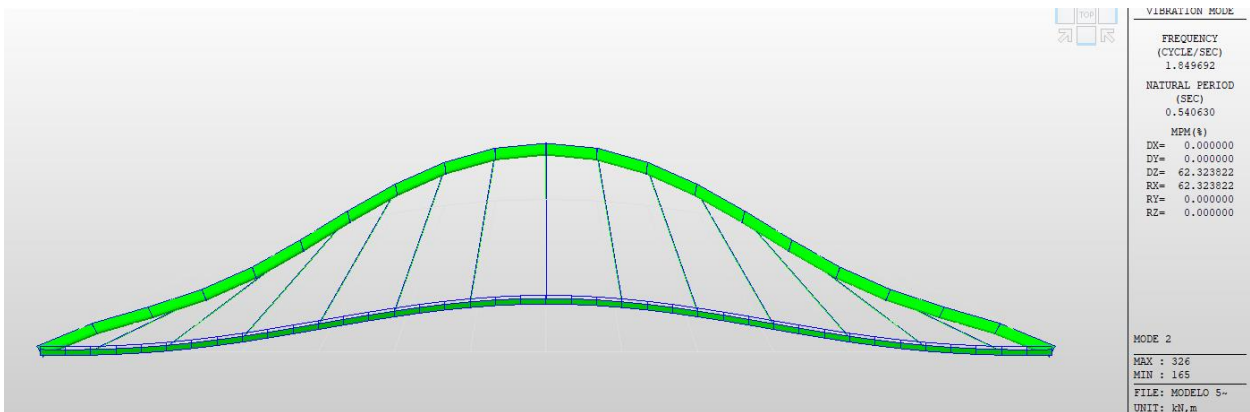


Figura 254 Modo 2 de vibración

o Modo 3: (2,794 Hz)

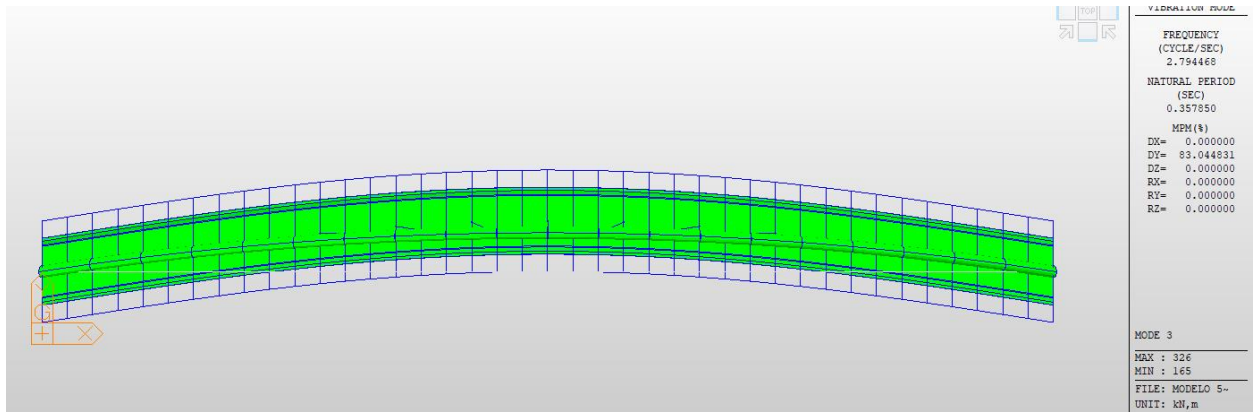


Figura 255 Modo 3 de vibración

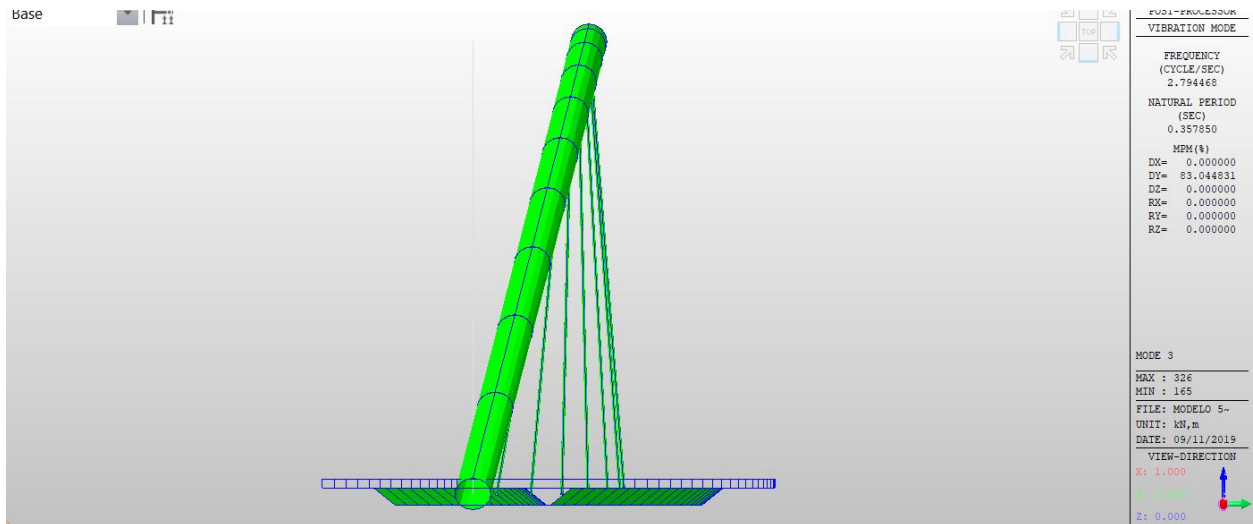


Figura 256 Modo 3 de vibración II

3.5.3 Modelo 5c

- Flecha: 8,726 centímetros

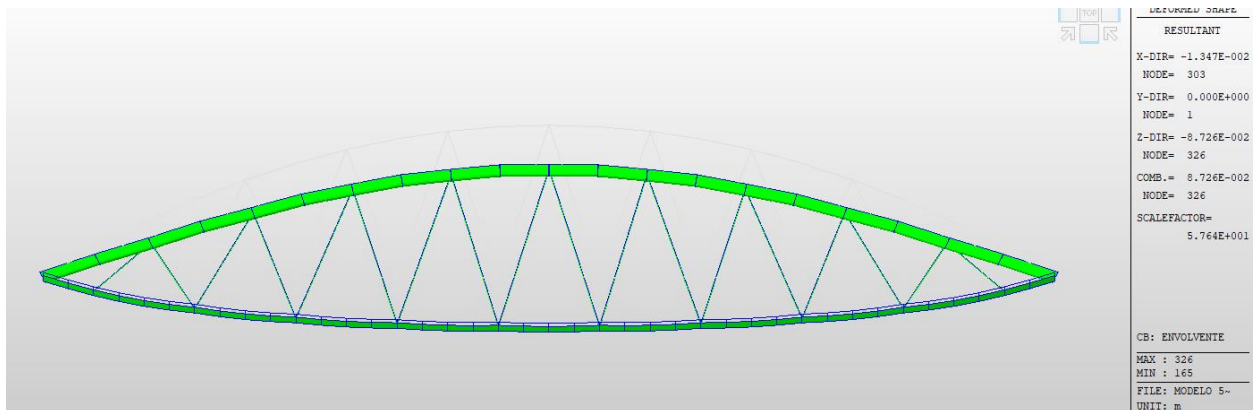


Figura 257 Flecha

- Modos de pandeo

- o Modo 1: 2,565

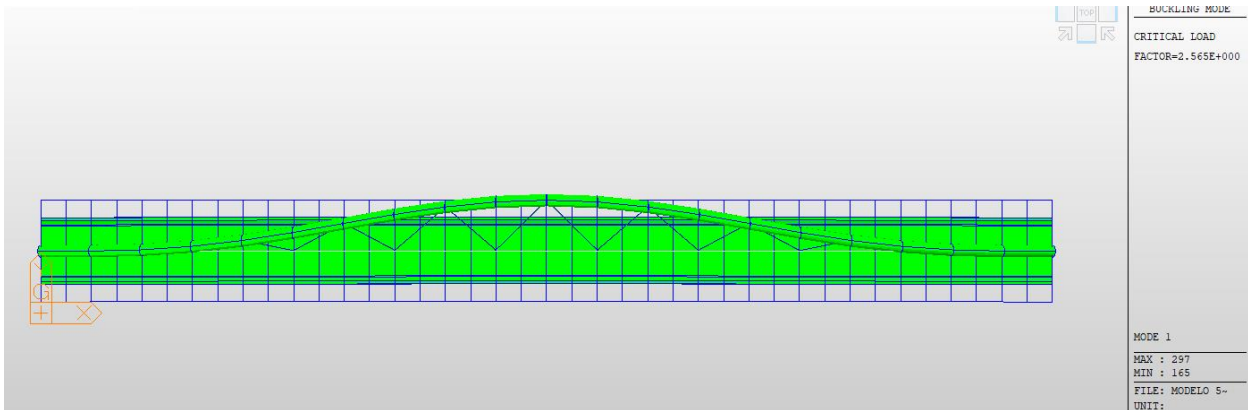


Figura 258 Modo 1 de pandeo

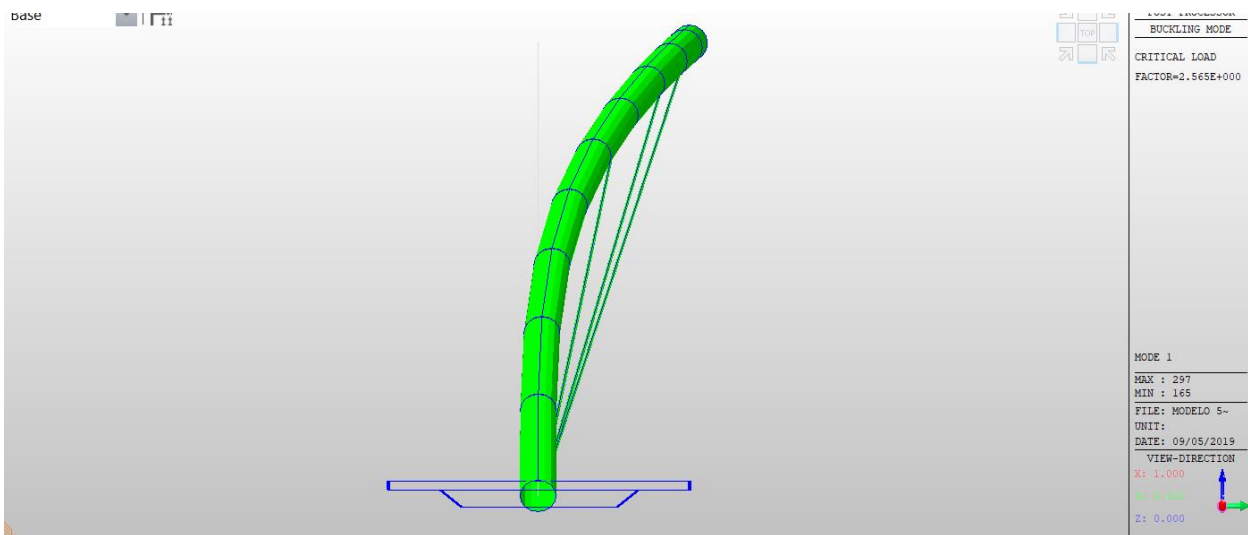


Figura 259 Modo 1 de pandeo II

- o Modo 2: 2,613

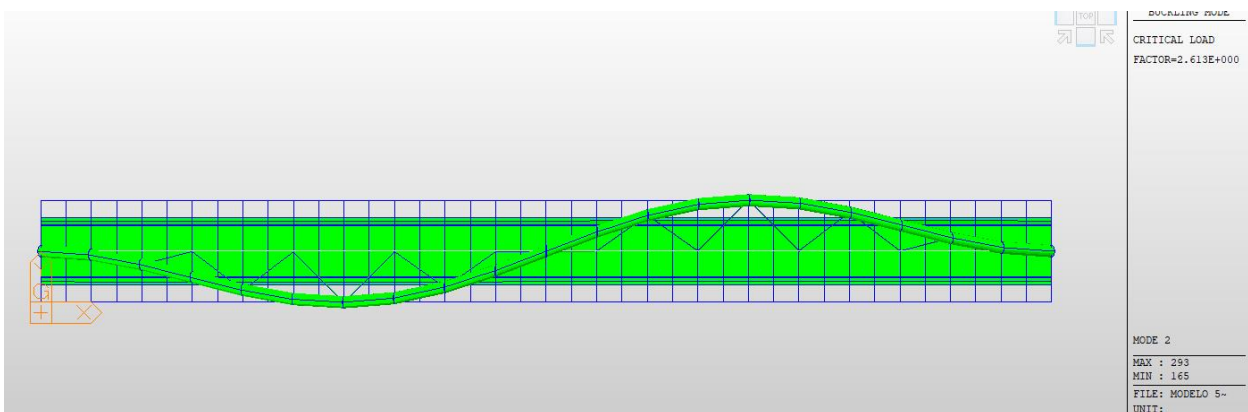


Figura 260 Modo 2 de pandeo

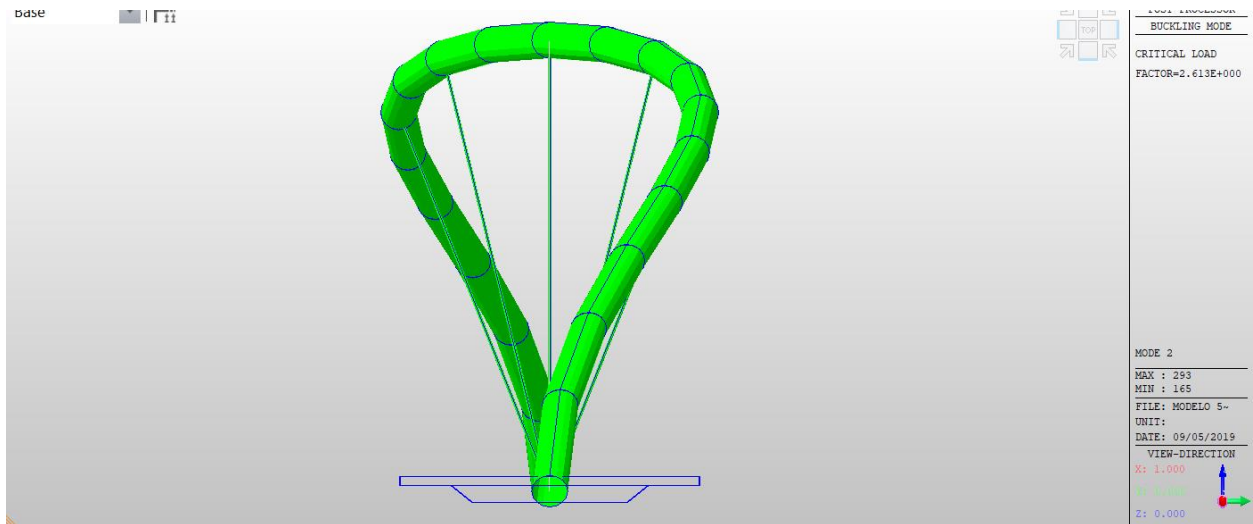


Figura 261 Modo 2 de pandeo II

o Modo 3: 6,490

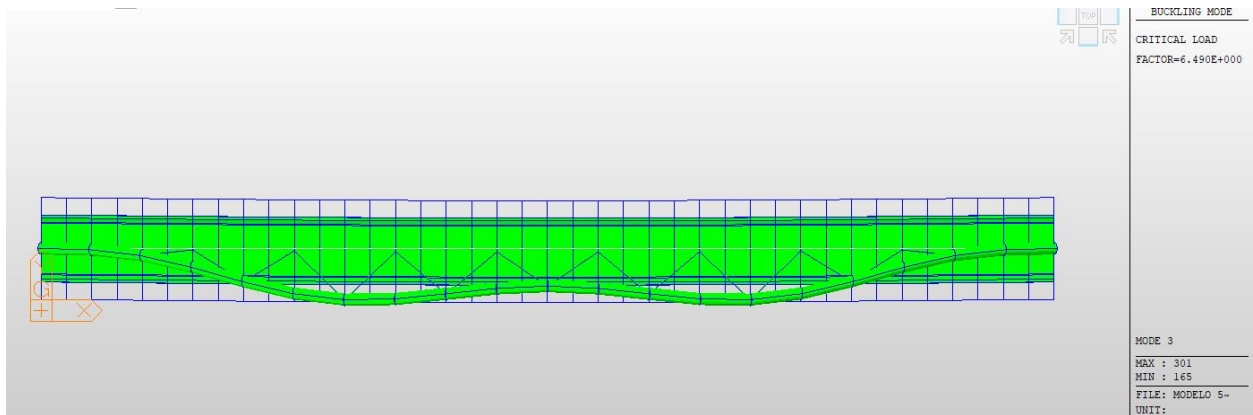


Figura 262 Modo 3 de pandeo

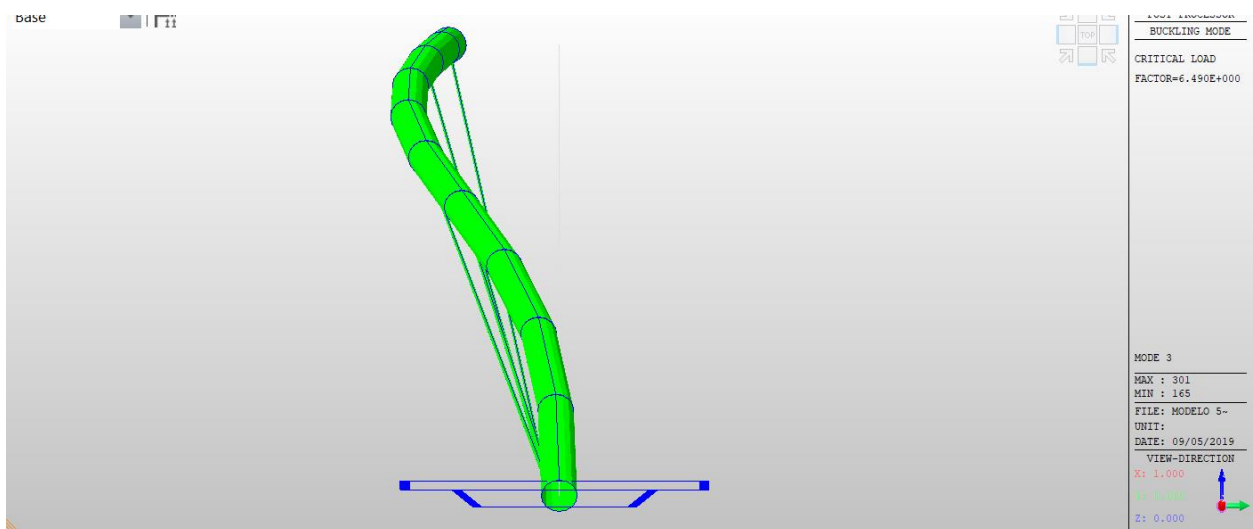


Figura 263 Modo 3 de pandeo II

- Modos de vibración: Frecuencias naturales

- o Modo 1: (3,952 Hz)

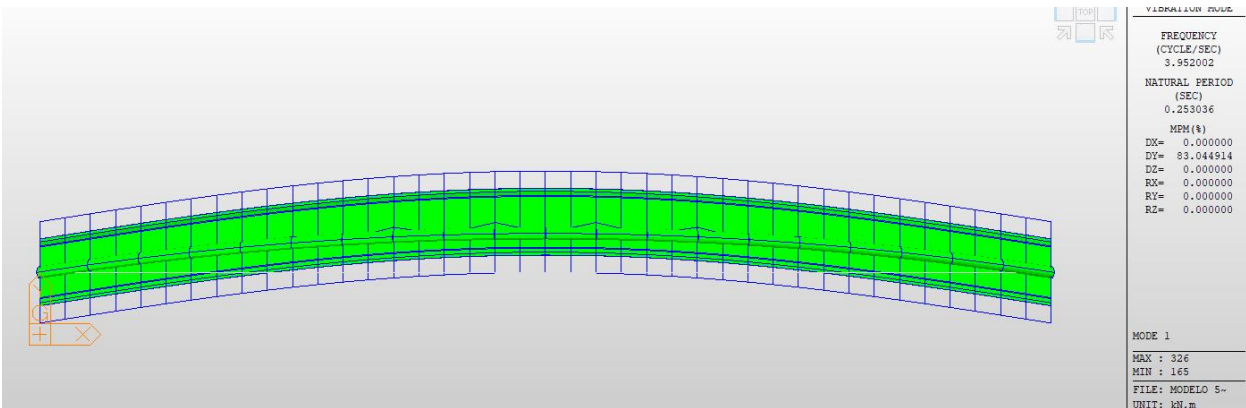


Figura 264 Modo 1 de vibración

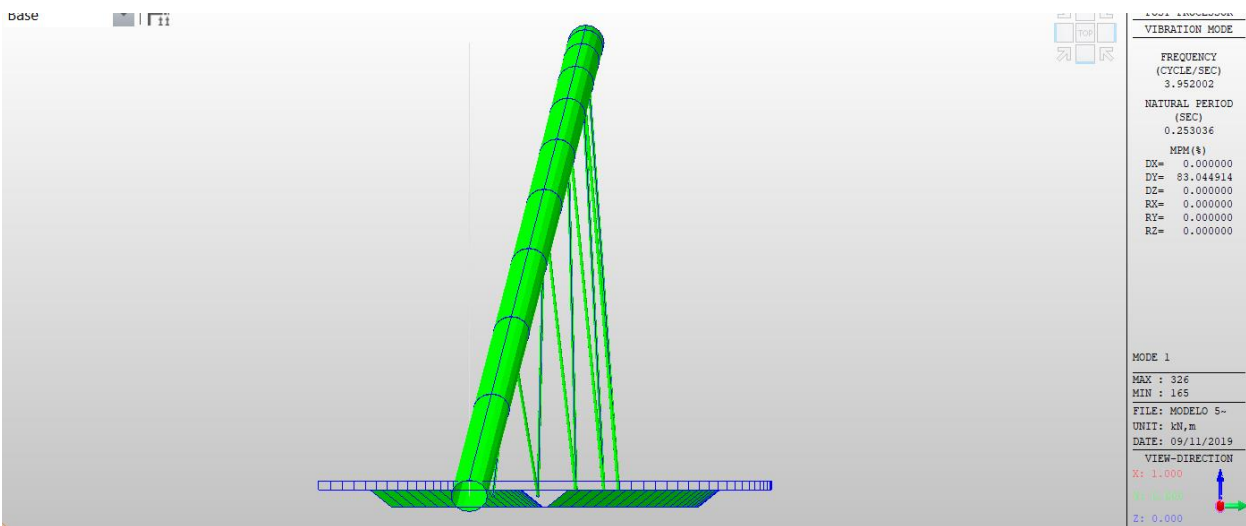


Figura 265 Modo 1 de vibración II

- o Modo 2: (5,022 Hz)

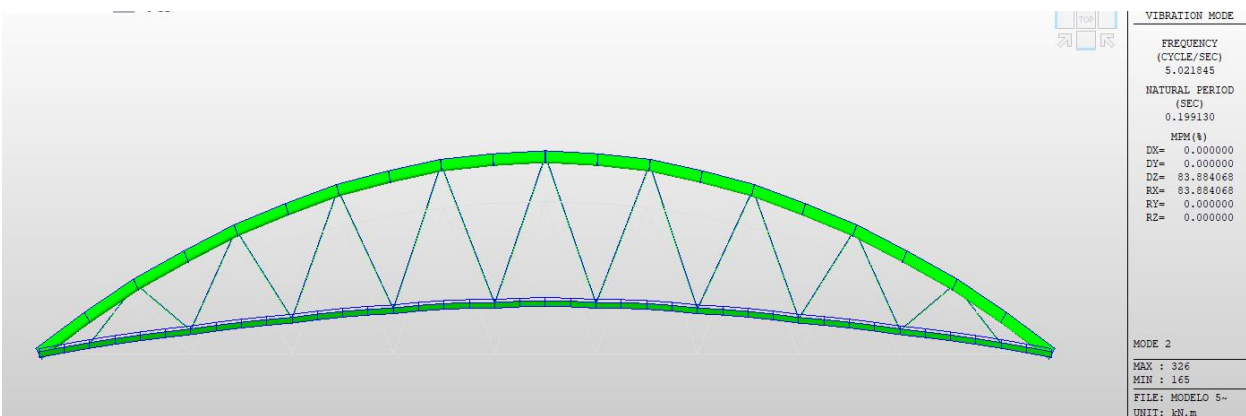


Figura 266 Modo 2 de vibración

- Modo 3: (5,582 Hz)

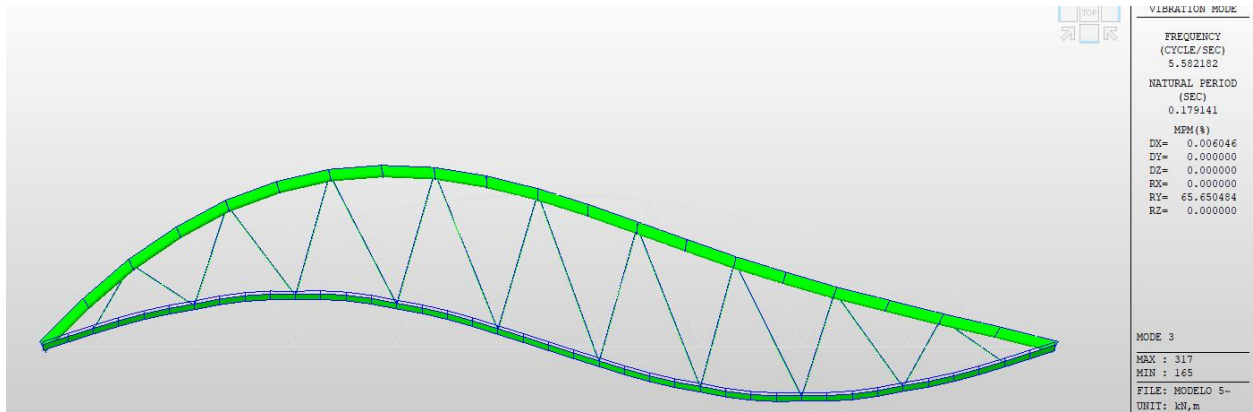


Figura 267 Modo 3 de vibración

3.5.4 Modelo 5d

- Flecha: 8,986 centímetros

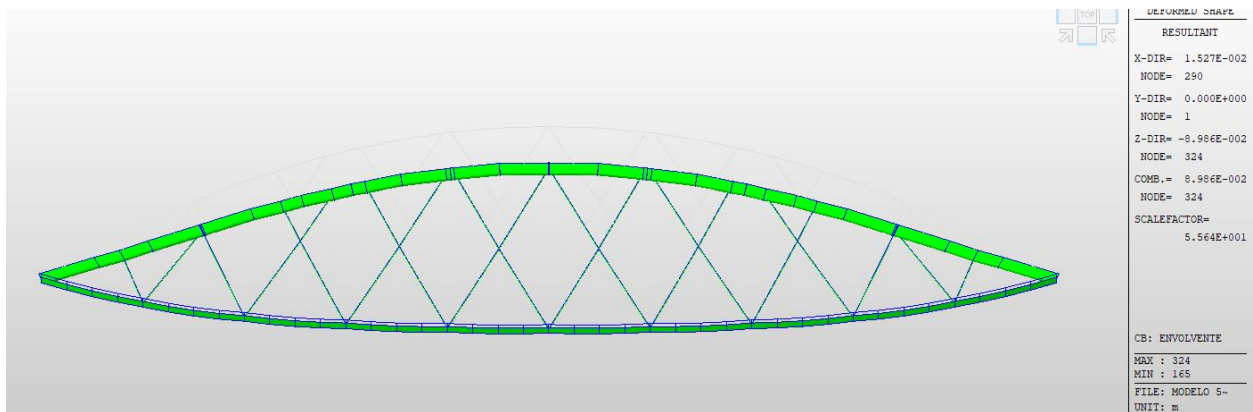


Figura 268 Flecha

- Modos de pandeo
 - Modo 1: 2,455

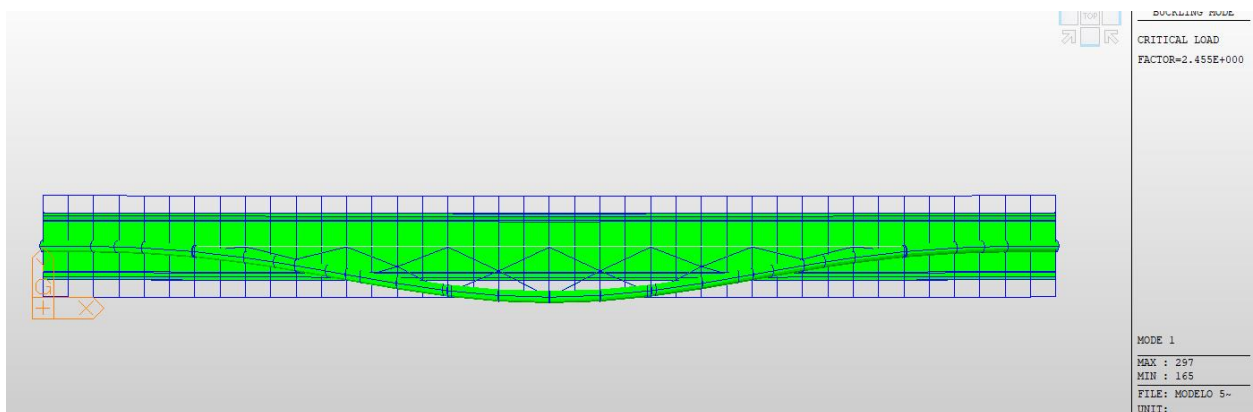


Figura 269 Modo 1 de pandeo

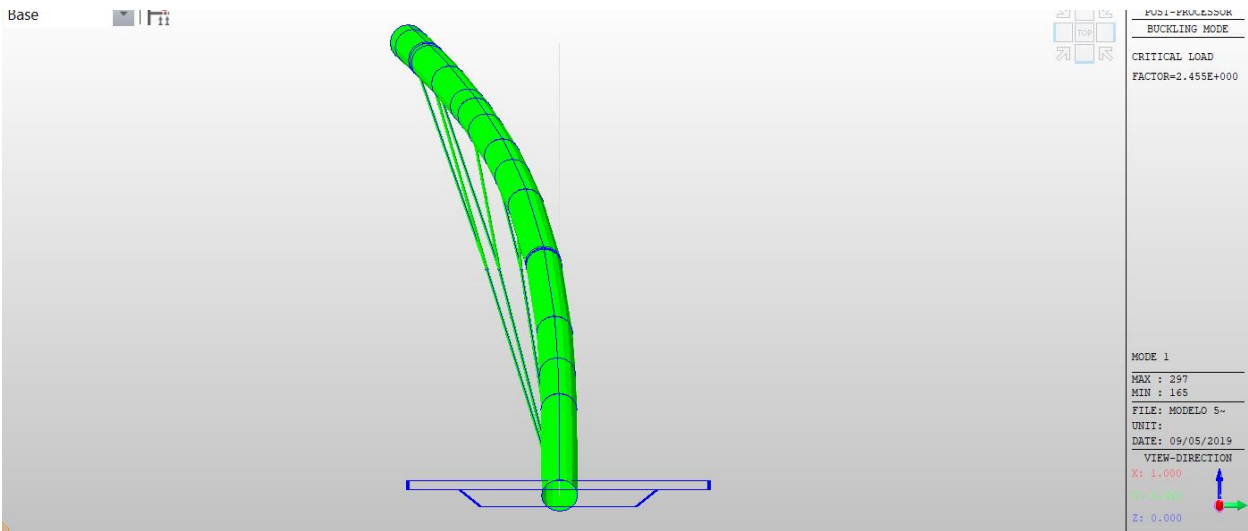


Figura 270 Modo 1 de pandeo II

o Modo 2: 2,568

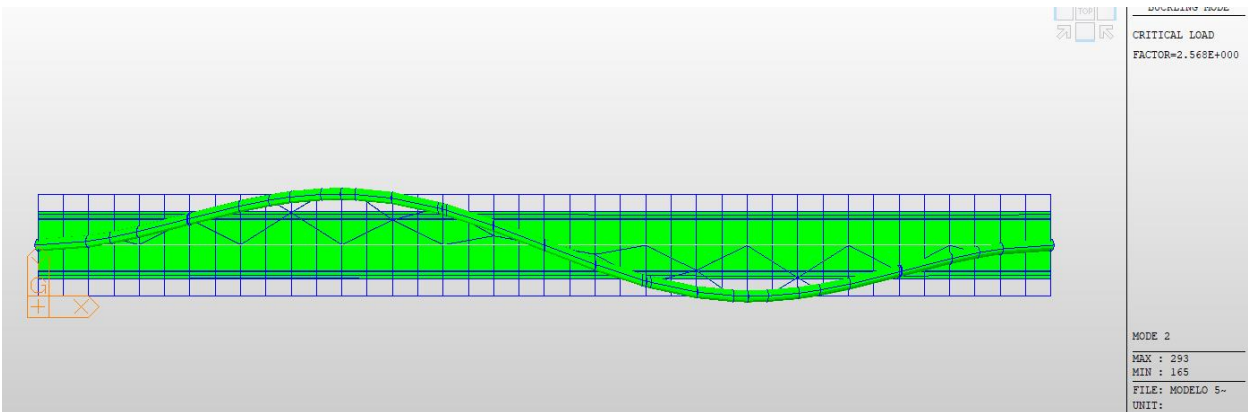


Figura 271 Modo 2 de pandeo

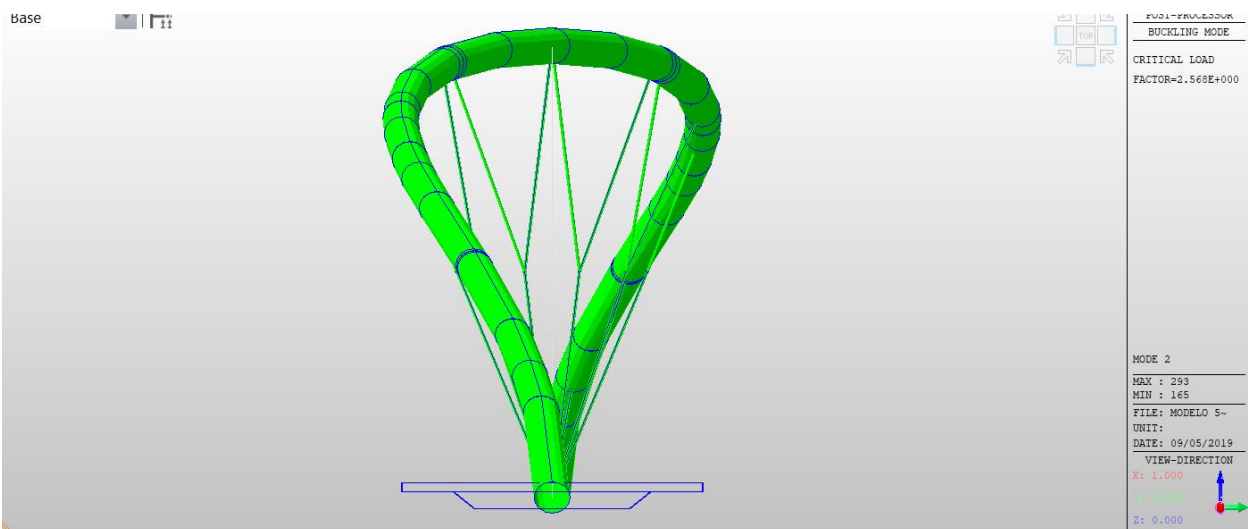


Figura 272 Modo 2 de pandeo II

- o Modo 3: 6,269

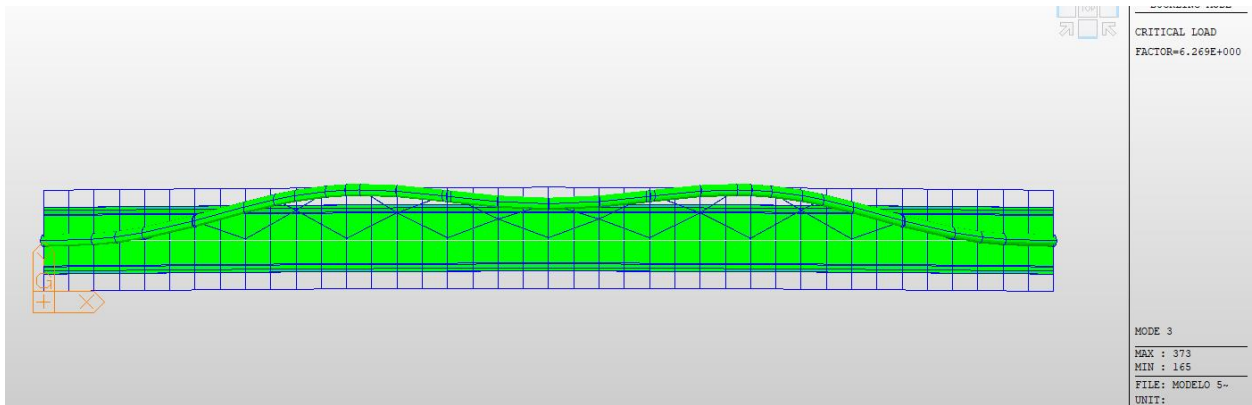


Figura 273 Modo 3 de pandeo

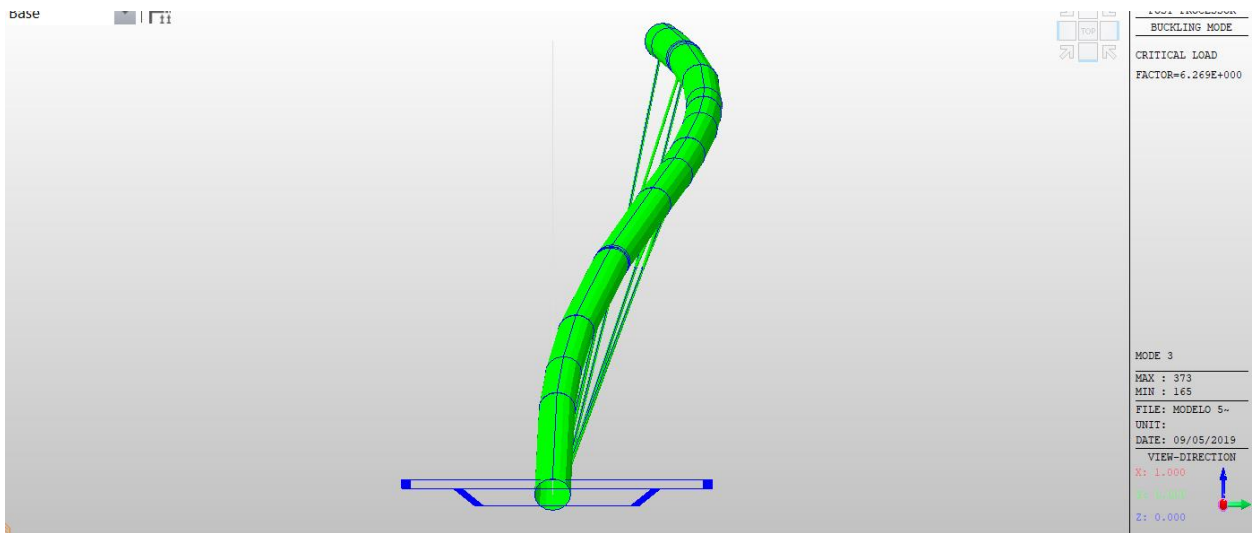


Figura 274 Modo 3 de pandeo II

- Modos de vibración: Frecuencias naturales

- o Modo 1: (3,952 Hz)

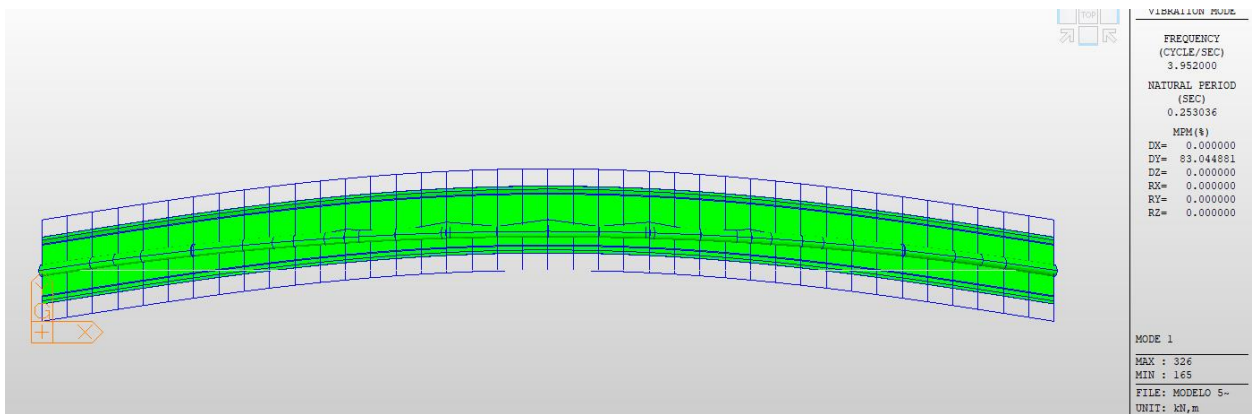


Figura 275 Modo 1 de vibración

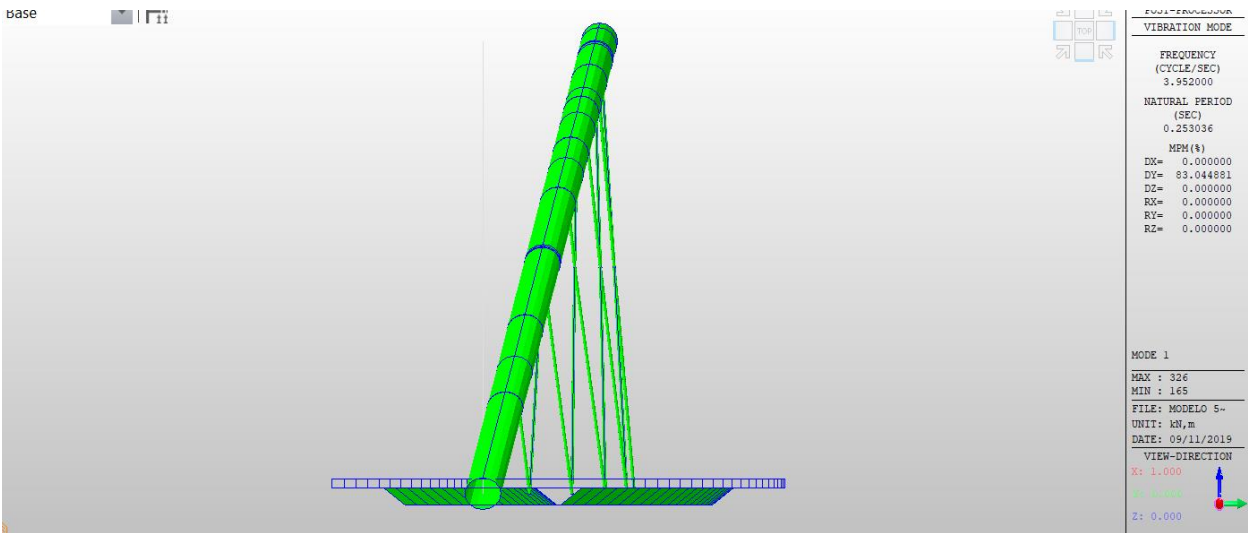


Figura 276 Modo 1 de vibración II

- Modo 2: (4,932 Hz)

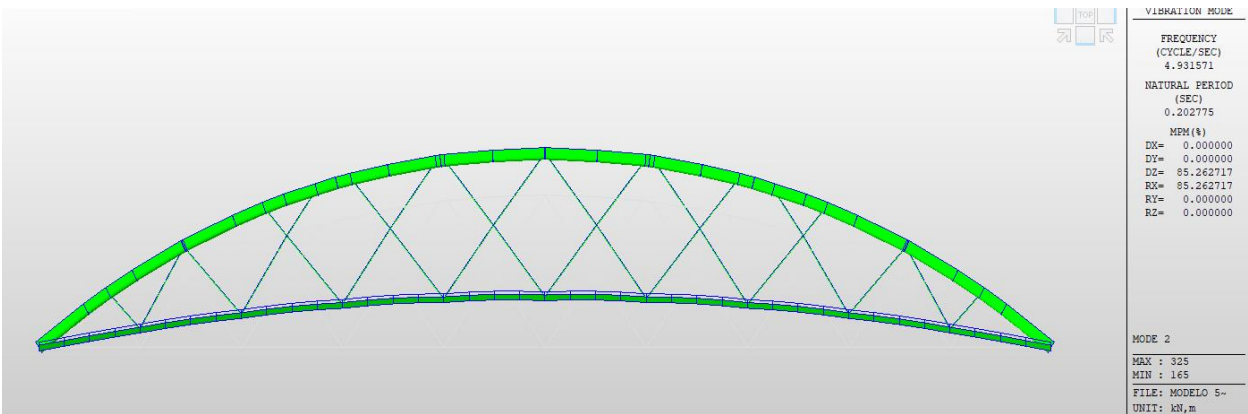


Figura 277 Modo 2 de vibración

- Modo 3: (7,035 Hz)

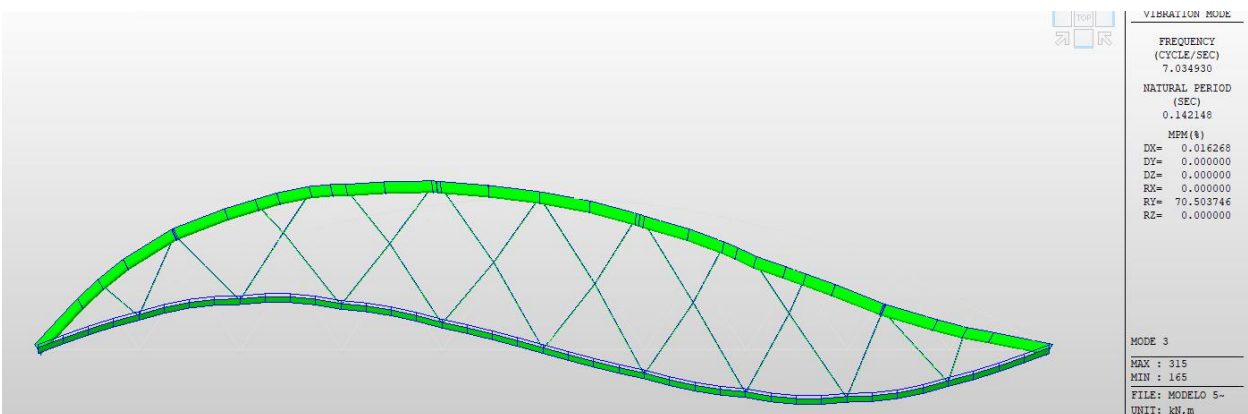


Figura 278 Modo 3 de vibración

4 ESTUDIO DE LOS RESULTADOS

Con los años que llevo de profesión debería haber tenido chavales que me mordieran para quitarme del medio y no ha ocurrido.

Javier Manterola, 2017

En este capítulo vamos a proceder a la comparación y estudio de los resultados obtenidos. Para ello iremos estudiando cómo se comporta cada modelo y estudiaremos que tienen en común y cuál es su comportamiento en relación con las magnitudes que estamos analizando.

4.1 Según la tipología de arco.

Vamos a empezar estudiando los 5 grupos que tenemos en función de la tipología del arco. En el capítulo 2 de este trabajo vienen representadas cada tipología y su correspondiente etiqueta en función del modelo.

En cada subapartado iremos estudiando, comparando y analizando desde el modelo 1 hasta el 5. Mediante una tabla se muestran a modo de resumen los datos obtenidos, también reflejados en el apartado anterior. Básicamente lo que se observa es cómo se comporta cada tipología según variemos la disposición de sus tirantes.

4.1.1 Modelos “1”

Recordamos que esta primera tipología consiste en 2 arcos paralelos.

En la siguiente tabla indicamos a modo de resumen los valores obtenidos.

Modelo	1a	1b	1c	1d
Flecha (cm)	6,49	34,68	5,96	5,79
Modo de pandeo	2,81	2,18	3,95	3,68
Modo de vibración (Hz)	1,45	2,10	6,67	6,90

Tabla 3 Resultados Modelo 1

Una vez tenemos estos datos, observamos los siguiente:

- El modelo que sufre menos deformación vertical es el “1d” frente al “1b” que se deforma unas 6 veces más.
- El modelo más rígido en cuanto a sollicitación de pandeo es el “1c” y el menos rígido el “1b”.
- El modelo con una frecuencia natural más alta es el “1d”, frente a la más baja que pertenece al modelo “1a”.

4.1.2 Modelos “2”

Recordamos que esta tipología consiste en 2 arcos paralelos tumbados hacia dentro de la estructura con una inclinación de $21,8^\circ$ respecto a la vertical.

En la siguiente tabla indicamos a modo de resumen los valores obtenidos.

Modelo	2a	2b	2c	2d
Flecha (cm)	8,36	29,5	6,75	7,37
Modo de pandeo	5,08	4,19	6,29	6,46
Modo de vibración (Hz)	2,19	2,77	6,30	6,62

Tabla 4 Resultados Modelo 2

Una vez tenemos estos datos, observamos los siguiente:

- El modelo que sufre menos deformación vertical es el “2c” frente al “2b” que se deforma unas 4 veces más.
- El modelo más rígido en cuanto a sollicitación de pandeo es el “2d” y el menos rígido el “2a”.
- El modelo con una frecuencia natural más alta es el “2d”, frente a la más baja que pertenece al modelo “2a”.

4.1.3 Modelos “3”.

Recordamos que esta tipología consiste en 2 arcos paralelos tumbados hacia fuera de la estructura con una inclinación de $21,8^\circ$ respecto a la vertical.

En la siguiente tabla indicamos a modo de resumen los valores obtenidos.

Modelo	3a	3b	3c	3d
Flecha (cm)	8,44	29,67	6,75	7,39
Modo de pandeo	3,70	3,39	3,77	3,58
Modo de vibración (Hz)	2,19	2,77	6,34	6,65

Tabla 5 Resultados Modelo 3

Una vez tenemos estos datos, observamos los siguiente:

- El modelo que sufre menos deformación vertical es el “3c” frente al “3b” que se deforma unas 4 veces más.
- El modelo más rígido en cuanto a sollicitación de pandeo es el “3c” y el menos rígido el “3b”.
- El modelo con una frecuencia natural más alta es el “3d”, frente a la más baja que pertenece al modelo “3a”.

4.1.4 Modelos “4”

Recordamos que esta tipología consiste en 1 solo arco centrado en el tablero.

En la siguiente tabla indicamos a modo de resumen los valores obtenidos.

Modelo	4a	4b	4c	4d
Flecha (cm)	12,76	51,01	10,65	10,13
Modo de pandeo	3,61	2,54	8,58	18,51
Modo de vibración (Hz)	1,71	2,03	4,93	4,76

Tabla 6 Resultados Modelo 4

Una vez tenemos estos datos, observamos los siguiente:

- El modelo que sufre menos deformación vertical es el “4d” frente al “4b” que se deforma unas 5 veces más.
- El modelo más rígido en cuanto a sollicitación de pandeo es el “4d” y el menos rígido el “4b”.
- El modelo con una frecuencia natural más alta es el “4c”, frente a la más baja que pertenece al modelo “4a”.

4.1.5 Modelos “5”

Recordamos que esta tipología es muy similar al caso anterior, modelo “4”, con un tablero diferente al usado en los 4 anteriores modelos.

En la siguiente tabla indicamos a modo de resumen los valores obtenidos.

Modelo	5a	5b	5c	5d
Flecha (cm)	9,31	37,74	8,73	8,99
Modo de pandeo	2,59	2,38	2,57	2,46
Modo de vibración (Hz)	2,20	1,74	3,95	3,95

Tabla 7 Resultados Modelo 5

Una vez tenemos estos datos, observamos los siguiente:

- El modelo que sufre menos deformación vertical es el “5c” frente al “5b” que se deforma unas 4 veces más.
- El modelo más rígido en cuanto a sollicitación de pandeo es el “5a” y el menos rígido el “5b”.
- Los modelos con una frecuencia natural más alta son el “5c” y el “5d”, frente a la más baja que pertenece al modelo “5b”.

4.1.6 Conclusiones

Una vez hemos analizado los diferentes modelos con esta agrupación podemos afirmar:

- Los modelos “1” tienen generalmente flechas más bajas, frente a los modelos “4” que son los que tienen generalmente flechas más altas.
- Los modelos “2” son los más rígidos a pandeo frente a los otros que tienen un comportamiento similar.
- Los modelos “4” y “5” son más estables frente a vibraciones que el resto, aunque en general tienen un comportamiento similar.

4.2 Según la disposición de los tirantes

En este apartado, vamos a hacer algo similar a lo realizado en el anterior, pero cambiando la forma en la que presentamos los resultados, ya que vamos a agrupar de diferente forma los modelos para su posterior estudio, análisis y comparación.

Vamos a ordenarlos en función de la disposición de sus tirantes, por que tendremos 4 grupos de 5 modelos cada uno. Al igual que el apartado anterior lo reflejaremos mediante tablas y lo compararemos posteriormente.

Básicamente lo que se observa es cómo se comporta cada disposición de los tirantes según la tipología del arco.

4.2.1 Modelos “a”

Esta primera disposición consiste en tirantes verticales.

En la siguiente tabla indicamos a modo de resumen los valores obtenidos.

Modelo	1a	2a	3a	4a	5a
Flecha (cm)	6,49	8,36	8,44	12,76	9,31
Modo de pandeo	2,81	5,08	3,70	3,61	2,59
Modo de vibración (Hz)	1,45	2,19	2,19	1,71	2,20

Tabla 8 Resultados Modelo a

Una vez tenemos estos datos, observamos los siguiente:

- El modelo que sufre menos deformación vertical es el “1a” frente al “4a”, que es el que sufre mayor desplazamiento vertical.
- El modelo más rígido en cuanto a sollicitación de pandeo es el “2a” y el menos rígido el “5a”.
- El modelo con una frecuencia natural más alta es el “5a”, frente a la más baja que pertenece al modelo “1a”.

4.2.2 Modelos “b”

Esta disposición consiste en tirantes colocados de forma oblicua.

En la siguiente tabla indicamos a modo de resumen los valores obtenidos.

Modelo	1b	2b	3b	4b	5b
Flecha (cm)	34,68	29,5	29,67	51,01	37,74
Modo de pandeo	2,18	4,19	3,39	2,54	2,38
Modo de vibración (Hz)	2,10	2,77	2,77	2,03	1,74

Tabla 9 Resultados Modelo b

Una vez tenemos estos datos, observamos los siguiente:

- El modelo que sufre menos deformación vertical es el “2b” frente al “4b”, que es el que sufre mayor desplazamiento vertical.
- El modelo más rígido en cuanto a sollicitación de pandeo es el “2b” y el menos rígido el “1b”.
- Los modelos con una frecuencia natural más alta son el “2b” y “2c”, frente a la más baja que pertenece al modelo “5b”.

4.2.3 Modelos “c”

Esta disposición consiste en tirantes colocados a modo de celosía.

En la siguiente tabla indicamos a modo de resumen los valores obtenidos.

Modelo	1c	2c	3c	4c	5c
Flecha (cm)	5,96	6,75	6,75	10,65	8,73
Modo de pandeo	3,95	6,29	3,77	8,58	2,57
Modo de vibración (Hz)	6,67	6,30	6,34	4,93	3,95

Tabla 10 Resultados Modelo c

Una vez tenemos estos datos, observamos los siguiente:

- El modelo que sufre menos deformación vertical es el “1c” frente al “4c”, que es el que sufre mayor desplazamiento vertical.
- El modelo más rígido en cuanto a sollicitación de pandeo es el “4c” y el menos rígido el “5c”.
- El modelo con una frecuencia natural más alta es el “1c”, frente a la más baja que pertenece al modelo “5c”.

4.2.4 Modelos “d”

Esta disposición consiste en tirantes cruzados con cierto ángulo de inclinación.

En la siguiente tabla indicamos a modo de resumen los valores obtenidos.

Modelo	1d	2d	3d	4d	5d
Flecha (cm)	5,79	7,37	7,39	10,13	8,99
Modo de pandeo	3,68	6,46	3,58	18,51	2,46
Modo de vibración (Hz)	6,90	6,62	6,65	4,76	3,95

Tabla 11 Resultados Modelo d

Una vez tenemos estos datos, observamos los siguiente:

- El modelo que sufre menos deformación vertical es el “1d” frente al “4d”, que es el que sufre mayor desplazamiento vertical.
- El modelo más rígido en cuanto a sollicitación de pandeo es el “4d” y el menos rígido el “5d”.
- El modelo con una frecuencia natural más alta es el “1d”, frente a la más baja que pertenece al modelo “5d”.

4.2.5 Conclusiones

Observando los diferentes modelos y comparandolos llegamos a las siguientes afirmaciones.

- Los modelos “c” y “d” son los que menos deformación vertical sufren, frente a los modelos “b” que claramente son los que más desplazamiento vertical sufren.
- En cuanto a modos de pandeo, los modelos “c” y “d” son más rígidos que el resto.
- De forma análoga, los modelos “c” y “d” son más estables a vibraciones que los otros 2.
- Podemos afirmar en base a los resultados que los modelos “c” y “d” tienen un comportamiento similar.

5 CONCLUSIONES Y ASPECTOS FUTUROS A DESARROLLAR

En el presente capítulo vamos a comentar por un lado las conclusiones acerca del trabajo y posteriormente algunos aspectos a desarrollar o ampliar para trabajos futuros.

Primeramente la elaboración de varios modelos numéricos a partir de uno real. El real como se comentó al principio de este trabajo fue el recomendado por el profesor, el Puente Reina Sofía, situado en Palma del Río. Fue de mucha utilidad para tener un punto de partida con el que comenzar a realizar los diferentes modelos.

También ha sido de mucha utilidad la bibliografía empleada de D. Javier Manterola 'Puentes: Apuntes para su diseño, cálculo y construcción. Tomo I [1] y D. Javier Manterola 'Puentes: Apuntes para su diseño, cálculo y construcción. Tomo II. [2]. Donde hemos realizado un trabajo previamente de aprendizaje y asimilación de conceptos sobre esta tipología de puentes, como posteriormente ha sido de apoyo para definir las diferentes tipologías de arcos y disposiciones de tirantes que hemos empleado en la definición de los diferentes modelos numéricos.

Por supuesto, la ayuda del tutor, guiándome en este trabajo, aportando tanto ideas, como soluciones, para ayudar tanto en el aprendizaje de la herramienta informática Midas Civil [3] a la hora de la realización de los diferentes modelos, como en los factores clave a analizar en el comportamiento de este tipo de estructuras.

5.1. Conclusiones

Tras lo expuesto en esta memoria, se puede llegar a las siguientes conclusiones.

- En primer lugar se da por completado el estudio que nos habíamos propuesto en el capítulo 1 de esta memoria. Se han realizado los diferentes modelos numéricos propuestos en el programa de elementos finitos Midas Civil [3], elegido para este trabajo, y obtenido los resultados para las diferentes variables propuestas en un principio: flecha, modos de pandeo y modos de vibración.
- Con todo ello finalmente hemos concluido que los modelos con dos arcos paralelos sufren una flecha menor que los modelos con un solo arco.
- La tipología con dos arcos inclinados hacia el interior de la estructura presenta mayor rigidez que los otros modelos, aunque no mucho mayor.
- Generalmente todas las tipologías de arco tienen un comportamiento similar frente a vibraciones aunque el modelo con dos arcos tumbados hacia el exterior de la estructura y el de un solo arco presenta un valor mayor de la primera frecuencia natural.
- Centrándonos en una misma disposición de tirantes para diferentes modelos de arco, llegamos a la conclusión de que los modelos en celosía y cruzados presentan mejor comportamiento respecto a las variables analizadas que el resto. Esto es debido a que sufren una flecha de menor valor, tienen un coeficiente de pandeo más alto y la primera frecuencia natural es mayor.
- Los modelos de tipo abanico son los que mayor flecha presentan frente a los anteriormente nombrados que sería los que menor desplazamiento vertical sufren.
- En cuanto a rigidez y estabilidad, los valores obtenidos para la disposición de tirantes en celosía y cruzados son mayores que los otros dos.

5.2. Aspectos futuros a desarrollar

En este apartado comentaremos varias opciones relacionadas con diferentes aspectos del trabajo para posibles desarrollos futuros, tanto para completar o ampliar lo descrito en el presente proyecto, como nuevos caminos a desarrollar.

- Una de las opciones más lógicas para continuar con este trabajo es incluir otros modelos de puente. Pueden ser dentro de la misma tipología de tipo arco, incluyendo otra geometría de arcos o nuevas disposiciones de tirantes.

En la misma línea también podemos tener en cuenta la variación de las secciones de los elementos que conforman la estructura, o incluso su material.

Hasta ahora las opciones que hemos comentado son siempre manteniendo el mismo tablero. Continuando esta idea, se podría mantener los mismos modelos descritos en el presente trabajo e introducir un tablero diferente. Cuando digo diferente, surgen muchas posibilidades, tanto su geometría, como sus elementos, sus materiales, etc....

Existen muchísimos modelos de puentes, en función de las variables presentas en la zona que se requiera dicha estructura, por lo que las variables de este trabajo son muy amplias.

- Otra opción sería adoptar otra tipología de puente diferente a la usada en el presente trabajo, puente arco con tablero inferior, manteniendo la idea o el objeto de estudio. Es decir, analizar la flecha, modos de pandeo y modos de vibración, pero con otra tipología de estructura y otros modelos.
- Otra opción que desarrollar en este mismo trabajo o en otros modelos, es el estudio de otras magnitudes referidas a la respuesta resistente de la estructura en un análisis estático.

REFERENCIAS

- [1] J. Manterola, Puentes, Apuntes para su diseño, cálculo y construcción, Tomo I, 2006.
- [2] J. Manterola, Puentes, Apuntes para su diseño, cálculo y construcción, Tomo II, 2006.
- [3] «MIDAS Civil,» 2018

