



MEMORIA DE CÁLCULO
MEDIANTE EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS
EN PÓRTICO BULNES ANTE CARGAS DE VIENTO Y SÍSMICAS

AUTOR:
MANUEL SALAS FERNÁNDEZ
MSc(e) INGENIERO CIVIL MECÁNICO

FECHA:
25 DE OCTUBRE DEL 2015

ÍNDICE

1. ANTECEDENTES	2
2. ANÁLISIS ESTRUCTURAL	3
2.1. Modelo 3D de la estructura.....	3
2.2. Material de la estructura.	3
2.3. Cargas de diseño.	4
2.3.1. Peso estructura.....	4
2.4. Condiciones de borde.....	6
2.5. Mallado	7
2.6. Sistema coordinado de la estructura.....	7
2.7. Casos de carga.	8
3. RESULTADOS	9
3.1. Escenario 1: Cargas por acción del viento.....	9
3.1.1. Viento soplando de frente al panel FV.....	9
3.1.1.1. Caso A	9
3.1.1.2. Caso B	10
3.1.2. Viento soplando por la cara posterior al panel FV.....	12
3.1.2.1. Caso A	12
3.1.2.2. Caso B	14
3.1.3. Síntesis cargas de viento	16
3.2. Escenario 2: Cargas por acción de sismos.	17
3.2.1. Sismo vertical.....	17
3.2.1.1. Fuerza actuando hacia arriba.	17
3.2.1.2. Fuerza actuando hacia abajo.....	18
3.2.2. Sismo horizontal.....	20
3.2.2.1. Fuerza actuando de izquierda a derecha.	20
3.2.2.2. Fuerza actuando de atrás hacia adelante.....	21
3.2.3. Síntesis cargas sísmicas.....	23
4. CONCLUSIONES	24

1. ANTECEDENTES

Flux Solar SpA. solicita cálculo y análisis estructural para estructura de montaje de paneles fotovoltaicos (FV), en particular la estructura posee el nombre comercial “Pórtico Bulnes”.

La estructura será analizada en base a la normativa chilena vigente las cuáles son:

- NCh 432 – 2010: Diseño estructural – Cargas de viento.
- NCh 433 – Of. 1996, Mod. 2009: Diseño sísmico de edificios.
- NCh 3171 – Diseño estructural – Disposiciones generales y combinaciones de carga.

La configuración de pórtico analizado, ver Figura 1.1, se compone de los siguientes elementos:

- 3 vigas rastrel de 1,145 metros de largo.
- 3 vigas dintel de 1,298 metros de largo.
- 3 vigas pie de 0,666 metros de largo.
- 2 vigas correa de 4,400 metros de largo.

Las solicitaciones de carga a las que está sometida la estructura son las siguientes:

- Peso propio de la estructura base.
- Peso de paneles FV.
- Carga de viento genéricas.
- Cargas sísmicas genéricas.

Las dimensiones, geometría y disposición de la estructura son datos proporcionados por Flux Solar SpA., así como los pesos de los paneles FV.

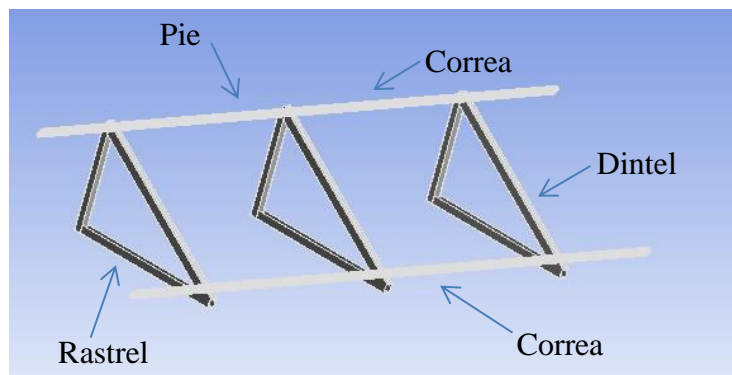


Figura 1.1: Pórtico Bulnes analizado.

2. ANÁLISIS ESTRUCTURAL

2.1. Modelo 3D de la estructura.

En las Figuras 2.1 a 2.2 se muestran las vistas en planta y lateral de la estructura analizada, respectivamente.

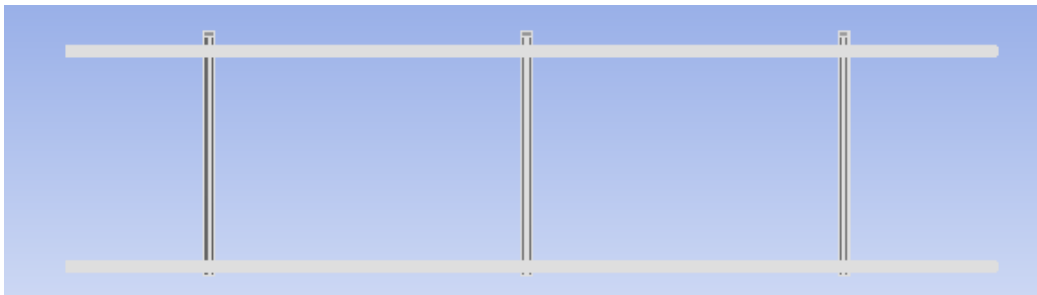


Figura 2.1: Vista en planta de la estructura.

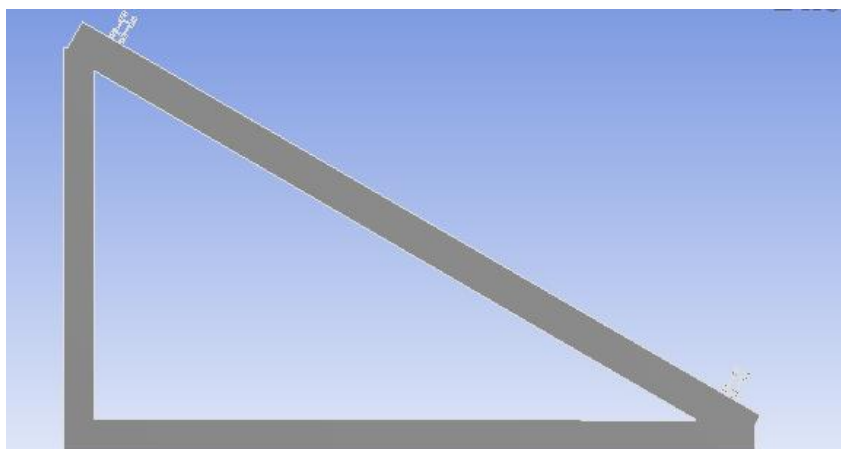


Figura 2.2: Vista en elevación de la estructura.

2.2. Material de la estructura.

El material de las vigas en la estructura analizada corresponde a uno de los tipos de aleación de aluminio, para el cual se resumen sus propiedades mecánicas en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1: Propiedades mecánicas del material de la estructura.

Material	Designación	Densidad [kg/m ³]	Módulo Elástico [GPa]	Módulo de Corte [GPa]	Coefficiente Poisson [-]	Esfuerzo Fluencia [MPa]	Resistencia Tracción [MPa]
Aluminio	6061-T6	2770	71	27	0,33	280	310

2.3. Cargas de diseño.

Tal como se menciona en el Capítulo 1, las cargas de diseño a considerar son descritas a continuación:

2.3.1. Peso estructura

La estructura debe soportar su peso propio, para lo cual se considera la densidad mostrada en la Tabla 2.1, el volumen dado por la geometría de la estructura y una aceleración de gravedad de $-9,8 \text{ [m/s}^2\text{]}$.

2.3.2. Paneles Fotovoltaicos:

La estructura analizada, posee 4 paneles FV de $26,8 \text{ [kg] c/u}$, los que son soportados por los perfiles correa de la estructura. De acuerdo a la Figura 2.3, y posterior al análisis de fuerzas mediante leyes de Newton, se determina que las reacciones R_1 y R_2 en las correas son iguales a 294 [N] .

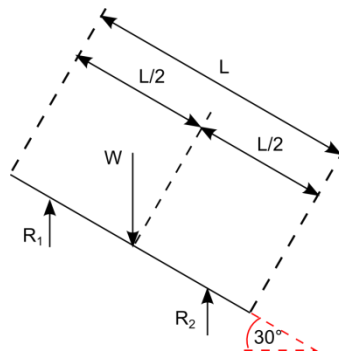


Figura 2.3: Diagrama de cuerpo libre, acción del peso de los paneles FV.

2.3.3. Cargas provocadas por el viento:

Las cargas de viento son calculadas de acuerdo a la norma NCh 432–2010, la cual determina como se debe considerar la acción de éste en el cálculo de construcciones.

En particular, este estudio tiene como finalidad realizar una estimación nominal bajo estándares de diseño conservadores, los que validan la implementación de éste sistema en diferentes puntos de Chile, sin embargo, para cada instalación se deberá realizar un estudio particular considerando el entorno y otros componentes aledaños.

Este estudio, utiliza los siguientes criterios de diseño iniciales:

- Velocidad del viento, $v=40$ m/s (144 km/h).
- Instalación a 30m de altura.

De acuerdo a lo anterior, la norma indica el cálculo bajo dos situaciones, que a su vez se dividen en dos casos, ver Figura 2.4:

- Situación 1: Viento soplando de frente al panel FV:
 - Caso A: Carga uniforme sobre el panel FV.
 - Caso B: Carga variable sobre el panel FV (mayor en mitad superior).
- Situación 2: Viento soplando por la cara posterior al panel FV:
 - Caso A: Carga uniforme sobre el panel FV.
 - Caso B: Carga variable sobre el panel FV (mayor en mitad superior).

En general la situación 2, también puede ser analizado como viento succionando el panel de sus apoyos.

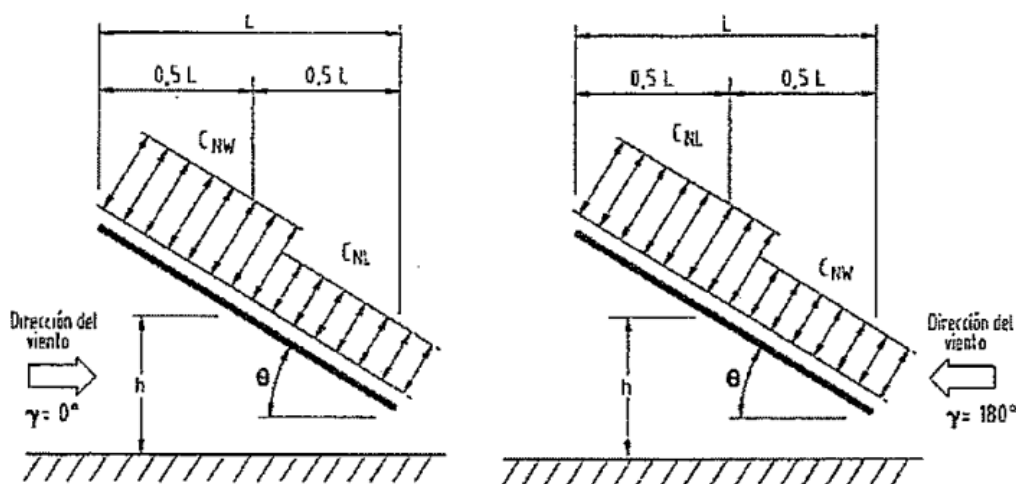


Figura 2.4: Casos de cálculo de acción del viento [NCh 432–2010, pág 68].

Así, las cargas asociadas a cada evento por acción del viento se resumen en la Tabla 2.2:

Tabla 2.2: Cargas producto del viento expresadas en $[N/m^2]$, de acuerdo a NCh 432–2010.

Situación 1				Situación 2			
Caso A		Caso B		Caso A		Caso B	
Superior	Inferior	Superior	Inferior	Superior	Inferior	Superior	Inferior
11626	5110	6990	7355	-9965	-4380	-12023	68

2.3.4. Cargas sísmicas

Las cargas de sísmicas en este proyecto son calculadas de acuerdo a la norma NCh 433 – Of. 1996, Mod. 2010, la cual determina como se deben considerar sismos verticales y horizontales.

En particular, este estudio tiene como finalidad realizar una estimación nominal bajo estándares de diseño conservadores, los que validan la implementación de éste sistema en diferentes puntos de Chile, sin embargo, para cada instalación se deberá realizar un estudio particular considerando el entorno y otros componentes aledaños.

Las situaciones indicadas en la norma indican que se debe evaluar la componente de fuerza en ambas direcciones una vez se haya elegido el eje de cálculo.

En particular, las cargas obtenidas de la norma son las siguientes:

- Fuerza vertical: 335,4 [N]
- Fuerza horizontal: 2973,6 [N]

2.4. Condiciones de borde

Se fija el desplazamiento de las 3 direcciones cartesianas en ambos extremos de cada rastrel, ver Figura 2.5.

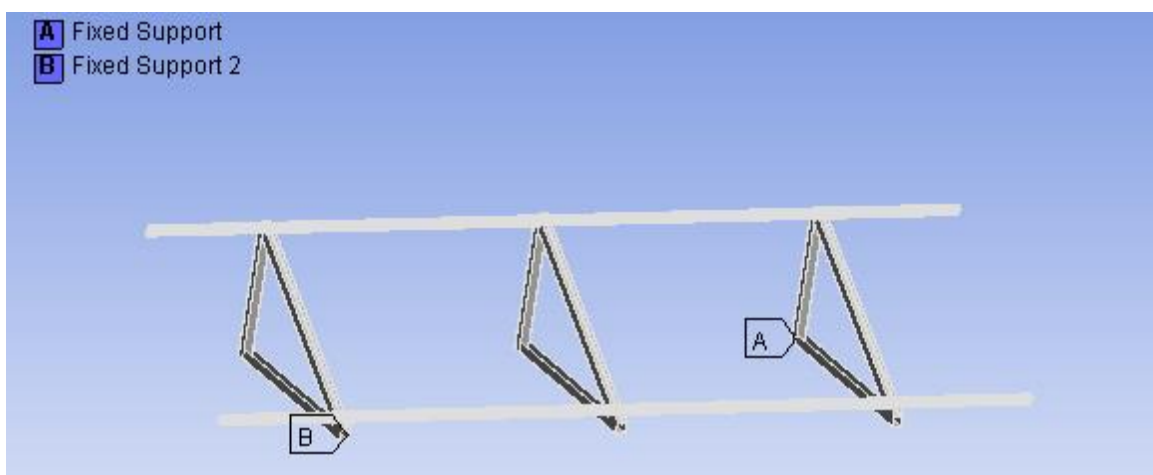


Figura 2.5: Fijaciones de la estructura.

2.5. Mallado

El modelo se malla con elementos volumétricos, donde las vigas correas se mallan con elementos mas pequeños que dintel, rastrel y pie, debido a su geometría compleja. En la Figura 2.7 se aprecia el mallado empleado en la estructura.

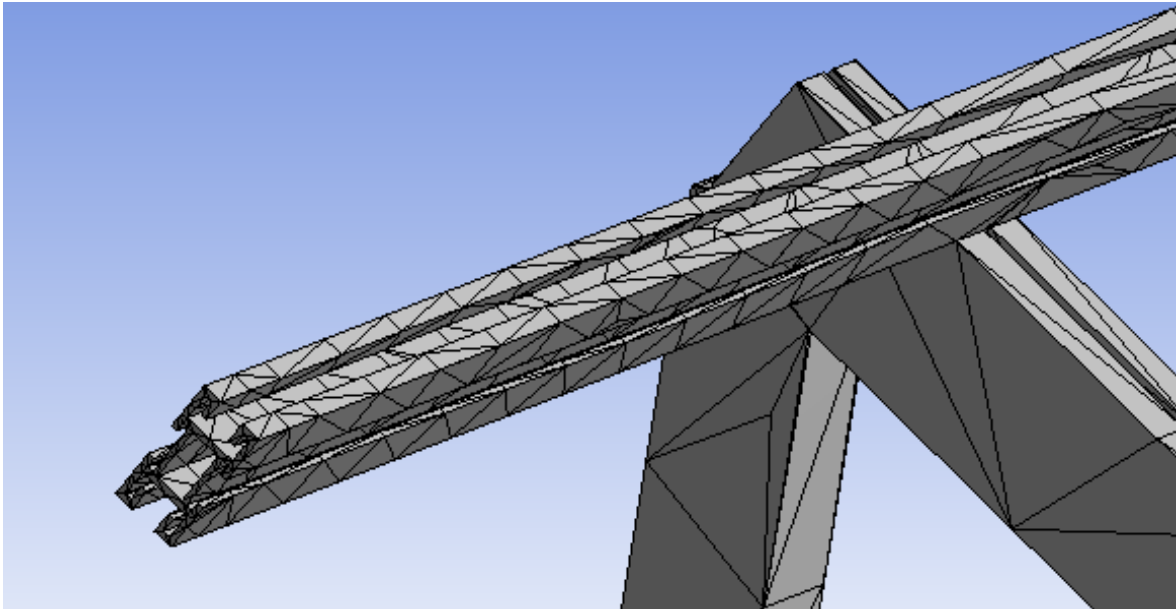


Figura 2.6: Detalle del mallado empleado en el cálculo.

2.6. Sistema coordenado de la estructura.

Para referencias del cálculo de reacciones, en la Figura 2.7 se presenta la estructura junto a sus ejes cartesianos.

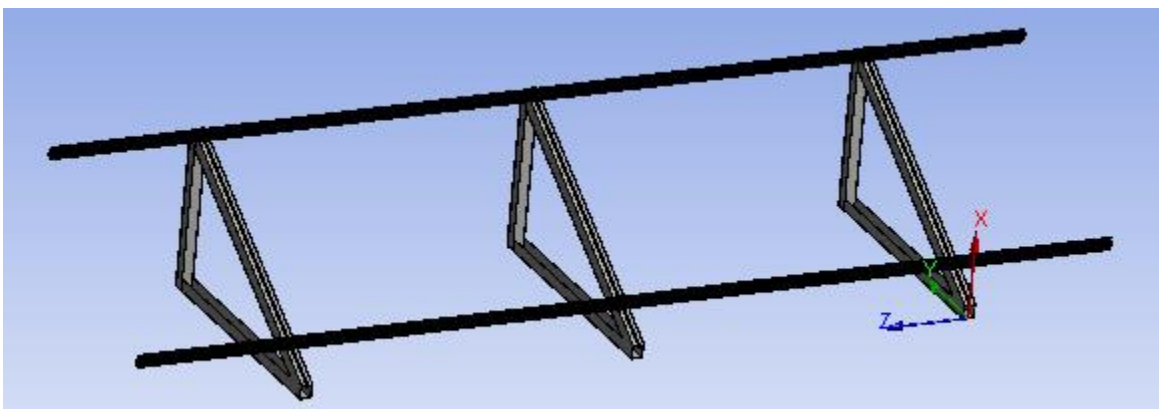


Figura 2.7: Sistema coordenado de la estructura.

2.7. Casos de carga.

De acuerdo a la NCh 3171–2010, no es necesario analizar de forma simultánea las cargas de viento y sismo, por tanto, en este estudio los niveles de esfuerzo y deformación en la estructura son determinados para cada escenario tomando las consideraciones descritas en 2.3.3 y 2.3.4 de viento y sismo respectivamente, siendo:

- Escenario 1: Cargas por acción del viento.
- Escenario 2: Cargas por eventos sísmicos.

3. RESULTADOS

3.1. Escenario 1: Cargas por acción del viento.

3.1.1. Viento soplando de frente al panel FV.

3.1.1.1. Caso A

En la Figura 3.1, se muestran las cargas y condiciones de borde aplicadas para el cálculo del caso A. Luego en la Figura 3.2 se muestran los esfuerzos equivalentes de Von Mises que se generan en la estructura a partir de las cargas simuladas y en la Figura 3.3, el nivel de deformación total equivalente de la estructura.

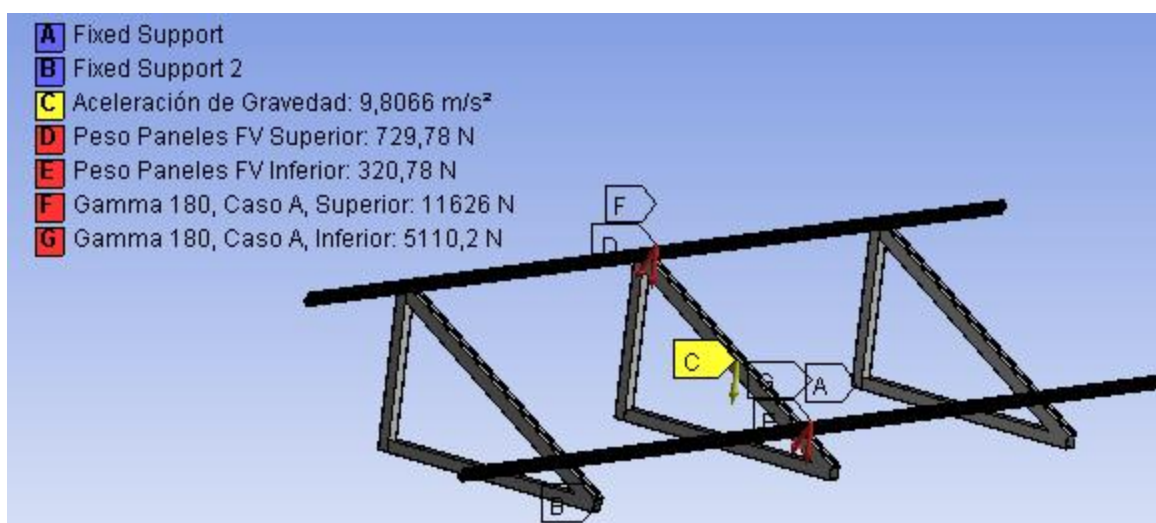


Figura 3.1: Condiciones de borde y cargas para el caso A.

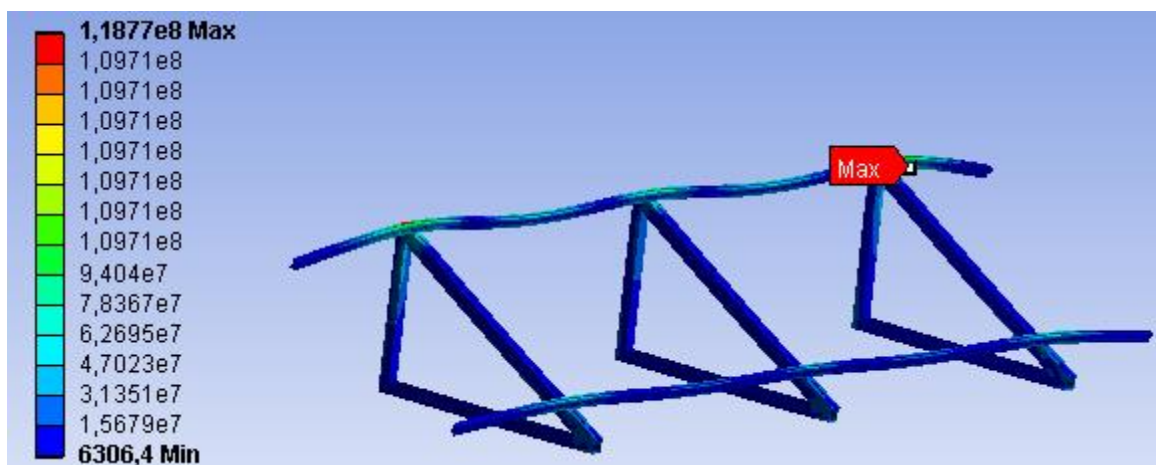


Figura 3.2: Esfuerzos equivalentes de Von Mises para el caso A [Pa].

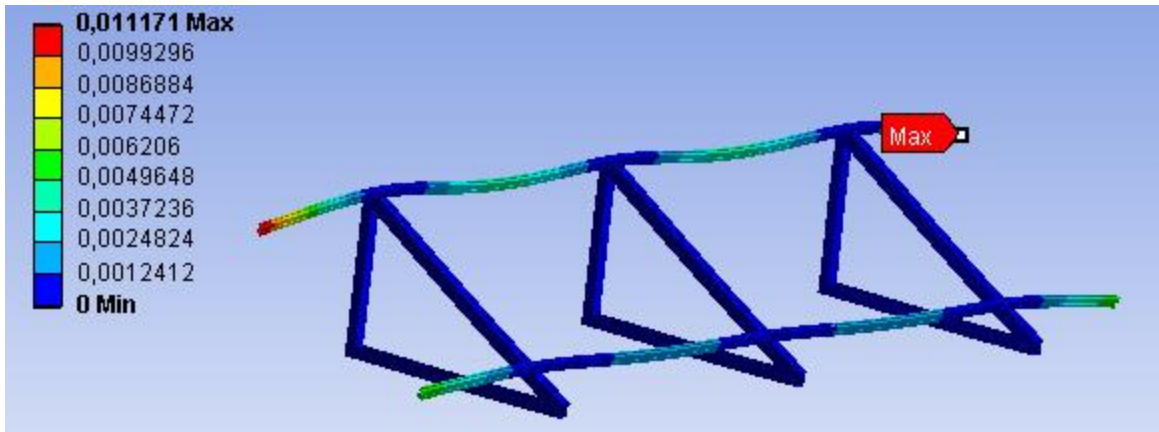


Figura 3.3: Deformación total equivalente de la estructura para el caso A [m].

En la Tabla 3.1, se presentan las reacciones en los soportes generadas para este caso.

Tabla 3.1: Reacciones en caso de carga A de escenario N°1.

Lado Correa Superior					
Fx [N]	Fy [N]	Fz [N]	Mx [Nm]	My [Nm]	Mz [Nm]
13752	-1679,9	-0,29	2,19	0,95	2,6e-4
Total [N]			Total [Nm]		
13854			2,4		
Lado Correa Inferior					
Fx [N]	Fy [N]	Fz [N]	Mx [Nm]	My [Nm]	Mz [Nm]
1992,9	-6688	0,29	-1,86	-0,95	-983,5
Total [N]			Total [Nm]		
6979			983,5		

3.1.1.2. Caso B

En la Figura 3.4, se muestran las cargas y condiciones de borde aplicadas para el cálculo del caso B. Luego en la Figura 3.5 se muestran los esfuerzos equivalentes de Von Mises que se generan en la estructura a partir de las cargas simuladas y en la Figura 3.6, el nivel de deformación total equivalente de la estructura.

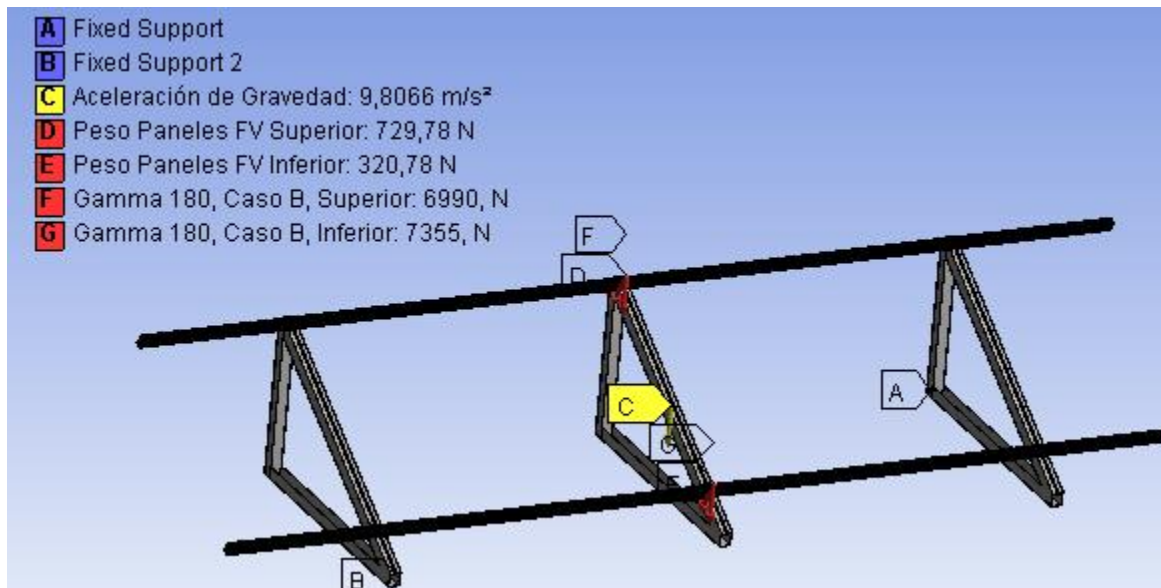


Figura 3.4: Condiciones de borde y cargas para el caso B.

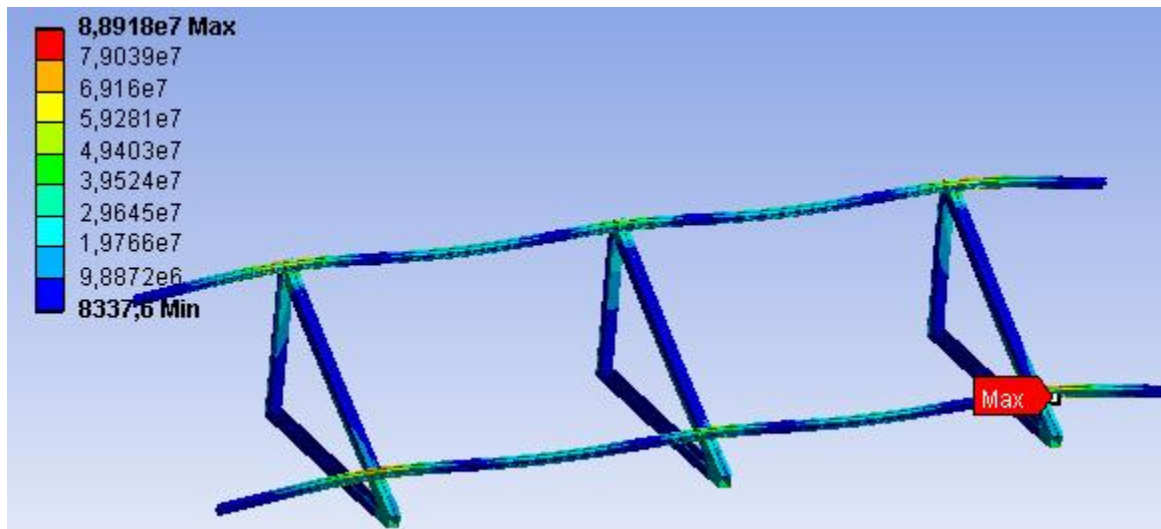


Figura 3.5: Esfuerzos equivalentes de Von Mises para el caso B [Pa].

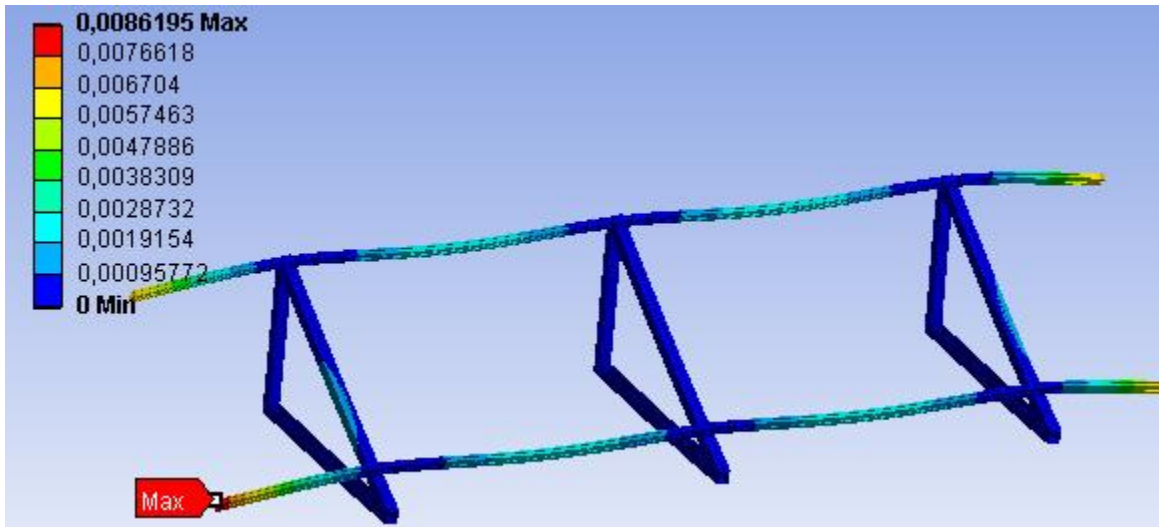


Figura 3.6: Deformación total equivalente de la estructura para el caso B [m].

En la Tabla 3.2, se presentan las reacciones en los soportes generadas para este caso.

Tabla 3.2: Reacciones en caso de carga B de escenario N°1.

Lado Correa Superior					
Fx [N]	Fy [N]	Fz [N]	Mx [Nm]	My [Nm]	Mz [Nm]
8838	-1141,2	3,47e-3	1,52	0,98	1,69e-4
Total [N]			Total [Nm]		
8911,3			1,81		
Lado Correa Inferior					
Fx [N]	Fy [N]	Fz [N]	Mx [Nm]	My [Nm]	Mz [Nm]
4836,8	-6031,3	-3,5e-3	-1,52	-0,98	-1232,5
Total [N]			Total [Nm]		
7731,2			1232,5		

3.1.2. Viento soplando por la cara posterior al panel FV.

3.1.2.1. Caso A

En la Figura 3.7, se muestran las cargas y condiciones de borde aplicadas para el cálculo del caso A. Luego en la Figura 3.8 se muestran los esfuerzos equivalentes de Von Mises que se generan en la estructura a partir de las cargas simuladas y en la Figura 3.9, el nivel de deformación total equivalente de la estructura.

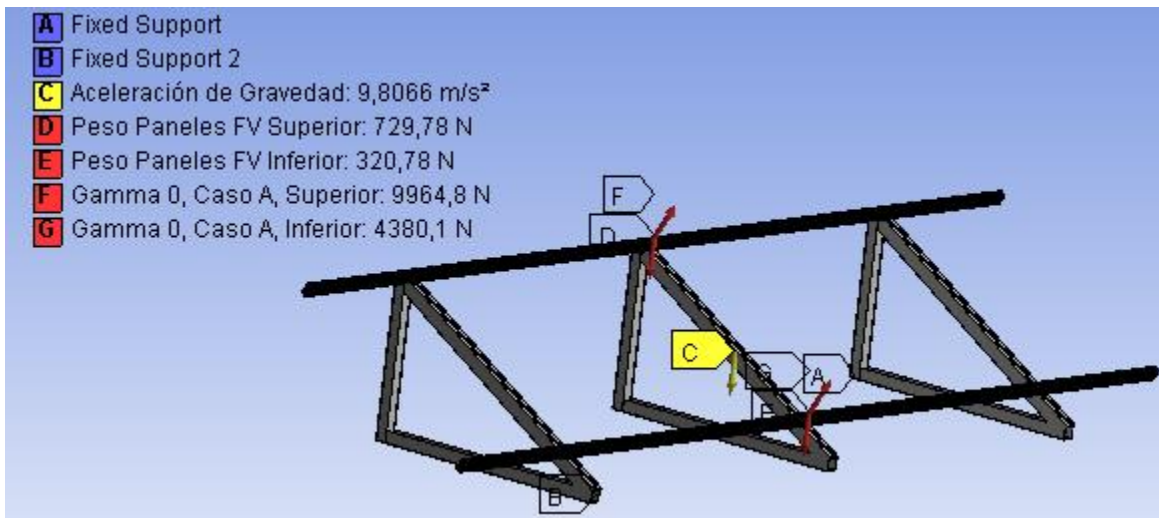


Figura 3.7: Condiciones de borde y cargas para el caso A.

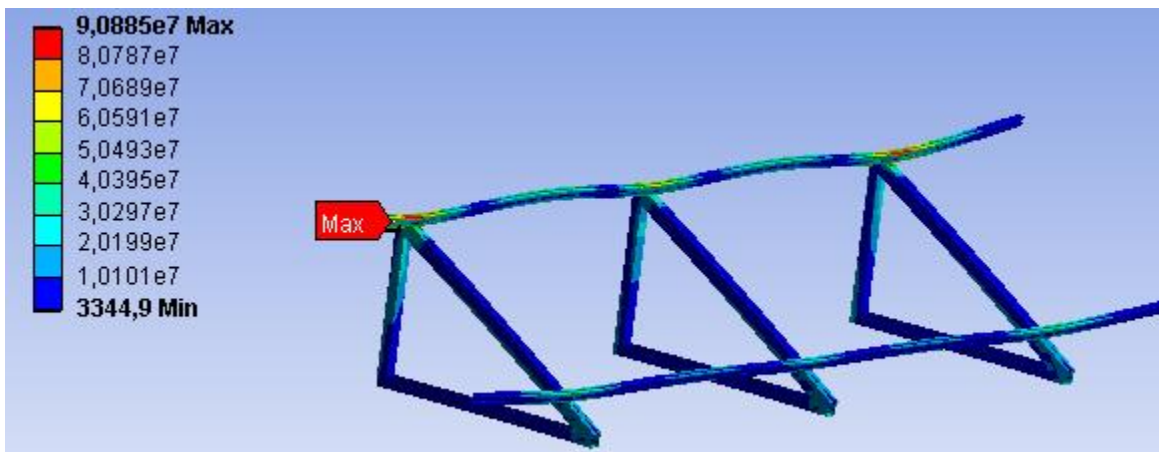


Figura 3.8: Esfuerzos equivalentes de Von Mises para el caso A [Pa].

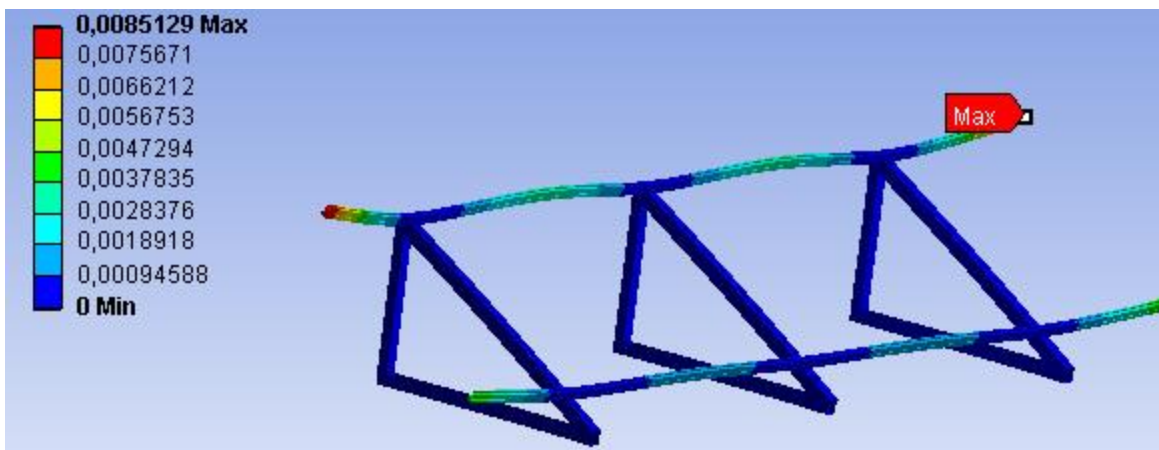


Figura 3.9: Deformación total equivalente de la estructura para el caso A [m].

En la Tabla 3.3, se presentan las reacciones en los soportes generadas para este caso.

Tabla 3.3: Reacciones en caso de carga A de escenario N°2.

Lado Correa Superior					
Fx [N]	Fy [N]	Fz [N]	Mx [Nm]	My [Nm]	Mz [Nm]
-10350	1276,70	0,22	-1,52	-0,55	-1,97
Total [N]			Total [Nm]		
10428			2,5		
Lado Correa Inferior					
Fx [N]	Fy [N]	Fz [N]	Mx [Nm]	My [Nm]	Mz [Nm]
-821,58	5895,80	-0,22	1,27	0,55	746,72
Total [N]			Total [Nm]		
5953			746,72		

3.1.2.2. Caso B

En la Figura 3.10, se muestra las cargas y condiciones de borde aplicadas para el cálculo del caso B. Luego en la Figura 3.11 se muestran los esfuerzos equivalentes de Von Mises que se generan en la estructura a partir de las cargas simuladas y en la Figura 3.12, el nivel de deformación total equivalente de la estructura.

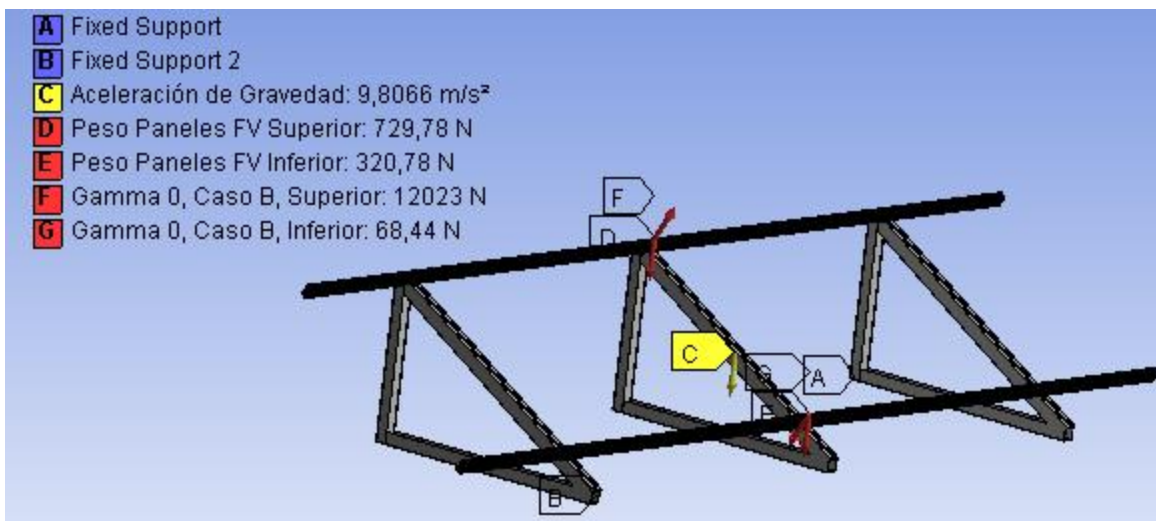


Figura 3.10: Condiciones de borde y cargas para el caso B.

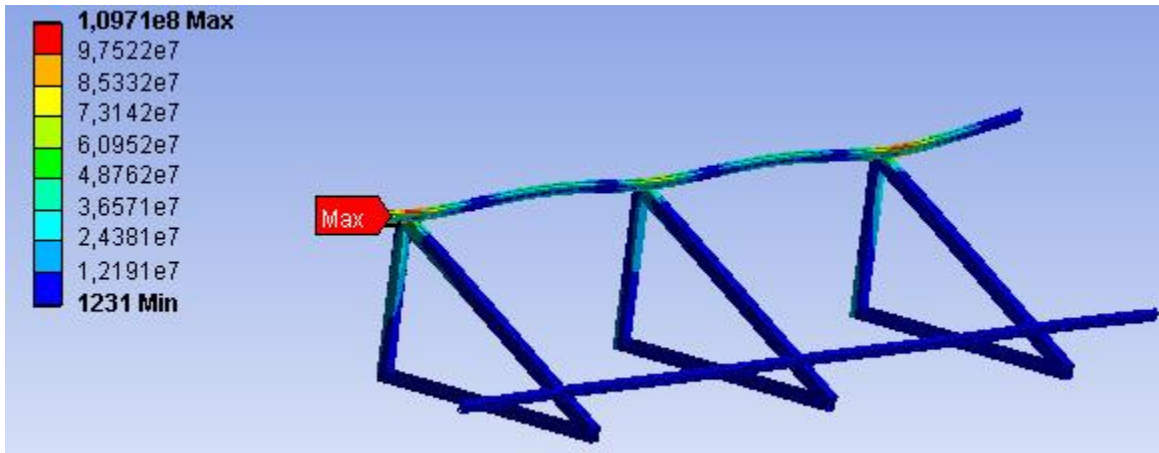


Figura 3.11: Esfuerzos equivalentes de Von Mises para el caso B [Pa].

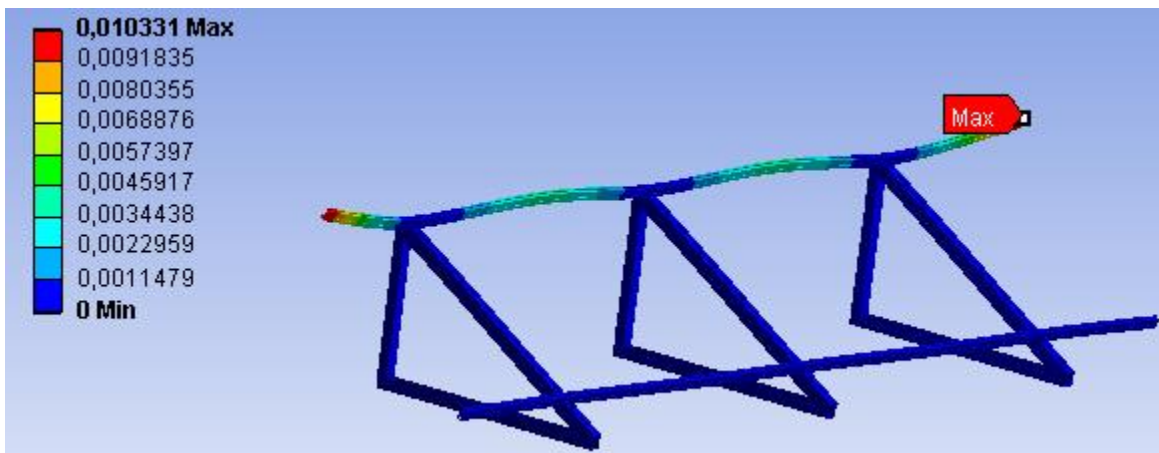


Figura 3.12: Deformación total equivalente de la estructura para el caso B [m].

En la Tabla 3.4, se presentan las reacciones en los soportes generadas para este caso.

Tabla 3.4: Reacciones en caso de carga B de escenario N°2.

Lado Correa Superior					
Fx [N]	Fy [N]	Fz [N]	Mx [Nm]	My [Nm]	Mz [Nm]
-12321	1438,4	0,49	-1,72	-0,26	-2,35e-4
Total [N]			Total [Nm]		
12405			1,74		
Lado Correa Inferior					
Fx [N]	Fy [N]	Fz [N]	Mx [Nm]	My [Nm]	Mz [Nm]
3220,40	4538,70	-0,49	1,15	0,25	136,03
Total [N]			Total [Nm]		
5419			136,04		

3.1.3. Síntesis cargas de viento

Tabla 3.5: Esfuerzos y desplazamientos máximo en cada caso de cargas de viento analizado.

	Viento sopla frente a FV		Viento sopla por detrás de FV	
	Caso A	Caso B	Caso A	Caso B
Esfuerzo	119 [MPa]	89 [MPa]	91 [MPa]	110 [MPa]
Desplazamiento	0,01 [m]	0,009 [m]	0,01	0,01 [m]

Los esfuerzos máximos en general, se sitúan en zonas de unión entre dintel y correa. Pero en ningún caso superando los límites del material.

Los resultados obtenidos, ver Tabla 3.5, muestran que la estructura es apta para soportar de forma íntegra vientos de hasta 140 [km/h] a una altura de hasta 30 metros.

Comparando con la tabla 2.1, se determina que la estructura está por debajo de los límites de fluencia y por ende muy por debajo del límite de ruptura del material. En esta condición se alcanza un factor de seguridad a la ruptura de:

$$FS = \frac{\sigma_r}{\sigma_{m\acute{a}x}} = \frac{310}{119} = 2,6$$

Además, los niveles de desplazamiento máximos en la estructura son menores a 10 [mm], lo cual es despreciable dado el tamaño de la estructura y las cargas a las que está siendo solicitada.

3.2. Escenario 2: Cargas por acción de sismos.

3.2.1. Sismo vertical.

3.2.1.1. Fuerza actuando hacia arriba.

En la Figura 3.13, se muestra las cargas y condiciones de borde aplicadas para el cálculo del caso B. Luego en la Figura 3.14 se muestran los esfuerzos equivalentes de Von Mises que se generan en la estructura a partir de las cargas simuladas y en la Figura 3.15, el nivel de deformación total equivalente de la estructura.

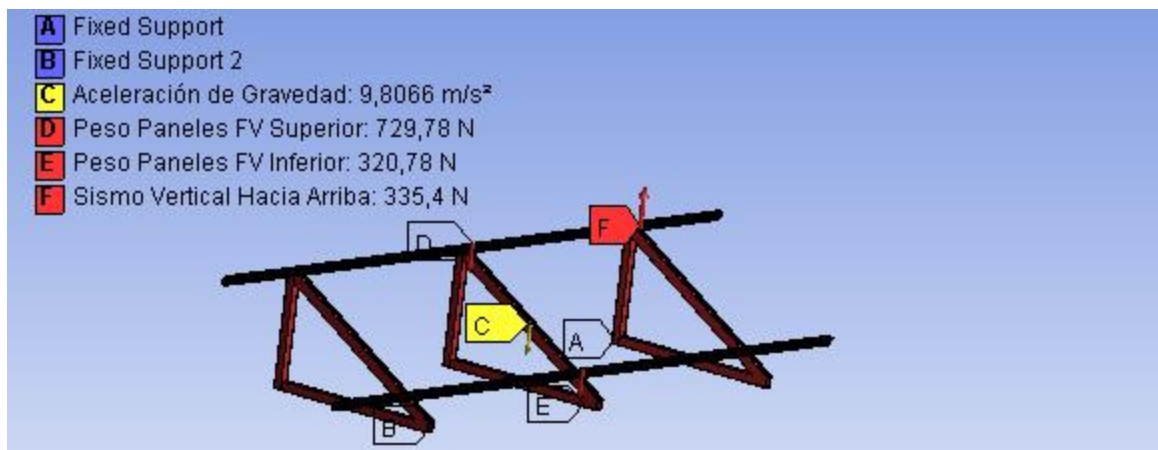


Figura 3.13: Condiciones de borde y cargas para sismo vertical hacia arriba.

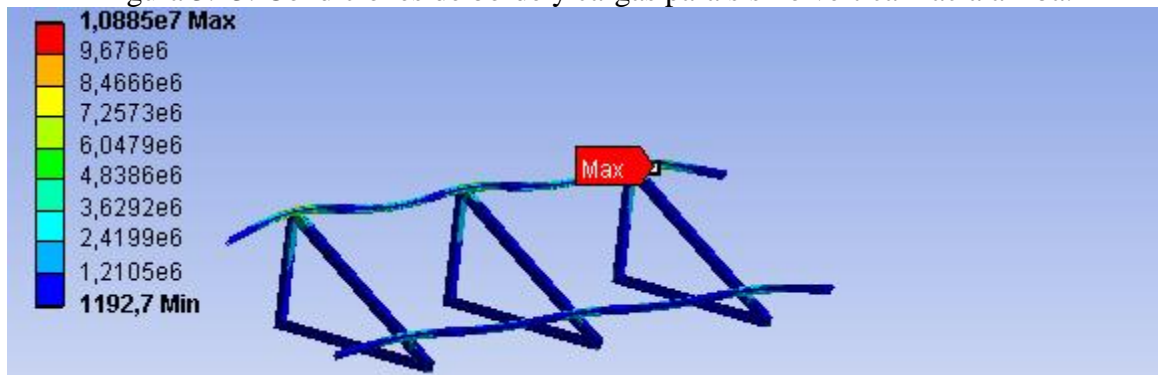


Figura 3.14: Esfuerzos equivalentes de Von Mises para sismo vertical hacia arriba [Pa].

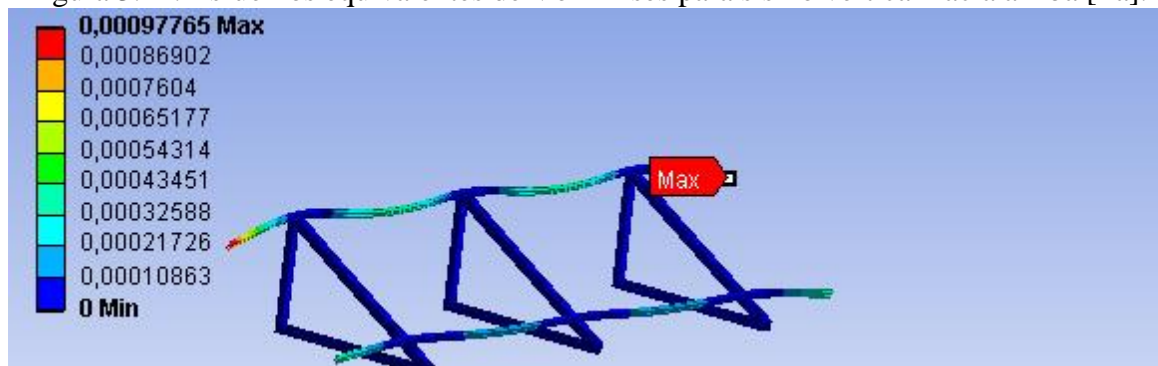


Figura 3.15: Deformación total equivalente de estructura sismo vertical hacia arriba [m].

En la Tabla 3.6, se presentan las reacciones en los soportes generadas para este caso.

Tabla 3.6: Reacciones en caso de carga sísmica vertical hacia arriba.

Lado Correa Superior					
Fx [N]	Fy [N]	Fz [N]	Mx [Nm]	My [Nm]	Mz [Nm]
602,81	-51,25	-7,61e-3	0,11	0,11	1,15e-5
Total [N]			Total [Nm]		
605			0,15		
Lado Correa Inferior					
Fx [N]	Fy [N]	Fz [N]	Mx [Nm]	My [Nm]	Mz [Nm]
313,43	51,25	7,61e-3	-0,10	-0,11	-30,16
Total [N]			Total [Nm]		
318			30,16		

3.2.1.2. Fuerza actuando hacia abajo.

En la Figura 3.16, se muestra las cargas y condiciones de borde aplicadas para el cálculo del caso B. Luego en la Figura 3.17 se muestran los esfuerzos equivalentes de Von Mises que se generan en la estructura a partir de las cargas simuladas y en la Figura 3.18, el nivel de deformación total equivalente de la estructura.

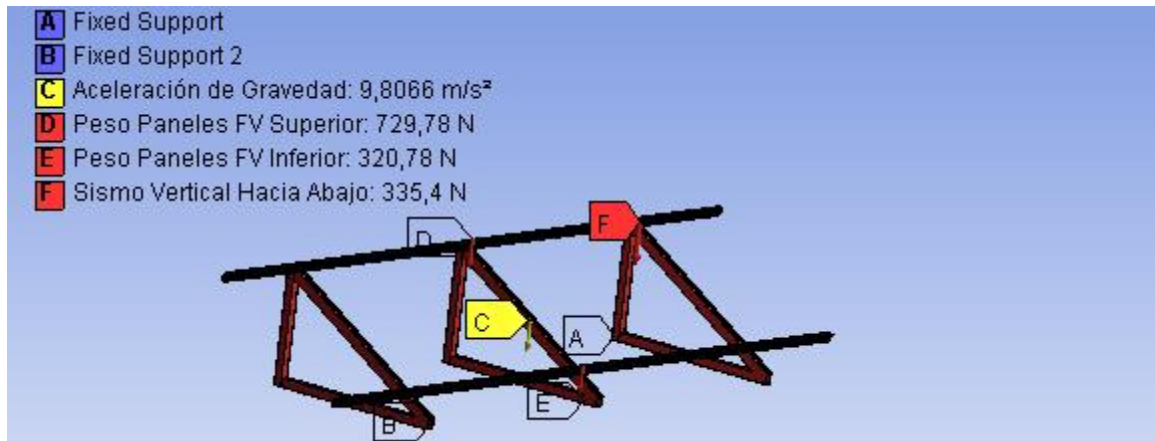


Figura 3.16: Condiciones de borde y cargas para sismo vertical hacia abajo.

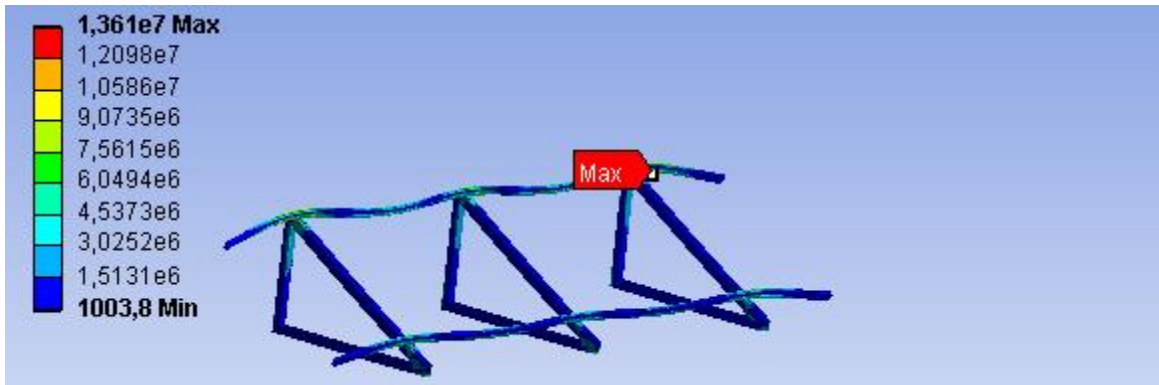


Figura 3.17: Esfuerzos equivalentes de Von Mises para sismo vertical hacia abajo [Pa].

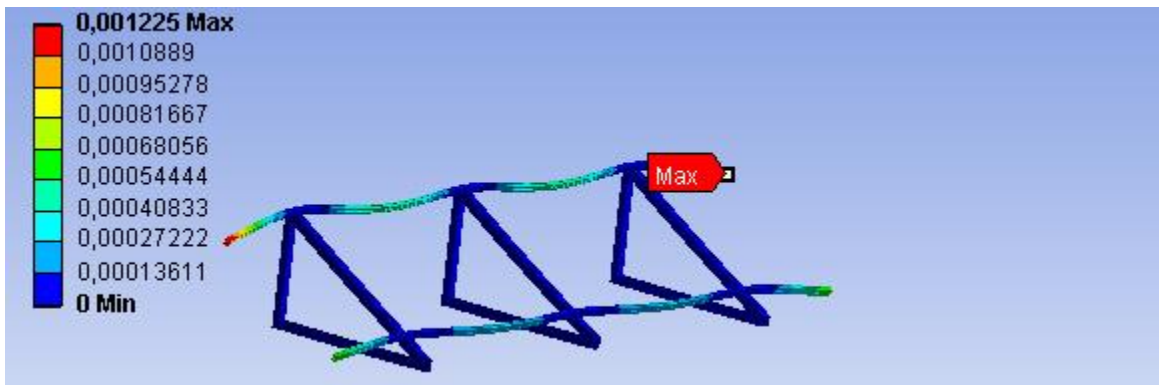


Figura 3.18: Deformación total equivalente de estructura en sismo vertical hacia abajo [m].

En la Tabla 3.7, se presentan las reacciones en los soportes generadas para este caso.

Tabla 3.7: Reacciones en caso de carga sísmica hacia abajo.

Lado Correa Superior					
Fx [N]	Fy [N]	Fz [N]	Mx [Nm]	My [Nm]	Mz [Nm]
945,65	-124,54	-2,52e-2	0,28	0,17	1,80e-5
Total [N]			Total [Nm]		
954			0,33		
Lado Correa Inferior					
Fx [N]	Fy [N]	Fz [N]	Mx [Nm]	My [Nm]	Mz [Nm]
641,39	124,54	2,52e-2	-0,25	-0,18	-73,53
Total [N]			Total [Nm]		
653			73,53		

3.2.2. Sismo horizontal.

3.2.2.1. Fuerza actuando de izquierda a derecha.

En la Figura 3.19, se muestra las cargas y condiciones de borde aplicadas para el cálculo del caso B. Luego en la Figura 3.20 se muestran los esfuerzos equivalentes de Von Mises que se generan en la estructura a partir de las cargas simuladas y en la Figura 3.21, el nivel de deformación total equivalente de la estructura.

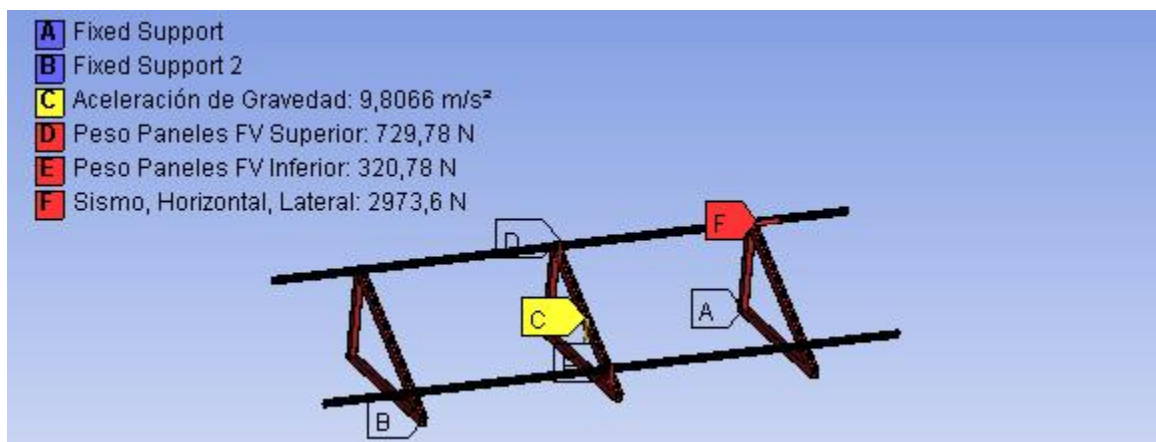


Figura 3.19: Condiciones de borde y cargas en sismo horizontal lateral.

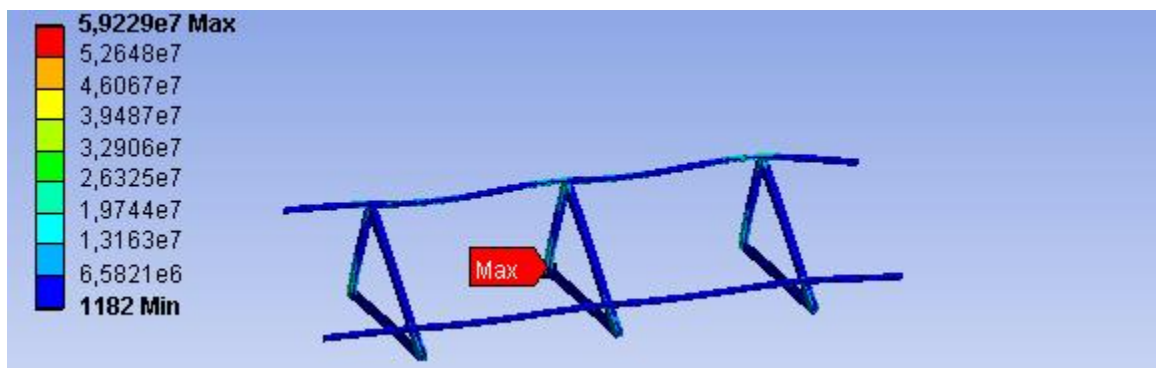


Figura 3.20: Esfuerzos equivalentes de Von Mises en sismo horizontal lateral [Pa].

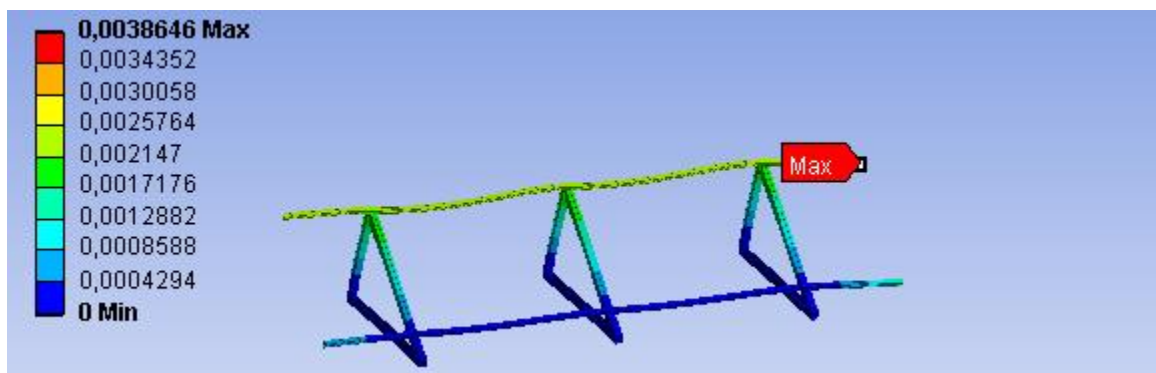


Figura 3.21: Deformación total equivalente de estructura en sismo horizontal lateral [m].

En la Tabla 3.8, se presentan las reacciones en los soportes generadas para este caso.

Tabla 3.8: Reacciones en caso de carga sísmica horizontal lateral.

Lado Correa Superior					
Fx [N]	Fy [N]	Fz [N]	Mx [Nm]	My [Nm]	Mz [Nm]
774,53	-87,83	1546,1	-122,59	-765,97	1,48e-5
Total [N]			Total [Nm]		
1731			776		
Lado Correa Inferior					
Fx [N]	Fy [N]	Fz [N]	Mx [Nm]	My [Nm]	Mz [Nm]
477,11	87,83	1427,4	280,02	-259,23	-51,50
Total [N]			Total [Nm]		
1508			385		

3.2.2.2. Fuerza actuando de atrás hacia adelante.

En la Figura 3.22, se muestra las cargas y condiciones de borde aplicadas para el cálculo del caso B. Luego en la Figura 3.23 se muestran los esfuerzos equivalentes de Von Mises que se generan en la estructura a partir de las cargas simuladas y en la Figura 3.24, el nivel de deformación total equivalente de la estructura.

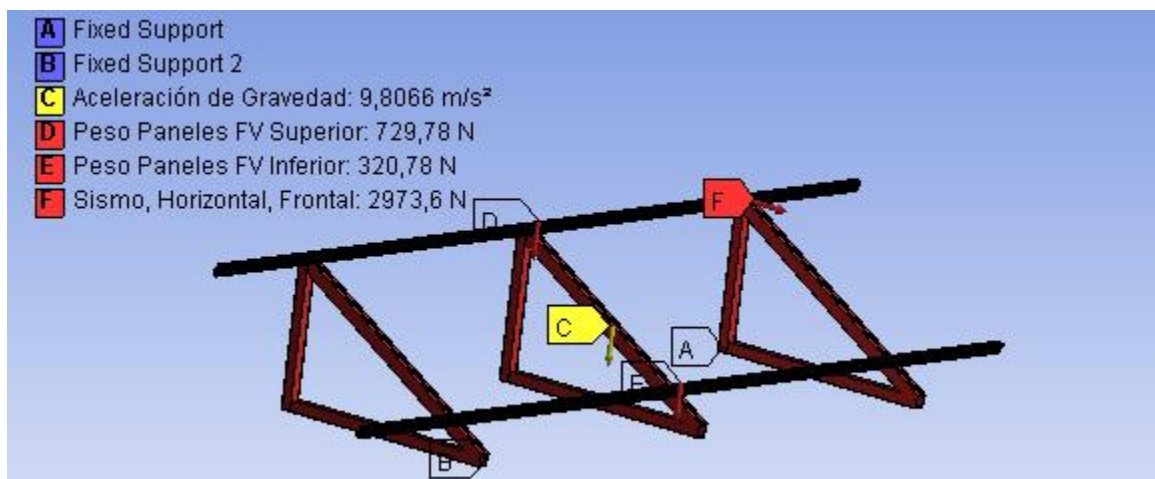


Figura 3.22: Condiciones de borde y cargas para sismo horizontal frontal.

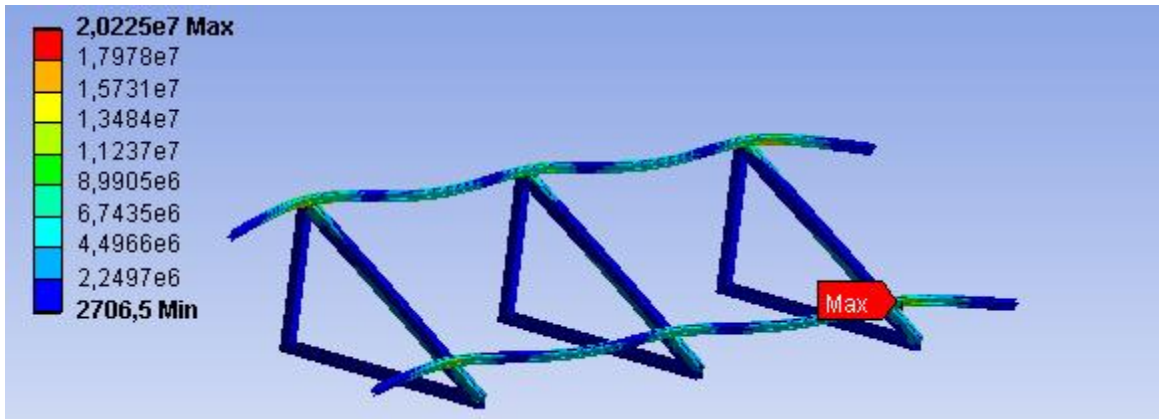


Figura 3.23: Esfuerzos equivalentes de Von Mises para sismo horizontal frontal [Pa].

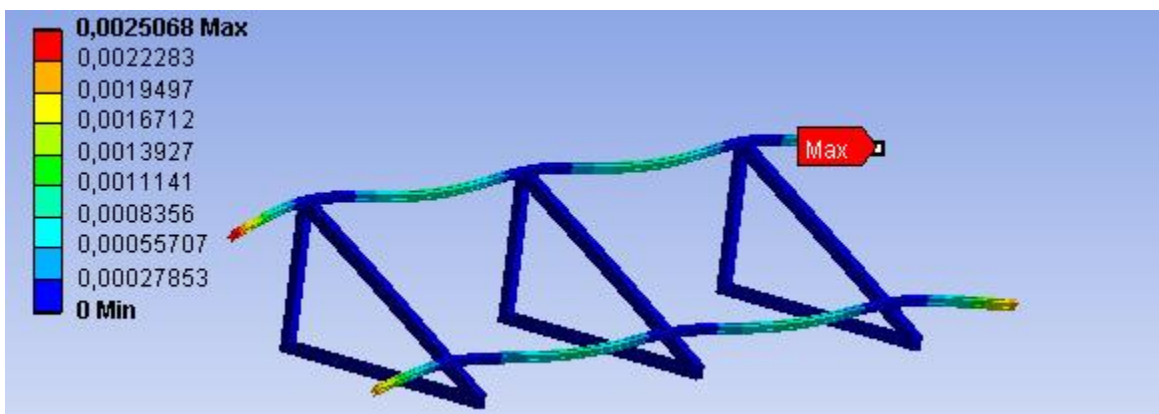


Figura 3.24: Deformación total equivalente de estructura en sismo horizontal frontal [m].

En la Tabla 3.9, se presentan las reacciones en los soportes generadas para este caso.

Tabla 3.9: Reacciones en caso de carga sísmica horizontal frontal.

Lado Correa Superior					
Fx [N]	Fy [N]	Fz [N]	Mx [Nm]	My [Nm]	Mz [Nm]
27,24	283,1	-2,17e-2	-0,13	0,24	5,20e-7
Total [N]			Total [Nm]		
284			0,27		
Lado Correa Inferior					
Fx [N]	Fy [N]	Fz [N]	Mx [Nm]	My [Nm]	Mz [Nm]
1224,4	2690,5	2,17e-2	0,21	-0,25	101,34
Total [N]			Total [Nm]		
2956			101,34		

3.2.3. Síntesis cargas sísmicas

Tabla 3.10: Esfuerzos y desplazamientos máximo en cada caso de cargas sísmicas analizado.

	Sismo vertical		Sismo horizontal	
	Caso A	Caso B	Caso A	Caso B
Esfuerzo	11 [MPa]	14 [MPa]	59 [MPa]	20 [MPa]
Desplazamiento	0,001 [m]	0,001 [m]	0,004	0,003 [m]

En general, y al igual que los esfuerzos obtenidos de cargas de viento, los esfuerzos máximos sísmicos en general, se sitúan en zonas de unión entre dintel y correa. Pero en ningún caso superando los límites del material.

Los resultados obtenidos, ver Tabla 3.10, muestran que la estructura es apta para soportar de forma íntegra cargas de sismos calculados de acuerdo a NCh 433-Of 1996.

Comparando con la tabla 2.1, se determina que la estructura está por debajo de los límites de fluencia y por ende muy por debajo del límite de ruptura del material. En esta condición se alcanza un factor de seguridad a la ruptura de:

$$FS = \frac{\sigma_r}{\sigma_{m\acute{a}x}} = \frac{310}{59} = 5,3$$

Además, los niveles de desplazamiento máximos en la estructura son menores a 4 [mm], lo cual es despreciable dado el tamaño de la estructura y las cargas a las que está siendo solicitada.

4. CONCLUSIONES

Se determina que la estructura es capaz de aguantar vientos de hasta 140 km/h a unos 30 metros de altura de la superficie. Además las cargas sísmicas generan esfuerzos muy por debajo de los límites de fluencia y/o ruptura,

Se verifica también que la estructura es capaz de soportar sismos de distintas magnitudes sin ver comprometida su integridad estructural.

Los cálculos se hicieron en base a la normativa chilena vigente por medio de los siguientes documentos:

- NCh 432 – 2010: Diseño estructural – Cargas de viento.
- NCh 433 – Of. 1996, Mod. 2009: Diseño sísmico de edificios.
- NCh 3171 – Diseño estructural – Disposiciones generales y combinaciones de carga.

Finalmente, se concluye que la estructura soporta cargas genéricas en base a parámetros conservadores obtenidos de cada norma. Se destaca que, para instalaciones específicas se deben realizar cálculos reales tomando en cuenta los pasos a seguir en cada norma.

Manuel E. Salas Fernández

