

INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DEL SUR DE GUANAJUATO



“Análisis y simulación mecánica de la estructura en la explanada del edificio E del ITSUR”

Opción 2: Titulación Integral – Tesis Profesional

Elaborada por:

Francisco Javier Guzmán Mora

Que presenta para obtener el título de:

INGENIERO EN SISTEMAS AUTOMOTRICES

Asesor:

Dr. J. Eli Eduardo González Durán

“Análisis y simulación mecánica de la estructura en la explanada del edificio E del ITSUR”

Elaborada por:

Francisco Javier Guzmán Mora

Aprobado por..... Dr. José Eli Eduardo González Durán
Docente de la carrera de Ingeniería Electrónica
Asesor de tesis profesional

Revisado por..... M.C. Marco Antonio Martínez Bocanegra
Docente de la carrera de Ingeniería en sistemas automotrices
Revisor de tesis profesional

Revisado por..... M.C. Pedro Duran Reséndiz
Docente de la carrera de Ingeniería en sistemas automotrices
Revisor de tesis profesional



LIBERACIÓN DE PROYECTO PARA LA TITULACIÓN INTEGRAL

Uriangato, Gto., 02/mayo/2023

Asunto: Liberación de proyecto para la titulación integral

M.I José Gabriel Aguilera González
Director Académico
ITSUR
PRESENTE

Por este medio informo que ha sido liberado el siguiente proyecto para la titulación integral:

Table with 2 columns: Carrera (Ingeniería en Sistemas Automotrices) and Núm. de control (T17120138). Rows include student name (Francisco Javier Guzmán Mora), project name (Análisis y simulación mecánica de la estructura en la explanada del edificio E del ITSUR), and product (Tesis Profesional de Residencia Profesional).

Agradezco de antemano su valioso apoyo en esta importante actividad para la formación profesional de nuestras y nuestros egresados.

ATENTAMENTE

Handwritten signature of M.C. Mariano Braulio Sánchez

M.C. Mariano Braulio Sánchez
Jefe de División de Ingeniería en Sistemas Automotrices
ITSUR



Instituto Tecnológico Superior del Sur de Guanajuato
COORDINACIÓN DE INGENIERÍA EN SISTEMAS AUTOMOTRICES

La comisión revisora ha tenido a bien aprobar la reproducción de este trabajo.

Table with 3 columns and 2 rows. Row 1: Signatures of Dr. José Eli Eduardo González Durán, M.C. Marco Antonio Martínez Bocanegra, and M.C. Pedro Duran Reséndiz. Row 2: Roles: Asesor de la Tesis Profesional, Revisor de la Tesis Profesional, and Revisor de la Tesis Profesional.

c.c.p.- Expediente

Julio 2017

DEPARTAMENTO ACADEMICO	CLAVE:11EIT0002E ISA-EGR-EJ2023/25
---------------------------	---------------------------------------

Uriangato, Guanajuato, 03/mayo/2023

Asunto: Aprobación de impresión de trabajo profesional

C. FRANCISCO JAVIER GUZMÁN MORA

P R E S E N T E:

Por medio de este conducto, le comunico a usted que después de haber sido revisado su trabajo bajo la cual se derivó la Monografía Titulada:

“Análisis y simulación mecánica de la estructura en la explanada del edificio E del ITSUR”

La comisión revisora, ha tenido a bien aprobar la impresión de este trabajo.

ATENTAMENTE

*“Excelencia en Educación Tecnológica”
“Tecnología y Calidad para la Vida”*

M.C. Mariano Braulio Sánchez

Jefe de División de Ingeniería en Sistemas Automotrices



Instituto Tecnológico Superior
del Sur de Guanajuato
COORDINACIÓN INGENIERÍA
EN SISTEMAS AUTOMOTRICES

C.c.p Unidad de Servicios Escolares
C.c.p Coordinación de Ingeniería en Sistemas Automotrices
C.C.p Archivo Consecutivo



Ave. Educación Superior No. 2000, Col. Juárez, Uriangato, Guanajuato,
C.P. 38982
Tels. (445) 45 7 74 68 al 71 Ext. *144, e-mail: automotrices@itsur.edu.mx



Agradecimientos.

Querida familia, amigos y maestros.

Con gran emoción y satisfacción, les dedico este trabajo que hoy presento. Sin su apoyo, motivación y enseñanzas, no hubiera sido posible llegar hasta aquí.

A mi familia, gracias por ser mi fuente de inspiración y mi roca inquebrantable en los momentos difíciles. Sus consejos y palabras de aliento me han impulsado a seguir adelante y perseguir mis sueños.

A mis amigos, gracias por ser mi red de apoyo, por sus risas, por sus críticas constructivas y por estar siempre ahí cuando los necesito. Compartir con ustedes momentos de diversión y también de trabajo ha sido fundamental para alcanzar mis metas.

A mis maestros, gracias por su sabiduría, paciencia y dedicación en transmitir sus conocimientos. Sus enseñanzas han sido un gran motor para mi crecimiento académico y personal.

Este trabajo no es solo mío, sino también de todos ustedes. Espero que lo disfruten y lo sientan como un logro conjunto.

Con cariño y agradecimiento para todos ustedes

Tabla de contenido

Capítulo 1	12
Introducción.....	12
Capítulo 2	14
Marco teórico (Antecedentes).....	14
2.1 Análisis Estructural.....	15
2.2 Análisis Térmico.....	19
2.3 Análisis Modal.....	24
Capítulo 3	33
Planteamiento del problema.....	33
3.1. Identificación.....	33
3.2. Justificación.....	33
3.3. Alcance.....	33
3.4. Limitaciones.....	34
Capítulo 4	35
Objetivos.....	35
4.1. Objetivo general.....	35
4.2. Objetivos específicos.....	35
Capítulo 5	36
Metodología.....	36
5.1 Proceso Experimental.....	36
5.2 Proceso de Simulación.....	43
Acoplamiento.....	51
Capítulo 6	58
Resultados.....	58
Resultados Estudio Térmico en Estado Estacionario.....	58
Resultados Estudio Estructural Estático Acoplado al Análisis Térmico.....	58
Resultados Estudio Modal.....	59
Capítulo 7	60
Análisis de Resultados.....	60

Estudio Térmico en Estado Estacionario	60
Estudio Estructural Estático Acoplado al Análisis Térmico	62
Estudio Modal	64
Capítulo 8	74
Conclusiones	74
Referencias	75
Anexos	77
anexo A.....	77
anexo B.....	78

Índice de Figuras

Figura 1: Nodos y elementos de la malla.	14
Figura 2: Esfuerzo de compresión.	18
Figura 3: Esfuerzo de tensión.	18
Figura 4: Esfuerzo de Torsión.....	18
Figura 5: Esfuerzo de flexión.	19
Figura 6: Representación de la conductividad Térmica.....	22
Figura 7: Pistola de temperatura ZK-78S.....	23
Figura 8: Amplitud.....	28
Figura 9: Sistema de ejes lineales.	28
Figura 10: Sensor de aceleración ADXL203	30
Figura 11: Dispositivo de adquisición de datos DAQ 6011.....	32
Figura 12: Numeración de cristales por fila y columna.....	36
Figura 13: Medición con pistola térmica ZK-78S.....	37
Figura 14: Grafica día más caluroso.....	37
Figura 15: Posición de acelerómetros.....	38
Figura 16: Interfaz de frecuencias en LABVIEW: a) frecuencia eje x; b) frecuencia eje y; c) frecuencia eje z.....	39
Figura 17: Frecuencias en el eje X.....	40
Figura 18: Frecuencias en el eje Y.....	40
Figura 19: Frecuencias en el eje Z.....	40
Figura 20: Posición y distancias de los elementos estructurales.....	41
Figura 21: Modelo CAD de los elementos que conforman la estructura: a) columna; b) cuadrícula de aluminio; c) viga principal; d) viga secundaria; e) cristal.....	43
Figura 22: Simetría de viga secundaria.....	44
Figura 23: Simetría de columnas.	44
Figura 24: Ensamble de la estructura.	44
Figura 25: Modelo CAD terminado.....	45
Figura 26: Modelo CAD simplificado.	45
Figura 27: Geometría bajo análisis.	46
Figura 28: Asignación material a la geometría.	47
Figura 29: Malla.....	48
Figura 30: Detalles de malla.	48
Figura 31: Condición de Temperatura.....	49
Figura 32: Condición de Convección.	49
Figura 33: Figura 33: Solución de temperatura.....	50
Figura 34: Solución Flujo de calor total.	50
Figura 35: Estudios acoplados.....	51
Figura 36: Cara donde se aplicó la carga.....	52
Figura 37: Caras con condición de frontera friccionales.....	52
Figura 38: Soporte fijo.....	53

Figura 39: Solución Deformación.....	53
Figura 40: Solución Equivalent stress.....	54
Figura 41: Solución de factor de seguridad.....	54
Figura 42: Deformación de frecuencia natural 1 (2.4 Hz).....	55
Figura 43: Deformación de frecuencia natural 2 (7.5 Hz).....	55
Figura 44: Deformación de frecuencia natural 3 (13 Hz).....	56
Figura 45: Deformación de frecuencia natural 4 (17.9 Hz).....	56
Figura 46: Deformación frecuencia natural 5 (37.9 Hz).....	57
Figura 47: Deformación frecuencia natural 6 (38.1 Hz).....	57
Figura 48: Código QR animación estudio térmico.....	58
Figura 49: Código QR animación estudio estructural.....	58
Figura 50: Código QR animación estudio modal.....	59
Figura 51: Distribución de Temperatura.....	60
Figura 52: Flujo de Calor.....	61
Figura 53: Deformación Total.....	62
Figura 54: Esfuerzo Equivalente.....	63
Figura 55: Factor de Seguridad.....	63
Figura 56: Deformación direccional X1.....	64
Figura 57: Deformación direccional X2.....	65
Figura 58: Deformación direccional X3.....	65
Figura 59: Deformación direccional X4.....	66
Figura 60: Deformación direccional X5.....	66
Figura 61: Deformación direccional X6.....	67
Figura 62: Deformación direccional Y1.....	67
Figura 63: Deformación direccional Y2.....	68
Figura 64: Deformación direccional Y3.....	68
Figura 65: Deformación direccional Y4.....	69
Figura 66: Deformación direccional Y5.....	69
Figura 67: Deformación direccional Y6.....	70
Figura 68: Deformación direccional Z1.....	70
Figura 69: Deformación direccional Z2.....	71
Figura 70: Deformación direccional Z3.....	71
Figura 71: Deformación direccional Z4.....	72
Figura 72: Deformación direccional Z5.....	72
Figura 73: Deformación direccional Z6.....	73

Índice de Tablas

Tabla 1: Propiedades de los materiales que componen la estructura.	42
Tabla 2: Condiciones Sizing para el mallado.	47
Tabla 3: Deformaciones mayores a 1 mm.....	73

RESUMEN

En el presente trabajo se trata de determinar la posible causa por la cual se están fracturando los cristales que conforman la estructura de la explanada del edificio E del Tecnológico Nacional de México campus sur de Guanajuato (ITSUR) mediante una serie de estudios de simulación numérica a través del método de elemento finito.

Se tomaron las dimensiones de los elementos que conforman la estructura, para realizar un modelo tridimensional en la interfaz de SolidWorks, simultáneamente se capturaron datos experimentales de las condiciones principales a la que está expuesta la estructura; vibración y temperatura, posibles factores responsables del fenómeno de fragmentación en los cristales

Con los datos experimentales y a través de un software comercial se realizaron análisis de transferencia de calor, esfuerzos térmicos y vibraciones mediante el método de elemento finito.

Los resultados obtenidos se compararon con las mediciones experimentales y se encontró la causa más factible que ocasiona la fractura de los cristales son los esfuerzos térmicos a los que está sometida la estructura.

Palabras clave: Esfuerzos Térmicos, Análisis Térmico, Análisis Modal, Análisis de Elemento Finito, Simulación, Vibraciones.

ABSTRACT

In the present work we try to determine the possible cause of the fracture of the crystals that form the structure of the esplanade of building E of the Tecnológico Nacional de México campus sur de Guanajuato (ITSUR) by means of a series of numerical simulation studies using the finite element method.

For this, first the dimensions of the elements that make up the structure and of the structure itself were taken to make a three-dimensional model in the SolidWorks software interface, simultaneously experimental data were captured for the three main conditions to which the structure is exposed; weight, vibration and temperature, and which are blamed for the fragmentation phenomenon in the crystals.

With the experimental data and through a commercial software, heat transfer, thermal stress and vibration analyses were performed using the finite element method.

The results obtained were compared with the experimental measurements and the most feasible cause of the fracture of the crystals was found to be the thermal stresses to which the structure is subjected.

Keywords: Thermal Stress, Thermal Analysis, Modal Analysis, Finite Element Analysis, Simulation, Vibrations.

Capítulo 1

Introducción.

La simulación de elementos finitos es un método computarizado para predecir cómo reaccionará un producto ante las fuerzas, la vibración, el calor, el flujo de fluidos y otros efectos físicos del mundo real. La simulación de elementos finitos permite comprobar si un producto se romperá, desgastará o funcionará como se espera. Se denomina análisis, pero en el proceso de desarrollo de productos, se utiliza para predecir qué ocurrirá cuando se utilice un producto.

El análisis por el método de elementos finitos (FEA) descompone un objeto real en un gran número (entre miles y cientos de miles) de elementos finitos, como pequeños cubos. Las ecuaciones matemáticas permiten predecir el comportamiento de cada elemento. Luego, una computadora suma todos los comportamientos individuales para predecir el comportamiento real del objeto [1].

Este trabajo consiste en los siguientes capítulos:

Capítulo 1: Se da una breve introducción al proceso de simulación mediante el Método de Elemento Finito (MEF).

Capítulo 2: En el marco teórico se citan y da una descripción de los conceptos necesarios para el entendimiento del proyecto.

Capítulo 3: Se plantea la problemática de la fragmentación de los cristales dentro del ITSUR, así como por qué se realizó, alcance del proyecto y las limitaciones y/o obstáculos que se presentaron para la realización de esta investigación.

Capítulo 4: Se expone el objetivo general que se tiene para la realización de este proyecto, además de los objetivos específicos que fueron necesarios a lo largo de la investigación para su exitosa culminación.

Capítulo 5: Se describe el proceso que se llevó a cabo para la realización del proyecto, el cual se divide en:

Proceso experimental: en la que se encuentra la toma de valores de temperatura, vibraciones y dimensiones estructurales.

Proceso de simulación: donde se incluyen los apartados de MEF; pre-procesamiento, procesamiento y post- procesamiento además del modelado tridimensional en SolidWorks y acoplamiento de estudios de simulación numérica.

Capítulo 6: Se muestran los resultados obtenidos mediante una simulación.

Capítulo 7: Se realiza la interpretación y análisis de los resultados obtenidos en el estudio de simulación, que a su vez son comparados con los datos experimentales ya registrados.

Capítulo 8: Se presentan las conclusiones que se obtuvieron con la realización de este proyecto.

Capítulo 2

Marco teórico (Antecedentes).

El Método de Elementos Finitos (MEF), se utiliza para aplicaciones estructurales con el levantamiento de la distribución de esfuerzos, deformaciones y desplazamientos a través de análisis estáticos y dinámicos.

La geometría de la pieza, sometida a cargas y restricciones, se subdivide en partes más pequeñas, conocidas como “elementos”, que representan el dominio continuo del problema. La división de la geometría en pequeños elementos resuelve un problema complejo, al subdividirlo en problemas más simples, lo que permite a la computadora hacer las tareas con eficiencia.

El método propone que un número infinito de variables desconocidas, sean sustituidas por un número limitado de elementos de comportamiento bien definido. Esas divisiones pueden tener diferentes formas, tales como triangular, cuadrangular, entre otros, dependiendo del tipo y tamaño del problema. Como el número de elementos es limitado, son llamados “elementos finitos” – palabra que da nombre al método.

Los elementos finitos están conectados entre sí por puntos, que se llaman nodos o puntos nodales. Al conjunto de todos estos ítems (elementos y nodos) se lo denomina malla, como se observa en la Figura 1.

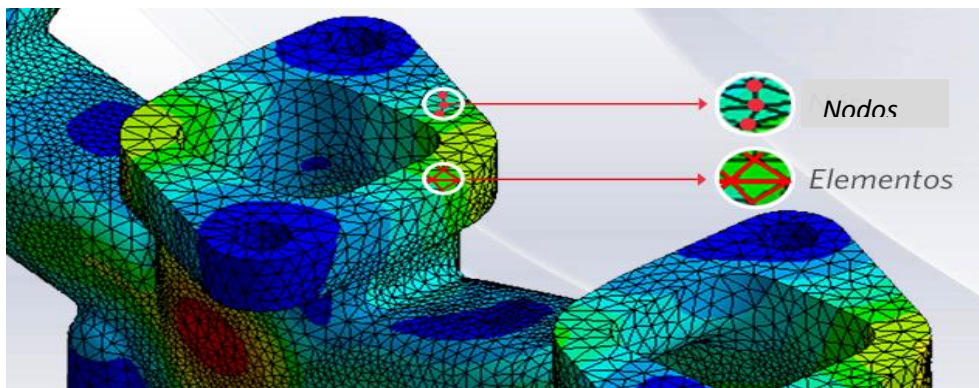


Figura 1: Nodos y elementos de la malla.

Debido a las subdivisiones de la geometría, las ecuaciones matemáticas que rigen el comportamiento físico no se resolverán de una manera exacta, sino aproximada por este método numérico.

La precisión del MEF depende de la cantidad de nodos y elementos, del tamaño y de los tipos de elementos de la malla. Por lo tanto, cuanto menor sea el tamaño y mayor el número de elementos en una malla, más precisos serán los resultados del análisis [2].

El MEF predice el comportamiento de los productos afectados por una variedad de efectos físicos, entre los que se incluyen:

- Esfuerzo mecánico
- Vibración mecánica
- Fatiga
- Movimiento
- Transferencia de calor
- Flujo de fluidos
- Electrostática

2.1 Análisis Estructural

El análisis estructural es el proceso de cálculo y determinación de los efectos de las cargas y las fuerzas internas en una estructura. Para realizar un análisis estructural se deben considerar los siguientes conceptos:

Elementos estructurales.

Se define como elemento estructural a uno cualquiera de sus componentes, viga, losa, columna, etc. Pues si bien la estructura debe funcionar, y lo hace, como un conjunto, para un correcto análisis se debe conocer el comportamiento de cada uno de los elementos [3].

Se puede clasificar los elementos estructurales según su forma:

- Elementos con una dimensión dominante; por ejemplo: vigas, columnas, pilares, pilotes.
- Elementos con dos dimensiones dominantes; por ejemplo: losas, tabiques antisísmicos, láminas, bóvedas, etc.
- Elementos con las tres dimensiones semejantes; por ejemplo: bloques de cimentación, cabezales de pilotes.

Cargas.

Estas son aplicadas a los diferentes elementos de las estructuras y se expresan en unidades de peso [4].

El origen de una carga puede ser:

- **Peso propio:** es la carga originada por el peso del elemento resistente.
- **Cargas permanentes:** son las cargas debidas a partes de la construcción que no son estructurales, pero están fijadas a la misma permanentemente.
- **Cargas de servicio o sobrecargas:** son las cargas de uso, son las que debe resistir la estructura diseñada.
- **Cargas por fenómenos meteorológicos:** son las originadas por el viento o la nieve.
- **Cargas sísmicas:** son las originadas por un sismo, tectónico o volcánico; inclusive sismos originados por la acción humana (sismos inducidos).
- **Presiones o empujes:** cargas originadas por el empuje de suelos, líquidos, con dirección predominantemente horizontal.

Las principales cargas son:

- **Cargas concentradas:** son cargas en las que el total de la fuerza está aplicada en un área muy pequeña, que idealmente se puede asimilar a un punto.
- **Cargas repartidas uniformemente:** se trata de cargas que actúan a lo largo del elemento con un valor uniforme; cuando la carga repartida, lo es sobre un elemento de dos dimensiones dominantes, tenemos una carga repartida uniforme extendida una superficie.
- **Cargas repartidas variables:** se trata de cargas repartidas que actúan sobre la barra, pero con valores variables a lo largo de la misma.

Esfuerzo.

Un esfuerzo se determina mediante la carga aplicada en un área determinada del elemento estructural y este puede ser transversal o longitudinal al elemento. Para determinar el esfuerzo tenemos la Ecuación (1) y su respectiva notación que a continuación se muestra [5].

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (1)$$

Donde:

σ = esfuerzo.

P = fuerza o carga aplicada.

A = área determinada del elemento.

A continuación, se dará a conocer una breve explicación de los tipos de esfuerzos:

Compresión: Sucede cuando dos fuerzas con la misma dirección tienen fuerzas en sentidos encontrados que intentan contraer un cuerpo, como se observa en la Figura 2.



Figura 2: Esfuerzo de compresión.

Tensión: Es el esfuerzo al que está sometido un cuerpo por la aplicación de dos fuerzas que actúan en sentido opuesto, y tienden a estirarlo, vea la Figura 3.

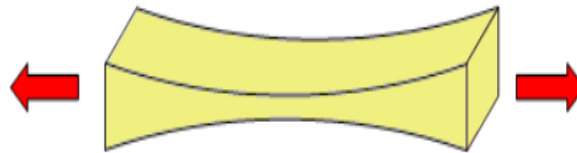


Figura 3: Esfuerzo de tensión.

Torsión: Cuando dos fuerzas en un mismo eje actúan en direcciones contrarias, causa que el cuerpo se someta a torsión, como se aprecia en la Figura 4.

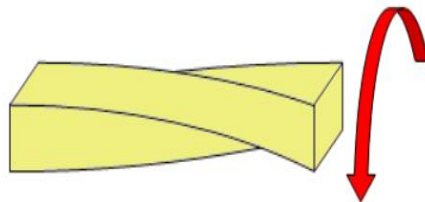


Figura 4: Esfuerzo de Torsión.

Flexión: Este esfuerzo sucede cuando hay una fuerza perpendicular al eje principal de un cuerpo, este tipo de fuerza tiende a doblarlo, produciendo deformación por compresión, obsérvese en la Figura 5 [5].

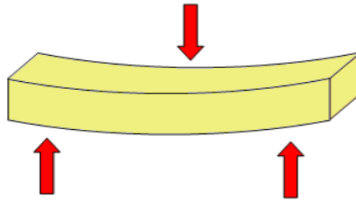


Figura 5: Esfuerzo de flexión.

2.2 Análisis Térmico.

El análisis térmico es un conjunto de técnicas analíticas que estudian el comportamiento térmico de los materiales. Cuando un material se calienta o se enfría, su estructura y su composición química pueden sufrir cambios tales como fusión, sublimación, solidificación, cristalización, descomposición, oxidación térmica o sinterización [6].

El calor fluye desde las regiones donde la temperatura es más alta hacia las regiones en la que es más baja.

La ecuación que describe la conducción térmica se conoce como **ley de Fourier**

Sea J la densidad de corriente de energía (energía por unidad de área y por unidad de tiempo), afirma que hay una proporcionalidad entre el flujo de energía J y el gradiente de temperatura.

$$J = -K \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2)$$

Siendo K una constante del material denominada conductividad térmica [7].

Consideremos un elemento de longitud L y área de sección transversal S con una distribución de temperatura no uniforme a lo largo del eje X , desde $x = 0$ hasta $x = L$. El elemento está hecha de un material de densidad ρ , calor específico c y conductividad térmica K . Supongamos que las caras laterales del elemento están aisladas y que no hay ninguna fuente de calor interna en el elemento.

Vamos a considerar un trozo del elemento de longitud Δx , entre x y $x + \Delta x$. En un intervalo de tiempo Δt , entra calor por su sección izquierda $J_S \Delta t$ y sale calor por su sección derecha $J'_S \Delta t$. La diferencia se emplea en elevar la temperatura de dicho elemento de volumen que es el producto de la masa por el calor específico y por la diferencia de temperatura (final menos inicial).

$$c\rho(T(x, t + \Delta t) - T(x, t)) \quad (3)$$

$$c\rho(S\Delta x)T(x, t + \Delta t) - c\rho(S\Delta x)T(x, t) = S\Delta t(-K\frac{\partial T}{\partial x})_x - S\Delta t(-K\frac{\partial T}{\partial x})_{x + \Delta x} \quad (4)$$

$$\frac{T(x, t + \Delta t) - T(x, t)}{\Delta t} = \frac{K}{c\rho} \frac{(\frac{\partial T}{\partial x})_{x + \Delta x} - (\frac{\partial T}{\partial x})_x}{\Delta x} \quad (5)$$

En el límite cuando $\Delta t \rightarrow 0$ y $\Delta x \rightarrow 0$ obtenemos la ecuación que describe la conducción térmica.

$$\frac{\partial T(x, t)}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T(x, t)}{\partial x^2} \quad (6)$$

En general, la ecuación de la conducción del calor para un medio homogéneo, en el que la densidad ρ , calor específico c y conductividad térmica K es constante, se escribe:

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla^2 T \quad (7)$$

En coordenadas rectangulares $T(x, y, z, t)$

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (8)$$

En coordenadas cilíndricas $T(\rho, \varphi, z, t)$

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\rho \frac{\partial T}{\partial \rho} \right) + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (9)$$

En coordenadas esféricas $T(r, \varphi, \theta, t)$

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} \quad (10)$$

Se basa en la medida de las propiedades químicas o físicas de un material en función de la temperatura [8]. A continuación, se describen los conceptos utilizados en este trabajo:

Temperatura

La temperatura es una magnitud escalar que se define como la cantidad de energía cinética de las partículas de una masa gaseosa, líquida o sólida. Cuanto mayor es la velocidad de las partículas, mayor es la temperatura y viceversa [9].

Conductividad térmica

La conductividad térmica se da a través de la agitación molecular y contacto, y no es el resultado del movimiento de masa del sólido en sí mismo.

El calor avanza con un gradiente de temperatura, desde un área de alta temperatura y alta energía molecular a un área con temperatura menor y menor energía molecular. Esta transferencia continuará hasta que se alcance el equilibrio térmico. La velocidad a la que se transfiere el calor depende de la magnitud del gradiente de temperatura, y de las características térmicas específicas del material [10], como se representa en la Figura 6.

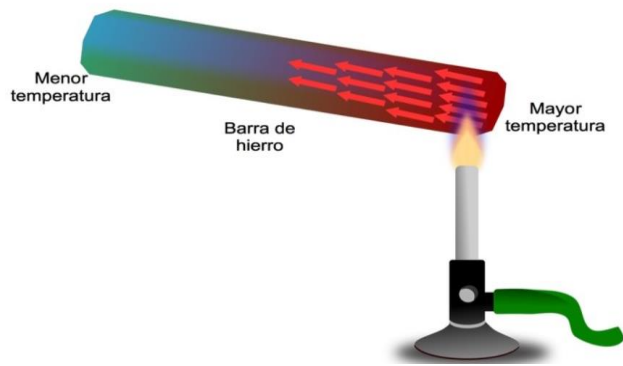


Figura 6: Representación de la conductividad Térmica [11].

Esfuerzos Térmicos

Esfuerzo de tensión o compresión que se produce en un material que sufre una dilatación o contracción térmica.

Un cambio de temperatura puede ocasionar que un material cambie sus dimensiones. Si la temperatura aumenta, generalmente un material se dilata, mientras que si la temperatura disminuye, el material se contrae. Ordinariamente esta dilatación o contracción es linealmente relacionada con el incremento o disminución de temperatura que se presenta.

Al presentarse un cambio de temperatura en un elemento, éste experimentará una deformación axial, denominada **deformación térmica**, si la deformación es controlada, entonces no se presenta la deformación, pero sí un esfuerzo, llamado esfuerzo térmico [12].

Coeficiente de expansión térmica.

Casi todos los materiales se modifican sus dimensiones al variar su temperatura, dicho fenómeno se conoce como expansión térmica la cual se debe a que al aumentar la temperatura aumenta la velocidad de las partículas internas del material, por lo que la distancia de separación entre ellas se vuelve mayor [13].

Pistola térmica ZK-178S.

Es una cámara termo-gráfica infrarroja que combina la medición de temperatura de la superficie y la imagen térmica en tiempo real. También es compatible con la función de transmisión de imágenes en tiempo real esta configuración facilita la medición de temperatura a distancia sin contacto con el objeto a medir. Como tal, el termómetro infrarrojo es útil para medir la temperatura en circunstancias en las que los termopares u otros sensores de tipo de sonda no se pueden usar o no producen datos precisos por diversas razones.

Algunas circunstancias típicas son cuando el objeto a medir está en movimiento; cuando el objeto está rodeado de un campo electromagnético, como en calentamiento por inducción; cuando el objeto está contenido en un vacío u otra atmósfera controlada; o en aplicaciones en las que se requiere una respuesta rápida, es por esto que para nuestra adquisición de datos térmicos utilizamos un equipo de medición infrarroja llamado Pistola de temperatura ZK-178S que se muestra en la Figura 7.



Figura 7: Pistola de temperatura ZK-78S.

El cual cuenta con las siguientes características:

- Sensor UFPA.
- Medición de temperatura alta / baja.
- Alta visibilidad de imagen.
- Dispersión ajustable.
- Tarjeta de almacenamiento.
- Rango Temperatura (-10°C – 400°C).
- Resolución Térmica (160 * 120).

- Alarma de Temperatura Alta.
- Puerto Tipo-C para carga y transferencia de datos.
- Linterna.
- Software para PC para análisis de imágenes.

Los pirómetros infrarrojos

Son un detector, que convierte la energía en una señal eléctrica que se puede exhibir en unidades de temperatura después de que se compensa la variación en la temperatura ambiente, permiten a los usuarios medir la temperatura en aplicaciones en las que no se pueden usar sensores convencionales. Específicamente, en casos que tratan con objetos en movimiento (por ejemplo, rodillos, maquinaria en movimiento, o una banda transportadora), o cuando se requieren mediciones sin contacto debido a contaminación o razones de riesgo (como alta tensión), donde las distancias son demasiado grandes, o donde las temperaturas a medir son demasiado elevadas para los termopares u otros sensores de contacto [14].

Los aspectos cruciales para cualquier pirómetro infrarrojo son:

- Campo visual (tamaño del objetivo y distancia).
- Rango de temperatura.
- Montaje (portátil de mano o montura fija).
- Otros factores a considerar son el tiempo de respuesta, entorno, limitaciones de montaje, aplicaciones de puerto o ventana de visión, y procesamiento de señal deseado.

2.3 Análisis Modal

El análisis modal es una técnica de análisis dinámico de estructuras. Tiene como objetivo la estimación de propiedades dinámicas como las frecuencias y los modos naturales al igual que el amortiguamiento. El análisis modal puede ser teórico o experimental. El teórico se basa en técnicas analíticas o simulaciones.

El experimental se basa en ensayos y tiene 4 pasos fundamentales:

- Excitación de la estructura.
- Medición mediante acelerómetros.
- Tratamiento digital y análisis de las señales.
- Aplicación de modelos.

En los últimos tiempos se ha convertido en una herramienta muy importante para la detección de fallos o dar un mantenimiento preventivo, además mediante este análisis se puede prolongar la vida útil de los elementos que conforman la estructura [15].

Consideraciones dentro de un Análisis Modal:

Vibración

La vibración es el movimiento periódico de un cuerpo o de un sistema de cuerpos conectados desplazados desde una posición de equilibrio. Para la medición de este desplazamiento se utiliza la ecuación de aceleración [16].

Ecuación aceleración:

$$a = A \sin(\omega t) \quad (11)$$

Donde:

a : Aceleración en m/s^2 a la cual es sometido el acelerómetro.

A : Amplitud de la señal.

ω : Frecuencia natural cuya equivalencia es $2\pi f$ donde f es la frecuencia de la señal con mayor magnitud.

t : Tiempo en el punto determinado en el cual se toma la medición.

Para la obtención de la velocidad, se integra la ecuación (11), por lo tanto, el procedimiento

$$v = \int a \sin \omega t dt = \int a \sin \omega t dt \quad (12)$$

$$A \int \sin U dt \quad (13)$$

$$U = wt \quad (14)$$

$$\frac{\dot{U}}{dt} = w \quad (15)$$

$$du = wdt \quad (16)$$

$$\frac{du}{w} = dt \quad (17)$$

$$\frac{A}{w} \int \sin u du = \frac{A}{w} (-\cos u) = -\frac{A}{w} \cos wt \quad (18)$$

Ecuación proporcional a la velocidad con base a la amplitud de la aceleración.

$$v = -\frac{A}{w} = -\frac{A}{2\pi f} \quad (19)$$

Donde:

v : Velocidad en m/s .

A : Amplitud de la señal de la aceleración.

f : Frecuencia de oscilación de la sinusoidal.

Obtención del desplazamiento en base a la integral de la velocidad:

Procedimiento.

$$D = \int v dt = \int -\frac{A}{w} \cos wt dt \quad (20)$$

$$-\frac{A}{w} \int \cos u dt \quad (21)$$

$$(22)$$

$$U = wt$$

$$\frac{U'}{dt} = w \quad (23)$$

$$du = w dt \quad (24)$$

$$\frac{du}{w} = dt \quad (25)$$

$$-\frac{A}{w^2} \int \sin u du = -\frac{A}{w^2} (-\sin u) = \frac{A}{w^2} \sin wt \quad (26)$$

Ecuación de equivalencia del desplazamiento obtenida:

$$(27)$$

$$D = \frac{A}{4\pi^2 f^2}$$

Donde

D: Desplazamiento en Metros.

A: Magnitud de la aceleración.

f: Frecuencia a la que oscila la señal .

La vibración libre se produce cuando el movimiento se mantiene por fuerzas restauradoras gravitatorias o elásticas y la vibración forzada cuando se aplica al sistema una fuerza externa periódica o intermitentes [17].

Amplitud.

Es la máxima elongación con que vibran las partículas del medio. Se mide, en el Sistema Internacional (S.I.), en metros.

Puede expresarse como la distancia entre los extremos alcanzados por el movimiento (valor pico-pico) o como la distancia desde algún punto central hasta la desviación máxima (valor pico), como se presenta en la Figura 8.

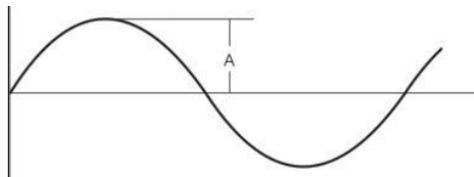


Figura 8: Amplitud.

Dirección

Las vibraciones pueden producirse en tres direcciones lineales como en eje x (longitudinal), eje y (lateral) y eje z (vertical) [18], representado en la Figura 9.

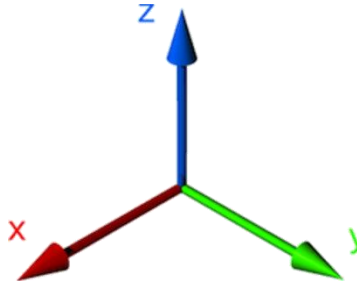


Figura 9: Sistema de ejes lineales.

Frecuencia

La frecuencia es el número de ciclos por unidad de tiempo, es decir las veces en cual se repite el movimiento en un determinado tiempo. Esta viene dada en Hertz (Hz) o ciclos por minuto (CPM) [19]. La frecuencia viene expresada mediante la Ecuación 2.

$$f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi} \quad (28)$$

Donde:

f = frecuencia en (Hz).

T = periodo en segundos (s).

ω = frecuencia angular en radianes por segundo (rad/s).

Frecuencias naturales

Un sólido alterado de su posición de descanso tiende a vibrar a ciertas frecuencias denominadas naturales o resonantes cuando este es excitado. Para cada frecuencia natural, el sólido adquiere una determinada forma denominada forma modal. El análisis de frecuencia calcula las frecuencias naturales y las formas modales asociadas, cuando la frecuencia de la fuente emisora de ondas coincide con la frecuencia natural del resonador (objeto que oscila) se llega a una condición conocida como resonancia.

La resonancia se define como la tendencia de un sistema físico a oscilar con una amplitud mayor en algunas frecuencias. Un sistema físico puede tener tantas frecuencias naturales o de resonancia como grados de libertad [20].

Acelerómetro adxl203

El acelerómetro adxl203 que se muestra en la Figura 10, es un sensor de aceleración cuya salida de respuesta es una señal analógica en respuesta a la aceleración a la que se someta mostrando un referencial a gravedad terrestre de 2.5 V y 1V/g en respuesta subsecuente a las aceleraciones a las que se somete, con una resolución de 1 mg a 60 HZ y una temperatura de operación de -40°C hasta los 125°C con una sensibilidad de 0.1° tanto para el eje X como para el eje Y es

gracias a este comportamiento que se puede deducir la aceleración a la cual se somete el dispositivo a través del voltaje entregado por el mismo.

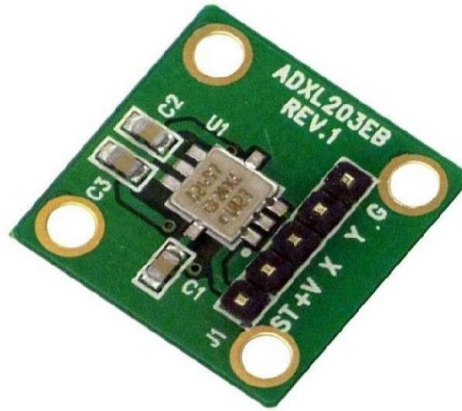


Figura 10: Sensor de aceleración ADXL203

Programación en LABVIEW

La programación gráfica es un método de programación simplificada la cual permite el diseño de una interfaz, así como la lógica de su funcionamiento sin la necesidad de la utilización de lenguajes máquina, básicos, complejos o tendientes al lenguaje humano por lo cual, mediante el seguimiento de la descripción de las imágenes, así como de la descripción de conexiones necesarias para su correcto funcionamiento. LABVIEW es un software que proporciona un potente entorno de desarrollo gráfico para el diseño de aplicaciones de Ingeniería de adquisición de datos, análisis de medidas y presentación de datos gracias a un lenguaje de programación sin la complejidad de otras herramientas de desarrollo.

Sistema de adquisición de datos (DAQ)

Un dispositivo de adquisición de datos (DAQ, por sus siglas en inglés) es un elemento el cual mediante el uso de sus entradas analógicas permite el ingreso de datos provenientes del mundo real mediante la utilización de sensores específicos los cuales en respuesta a una variable física generan un voltaje o una magnitud de corriente las cuales son detectadas por las entradas analógicas de la DAQ, la cual, mediante una conexión generalmente USB transmite los datos hasta un PC en el cual se dará seguimiento a la incidencia de información para su posterior procesamiento.

El DAQ USB-6211 que se muestra en la Figura 11 es un dispositivo DAQ multifunción. Ofrece entrada analógica, entrada digital, salida digital y dos contadores de 32 bits. El dispositivo proporciona un amplificador integrado diseñado para configuraciones rápidas a altas velocidades de escaneado. También cuenta con la tecnología NI Signal Streaming que permite la transferencia de datos bidireccional a alta velocidad parecida a DMA a través del bus USB. El dispositivo es ideal para aplicaciones de prueba, control y diseño, entre ellas, registro de datos portátil, monitoreo de campo, OEM embebidas, adquisición de datos del vehículo y aplicación académica.

El USB-6211 tiene una cubierta mecánica ligera y es energizado por bus para ofrecer fácil portabilidad. El controlador NI-DAQmx y la utilidad de configuración incluidos simplifican la configuración y las medidas, debido a su facilidad de procesamiento de datos analógicos, así como su conectividad con LABVIEW el modelo 6211 fue el complemento ideal para adquirir y transmitir las señales provenientes de los sensores [16].



Figura 11: Dispositivo de adquisición de datos DAQ 6011.

Capítulo 3

Planteamiento del problema

3.1. Identificación.

En el edificio E del ITSUR existe una explanada la cual está cubierta por una estructura con variedad de elementos los cuales se dividen por secciones; en la base se tiene vigas y columnas de acero estructural, después es seguida de una cuadrícula de perfiles de aluminio y por último están colocados cristales que funcionan como techo, de los cuales en el último año dos se han fragmentado y caído sin razón aparente, por lo cual se han formulado 3 posibles teorías de acuerdo a las condiciones a la que está expuesta; vibración, temperatura y peso. Por lo que se capturaran datos experimentales de estas tres variables para después realizar una simulación mecánica por MEF que ayude a encontrar la posible causa de este fenómeno y evitar se siga repitiendo.

3.2. Justificación.

Debido al riesgo constante de que los cristales se estén fragmentando y que esa zona es transitada por los alumnos y personal del ITSUR, se decidió realizar esta investigación para encontrar la posible causa de este fenómeno puesto que representa un grave peligro para toda la comunidad estudiantil que circula por esta zona.

3.3. Alcance.

A lo largo de este proyecto se realizó la medición de temperatura de los cristales y estructura, lectura de las vibraciones implementando acelerómetros, dimensionamiento de los elementos que conforman la estructura y realización de dichos elementos estructurales en software CAD para su posterior ensamble, centrándose en la estructura cuadrículada de aluminio, la cual resulta una de las

partes más críticas y en la que se llevó a cabo el pre-procesamiento, procesamiento y post-procesamiento de los estudios térmico en estado estacionario, estructural estático acoplado y modal.

Se muestra los resultados obtenidos de la implementación de la simulación del método numérico de elementos finitos.

3.4. Limitaciones.

Al realizar este trabajo se presentaron diversos obstáculos y limitaciones principalmente en los elementos que se requerían para llevarlo a cabo, entre ellos destacaron dos principales por los se vio afectada de manera directa esta investigación:

La primera limitación que encontramos fue con respecto a los acelerómetros que se requerían para medir las frecuencias en las cuales se movían los cristales , ya que al ser un plano tridimensional ,es decir, de tres ejes (X,Y y Z) se requería de dos acelerómetros del modelo existente; uno para los ejes X, Y y otro para el eje Z , esto repercutió en la duración de adquisición de los datos necesarios para la realización del análisis ya que los dos acelerómetros se colocaban en un mismo cristal del cual recolectaban datos de vibración durante 8 horas, el punto es que con esta configuración solo se podían tomar datos de un cristal por día, la estructura cuenta con 88 cristales.

La segunda limitación y la que más impacto generó, fue con respecto a las capacidades de las computadoras a las que se tuvieron acceso en el ITSUR, debido a que no cuentan con las características computacionales suficientes para aplicar los diferentes tipos de análisis (estructural, modal y térmico) que se requerían para esta investigación en toda la estructura, por lo tanto el estudio se simplifico analizando únicamente la estructura de aluminio.

Capítulo 4

Objetivos

4.1. Objetivo general.

Realizar análisis de simulación numérica mediante MEF sobre la estructura que cubre la explanada del edificio E del ITSUR y mediante los resultados obtenidos determinar si alguna de las condiciones (peso, temperatura y vibraciones) es la posible causa de la fragmentación de los cristales.

4.2. Objetivos específicos.

- Medición de temperatura y vibraciones alcanzadas en los cristales.
- Registro de temperatura y vibración en Excel.
- Toma de dimensiones de los elementos que conforman la estructura.
- Elaboración de un Modelo 3D de la estructura.
- Realización de análisis; estructural, Modal y Térmico mediante el MEF
- Obtención de datos de simulación mecánica de la estructura.
- Comparación de datos experimentales con datos simulados.

Capítulo 5

Metodología

5.1 Proceso Experimental

Una primera etapa se centró en la medición y registro de los datos de temperatura alcanzados en cada uno de los cristales los cuales fueron enumerados por fila y columna para su identificación, como se observa en la Figura 12.

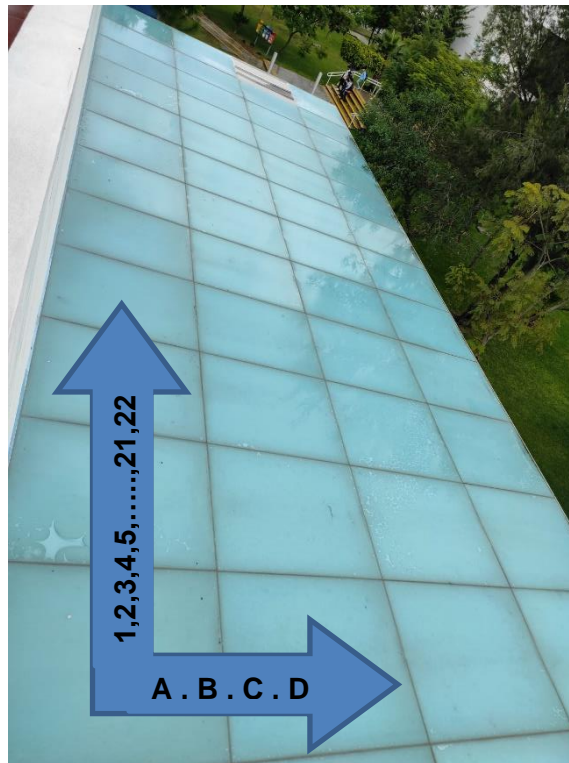


Figura 12: Numeración de cristales por fila y columna.

Para realizar la medición de temperatura la mejor opción fue el uso de una pistola térmica ZK-78S la cual se muestra en la Figura 13, puesto que la altura de los cristales es de casi 3 metros.



Figura 13: Medición con pistola térmica ZK-78S.

Dichos datos fueron guardados en una tabla de Excel en donde se agregó la clave del cristal, las temperaturas alcanzadas y la hora en la que fueron capturadas.

La lectura de temperatura se llevó a cabo cada hora en un lapso de 10 a.m. a 4 p.m. con la finalidad de detectar la hora del día en la cual se alcanza la mayor temperatura en los cristales, además estos mismos datos son utilizados como parámetros de entrada para la simulación del estudio térmico.

Después de realizar esta medición térmica durante 7 días se observó que el pico de temperatura fue a la hora del día “13:00 horas” con esto se procedió a la búsqueda del día con mayor temperatura en este horario y se realizó la gráfica que se representa en la Figura 14.

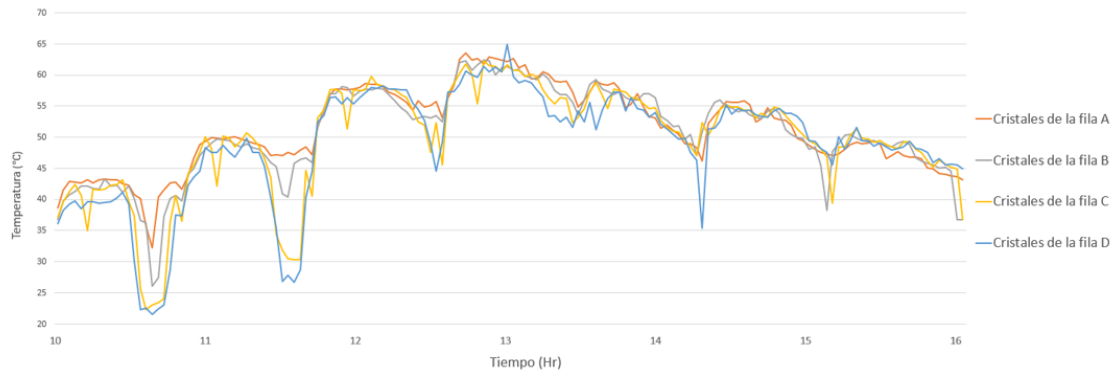


Figura 14: Grafica día más caluroso.

En esta grafica se muestra la temperatura en grados Celsius alcanzada en cada fila de cristales en el horario de 10:00 a 16:00hrs. La mayor temperatura registrada fue de 65 grados Celsius.

La siguiente etapa del proceso experimental consto de la obtención y registro de las vibraciones de la estructura, centrándonos principalmente en los elementos más débiles de esta, los cristales

Para esto se utilizaron dos acelerómetros ubicados en la parte central inferior de los cristales, colocados y alineados de tal manera que registran las vibraciones en los 3 principales ejes (X, Y y Z), como se presenta en la Figura 15.

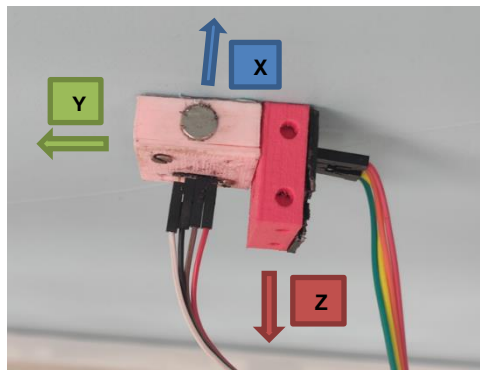


Figura 15: Posición de acelerómetros.

El acelerómetro de color rosa se encarga de medir las vibraciones en los ejes X y Y (sobre la superficie del cristal), el acelerómetro de color rojo se coloca de manera perpendicular al cristal y de esta forma mida las vibraciones sobre el eje Z (perpendicular al cristal). Una vez colocados en su posición los acelerómetros registran los datos son procesados mediante un sistema USB DAQ que está conectada a una computadora en la cual, se facilitó un programa de filtrado de señal desarrollado en el software LABVIEW el cual muestra de manera gráfica las frecuencias y magnitud de las vibraciones, como se representa en la Figura 16.

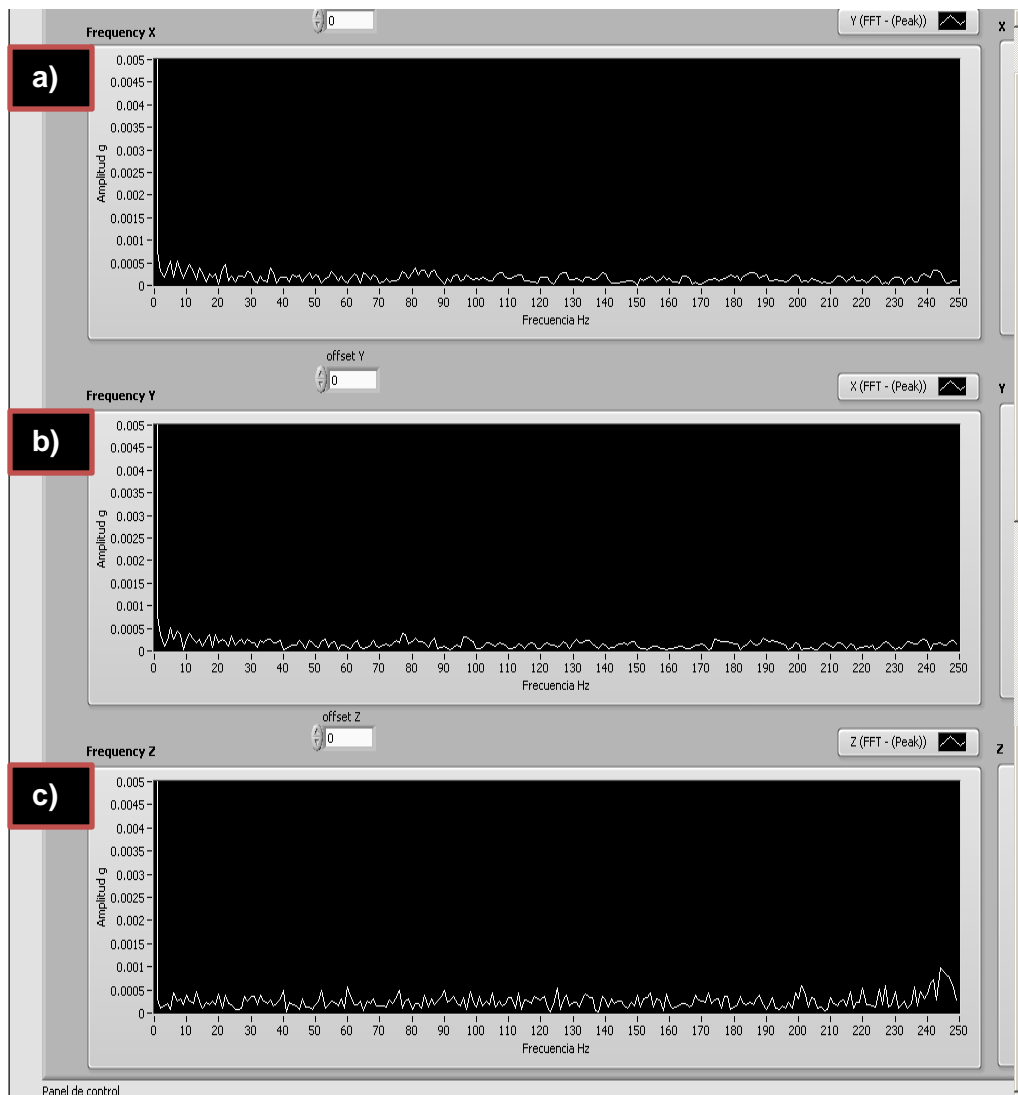


Figura 16: Interfaz de frecuencias en LABVIEW: a) frecuencia eje x; b) frecuencia eje y; c) frecuencia eje z.

Los datos generados por el programa se guardan en un archivo Excel donde en la primera columna se registra la hora/día/mes y año de cada dato, y en las tres siguientes columnas la magnitud de frecuencia alcanzada en cada uno de los ejes (X, Y y Z).

La lectura de vibraciones se llevó a cabo desde las 09:00 hrs. hasta las 17:00 hrs. donde el registro de magnitud de la frecuencia se capturaba cada segundo. En la Figura 17, 18 y 19 se muestran graficas con las frecuencias obtenidas.

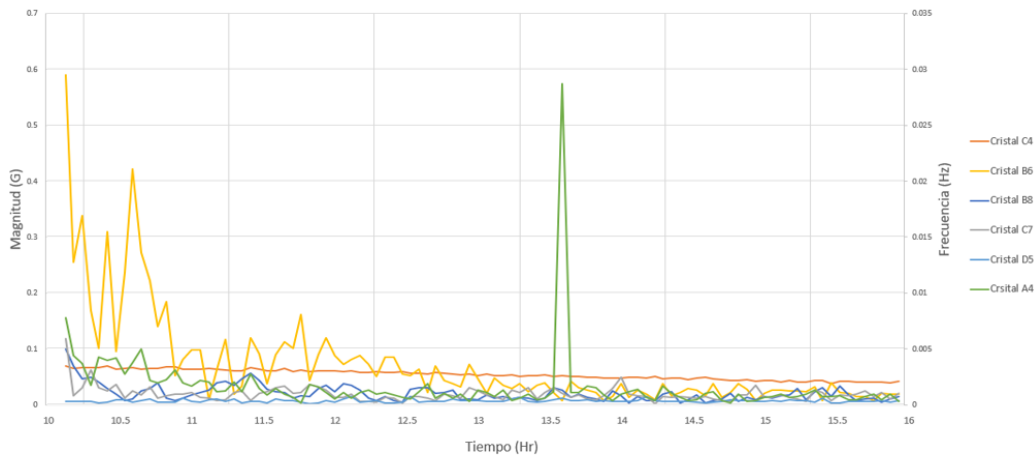


Figura 17: Frecuencias en el eje X

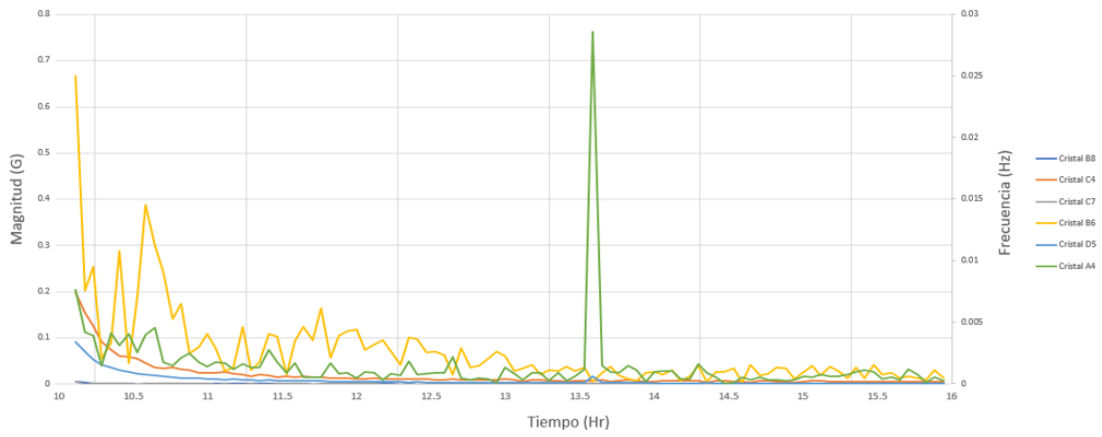


Figura 18: Frecuencias en el eje Y

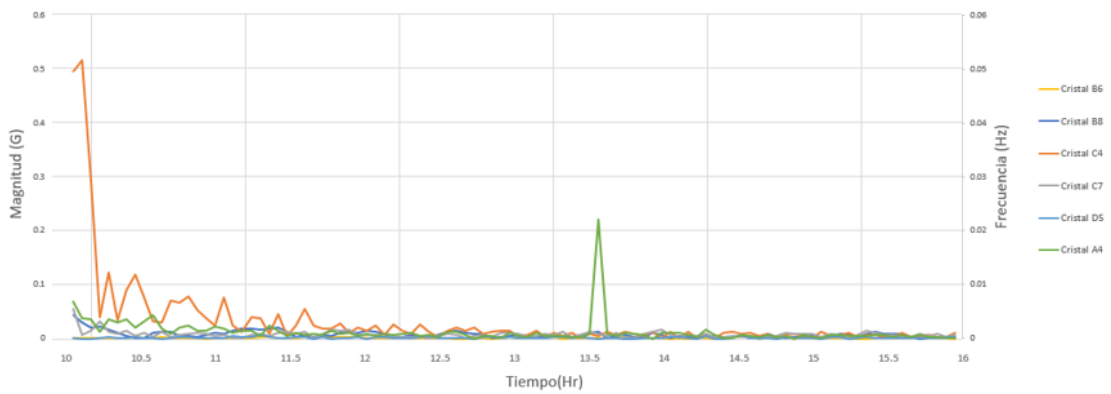


Figura 19: Frecuencias en el eje Z

Como tercer y última etapa del proceso experimental; se utilizó un flexómetro con el cual se obtuvieron las dimensiones de los elementos que conforman la estructura y con base en estas se consultó en internet los perfiles comerciales similares, ya que existía desinformación y era imposible acceder a estas cotas sin dañar la estructura. Con las dimensiones de cada elemento registradas se procedió a la realización de planos estructurales de cada uno de los elementos (Véase anexo A), además de su posición en la en la estructura para lograr un mejor detalle y facilidad para la identificación de las mismas, como se muestran en la Figura 20.

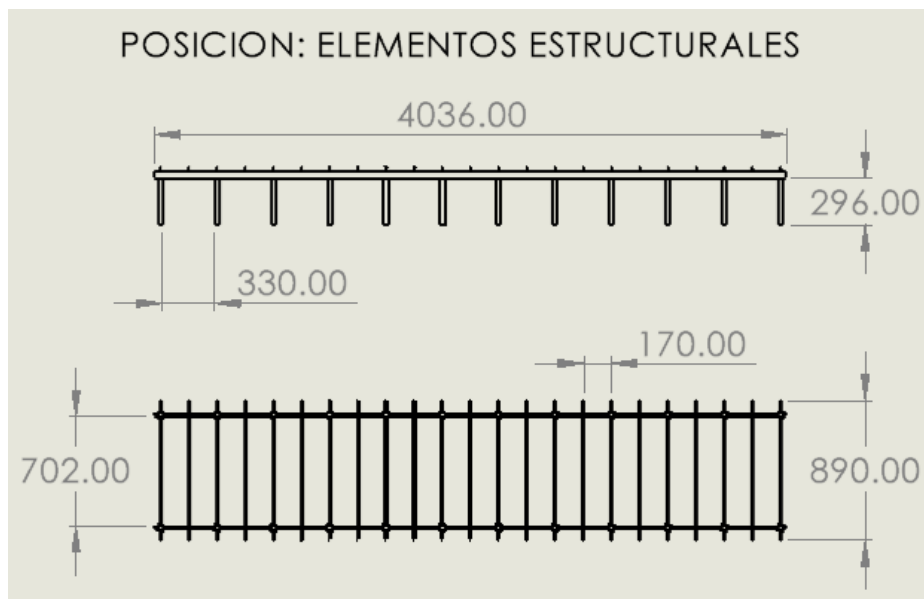


Figura 20: Posición y distancias de los elementos estructurales (unidades en milímetros).

La estructura se conforma por 24 columnas, 2 vigas principales, 23 vigas secundarias, una estructura cuadriculada de perfiles aluminio y 88 cristales. En la Tabla 1 se muestran el material y propiedades físicas del cual están hechos cada uno de estos elementos.

Elemento	Material	Propiedades
Columna	Acero estructural	Densidad: 7860 Kg/m^3 Módulo de Young: $200 * 10^9 \text{ N/m}^2$ Módulo de Poisson: 0.30 Conductividad térmica: 50.2 W/mK Dilatación térmica: $13 * ^\circ\text{C} * 10^{-6}$
Viga Principal		
Viga Secundaria		
Cuadrícula Perfil Aluminio	Aluminio	Densidad: 2710 Kg/m^3 Módulo de Young: $70 * 10^9 \text{ N/m}^2$ Módulo de Poisson: 0.34 Conductividad térmica: 205 W/mK Dilatación térmica: $24 * ^\circ\text{C} * 10^{-6}$
Cristal	Vidrio Templado	Densidad: 2500 Kg/m^3 Módulo de Young: $265 * 10^9 \text{ N/m}^2$ Módulo de Poisson: 0.23 Conductividad térmica: 1.5 W/mK Dilatación térmica: $9 * ^\circ\text{C} * 10^{-6}$

Tabla 1: Propiedades de los materiales que componen la estructura [21].

5.2 Proceso de Simulación

El proceso de simulación comienza con la primera etapa que consta de la creación de un modelo CAD de cada uno de los elementos mediante el uso de SolidWorks dándole a cada uno de estos las dimensiones reales que fueron señaladas en los planos realizados en la tercera etapa del proceso experimental, como se observa en la Figura 21.

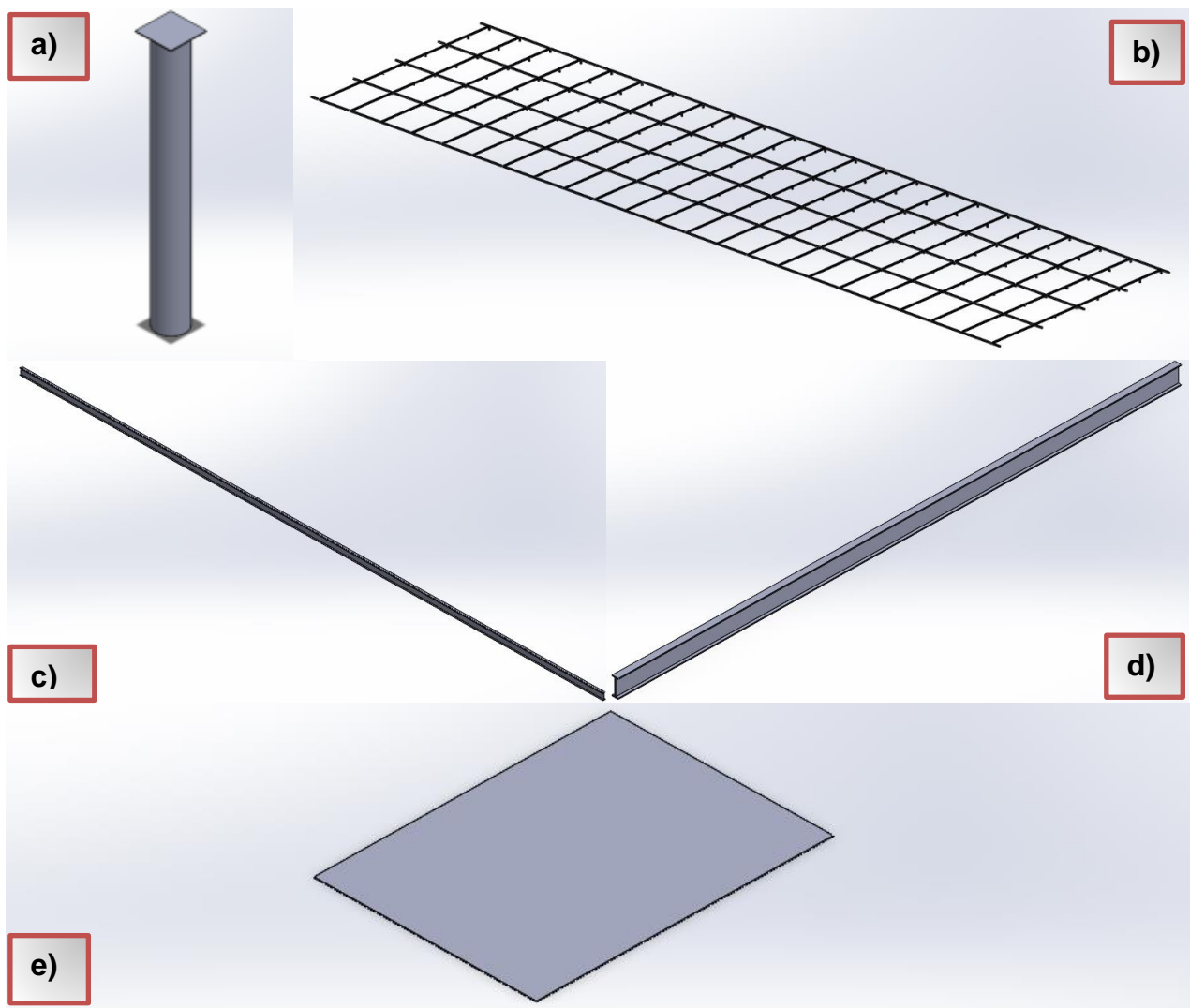


Figura 21: Modelo CAD de los elementos que conforman la estructura: a) columna; b) cuadrícula de aluminio; c) viga principal; d) viga secundaria; e) cristal.

Para la optimización del tiempo que llevaría realizar cada elemento, se optó por usar la función simetría en el software CAD esta función se aplicó solo a los elementos columna y viga secundaria, lo cual se puede observar en la Figura 22 y Figura 23 respectivamente.



Figura 23: Simetría de columnas.

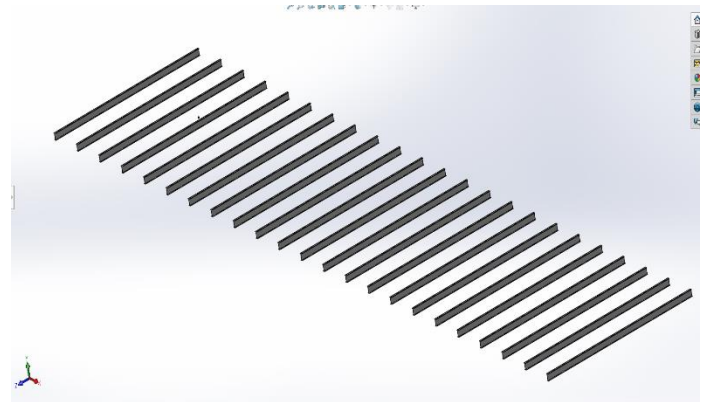


Figura 22: Simetría de viga secundaria.

Una vez completada esta parte se dio a la tarea de realizar el ensamble de todos los elementos para así dar forma a la estructura, como se aprecia en la Figura 24.

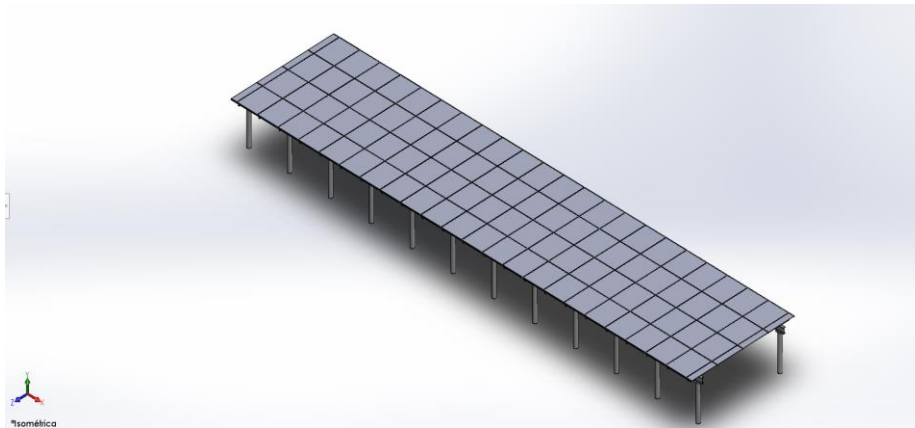


Figura 24: Ensamble de la estructura.

En la Figura 25 se presenta la vista isométrica del modelo CAD con texturas y colores añadidos a los diferentes elementos.

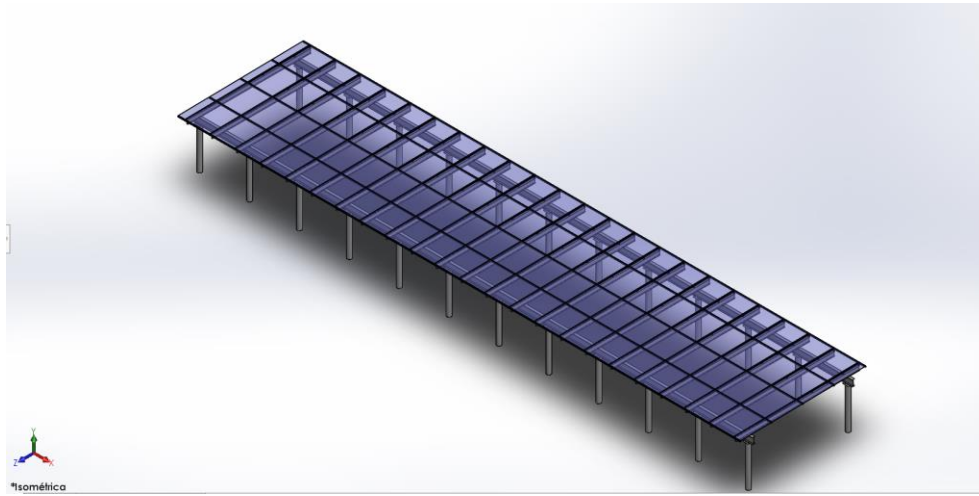


Figura 25: Modelo CAD terminado.

Debido a la limitación mencionada en el Capítulo 3 sobre las capacidades de las computadoras a las que se tuvo acceso dentro del ITSUR se simplificó la geometría en la que se aplicó el estudio, reduciendo el modelo hasta utilizar solamente la estructura de aluminio, la cual se muestra en la Figura 26.

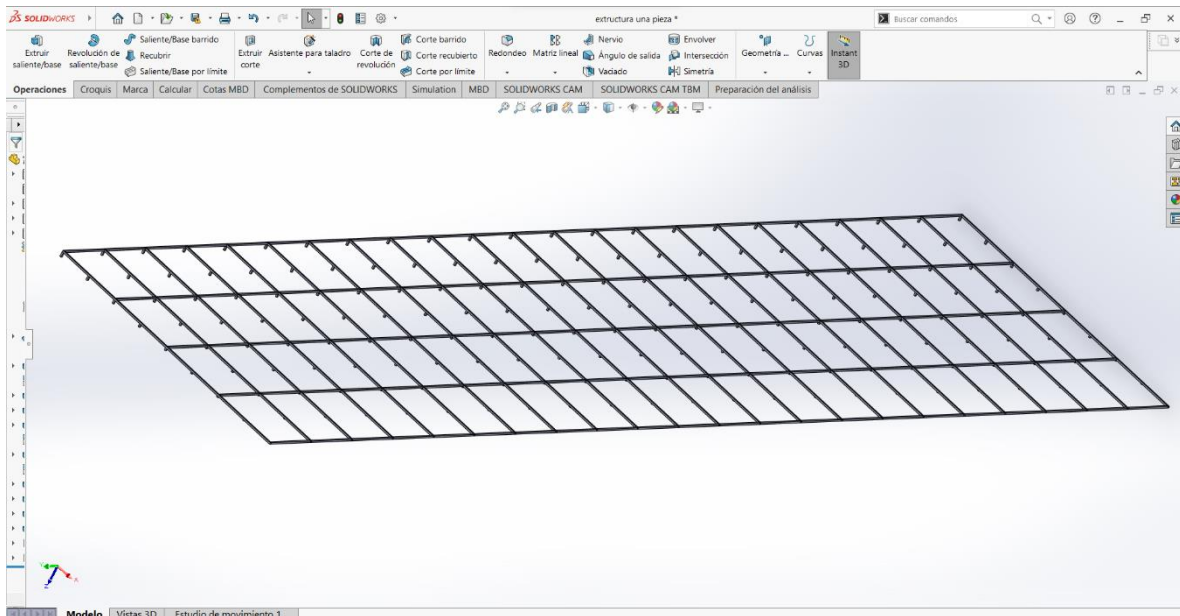


Figura 26: Modelo CAD simplificado.

Una vez teniendo el Modelo CAD con el que se trabajara, toca exportarlo a un software comercial de elemento finito, para esto lo primero que haremos será guardar el modelo CAD en el formato “**Parasolid (*.x_t;*.x_b)**”.

Pre- Procesamiento

Desde este punto se adentrará en las etapas del Método de Elementos Finitos (MEF).

Comenzamos con la importación del modelo CAD hacia el Software comercial de simulación numérica, esto se hace seleccionando “importar geometría” después se comprobará que la geometría sea correcta entrando a **DesingModeler** ya que cualquier error, cambio y/o omisión en la geometría afectará significativamente el comportamiento de esta durante la simulación y por ende los resultados del estudio. La geometría ya exportada se muestra en la Figura 27.

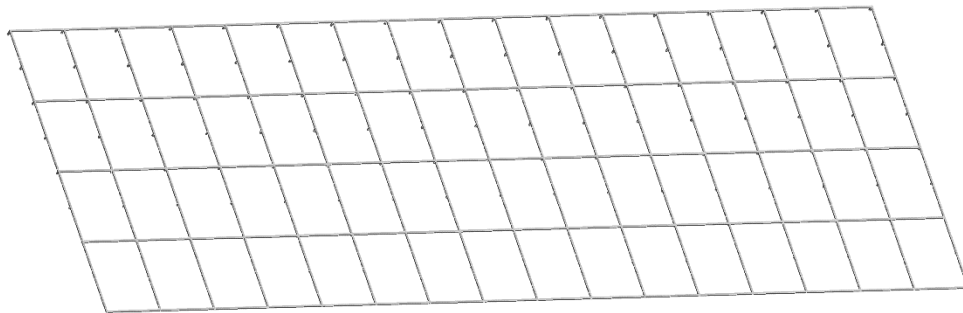


Figura 27: Geometría bajo análisis.

En este punto toca cargar el material que posteriormente se le asignará a la geometría, para esto se abrirá **Engineering Data** y se podrá agregar un nuevo material, así como sus propiedades o también se podrá trabajar con uno ya preestablecido en el software como lo es el **Aluminum Alloy** (Aleación de aluminio) el cual se utilizó para este caso.

Ya con el material cargado procedemos a abrir **Model** y se asigna a la geometría el material seleccionado, como se muestra en la Figura 28.

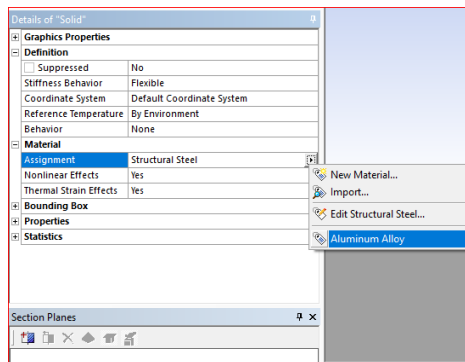


Figura 28: Asignación material a la geometría.

Enseguida se insertan las condiciones para la malla que separará la geometría en elementos finitos, en este caso se utilizó la función **Sizing** (dimensionamiento) para establecer la malla en las partes estructurales, solo que con diferentes parámetros como se describe en la Tabla 2.

Parte	Tipo de “Sizing”	Tamaño elemento
Cuadrícula Aluminio	<i>Element Size</i> <i>Body Sizing</i>	10mm
Viga Secundaria	<i>Element Size</i> <i>Body Sizing</i>	20mm

Tabla 2: Condiciones Sizing para el mallado.

Teniendo estas condiciones de mallado, se procede a generar la malla en la geometría la cual se aprecia en la Figura 29.



Figura 29: Malla.

Los detalles de la malla se observan en la Figura 30, así como el número de elementos y nodos que la conforman.

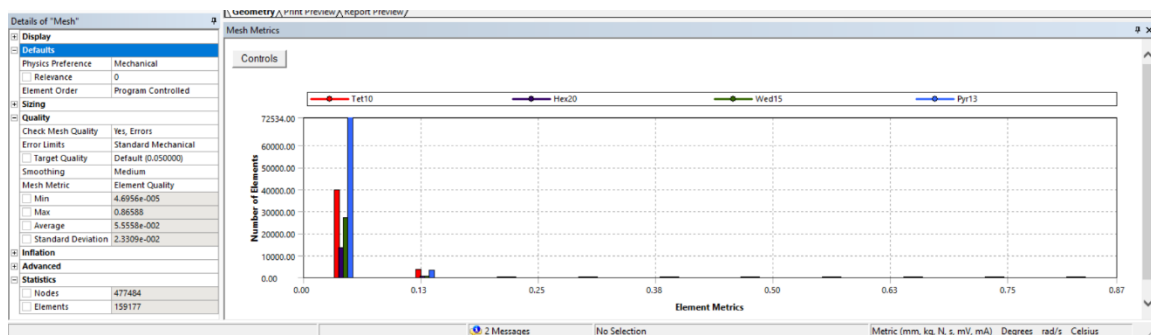


Figura 30: Detalles de malla.

Procesamiento estudio térmico

En esta etapa se asignan las condiciones de frontera para la realización del estudio térmico **STUDY- STATE THERMAL** (Estudio Térmico de Estado Estacionario).

Se inserta una condición de Temperatura con la mayor temperatura registrada la cual fue de 64.9 °C y se aplica en las caras donde estarían en contacto directo los cristales, es decir en toda la parte superior se muestra de manera gráfica en la Figura 31.

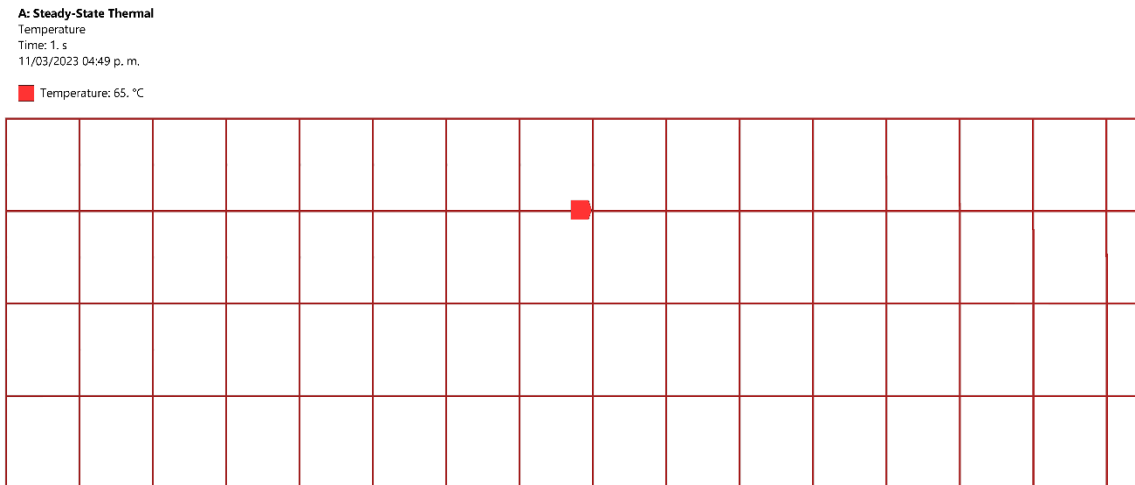


Figura 31: Condición de Temperatura.

Consecutivamente se determina ahora una condición de convección por aire estancado el cual se le asigna una temperatura ambiente de 30 °C (representa el aire que rodea la estructura) y se aplicara en todas las caras restantes de la cuadrícula de aluminio, como se representa en la Figura 32.

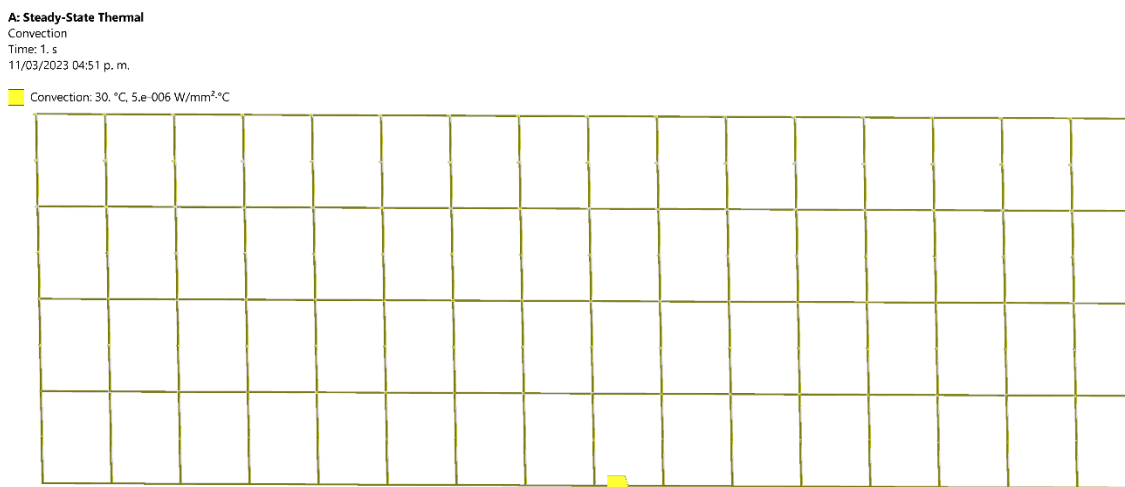


Figura 32: Condición de Convección.

Post- Procesamiento estudio térmico

Asignación de una solución Térmica de Temperatura, la cual mostro la distribución de temperatura sobre la geometría, como se aprecia en la Figura 33.

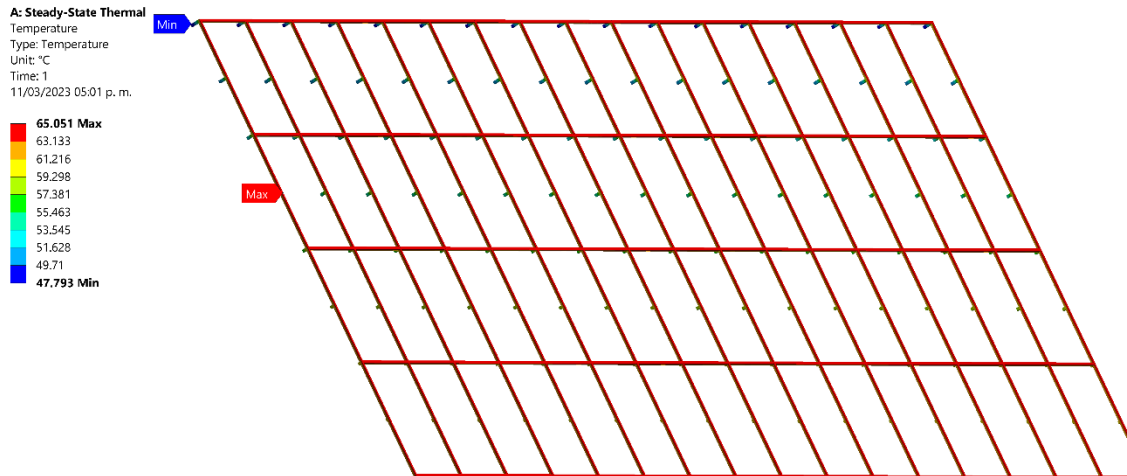


Figura 33: Figura 33: Solución de temperatura.

Al igual se agregó una solución de flujo de calor total que muestra el flujo de energía por unidad de área, como se presenta en la Figura 34.

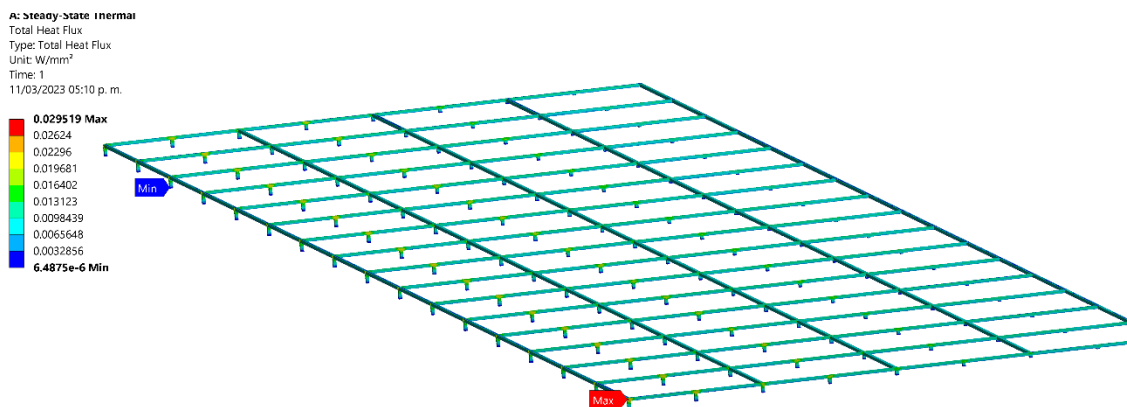


Figura 34: Solución Flujo de calor total.

Una vez insertadas estas soluciones se procede a resolver.

Acoplamiento

Con la solución del estudio térmico de estado estacionario se procedió a realizar el acoplamiento de un estudio estructural estático, como se muestra en la Figura 35.

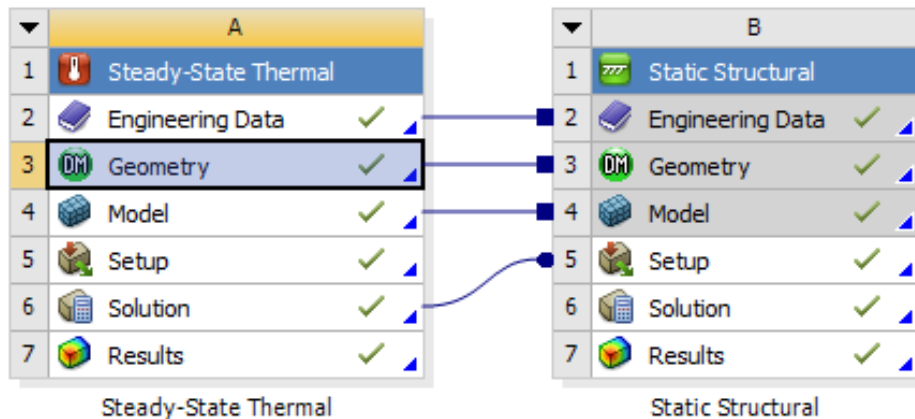


Figura 35: Estudios acoplados.

El acoplamiento funciona para que ambos estudios estén conectados, es decir, que ahora ambos estudios se simulan sobre la misma geometría y utilizan el mismo pre-procesamiento, por ende, los resultados del estudio térmico sirven como condiciones de frontera iniciales en el análisis estructural.

En este caso se acoplo un estudio estructural estático ya que se buscó simular la deformación y esfuerzos que tiene la estructura con el peso de los cristales en base en las soluciones y/o resultados del estudio térmico en estado estacionario.

Procesamiento estudio estructural

Ambos estudios llevan un procesamiento distinto por lo que tocara insertar las siguientes condiciones de frontera para el estudio estructural estático.

La primera condición de frontera será insertar una carga en la cara superior de la geometría que simulará el peso de los cristales sobre la estructura, como se representa en la Figura 36.

F: Copy of Copy of Static Structural
Force
Time: 1. s
14/03/2023 10:17 a. m.
Force: 50210 N
Components: 0., -50210.0, 0.

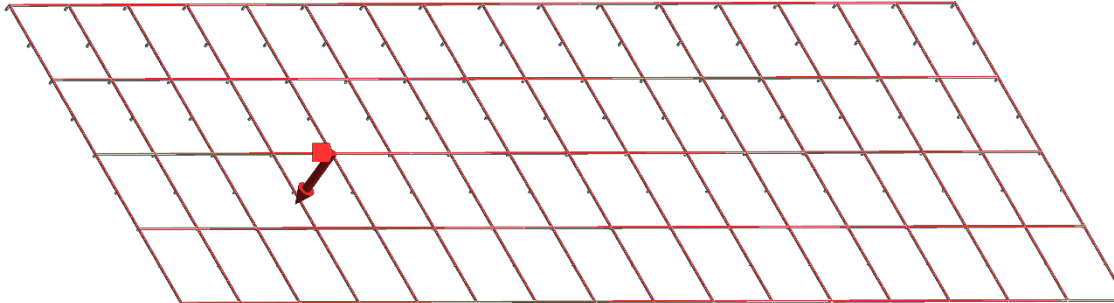


Figura 36: Cara donde se aplicó la carga.

Enseguida se agrega una condición de **Frictionless** en las caras donde la cuadrícula de aluminio esta apoyada sobre las vigas secundarias, es decir, en los soportes como se muestra en la Figura 37.

E: Copy of Static Structural
Frictionless Support
Time: 1. s
14/03/2023 10:12 a. m.
Frictionless Support

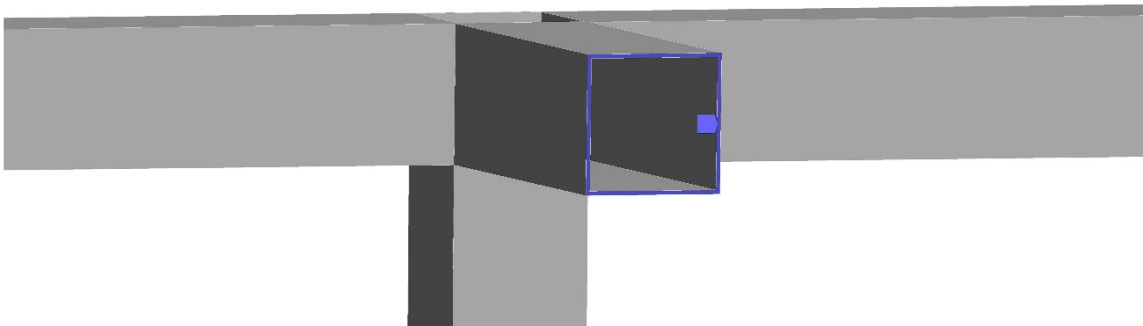


Figura 37: Caras con condición de frontera friccionales.

También fue requerida una condición de soporte fijo debido a que el lado posterior de la estructura está en contacto con una pared la cual impide su movimiento por lo cual se utilizó dicha condición en la cara de la estructura que muestra la figura 38.

E: Copy of Static Structural
Fixed Support
Time: 1. s
14/03/2023 10:09 a. m.
■ Fixed Support

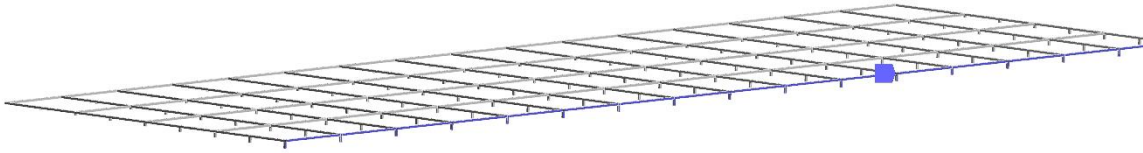


Figura 38: Soporte fijo.

Post- Procesamiento estudio estructural

Asignación de una solución estructural de Deformación, la cual mostro la deformación total de la geometría, como se muestra en la Figura 39.

r: Copy of Copy of Static Structural
Total Deformation
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 1
11/04/2023 04:39 p. m.

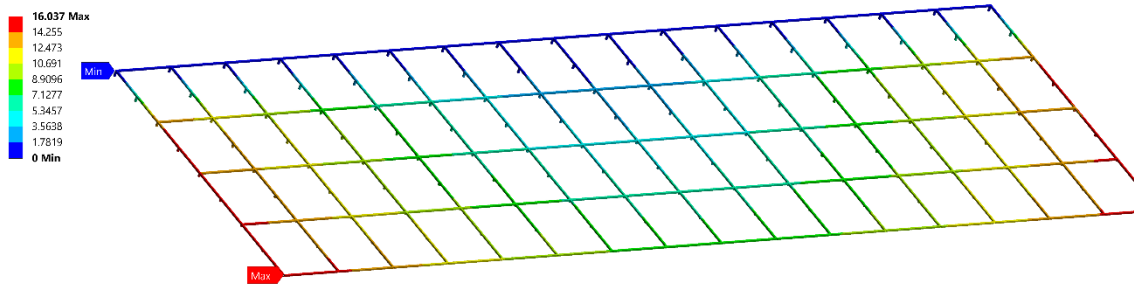


Figura 39: Solución Deformación.

Consecutivamente se agregó otra solución estructural **Equivalent stress** para conocer los esfuerzos generados por el peso de los cristales y la temperatura, la cual se aprecia en la Figura 40.

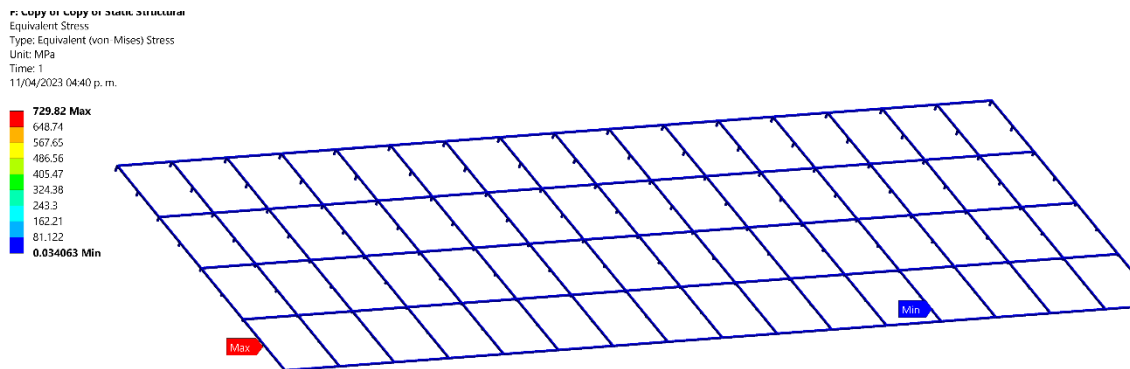


Figura 40: Solución Equivalent stress.

Por último, se agregó una solución de **Stress** para determinar el factor de seguridad de la estructura y ver si resistirá a la fuerza que aplicamos sobre ella, observe la Figura 41.

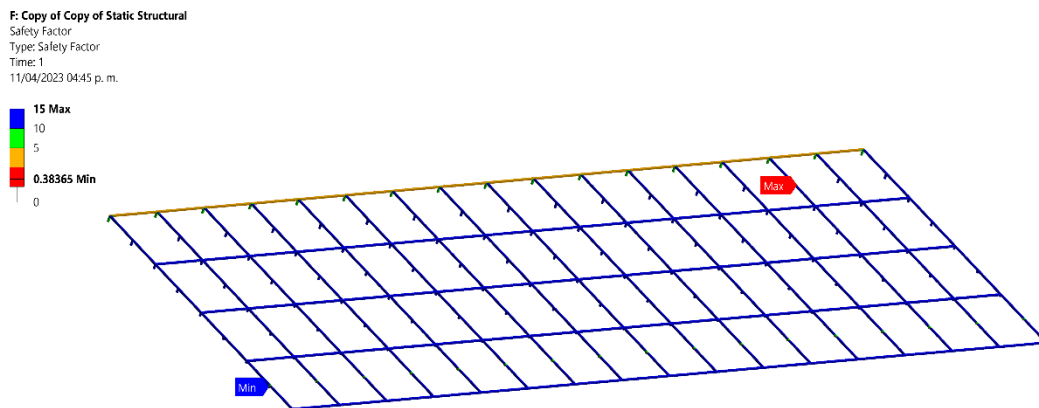


Figura 41: Solución de factor de seguridad.

Post- Procesamiento de estudio modal

Para la simulación de este estudio se replicaron las condiciones de frontera utilizadas en el previo estudio estructural.

Se asignó una solución de deformación total la cual nos muestra las deformaciones de las 6 frecuencias naturales que actúan sobre la estructura.

Frecuencia natural 1: 2.4 oscilaciones por segundo. Figura 42.

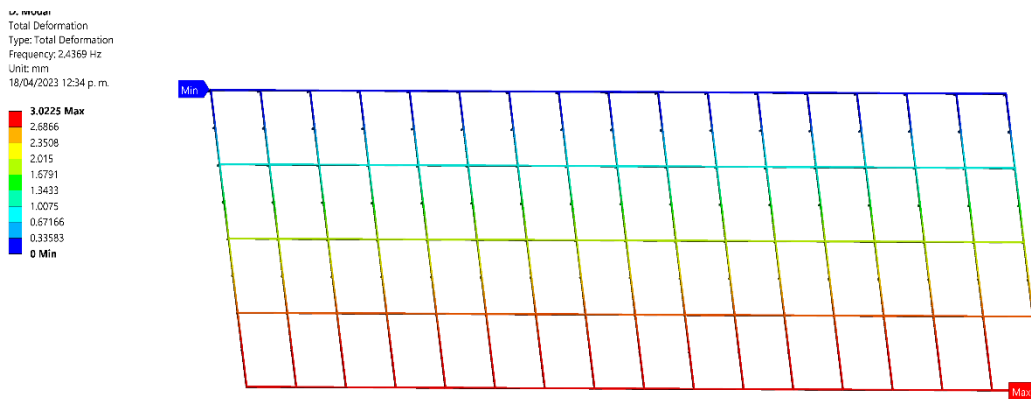


Figura 42: Deformación de frecuencia natural 1 (2.4 Hz).

Frecuencia natural 2: 7.5 oscilaciones por segundo. Figura 43.

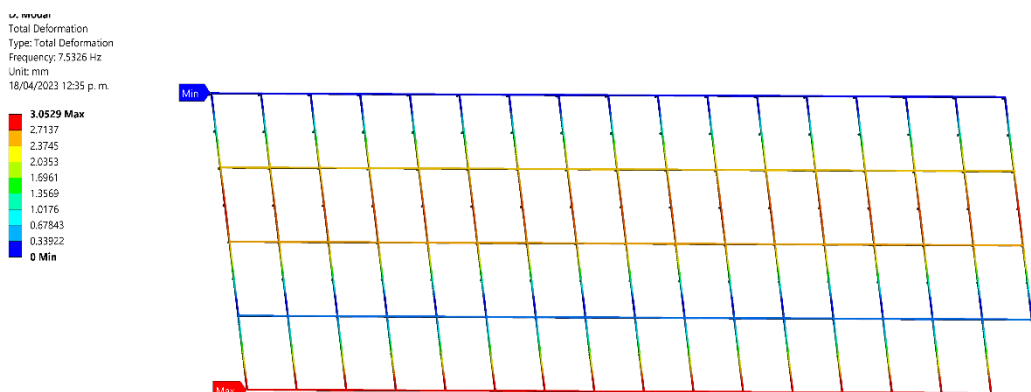


Figura 43: Deformación de frecuencia natural 2 (7.5 Hz).

Frecuencia natural 3: 13 oscilaciones por segundo. Figura 44.

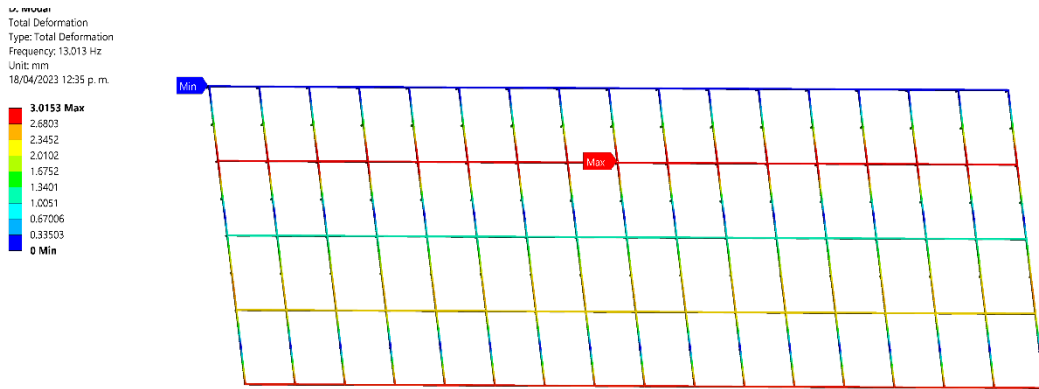


Figura 44: Deformación de frecuencia natural 3 (13 Hz).

Frecuencia natural 4: 17.4 oscilaciones por segundo. Figura 45.

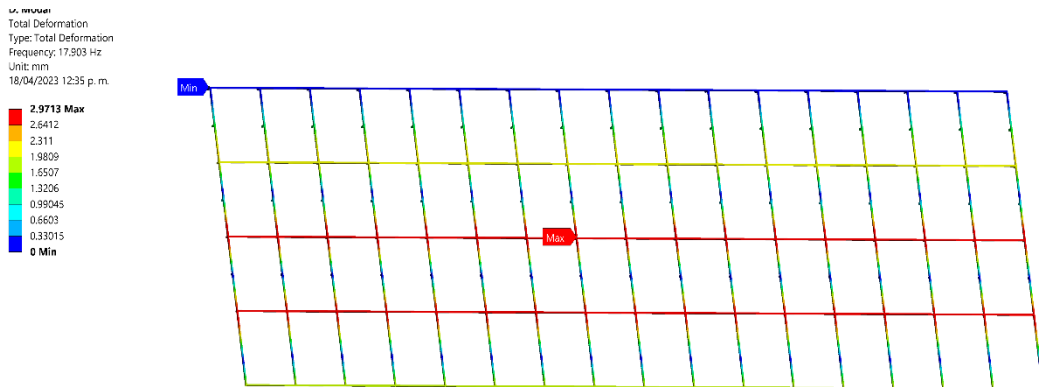


Figura 45: Deformación de frecuencia natural 4 (17.9 Hz).

Frecuencia natural 5: 39.7 oscilaciones por segundo. Figura 46.

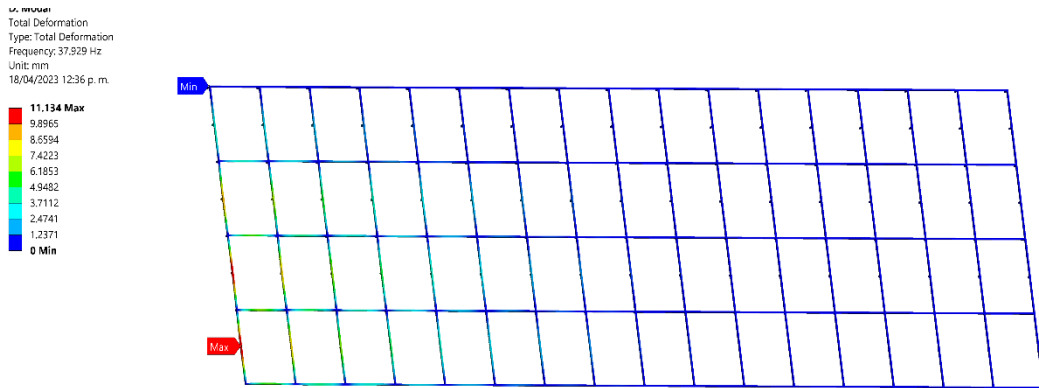


Figura 46: Deformación frecuencia natural 5 (37.9 Hz).

Frecuencia natural 6: 38.1 oscilaciones por segundo. Figura 47.

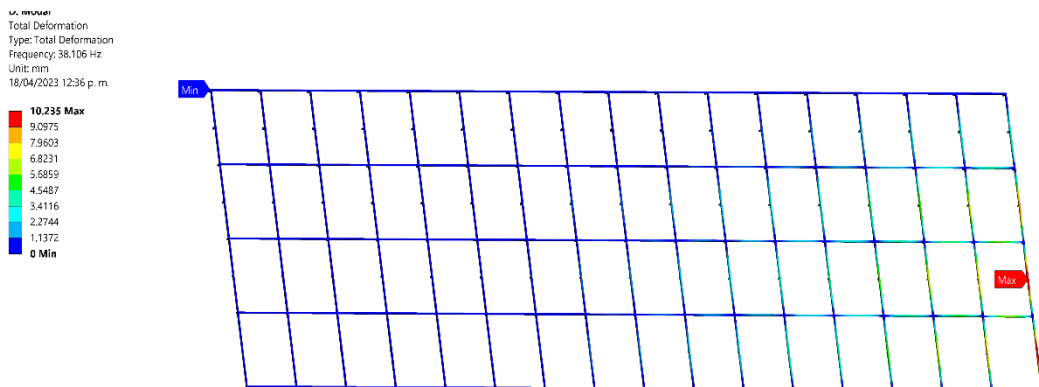


Figura 47: Deformación frecuencia natural 6 (38.1 Hz).

Capítulo 6

Resultados

Para una mejor visualización se presentarán los resultados de los estudios mediante un video de cada simulación al que se podrá acceder con los códigos QR mostrados en las Figuras 48, 49 y 50 respectivamente.

Resultados Estudio Térmico en Estado Estacionario



Figura 48: Código QR animación estudio térmico.

Resultados Estudio Estructural Estático Acoplado al Análisis Térmico



Figura 49: Código QR animación estudio estructural.

Resultados Estudio Modal



Figura 50: Código QR animación estudio modal.

Capítulo 7

Análisis de Resultados

Estudio Térmico en Estado Estacionario

Temperatura.

La distribución de temperatura que se muestra en la Figura 51, en la cual se observan las caras de la geometría que llegaron a una temperatura máxima y mínima, lo cual tiene sentido ya que en la cara superior sombreada de color rojo fue en donde se asignó la condición inicial de temperatura de 65 grados. La temperatura mínima sombreada de color azul fue señalada en el soporte de mayor tamaño ya que al ser más grande alcanza a disipar de mejor manera el calor.

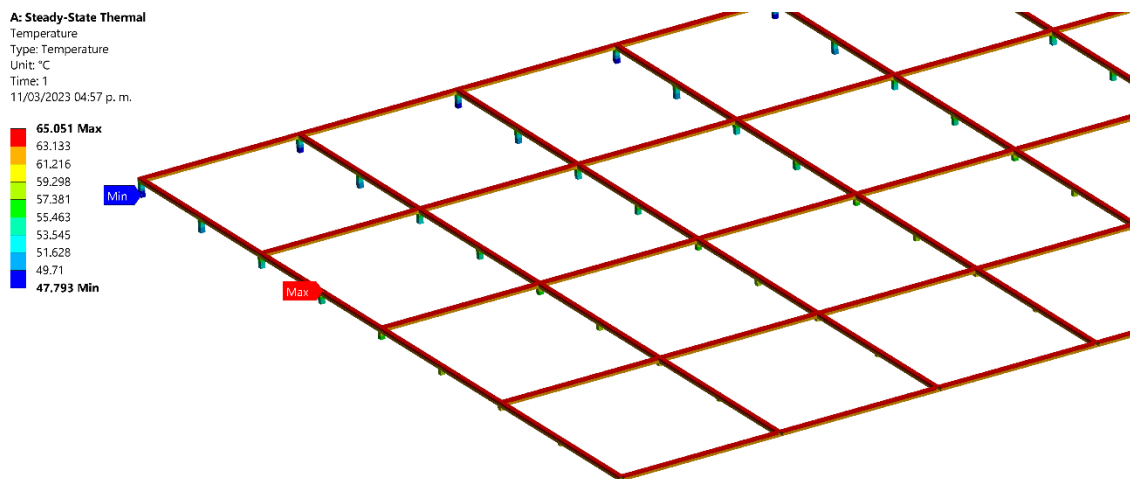


Figura 51: Distribución de Temperatura.

Flujo de Calor

Las áreas en donde se presenta un mayor flujo de calor y estas se enfocan en las uniones de los soportes con la sección superior de la estructura, esto debido a que el aluminio tiene una tasa de conductividad térmica muy elevada, se muestran los resultados en la Figura 52.

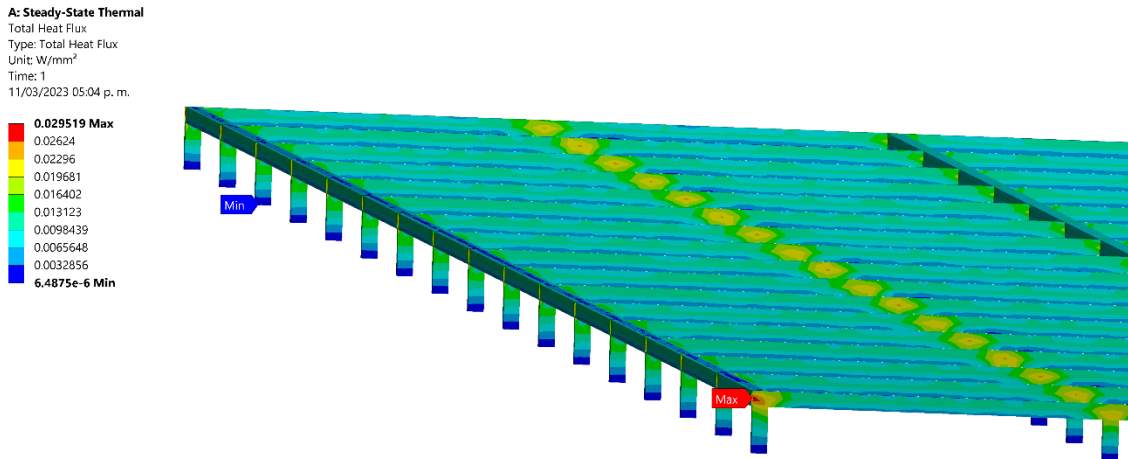


Figura 52: Flujo de Calor.

Estudio Estructural Estático Acoplado al Análisis Térmico

Deformación Total.

Las deformaciones maximas sombreadas de color rojo tuvieron un desplazamiento de 16.03 mm las cuales estan localizadas en las areas de la estructura las que no cuenta con los suficientes elementos que actuen como soporte para distribuir de mejor manera la carga a la cual esta sometida, la deformacion minima sombreada de color azul se localizan en las areas de la estructura las cuales cuentan con una mejor distribicion de la carga asi como tambien una mayor cantidad se soportes, que se muestran en la Figura 53.

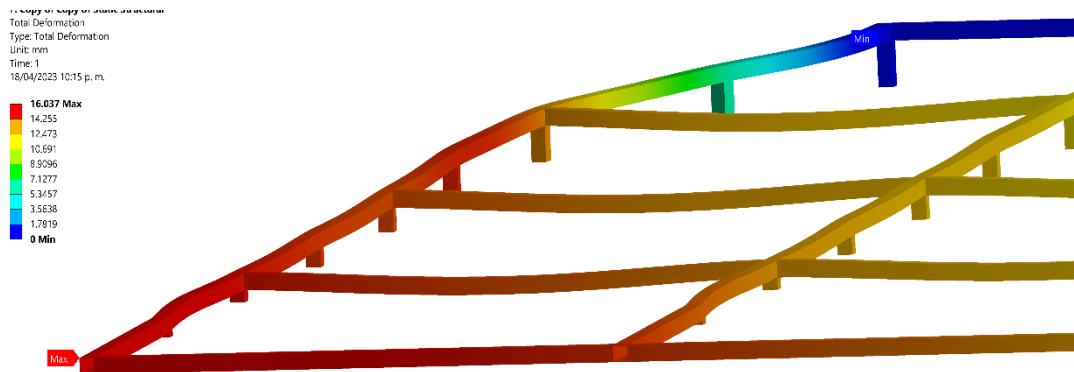


Figura 53: Deformación Total.

Esfuerzo Equivalente.

En la Figura 54 se observan las áreas específicas en donde se registran los esfuerzos máximos y mínimos en la estructura. El máximo esfuerzo se localiza en la unión de los soportes a la estructura y la menor se localiza en la parte superior de la estructura ya que al no ser un soporte no se está sometida a grandes esfuerzos.

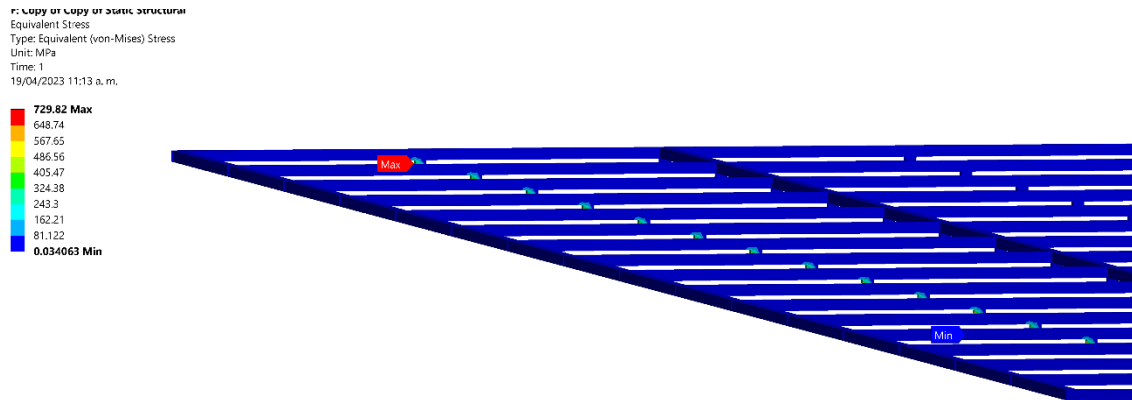


Figura 54: Esfuerzo Equivalente.

Factor de Seguridad.

Teniendo en cuenta que el mínimo valor permisible del factor de seguridad es igual a 1.

Se analizaron los resultados que se muestran en la Figura 55, se observa que las áreas sombreadas de azul soportan hasta 15 veces la carga aplicada a la estructura, las de color verdes soportan hasta 10 veces, las de color amarillas soportan hasta 5 veces, pero algunas áreas en los soportes de la estructura de aluminio se tornaron de color rojo lo que indica que son inferiores al mínimo permitido, por lo tanto son los puntos de la estructura más propensos al fallo o deformación.

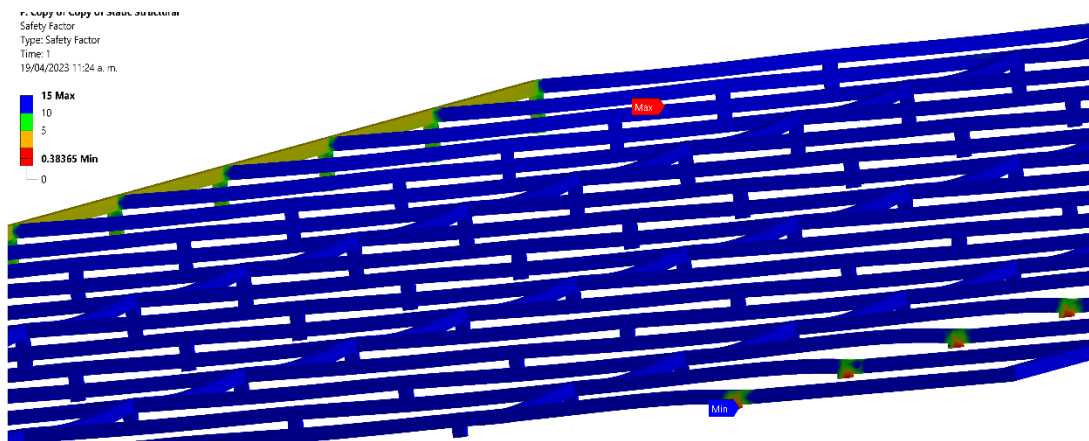


Figura 55: Factor de Seguridad.

Estudio Modal

Las frecuencias naturales que actúan sobre los distintos ejes de la estructura en el plano tridimensional son imperceptibles a la vista, pero en caso de que un fenómeno externo iguale alguna de estas frecuencias naturales causarían deformaciones visibles en la estructura.

Al aplicar una solución de “Deformación direccional” se observó cómo actúa la deformación total de las frecuencias sobre los distintos ejes tridimensionales de la estructura (X,Y,Z).

Deformación frecuencial eje X

Frecuencia direccional X 1 (2.4 Hz): se observa que la deformación que produce esta frecuencia afecta principalmente la primera columna de cristales, observe la Figura 56.

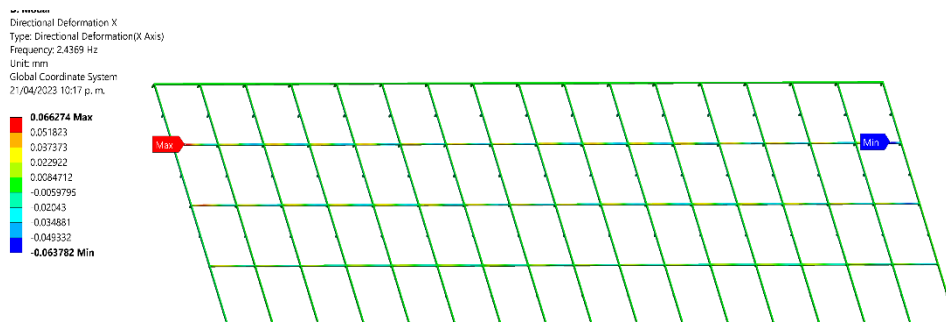


Figura 56: Deformación direccional X1.

Frecuencia direccional X 2 (7.5 Hz): se observa que la deformación que produce esta frecuencia tiene un efecto principalmente en el cristal D1, ya que es la parte de la estructura que presenta más deformación, observe la Figura 57.

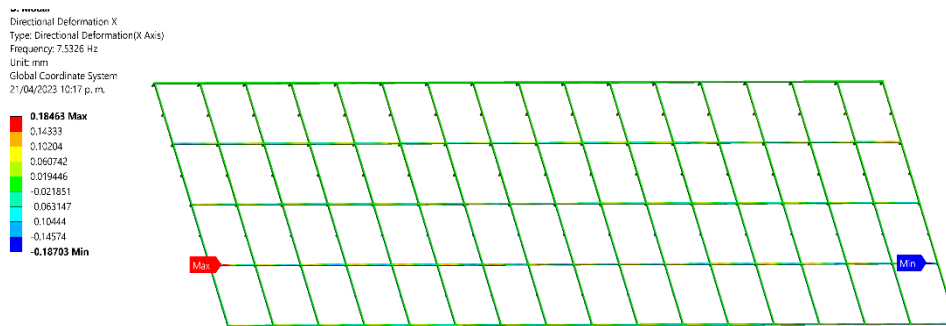


Figura 57: Deformación direccional X2.

Frecuencia direccional X 3 (13 Hz): El color rojo que indica la deformación positiva que produce esta frecuencia, se localiza principalmente en la base de los cristales B16, C16 y D1, observe Figura 58.

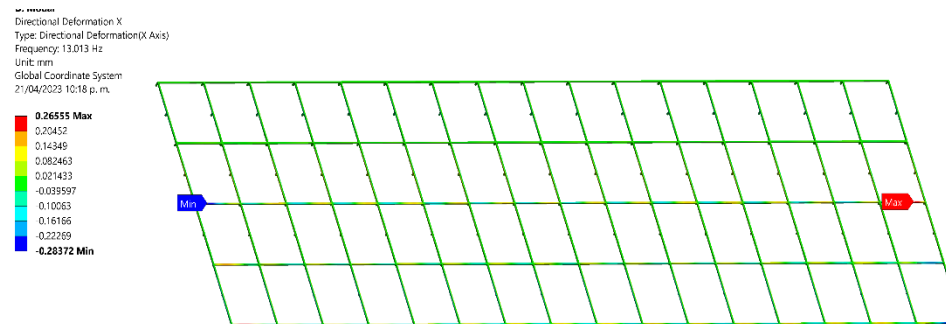


Figura 58: Deformación direccional X3.

Frecuencia direccional X 4 (17.9 Hz): se muestra que esta frecuencia causaría una deformación principalmente en la base frontal del cristal D1 y D16, observe Figura 59.

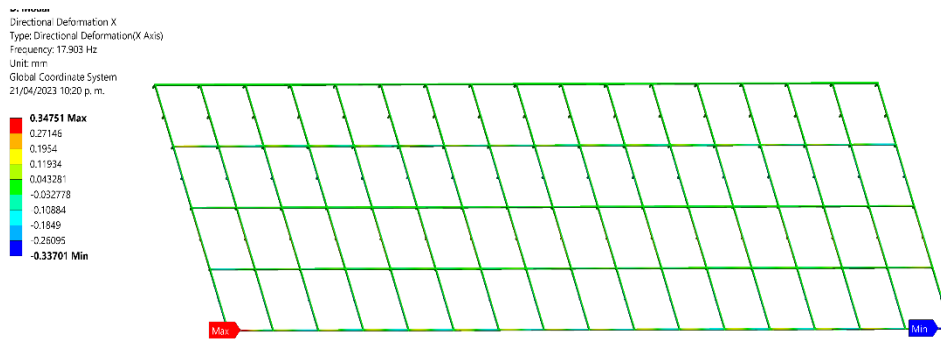


Figura 59: Deformación direccional X4.

Frecuencia direccional X 5 (37.9 Hz): se observa que esta frecuencia produce una mayor deformación; positiva como negativa, principalmente en las primeras 5 columnas de cristales, véase la Figura 60.

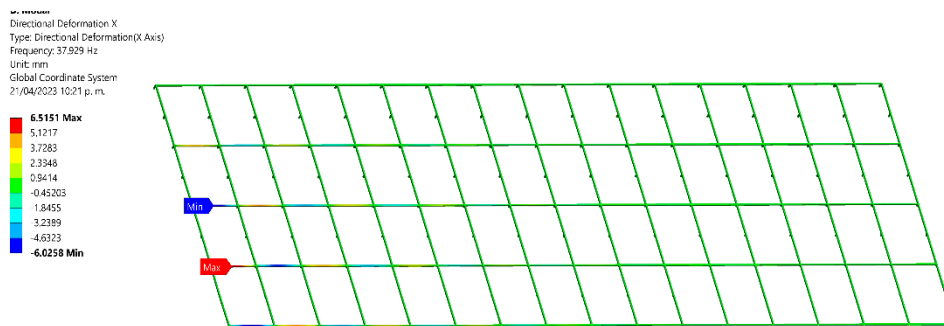


Figura 60: Deformación direccional X5.

Frecuencia direccional X 6 (38.1 Hz): esta frecuencia produce una mayor deformación direccional en x; tanto positiva como negativa, principalmente en las últimas 5 columnas de cristales, véase la Figura 61.

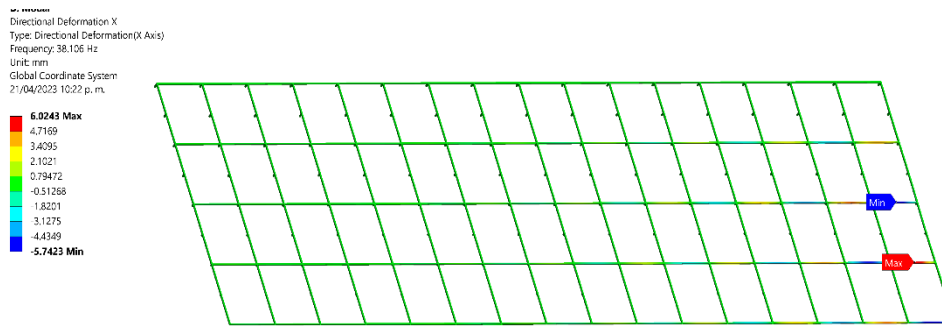


Figura 61: Deformación direccional X6.

Deformación frecuencial eje Y

Frecuencia direccional Y 1 (2.4 Hz): esta frecuencia produce una mínima deformación direccional máxima de 0.0008 mm sobre la estructura, en la Figura 62 se puede ver que afecta principalmente a los cristales A1 y A16.

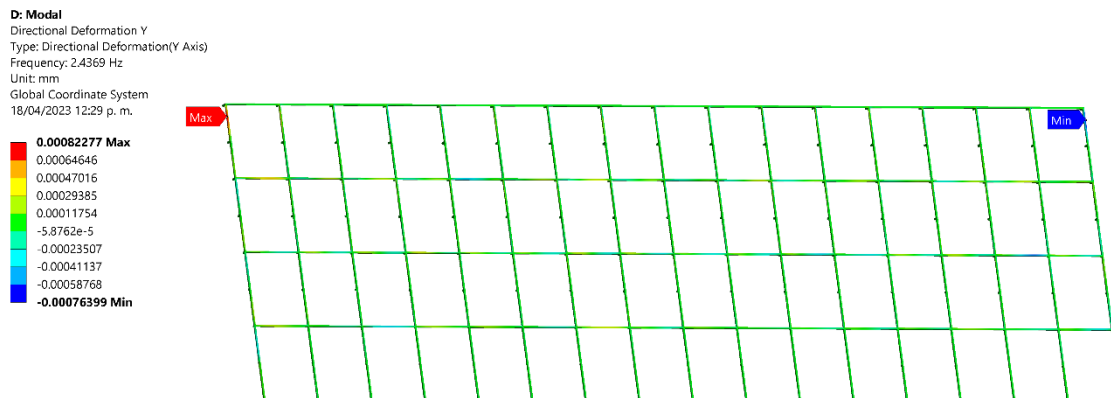


Figura 62: Deformación direccional Y1.

Frecuencia direccional Y 2 (7.5 Hz): esta frecuencia produce una deformación direccional de 0.0019 mm sobre la estructura la cual se concentra casi al centro de la estructura, observe Figura 63.

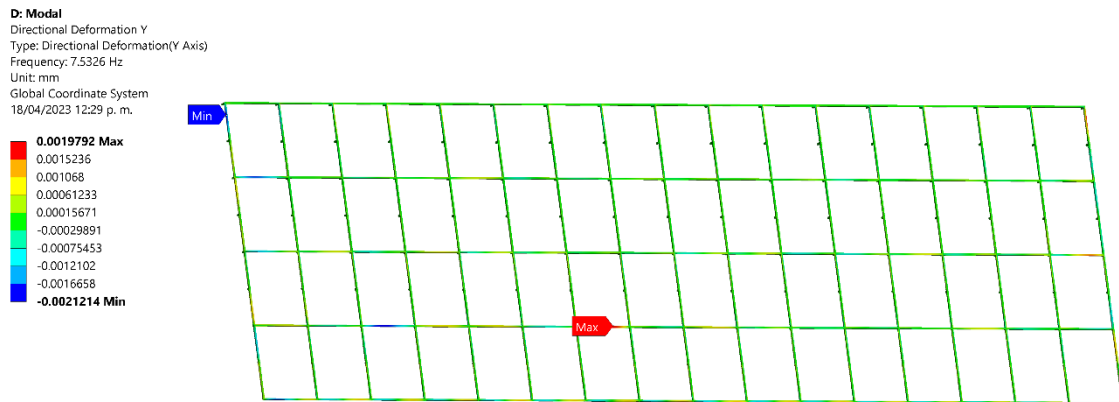


Figura 63: Deformación direccional Y2.

Frecuencia direccional Y 3 (13 Hz): esta frecuencia produce una deformación direccional sobre la estructura, la cual afecta principalmente las dos columnas extremas de la estructura como se muestra en la Figura 64.

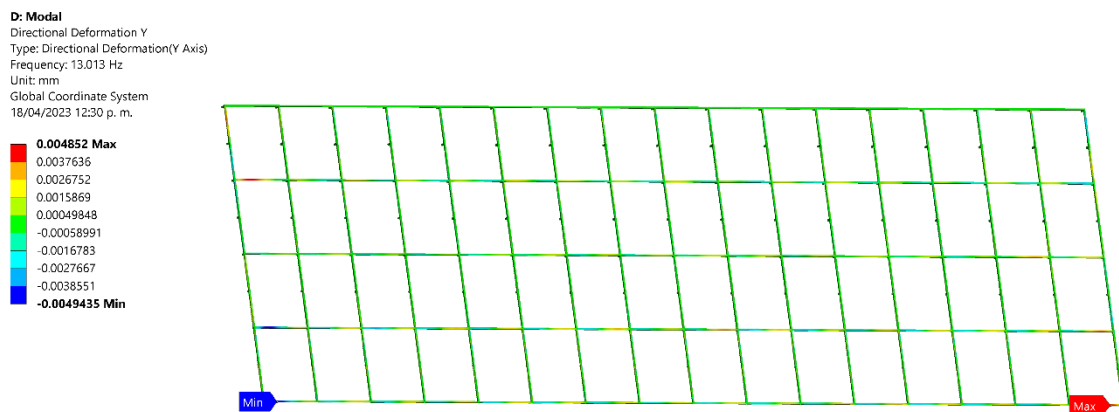


Figura 64: Deformación direccional Y3.

Frecuencia direccional Y 4 (17.9 Hz): esta frecuencia produce una deformación direccional que está presente en toda la estructura prácticamente, aunque se centra en los extremos de la tercera fila de cristales, observe la Figura 65.

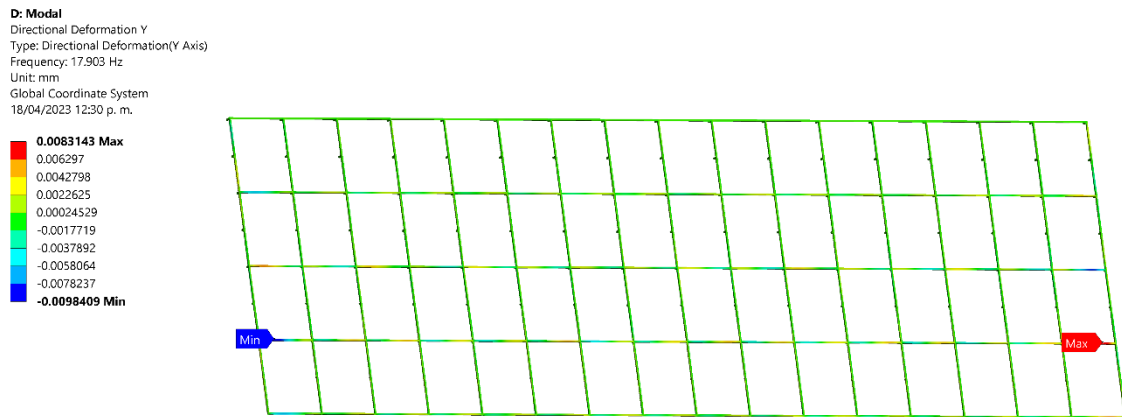


Figura 65: Deformación direccional Y4.

Frecuencia direccional Y 5 (37.9 Hz): esta frecuencia produce una deformación direccional: tanto mínima como máxima que actúa sobre los cristales D1 y D2 como se observa en la Figura 66.

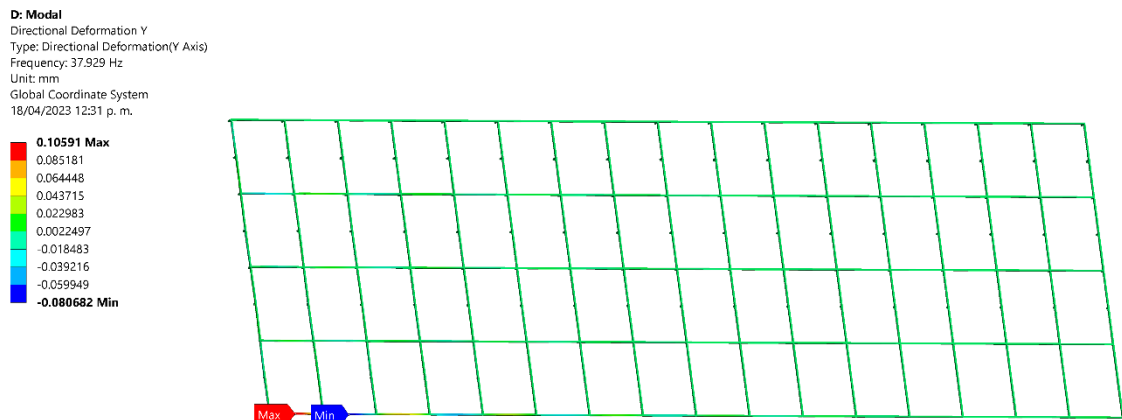


Figura 66: Deformación direccional Y5.

Frecuencia direccional Y 6 (38.1 Hz): se observa en la Figura 67 que esta frecuencia produce una deformación direccional Y más significativa en el frente derecho de la estructura, afectando a los cristales D15 y D16.

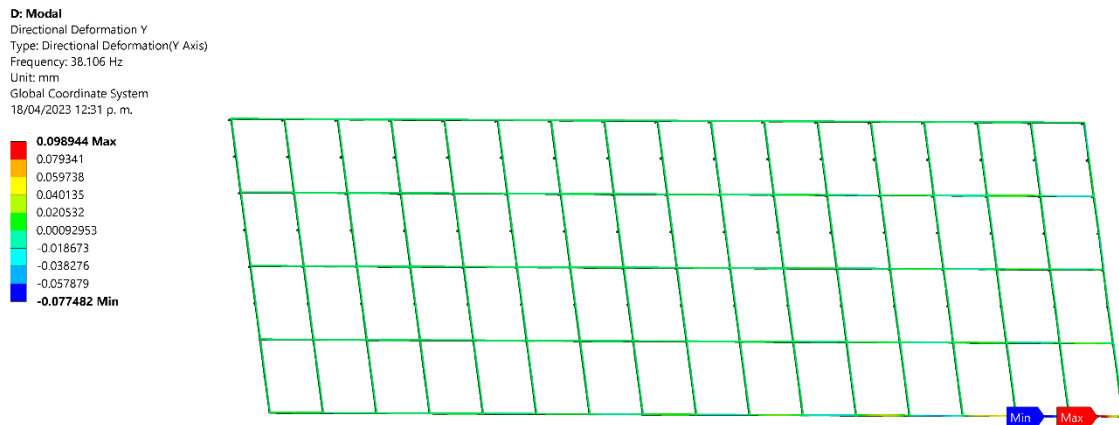


Figura 67: Deformación direccional Y6.

Deformación frecuencial eje Z

Frecuencia direccional Z 1 (2.4 Hz): se observa que esta frecuencia produce una deformación direccional Z máxima de 3mm lo que es algo considerable y afecta todo el frente de la estructura, observe la Figura 68.

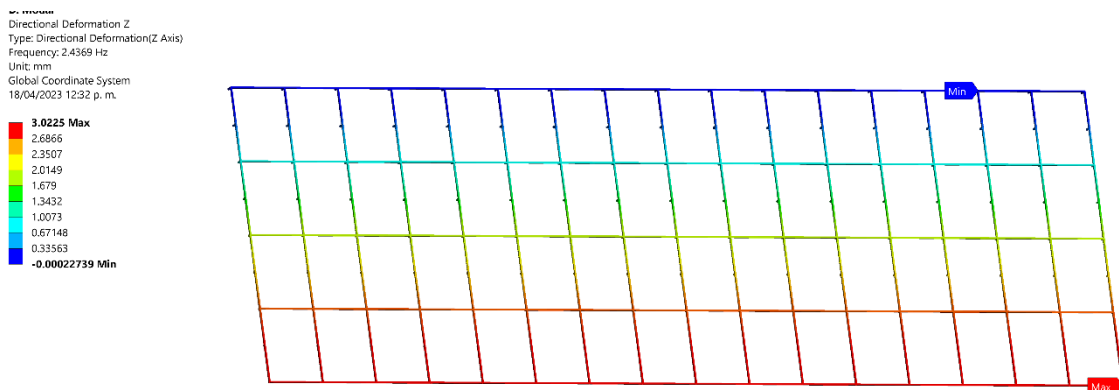


Figura 68: Deformación direccional Z1.

Frecuencia direccional Z 2 (7.5 Hz): esta frecuencia produce una deformación direccional Z máxima de 3.05 mm y una mínima de 2.8 mm, observe la Figura 69.

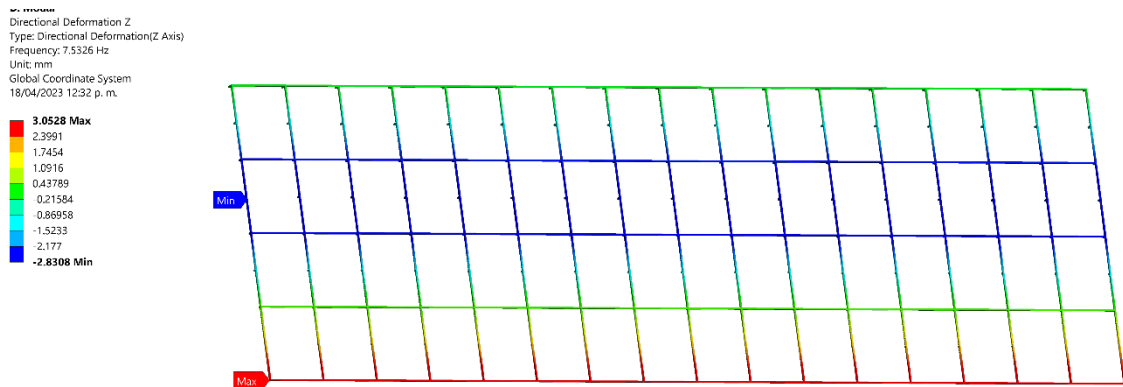


Figura 69: Deformación direccional Z2.

Frecuencia direccional Z 3 (13 Hz): se observa que esta frecuencia produce una deformación direccional Z máxima de 3mm lo que es algo considerable y afecta todo el frente de la estructura, observe la Figura 70.

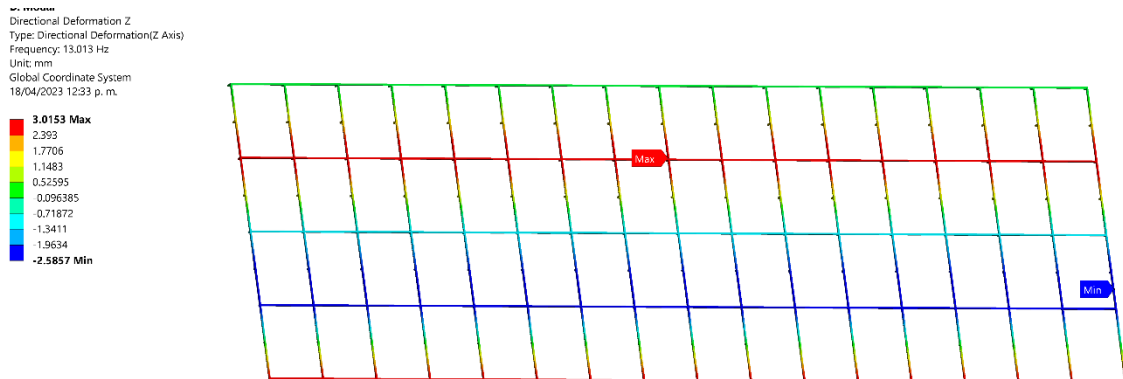


Figura 70: Deformación direccional Z3.

Frecuencia direccional Z 4 (17.9 Hz): se observa que esta frecuencia produce una deformación direccional Z de 2mm; tanto máxima como mínima la cual se centra en los soportes horizontales de la estructura como se muestra en la Figura 71.

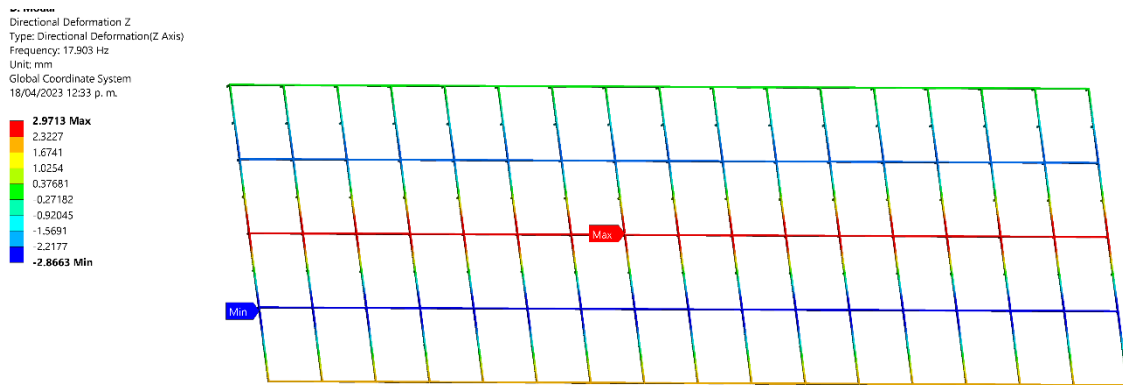


Figura 71: Deformación direccional Z4.

Frecuencia direccional Z 5 (37.9 Hz): se observa que esta frecuencia produce una deformación direccional la cual se muestra en la Figura 72, deformando principalmente la primera columna de soportes.

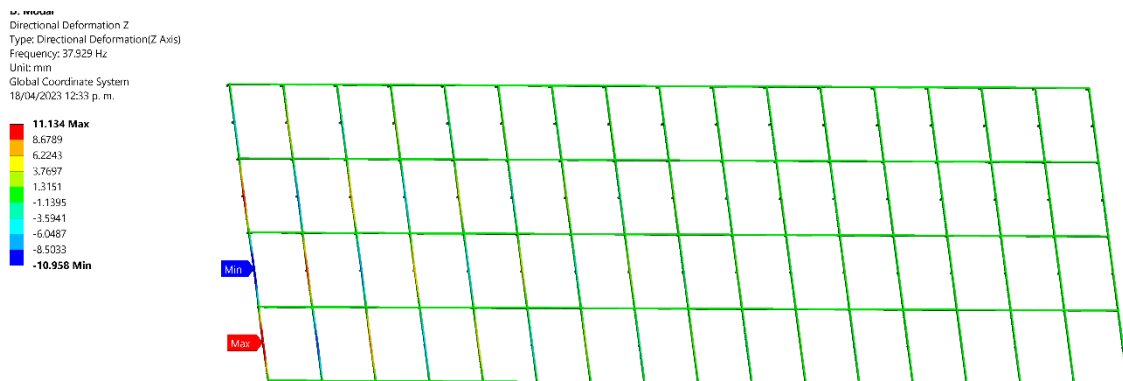


Figura 72: Deformación direccional Z5.

Frecuencia direccional Z 6 (38.1 Hz): se observa en la Figura 73 que esta frecuencia produce una deformación direccional de 10mm; tanto máxima como mínima, lo cual significaría 2 centímetros de desplazamiento entre ellas, lo que es realmente significativo y comprometería la integridad de la estructura.

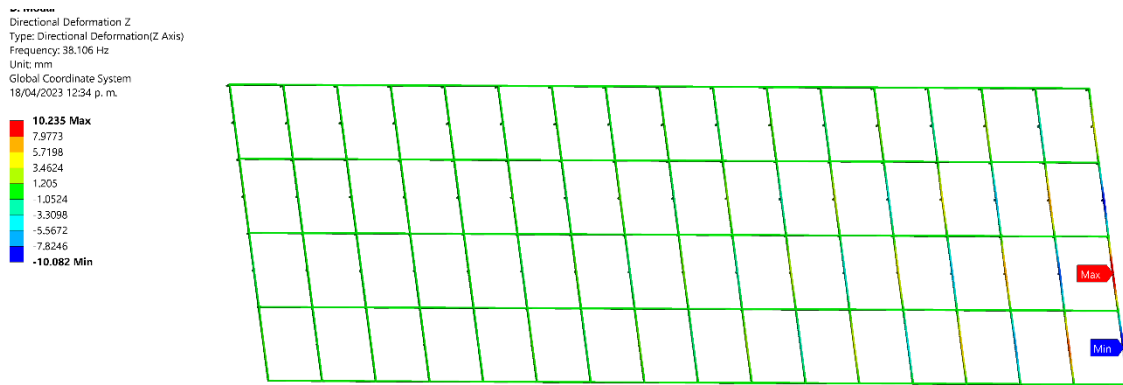


Figura 73: Deformación direccional Z6.

Para una mejor visualización se presenta la Tabla 3; en la que se muestran las frecuencias cuyas deformaciones sobrepasan un milímetro de desplazamiento y los cristales que se ven afectados por este fenómeno.

Eje	Deformación	Frecuencia Natural	Cristales afectados
X	6.51 mm	5 (37.9 Hz)	B1, C1,C2, D1, D2
X	6.02 mm	6 (38.1 Hz)	B16, C15, C16, D15, D16
Z	3.02 mm	1(2.4 Hz)	Fila C, Fila D
Z	3.05 mm	2(7.5 Hz)	Fila B, Fila D
Z	3.01 mm	3(13 Hz)	Todos los cristales son afectados
Z	2.97 mm	4(17.9 Hz)	Todos los cristales son afectados
Z	11.1 mm	5 (37.9Hz)	B1, C1,C2, D1, D2
Z	10.2 mm	6 (38.1 Hz)	B16, C15, C16, D15, D16

Tabla 3: Deformaciones mayores a 1 mm.

Capítulo 8

Conclusiones

Con los resultados obtenidos de las simulaciones se llegó a la conclusión que el material con el cual está fabricada la estructura no es el correcto puesto que las condiciones y cargas a las que está sometida dicha estructura no son las ideales para este material, ya que según los estudios realizados, en algunas áreas de la estructura sus valores de factor de seguridad son menores a 1; por lo que sufre una deformación considerable creando movimiento y falta de soporte sobre los cristales lo que los lleva a la fragmentación.

El calor es un factor muy importante que está afectando la estructura causando que esta se esté deformando, el motivo es porque el aluminio es un material con un coeficiente de conductividad térmica y de expansión muy alto, por lo tanto, al calentarse su dilatación de acuerdo al análisis realizado es de 16 milímetros.

Con el estudio modal realizado, se compararon las frecuencias naturales de la estructura con los datos de las frecuencias de vibraciones experimentales recabados y se concluyó que las vibraciones a las que se somete la estructura no son las causantes de la fragmentación de los cristales debido al tiempo y magnitud de estas, mas no se descarta el caso especial de un fenómeno sísmico, en el cual se iguale alguna de las frecuencias naturales de la estructura por un lapso de tiempo mayor a 1 segundo, produciría una deformación en la estructura lo que llevaría a la fragmentación de los cristales.

Referencias

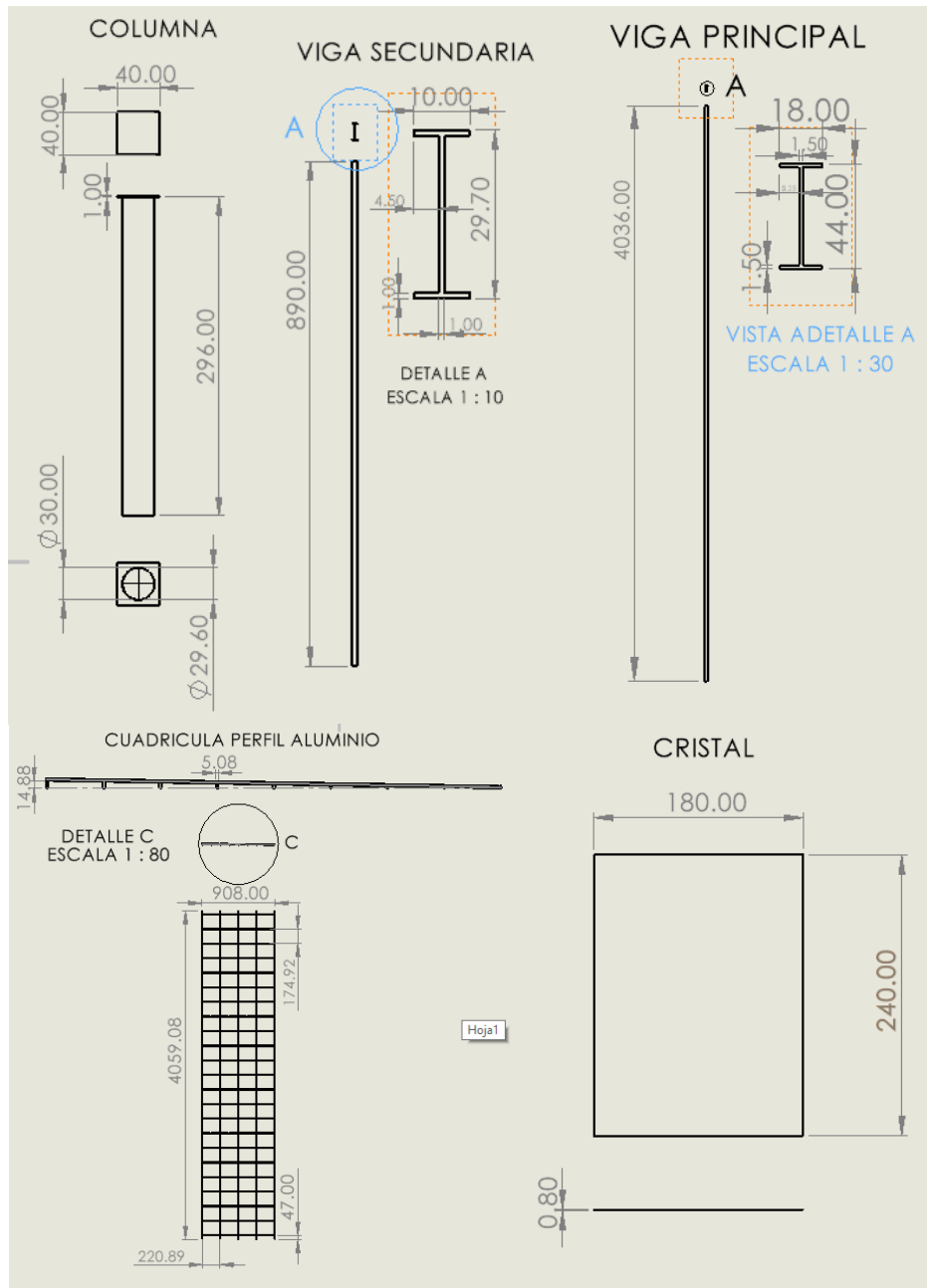
- [1] AUTODESK, «Análisis de elementos finitos,» autodesk, 1 Enero 2022. [En línea]. Available: <https://www.autodesk.mx/solutions/finite-element-analysis#:~:text=El%20an%C3%A1lisis%20de%20elementos%20finitos,efectos%20f%C3%ADsicos%20del%20mundo%20real..> [Último acceso: 20 Noviembre 2022].
- [2] G. Mirlisenna, «Blog ESSS,» ESSS simulating the future, 22 Enero 2016. [En línea]. Available: <https://www.esss.co/es/blog/metodo-de-los-elementos-finitos-que-es/>. [Último acceso: 11 2022].
- [3] DOCPLAYER.ES, «DOCPLAYER,» DOCPLAYER, 2022. [En línea]. Available: <https://docplayer.es/36677869-Deformaciones-de-las-estructuras.html>. [Último acceso: 28 Noviembre 2022].
- [4] I. R. F. Morales, «DEFORMACIONES DE LAS ESTRUCTURAS,» REVISTA DE LA UNIVERSIDAD DE MENDOZA, Mendoza, 2018.
- [5] A. Arubio, «mcncamateriales.wordpress,» mcncamateriales, 24 febrero 2020. [En línea]. Available: <https://mcncamateriales.wordpress.com/2020/02/24/unidad-1-esfuerzos-y-deformaciones/>. [Último acceso: 28 Noviembre 2022].
- [6] CIMAV, «Laboratorio de Análisis Térmico,» CONACYT, 1 enero 2020. [En línea]. Available: <http://mty.cimav.edu.mx/termico/>. [Último acceso: 1 noviembre 2022].
- [7] P. Puig Adam, «Curso teórico-práctico de ecuaciones diferencias aplicado a la Física y Técnica,» Madrid, Biblioteca Matemática, 1975, pp. 300-303.
- [8] A. F. García, «Fenomenos de transporte,» Copyright , 2016. [En línea]. Available: <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica3/transporte/conduccion/conduccion.html>. [Último acceso: 25 febrero 2023].
- [9] E. C. Leskow., «concepto.de,» Editorial Etecé, 13 Junio 2022. [En línea]. Available: <https://mcncamateriales.wordpress.com/2020/02/24/unidad-1-esfuerzos-y-deformaciones/>. [Último acceso: 28 NOIEMBRE 2022].
- [10] T. L. America, «<https://thermtest.com/>,» thermtest, 5 Marzo 2020. [En línea]. Available: <https://thermtest.com/latinamerica/que-es-la-conductividad-termica>. [Último acceso: 28 Noviembre 2022].

Referencias.

- [11] T. Materia, «todamateria.com,» 7Graus, 28 junio 2021. [En línea]. Available: <https://www.todamateria.com/transferecia-de-calor/>. [Último acceso: 28 Noviembre 2022].
- [12] L. O. Berrocal, «Resistencia de Materiales,» McGraw-Hill / Internacional Iberoamericana, Aravaca (Madrid), 2007.
- [13] C. A. J. Carballo, «repositoriotec.tec.ac.cr,» 8 Marzo 2017. [En línea]. Available: <https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/10177/Temperatura%20y%20expansi%C3%B3n%20t%C3%A9rmica.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. [Último acceso: 28 Noviembre 2022].
- [14] Omega Engineering Inc., «Termometro infrarrojo,» OMEGA TM, 1 Junio 2020. [En línea]. Available: <https://mx.omega.com/prodinfo/termometro-infrarrojo.html>. [Último acceso: 2 Noviembre 2022].
- [15] CATEC, «Centro Avanzado de Tecnologías Aeroespaciales,» FADA, 2019. [En línea]. Available: <http://www.catec.aero/es/materiales-y-procesos/l%C3%ADnea-de-investigaci%C3%B3n/an%C3%A1lisis-modal>. [Último acceso: 2 Noviembre 2022].
- [16] I. A. M. Juárez, «Monitoreo y adquisicion de vibraciones, potencia y temperatura en un motor electrico,» ITSUR, Uriangato, 2022.
- [17] R. C. Hibbeler, Mecánica vectorial para ingenieros: dinámica., Estado unidos: Pearson Educación, 2004.
- [18] M. J. Griffin, «Vibraciones,» de *ENCICLOPEDIA DE LA SALUD Y EL TRABAJO*, Madrid, Chantal Dufresne, BA, 1998, p. 50.2.
- [19] D. E. L. M. LUIS MIGUEL BARAHONA RIVERA, «ANÁLISIS ESTÁTICO DE FRECUENCIAS NATURALES,» 3 Febrero 2015. [En línea]. Available: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/7870/1/UPS-CT004704.pdf>. [Último acceso: 28 Noviembre 2022].
- [20] Uno Ingard & W. L. Kraushaar, Introducción al estudio de la mecánica, materia y ondas, Barcelona: Reverté, 1966.
- [21] HyperPhysics ©, «HyperPhysics,» Georgia State University, 1 Enero 2017. [En línea]. Available: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Tables/ttab.html#c1>. [Último acceso: 12 Noviembre 2022].

Anexos

anexo A



anexo B

