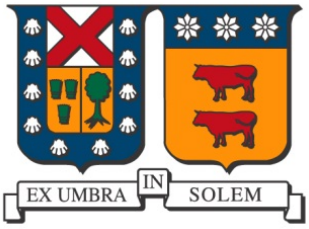
UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE MECÁNICA
VALPARAÍSO - CHILE



“DISEÑO DE UN SISTEMA PARA EL TRANSPORTE SEGURO DE INSTRUMENTOS MUSICALES”

JAVIERA SÁNCHEZ TIMMERMANN

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERA CIVIL MECÁNICA

PROFESOR GUÍA: ING. RAFAEL MENA YANSSEN
PROFESOR CORREFERENTE: DR. ING. MARIO TOLEDO TORRES

Mayo - 2026

CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Diseño de un sistema para el transporte seguro de instrumentos musicales

Nombre del candidato(a): Javiera Sánchez Timmermann

Carrera / Grado: Ingeniería Civil Mecánica

Campus: Casa Central Valparaíso **Departamento:** Ingeniería Mecánica

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Rafael Mena Youssen, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por **(marcar una opción):**

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

_____

_____

_____

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 3 - 07 - 2026 . **Firma:** _____

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 3 - 07 - 2026 **Firma:** _____

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

DEDICATORIA

A mi madre, Helga, por ayudarme y guiarme toda la vida, por los sacrificios que ha hecho por mí y por mi educación, y por ser una gran inspiración.
A mi padre, Guillermo, por apoyarme y recordarme con sus mensajes el porque de haber escogido esta carrera.
A mi pareja, Daniel, por estar ahí cuando más lo necesitaba y asegurarse de que yo pudiera seguir hasta el final.
A mis hermanos, Álvaro y Josefa, por estar ahí a todas horas, escuchándome divagar por enésima vez sobre lo mismo y escucharme como me doy la respuesta que estaba buscando.
Los amo muchísimo a todos.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi profesor guía, Rafael Mena Yanssen, por su orientación constante durante la duración de este trabajo. Su apoyo fue fundamental para llevar a buen puerto esta memoria.

También quiero agradecer a mis padres y sus parejas, a mis hermanos y hermanastros, a mis abuelos, a mis tíos y a mi pareja, por su apoyo incondicional y sus palabras de aliento, las cuales necesite para seguir adelante.

Deseo agradecer a las orquestas a las que he pertenecido, a sus integrantes, mis compañeras y compañeros, siendo en gran parte la inspiración para este trabajo.

Por último, quiero agradecer a toda persona que me haya ayudado en este camino, ya sea con información o con palabras o con su mera presencia.

RESUMEN

Resumen— Este trabajo busca diseñar un sistema para transportar de forma segura instrumentos musicales, particularmente el timbal. Se realiza un modelo del diseño en 3D, el cual se analiza haciendo una simulación en Autodesk Inventor Nastran. Se encuentra que la solución es viable, aunque se sugieren mejoras.

Palabras Clave— transporte; modelo 3D; timbal;

ABSTRACT

Abstract— The following work seeks to make a design to transport in a safely manner musical instruments, specifically the timpani. A design model is made in 3D, and is analyzed making a simulation on Autodesk Inventor Nastran. The solution is found to be viable, although improvements are suggested.

Keywords— transport; 3D model; timpani;

GLOSARIO

UTFSM: Universidad Técnica Federico Santa María.
OEUTFSM: Orquesta Estudiantil de la Universidad Técnica Federico Santa María.
USD: Dolár estadounidense.
ATA: Air Transport Association of America.
3D: tres dimensiones.

RESUMEN EJECUTIVO

En este trabajo se aborda una problemática muy particular de la orquesta de la Universidad. Esto le afecta a otras agrupaciones, pero el caso más cercano (y vivido) es el de la OEUTFSM. Se encuentra que para cada ensayo se deben mover los instrumentos a la sala de ensayo correspondiente, la cual que va variando cada ensayo. Eso es bastante común para la mayoría de instrumentos pero, en el caso de las percusiones de gran tamaño, al igual que el piano, se tiende a guardarlas en el lugar de ensayo. Al menos, en el caso de los instrumentos que pertenecen a las salas o teatros. El tener que mover dos veces por semana los instrumentos mas grandes de un lado a otro de la universidad es un tema.

De estos instrumentos, nos centraremos en el timbal. la orquesta tiene tres timbales, de 23”, 26“ y 29”. Tienen una altura aproximada de 90 [cm] y el diámetro del mas grande es de 90 [cm]. Y aunque no pasa de los 30 [kg], su volumen hace que sea complejo de mover. Además, se recomienda moverlos lo menos posible para evitar desafinar el instrumento. Por esto se tiende a evitar usar las ruedas para moverlo grandes distancias y se sujeta de a dos personas. Esta no es la mejor forma de moverlos y puede llegar a tener un accidente. Y esto sin considerar el alto costo de un timbal.

Se requiere una solución que permita el transporte de estos instrumentos de forma segura. Para esto se procede a realizar un modelo 3D usando Autodesk Inventor.

Al revisar el mercado, se encuentran un par de alternativas. Los road cases son la mejor opción para basar la solución. Estas cajas son utilizadas en el ámbito musical para mover los instrumentos y equipos cuando bandas y agrupaciones están de gira. Generalmente están compuestas por contrachapado, a veces laminado con ABS, alguna espuma para amortiguar y proteger el instrumento por dentro y accesorios y terminaciones en aluminio y acero. Algunas también incluyen ruedas para moverlas.

Se diseña una caja considerando las dimensiones del timbal de 29ƶ se procede a modelar las partes de contrachapado y espuma. Se descargan las piezas restantes para el armado disponibles en una biblioteca digital, subidas por el proveedor. Esto permite usar piezas que se pueden comprar fácilmente para el modelo.

Una vez obtenidas las piezas, se ensambla el modelo y se empieza a trabajar en Autodesk Inventor Nastran para hacer una prueba de impacto con el fin de probar la resistencia de la caja. Se hace un timbal simplificado para esto.

Se consideraron tres casos, siendo el primero dividido en dos subcasos. El primer subcaso se hizo considerando una caída de 10 [m], un caso extremo. En la simulación, se tuvo que simplificar el modelo original debido a que el cálculo no se lograba terminar, por lo que se tuvo que dejar en su mínima expresión. El segundo subcaso fue una caída de 5 [m] en la misma posición y el caso 2 y 3 tiene las mismas características, pero variando la posición inicial.

De esto, se pudo observar que la caja puede ser viable, considerando el diseño con todas sus piezas. De todas formas, se recomiendan algunos cambios para mejorar el mismo.

A lo largo de este trabajo también se encontraron algunas informaciones. En primer lugar, para el buen cuidado del timbal se debe inspeccionar con detenimiento cada mes. Para moverlo hay que tensar el cabezal. Una representante de KHS, la marca de los timbales de la OEUTFSM, dice que después de mover los timbales estos se pueden desafinar y va a necesitar balanceo y ajuste antes de cualquier ensayo o presentación. Esto me da a entender, que no importa lo cuidadoso que sea el movimiento, es difícil evitar desafinarlos. Esto no quita que se deben tratar con cuidado y deben ser tomados desde el armazón y evitar tocar todo el resto al moverlos.

Se considera este diseño como una solución viable. Sin embargo, de hacer otras simulaciones se cambiarían algunas cosas. Más que nada, se ahorraría tiempo empezando desde algo más simple. Se agregarían algunas fuerzas. El software va avanzando y se van haciendo simulaciones cada vez más complejas. Por lo que puede que más adelante se pueda hacer algo mas elaborado.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN II

ABSTRACT II

GLOSARIO III

RESUMEN EJECUTIVO IV

ÍNDICE DE FIGURAS VIII

ÍNDICE DE TABLAS X

INTRODUCCIÓN 1

CAPÍTULO 1: DEFINICIÓN DEL PROBLEMA 2

CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE 3
2.1 ESTUDIO DE MERCADO . . . 3
2.2 ESTUDIO DE CARACTERÍSTICAS DE LOS INSTRUMENTOS . . . 5

CAPÍTULO 3: MARCO CONCEPTUAL 6
3.1 ESFUERZOS Y FACTOR DE SEGURIDAD . . . 6
3.2 AUTODESK INVENTOR Y NASTRAN . . . 6
3.3 ANÁLISIS DE ELEMENTO FINITO . . . 8

CAPÍTULO 4: ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN 10

CAPÍTULO 5: DISEÑO CONCEPTUAL Y BÁSICO 13
5.1 MODELO DE LA SOLUCIÓN . . . 13
5.1.1 CAJA 2.0 . . . 13
5.1.2 CAJA 5.2 . . . 15
5.2 SIMULACIÓN DE LA SOLUCIÓN . . . 17
5.2.1 CASO 1 SUBCASO 1 . . . 17
5.2.1.1 TIPO DE ANÁLISIS . . . 19
5.2.1.2 IDEALIZACIONES . . . 20
5.2.1.3 CONDICIONES DE CONTORNO . . . 21
5.2.1.4 CONTROL DE MALLADO . . . 24
5.2.1.5 CONTACTO . . . 25
5.2.1.6 CONFIGURACIÓN DEL SUBCASO . . . 26
5.2.1.7 MALLA E INICIO DE SIMULACIÓN . . . 28
5.2.1.8 RESULTADOS . . . 29
5.2.2 CASO 1 SUBCASO 2 . . . 35
5.2.2.1 TIPO DE ANÁLISIS . . . 37
5.2.2.2 IDEALIZACIONES . . . 38

5.2.2.3 CONDICIONES DE CONTORNO 39
5.2.2.4 CONTROL DE MALLADO 41
5.2.2.5 CONTACTO 42
5.2.2.6 CONFIGURACIÓN DEL SUBCASO 43
5.2.2.7 MALLA E INICIO DE SIMULACIÓN 44
5.2.2.8 RESULTADOS 46
5.2.3 CASO 2 50
5.2.3.1 TIPO DE ANÁLISIS 53
5.2.3.2 IDEALIZACIONES 54
5.2.3.3 CONDICIONES DE CONTORNO 55
5.2.3.4 CONTROL DE MALLADO 57
5.2.3.5 CONTACTO 58
5.2.3.6 CONFIGURACIÓN DEL CASO 59
5.2.3.7 MALLA E INICIO DE SIMULACIÓN 60
5.2.3.8 RESULTADOS 62
5.2.4 CASO 3 67
5.2.4.1 TIPO DE ANÁLISIS 70
5.2.4.2 IDEALIZACIONES 71
5.2.4.3 CONDICIONES DE CONTORNO 72
5.2.4.4 CONTROL DE MALLADO 74
5.2.4.5 CONTACTO 75
5.2.4.6 CONFIGURACIÓN DEL CASO 76
5.2.4.7 MALLA E INICIO DE SIMULACIÓN 77
5.2.4.8 RESULTADOS 78

CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES **87**

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS **90**

ÍNDICE DE FIGURAS

1 Ejemplo de road case 4
2 Partes de un timbal 5
3 Figura modelada en Autodesk Inventor 7
4 Figura con malla en Nastran 7
5 Figura después de una simulación en Nastran 8
6 Alternativa de solución 1: Caja con rampa lateral 10
7 Alternativa de solución 2: Caja con apertura frontal y central 11
8 Alternativa de solución 3: Modelo Top off 12
9 Caja versión 2.0 13
10 Caja versión 5.2 16
11 Diagrama de cuerpo libre altura 10 [m] 18
12 Diagrama de cuerpo libre al inicio de la simulación 19
13 Ventana de análisis en Inventor Nastran 20
14 Caja en su versión 5.2 con vista parcial de su interior 21
15 Ventana de restricciones en Inventor Nastran 22
16 Ventana de carga 1 en Inventor Nastran 23
17 Ventana de carga 2 en Inventor Nastran 24
18 Ventana de control de la malla en Inventor Nastran 25
19 Ventana de contacto de superficies (1) en Inventor Nastran 25
20 Ventana de contacto de superficies (244) en Inventor Nastran 26
21 Ventana de damping en Inventor Nastran 27
22 Ventana de configuración dinámica en Inventor Nastran 28
23 Ventana de configuración del mallado en Inventor Nastran 28
24 Mallado final subcaso 1 caso 1 antes de iniciar la simulación en Inventor Nastran 29
25 Esfuerzo de Von Mises 30
26 Esfuerzo de Von Mises máximo 31
27 Factores de Seguridad en la caja 31
28 Dos factores de seguridad mínimos 32
29 Factor de Seguridad en la caja con concentradores de esfuerzos 33
30 Factor de Seguridad en el timbal 34
31 Factor de Seguridad mínimo del timbal 35
32 Diagrama de cuerpo libre altura 5 [m] 36
33 Diagrama de cuerpo libre al inicio de la simulación subcaso 2 37
34 Ventana de análisis en Inventor Nastran 38
35 Ventana de restricciones en Inventor Nastran 39
36 Ventana de carga 1 en Inventor Nastran 40
37 Ventana de carga 2 en Inventor Nastran 41
38 Ventana de control de la malla en Inventor Nastran 42
39 Ventana de contacto de superficies (1) en Inventor Nastran 42
40 Ventana de contacto de superficies (244) en Inventor Nastran 43
41 Ventana de damping en Inventor Nastran 44
42 Ventana de configuración dinámica en Inventor Nastran 44

43 Ventana de configuración del mallado en Inventor Nastran 45
44 Mallado final subcaso 2 caso 1 antes de iniciar la simulación en Inventor Nastran 45
45 Esfuerzo de Von Mises subcaso 2 46
46 Esfuerzo de Von Mises máximo 47
47 Esfuerzo de Von Mises puntos de interés 48
48 Factores de Seguridad en la caja subcaso 2 48
49 Esfuerzo de Von Mises timbal subcaso 2 49
50 Factores de seguridad timbal subcaso 2 50
51 Caja girada para caso 2 51
52 Diagrama de cuerpo libre caso 2 52
53 Diagrama de cuerpo libre al inicio de la simulación caso 2 53
54 Ventana de análisis en Inventor Nastran 54
55 Ventana de restricciones en Inventor Nastran 55
56 Ventana de carga 1 en Inventor Nastran 56
57 Ventana de carga 2 en Inventor Nastran 57
58 Ventana de control de la malla del caso 2 en Inventor Nastran 58
59 Ventana de contacto de superficies (242) del caso 2 en Inventor Nastran . . . 58
60 Ventana de contacto de superficies (244) del caso 2 en Inventor Nastran . . . 59
61 Ventana de damping en Inventor Nastran 59
62 Ventana de configuración dinámica en Inventor Nastran 60
63 Ventana de configuración del mallado en Inventor Nastran 61
64 Mallado final caso 2 antes de iniciar la simulación en Inventor Nastran 61
65 Los pasos de tiempo del caso 2 62
66 Esfuerzo de Von Mises caso 2 63
67 Factores de Seguridad en la caja caso 2 64
68 Esfuerzo de Von Mises timbal caso 2 65
69 Esfuerzo de Von Mises timbal caso 2 66
70 Factores de seguridad timbal subcaso 2 67
71 Caja en posición para caso 3 68
72 Diagrama de cuerpo libre caso 3 69
73 Diagrama de cuerpo libre al inicio de la simulación caso 3 70
74 Ventana de análisis en Inventor Nastran 71
75 Ventana de restricciones en Inventor Nastran 72
76 Ventana de carga 1 en Inventor Nastran 73
77 Ventana de carga 2 en Inventor Nastran 74
78 Ventana de control de la malla del caso 3 en Inventor Nastran 75
79 Ventana de contacto de superficies (1) del caso 3 en Inventor Nastran 75
80 Ventana de contacto de superficies (243) del caso 3 en Inventor Nastran . . . 76
81 Ventana de damping en Inventor Nastran 76
82 Ventana de configuración dinámica en Inventor Nastran 77
83 Ventana de configuración del mallado en Inventor Nastran 77
84 Mallado final caso 3 antes de iniciar la simulación en Inventor Nastran 78
85 Esfuerzo de Von Mises caso 3 79
86 Esfuerzo de Von Mises cerca del punto de contacto 80

87 Esfuerzo de Von Mises vista de la base de la caja 80
88 Factores de seguridad en la caja caso 3 81
89 Factor de seguridad en el punto de contacto 82
90 Factores de seguridad vista de la base de la caja 83
91 Esfuerzo de Von Mises timbal caso 3 84
92 Factores de seguridad timbal caso 3 85
93 Factor de seguridad mínimo timbal caso 3 86

ÍNDICE DE TABLAS

1 Lista de partes de la Caja versión 2.0 Fuente: Elaboración Propia. 14
2 Lista de partes de la Caja versión 5.2 Fuente: Elaboración Propia. 16
3 Características de materiales utilizados Fuente: Elaboración Propia. 21
4 Características de materiales utilizados Fuente: Elaboración Propia. 38
5 Características de materiales utilizados Fuente: Elaboración Propia. 54
6 Características de materiales utilizados Fuente: Elaboración Propia. 71

INTRODUCCIÓN

En el último tiempo la tecnología ha avanzado a un paso apresurado, en especial si se compara con las pasadas décadas o el último siglo. Los medios de transporte se han adaptado a la gran demanda de bienes y a sus distintas necesidades. Ya sea para el transporte seguro de sustancias peligrosas, víveres u objetos de gran tamaño, estos se transportan alrededor del globo todos los días. Sin embargo, el transporte de tanto objetos como individuos sigue siendo de lo más simple, es decir, conseguir una envoltura o caja, lograr mover el objeto o caja uno mismo o con la ayuda de un tercero, conseguir un medio de transporte, como una camioneta o camión de mudanzas de ser necesario y llegar a destino. Para distancias menores, transportarlo con un tipo de carro de carga o con la ayuda de otra persona es lo más común.

¿Qué sucede para cosas frágiles, o de grandes dimensiones? Manipular mal carga puede llevar a lesiones y a perdida material.

El caso concreto que se va a estudiar en este trabajo es el transporte de instrumentos para orquesta. Estos instrumentos son costosos, de gran tamaño y/o peso y se requiere una forma segura de moverlos.

Dependiendo del tipo de orquesta, nos encontramos con distintos tipos de instrumentos que la conforman. Una orquesta sinfónica puede ser formada por 80 músicos, los cuales se dividen en cuerdas, maderas, bronces y percusiones.

Todas las familias tienen sus particularidades. La percusión tiene una gran variedad de instrumentos, pasando por la caja, la marimba, los platillos, el triángulo, entre otros. Uno de los instrumentos principales que los caracteriza es el timbal.

El timbal es un instrumento de percusión de membrana que esta formado por un caldero de cobre u otro material, el cual esta cubierto por una membrana. Se caracterizan por el diámetro del parche, siendo el mas pequeño de 51 cm y el más grande de 81 cm, con una altura cercana a los 90 cm dependiendo del modelo. Es un instrumento delicado, que requiere cuidado al ser movido entre lugares.

Según el estado del arte, existen algunas alternativas de transporte, pero estas se pueden mejorar. A continuación, se expondrán posibles soluciones con este fin, una de estas será simulada utilizando la herramienta Autodesk Inventor Nastran.

CAPÍTULO 1
DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Durante mis años en la universidad, he participado en la orquesta de mi casa de estudios y, con el paso de los años, la orquesta ha ido adquiriendo más instrumentos para sus integrantes. Estos se deben mover de las salas asignadas para la orquesta a donde se produzca el ensayo cada vez que toca. En general, no es tan complejo, pero esto se ha ido complicando con la adquisición del piano, los timbales y demás accesorios de las percusiones. Para mover eficientemente solo los tres timbales se necesitan seis personas. Para los demás accesorios y si se requiere el piano, se necesitan más personas todavía. Cabe destacar que hay cinco percusionistas o menos y los demás deben llevar sus instrumentos e implementos que necesiten. Esto se vuelve más complejo cuando se trata de mover todo desde el edificio P al T o al aula magna. Y esto es solo para dentro del campus, la logística para llevar todo a otros lugares de la región o incluso otros campus es bastante compleja.

Los timbales, el piano y otros instrumentos no están hechos para ser movidos constantemente. Sin embargo, esto es una necesidad, no solo para la orquesta de la universidad, si no que para otras agrupaciones musicales. Se necesita mucho espacio para poder guardar este tipo de instrumentos.

Por lo anterior, se desea encontrar una solución eficiente para el transporte de seguro de instrumentos musicales. Para esto se analizara el estado del arte de soluciones existentes en el mercado actual. Se estudiaran las recomendaciones de fabricantes para la manipulación de instrumentos y se analizaran las geometrías y materialidades de los instrumentos.

Con todo esto se busca llegar a elaborar alternativas de soluciones y llegar a la ingeniería básica de un diseño final.

CAPÍTULO 2
ESTADO DEL ARTE

En está sección se expondrán los productos ya existentes en el mercado que se utilizan para el transporte de instrumentos y las características de estos.

2.1. ESTUDIO DE MERCADO

Buscando información sobre formas de transportar instrumentos musicales, se encuentran varios productos con este propósito. Para la mayoría de instrumentos, existen cajas (cases en inglés) que cumplen con proteger y facilitar su transporte, adaptándose a la forma del instrumento en cuestión.

Para la percusión existen diversas opciones, debido a que esta familia consta de cientos de instrumentos y accesorios de distintas características. La mayoría tiene algún tipo de bolso para su transporte y, en algunos casos, también para el transporte del atril que los soporta.

En el caso particular del timbal, se encontraron dos tipos de soluciones disponibles en el mercado. Los bolsos o cubiertas, los cuales son de materiales resistentes utilizados en la industria con el fin de cubrir y proteger a los instrumentos pero, al cubrir parcial o completamente el instrumento, dificulta el poder tomar el instrumento correctamente para su transporte y por sus dimensiones no se puede tomar como una mochila o bolso, y cajas adaptadas para estos instrumentos, algunas cuentan con ruedas para fácil movimiento. Las últimas serían una buena opción para facilitar el transporte, pero tienen un alto costo, con modelos desde los 2000 USD, y no son muy comunes (Percussion Source, s.f.). Cabe destacar que los modelos encontrados cumplen con ATA SPEC 300, la cual define ciertas características que deben cumplir cajas para transporte aéreo (Wikipedia contributors, 2026, sec. Construction).



Figura 1: Ejemplo de road case
Fuente: Road-case-telescoping-handle-vol-case [Fotografía], 2026, Wikimedia Commons (https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=181466414). CC0 1.0

Investigando este tipo de cajas, conocidas como “road cases”las cuales son estuches rígidos que son utilizados para el transporte de equipos delicados y pesados, se encontró información de como construirlas, mencionando el alto costo y la posibilidad de ajustar a los requerimientos propios (DIY Road CasesTM Store - Road Case Hardware, s.f.).

2.2. ESTUDIO DE CARACTERÍSTICAS DE LOS INSTRUMENTOS

Para diseñar una propuesta de sistema se necesitan saber algunas características de los timbales. Hay varias recomendaciones de fabricantes y profesionales sobre el cuidado y transporte de estos instrumentos.

Para esto se tienen que saber las distintas partes que componen un timbal:



Figura 2: Partes de un timbal
Fuente: Adaptado de timpani [Fotografía], por adil113, 2011, Flickr (https://flic.kr/p/a7wwou). CC BY 2.0

Las partes que nos interesan se muestran en la figura 2, es decir, la membrana, el aro de soporte, la columna o armazón y la caldera. Según las recomendaciones de fabricantes (Wollwage, 2021) se debe levantar el timbal desde el armazón dependiendo del modelo en cuestión. No se debe tomar desde el aro de soporte, esto podría producir daños al borde de la membrana y distorsionar el tono del instrumento (M. Bandy, comunicación personal, 26 de febrero de 2024).

Según lo expuesto en la definición del problema, se quiere considerar una solución para los timbales utilizados en la orquesta de la universidad. Estos son los modelos MTG2300AP, MTG2600AP Y MTG2900AP de la marca Majestic. Según la descripción de la página web oficial de Majestic (Majestic, s. f.), la caldera es de fibra de carbono, el marco, es decir, la base y asideros son de aluminio fundido. La membrana es de la marca remo modelo renaissance, que consta de una película especialmente tratada y un aro de aluminio para mejor estabilidad.

CAPÍTULO 3
MARCO CONCEPTUAL

3.1. ESFUERZOS Y FACTOR DE SEGURIDAD

Para realizar la evaluación mecánica de la caja y timbal se utilizará como parámetro el esfuerzo máximo de Von Mises y el correspondiente factor de seguridad.

El esfuerzo de Von Mises proviene de la teoría de fallas de energía de Distorsión Máxima y se obtiene de la siguiente ecuación:

$$\sigma_{vm} = \left[\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}\right]^{1/2}$$

Donde σ_1, σ_2 y σ_3 son los esfuerzos principales, los cuales se obtienen de los componentes de esfuerzos normales y cortantes del elemento a analizar y el plano principal, obteniendo así los esfuerzos normales al plano.

El factor de seguridad es un índice que relaciona la resistencia del material con el esfuerzo aplicado al elemento analizado.

$$n = \frac{\sigma}{\sigma_{adm}} 1$$

3.2. AUTODESK INVENTOR Y NASTRAN

Con el fin de modelar la solución se hace uso de la herramienta Autodesk Inventor, que es una aplicación de diseño desarrollada por Autodesk. Inventor permite crear y analizar modelos en 2D y 3D, pudiendo comprobar forma y funcionalidad sin necesidad de construir un prototipo físico.

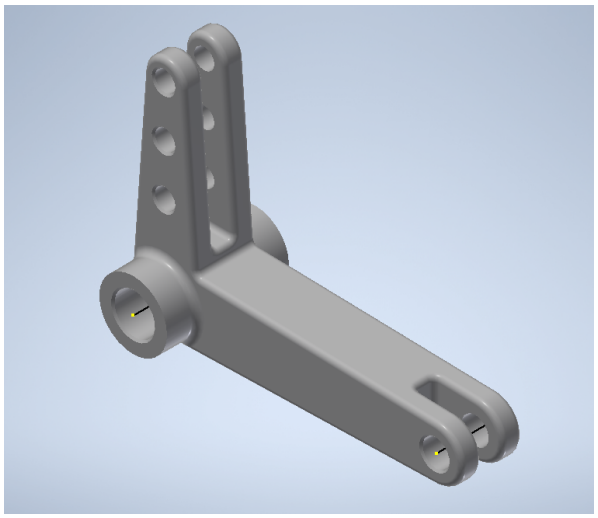


Figura 3: Figura modelada en Autodesk Inventor
Nota. Captura de pantalla en Autodesk Inventor

Para realizar una simulación con la solución propuesta se utiliza el software Autodesk Inventor Nastran. Nastran es una herramienta que se utiliza dentro de Autodesk Inventor que permite hacer análisis de elemento finito. Este usa el solucionador de Nastran, ofreciendo así opciones para simular análisis de transferencia de calor, de elementos dinámicos y estáticos.

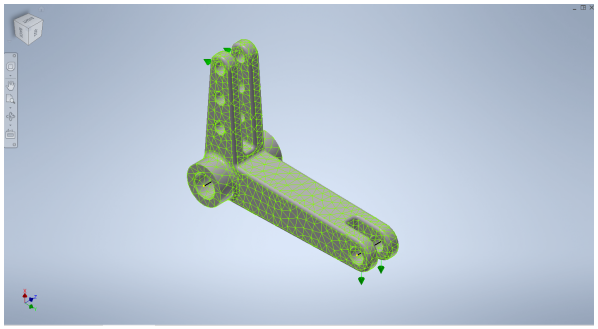


Figura 4: Figura con malla en Nastran
Nota. Captura de pantalla en Autodesk Inventor

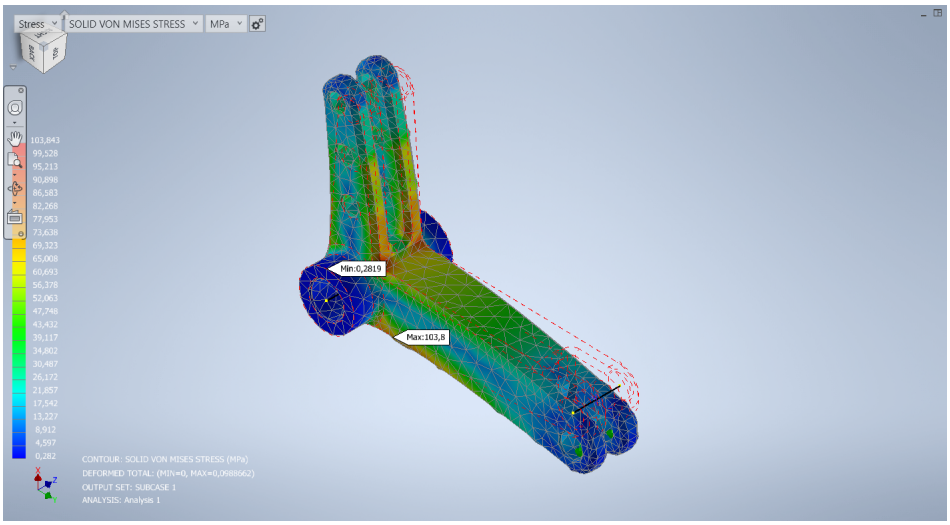


Figura 5: Figura después de una simulación en Nastran
Nota. Captura de pantalla en Autodesk Inventor

3.3. ANÁLISIS DE ELEMENTO FINITO

El análisis busca resolver F= Kx F=[K]x o P= Ma+Bv+Kx para dinámica.

Se puede dividir el análisis de elemento finito en los siguientes pasos:

- Crear la geometría a estudiar. Esto se hará con Autodesk Inventor.
- Asignar materiales y sus propiedades.
- Crear el mallado.
- Aplicar las cargas relevantes al estudio y también las limitaciones.
- Revisar los resultados

Se deben realizar ciertos supuestos para realizar el análisis con respecto a materiales, geometrías, mallado, cargas, limites y condiciones físicas.

Para el modelado existen algunas idealizaciones; vigas, simetría, planos, placas, sólidos, entre otros.

Un mallado de elemento finito esta formado por nodos, puntos en un espacio 3D, y elementos, las áreas o volúmenes definidos por los nodos. Los elementos se dividen en elementos sólidos, los cuales se conforman de a lo menos 4 nodos y tienen volumen, elementos “shell”,

estos solo tienen área y se les debe especificar un espesor, y elementos “line”, que son una línea y requieren una sección transversal y orientación especificada.

Se necesitan definir los materiales y sus propiedades. Cada material tiene sus propias características y estas son necesarias para el análisis. También se de definir si el elemento es Hola con respecto a los materiales. Me los modelos se debe definir, sí, por ejemplo, es isotrópico, orto-trópico o aniso-trópico.

Se debe analizar si se puede idealizar el material de ser no-linear. Dependiendo del rango de trabajo se podría idealizar como linear para facilitar el cálculo.

Se deben definir correctamente las geometrías a estudiar y se tiene que considerar que a mayor complejidad más difícil de realizar es la simulación. A veces, se debe llevar a su expresión mas simple.

El mallado debe adaptarse a la necesidad, mientras mas pequeño, mejor es el cálculo pero, este es mas caro. Se debe priorizar las zonas de mayor complejidad de la geometría o la zona que se desea estudiar en específico.

Se deben agregar las condiciones de borde según lo requiera y cargas según el tipo de estudio.

CAPÍTULO 4
ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN

De las soluciones ya disponibles se considero que las cajas eran una buena opción, por lo cuál se decide diseñar una de bajo costo, que facilite su movimiento y que se pueda cargar en un vehículo que tenga dimensiones que lo permitan.

Como base para el diseño de la solución se usó las “road cases”, estuches rígidos que son utilizados para el transporte de equipos delicados y pesados. Se utilizan en una gran variedad de rubros y, en lo musical, son usados constantemente para tours, desde bandas a orquestas. Por lo mismo, vienen en una gran variedad de tamaños y formas, y se pueden adaptar las propias necesidades.

Lo que nos interesa es encontrar una forma de caja que nos permita extraer y cargar el timbal de la manera mas simple posible, sin complicar demasiado el diseño.

Primero se estudio una solución en base a la opción disponible según el estudio de mercado, una caja con una rampa en uno de sus lados (figura 6). Esta ya es una buena solución, pero algo que se considero una falencia es que ser complicado de soltar y mover el timbal con solo una apertura. Esto porque solo se puede tomar desde el armazón, por lo que el espacio limitado puede dificultar su extracción.

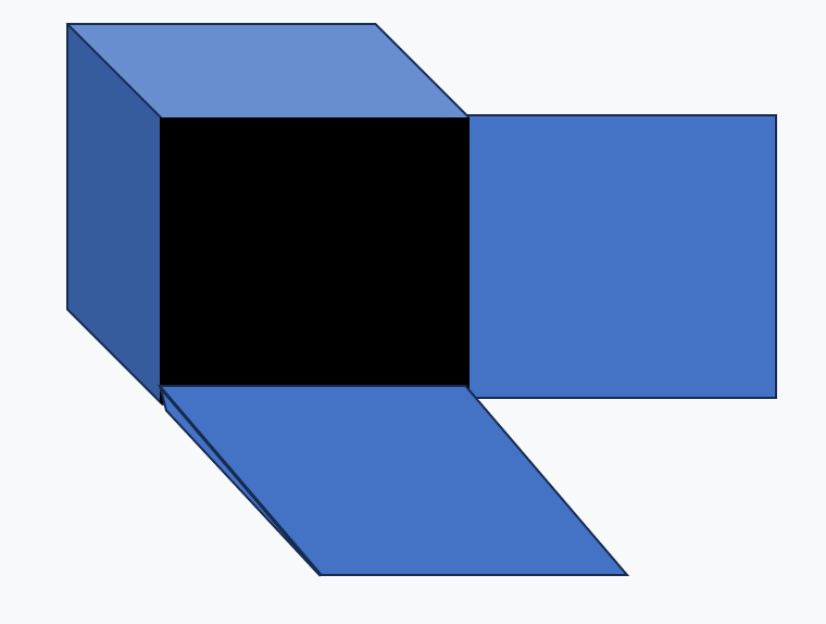


Figura 6: Alternativa de solución 1: Caja con rampa lateral
Nota. Captura de pantalla en PowerPoint

siguiendo con la idea de tener más espacio para sacar el timbal de la caja, se considero una apertura frontal y al centro (figura 7), con bisagras en la parte posterior. Aunque esto cumpliría con hacer más fácil el acceso al timbal, el diseño se vuelve mas complejo.

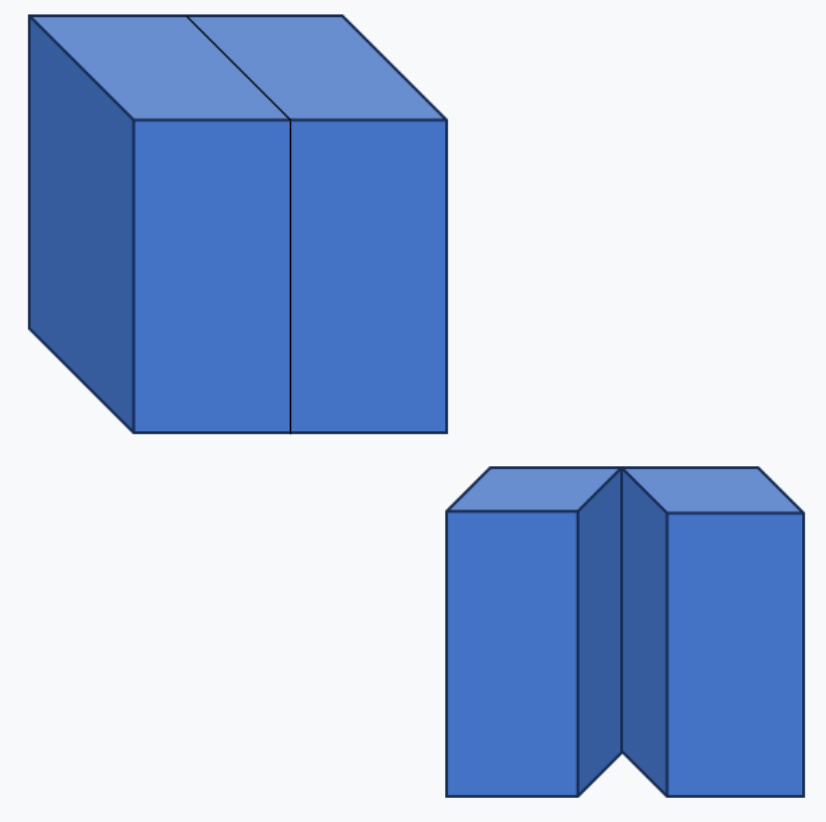


Figura 7: Alternativa de solución 2: Caja con apertura frontal y central
Nota. Captura de pantalla en PowerPoint

Finalmente, se decidió por hacer un modelo ”Top off”(figura 8, que se caracteriza por que la base de la caja es baja, lo cual normalmente vendría siendo la tapa, mientras que la tapa es la parte mas profunda. Esto significa que para colocar el timbal en la base solo hay que levantarlo 200 [mm] aproximadamente. La tapa se puede levantar por sobre el timbal y deja libre acceso para moverlo. Esto también da la opción de moverlo con solo la base de la caja, de ser necesario.

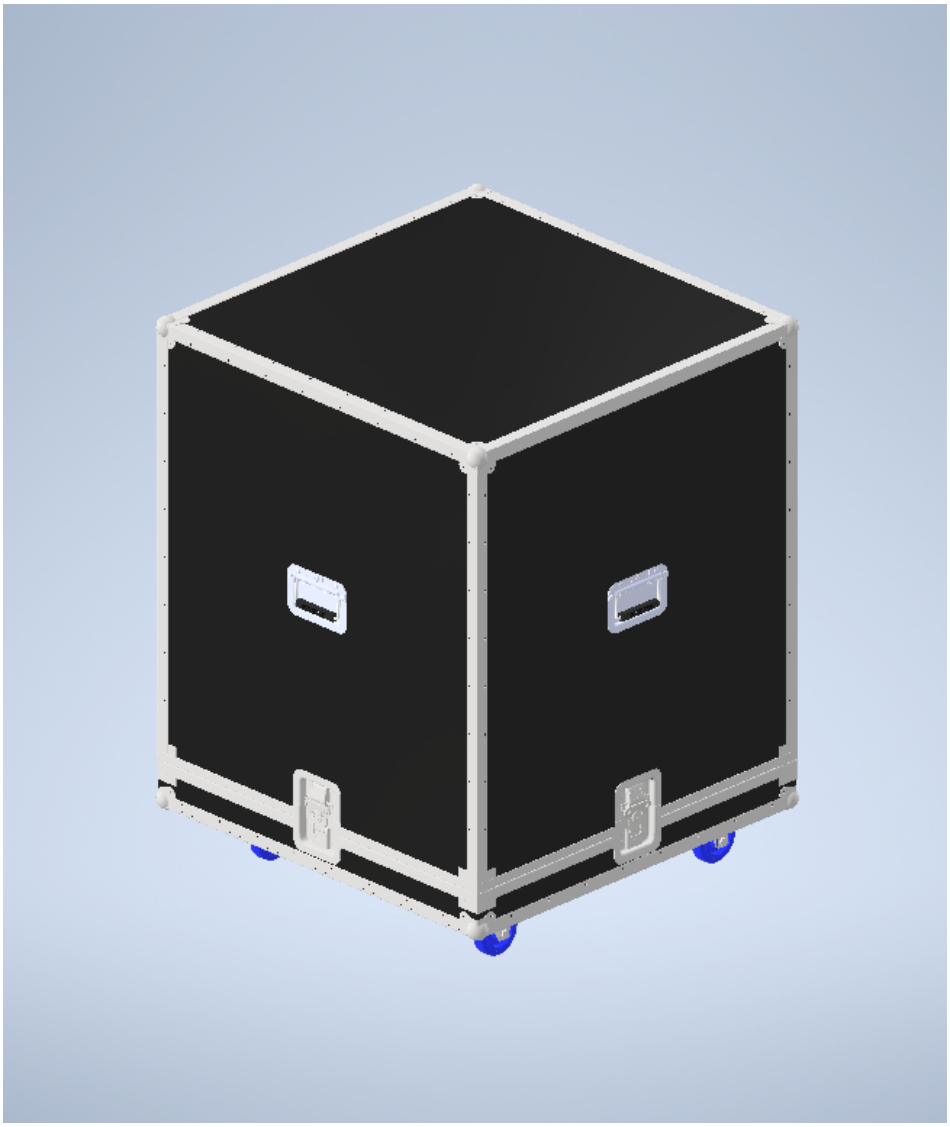


Figura 8: Alternativa de solución 3: Modelo Top off
Nota. Captura de pantalla en Autodesk Inventor

CAPÍTULO 5
DISEÑO CONCEPTUAL Y BÁSICO

5.1. MODELO DE LA SOLUCIÓN

Teniendo ya definida la forma de la caja se procede a modelar las partes necesarias para realizar el ensamblaje en inventor. Se consideran las dimensiones de un timbal de 29”(74 cm) con una altura de 89,5 cm y diámetro máximo de 90 cm. Se definen las dimensiones de paredes de contrachapado y de la espuma para amortiguar. Se utilizaron partes del proveedor Penn Elcom disponibles de la biblioteca digital 3D ContentCentral para las extrusiones, ruedas, puntal, esquinas, manillas y pasador.

5.1.1. CAJA 2.0

Una vez obtenidas las piezas individuales se empieza a ensamblar el modelo de caja. En la figura 9 se puede observar la caja en su versión 2.0. En esta versión tiene todas las partes del diseño completo, excepto las manillas y pasadores, de los cuales solo se encuentra la base de estos.

En la tabla 1 se muestra con mas detalle las partes que conforman a la caja versión 2.0.

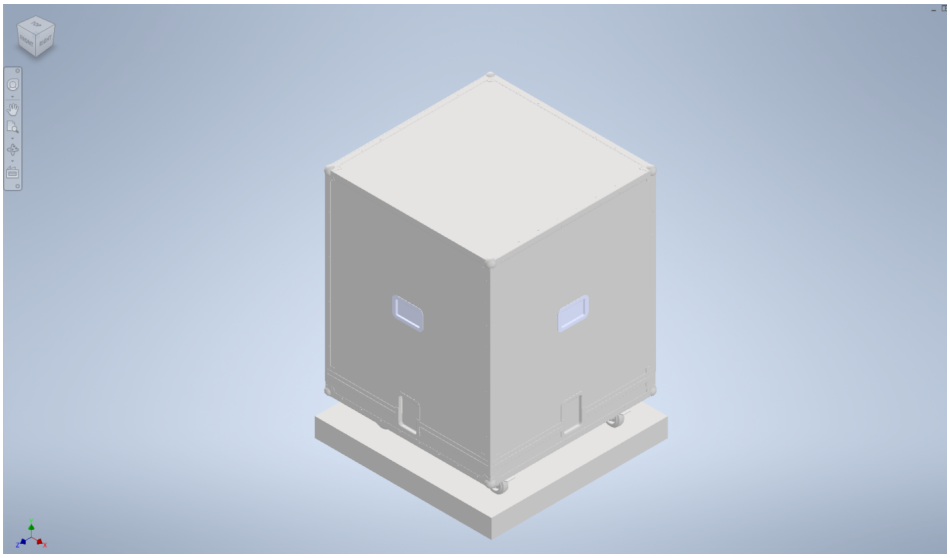


Figura 9: Caja versión 2.0
Nota. Captura de pantalla en Autodesk Inventor

Tabla 1: Lista de partes de la Caja versión 2.0 Fuente: Elaboración Propia.

Nombre de parte	Descripción
Base_Back	Parte trasera de la base de la caja. Cotrachapado.
Base_Bottom	Parte inferior de la base de la caja. Cotrachapado.
Base_Front	Parte delantera de la base de la caja. Cotrachapado.
Base_Lside	Lado izquierdo de la base de la caja. Cotrachapado.
Base_Rside	Lado derecho de la base de la caja. Cotrachapado.
Base_Back_Foam	Parte trasera de espuma de la base de la caja.
Base_Bottom_Foam	Parte inferior de espuma de la base de la caja.
Base_Front_Foam	Parte delantera de espuma de la base de la caja.
Base_Lside_Foam	Lado izquierdo de espuma de la base de la caja.
Base_Rside_Foam	Lado derecho de espuma de la base de la caja.
Lid_Top	Parte superior de la tapa de la caja. Cotrachapado.
Lid_Front	Parte delantera de la tapa de la caja. Cotrachapado.
Lid_Lside	Lado izquierdo de la tapa de la caja. Cotrachapado.
Lid_Rside	Lado derecho de la tapa de la caja. Cotrachapado.
Lid_Back_Foam	Parte trasera de espuma de la tapa de la caja.
Lid_Top_Foam	Parte superior de espuma de la tapa de la caja.
Lid_Front_Foam	Parte delantera de espuma de la tapa de la caja.
Lid_Lside_Foam	Lado izquierdo de espuma de la tapa de la caja.
Lid_Rside_Foam	Lado derecho de espuma de la tapa de la caja.

W0985-V6 - Penn Elcom	100mm / 4”Braked Swivel Castor with Rubber Blue Wheel
E0775 - Penn Elcom	Single Angle Extrusion 29.8mm / 1.17”legs
B1131 - Penn Elcom	Large Brace, 6 Hole
EG-0527-1 - Penn Elcom	Tongue Extrusion with clip-on system - Smooth surface - Board thickness: 10mm / 3/8”
EG-0527-2 - Penn Elcom	Groove Extrusion with clip-on system - Smooth surface - Board thickness: 10mm / 3/8”
C1352 - Penn Elcom	Large Ball CornerInternal Radius: 0.5mm / 1/32”1.5mm / 16 gauge Steel
H1906 - Penn Elcom	Backplate for Medium Recessed Handles H1061, H1064, H7151 and H7154
H7154 - Penn Elcom	Rivet Protected Recessed Handle19mm / 3/4”GripDouble Sprung
L0526 - Penn Elcom	Backplate for Medium Recessed Latches
L944-527MOL3 - Penn Elcom	Large MOL3™ Latch in 27mm / 1 1/16.°ffset dishSplit to Hole Centre: 19mm / 3/4”

5.1.2. CAJA 5.2

Y en la figura 10 se tiene la caja versión 5.2. En la versión 2.0 se empexó a reducir la complejidad de la geometría con el fin de llegar a un resultado. La caja con todas sus partes complicaba demasiado la simulación, por lo que se fueron reduciendo hasta llegar a la versión 5.2 en la que se incluye un timbal simplificado en su interior.

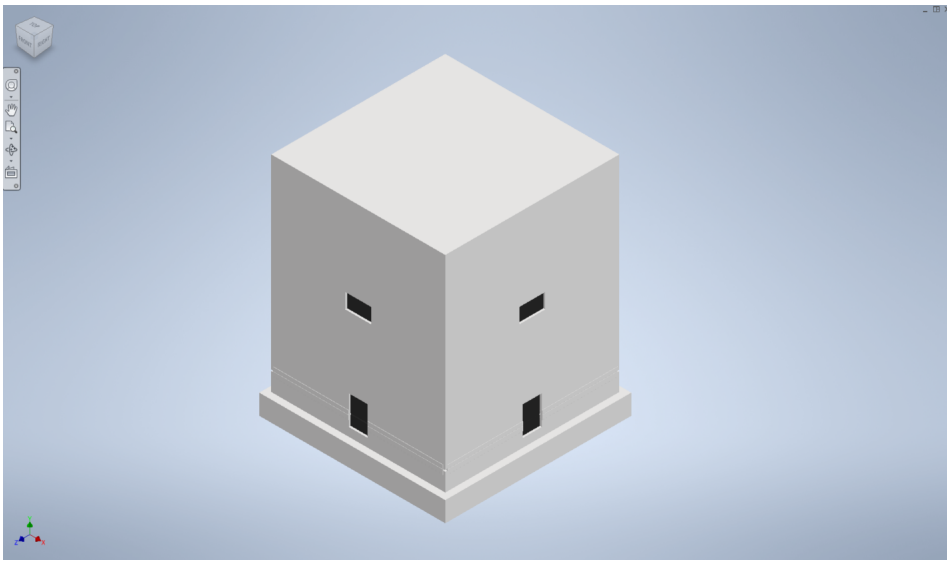


Figura 10: Caja versión 5.2
Nota. Captura de pantalla en Autodesk Inventor

Tabla 2: Lista de partes de la Caja versión 5.2 Fuente: Elaboración Propia.

Nombre de parte	Descripción
Base_Back	Parte trasera de la base de la caja. Cotrachapado.
Base_Bottom	Parte inferior de la base de la caja. Cotrachapado.
Base_Front	Parte delantera de la base de la caja. Cotrachapado.
Base_Lside	Lado izquierdo de la base de la caja. Cotrachapado.
Base_Rside	Lado derecho de la base de la caja. Cotrachapado.
Base_Back_Foam	Parte trasera de espuma de la base de la caja.
Base_Bottom_Foam	Parte inferior de espuma de la base de la caja.
Base_Front_Foam	Parte delantera de espuma de la base de la caja.
Base_Lside_Foam	Lado izquierdo de espuma de la base de la caja.
Base_Rside_Foam	Lado derecho de espuma de la base de la caja.

Lid_Top	Parte superior de la tapa de la caja. Cotrachapado.
Lid_Front	Parte delantera de la tapa de la caja. Cotrachapado.
Lid_Lside	Lado izquierdo de la tapa de la caja. Cotrachapado.
Lid_Rside	Lado derecho de la tapa de la caja. Cotrachapado.
Lid_Back_Foam	Parte trasera de espuma de la tapa de la caja.
Lid_Top_Foam	Parte superior de espuma de la tapa de la caja.
Lid_Front_Foam	Parte delantera de espuma de la tapa de la caja.
Lid_Lside_Foam	Lado izquierdo de espuma de la tapa de la caja.
Lid_Rside_Foam	Lado derecho de espuma de la tapa de la caja.
Timbal_Base	Base de acero fundido del timbal
Timbal_Caja	Caja de resonancia de bronce del timbal
EG-0527-1 - Penn Elcom	Tongue Extrusion with clip-on system - Smooth surface - Board thickness: 10mm / 3/8”
EG-0527-2 - Penn Elcom	Groove Extrusion with clip-on system - Smooth surface - Board thickness: 10mm / 3/8”

5.2. SIMULACIÓN DE LA SOLUCIÓN

Para probar la caja diseñada se decide hacer una prueba de caída. Se decide hacer tres casos distintos, con uno teniendo dos subcasos.

5.2.1. CASO 1 SUBCASO 1

Se define una altura inicial de 10 [m]. Para la simulación se considera una distancia de 3 [mm] entre la caja y una velocidad de 14 [m/s] como resultado de la caída libre.

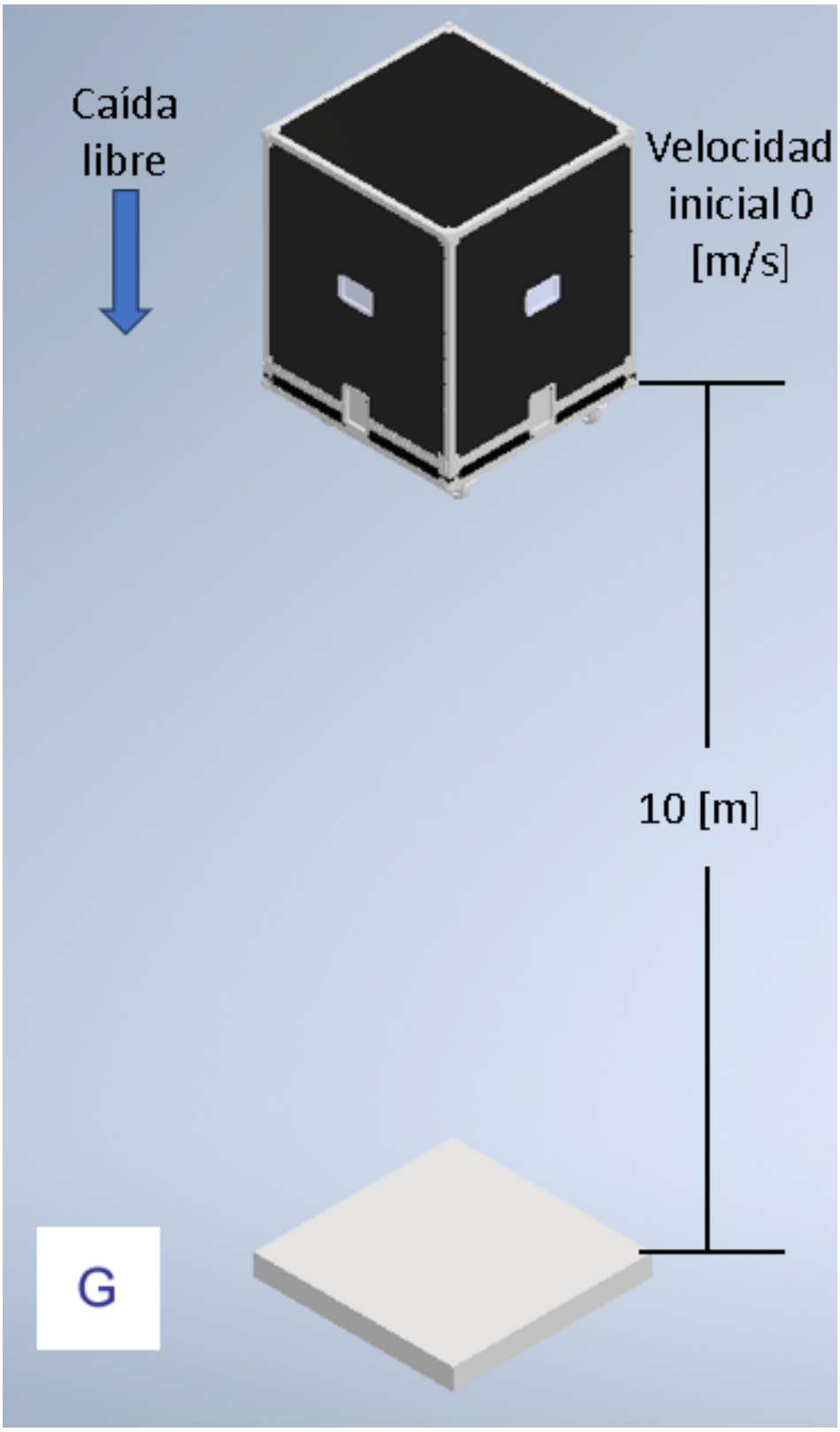


Figura 11: Diagrama de cuerpo libre altura 10 [m]
Nota. Captura de pantalla en Autodesk Inventor Nastran

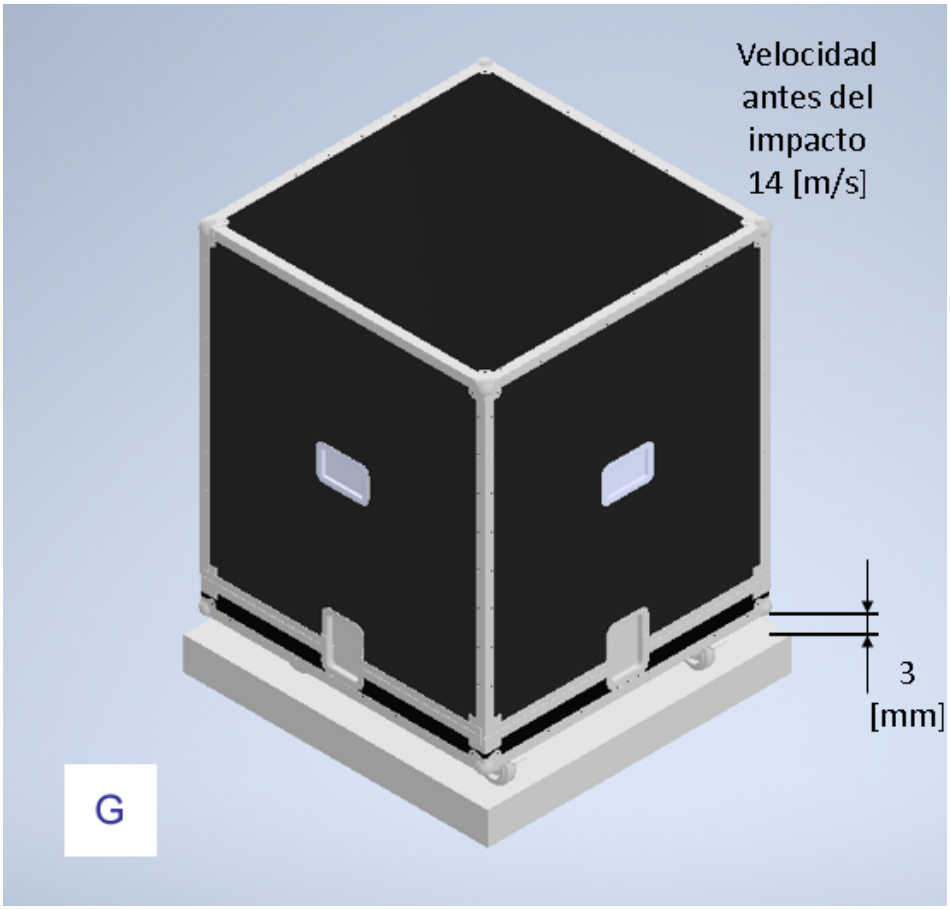


Figura 12: Diagrama de cuerpo libre al inicio de la simulación
Nota. Captura de pantalla en Autodesk Inventor Nastran

5.2.1.1. TIPO DE ANÁLISIS El tipo de análisis que se va a realizar es una respuesta transitoria no lineal. Se procede a activar la velocidad y aceleración para este tipo de análisis.

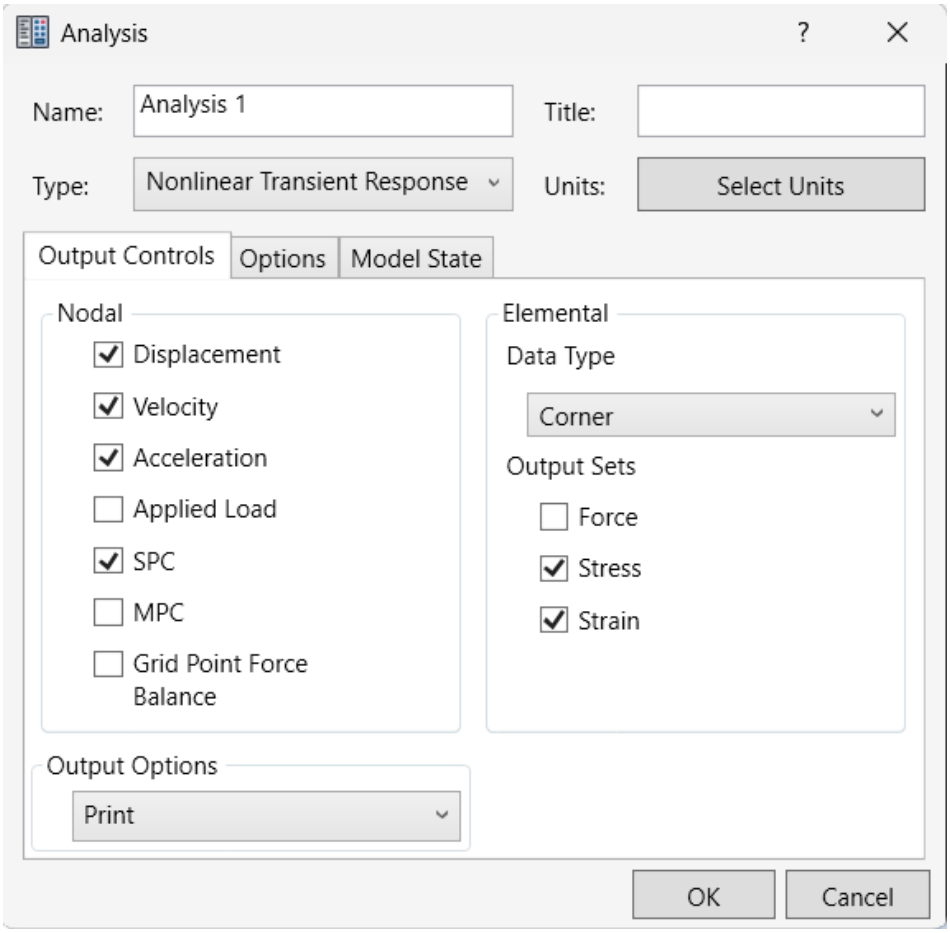


Figura 13: Ventana de análisis en Inventor Nastran
Nota. Captura de pantalla en Autodesk Inventor Nastran

5.2.1.2. IDEALIZACIONES Luego se definen las idealizaciones de sólido con los materiales correspondientes; contrachapado para las paredes de la caja, aluminio para las extrusiones. Poliestireno de alto impacto para la espuma. Notar que esto es por que éste fue uno de los materiales que permitió realizar un análisis con características parecidas a lo que se estaba buscando. Se consideró también concreto para el piso, acero fundido para la base del timbal y bronce para la caldera, la cual incluye la membrana del mismo material. La caldera tiene un grosor de 4 [mm].

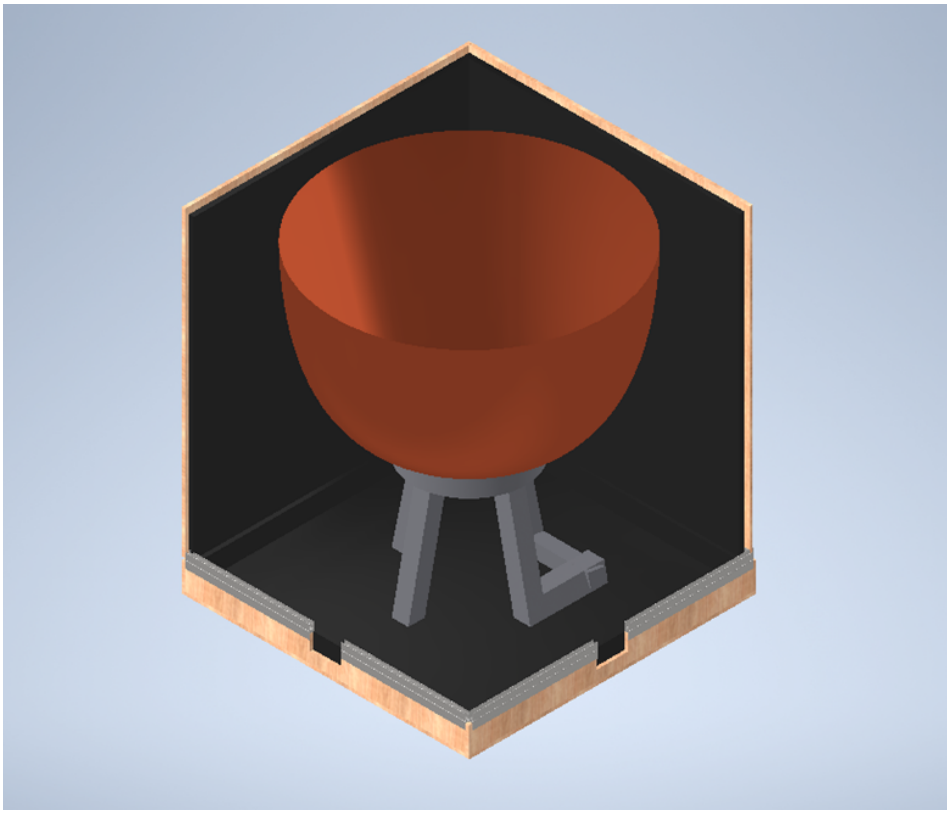


Figura 14: Caja en su versión 5.2 con vista parcial de su interior
Nota. Captura de pantalla en Autodesk Inventor Nastran

Tabla 3: Características de materiales utilizados Fuente: Elaboración Propia.

Material	**Módulo de Elasticidad E [MPa]**	**Relación de Poisson ν [-]**	**densidad ρ [kg/m^3]**
Contrachapado	7,70E+03	0,25	552
Aluminio	6,89E+04	0,33	2700
Poliestireno de Alto Impacto	1,90E+03	0,38	1022
Concreto	2,33E+04	0,167	2407,3
Acero fundido	2,10E+05	0,3	7850
Bronce	9,70E+04	0,31	8470

5.2.1.3. CONDICIONES DE CONTORNO Se define como condición de contorno que el piso no tiene grados de libertad.

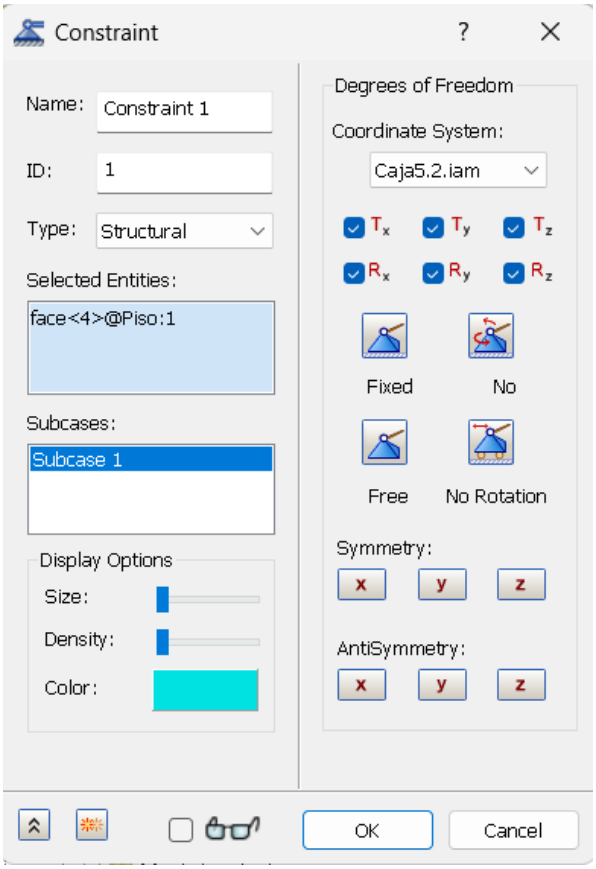


Figura 15: Ventana de restricciones en Inventor Nastran
Nota. Captura de pantalla en Autodesk Inventor Nastran

Se colocan las condiciones iniciales de velocidad inicial del análisis en el eje y de -14 m/s y de la gravedad en y de -9,81 m/s^2.

La velocidad se calcula considerando una velocidad al inicio de la caída de 10 [m] de 0 [m/s].

$$V = \sqrt{2 \times G \times d} = \sqrt{2 \times 9,8\,[m/s^2] \times 10\,[m]} = 14\,[m/s]$$

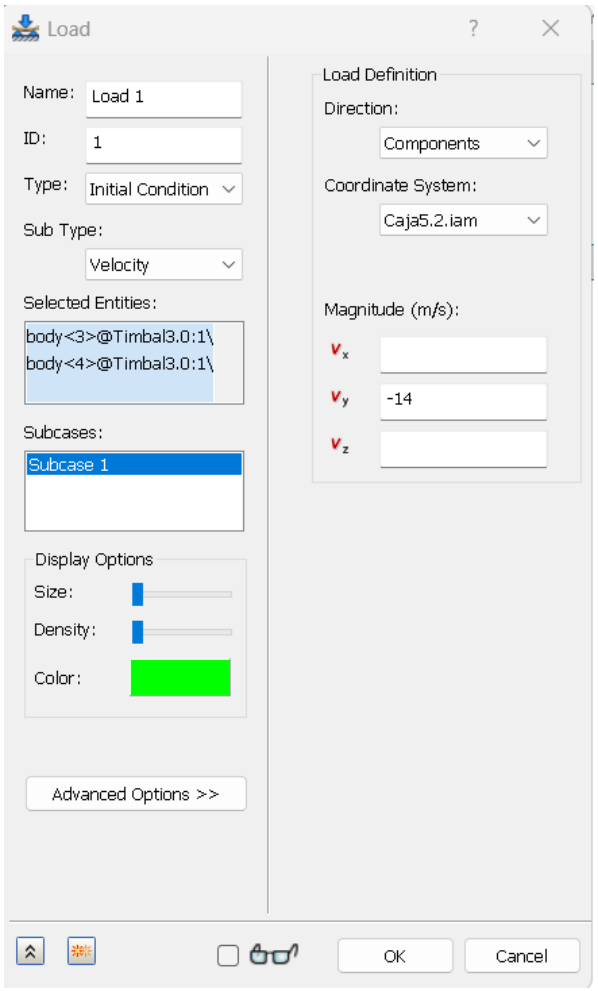


Figura 16: Ventana de carga 1 en Inventor Nastran
Nota. Captura de pantalla en Autodesk Inventor Nastran

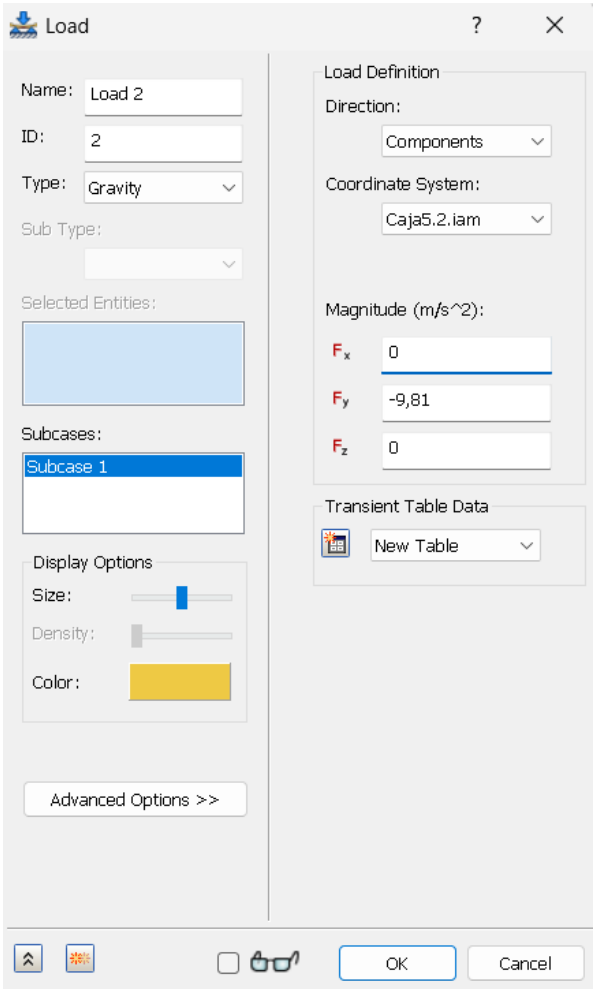


Figura 17: Ventana de carga 2 en Inventor Nastran
Nota. Captura de pantalla en Autodesk Inventor Nastran

5.2.1.4. CONTROL DE MALLADO Se añade un control al mallado de 0,01 m para las caras que van a entrar en contacto, en este caso es la base en la parte inferior y el piso.

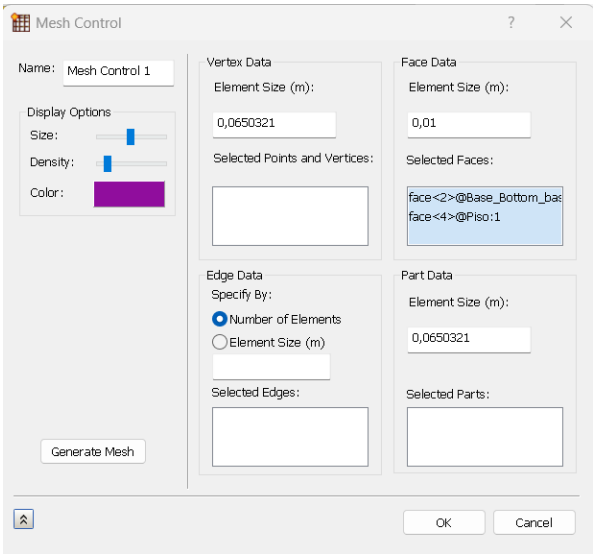


Figura 18: Ventana de control de la malla en Inventor Nastran
Nota. Captura de pantalla en Autodesk Inventor Nastran

5.2.1.5. CONTACTO Por lo mismo, hay que definir este contacto y también asegurarse de que todas las partes que deben de estar en contacto lo estén según el sistema.

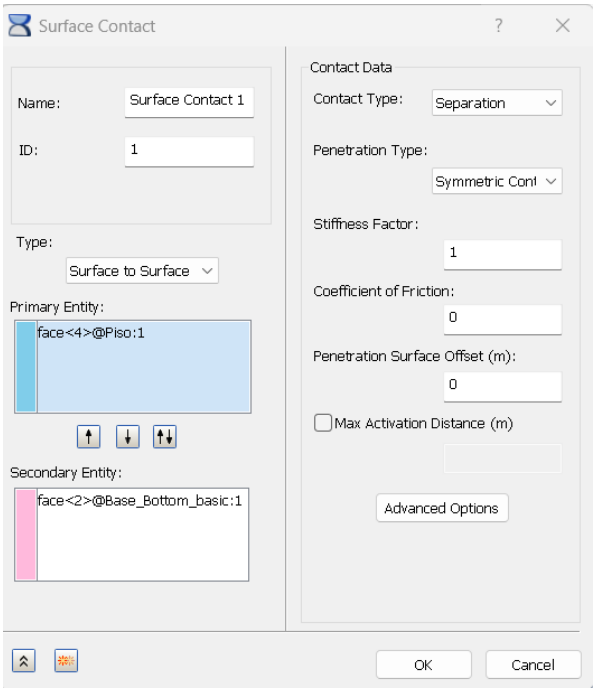


Figura 19: Ventana de contacto de superficies (1) en Inventor Nastran
Nota. Captura de pantalla en Autodesk Inventor Nastran

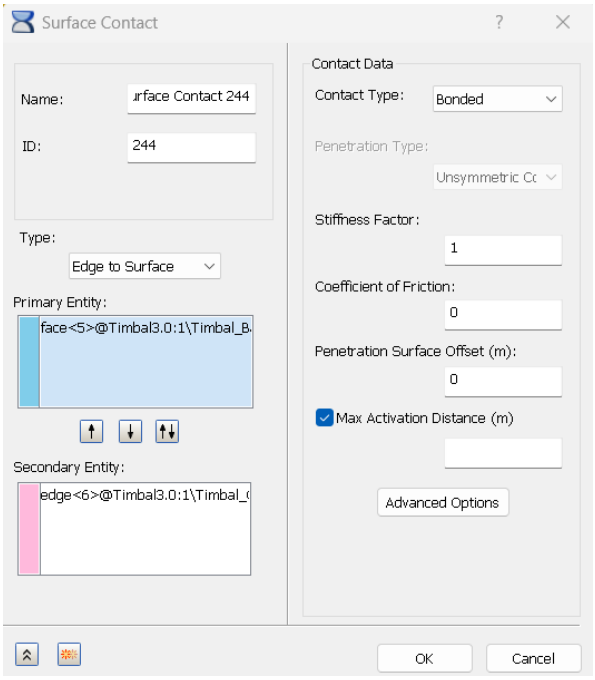


Figura 20: Ventana de contacto de superficies (244) en Inventor Nastran
Nota. Captura de pantalla en Autodesk Inventor Nastran

5.2.1.6. CONFIGURACIÓN DEL SUBCASO Se debe definir el damping estructural. Se considera un valor de G de cuatro y una frecuencia de 247 Hz.

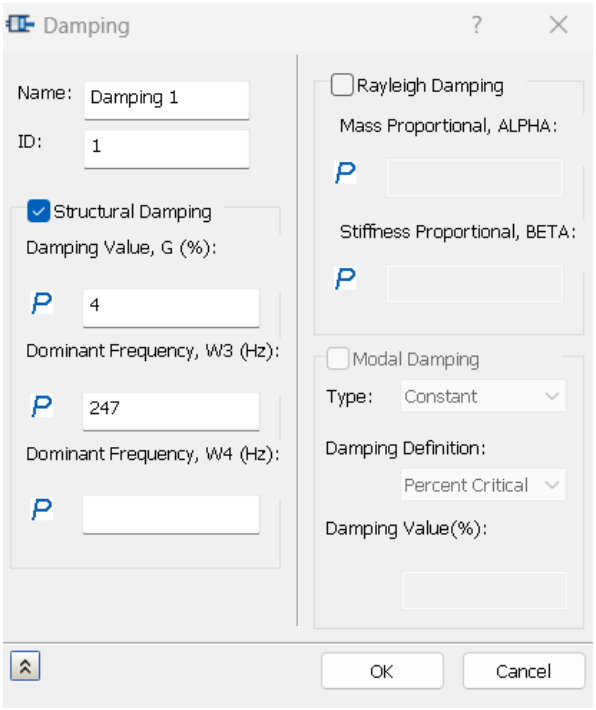


Figura 21: Ventana de damping en Inventor Nastran
Nota. Captura de pantalla en Autodesk Inventor Nastran

Se asume que la diferencia de velocidad entre la posición inicial del ensayo y el contacto es despreciable. Se considera que la posición inicial del modelo esta a 3 mm de distancia del suelo, lo cual nos da una variación del tiempo de 0,0002 segundos.

$$\Delta t = \frac{d}{V} = \frac{0,003[m]}{14[m/s]} = 0,0002[s]$$

Se define la configuración no linear en automático y para la configuración dinámica se ingresa el delta de tiempo que se había dicho anteriormente, que es de 0,0002 segundos. Además de eso, se considera un número de pasos de tiempo de 30. En principio eran 16 pero, a medida que se fueron realizando simulaciones se ha considerado que ha sido mejor aumentarlo para llegar a un mejor resultado.

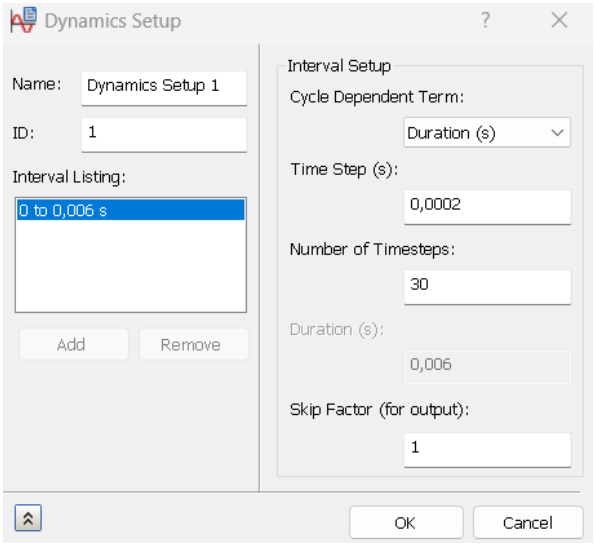


Figura 22: Ventana de configuración dinámica en Inventor Nastran
Nota. Captura de pantalla en Autodesk Inventor Nastran

5.2.1.7. MALLA E INICIO DE SIMULACIÓN Por último, se considera un tamaño de elemento de 0,04 m, con elementos de orden lineal y se procede a generar el mallado para luego iniciar la simulación.

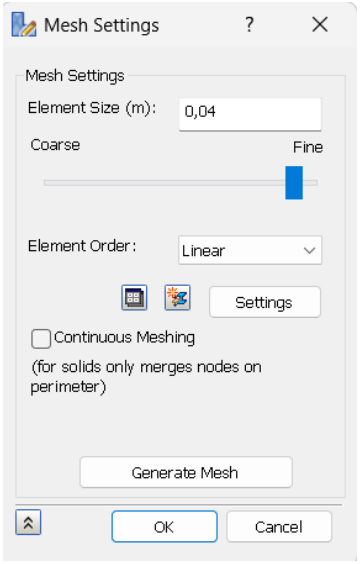


Figura 23: Ventana de configuración del mallado en Inventor Nastran
Nota. Captura de pantalla en Autodesk Inventor Nastran

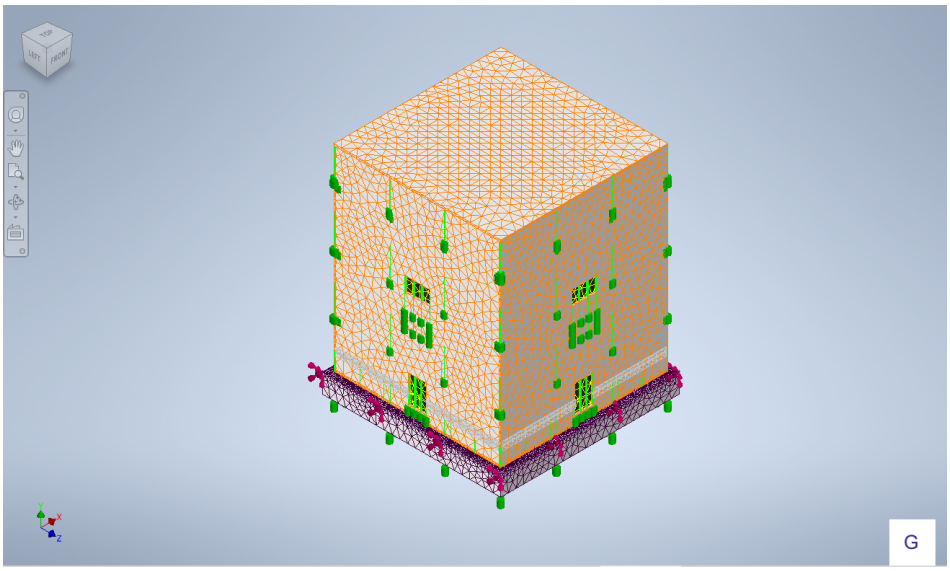


Figura 24: Mallado final subcaso 1 caso 1 antes de iniciar la simulación en Inventor Nastran
Nota. Captura de pantalla en Autodesk Inventor Nastran

5.2.1.8. RESULTADOS Al finalizar la simulación se obtienen varios datos.

En la figura 25 se observan los datos obtenidos del esfuerzo de Von Mises. Se muestran los valores máximo y mínimo presentes en la caja. Además se destaca un valor que llama la atención en la parte superior de la caja.

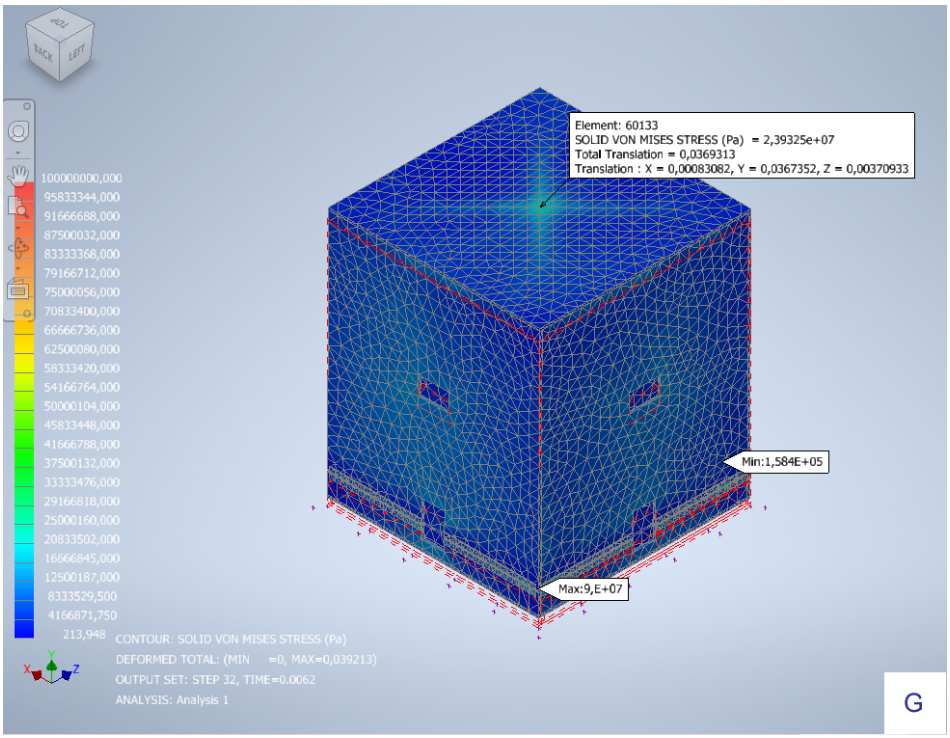


Figura 25: Esfuerzo de Von Mises
Nota. Captura de pantalla en Autodesk Inventor Nastran

En la figura 26 se muestra un esfuerzo de Von Mises de 29 [MPa] en el elemento 41092. Este elemento tiene el menor valor de factor de seguridad (0,569367) en la caja como se puede ver en las figuras 27 y 28.

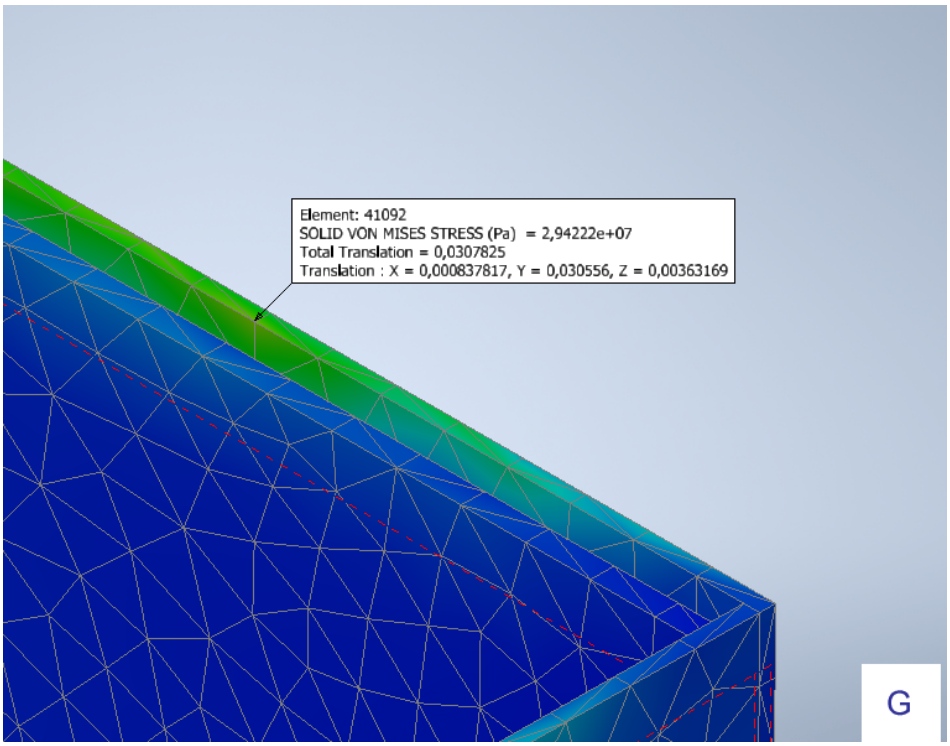


Figura 26: Esfuerzo de Von Mises máximo
Nota. Captura de pantalla en Autodesk Inventor Nastran

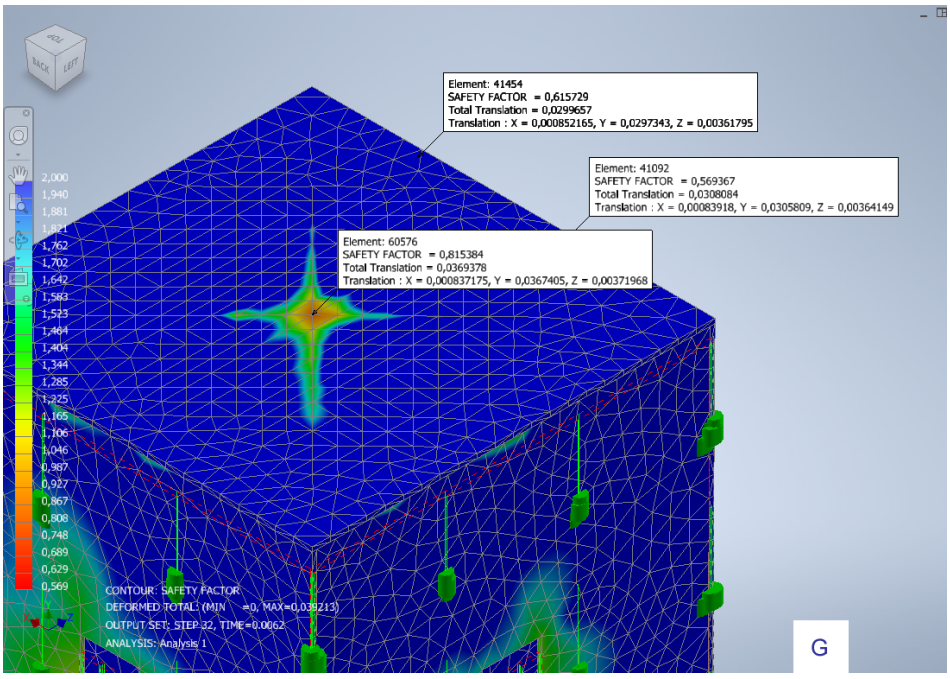


Figura 27: Factores de Seguridad en la caja
Nota. Captura de pantalla en Autodesk Inventor Nastran

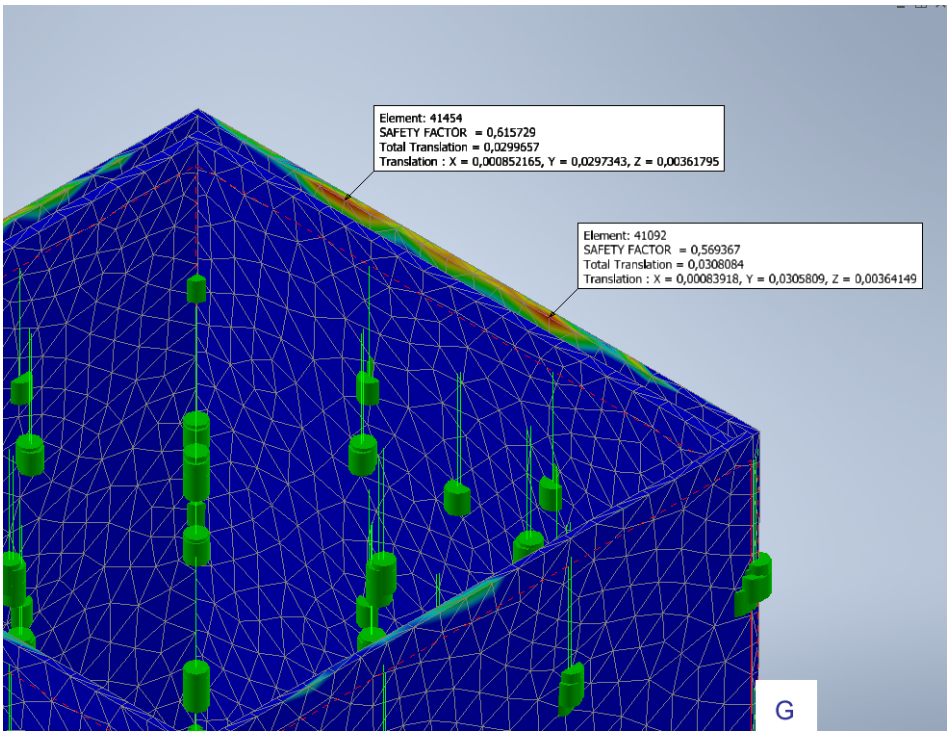


Figura 28: Dos factores de seguridad mínimos
Nota. Captura de pantalla en Autodesk Inventor Nastran

De los resultados de factor de seguridad se puede observar en la figura 29 el efecto de los concentradores de esfuerzos que se generan en la caja en donde estarían empotrados las manillas y cierres.

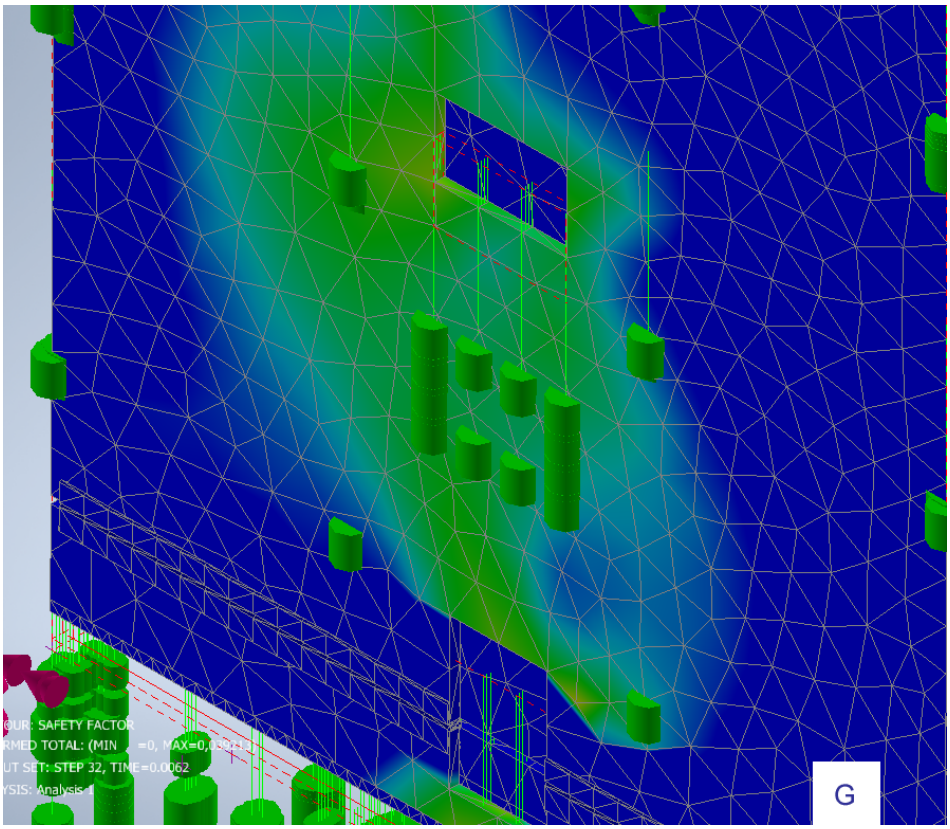


Figura 29: Factor de Seguridad en la caja con concentradores de esfuerzos
Nota. Captura de pantalla en Autodesk Inventor Nastran

Con respecto al timbal, los datos obtenidos de factor de seguridad muestran que los puntos críticos se encuentran en la unión de la membrana y la caldera (figura 30), además de tener unos puntos sobre la misma membrana que, aunque son valores sobre 1, podrían volverse críticos bajo algún cambio en las condiciones. Cabe destacar que, se considero la caldera y la membrana una pieza para esta simulación.

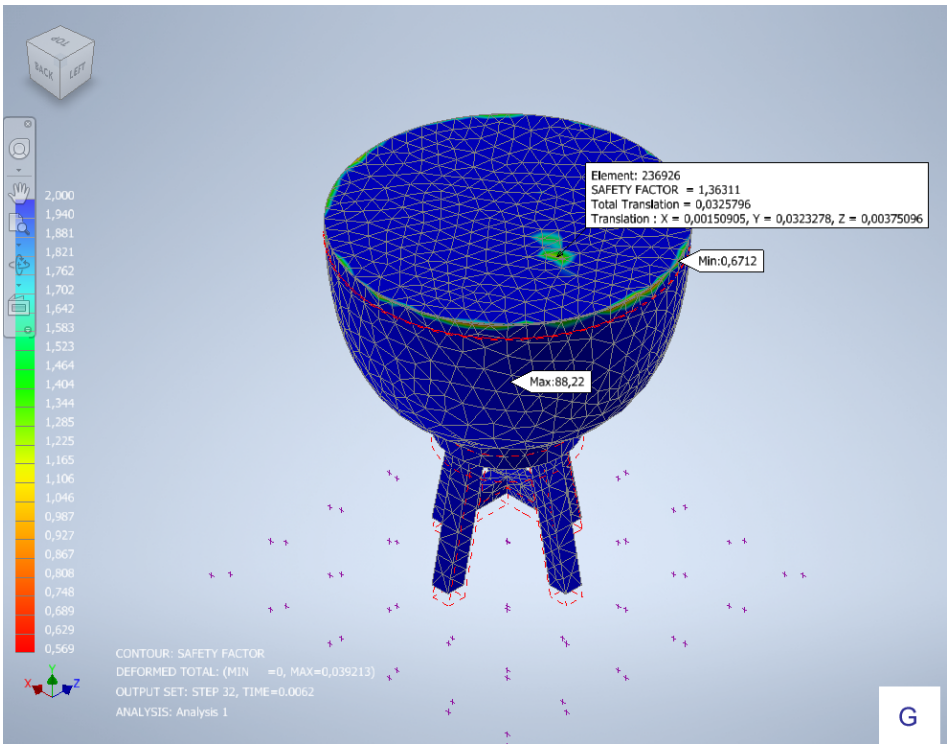


Figura 30: Factor de Seguridad en el timbal
Nota. Captura de pantalla en Autodesk Inventor Nastran

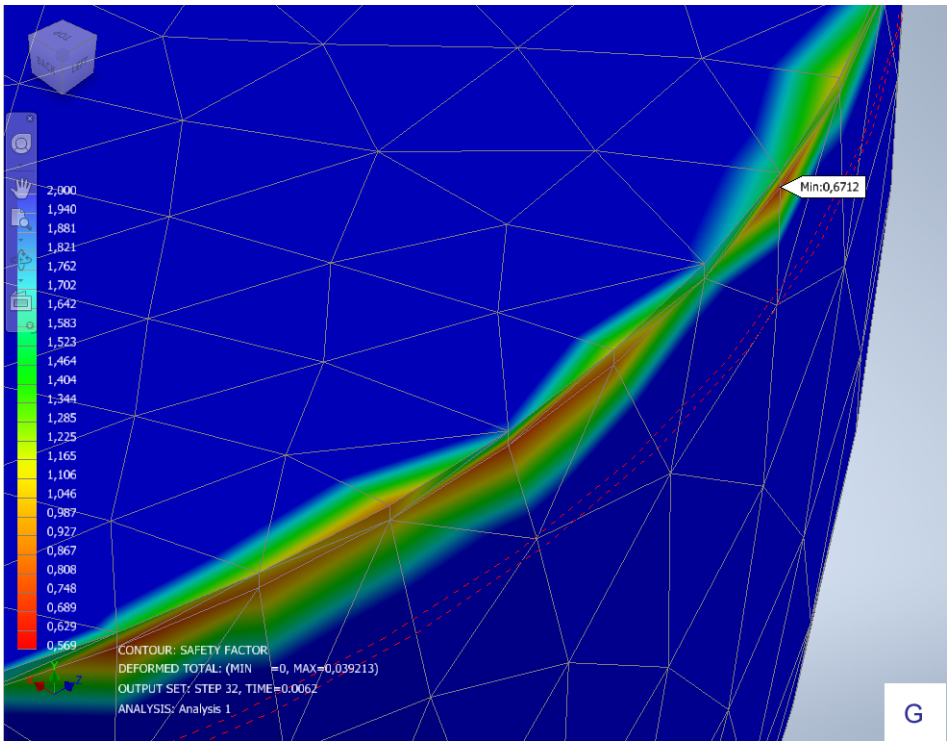


Figura 31: Factor de Seguridad mínimo del timbal
Nota. Captura de pantalla en Autodesk Inventor Nastran

5.2.2. CASO 1 SUBCASO 2

Se define una altura inicial de 5 [m]. Para la simulación se considera una distancia de 3 [mm] entre la caja y una velocidad de 10 [m/s] como resultado de la caída libre.

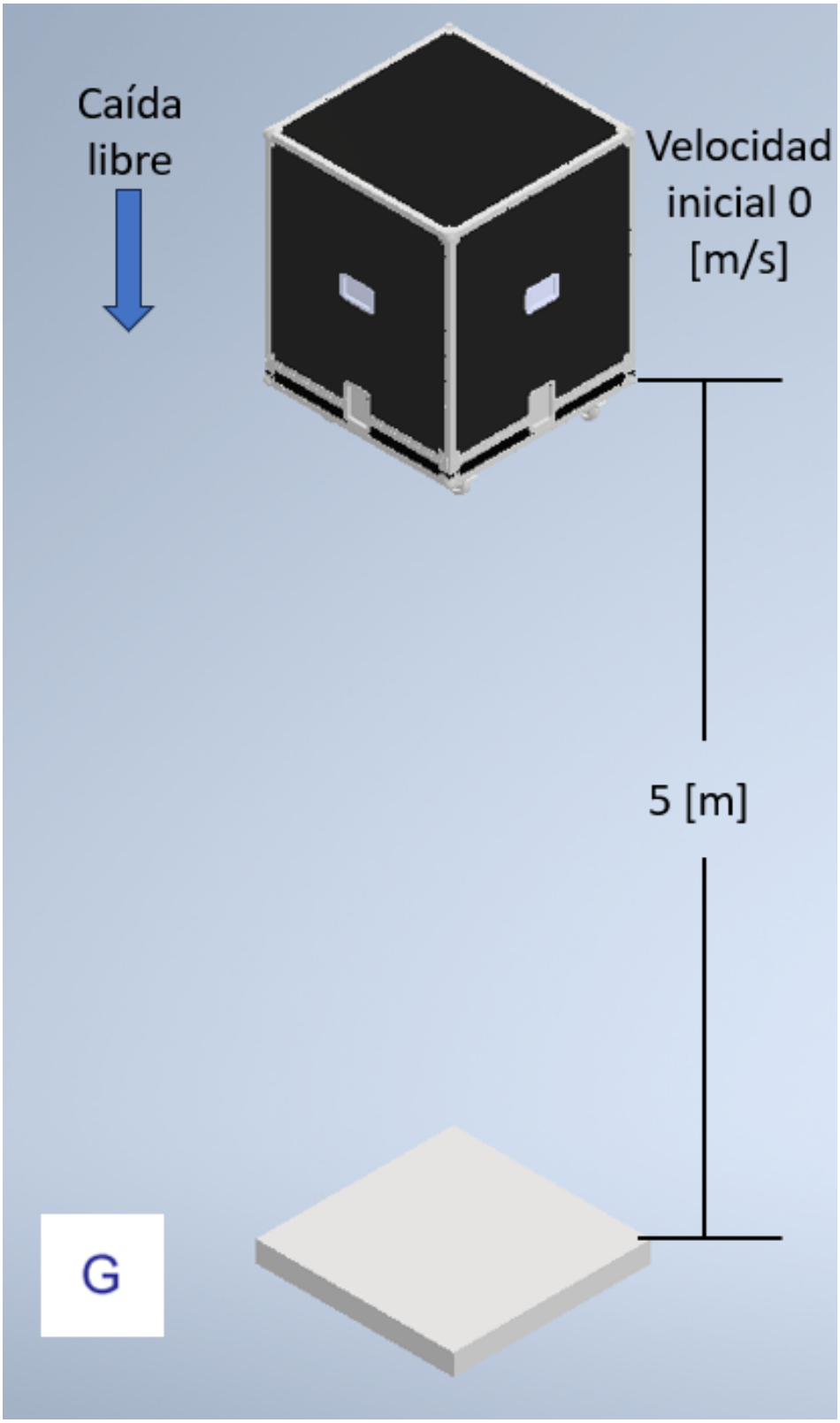


Figura 32: Diagrama de cuerpo libre altura 5 [m]
Nota. Captura de pantalla en Autodesk Inventor Nastran

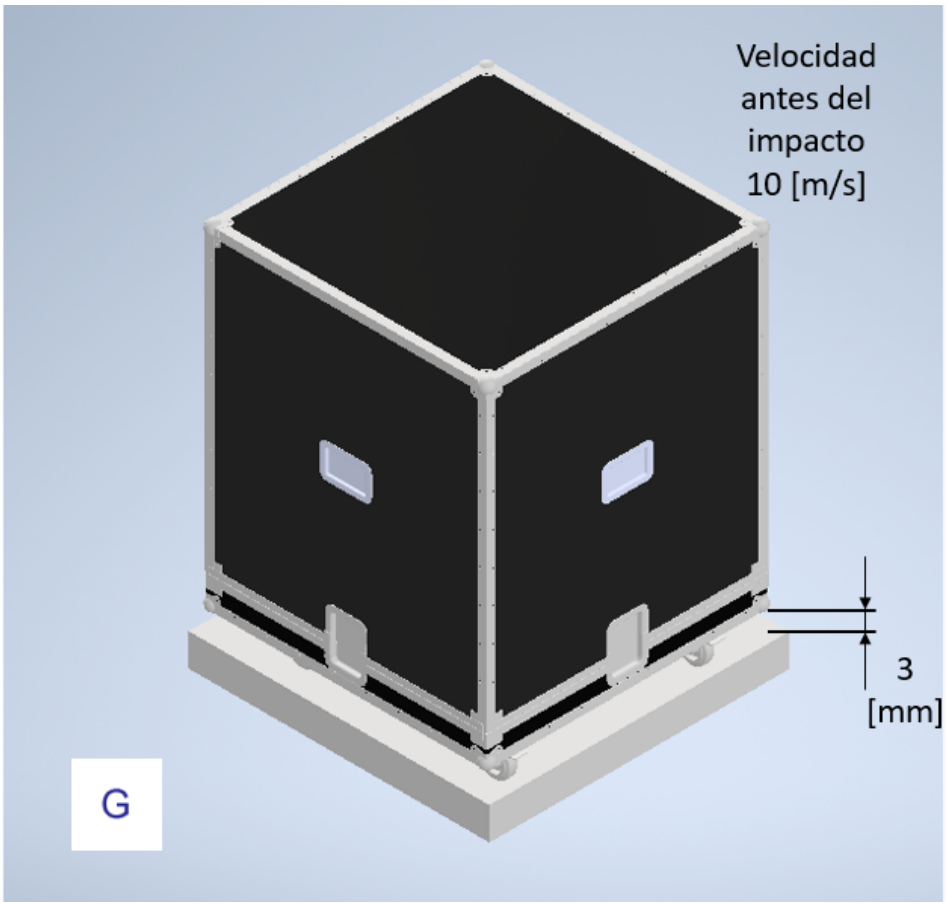


Figura 33: Diagrama de cuerpo libre al inicio de la simulación subcaso 2
Nota. Captura de pantalla en Autodesk Inventor Nastran

5.2.2.1. TIPO DE ANÁLISIS Se define el tipo de análisis de la misma forma que en el sub-caso 1.

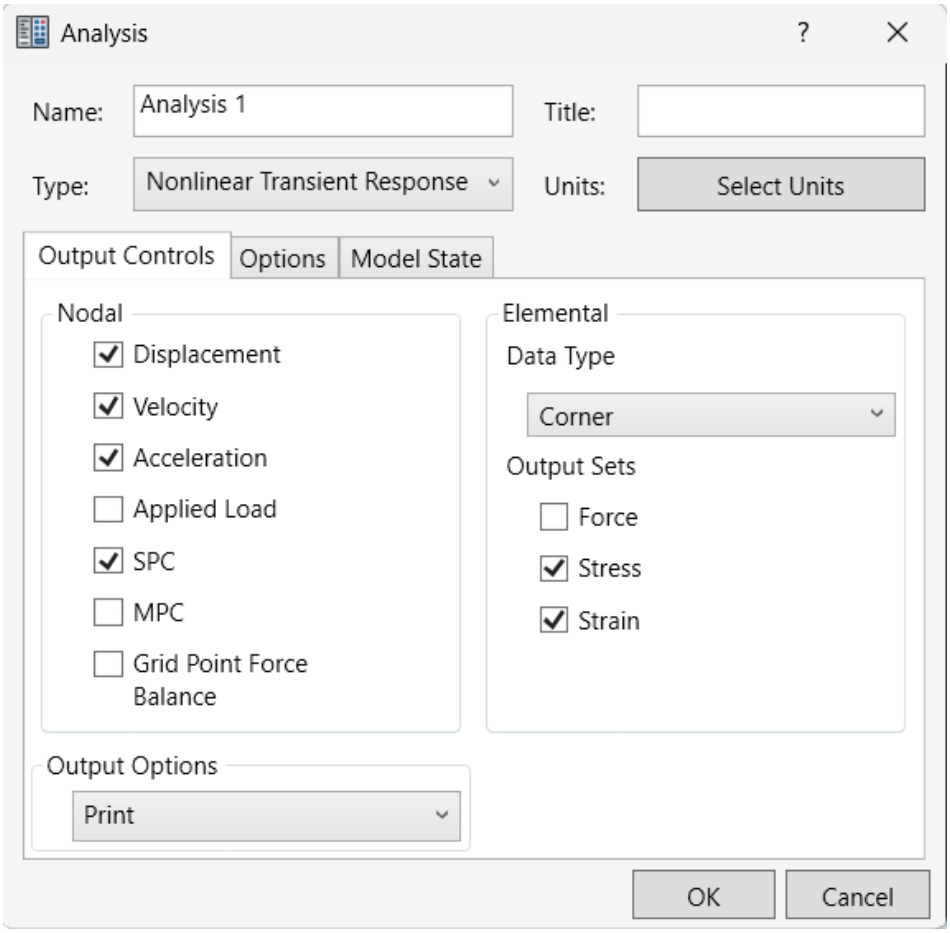


Figura 34: Ventana de análisis en Inventor Nastran
Nota. Captura de pantalla en Autodesk Inventor Nastran

5.2.2.2. IDEALIZACIONES Las idealizaciones son las mismas que en el subcaso 1.

Tabla 4: Características de materiales utilizados Fuente: Elaboración Propia.

Material	**Módulo de Elasticidad E [MPa]**	**Relación de Poisson ν [-]**	**densidad ρ [kg/m^3]**
Contrachapado	7,70E+03	0,25	552
Aluminio	6,89E+04	0,33	2700
Poliestireno de Alto Impacto	1,90E+03	0,38	1022
Concreto	2,33E+04	0,167	2407,3
Acero fundido	2,10E+05	0,3	7850
Bronce	9,70E+04	0,31	8470

5.2.2.3. CONDICIONES DE CONTORNO Se define como condición de contorno que el piso no tiene grados de libertad.

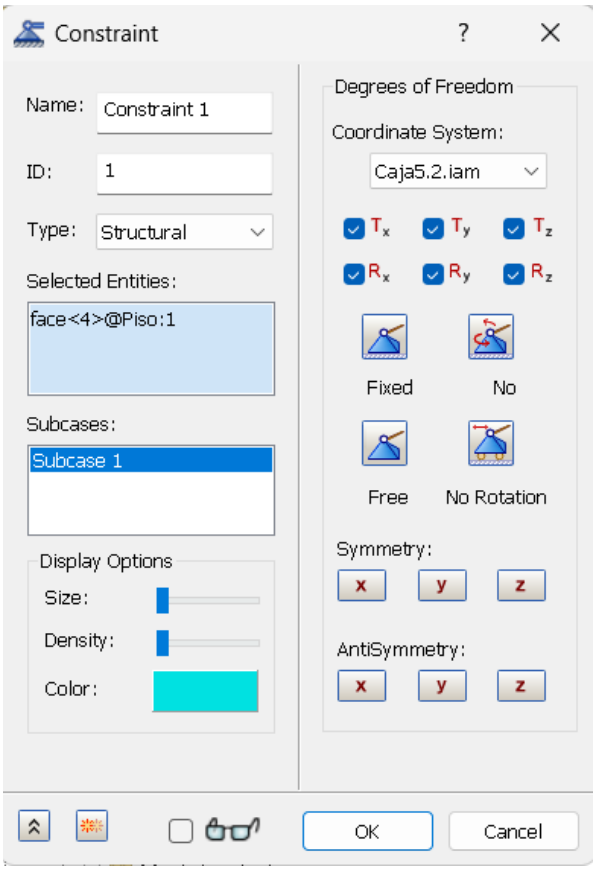


Figura 35: Ventana de restricciones en Inventor Nastran
Nota. Captura de pantalla en Autodesk Inventor Nastran

Se colocan las condiciones iniciales de velocidad inicial del análisis en el eje y de -10 m/s y de la gravedad en y de -9,81 m/s^2.

La velocidad se calcula considerando una velocidad al inicio de la caída de 5 [m] de 0 [m/s].

$$V = \sqrt{2 \times G \times d} = \sqrt{2 \times 9,8\,[m/s^2] \times 5\,[m]} = 10\,[m/s]$$

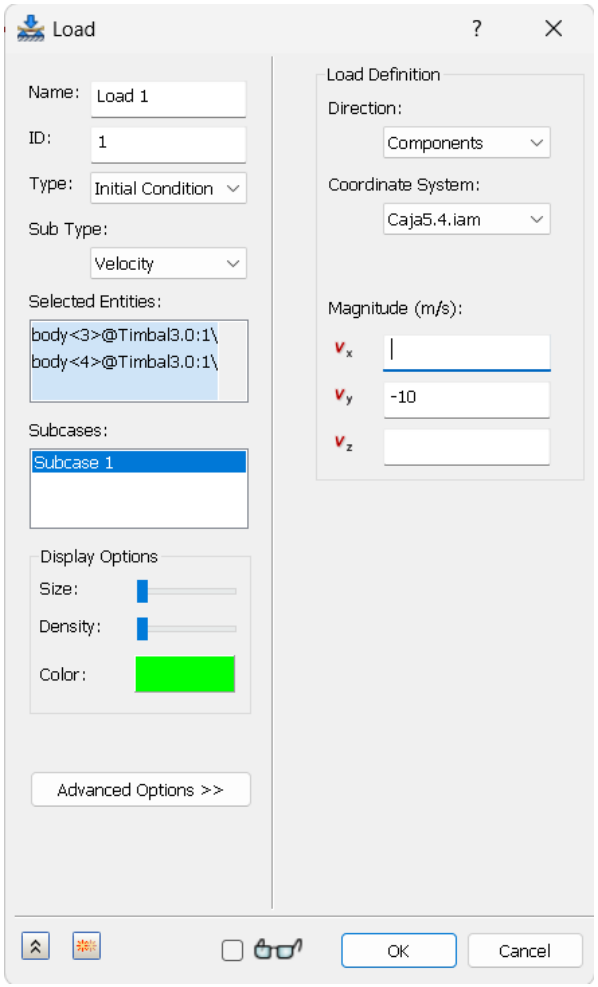


Figura 36: Ventana de carga 1 en Inventor Nastran
Nota. Captura de pantalla en Autodesk Inventor Nastran

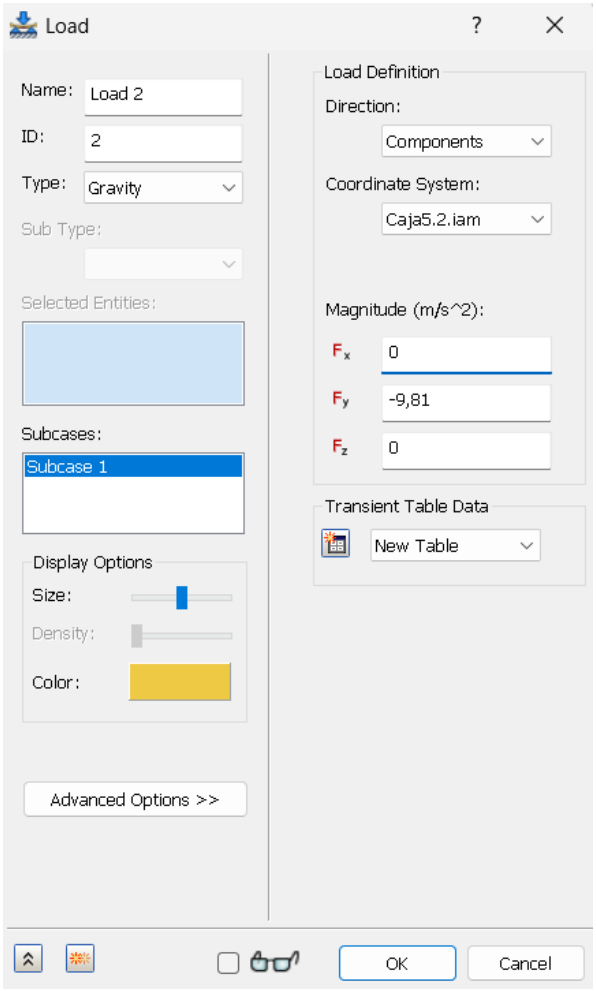


Figura 37: Ventana de carga 2 en Inventor Nastran
Nota. Captura de pantalla en Autodesk Inventor Nastran

5.2.2.4. CONTROL DE MALLADO Se añade el mismo control de mallado que en el subcaso 1.

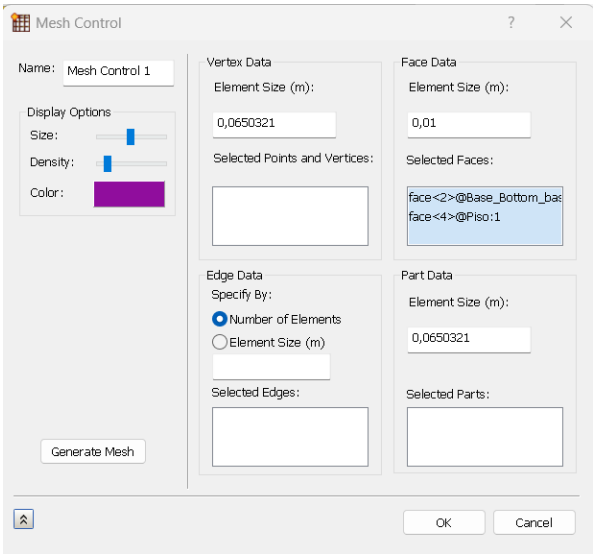


Figura 38: Ventana de control de la malla en Inventor Nastran
Nota. Captura de pantalla en Autodesk Inventor Nastran

5.2.2.5. CONTACTO Se definen los contactos entre todas las partes según corresponda.

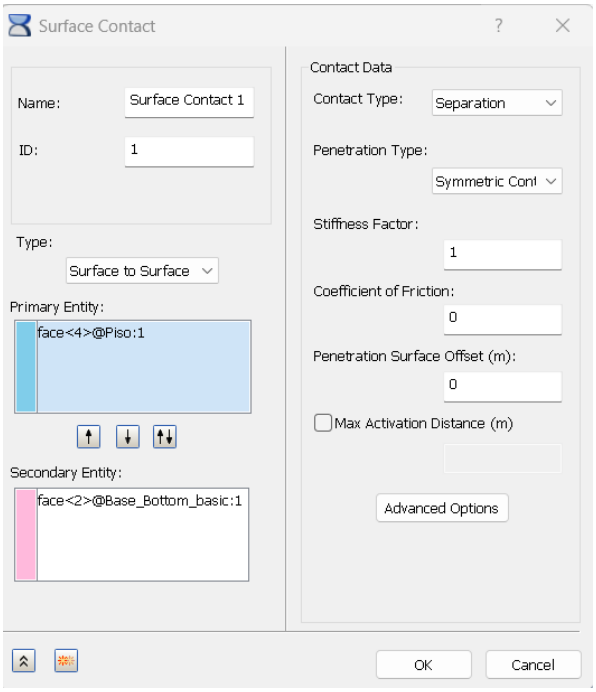


Figura 39: Ventana de contacto de superficies (1) en Inventor Nastran
Nota. Captura de pantalla en Autodesk Inventor Nastran

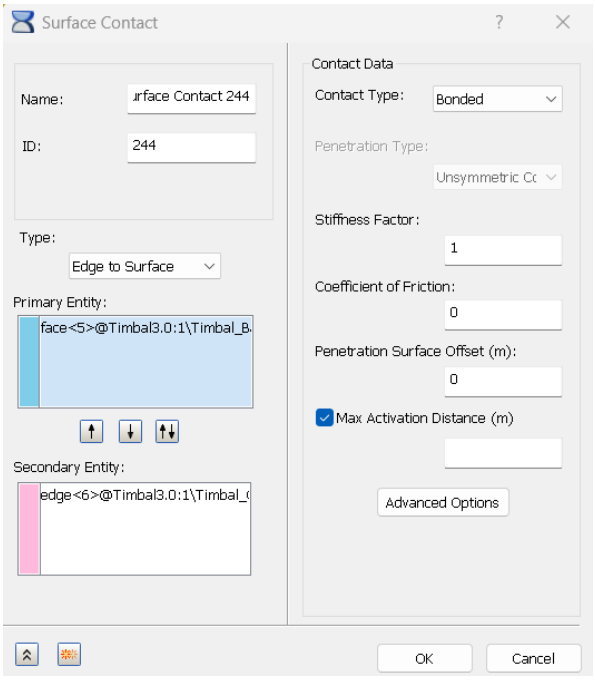


Figura 40: Ventana de contacto de superficies (244) en Inventor Nastran
Nota. Captura de pantalla en Autodesk Inventor Nastran

5.2.2.6. CONFIGURACIÓN DEL SUBCASO Se configura con los mismos valores que en el subcaso 1.

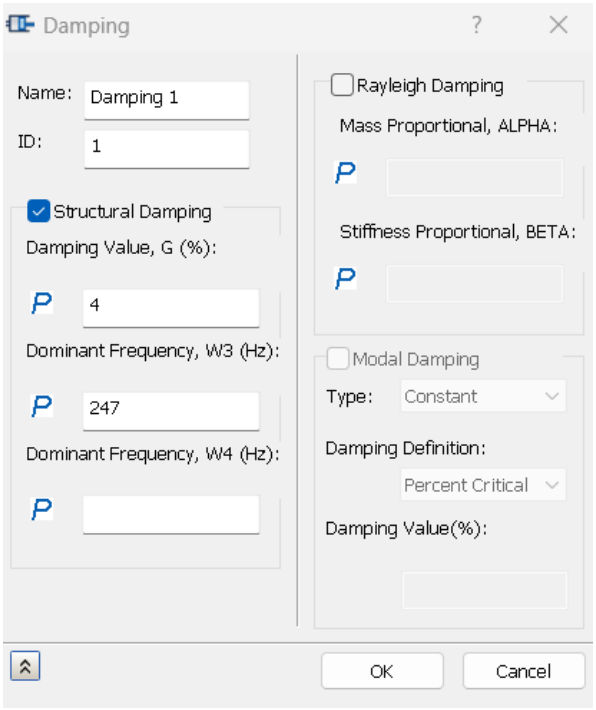


Figura 41: Ventana de damping en Inventor Nastran
Nota. Captura de pantalla en Autodesk Inventor Nastran

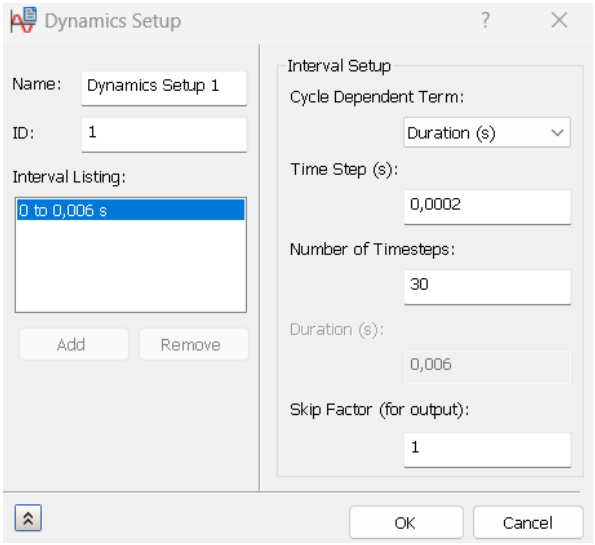


Figura 42: Ventana de configuración dinámica en Inventor Nastran
Nota. Captura de pantalla en Autodesk Inventor Nastran

5.2.2.7. MALLA E INICIO DE SIMULACIÓN Se define la malla igual a la del subcaso 1 y se inicia la simulación.

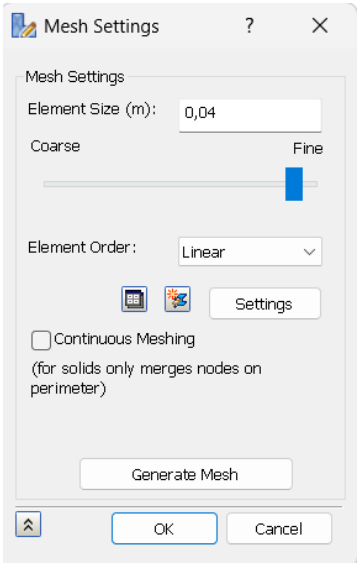


Figura 43: Ventana de configuración del mallado en Inventor Nastran
Nota. Captura de pantalla en Autodesk Inventor Nastran

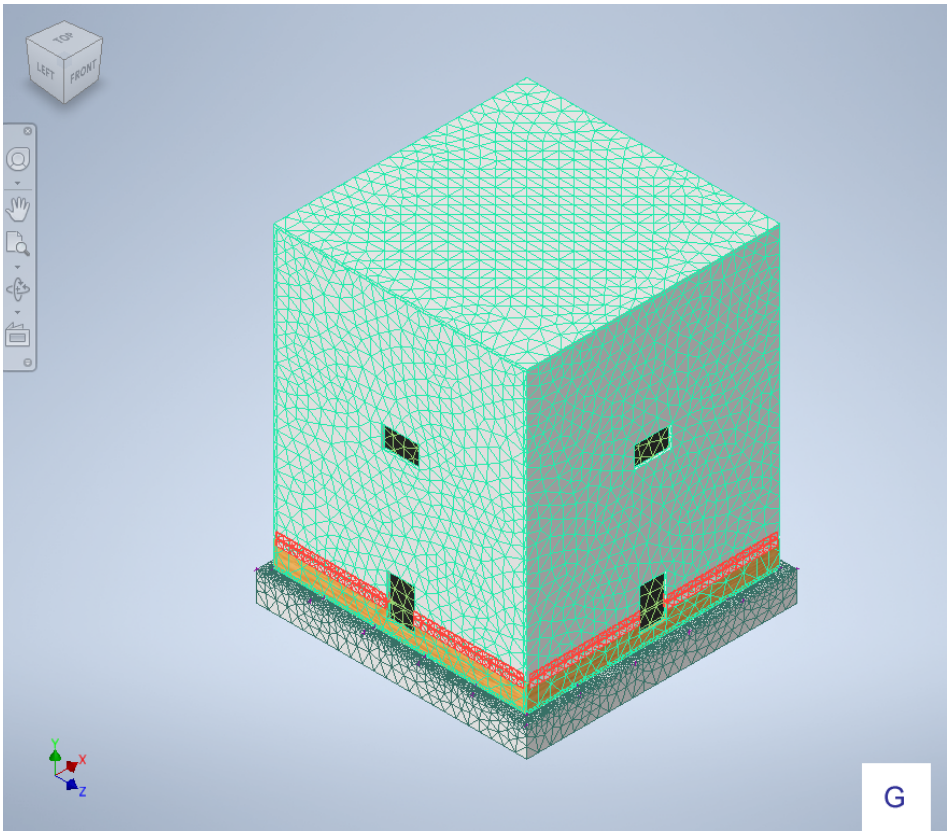


Figura 44: Mallado final subcaso 2 caso 1 antes de iniciar la simulación en Inventor Nastran
Nota. Captura de pantalla en Autodesk Inventor Nastran

5.2.2.8. RESULTADOS Al finalizar la simulación del subcaso 2 se obtiene lo que se muestra a continuación.

En la figura 45 se observan los datos obtenidos del esfuerzo de Von Mises. Se muestran los valores máximo y mínimo presentes en la caja. Además se destaca un valor que llama la atención en la parte superior de la caja.

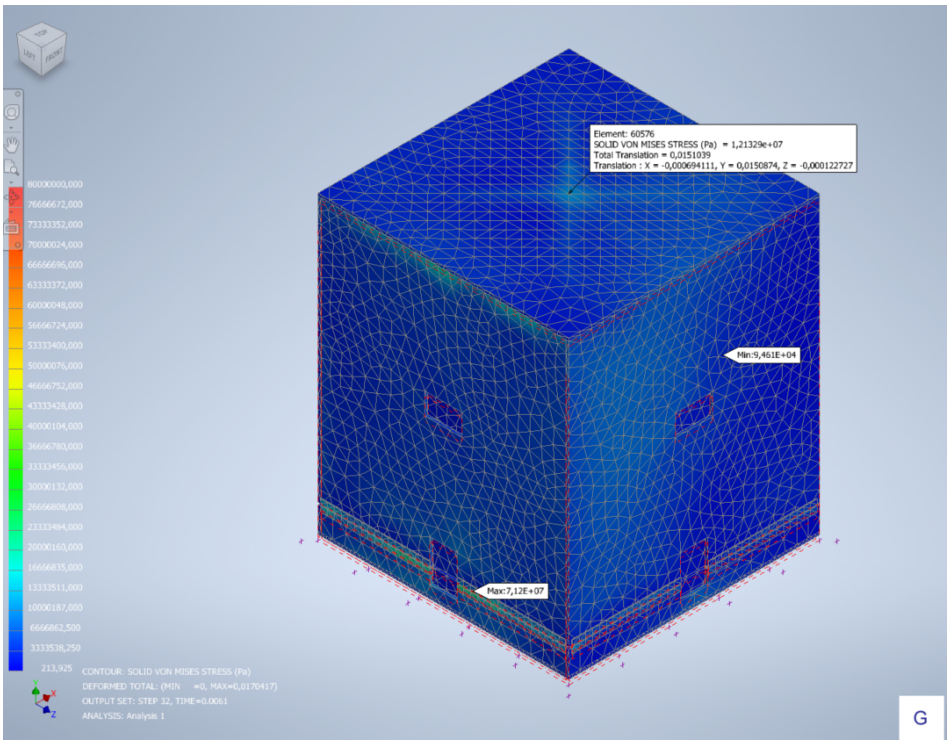


Figura 45: Esfuerzo de Von Mises subcaso 2
Nota. Captura de pantalla en Autodesk Inventor Nastran

En la figura 46 se muestra el valor máximo de esfuerzo de Von Mises presente en la caja, el cual esta en el perfil de aluminio híbrido que une ambas partes de la caja.

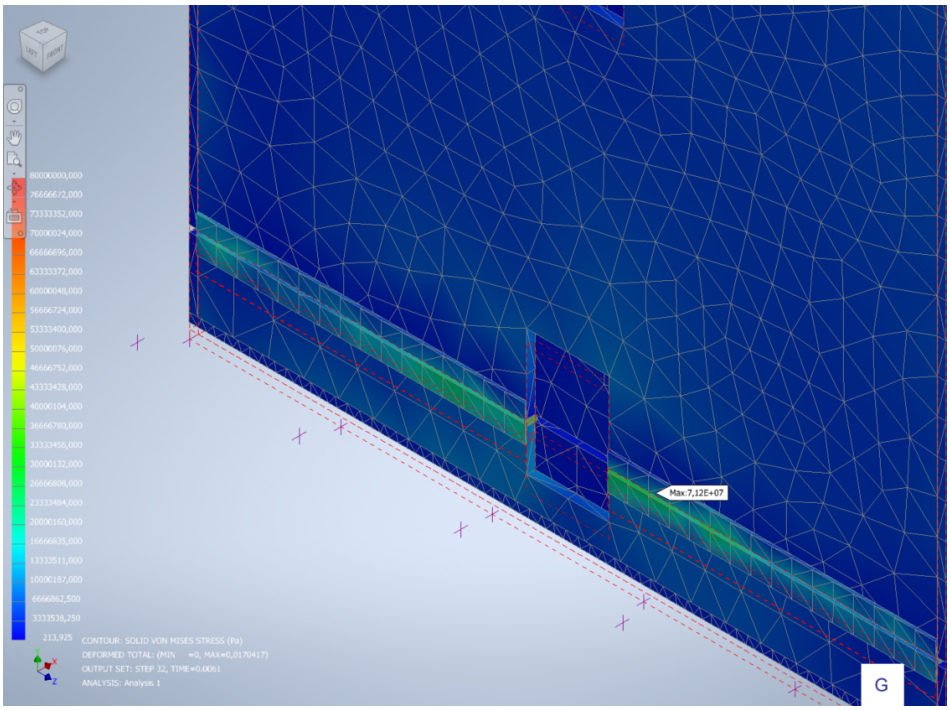


Figura 46: Esfuerzo de Von Mises máximo
Nota. Captura de pantalla en Autodesk Inventor Nastran

En la figura 47 se observan puntos de interés parecidos a los observados en el subcaso 1, en las paredes laterales zona superior de la caja, los cuales, en la figura 48 muestran valores cercanos, e incluso menores a la unidad en factor de seguridad.

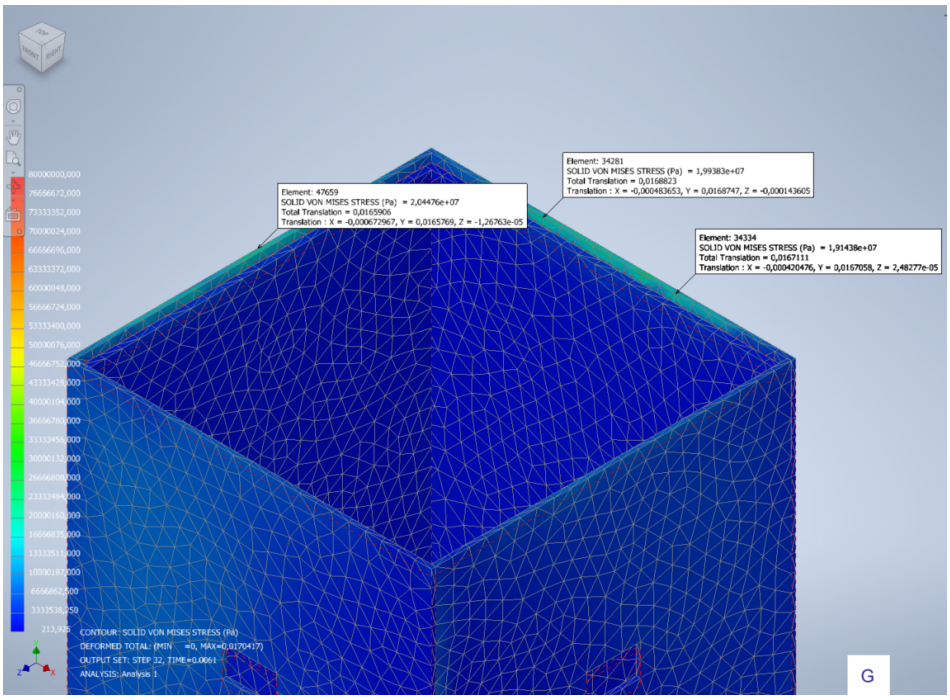


Figura 47: Esfuerzo de Von Mises puntos de interés
Nota. Captura de pantalla en Autodesk Inventor Nastran

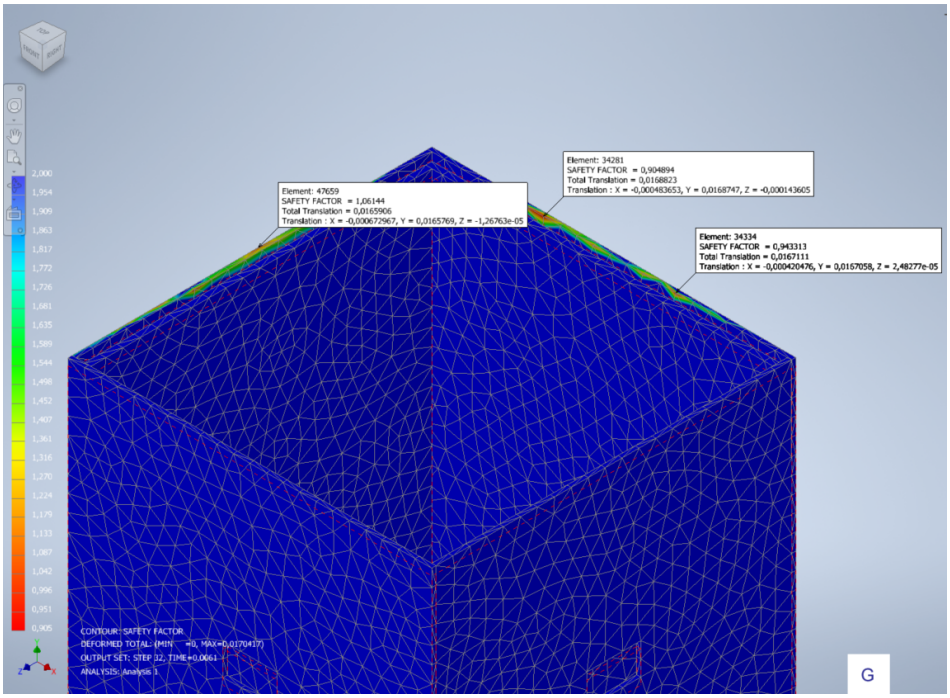


Figura 48: Factores de Seguridad en la caja subcaso 2
Nota. Captura de pantalla en Autodesk Inventor Nastran

A diferencia del subcaso 1, en el timbal se observa el valor máximo del esfuerzo de Von Mises en la base, en el punto de unión entre una de las patas delanteras y la base redonda que soporta la caldera del timbal (figura 49). En este mismo punto se observa en la figura 50 el valor mínimo de el factor de seguridad: 1,754.

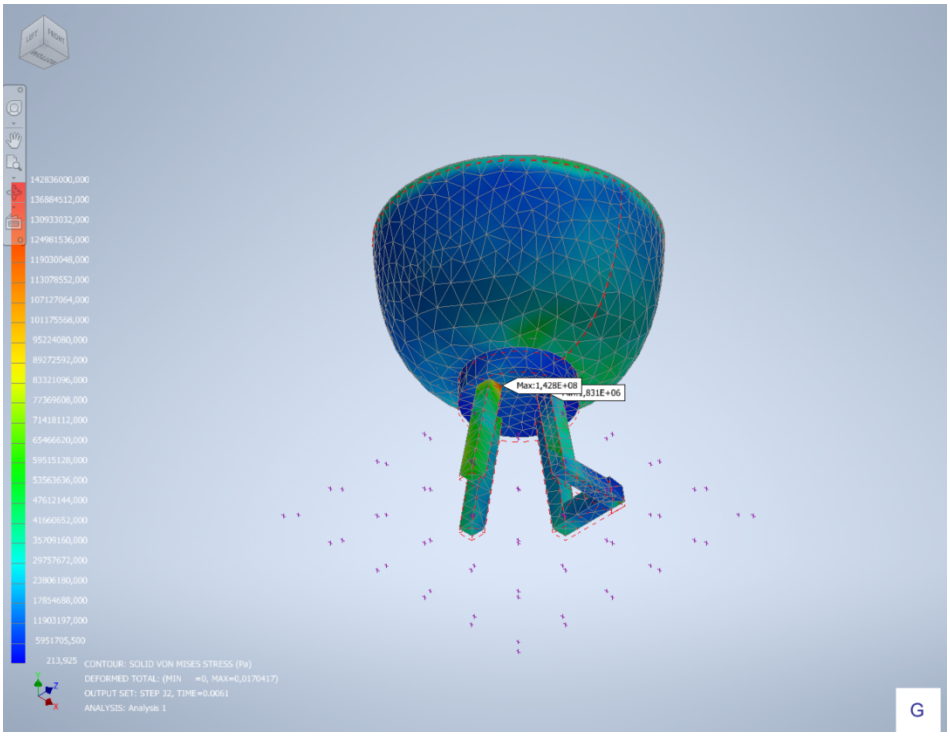


Figura 49: Esfuerzo de Von Mises timbal subcaso 2
Nota. Captura de pantalla en Autodesk Inventor Nastran

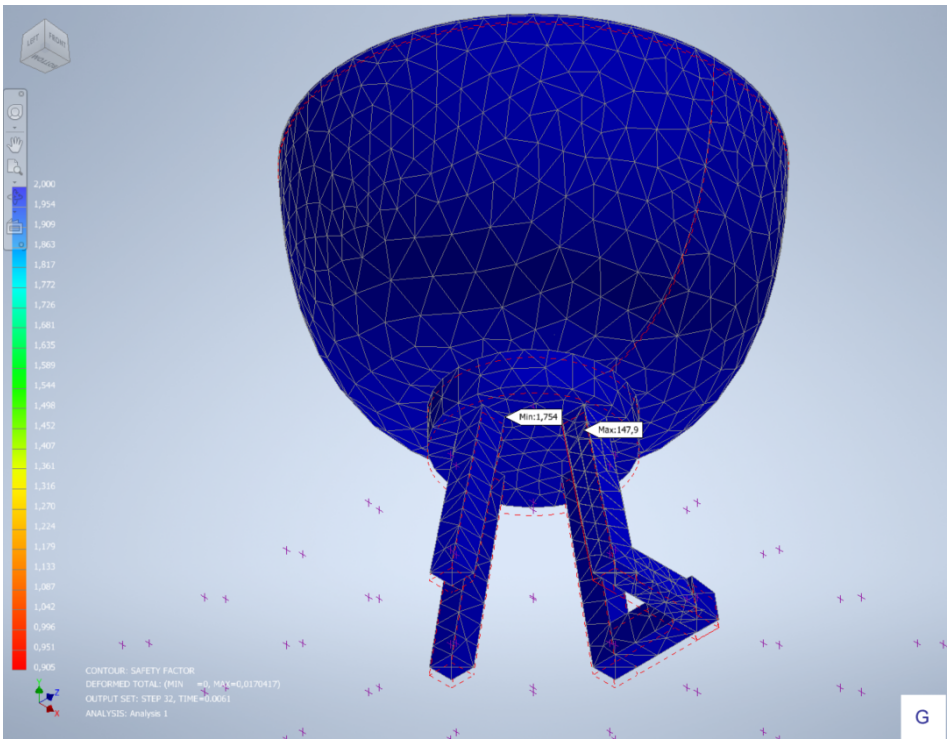


Figura 50: Factores de seguridad timbal subcaso 2
Nota. Captura de pantalla en Autodesk Inventor Nastran

5.2.3. CASO 2

Se gira la caja desde su posición inicial 45 grados con respecto al plano xz. Se define una altura inicial de 5 [m]. Para la simulación se considera una distancia de 3 [mm] entre la caja y una velocidad de 10 [m/s].

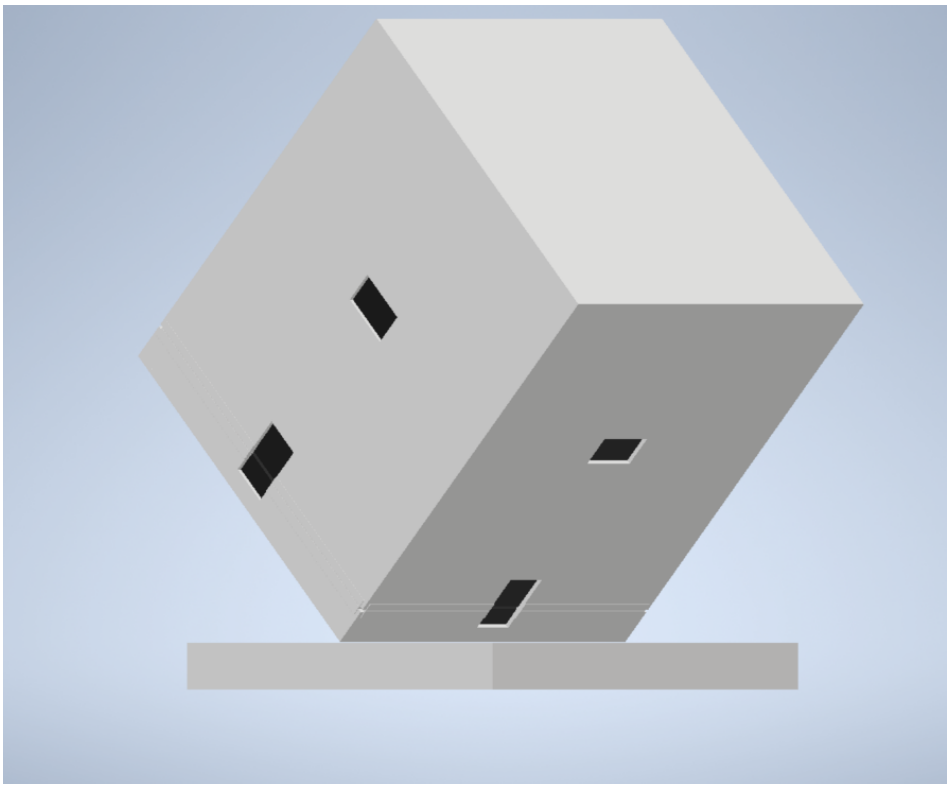


Figura 51: Caja girada para caso 2
Nota. Captura de pantalla en Autodesk Inventor Nastran

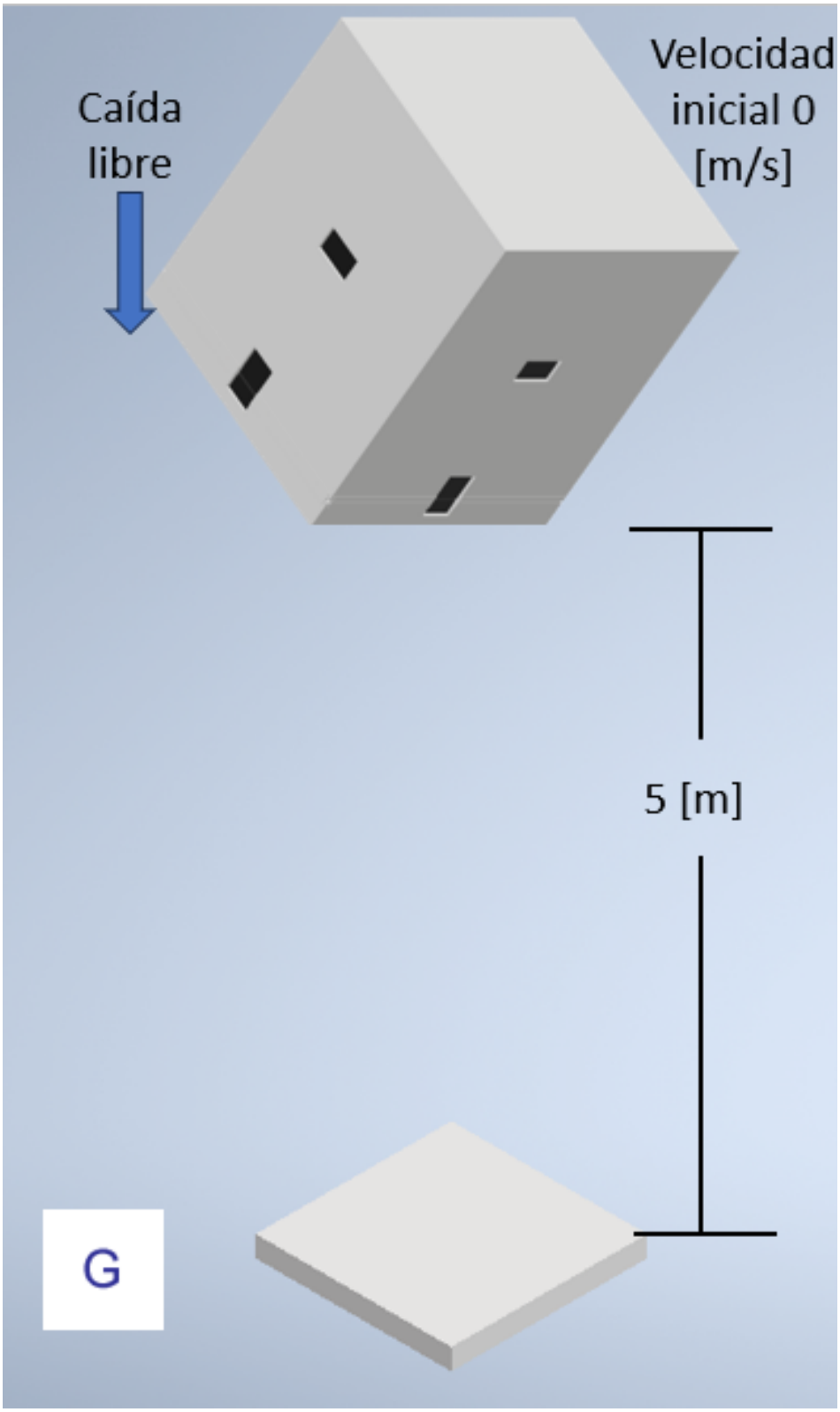


Figura 52: Diagrama de cuerpo libre caso 2
Nota. Captura de pantalla en Autodesk Inventor Nastran

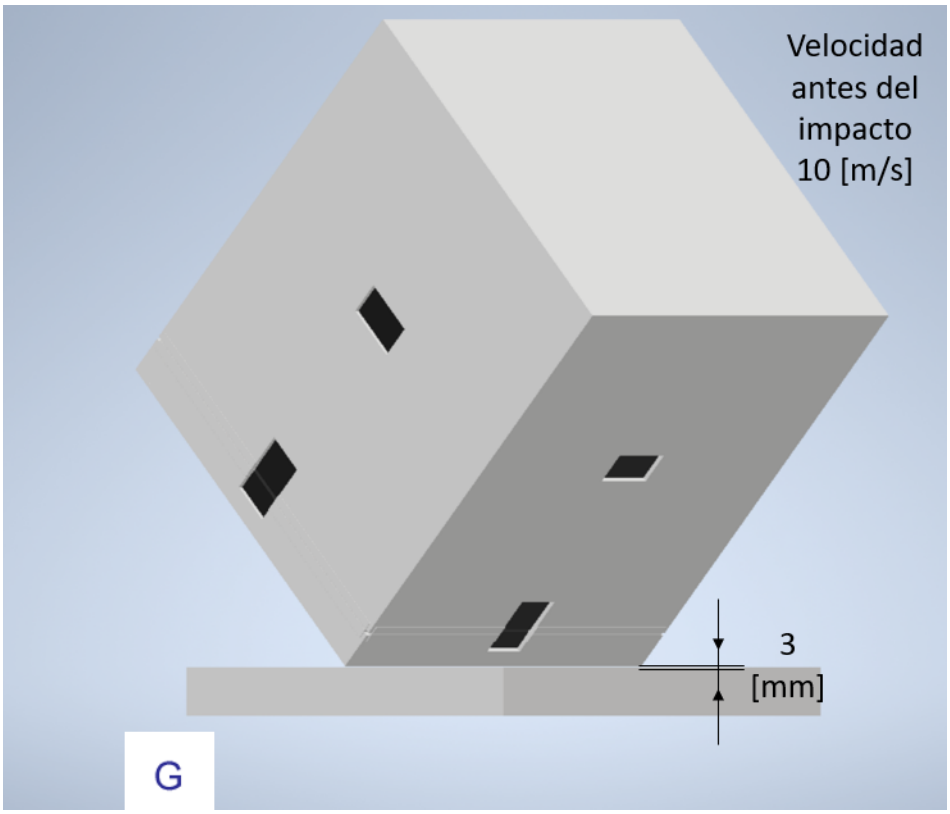


Figura 53: Diagrama de cuerpo libre al inicio de la simulación caso 2
Nota. Captura de pantalla en Autodesk Inventor Nastran

5.2.3.1. TIPO DE ANÁLISIS Se define el tipo de análisis de la misma forma que en el caso 1.

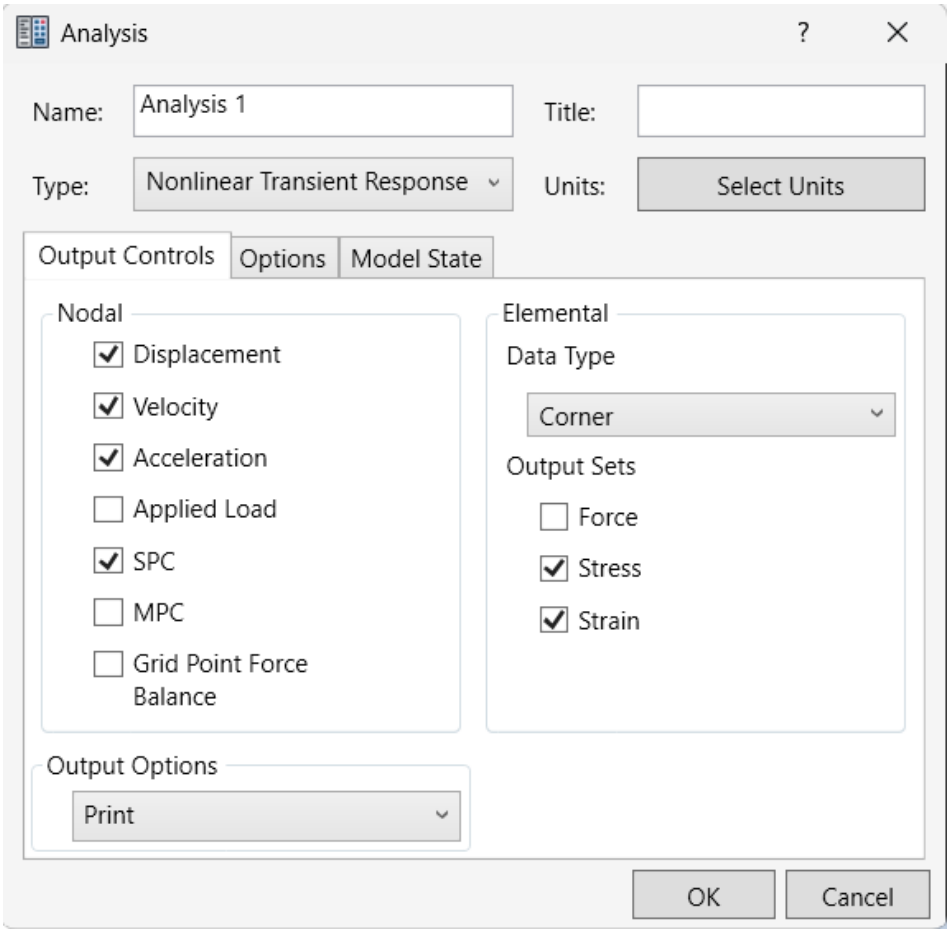


Figura 54: Ventana de análisis en Inventor Nastran
Nota. Captura de pantalla en Autodesk Inventor Nastran

5.2.3.2. IDEALIZACIONES Las idealizaciones son las mismas que en el caso 1.

Tabla 5: Características de materiales utilizados Fuente: Elaboración Propia.

Material	**Módulo de Elasticidad E [MPa]**	**Relación de Poisson ν [-]**	**densidad ρ [kg/m^3]**
Contrachapado	7,70E+03	0,25	552
Aluminio	6,89E+04	0,33	2700
Poliestireno de Alto Impacto	1,90E+03	0,38	1022
Concreto	2,33E+04	0,167	2407,3
Acero fundido	2,10E+05	0,3	7850
Bronce	9,70E+04	0,31	8470

5.2.3.3. CONDICIONES DE CONTORNO Se definen las mismas condiciones que en el subcaso 2 del caso 1.

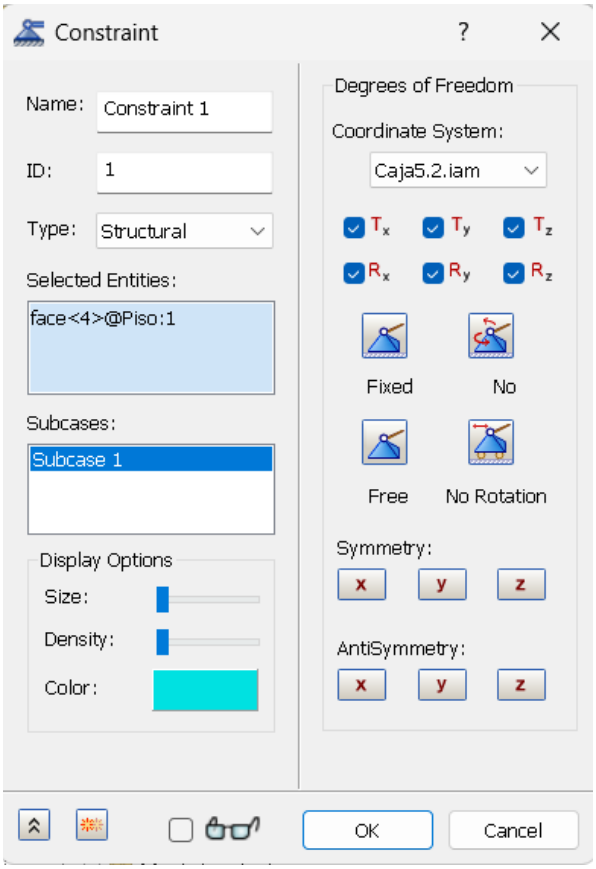


Figura 55: Ventana de restricciones en Inventor Nastran
Nota. Captura de pantalla en Autodesk Inventor Nastran

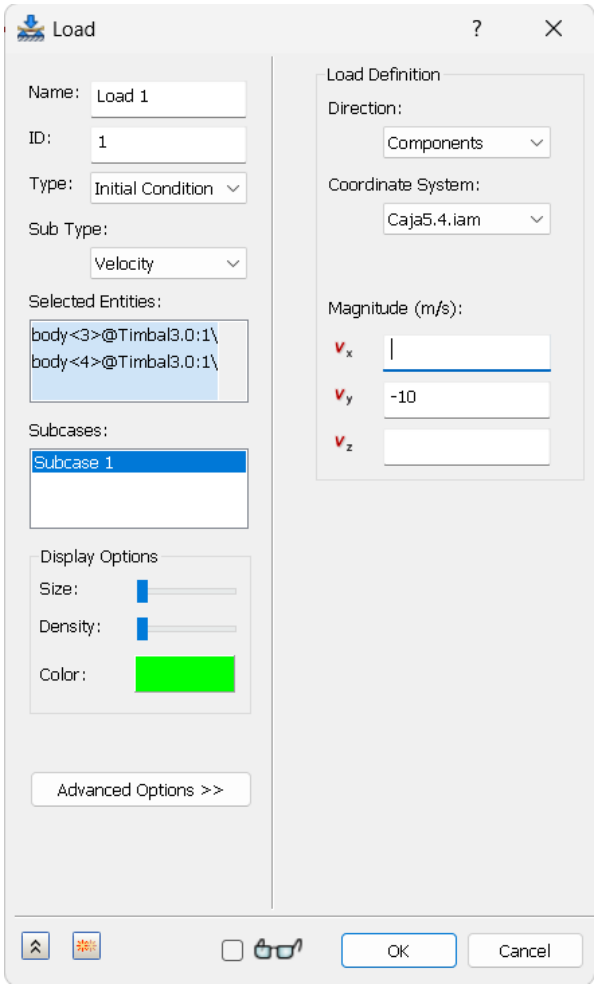


Figura 56: Ventana de carga 1 en Inventor Nastran
Nota. Captura de pantalla en Autodesk Inventor Nastran

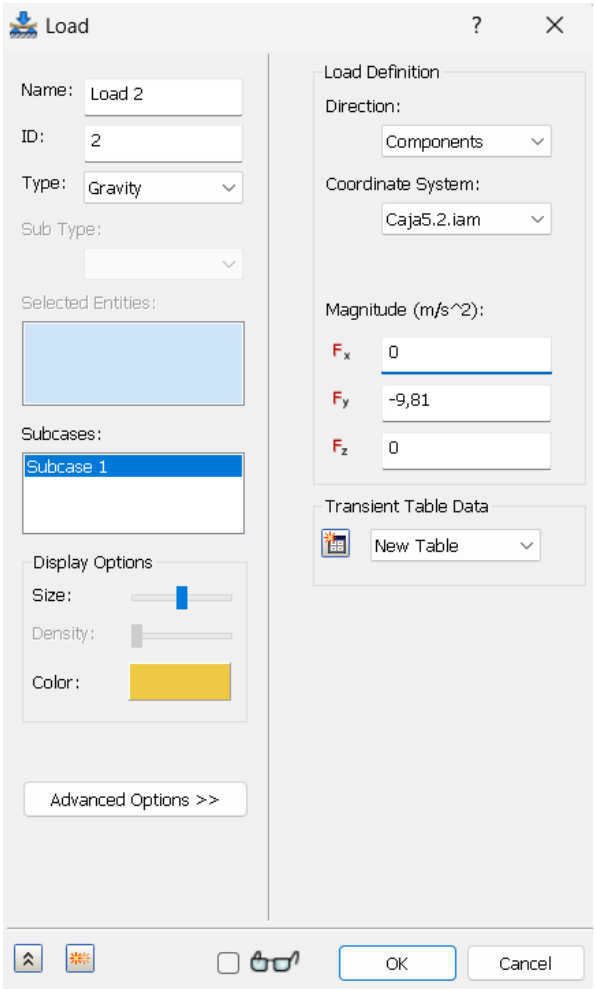


Figura 57: Ventana de carga 2 en Inventor Nastran
Nota. Captura de pantalla en Autodesk Inventor Nastran

5.2.3.4. CONTROL DE MALLADO Se considera la configuración del subcaso 1 del caso 1 para las caras que entran en contacto con el suelo.

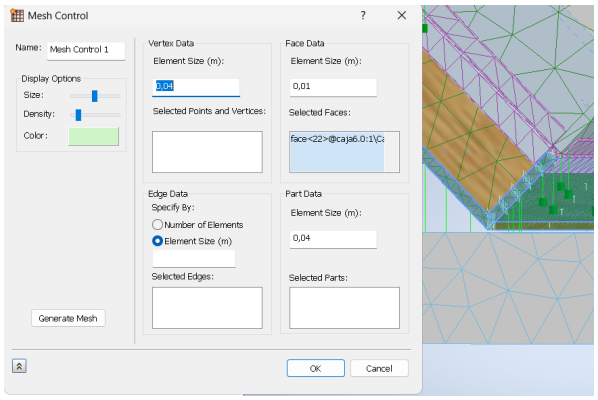


Figura 58: Ventana de control de la malla del caso 2 en Inventor Nastran
Nota. Captura de pantalla en Autodesk Inventor Nastran

5.2.3.5. CONTACTO Se definen los contactos entre todas las partes según corresponda.

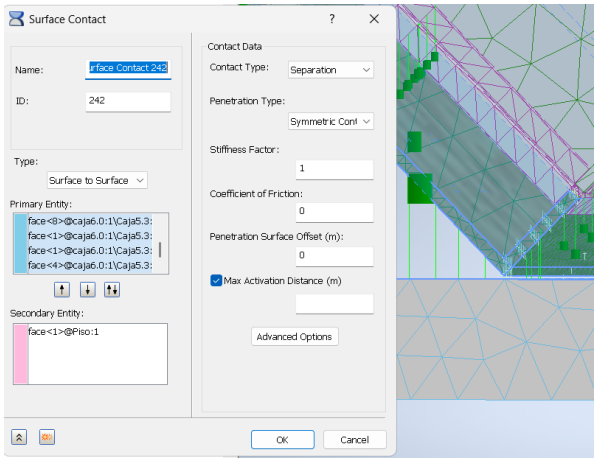


Figura 59: Ventana de contacto de superficies (242) del caso 2 en Inventor Nastran
Nota. Captura de pantalla en Autodesk Inventor Nastran

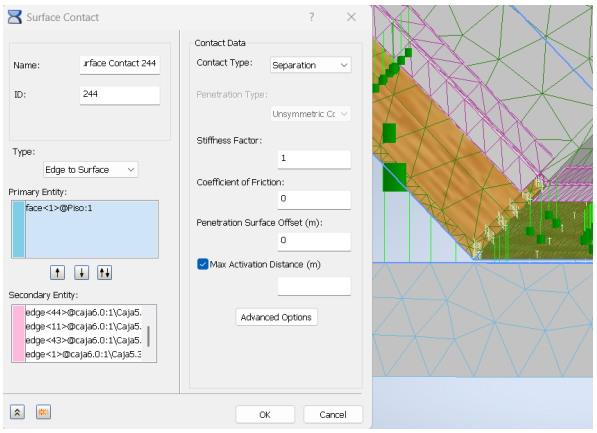


Figura 60: Ventana de contacto de superficies (244) del caso 2 en Inventor Nastran
Nota. Captura de pantalla en Autodesk Inventor Nastran

5.2.3.6. CONFIGURACIÓN DEL CASO Se define el damping como en el subcaso 1 del caso 1.

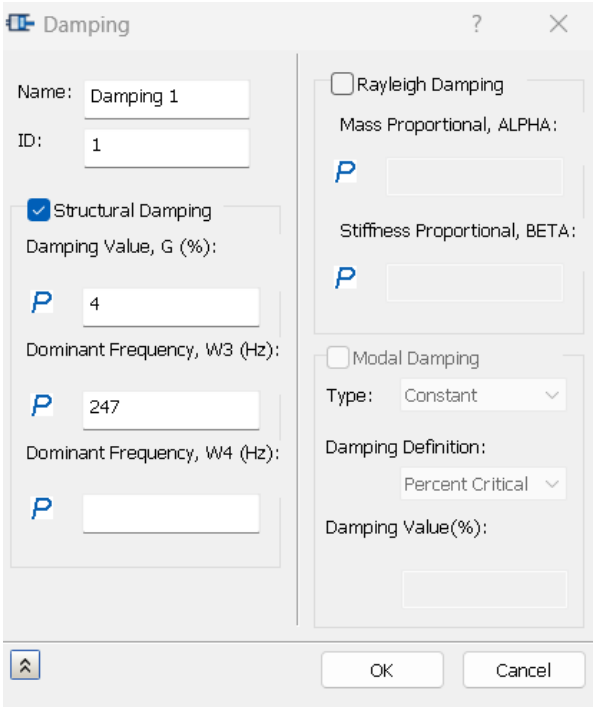


Figura 61: Ventana de damping en Inventor Nastran
Nota. Captura de pantalla en Autodesk Inventor Nastran

Para este caso consideramos el cambio de velocidad inicial con respecto a los casos anteriores

y esto cambia el delta de tiempo a 0,0003[s].

$$\Delta t = \frac{d}{V} = \frac{0,003[m]}{10[m/s]} = 0,0003[s]$$

El resto de la configuración es igual al subcaso 1 del caso 1.

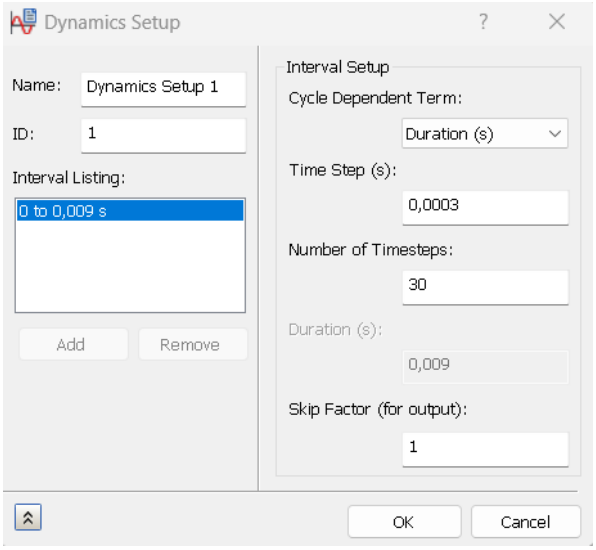


Figura 62: Ventana de configuración dinámica en Inventor Nastran
Nota. Captura de pantalla en Autodesk Inventor Nastran

5.2.3.7. MALLA E INICIO DE SIMULACIÓN Se define la malla igual a la del subcaso 1 y se inicia la simulación.

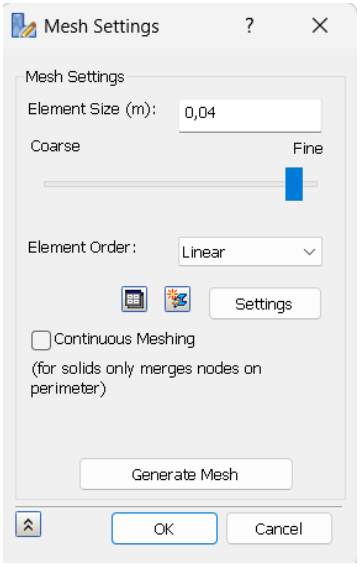


Figura 63: Ventana de configuración del mallado en Inventor Nastran
Nota. Captura de pantalla en Autodesk Inventor Nastran

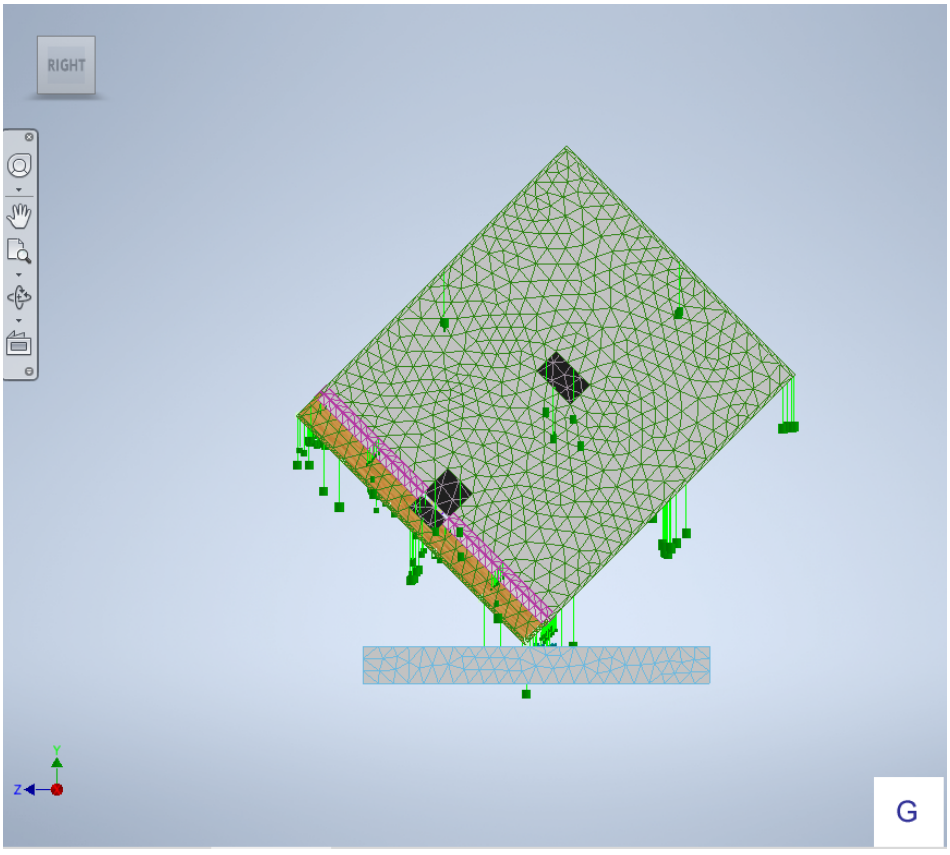


Figura 64: Mallado final caso 2 antes de iniciar la simulación en Inventor Nastran
Nota. Captura de pantalla en Autodesk Inventor Nastran

5.2.3.8. RESULTADOS Dada la complejidad de la simulación del caso 2, solo se calcularon 9 pasos de tiempo (figura 65). Los siguientes resultados son solo considerando esto.

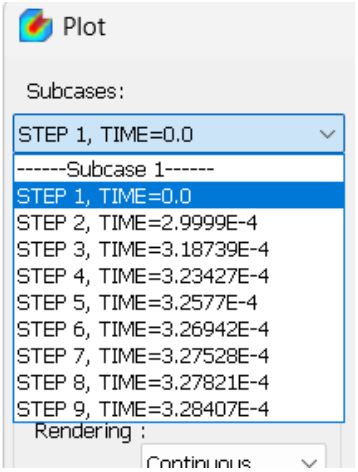


Figura 65: Los pasos de tiempo del caso 2
Nota. Captura de pantalla en Autodesk Inventor Nastran

En la figura 66 se observan los datos obtenidos del esfuerzo de Von Mises para el caso 2. Se muestran los valores máximo y mínimo presentes en la caja.

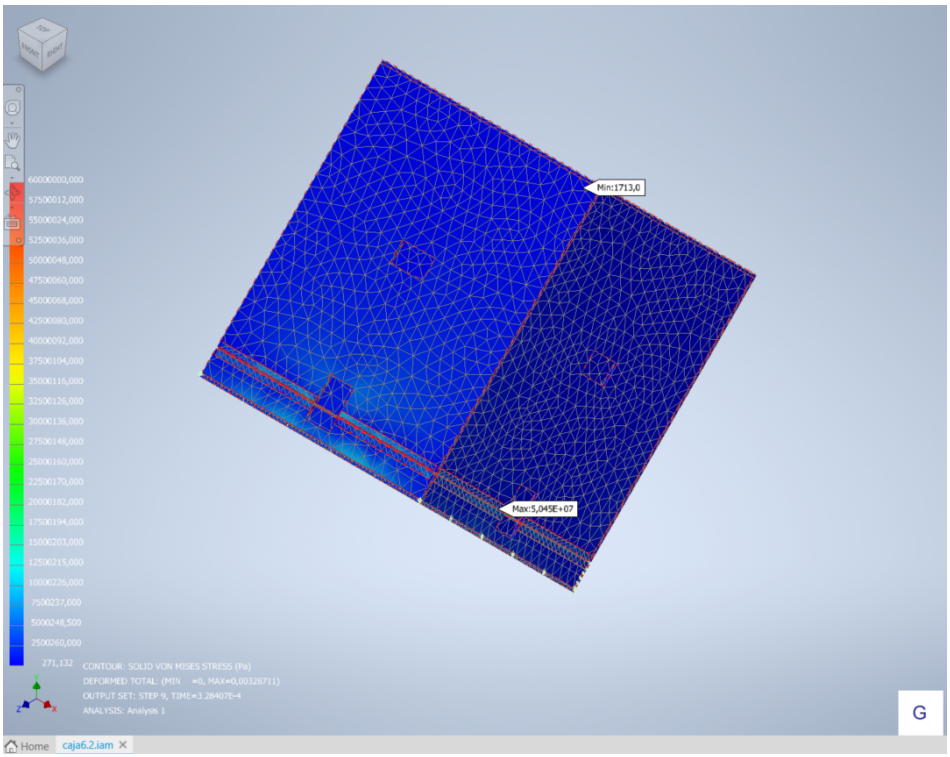


Figura 66: Esfuerzo de Von Mises caso 2
Nota. Captura de pantalla en Autodesk Inventor Nastran

En la figura 67 se muestran los valores mínimo y máximo del factor de seguridad en la caja. El valor mínimo se encuentra en la base de la caja y se corresponde a donde se encuentran puntos de apoyo del timbal.

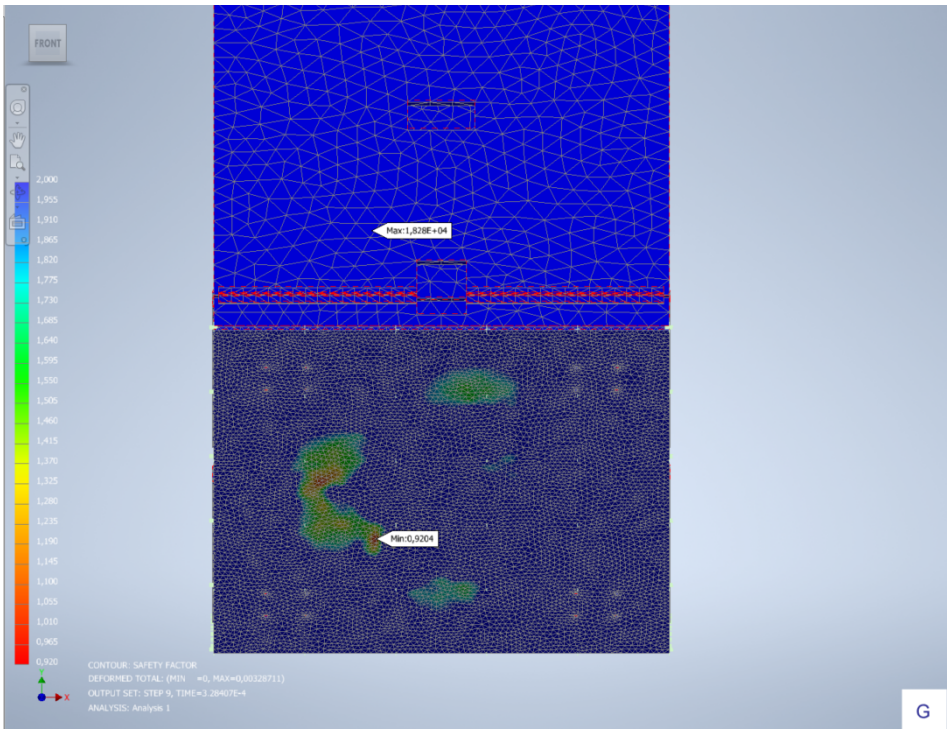


Figura 67: Factores de Seguridad en la caja caso 2
Nota. Captura de pantalla en Autodesk Inventor Nastran

Al ver el timbal (figuras 68 y 69), los esfuerzos de Von Mises máximo y mínimo se encuentran en la base del mismo, puntos semejantes a los observados en el subcaso 2 (figura 49). Los factores de seguridad de la figura 70 se corresponden con los esfuerzos de Von Mises.

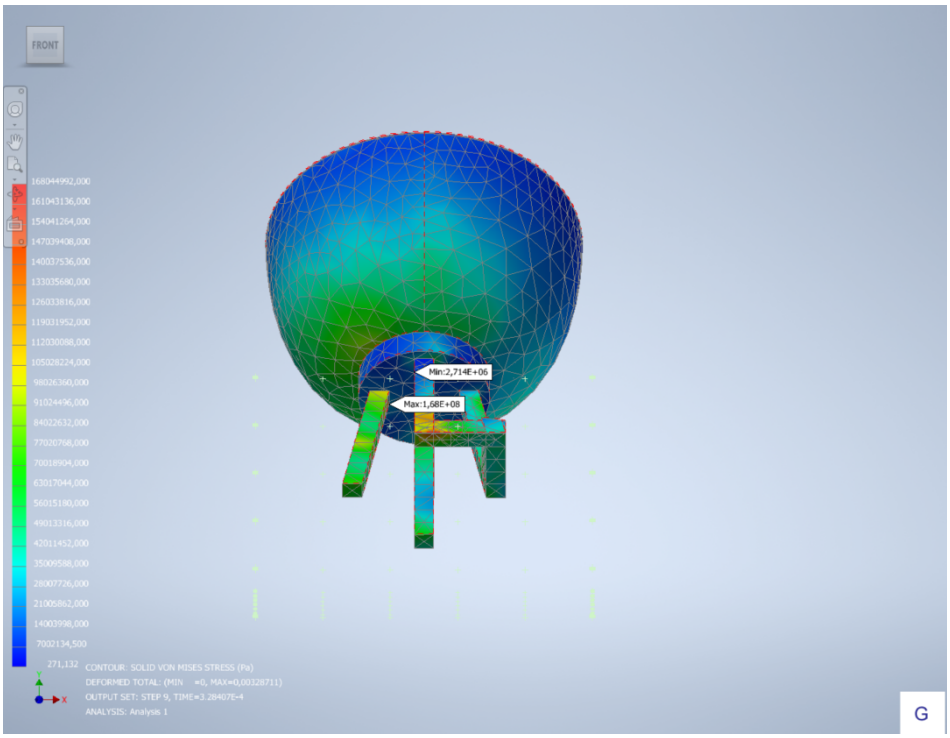


Figura 68: Esfuerzo de Von Mises timbal caso 2
Nota. Captura de pantalla en Autodesk Inventor Nastran

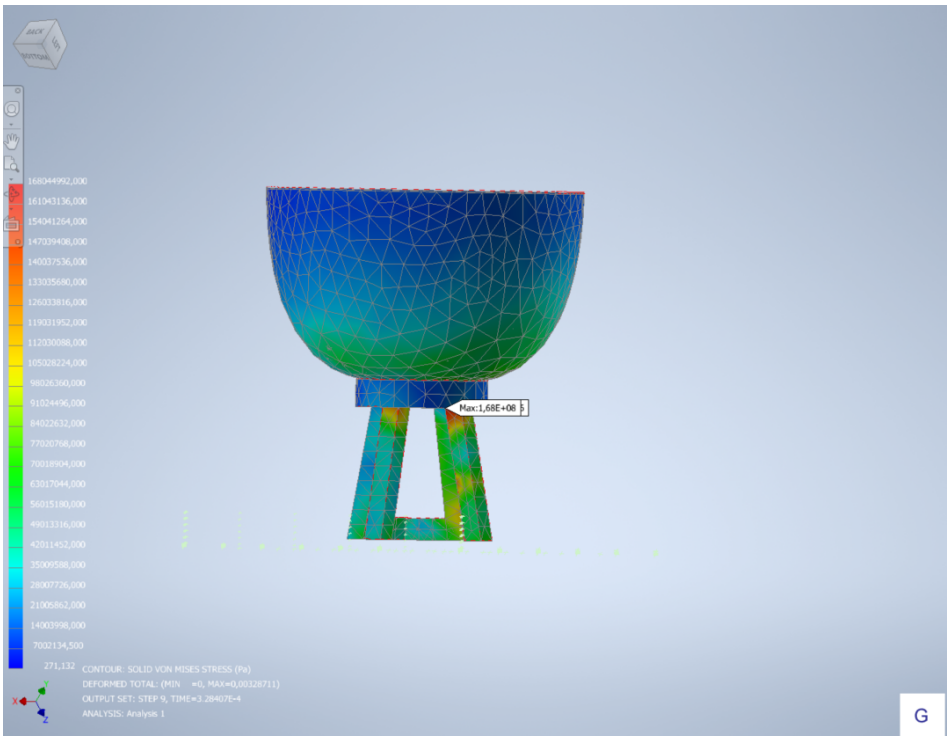


Figura 69: Esfuerzo de Von Mises timbal caso 2
Nota. Captura de pantalla en Autodesk Inventor Nastran

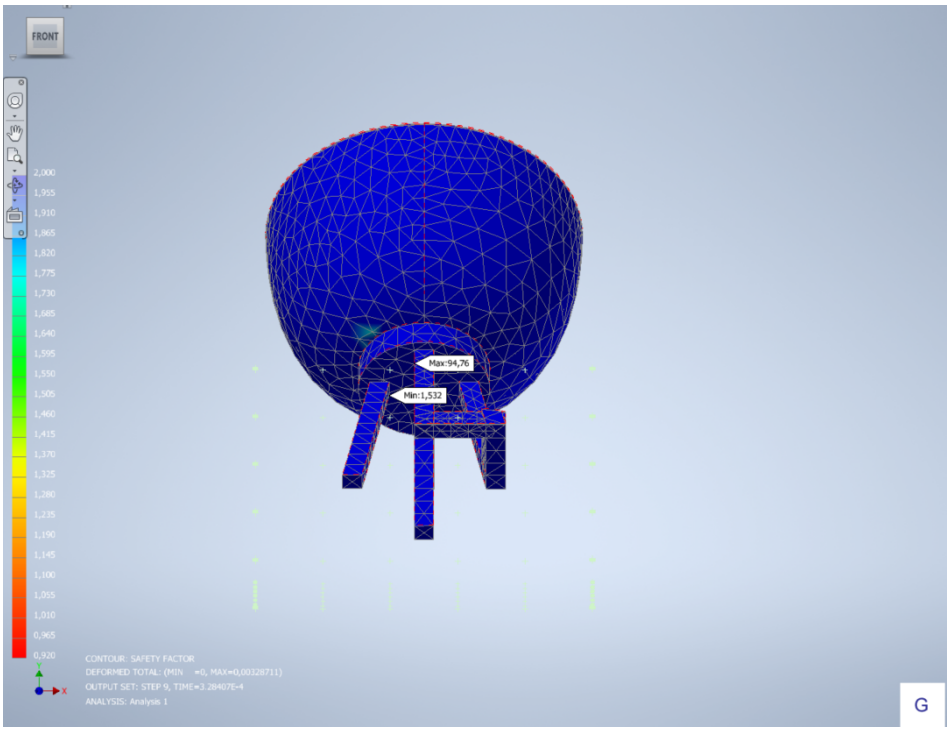


Figura 70: Factores de seguridad timbal subcaso 2
Nota. Captura de pantalla en Autodesk Inventor Nastran

5.2.4. CASO 3

Se gira la caja desde la posición del caso 2 grados con respecto al plano yz. Se define una altura inicial de 5 [m]. Para la simulación se considera una distancia de 3 [mm] entre la caja y una velocidad de 10 [m/s].

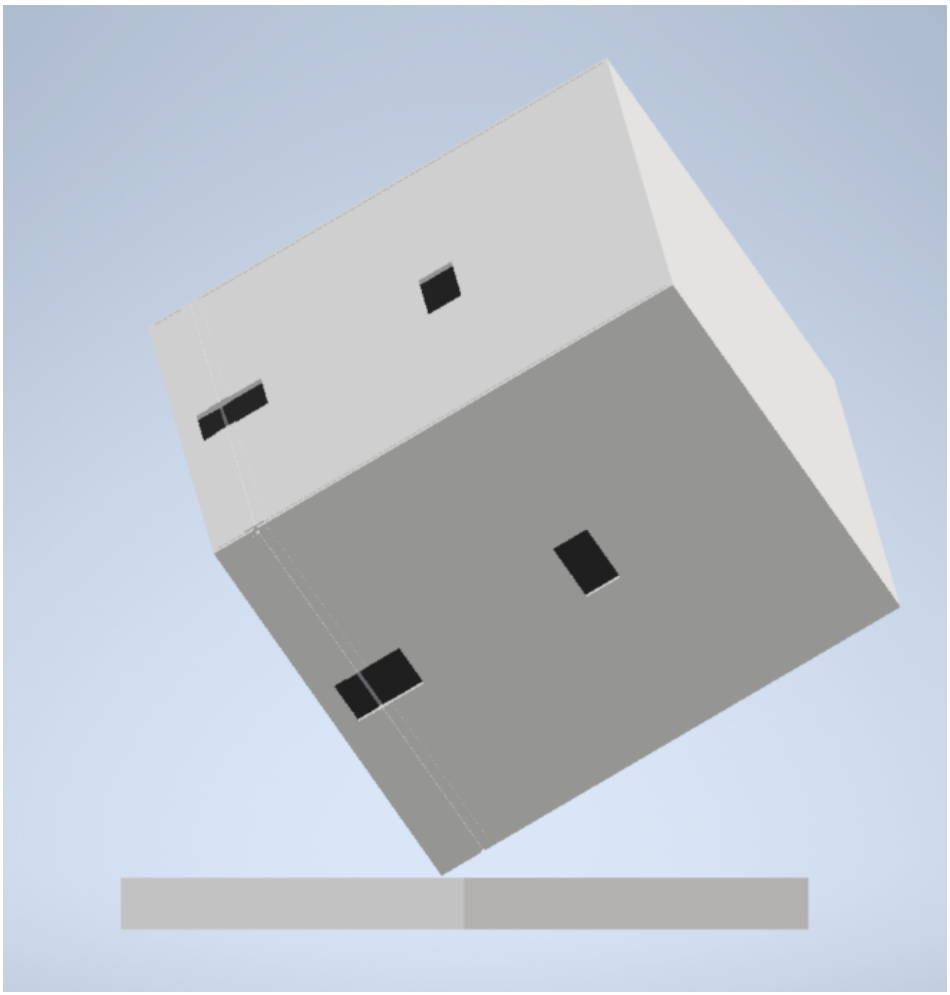


Figura 71: Caja en posición para caso 3
Nota. Captura de pantalla en Autodesk Inventor Nastran

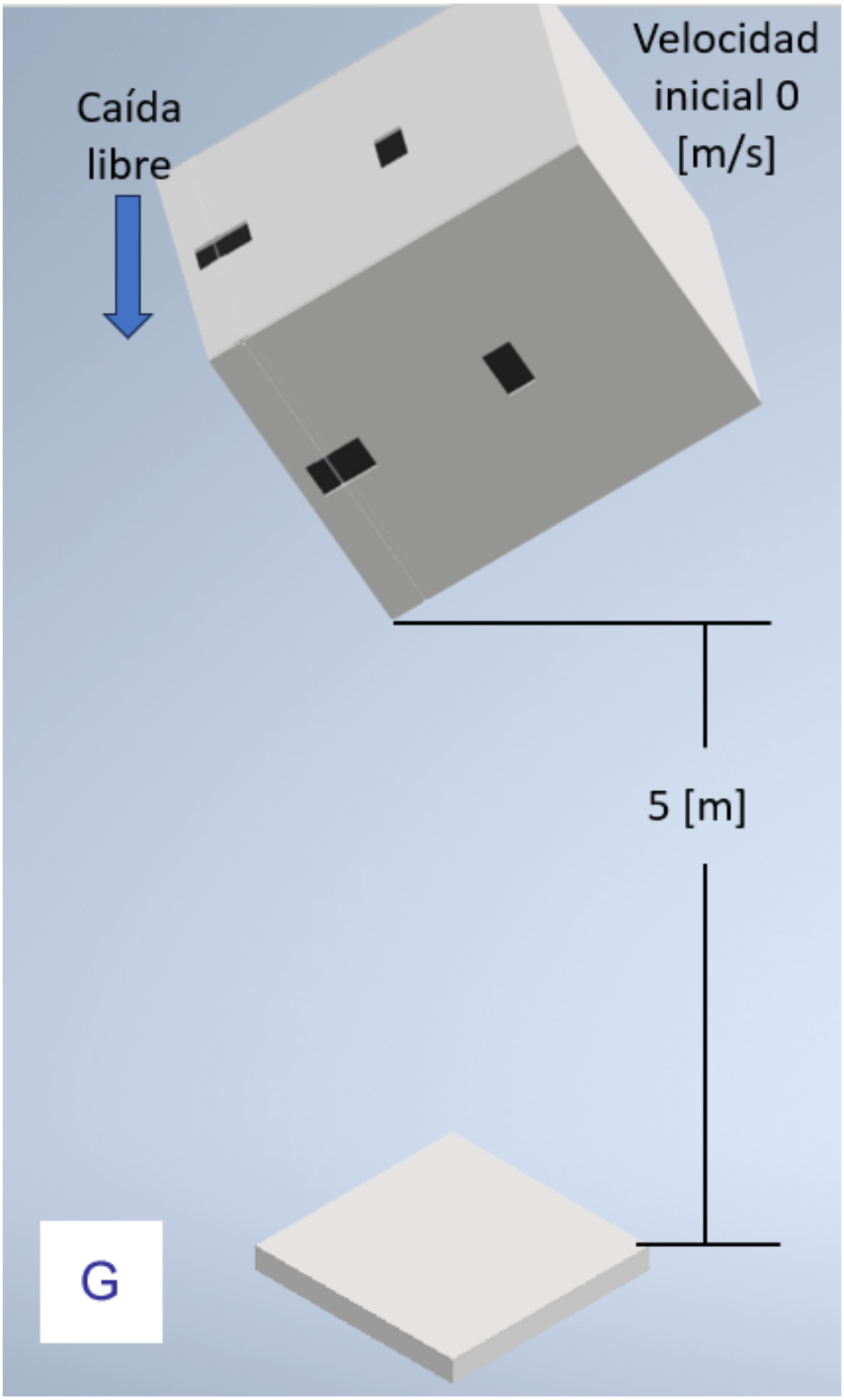


Figura 72: Diagrama de cuerpo libre caso 3
Nota. Captura de pantalla en Autodesk Inventor Nastran

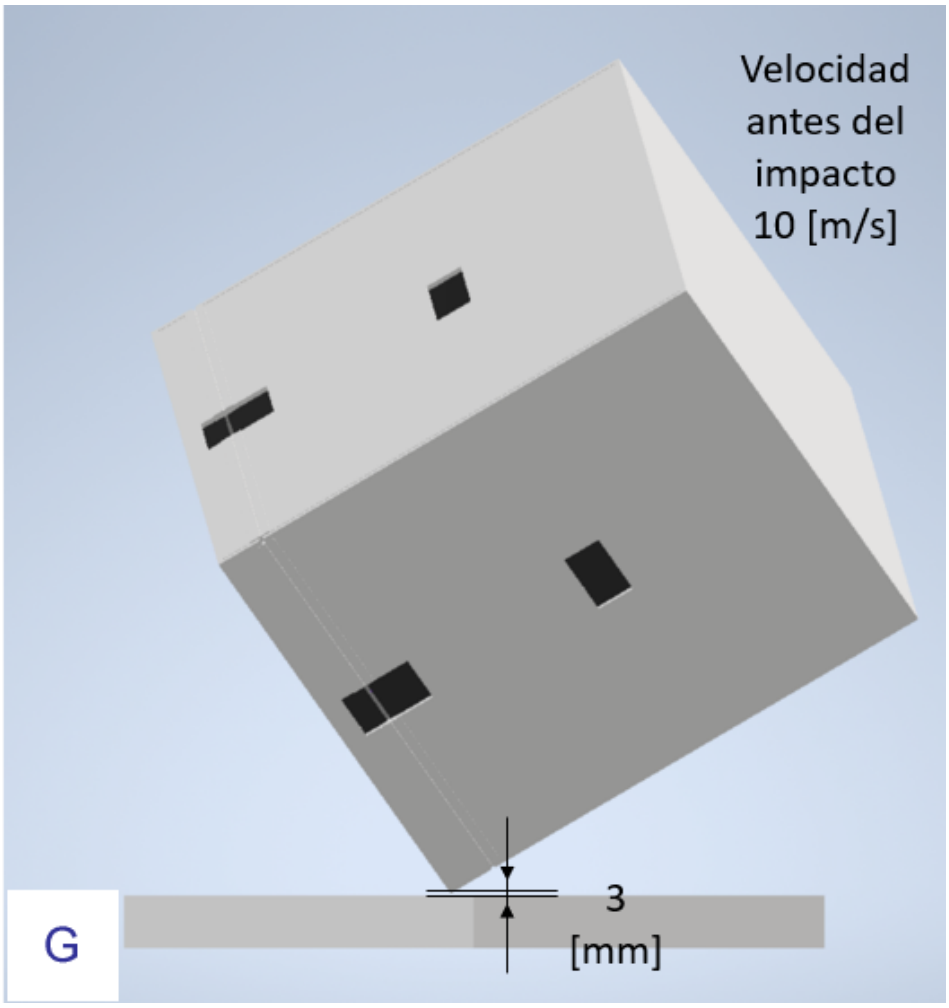


Figura 73: Diagrama de cuerpo libre al inicio de la simulación caso 3
Nota. Captura de pantalla en Autodesk Inventor Nastran

5.2.4.1. TIPO DE ANÁLISIS Se define el tipo de análisis de la misma forma que en el caso 1.

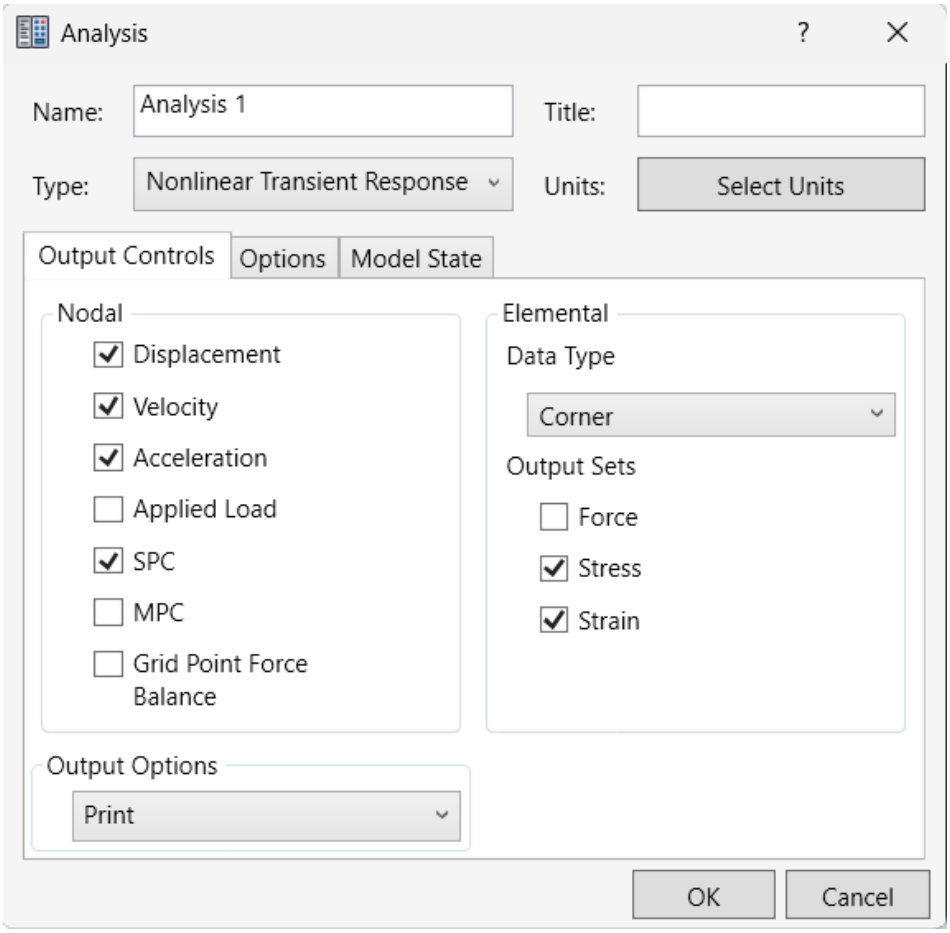


Figura 74: Ventana de análisis en Inventor Nastran
Nota. Captura de pantalla en Autodesk Inventor Nastran

5.2.4.2. IDEALIZACIONES Las idealizaciones son las mismas que en el caso 1.

Tabla 6: Características de materiales utilizados Fuente: Elaboración Propia.

Material	**Módulo de Elasticidad E [MPa]**	**Relación de Poisson ν [-]**	**densidad ρ [kg/m^3]**
Contrachapado	7,70E+03	0,25	552
Aluminio	6,89E+04	0,33	2700
Poliestireno de Alto Impacto	1,90E+03	0,38	1022
Concreto	2,33E+04	0,167	2407,3
Acero fundido	2,10E+05	0,3	7850
Bronce	9,70E+04	0,31	8470

5.2.4.3. CONDICIONES DE CONTORNO Se definen las mismas condiciones que en el subcaso 2 del caso 1.

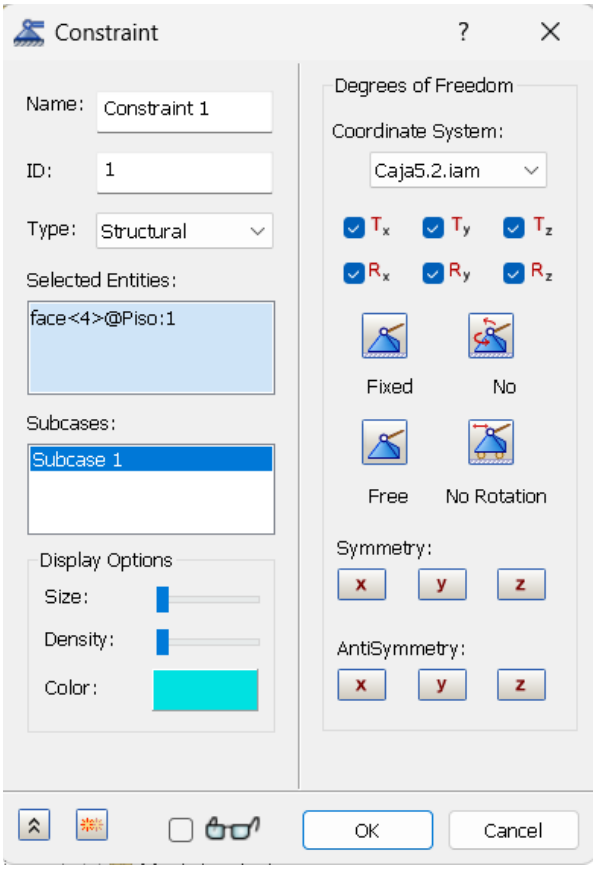


Figura 75: Ventana de restricciones en Inventor Nastran
Nota. Captura de pantalla en Autodesk Inventor Nastran

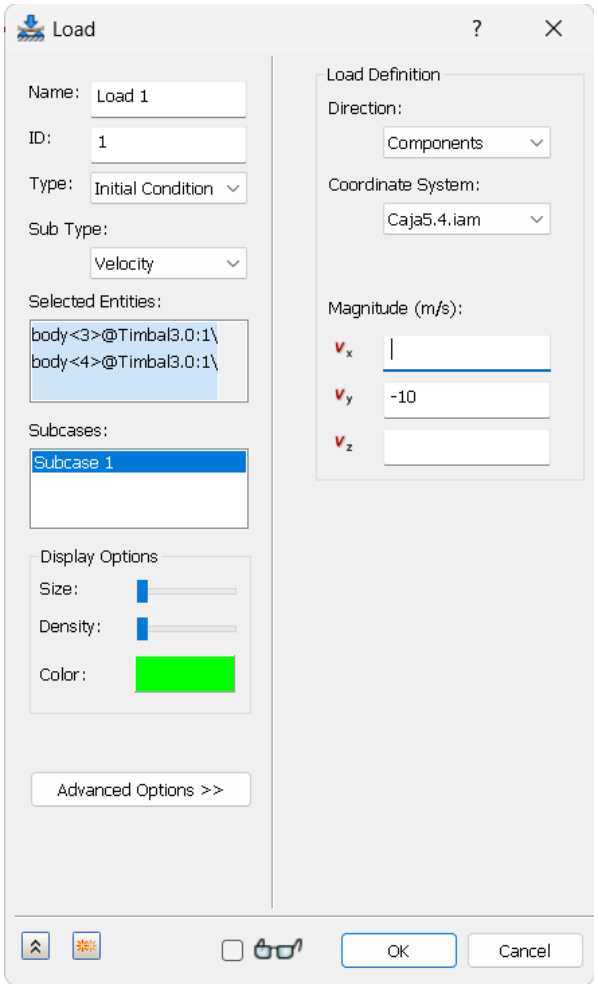


Figura 76: Ventana de carga 1 en Inventor Nastran
Nota. Captura de pantalla en Autodesk Inventor Nastran

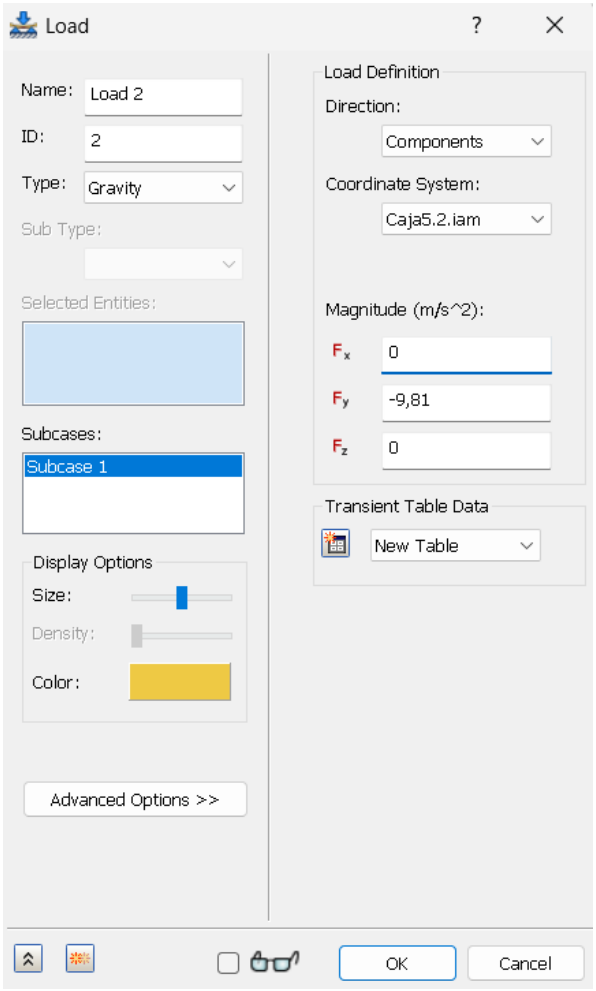


Figura 77: Ventana de carga 2 en Inventor Nastran
Nota. Captura de pantalla en Autodesk Inventor Nastran

5.2.4.4. CONTROL DE MALLADO Se considera la configuración del subcaso 1 del caso 1 para las caras que entran en contacto con el suelo.

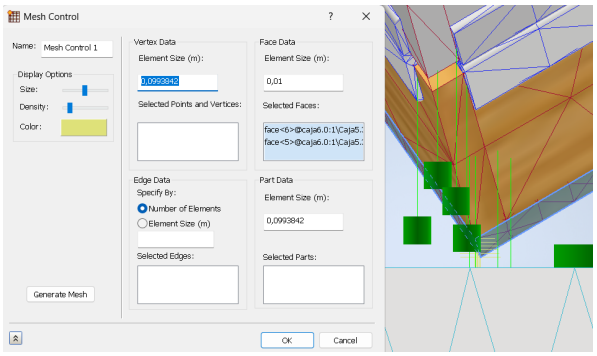


Figura 78: Ventana de control de la malla del caso 3 en Inventor Nastran
Nota. Captura de pantalla en Autodesk Inventor Nastran

5.2.4.5. CONTACTO Se definen los contactos entre todas las partes según corresponda.

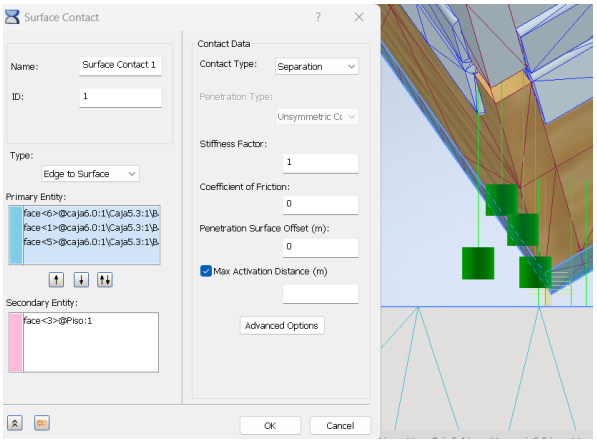


Figura 79: Ventana de contacto de superficies (1) del caso 3 en Inventor Nastran
Nota. Captura de pantalla en Autodesk Inventor Nastran

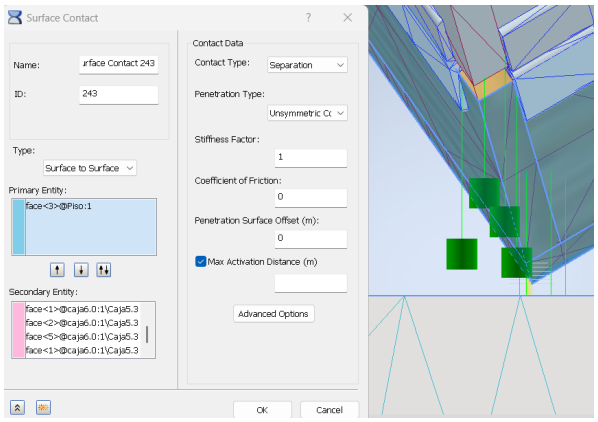


Figura 80: Ventana de contacto de superficies (243) del caso 3 en Inventor Nastran
Nota. Captura de pantalla en Autodesk Inventor Nastran

5.2.4.6. CONFIGURACIÓN DEL CASO La configuración del caso es la misma que el caso 2.

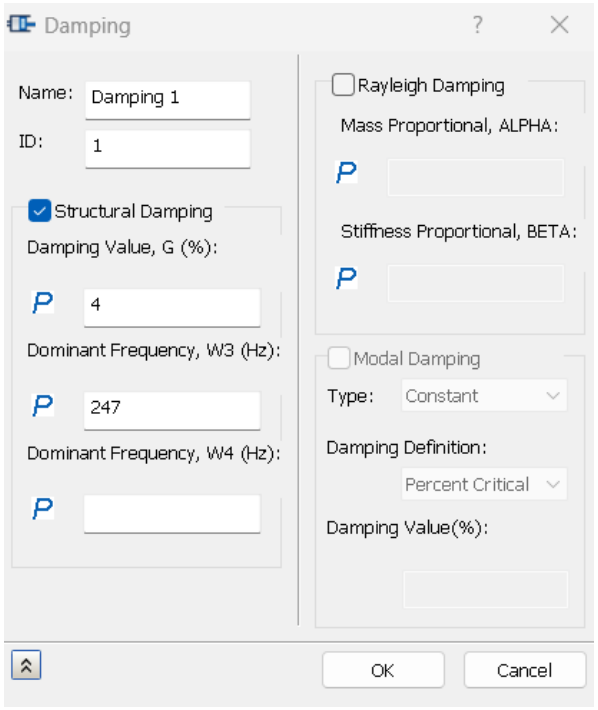


Figura 81: Ventana de damping en Inventor Nastran
Nota. Captura de pantalla en Autodesk Inventor Nastran

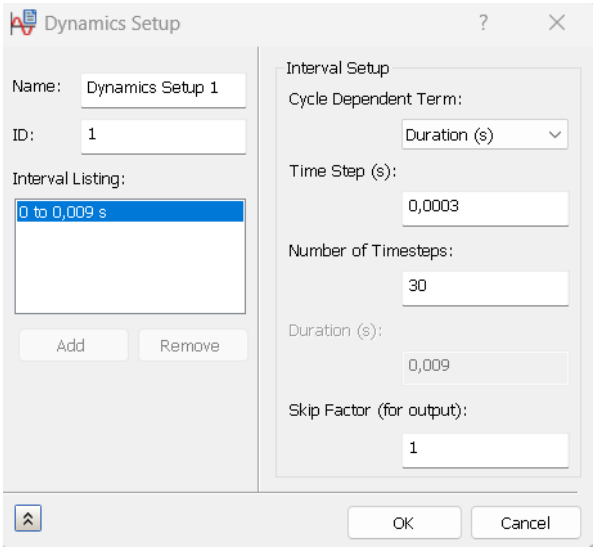


Figura 82: Ventana de configuración dinámica en Inventor Nastran
Nota. Captura de pantalla en Autodesk Inventor Nastran

5.2.4.7. MALLA E INICIO DE SIMULACIÓN Se define la malla igual a la del subcaso 1 y se inicia la simulación.

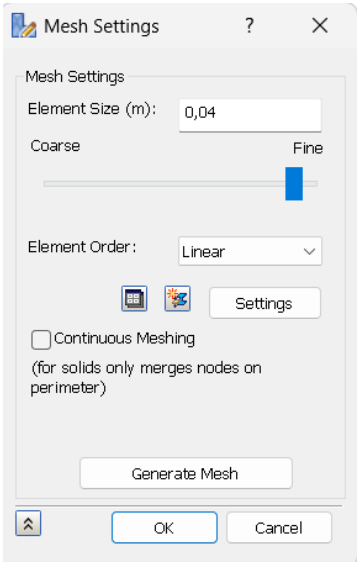


Figura 83: Ventana de configuración del mallado en Inventor Nastran
Nota. Captura de pantalla en Autodesk Inventor Nastran

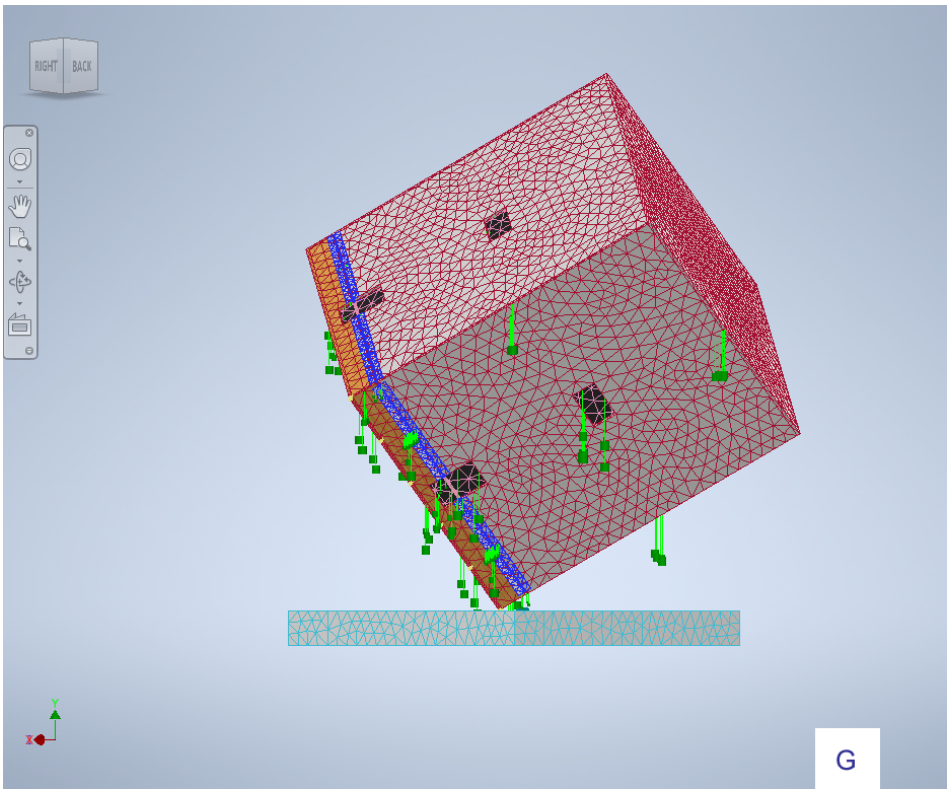


Figura 84: Mallado final caso 3 antes de iniciar la simulación en Inventor Nastran
Nota. Captura de pantalla en Autodesk Inventor Nastran

5.2.4.8. RESULTADOS Con la simulación del caso 3 se ven los siguientes resultados.

En la figura 85 se observan los valores máximo y mínimo de esfuerzo de Von Mises presentes en la caja. También se puede ver parte del movimiento que tuvo la caja desde el contorno rojo, que muestra su posición inicial, y su posición actual.

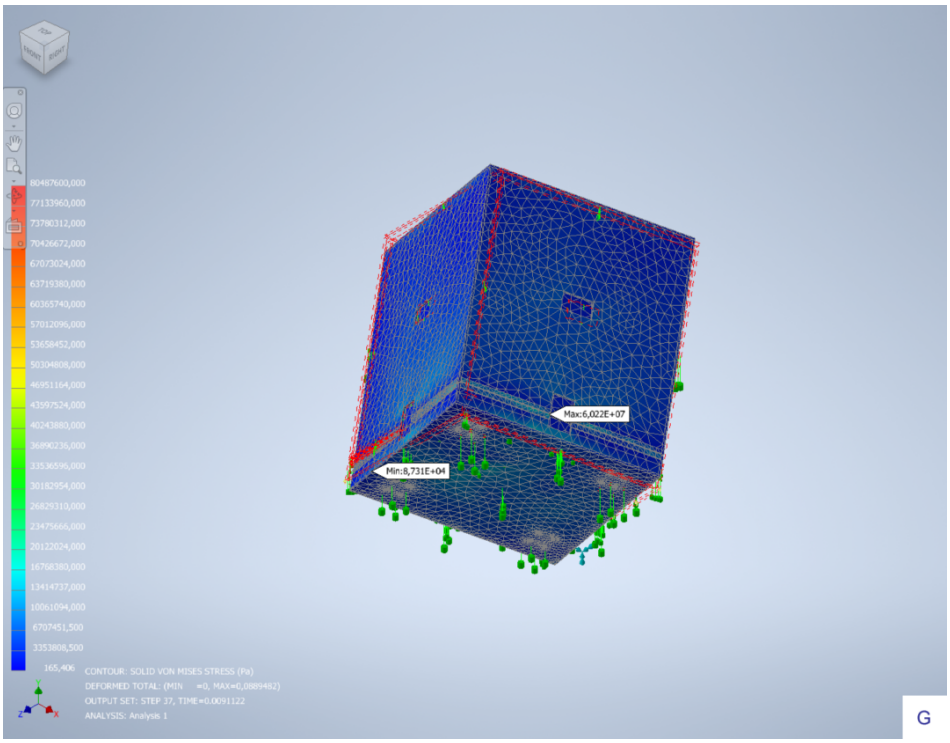


Figura 85: Esfuerzo de Von Mises caso 3
Nota. Captura de pantalla en Autodesk Inventor Nastran

En la figura 86 se muestra un esfuerzo de Von Mises cerca del punto de contacto de la caja con el suelo y en la figura 87 se muestra la base de la caja, pudiendo ver que el valor máximo del esfuerzo de Von Mises se encuentra, al igual que en el subcaso 2 del caso 1, en el perfil de aluminio híbrido.

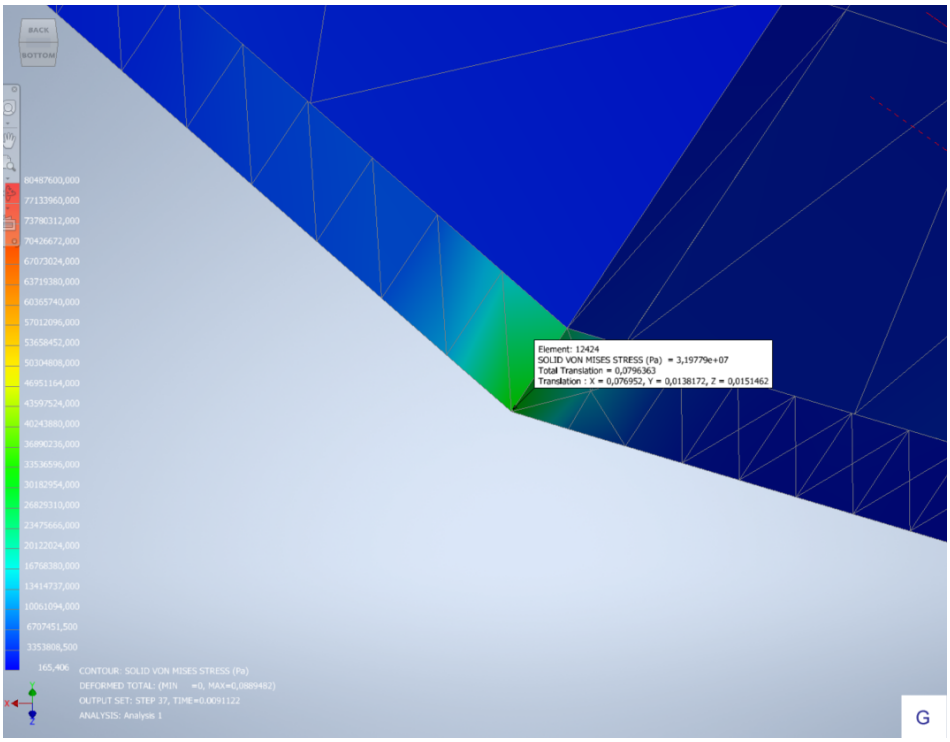


Figura 86: Esfuerzo de Von Mises cerca del punto de contacto
Nota. Captura de pantalla en Autodesk Inventor Nastran

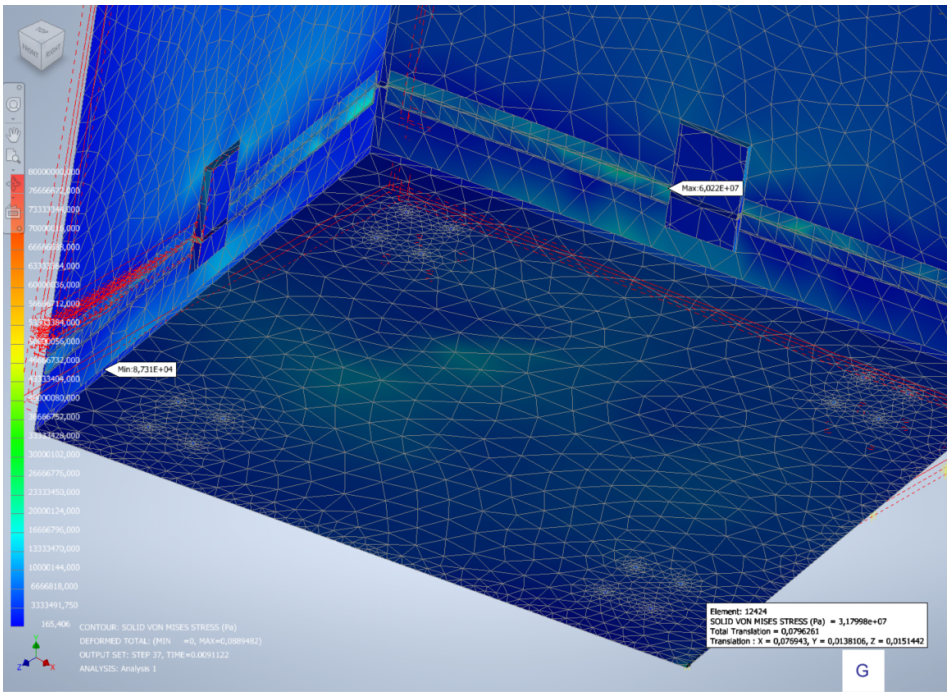


Figura 87: Esfuerzo de Von Mises vista de la base de la caja
Nota. Captura de pantalla en Autodesk Inventor Nastran

Con respecto a los factores de seguridad, en la figura 88 se ven los valores máximo y mínimo, mínimo que se encuentra en el punto de contacto con el suelo con un valor de 0,5479 (figura 89)

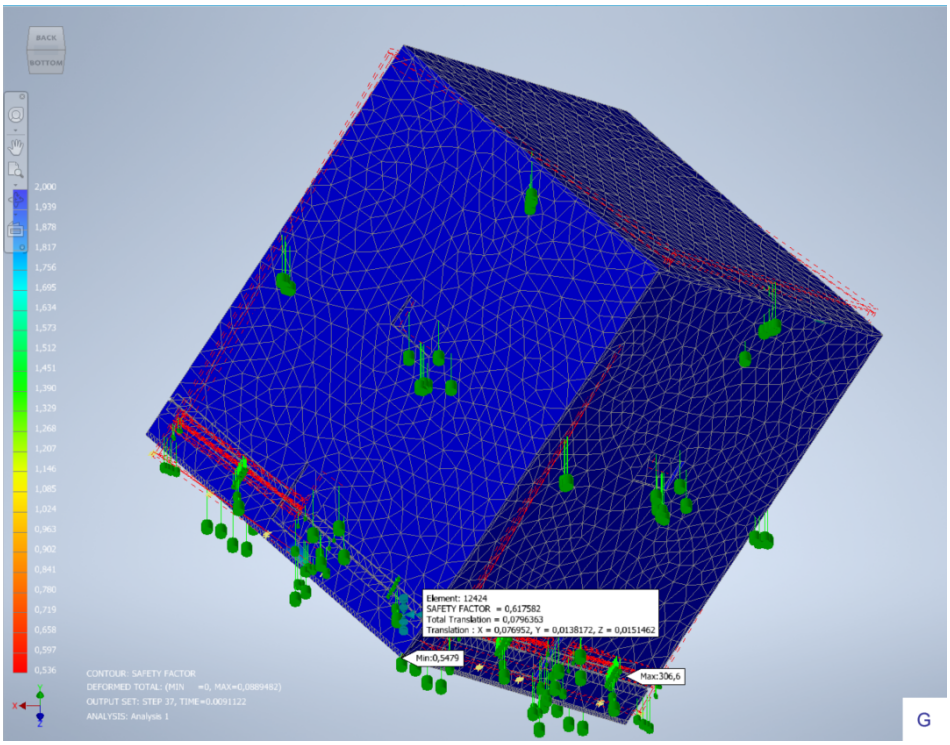


Figura 88: Factores de seguridad en la caja caso 3
Nota. Captura de pantalla en Autodesk Inventor Nastran

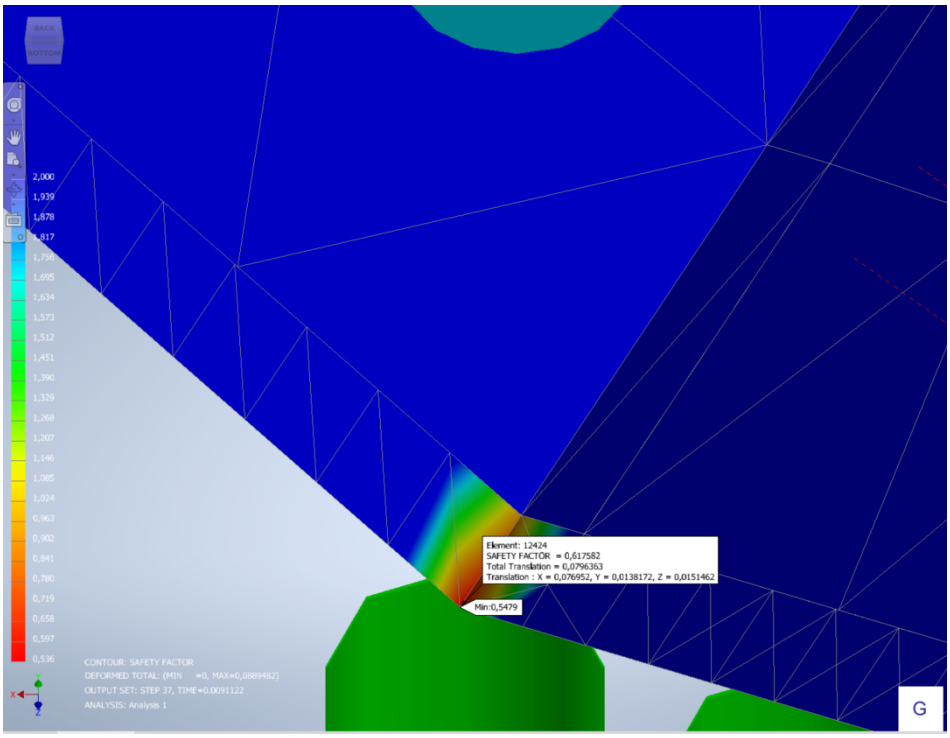


Figura 89: Factor de seguridad en el punto de contacto
Nota. Captura de pantalla en Autodesk Inventor Nastran

En la base de la caja, se puede ver una variación de los factores de seguridad (figura 90) que coincide con parte de la base del timbal.

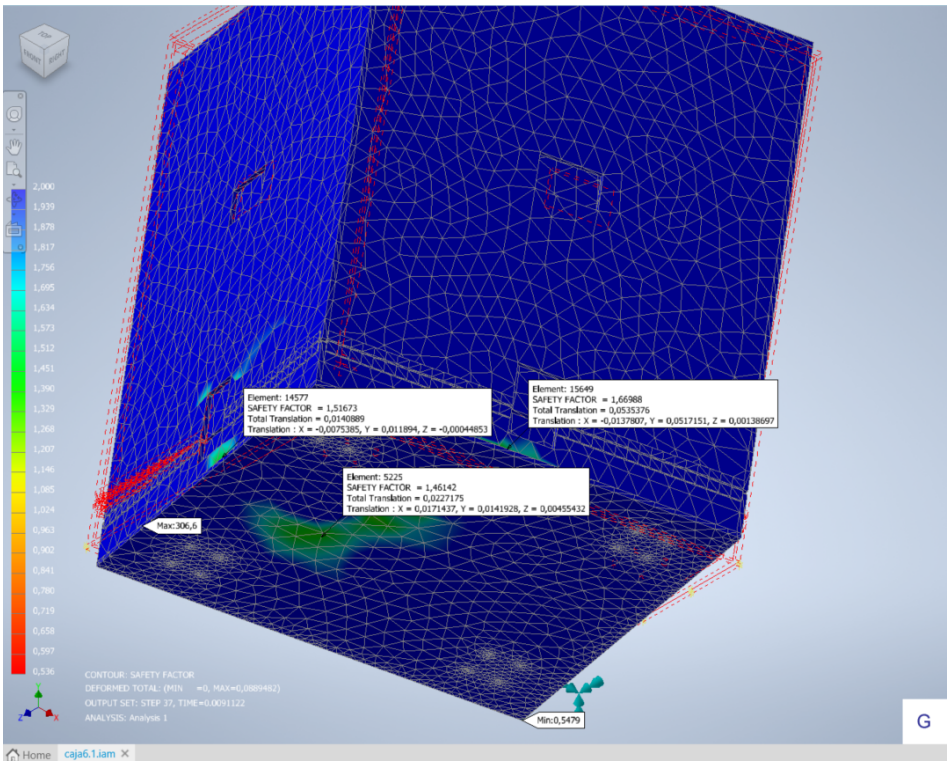


Figura 90: Factores de seguridad vista de la base de la caja
Nota. Captura de pantalla en Autodesk Inventor Nastran

En el timbal los esfuerzos máximo y mínimo de Von Mises (figura 91) coinciden con los puntos de los factores de seguridad mínimo y máximo (figura 92). En la figura 93 se puede apreciar que el factor de seguridad mínimo de 0,536 se encuentra, a diferencia de los demás casos, en la zona de la caldera que esta en contacto con la base del timbal.

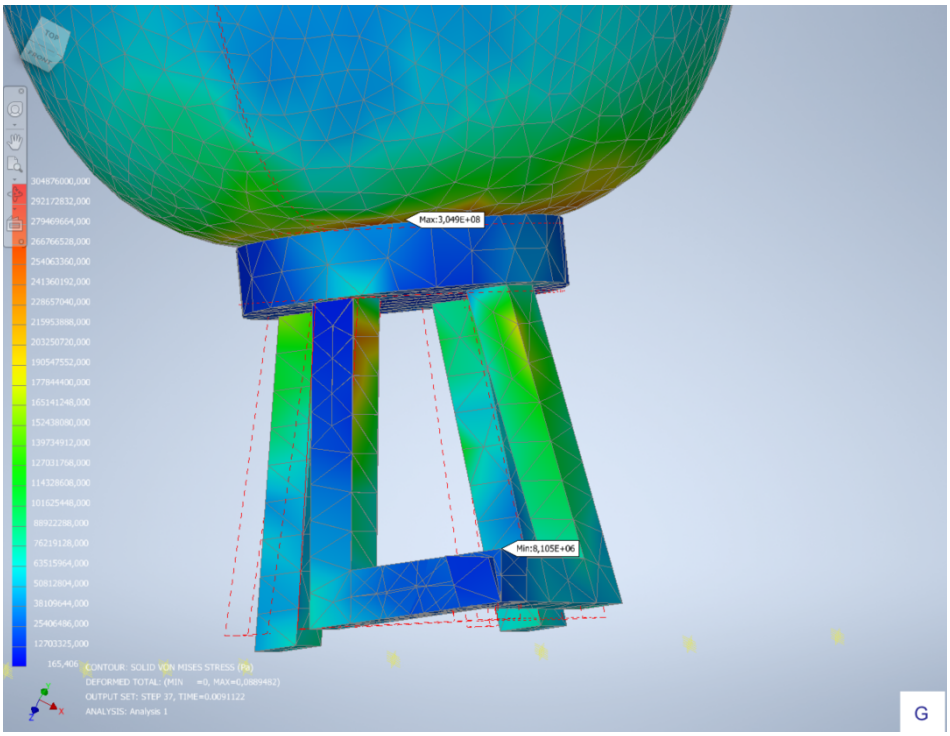


Figura 91: Esfuerzo de Von Mises timbal caso 3
Nota. Captura de pantalla en Autodesk Inventor Nastran

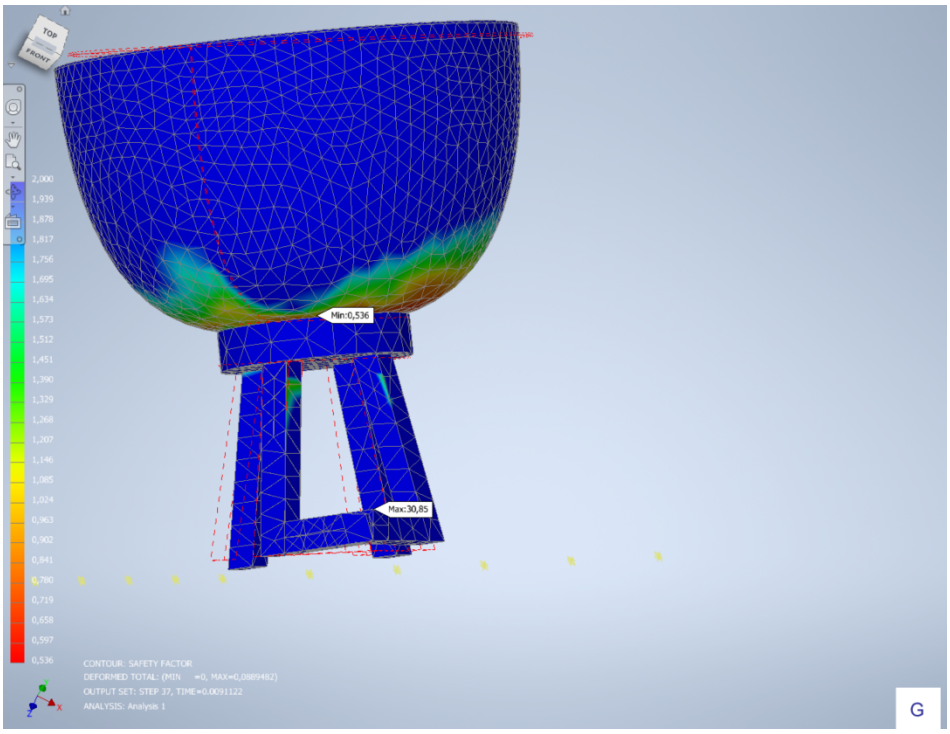


Figura 92: Factores de seguridad timbal caso 3
Nota. Captura de pantalla en Autodesk Inventor Nastran

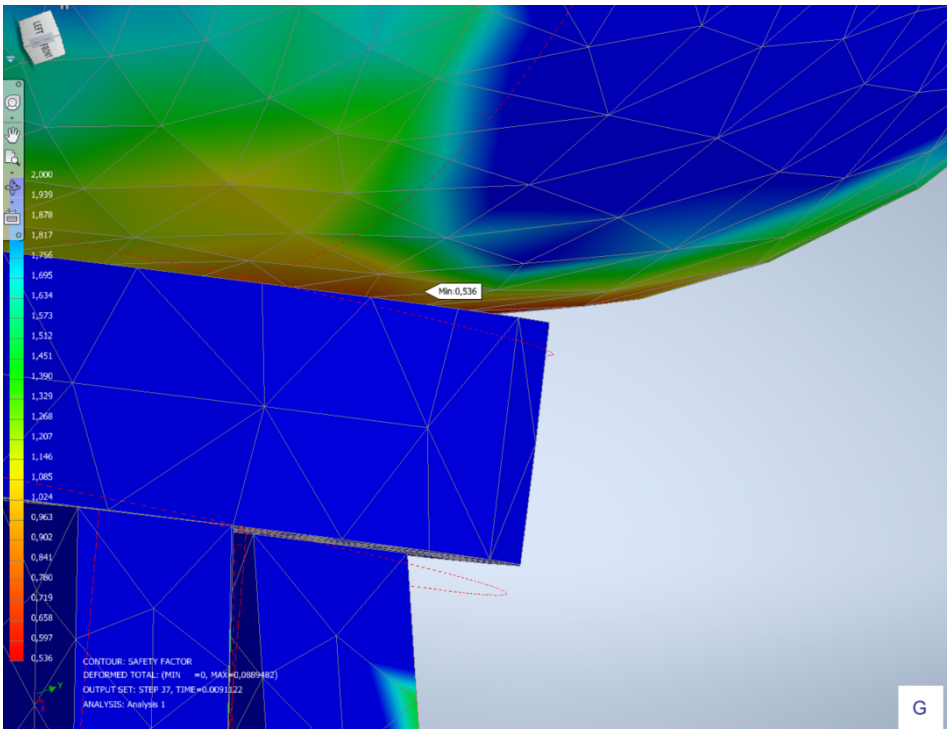


Figura 93: Factor de seguridad mínimo timbal caso 3
Nota. Captura de pantalla en Autodesk Inventor Nastran

CAPÍTULO 6
CONCLUSIONES

A partir de los resultados de la sección anterior, se puede concluir que uno de los puntos más críticos de la caja corresponde a una de las paredes de la misma, más específicamente, al borde superior de una de las paredes laterales modelada a partir de una plancha de contrachapado de 10 [mm] de espesor, cuyo esfuerzo máximo de Von Mises obtenido corresponde a 29 [MPa] y un factor de seguridad mínimo de 0,57 en el subcaso 1 del caso 1. Al observar detenidamente los resultados del modelo se puede verificar que la zona en la que se encuentran los valores mínimos de factor de seguridad (por debajo de 1) se sitúan en el borde superior de las paredes laterales, donde lo único que las une a la parte superior es la función de contacto de Nastran, por lo que al agregar el perfil de aluminio que corresponde al diseño final ayudaría a mejorar este valor.

En los casos 2 y 3 se observa otro punto crítico en la caja, la base en los puntos de contacto del timbal con la misma. En el caso 2 se observa un valor de factor de seguridad de 0,92, mientras que en el caso 3 solo se aprecia la variación de esta zona con respecto al resto de la base. Esto nos indica que podría ser necesario variar el espesor de la pared base o considerar un mayor espesor de la espuma para amortiguar de mejor manera todos los puntos en donde el timbal hace contacto con la caja.

Por otra parte, vale la pena indicar que, en todos los casos, existen secciones con mayores valores de Von Mises en la caja, pero están presentes en los perfiles de aluminio (material con un módulo de Young mayor al contrachapado), por lo que no arrojaron un valor preocupante de factor de seguridad.

Otro punto de interés se encuentra en el centro de la cara superior de la caja, el cual también podría ser parcialmente explicado por el contacto simple de las paredes entre sí. Se requiere más información para dar un veredicto más concluyente al respecto. Otras zonas preocupantes se encuentran alrededor de los orificios de las paredes laterales de la caja generados para la instalación de manillas y cierres. Estos últimos, al ser fabricados a partir de acero ayudarán al reforzamiento de esta área al tener propiedades mecánicas mejores que el contrachapado.

En el caso 3 el valor mínimo de factor de seguridad (0,55) se encuentra en el punto de contacto con el suelo, una de las esquinas inferiores. Este valor, aunque esperable, se podrá subsanar en parte al considerar que el diseño final tiene unas esquinas en forma de esfera de aluminio para proteger estos puntos críticos.

Con respecto al timbal, se observa, por los resultados del subcaso 1 del caso 1, que debería analizarse más la misma membrana y el como evitar las vibraciones que se generan por el mismo movimiento del instrumento. El factor de seguridad tiene valores menores a 1 en todo lo que sería el borde de la membrana. Esto refleja la concentración de esfuerzos de

esta zona y como las vibraciones generadas en el impacto afectan este punto tan fino del elemento simulado. Al hacer la simulación no se tomo en consideración que, generalmente, estos instrumentos cuentan con una tela que se coloca sobre la membrana para disipar parte de las vibraciones. ¿Que tanto habrían cambiado los valores en la membrana si se hubiera podido hacer el análisis con algo así?

Para el subcaso 2 del caso 1 y el caso 2, se observo que los valores mínimos de factor de seguridad se generaron en las uniones de las patas delanteras del timbal con la base redonda que conecta con el cuerpo del instrumento. Sin embargo, estos no fueron críticos.

El caso 3 muestra otro punto crítico no observado en los anteriores casos. Tuvo un factor de seguridad mínimo de 0,54 en lo que sería la base de la caldera. Esto podría deberse al movimiento mas rotativo que se generó en este caso al caer en una esquina de la caja. Es algo a tener cuenta, pero el modelo del timbal es bastante simplificado y, en general, este no sería el único punto de contacto entre base y caldera, a diferencia de lo que se tiene aquí.

Algunas consideraciones que pueden explicar los resultados.

En primer lugar, se debe tener en consideración las siguientes condiciones: La solución fue generada considerando solo un tipo de timbal (el más grande que se tuvo disponible). Estos instrumentos pueden variar en cinco tamaños distintos, por lo que en un futuro se podría evaluar la adaptación de la caja a timbales más pequeños.

Por otra parte, se bajó la complejidad del modelo para disminuir los tiempos de cálculo de la simulación. Una simulación mas fidedigna a la realidad se podría lograr al considerar y evaluar todas las piezas del diseño (incluyendo remaches, espuma y otros materiales) la cual se espera sea más estable estructuralmente. Esto también afecto al modelo del timbal.

No se pudo simular con las ruedas, que se pueden considerar puntos de concentración de esfuerzo. Aunque las ruedas, como son de goma, podrían haber amortiguado en parte el impacto.

De la simulación uno puede determinar que la caja es una solución viable, sólo se deben tomar ciertas precauciones.

Luego de investigar más sobre los timbales, se observa que no es tan relevante el evitar que toquen el suelo. Para que no se desafine es más importante asegurarse de que no reciban algún golpe, por lo cual sería mejor que una persona las moviera usando las ruedas que generalmente tienen, así se evitarían varios de los peligros.Aun así, aunque se hiciera esto, es cierto que los caminos con adoquines o cosas irregulares podrían ser más problemáticos. E incluso podrían provocar alguna caída. También está el problema de las puertas. Pasar el timbal por el marco de una puerta es una maniobra evasiva. ¿Pero con la caja? También lo sería porque es demasiado grande. El tema es que apenas puede pasar y la caja lo haría mucho más complejo para ciertas dimensiones. En ese caso, lo ideal sería tenerlos guardados en un lugar en el que se pueda salir con holgura. La mayoría de teatros y espacios en donde

se va a tocar tienen estos espacios como para entrar con la caja.

Es interesante ver que este tipo de cosas son más fáciles o difíciles de obtener dependiendo del instrumento. Pero también, dependiendo del material, la procedencia, las dimensiones, puede llegar a ser muy costoso. Llega un punto en el que lo más simple es hacerlo uno mismo. Lo más complejo es tener las herramientas necesarias, específicamente las de corte. Pero encontrar información de cómo hacerlo y el material no es muy complicado.

Siento que este trabajo es más que nada un comienzo. Sería interesante que se extrapolará a más cosas. Con más instrumentos. ¿Cuál es la mejor forma de mantener guardado un instrumento? Por ejemplo, por todo el verano en universidad. ¿Sería mejor dejar el timbal en la sala en la que están? ¿ O sería mejor que estuvieran en la caja? Se que hay condiciones ambientales ideales para los instrumentos. Se puede tener una sala acondicionada para eso pero, para instrumentos más pequeños que queden mucho tiempo guardados, ¿se podría hacer una caja que los mantenga en su mejor estado?

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

3D ContentCentral. (s. f.). 3D ContentCentral. https://www.3dcontentcentral.com

adil113. (2011, 27 julio). timpani. Flickr. https://flic.kr/p/a7wwou

Autodesk. (s. f.-a). Section 1: Introducing Autodesk Inventor Nastran. Autodesk Inventor Nastran 2024. Recuperado 19 de julio de 2025, de https://help.autodesk.com/view/NINCAD/2024/ENU/?guid=GUID-EA9566CB-2A9F-4ADE-983E-A486B44D3B2C

Autodesk. (s. f.-b). Section 2: The Basics of Finite Element Analysis (FEA). Autodesk Inventor Nastran 2024. Recuperado 2 de octubre de 2025, de https://help.autodesk.com/view/NINCAD/2024/ENU/?guid=GUID-B63CD966-5467-45A2-BACA-1408418997D0

Autodesk. (s. f.-c). Section 17: Ball Impact Exercise. Autodesk Inventor Nastran 2024. Recuperado 12 de junio de 2025, de https://help.autodesk.com/view/NINCAD/2024/ENU/?guid=GUID-4D23314C-FB81-4500-A001-A36CCB63651D

colaboradores de Wikipedia. (2025a, mayo 12). Timbal de concierto. Wikipedia, la Enciclopedia Libre. https://es.wikipedia.org/wiki/Timbal_de_concierto

colaboradores de Wikipedia. (2025b, octubre 21). Orquesta sinfónica. Wikipedia, la Enciclopedia Libre. https://es.wikipedia.org/wiki/Orquesta_sinf%C3%B3nica

DIY Road CasesTM Store - Road Case Hardware. (s. f.). https://diyroadcasesstore.com/

Gerhart, D. (2022, 4 febrero). Timpani maintenance. Yamaha Music. https://hub.yamaha.com/drums/percussion/timpani-maintenance/

Ludwig Drum Co. (s. f.). Timpani Owner's Manual [Pdf]. Ludwig Drums. Recuperado 6 de febrero de 2024, de https://www.ludwig-drums.com/application/files/3214/6712/2669/AV3LU700.pdf

Majestic. (s. f.). HARMONIC SERIES. Recuperado 2 de marzo de 2024, de https://majesticpercussion.com/us/products/timpani/harmonic-series/

Percussion Source. (s. f.). Shop Timpani Cases, Bags & Covers - Durable Protection for Drums. https://www.percussionsource.com/cases-bags-covers/timpani-cases

Saline Bands. (s. f.). CARE OF TIMPANI. Recuperado 12 de febrero de 2024, de https://sites.google.com/salineschools.org/bands/tactical-timpani-3/care-of-timpani

Wikipedia contributors. (2025, 19 agosto). Autodesk Inventor. Wikipedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Autodesk_Inventor

Wikipedia contributors. (2026, 18 enero). Road case. Wikipedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Road_case

Wollwage, T. C. (2021, 14 agosto). Anatomy of Timpani. Yamaha Music - Blog. https://hub.yamaha.com/drums/percussion/anatomy-of-timpani/

Wudyka, D. G. /. I. (2021, 29 diciembre). Caution! Are you moving your timpani correctly? Yamaha Music - Blog. https://hub.yamaha.com/music-educators/educator/caution-are-you-moving-your-timpani-correctly/