



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

CENTRO UNIVERSITARIO UAEM VALLE DE MÉXICO

**Sistema Computacional para el Diseño a la Medida de
Sillas de Ruedas de Tipo Exo-Esqueleto Mediante el
Análisis del Elemento Finito**

TESIS

Que para obtener el grado de

MAESTRO EN CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN

Presenta

ING. OSCAR GONZÁLEZ WOGUE

Tutor académico:

DR. CARLOS OMAR GONZÁLEZ MORÁN

Tutor(es) adjunto(s):

DR. ASDRÚBAL LÓPEZ CHAU

DR. JOSÉ MARTÍN FLORES ALBINO

**Atizapán de Zaragoza, Edo. de México. 16 de junio de
2021**



RESUMEN

Para este trabajo de investigación, se desarrolló un sistema computacional basado en una interfaz gráfica de usuario con Matlab, este sistema analiza geometrías sólidas de programas para Diseño Asistido por Computadora (CAD) guardados con extensión de estereolitografía (.stl). Este sistema fue diseñado y programado utilizando el programa Matlab – GUIDE; que es un entorno de programación y diseño para interfaces gráficas además de las herramientas de trabajo o toolboxes. Este sistema desarrollado tiene entradas para recibir los datos numéricos de las constantes físicas de los materiales, así como las restricciones aplicadas (cargas estáticas y contactos) al sólido, para simular y luego desplegar los resultados, como salidas: el esfuerzo de Von Mises, que es un criterio para encontrar posibles fallas. Este criterio se obtiene en base a el Método del Elemento Finito. Y las soluciones de las elongaciones axiales en la pieza. El sistema desarrollado para la evaluación de geometrías 3D fue aplicado con una técnica de elemento finito para modelos 3D, estas piezas fueron diseñadas y componen un equipo ortésico (exoesqueleto) a manera de una silla de ruedas. En este caso de estudio, la fibra de carbono se utilizó como material de construcción principal para las piezas que formaron el montaje de equipos ortopédicos para un paciente que ejerció una fuerza estática de 600 N. Este sistema ayuda a reducir el tiempo y los recursos que se utilizan en la construcción de prototipos que no son funcionales dados los materiales involucrados (madera, cartón, plástico, etc.) el Método del Elemento Finito puede mostrar fallas del sistema sin tener que desperdiciar recursos materiales destinados a la construcción de diseños, en su lugar, sólo consumirá espacio en la memoria de la computadora y gastará tiempo procesando la información. El sistema desarrollado determina las cantidades de tensión que soporta una pieza en base a las condiciones y parámetros que ingresa el usuario.

ABSTRACT

For this research work, a computer system based on a graphical user interface with Matlab was developed, this system analyzes solid geometries of Computer Aided Design (CAD) programs saved with stereolithography extension (.stl). This system was designed and programmed using the Matlab – GUIDE program, which is a programming and design environment for graphical interfaces as well as a working tools or toolboxes. This developed system has inputs to receive the numerical data of the physical constants of the materials, as well as the restrictions applied (static loads and contacts) to the solid, to simulate and then display the results, as outputs: von Mises' effort, which is a criterion for finding possible faults. This criterion is obtained based on the Finite Element Method. And the solutions of the axial elongations in the piece. The system developed for the evaluation of 3D geometries was applied with a finite element technique for 3D models, these pieces were designed and make up an orthotic equipment (exoskeleton) in the manner of a wheelchair. In this case study, carbon fiber was used as the main building material for the parts that formed the assembly of orthopedic equipment for a patient who exerted a static force of 600 N. This system helps to reduce the time and resources that are used in the construction of prototypes that are not functional given the materials involved (wood, cardboard, plastic, etc.) the Finite Element Method can show system failures without having to waste material resources intended for the construction of designs, instead, it will only consume space in the computer's memory and spend time processing the information. The developed system determines the amounts of voltage that a part supports based on the conditions and parameters that the user enters.

ÍNDICE DE CONTENIDO

1. Introducción.....	1
1.1 Descripción general del trabajo de investigación	1
1.2 Construcción de un equipo ortésico personalizado.....	2
1.3 Propósito General del Trabajo de Investigación.....	4
1.4 Planteamiento del problema.....	5
1.5 Objetivo General y Objetivos Específicos.....	6
1.6 Delimitación de la Investigación	7
1.7 Hipótesis	7
1.8 Justificación	7
1.9 Metodología.....	8
1.10 Publicaciones derivadas de las investigaciones	9
1.11 Estructura de la tesis	9
2. Marco Teórico y Estado del Arte	10
2.1 Interfaz Gráfica de Usuario.....	10
2.2 Definición de Método del Elemento Finito	10
2.3 Esfuerzo de Von Mises.....	12
2.4. Elemento Finito aplicado a la ingeniería Biomédica.....	15
2.5. Tipos de sillas de ruedas actuales	18
2.6. Patentes de sillas de ruedas contemporáneas.....	19
3. Desarrollo	22
3.1. Visión General del Sistema Computacional.....	23
3.2. Características del usuario	24
3.3. Diseño preliminar del sistema.....	25

3.4. Elaboración de diagramas de casos de uso	26
3.5. Características del usuario	26
3.6. Interfaces de Usuario	32
3.7. Interfases de hardware	35
3.8 Especificaciones de los requerimientos del sistema	36
3.8.1 Requerimientos funcionales.....	36
3.8.2 Requerimientos No Funcionales.....	36
4. Resultados.....	37
4.1 Configuración Experimental.....	38
5. Conclusiones.....	46
6. Anexos.....	B
7. Referencias	LL

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1. Caso de uso para ingeniero de aplicación.....	24
Tabla 3.2. Caso de uso para Dibujante CAD.....	224
Tabla 3.3. Caso de uso para Estudiante.....	25
Tabla 3.4. Requerimientos del sistema de cálculo de la tensión de Von Mises para estructuras 3D.	25
Tabla 3.5. Botones que conforman la GUI y su descripción.....	33
Tabla 4.1. Piezas estudiadas.	38
Tabla 4.2. Comparativa de las pruebas 1 y 2.....	45
Tabla 6.1. Comparativa entre piezas B y B.1.	I
Tabla 6.2. Comparación de Von Mises en prueba 5 y 6.....	Q
Tabla 6.3. Comparación de resultados en pruebas 7 y 8.	X
Tabla 6.4. Comparación de las 2 pruebas 9 y 10.....	EE

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Cubo elemental y sus componentes de estado general.....	12
Figura 2.2. Cubo elemental y sus componentes de estrés principales.....	13
Figura 2.3. Silla de ruedas modulares	19
Figura 3.1. Pasos para el desarrollo de una silla exo-esquelética mediante simulación de tensión de Von Mises.....	21
Figura 3.2. Diagrama del sistema.....	26
Figura 3.3. Diagrama de casos de uso.....	27
Figura 3.4. Diagrama UML de casos de uso para usuario Estudiante.....	28
Figura 3.5. Diagrama UML de casos de uso para usuario Ingeniero de Aplicación.....	29
Figura 3.6. Diagrama UML de casos de uso para usuario Dibujante CAD.....	30
Figura 3.7. Diagrama UML de Clases.....	31
Figura 3.8. Ventana principal de la Interfaz Gráfica de Usuario.....	32
Figura 3.9. Diagrama de bloques del Sistema de Análisis.....	35
Figura 4.1. Vista explosionada en 3D Experience.....	37
Figura 4.2. Prueba 1 en el software desarrollado para encontrar tensiones de Von Mises...39	
Figura 4.3. Restricciones para la prueba 1.....	40
Figura 4.4. Mallado de la prueba 1 y Resultados de las deflexiones en ‘x’, ‘y’, ‘z’.....	40
Figura 4.5. Tensiones de Von Mises de la prueba 1.....	41
Figura 4.6. Gráfica de las tensiones de Von Mises.....	41
Figura 4.7. Prueba 2 en el software desarrollado para encontrar tensiones de Von Mises...42	
Figura 4.8. Restricciones en la prueba 2.....	43
Figura 4.9. Representación en 3D en los ejes ‘x’, ‘y’ y ‘z’ y su mallado de la pieza A.....	43
Figura 4.10. Tensiones de Von Mises de la prueba 2.....	44
Figura 4.11. Gráfica de las tensiones de Von Mises.....	44

Figura 4.12. Traslape de las gráficas de las Pruebas 2 y 1.....	45
Figura 6.1. Prueba 3 en el software desarrollado para encontrar tensiones de Von Mises.....	B
Figura 6.2. Cara de sujeción de la pieza B es la parte que une la siguiente pieza en el compendio de todas las partes a evaluar.....	C
Figura 6.3. En la pieza B nótese que la cara de carga es aquella que recibe la fuerza constante	C
Figura 6.4. Representación en 3D de los ejes ‘x’, ‘y’ y ‘z’, y mallado de la Pieza B.....	D
Figura 6.5. Tensión de Von Mises de la prueba 3.....	D
Figura 6.6. Gráfica de la Tensión Von Mises.....	E
Figura 6.7. Prueba 4 en el software desarrollado para encontrar tensiones de Von Mises ...	F
Figura 6.8. En la pieza B.1 nótese que la cara de carga es aquella que recibe la fuerza constante.....	G
Figura 6.9. Cara de sujeción de la pieza B.1 es la parte que une la siguiente pieza en el compendio de todas las partes a evaluar.....	G
Figura 6.10. Representación de los ejes ‘x’, ‘y’ y ‘z’ y el mallado de la pieza B.1.....	H
Figura 6.11. Tensión de Von Mises de la prueba 4.....	H
Figura 6.12. Gráfica de la Tensión de Von Mises.....	I
Figura 6.13. Prueba 5 en el software desarrollado para encontrar tensiones de Von Mises.....	J
Figura 6.14. Cara de sujeción de la pieza C es la parte que une la siguiente pieza en el compendio de todas las partes a evaluar	K
Figura 6.15. En la pieza C nótese que la cara de carga es aquella que recibe la fuerza constante.....	K
Figura 6.16. Representación en 3D de los ejes ‘x’, ‘y’ y ‘z’ y mallada de la pieza C.....	L
Figura 6.17. Tensión de Von Mises de la prueba 5.....	L
Figura 6.18. Gráfica de la Tensión de Von Mises.....	M
Figura 6.19. Prueba 6 en el software desarrollado para encontrar tensiones de Von Mises....	N
Figura 6.20. Cara de sujeción de la pieza C.1 es la parte que une la siguiente pieza en el compendio de todas las partes a evaluar.....	O

Figura 6.21. En la pieza C.1 nótese que la cara de carga es aquella que recibe la fuerza constante.....	O
Figura 6.22. Representación de los ejes ‘x’, ‘y’ y ‘z’ y mallado de la pieza C.1.....	P
Figura 6.23. Tensión de Von Mises de la prueba 6.....	P
Figura 6.24. Gráfica de la Tensión de Von Mises.....	Q
Figura 6.25. Prueba 7 en el software desarrollado para encontrar tensiones de Von Mises....	R
Figura 6.26. Restricciones en la prueba 7.....	S
Figura 6.27. Representación en 3D de los ejes ‘x’, ‘y’ y ‘z’ y mallado de la pieza D.....	S
Figura 6.28. Tensión de Von Mises de la prueba 7.....	T
Figura 6.29. Tensión de Von Mises.....	T
Figura 6.30. Prueba 8 en el software desarrollado para encontrar tensiones de Von Mises....	U
Figura 6.31. Restricciones en la prueba 8.....	V
Figura 6.32. Representación en 3D de los ejes ‘x’, ‘y’ y ‘z’ y mallado de la pieza D.1..	V
Figura 6.33. Tensión de Von Mises de la prueba 8.....	W
Figura 6.34. Gráfica de la Tensión de Von Mises.....	W
Figura 6.35. Prueba 9 en el software desarrollado para encontrar tensiones de Von Mises....	Y
Figura 6.36. Restricciones en la prueba 9.....	Z
Figura 6.37. Representación en 3D de los ejes ‘x’, ‘y’ y ‘z’ y mallado de la Pieza E.....	Z
Figura 6.38. Tensión de Von Mises de la prueba 9.....	AA
Figura 6.39. Gráfica de las Tensiones de Von Mises.....	AA
Figura 6.40. Prueba 10 en el software desarrollado para encontrar tensiones de Von Mises.	BB
Figura 6.41. Cara de sujeción de la pieza E.1 es la parte que une la siguiente pieza en el compendio de todas las partes a evaluar.....	CC
Figura 6.42. En la pieza E.1 nótese que la cara de carga es aquella que recibe la fuerza constante.....	CC
Figura 6.43. Representación de los ejes ‘x’, ‘y’ y ‘z’ y mallado de la pieza E.1.....	DD

Figura 6.44. Tensiones de Von Mises de la prueba 10.....	DD
Figura 6.45. Gráfica de la tensión de Von Mises.....	EE
Figura 6.46. Prueba 11 en el software desarrollado para encontrar tensiones de Von Mises..	FF
Figura 6.47. Condiciones de frontera para la prueba 11.....	GG
Figura 6.48. Representación de los ejes ‘x’, ‘y’ y ‘z’ y mallado de la pieza F.....	GG
Figura 6.49. Tensiones de Von Mises de la prueba 11.....	HH
Figura 6.50. Gráfica de la Tensión de Von Mises.....	HH
Figura 6.51. Renderización del prototipo	II
Figura 6.52. Expectativa del prototipo desarrollado.....	II
Figura 6.53. Vista explosionada hecha con 3D Experience.....	JJ
Figura 6.54. Plano de la silla de ruedas con órtesis exo-esqueleto.....	KK

DEFINICIONES, ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

Módulo elástico: El Módulo elástico es la pendiente de la línea recta que se forma en la zona elástica de la curva (Terán et al., 2018).

Coefficiente de Poisson: es una constante elástica que proporciona una medida del estrechamiento de sección de un prisma de material elástico lineal e isótropo cuando se estira longitudinalmente y se adelgaza en las direcciones perpendiculares a la de estiramiento (Ortiz Berrocal, 1998).

GUI Abreviatura de: (Graphic User Interface) Interfaz Gráfica de Usuario que es un subcampo del estudio llamado interacción hombre – computadora. A su vez la interacción hombre – computadora es el estudio, planeación y diseño de como las personas y las computadoras trabajan juntos, de forma que los requerimientos de la persona se cumplan a su entera satisfacción en la forma más efectiva posible.

GUIDE Abreviatura de: (Graphic User Interface and Integrated Development Environment): MATLAB-GUIDE es una herramienta para el desarrollo de Interfaces Gráficas de usuario, ya que combina la facilidad de programar del código m y la interactividad de crear interfaces en un entorno visual mediante botones, al poder ubicarlos en la Pantalla simplemente al arrastrarlos y soltarlos. Además de acceder a todo el potencial de cálculo de Matlab y sus numerosas cajas de herramientas o toolboxes y bibliotecas (Petinrin, 2010).

CAD Abreviatura de: (Computer Aided Design) Diseño Asistido por Computadora: Entorno de modelado de diseños en 3D. Existen distintos tipos de entornos CAD, controlados por comandos con líneas de texto, o los controlados con Interfaces Gráficas para el Usuario. La Interfaz cuenta con botones, campos de texto, entradas para datos y opciones en una ventana que permiten al usuario encontrar las operaciones de dibujo 2D y operaciones de diseño en 3D.

Órtesis: El equipo ortésico es un aparato ortopédico que tiene la función principal de asistir en la recuperación de un paciente que necesita movilidad en sus articulaciones o en algún miembro del cuerpo.

MFC: Microsoft Foundation Classes o MFC es un conjunto de clases interconectadas por múltiples relaciones de herencia, que proveen un acceso más sencillo a las API de Windows (*Microsoft Foundation Clases, Windows, 2010*).

1. Introducción

El presente trabajo de tesis contiene una Interfaz Gráfica para el Usuario que incluye funciones de los programas para el Análisis del Elemento Finito de Matlab.

El sistema desarrollado carga las piezas geométricas de tres dimensiones con extensión (.stl) en donde se buscaron del archivo cargado las soluciones a los problemas estáticos estructurales. A partir del archivo se encontraron los valores de los criterios de la tensión de Von Mises y de las deflexiones multiaxiales. El sistema desarrollado mostró los resultados en forma gráfica y como datos, para poder conocer los promedios, los máximos y los mínimos en valores de las magnitudes encontradas.

Por un lado se diseñaron lienzos en 3D guardadas como archivos en formato tipo estereolitografía, los diseños son un conjunto de piezas ensamblables entre sí para formar una silla de ruedas con un equipo ortésico (estructura exoesqueleto para las piernas) en función de las medidas antropométricas y de la fuerza estática que el individuo ejercerá en las piezas. Una vez construido el ensamblaje, sus piezas individuales se cargaron al programa y se analizaron con él. Los datos obtenidos a partir de las restricciones dan como consecuencias gráficas donde se señala los puntos vulnerables. Los datos que nos proporcionan información de las tensiones de Von Mises se colectan en un archivo de Excel con extensión .xlsx para resguardar el análisis hecho para poder hacer modificaciones.

1.1 Descripción general del trabajo de investigación

Este trabajo plantea la aplicación del Método del Elemento Finito (FEM) para resolver problemas del cálculo de las tensiones estructurales (tensiones de Von Mises) y desplazamientos multiaxiales, de una silla de ruedas y un equipo de órtesis. El Método del Elemento Finito se define como el método que utiliza técnicas de simulación por computadora para resolver problemas de ingeniería, en el presente proyecto se utilizó para calcular el esfuerzo de Von Mises (Chandrupatla & Belegundu, 1999). Particularmente, el Método del Elemento Finito ha hecho posible la implementación de algoritmos computacionales para el análisis de las características de tensiones de Von Mises de un nuevo

diseño de un componente mecánico. Para ello se hizo el diseño y programación de una Interfaz Gráfica que despliega las tensiones de Von Mises en una pieza 3D. Con el análisis de la tensión de Von Mises se puede conocer las condiciones de esfuerzo combinado que se generan en el sistema, las cuales, al compararse con el Módulo de Young, permiten saber si el material estará en la región plástica o elástica (Ramírez Arias & Martínez Quintero, 2011). Esto significa que cuando el esfuerzo de Von Mises supera al Módulo de Young, se dice que se encuentra fuera de la región elástica de la gráfica, por ende, la pieza se deformó hasta perder su forma original y ahora está en la región plástica de la gráfica. El sistema desarrollado, además resuelve las cantidades de desplazamiento que están presentes en cada una de las coordenadas cartesianas de la geometría. Mediante un cuadro de texto para escribir datos se asignan las restricciones de material (Módulo de Young y Coeficiente de Poisson), de cantidad de carga (Pascales) y las condiciones de contacto o sujeción en el modelo geométrico (número de cara en la geometría). Los algoritmos usados para la creación de la Interfaz Gráfica para el Usuario, procesan las restricciones referente a la resistencia de los materiales seleccionados para construir el prototipo de la silla de ruedas con órtesis tipo exoesqueleto adaptado en las piernas del individuo. Debido a la visualización de las gráficas 3D y de los datos de las variables que soluciona el sistema computacional, son presentados en ventanas con la Interfaz Gráfica para el Usuario, y el usuario puede guardarlos en la computadora, posteriormente, es posible graficar los datos obtenidos en aplicaciones de procesamiento de datos (Excel, Minitab, SPSS, R Studio, STATA, SAS, E Views) y ejecutar un análisis estadístico de la información.

1.2 Construcción de un equipo ortésico personalizado

Los diseños comúnmente son realizados mediante la idea de ahorrar espacio para que las sillas se puedan transportar. Como diseñadores de productos, equipos ortopédicos y ortésicos, los diseños requieren de medidas antropométricas y tienden a diseñar un solo equipo para adaptarlo a un gran número de personas. En este caso se desarrolló un sistema informático que sirve de ayuda al diseñador para que pueda ajustar las piezas de una silla de ruedas a la funcionalidad y operabilidad. En el diseño de equipos ortopédicos se requiere del uso de los sistemas informáticos para facilitar la toma de decisiones. Las etapas del desarrollo de un nuevo producto se realizan con el auxilio de sistemas computarizados. Para desarrollar un

producto de diseño 3D, existen nuevos software de manufactura e ingeniería asistidos por computadora, se puede diseñar un producto en menos tiempo y con menos esfuerzo. La computadora puede simular el comportamiento de una pieza para que funcione como si estuviera en su campo de aplicación, es decir, que la computadora puede imitar las condiciones en que se desarrolla un problema de resistencia a la elongación y a la tensión. Aumentando la rapidez en el progreso con el que se desarrolla un producto, y disminuyendo los costos, destinados a la construcción de prototipos para pruebas de resistencia en laboratorios de materiales.

Para el diseño de las sillas de ruedas se encontró que los ingenieros comúnmente recurren a técnicas de diseño asistido por computadora, en el cual se consideran ciertos conceptos de ingeniería estructural, por ejemplo: se analiza el centro de masa, ya que es un criterio determinante en el diseño, ya que de él depende la estabilidad estática de la silla (Kirby et al., 1996). Por otro lado, durante la búsqueda de información sobre las variables físicas y constantes físicas que son comunes en los estudios estructurales estáticos, las variables más comunes son las tensiones producidas por las cargas y medidas en Pascales, deformaciones y deflexiones medidas en milímetros. Las constantes son las restricciones que definen el modelo del Elemento Finito, por ejemplo: el Módulo de Young dado en Pascales y el coeficiente de Poisson es adimensional. Las condiciones de frontera o límites son definidas por el usuario en la GUI mediante la asignación del número correspondiente con la cara geométrica que el sistema imprime sobre cada una de las caras de la geometría.

Conjuntados los conceptos presentados anteriormente se realizó una interpretación precisa de los resultados, por ejemplo las cantidades de elongación en el eje x , y y/o z , o las tensiones de Von Mises nodales, le brindó la confiabilidad que requiere porque fue capaz de integrar sus diseños de las piezas en un ensamblaje que pudo resistir las tensiones que ejercerá el paciente sobre todas las áreas de las piezas que son susceptibles a una elongación. Además, se tuvo la información que hace posible evitar esas deformaciones con el refuerzo en las áreas más frágiles. Desarrollo de una aplicación para evaluar la calidad de la seguridad estructural del diseño, y así lograr diseñar un producto funcional porque todas sus geometrías, es decir, sus volúmenes, áreas y superficies se probaron y los resultados encontraron que todas las piezas estuvieron dentro de la región elástica del material. Al comparar el Módulo de Young

con el Módulo esfuerzo de Von Mises se demostró que en ninguna de las evaluaciones resultó que el Módulo esfuerzo de Von Mises sobrepasa al Módulo de Young. Esto significa que cuando el esfuerzo de Von Mises supera al módulo de Young, se dice que el material salió de la región de deformación reversible, es decir, que el material se deformó hasta perder su forma original y entró en la región de deformación permanente de la gráfica. El usuario cuenta con las guías de selección del material adecuado y los planos esquemáticos de las estructuras (reforzadas) que tomaron en cuenta tanto el requerimiento de generar un diseño ergonómico, como el requerimiento para cumplir con el factor de seguridad estructural. Al finalizar las pruebas, los resultados de los criterios de esfuerzo de Von Mises y de las elongaciones axiales mostraron en sus cifras rangos que se encuentran dentro de los factores de seguridad estructural.

1.3 Propósito General del Trabajo de Investigación

Actualmente, los programas de simulación por computadora son utilizados con versiones de prueba que funcionan durante 30 o 60 días, como versiones gratuitas para estudiantes y las versiones completas son a menudo inaccesibles para estudiantes o investigadores, dado su costo.

Este sistema desarrollado resuelve el cálculo de la tensión de Von Mises para figuras tridimensionales adquiridas desde un archivo con extensión (‘.stl’).

Al tener el sistema informático dispuesto con todos los requerimientos de una aplicación intuitiva, y que resuelve los problemas planteados (cálculos de los esfuerzos de Von Mises y de las elongaciones), se procedió a hacer una prueba con una estructura sólida tridimensional, definida por el usuario (González Woge et al., 2020), la cual se diseña con software CAD (SolidWorks y CATiA V5-V6 de la Plataforma 3D Experience), donde se efectuó una prueba del sistema, al hacer comparativas de desempeño entre herramientas para análisis estructurales de otros desarrolladores, donde se evaluó, el tiempo de ejecución.

Selección de la herramienta para programación, Matlab (González Woge et al., 2020) y GUIDE. La herramienta para el desarrollo de la GUI es GUIDE de Matlab de Mathworks. “GUIDE es un entorno de programación visual disponible en Matlab para realizar y ejecutar

programas. Tiene las características básicas de todos los programas visuales como es el caso de Visual Basic o Visual C++ donde estos programas no son software libre o open source.” (Barragán, G., D. O., 2008).

El modelado de los diseños fue hecho con el software SolidWorks y CATiA V5-V6 de la Plataforma 3D Experience de Dassault Systèmes, siendo entornos de diseño 3D, donde se efectuó el modelado, dibujo técnico y diseño de las piezas geométricas que forman el equipo.

1.4 Planteamiento del problema

En el diseño de nuevos productos físicos generalmente se requiere del desarrollo de componentes ensamblables, mismos que pueden ser simulados antes de su fabricación. Esta simulación permite ahorrar tiempo y recursos. Para el caso del diseño de las sillas de ruedas personalizadas, con el fin de garantizar que cada silla cumpla con los factores de seguridad estructural son necesarios los programas diseñados para realizar el análisis de las geometrías, mediante el Método del Elemento Finito, dichos programas cuentan con una serie de procesos que dividen la geometría importada en elementos finitos (poliedros) que se resuelven de forma iterativa en la computadora, para encontrar los giros, deflexiones y esfuerzos que afectan cada uno de esos elementos finitos de un sólido 3D.

Aunque existen actualmente programas de diseño como AutoCAD y SolidWorks, al ser ellos de propósito general, requieren que el diseñador realice el modelado de cada parte del producto desde cero, además se necesita un análisis de resistencia de materiales para determinar las medidas correctas de alguna pieza. El diseñador debe de saber interpretar los resultados y ajustar nuevamente las medidas si fuese necesario. Este proceso es necesario repetirlo en cada una de las piezas de dimensiones personalizadas.

Al evaluar las características a profundidad se encontró con una solución con procedimientos similares al del enfoque presentado aquí (Petinrin, 2010), con una interfaz gráfica que muestra las opciones de definir las restricciones, constantes físicas, etcétera. En la mayoría de los programas se definen mediante líneas de comando. El trabajo consistió en poder ingresar la información de forma intuitiva al programa, mediante una ventana que muestra la información de la pieza y con entradas para texto.

El considerar que los usuarios del equipo aplicarán fuerza sobre las piezas, que en consecuencia ejercerán presión sobre las piezas del equipo.

1.5 Objetivo General y Objetivos Específicos

En la siguiente sección se enlistan los objetivos principales de la Tesis.

Objetivo general:

Desarrollar un sistema para el cálculo de las dimensiones de sillas de ruedas de tipo exoesqueleto personalizadas mediante la simulación de los esfuerzos estructurales de Von Mises y las deflexiones en los ejes cartesianos.

Objetivos específicos:

1. Diseñar la estructura general de una silla de ruedas novedosa tipo exoesqueleto.
2. Desarrollar un sistema que calcula las dimensiones de las piezas mecánicas, considerando las restricciones de función, operación y el tipo de material usado.
3. Identificar las partes mecánicas de la silla de ruedas que fueron adaptadas de acuerdo con la ergonomía.
4. Simular de las partes mecánicas del equipo órtesis para calcular sus dimensiones correctas que permitan resistir el esfuerzo máximo considerando las funciones y condiciones de operación.
5. Realizar las pruebas de funcionamiento y resistividad de esfuerzos mecánicos de las piezas de una silla de ruedas en el programa desarrollado.
6. Construir un modelo a escala del prototipo.

1.6 Delimitación de la Investigación

El estudio del presente proyecto implementa las herramientas para el análisis de la resistencia al esfuerzo de materiales utilizando Matlab, así como el complemento GUIDE. El sistema permite al usuario ingresar la información del modelo sólido de una pieza en formato (.stl). El sistema propuesto no es para diseñar geometrías de sólidos. Para el rediseño es necesario el disponer de un programa CAD.

En la ventana del sistema permite orientar, aplicar fuerzas, cargas, para que el usuario establezca el comportamiento estático de la pieza. Además, de definir ciertos parámetros para realizar los cálculos de constantes físicas como: módulo de Young y coeficiente de Poisson además de las restricciones, carga, sujeción.

1.7 Hipótesis

Un programa para el cálculo de estudios estáticos de estructuras proveerá a los usuarios con una herramienta personalizada que sirva como guía al rediseñar las piezas más frágiles que sirve para mostrarles la cantidad de resistencia al esfuerzo mecánico, a la vez, informarles sobre las cantidades desplazadas, en términos de longitudes, que expanden o comprimen la pieza en sus coordenadas cartesianas.

1.8 Justificación

Diseño del sistema computacional, para poder realizar pruebas detalladas del diseño de piezas para una silla de ruedas del tipo exoesqueleto, mediante el Análisis del Elemento Finito, en específico realizar un Análisis Estructural Estático, probar con configuraciones, materiales y modificaciones estructurales.

- Es un proyecto que traerá beneficios a personas con movilidad limitada.
- Resolverá algunas interrogantes, como la posibilidad de construir sillas económicas con calidad para las personas permitiendo evaluar cualquiera de los materiales disponibles.
- También resolverá interrogantes acerca de si los materiales son adecuados para las funciones que se pretende dar al equipo.

1.9 Metodología

La metodología sobre la que se basa el trabajo es la ingeniería de software orientada a la reutilización (Sommerville, I., 2011).

Dividida en una serie de 4 etapas:

1. Análisis de componentes: Implementación de programas de Matlab para la lectura de datos en Interfases gráficas para el usuario, así como la lectura e interpretación de geometrías 3D denominados archivos tipo estereolitografía, para la construcción del programa. Desarrollo del módulo para el Análisis del Elemento Finito.
2. Modificación de requerimientos: Análisis de los requerimientos existentes usando información de los componentes descubiertos en el paso anterior, modificar los componentes para que reflejen los componentes disponibles de no ser posible modificarlos, se debe regresar al análisis de componentes.
3. Diseño del sistema informático con reutilización:
 - Diseñar el marco conceptual y rediseñar para la adecuación necesaria.
4. Desarrollo e integración:
 - Momento de diseñar el/los programas que no son reutilizables o que no han podido procurarse de manera externa e integración de los componentes.

En base a las etapas mencionadas se reutilizó el programa de cálculo con Elemento Finito de Matlab probado en la comparación de herramientas (González Woge et al., 2020) para reutilizarlo en una Interfaz Gráfica para el Usuario.

MATLAB (Matrix Laboratory) es un sistema de cálculo numérico que ofrece un entorno de desarrollo integrado con un lenguaje de programación propio (Petinrin, 2010). Y ocupando una de sus múltiples características para esta tesis de maestría se usa el entorno GUIDE de Matlab se diseñaron y programaron las entradas (botones y cuadros para entradas de texto) para los archivos '.stl', las entradas para las restricciones de los materiales (constantes) y las entradas de las condiciones de frontera (número de cara), y las salidas (figuras en ventanas y datos en hojas de cálculo) resultantes de los módulos de cálculo para tensiones de Von Mises (gráficas 3D y datos) y cantidad de elongaciones (gráficas 3D y datos). Cabe aclarar que se hizo una profunda investigación en cuanto a la elección del software, se diseñó en programas

CAD cada una de las partes, se prototipó y manufacturó en Impresión 3D a escala cada pieza. Se ensambló cada pieza del exoesqueleto impresa en un modelo (dummy) de figura humana. Las pruebas analizadas en el sistema se efectuaron para medir tanto la tensión de las piezas y también su refuerzo de la pieza.

Después de haber diseñado y programado las salidas con los elementos que requiere el usuario para hacer que el programa de Análisis con Elemento Finito de Matlab encuentre las soluciones y que el sistema muestre las cantidades de resistencia a la tensión (variable Von Mises) y las cantidades de elongación multiaxial (variable longitud) en los sólidos.

1.10 Publicaciones derivadas de las investigaciones

- González Woge, O., González Morán, C. O., & López Chau, A. (2020). Introducción al método del elemento finito : Solidworks y Matlab. *Revista Ideas En Ciencias de La Ingeniería*, *1*(1), 27–48. <https://hemeroteca.uaemex.mx/index.php/ideasingeneria/article/view/14589>
- González Woge, O., González Morán, C. O., Gaviño Ortiz, G., & López Chau, A. (2021). Análisis de tensión y desarrollo de una GUI en Matlab aplicada a una estructura de exoesqueleto mediante el criterio Von Mises. *Revista Investigación Operacional*, (2021) 42.

1.11 Estructura de la tesis

En el capítulo 2: En el marco teórico y los antecedentes del trabajo de investigación, se hace una revisión bibliográfica para desarrollar los conceptos que se aplicaron en el trabajo de investigación. En el capítulo 3, se desarrolló el sistema donde se enlistan las etapas. En el capítulo 4, se describen los resultados encontrados por el sistema computacional. Finalmente, en el capítulo 5, se hacen las conclusiones del trabajo.

2. Marco Teórico y Estado del Arte

El sistema está constituido por entradas de datos, interpretación de geometrías sólidas en 3D, asignación de restricciones, resolución de cálculos y despliegue de información (solicitud de salidas). La ventana principal del sistema para el usuario se diseñó con Matlab – GUIDE, y el trabajo continuó con el desarrollo de un enlace (explorador de archivos ‘stl’) que permita al usuario la carga de archivos de software CAD y los reciba. Posteriormente, se diseñó una serie de entradas para las restricciones, ya sean constantes físicas como: el módulo elástico y el coeficiente de Poisson, además de las entradas para los números de las caras geométricas que definen las cargas y las sujeciones o contactos.

2.1 Interfaz Gráfica de Usuario

Definición de Interfaz: “Especificación de los atributos y las operaciones asociados con un componente de software. La interfaz se usa como medio para acceder a la funcionalidad del componente” (Sommerville, I., 2011). Las GUI emplean ventanas para ordenar archivos y aplicaciones representadas por iconos y menús que muestran una lista de indicaciones. El usuario manipula de manera directa dichos objetos visuales en el monitor señalándolos y arrastrándolos o moviéndolos con un ratón. Con la interfaz la computadora traduce los datos y los convierte en la imagen. La interfaz da mecanismos estándar de control como ventanas y cuadros de diálogo. Las aplicaciones escritas para una interfaz gráfica de usuario son independientes de los dispositivos: mientras la interfaz cambia para permitir la utilización de nuevos dispositivos de entrada y salida, como un monitor de pantalla grande o un dispositivo de almacenamiento.

2.2 Definición de Método del Elemento Finito

En términos matemáticos, Estudio del Elemento Finito, es una técnica numérica para solucionar problemas de campo descritos por un grupo de ecuaciones diferenciales parciales.

El proceso del Estudio del Elemento Finito es usualmente iterativo en naturaleza, esto quiere decir que algunas de las operaciones o métodos son repetitivas debido a que los resultados conseguidos en una fase se aplican en la siguiente fase. Y de esta forma sucesivamente para

obtener el funcionamiento óptimo en un precio bajo para que el sistema se construya (Liu & Quek, 2003).

El método se inicia con el siguiente procedimiento (proceso previo):

Construir el modelo matemático. El punto de partida para cualquier análisis es el modelo geométrico. En este caso, se trata de un modelo de una pieza. El análisis de simulación comienza con la geometría representada por un modelo de una pieza o conjunto. A este modelo, se le deben asignar propiedades de los materiales, definir cargas y se le aplican restricciones. Esta geometría debe ser mallada en una forma correcta y razonablemente pequeña, un mallado finito de elementos.

Definimos propiedades de los materiales, cargas, apoyos y restricciones.

Este procedimiento completa la creación de un modelo matemático. Nota: El procedimiento de crear un modelo matemático no es Análisis del Elemento Finito (fin del proceso previo).

Etapas del Método del Elemento Finito para el caso de estudio del sistema computacional:

- Construcción del Modelo Matemático. Material propiedades, cargas y restricciones se definen y el modelo se divide en elementos finitos.
- Solución Informática (los resultados deseados).
- Postproceso (Analizar los resultados).
- Procesamiento previo. El modelo matemático puede ahora ser dividido en elementos finitos mediante el proceso de discretización, mejor conocido como mallado. La discretización se manifiesta visualmente a sí misma como la malla de la geometría. Sin embargo, las cargas, y las sujeciones se discretizan también y, después de que el modelo es mallado, las cargas y las sujeciones malladas son aplicadas a los nodos en la malla de elemento finito.
- Solución numérica. Después de haber creado el modelo del elemento finito, usamos el sistema de cálculo de la solución numérica, que produce los datos de interés. Analizar los resultados.
- Postproceso. El análisis de los resultados es frecuentemente el paso más difícil de todos. Los análisis proveen datos muy detallados, que en pueden ser representados

en cualquier formato. La correcta interpretación de los resultados requiere que se consideren las suposiciones, simplificaciones, y errores que se introdujeron en los primeros tres pasos: construir el modelo matemático, construir el modelo del elemento finito y resolver el modelo del elemento finito (Solidworks Corp., 2017).

2.3 Esfuerzo de Von Mises

La variable denominada; esfuerzo de Von Mises viene del estudio del Elemento Finito y se conoce como una magnitud física que tiene unidades de N/m^2 o Pa (Chandrupatla & Belegundu, 1999). La constante física denominada módulo elástico es una constante física de los materiales y se utiliza para el cálculo del esfuerzo de Von Mises, cuando el valor resultante del esfuerzo de Von Mises, en un elemento finito específico, si éste, supera la constante del módulo elástico, se dice que ese elemento finito fallará (Tamburrino, 1987).

El esfuerzo de Von Mises es además conocido como tensión Huber, se mide en Pascales, es una medida de la tensión que se representa en los 6 elementos de un estado general en 3D, ver Figura 2.1.

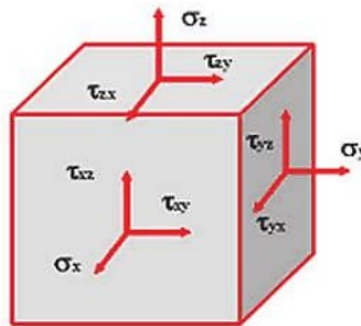


Figura 2.1. Cubo elemental y sus componentes de estado general: τ_{xy} , τ_{yx} , τ_{yz} , τ_{zy} , τ_{xz} , τ_{zx} : principales tensiones de cizalla, σ_x , σ_y , σ_z : tensiones habituales.

Dos elementos de esfuerzo cortante y un factor de la tensión habitual a cada lado de un hexaedro regular elemental. Debido al requisito de equilibrio, el estado de tensión general en 3D se caracteriza por sólo 6 elementos de tensión por el equilibrio, Ec. 1:

$$= \quad , \quad = \quad , \quad = \quad \text{Ec. 1}$$

Donde:

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$: principales tensiones de cizalla (cizalla es una herramienta para corte, se refiere a la dirección del corte y es tangencial a la dirección sigma).

La tensión de Von Mises es representada por la Ec. 2 y puede ser expresada por los componentes definidos por el siguiente sistema de coordenadas global como:

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{1}{2} \left[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_x - \sigma_z)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) \right]} \quad \text{Ec. 2}$$

Donde:

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$: tensiones habituales.

$\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$: tensiones de cizalla.

Tensiones Principales: σ_1, σ_2 y σ_3

El estado de tensión también puede ser descrito por tres componentes principales de tensión: $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$, del cubo elemental de tensión, ver Figura 2.2.

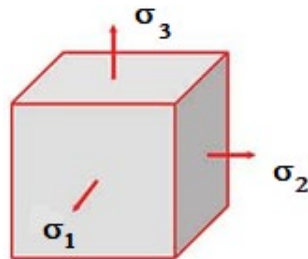


Figura 2.2. Cubo elemental y sus componentes de tensión principales (Solidworks Corp., 2017).

Cuyas direcciones son normales para las caras de un esfuerzo de Von Mises. Aquí es la Ec. 2, donde se aplica únicamente las tensiones habituales, sin aplicar las tensiones de cizalla o tangenciales y son expresadas como la expresión matemática resultante de las tensiones del sistema :

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{1}{2} \left[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_x - \sigma_z)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 \right]} \quad \text{Ec. 3}$$

Donde:

1, 2, 3: principales componentes de tensión.

Relación del esfuerzo de Von Mises con el caso de estudio.

Para calcular el elemento de estabilidad estructural en un sólido, el esfuerzo de Von Mises se define como una magnitud escalar no-negativa. El esfuerzo de Von Mises es usualmente utilizado como medida para comprobar el desempeño estructural, ya que la estabilidad estructural de varios materiales de ingeniería muestra características del tipo elastoplástico, como el acero, es bien descrito por el esfuerzo de Von Mises.

Para los materiales, el componente de rendimiento de estabilidad o el componente final de estabilidad puede calcularse dividiendo la tensión de producción (también denominado rendimiento de fuerza) o la tensión final (también denominado fuerza) o la última tensión (también llamada fuerza máxima) del material por la tensión de Von Mises.

Tensión σ_1 es resistencia a la tracción busca cual es el punto de rotura de material, mientras σ_3 busca la tensión de compresión de una estructura (Solidworks Corp., 2017).

La tensión de Von Mises se utiliza como criterio para determinar la aparición de fallos en materiales dúctiles. El criterio de fallo indica que el esfuerzo de Von Mises debe ser menor que el esfuerzo de fluencia del material (Chandrupatla & Belegundu, 1999). En la forma de desigualdad, el criterio puede ser puesto como:

Ec. 4

Donde:

= tensión de Von Mises

= tensión de fluencia

2.4. Elemento Finito aplicado a la ingeniería Biomédica

En esta sección se muestran los casos de estudio que se consultaron y se hace referencia a la bibliografía que se utilizó como fundamentación para desarrollar el trabajo de investigación.

En el campo de la simulación de Elementos Finitos para equipos ortopédicos y de ayuda a los minusválidos se hace referencia al artículo de: (Ramírez Arias & Martínez Quintero, 2011), en el artículo se explica la metodología que han seguido los autores para crear un dispositivo que permita automatizar una silla de ruedas para pacientes cuadripléjicos. Se muestra el análisis mediante Elementos Finitos que realizaron los autores de las cargas y de los esfuerzos que el dispositivo soporta. Se exponen los resultados del modelo desarrollado usando el lenguaje VRML en Matlab mediante la herramienta V-Realm Builder. Se muestra también el estudio del centro de masa ya que es un criterio relevante en el diseño del que depende la estabilidad estática de la silla. De igual manera, se detalla cómo los pernos soportan el motor y se explica cómo el lenguaje de programación utilizado permitió graficar el modelo. Los modelos de las piezas mecánicas para mover el equipo deben garantizar que no se modifiquen las consideraciones estructurales antropométricas de la silla original, asegurando una posición estable para el usuario. La silla de ruedas seleccionada por los autores del artículo en cuestión fue modelada usando la herramienta de diseño V-Realm Builder incluida en Matlab, para disponer de un modelo digital que permite versatilidad para comprobar las modificaciones que se aplicarán antes de implementarlas físicamente. Así se facilita la aproximación al modelo matemático que se plantea. Al agregar este dispositivo, implícitamente se añaden cargas estáticas masa (kg). Con el objetivo de no alterar el equilibrio, se seleccionó la parte posterior de la silla como la mejor posición. Para verificar este parámetro de nuevo se analiza el centro de masa, ahora considerando el dispositivo adaptable. Para determinar los esfuerzos y las deformaciones a las que estará sometida la estructura, se desarrolló el análisis por Elementos Finitos que permite determinar si la estructura estaría en función de soportar las cargas que se ejercen sobre el dispositivo diseñado. Matlab ofrece herramientas gráficas de modelado y simulación de ambientes virtuales, una de las cuales es V-Realm-Builder, en donde se construyó el modelo tridimensional de la silla, utilizando el lenguaje VRML. En el modelo se adaptó el dispositivo previo a su implementación real, permitiendo optimizar el diseño y creando una interfaz

directa con Simulink. Los resultados del análisis mediante Elementos Finitos de las cargas y esfuerzos que soportará el dispositivo evidenciaron que aguantará de manera adecuada las condiciones de operación planteadas. El modelo tridimensional obtenido ofrece una herramienta poderosa e importante ya que permite simular el resultado de aplicar estrategias de control a ambientes virtuales, logrando conocer una previa implementación al resultado e incrementando considerablemente la efectividad en el diseño a utilizar.

En el siguiente artículo, se asemeja en gran medida a los objetivos y la metodología empleada en el trabajo aquí presentado, (Petinrin, 2010). En el artículo se describe el desarrollo de una aplicación con Matlab, haciendo uso de la versatilidad y facilidad de programar con Matlab, la interfaz gráfica para el usuario se asemeja en gran medida a la que se desarrollará en el trabajo aquí presentado, donde se muestra una aplicación que resuelve problemas de análisis por Elementos Finitos para vigas cargadas estáticamente, diseñada con Matlab, haciendo uso de la versatilidad y facilidad de programar con Matlab, las herramientas que incluyen ayudan al programador a construir interactivamente una GUI o Interfaz Gráfica de Usuario para su programa, para valorar el comportamiento funcional de la viga. El objetivo de esta aplicación es mostrar las virtudes de Matlab como un paquete de software para desarrollar Interfaces Gráficas de Usuario amigables y el desarrollo de una interfaz Gráfica de Usuario con el lenguaje de programación de Matlab, resolviendo modelos de la distribución uniaxial del estrés en una columna suspendida fija en un lado y libre en el otro lado, mediante el Método del Elemento Finito.

En el área del desarrollo de simuladores para auxiliar aspectos de medicina, se han realizado trabajos como el de (Giner et al., 2019) en el cual se realiza la validación experimental de un modelo de análisis de Elementos Finitos en fractura de cadera y su aplicación clínica. El trabajo se refiere a la caracterización del hueso en la cadera mediante pruebas experimentales con hueso y mediante el Análisis del Elemento Finito, explica acerca de un experimento donde se toman huesos reales de cadáveres para realizar pruebas y medir su punto de inicio de fractura, propagación, carga progresiva y la carga máxima de la fractura. La propuesta busca desarrollar un modelo de experimentación computacional que caracterice el hueso de la extremidad proximal del fémur como un material heterogéneo a partir de la traslación directa de los parámetros mecánicos obtenidos de piezas anatómicas de experimentación.

Por otro lado, el trabajo denominado: (Romero et al., 2017), es un artículo que hace hincapié sobre la eficiencia del método de los Elementos Finitos para conseguir soluciones nodales exactas, se expone una metodología aplicable a problemas de Elementos Finitos, la cual, incluye casos de operadores no auto adjuntos para la ecuación diferencial.

El artículo de (Romero et al., 2017), trata de ilustrar un caso donde se aplicó un procedimiento basado en el concepto de Acción Repartida Equivalente (ARE) al análisis, por el Método de Elementos Finitos (MEF) formulado en desplazamientos y solución nodal exacta, de pilares con deformación por cortante, de acuerdo con la teoría de Timoshenko. Los resultados obtenidos con la metodología ARE-MEF, en los casos analizados, ponen de manifiesto que con un número muy reducido de elementos (uno y dos en los ejemplos realizados) se alcanza una gran exactitud en desplazamientos, giros y esfuerzos.

Por otra parte, la animación gráfica muestra la gran variedad de aplicaciones que tiene el Método del Elemento Finito dado en el trabajo de (Woodward et al., 2017), dicho artículo representa la producción de una aplicación programada en C++ y la interfaz gráfica de Usuario fue diseñada con Microsoft MFC, y un visualizador 3D denominado OpenGL, diseñada para replicar en tiempo real las expresiones del rostro humano. Utiliza estampas de color blanco de fácil aplicación en la cara del modelo humano, denominados como marcadores en el ordenador, los cuales tienen ciertas restricciones para capturar los vértices y simular mediante desplazamientos nodales en un mallado 3D. Utiliza matrices jacobianas utilizadas en el Método del Elemento Finito para satisfacer las ecuaciones diferenciales parciales y encontrar los desplazamientos de las coordenadas axiales. Además, el mallado de la cara puede deformarse usando un acercamiento geométrico eficiente donde los vértices se mueven independientemente por los músculos virtuales, se implementaron ecuaciones lineales y elípticas para aplicar deformación directa en la malla. Las estampas aplicadas en 13 puntos de la cara del modelo humano son seguidas por 2 cámaras. Las cuales detectan los movimientos de los marcadores y los traducen y simulan en un visualizador gráfico como un modelo 3D de la cara. Dándole animación a un modelo 3D definido previamente.

2.5. Tipos de sillas de ruedas actuales

Principalmente existen dos tipos de sillas de ruedas caracterizadas por su funcionamiento. En primer lugar, están las sillas de ruedas manuales. Estas sillas son impulsadas por un asistente o por el propio sujeto. El segundo tipo es la silla de ruedas eléctrica o silla de ruedas con motor. Estas sillas permiten que el usuario pueda manejar las ruedas sin hacer fuerza con sus brazos, ya que contiene un mando eléctrico que se controla con la mano. Este mando está compuesto por un joystick que contiene debajo un tablero de control para establecer la rapidez y, en algunos casos, la posición del respaldo, el asiento, etc. Las sillas de ruedas eléctricas suelen ser más costosas, pero facilitan la movilidad de las personas aumentando su autonomía e independencia. Las sillas eléctricas son accionadas por baterías que son recargables. Asimismo, existen sillas eléctricas controlables por la boca. Estas sillas están pensadas, sobre todo, para los usuarios incapacitados para utilizar sus manos. Para el diseño de sillas de ruedas en la actualidad los ingenieros cuentan con herramientas que ayudan a diseñar los componentes de la silla de ruedas, en caso particular, acuden a software CAD, particularmente SolidWorks, el cual permite conjuntar todos los componentes de la silla en un solo archivo que simula el ensamblaje de los componentes entre sí para crear contactos y recrear condiciones apegadas a la vida real mediante Simulación con Elemento Finito, y así descubrir las fortalezas y debilidades del diseño (Stanfill & Jensen, 2017). Se ilustra el estado actual de una silla de ruedas modulares (ver Figura 2.1): Patente de Estados Unidos # 7,100,716 B2, (Saghiri et al., 2014).

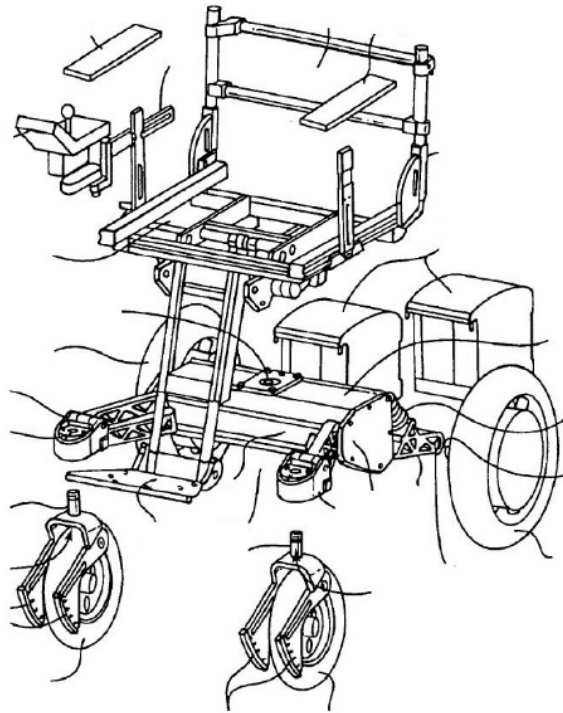


Figura 2.3. Silla de ruedas modulares (Saghiri et al., 2014).

2.6. Patentes de sillas de ruedas contemporáneas

En esta sección se hace referencia a las patentes de equipos tipo silla de ruedas consultadas para fundamentar el diseño y la selección de los materiales constructivos de la silla tipo exo.

En el área de diseño y patentes de sillas de ruedas se menciona el trabajo de (Saghiri et al., 2014), la invención se relaciona con un vehículo pequeño, en particular una silla de ruedas con estructura modular. La silla de ruedas puede ser impulsada manualmente con las llantas o accionadas por un motor. La silla a menudo comprende un mecanismo de plegado que permite doblar la rueda al marco de la silla con el fin de reducir el tamaño total para el propósito del transporte de la rueda silla. Las dimensiones más importantes del componente principal se encuentran preferiblemente dentro de un plano mientras que las dimensiones perpendiculares a dicho plano son considerablemente más pequeñas. Por consiguiente, después de ser desensamblado, el vehículo pequeño tiene dimensiones exteriores en el mismo rango que una silla de ruedas plegable. El vehículo pequeño según la presente invención (Saghiri et al., 2014) es una estructura modular que incluye un componente principal, al

menos una rueda y un estribo que es desmontable de la estructura principal o componente a través de un dispositivo de liberación rápida, al menos una rueda de conducción se monta y desmonta en dicho componente principal a través de un dispositivo de liberación rápida y un componente de asiento que se separa-monta hábilmente en dicho componente principal a través de una liberación rápida del dispositivo. El ensamblaje del asiento del vehículo pequeño según la presente patente (Saghiri et al., 2014) comprende un asiento, un asiento trasero, descansa brazos, y dos apoya brazos. El componente del asiento se proporciona como una unidad completa. Esta unidad se encuentra montada para que el componente principal, específicamente para el cuerpo y para ser desmontado por medios de un dispositivo de liberación rápida. El componente del asiento puede ser plegable. El asiento se puede diseñar con especial atención a la ergonomía. La presente invención tiene una estructura modular y comprende un componente principal que permite el desprendimiento de las ruedas y el desprendimiento del componente del asiento del componente principal por medio de un dispositivo de liberación rápida. Esta provee particularmente pequeñas dimensiones para su transporte con calidad, alta estabilidad y resistencia. El cuerpo principal está diseñado como un monocasco, el tipo de construcción del cuerpo principal soporta la suspensión. El componente asiento puede diseñarse para que se pueda girar, de modo que, al girar el asiento por 180°, el vehículo al tener tracción trasera se convertirá en un vehículo que tiene tracción delantera. Los brazos provistos para soportar las ruedas de conducción son preferiblemente diseñados como brazos longitudinalmente dispuestos que se soportan en el cuerpo principal a través de una unidad resorte/amortiguador.

La patente siguiente muestra un pequeño vehículo diseñado como una silla de ruedas como se explica a continuación, tiene una excelente estabilidad (Jolla, 1989). La silla de ruedas puede ser compatible para permitir también la operación en pistas irregulares. Al mismo tiempo, la estructura y el diseño de la silla de ruedas permiten desmontarse en componentes individuales, por lo que es posible transportar la silla de ruedas en la cajuela de un automóvil común.

Si se utilizan ejes enchufables y dispositivos de liberación rápida, y después de que el componente del asiento y, según sea el caso, las baterías de almacenamiento se eliminan, solo el componente principal, por ejemplo, el cuerpo principal y los cuatro brazos

permanecen. El componente principal es un componente que tiene una forma plana que puede ser fácilmente transportado. Las ruedas y las baterías también pueden ser fácilmente guardadas y el componente del asiento también se puede plegar en una forma plana que aumente el ahorro de espacio si se utiliza el mecanismo de plegado.

Otro caso similar, en las patentes de sillas de ruedas consultadas, es una que muestra la selección de los materiales compuestos seleccionados tanto por su ligereza como por su resistencia a la tracción, en el caso de la patente de (Robert et al., 1993), donde se utiliza para la construcción del eje de la silla de ruedas; fibra de carbono como material de la estructura tubular del eje que une las dos ruedas.

3. Desarrollo

A continuación, se describe el desarrollo del software a implementar usando elementos de ingeniería de software. Sin embargo, las partes derivadas del proyecto, como las imágenes del prototipo del equipo órtesis se muestra en el anexo.

En el diagrama de la Figura 3.1, se observa el proceso de diseño, análisis y construcción del proyecto en general, mediante la aplicación del sistema de Análisis del Elemento Finito de Piezas Geométricas en 3D diseñado con MATLAB. Además, ilustra de forma general, los procesos llevados a cabo mediante la utilización de diferentes tipos de herramientas. El diseño de las piezas para conformar la estructura de la órtesis (traje-exo) y la silla de ruedas dependió principalmente de la herramienta CAD: 3D EXPERIENCE platform con sus complementos SolidWorks 2019 y CATiA V5-V6. El desarrollo del sistema dependió principalmente de MATLAB y su complemento GUIDE. La construcción del prototipo a escala (dummy) fue llevado a cabo con Impresión 3D de materiales compuestos (fibra de carbono y nylon), principalmente Flashforge Creator Pro, ver anexo.

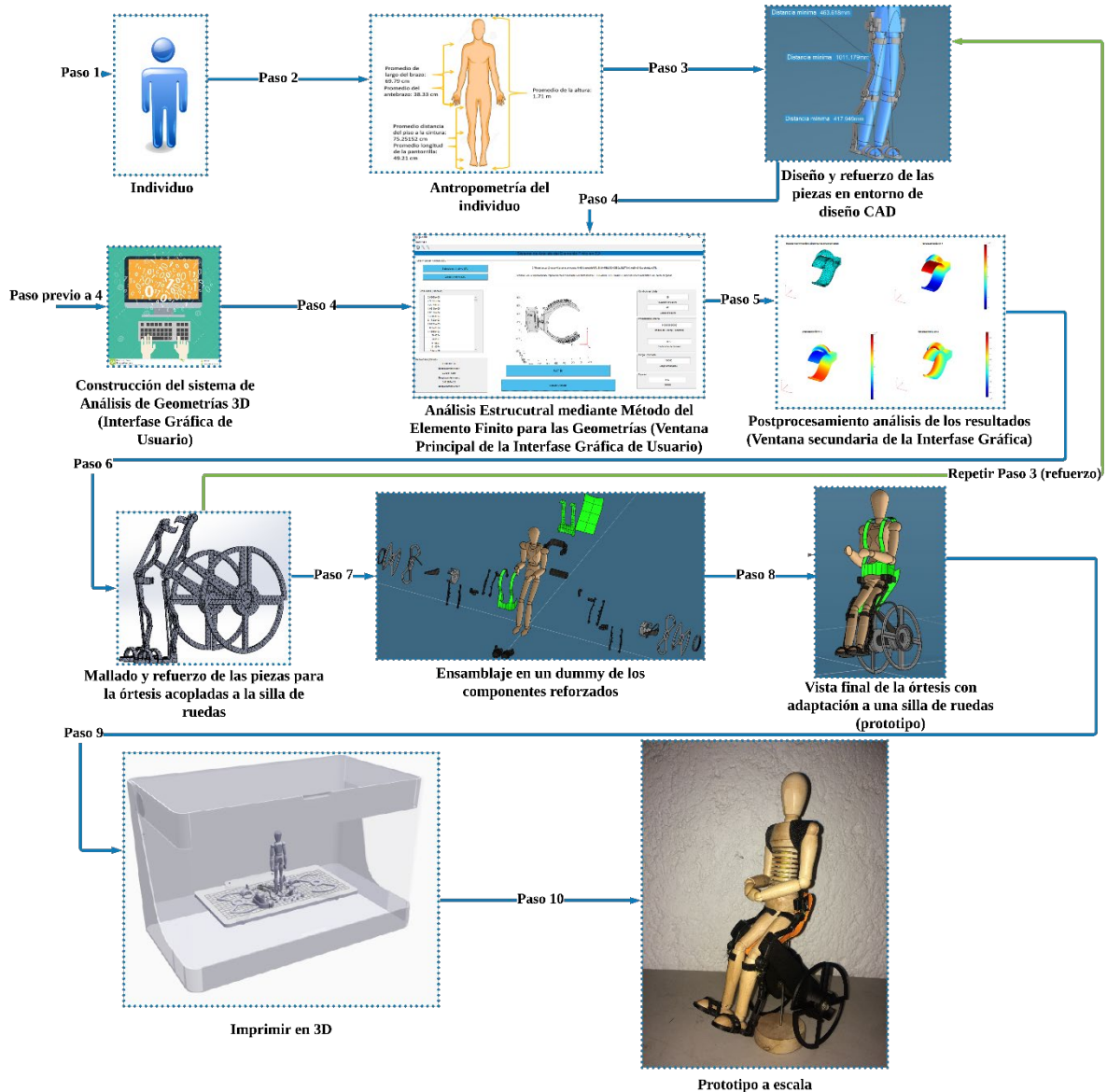


Figura 3.1. Pasos para el desarrollo de una silla exo-esquelética mediante simulación de tensión de Von Mises.

3.1. Visión General del Sistema Computacional

Es un sistema basado en Matlab con miras a ser compartido públicamente, el sistema provee a los usuarios una herramienta de solución a problemas de aplicación en ingeniería estructural, para que se dé el uso para preparar a los usuarios a desarrollar diseños de estructuras seguras, también para que simplifique la interacción entre el usuario y la

computadora, mediante una interfaz gráfica para el usuario pueda resolver de problemas de estructuras.

Los siguientes son las principales características incluidas en el sistema:

- Soporte Multiplataforma: Ofrece soporte para la mayoría de los sistemas operativos.
- Un usuario por vez podrá utilizar el sistema.

3.2. Características del usuario

Se considera que el usuario deberá conocer acerca de las geometrías y los tipos de archivos que se utilizan para guardar los diseños, además es preferible que sepa acerca del estudio del Elemento Finito para examinar los diseños. También que pueda realizar las capturas de los datos e interpretar los informes.

En cada caso se señala el perfil del usuario, mediante un cuadro que cuenta con: tipo de usuario, formación, habilidades y actividades.

Tabla 3.1. Caso de uso para ingeniero de aplicación.

Tipo de usuario	Ingeniero de aplicación
Formación	Ingeniería Industrial, mecánica, aeronáutica, civil o automotriz
Habilidades	Diseño de estructuras sólidas con computadora
Actividades	Interacción, visualización de información y carga de archivos, validación de diseños conforme a normas específicas.

Tabla 3.2. Caso de uso para Dibujante CAD.

Tipo de usuario	Dibujante CAD
Formación	Diseño industrial, diseño mecánico
Habilidades	Diseño de estructuras sólidas con computadora
Actividades	Interacción, visualización de información y carga de archivos.

Tabla 3.3. Caso de uso para Estudiante.

Tipo de usuario	Estudiante
Formación	Conocimientos básicos de la geometría en 3D
Habilidades	Diseño de estructuras sólidas con computadora
Actividades	Interacción, visualización de información y carga de archivos.

3.3. Diseño preliminar del sistema

En el siguiente diagrama se muestra un ejemplo de quien utilizará el programa. Dicho diagrama de casos de uso se enfoca en dar la información más importante acerca de cuáles son las funciones del programa.

Tabla 3.4. Requerimientos del sistema de cálculo de la tensión de Von Mises para estructuras modeladas en diseño 3D.

Función	Cálculo de la tensión de Von Mises en una estructura
Descripción	Calcula la tensión máxima de Von Mises para el material con constantes físicas definidas por el usuario
Entradas	Lectura del coeficiente de Poisson Lectura del Módulo elástico Asignación de restricciones en las caras del sólido: cargas y sujeciones
Salidas	Tensión de Von Mises y desplazamientos
Acción	Indicar con colores cuando el valor de la tensión de Von Mises se encuentre dentro de los límites seguros del material
Requerimientos	Lecturas de las constantes físicas de un material y definir las restricciones para el modelo a analizar
Precondición	Conocer el modelo tridimensional

Diseño preliminar del sistema, ver Figura 3.2.

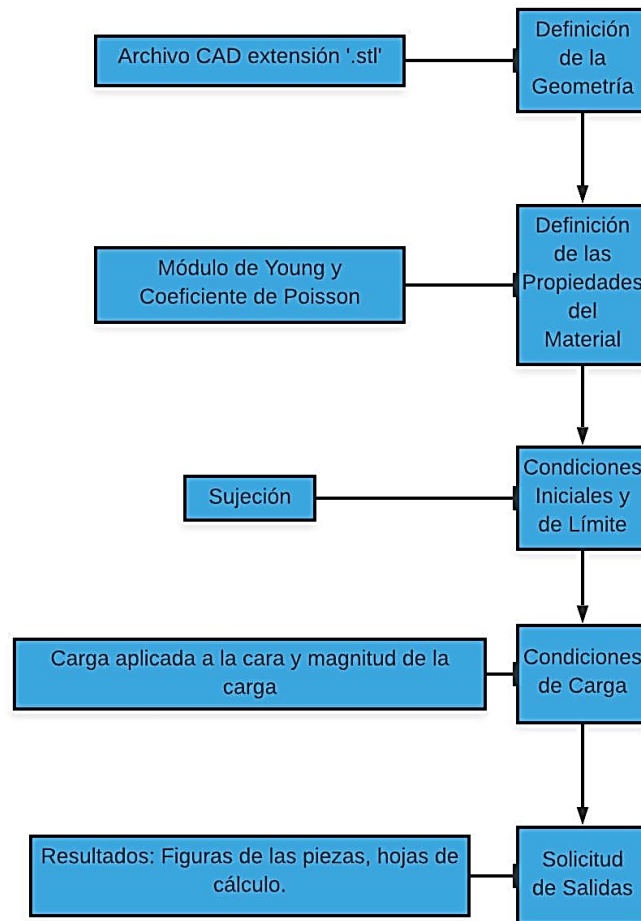


Figura 3.2. Diagrama del sistema.

3.4. Elaboración de diagramas de casos de uso

En el siguiente diagrama se muestra un ejemplo de quien utilizará el programa, ver Figuras 3.3, 3.4, 3.5 y 3.6. Dichos diagramas de casos de uso se enfocan en dar la información más importante acerca de cuáles son las funciones del programa.

3.5. Características del usuario

Se considera que el usuario deberá conocer acerca de las geometrías y los tipos de archivos que se utilizan para guardar los diseños, además es preferible que sepa acerca del estudio del

Elemento Finito para examinar los diseños. También que pueda realizar las capturas de los datos e interpretar los informes.

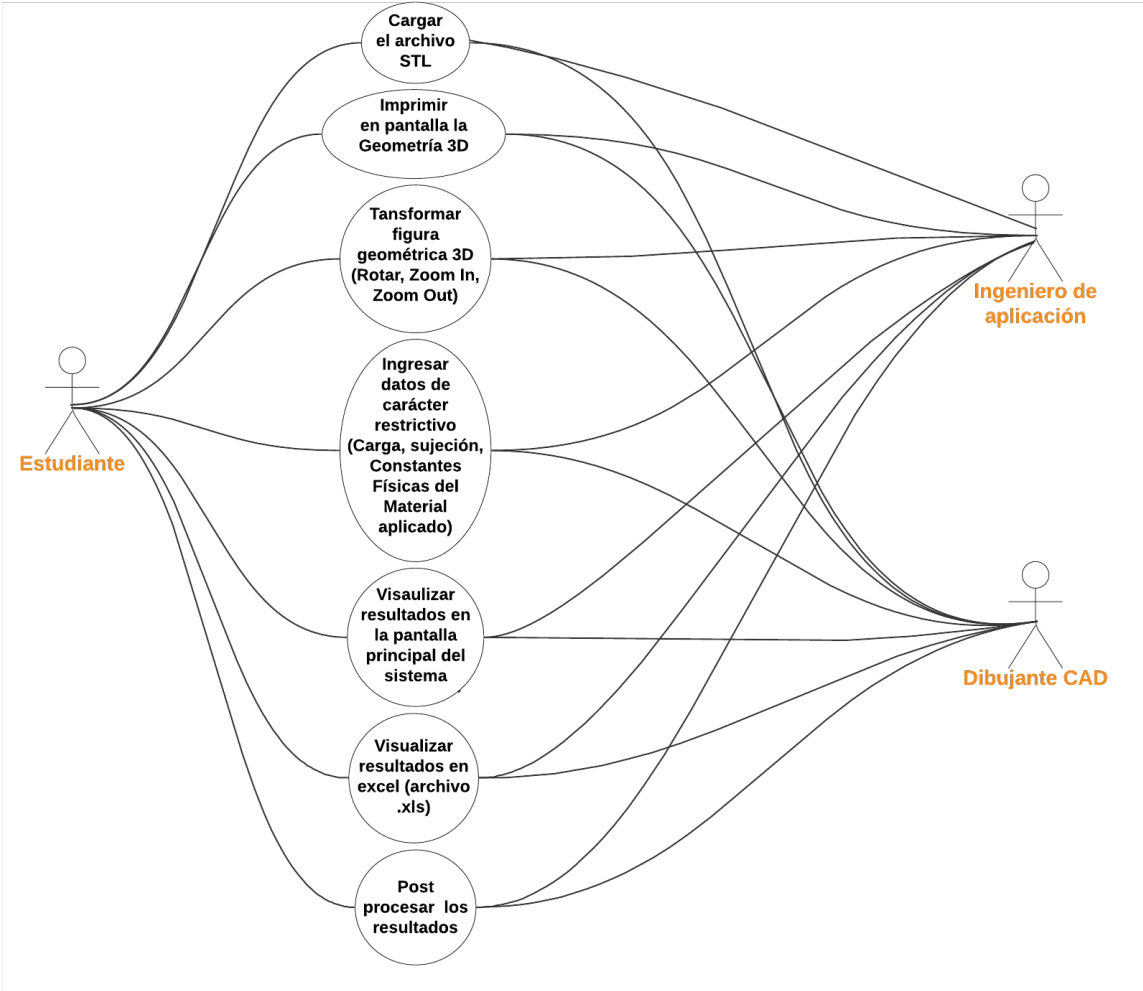


Figura 3.3. Diagrama de casos de uso.

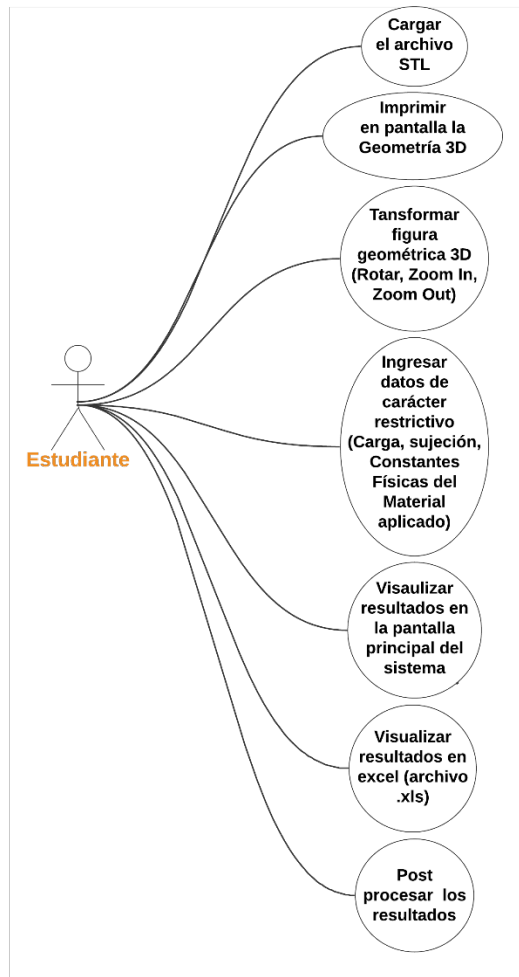


Figura 3.4. Diagrama UML de casos de uso para usuario Estudiante.

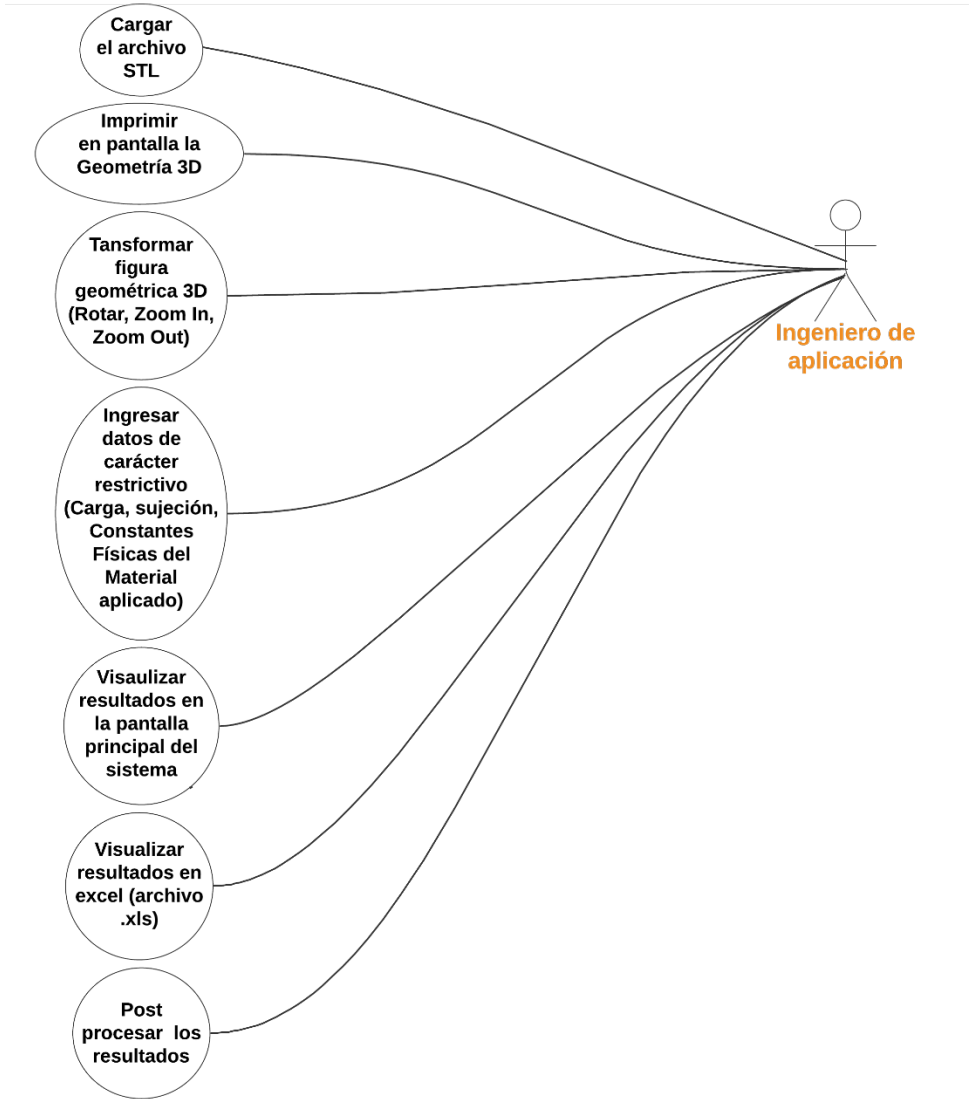


Figura 3.5. Diagrama UML de casos de uso para usuario Ingeniero de Aplicación.

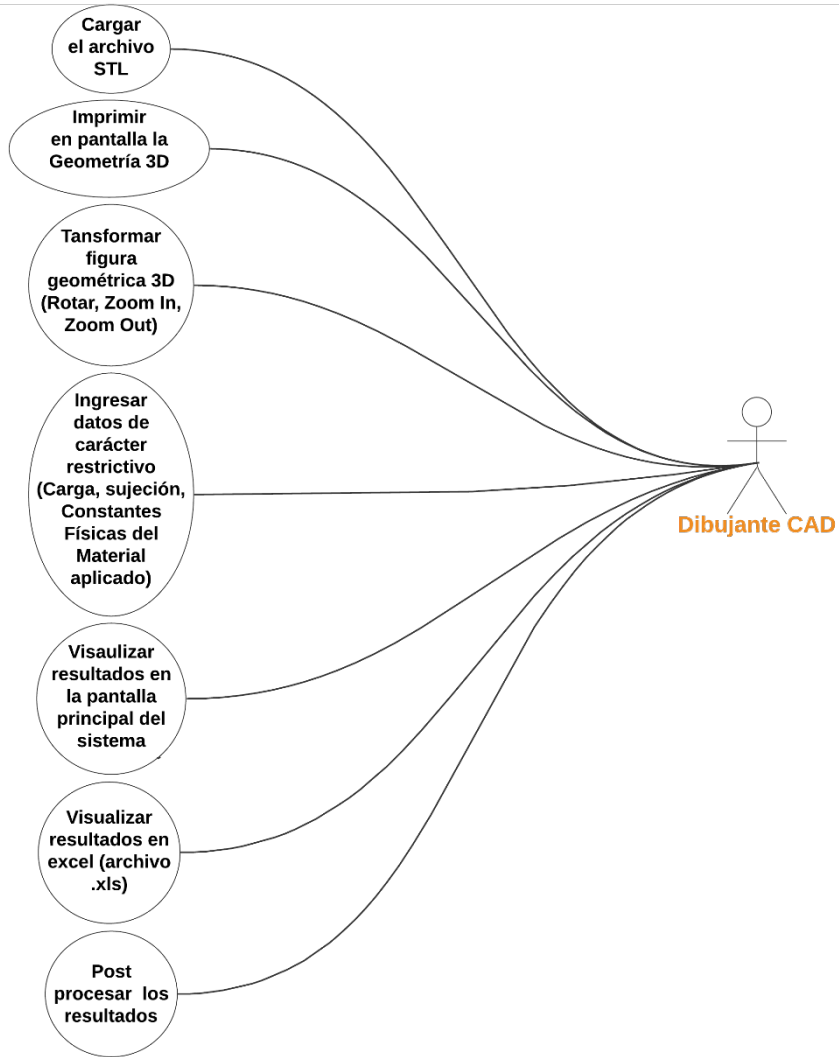


Figura 3.6. Diagrama UML de casos de uso para usuario Dibujante CAD.

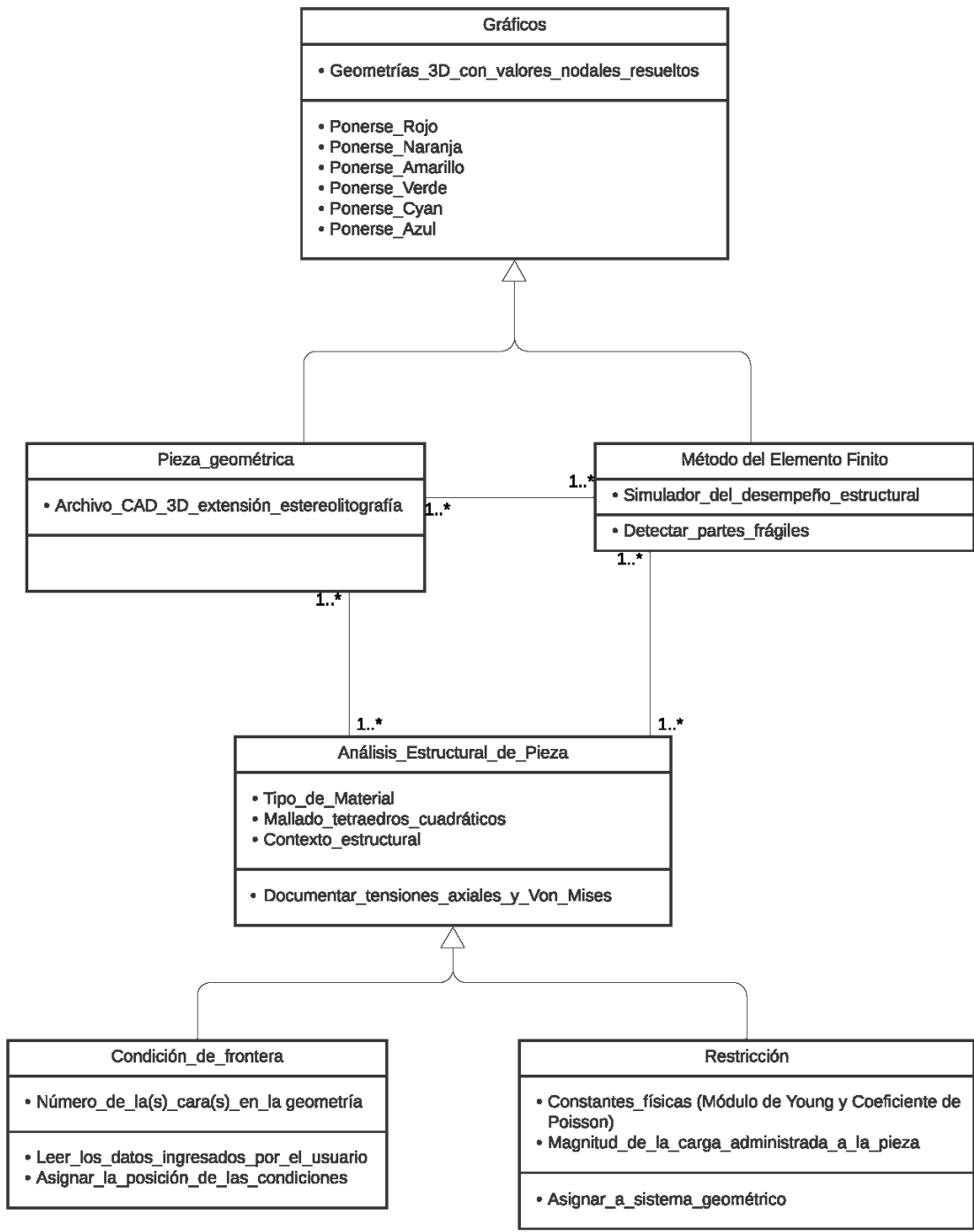


Figura 3.7. Diagrama UML de Clases

3.6. Interfaces de Usuario

La Interfaz Gráfica para el usuario ver Figura 3.8. Cuenta con las funciones necesarias que un análisis de la calidad estructural requiere para evaluar piezas sólidas 3D.

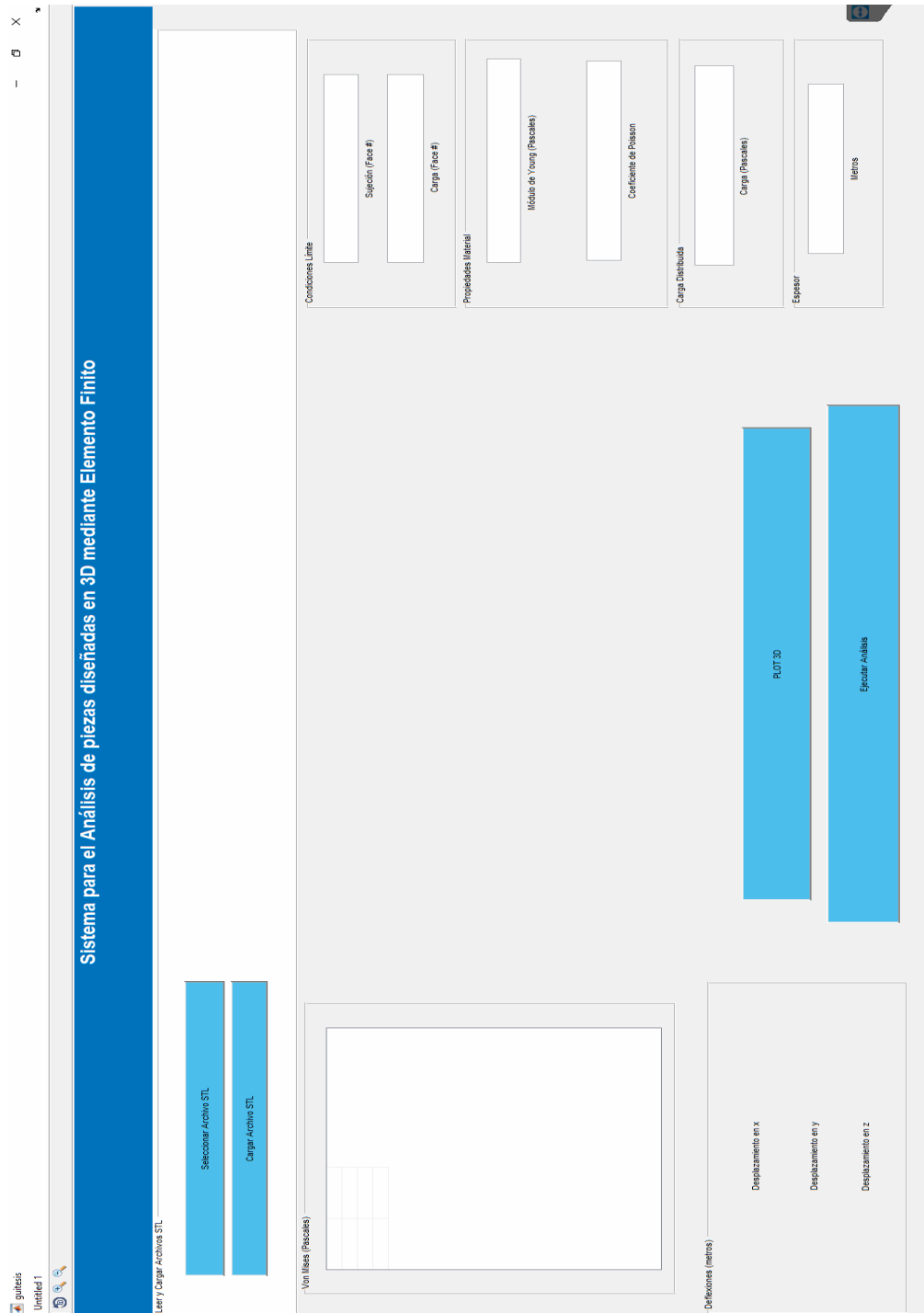

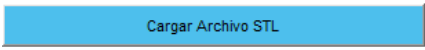

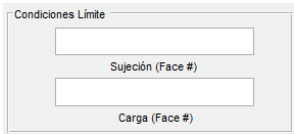
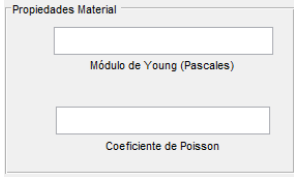
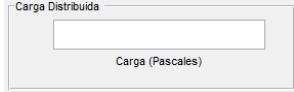


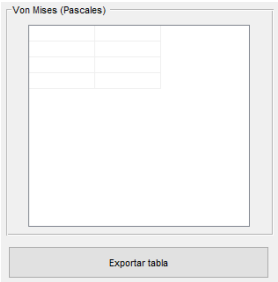




Figura 3.8. Ventana principal de la Interfaz Gráfica de Usuario.

Tabla 3.5. Botones que conforman la GUI y su descripción.

	<p><i>Push button</i> de selección de archivo 3D.</p>
	<p><i>Push button</i> de carga de archivo en la memoria.</p>
	<p><i>Push button</i> de Imprimir en pantalla la geometría importada, mostrando la geometría seleccionada.</p>
	<p>Campos de texto para las entradas de las condiciones límite.</p>
	<p>Campos de texto para las entradas de las propiedades del material.</p>
	<p>Campos de texto para la entrada de magnitud de la carga.</p>

 <p>Espeesor</p> <p>Metros</p>	<p>Campo de texto para la entrada del espesor en coordenada cartesiana 'z'.</p>												
 <p>Ejecutar Análisis</p>	<p><i>Push button</i> para correr la simulación.</p>												
 <p>Von Mises (Pascuales)</p> <table border="1" data-bbox="407 709 628 905"> <tr><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td></tr> </table> <p>Exportar tabla</p>													<p>Tabla de resultados y <i>Push button</i> para guardar los datos en un archivo '.csv'.</p>
 <p>Deflexiones (metros)</p> <p>Desplazamiento en x</p> <p>Desplazamiento en y</p> <p>Desplazamiento en z</p>	<p>Área para texto para los valores máximos en los desplazamientos de las coordenadas cartesianas.</p>												
	<p>Botón de giro para la geometría.</p>												
	<p>Botón de zoom in/zoom out para la geometría.</p>												

3.7. Interfases de hardware

La pantalla del monitor – El software deberá mostrar información al usuario al imprimir en pantalla.

Ratón – El software debe interactuar con el movimiento del ratón y los botones del ratón. El cursor del ratón se activa en las zonas de entrada de datos, selecciones de datos, y botones de comando, también el ratón interactúa con el área de la interfaz destinada a mostrar en pantalla la pieza 3D para girarla y acercarla y/o alejarla.

Teclado – El software deberá interactuar con las pulsaciones del teclado. El área para entrada de datos de la interfaz requiere de ingreso de datos por medio de un teclado.

A continuación, se describe el sistema de Análisis con un diagrama de bloques, Figura 3.9.

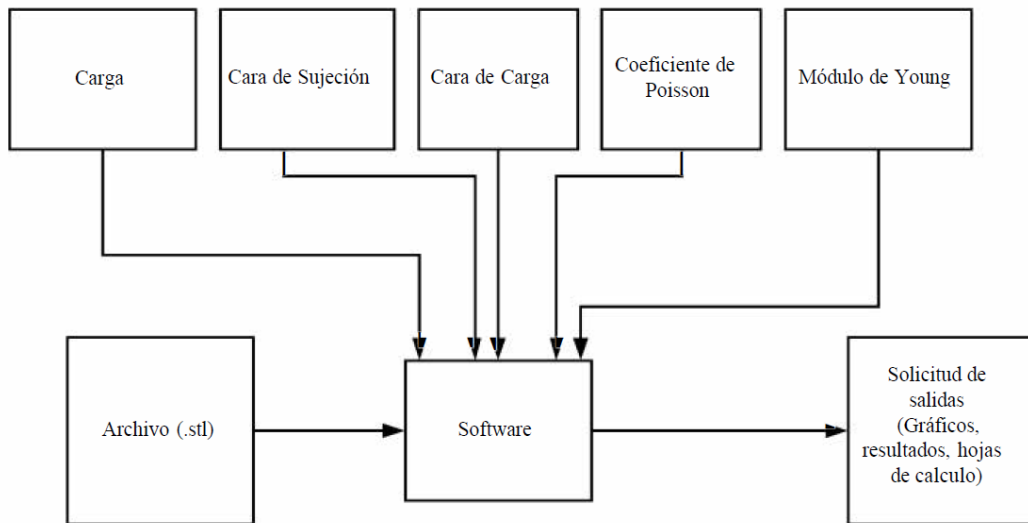


Figura 3.9. Diagrama de bloques del Sistema de Análisis.

3.8 Especificaciones de los requerimientos del sistema

3.8.1 Requerimientos funcionales

RF01. El sistema elaborará: documentos de Excel de las soluciones numéricas encontradas con el Método del Elemento Finito, los que serán utilizados como criterios de seguridad estructural para el usuario, y los layouts que guiarán durante la construcción de sillas de ruedas de tipo exo-esqueleto u otras piezas.

RF02. El sistema aceptará todos los datos necesarios para realizar el análisis (campos de edición para datos alfanuméricos, constantes físicas del material: Módulo Elástico y Coeficiente de Poisson, archivos CAD: geometrías 3D del tipo (.stl), datos de carácter restrictivo del análisis del EF: sujeciones y cargas; de las caras de la geometría designadas por el usuario).

RF03. El sistema realizará el procesamiento de la geometría 3D con los datos ingresados por el usuario, con el método del Elemento Finito.

RF04. El sistema encontrará el criterio de la tensión Von Mises para buscar las posibles fallas estructurales.

RF05. Los archivos generados corresponden a las posibles modificaciones que el ingeniero de aplicación pueda hacer.

3.8.2 Requerimientos No Funcionales

RNF01. El sistema proveerá de una solución real al problema planteado, en un tiempo breve.

RNF02. La interacción entre el usuario y el sistema permite trabajar con los simuladores del Método del Elemento Finito, esto valida los diseños de las piezas para armar equipos ortésicos – ortopédicos, el sistema computacional estará a cargo de cumplir con el objetivo, dando una fácil interpretación de los comandos, funciones y gráficos existentes en el sistema.

4. Resultados

Los primeros resultados fueron publicados en (González Woge et al., 2020) de donde se observó que software tiene mejores ventajas entre Matlab contra SolidWorks. Ambos programas cuentan con las características necesarias para el análisis por Elementos Finitos de piezas CAD, pero se optó por desarrollar los análisis con Matlab dadas sus condiciones de fácil adaptación a condiciones cambiantes y resolución precisa de los problemas del Elemento Finito.

A continuación, se muestra una vista explosionada de donde todos los elementos se analizaron en el sistema de Análisis del Elemento Finito.

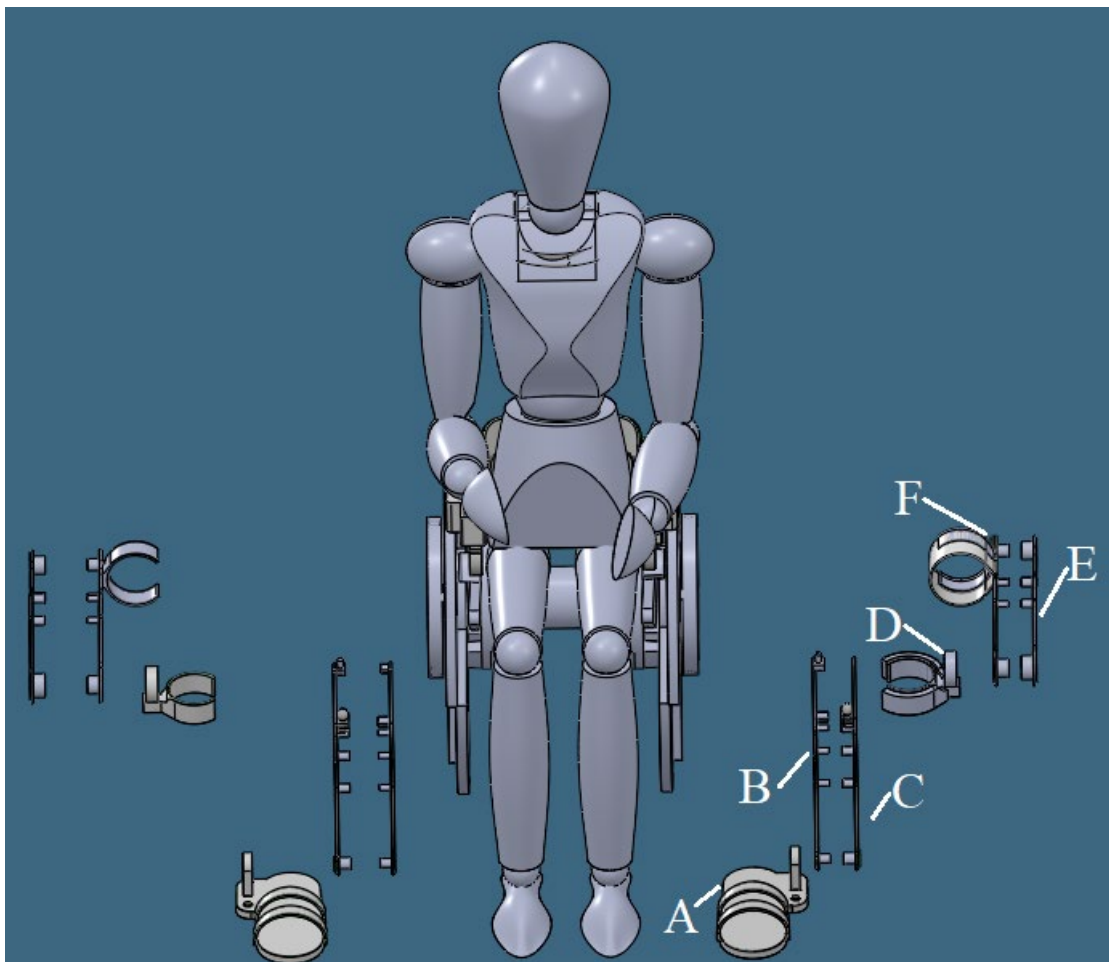


Figura 4.1. Vista explosionada en 3D Experience.

Tabla 4.1. Piezas estudiadas.

Pieza	Nombre de archivo
A	FootExo.stl
B	KneeExo1.stl
C	KneeExo2.stl
D	KneeExo3.stl
E	TighExo1.stl
F	TighExo2.stl

4.1 Configuración Experimental

En esta sección, se evaluará cada una de las partes descritas de la Tabla 4.1 en el software desarrollado, el sistema evaluará los esfuerzos combinados sobre cada una de las piezas dándoles como referencia las restricciones que se describen en cada una de las partes a evaluar. El resultado de esta información nos dará información sobre las partes vulnerables a las fracturas y mediante un rediseño estas partes frágiles que se reforzaron.

A continuación, se hacen 2 pruebas, la primera a una pieza original y la segunda prueba consiste en el análisis de la misma pieza (primera prueba) pero reforzada en base a el análisis resultante de la pieza original. En donde cada prueba contiene la información de: Número de prueba, nombre de la pieza, restricciones, propiedades del material, carga distribuida, espesor en coordenada 'z', gráfico del primer análisis, gráfico que muestra las condiciones de frontera, gráfico que muestra el mallado y las deflexiones, gráfico de Von Mises, gráfico de la variable Von Mises. Nótese que las restricciones es información técnica que utiliza el ingeniero de aplicación que requiere para el estudio del Elemento Finito. Finalmente, el objetivo a obtener es el color azul. Ya que este color indica en mayor medida que cumple con el criterio de Von Mises. Todas las pruebas analizadas de cada una de las partes que conforman el diseño de la silla y la órtesis se contemplan en el anexo.

Inicio de las pruebas con el software desarrollado y su posterior refuerzo aplicadas al componente FootExo ('A') del ensamblaje.

Prueba 1.

Pieza: FootExo.stl

Restricciones: Condiciones Límite: Sujeción: cara #50, Carga: cara #16 distribuida uniformemente. Propiedades del Material (Fibra de carbono): Módulo de Young: 142 GigaPascales, Coeficiente de Poisson: 0.27. Carga distribuida: 23750 Pascales (Cálculo hecho con la relación $P=F/A$). Espesor en coordenada cartesiana 'z': 0.3 metros.

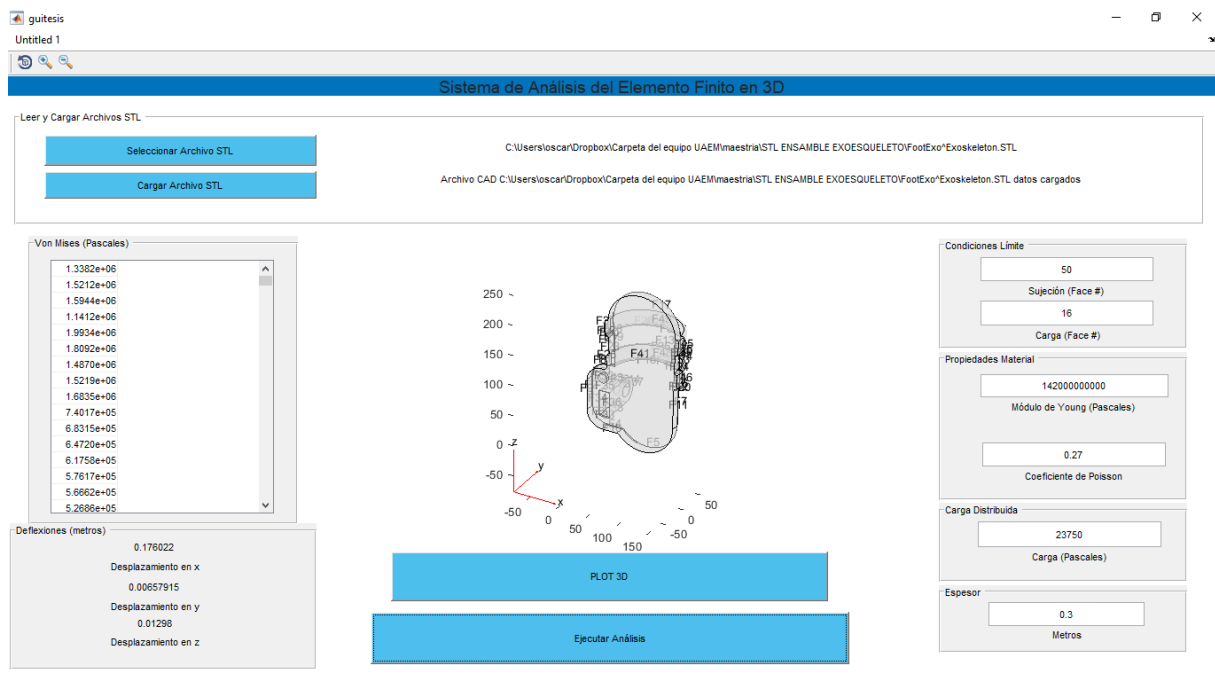


Figura 4.2. Prueba 1 en el software desarrollado para encontrar tensiones de Von Mises.

En la Figura 4.2 se puede observar a la izquierda de la imagen el listado de los datos obtenidos, en la parte central el modelo a evaluar en este caso es la pieza A, en la parte derecha de la imagen se agregan las condiciones de frontera.

En la pieza A nótese que la cara de carga es aquella que recibe la fuerza constante, por un lado, la cara de sujeción es la parte que une la siguiente parte en el compendio de todas las partes a evaluar, como se ve Figura 4.3.

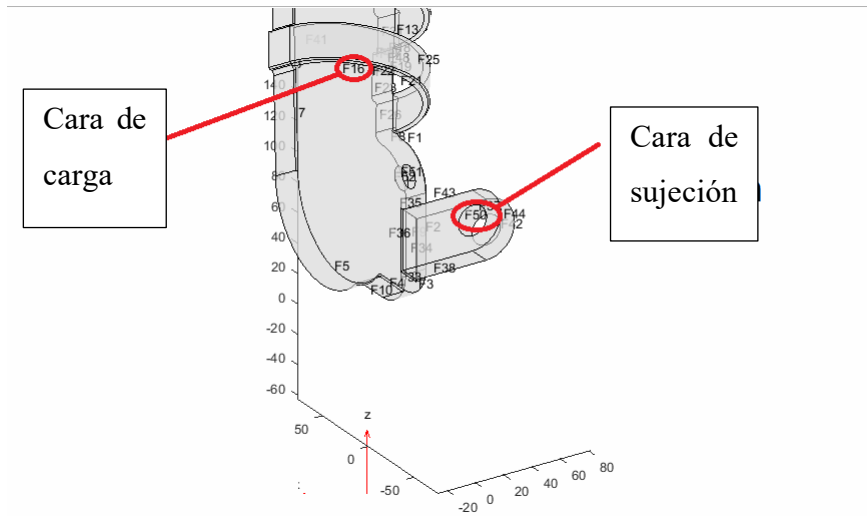


Figura 4.3. Restricciones para la prueba 1.

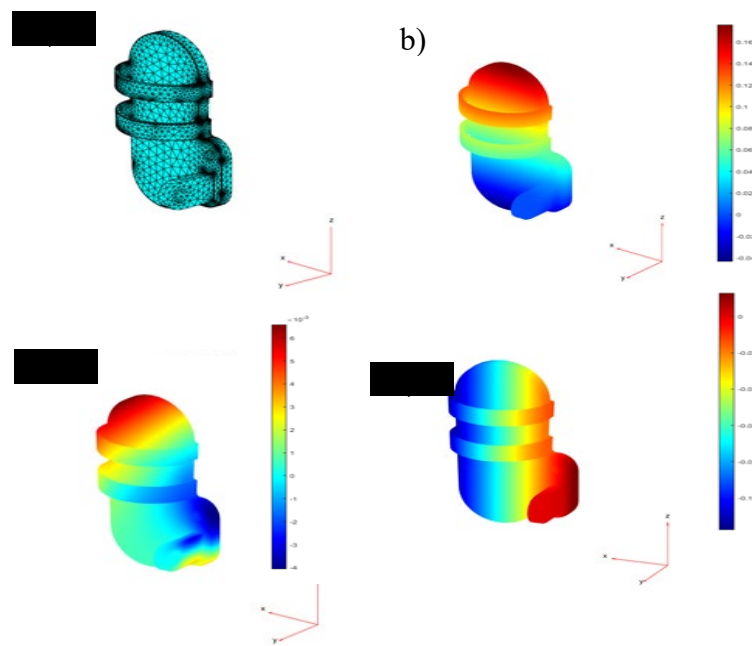


Figura 4.4. Mallado de la prueba 1 y Resultados de las deflexiones en 'x', 'y', 'z'.

En la Figura 4.4, en a) se observa el mallado de la pieza A, en b) se observa la tensión y compresión en el eje 'x', en c) se observa la tensión y compresión en el eje 'y', en d) se observa la tensión y compresión en el eje 'z', a la derecha se muestra la escala de color.

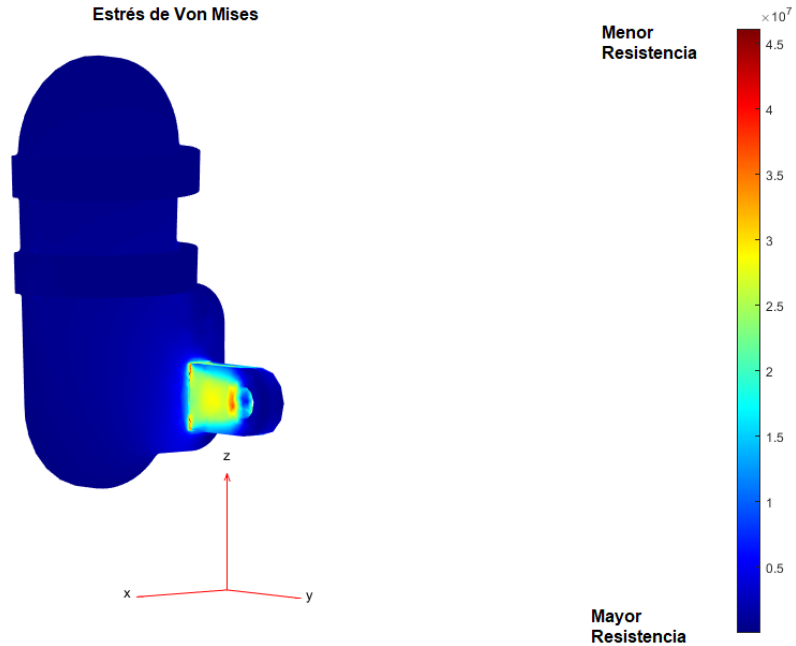


Figura 4.5. Tensiones de Von Mises de la prueba 1.

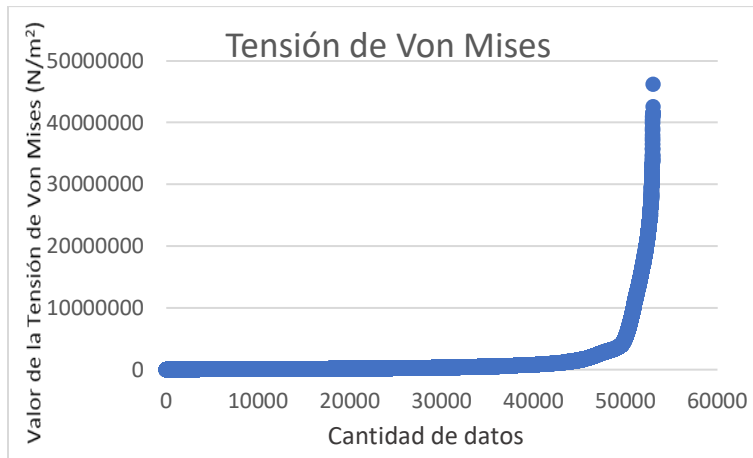


Figura 4.6. Gráfica de las tensiones de Von Mises.

En los resultados de la Figura 4.4 se observa una ligera deflexión en la coordenada cartesiana 'x' = 0.176022 metros, la cual puede ser resuelta reforzando la pieza o aumentando su espesor.

Las siguientes deflexiones de la Figura 4.4 no son tan pronunciadas con 'y'=0.00657915, 'z'=0.01298 metros, respectivamente, lo cual es muy ligero y no se corre riesgo de una deformación profunda en la pieza.

Observando el criterio de Von Mises, el cual obtuvo un máximo $\sigma_{VM}=46117148.1$ Pascales y al observar el mapeo de las localizaciones nodales para la variable “tensión de Von Mises”, ver Figura 4.5, donde hay un área cercana a la sujeción, que se debe rediseñar conforme a las características arrojadas por el Sistema desarrollado.

Prueba 2.

Pieza: FootExo.stl (reforzado)

Condiciones Límite: Sujeción: cara #57, Carga: cara #10 distribuida uniformemente. Propiedades del Material (Fibra de carbono): Módulo de Young: 142 GigaPascales, Coeficiente de Poisson: 0.27 Carga distribuida: 23750 Pascales. Espesor en coordenada cartesiana 'z': 0.3 metros.

En la Figura 4.7 se puede observar a la izquierda de la imagen el listado de los datos obtenidos, en la parte central el modelo a evaluar en este caso es la pieza A.1, en la parte derecha de la imagen se agregan las condiciones de frontera.

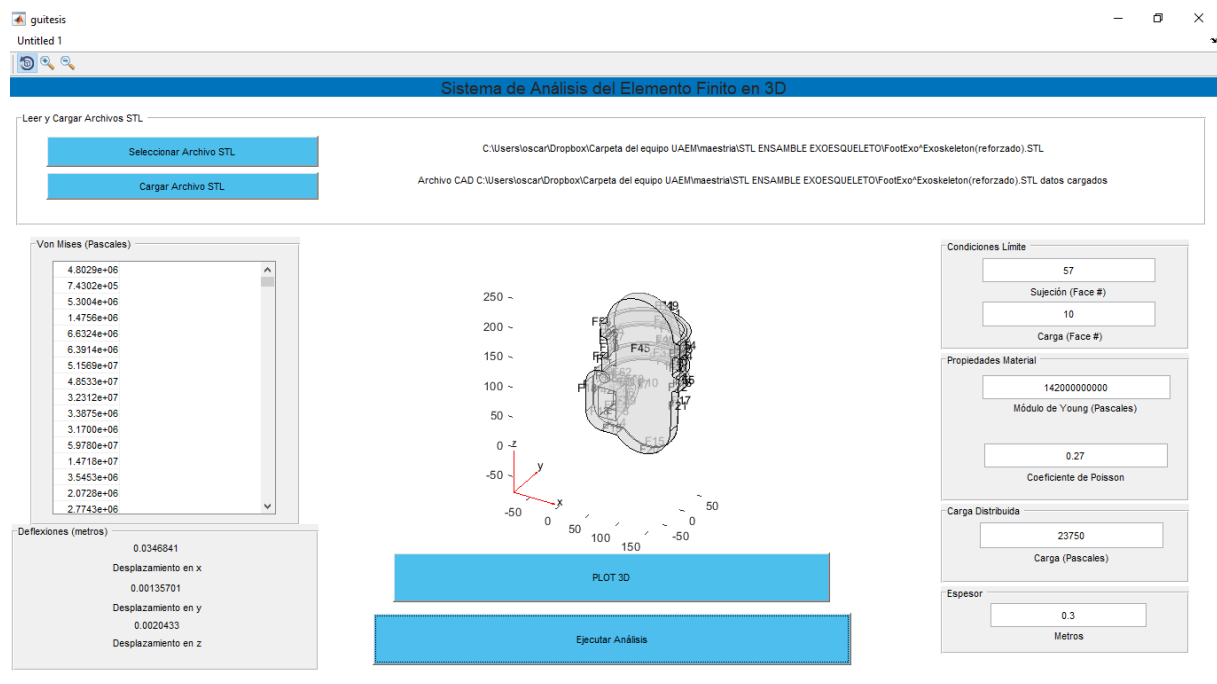


Figura 4.7. Prueba 2 en el software desarrollado para encontrar tensiones de Von Mises.

En la Figura 4.7 se puede observar a la izquierda de la imagen el listado de los datos obtenidos, en la parte central el modelo a evaluar en este caso es la pieza A.1, en la parte derecha de la imagen se agregan las condiciones de frontera.

En la pieza A.1 nótese que la cara de carga es aquella que recibe la fuerza constante, por un lado, la cara de sujeción es la parte que une la siguiente parte en el compendio de todas las partes a evaluar, como se ve Figura 4.8.

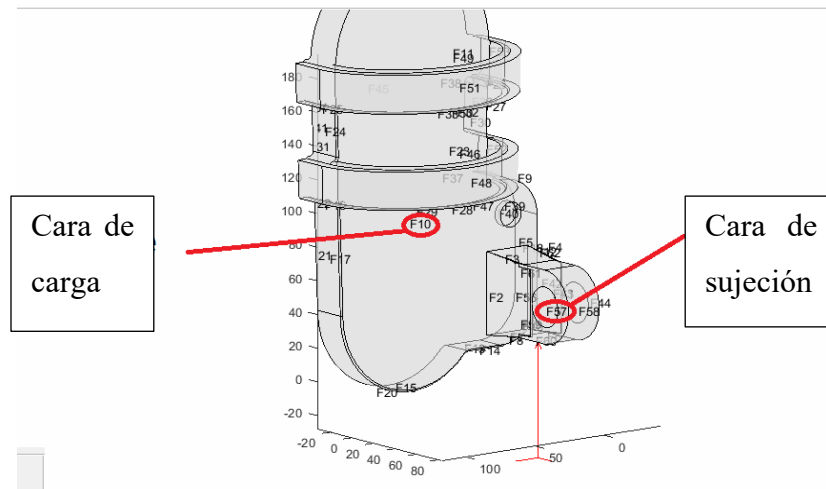


Figura 4.8. Restricciones en la prueba 2.

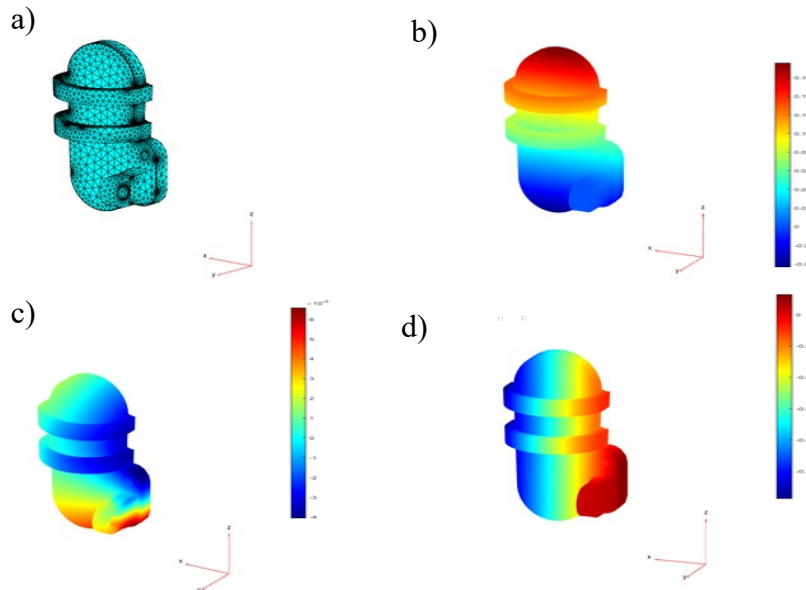


Figura 4.9 Representación en 3D en los ejes 'x', 'y' y 'z' y su mallado de la pieza A.

En la Figura 4.9, en a) se observa el mallado de la pieza A.1, en b) se observa la tensión y compresión en el eje 'x', en c) se observa la tensión y compresión en el eje 'y', en d) se observa la tensión y compresión en el eje 'z', a la derecha se muestra la escala de color.

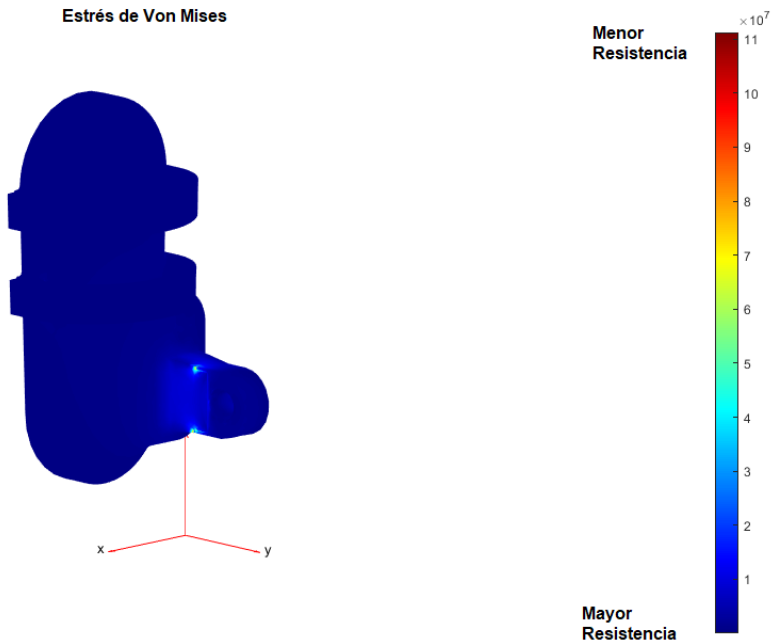


Figura 4.10. Tensiones de Von Mises de la prueba 2.

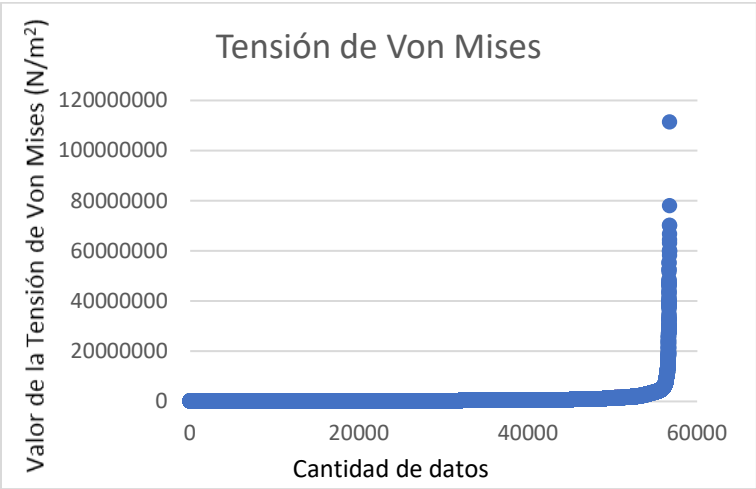


Figura 4.11. Gráfica de las tensiones de Von Mises.

En los resultados de la prueba 2 muestran un mejor desempeño en todas las pruebas, en las coordenadas cartesianas demuestran una disminución en los desplazamientos, deflexiones mostradas en la Figura 4.9: en el eje 'x' = 0.0346841 metros, disminuyendo la deflexión en

esa coordenada, para el eje 'y' = 0.00135701 metros, reduciendo el desplazamiento, procediendo a la siguiente coordenada 'z' = 0.0020433, dejando claro que en todas las coordenadas el desempeño de la pieza en términos de desplazamiento máximo se redujo.

Por otra parte, el criterio tensión de Von Mises, su valor máximo resultó $\sigma_{VM} = 111234424.7$ Pascales, su promedio es de 602275.3523 Pascales. Indicando que la pieza se aumentó en cuanto a su resistencia, ver Figura 4.11. Pero al igual mostró menos nodos críticos con valores altos en las magnitudes Pascales. En el gráfico 3D disminuyeron las áreas con nodos de colores rojos-naranjas-amarillos, la mayor parte de la pieza mostró una coloración azul, ver Figura 4.10. En la Figura 4.12 se observa el gráfico de la pieza sin reforzar contra la pieza reforzada notando que la Tensión Von Mises calculada en la pieza reforzada mejora con el rediseño.

Tabla 4.2. Comparativa de las pruebas 1 y 2.

Pieza	Variable	Máximo (Pa)	Mínimo (Pa)	Promedio (Pa)
FootExo	Von Mises	46117148.09	374.24	1365559.75
FootExo (reforzado)	Von Mises	111234424.70	629.94	602275.35
Diferencia		65117276.61	255.69	

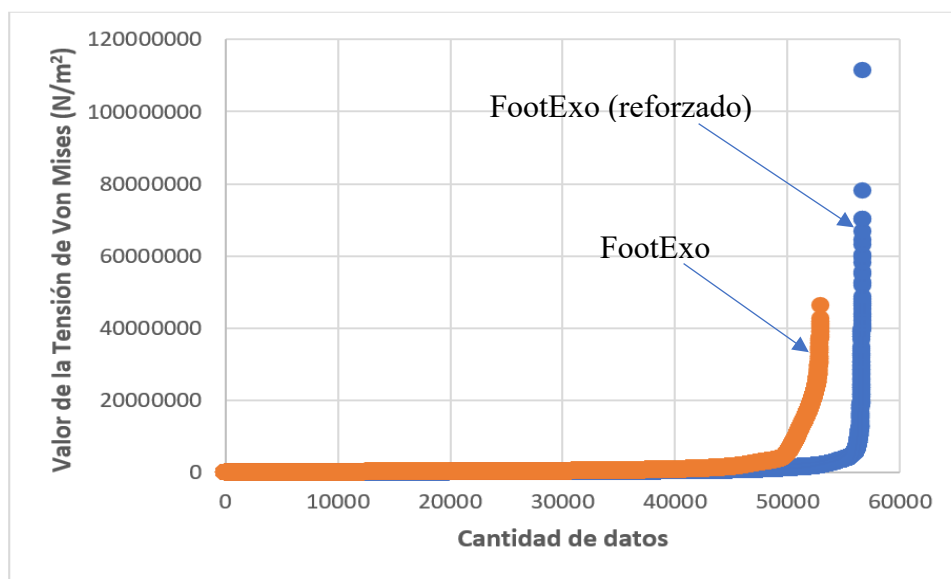


Figura 4.12. Traslape de las gráficas de las Pruebas 2 y 1.

5. Conclusiones

Se desarrolló un sistema computacional para calcular las tensiones de Von Mises utilizando el Método del Elemento Finito aplicado a las piezas parametrizadas que conforman una silla exoesquelética de la geometría importada. Este sistema nos permite la evaluación de cualquier pieza diseñada en CAD, en donde podemos modelar y agregar las restricciones (Módulo de Young y Coeficiente de Poisson) y condiciones de frontera (Carga y Sujeción). La importancia de este sistema computacional es el poder identificar las partes vulnerables de cualquier pieza en donde el color azul es nuestra referencia para saber que son partes reforzadas, mientras que hacia el color rojo estas partes son vulnerables a fracturas. Tomando en cuenta que las piezas que son vulnerables a fracturas pueden nuevamente rediseñarse mediante un entorno de diseño CAD y también nuevamente se pueden evaluar en este sistema computacional. La finalidad es aportar a la industria de la medicina en el área de la ortopedia.

De esta forma se evita hacer maquetación de los diseños optimizando así, recursos humanos, recursos económicos, recursos materiales y tiempo.

Como trabajo a futuro se pretende crear una sección para la combinación de materiales (materiales compuestos o composites) para la generación de piezas que contengan mayor duración y resistencia.

ANEXOS

6. Anexos.

Continuación de resultados para el análisis total de las piezas que conforman el ensamblaje de la silla exo-esquelética. Pruebas y posterior refuerzo aplicadas al componente KneeExo1 ('B') del ensamblaje.

Prueba 3.

Pieza: KneeExo1.stl

Condiciones Límite: Sujeción: cara #18, Carga: cara #41 distribuida uniformemente. Propiedades del Material (Fibra de carbono): Módulo de Young: 142 GigaPascales, Coeficiente de Poisson: 0.27. Carga Distribuida: 25650 Pascales. Espesor de la coordenada cartesiana 'z': 0.01 metros.

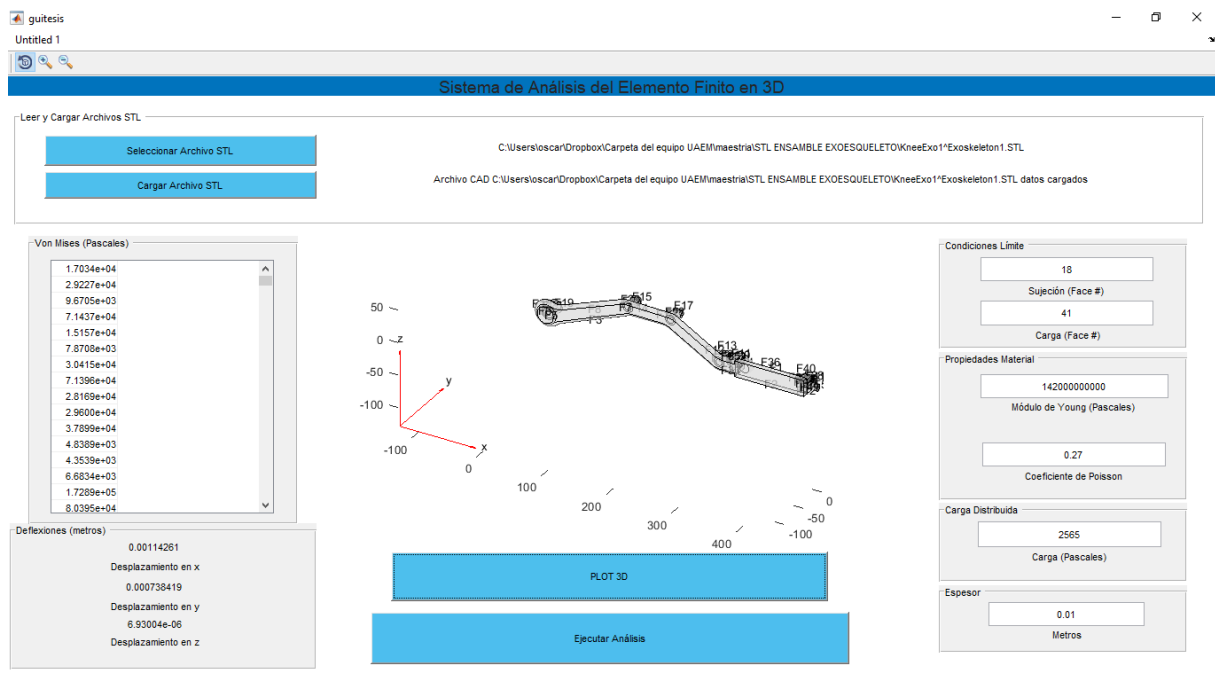


Figura 6.1. Prueba 3 en el software desarrollado para encontrar tensiones de Von Mises.

En la Figura 6.1, se puede observar a la izquierda de la imagen el listado de los datos obtenidos, en la parte central el modelo a evaluar en este caso es la pieza B, en la parte derecha de la imagen se agregan las condiciones de frontera.

En la pieza B nótese que la cara de carga es aquella que recibe la fuerza constante, por un lado, la cara de sujeción es la parte que une la siguiente parte en el compendio de todas las partes a evaluar, como se ve Figura 6.2 y 6.3.

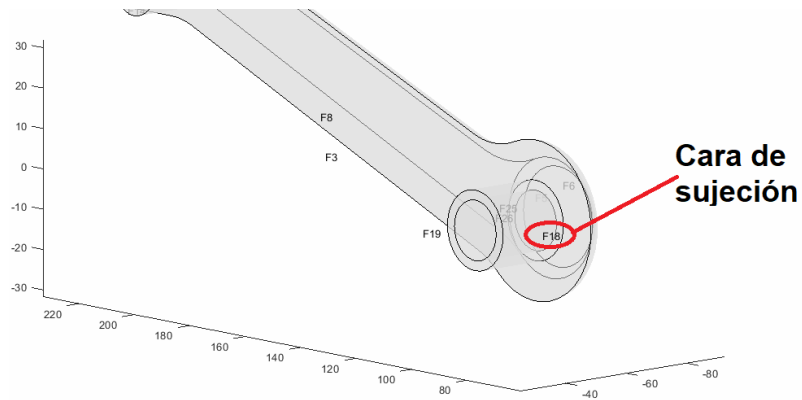


Figura 6.2. Cara de sujeción de la pieza B es la parte que une la siguiente pieza en el compendio de todas las partes a evaluar.

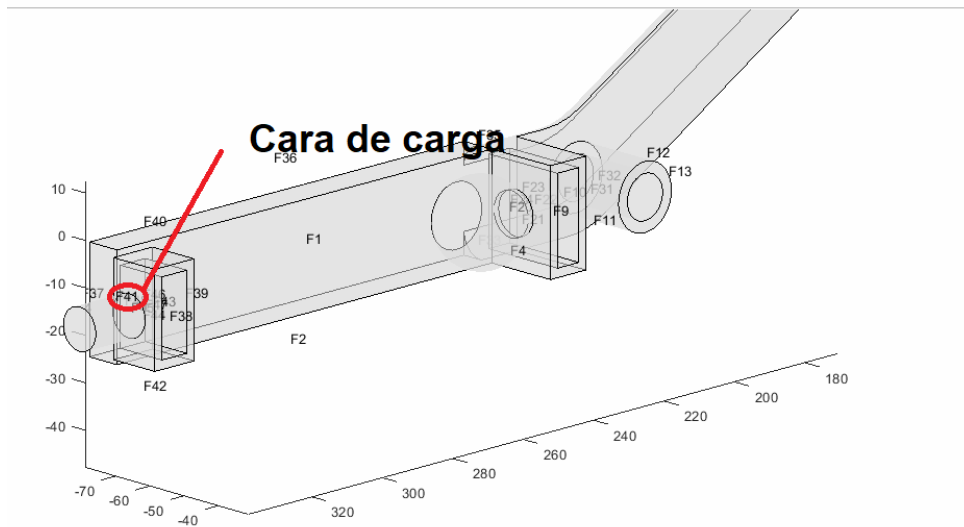


Figura 6.3. En la pieza B nótese que la cara de carga es aquella que recibe la fuerza constante.

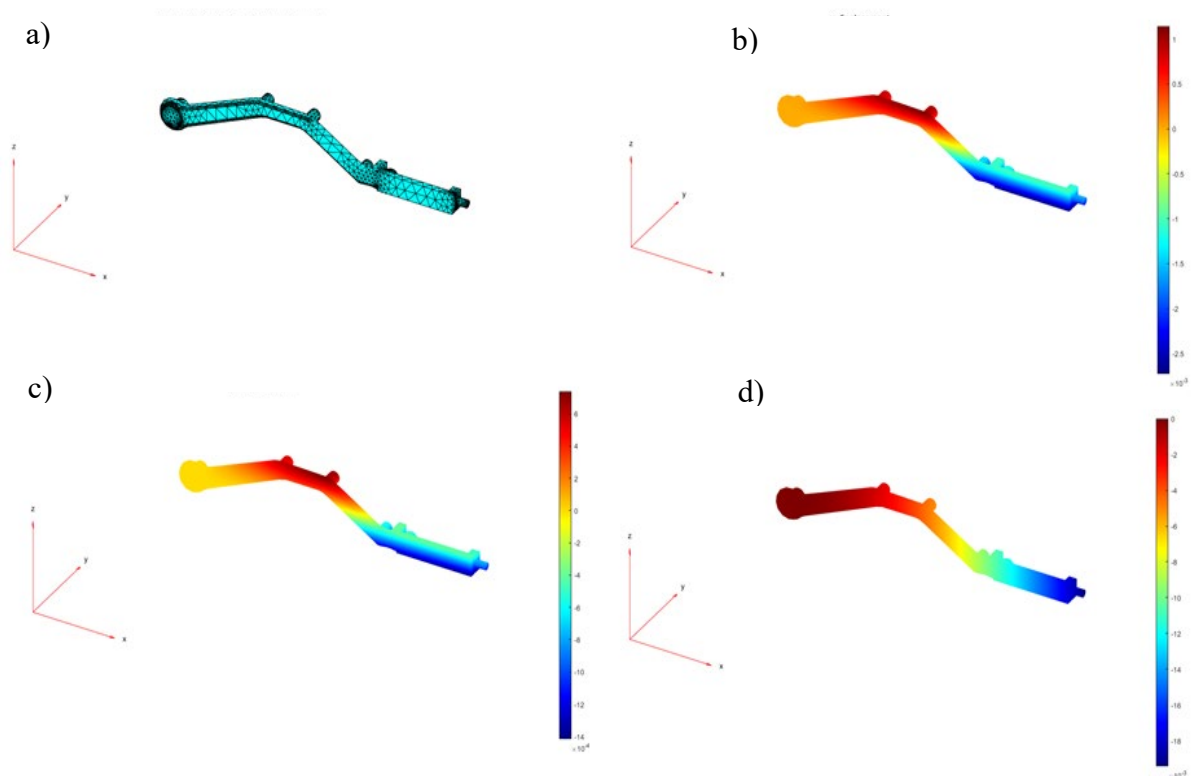


Figura 6.4. Representación en 3D de los ejes 'x', 'y' y 'z', y mallado de la Pieza B.

En la Figura 6.4, en a) se observa el mallado de la pieza B, en b) se observa la tensión y compresión en el eje 'x', en c) se observa la tensión y compresión en el eje 'y', en d) se observa la tensión y compresión en el eje 'z', a la derecha se muestra la escala de color.

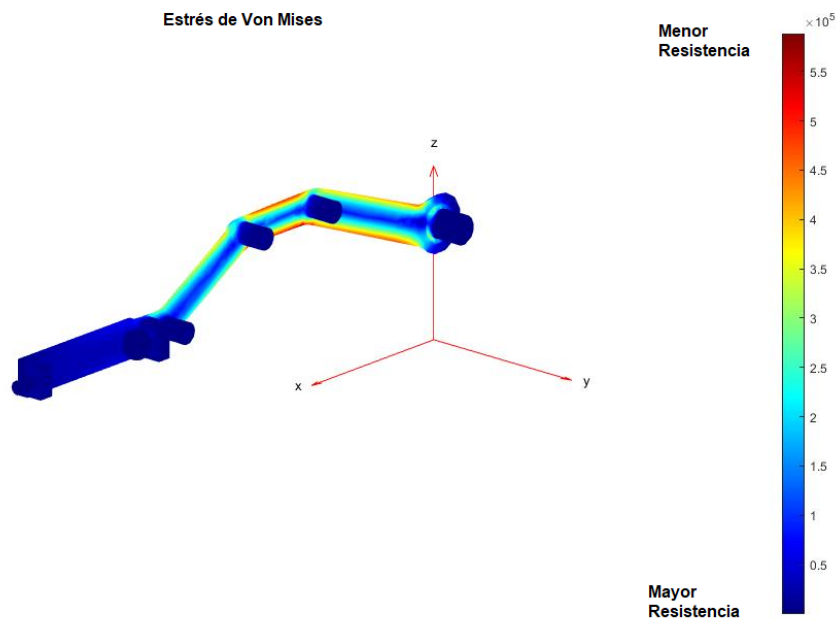


Figura 6.5. Tensión de Von Mises de la prueba 3.

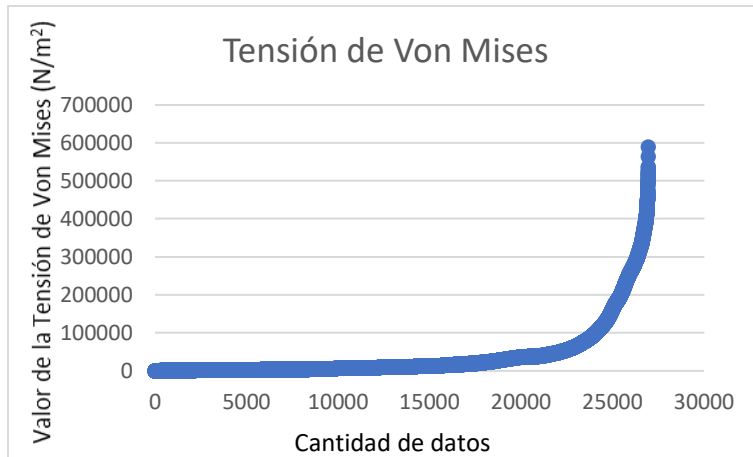


Figura 6.6. Gráfica de la Tensión Von Mises.

Dados los resultados de las deflexiones de la Figura 6.4, mostraron que la pieza se desplazó en la dirección 'x', un máximo de 0.0114261 metros, en la coordenada 'y' = 0.000738419 metros como máximo de desplazamiento, y por último en el eje 'z' un máximo de 6.93×10^{-6} metros como deflexión, quedando como un valor muy cercano a cero.

Para el caso de la tensión de Von Mises, el sistema arrojó los siguientes resultados; el valor máximo de la tensión de Von Mises fue $\sigma_{VM} = 588339.5117$ Pascales, la media = 38582.47652 Pascales, y un valor mínimo = 0.453443372 Pascales. Observando la Figura 6.5, se pueden distinguir áreas de coloración rojo, amarillo y naranja en los contornos adyacentes a la sujeción.

En la Figura 6.6 se observa el valor calculado de Von Mises.

Prueba 4.

Pieza: KneeExo1.stl (reforzado)

Condiciones Límite: Sujeción: cara #19, Carga: cara #42 distribuida uniformemente.
Propiedades del Material (Fibra de carbono): Módulo de Young: 142 GigaPascales.
Coeficiente de Poisson: 0.27. Carga Distribuida: 25650 Pascales. Espesor de la coordenada cartesiana 'z': 0.01 metros

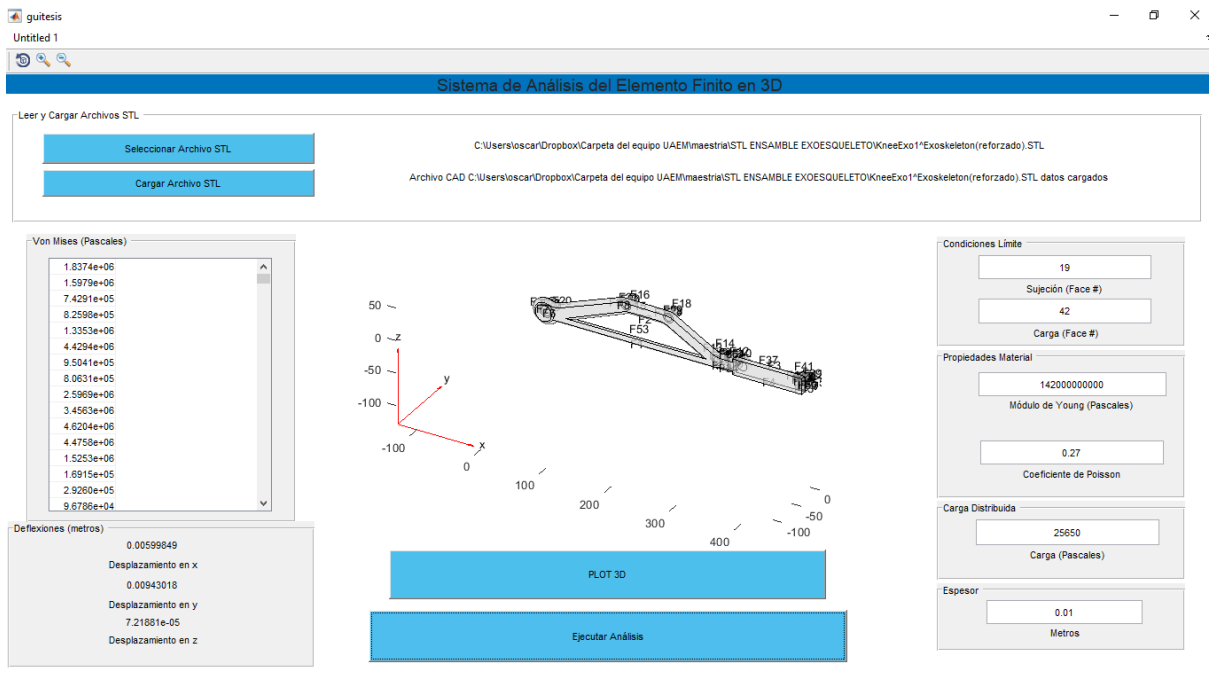


Figura 6.7. Prueba 4 en el software desarrollado para encontrar tensiones de Von Mises.

En la Figura 6.7, se puede observar a la izquierda de la imagen el listado de los datos obtenidos, en la parte central el modelo a evaluar en este caso es la pieza B.1, en la parte derecha de la imagen se agregan las condiciones de frontera.

En la pieza B nótese que la cara de carga es aquella que recibe la fuerza constante, por un lado, la cara de sujeción es la parte que une la siguiente parte en el compendio de todas las partes a evaluar, como se ve Figura 6.8 y 6.9.

Figura 6.8. En la pieza B.1 nótese que la cara de carga es aquella que recibe la fuerza constante.

Figura 6.9. Cara de sujeción de la pieza B.1 es la parte que une la siguiente pieza en el compendio de todas las partes a evaluar.

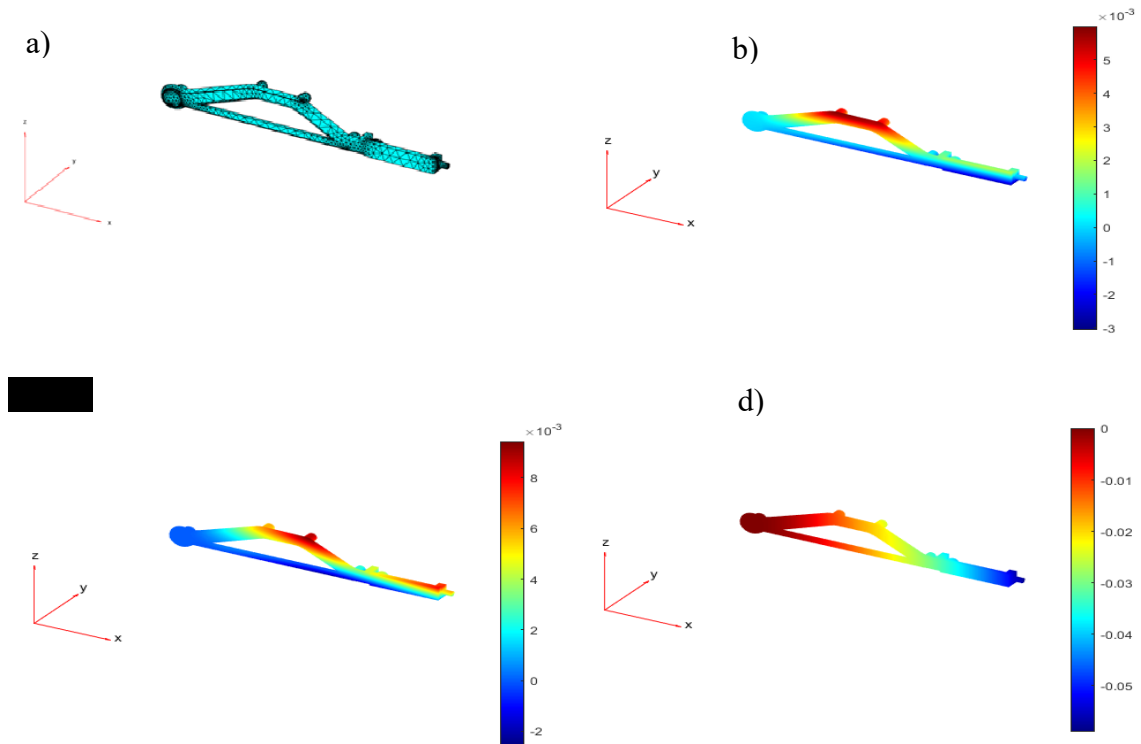


Figura 6.10. Representación de los ejes 'x', 'y' y 'z' y el mallado de la pieza B.1.

En la Figura 6.10, en a) se observa el mallado de la pieza B.1, en b) se observa la tensión y compresión en el eje 'x', en c) se observa la tensión y compresión en el eje 'y', en d) se observa la tensión y compresión en el eje 'z', a la derecha se muestra la escala de color.

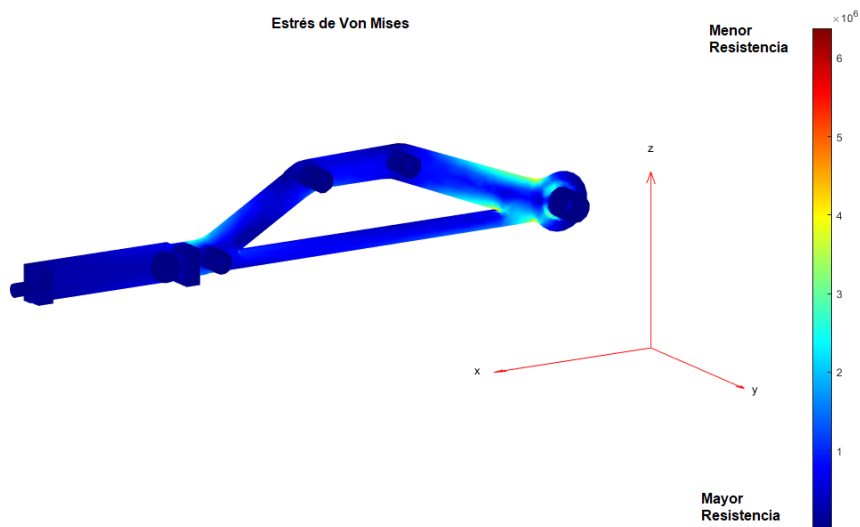


Figura 6.11. Tensión de Von Mises de la prueba 4.

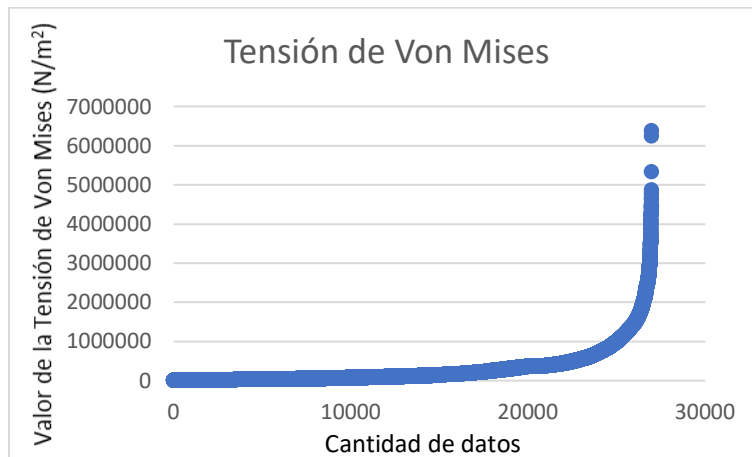


Figura 6.12. Gráfica de la Tensión de Von Mises.

La prueba 4, resultó con los valores máximos de las coordenadas cartesianas de la Figura 6.10: 'x' = 0.00599849 metros, 'y' = 0.00943018 metros y 'z' = 7.21×10^{-5} metros para sus desplazamientos.

Para la variable Von Mises su desempeño mejoró dada la barra de refuerzo que se le agregó al diseño original de la pieza, en la Figura 6.11, se observa que existen áreas de la pieza con menos nodos críticos, lo que es notable dados los colores azules. Valor máximo de Von Mises $\sigma_{VM} = 6377728.691$ Pascales, Promedio = 293887.5683 Pascales y Mínimo = 3.069021326 Pascales. En la Figura 6.12 se observa el valor calculado de Von Mises.

Tabla 6.1. Comparativa entre piezas B y B.1.

Pieza	Variable	Máximo (Pa)	Mínimo (Pa)	Promedio (Pa)
KneeExo1	Von Mises	588339.5117	0.453443372	38582.47652
KneeExo1 (reforzado)	Von Mises	6377728.691	3.069021326	293887.5683
Diferencia		5789389.1783	2.615577954	

Pruebas y posterior refuerzo aplicadas al componente KneeExo2 ('C') del ensamblaje

Prueba 5.

Pieza: KneeExo2.stl

Condiciones Límite: Sujeción: cara #9, Carga: cara #22 distribuida uniformemente.
Propiedades del Material (Fibra de carbono): Módulo de Young: 142 GigaPascales, Coeficiente de Poisson: 0.27, Carga Distribuida: 27083 Pascales, Espesor de la coordenada cartesiana 'z': 0.01 metros

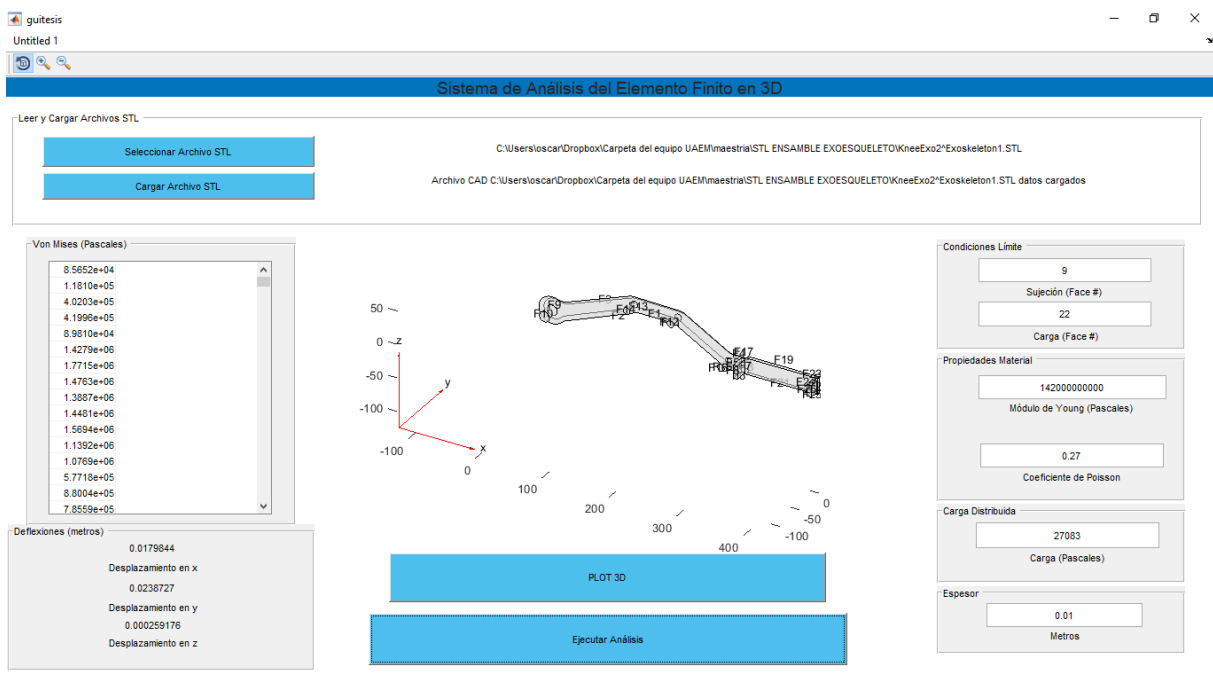


Figura 6.13. Prueba 5 en el software desarrollado para encontrar tensiones de Von Mises.

En la Figura 6.13, se puede observar a la izquierda de la imagen el listado de los datos obtenidos, en la parte central el modelo a evaluar en este caso es la pieza B.1, en la parte derecha de la imagen se agregan las condiciones de frontera.

En la pieza B.1 nótese que la cara de carga es aquella que recibe la fuerza constante, por un lado, la cara de sujeción es la parte que une la siguiente parte en el compendio de todas las partes a evaluar, como se ve Figura 6.14 y 6.15.

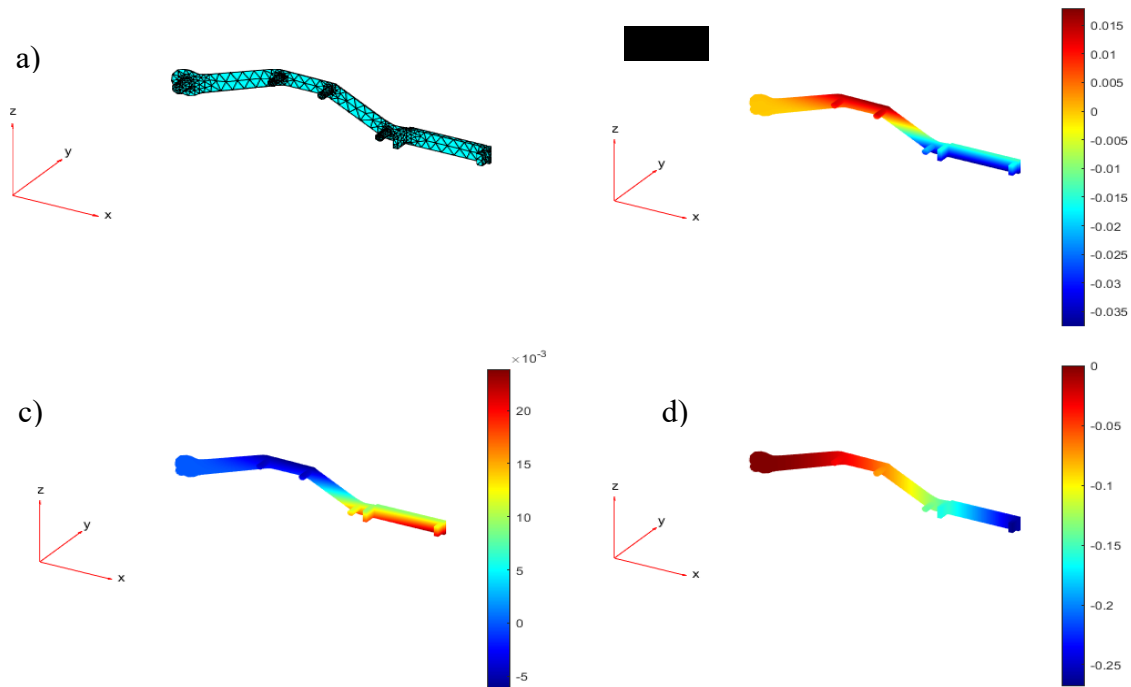


Figura 6.16. Representación en 3D de los ejes 'x', 'y' y 'z' y mallada de la pieza C.

En la Figura 6.16, en a) se observa el mallado de la pieza A, en b) se observa la tensión y compresión en el eje 'x', en c) se observa la tensión y compresión en el eje 'y', en d) se observa la tensión y compresión en el eje 'z', a la derecha se muestra la escala de color.

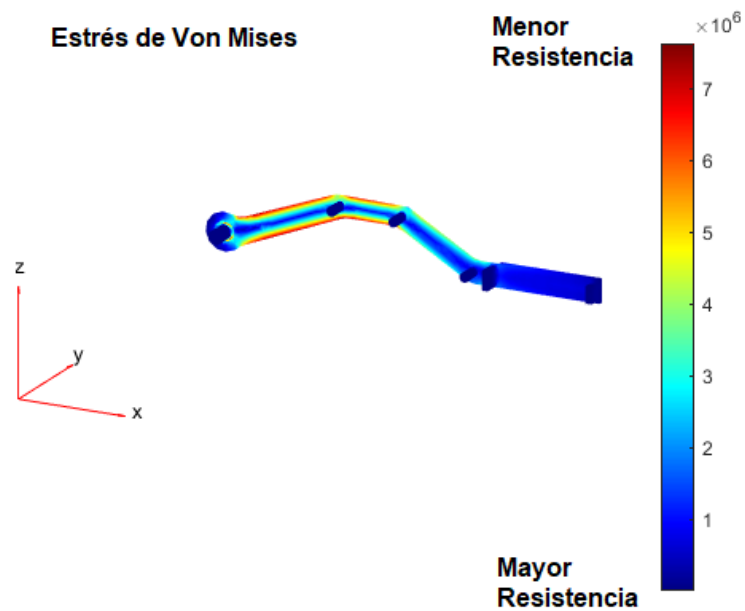


Figura 6.17. Tensión de Von Mises de la prueba 5.

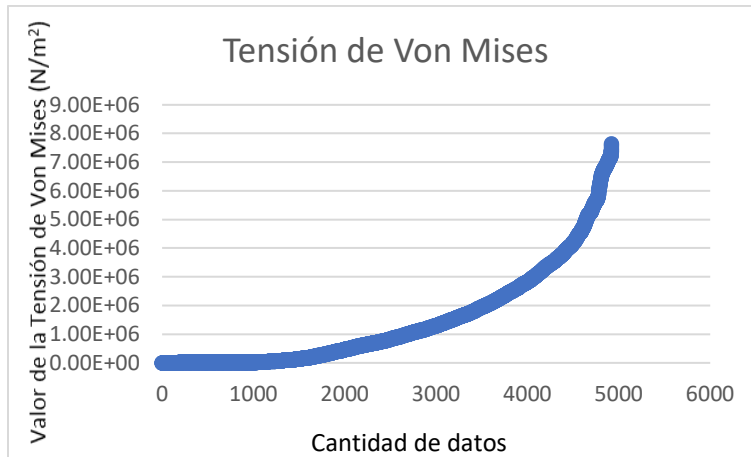


Figura 6.18. Gráfica de la Tensión de Von Mises.

Los resultados de la prueba 5 para deflexiones de la Figura 6.17 se deformará en la dirección 'x', un máximo de 0.0179844 metros, en 'y' = 0.0238727 metros y en 'z' = 0.000259176 metros.

Para la variable Von Mises el valor máximo registrado fue $\sigma_{VM} = 7629418.609$ Pascales, con una media = 1437395.512 Pascales o N/m^2 , y una mínima = 3.18×10^{-12} Pascales. En la Figura 6.17, se pueden observar coloraciones con matices de rojo-naranja-amarillo en el área perimetral de la sujeción 'y' en dirección '+x'. Esto es demostrado por los nodos críticos con colores rojos, amarillos y naranjas en esa área. En la Figura 6.18 se observa el valor calculado de Von Mises.

Prueba 6.

Pieza: KneeExo2.stl (reforzado)

Condiciones Límite: Sujeción: cara #12, Carga: cara #25 distribuida uniformemente, Propiedades del Material (Fibra de carbono): Módulo de Young: 142 GigaPascales, Coeficiente de Poisson: 0.27, Carga Distribuida: 27083 Pascales. Espesor de la coordenada cartesiana 'z': 0.01 metros.

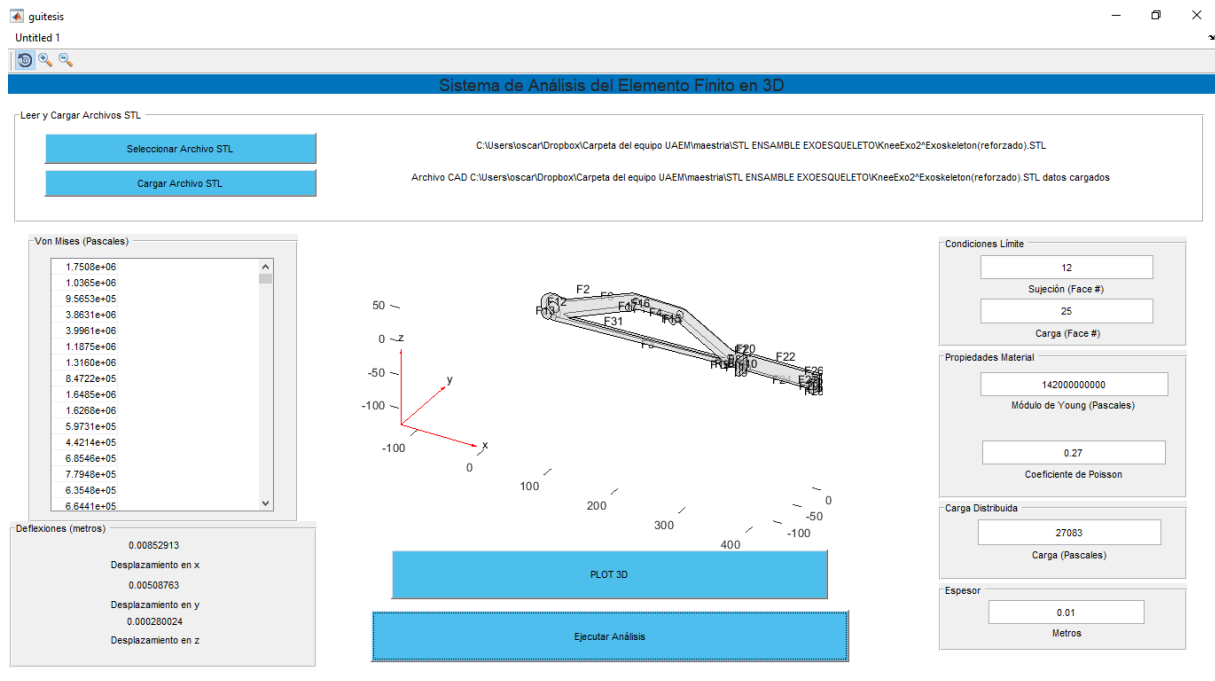


Figura 6.19. Prueba 6 en el software desarrollado para encontrar tensiones de Von Mises.

En la Figura 6.19, se puede observar a la izquierda de la imagen el listado de los datos obtenidos, en la parte central el modelo a evaluar en este caso es la pieza C, en la parte derecha de la imagen se agregan las condiciones de frontera. En la pieza C nótese que la cara de carga es aquella que recibe la fuerza constante, por un lado, la cara de sujeción es la parte que une la siguiente parte en el compendio de todas las partes a evaluar, como se ve Figura 6.20 y 6.21.

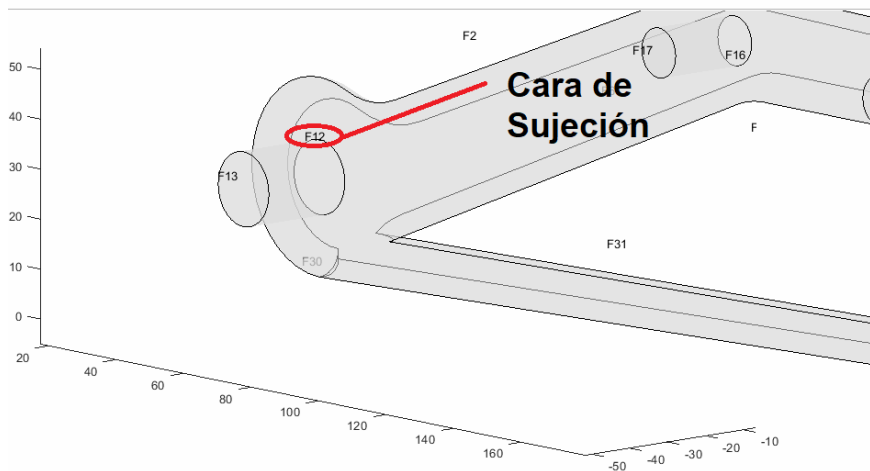


Figura 6.20. Cara de sujeción de la pieza C.1 es la parte que une la siguiente pieza en el compendio de todas las partes a evaluar.

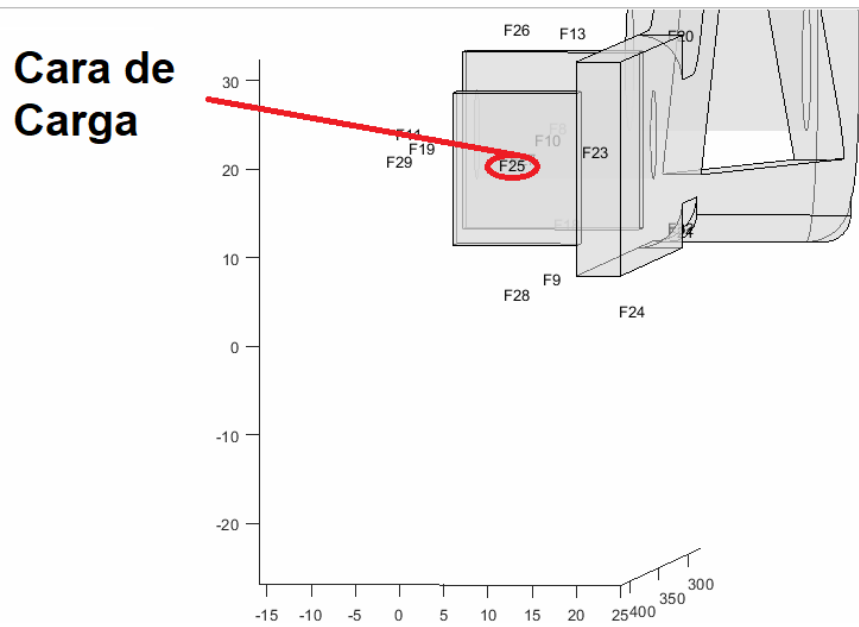


Figura 6.21. En la pieza C.1 nótese que la cara de carga es aquella que recibe la fuerza constante.

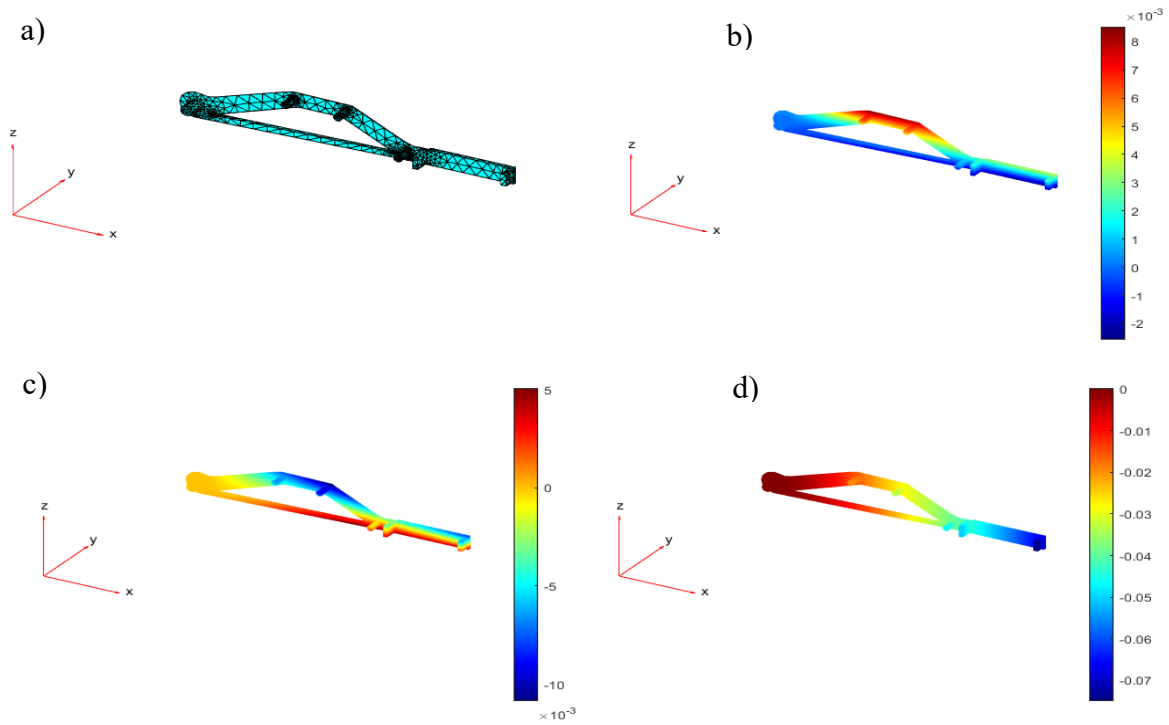


Figura 6.22. Representación de los ejes 'x', 'y' y 'z' y mallado de la pieza C.1.

En la Figura 6.22, en a) se observa el mallado de la pieza C.1, en b) se observa la tensión y compresión en el eje 'x', en c) se observa la tensión y compresión en el eje 'y', en d) se observa la tensión y compresión en el eje 'z', a la derecha se muestra la escala de color.

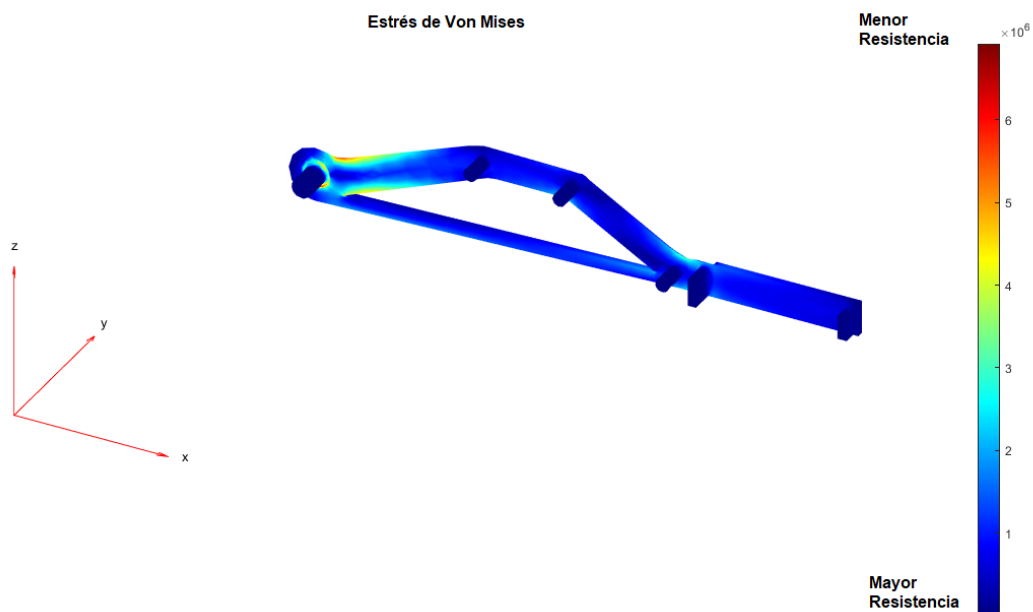


Figura 6.23. Tensión de Von Mises de la prueba 6.

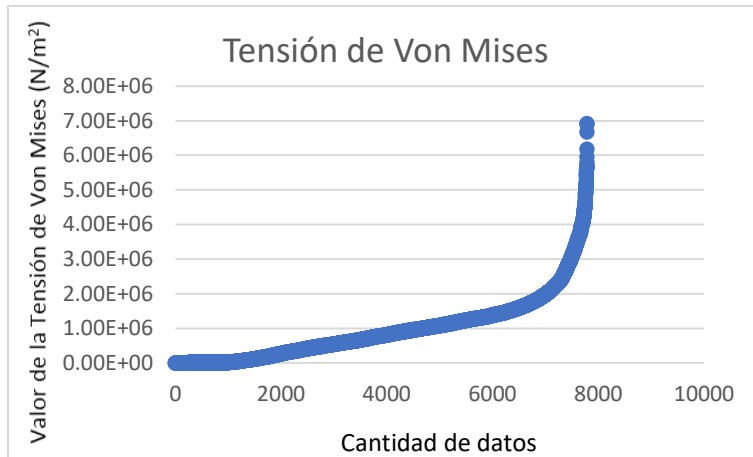


Figura 6.24. Gráfica de la Tensión de Von Mises.

En la prueba 6, se añadió una barra reforzadora en la pieza, resultando en las siguientes deflexiones de la Figura 6.24 para las deflexiones se enlistan a continuación: 'x' = 0.00852913 metros, 'y' = 0.00508763 metros y 'z' = 0.000280024 metros.

Para la tensión Von Mises los valores máximo, promedio y mínimo fueron los siguientes: Máximo = 6919943.272 Newton/metros², Promedio = 9.38 X 10⁵ Pascales, Mínimo = 2.06 X 10⁻¹² Pascales, ver Figuras 6.23 y 6.24.

Tabla 6.2. Comparación de Von Mises en prueba 5 y 6.

Pieza	Variable	Máximo (Pa)	Mínimo (Pa)	Promedio (Pa)
KneeExo2	Von Mises	7629418.609	3.18 X 10 ⁻¹²	1437395.512
KneeExo2 (reforzado)	Von Mises	6919943.272	2.06 X 10 ⁻¹²	9.38 X 10 ⁵
Diferencia		709474.89	0.000000000000112	

Pruebas y posterior refuerzo aplicadas al componente KneeExo3 ('D') del ensamblaje

Prueba 7.

Pieza: KneeExo3.stl

Condiciones Límite: Sujeción: cara #39, Carga: cara #38 distribuida uniformemente.
Propiedades del Material (Fibra de carbono): Módulo de Young: 142 GigaPascuales,
Coeficiente de Poisson: 0.27. Carga Distribuida: 198412.6984 Pascales. Espesor de la coordenada cartesiana 'z': 0.07 metros.

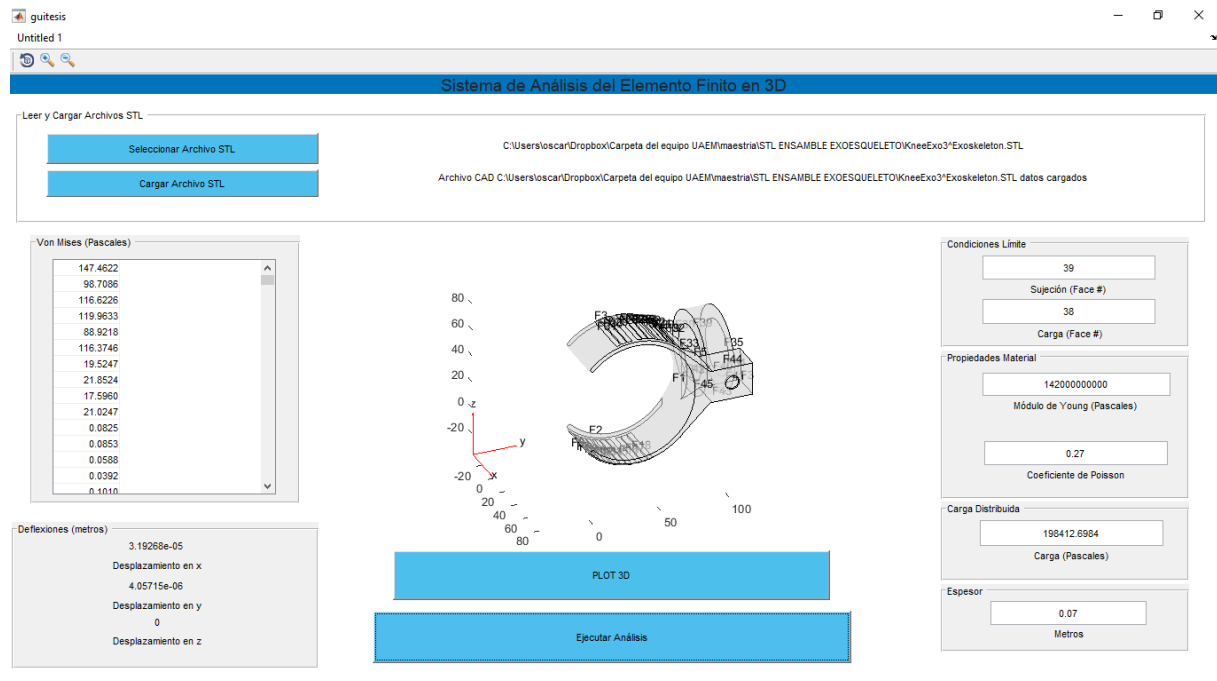


Figura 6.25. Prueba 7 en el software desarrollado para encontrar tensiones de Von Mises.

En la Figura 6.25, se puede observar a la izquierda de la imagen el listado de los datos obtenidos, en la parte central el modelo a evaluar en este caso es la pieza D, en la parte derecha de la imagen se agregan las condiciones de frontera. En la pieza D nótese que la cara de carga es aquella que recibe la fuerza constante, por un lado, la cara de sujeción es la parte que une la siguiente parte en el compendio de todas las partes a evaluar, como se ve Figura 6.26.

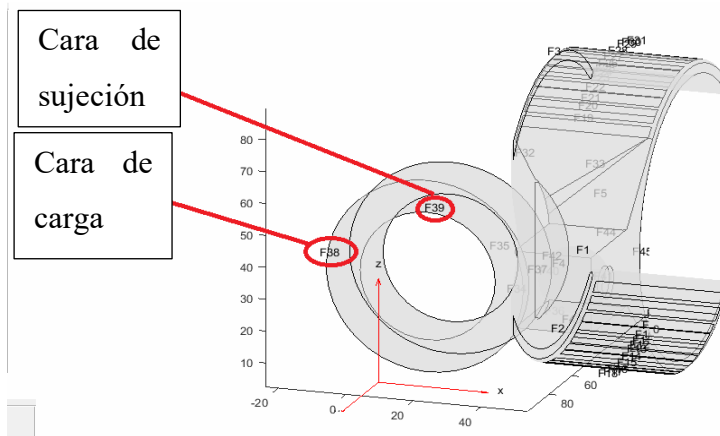


Figura 6.26. Restricciones en la prueba 7.

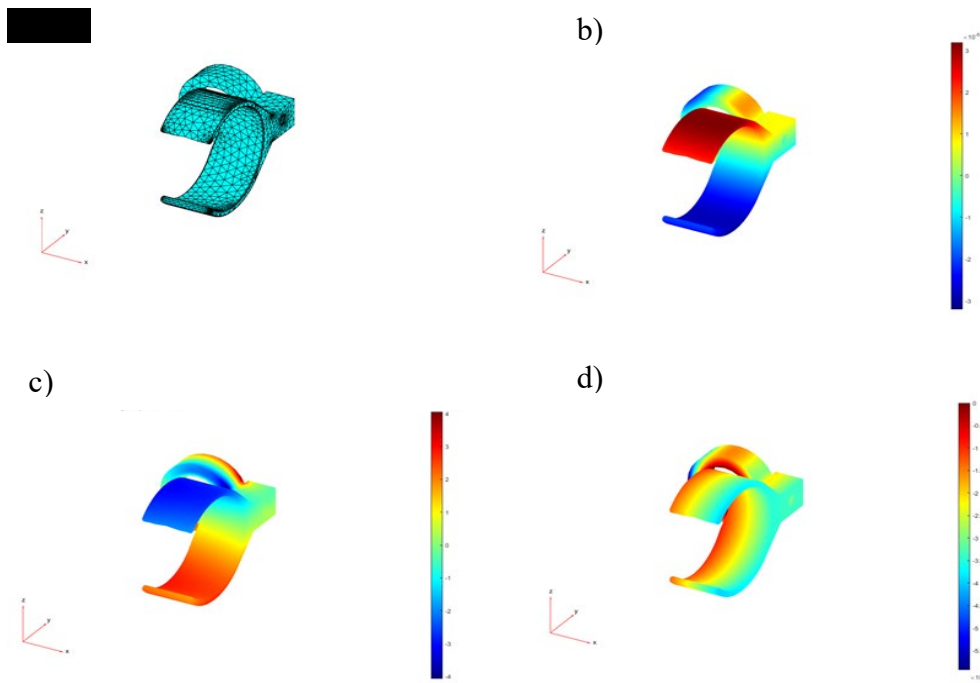


Figura 6.27. Representación en 3D de los ejes 'x', 'y' y 'z' y mallado de la pieza D.

En la Figura 6.27, en a) se observa el mallado de la pieza D, en b) se observa la tensión y compresión en el eje 'x', en c) se observa la tensión y compresión en el eje 'y', en d) se observa la tensión y compresión en el eje 'z', a la derecha se muestra la escala de color.

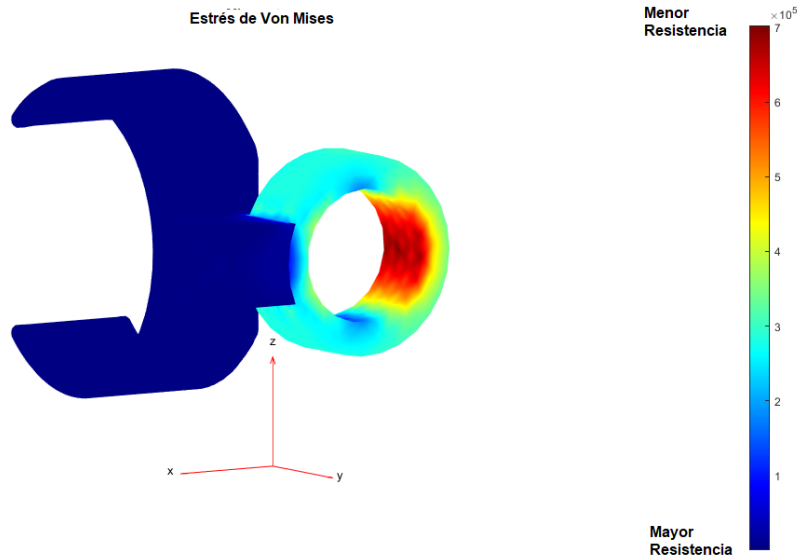


Figura 6.28. Tensión de Von Mises de la prueba 7.

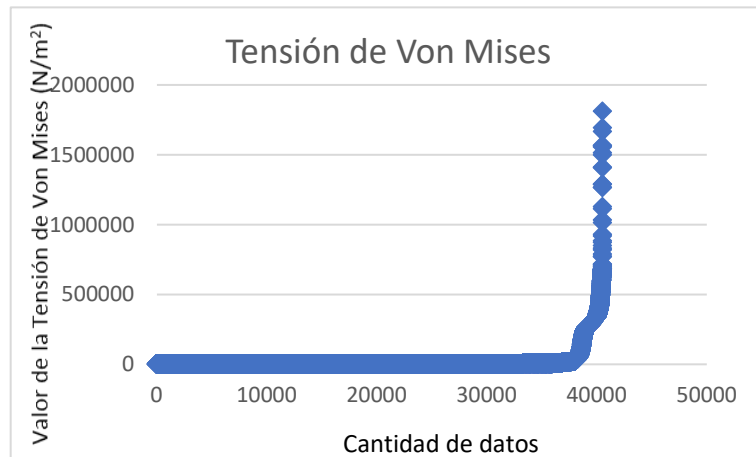


Figura 6.29. Tensión de Von Mises.

En los resultados de la prueba 7 mostrados en las deflexiones de la Figura 6.29, se observan los siguientes desplazamientos: eje 'x' = 3.19268×10^{-5} metros, eje 'y' = 4.05715×10^{-6} metros.

Para la variable Von Mises se encontraron los valores siguientes: 1809590.66 Pascales como máximo, 1809590.66 Pascales como media y 0.000166048 Pascales como mínimo, ver Figuras 6.28 y 6.29.

Prueba 8.

Pieza: KneeExo3.stl (reforzado)

Condiciones Límite: Sujeción: cara #15, Carga: cara #4 distribuida uniformemente.
Propiedades del Material (Fibra de carbono): Módulo de Young: 142 GigaPascales,
Coeficiente de Poisson: 0.27. Carga Distribuida: 198412.6984 Pascales, Espesor de la
coordenada cartesiana 'z': 0.068 metros.

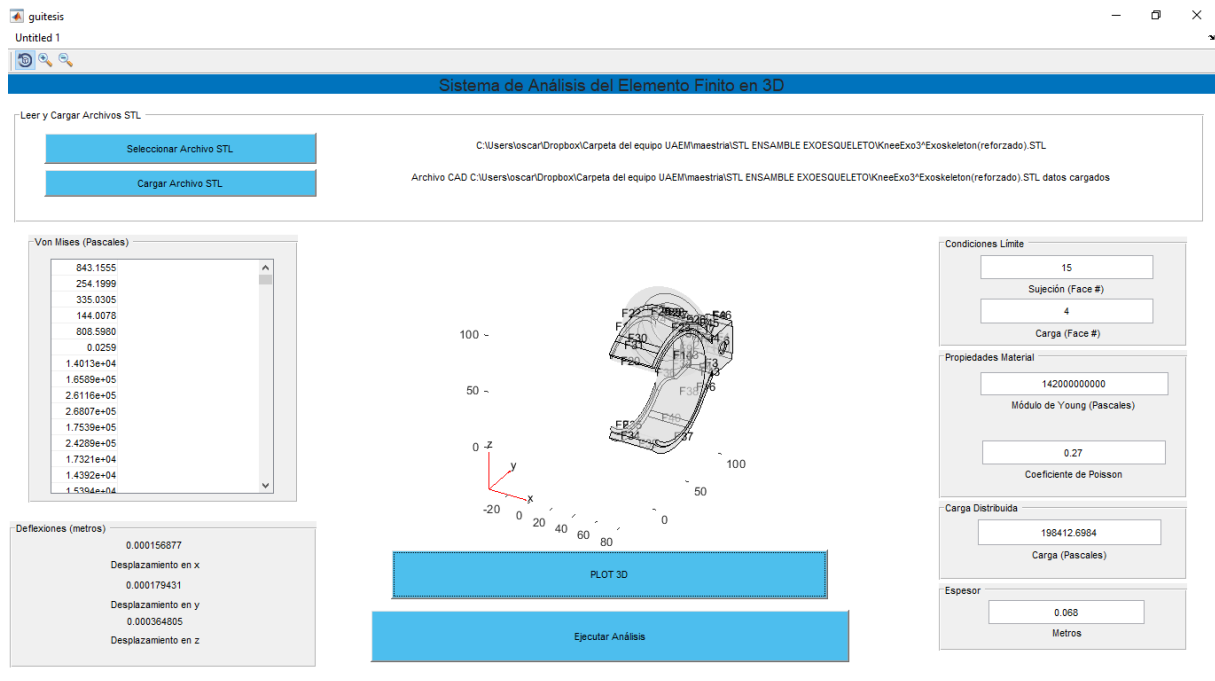


Figura 6.30. Prueba 8 en el software desarrollado para encontrar tensiones de Von Mises.

En la Figura 6.30, se puede observar a la izquierda de la imagen el listado de los datos obtenidos, en la parte central el modelo a evaluar en este caso es la pieza D.1, en la parte derecha de la imagen se agregan las condiciones de frontera. En la pieza D.1 nótese que la cara de carga es aquella que recibe la fuerza constante, por un lado, la cara de sujeción es la parte que une la siguiente parte en el compendio de todas las partes a evaluar, como se ve Figura 6.31.

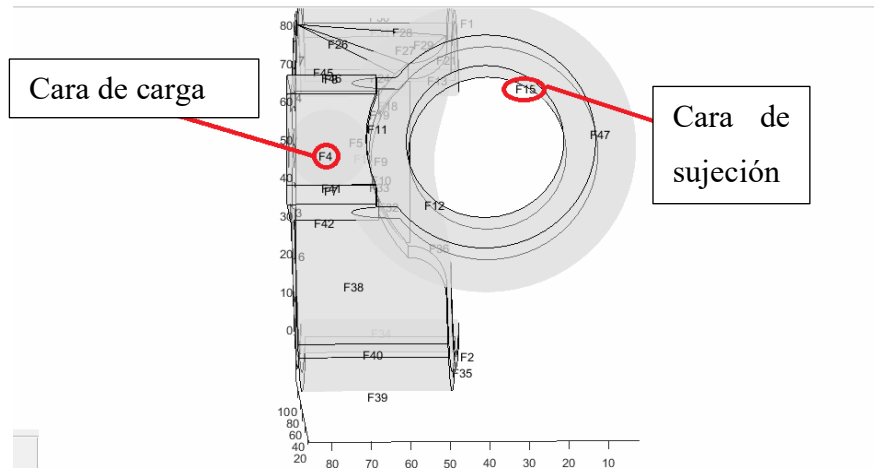


Figura 6.31. Restricciones en la prueba 8.

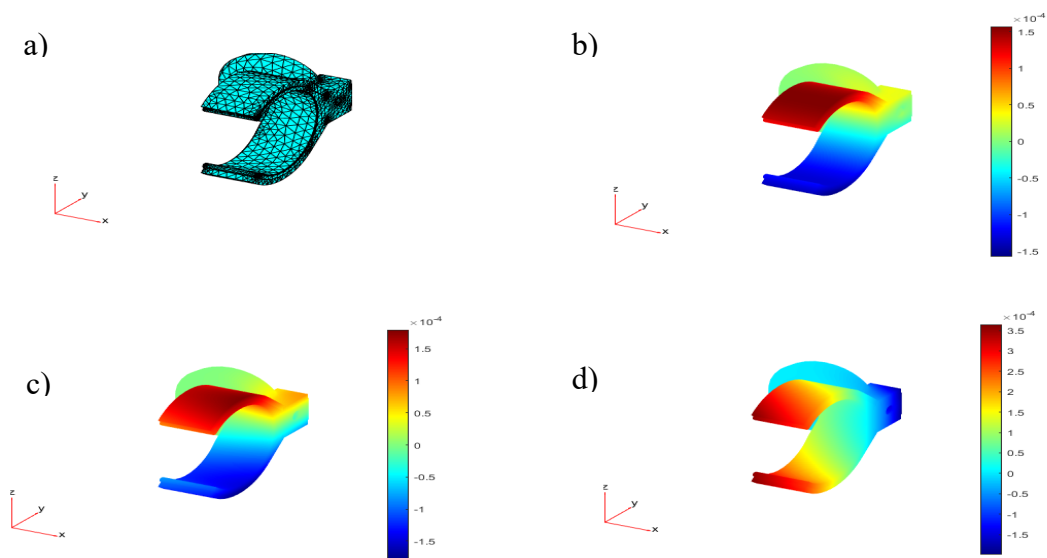


Figura 6.32. Representación en 3D de los ejes 'x', 'y' y 'z' y mallado de la pieza D.1.

En la Figura 6.32, en a) se observa el mallado de la pieza D.1, en b) se observa la tensión y compresión en el eje 'x', en c) se observa la tensión y compresión en el eje 'y', en d) se observa la tensión y compresión en el eje 'z', a la derecha se muestra la escala de color.

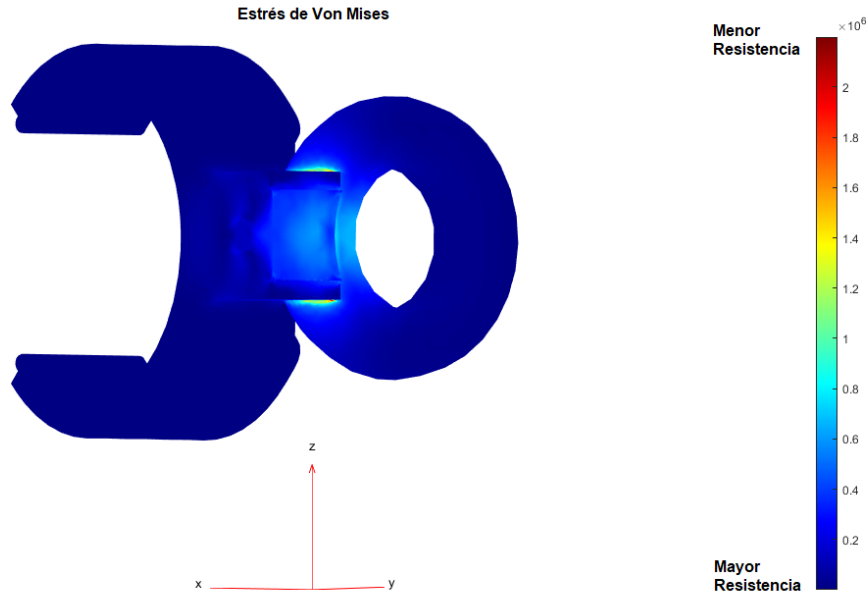


Figura 6.33. Tensión de Von Mises de la prueba 8.

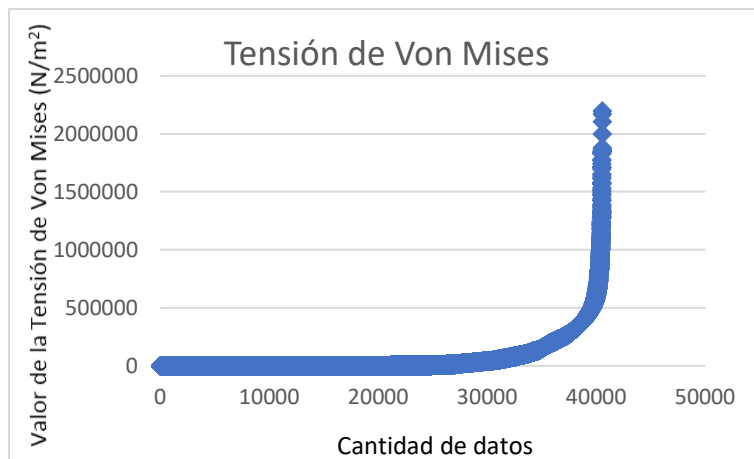


Figura 6.34. Gráfica de la Tensión de Von Mises.

Para la prueba 8, se añadió espesor en las zonas más vulnerables de la pieza, el análisis descubrió los siguientes resultados, ver deflexiones de la Figura 6.34, desplazamiento máximo en dirección 'x' = 0.000156877 metros, deflexión máxima en la dirección 'y' = 0.000179431 metros y deformación máxima en dirección 'z' = 0.000364805 metros.

En la variable Von Mises se encontró el siguiente resumen de los datos resultantes en la prueba: 2198660.102 Pascales como máximo, 2198660.102 Pascales como media y

0.003259983 Pascales como mínimo, ver Figuras 6.33 y 6.34, se muestra una disminución en valores críticos en la escala de colores.

Tabla 6.3. Comparación de resultados en pruebas 7 y 8.

Pieza	Variable	Máximo (Pa)	Mínimo (Pa)	Promedio (Pa)
KneeExo3	Von Mises	1809590.66	0.000166048	1809590.66
KneeExo3 (reforzado)	Von Mises	2198660.102	0.003259983	2198660.102
Diferencia		389069.442	0.0030939	

Pruebas y posterior refuerzo aplicadas al componente TighExo1 ('E') del ensamblaje

Prueba 9. Pieza: TighExo1.stl

Condiciones Límite: Sujeción: cara #24, Carga: cara #2 distribuida uniformemente.
Propiedades del Material (Fibra de carbono): Módulo de Young: 142 GigaPascales,
Coeficiente de Poisson: 0.27. Carga Distribuida: 81822.7593 Pascales. Espesor de la
coordenada cartesiana 'z': 0.05 metros.

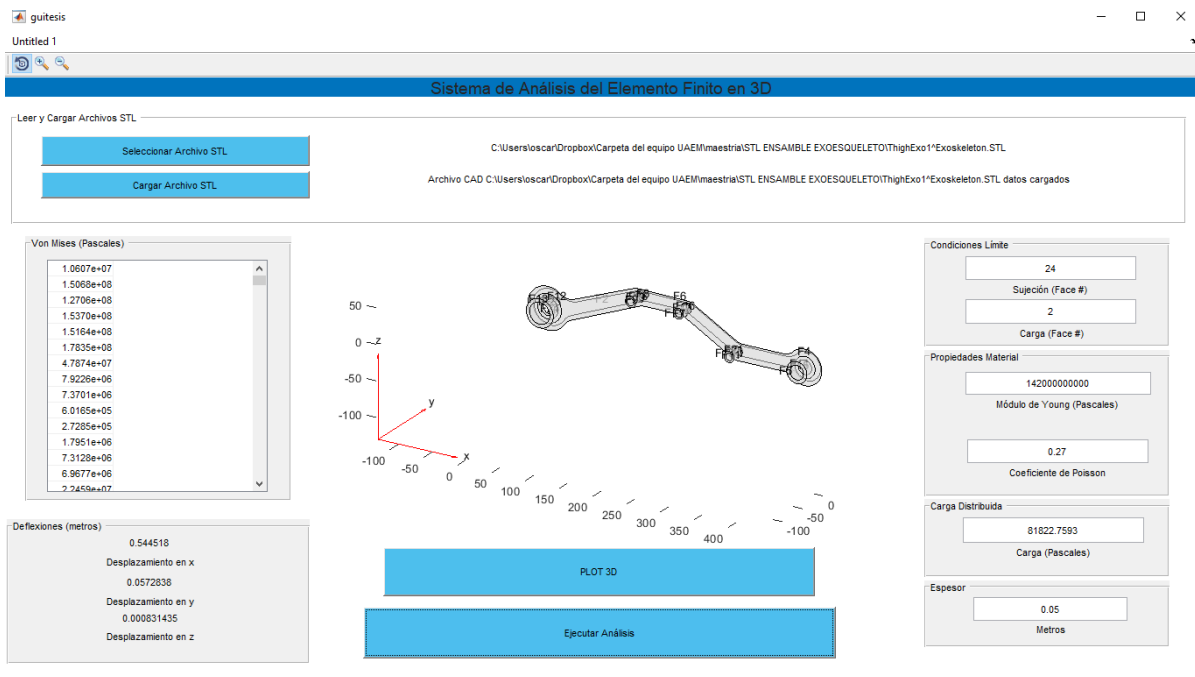


Figura 6.35. Prueba 9 en el software desarrollado para encontrar tensiones de Von Mises.

En la Figura 6.35, se puede observar a la izquierda de la imagen el listado de los datos obtenidos, en la parte central el modelo a evaluar en este caso es la pieza E, en la parte derecha de la imagen se agregan las condiciones de frontera.

En la pieza E nótese que la cara de carga es aquella que recibe la fuerza constante, por un lado, la cara de sujeción es la parte que une la siguiente parte en el compendio de todas las partes a evaluar, como se ve Figura 6.36.

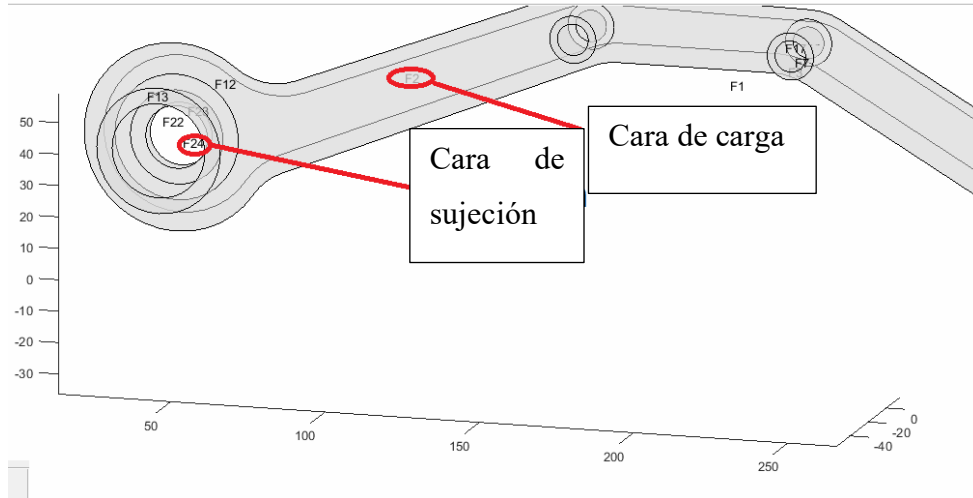


Figura 6.36. Restricciones en la prueba 9.

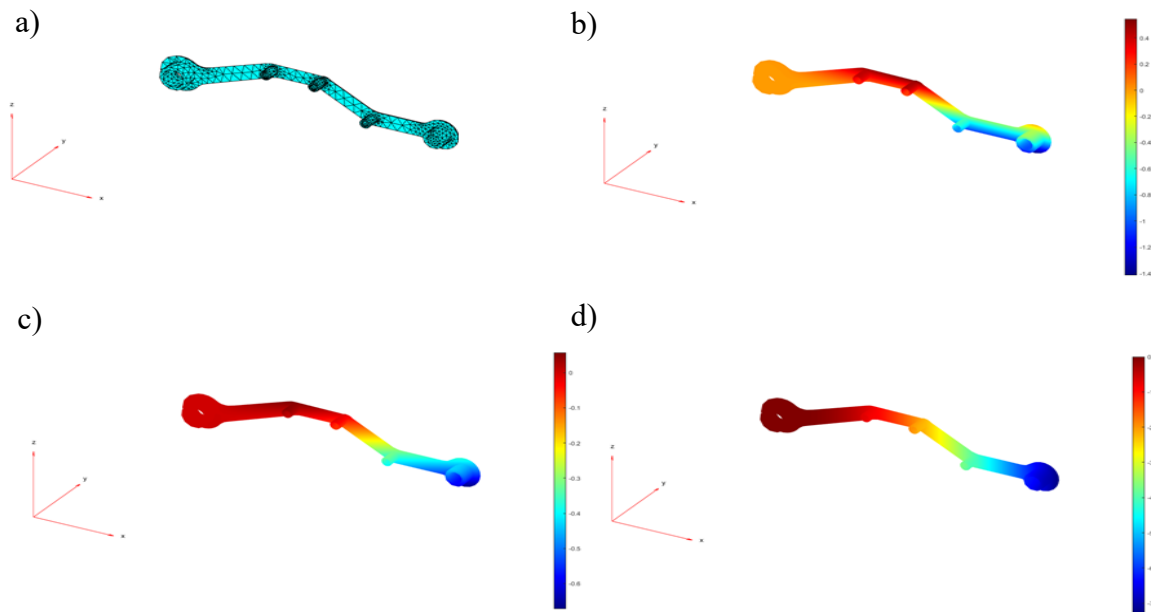


Figura 6.37. Representación en 3D de los ejes 'x', 'y' y 'z' y mallado de la Pieza E.

En la Figura 6.37, en a) se observa el mallado de la pieza E, en b) se observa la tensión y compresión en el eje 'x', en c) se observa la tensión y compresión en el eje 'y', en d) se observa la tensión y compresión en el eje 'z', a la derecha se muestra la escala de color.

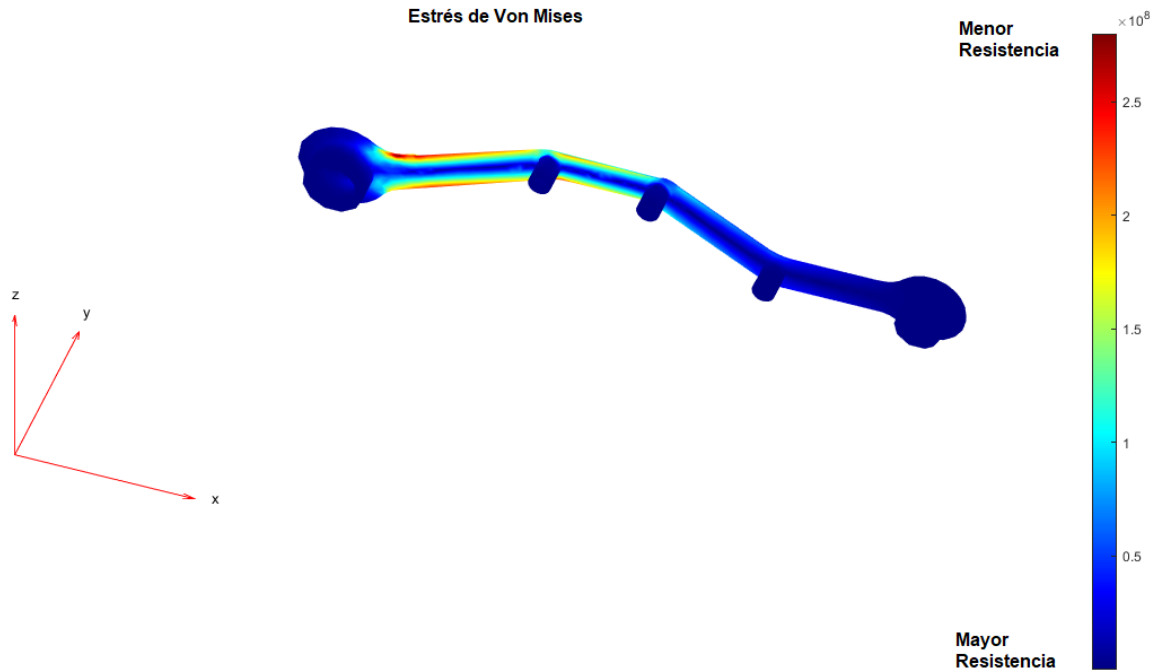


Figura 6.38. Tensión de Von Mises de la prueba 9.

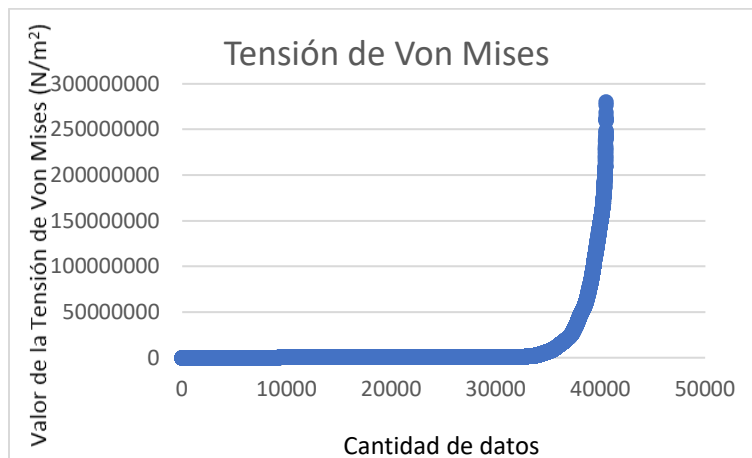


Figura 6.39. Gráfica de las Tensiones de Von Mises.

En la prueba 9, se obtuvieron los siguientes valores máximos en los desplazamientos ver Figura 6.37, 'x' = 0.544518 metros, 'y' = 0.0572838 metros y 'z' = 0.000831435 metros.

Para los valores máximo, media y mínimo de la variable Von Mises se hallaron los siguientes resultados: 280031027.7 Pascales Max, 280031027.7 Pascales Media y 0.003259983 Pascales Min. Ver Figuras 6.38 y 6.39.

Prueba 10.

Pieza: TighExo1.stl (reforzado)

Condiciones Límite: Sujeción: cara #26, Carga: cara #6 distribuida uniformemente, Propiedades del Material (Fibra de carbono): Módulo de Young: 142 GigaPascales, Coeficiente de Poisson: 0.27, Carga Distribuida: 42325.97 Pascales, Espesor de la coordenada cartesiana 'z': 0.05 metros.

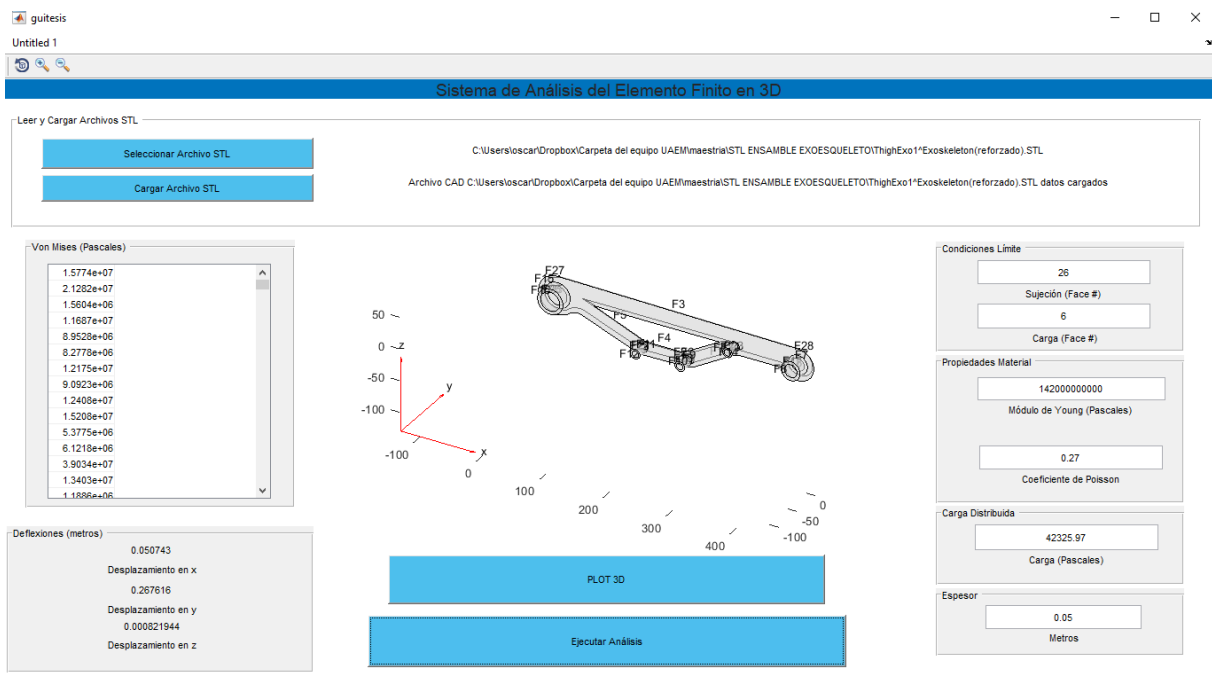


Figura 6.40. Prueba 10 en el software desarrollado para encontrar tensiones de Von Mises.

En la Figura 6.40, se puede observar a la izquierda de la imagen el listado de los datos obtenidos, en la parte central el modelo a evaluar en este caso es la pieza E.1, en la parte derecha de la imagen se agregan las condiciones de frontera. En la pieza E.1 nótese que la cara de carga es aquella que recibe la fuerza constante, por un lado, la cara de sujeción es la parte que une la siguiente parte en el compendio de todas las partes a evaluar, como se ve Figura 6.41 y 6.42.

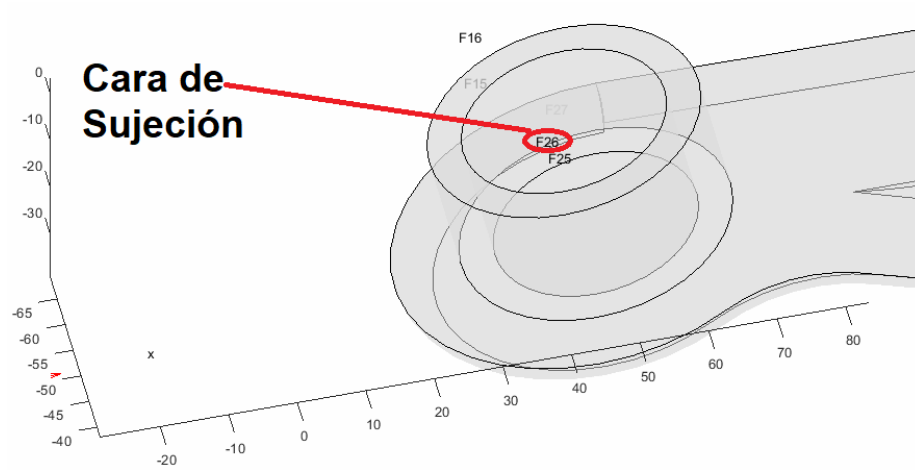


Figura 6.41. Cara de sujeción de la pieza E.1 es la parte que une la siguiente pieza en el compendio de todas las partes a evaluar.

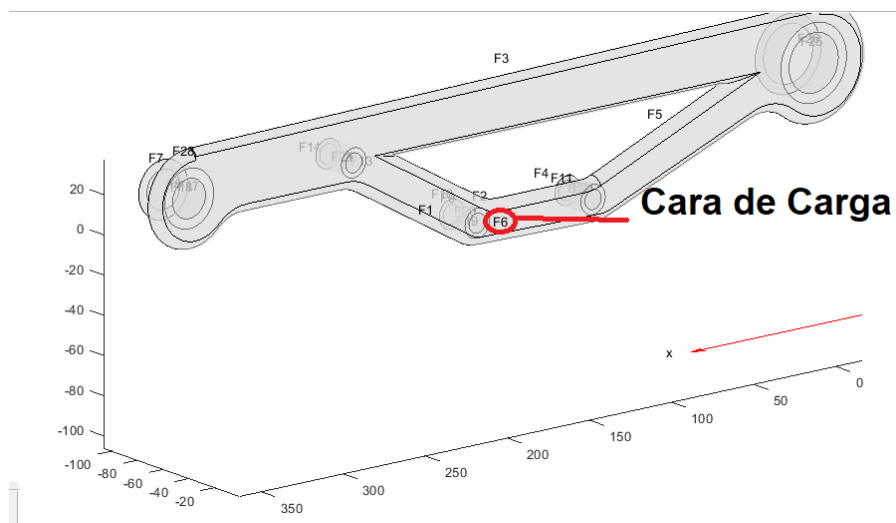


Figura 6.42. En la pieza E.1 nótese que la cara de carga es aquella que recibe la fuerza constante.

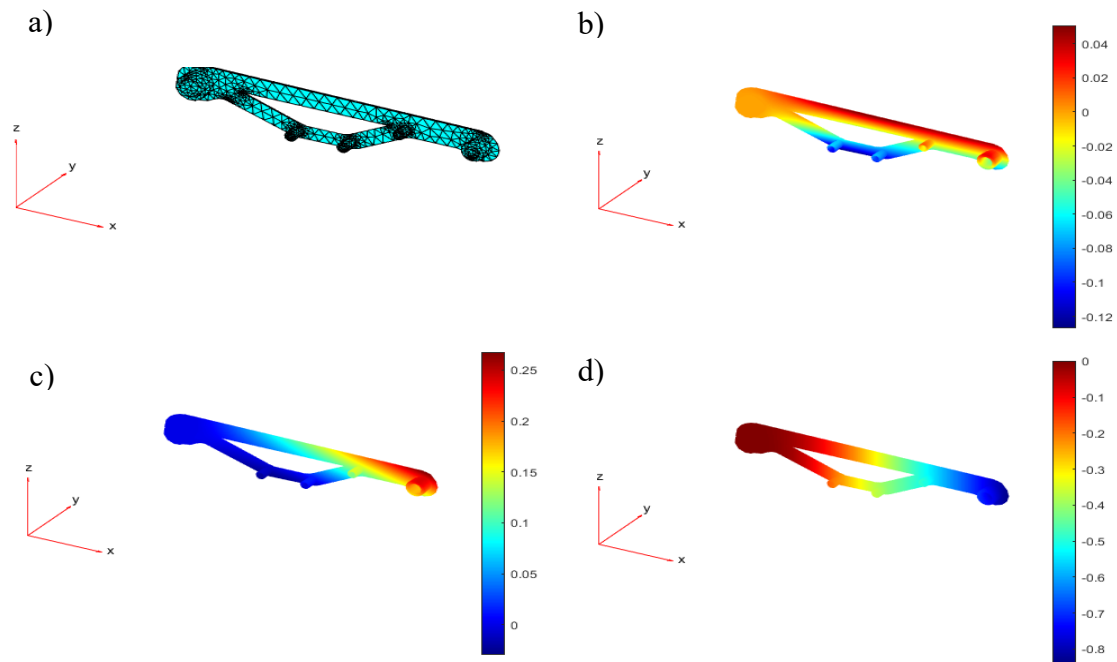


Figura 6.43. Representación de los ejes 'x', 'y' y 'z' y mallado de la pieza E.1.

En la Figura 6.43, en a) se observa el mallado de la pieza E.1, en b) se observa la tensión y compresión en el eje 'x', en c) se observa la tensión y compresión en el eje 'y', en d) se observa la tensión y compresión en el eje 'z', a la derecha se muestra la escala de color.

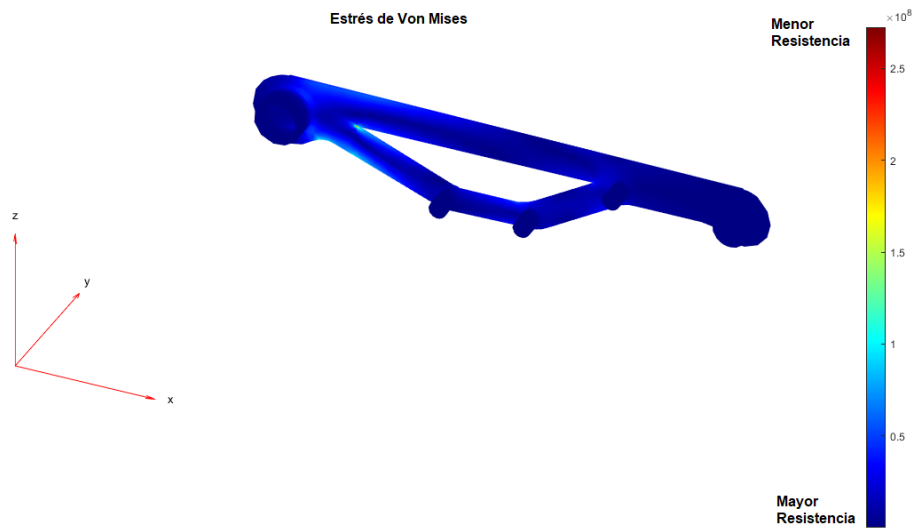


Figura 6.44. Tensiones de Von Mises de la prueba 10.

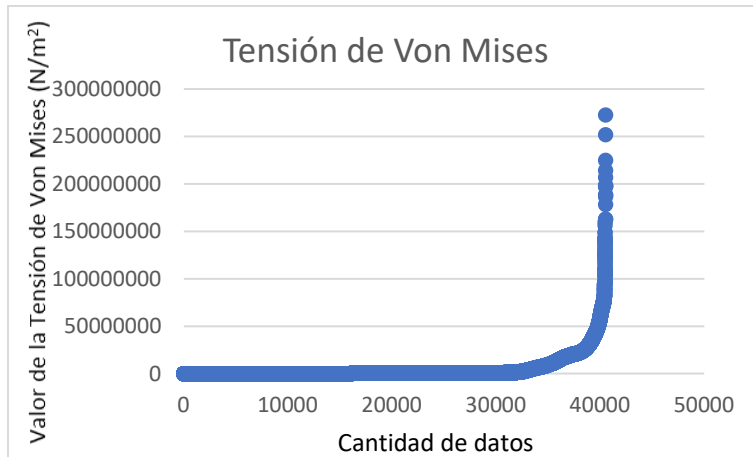


Figura 6.45. Gráfica de la tensión de Von Mises.

Para la prueba 10, se reforzó mediante un travesaño, evitando generar nodos con valor alto de la tensión de Von Mises y en las otras medidas, por lo que se obtuvieron los siguientes valores máximos en deflexiones de la Figura 6.44: 'x' = 0.050743 metros, 'y' = 0.267616 metros y 'z' = 0.000821944 metros.

Por su parte la variable Von Mises resulto ser de valor máximo = 272431717.4 Pascales, el valor medio = 272431717.4 Pascales y el valor mínimo = 0.003259983 Pascales. Ver Figuras 6.44 y 6.45.

Tabla 6.4. Comparación de las 2 pruebas 9 y 10.

Pieza	Variable	Máximo (Pa)	Mínimo (Pa)	Promedio (Pa)
ThighExo1	Von Mises	280031027.7	0.003259983	280031027.7
ThighExo1 (reforzado)	Von Mises	272431717.4	0.003259983	272431717.4
Diferencia		7599310.3	0	

Pruebas aplicadas al componente TighExo2 ('F') del ensamblaje

Prueba 11.

Pieza: TighExo2.stl

Condiciones Límite: Sujeción: cara #9, Carga: cara #1 distribuida uniformemente. Propiedades del Material (Fibra de carbono): Módulo de Young: 142 GigaPascales, Coeficiente de Poisson: 0.27. Carga Distribuida: 104468.3525 Pascales. Espesor de la coordenada cartesiana 'z': 0.05 metros

Figura 6.46. Prueba 11 en el software desarrollado para encontrar tensiones de Von Mises.

En la Figura 6.46, se puede observar a la izquierda de la imagen el listado de los datos obtenidos, en la parte central el modelo a evaluar en este caso es la pieza F, en la parte derecha de la imagen se agregan las condiciones de frontera.

En la pieza F nótese que la cara de carga es aquella que recibe la fuerza constante, por un lado, la cara de sujeción es la parte que une la siguiente parte en el compendio de todas las partes a evaluar, como se ve Figura 6.47.

Figura 6.47. Condiciones de frontera para la prueba 11.



b)

c)

d)

Figura 6.48. Representación de los ejes 'x', 'y' y 'z' y mallado de la pieza F.

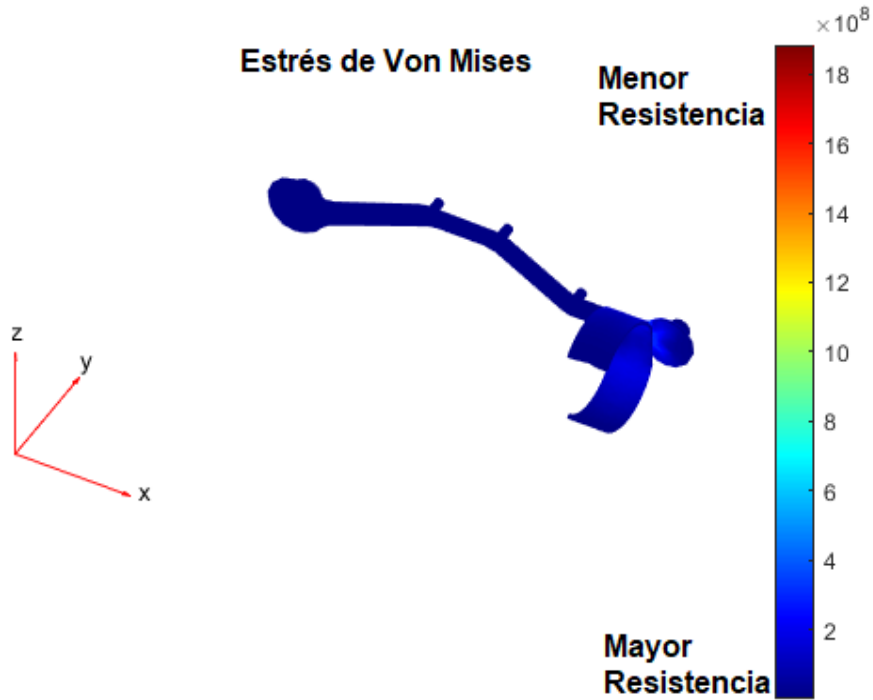


Figura 6.49. Tensiones de Von Mises de la prueba 11.

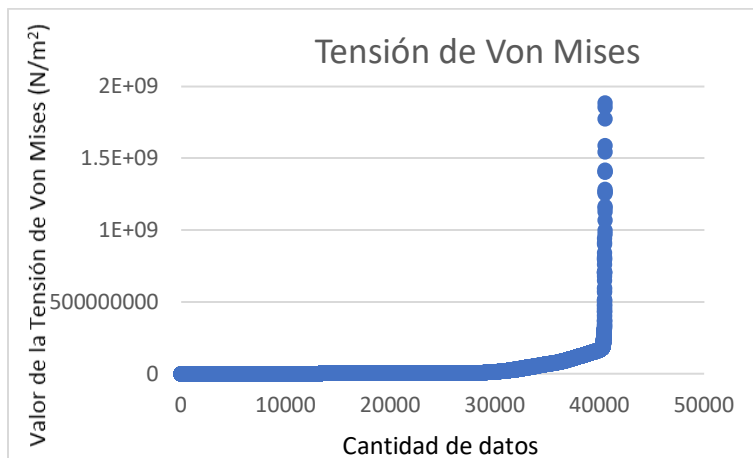


Figura 6.50. Gráfica de la Tensión de Von Mises.

Para la prueba 11, se descubrió que los valores máximos de las deformaciones se presentan a continuación: 'x' = 0.0808721 metros, 'y' = 0.933644 metros y 'z' = 0.464652 metros, ver Figura 6.48. Para la variable Von Mises, ver Figura 6.49, la prueba dio con los siguientes resultados: Máximo = 1883224658 Pascales, Promedio = 21911245.32 Pascales y Mínimo = 9.85308×10^{-9} Pascales. La prueba presento resultados que confirmaron que el componente resistirá la carga aplicada uniformemente sin presentar deformaciones profundas. Por lo

tanto, se mantuvo el diseño original de la pieza y no se requirió de la elaboración de un refuerzo en la pieza.

Prototipo final del equipo modelados en entornos de diseño CAD



Figura 6.51. Renderización del prototipo.



Figura 6.52. Expectativa del prototipo desarrollado.

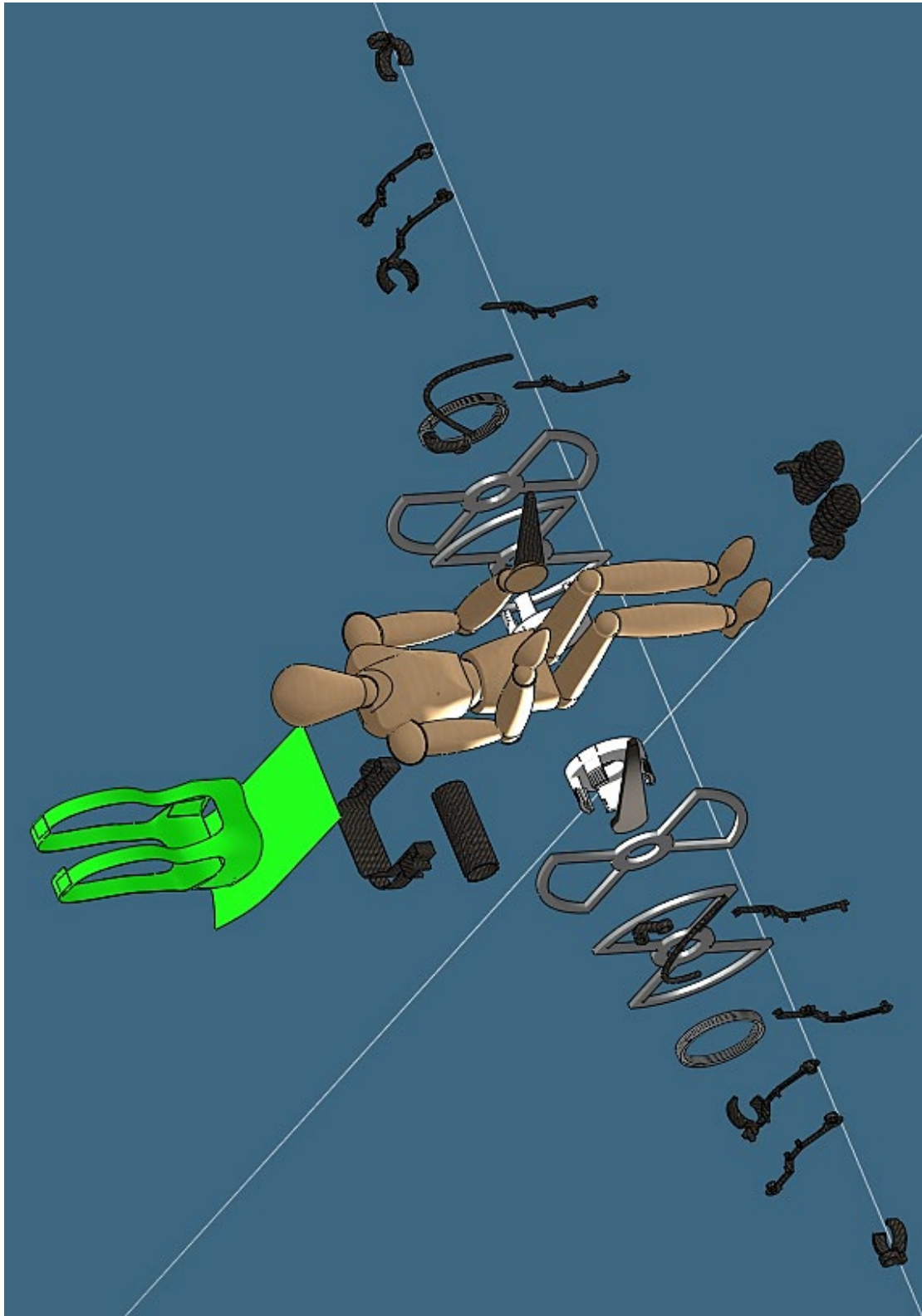


Figura 6.53. Vista explosionada hecha con 3D Experience.

