



*Diseño y validación de una máquina para ensayos a tracción de probetas de resinas poliméricas impresas en 3D*

*Design and validation of a machine for tensile testing of 3D printed polymer resin specimens*

*Projeto e validação de uma máquina para testes de tração de amostras de resina polimérica impressas em 3D*

Jorge Sebastian Buñay Guaman <sup>I</sup>  
[jorge.bunay@esPOCH.edu.ec](mailto:jorge.bunay@esPOCH.edu.ec)  
<https://orcid.org/0000-0001-6963-0383>

Jorge Isaias Caicedo Reyes <sup>II</sup>  
[isaias.caicedo@esPOCH.edu.ec](mailto:isaias.caicedo@esPOCH.edu.ec)  
<https://orcid.org/0000-0001-9875-6348>

Luis Santiago Choto Chariguaman <sup>III</sup>  
[lchoto@esPOCH.edu.ec](mailto:lchoto@esPOCH.edu.ec)  
<https://orcid.org/0000-0003-2499-3337>

Steven Jose Cevallos Silva <sup>IV</sup>  
[theanubis28@gmail.com](mailto:theanubis28@gmail.com)  
<https://orcid.org/0000-0003-4925-4506>

**Correspondencia:** [jorge.bunay@esPOCH.edu.ec](mailto:jorge.bunay@esPOCH.edu.ec)

Ciencias Técnica y Aplicadas  
Artículo de Investigación

\* **Recibido:** 23 de mayo de 2023 \* **Aceptado:** 12 de junio de 2023 \* **Publicado:** 11 de julio de 2023

- I. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Mecánica. Riobamba, Ecuador.
- II. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Mecánica. Riobamba, Ecuador.
- III. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Mecánica. Riobamba, Ecuador.
- IV. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Mecánica. Riobamba, Ecuador.



## Resumen

El presente proyecto técnico tuvo como objetivo presentar el diseño y validación de una máquina para ensayos a tracción de probetas de resinas poliméricas impresas en 3D. El compendio de material bibliográfico permitió presentar los principales parámetros de diseño, con una capacidad máxima establecida de 10 kN y un desplazamiento de 305 mm. Se empleó la metodología del diseño concurrente ocasionando la descomposición de cada una de las posibles alternativas mediante la aplicación que pertenece al procedimiento de despliegue de la función de calidad QFD. El sistema de sujeción de probetas mediante la selección de mordazas manuales tipo cuña con capacidad de 5 kN. El sistema de conversión de carga con buena precisión y repetibilidad de tipo Xforce HP Load Cell. La medición de cuanto varia la extensión de las probetas sometidas a prueba mediante el dispositivo Clip on Extensometer 5025-1. La pantalla de un computador donde permite la visualización de resultados. Los componentes mecánicos se diseñaron mediante cálculo analítico por resistencia mecánica y rigidez, integrando la modelación en el programa SolidWorks y la aplicación del método de elementos finitos en el programa ANSYS, el cuál facilitó la validación de los valores obtenidos en el cómputo de diseño. Se realizaron cinco ensayos sobre las probetas de resina ingenieril con la geometría que establece la norma ASTM D 638 para la determinación de las principales propiedades de tracción en materiales poliméricos con un esfuerzo ultimo de tracción equivalente a 48,561 MPa. El análisis del tipo de fractura corrobora si el material presenta un comportamiento frágil o dúctil. La simulación estática de la máquina permitió verificar que es un diseño funcional y confiable.

**Palabras Clave:** Rigidez; Software; Máquina A Tracción; Ensayo de Tracción; Resina Ingenieril.

## Abstract

The objective of this technical project was to present the design and validation of a machine for tensile testing of 3D printed polymeric resin specimens. The compendium of bibliographic material made it possible to present the main design parameters, with an established maximum capacity of 10 kN and a displacement of 305 mm. The concurrent design methodology was used, causing the decomposition of each of the possible alternatives through the application that belongs to the deployment procedure of the QFD quality function. The specimen clamping system through the selection of wedge-type manual clamps with a capacity of 5 kN. The load conversion system with

good accuracy and repeatability of the Xforce HP Load Cell type. The measurement of how much the extension of the specimens under test varies by means of the Clip on Extensometer 5025-1 device. The screen of a computer where it allows the visualization of results. The mechanical components were designed by means of analytical calculation for mechanical resistance and rigidity, integrating the modeling in the SolidWorks program and the application of the finite element method in the ANSYS program, which facilitated the validation of the values obtained in the design computation. Five tests were carried out on the engineering resin specimens with the geometry established by the ASTM D 638 standard for the determination of the main tensile properties in polymeric materials with an ultimate tensile stress equivalent to 48,561 MPa. The analysis of the type of fracture corroborates if the material presents a brittle or ductile behavior. The static simulation of the machine allowed to verify that it is a functional and reliable design.

**Keywords:** Rigidity; Software; Traction Machine; Tensile test; Engineering Resin.

## Resumo

O objetivo deste projeto técnico foi apresentar o projeto e validação de uma máquina para ensaios de tração de corpos de prova de resina polimérica impressos em 3D. O compêndio de material bibliográfico permitiu apresentar os principais parâmetros de projeto, com capacidade máxima estabelecida de 10 kN e deslocamento de 305 mm. Foi utilizada a metodologia de design concorrente, provocando a decomposição de cada uma das alternativas possíveis através da aplicação pertencente ao procedimento de implantação da função qualidade do QFD. O sistema de fixação do corpo de prova através da seleção de grampos manuais tipo cunha com capacidade de 5 kN. O sistema de conversão de carga com boa precisão e repetibilidade do tipo Xforce HP Load Cell. A medição de quanto varia a extensão dos corpos de prova sob teste por meio do aparelho Clip on Extensometer 5025-1. A tela de um computador onde permite a visualização dos resultados. Os componentes mecânicos foram projetados por meio de cálculo analítico de resistência mecânica e rigidez, integrando a modelagem no programa SolidWorks e a aplicação do método dos elementos finitos no programa ANSYS, o que facilitou a validação dos valores obtidos no cálculo do projeto. Cinco ensaios foram realizados em corpos de prova de resina de engenharia com a geometria estabelecida pela norma ASTM D 638 para a determinação das principais propriedades de tração em materiais poliméricos com tensão de ruptura de tração equivalente a 48.561 MPa. A

análise do tipo de fratura corrobora se o material apresenta comportamento frágil ou dúctil. A simulação estática da máquina permitiu verificar que se trata de um projeto funcional e confiável.

**Palavras-chave:** Rigidez; Programas; Máquina de Tração; Teste de tração; resina de engenharia.

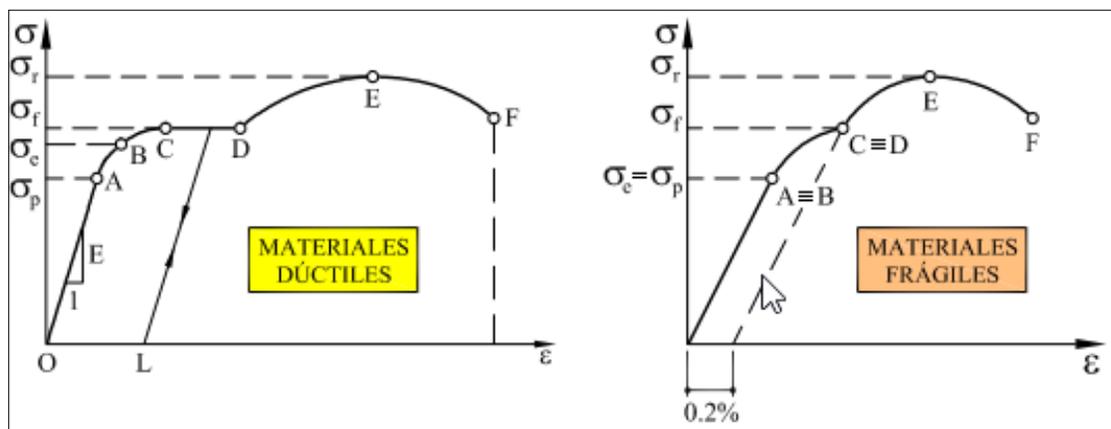
## Introducción

- **Ensayos de tracción en polímeros**

Los ensayos de tracción sobre polímeros son realizados con la finalidad de estudiar las propiedades mecánicas que constantemente se ven mejoradas mediante experimentación sobre compuestos poliméricos, de forma que, proporcionen información exacta sobre la resistencia y la tenacidad de éstos. Los polímeros permiten la creación de elementos de gran resistencia mecánica, a temperatura, dúctiles y ligeros, como la fibra de carbono. La aplicación de este tipo de ensayos se centra natural y específicamente sobre la determinación de los esfuerzos y la matriz termoestable (Nava *et al.*, (2018).

- **Diagrama esfuerzo – deformación unitaria**

Los resultados de las deformaciones unitarias axiales, correspondientes al promedio de  $E$ , es dividido por el estiramiento resultante  $\delta$  y de acuerdo con la longitud de calibración. Posteriormente, se realiza el mencionado diagrama, el cual refleja la capacidad del material según las propiedades mecánicas que posee, además del comportamiento al interactuar con cargas. La gráfica inicia con el señalamiento de una línea trazada y proporcional entre los esfuerzos generados, desde un origen hasta un punto A, correspondiente al límite de proporcionalidad, dichos puntos interrelacionan los esfuerzos y la deformación unitaria resultante (Análisis teórico-práctico de esfuerzos y por elementos finitos de un ensayo de tracción, 2018 págs. 42-55).



**Ilustración 1.** Curvas tensión - deformación para materiales: a) dúctiles y b) frágiles.

**Fuente:** (Ruiz, y otros, 2015)

- **Ensayos de tracción en resinas poliméricas de acuerdo con la norma ASTM D 638**

De acuerdo con Pérez et al., (2021 págs. 1-6), uno de los ensayos más practicados en el mundo es el de tracción. Este ensayo da la oportunidad de generar información relacionado al comportamiento mecánico del material en tratamiento. Su funcionamiento está basado en la deformación de un material llevándolo hasta su rotura mediante la aplicación de una fuerza. La fuerza aplicada es del tipo uniaxial. Para polímeros es necesario utilizar una máquina de 50kN la misma es apta para ensayar materiales como cables, cerámicos, textiles, entre otros.

El procedimiento del ensayo consiste en aplicar una carga secuencialmente a la pieza que esta sujeta a las mordazas de la maquina universal. De esta manera podemos obtener los datos solicitados para caracterizar un material mecánicamente. En el caso de los polímeros, la norma que regula este ensayo es la ASTM D 638 (Análisis teórico-práctico de esfuerzos y por elementos finitos de un ensayo de tracción, 2018 págs. 42-55).

- **Proceso de impresión 3D para resinas poliméricas**

La principal tecnología de impresión 3D de polímeros más utilizada es la impresión 3D de modelado por deposición fundida (FDM): este tipo de impresión construyen piezas al derretir y extrudir un filamento termoplástico que un extrusor deposita capa por capa en el área de impresión (Aplicaciones biomédicas actuales de la impresión 3D y fabricación aditiva, 2020 págs. 23-34).

- **Estereolitografía**

La fabricación de piezas o prototipos funcionales con un buen acabado superficial que son totalmente adaptables y personalizadas sin la necesidad de utilizar moldes se ha hecho a cabo gracias a la tecnología 3D de estereolitografía o también llamado SLA.

La estereolitografía (SLA) es un tipo de fabricación 3D que usa un láser de luz ultravioleta para fusionar y unir pequeñas partículas de resina foto curables, capa a capa, hasta finalizar la estructura tridimensional. Dependiendo de la geometría, puede ser necesario la impresión de material soporte para evitar que se colapse el diseño durante su fabricación. Este, se elimina posteriormente una vez acabada la pieza. Para ciertas resinas técnicas, las piezas impresas son sometidas a un post-curado ultravioleta para mejorar sus propiedades mecánicas y térmicas. (Solutions, 2019)

- **Tipos de resinas para ensayos a tracción**

- La resina estándar es la resina más común utilizada para crear prototipos que se imprimen rápidamente en impresoras 3D de plástico. Se trata de plásticos muy genéricos, ya que suelen ser utilizados por muchos usuarios diferentes para iniciarse en el mundo de la impresión 3D de plásticos, entre cuyas propiedades se encuentran: 50 - 65 MPa respecto al módulo de tracción, resistencia a bajas temperaturas, alargamiento y rotura limitada.
- Los plásticos industriales rígidos continúan desarrollándose conforme avanza la tecnología, ya que los plásticos previos tienen una alta fragilidad y malas propiedades mecánicas y térmicas. Por esta razón, la impresión 3D de resina no se ha utilizado mucho en áreas industriales como la fabricación de componentes, incluso en joyería, entre cuyas propiedades se encuentran: 35 - 55 MPa respecto al módulo de tracción, resistencia a bajas y medias temperaturas, alargamiento muy deficiente y presencia de rotura prematura debido a que se trata de un material rígido.
- The Special Engineering Resin es un material de características idóneas para aplicaciones ingenieriles, el cual resalta por la gran resistencia y rigidez ofrecida, entre cuyas propiedades se encuentran: 60 - 75 MPa respecto al módulo de tracción, resistencia a altas temperaturas, y mejora amplia de la resistencia a la flexión, alargamiento y rotura, además, es capaz de admitir resoluciones de 100 y 50 micras, en comparación con el resto de las resinas comerciales para tales fines, cabe mencionar que se debe tener en cuidado en el momento de la manipulación ya que resulta ser tóxica.

### #4 Special Engineering Resin

- Viscosity (@25°C): 430±30cps
- Liquid Density (@25°C): 1.05~1.25g/cm³
- Bending Strength: 60-85MPa
- Tensile Strength: 60-75MPa
- Hardness (Shore): 85D
- Wavelength: 405nm
- Volume Shrinkage: 2.0~2.4%
- Elongation: 105~110%
- Resistance: 150°C
- Best Printing Temperature: 25~28°C
- Storage Temperature: 5~30°C

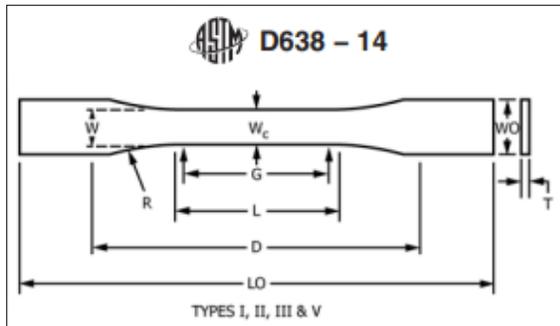


**Ilustración 2.** Propiedades de la resina ingenieril.

**Fuente:** (Filament2print, 2022).

- **Clase de probetas de resina según norma ASTM D - 638**

Según la norma ASTM D 638 (*Standard test Method for Tensile Properties of Plastics*), la caracterización de las probetas utilizadas en los ensayos de tracción de origen resinoso, guardan configuración en forma de hueso de perro o de forma recta, dependiendo del tipo de compuesto o el grosor de la muestra, evidenciadas en la ilustración 8-2 (Impresión 3D con Materiales Elastoméricos, 2019 págs. 5-15).



**Ilustración 3.** Probeta para ensayo de tracción

**Fuente:** (ASTM D - 638)

Hay cinco tipos de muestras permitidas para la norma ASTM D 638 que difieren en tamaño según el grosor de la muestra y la cantidad de material disponible. Los más utilizados son los especímenes Tipo I, que tienen un espesor de 3,2 mm y generalmente se crean mediante moldeo por inyección. Las muestras de tipo I tienen una longitud total de 165 mm y un ancho de 13 mm, con una longitud de referencia de 50 mm. Las muestras planas normalmente se moldean, troquelan o mecanizan en forma de "hueso de perro" o "pesa", lo que garantiza que la rotura se produzca en el centro de la muestra y no en las áreas de sujeción. Además de las muestras planas, la norma ASTM D 638 también permite la prueba de tubos y varillas rígidos, los cuales también deben mecanizarse en forma de hueso de perro. En los casos en que el material es limitado, muchos laboratorios utilizarán especímenes Tipo IV o Tipo V. Las dimensiones requeridas para los especímenes Tipo IV son las mismas que las requeridas para el troquelado C de la norma ASTM D 412, lo que significa que se puede usar el mismo troquelado. Los especímenes tipo V son los más pequeños, con una longitud de calibre de solo 0,3 pulg.

A continuación, son señaladas las dimensiones de la probeta:

**Tabla 1.** Dimensiones según norma ASTM D 638 para probetas tipo I

Símbolo	Parámetros	Dimensiones (mm)
<i>Q</i>	Distancia total	50,0 ± 0,5
<i>L</i>	Distancia inicial de prueba	57,0 ± 0,5
<i>LO</i>	Longitud total	165
<i>D</i>	Distancia entre las posiciones anchas	86,6 ± 0,5
<i>W</i>	Longitud donde termina la curva	13,0 ± 0,5
<i>WO</i>	Altura	19,0 ± 0,5
<i>W<sub>o</sub></i>	Longitud de la parte estrecha de lados paralelos	13,0 ± 0,5
<i>T</i>	Espesor	3,2 ± 0,5
<i>H</i>	Radio	38 ± 0,1

Fuente: (ASTM D - 638)

- **Desarrollo de los ensayos de tracción de acuerdo con la norma ASTM D - 638**

Debido a que existen similitud entre el carácter de orden de procedimientos entre la instalación de las probetas y toma de datos en los laboratorios de resistencia de materiales, se plantea la siguiente progresión de pasos (Progreso de la Impresión 3D de Dispositivos Médicos, 2020 págs. 151-166):

- Medición del espesor y ancho de la probeta a intervenir.
- Verificar el ajuste de las mordazas instaladas, de manera de evitar el deslizamiento de la probeta.
- Establecer la velocidad de progresión para la tracción sobre la probeta. Normalmente la misma logra alcanzar los 0.5 a los 5 minutos luego de iniciar el ensayo.
- Asegurar las condiciones atmosféricas para la realización del ensayo, teniendo en cuenta: atmosfera del lugar a  $23 \text{ }^\circ \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $73,4 \pm 3.6 \text{ }^\circ\text{F}$ ) hasta  $50 \pm 5 \%$  respecto de la humedad relativa.
- El número de probetas a intervenir deberá regularse de acuerdo con la naturaleza isotrópica o anisotrópicas de los mismos, procurando disponer de 5 para el primer caso y 10 para el segundo.
- Registrar la deformación y cargas en cada punto, especialmente al inicio y al final al generarse la ruptura.

- Evitar la toma equivocada de información mediante la cancelación del procedimiento.

Aplicar las técnicas adecuadas para la evaluación de alternativas encamina que el diseño escogido sea el más útil, eficiente y viable.

## **Metodología**

- **Matriz Quality Function Deployment o QFD**

Es una técnica conocida como la casa de la calidad, utilizada con mayor frecuencia para perfeccionar diseños funcionales sobre máquinas o productos de ingeniería, a través de la repotenciación y actualización de aspectos técnicos de acuerdo con solicitudes de una gama clientelar (Lorenzo *et al.*, (2004).

La base fundamental de la técnica se centra en dos aspectos o variables sobre los diseños, conocidos como la voz del usuario y la voz del ingeniero, las cuales adoptan los roles de quienes realizan los movimientos financieros sobre los productos o proyectos y el grupo que determinará la actualización de las características técnicas, respectivamente (Lorenzo *et al.*, (2004).

- **Matriz Morfológica**

La matriz morfológica es una técnica de innovación que persigue el desglose conceptual de los elementos en estudio hasta alcanzar extremos básicos y simplificados de los mismos, de forma que permitan el replanteamiento del diseño conceptual para explotar nuevas oportunidades sobre el producto o elementos, anexar nuevos materiales al diseño o reconfigurarlas ventajas esquemáticas.

La técnica se vale de la siguiente sucesión de fases para implementarse:

- Definir la problemática.
- Identificar los parámetros de diseño.
- Construcción de la matriz morfológica.
- Combinar posibilidades.
- Evaluar las oportunidades detectadas.

A continuación, se señaló un ejemplo de matriz morfológica aplicada al proceso de doblado:

<b>FUNCIONES</b>	<b>PORTADOR DE LAS FUNCIONES</b>		
	<b>ELECTRICO</b>	<b>MECANICO</b>	<b>MANUAL</b>
1. Funcionamiento		X	X
2. Medir	X	X	
3. Colocar	X	X	
4. Doblar	X		X
5. Extraer	X		X

**Ilustración 4.** Matriz morfológica sobre un proceso de doblado

**Fuente:** (Mentorday, 2020).

Lo correspondiente a la matriz morfológica conlleva a una combinación de ideas que principalmente busca descomponer un concepto en elementos esenciales o estructuras básicas.

Análisis de alternativas:

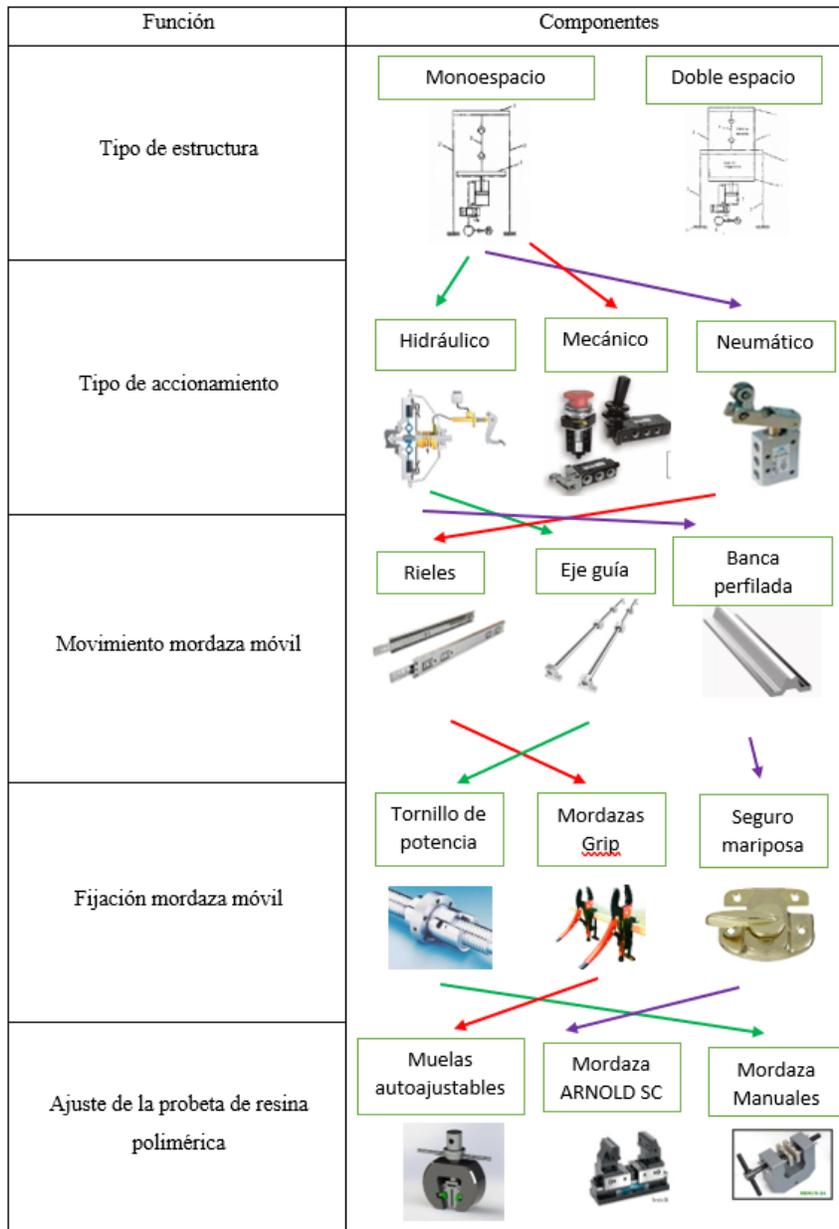
Alternativa 1 

Alternativa 2 

Alternativa 3 

- **Análisis de alternativas módulo 1**

El módulo 1 es pertinente a la fase inicial que realiza la máquina de tracción en resinas poliméricas. Se consideraron los parámetros más importantes para analizar en esta fase: tipo de estructura, tipo de accionamiento, movimiento de la mordaza móvil, fijación de la mordaza móvil y ajuste de la probeta de resina polimérica. En la figura se muestran las posibles alternativas de solución.



**Ilustración 5.** Matriz morfológica análisis módulo 1

**Realizado por:** Autores. 2022

• **Evaluación de alternativas módulo 1**

Adquiridas las alternativas de solución para el módulo 1 se realiza la respectiva evaluación tomando en cuenta los siguientes criterios.

- Operación
- Costo
- Funcionalidad

- Seguridad

**Tabla 2.** Conclusión de evaluación de criterios módulo 1

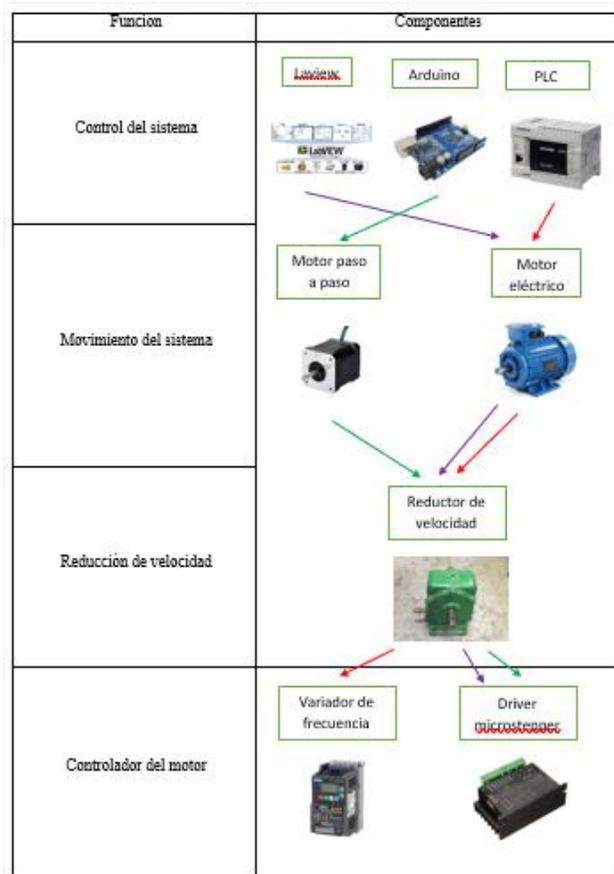
CRITERIO	SEGURIDAD	COSTO	OPERACIÓN	FUNCIONALIDAD	SUMATORIA	PONDERACIÓN
ALTERNATIVA 1	0,142	0,5	0,231	0,333	2,206	0,315
ALTERNATIVA 2	0,5	0,143	0,538	0,416	2,597	0,371
ALTERNATIVA 3	0,357	0,357	0,231	0,25	2,195	0,314
					7	1

**Realizado por:** Autores. 2022

Mediante los resultados arrojados en la tabla 2, se determina que la opción más viable para esta máquina es la alternativa 2.

- **Análisis de alternativas módulo 2**

Lo que refiere al módulo 2 es el procedimiento inicial del ensayo a tracción, para lo cual se consideró el control del sistema, movimiento del sistema, reducción de la velocidad y controlador del motor. En la figura se muestran las posibles alternativas de solución.



**Ilustración 6.** Matriz morfológica análisis módulo 2

**Realizado por:** Autores. 2022

• **Evaluación de alternativas módulo 2**

Adquiridas las alternativas de solución para el módulo 2 se realiza la respectiva evaluación tomando en cuenta los siguientes criterios.

- Adaptabilidad
- Costo
- Disponibilidad
- Lenguaje de programación

**Tabla 3.** Conclusión de evaluación de criterios módulo 2

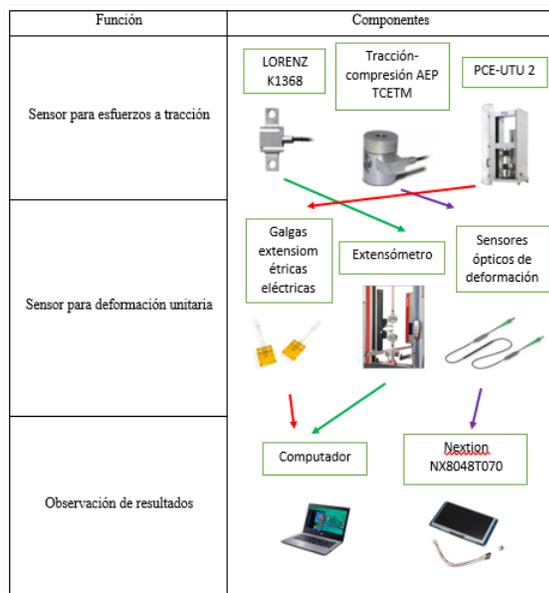
CRITERIO	ADAPTABILIDAD	COSTO	DISPONIBILIDAD	LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN	SUMATORIA	PONDERACIÓN
ALTERNATIVA 1	0,333	0,333	0,5	0,166	2,332	0,388
ALTERNATIVA 2	0,416	0,5	0,333	0,416	2,249	0,374
ALTERNATIVA 3	0,25	0,166	0,166	0,416	1,582	0,263
					6	1

**Realizado por:** Autores. 2022

Mediante los resultados arrojados en la tabla 3, se determina que la opción más viable para esta máquina es la alternativa 1.

- **Análisis de alternativas módulo 3**

Finalmente, en el módulo 3 se considera el proceso del ensayo a tracción junto con la visualización de los resultados al finalizar el ensayo. En este módulo específicamente se evalúa la interacción hombre – máquina. Tres de las funciones más principales son: Sensor para esfuerzos a tracción, sensor para deformación unitaria y Observación de resultados. En la figura se muestran las posibles alternativas de solución.



**Ilustración 7.** Matriz morfológica análisis módulo 3

**Realizado por:** Autores. 2022

- **Evaluación de alternativas módulo 3**

Obtenidas las alternativas de solución para el módulo 3 se realiza la respectiva evaluación tomando en cuenta los siguientes criterios.

- Sensibilidad
- Exactitud
- Costo

**Tabla 4.** Conclusión de evaluación de criterios módulo 3

CRITERIO	SENSIBILIDAD	EXACTITUD	COSTO	SUMATORIA	PONDERACIÓN
ALTERNATIVA 1	0,333	0,333	0,287	0,953	0,191
ALTERNATIVA 2	0,25	0,333	0,428	2,011	0,402
ALTERNATIVA 3	0,416	0,333	0,287	2,036	0,407
				5	1

**Realizado por:** Autores. 2022

Mediante los resultados arrojados en la tabla 4, cabe recalcar que los valores entre la alternativa 2 y 3 son muy cercanos y se pudiera elegir cualquiera de las dos opciones, pero mediante un análisis de costos nos beneficiará para esta máquina la alternativa 2.

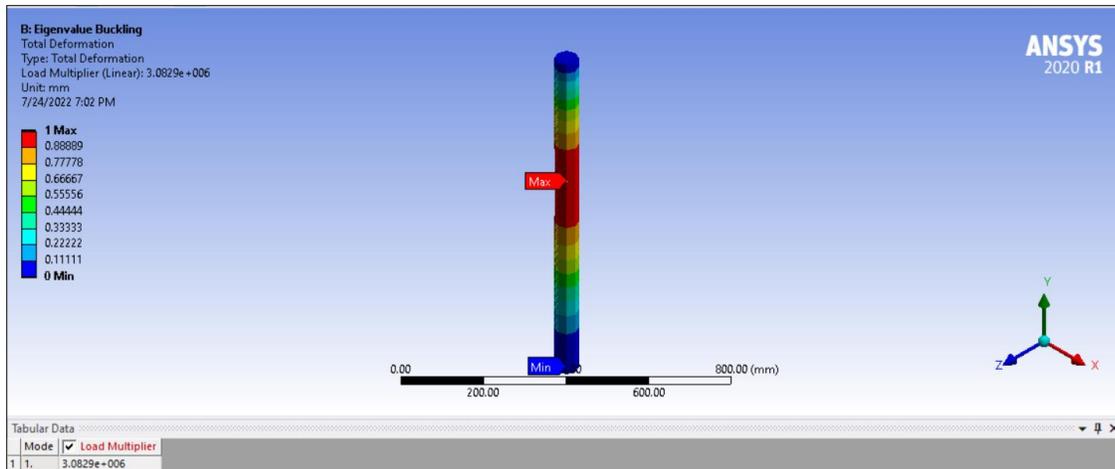
- **Resultados**
- **Valores obtenidos de los diferentes criterios de diseño para las columnas principales 1 y 2**

De acuerdo con el análisis efectuado en el marco metodológico en donde se efectúa los cálculos pertinentes al diseño de las columnas principales 1 y 2, se presentan a continuación, una tabla comparativa de los valores validados analíticamente y mediante el software CAD (ANSYS).

**Tabla 5.** Valores calculados por resistencia mecánica

Parámetros	Resultados analíticos	Resultados en Ansys
$P_{cr}$	3074796,046 N	3082900 N
$P_{max}$	3944,679 N	-----
$P_{req}$	1279,91 N	-----
Condición	$P_{max} > P_{req}$	-----

**Realizado por:** Autores. 2022



**Ilustración 8.** Carga crítica en las columnas principales 1 y 2

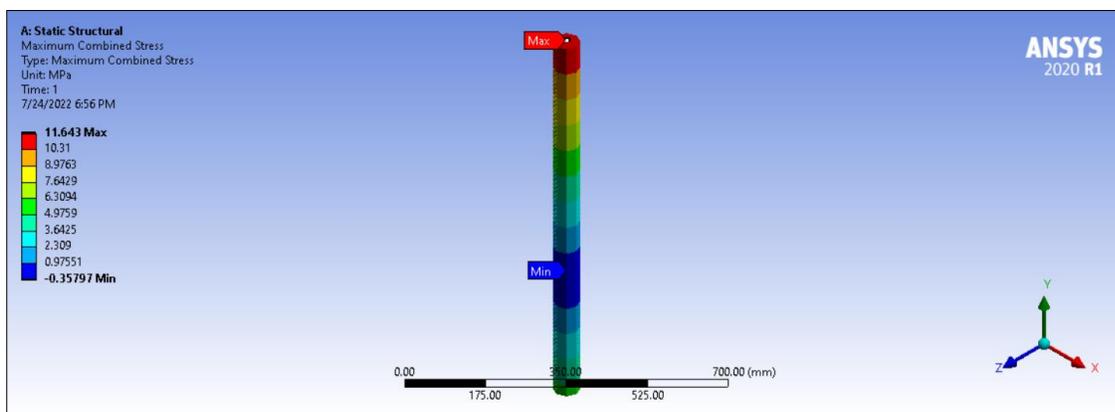
**Realizado por:** Autores. 2022

De acuerdo con el análisis efectuado en el marco metodológico y en base del diseño de resistencia mecánica se maneja los esfuerzos normales de compresión, flexión y equivalente de las columnas principales 1 y 2 así se presentan a continuación una tabla comparativa de los valores validados analíticamente y mediante el software CAD (ANSYS).

**Tabla 6.** Valores calculados por esfuerzos combinados

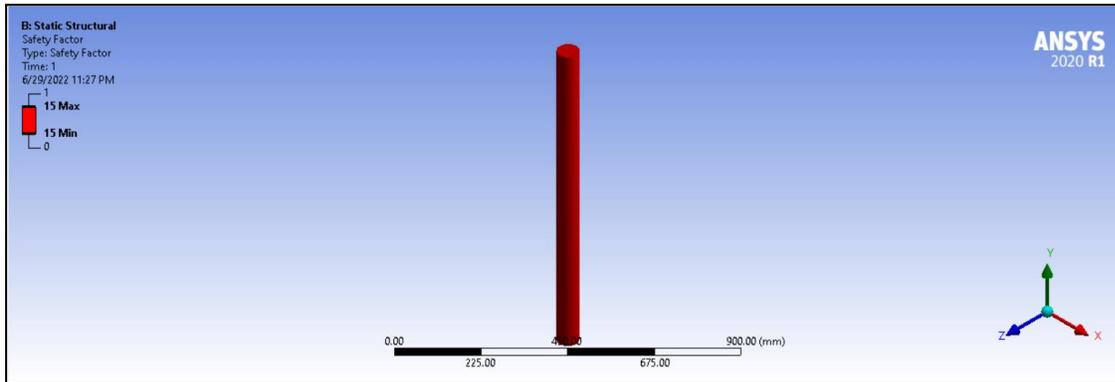
Parámetros	Resultados analíticos	Resultados en Ansys
$\sigma_c$	-0,453 Mpa	-0,453 Mpa
$\sigma_f$	12,07 MPa	12,096 Mpa
$\sigma_{equivalente}$	11,643 MPa	11,643 Mpa
$n$	136,563	>15

**Realizado por:** Autores. 2022



**Ilustración 9.** Esfuerzo equivalente de Von-Mises de las columnas principales 1 y 2

Realizado por: Autores. 2022



**Ilustración 10.** Factor de seguridad de las columnas principales 1 y 2

Realizado por: Autores. 2022

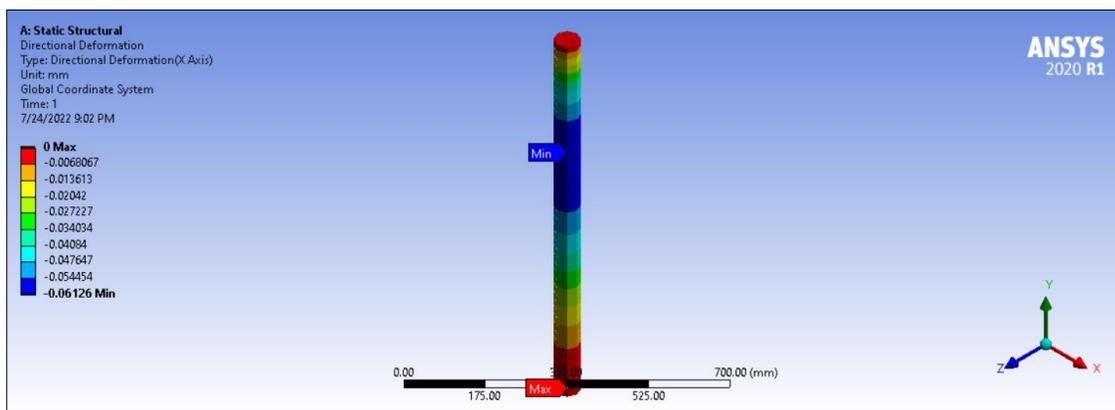
- **Valores obtenidos por rigidez columnas principales 1 y 2**

De acuerdo con el análisis efectuado en el marco metodológico y en base del diseño de resistencia mecánica se maneja el diseño por rigidez de las columnas principales 1 y 2 así se presentan a continuación una tabla comparativa de los valores validados analíticamente y mediante el software CAD (ANSYS).

**Tabla 7.** Valores calculados por rigidez

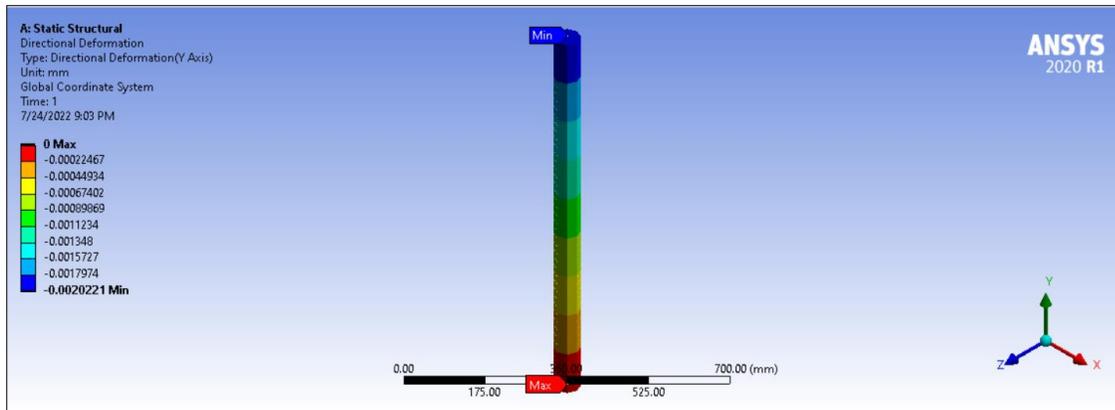
Parámetros	Resultados analíticos	Resultados en Ansys
$\delta$	0,00202 mm	0,002021 mm
$y_{max}$	0.0604 mm	0,06126 mm

Realizado por: Autores. 2022



**Ilustración 11.** Deformación direccional (eje X) de las columnas principales 1 y 2

Realizado por: Autores. 2022



**Ilustración 12.** Deformación direccional (eje Y) de las columnas principales 1 y 2

Realizado por: Autores. 2022

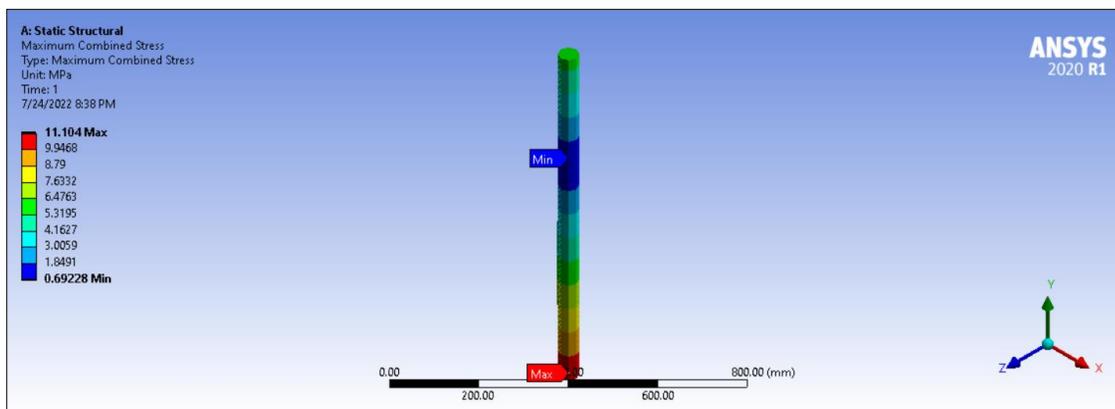
- Valores obtenidos de los diferentes criterios de diseño para las columnas internas 3 y 4

De acuerdo con el análisis efectuado en el marco metodológico 1 en donde se efectúa los cálculos pertinentes al diseño de las columnas internas 3 y 4, se presentan a continuación, una tabla comparativa de los valores validados analíticamente y mediante el software CAD (ANSYS).

**Tabla 8.** Valores calculados de esfuerzo combinados

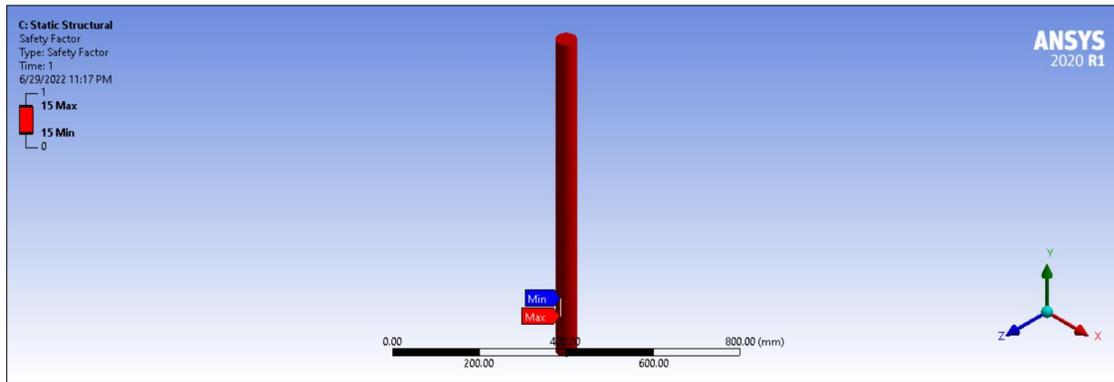
Parámetros	Resultados analíticos	Resultados en Ansys
$\sigma_t$	0,652 MPa	0,6536 MPa
$\sigma_f$	10,43 MPa	10,451 MPa
$\sigma_x$	11,081 MPa	11,104 MPa
$n$	143,49	>15

Realizado por: Autores. 2022



**Ilustración 13.** Esfuerzo equivalente de Von-Mises de las columnas internas 3 y 4

Realizado por: Autores. 2022



**Ilustración 14.** Factor de seguridad de las columnas internas 3 y 4

Realizado por: Autores. 2022

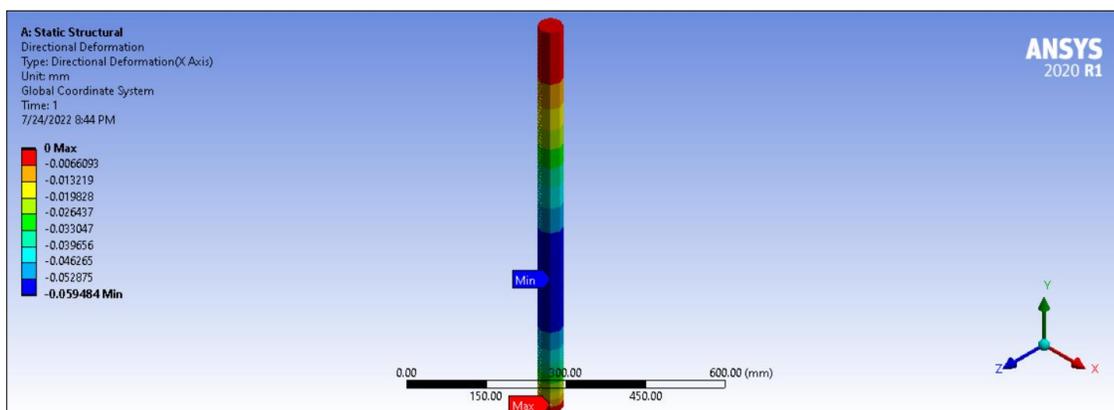
- **Valores obtenidos por rigidez columnas internas 3 y 4**

De acuerdo con el análisis efectuado en el marco metodológico y en base del diseño de resistencia mecánica se maneja el diseño por rigidez de las columnas principales 3 y 4 así se presentan a continuación una tabla comparativa de los valores validados analíticamente y mediante el software CAD (ANSYS).

**Tabla 9.** Valores calculados por rigidez

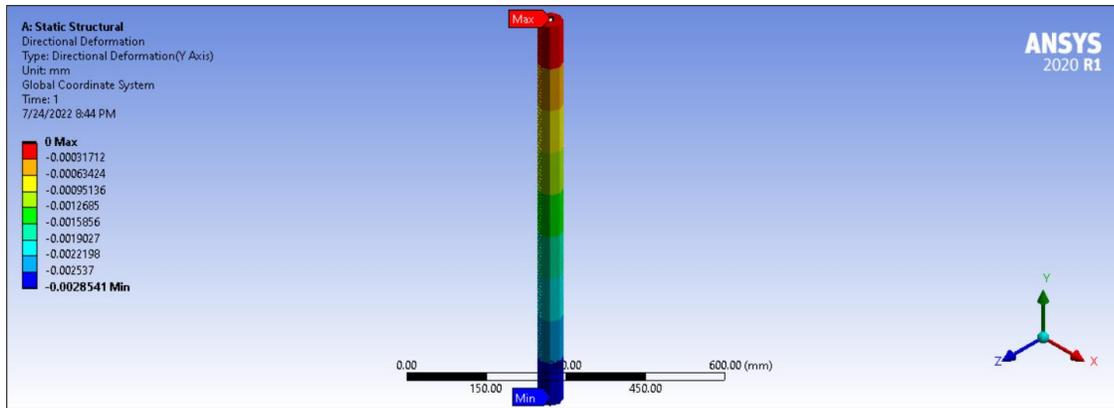
Parámetros	Resultados analíticos	Resultados en Ansys
$\delta$	0,00285 mm	0,00285 mm
$y_{max}$	0,0587 mm	0,0595 mm

Realizado por: Autores. 2022



**Ilustración 15.** Deformación direccional (eje X) de las columnas internas 3 y 4

Realizado por: Autores. 2022



**Ilustración 16.** Deformación direccional (eje Y) de las columnas internas 3 y 4

**Realizado por:** Autores. 2022

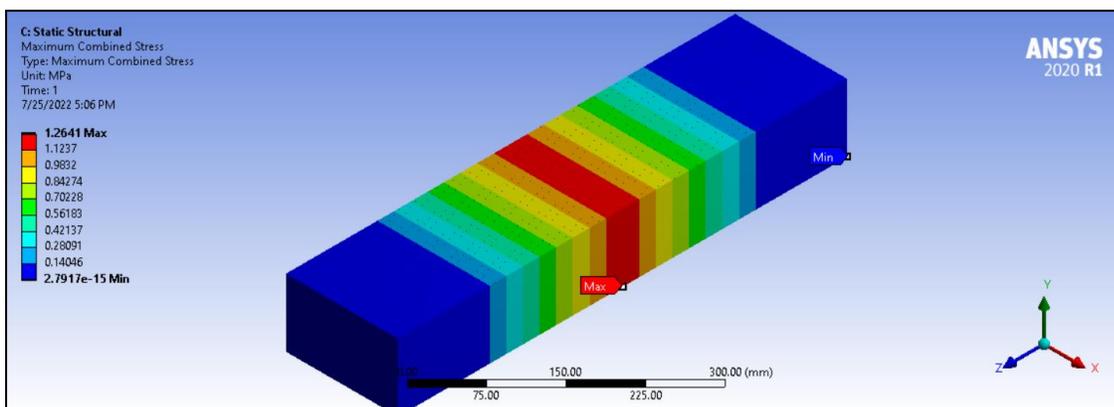
- **Valores obtenidos de los diferentes criterios de diseño para la viga fija 5**

De acuerdo con el análisis efectuado en el marco metodológico y en base del diseño de resistencia mecánica se maneja los esfuerzos normales de compresión, flexión y equivalente de la viga fija 5 así se presentan a continuación una tabla comparativa de los valores validados analíticamente y mediante el software CAD (ANSYS).

**Tabla 10.** Valores calculados por resistencia

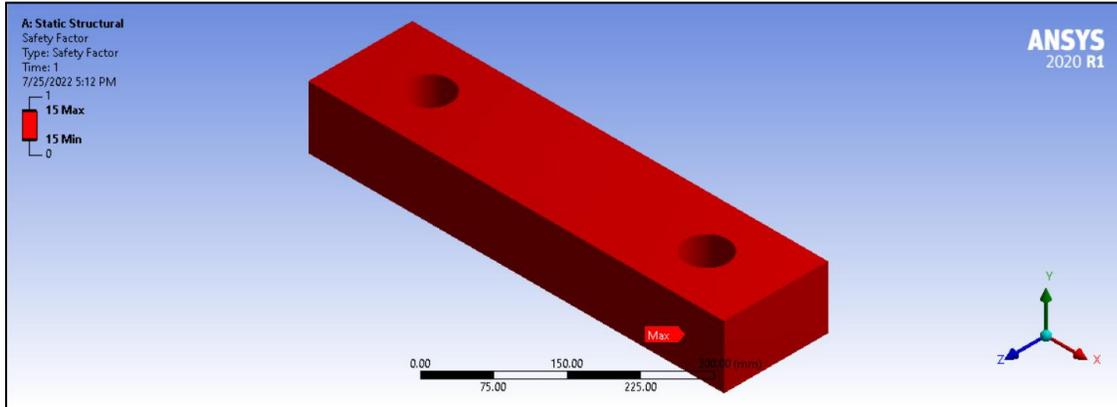
Parámetros	Resultados analíticos	Resultados en Ansys
$\sigma_f$	-1,264 MPa	-1,2641 MPa
$\tau_f$	0,142 MPa	-----
$\tau_{xy}$	0 MPa	0 MPa
$\sigma_{equivalente}$	1,264 MPa	1,2641 MPa
$n$	1022.94	>15

**Realizado por:** Autores. 2022



**Ilustración 17.** Esfuerzo equivalente de Von-Mises de la viga fija 5

**Realizado por:** Autores. 2022



**Ilustración 18.** Factor de seguridad de la viga fija 5

**Realizado por:** Autores. 2022

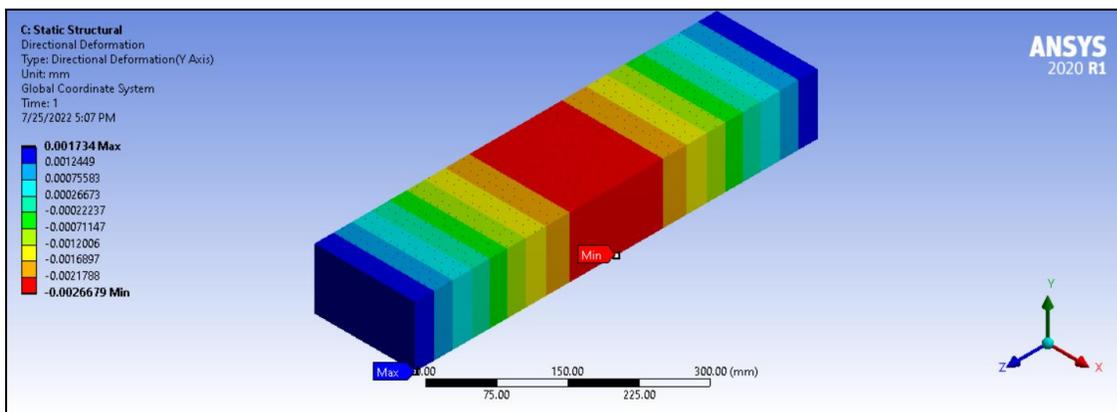
- **Valores obtenidos por deformación de la viga fija 5**

De acuerdo con el análisis efectuado en el marco metodológico y en base del diseño de resistencia mecánica se maneja el diseño por rigidez de la viga fija 5 así se presentan a continuación una tabla comparativa de los valores validados analíticamente y mediante el software CAD (ANSYS).

**Tabla 11.** Valores calculados para la deformación

Parámetros	Resultados analíticos	Resultados en Ansys
Y	-0,00231 mm	-0,00267 mm

**Realizado por:** Autores. 2022



**Ilustración 19.** Deflexión (eje Y) de la viga fija 5

**Realizado por:** Autores. 2022

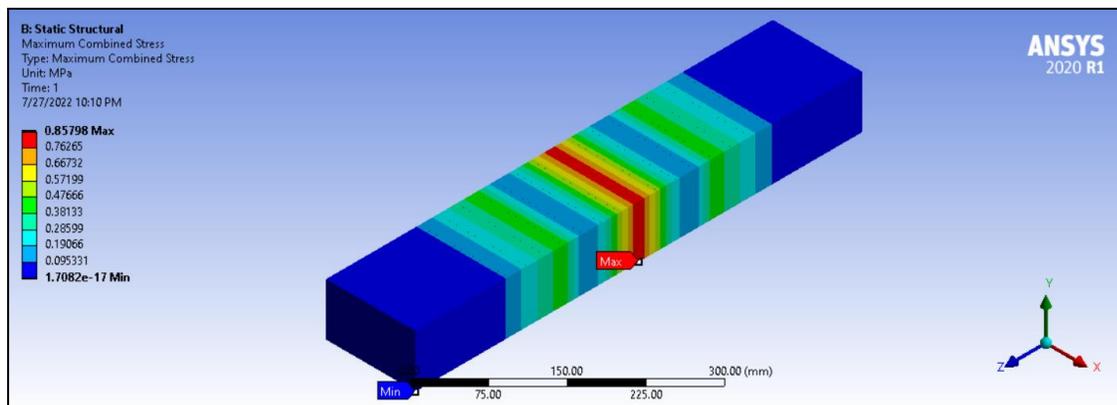
- **Valores obtenidos de los diferentes criterios de diseño para la viga móvil 6**

De acuerdo con el análisis efectuado en el marco metodológico y en base del diseño de resistencia mecánica se maneja los esfuerzos normales de compresión, flexión y equivalente de la viga móvil 6 así se presentan a continuación una tabla comparativa de los valores validados analíticamente y mediante el software CAD (ANSYS).

**Tabla 12.** Valores calculados por resistencia

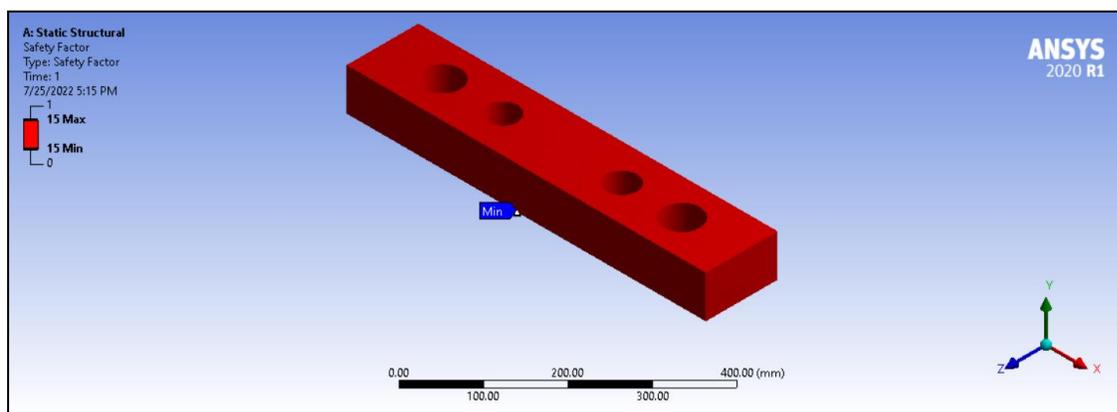
Parámetros	Resultados analíticos	Resultados en Ansys
$\sigma_f$	0,816 MPa	0,816 MPa
$\tau_f$	-0,229 MPa	-----
$\tau_{xy}$	0 MPa	0 MPa
$\sigma_{equivalente}$	1,163 MPa	1,306 MPa
$n$	1584,56	>15

Realizado por: Autores. 2022



**Ilustración 20.** Esfuerzo equivalente de Von-Mises de la viga móvil 6

Realizado por: Autores. 2022



**Ilustración 21.** Factor de seguridad de la viga móvil 6

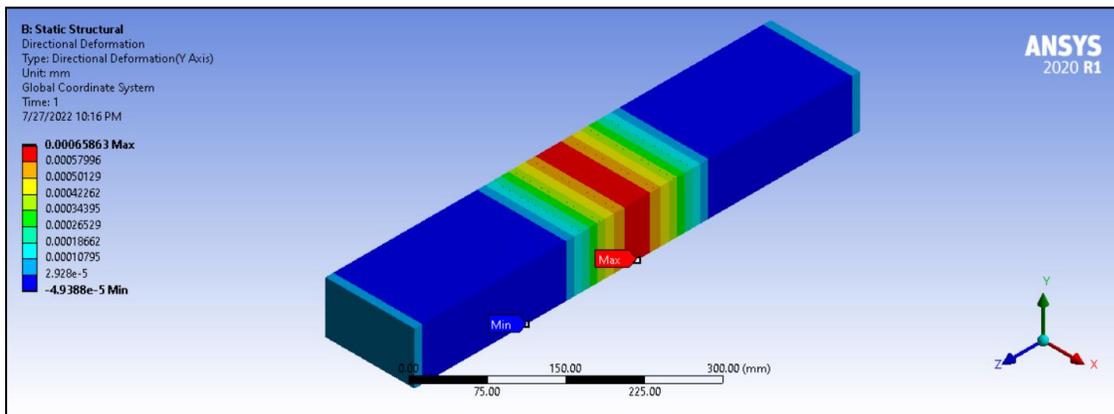
**Realizado por:** Autores. 2022

- **Valores obtenidos para la deformación de la viga móvil 6**

De acuerdo con el análisis efectuado en el marco metodológico y en base del diseño de resistencia mecánica se maneja el diseño por rigidez de la viga móvil 6 así se presentan a continuación una tabla comparativa de los valores validados analíticamente y mediante el software CAD (ANSYS).

**Tabla 13.** Valores calculados para la deformación

Parámetros	Resultados analíticos	Resultados en Ansys
$Y \text{ en } X = 300\text{mm}$	$-0,000766 \text{ mm}$	$-0,000658 \text{ mm}$



**Ilustración 22.** Deflexión (eje y) de la viga móvil 6

**Realizado por:** Autores. 2022

- **Valores obtenidos de los diferentes criterios para la viga de columnas guías 7**

De acuerdo con el análisis efectuado en el marco metodológico y en base del diseño de resistencia mecánica se maneja los esfuerzos normales de compresión, flexión y equivalente de la viga de columnas guías 7 así se presentan a continuación una tabla comparativa de los valores validados analíticamente y mediante el software CAD (ANSYS).

**Tabla 14.** Valores calculados por resistencia

Parámetros	Resultados analíticos	Resultados en Ansys
$\sigma_f$	$-3,072 \text{ MPa}$	$-3,0718 \text{ MPa}$
$\tau_f$	$0,384 \text{ MPa}$	-----
$\tau_{xy}$	$0 \text{ MPa}$	$0 \text{ MPa}$

$\sigma_{equivalente}$	3,072 MPa	3,0718 MPa
$n$	420,898	>15

Realizado por: Autores. 2022

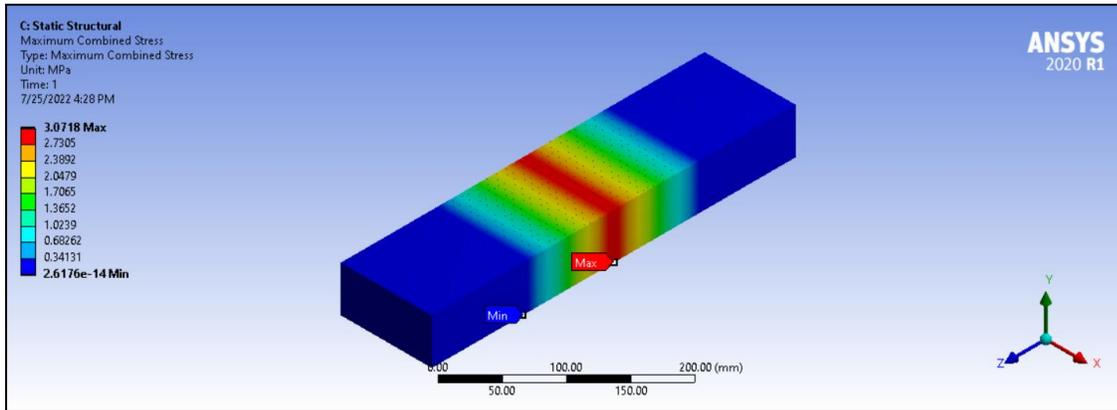


Ilustración 23. Esfuerzo equivalente de Von-Mises de la viga de columnas guías 7

Realizado por: Autores. 2022

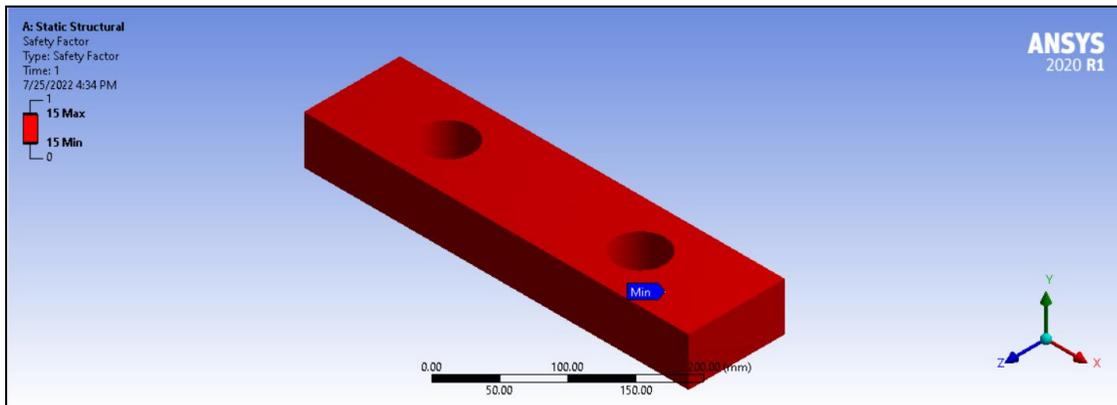


Ilustración 24. Factor de seguridad de la viga de columnas guías 7

Realizado por: Autores. 2022

- **Valores obtenidos para la deformación de la viga de columnas guías 7**

De acuerdo con el análisis efectuado en el marco metodológico y en base del diseño de resistencia mecánica se maneja el diseño por rigidez de la viga de columnas guías 7 así se presentan a continuación una tabla comparativa de los valores validados analíticamente y mediante el software CAD (ANSYS).

Tabla 15. Valores calculados para la deformación

Parámetros	Resultados analíticos	Resultados en Ansys
$Y$ en $X = 200mm$	$-0,00252 mm$	$-0,00301 mm$
$Y$ en $X = 0mm$	$0,00379 mm$	$0,00379 mm$
$Y$ en $X = 400mm$	$0,00379 mm$	$0,00379 mm$

Realizado por: Autores. 2022

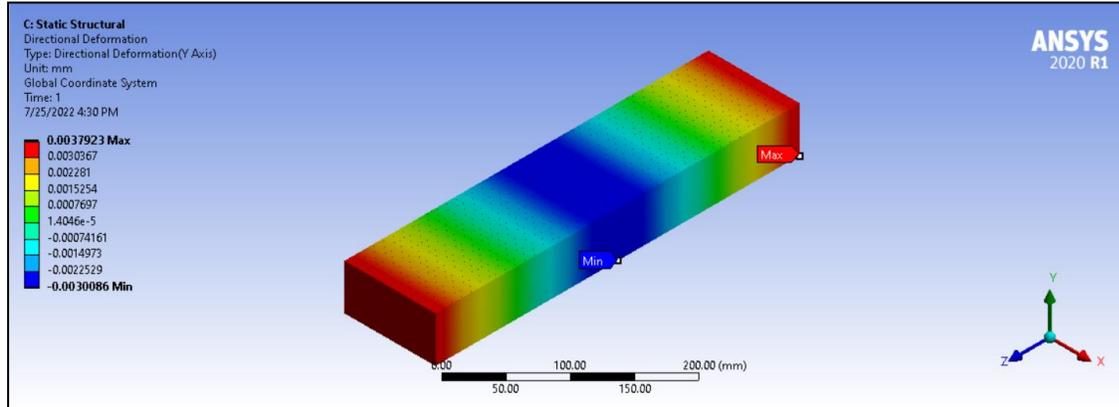


Ilustración 25. Deflexión (eje y) de la viga de columnas guías 7

Realizado por: Autores. 2022

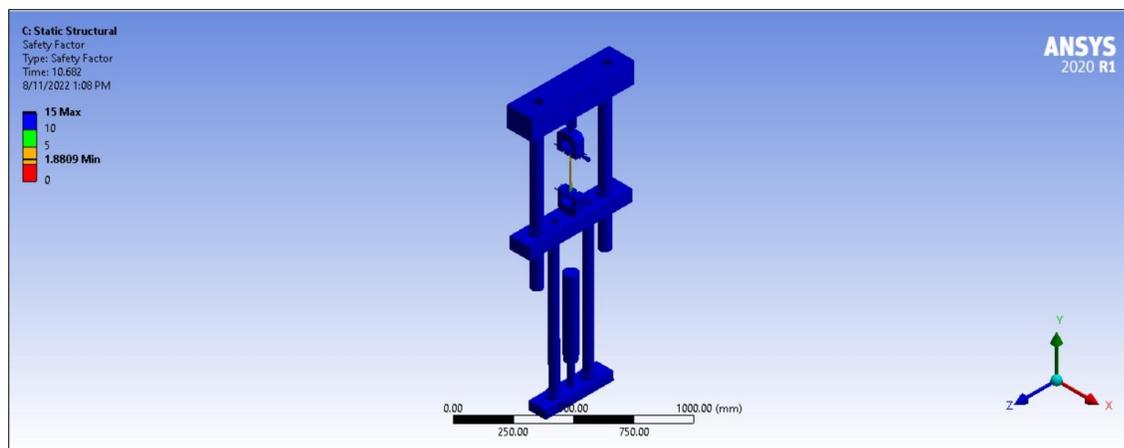
- **Simulación**

El término simulación mediante software actúa en diferentes campos dentro de la ingeniería y la investigación, la principal función se refiere al uso de programas que simulan el funcionamiento de ciertos sistemas mecánicos, permitiendo obtener predicciones sobre su desempeño y efectividad antes de ser utilizados en el mundo real.

- **Análisis dinámico de la máquina**

El módulo de análisis dinámico dentro del software ANSYS hace posible el cálculo del estado de tensión de modelos tridimensionales obtenidos mediante el programa de modelado cuyos principales resultados de solución dinámica son:

- Campo de desplazamientos en puntos de la malla generada sobre el modelo por elementos finitos.
- Valores de deformación.
- Análisis de tensión sobre los principales elementos constitutivos.
- Campo distribuido sobre el modelo tridimensional del factor de seguridad.
- Estimación de los valores de esfuerzo.

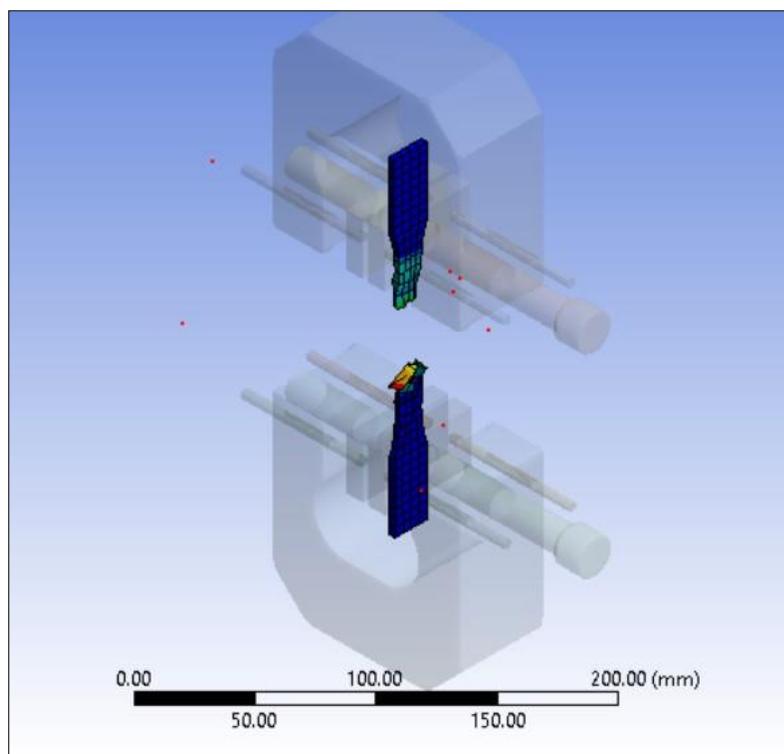


**Ilustración 26.** Factor de seguridad de la máquina de tracción al final del ensayo

**Realizado por:** Autores. 2022

- **Simulación del ensayo a tracción**

Basado principalmente en un análisis dinámico para determinar el comportamiento y mediante el uso de la librería Explicit Dynamics con la cual facilita evaluar el efecto que tienen las cargas al variar en el transcurso del tiempo, además, de cómo actúan los desplazamientos y deformaciones se tiene la respectiva validación.

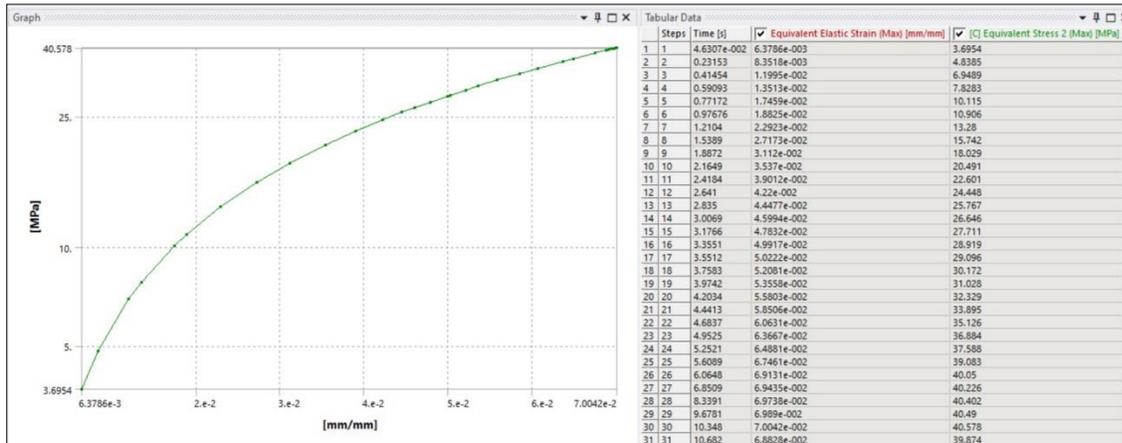


**Ilustración 27.** Simulación de la rotura de la probeta al final del ensayo

**Realizado por:** Autores. 2022

- **Curva obtenida de la simulación del ensayo**

El análisis de la curva esfuerzo – deformación que se obtiene dentro de la simulación del ensayo aporta, de manera sencilla, un indicador de validación con las pruebas experimentales realizadas en las probetas por lo que se visualiza a continuación:



**Ilustración 28.** Curva de la simulación del ensayo

**Realizado por:** Autores. 2022

- **Cálculo del porcentaje de error entre ensayo experimental y validado por software**

$$\%error = \left| \frac{v_A - v_E}{v_E} \right| * 100$$

$$\%error = \left| \frac{42 - 40,578}{40,578} \right| * 100$$

$$\%error = 3,5$$

- **Conclusiones**

- Por medio del uso de la ingeniería concurrente se puntualiza las necesidades y requerimientos importantes a tomar en cuenta en el diseño de la máquina. Del mismo modo la metodología utilizada conllevó a evaluar las alternativas más viables para proceder con los cálculos analíticos de los componentes necesarios y la evaluación mediante la casa de la calidad puso en evidencia las necesidades del usuario para posteriormente transformarlas en especificaciones técnicas con criterio ingenieril y generar así las propuestas para un diseño adecuado, arrojando como resultado una estructura tipo monoespacio con accionamiento hidráulico y mediante eje guía, además, el ajuste de la probeta con el uso de

mordazas manuales y finalmente equipado con un extensómetro para la medición de la deformación junto con un computador para la obtención de los resultados del ensayo.

- De acuerdo con el diseño mecánico para la selección de los materiales se consideró tanto el esfuerzo como la deformación requeridos para este tipo de máquinas, y utilizando un programa especializado se obtuvo tanto para las columnas fijas como para las columnas móviles el material AISI 4340 Normalizado, del mismo modo para las vigas fija, móvil, soporte y bancada se aplica la Fundición Gris ASTM A48 grado 60 y finalmente para los perfiles de la estructura de la máquina el acero ASTM A36, además, para el sistema electrohidráulico se tomó como parámetros la fuerza máxima y recorrido requerido para realizar el ensayo seleccionando así un cilindro de 11,1 toneladas de capacidad y 305 mm de carrera junto con una bomba de engranajes externos ya que es la más adecuada para adquirir una velocidad constante, con todo esto para el sistema de control se ha utilizado un PLC con 14 entradas y 10 salidas debido a la cantidad de válvula solenoides, indicadores luminosos y contactores, también para la adquisición de datos se empleó una tarjeta de adquisición de datos multicanal.
- Mediante el software CAE (ANSYS) se realizó la validación de resistencia mecánica y rigidez de cada uno de los componentes constitutivos de la máquina a tracción resultando los elementos más críticos las columnas fijas principales 1 y 2 con un valor de esfuerzo igual a 11,6 MPa evaluado analíticamente y mediante software obteniendo un porcentaje de error de 0% y presentando un coeficiente de seguridad de 136,5 y un valor de deformación equivalente a 0.0604 mm evaluado analíticamente y mediante software obteniendo un valor de 0,06126 finalmente se calcula el porcentaje de error de 1,4 % lo que conlleva a mencionar que el diseño es funcional.
- Adicionalmente para validación completa de la máquina se realizó el ensayo a tracción experimental de las probetas de resina polimérica ingenieril con los parámetros que establece la norma ASTM D 638 obteniéndose las curvas de Esfuerzo vs Deformación unitaria las cuales fueron comparadas con los resultados arrojados en los análisis tanto estático como dinámico en el software CAE y obteniéndose un porcentaje de error de 2,69%.

Se realizó las cotizaciones basándose en los principales fabricantes y exportadores para determinar los costos más accesibles para los componentes constitutivos de la máquina que son necesarios para los sistemas mecánico, control y electrohidráulico detallado en el capítulo 4

### Referencias

ABBEY, T., Linear Buckling. FE training [en línea]. 2022. [Consulta: 8 agosto 2022]. Disponible en: [https://www.fetraining.net/fea\\_collection1/module-1/linear\\_buckling/](https://www.fetraining.net/fea_collection1/module-1/linear_buckling/).

AL MAKKY, A., Computational Fluid Dynamics is the Future. [en línea]. 2014. [Consulta: 8 agosto 2022]. Disponible en: <https://cfd2012.com/ansys-explicit-dynamics.html>.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, ASTM D638-14, Standard Practice for Preparation of Metallographic Specimens. ASTM International [en línea], 2016. vol. 82, no. C, pp. 1-15. ISSN 21653992. DOI 10.1520/D0638-14.1. Disponible en: <http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?E140%0Ahttp://www.astm.org/Standards/E8.htm>.

AUTODESK, DISEÑO ASISTIDO POR COMPUTADORA SOFTWARE DE DISEÑO CAD. [en línea]. 2019. [Consulta: 8 agosto 2022]. Disponible en: <https://latinoamerica.autodesk.com/solutions/cad-software>.

BEER, F.P., JOHNSTONS, E.R., MAZUREK, D.F. y EISENBERG, E.R., *Mecanica de materiales*. Quinta. 2010. México: Mc Graw Hill. ISBN 9788578110796.

BIESENBERGER, J.A. y SEBASTIAN, D.H., *Principles of Polymerization Engineering*. [en línea]. Cuarta. 2004. Estados Unidos: John Wiley. ISBN 0471086169. Disponible en: <http://himatekkim.ulm.ac.id/id/wp-content/uploads/2019/12/Principles-of-Polymerization-Fourth-Edition.pdf>.

BUDYNAS, R. y NISBETT, K., *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley* [en línea]. Novena. 2006. México: s.n. Disponible en: [http://www1.frm.utn.edu.ar/electromecanica/materias/pagina\\_nuevas/elementoMaquina/material/libroCabecera.pdf](http://www1.frm.utn.edu.ar/electromecanica/materias/pagina_nuevas/elementoMaquina/material/libroCabecera.pdf).

BUÑAY, A.F. y MOROCHO, C.F., *DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PRUEBAS DE UNA MÁQUINA PARA REALIZAR ENSAYOS DE TRACCIÓN EN CUERDAS DE FIBRAS SINTÉTICAS* [en línea]. S.l.: 2015. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo «Espoch». Disponible en: <http://dspace.espoch.edu.ec/bitstream/123456789/4649/1/15T00620.pdf>.

CERVERA, M. y BLANCO, E., *Resistencia de Materiales* [en línea]. Sexta. 2015. Barcelona: CIMNE. ISBN 978-84-481-5633-6. Disponible en: <https://elibro.net/es/ereader/uta/39532>.

GALLEGO, P.A. y CLAROS, R.F., *Diseño mecánico de una máquina universal de ensayos para polímeros* [en línea]. S.l.: 2007. s.n. [Consulta: 8 agosto 2022]. Disponible en: <https://repositorio.utp.edu.co/server/api/core/bitstreams/c2a290bc-1770-49dd-8268-2f391ca888f5/content>.

GASTELUM, A.N., SIQUEIROS HERNÁNDEZ, M., GONZALEZ, B., VEGA, Y. y MUÑOZ, I.M., *Análisis comparativo de las propiedades mecánicas de un material compuesto reforzado con fibras de carbono y las de su matriz polimérica de resina epóxica*. *Revista Materia* [en línea], 2018. vol. 23, no. 2. ISSN 15177076. DOI 10.1590/S1517-707620180002.0428. Disponible en: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/qLzr9PHftKDmxtSJDDJpfKN/?lang=es&format=pdf>.

- HERNÁNDEZ, S. y CÁRDENAS, E., Análisis teórico - práctico de esfuerzos y por elementos finitos de un ensayo a tracción. [en línea]. México: 2018. 1. Disponible en: <http://revistas.ustatunja.edu.co/index.php/ingeniomagno/article/view/1643/1486>.
- LEÓN, M., FERNANDEZ, M. y RODRÍGUEZ, J., Impresión 3D con materiales elastoméricos. Revista de plásticos modernos: Ciencia y tecnología de polímeros [en línea], 2019. vol. 118, no. 747, pp. 2. Disponible en: [https://www.researchgate.net/profile/Angel-Marcos-Fernandez/publication/335320270\\_Impresion\\_3D\\_con\\_materiales\\_elastomericos/links/5d5e3fed299bf1b97cfd07b6/Impresion-3D-con-materiales-elastomericos.pdf?origin=publication\\_detail](https://www.researchgate.net/profile/Angel-Marcos-Fernandez/publication/335320270_Impresion_3D_con_materiales_elastomericos/links/5d5e3fed299bf1b97cfd07b6/Impresion-3D-con-materiales-elastomericos.pdf?origin=publication_detail).
- LORENZO, S., MIRA, J., OLARTE, M., GUERRERO, J. y MOYANO, S., Matrix analysis of the client's voice: QFD applied to healthcare management. Gaceta sanitaria / S.E.S.P.A.S [en línea], 2004. vol. 18, no. 6, pp. 464-471. ISSN 02139111. DOI 10.1157/13069765. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/240381952\\_Analisis\\_matricial\\_de\\_la\\_voz\\_del\\_cliente\\_QFD\\_aplicado\\_a\\_la\\_gestion\\_sanitaria/link/5e5e17b3299bf1bdb84cdfdc/download](https://www.researchgate.net/publication/240381952_Analisis_matricial_de_la_voz_del_cliente_QFD_aplicado_a_la_gestion_sanitaria/link/5e5e17b3299bf1bdb84cdfdc/download).
- LUYBEN, W.L., The Integration of Process Design and Control. Computer Aided Chemical Engineering [en línea], 2004. vol. 17, pp. 10-41. ISSN 15707946. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1570794604800531>.
- MECHEAD, Explicit Dynamics in Ansys. Mechead [en línea]. 2022. [Consulta: 8 agosto 2022]. Disponible en: <https://www.mechead.com/what-is-explicit-dynamics-in-ansys/>.
- MEDEIROS, J., A Look at SOLIDWORKS Toolbox. Engineers rule [en línea]. 2018. [Consulta: 8 agosto 2022]. Disponible en: <https://www.engineersrule.com/look-solidworks-toolbox/>.
- MENTORDAY, LA MATRIZ MORFOLÓGICA. [en línea]. 2022. [Consulta: 8 agosto 2022]. Disponible en: <https://mentorday.es/wikitips/matriz-morfologica/>.
- MOLAZON, Special Engineering Resin. [en línea]. 2022. [Consulta: 8 agosto 2022]. Disponible en: [https://lesresines3d.fr/en/home/131-212-engineering-resin-molazon-lcd-dlp-1kg.html#/2-color-gray/22-weight-1\\_kg](https://lesresines3d.fr/en/home/131-212-engineering-resin-molazon-lcd-dlp-1kg.html#/2-color-gray/22-weight-1_kg).

MOLINA, R., PENDER, G., GONZÁLEZ, G. y MORO, L., Comprobación de la uniformidad de resultados de un equipo de ensayos simultáneos de termofluencia. *Matéria* (Rio de Janeiro) [en línea], 2018. vol. 23, no. 2. DOI 10.1590/s1517-707620180002.0358. Disponible en: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/gnDNtkNNB9Qbk93jbZrdvLS/?format=pdf&lang=es>.

MORENO, M., Hierro Nodular - Hierro Gris. [en línea], 2014. pp. 1-8. ISSN 03706125. Disponible en: [http://www.ecuainox.com/evidenciacion/HIERRO\\_NODULAR\\_HIERRO\\_GRIS.pdf](http://www.ecuainox.com/evidenciacion/HIERRO_NODULAR_HIERRO_GRIS.pdf).

MOTT, R., SUSFERRIN\_Diseño\_Elementos\_Maquinas.pdf [en línea]. 2006. S.l.: s.n. Disponible en:  
[https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=nrYd\\_BjTL0UC&oi=fnd&pg=PA1&dq=%22sistemas+de+unidades%22&ots=1BKp2eod9D&sig=SwoWt30msLlcScDpGeL1DGKzRGY#v=onepage&q=%22sistemas+de+unidades%22&f=false](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=nrYd_BjTL0UC&oi=fnd&pg=PA1&dq=%22sistemas+de+unidades%22&ots=1BKp2eod9D&sig=SwoWt30msLlcScDpGeL1DGKzRGY#v=onepage&q=%22sistemas+de+unidades%22&f=false).

MUTLU, B., Tensile testing of square structure built with electron beam melting. *Revista de Metalurgia* [en línea], 2021. vol. 57, no. 3. ISSN 19884222. DOI 10.3989/revmetalm.200. Disponible en:  
<https://revistademetalurgia.revistas.csic.es/index.php/revistademetalurgia/article/view/1515/1935>.

NATIONAL INSTRUMENTS, Módulo de adquisición de datos de tensión 6501. *Direct Industry* [en línea]. 2022. Disponible en: <https://www.directindustry.es/prod/national-instruments/product-5074-1596646.html>.

PÉREZ, D.I., CASTRO OLIVARES, J.E., FLORES MÉNDEZ, J., MENDOZA QUIÑONEZ, J.A., MICHUA CAMARILLO, A. y APARICIO RAZO, M., Evaluación y comparación de resistencia a la tracción y flexión de Quiote del Maguey Manso (Agave Salmiana) contra bambú Guadua. *Ingeniería Investigación y Tecnología* [en línea], 2021. vol. 22, no. 3, pp. 1-6. ISSN 14057743. DOI 10.22201/fi.25940732e.2021.22.3.019. Disponible en: <https://www.scielo.org.mx/pdf/iit/v22n3/1405-7743-iit-22-03-00003.pdf>.

RIBA, C., Selección de materiales en el proceso de diseño de maquinas. [en línea]. 2008. S.l.: s.n. ISBN 8493132985. Disponible en:  
<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.3/36844/9788498804065.pdf>.

- RODRÍGUEZ, H., Estudio y Clasificación de las Fundiciones. Ingmecánica [en línea]. 2022a. [Consulta: 8 agosto 2022]. Disponible en: <https://ingmecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn108.html>.
- RODRÍGUEZ, H., Estudio y Clasificación de los Aceros. [en línea]. 2022b. [Consulta: 8 agosto 2022]. Disponible en: <https://ingmecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn101.html>.
- RODRÍGUEZ, J. y REINECKE, H., Aplicaciones biomédicas actuales de la impresión 3D y fabricación aditiva. [en línea], 2020. vol. 119, no. 754, pp. 23-34. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7482860>.
- ROMO, S., Lo que el 2020 le dejó a la impresión 3D y sus avances para 2021. *Plastics Technology México* [en línea]. 2021. [Consulta: 8 agosto 2022]. Disponible en: <https://www.pt-mexico.com/articulos/lo-que-el-2020-le-dejo-a-la-impresion-3d-y-sus-avances-para-2021>.
- SANGEETHA, S. y ARAVIND, R., STUDY ON FINITE ELEMENT ANALYSIS OF REINFORCED CONCRETE BEAMS WITH GGBS USING ANSYS. *International Journal of Pure and Applied Mathematics* [en línea], 2018. vol. 118, no. 5, pp. 881-887. Disponible en: <https://www.acadpubl.eu/jsi/2018-118-5/articles/5/78.pdf>.
- SILVA, G., Máquina universal digital H011. *+Ciencia* [en línea], 2013. no. 2, pp. 37. Disponible en: <https://ingenieria.anahuac.mx/revista/MasCiencia2.pdf>.
- SMITH, W.F. y HASHEMI, J., *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales*. Cuarta. 2006. México: Mc Graw Hill. ISBN 9701056388.
- SUÁREZ, S., SLA: Impresión 3D por estereolitografía. [en línea]. 2017. [Consulta: 8 agosto 2022]. Disponible en: <https://www.3dnatives.com/es/impresion-3d-por-estereolitografia-les-explicamos-todo/#!>
- UNAM, PRÁCTICA 1 . Fabricación de probetas cerámicas y poliméricas para caracterización mecánica. *Manual de prácticas del laboratorio de Caracterización de materiales no metálicos* [en línea], 2019. pp. 1.1-1.18. Disponible en: [http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/jspui/bitstream/132.248.52.100/16969/3/03-Manual de Prácticas Caracterización de materiales no metálicos-FINAL.pdf](http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/jspui/bitstream/132.248.52.100/16969/3/03-Manual%20de%20Prácticas%20Caracterización%20de%20materiales%20no%20metálicos-FINAL.pdf).
- VARGAS, C.P.P., *Material para impresión 3D basado en resinas naturales de colofonia*. , 2019.

WOGÉ, O., MORÁN, C., GONZÁLEZ, O. y CHAU, A., Introducción al método del elemento finito: Solidworks y Matlab. Ideas en Ciencias de la Ingeniería [en línea], 2020. vol. 1, no. 1, pp. 27-47. Disponible en: <https://ideasencienciasingenieria.uaemex.mx/article/view/14589>.

© 2023 por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).