

Simulación del Esfuerzo Mecánico en una pieza Modelada en 3D por el Método de Elementos Finitos

Juan Antonio Sánchez Márquez¹, Tristán Azael Sánchez Ramírez², Axel Gasca González³, Lilia Sofía Martínez Jiménez⁴, Katia Natali Núñez Guía⁵, Mariana Ruelas Rodríguez⁶, Frida Mariel Sánchez Ramírez⁷

¹Escuela del Nivel Medio Superior de Salamanca, Colegio del Nivel Medio Superior UG, ja.sanchez@ugto.mx

²Licenciatura en Ingeniería Civil, División de Ingenierías, Campus Guanajuato, ta.sanchezramirez@ugto.mx

³Licenciatura en Ingeniería Química, División de Ciencias Naturales y Exactas, Campus Guanajuato, a.gascagonzalez@ugto.mx

⁴Licenciatura en Ingeniería Química, División de Ciencias Naturales y Exactas, Campus Guanajuato, ls.martinezjimenez@ugto.mx

⁵Escuela del Nivel Medio Superior de Salamanca, Colegio del Nivel Medio Superior UG, kn.nunezguia@ugto.mx

⁶Escuela del Nivel Medio Superior de Salvatierra, Colegio del Nivel Medio Superior UG, m.ruelasrodriguez@ugto.mx

⁷Escuela del Nivel Medio Superior de Guanajuato, Colegio del Nivel Medio Superior UG, fm.sanchezramirez@ugto.mx

Resumen

El diseño de proyectos de ingeniería utilizando modelado 3D nos permite conseguir planos constructivos de una manera rápida y parametrizable. Además, el poder ver los objetos y elementos de manera tridimensional facilita la detección y corrección de errores, tanto estéticos como funcionales. A nivel técnico, el modelado 3D hace posible detectar interferencias entre piezas y establecer la resistencia de los materiales de una manera medible, aplicable y exacta. Esto se traduce en una mayor facilidad para crear formas complejas e integrarlas a nivel geométrico, espacial y de componentes. Por otro lado, el análisis de elementos finitos es un método computarizado para predecir cómo reaccionará una pieza ante las fuerzas, la vibración, el calor y otros efectos físicos del mundo real. La simulación de elementos finitos te permite comprobar si un producto se romperá, desgastará o funcionará como se espera. Se denomina análisis, pero representa más bien un proceso de simulación. Al aplicar este método se comienza por descomponer un objeto real en un gran número de elementos finitos (pequeñas figuras geométricas). Las ecuaciones matemáticas permiten predecir el comportamiento de cada elemento. Luego, una computadora suma todos los comportamientos individuales para predecir el comportamiento real del objeto. Este proyecto se centra en la simulación del esfuerzo mecánico que experimenta una pieza modelada en 3D en FUSION 360 haciendo uso del método de elementos finitos.

Palabras clave: Modelado, Tridimensional, Simulación, Elementos Finitos, Prototipo

Introducción: Modelado y Simulación de piezas en 3D

Modelado de una pieza en 3D

El modelado en 3D se constituye como una metodología que engloba el desarrollo de diseños tridimensionales mediante el uso de diversos softwares especializados en esta área. Este método ha permitido realizar representaciones de diversos proyectos de manera virtual a través de modelos matemáticos, es decir, permite ver y analizar el resultado de un diseño, con mucha precisión y verificación de los detalles, antes de que este sea llevado a cabo físicamente, siendo esto de gran utilidad para conseguir que los nuevos productos sean de mejor calidad, aumentando así su eficiencia y optimización, debido a que es posible predecir, corregir posibles problemas de funcionamiento e incluso planificar su proceso de fabricación. Cabe destacar que este tipo de modelados y simulaciones permiten un considerable ahorro económico en el desarrollo de pruebas y materiales, puesto que estas ya han sido puestas a prueba de manera virtual, este punto es de vital importancia para las organizaciones, debido a que, al reducir costos, se puede aumentar la rentabilidad del proyecto o negocio. Gracias al modelado 3D, es posible realizar un proyecto, anunciarlo y fabricarlo acorde a su demanda; reduciendo con ello tiempos y costos en comparación con los métodos tradicionales.

Modelado en Autodesk FUSION 360

El software Autodesk FUSION 360 es uno de los softwares de simulación más completos e intuitivos que se pueden encontrar en el mercado actualmente. La simulación de modelos en FUSION 360 requiere del uso de técnicas matemáticas y computadores que permiten simular y predecir el funcionamiento de cualquier tipo de operación o proceso que tenga lugar en el mundo real. En resumen, la simulación computacional se puede definir como el estudio del comportamiento de sistemas mediante la solución de modelos matemáticos computacionales. El programa Fusión 360 utiliza el método de Análisis de Elementos Finitos (FEA) para predecir el comportamiento de un objeto del mundo real ante diferentes agentes tales como las fuerzas, el calor, la vibración, entre otros. De igual modo, este modo también permite predecir si un objeto se romperá, desgastará o funcionará de la manera en que fue diseñado y se espera que se comporte. Al procedimiento que se lleva a cabo en FUSION 360 se le suele llamar análisis, pero en el ciclo de diseño la realidad es que dicho procedimiento se usa para predecir qué sucederá cuando el producto se someta a uso. En resumen, se puede usar el método de elementos finitos para hacer más fácil la tarea de crear prototipos, disminuyendo la necesidad de uso de prototipos físicos y de realizar pruebas destructivas. El método de elementos finitos funciona descomponiendo un objeto real en un gran número de elementos (de 1000 a 100 000), como pequeños tetraedros o cubos, llamadas usualmente celdas. AL conjunto de celdas se le denomina malla. El método establece ecuaciones matemáticas para predecir el comportamiento de cada elemento y la suma de los resultados nos permite acceder a las soluciones globales del problema. Algunas de las simulaciones que se pueden llevar a cabo en FUSION 360 son las siguientes:

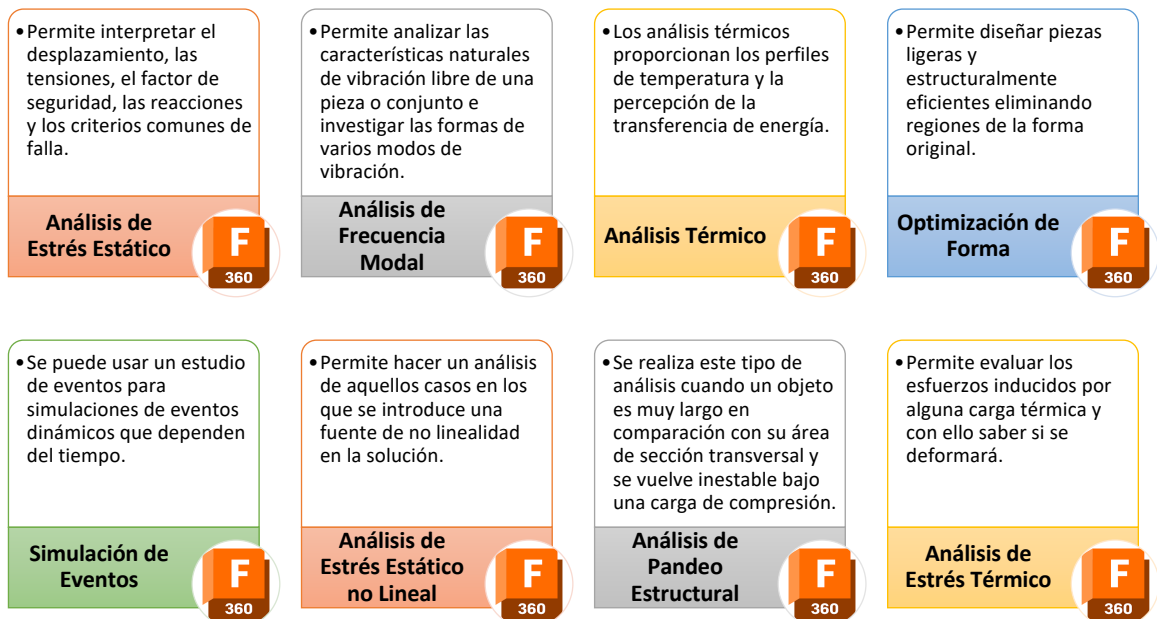


Figura 1. Tipos de Simulaciones disponibles en Autodesk FUSION 360.

Método de Elementos Finitos

El método de los elementos finitos es una herramienta relativamente nueva en ingeniería, ya que sus inicios fueron en el año de 1941, donde Hrenikoff, presentó una solución de problemas de elasticidad usando el método denominado “framework”. En 1943 aparecieron los trabajos de Courant realizados en interpolaciones lineales basadas en subregiones triangulares para modelar problemas de torsión.

Después a mediados de los años 50's aparece Turner desarrollando matrices de rigidez para la solución de problemas de elasticidad en barras y vigas, entre otros elementos, con grandes logros y posteriormente siguiendo los pasos de Turner las Corporaciones MacNeal-Schwendler and Computer Sciences elaboraron en la NASA el primer código de importancia para el análisis de elementos finitos, llamado NASTRAN, pero no fue hasta 1960 cuando Clough, utilizó por primera vez el término de elemento finito y en 1967 fue publicado

el primer libro de elementos finitos por Zienkiewicz y Chung.

Cabe destacar, que el método de elementos finitos puede llegar a ser un método matemático muy complejo ya que uno de sus fundamentos está basado en la discretización de los cuerpos de estudio, y debido a la existencia de muchas divisiones se debe realizar una o más ecuaciones para representar el comportamiento de cada división del cuerpo. El método de elementos finitos permite obtener una solución numérica aproximada sobre un cuerpo, estructura o dominio sobre el que están definidas ciertas ecuaciones diferenciales que caracterizan el comportamiento físico del problema dividiéndolo en un número elevado de subdominios denominados “elementos finitos”.

El método de los elementos finitos es muy usado debido a su generalidad y a la facilidad de introducir dominios de cálculo complejos (en dos o tres dimensiones). En definitiva, con esta metodología en lugar de obtener la solución exacta a una variable que cumple un sistema de ecuaciones diferenciales, se obtiene el valor aproximado de dicha variable en unos puntos determinados estimándose posteriormente el resto de las variables asociadas. Como pudimos ver en los párrafos anteriores, fueron muchos los desarrollos, trabajos, investigaciones, experimentos, análisis e inversiones de tiempo y dinero para poder tener en el método de elementos finitos que es una eficaz herramienta en la solución de problemas en el área de la ingeniería. Las aplicaciones de este método tienen un gran campo de trabajo. El método puede ser aplicado en la resolución y diagnóstico de problemas de análisis estructural para la estimación de desplazamientos, deformaciones y tensiones, también permite representar diferentes escenarios y evaluar el rendimiento de productos con aplicación de criterios de resistencia, rigidez o fatiga. Variaciones del método de elementos finitos permiten hacer análisis térmico, acústico, dinámico, electromagnético y de flujos de los casos más simples de comportamiento lineal al no lineal, como cuando se tienen grandes desplazamientos o contacto entre las partes de un conjunto.

Las aplicaciones del método de elementos finitos se han visto favorecidas gracias a los grandes avances tecnológicos que se han logrado en el área de la computación y sobre todo en los sistemas de diseño asistido por computadora; ahora es relativamente más fácil la modelación de prototipos, en los cuales podemos tener geometrías y superficies complicadas e irregulares, aplicaciones de cargas en forma específica para el estudio preciso de los esfuerzos internos y tener una modelación ajustada a los perfiles y estructuras que se emplean teniendo en consideración ciertas características como el cambio de secciones, estructuras huecas, con pared delgada y con características en secciones transversales muy específicas, entre muchas otras particularidades. En la búsqueda de soluciones, el método de elementos finitos puede tener diferentes tamaños de las celdas que integran la malla. Esto permite que la malla de elementos sea expandida o refinada en aquellos lugares donde exista la necesidad de hacerlo. Un aspecto importante del método es que está limitado a trabajar con formas regulares que tengan fronteras fáciles de definir, ya que estas fronteras de formas irregulares pueden ser aproximadas usando elementos con lados rectos o curvos. La principal desventaja del método es que necesita ser programado en una computadora, debido a la gran cantidad de cálculos numéricos que se deben realizar, aún para problemas pequeños; sin embargo, en la actualidad existe una gran variedad de softwares de elementos finitos, que facilitan en gran parte esta tarea.

En resumen, la simulación computacional es un método ampliamente usado en industrias de todo tipo para analizar distintos sistemas y mejorar la calidad de los productos y proyectos. En la mayoría de los casos este análisis se lleva cabo mediante el uso de computadoras que utilizan el Método de Elementos Finitos a fin de obtener respuestas y soluciones para una gran variedad de problemas de ingeniería. Los pasos esenciales de este método se detallan en la figura siguiente:



Figura 2. Pasos esenciales aplicados en el método de Elementos Finitos.

Objetivos

- Desarrollar la Simulación del Esfuerzo Mecánico que experimenta una pieza Modelada en 3D en FUSION 360 haciendo uso del método de elementos finitos.
- Introducir a los estudiantes en el mundo del modelado en 3D y de la simulación y solución de problemas asistidas por computadora.
- Divulgación de los conceptos básicos del modelado en 3D y la simulación asistida por computadora usando recursos digitales.

Recursos



Figura 3. Recursos Empleados en el proyecto.

Desarrollo del Proyecto

Prueba de Tensión en Probetas

La realización de las pruebas de tensión comenzó con la elaboración de bocetos en 2D basados en las dimensiones propuestas para las probetas. Es conveniente visualizar las figuras geométricas base de cada diseño, para así poder plantearlo con mayor facilidad; es decir, si partimos de bocetos basados en geometrías regulares podremos crear figuras compuestas a partir de combinar figuras más simples. El proceso de construcción de los bocetos iniciales se detalla en la Figura 4.

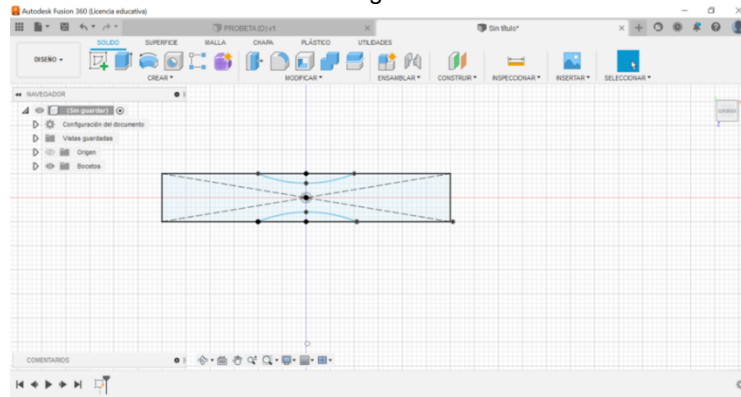


Figura 4. Bocetos iniciales en 2D empleados en el diseño de las probetas.

Una vez planteado el diseño acorde a las dimensiones que se necesitan, en los casos que fue necesario, se utilizó la herramienta “cortar” para eliminar todas aquellas partes de la figura que no se requerían en el diseño para poder terminar el boceto. Por último, se asignó el espesor a cada una de las probetas para obtener nuestro modelo en 3D, de igual forma el software da la posibilidad para poder optimizar la forma de la pieza en caso de que lo requiera o la figura a analizar no tenga geometrías bien definidas, y así el software pueda hacer las simulaciones posteriores sin tanto problema y dificultad, finalmente se determinó el tipo de material que se trabajará, en este caso elegimos resina epóxica, Figura 2.

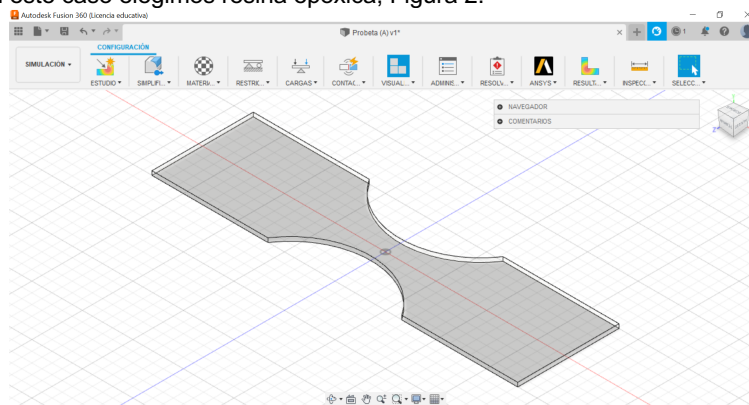


Figura 5. Diseño 3D de la probeta E.

En este caso se indicó en el simulador que el material de las piezas a analizar son de resina epóxica, se planteó la restricción de que algunas de las caras de los extremos del boceto no se debían mover (restricciones), así mismo se indicó la magnitud de la fuerza, la dirección en que ésta se iba aplicar y las partes de la pieza que se verían afectadas por dicha fuerza. Una vez que se obtuvo el diseño de cada una de las piezas se determinó un enmallado y se realizaron diversas simulaciones de tensión estática, para probar la resistencia tanto de la pieza como del material a analizar, Figura 6.

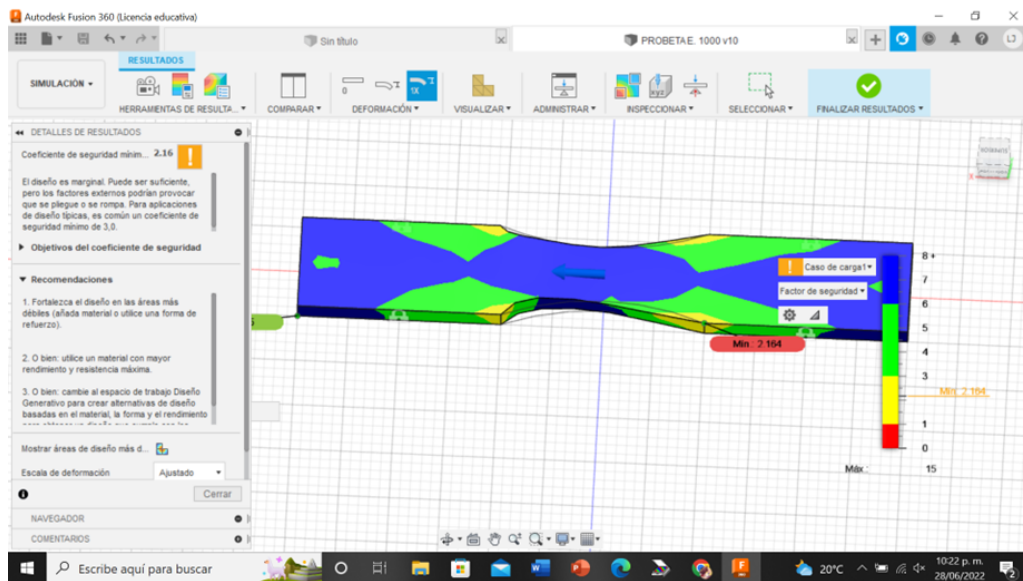


Figura 6. Simulación de la probeta E aplicando una fuerza de 350 N

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de la simulación de la probeta E a diferentes fuerzas, Tabla 1. Los valores del módulo de la elasticidad corresponden con los reportados en la literatura.

Tabla 1. Datos obtenidos en la simulación del esfuerzo máximo y la deformación presentes en la probeta E.

RESULTADOS DE ENSAYOS A TENSIÓN EN LA PROBETA E				
Probeta	Carga Aplicada (KN)	Deformación máxima	Esfuerzo Máximo MPa	Módulo de Elasticidad
Prueba 01	1000	0.005823	16.37	2811.26
Prueba 02	900	0.005241	14.73	2810.53
Prueba 03	700	0.004076	11.46	2811.57
Prueba 04	650	0.003785	10.64	2811.09
Prueba 05	600	0.003494	9.82	2811.39
Prueba 06	550	0.003203	9.00	2811.42
Prueba 07	500	0.002912	8.18	2811.12
Prueba 08	450	0.002620	7.36	2811.83
Prueba 09	400	0.002329	6.55	2811.93
Prueba 10	350	0.002038	5.73	2811.57
Prueba 11	300	0.001747	4.91	2811.67
Prueba 12	250	0.001456	4.09	2811.12
Prueba 13	200	0.001165	3.27	2810.30
Prueba 14	150	8.735E-04	2.45	2804.80
Prueba 15	125	7.279E-04	2.04	2802.58
Valor Medio		0.003227	9.07	2811.38082

Prueba de Compresión

Para realizar la prueba de compresión fueron necesarios los conocimientos que se obtuvieron anteriormente en la prueba de tensión con las probetas. De igual manera, se partió de bocetos en 2D para construir el prototipo tridimensional que cumpliera con las especificaciones propuestas en el diseño original. En esta prueba se realizó una figura un poco más compleja comparada con la analizada en las probetas; pues además de necesitar figuras regulares también se utilizaron figuras tridimensionales. Los detalles de los bocetos iniciales se presentan en la Figuras 7.

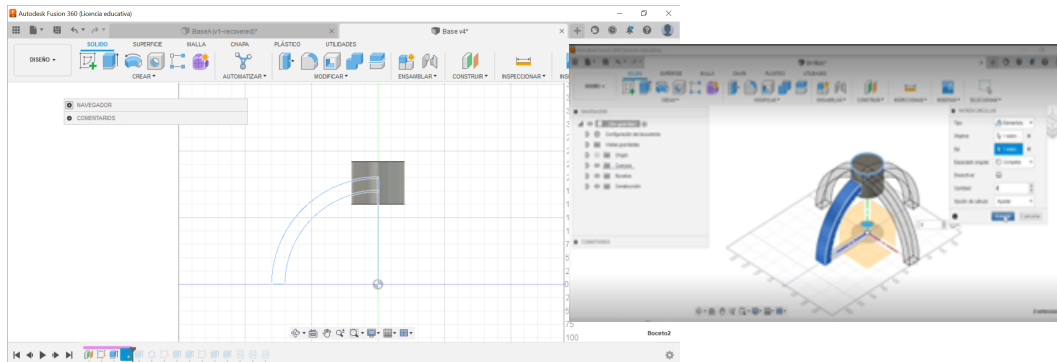


Figura 7. Bocetos iniciales en 2D y patrón circular empleado en la construcción del modelo.

Toda vez que el patrón circular nos permitió generar la estructuras de las barras de la base a 4 puntos se procedió a utilizar la herramienta “cortar” para remover gran parte del centro del cilindro; esto con la intención de insertar otra pieza similar dentro de la estructura central, Figura 8. A continuación, se construyó la pieza que uniría las dos partes de nuestra estructura; ésta actúa como un perno que traspasa los dos cuerpos que realizamos en los pasos anteriores y que se ensambla a la pieza gracias a la rosca simulada en la cara externa del perno, Figura 9.

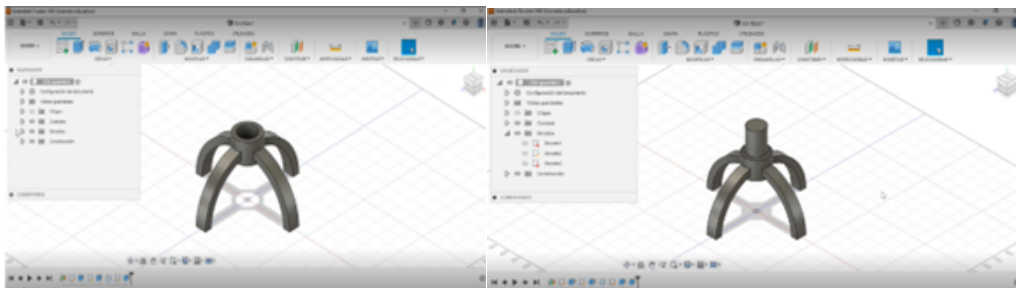


Figura 8. Generación del orificio en donde se genera la unión de la barra con la base empleando un perno.

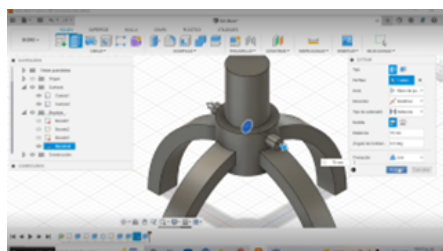


Figura 9. Perno de ensamble de las piezas que integran la base.

Después de elaborar la pieza se establecieron los parámetros necesarios para que el programa pudiera hacer la simulación correctamente, en primer lugar, establecimos que el material para la base sería acero inoxidable y tanto la barra como el perno serían de acero galvanizado, después se estableció que las restricciones de movimientos estarían presentes en las caras inferiores de la base y las salidas del perno, esto para apreciar la deformación directamente en la barra. Lo siguiente fue experimentar con distintas fuerzas de compresión en la cara superior de nuestra estructura, esto con el fin de encontrar alguna fuerza que tuviera el parámetro de seguridad igual a 4.5, pues esta era la más factible en nuestro proceso. Parte del ejercicio consistió en experimentar con el diseño alterando partes de nuestra estructura final, como el tamaño de la base, el tamaño de la barra o diferentes cantidades de pernos o de patas en la base. Este hecho nos permitía saber cuál de las diferentes variables resistía más la fuerza de compresión a través de un análisis comparativo, Figura 10.

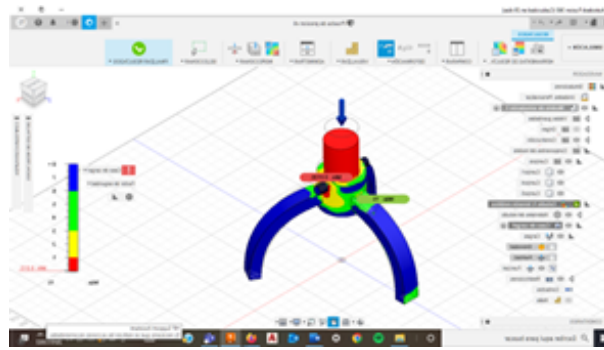


Figura 10. Simulación del esfuerzo de compresión aplicado en el diseño.

A continuación, se presentan los resultados de la estructura para una base de 3 patas y un perno únicamente, Tabla 2. Los resultados obtenidos en el resto de los diseños se muestran de manera extendida y detallada en los manuales derivados del trabajo de investigación.

Tabla 2. Datos obtenidos en la simulación del esfuerzo máximo y la deformación en la base de 3 patas y un perno.

RESULTADOS DE ENSAYOS A COMPRESIÓN				
Prueba	Factor de Seguridad	Fuerza Aplicada (N)	Deformación Máxima	Estrés Máximo (MPa)
01	5.08	5000	2.93E-04	38.26
02	6.35	4000	2.77E-04	32.6
03	4.65	6000	3.79E-04	45.72
04	4.57	6100	3.86E-04	46.48
Valor Medio			9.07	2811.38082

Prueba de Fatiga

Para llevar a cabo la prueba de fatiga se realizó en primera instancia la optimización de forma del diseño propuesto. El objetivo se centró en eliminar aquellas regiones de material que resultaban innecesarias para el diseño, Figura 11 y 12. Para conseguir los mismos resultados, conservando las propiedades mecánicas que nos interesan, pero con una cantidad menor de material obteniendo así la figura final, figura 2. Para esto el programa de fusión 360 nos facilita el trabajo con una herramienta que este posee en nuestro caso se decidió conservar el 40 % de la masa original, una vez que el programa nos marca la masa necesaria nosotros procedemos a quitar los residuos y finalizar la optimización, como podemos observar se eliminó gran parte de la masa de los triángulos base. Al realizar la simulación con la figura final, observamos que la optimización fue correcta con lo que pedíamos, ahora podemos trabajar las siguientes pruebas de fatiga. (1)

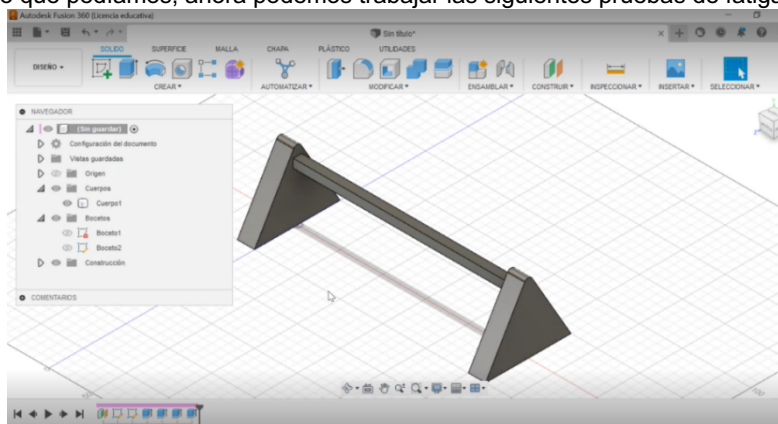


Figura 11. Diseño original propuesto para la prueba de fatiga.

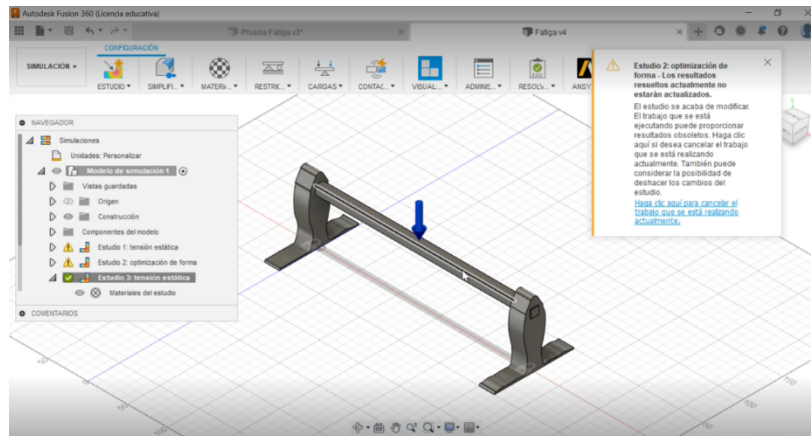


Figura 12. Diseño final con optimización de forma.

Se puede definir la fatiga como la deficiencia que se produce cuando un elemento se somete a una carga repetida o variable, que nunca alcanza un nivel suficiente como para provocar un error en una aplicación individual. Una vez que se tiene optimizado el diseño 3D, se realiza una serie de pruebas de tensión sobre la parte central de la pieza para determinar cuál es la carga que esta soporta antes de tener el peligro de deformarse, Figura 13. Se encontró que la carga máxima soportada por el diseño optimizado es de 809 Newtons, con un factor de seguridad de 3.00. (2)

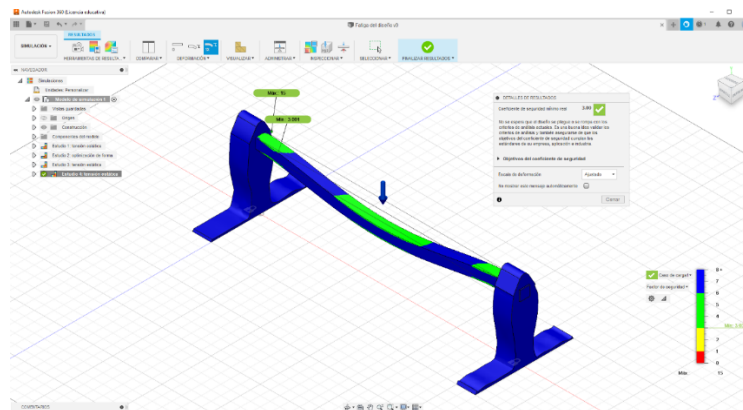


Figura 13. Simulación de la deformación presente en el diseño con optimización de forma.

Conclusiones

El modelado nos ayuda a visualizar un sistema como deseamos que sea diseñado. Un modelo ayuda al equipo de trabajo a comunicar la visión del sistema que se está construyendo. Además, nos permite especificar la estructura y conducta de un sistema. Un modelo permite documentar la estructura y conducta de un sistema antes de que sea codificado. Nos da una plantilla que guía el proceso de construcción. Un modelo es una herramienta invaluable durante la construcción, sirve como guía para el programador.

Los modelos son herramientas que apoyan al proyecto a largo plazo, ya que documentan las decisiones de diseño tomadas y ya no solo se depende de la memoria. La simulación es una herramienta muy potente para la evaluación y el análisis de los sistemas nuevos y los ya existentes. Permite anticiparse al proceso real, validarlo y obtener su mejor configuración. la simulación permite reproducir virtualmente los procesos y estudiar su comportamiento, para analizar el impacto de los posibles cambios o para comparar diferentes alternativas de diseño sin el alto coste de los experimentos a escala real.

El objetivo final es conseguir la mejor configuración del proceso con un coste mínimo, maximizando la eficiencia y la productividad. En resumen, Las técnicas de simulación sirven para analizar los procesos

actuales (mejora y optimización) y procesos futuros (anticipación de soluciones) con el fin de obtener el diseño más eficiente con diferentes objetivos:

- Optimización de recursos.
- Validación de la inversión a realizar.
- Identificación de restricciones de proceso.
- Análisis de puntos críticos (cuellos de botella) del proceso
- Evaluación de alternativas de diseño de los procesos.
- Evaluación del diseño de instalaciones para adaptarse a la fabricación de nuevos modelos.
- Análisis de la capacidad máxima.
- Estimación de la eficiencia / productividad.
- Simulación de condiciones extremas.

Referencias

- SolidWorks. (2011). "Diseño para evitar fatiga; informe técnico". Recuperado de: https://www.solidworks.es/sw/docs/WP_SIM_Fatigue_ESP.pdf
- Centro Autorizado de Capacitación Autodesk, SK Talleres- Simulaciones en FUSION 460. Extraído a partir de: <https://es.linkedin.com/pulse/simulaciones-en-fusion-360-i-sk-talleres>
- Desconocido, PRINCIPIOS DEL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS. (s. f.), págs. 6-9, 24-26. Recuperado el 18 de julio de 2022, de: http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lim/maldonado_j_r/capitulo2.pdf
- Desconocido, Fundamento y origen del Método de los Elementos Finitos (MEF). (s. f.). Ingeoexpert. Recuperado el 18 de julio de 2022, de: <https://ingeoexpert.com/articulo/fundamento-y-origen-del-metodo-de-los-elementos-finitos-mef/>
- Mirlisenna, G. (2016, 22 enero). MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS: ¿QUÉ ES? ESSS. Recuperado el 18 de julio de 2022, de: <https://www.esss.co/es/blog/metodo-de-los-elementos-finitos-que-es/>
- Formacad Engineering & Consulting. (2022, 15 marzo). Ventajas y desventajas de Fusion 360 | formacad. formacad Engineering & Consulting. Recuperado de: <https://formacad.es/fusion-360-ventajas-y-desventajas/>
- Puentedura, R. (2006). Transformation, Technology, and Education.