

Universidad Autónoma de Ciudad Juárez
Instituto de Ingeniería y Tecnología
Departamento de Ingeniería Industrial y Manufactura



**Mejora del diseño de una fixtura de una máquina de heat
steking, por medio del análisis de elemento finito**

Proyecto que presenta

Ing. Luis Antonio Nájera León

como requisito parcial para obtener el grado de

Maestría en Ingeniería en Manufactura

Director

Dr. Yahir de Jesús Mariaca Beltrán

Agradecimientos

Agradezco a Dios por ser parte del logro obtenido en colocar los medios para superar los obstáculos y concluir este esfuerzo nada sencillo durante dos años, de manera satisfactoria. Agradezco infinitamente a mi familia (padres y hermana) por el apoyo incondicional e influencia positiva hasta la instancia actual de mi vida para alcanzar cada una de las etapas personales y profesionales encaminadas con su ejemplo de vida. También quiero agradecer a mi futura esposa, que estuvo desde el principio brindando consejos y alentando a que se podía concluir esta etapa de altas y bajas, pero la paciencia es infinitamente agradecida.

Gracias a la institución por brindar los recursos tecnológicos y didácticos para la enseñanza y formación de personas en el ámbito profesional. Aunque fueron tiempos muy complicados por la situación de la pandemia, aun así se buscó completar la formación necesaria para lograr el objetivo. La flexibilidad para llevar las actividades escolares a distancia fue parte esencial de nuestro desarrollo. Así también, debo reconocer el apoyo del Doctor Yahir Mariaca, donde durante poco de menos año de conocerlo nos ha brindado puntuales lecciones y enseñanzas escolares, profesionales y reales, siendo parte esencial en ayudar a formarnos como personas y profesionistas.

Finalmente, quiero agradecer a cada una de las personas que estuvieron involucradas en el transcurso de la maestría, por transmitir amistad, compañía, apoyo, ánimos y consejos para superar cada barrera que se presentó desde el inicio del camino hasta la meta final. ¡Gracias y Dios está con nosotros!

Dedicatoria

Para mi hermana, mamá, papá (†) y mi futura esposa.

Índice general	
Agradecimientos	1
Dedicatoria.....	2
Índice de figuras	6
Índice de tablas.....	9
RESUMEN.....	10
ABSTRACT.....	11
1. INTRODUCCIÓN	12
1.1. Antecedentes.....	12
1.2. Planteamiento del problema	15
1.3. Objetivos.....	15
1.3.1. Objetivo general	15
1.3.2. Objetivos específicos	15
1.5. Justificación	16
1.6. Alcance y delimitación.....	17
1.7. Cronograma.....	18
2. REVISIÓN DE LITERATURA.....	19
2.1. Introducción	19
2.2. Método de elemento finito	19
2.3. Simulación de esfuerzos	20

2.4.	Malla de cálculo válido para el método de elemento finito	20
2.5.	Condiciones de frontera.....	21
2.6.	Simulación numérica de la fixtura.....	21
2.6.1.	Deformación máxima.....	21
2.6.2.	Deformaciones unitarias equivalentes de Von Mises y esfuerzos equivalentes de Von Mises	22
2.6.3.	Herramienta de fatiga	22
3.	METODOLOGÍA	23
3.1.	Métodos	23
3.1.1.	Geometría válida de la fixtura	24
3.1.2.	Establecer las condiciones de frontera.....	26
3.1.3.	Desarrollar una malla de cálculo válido	27
3.1.4.	Selección de materiales.....	30
3.1.5.	Simulación de fuerzas	32
3.1.6.	Simulación numérica de la fixtura	33
3.1.7.	Análisis de resultados	33
3.2.	Materiales	34
3.2.1.	Cambios en la geometría de la fixtura o nido	34
3.2.2.	Establecer las condiciones de frontera.....	36
3.2.3.	Desarrollar una malla de cálculo válido	37

3.2.4.	Selección de materiales.....	40
3.2.5.	Simulación de fuerzas	42
3.2.6.	Simulación numérica de la fixtura	43
3.2.7.	Análisis de resultados	43
4.	RESULTADOS	44
4.1.	Resultados de geometría inicial	44
4.2.	Resultados de geometría con mejora	49
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	58
6.	REFERENCIAS.....	60

Índice de figuras

Figura 1. Cronograma Seminario de Investigación I.....	18
Figura 2. Cronograma Titulación	18
Figura 3. Metodología expresada en forma de diagrama de flujo.....	24
Figura 4. Máquina de heat staking.....	26
Figura 5. Geometrías iniciales consideradas para el análisis de elemento finito (3 geometrías distintas).	27
Figura 6. Pasos a seguir en el análisis estructural estático.....	28
Figura 7. Importación de geometría inicial que se analizará.....	29
Figura 8. Malla generada en geometría inicial.	30
Figura 9. Selección de librería de materiales que tienen curva de fatiga.....	31
Figura 10. Selección de materiales utilizando librería que contiene curva de fatiga en materiales.	31
Figura 11. Soporte fijo seleccionado en geometría inicial.....	32
Figura 12. Aplicación de fuerzas en la geometría inicial.	33
Figura 13. Vista general de la mejora propuesta en la fixtura.	35
Figura 14. Vista lateral de la mejora propuesta en la fixtura.	35
Figura 15. Vista superior de la mejora propuesta en la fixtura.	36
Figura 16. Geometría con propuesta de mejora considerada para el análisis de elemento finito.....	37
Figura 17. Pasos a seguir en el análisis estructural estático.....	38
Figura 18. Importación de geometría que se analizará.	39
Figura 19. Malla generada en fixtura.	40

Figura 20. Selección de librería de materiales que tienen curva de fatiga.....	41
Figura 21. Selección de materiales utilizando librería que contiene curva de fatiga en materiales.	41
Figura 22. Soporte fijo seleccionado en geometría con mejora.	42
Figura 23. Aplicación de fuerzas en la geometría con mejora.	43
Figura 24. Deformación total de la geometría inicial.....	44
Figura 25. Estrés equivalente de Von Mises de la geometría inicial.....	45
Figura 26. Deformaciones unitarias equivalente de Von Mises de la geometría inicial.	46
Figura 27. Factor de seguridad de estrés de la geometría inicial.	47
Figura 28. Vida útil de la geometría inicial.	48
Figura 29. Factor de seguridad en fatiga de la geometría inicial.	49
Figura 30. Deformación total de la geometría con mejora.....	50
Figura 31. Estrés equivalente de Von Mises de la geometría con mejora.....	51
Figura 32. Deformaciones unitarias equivalente de Von Mises de la geometría con mejora.	52
Figura 33. Factor de seguridad de estrés de la geometría con mejora.	53
Figura 34. Vida útil de la geometría con mejora.	54
Figura 35. Factor de seguridad en fatiga de la geometría con mejora.	55
Figura 36. Comparación de deformación máxima (mm).....	56
Figura 37. Comparación de esfuerzos equivalentes de Von Mises (MPa).....	56
Figura 38. Comparación de deformaciones unitarias (mm/mm).....	57
Figura 39. Comparación de factor de seguridad.	57

Figura 40. Comparación de vida útil en fatiga.	58
Figura 41. Comparación de factor de seguridad de vida en fatiga.	58

Índice de tablas

Tabla 1. Selección de materiales para cada una de las geometrías.	34
Tabla 2. Comparación de materiales entre acero y aluminio.	34
Tabla 3. Resumen de resultados obtenidos.....	55

RESUMEN

En este trabajo de investigación se propone desarrollar el análisis de una fixtura que se utiliza en una máquina de heat staking mediante el análisis de elemento finito. Dicho análisis se realiza con el fin de encontrar las deficiencias en la fixtura actual por la mala adhesión de un balín metálico a un orificio plástico. Se cree que existe movilidad durante el proceso del estaqueado de plástico que consiste en calentar y ablandar el plástico para deformarlo permanentemente. Para esto se pretende mejorar el diseño de la fixtura por medio del análisis de elemento finito de esfuerzos críticos, deformaciones y vida en fatiga, para eliminar los errores en la unión de los componentes de diferentes materiales en el proceso de estaqueo. Existen diversos estudios que se desarrollaron dentro de la metodología que son establecer una geometría válida para el análisis de la fixtura, establecer las condiciones de frontera de operación a analizar, desarrollar una malla de cálculo válido para el método de elemento finito, desarrollar la simulación numérica de la fixtura para la obtención de la deformación máxima, para la obtención de las deformaciones unitarias equivalentes de Von Mises y para la obtención del factor de seguridad; estimar la vida útil en fatiga para la validación del diseño óptimo de la fixtura, y sustentar el diseño óptimo de la fixtura con las conclusiones obtenidas del análisis de elemento finito. Como resultado, con la utilización del software Solidworks se agregaron insertos y soportes a la geometría de la fixtura para restringir el movimiento del giro del ensamble y evitar el daño de la pieza, todo esto nuevamente validado en una nueva simulación en el software Ansys.

ABSTRACT

In this research work it is proposed to develop the analysis of a fixture used in a heat staking machine through finite element analysis. This analysis is carried out in order to find the deficiencies in the current fixture due to the poor adhesion of a metallic sphere to a plastic hole. Mobility exists during the plastic staking process which involves heating and softening the plastic to permanently deform it. For this, it is intended to improve the design of the fixture by means of finite element analysis of critical stresses, deformations and fatigue life, to eliminate errors in the union of the components of different materials in the staking process. There are several studies that were developed within the methodology that are to establish a valid geometry for the analysis of the fixture, establish the operating boundary conditions to be analyzed, develop a valid calculation mesh for the finite element method, develop the numerical simulation of the fixture to obtain the maximum deformation, to obtain the equivalent Von Mises unit deformations and to obtain the safety factor; estimate the life in fatigue for the validation of the optimal design of the fixture, and support the optimal design of the fixture with the conclusions obtained from the finite element analysis. As a result, using the software Solidworks, inserts and supports were added to the geometry of the fixture to restrict the movement of the assembly twist and prevent damage to the part, all this again validated in a new simulation in the Ansys software.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, los estudios para predecir y analizar fenómenos en elementos mecánicos, por lo general se llevan a cabo sobre modelos mecánicos, los cuales comúnmente se fabrican a escala y cumplen con las teorías de análisis dimensional y de similitud. También, los procesos de ensamble se utilizan comúnmente en la producción de diversos bienes de consumo [1], donde los métodos de modelado y los métodos experimentales son complejos, costosos y requieren mucho tiempo [2]. En este trabajo de investigación se propone desarrollar el análisis de una fixtura que se utiliza en una máquina de heat staking mediante el análisis de elemento finito.

Palabras clave: Heat Staking, mejora, fixtura (escantillón), simulación, análisis de elemento finito, Solidworks, Ansys.

1.1. Antecedentes

La competencia global ha obligado a los fabricantes industriales a reducir los ciclos de producción y la agilidad del diseño de productos [3]–[5]. Por consiguiente, las empresas de manufactura demandan tecnologías eficientes para la unión de materiales que se están desarrollando actualmente [6], [7]. Esta necesidad se basa en lo que plantea Faria Neto et al. (2018), quienes señalan que uno de los problemas que se presentan en la producción de componentes es la unión de materiales de diferente naturaleza como los polímeros y metales.

Si dicho problema ha propiciado, en los últimos años, el desarrollo tecnológico, donde se han reportado nuevas metodologías; sobresaliendo el estaqueo de plástico (*staking plastic*). Esta utiliza luz infrarroja como fuente de energía para ensamblar las piezas de plástico calentadas [8], [9]. Otra metodología desarrollada es el proceso de

heat staking (estaca de calor), la cual utiliza calor y presión sobre ciertos parámetros para manipular una orilla moldeada en una pieza de plástico que retendrá o unirá la pieza a otro componente [10], [11]. Es decir, la parte que se unirá al plástico tiene un orificio o ranura que coincide con la geometría del componente. A diferencia del remachado, el proceso de estaqueo requiere calentar y ablandar la proyección de plástico para deformarla permanentemente.

Los métodos de calentamiento típicos utilizados para el proceso de estacado son el calentamiento ultrasónico, el calentamiento por contacto de la herramienta y el calentamiento por aire caliente [7]. En este proceso, el calor localizado hace que el polímero en contacto con el patrón en relieve se derrita y fluya hacia las cavidades alrededor de las características del molde formando los patrones requeridos sobre el sustrato [12]. Las ventajas que ha llevado utilizar este tipo de tecnología es gracias al relleno de plástico que oscila en 30-40%, haciendo sencillo el procesamiento de la pieza [13] provocando bajo costo, alta productividad y buena retención entre componentes [14], [15] que se manufacturan. Para llevar a cabo este proceso es necesario el diseño de una fixtura especial.

Las fixturas juegan un papel importante juegan un papel importante para garantizar la calidad de los productos en la ingeniería de fabricación [16], [17], especialmente en el contexto de la fabricación multiproducto [18]. Una fixtura está diseñada para un trabajo particular [19] en colocar y sostener una o más piezas de trabajo dentro de algunas especificaciones [20]. Se usa ampliamente en la manufactura de partes. La fixtura mantiene la pieza de trabajo en la posición deseada [21] y guía a la

máquina o herramental a que realice su proceso, ayudando a que la construcción repetitiva se realice dentro de los mismos parámetros.

Por otro lado, las fixturas tienen un impacto directo en la calidad, la productividad y el costo del producto. Generalmente, los costos asociados con el diseño y la fabricación de los accesorios pueden representar entre el 10% y el 20% del costo total de un sistema de fabricación [22]. Aproximadamente el 40% de las piezas rechazadas se deben a errores de dimensionamiento que se atribuyen a un diseño deficiente de los accesorios [23]. Por lo que un aspecto importante en el diseño de un buen accesorio es el de impartir suficiente rigidez a toda la superficie de la pieza de trabajo que se va a mecanizar [24].

Los automóviles, las aeronaves y los barcos tienen muchas piezas que deben conectarse entre sí [25], [26]. En una empresa manufacturera donde se realiza el proceso de heat staking a un ensamble, se necesitan hacer modificaciones a la fixtura porque el proceso de calentado no se está realizando de manera óptima. Aunque dicha fixtura fue diseñada con las especificaciones requeridas [27], el diseño de la fixtura permite un movimiento que altera las condiciones normales de la pieza, por lo que el desperdicio incrementa, y los parámetros siendo modificados no ayudan a la manufactura óptima de la pieza. Por consecuencia, los accesorios se han vuelto más flexibles en sus aplicaciones a expensas de ser menos rígidos mecánicamente [28].

La bibliografía disponible sobre este proceso, es escasa, y la habilidad de los técnicos e ingenieros involucrados, existe gracias a su experiencia profesional [29]. La optimización del proceso y el diseño se basa principalmente en pruebas empíricas y conocimientos expertos [6].

1.2. Planteamiento del problema

En un proceso de unión, de acuerdo con Abibe et al. (2012), [30] se pueden encontrar diferentes modos de falla dependiendo de las condiciones, donde uno de los factores que juega un papel esencial es la fixtura. Una de las industrias que requiere de este proceso es la industria automotriz. En una empresa manufacturera de dicha industria se detectó una máquina de heat staking que se encuentra iniciando producción en serie y se han reportado rechazos por la mala adhesión de un balín metálico a un orificio plástico, por lo que se requiere el análisis del diseño de la fixtura, ya que se cree que existe movilidad durante el proceso del estaqueado de plástico. Esto hace que se quemee la orilla del plástico y el balín metálico no permite la unión propia al plástico.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Mejorar el diseño de una fixtura de una máquina de heat staking, por medio del análisis de elemento finito de esfuerzos críticos, deformaciones y vida en fatiga, para eliminar los errores en la unión de los componentes de diferentes materiales en el proceso de estaqueo.

1.3.2. Objetivos específicos

- Establecer una geometría válida para el análisis de la fixtura.
- Establecer las condiciones de frontera de operación a analizar.
- Desarrollar una malla de cálculo válido para el método de elemento finito.
- Desarrollar la simulación numérica de la fixtura, para la obtención de la deformación máxima bajo condiciones normales de operación.

- Desarrollar la simulación numérica de la fixtura, para la obtención de las deformaciones unitarias equivalentes de Von Mises, bajo condiciones normales de operación.
- Desarrollar la simulación numérica de la fixtura, para la obtención del factor de seguridad, bajo condiciones normales de operación.
- Estimar la vida útil en fatiga por medio del análisis de elemento finito para la validación del diseño óptimo de la fixtura.
- Validar y sustentar el diseño óptimo de la fixtura con las conclusiones obtenidas del análisis de elemento finito.

1.4. Hipótesis

A partir de la adecuación de la fixtura es posible eliminar los errores en la unión de un ensamble sobre la parte metálica y el polímero.

1.5. Justificación

En el pasado, se dedicaba poco trabajo de análisis al diseño. Con el desarrollo reciente de nuevas técnicas, software y teorías matemáticas, se puede sintetizar la tarea [31]. Por ello, la importancia de este estudio es determinar una técnica para resolver los problemas del quemado de la pieza dentro del proceso para encontrar una causa raíz del problema. La retroalimentación constructiva de los operadores incluyó la solicitud de la mejora [32]. Es así como los grupos de ingeniería se enfocan en este problema específico cuando ocurre y tienden a dar una solución basada en la experiencia experimental en comparación a un análisis profundo para la resolución del problema. También, tradicionalmente, los dispositivos se diseñan o mejoran mediante prueba y error, lo cual es costoso y requiere mucho tiempo [33]. Por lo que la ubicación adecuada de la

pieza de trabajo y el diseño del accesorio son cruciales para la calidad del producto en términos de precisión, exactitud y acabado de la pieza mecanizada [34]. Este estudio se centra en encontrar una solución a los datos o antecedentes que se tienen al problema. Con la ayuda del software ANSYS, los resultados de la investigación proporcionarán una base teórica para el desarrollo de una tecnología de procesamiento razonable y un ensamblaje confiable de la pieza de trabajo [35]. Debido al uso de la tecnología de análisis paramétrico, las variables de diseño deben especificarse en modelos tridimensionales [36].

1.6. Alcance y delimitación

Esta simulación se centra en el análisis a un problema de producción en la industria, así como en la reducción de la mala calidad de los productos fabricados en el proceso de heat staking. En contexto, se desarrollará una metodología para establecer una solución sólida a los problemas del heat staking con base en la posición de la pieza sobre la fixtura y la posición del stake a la pieza y proponer la resolución de problemas para este asunto específico. La metodología propuesta se puede aplicar en un concepto general para reducir el tiempo en la resolución del problema contrario al concepto de prueba y error para encontrar la solución.

El enfoque principal es analizar las interacciones de contacto entre pieza de trabajo y fijación [37], por lo que sólo se podrá realizar el análisis discretizando el diseño donde serán tres objetos de análisis: la parte superior que es el stake, la parte central que es la piezao ensamble y la parte inferior que es la fixtura. Así se dejan otros componentes externos fuera dado que se limita el estudio a una cierta cantidad de nodos.

1.7. Cronograma

Durante los dos últimos semestres del programa que comprenden los cursos de seminario de investigación I y titulación, se desarrollaron actividades dentro de un periodo de 32 semanas.

Para el seminario de investigación I se llevaron a cabo actividades pertinentes a la parte inicial del proyecto en la definición de la estructura, tal como lo menciona la Figura 1.

No.	Actividad	Semana															
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	Tema, asesor, planteamiento, objetivos general y particulares, hipótesis y justificación preliminar	█	█														
2	Diagrama de flujo, introducción y antecedentes		█	█	█												
3	Propuesta de revisión de literatura				█	█	█										
4	Planteamiento, objetivos generales y particulares, hipótesis					█	█	█									
5	Alcance, delimitaciones y cronograma de actividades						█	█									
6	Presentación ante grupo de avances								█	█							
7	Revisión de literatura/Estado del arte										█	█	█				
8	Actualización de metodología.												█	█			
9	Revisión de póster para coloquio														█	█	
10	Entrega de póster y presentación en video del póster															█	█
11	Entrega de protocolo final de investigación de seminario de investigación I																█

Figura 1. Cronograma Seminario de Investigación I

Por otro lado, dentro del último semestre en la materia de titulación se comprende toda la etapa de metodología y ejecución del proyecto respecto a simulaciones y manejo de software tal como lo muestra la Figura 2.

No.	Actividad	Semana															
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	Estudio preliminar	█															
2	Obtención de requerimientos		█														
3	VARIABLES de entrada y salida			█													
4	Recolección de datos				█	█											
5	Diseño de la geometría (fixtura, herramental y pieza)					█	█										
6	Validación de geometría para el análisis de la fixtura						█	█									
7	Delimitación de las condiciones de frontera de operación a analizar							█	█								
8	Generación de una malla de cálculo válido para el método de elemento finito								█	█							
9	Simulación numérica de la fixtura									█	█						
10	Estimación de la vida útil en fatiga por medio del análisis de elemento finito										█	█					
11	Propuestas de mejora en base a los resultados previos											█	█				
12	Determinar las limitaciones de las geometrías previas y posibles soluciones												█	█			
13	Ejecutar nuevamente las simulaciones a las mejoras realizadas													█	█		
14	Validaciones estadísticas en el piso de producción														█	█	
15	Desarrollo del reporte															█	█
16	Desarrollo de la presentación del proyecto																█
17	Desarrollo del artículo																█
18	Presentación del proyecto																█

Figura 2. Cronograma Titulación

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Introducción

De acuerdo con la literatura que se empleó a lo largo del desarrollo del documento, se encontró que existe una secuencia para determinar los puntos débiles o a considerar en una geometría, es decir, se selecciona la geometría de análisis donde se determina si se necesita toda la entidad o solo alguna parte de ella. Posteriormente se realizan todas las simulaciones para analizarlas y determinar que técnicas pueden emplearse para proponer una mejora que satisfaga los puntos débiles del funcionamiento y ayuden la decisión final. Es así como se planteará más adelante la metodología que amparará la hipótesis propuesta.

2.2. Método de elemento finito

El método de elemento finito (FEM por sus siglas en inglés) discretiza la pieza de trabajo en un número definido de elemento de membrana triangular. Para minimizar los errores dimensionales y de forma, se optimiza el diseño del dispositivo [38], [39]. Un modelo de elemento finito (FE por sus siglas en inglés) del sistema accesorio-pieza de trabajo es muy adecuado para predecir la deformación elástica de la pieza de trabajo y las fuerzas de reacción, ya que puede explicar fácilmente todas las fuentes de cumplimiento en el sistema [40], [41]. El método de elemento finito es un método numérico, ha pasado de ser una herramienta novedosa a necesaria tanto a nivel académico como industrial alcanzando sus mayores aplicaciones en el campo de la ingeniería. El éxito del método también se debe al surgimiento de computadoras más rápidas, con mayor capacidad de almacenamiento y manejo de datos, aunado al desarrollo de programas especializados [42]. También se han utilizado técnicas de

diferencias finitas, pero éstas plantean problemas cuando los contornos son complicados [43].

2.3. Simulación de esfuerzos

El análisis de fatiga tiene tres métodos principales, vida de deformación, vida de tensión y mecánica de fractura. Estos dos primeros se encuentran para utilizarse en el software ANSYS. Las frecuencias naturales de los elementos están influenciadas fuertemente por la variación en la rigidez de los materiales utilizados y, en consecuencia, los modos de vibración. Así mismo, si una carga de impacto presenta variación en un periodo muy corto, se generan ondas elásticas que, al interactuar con los efectos o discontinuidades de los elementos, generan concentraciones de esfuerzos [44].

Los resultados que son comunes a ambos tipos de análisis de fatiga se enumeran a continuación:

- Condiciones de frontera
- Malla de cálculo válido para el método de elemento finito.
- Deformación máxima
- Deformaciones unitarias equivalentes de Von Mises
- Esfuerzos equivalentes de Von Mises
- Factor de seguridad
- Vida útil en fatiga

2.4. Malla de cálculo válido para el método de elemento finito

El objetivo de la malla en ANSYS Workbench es proporcionar herramientas de malla robustas y fáciles de usar que simplificarán el proceso de generación de malla [45]. En el proceso de discretización se utiliza una malla de aproximación y curvatura con

elementos de alto orden, esta muestra el sistema de mallado para luego aplicar el método de elementos finitos a través del Solver de ANSYS [46].

2.5. Condiciones de frontera

Como se mencionó anteriormente, utilizamos FEM para calcular el desplazamiento máximo de los puntos de contacto con la herramienta de corte en el área de mecanizado de la pieza de trabajo. Se utiliza una interpolación discreta para traducir cada dimensión de una partícula a un número entero representado como un nodo del modelo FEM de la pieza de trabajo. Luego, los nodos traducidos se envían a ANSYS como condiciones de contorno [47]. Por lo tanto, se necesitan esfuerzos para obtener datos experimentales que puedan respaldar las correlaciones [48]. Las condiciones de contorno son consideradas como cargas a las que se somete la entidad o geometría que se va a analizar.

2.6. Simulación numérica de la fixtura

La deformación elástica de la pieza de trabajo y el error geométrico de los localizadores son componentes principales del error general de mecanizado [21]. Los ejemplos numéricos demuestran la precisión y la eficacia del método propuesto [49].

2.6.1. Deformación máxima

Las deformaciones físicas se pueden calcular en y dentro de una pieza o ensamblaje. Los soportes fijos evitan la deformación; las ubicaciones sin un soporte fijo suelen sufrir deformaciones en relación con la ubicación original. Las deformaciones se calculan en relación con el sistema de coordenadas del mundo de la pieza o el ensamblaje.

El resultado de la deformación puede presentar una limitación de visualización basada en nodos.

2.6.2. Deformaciones unitarias equivalentes de Von Mises y esfuerzos equivalentes de Von Mises

El esfuerzo equivalente Von Mises o teoría de la energía de distorsión o deformación máxima predice que la falla por fluencia da lugar cuando la energía de deformación total por unidad de volumen alcanza o excede la energía de deformación por unidad de volumen correspondiente a la resistencia a la fluencia en compresión o tensión del mismo material [50].

La tensión equivalente (también llamada tensión de von Mises) se utiliza a menudo en el trabajo de diseño porque permite que cualquier estado de tensión tridimensional arbitrario se represente como un único valor de tensión positivo. La tensión equivalente es parte de la teoría de rotura por tensión equivalente máxima utilizada para predecir la fluencia en un material dúctil.

2.6.3. Herramienta de fatiga

La fatiga proporciona información sobre la vida, los daños y los factores de seguridad y utiliza un enfoque de duración de tensión o de duración de tensión, con varias opciones para manejar la tensión media y especificar las condiciones de carga. Un ejemplo del enfoque de duración de la deformación es una parte / cuerpo con muesca donde, aunque la respuesta nominal es elástica, la respuesta local puede presentarse como un plástico. Revise las siguientes secciones con respecto a las propiedades del material de fatiga, la teoría de los cálculos asociados con las propiedades del material, las condiciones de carga y los resultados.

2.6.3.1. Factor de seguridad

El factor de seguridad es un gráfico de contorno del factor de seguridad con respecto a una falla por fatiga en una vida de diseño determinada. Al igual que los daños y la vida, este resultado puede tener alcance. Para el factor de seguridad los valores inferiores a uno indican una falla antes de que se alcance la vida útil del diseño. Los factores de seguridad altos en una región indican que puede guardar material de dicha región. Muchos códigos requieren un factor de seguridad mínimo entre 1.5 y 3

El material que se encuentra en una ubicación empezará a fallar si aplica nuevas cargas iguales a las actuales multiplicadas por el factor de seguridad resultante, teniendo en cuenta que las deformaciones unitarias permanecen en el intervalo lineal.

2.6.3.2. Vida útil en fatiga

La vida puede abarcar todo el modelo o tener un alcance como cualquier otro resultado de contorno en Ansys (partes, superficies, bordes y vértices).

3. METODOLOGÍA

3.1. Métodos

Una vez entendida la parte de todo lo que antecede a las técnicas de empleo para determinar las consecuencias de la ejecución de los pasos llegar a la obtención de datos para el análisis de ellos, se propone la metodología que ayudará en la secuencia de seguimiento. El modelado se realizó en el software SolidWorks y la simulación en el software ANSYS [51]. Es así como en la Figura 3 se muestra el flujo de la metodología y los siguientes capítulos de explica cada uno de ellos.

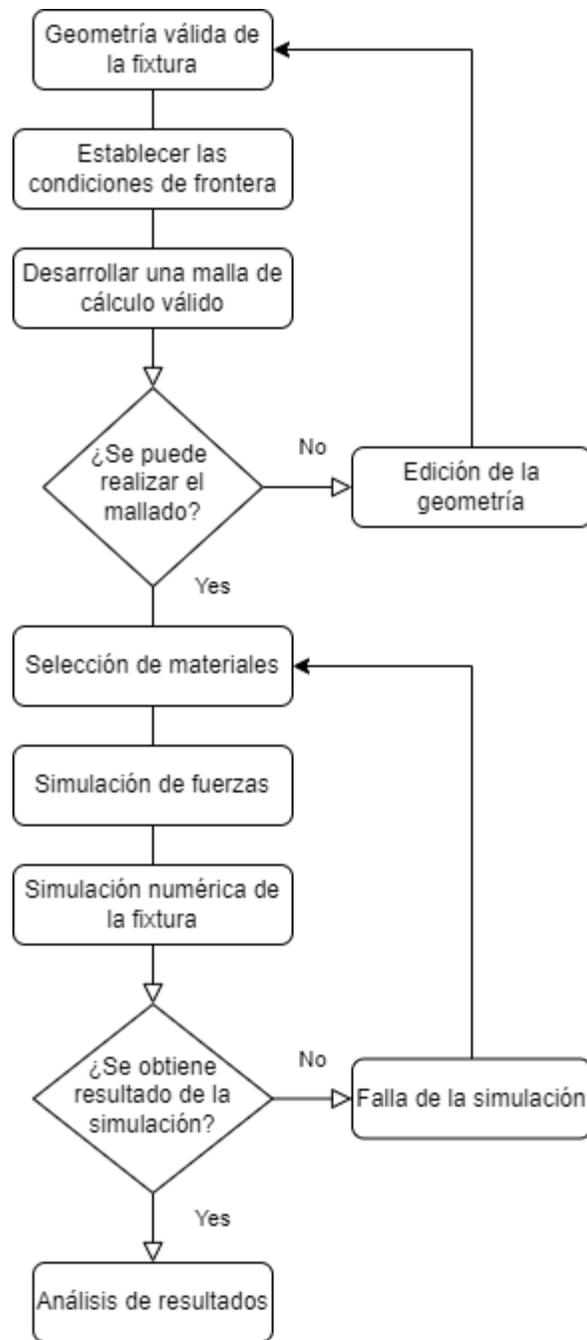


Figura 3. Metodología expresada en forma de diagrama de flujo.

3.1.1. Geometría válida de la fixtura

El análisis de la estructura es un vínculo vital al diseñar componentes [52]. Por lo que mediante simulaciones estructurales es posible determinar a qué cargas se someten los Heat Stakes durante diferentes condiciones de uso [14]. Es por lo que se pretende

explorar la simulación de la fixtura en la máquina para revisar las condiciones de sujeción que tiene la pieza en dicha fixtura. Esto ayudará a que el conocimiento de las deformaciones de la pieza de trabajo inducidas por la carga en un sistema de pieza de trabajo es importante para garantizar una producción de piezas de calidad. Los métodos adecuados para predecir con precisión tales deformaciones son esenciales para el diseño y funcionamiento de los accesorios [53]. Luego, el modelo se carga de acuerdo con las condiciones de mecanizado y se resuelve para optimizar el parámetro de fijación para minimizar la deformación de la pieza [54].

Como se mencionó anteriormente, utilizamos FEM para calcular el desplazamiento máximo de los puntos de contacto con la herramienta de corte en el área de mecanizado de la pieza de trabajo. Se utiliza una interpolación discreta para traducir cada dimensión de una partícula a un número entero representado como un nodo del modelo FEM de la pieza de trabajo. Luego, los nodos traducidos se envían a ANSYS como condiciones de contorno [47]. Por lo tanto, se necesitan esfuerzos para obtener datos experimentales que puedan respaldar las correlaciones [48].

La deformación elástica de la pieza de trabajo y el error geométrico de los localizadores son componentes principales del error general de mecanizado [21]. Los ejemplos numéricos demuestran la precisión y la eficacia del método propuesto [49].

Inicialmente la máquina de heat staking se muestra como en la Figura 4.

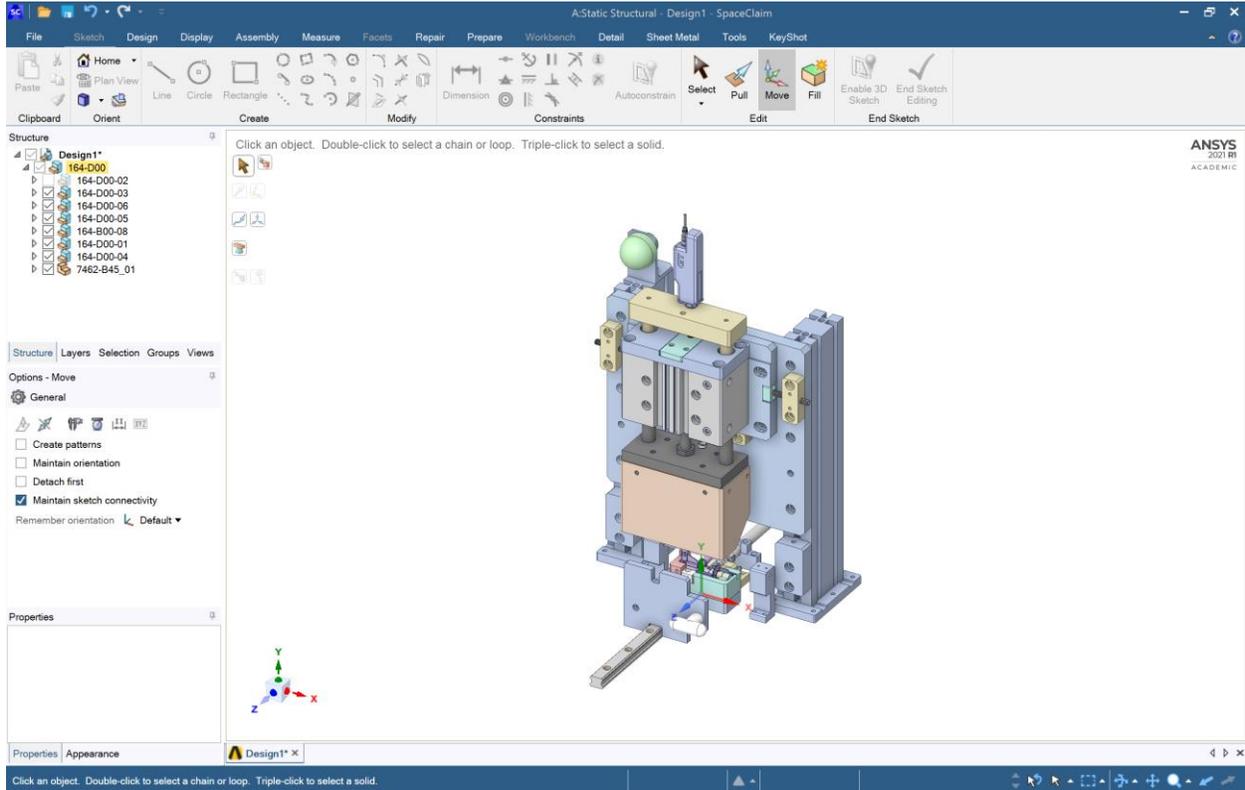


Figura 4. Máquina de heat staking.

3.1.2. Establecer las condiciones de frontera

Para el análisis en el siguiente proyecto se determinarán las condiciones en las que se encuentra la fixtura, en este caso, se aislarán la pieza de toda la máquina de heat staking, donde se contempló analizar el herramental, el ensamble de la pieza que se procesa en la máquina y la fixtura o nido que recibe el impacto del proceso de la máquina para someterlo a los estudios que se han manejado en la revisión de literatura, tal como lo muestra la Figura 5.

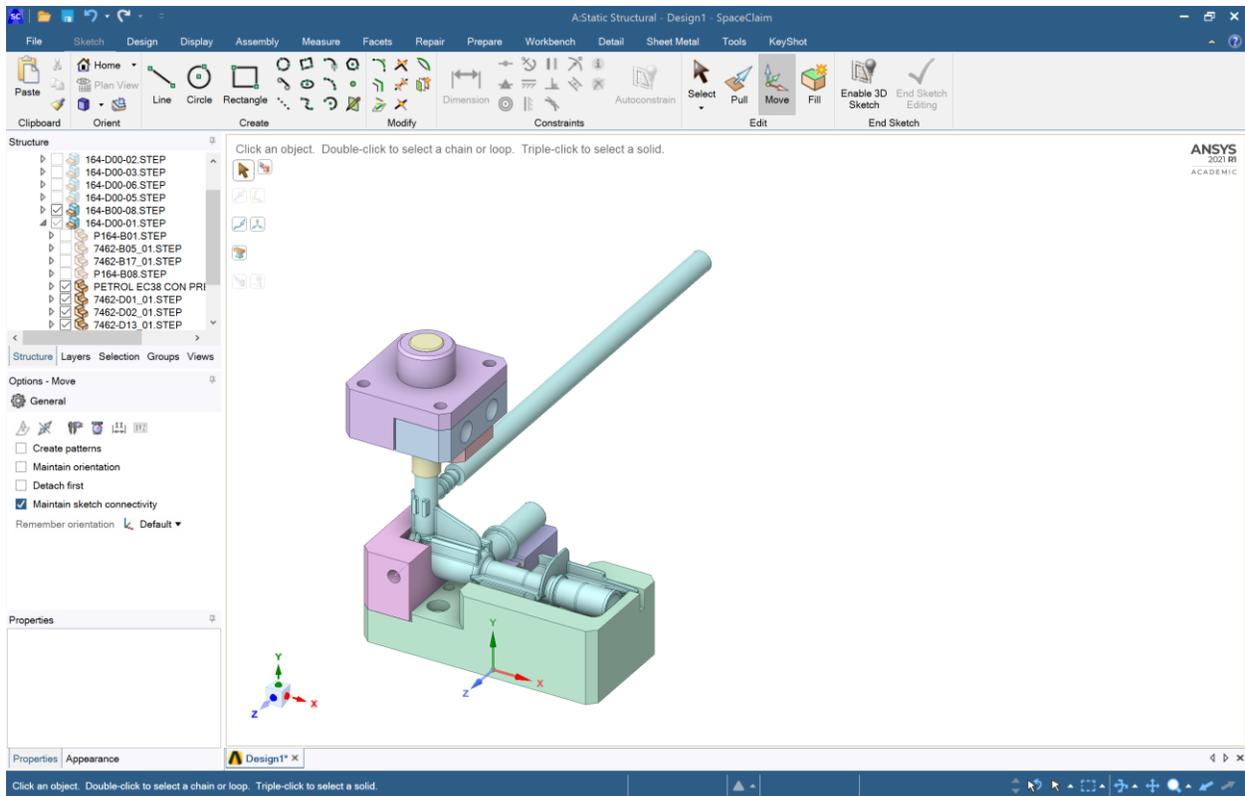


Figura 5. Geometrías iniciales consideradas para el análisis de elemento finito (3 geometrías distintas).

3.1.3. Desarrollar una malla de cálculo válido

El formato de la geometría de la pieza se requiere que esté en algún formato compatible con ANSYS para que pueda ser simulado dentro del entorno del software, por lo que, para iniciar con la simulación del análisis estructural, se abre el software Workbench Ansys y se selecciona el módulo o toolbox “Static Structural” y por consiguiente se abre la siguiente ventana para realizar el paso a paso del análisis estructural tal como lo muestra la Figura 6.

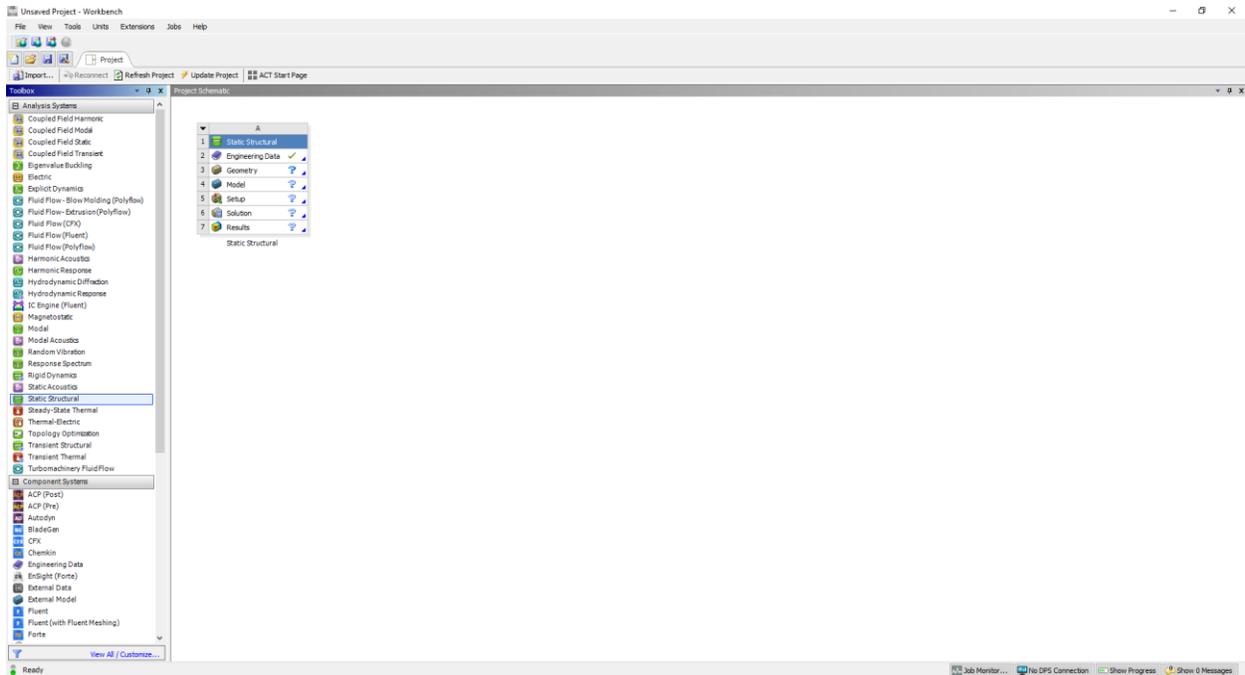


Figura 6. Pasos a seguir en el análisis estructural estático.

Luego, se selecciona la opción de Geometry para el documento de la geometría a analizar, en este caso, se discretizo toda la maquinaria para solo dejar la fixtura o nido de análisis tal como lo muestra la Figura 7.

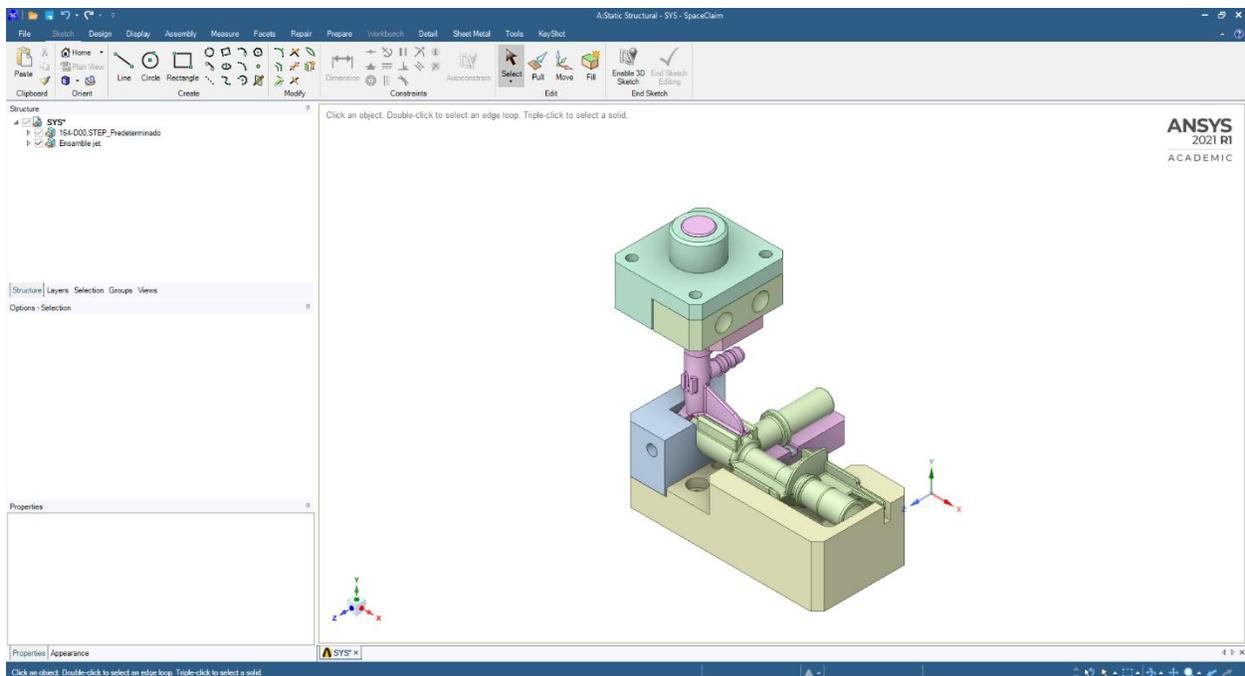


Figura 7. Importación de geometría inicial que se analizará.

Enseguida, se guardan los cambios y se cierra la ventana para luego seleccionar la opción de “Model”, donde se abrirá una ventana donde se seleccionarán los materiales de la parte, que en este caso es Stainless Steel y enseguida se hace el mallado de la parte y en su caso proceder a analizarlo tal como se muestra en la Figura 8.

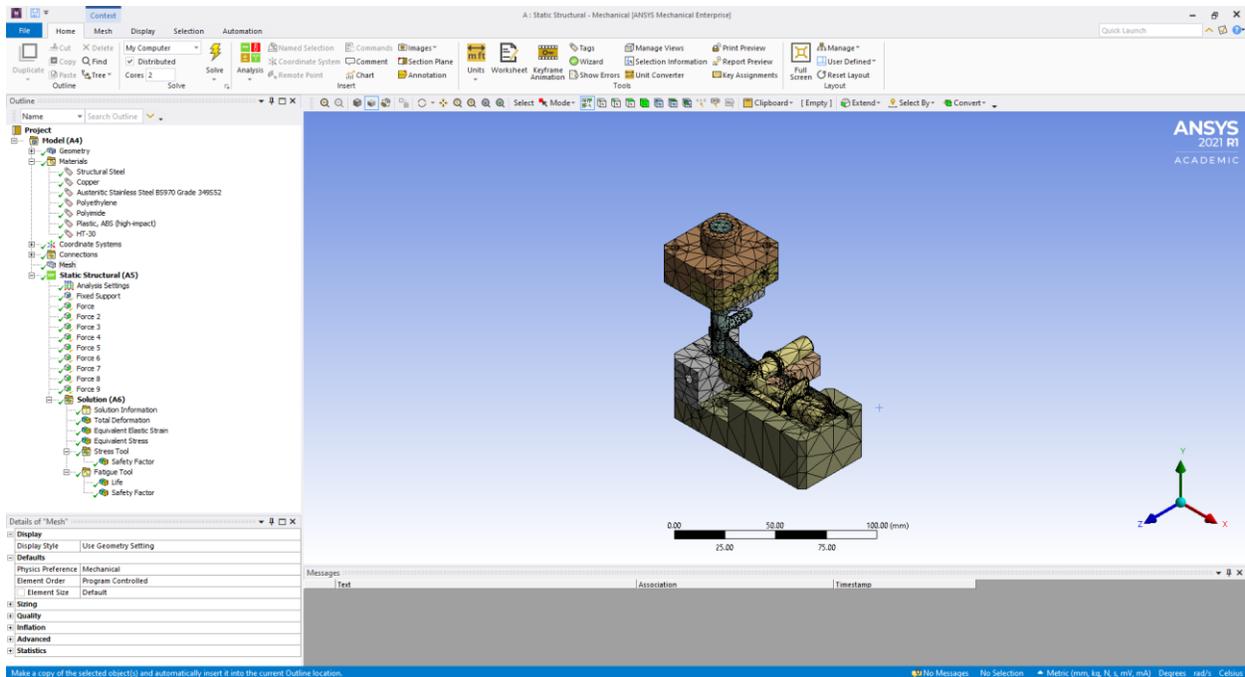


Figura 8. Malla generada en geometría inicial.

3.1.4. Selección de materiales

Posteriormente, en la Figura 9 y 10 se muestra que se selecciona la primera opción de “Engineering Data” donde se cargarán los materiales a utilizar, en este caso aplica el acero inoxidable (Stainless Steel en inglés). Por lo que para ello fue necesario instalar una librería que contiene los materiales con la curva de fatiga necesaria para realizar satisfactoriamente todos los estudios pertinentes, caso contrario con lo que ya trae por default donde no contiene dichos datos necesarios.

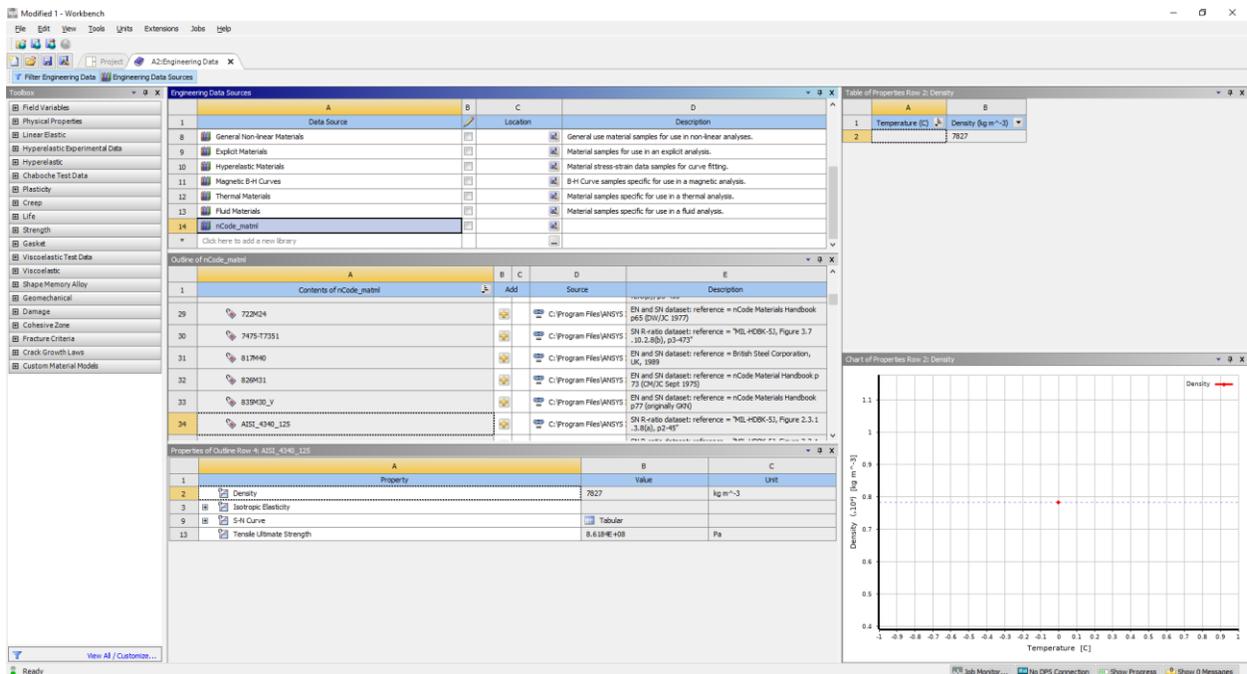


Figura 9. Selección de librería de materiales que tienen curva de fatiga.

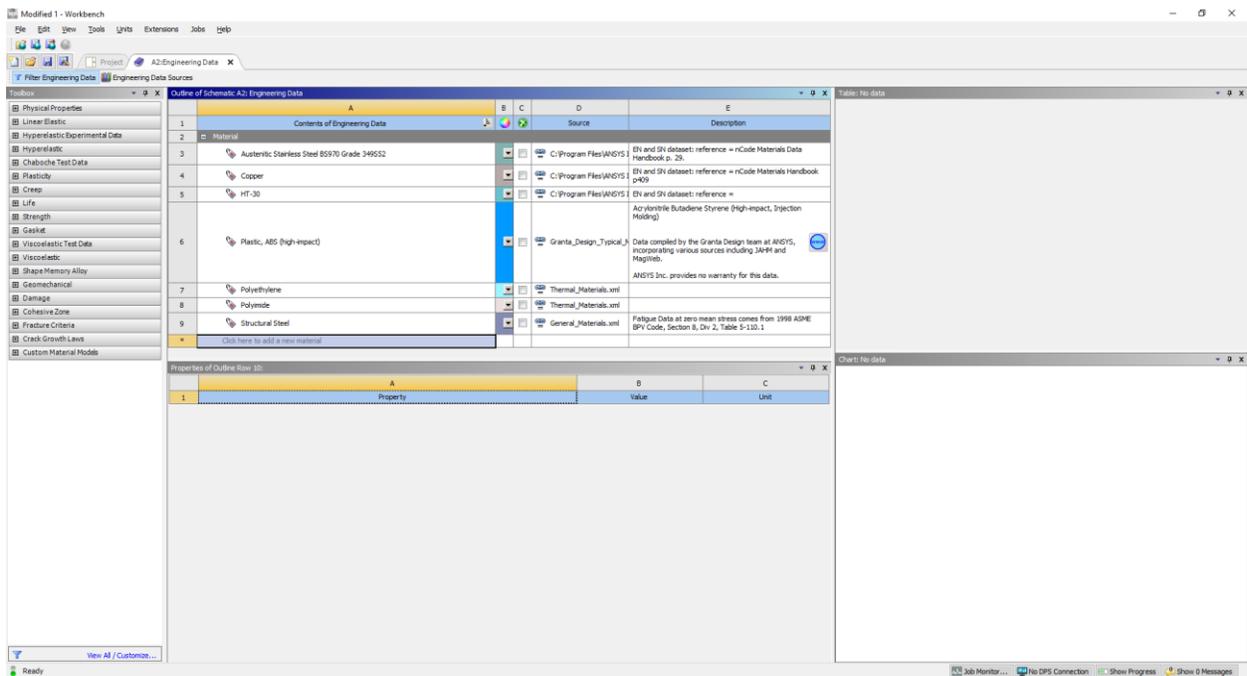


Figura 10. Selección de materiales utilizando librería que contiene curva de fatiga en materiales.

3.1.5. Simulación de fuerzas

Por consiguiente, se selecciona el soporte fijo (fixed support) como guía de la base para realizar el análisis como se muestra en la Figura 11.

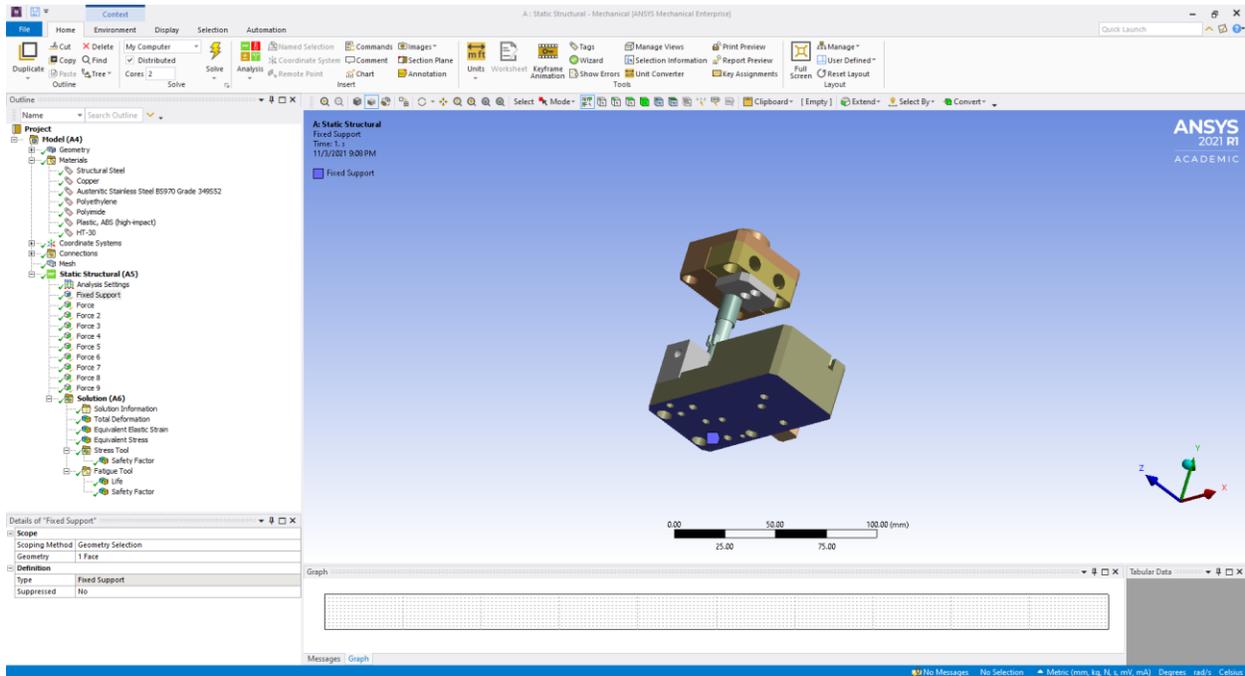


Figura 11. Soporte fijo seleccionado en geometría inicial.

Luego, tenemos que aplicar la fuerza que distribuye el stake o el herramental que baja a través de un cilindro automático, en este caso se le aplica una fuerza de 1500 N como lo muestra la Figura 12 en la parte roja coloreada y el vector que simula la orientación de dicha fuerza.

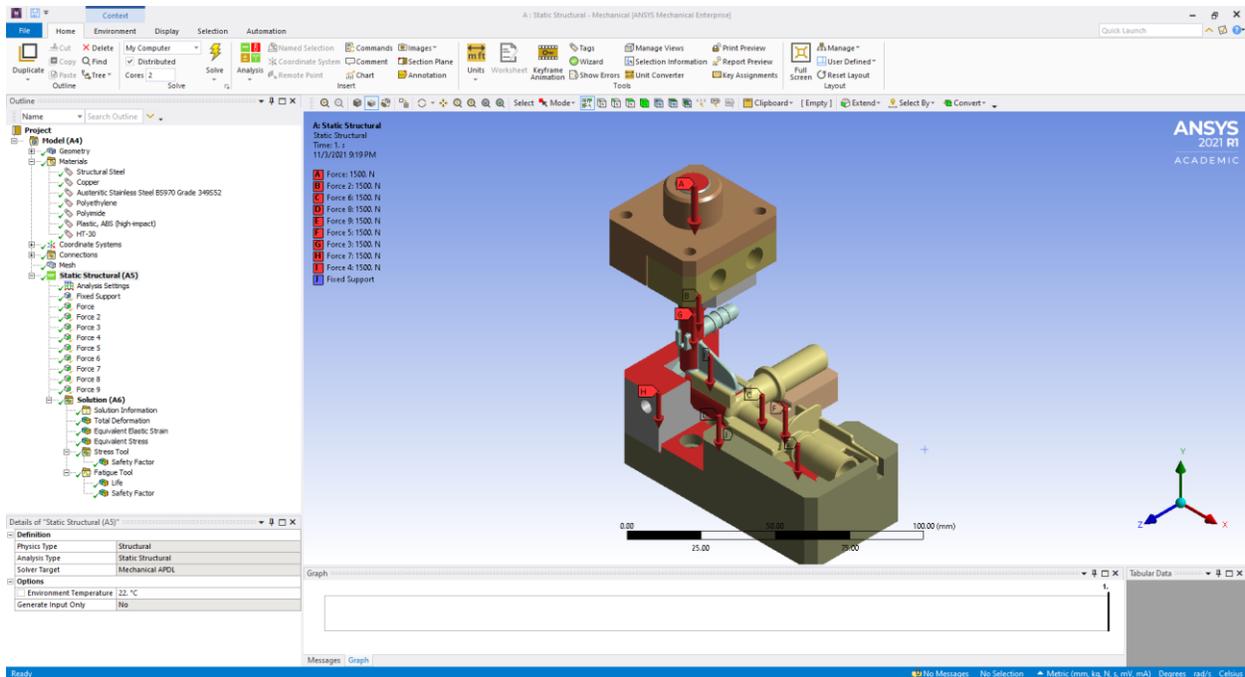


Figura 12. Aplicación de fuerzas en la geometría inicial.

3.1.6. Simulación numérica de la fixtura

Una vez realizada la malla, condicionando el soporte fijo y la fuerza de aplicación en la fixtura, se seleccionan los estudios a realizar en la pieza donde se aplicaron los siguientes para discutirse en el siguiente apartado:

- Deformación máxima
- Esfuerzos equivalentes de Von Mises
- Factor de seguridad
- Vida útil en fatiga

3.1.7. Análisis de resultados

Una vez realizada la metodología para la primera geometría, se propondrá una mejora en la geometría de la fixtura de tal manera que hay que desarrollar los pasos de la metodología, esto con el fin de validar que tan efectivas fueron las técnicas empleadas.

3.2. Materiales

Se tienen materiales que se utilizarán al principio y después de la simulación, por lo que es necesario presentarlos tal como se muestra en la Tabla 1.

Geometría	Actual	Propuesto
Herramental	Cobre	Cobre
Pieza (ensamble)	Polímero	Polímero
Fixtura	Acero	Aluminio

Tabla 1. Selección de materiales para cada una de las geometrías.

Dentro de la propuesta que se sugiere se presenta en la siguiente Tabla 2 los pros y contras de los materiales y que tienen características técnicas que los hacen únicos [55].

Material	Pros	Contras
Acero	<ul style="list-style-type: none">• Bajo costo• Fácil manufactura• Resistencia• Durabilidad	<ul style="list-style-type: none">• Peso• Resistencia a la corrosión.
Aluminio	<ul style="list-style-type: none">• Bajo costo• Fácil manufactura• Buena relación resistencia peso• Resistencia a la corrosión• Múltiples aleaciones	<ul style="list-style-type: none">• Difícil reparación• Corta vida útil

Tabla 2. Comparación de materiales entre acero y aluminio.

3.2.1. Cambios en la geometría de la fixtura o nido

Dentro de la geometría de las tres piezas de análisis, por medio del software Solidworks se agregaron tres insertos al nido para restringir el movimiento de giro del conector, donde antes tenían unos plunger balls para la sujeción, pero ya no serán necesarios. Así también, se agregó un soporte al conector de la manguera tal como lo muestra la Figura 13.

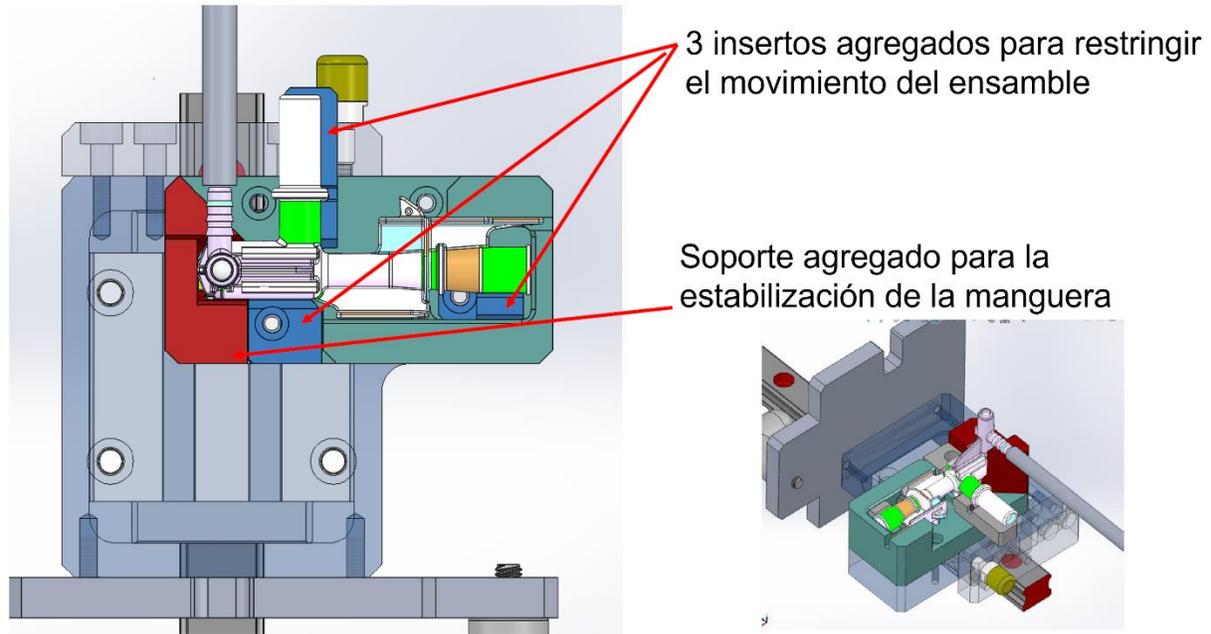


Figura 13. Vista general de la mejora propuesta en la fixtura.

Por otro lado, en la Figura 14 se muestra en otra perspectiva el soporte que se agregó en la manguera y uno de los insertos agregados en el nido o fixtura.

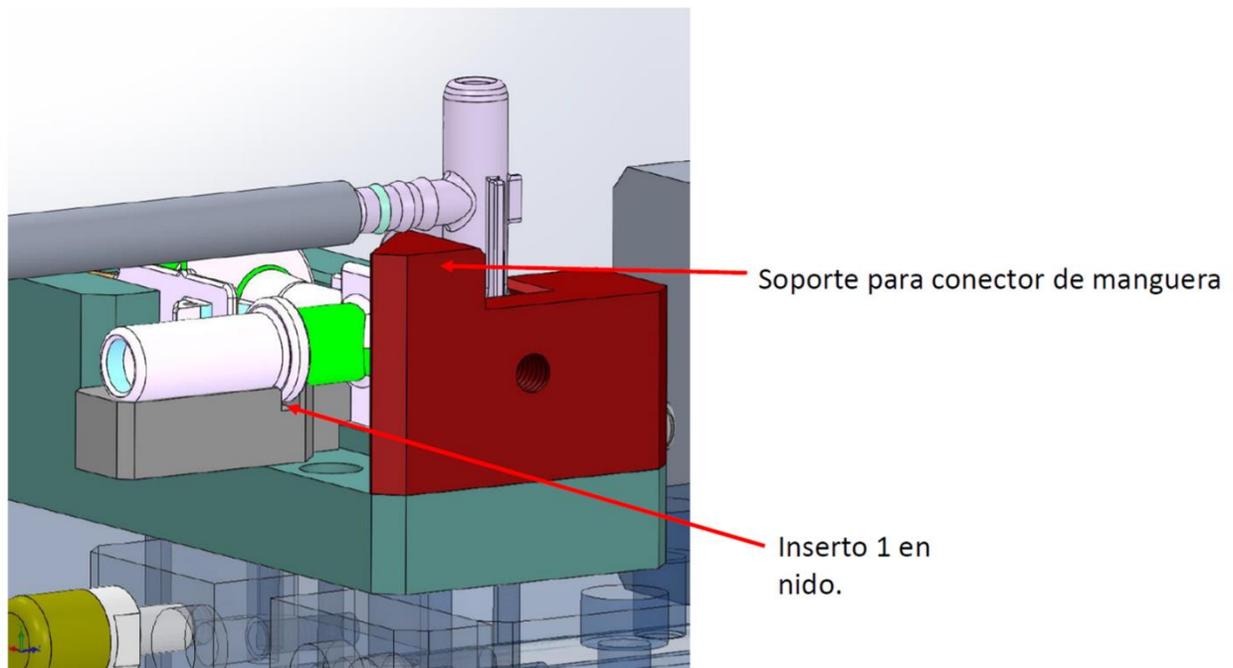


Figura 14. Vista lateral de la mejora propuesta en la fixtura.

Y finalmente, se muestra en la Figura 15 desde otra vista los dos insertos restantes dentro del nido.

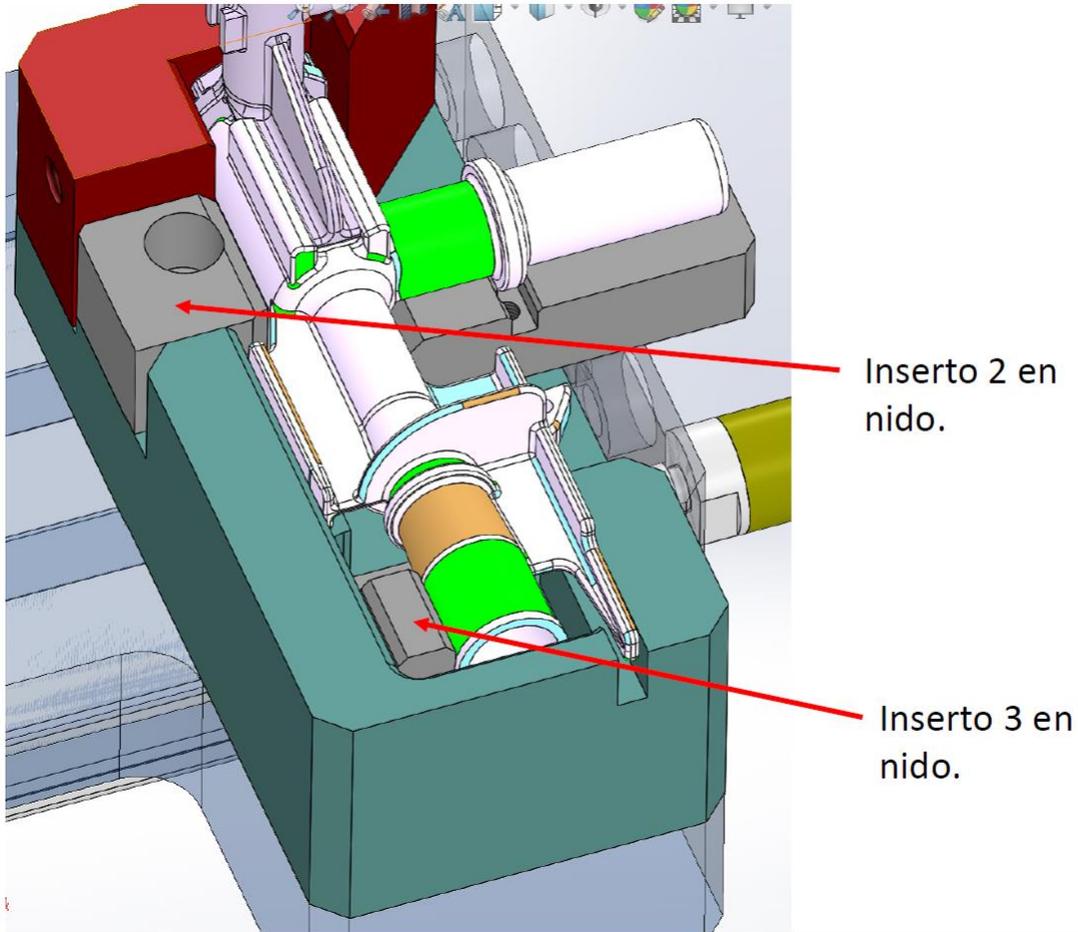


Figura 15. Vista superior de la mejora propuesta en la fixtura.

3.2.2. Establecer las condiciones de frontera

Para el análisis de la mejora en el proyecto se determinarán las condiciones en las que se encuentra la fixtura, en este caso, se aislarán la pieza de toda la máquina de heat staking, donde se contempló analizar el herramental, el ensamble de la pieza que se procesa en la máquina y la fixtura o nido que recibe el impacto del proceso de la máquina para someterlo a los estudios nuevamente, tal como lo muestra la Figura 16.

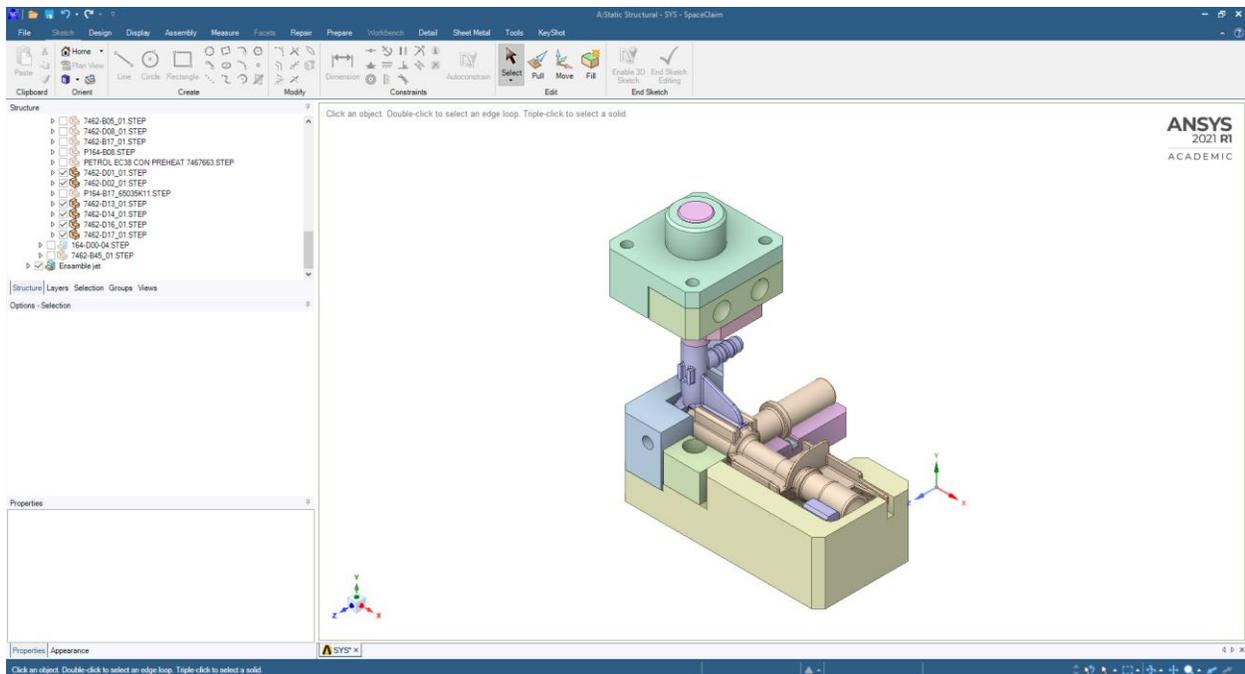


Figura 16. Geometría con propuesta de mejora considerada para el análisis de elemento finito.

3.2.3. Desarrollar una malla de cálculo válido

El formato de la geometría de la pieza se requiere que esté en algún formato compatible con ANSYS para que pueda ser simulado dentro del entorno del software, por lo que, para iniciar con la simulación del análisis estructural, se abre el software Workbench Ansys y se selecciona el módulo o toolbox “Static Structural” y por consiguiente se abre la siguiente ventana para realizar el paso a paso del análisis estructural tal como lo muestra la Figura 17.

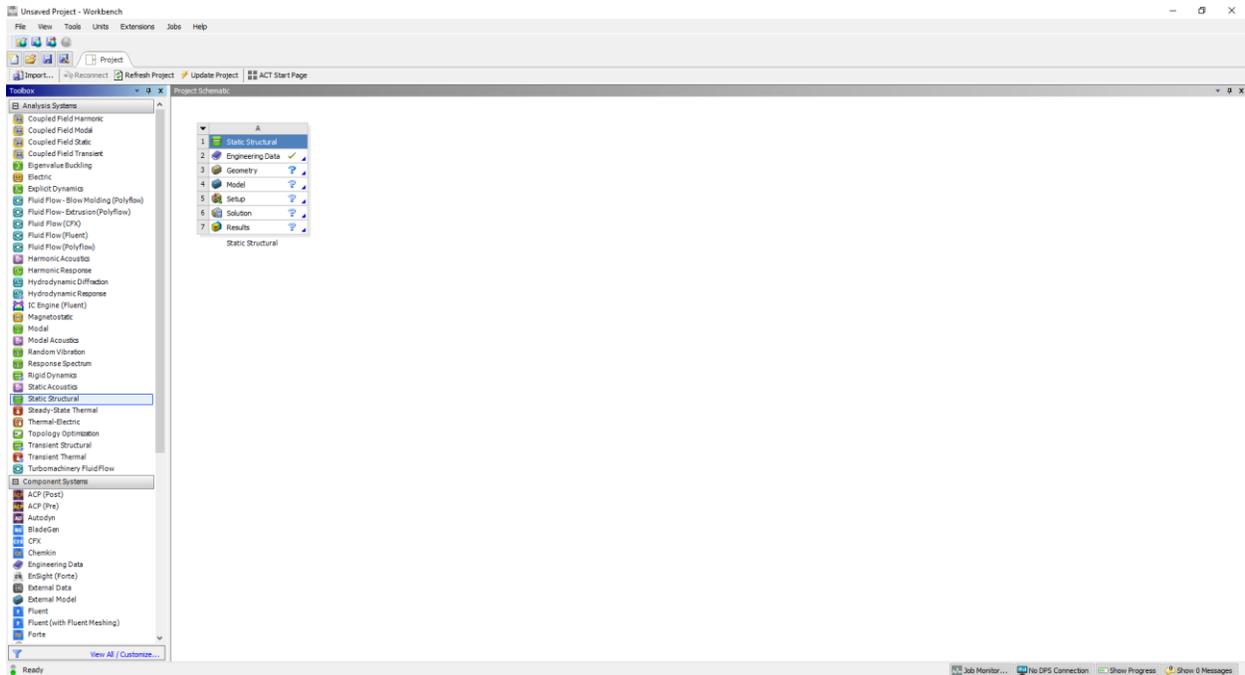


Figura 17. Pasos a seguir en el análisis estructural estático.

Luego, se selecciona la opción de Geometry para el documento de la geometría a analizar, en este caso, se discretizo toda la maquinaria para solo dejar la fixtura o nido de análisis tal como lo muestra la Figura 18.

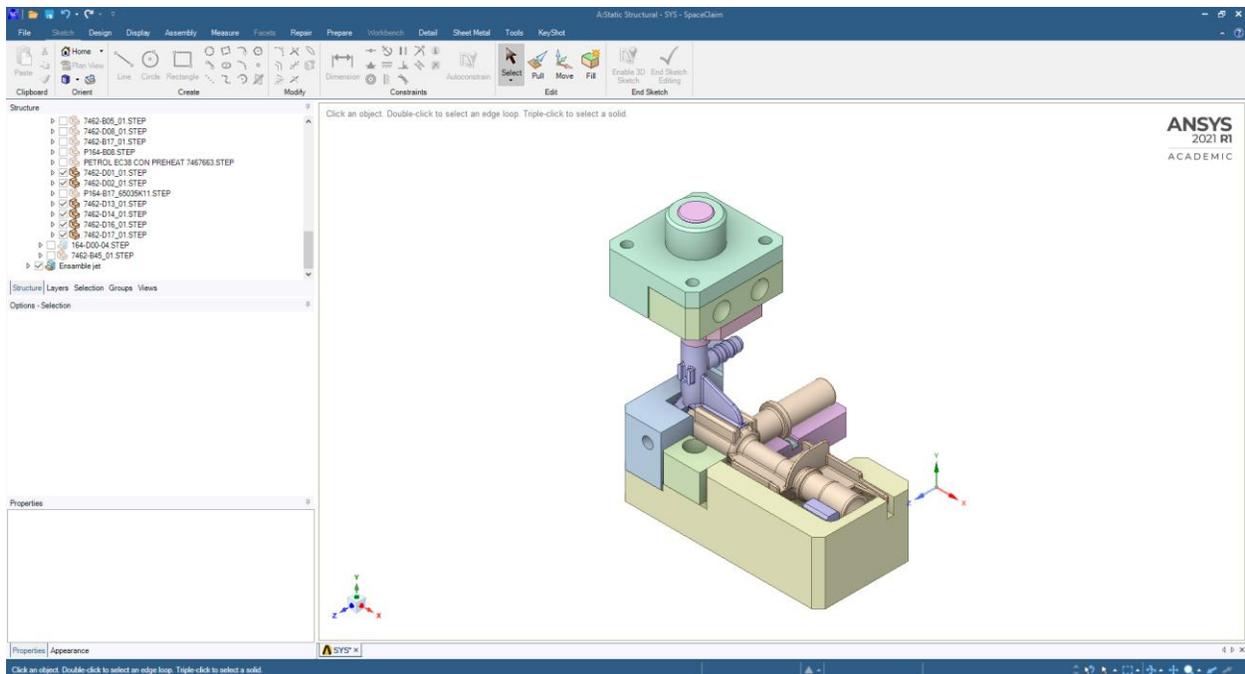


Figura 18. Importación de geometría que se analizará.

Enseguida, se guardan los cambios y se cierra la ventana para luego seleccionar la opción de “Model”, donde se abrirá una ventana donde se seleccionarán los materiales de la parte y enseguida se hace el mallado de la parte y en su caso proceder a analizarlo tal como se muestra en la Figura 19.

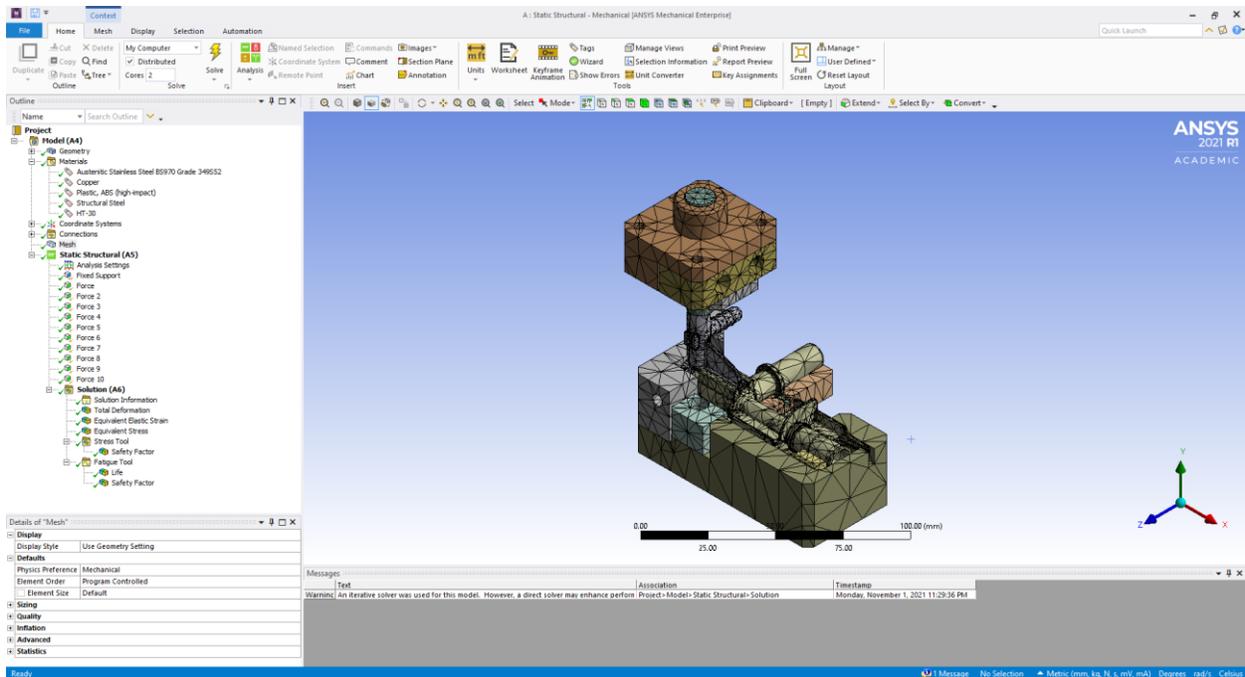


Figura 19. Malla generada en fixtura.

3.2.4. Selección de materiales

Posteriormente, en la Figura 20 y 21 se muestra que se selecciona la primera opción de “Engineering Data” donde se cargarán los materiales a utilizar, en este caso aplica el acero inoxidable (Stainless Steel en inglés). Por lo que para ello fue necesario instalar una librería que contiene los materiales con la curva de fatiga necesaria para realizar satisfactoriamente todos los estudios pertinentes, caso contrario con lo que ya trae por default donde no contiene dichos datos necesarios.

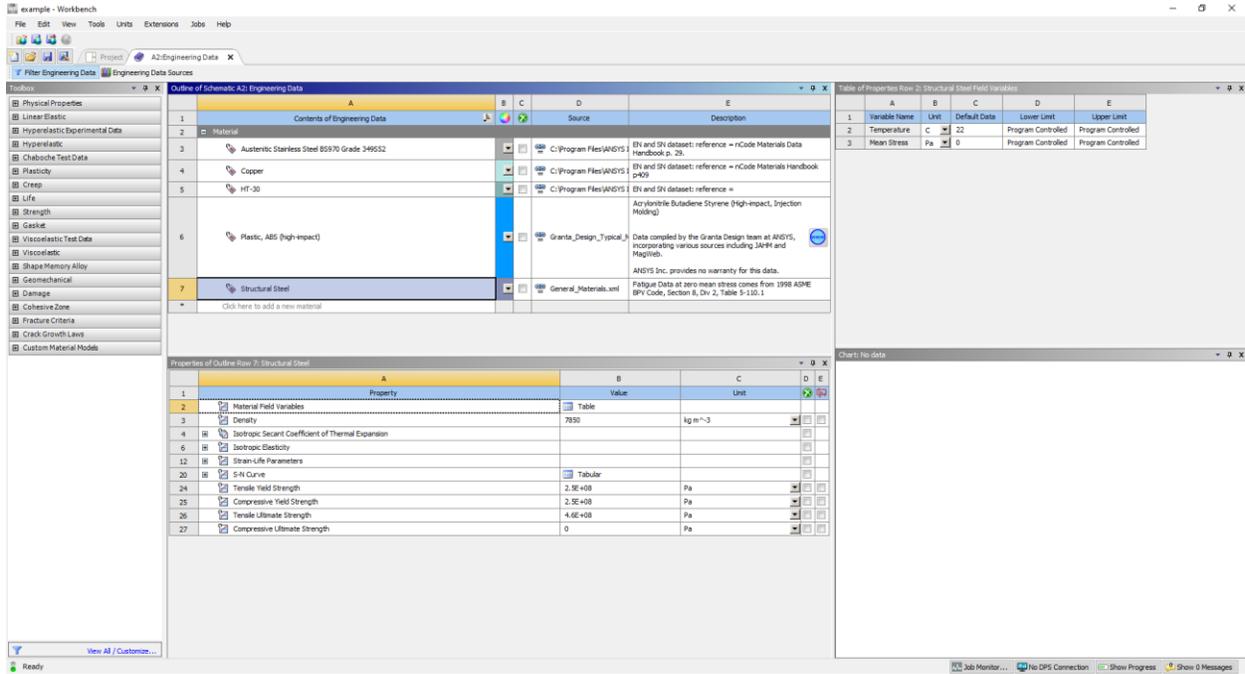


Figura 20. Selección de librería de materiales que tienen curva de fatiga.

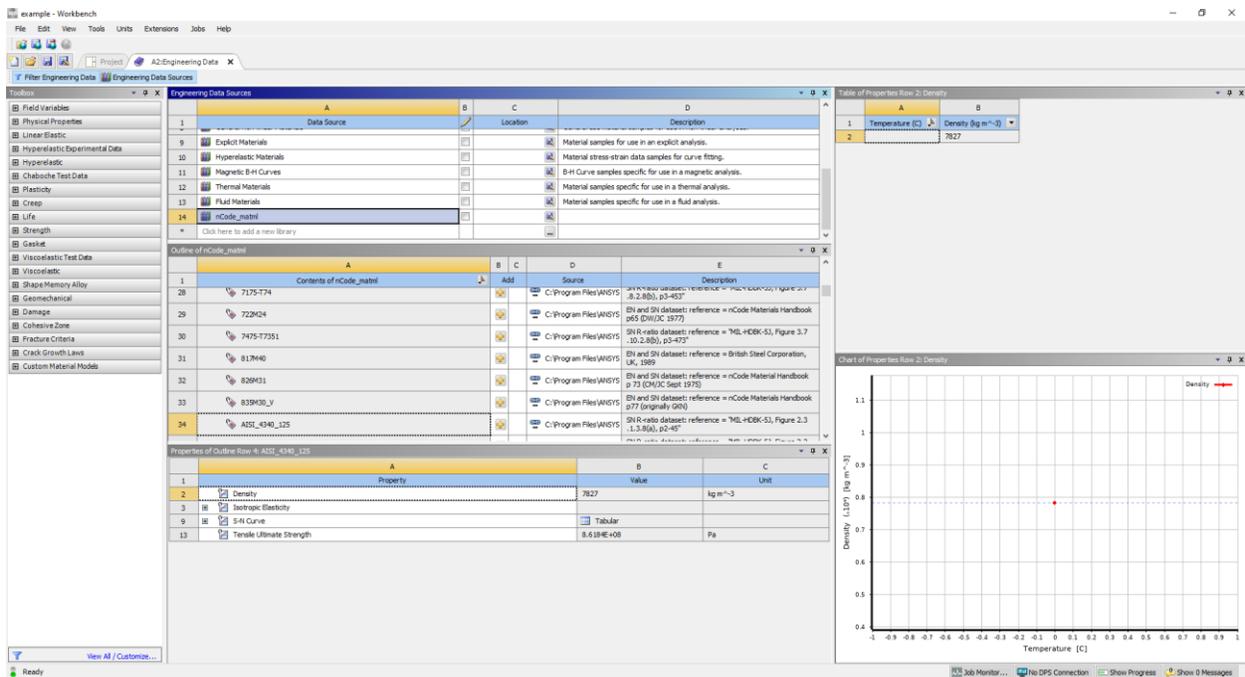


Figura 21. Selección de materiales utilizando librería que contiene curva de fatiga en materiales.

3.2.5. Simulación de fuerzas

Por consiguiente, se selecciona el soporte fijo (fixed support) como guía de la base para realizar el análisis como se muestra en la Figura 22.

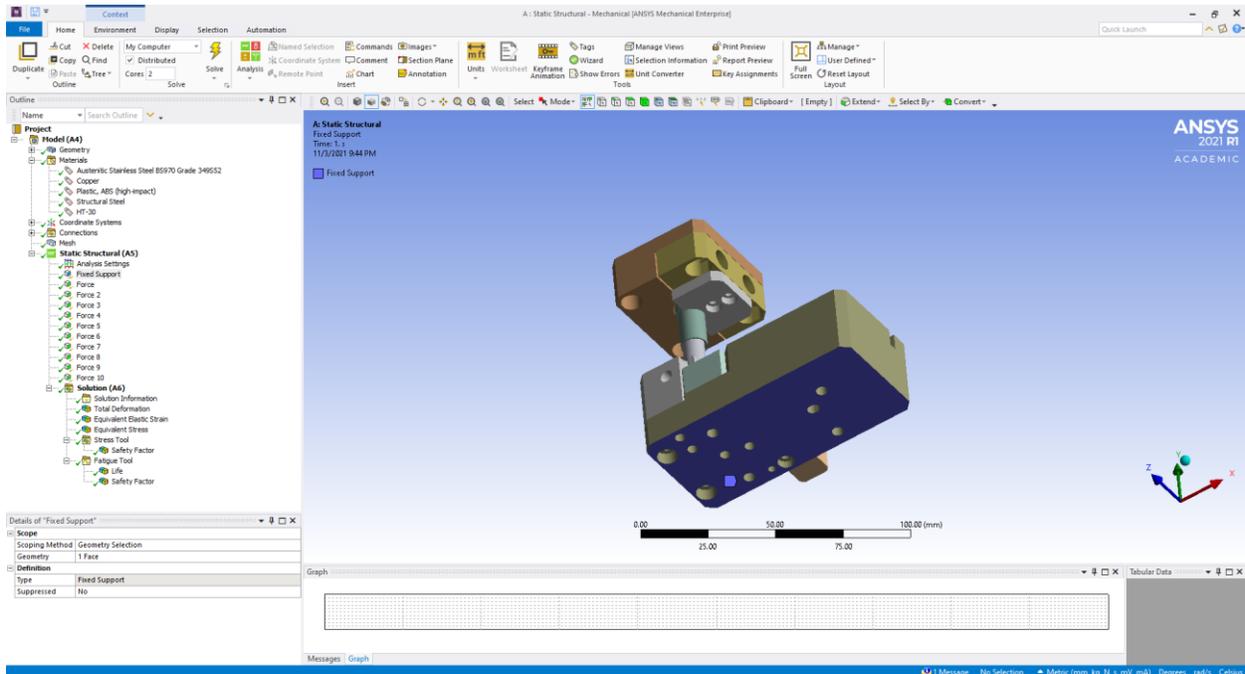


Figura 22. Soporte fijo seleccionado en geometría con mejora.

Luego, tenemos que aplicar la fuerza que distribuye el stake o el herramental que baja a través de un cilindro automático, y una fuerza más en la parte de la fixtura en este caso se le aplica una fuerza de 450 N como lo muestra la Figura 23 este conjunto de fuerzas se redujo considerablemente por el cambio de material y los esfuerzos neumáticos que ayudan a hacer mas sencillo el deslizamiento del accionar para el quemado de la pieza y el vector que simula la orientación de dicha fuerza.

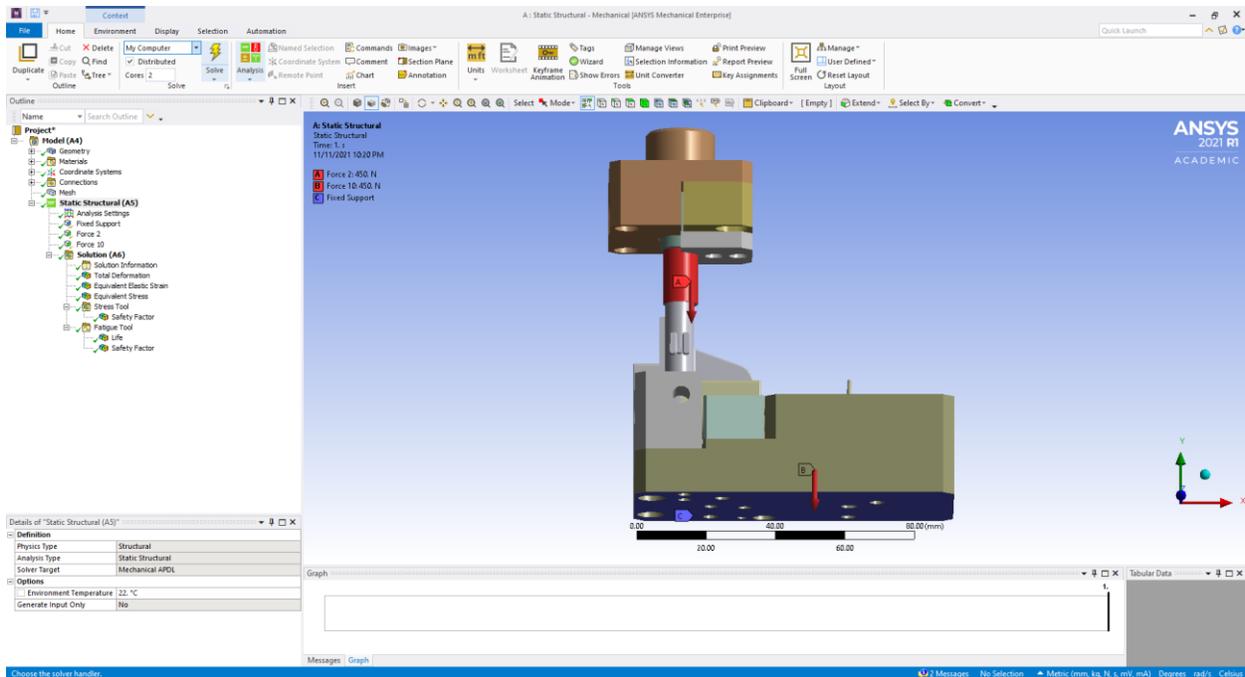


Figura 23. Aplicación de fuerzas en la geometría con mejora.

3.2.6. Simulación numérica de la fixtura

Una vez realizada la malla, condicionando el soporte fijo y la fuerza de aplicación en la fixtura, se seleccionan los estudios a realizar en la pieza donde se aplicaron los siguientes para discutirse en el siguiente apartado:

- Deformación máxima
- Esfuerzos equivalentes de Von Mises
- Factor de seguridad
- Vida útil en fatiga

3.2.7. Análisis de resultados

Una vez realizada la metodología para la primera geometría, se propondrá una mejora en la geometría de la fixtura de tal manera que hay que desarrollar los pasos de la metodología, esto con el fin de validar que tan efectivas fueron las técnicas empleadas.

4. RESULTADOS

4.1. Resultados de geometría inicial

Los resultados del estudio para la geometría inicial nos indican que, con la aplicación de las fuerzas de 1500 N en las zonas que interactúa el movimiento del proceso de la máquina de heat staking, de acuerdo con la Figura 24 tenemos una deformación máxima resultante de 0.055354 mm y la mínima de 0 mm. Las zonas rojas representan la máxima deformación y las zonas azules la mínima.

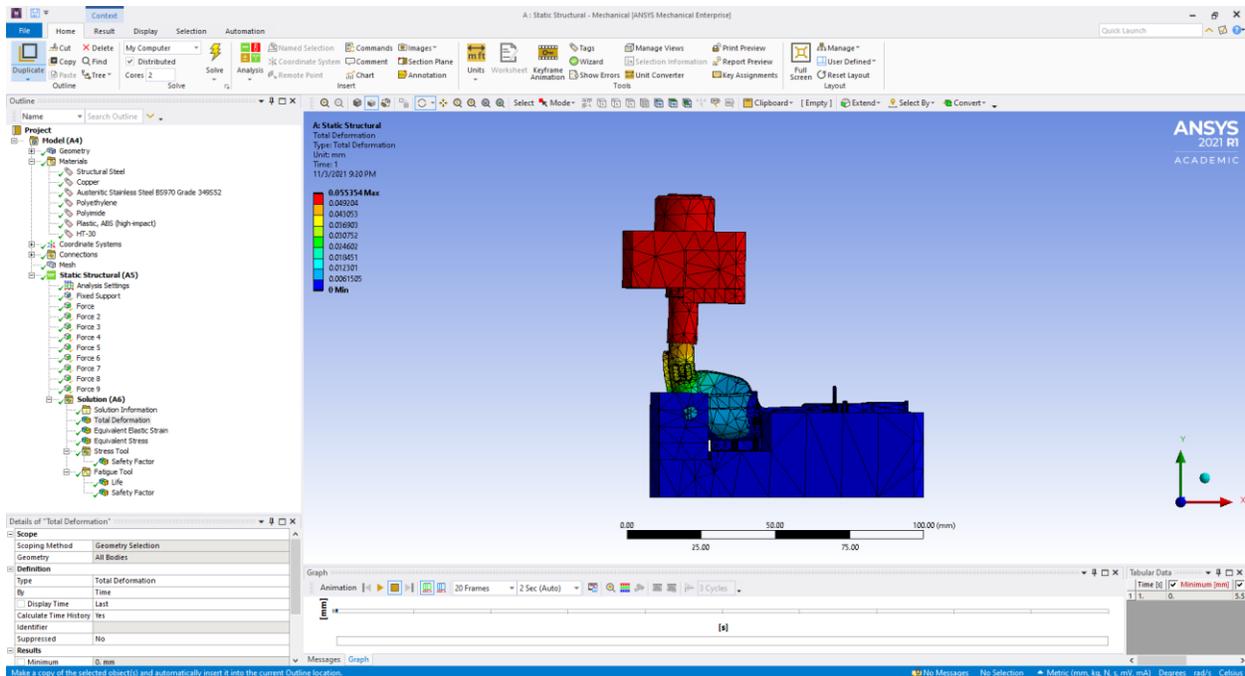


Figura 24. Deformación total de la geometría inicial.

Para el caso del estrés equivalente de Von Mises, de acuerdo con la Figura 25 tenemos el estrés máximo en la geometría inicial de 1522.3 MPa donde no se ve representado en la simulación, mientras que estrés mínimo representado por la región azul que se encuentra en la mayor parte de la fixtura con un valor de 0.00040116 MPa.

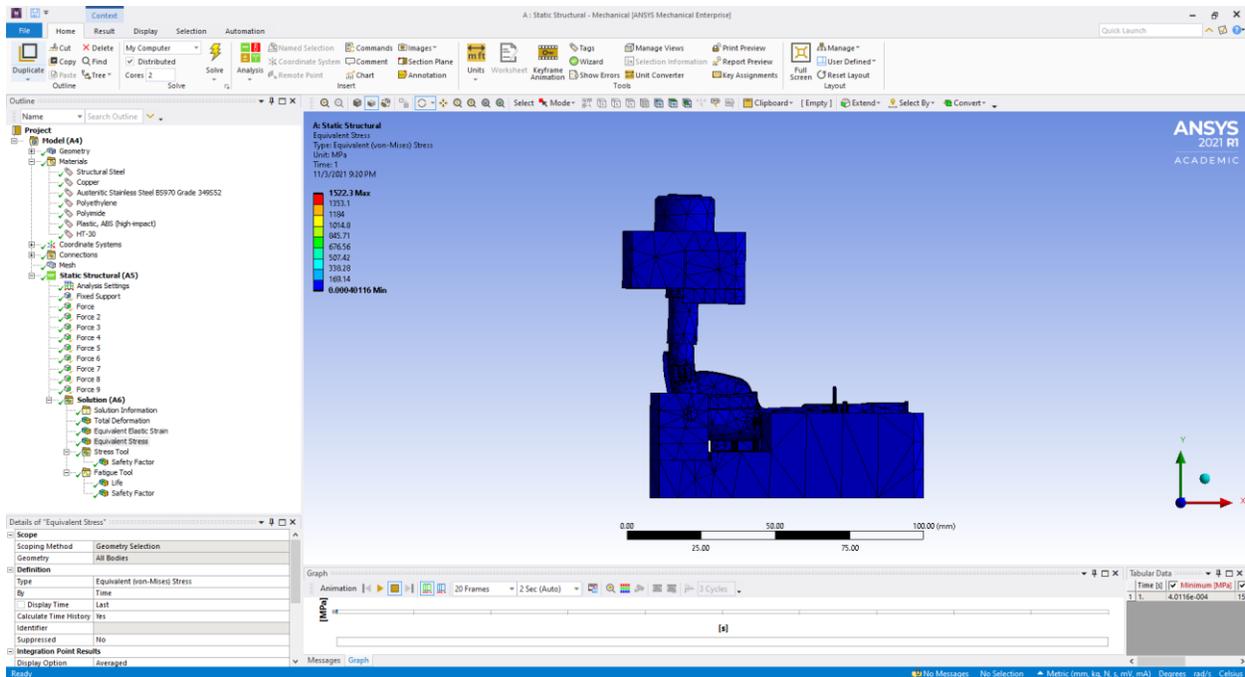


Figura 25. Estrés equivalente de Von Mises de la geometría inicial.

Ahora en el caso del estudio de las deformaciones unitarias equivalente de Von Mises de la geometría inicial, la Figura 26 representa la simulación donde se tiene un valor máximo de 0.025673 y un valor mínimo de 1.9156×10^{-8} .

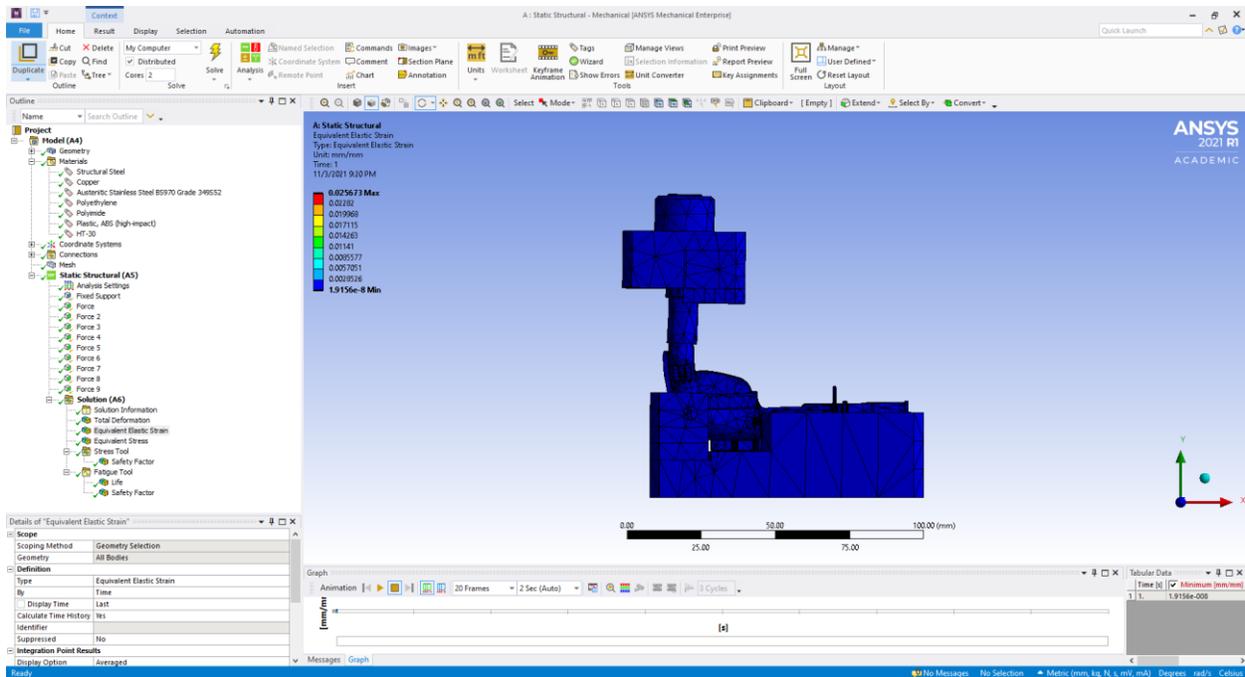


Figura 26. Deformaciones unitarias equivalente de Von Mises de la geometría inicial.

Ahora tenemos la Figura 27 mostrando el factor de seguridad máximo obtenido de 15 representado con color azul, esta región no es muy sencillo apreciarlo en toda la geometría inicial, y por otro lado, se tiene un valor mínimo 0.19797.

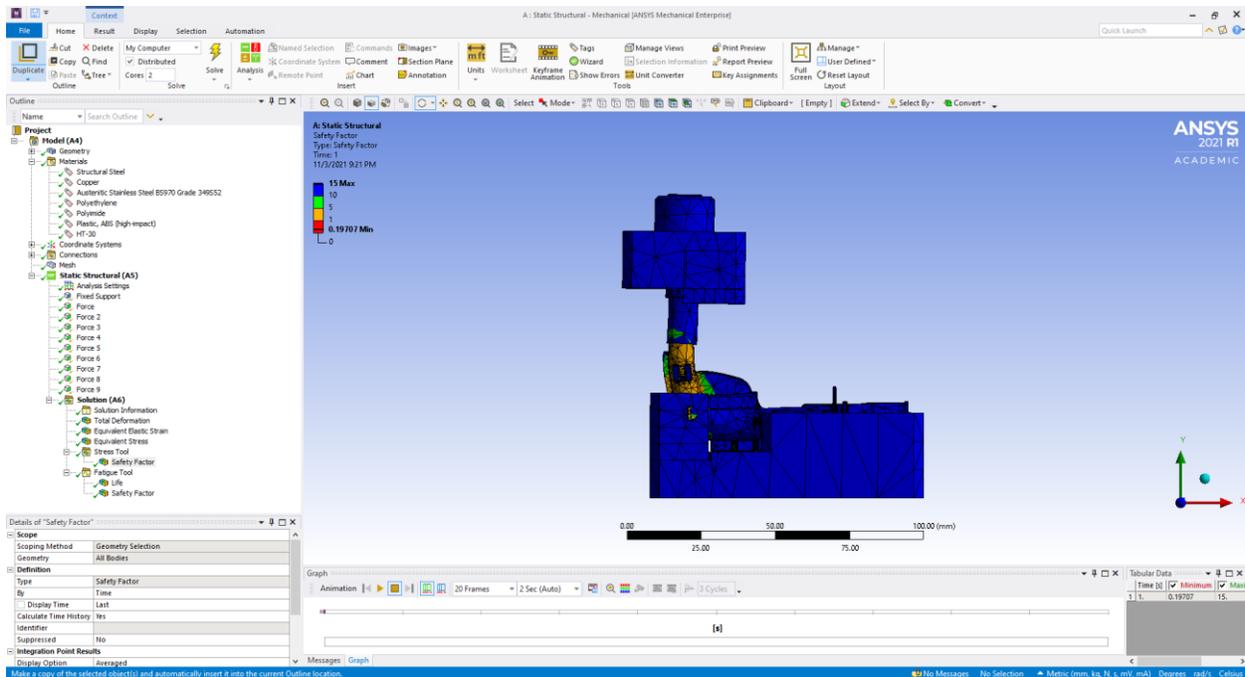


Figura 27. Factor de seguridad de estrés de la geometría inicial.

Tenemos ahora que de acuerdo con la Figura 28 tenemos la vida útil de la geometría inicial, donde la vida es de 10,000,000,000 de ciclos, sin embargo se tiene que esta vida útil no es uniforme en toda la geometría inicial.

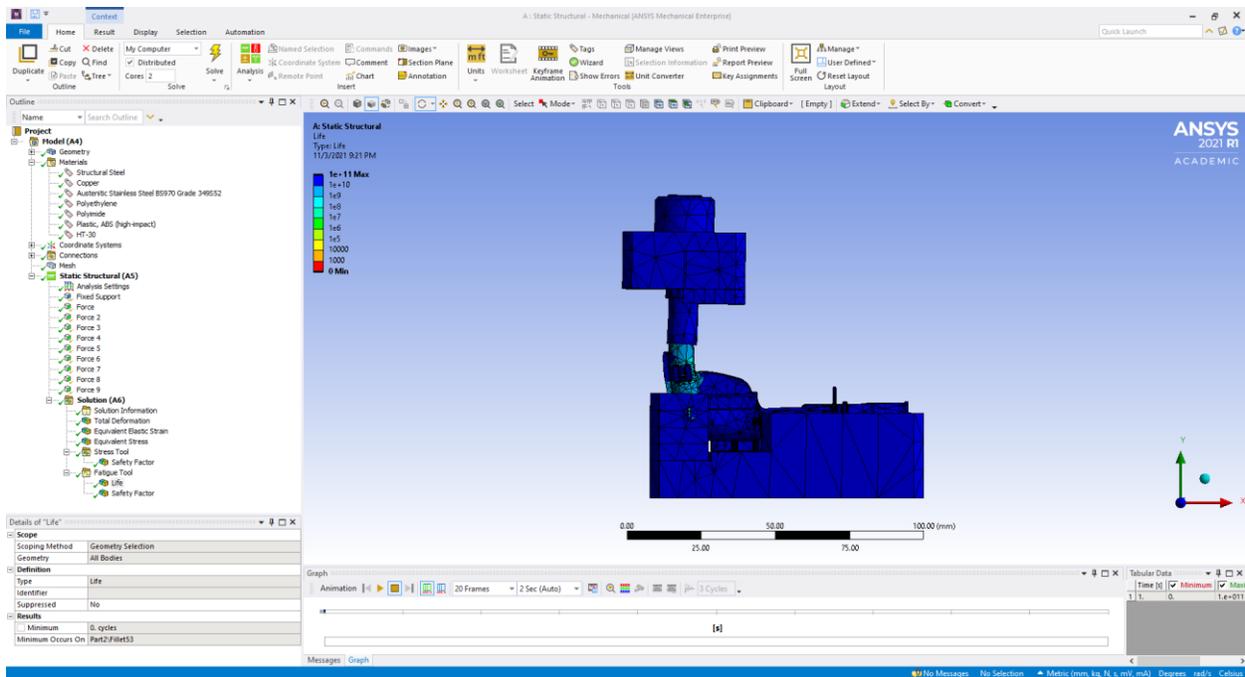


Figura 28. Vida útil de la geometría inicial.

Para concluir los resultados, de acuerdo con la Figura 29 tenemos el factor de seguridad en fatiga de la geometría inicial, el mínimo representa un valor de 0.062501.

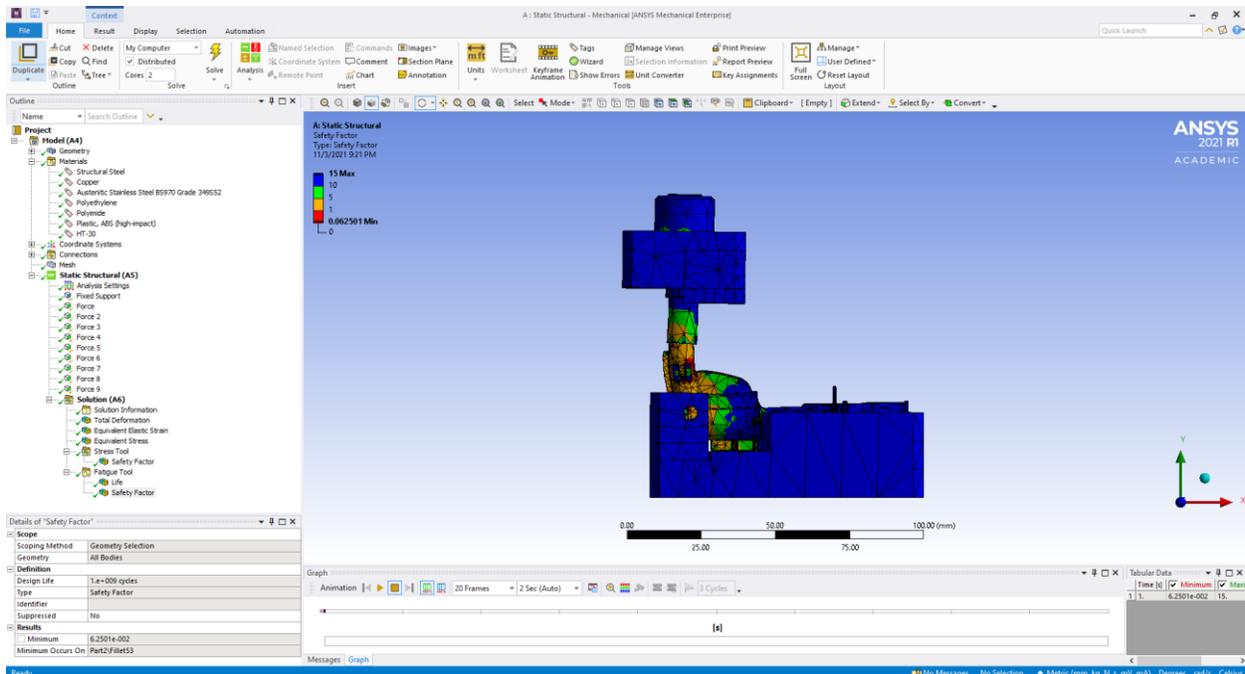


Figura 29. Factor de seguridad en fatiga de la geometría inicial.

Es así como se obtienen todas las simulaciones pertinentes a la geometría inicial que significa tener un plan de acción o mejora para el ensamble de la pieza, donde el que juega un papel primordial fue la mejora de la fixtura en cuestión de aditamentos mecánicos y la selección de un material distinto que ayude en una nueva simulación para mejorar los resultados y nos indiquen que la sugerencia de mejora nos brindará una solución confiable.

4.2. Resultados de geometría con mejora

Los resultados del estudio para la geometría con mejora nos indican que, se redujeron los valores con la aplicación de las fuerzas de 450 N en las zonas que interactúa el movimiento del proceso de la máquina de heat staking, de acuerdo con la Figura 30 tenemos una deformación máxima resultante de 0.0073854 mm y la mínima de 0 mm. Las zonas rojas representan la máxima deformación y las zonas azules la mínima.

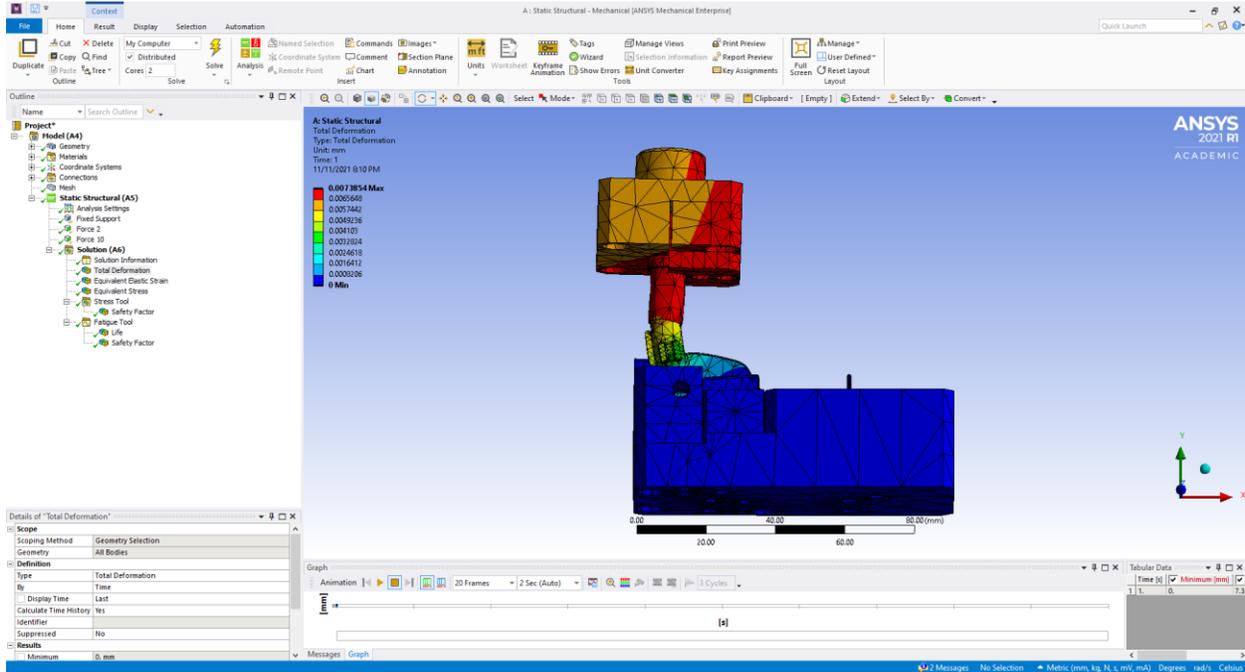


Figura 30. Deformación total de la geometría con mejora.

Para el caso del estrés equivalente de Von Mises, de acuerdo con la Figura 31 tenemos el estrés máximo en la geometría inicial de 153.3 MPa donde no se ve representado en la simulación, mientras que estrés mínimo representado por la región azul que se encuentra en la mayor parte de la fixtura con un valor de 0.00026009 MPa.

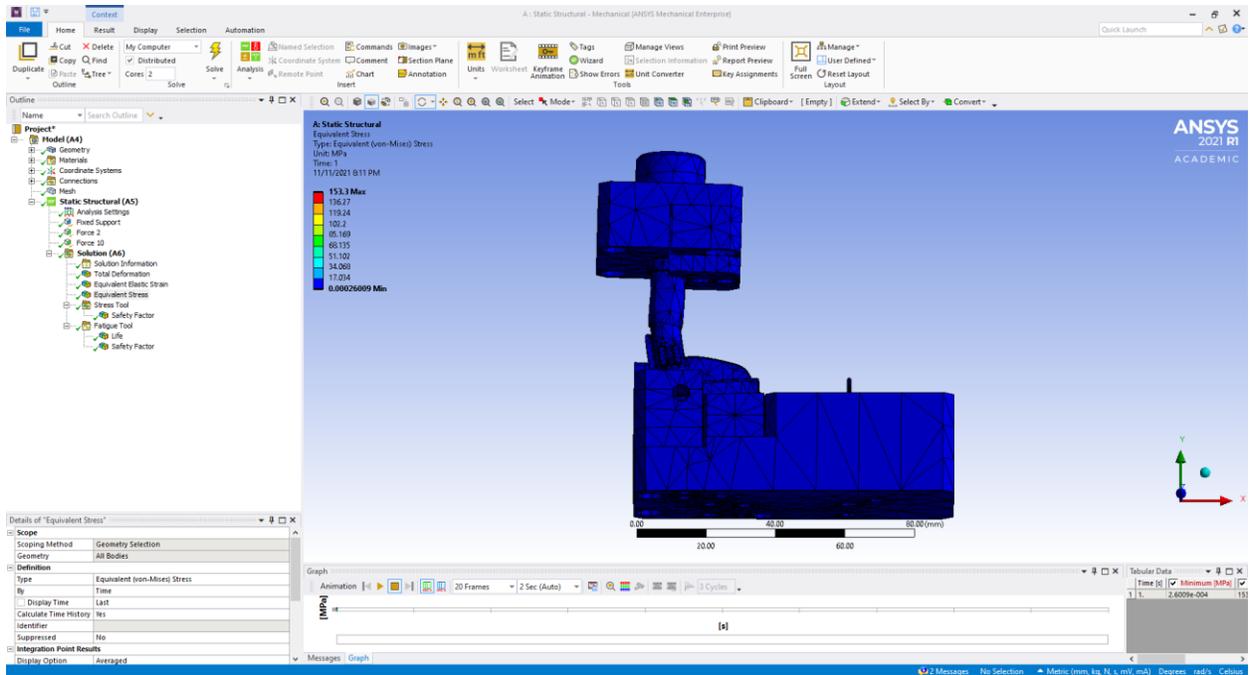


Figura 31. Estrés equivalente de Von Mises de la geometría con mejora.

Ahora en el caso del estudio de las deformaciones unitarias equivalente de Von Mises de la geometría inicial, la Figura 32 representa la simulación donde se tiene un valor máximo de 0.0024108 y un valor mínimo de 2.84×10^{-9} .

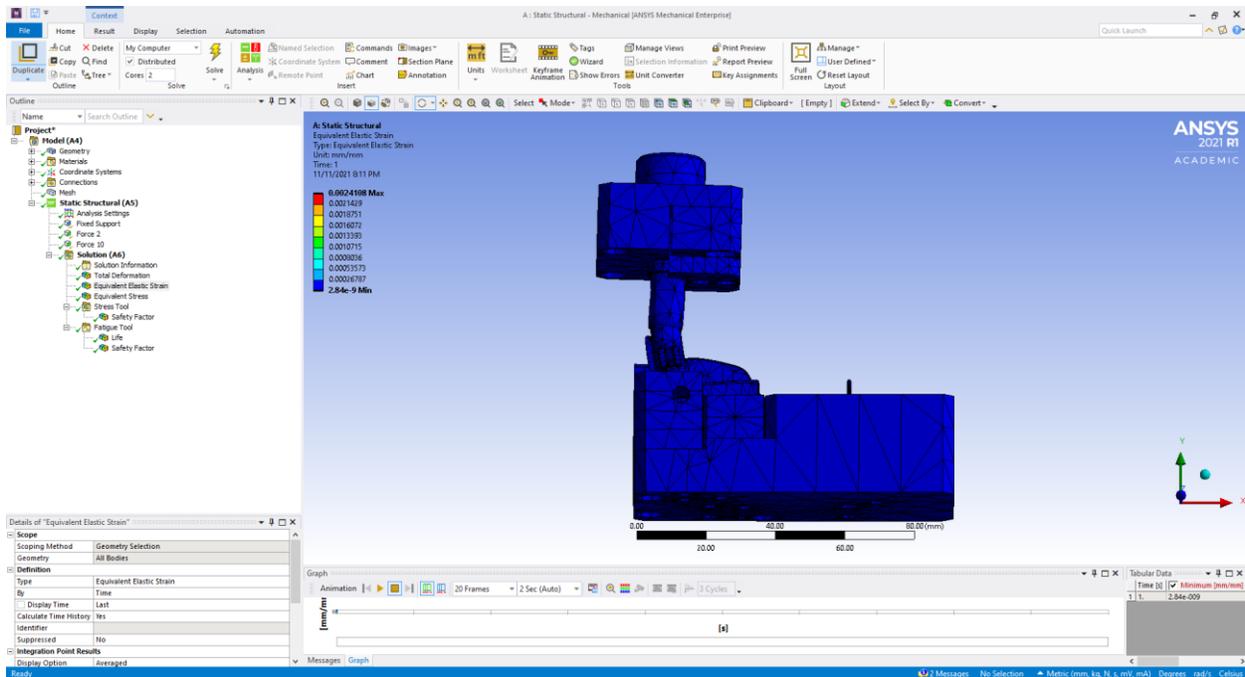


Figura 32. Deformaciones unitarias equivalente de Von Mises de la geometría con mejora.

Ahora tenemos la Figura 33 mostrando el factor de seguridad máximo obtenido de 15 representado con color azul, esta región no es muy sencillo apreciarlo en toda la geometría inicial, y por otro lado, se tiene un valor mínimo 1.9569. Donde el valor aumento considerablemente con la mejora realizada en la geometría.

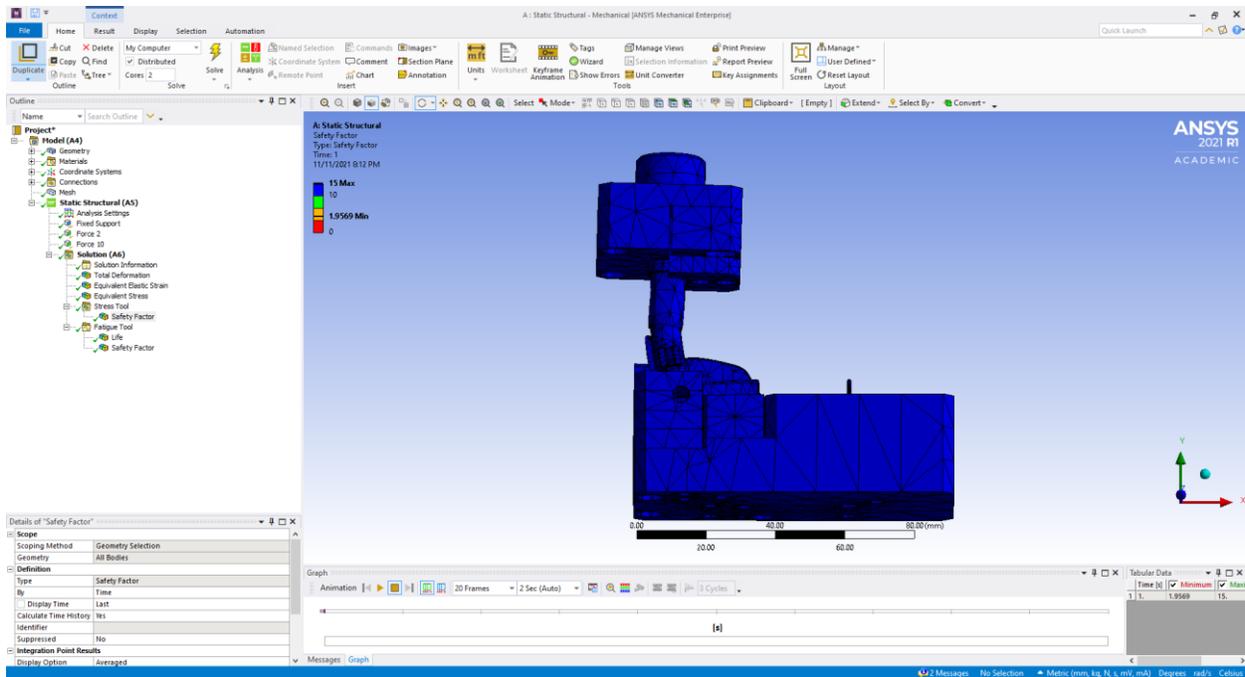


Figura 33. Factor de seguridad de estrés de la geometría con mejora.

Tenemos ahora que de acuerdo con la Figura 34 tenemos la vida útil de la geometría inicial, donde la vida es de 10,000,000,000 de ciclos, sin embargo, se tiene que esta vida útil no es uniforme en toda la geometría inicial.

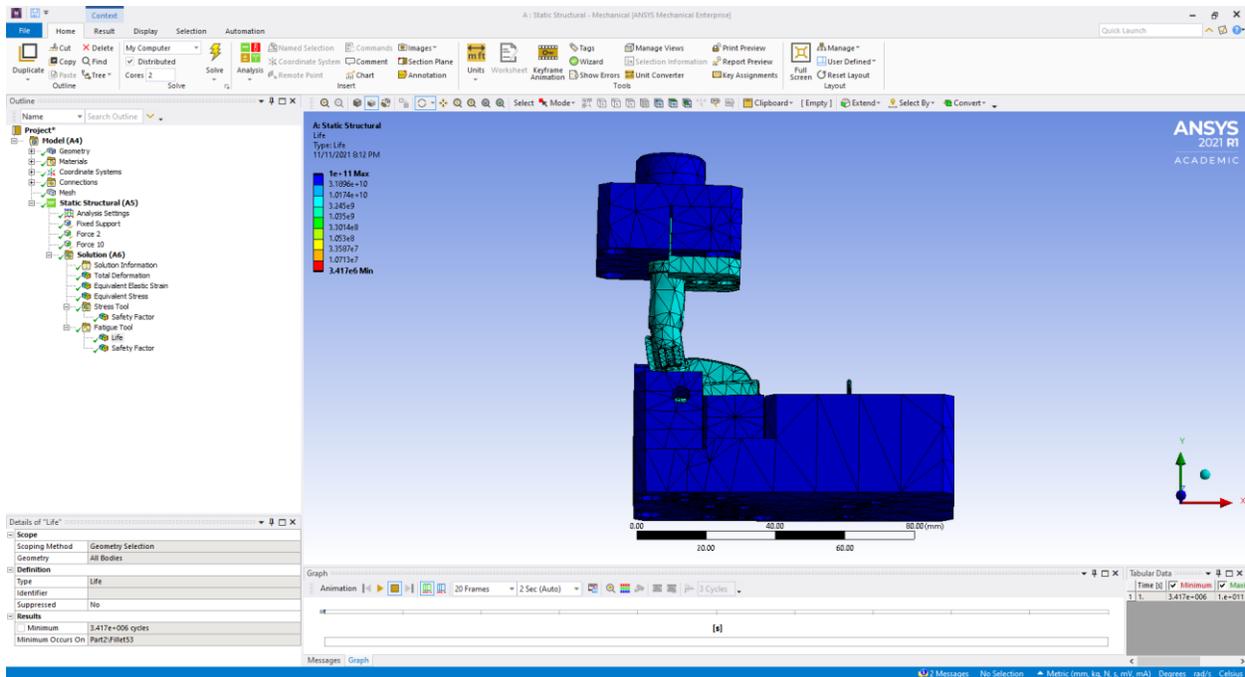


Figura 34. Vida útil de la geometría con mejora.

Para concluir los resultados, de acuerdo con la Figura 35 tenemos el factor de seguridad en fatiga de la geometría inicial, el mínimo representa un valor de 0.62062.

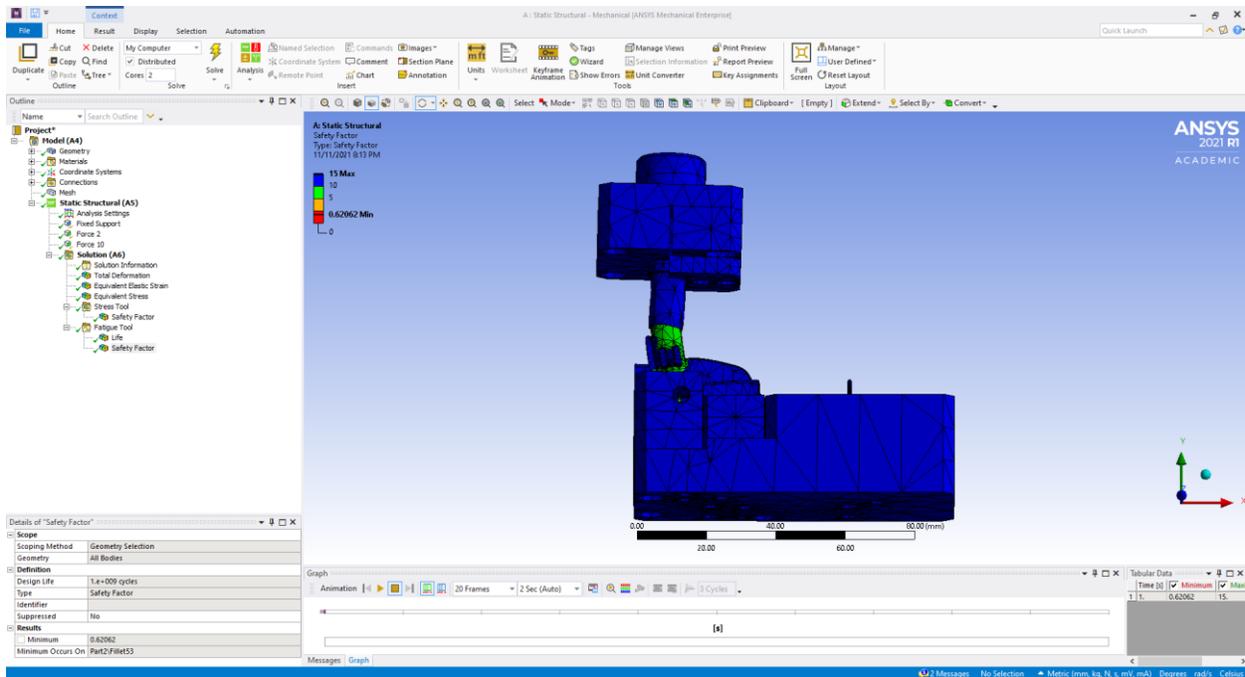


Figura 35. Factor de seguridad en fatiga de la geometría con mejora.

Es así como se obtuvieron los resultados esperados en base a la simulación inicial y luego con la simulación una vez realizada la mejora en la geometría donde está involucrada la fixtura principalmente con los insertos que se agregaron para evitar el movimiento de todo el ensamble.

De acuerdo con la Tabla 3 se muestra un sumario de resultados donde se presenta los hallazgos antes y después de las mejoras en las simulaciones.

Simulación	Units	Antes		Después	
		Min	Max	Min	Max
Deformación máxima	mm	0	0.055354	0	0.0073854
Esfuerzos equivalentes de Von Mises	MPa	0.00040116	1522.3	0.00026009	153.3
Deformaciones unitarias	mm/mm	1.915E-08	0.025673	2.84E-09	0.0024108
Factor de seguridad (estrés)	Safety Factor	0.19707	15	1.9569	15
Vida útil en fatiga	Life	0	1E+11	3.417E+06	1E+11
Factor de seguridad (Vida en fatiga)	Safety Factor	0.062501	15	0.62062	15

Tabla 3. Resumen de resultados obtenidos.

Posteriormente se presenta en las siguientes figuras los gráficos de comparación obtenidos entre el antes y después de la mejora a la geometría. En la Figura 36 se muestra la comparación de deformaciones máximas.

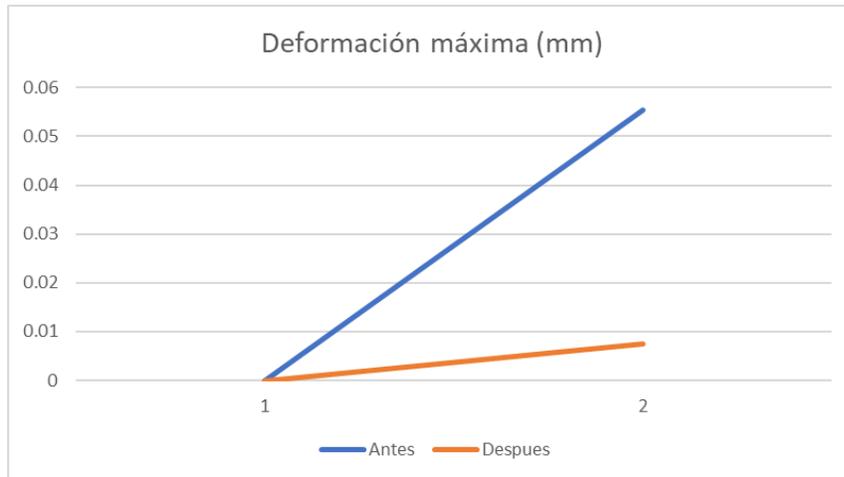


Figura 36. Comparación de deformación máxima (mm).

En la Figura 37 se muestra la comparación de los esfuerzos equivalentes de Von Mises (MPa).

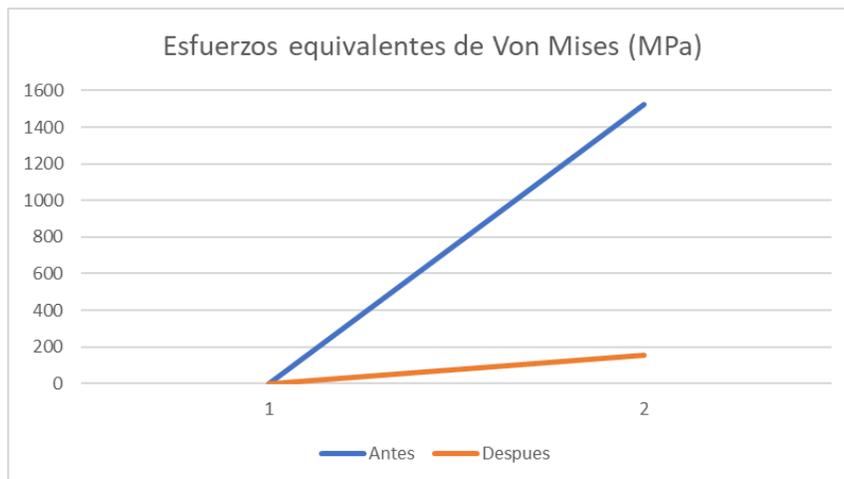


Figura 37. Comparación de esfuerzos equivalentes de Von Mises (MPa).

En la Figura 38 se muestra la comparación de las deformaciones unitarias.

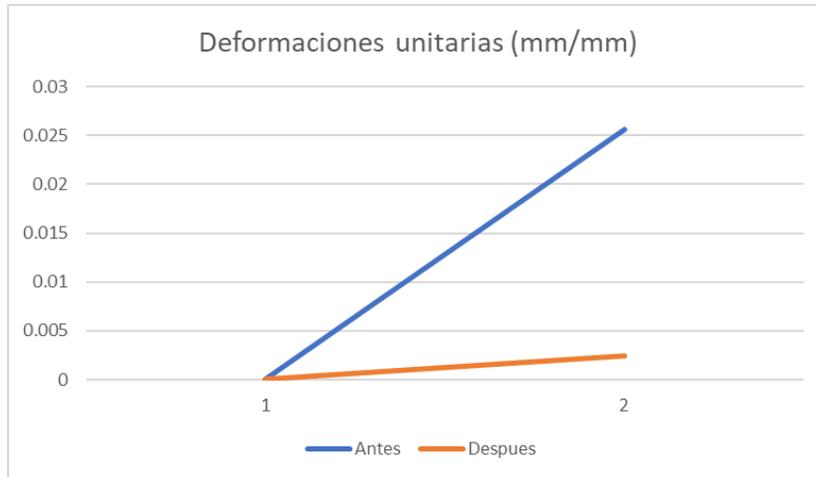


Figura 38. Comparación de deformaciones unitarias (mm/mm).

En la Figura 39 se muestra la comparación del factor de seguridad.

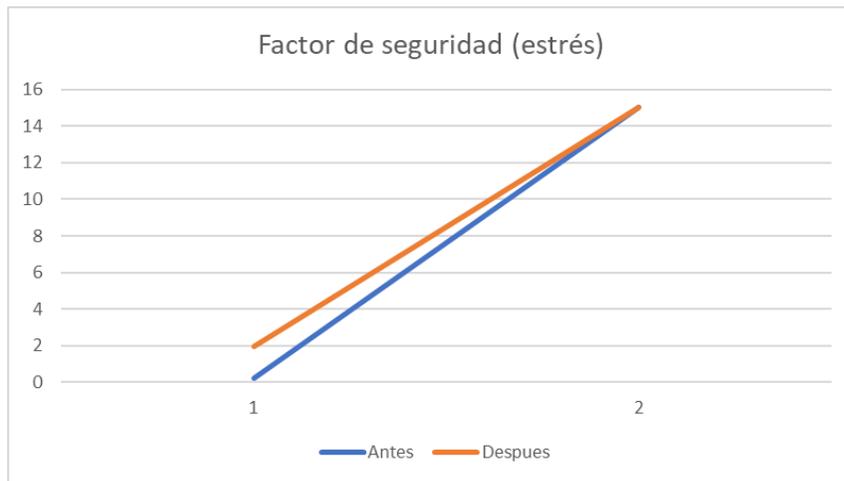


Figura 39. Comparación de factor de seguridad.

En la Figura 40 se muestra la comparación de vida útil en fatiga.

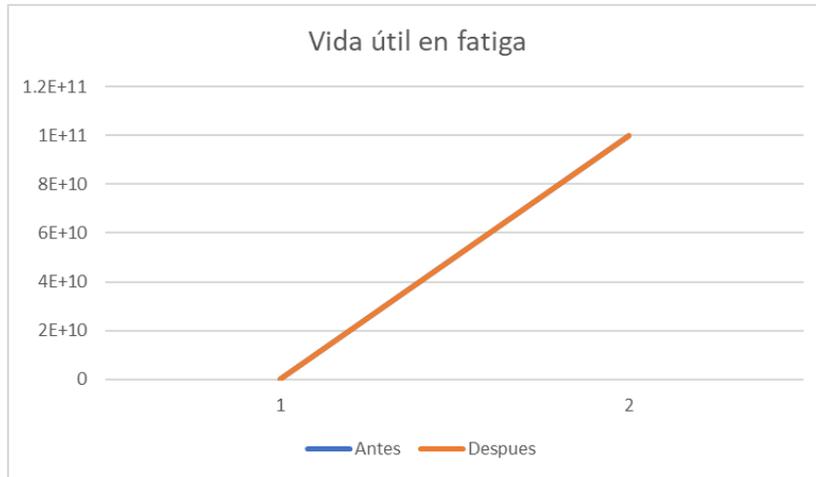


Figura 40. Comparación de vida útil en fatiga.

En la Figura 41 se muestra la comparación de factor de seguridad de vida útil en fatiga.

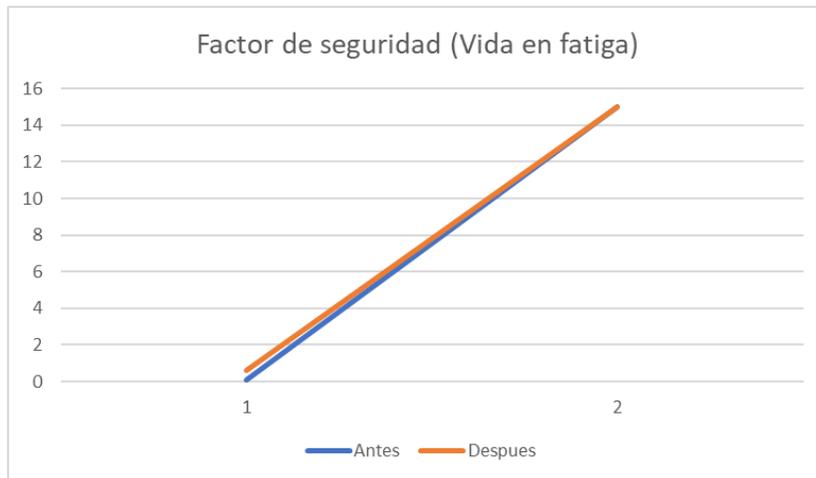


Figura 41. Comparación de factor de seguridad de vida en fatiga.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el proyecto se identifica la mejora de la fixtura debido a la falla que se tiene en el proceso de heat staking, por lo que una de las hipótesis fue que existe juego de la pieza con la fixtura, por lo que por un lado la fixtura debe estar adaptada a toda la geometría de la pieza y por consiguiente del herramental que baja de manera automática

cuando se realiza el ciclo de la pieza. Los análisis estructurales que se simularon en la geometría fueron satisfactorios en ambas simulaciones al principio y final o después de la mejora y se observó en un principio que el ensamble se fracturó, tiene una deformación máxima que fractura el ensamble, un esfuerzo al que se somete, un factor de seguridad por debajo de lo ideal para considerar que es bueno y por consiguiente una vida útil mala. Una vez que se hicieron los ajustes mecánicos a la fixtura agregándole insertos que ayuden a restringir el movimiento en el ensamble y también donde se hizo el cambio de material para la fixtura donde se decidió cambiar del material de acero a aluminio.

Se planteó realizar el análisis de la fixtura con componentes que intervienen en el ciclo del proceso, es decir, la pieza de ensamble y el herramental. Y se continuó con este estudio agregando más partes que afectan a la fixtura, por ejemplo, el ensamble de la pieza que se manufactura, y el stake para comprobar los datos y resultados obtenidos a través de ANSYS. Con respecto al software de simulación se aplicaron los parámetros específicamente para evitar errores y tiempos prolongados de solución. En cuanto al mallado, se seleccionaron correctamente los parámetros para las partes que se genera el corte tanto en aristas, superficies y sólidos con el objetivo de mejorar los resultados y visualización del proceso. Y por último, se realizó la validación del proceso con diferentes materiales para evaluar las condiciones para una solución con un ahorro de costos. Con las propuestas de material de cambiar de acero a aluminio se logró disminuir las cargas y fuerzas que intervienen en el estudio, esto por ser el aluminio más ligero y fuerte, además de que el esfuerzo permisible es muy similar entre ambos materiales de estudio. Es así como en las gráficas de comparación se demuestra de manera precisa que se logró mejorar los resultados en base a las técnicas empleadas.

6. REFERENCIAS

- [1] J. A. Camelio, S. J. Hu, and D. J. Ceglarek, "Impact of fixture design on sheet metal assembly variation," *Proc. ASME Des. Eng. Tech. Conf.*, vol. 3, pp. 133–140, 2002, doi: 10.1115/detc2002/dfm-34167.
- [2] R. C. Law and I. A. Azid, "Application of artificial neural network in thermal and solder joint reliability analysis for stacked dies LBGA," *Proc. IEEE/CPMT Int. Electron. Manuf. Technol. Symp.*, pp. 1–7, 2008, doi: 10.1109/IEMT.2008.5507805.
- [3] Y. Wu, Y. Rong, W. Ma, and S. R. LeClair, "Automated modular fixture planning: Geometric analysis," *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 14, no. 1, pp. 1–15, 1998, doi: 10.1016/S0736-5845(97)00024-0.
- [4] M. Tofall, M. Merklein, and R. Plettke, "Application of the finite element methods on the staking process of staking fasteners," *Key Eng. Mater.*, vol. 473, pp. 273–280, 2011, doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.473.273.
- [5] R. Förstmann, J. Wagner, K. Kreisköther, A. Kampker, and D. Busch, "Design for Automation: The Rapid Fixture Approach," *Procedia Manuf.*, vol. 11, no. June, pp. 633–640, 2017, doi: 10.1016/j.promfg.2017.07.161.
- [6] S. Härtel, E. Brueckner, B. Awiszus, and M. Gehde, "Development of a numerical model of the hot air staking process based on experimental data," *Appl. Sci.*, vol. 10, no. 20, pp. 1–12, 2020, doi: 10.3390/app10207115.
- [7] H. J. Yeh, C. L. Schott, and J. B. Park, "Staking design and process parameter study of hot-air cold staking process," *SAE Tech. Pap.*, no. 724, 1999, doi: 10.4271/1999-01-1629.

- [8] H.-S. Park and T.-T. Nguyen, "Numerical Simulation of Infrared Staking Plastic for an Automotive Part," *ICCM*, no. 14-17th July, pp. 1–7, 2015.
- [9] P. Khuntontong, T. Blaser, and W. K. Schomburg, "Fabrication of molded interconnection devices by ultrasonic hot embossing on thin polymer films," *IEEE Trans. Electron. Packag. Manuf.*, vol. 32, no. 3, pp. 152–156, 2009, doi: 10.1109/TEPM.2009.2020742.
- [10] G. Sullivan, L. Crawford, and I. Thermal Press Int'l, "The Heat Stake Advantage," *Thermal Press*.
- [11] A. G. Swamy, M Rama; Chand, "Design & Analysis & Optimization of Heat Staking Mechanism for Packing Machinery," *Int. J. Innov. Sci. Eng. Technol.*, vol. 1, no. 10, pp. 288–292, 2014.
- [12] J. L. Tan, C. M. Kiew, and Y. C. Lam, "Energy benchmark of polymeric embossing systems namely hot embossing systems and ultrasonic systems," *2014 13th Int. Conf. Control Autom. Robot. Vision, ICARCV 2014*, vol. 2014, no. December, pp. 1224–1228, 2014, doi: 10.1109/ICARCV.2014.7064490.
- [13] A. J. Jegadeesan, L. Karunamoorthy, and N. Arunkumar, "Investigation of hot-staking process parameters and evolution of improvement in joint strength," *Mater. Manuf. Process.*, vol. 30, no. 2, pp. 155–161, 2015, doi: 10.1080/10426914.2014.961479.
- [14] T. Sartor, B. D. Cacace, and S. R. Espada, "Structural Integrity Evaluation of Plastic Welding (Heat Stake) Tower in Door Trim Panels of Vehicles Using Finite Element Method," *SAE Tech. Pap.*, vol. 2015-36–02, no. September, pp. 1–6, 2015, doi: 10.4271/2015-36-0242.

- [15] H. Liu and H. Hu, "Fabrication of dumbbell shape microstructures by hot embossing through microporous mould," *2011 Int. Conf. Consum. Electron. Commun. Networks, CECNet 2011 - Proc.*, vol. 2, no. 5, pp. 341–344, 2011, doi: 10.1109/CECNET.2011.5768754.
- [16] V. Ivanov, I. Pavlenko, O. Liaposhchenko, O. Gusak, and V. Pavlenko, "Determination of contact points between workpiece and fixture elements as a tool for augmented reality in fixture design," *Wirel. Networks*, vol. 27, no. 3, pp. 1657–1664, 2021, doi: 10.1007/s11276-019-02026-2.
- [17] M. Vasundara and K. P. Padmanaban, "Recent developments on machining fixture layout design, analysis, and optimization using finite element method and evolutionary techniques," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 70, no. 1–4, pp. 79–96, 2014, doi: 10.1007/s00170-013-5249-6.
- [18] F. Turner, *Advances in Manufacturing Technology.*, vol. 88, no. 872. 1983.
- [19] D. Y. B. Dr.Yadavalli Basavaraj, "Modeling and Analysis of Support Pin for Brake Spider Fixture by Fem Using Ansys Software," *IOSR J. Mech. Civ. Eng.*, vol. 6, no. 1, pp. 10–15, 2013, doi: 10.9790/1684-0611015.
- [20] S. Arzanpour, J. Fung, J. K. Mills, and W. L. Cleghorn, "Flexible fixture design with applications to assembly of sheet metal automotive body parts," *Assem. Autom.*, vol. 26, no. 2, pp. 143–153, 2006, doi: 10.1108/01445150610658130.
- [21] S. Vishnupriyan, M. C. Majumder, and K. P. Ramachandran, "Optimal fixture parameters considering locator errors," *Int. J. Prod. Res.*, vol. 49, no. 21, pp. 6343–6361, 2011, doi: 10.1080/00207543.2010.532167.
- [22] Z. M. Bi and W. J. Zhang, "Flexible fixture design and automation: Review, issues

- and future directions,” *Int. J. Prod. Res.*, vol. 39, no. 13, pp. 2867–2894, 2001, doi: 10.1080/00207540110054579.
- [23] H. Wang, Y. Rong, H. Li, and P. Shaun, “Computer aided fixture design: Recent research and trends,” *CAD Comput. Aided Des.*, vol. 42, no. 12, pp. 1085–1094, 2010, doi: 10.1016/j.cad.2010.07.003.
- [24] B. S. Rao, D. Malkapuram, and E. Ramjee, “Force and Deformation Analysis for Determination of Optimum Fixture Configuration,” vol. 13, no. 7, pp. 4675–4681, 2018.
- [25] X. Liao and G. G. Wang, “Simultaneous optimization of fixture and joint positions for non-rigid sheet metal assembly,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 36, no. 3–4, pp. 386–394, 2008, doi: 10.1007/s00170-006-0827-5.
- [26] K. Wang, G Gary; Haji Hajikolaei, “Optimization of fixture and joint positions in sheet metal assembly: the effect of fixture numbers and constraints,” pp. 1–8, 2016.
- [27] B. Vijaya Ramnath, C. Elanchezhian, S. Rajesh, S. Jaya Prakash, B. M. Kumar, and K. Rajeshkannan, “Design and Development of Milling Fixture for Friction Stir Welding,” *Mater. Today Proc.*, vol. 5, no. 1, pp. 1832–1838, 2018, doi: 10.1016/j.matpr.2017.11.282.
- [28] R. J. Menassa and W. R. De Vries, “Optimization methods applied to selecting support positions in fixture design,” *J. Manuf. Sci. Eng. Trans. ASME*, vol. 113, no. 4, pp. 412–418, 1991, doi: 10.1115/1.2899715.
- [29] G. Abate, D. Perez, M. Baez, L. Santos, and D. Martinez Krahmer, “Determinación de la resistencia a la deformación de plastilina para el diseño de

- una prensa didáctica de forja,” 2014, no. October, pp. 1–16, doi:
10.13140/2.1.3758.8484.
- [30] A. B. Abibe, S. T. Amancio-Filho, J. F. dos Santos, and E. Hage, “Mechanical and failure behaviour of hybrid polymer-metal staked joints,” *Mater. Des.*, vol. 46, pp. 338–347, 2013, doi: 10.1016/j.matdes.2012.10.043.
- [31] S. Kashyap and W. R. DeVries, “Finite element analysis and optimization in fixture design,” *Struct. Optim.*, vol. 18, no. 2–3, pp. 193–201, 1999, doi:
10.1007/s001580050120.
- [32] P. Haight, J. Schaudt, and T. Smith, “Machining Fixture Redesign,” 2018.
- [33] N. Amaral, J. J. Rencis, and Y. Rong, “Development of a finite element analysis tool for fixture design integrity verification and optimisation,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 25, no. 5–6, pp. 409–419, 2005, doi: 10.1007/s00170-003-1796-6.
- [34] N. Kaya, “Machining fixture locating and clamping position optimization using genetic algorithms,” *Comput. Ind.*, vol. 57, no. 2, pp. 112–120, 2006, doi:
10.1016/j.compind.2005.05.001.
- [35] J. Xin, “Study of the process of turbine blade and fixture design based on UG and ANSYS,” *Adv. Mater. Res.*, vol. 421, pp. 369–372, 2012, doi:
10.4028/www.scientific.net/AMR.421.369.
- [36] Z. Bao, D. Zeng, and D. Wu, “Structural optimization of machine tool column based on dynamic characteristic analysis and response surface,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 772, no. 1, 2020, doi: 10.1088/1757-899X/772/1/012080.
- [37] N. M. Kumbhar, G. S. Patil, S. S. Mohite, and M. A. Sutar, “Workpiece-Fixture System,” pp. 60–65, 2012.

- [38] G. Prabhakaran, K. P. Padmanaban, and R. Krishnakumar, "Machining fixture layout optimization using FEM and evolutionary techniques," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 32, no. 11–12, pp. 1090–1103, 2007, doi: 10.1007/s00170-006-0441-6.
- [39] W. Chen, L. Ni, and J. Xue, "Deformation control through fixture layout design and clamping force optimization," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 38, no. 9–10, pp. 860–867, 2008, doi: 10.1007/s00170-007-1153-2.
- [40] S. Satyanarayana and S. N. Melkote, "Finite element modeling of fixture-workpiece contacts: Single contact modeling and experimental verification," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 44, no. 9, pp. 903–913, 2004, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2004.02.010.
- [41] L. Aretxabaleta, J. Aurrekoetxea, and I. Urrutibeascoa, "CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES PLÁSTICOS A ALTAS VELOCIDADES DE DEFORMACIÓN: EXTRAPOLACIÓN DE RESULTADOS DE TRACCIÓN FRENTE A ENSAYOS DE IMPACTO," no. June 2014, 2014.
- [42] M. Guerrero, S. Valderrabano Salazar, R. Campos R., and M. Isasi Larrea, "Aplicación del método de elemento finito al análisis nodal," *Ingenierías*, vol. 2, no. 3, pp. 49–55, 1999.
- [43] J. Celigüeta, *Método de los Elementos Finitos para Análisis Estructural*. 2011.
- [44] A. S. Jaimes, "Uso de software de elementos Finitos Ansys, en el diseño estructural de un vehículo todo terreno," *Uso Softw. Elem. Finitos Ansys, en el diseño estructural un vehículo todo terreno*, vol. 5, no. 1, 2017, doi: 10.18566/puente.v5n1.a03.

- [45] S. D. Wankhede, S. S. Joshi, L. J. Bagwan, and A. V Wadmare, "Analysis and Optimization of Hydraulic Scissor Lift," vol. 4, no. 4, pp. 1–8, 2018.
- [46] A. Vera, "Fatigue analysis of Epoxy Carbon MTB bicycle suspension system to thorough ANSYS," *Conoc. para el Desarro.*, vol. 10, no. 1, pp. 41–45, 2019, doi: 10.17268/cpd.2019.01.06.
- [47] J. Dou, X. Wang, and L. Wang, "Machining fixture layout optimization using particle swarm optimization algorithm," *Fourth Int. Semin. Mod. Cut. Meas. Eng.*, vol. 7997, p. 79970S, 2010, doi: 10.1117/12.885289.
- [48] S. C. Costa, H. Barrutia, J. A. Esnaola, and M. Tutar, "Numerical study of the heat transfer in wound woven wire matrix of a Stirling regenerator," *Energy Convers. Manag.*, vol. 79, pp. 255–264, 2014, doi: 10.1016/j.enconman.2013.11.055.
- [49] B. Li, M. Tang, Y. Zhi, and H. Yu, "Thermal simulation of 3-d stacked integrated circuits with layered finite element method," *2019 Photonics Electromagn. Res. Symp. - Fall, PIERS - Fall 2019 - Proc.*, pp. 1883–1886, 2019, doi: 10.1109/PIERS-Fall48861.2019.9021638.
- [50] V. H. Cabrera-moreta and L. Cnc, "Determinación de holgura de corte en chapa metálica mediante simulación en ANSYS," no. May, 2020.
- [51] W. Velilla and R. Mendoza, "Análisis estructural mediante simulación IAO en una estructura de carga y su validación," *Inge Cuc*, vol. 8, no. 1, pp. 231–240, 2012.
- [52] W. Cao, G. L. Zheng, J. L. Xu, and Y. Qiu, "Finite element analysis for assembly fixtures based on ANSYS," *Appl. Mech. Mater.*, vol. 380–384, pp. 173–176, 2013, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.380-384.173.
- [53] S. P. Siebenaler and S. N. Melkote, "Prediction of workpiece deformation in a

- fixture system using the finite element method,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 46, no. 1, pp. 51–58, 2006, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2005.04.007.
- [54] K. S. Kumar and G. Paulraj, “Geometric error control of workpiece during drilling through optimisation of fixture parameter using a genetic algorithm,” *Int. J. Prod. Res.*, vol. 50, no. 12, pp. 3450–3469, 2012, doi: 10.1080/00207543.2011.588616.
- [55] A. F. Rivas Bolívar, “Ánàlisis estructural para un marco rígido de bicicleta de montaña mediante el modelamiento de elementos finitos en el software ANSYS,” 2019.