

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la  
Producción**

"ANÁLISIS DE FALLAS Y MODELADO VIRTUAL DE CUCHILLAS  
UTILIZADAS EN MAQUINARIA DE MECANIZACIÓN AGRÍCOLA"

**TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN**

Proyecto Integrador

Previo la obtención del Título de:

**INGENIERO MECÁNICO**

Presentado por:

Albuja Ayala Maria Jose

Riera Maldonado Freddy Bryan

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2017

# AGRADECIMIENTOS

Agradecimiento por Maria Jose Albuja Ayala

A Dios, por concederme vida y salud y llegar a culminar mi meta propuesta.

A mis padres, quienes me apoyan, guían y brindan amor incondicional cada día.

A mi abuelita Cristina y mis abuelitos quiénes ya no me acompañan, pero siempre creyeron en mí y me alentaron a cumplir mi meta.

A mi familia, quiénes con mucho cariño y comprensión me apoyan.

A mis amigos, por compartir esta linda experiencia de mi etapa estudiantil.

A mis profesores y en especial a los Tutores de la materia Integradora, por su guía y por compartir sus vastos conocimientos para desarrollar este trabajo de graduación.

## Agradecimiento por Freddy Riera

A Dios, por bendecirme y permitirme llegar hasta donde he llegado.

A mi familia por ser el pilar fundamental y por estar ahí en cada uno de los pasos de mi vida.

A mis amigos y profesores por hacer de esta etapa universitaria una de las mejores.

En especial a mi abuelita Eufemia quien ya no se encuentra conmigo, que con sus palabras de aliento no me dejaban decaer para que siguiera adelante y siempre sea una persona de bien y cumpla con mis ideales.

## RESUMEN

Las cuchillas para el corte de caña de azúcar al momento de la cosecha, deben cumplir con especificaciones de ingeniería de desempeño, las que están sometidas a ambientes agresivos como el tipo de terreno, surco y diversidad de caña de azúcar. Durante la visita en los campos del ingenio azucarero San Carlos S.A., se apreció que las cuchillas presentan desgaste excesivo en el filo y fractura de las mismas; por lo que se consideró realizar un análisis exhaustivo de los factores que provocan la falla y plantear correctivos para minimizarla.

Se tiene una muestra de cuatro proveedores de cuchillas, para su análisis se tiene dos procedimientos: caracterización del material y de diseño. Para la caracterización de material se dio uso de normas estandarizadas para ensayos destructivos y no destructivos. Los resultados mostraron los materiales empleados para la fabricación de las cuchillas fueron aceros de bajo-medio contenido de carbono con adiciones de Si, Mn y Cr. La microestructura presentó dos fases: ferrita y martensita (predominante) y una dureza de  $41\pm 3$  HRC y la resistencia a la fluencia y resistencia máxima se encontraron en el orden de 1392 MPa a 1528 MPa y 1542 MPa a 1667 MPa, respectivamente. Los ensayos no destructivos determinaron la ubicación de la falla en los agujeros de la cuchilla y la variación de espesores debido al desgaste. Para caracterización de diseño se estableció el modelo matemático según el comportamiento de operación de la cuchilla al momento de la cosecha, se analizaron casos en el que intervienen solo el corte de la caña, obteniendo valores de factores de seguridad mayores a uno, lo que indica que tendrá vida infinita, siendo más críticos los casos donde la cuchilla es impactada por una piedra, para los cuales el factor de seguridad calculado fue inferior a uno.

**Palabras claves:** Análisis de Fallas, ensayo destructivo, ensayo no destructivo, vida útil, factor de seguridad.

## ***ABSTRACT***

The blades for cutting sugarcane at the time of harvest must comply with performance engineering specifications, which are subject to aggressive environments such as the type of terrain, groove and diversity of sugarcane. During the visit to the fields of the sugar mill San Carlos S.A., it was observed that the blades show excessive wear on the cutting edge and fracture thereof; so it was considered to carry out an exhaustive analysis of the factors that cause the failure and propose corrective measures to minimize it.

There is a sample of four blade suppliers, for its analysis there are two procedures: characterization of the material and design. For the characterization of material, standardized norms were used for destructive and non-destructive tests. The results showed the materials used for the manufacture of the blades were steels of low-medium carbon content with additions of Si, Mn and Cr. The microstructure had two phases: ferrite and martensite (predominant) and a hardness of  $41 \pm 3$  HRC and the resistance to creep and maximum strength were found in the order of 1392 MPa at 1528 MPa and 1542 MPa at 1667 MPa, respectively. The non-destructive tests determined the location of the fault in the holes of the blade and the variation of thickness due to wear. For design characterization of the mathematical model was established according to the operating behavior of the blade at the time of harvest, cases were analyzed in which only cut the cane, obtaining values of safety factors greater than one, which indicates that will have infinite life, being more critical the cases where the blade is impacted by a stone, for which the calculated safety factor was less than one.

**Keywords:** Failure analysis, destructive test, non-destructive test, useful life, safety factor

## DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido desarrollado en la presente propuesta de la materia integradora corresponde exclusivamente al equipo conformado por:

María José Albuja Ayala

Freddy Bryan Riera Maldonado

Ana Luisa Rivas Ferrín, Ph.D.

Livingston David Castro Valladares, M.Sc.

y el patrimonio intelectual del mismo a la Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción (FIMCP) de la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”



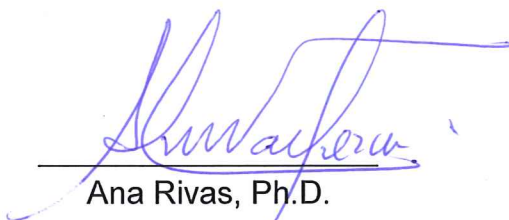
María José Albuja A.

Autor 1



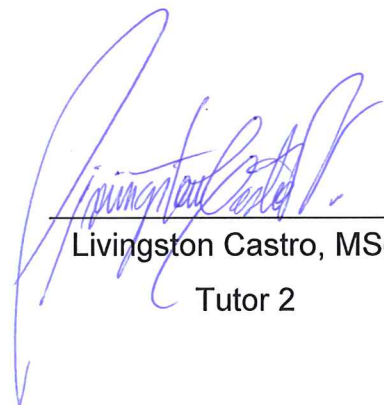
Freddy Riera M.

Autor 2



Ana Rivas, Ph.D.

Tutor 1



Livingston Castro, MSc.

Tutor 2

# INDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
ABSTRACT.....	II
DECLARACIÓN EXPRESA .....	III
ABREVIATURAS .....	VI
SIMBOLOGIA.....	VII
INDICE DE FIGURAS.....	VIII
INDICE DE TABLAS .....	X
CAPÍTULO 1 .....	1
1. Introducción .....	1
1.1. Descripción del Problema.....	2
1.2. Objetivos.....	3
1.2.1. Objetivo General .....	3
1.2.2. Objetivos Específicos.....	3
1.3. Marco Teórico.....	4
1.3.1. Cuchillas.....	4
1.3.2. Análisis de falla.....	5
1.3.3. Caña de Azúcar .....	6
1.3.4. Maquinaria Agrícola.....	8
CAPÍTULO 2 .....	10
2. Metodología.....	10
2.1. Metodología del Diseño .....	10
2.2. Bases y consideraciones.....	11
2.3. Descripción de las alternativas de solución.....	11
2.3.1. Estudio estadístico .....	12
2.3.2. Caracterización del Material.....	12
2.3.3. Caracterización del Diseño .....	23
2.3.2.1 Modelado y Simulación .....	37
CAPÍTULO 3 .....	41
3. Resultados .....	41
3.1. Análisis de Falla de Cuchillas .....	41
3.1.1. Ensayos Destructivos .....	41

3.1.2. Ensayos No Destructivos .....	49
3.2. Análisis de la simulación.....	50
<b>CAPÍTULO 4 .....</b>	<b>41</b>
<b>4. Discusión y Conclusiones .....</b>	<b>41</b>
4.1. Conclusiones.....	41
4.2. Recomendaciones.....	41
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	
<b>APÉNDICES</b>	



## **ABREVIATURAS**

ASTM	American Society of Testing Materials
ASME	American Society of Mechanical Engineers
ISO	International Organization for Standardization
CAD	Computer Aided Design
AISI	American Iron and Steel Institute
UTM	Ultrasonic Thickness Measurements
AISI	American Iron and Steel Institute
SAE	Society of Automotive Engineers
FEA	Analysis of Finite Elements

## SIMBOLOGIA

mm	milímetro
rpm	revoluciones por minuto
Kg	Kilogramo
in	pulgada
kgf	Kilogramo fuerza
nm	nanómetro
W	Watts
MPa	Megapascal
N	Newton
J	Joule
$\rho$	densidad
$\nu$	Módulo de Poisson
I	Inercia

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. 1. Tipos de Cuchillas y discos del mecanismo de cortador de base ...	5
Figura 1. 2. Velocidad de Cosecha mecánica típica para cañas verdes y quemadas usando máquinas sobre ruedas y sobre oruga.....	8
Figura 1. 3. Esquema de una máquina cosechadora sobre rueda.....	9
Figura 1. 4. Tractor para cosecha de caña de azúcar.....	9
Figura 2. 1. Diagrama de metodología de diseño para el análisis de las cuchillas.....	10
Figura 2. 2. Dimensionamiento de probeta a ensayar .....	15
Figura 2. 3. Dimensionamiento de probeta Charpy tipo A de acuerdo con .....	17
Figura 2. 4. Ensayo de Partículas Magnéticas realizada a cuchillas.....	20
Figura 2. 5. Medición de espesores realizada a cuchillas.....	21
Figura 2. 6. Microestructura de la muestra 1 con las líneas trazadas .....	23
Figura 2. 7. Plano de la cuchilla impactada por una caña de azúcar .....	23
Figura 2. 8. Plano de la cuchilla impactada por una caña de azúcar .....	24
Figura 2. 9. Plano de la cuchilla impactada por tres cañas de azúcar.....	24
Figura 2. 10. Plano de la cuchilla impactada por cuatro cañas de azúcar.....	24
Figura 2. 11. Plano de la cuchilla impactada por una caña de azúcar y una piedra .....	25
Figura 2. 12. Plano de la cuchilla impactada por una piedra.....	25
Figura 2. 13. Plano de la cuchilla impactada por dos piedras .....	26
Figura 2. 14. Diagrama de Cuerpo Libre de la cuchilla sometida a la fuerza ...	28
Figura 2. 15. Diagrama de la Fuerza cortante .....	28
Figura 2. 16. Diagrama del Momento Flector.....	28
Figura 2. 17. Esquema de la cuchilla de las secciones (A y B) a analizar.....	29
Figura 2. 18. Elemento diferencial de la sección A.....	29
Figura 2. 19. Factor geométrico de concentración de esfuerzos $K_t$ para una barra plana con orificio transversal en tensión axial.....	31
Figura 2. 20. Factor geométrico de concentración de esfuerzos $K_t$ para una barra plana con orificio transversal en flexión.....	32
Figura 2. 21. Elemento diferencial en la sección B.....	32
Figura 2. 22. Curva de sensibilidad a la muesca para aceros.....	36
Figura 2. 23. Etapas del análisis de elementos finitos.....	38
Figura 2. 24. Diagrama del Mallado de la cuchilla.....	38
Figura 2. 25. Calidad de Mallado de la cuchilla.....	39
Figura 2. 26. Cargas y restricciones aplicadas al sistema.....	39
Figura 3. 1. Curvas de Esfuerzo vs alargamiento para la muestra 1 .....	45
Figura 3. 2. Microestructura de la muestra 1 a X500.....	47
Figura 3. 3. Microestructura de la muestra 2 a X500.....	47

Figura 3. 4. Microestructura de la muestra 3 a X500.....	48
Figura 3. 5. Microestructura de la muestra 4 a X500.....	48
Figura 3. 6. Fisura alrededor de la zona de sujeción de la cuchilla .....	49

## INDICE DE TABLAS

Tabla 2. 1. Condiciones de trabajo.....	12
Tabla 2. 2. Ventajas y desventajas de las alternativas para.....	13
Tabla 2. 3. Ponderación de la matriz de decisión.....	14
Tabla 2. 4. Matriz de decisión para cortar metales.....	14
Tabla 2. 5. Rango de composición química para los diferentes tipos de elementos en un material. ....	18
Tabla 2. 6. Tabla de Longitud total y fraccionada.....	22
Tabla 2. 7. Coeficientes del factor de acabado superficial .....	34
Tabla 2. 8. Tabla de factor de confiabilidad.....	35
Tabla 3. 1. Composición química de las cuchillas.....	42
Tabla 3. 2. Valores de dureza de las cuchillas en estudio.....	44
Tabla 3. 3. Propiedades mecánicas de las cuchillas ensayadas a tracción. ....	44
Tabla 3. 4. Tabla de valores de la tenacidad en las cuchillas.....	46
Tabla 3. 5. Porcentaje de fases en las cuchillas evaluadas. ....	48
Tabla 3. 6. Comparación de espesores de cuchillas nuevas y desgastadas ...	50
Tabla 3. 7. Resultados obtenidos para el caso 1 a través del método de elementos finitos. ....	50
Tabla 3. 8. Resultados obtenidos para el caso 2 a través del método de elementos finitos. ....	52
Tabla 3. 9. Resultados obtenidos para el caso 3 a través del método de elementos finitos. ....	53
Tabla 3. 10. Resultados obtenidos para el caso 4 a través del método de elementos finitos. ....	54
Tabla 3. 11. Resultados obtenidos para el caso 5 a través del método de elementos finitos. ....	55
Tabla 3. 12. Resultados obtenidos para el caso 6 a través del método de elementos finitos. ....	56
Tabla 3. 13. Resultados obtenidos para el caso 7 a través del método de elementos finitos. ....	57

# CAPÍTULO 1

## 1. Introducción

En la actualidad los ingenios azucareros ocupan un lugar preponderante en la actividad agroindustrial del país; integra el cultivo, elaboración y comercialización de productos derivados de la caña de azúcar, tributando de manera significativa a la economía regional, nacional y contribuyendo en la generación de puestos de trabajo. En la zona del Guayas, se encuentra el Ingenio San Carlos, el complejo azucarero más grande del país, con un capital humano de alrededor 3000 empleados que cuenta con una extensa variedad de maquinaria agrícola e industrial, basada en tractores y cosechadoras.

La cosechadora está compuesta de partes que le permiten realizar las funciones de corte y troceado de la caña, utilizando dos tipos de cuchillas. Debido al tipo y condiciones de trabajo, las cuchillas están sometidas a fuertes cargas cíclicas, sufriendo un desgaste acelerado y en algunos casos fractura, lo que produce un continuo reemplazo de estos materiales. En el presente trabajo se persigue analizar las fallas que presentan las cuchillas a través de una caracterización del material y la evaluación de los diseños actuales en las cuchillas más eficiente en el ingenio San Carlos.

En el capítulo 1 se describe el problema, los objetivos y se plantea el marco teórico que se utilizará durante todo el estudio, los cuales serán las bases principales para el análisis de resultados. En el capítulo 2 se detalla el diseño de la metodología para el análisis de las fallas, que abarca estudio estadístico, elaboración de las probetas basadas en las normas que se deben considerar para realizar cada uno de los ensayos, análisis teórico y simulación del funcionamiento de las cuchillas. En el capítulo 3 se presentan los resultados y su discusión para finalizar con las conclusiones derivadas de la investigación y las recomendaciones, aspectos contemplados en el capítulo 4.

## 1.1. Descripción del Problema

En el Ecuador existen aproximadamente ocho ingenios azucareros de los cuales el 33% del consumo nacional de azúcar es producido por el ingenio San Carlos ubicado en la provincia del Guayas, con 25000 hectáreas que representan entre el 60 y 70 % de la caña que se procesa anualmente, distribuidas entre los cantones Marcelino Maridueña (donde se encuentra localizada la fábrica), El triunfo y Naranjito.

Existen dos formas de cosechar la caña, la primera de manera manual utilizando machetes para su corte, proceso ineficiente para producciones masivas. El segundo método es mecánico con una producción tres veces mayor al de corte manual, si se compara una sola máquina cosechadora contra 90 hombres. En el mecanizado agrícola influye las condiciones del terreno debido a la localización, que básicamente existen 2 tipos: pedroso y barroso con surco simple o doble, parámetro fundamental al momento del corte, que afectan directamente a las cuchillas del cortador base.

Las cuchillas son un elemento esencial en el proceso de siembra y cosecha, en donde están expuestos a una serie de licitaciones mecánicas y de impacto que pueden dar origen a la falla. En el caso específico del ingenio San Carlos, se reemplazan alrededor de 10.000 cuchillas al año por efectos de daños que involucran comúnmente deformación plástica o fractura. El tipo y recurrencia de falla intervienen el diseño de las piezas y el tipo de material que juegan un papel crucial. La falla de estas piezas conduce a retrasos y a un incremento del gasto de producción, efectos que pudieran ser minimizados evaluando las características mencionadas apropiadas para esta aplicación. Por otra parte, las cuchillas utilizadas en maquinaria de mecanización agrícola son importadas, su consumo anual es significativo para un solo sector.

En consecuencia, el ingenio San Carlos presenta un consumo excesivo de cuchillas, identificando esto como problemática principal: las fallas en las cuchillas del sistema de corte de caña de azúcar de una maquinaria agrícola. La pertinencia del proyecto sobre las cuchillas de uso agrícola es más que justificada, involucrando problemas de tipo económico, así como de

funcionamiento, por lo que el estudio es un aporte para la toma de decisiones en cuanto a diseño y tipo y procesamiento de materiales.

El estudio del análisis de fallas inicia con un estudio estadístico, en donde se realiza el muestreo para los ensayos no destructivos, posteriormente se realizó la caracterización del material a través de ensayos destructivos y no destructivos, finalmente la caracterización de diseño inicia con el análisis teórico y termina con la simulación de las cuchillas bajo condiciones de trabajo.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo General**

Evaluar el modo y causas de la falla de cuchillas utilizadas en equipos de mecanización en el Ingenio San Carlos, según un estudio estadístico del número de cuchillas que fallan anualmente, haciendo una evaluación del diseño de las cuchillas y del tipo de falla para minimizar daños y proponer correctivos.

### **1.2.2. Objetivos Específicos**

- ✓ Efectuar un muestreo de la frecuencia de fallas en las cuchillas bajo estudio, mediante la evaluación de datos recopilados en el Ingenio San Carlos.
- ✓ Determinar el tipo y causas más comunes de fallas de las cuchillas, mediante ensayos destructivos y no destructivos de piezas fuera de servicio y del análisis de piezas nuevas, para tomar los correctivos a que haya lugar.
- ✓ Evaluar el diseño de las cuchillas basados en sus características de operación haciendo uso de herramientas computacionales, con propósitos de mejora.



### **1.3. Marco Teórico**

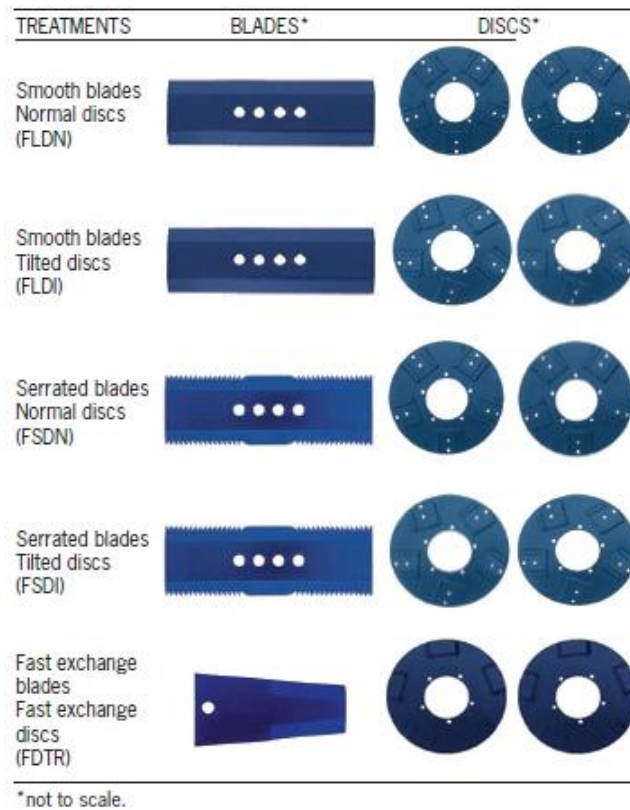
#### **1.3.1. Cuchillas**

Las cuchillas de corte son herramientas generalmente de metal con elementos aleados que permite realizar una operación de corte. Es utilizada en diferentes áreas de la industria como metal mecánico, automotriz, alimenticio, agrícola, papelera y cosmética. En esta sección, se describirá las aplicaciones y la importancia de las cuchillas de corte en la industria.

En el sector agrícola, las máquinas cosechadoras de caña de azúcar hacen uso de una variedad de juegos de cuchillas como, por ejemplo: descogolladoras, cortadoras de base y tronzadoras. Todos estos juegos de cuchillas experimentan daños (deterioro de sus filos) debido al carácter abrasivo de la caña de azúcar y materia extraña del suelo. Los tallos de la caña de azúcar se cortan por el impacto de las cuchillas en la cortadora base, considerando que en el tallo de la caña la dureza es mayor.

Mello y Harris (2003) evaluaron la influencia del tipo de cuchilla en el corte de tallos de caña de azúcar y concluyeron que la cuchilla inclinada y un escalón serrado de 3 mm arrojaban el mejor resultado (es decir, el menor daño al tallo). Mello (2005) observó que el escalón serrado de 3 mm presentaba la menor fuerza de corte específica, pero no difería de la forma de corte suave, tanto para las rotaciones a 450 como a 600 rpm de la velocidad tangencial de las cuchillas.

Taghijarah (Taghijarah, 2011) estudió el corte de los tallos de la caña de azúcar, encontraron que la resistencia al corte y la cizalladura específica aumentaron con la tasa de carga, y recomendaron tasas más bajas para reducir la demanda de energía. Johnson (Johnson, 2012) investigó cómo las velocidades de corte de las cuchillas ubicadas en ángulos oblicuos afectan la energía de corte, concluyendo que un ángulo de 60° requiere la menor cantidad de energía para cortar los tallos. Liu et al. (Liu, 2012) encontró que las cuchillas dentadas requieren menos energía y fuerza que las cuchillas planas, y sugieren que pueden producir la calidad de corte deseada, como se muestran en la Figura 1.1



**Figura 1. 1. Tipos de Cuchillas y discos del mecanismo de cortador de base**

Fuente: Toledo, Silva, & Furlani, 2011 .

### 1.3.2. Análisis de falla

El análisis de falla consiste en diagnosticar las causas que originaron la falla de un componente en operación, fundamentado en antecedentes sobre su diseño, fabricación; y utilizar esta información para mejorar la confiabilidad del componente. Cuando un componente ingenieril deja de realizar sus funciones, mucho antes de su vida útil, se dice que ha fallado prematuramente, pudiendo causar paradas imprevistas, incremento de costos y mantenimiento. Su objetivo es definir el correctivo para la prevención de fallas, logrando producir niveles altos de confiabilidad, calidad, seguridad y desarrollo económico. (ASM-International, 2002).

El análisis de falla está diseñado para:

- Identificar las formas de falla (forma de fallar el componente).

- Identificar el mecanismo de falla (agentes externos involucrados en la falla).
- Determinar la causa raíz (diseño, cargas que ocasionaron la falla).

Los procesos para la detección de fallas, así como susceptibilidad a éstas, involucran ensayos destructivos y no destructivos, respectivamente.

### **Ensayos Destructivos**

Consiste en evaluar la tendencia de fallas de componentes de un equipo, causas y mecanismos de fallas, extrayendo probetas (normalizadas por la ASTM) de un mismo lote de producción, las mismas que son sometidas a procesos que las “destruyen” y se evalúa en qué punto presenta el fallo; es decir, la limitación del material antes de considerarse obsoleto, o determinar por qué falló el material. Algunos de estos ensayos son: ensayo de tracción, ensayo de impacto, ensayo de dureza, metalográfico y de composición química. (ASM International, 2002)

### **Ensayos No Destructivos**

Permiten la detección de una falla sin la destrucción del mismo, con el fin de obtener la información sobre los desperfectos y propiedades de los materiales, elementos y estructura; así como también para revelar discontinuidades internas o superficiales. Algunos de estos ensayos son: tintas penetrantes, ultrasonido, partículas magnéticas, radiografía industrial, entre otros. (ASM International, 2002)

#### **1.3.3. Caña de Azúcar**

Es una planta herbácea de gran tamaño que se cultiva en países de clima cálido. La caña se extiende vegetativamente sembrando trozos de sus tallos (Rein, 2012) . La producción de caña cambia significativamente de un área a otra, dependiendo de la variedad, factores climáticos, disponibilidad de agua, prácticas de cultivo y la duración del periodo de crecimiento. Generalmente no se necesita volver a sembrar caña luego de cada cosecha, sino que se deja crecer de nuevo para obtener una siguiente cosecha, denominada rebrote o soca. La producción de caña de azúcar se reduce después de varias socas,

llegando al punto en que se vuelve a arar y sembrar nuevamente la caña, conocido como renovación. (Rein, 2012)

## **Métodos de Cosecha**

La cosecha de la caña de azúcar se realiza de dos maneras: manuales o con cosechadoras. En el Ingenio San Carlos, aproximadamente el 60% de la caña de azúcar se la cosecha de manera mecánica, dejando el 40% restante a una cosecha manual.

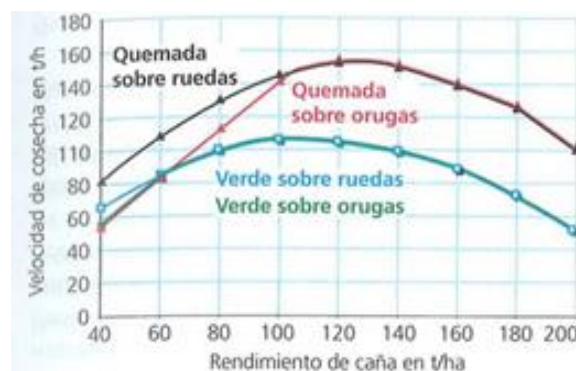
## **Cosecha Manual vs. Cosecha Mecánica**

En países con bajo costo de mano de obra, es más económico cosechar la caña manualmente. En países donde la topografía incluye terrenos inclinados y montañosos es sumamente difícil realizar una cosecha mecánica por la dificultad de desplazamiento de las máquinas. El corte manual produce menos pérdidas en el campo y genera mejor calidad de caña que la cosecha mecánica, y ofrece menos limitaciones con respecto a las condiciones de campo; mientras que en la cosecha mecánica, el modo de operación de la alzadora es importante debido a que una operación incorrecta puede provocar el levantamiento de grandes cantidades del suelo del campo y rocas/piedras, que pueden ser cargados junto con la caña (Vignes, 1980). Pero por tema de producción es mucho mejor una cosecha mecánica.

Existe una variedad de factores que se deben considerar al momento de implementar un sistema de cosecha mecanizada (Meyer, 1999). En términos de diseño y preparación de campo hay que tener en cuenta lo siguiente:

- Campos suficientemente llanos y sin rocas para la operación segura de cosechadoras y equipo de transporte.
- Cabeceras de campo adecuadas para girar la cosechadora al final de los surcos.
- Operaciones de cultivo compatibles, incluyendo la linealidad de los surcos (perfil de surco para minimizar pérdidas de caña sin alzar por la cosechadora) y diseño apropiado de canales de agua.
- Distancia entre surcos compatible para la caña y la maquinaria.

Otro factor considerar es: la eficiencia de la máquina agrícola y daños al suelo, que en algunos casos representan un problema, ocasionando pérdidas y una baja productividad. Estas pérdidas son proporcionales a la velocidad de la cosecha, agudeza del filo de las cuchillas, relación entre el tren de alimentación y la velocidad periférica del cortador base, y las características de la caña (Hocking, 2000). Con respecto a la productividad de la maquinaria existe un estudio detallado sobre el rendimiento de las cosechadoras usadas para caña verde y caña quemada cuyos resultados se presentan en la Figura 1.2 (Ridge, 1996). En cultivos de alto tonelaje se encontró que la diferencia entre productividad con caña verde y quemada es mayor para cultivos de mayor productividad, con ventajas de la velocidad de máquinas sobre ruedas, mientras que máquinas sobre oruga se limita a cultivos pequeños.



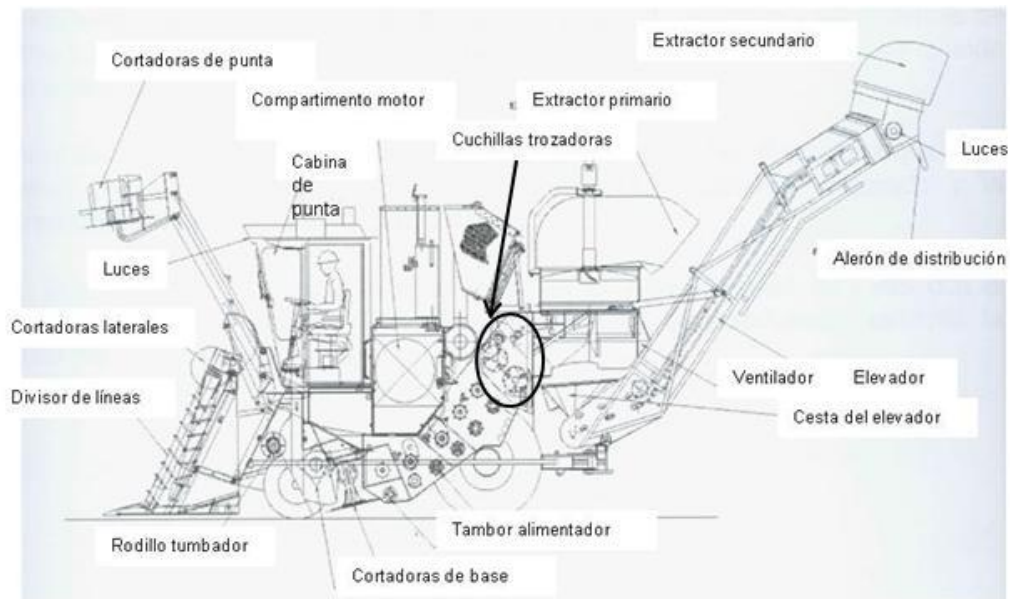
**Figura 1. 2. Velocidad de Cosecha mecánica típica para cañas verdes y quemadas usando máquinas sobre ruedas y sobre oruga.**

Fuente: Ridge, 1996

#### 1.3.4. Maquinaria Agrícola

La maquinaria agrícola es una o varias máquinas y equipos que emplean los agricultores en sus labores agrícolas, además una máquina agrícola tiene autonomía de funcionamiento y, por tanto, para su funcionamiento requiere un motor de combustión y unos mecanismos de transmisión que le permiten trasladarse por el campo cuando desarrolla el trabajo. En el sector agrícola se utilizan: cosechadoras, tractores y carretas.

**Cosechadora:** es un tractor especializado que se utiliza para cosechar, desgranar cultivos. En los cultivos de caña de azúcar realiza el troceado y lavado de la caña antes de descargar sobre el camión que las traslada a la fábrica (ver figura 1.3).



**Figura 1. 3. Esquema de una máquina cosechadora sobre rueda.**

Fuente: Leon, 2010

**Tractor:** son vehículos autopropulsados que se usan para accionar algunas máquinas que se necesite usar en el campo o jardín. Su característica principal es que se adhieren a cualquier tipo de terreno. En la Figura 1.4 se observa una de estas máquinas comerciales.



**Figura 1. 4. Tractor para cosecha de caña de azúcar.**

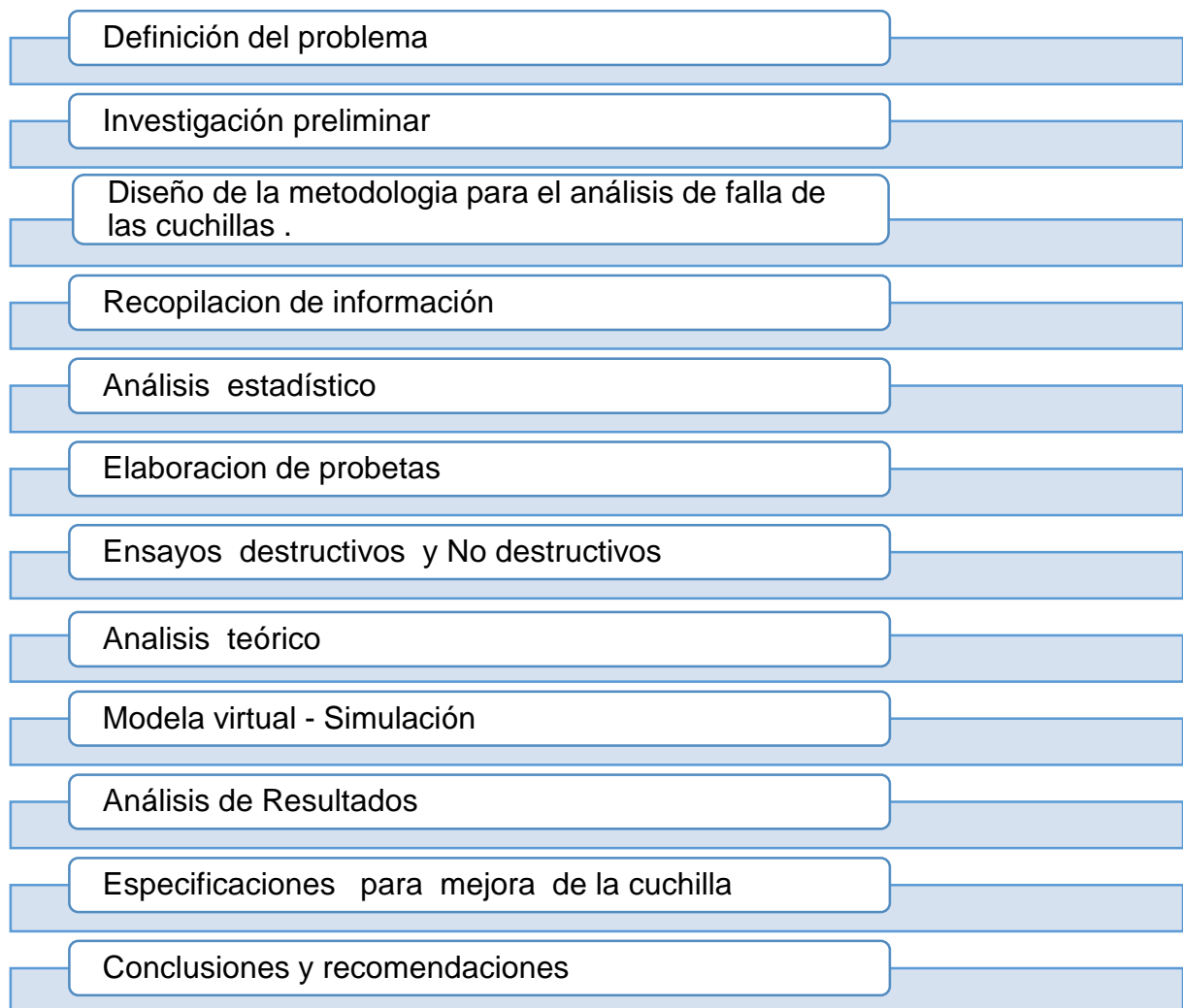
Fuente: John Deere, 2017

# CAPÍTULO 2

## 2. Metodología

En este capítulo, se describirá la metodología de diseño, procedimientos para realizar cada uno de los ensayos en la caracterización del material y finalmente la caracterización de diseño con el análisis teórico para posteriormente realizar la simulación.

### 2.1. Metodología del Diseño



**Figura 2. 1. Diagrama de metodología de diseño para el análisis de las cuchillas.**

Fuente: Elaboración propia.

## **2.2. Bases y consideraciones**

Los factores y parámetros que se consideraron para el desarrollo del análisis de falla de las cuchillas para el corte de caña de azúcar fueron los siguientes:

- Para el corte de las probetas para ensayos destructivos de tracción e impacto (Charpy) se siguieron las siguientes normas: ASTM E8 y ASTM E23, respectivamente.
- Para ensayos destructivos de composición química, metalografía y dureza, se siguieron las siguientes normas: ASTM E415, ASTM E311 y ASTM E18, respectivamente.
- La temperatura considerada para ensayos destructivos de tracción e impacto es temperatura ambiente.
- La caña de azúcar a cortar a través de las cuchillas ubicadas en la cortadora base será a temperatura ambiente con una densidad promedio de 0,12g/cc a una velocidad (cortador base) de 1200 RPM.
- Otro factor influyente al momento del corte de la caña de azúcar es el tipo de terreno y el tipo de surco.

## **2.3. Descripción de las alternativas de solución**

La selección de la mejor solución será según el desempeño, rendimiento, duración de las cuchillas al momento de cortar la caña de azúcar bajo los parámetros antes mencionados; el Ingenio San Carlos maneja cuchillas de 4 proveedores diferentes:

- Muestra 1 (Australiana)
- Muestra 2 (Colombiana)
- Muestra 3 (Ecuatoriana)
- Muestra 4 (Taiwanesa)

Mediante un análisis de los materiales sin uso de las muestras falladas y simulación de la cuchilla se determinará la solución con dos etapas:

1. Caracterización del material.
2. Caracterización del diseño.



### 2.3.1. Estudio estadístico

Se realizó un estudio estadístico de diez cuchillas por proveedor en el Ingenio San Carlos S.A para poder establecer los parámetros de operación. El montaje de todas las cuchillas sometidas al muestreo se lo realizo en el campo ubicado en las afueras del cantón Marcelino Maridueña bajo todas las condiciones indicadas en la tabla 2.1:

**Tabla 2. 1. Condiciones de trabajo**

Tipo de terreno	Lodoso, arcilloso
Temperatura	31°C
Cosechadora	John Deere 3520 - número 24
Cortador base	5 cuchillas
Ubicación	Cantera 34 de la 9, lote 02
Tipo de surco	Doble surco
Turno de trabajo	12 horas

Fuente: Elaboración propia.

Después de 2 días de trabajo se procedió a regresar al campo y desmontar las cuchillas donde se obtuvieron las velocidades de rotación y ángulos de inclinación para el modelado del diseño y el muestreo para los ensayos no destructivos.

### 2.3.2. Caracterización del Material

Las cuchillas fueron sometidas a diferentes tipos de ensayos con el fin de llevar a cabo su caracterización, es decir, el o los materiales con lo que está compuesto, el método de fabricación, y si ha sido sometido a algún tipo de tratamiento térmico. Las cuchillas se encuentran ubicadas en el cortador base de la cosechadora John Deere 3520, las cuales están sometidos a esfuerzos de desgaste e impacto al momento de cortar la caña de azúcar, con lo que frecuentemente las cuchillas se doblan e inclusive se fracturan; lo que puede deberse a un mal diseño de las cuchillas o ineficiencias al momento de su fabricación. Por lo que han sido sometidos a diferentes tipos de ensayos.

A continuación, la tabla 2.1 presenta las ventajas y desventajas de cada una de las alternativas para cortar metales.

**Tabla 2. 2. Ventajas y desventajas de las alternativas para**

**Cortar metales.**

<b>Tipo de corte</b>	<b>Ventaja</b>	<b>Desventaja</b>
Oxicorte	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Costo accesible</li> <li>• Tiempo menor</li> <li>• Mayor número de talleres que realicen la operación</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Acabado deficiente</li> <li>• Variación de temperatura</li> <li>• Baja calidad de corte</li> </ul>
Maquinado	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mayor número de talleres que realicen la operación.</li> <li>• Acabado bueno</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Variación de temperatura</li> <li>• Costo elevado</li> <li>• Tiempo mayor</li> </ul>
Corte en agua	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Acabado bueno</li> <li>• Calidad elevada de corte</li> <li>• Conservación temperatura</li> <li>• Tiempo menor</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Poca disponibilidad en talleres</li> <li>• Costo elevado</li> </ul>

Fuente: Elaboración propia.

Para el análisis de las alternativas para cortar metales se tomaron en cuenta 4 criterios:

- Costo (20%).- Significa el valor a pagar por el corte de la muestra del metal.
- Tiempo (15%).- Se evalúa el tiempo que tarda en cortarse la muestra del metal.
- Calidad de corte (25%). Se analiza la calidad del corte en el metal.
- Efecto térmico en el corte (40%). Se evalúa si el efecto térmico es nulo, es decir es constante la temperatura durante del corte.

A continuación, se presenta una tabla 2.2 en donde se plantea un criterio de ponderación cuantitativa en un rango de 1 a 5.

**Tabla 2. 3. Ponderación de la matriz de decisión.**

Condición	Calificación
Malo	1
Regular	2
Bueno	3
Muy Bueno	4
Excelente	5

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, se muestra en la tabla 2.3. La matriz de decisión de la mejor forma de cortar la muestra del metal. En la primera columna se encuentran las opciones de corte de la muestra, análogamente en la primera fila se encuentran los criterios de selección con su ponderación. El puntaje total se obtiene del producto entre la ponderación del criterio y la ponderación individual para la matriz de decisión, siendo 1 (malo) la ponderación más baja y 5 (excelente) la mejor.

**Tabla 2. 4. Matriz de decisión para cortar metales.**

Alternativa	Costo	Tiempo	Calidad de corte	Efecto térmico en el corte	Total
Criterio	0.20	0.15	0.25	0.40	
Oxicorte	4	3	2	1	2,15
Maquinado	2	3	4	1	2,25
Corte en agua	3	5	5	5	4,6

Fuente: Elaboración propia.

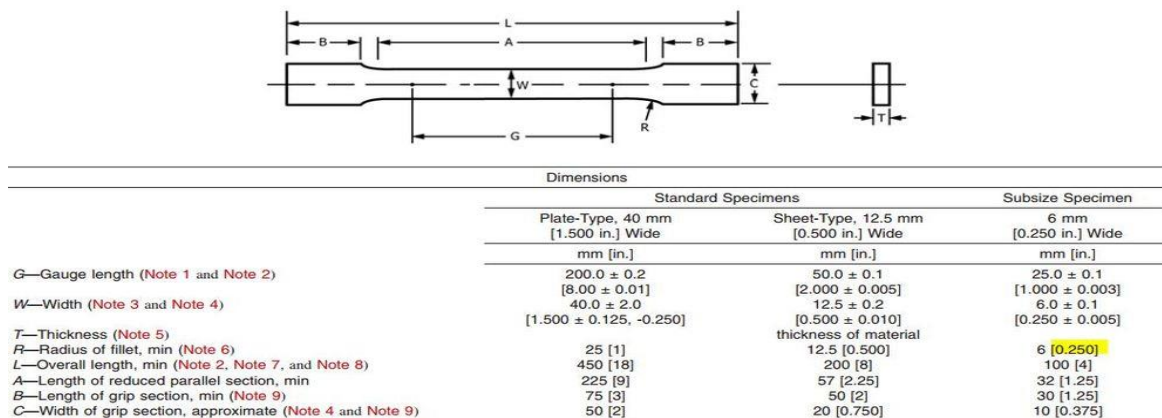
## Ensayo de Tracción

El objetivo de este ensayo es analizar el comportamiento de materiales metálicos al ser sometidos a un esfuerzo de tensión uniaxial, es decir, calcular la resistencia a la tracción del material ensayado. El ensayo de tracción constituye uno de los métodos fundamentales para la determinación de datos, tales como:

la especificación del material, investigación, desarrollo y diseño de componentes estructurales (Stephen W. Tsai, 1988). Esta información puede ser utilizada para establecer la idoneidad de la aleación para una particular aplicación, y / o proporcionar una base para comparación con otros materiales candidatos.

Dichos ensayos se realizan en una máquina Universal, cuya operación consiste en someter una probeta (Figura 2.2) a una carga en una sola dirección de manera creciente hasta la falla.

La resistencia de un material a menudo es la principal preocupación. La fuerza de interés se puede medir en términos de la tensión necesaria para causar la deformación plástica apreciable o la tensión máxima que el material puede soportar. Las pautas de diseño generalmente requieren que las propiedades de tracción de los metales y las aleaciones cumplan con criterios específicos y bien definidos. ASME ha establecido requisitos de código para las resistencias y ductilidades de muchos tipos de metales y aleaciones. Los procedimientos paso a paso para llevar a cabo la prueba de tracción se definen en varias normas ASTM (para nuestro caso, ASTM E 8, "Métodos de prueba estándar para pruebas de tensión de materiales metálicos").



**Figura 2. 2. Dimensionamiento de probeta a ensayar**

Fuente: ASTM, 2016.

Es necesario comprender las influencias de los elementos químicos para una interpretación y uso precisos de la mayoría de los datos de tensión. Los módulos elásticos de hierro fundido, acero al carbono y muchos otros materiales de ingeniería dependen de la velocidad a la que se estira la muestra de ensayo

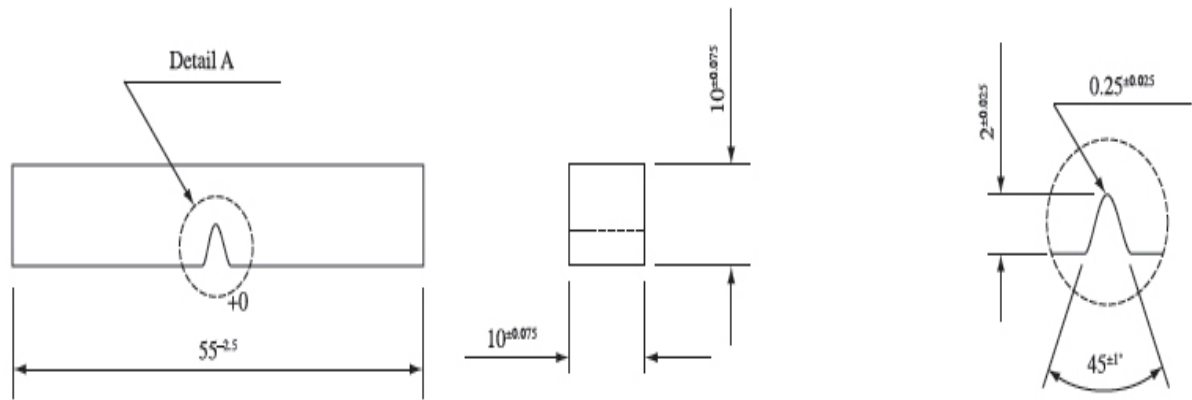
(velocidad de deformación). El límite elástico o la tensión a la que se aplica una cantidad específica de deformación plástica también dependen de la tasa de deformación de prueba. La composición de la aleación, tamaño del grano, deformación previa, temperatura de prueba y el tratamiento térmico también pueden influir en el límite elástico medido.

### **Ensayo Charpy o de Impacto**

El objetivo de este ensayo es evaluar la resistencia a la fractura del material antes fuerzas de impactos, a través de la medición de la energía potencial que absorben los materiales metálicos al ser sometido a una fuerza de choque. El ensayo de Impacto Charpy fue inventada en 1900 por *Georges Augustin Albert Charpy* (1865-1945), de ahí el nombre, que consiste en una pequeña muestra del material a ensayar, en forma de una barra de sección cuadrada, con una muesca en forma de V en la zona central; la cual se golpea a través de un péndulo oscilante, obteniendo la energía absorbida. El ensayo de impacto Charpy es utilizado como un método económico de control de calidad para determinar la sensibilidad a la muesca y la resistencia al impacto de los materiales de ingeniería.

Los factores importantes que afectan la tenacidad de un material incluyen: bajas temperaturas, altas tasas de deformación (por impacto o presurización) y concentradores de tensión como muescas, grietas y espacios vacíos. Este método de ensayo de prueba de impacto se refiere específicamente al comportamiento de metal cuando se somete a una sola aplicación de una fuerza que resulta en tensiones multiaxiales asociado con una muesca, junto con las altas tasas de carga y en algunos casos con temperaturas altas o bajas.

Los procedimientos paso a paso para llevar a cabo la prueba de impacto charpy se definen en varias normas ASTM (para nuestro caso, ASTM E 23, "Pruebas de impacto charpy de muestras pequeñas" - Figura 2.3).



**Figura 2. 3. Dimensionamiento de probeta Charpy tipo A de acuerdo con  
ASTM E23.**

Fuente: ASTM, 2016

### Ensayo de Dureza

El propósito principal del ensayo dureza es determinar la idoneidad de un material para una aplicación determinada, es decir, la resistencia del material a la deformación plástica localizada. En esta sección, se describirá el procedimiento para el ensayo de dureza.

La dureza se define como la resistencia de un material a la deformación permanente como indentación, desgaste, abrasión, rasguño. La práctica actual divide las pruebas de dureza en dos categorías: macro y micro dureza. La macro dureza se refiere a las pruebas con cargas aplicadas en el penetrador de más superior a 1 kg y cubre, por ejemplo, la prueba de herramientas, matrices y material de lámina en el medidor. En las pruebas de micro dureza, las cargas aplicadas son de 1 kg o menos y el material que se prueba es muy delgado (hasta 0.0125 mm, o 0.0005 in). (ASTM, 2002)

Para nuestro caso se efectuó un ensayo macro de dureza Rockwell C con un penetrador de cono de diamante de  $120^\circ$  con una carga preliminar menor de 10 Kgf, en seguida se le aplica una carga mayor de 150 Kgf, registrando este valor de dureza. Este procedimiento se efectúa 7 veces para cada una de las cuchillas, de manera que obtengamos una media de los valores de dureza obtenido, según lo señalado en la norma ASTM E18, "Métodos de pruebas estándar y definiciones para pruebas mecánicas de productos de acero".

## Análisis Químico

El análisis de composición o concentración química de un material por el método de espectrometría de vacío. La prueba inicia con una descarga luminosa ultravioleta sobre la superficie de la probeta, donde el espectrómetro transforma este ímpetu de luz en señales eléctricas medibles, registrando las energías residuales de los componentes presentes. El procedimiento paso a paso para llevar a cabo la prueba de composición química se define en varias normas ASTM (para nuestro caso, ASTM E 415, "Método de prueba estándar para el análisis de Carbono y Acero de Baja Aleación por Espectrometría de Emisión Atómica de Chispa"). Este método de prueba abarca la determinación simultánea de 21 aleaciones y elementos residuales en carbono y aceros de baja aleación por espectrometría de vacío de emisión atómica de chispa en los intervalos de fracción de masa como se indica en la tabla 2.1.

**Tabla 2. 5. Rango de composición química para los diferentes tipos de elementos en un material.**

Elemento	Rango de composición,%	
	Rango aplicable, fracción de masa% <sup>A</sup>	Rango cuantitativo, Fracción de masa% <sup>B</sup>
Aluminio	0 a 0.093	0.006 a 0.093
Antimonio	0 a 0.027	0.006 a 0.027
Arsénico	0 a 0.1	0.003 a 0.1
Boro	0 a 0.007	0.0004 a 0.007
Calcio	0 a 0.003	0.002 a 0.003
Carbón	0 a 1.1	0.02 a 1.1
Cromo	0 a 8.2	0.007 a 8.14
Cobalto	0 a 0,20	0.006 a 0.20
Cobre	0 a 0.5	0.006 a 0.5
Manganeso	0 a 2.0	0.03 a 2.0
Molibdeno	0 a 1.3	0.007 a 1.3
Níquel	0 a 5.0	0.006 a 5.0
Niobio	0 a 0.12	0.003 a 0.12

### Continuación de tabla 2.5.

Nitrógeno	0 a 0.015	0.01 a 0.055
Fosforoso	0 a 0.085	0.006 a 0.085
Silicio	0 a 1.54	0.02 a 1.54
Azufre	0 a 0.055	0.001 a 0.055
Estaño	0 a 0.061	0.005 a 0.061
Titanio	0 a 0.2	0.001 a 0.2
Vanadio	0 a 0.3	0.003 a 0.3
Circonio	0 a 0.05	0.01 a 0.05

Fuente: ASTM, 2016

### Ensayo de Partículas Magnéticas Fluorescente en Suspensión

La prueba de partículas magnéticas es un método de ensayo no destructivo que consiste en detectar discontinuidades ubicadas en la superficie de componentes o estructuras ferromagnéticas. Este ensayo se rige por las leyes del magnetismo, por lo tanto, está restringido a materiales que puedan soportar líneas de flujo magnético. Un yugo crea un campo electromagnético en la pieza a ensayar, mientras se esparce partículas magnéticas fluorescente sobre la superficie de la muestra, lo que provoca la acumulación de partículas en discontinuidades como una grieta; la cual puede ser detectada bajo inspección visual mediante la exposición de luz ultravioleta. (ASM-International, 2002)

La partícula magnética utilizada para detectar las grietas es el óxido de hierro. El rango de partículas del sistema húmedo es de menos de 0,5 micrómetros a 10 micrómetros para uso con portadores de agua o aceite. Las partículas utilizadas en los sistemas húmedos tienen pigmentos aplicados que emiten fluorescencia a 365 nm (ultravioleta A) que requieren  $1000 \mu\text{W} / \text{cm}^2$  ( $10 \text{ W/m}^2$ ) en la superficie de la pieza para una inspección adecuada. (ISO, 2015)

En la figura 2.4 se verifica la inspección de la cuchilla desgastada, se confirmará si con el ensayo de partículas magnéticas resulta importante algún desperfecto



o discontinuidad que no se haya podido obtener mediante la inspección visual, para determinar si mediante alguna fisura se producirá la rotura del mismo.



**Figura 2. 4. Ensayo de Partículas Magnéticas realizada a cuchillas.**

Fuente: Elaboración propia.

### **Ensayo de Medición Ultrasónica de Espesores**

La medición ultrasónica de espesores (UTM - Ultrasonic Thickness Measurements) es un método de prueba no destructivo que se emplea para inspeccionar el grosor del metal de las cuchillas. La medición del grosor es esencial para controlar la corrosión, la erosión y el daño. La detección de la pérdida de material es vital para garantizar la seguridad continua y el funcionamiento de la pieza inspeccionada. También puede ayudar a determinar si es necesario un trabajo de reparación o reemplazo, o si el elemento debe retirarse.

Un medidor de espesor ultrasónico funciona al medir con precisión el tiempo que tarda un pulso de sonido originado por una pequeña sonda llamada transductor ultrasónico para viajar a través de una pieza de prueba y reflejar desde la superficie interior o la pared lejana. A partir de esta medición, el grosor de la pieza de prueba se calcula y se muestra en una pantalla digital como se observa en la figura 2.5. Se realizó algunas mediciones a lo largo de los bordes de las cuchillas para verificar su desgaste, es decir, reducción de su espesor. (ASTM, 2015)



**Figura 2. 5. Medición de espesores realizada a cuchillas.**

Fuente: Elaboración propia.

## **Metalografía**

El ensayo metalográfico se analiza la microestructura del material de las cuchillas para comprobar si corresponde a los aceros usados en este tipo de prestación, además de ello se identificará particularidades micro estructurales como porcentaje de fase, homogeneidad, contenido de carbono, presencia de materiales aleantes, etc.

Los procedimientos paso a paso para llevar a cabo la prueba metalográfica se definen en varias normas ASTM (para nuestro caso, ASTM E3 - 11, "Guía Estándar para la preparación de especímenes metalográficos"). Se procedió a preparar las muestras cortando las medidas de 30x30x6 mm de las cuchillas de cada uno de los proveedores, para después realizar un pulido grueso con lijas de distintos tamaños de granos (150, 220, 320, 500, 600, 1000); luego se realizó un pulido fino con pasta de alúmina. Finalmente, las muestras fueron atacadas químicamente en una solución de Nital al 3% durante 10 segundos, para rápidamente enjuagar con etanol ( $\text{HNO}_3$ ). Mediante este análisis se caracterizan las fases presentes (ASM International, 2002) en las distintas muestras y comparar sus características micro estructurales.

Para determinar el porcentaje de los constituyentes en un acero al bajo o medio contenido de carbono, se utilizan métodos de análisis cuantitativo que permite determinar la fracción volumétrica promedio de fases, siguiendo metodologías estandarizadas. Esta metodología incluyen el análisis lineal, que consiste en dividir la longitud de los segmentos de líneas colocadas al azar que cortan las fases de interés ( $L_{\alpha}$ ) por la longitud total de línea ( $L_T$ ) para obtener la fracción lineal. Es decir, la fracción de la longitud de las líneas trazadas al azar que ocupan las fases, representada matemáticamente por la ecuación 1.

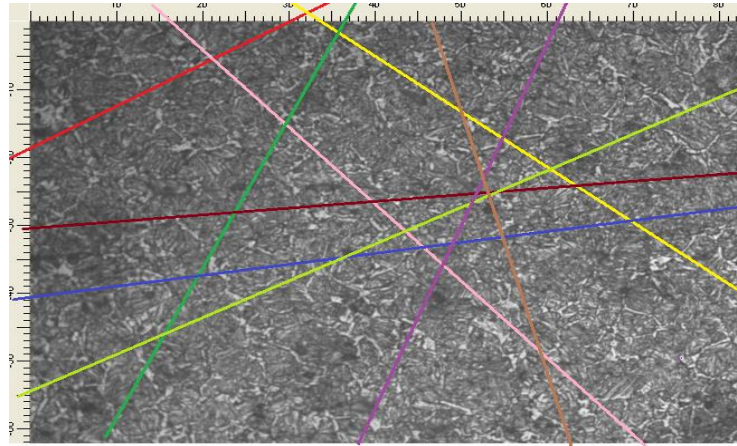
$$L_L = \frac{\sum L_{\alpha}}{L_T} = V_v \quad \text{ecuación 1}$$

A continuación, se muestra el ejemplo para una de las microestructuras de la muestra 1.

**Tabla 2. 6. Tabla de Longitud total y fraccionada.**

Color de línea	Longitud total [mm]	Fracción de la línea ocupada por las fases (mm)
Rojo	77	0.18
Amarilla	145	0.23
Azul	180	0.178
Celeste	154	0.25
Vino	170	0.17
Rosado	159	0.17
Verde	163	0.18
Verde limón	186	0.17
Lila	128	0.16
Café	135	0.32
Total volumen de fracción		0.201

Fuente: Elaboración propia.



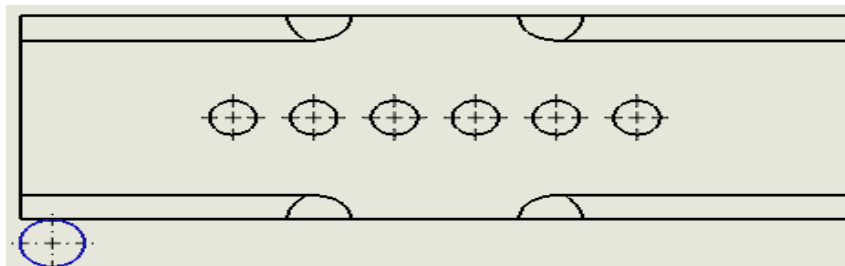
**Figura 2. 6. Microestructura de la muestra 1 con las líneas trazadas**

Fuente: Elaboración propia.

### 2.3.3. Caracterización del Diseño

Para la caracterización de diseño se analizarán varios casos considerados normales y críticos con sus respectivos análisis para cada uno de ellos

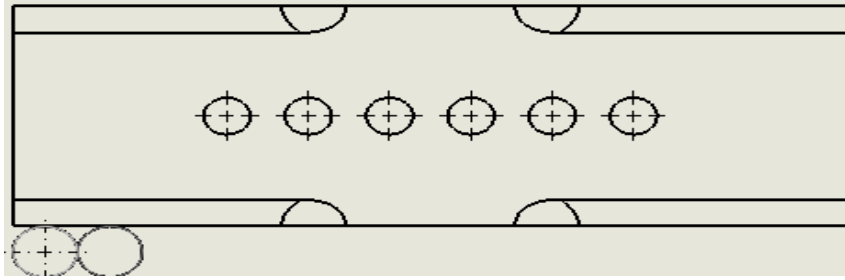
**Se considera el primer caso:** Este es el caso inicial e ideal en cual la cuchilla está sometida a una fuerza de corte ejercida por una sola caña y la fuerza inercial de la cortadora base. A continuación, en la Figura 2.7 se muestra un esquema del caso.



**Figura 2. 7. Plano de la cuchilla impactada por una caña de azúcar**

Fuente: Elaboración propia.

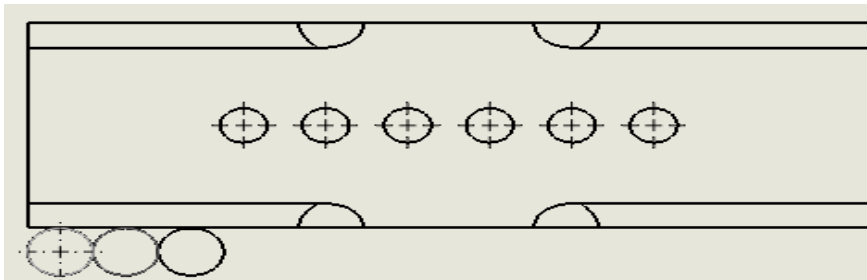
**En el segundo caso:** Se considera una cuchilla sometida a la fuerza cortante de dos cañas y una fuerza inercial de la cortadora base. A continuación, en la Figura 2.8 se modela un esquema del caso.



**Figura 2. 8. Plano de la cuchilla impactada por una caña de azúcar**

Fuente: Elaboración propia.

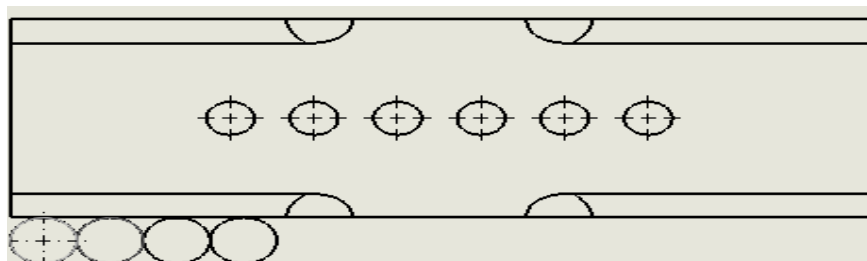
**En el tercer caso:** Se considera a una cuchilla sometida al impacto de tres cañas a lo largo de la sección de filo además de la fuerza inercial de la cortadora base. Continuación en la Figura 2.9 se muestra un esquema del caso



**Figura 2. 9. Plano de la cuchilla impactada por tres cañas de azúcar.**

Fuente: Elaboración propia.

**En el cuarto caso:** Este es el caso más crítico con respecto a la cuchilla sometida a cuatro cañas de azúcar con su respectiva fuerza cortante y su fuerza inercial de la cortadora base. Continuación en la Figura 2.10 se modela un esquema del caso.

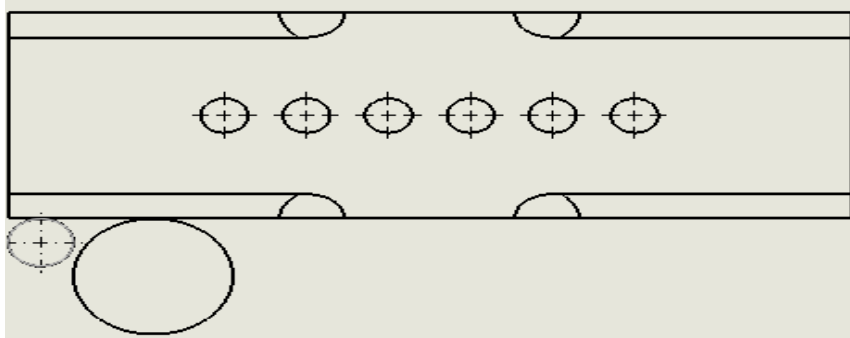


**Figura 2. 10. Plano de la cuchilla impactada por cuatro cañas de azúcar.**

Fuente: Elaboración propia.

**En el quinto caso:** Es un caso en el cual la cuchilla soporta fuerza cortante por una caña y otro producto de la piedra (el tipo de piedra escogida es una con

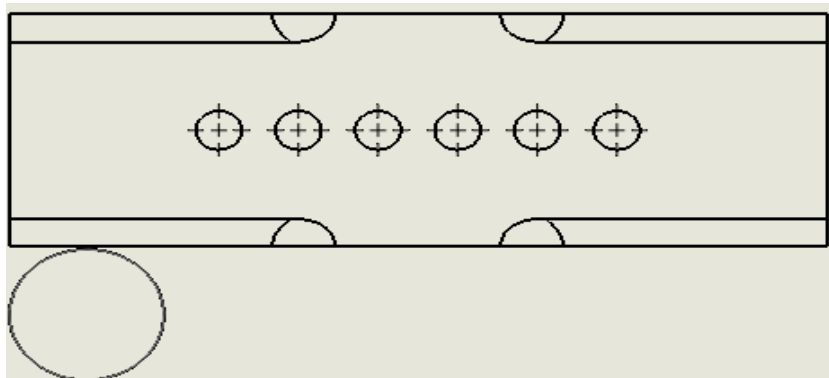
condiciones de terreno similares) además de la fuerza inercial de la cortadora base. A continuación, en la Figura 2.11 se muestra un esquema del caso.



**Figura 2. 11. Plano de la cuchilla impactada por una caña de azúcar y una piedra**

Fuente: Elaboración propia.

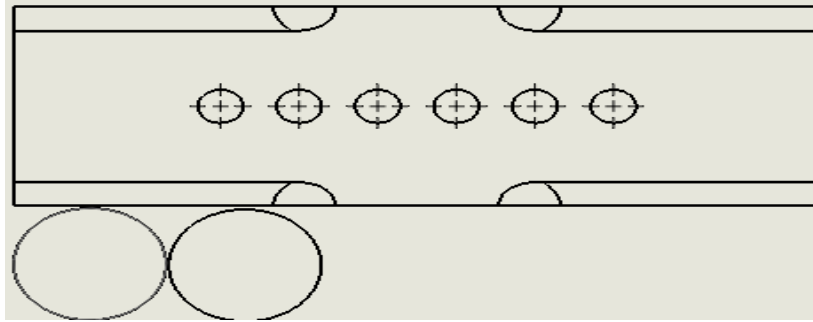
**En el sexto caso:** Es un caso en el cual la cuchilla soporta fuerza cortante producida por la piedra (el tipo de piedra escogida es una con condiciones de terreno similares) además de la fuerza inercial de la cortadora base. A continuación, en la Figura 2.12 se modela un esquema del caso.



**Figura 2. 12. Plano de la cuchilla impactada por una piedra**

Fuente: Elaboración propia.

**En el séptimo caso:** Es un caso crítico en el cual la cuchilla soporta dos fuerzas cortantes producida por la piedra (el tipo de piedra escogida es una con condiciones de terreno similares) además de la fuerza inercial de la cortadora base. A continuación, en la Figura 2.13 se modela un esquema del caso.



**Figura 2. 13. Plano de la cuchilla impactada por dos piedras**

Fuente: Elaboración propia.

Para los casos identificados anteriormente es importante considerar cada una de las geometrías en los diferentes tipos de muestra enfocada en el número de filos: 2 y 4 filos por cuchilla, los mismos que serán sometidos a un modelado virtual bajo parámetros específicos, dados al momento del corte de caña de azúcar; por lo que se requiere propiedades mecánicas y dimensionamiento de la caña de azúcar y de la cuchilla a modelar. Con el objetivo de asegurar la calidad de corte y la fiabilidad del equipo, las cuchillas se analizaron tomando en cuenta el esfuerzo cortante de la caña de azúcar que equivale a 4.76 MPa (Taghijarah, 2011); el mismo que se utilizó para determinar la fuerza de corte con el que se debería cortar la caña, con una sección transversal circular de 20.74 mm de diámetro. El producto de la resistencia al corte con la superficie transversal de la caña se muestra en la ecuación 2.

$$F_C = \tau * A \quad \text{ecuación 2}$$

$$F_C = 4.76 * 10^6 * 345.14 * 10^{-4}$$

$$F_C = 1554.05 \text{ N}$$

La fuerza de corte de la caña de azúcar debe ser multiplicada por un factor de impacto, reemplazando los valores de la ecuación 3.

$$n = 1 + \sqrt{1 + \frac{2hn}{\delta_{estatica}}} \quad \text{ecuación 3}$$

Para nuestro caso como  $h = 0$ ,  $n$  debe ser igual a 2, por lo que ahora nuestra fuerza de corte ( $F_C$ ) es 3108.1 N

A partir de la fuerza de corte es posible determinar la energía de corte que debe ceder el sistema para trozar una caña de azúcar al momento del choque con una

cuchilla. Siendo dicha energía el producto entre la fuerza de corte con el radio de la caña, dada por la ecuación 4.

$$E_C = F_C * \frac{d}{2} \quad \text{ecuación 4}$$

$$E_C = 3108.1 * \frac{20.74 * 10^{-3}}{2}$$

$$E_C = 16.12 J$$

La caña de azúcar no solo está sometida a la fuerza de corte de la cuchilla, sino que también a fuerzas inerciales debido al efecto de la velocidad de rotación del disco cortador base; por ende se realizó un análisis inercial en el que se generan solo esfuerzos radiales, el esfuerzo radial fue calculado según la geometría del disco, en nuestro caso disco hueco (Elsevier, 1997). Se determinó los esfuerzos radiales mediante la ecuación 5

$$\sigma_R = (3 + \nu) * \frac{\rho * \omega_m^2}{8} * (R_1^2 + R_2^2 - \frac{R_1^2 * R_2^2}{r^2} - r^2) \quad \text{ecuación 5}$$

Donde,

- $\rho$  Densidad del acero (7850 kg/m<sup>3</sup>)
- $\nu$  Módulo de Poisson del acero (0.28)
- $R_1$  Radio menor del disco hueco de acero (8")
- $R_2$  Radio mayor del disco hueco de acero (24")

En el que el esfuerzo radial se hace máximo cuando (ecuación 6),

$$r = \sqrt{R_1 * R_2} \quad \text{ecuación 6}$$

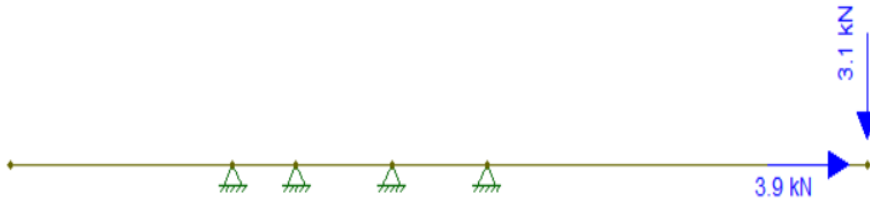
Reemplazando los valores correspondientes en las ecuaciones 5 y 6 obtenemos,  
 $\sigma_R = 8.33 MPa$

Debido a que el disco cortador base está girando a velocidad angular constante, la componente tangencial no será tomada en cuenta para el análisis estático, dinámico.

Las cuchillas deben ser analizadas en base a parámetros antes mencionados, como lo es, la fuerza inercial radial y la fuerza necesaria para realizar el corte de la caña sin ningún problema. Para ello, primeramente, se realizó un análisis estático con el objetivo de evaluar puntos críticos, y bajo este criterio las cuchillas son analizadas por fatiga debido a cargas cíclicas toleradas por el corte de las

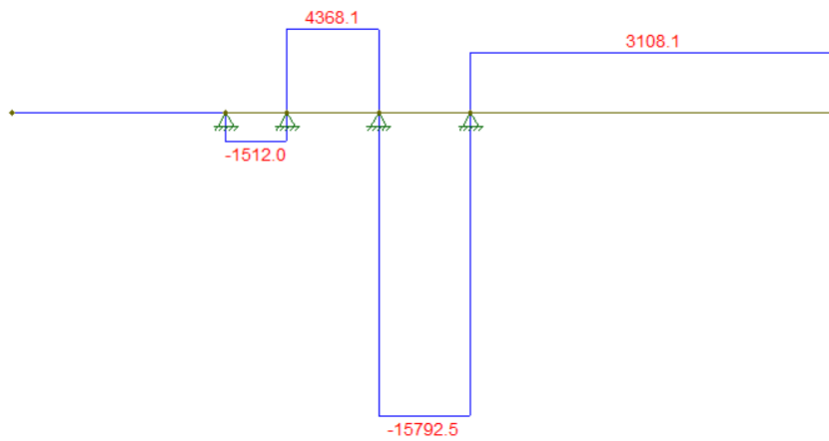


cañas de azúcar. Las cuchillas fueron producidas en diferentes aceros cuyas características mecánicas se presentan en la tabla 3.3.



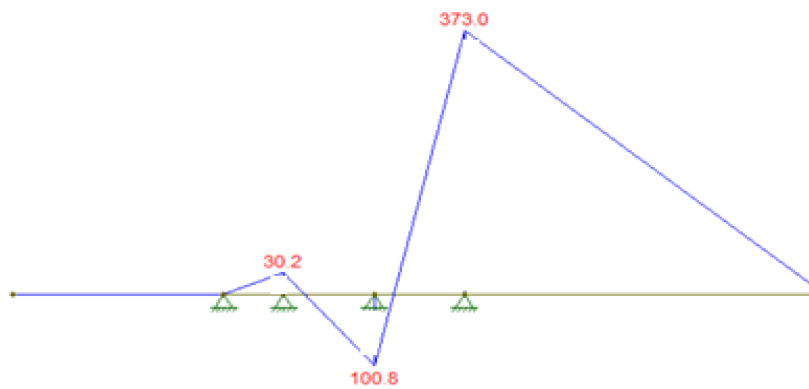
**Figura 2. 14. Diagrama de Cuerpo Libre de la cuchilla sometida a la fuerza de la caña.**

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 2. 15. Diagrama de la Fuerza cortante**

Fuente: Elaboración propia.

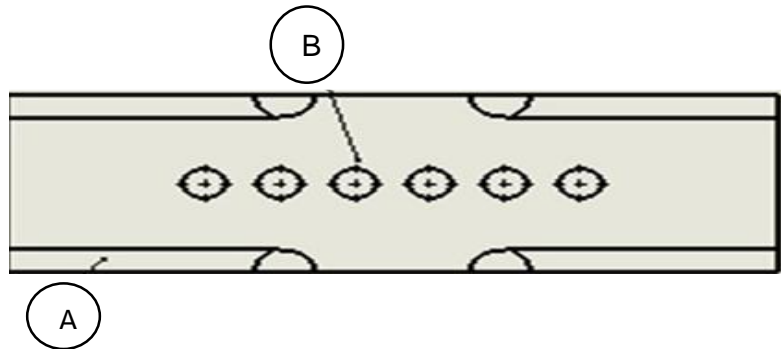


**Figura 2. 16. Diagrama del Momento Flector.**

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la figura 2.16 el punto crítico se produce en el apoyo más cercano a las fuerzas con un valor de 373 [Nm]; además de ello en dicho punto existe concentrador de esfuerzos debido al orificio de sujeción en la cuchilla. Para el análisis tanto estático como fatiga se analizaron dos puntos:

- Sección A: filo en el extremo de la cuchilla (punto no crítico).
- Sección B: sujeción de la cuchilla (punto crítico).



**Figura 2. 17. Esquema de la cuchilla de las secciones (A y B) a analizar.**

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, bajo diseño estático se analizaron los puntos mencionados. Analizando en un extremo de la cuchilla (sección A) bajo diseño estático tenemos: esfuerzo cortante y esfuerzo axial respectivamente.

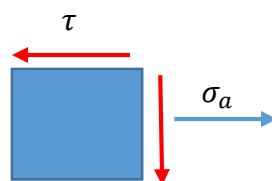
$$\tau = \frac{F_i}{A} = \frac{3108.1N}{0.000474m^2} = 6.55 \text{ Mpa} \quad \text{ecuación 7}$$

$$\sigma_a = \frac{F_r}{A} = \frac{3934.2N}{0.000474m^2} = 8.30 \text{ Mpa} \quad \text{ecuación 8}$$

Donde,

Fi = Fuerza de impacto al momento del corte de la caña de azúcar.

Fr = Fuerza radial debido a la inercia.



**Figura 2. 18. Elemento diferencial de la sección A.**

Fuente: Elaboración propia.

Tomando un elemento diferencial en la sección mencionada, donde ambos esfuerzos se combinan como se ilustra en la figura 2.18. se determinó el esfuerzo efectivo Von Misses a partir de los esfuerzos combinados expresado en la ecuación 9.

$$\sigma' = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x * \sigma_y + 3 * \tau_{xy}^2} \quad \text{ecuación 9}$$

$$\sigma' = \sqrt{8.3^2 + 0^2 - 8.3 * 0 + 3 * 6.55^2} = 14.06 \text{ Mpa}$$

El factor de seguridad a la fluencia está dado por la ecuación 10

$$n = \frac{S_y}{\sigma'} \quad \text{ecuación 10}$$

Donde,

$S_y$  = Esfuerzo de fluencia de la cuchilla.

Se obtuvo un factor de seguridad igual a 45.90 que es un indicador relevante para un diseño conservador.

Analizando su geometría existe un cambio debido al orificio (concentrador de esfuerzo); por lo que se procedió a calcular su inercia mediante el método de steiner que se presenta en la ecuación 11. El motivo del cálculo de su inercia es debido a que en esta sección no solo se presentan esfuerzo cortante y axial, sino además de ello esfuerzos de flexión y torsión, los mismos que requieren de su inercia y de su momento de inercia.

$$I = I_0 + A * d^2 \quad \text{ecuación 11}$$

Por consiguiente, a esto se calculó su centro de gravedad dada por las ecuaciones 12 y 13, las cuales nos sirven para el cálculo de la inercia.

$$X_{cg} = \frac{\sum(A_i * X_i)}{\sum A_i} \quad \text{ecuación 12}$$

$$Y_{cg} = \frac{\sum(A_i * Y_i)}{\sum A_i} \quad \text{ecuación 13}$$

Teniendo como resultado:

$$I_x = 1193.76 \text{ mm}^4$$

$$I_y = 249612 \text{ mm}^4$$

Analizando la sección del agujero en la cuchilla bajo diseño estático tenemos:

$$\tau_c = \frac{F_i}{A} = \frac{3108.1N}{0.000474m^2} = 6.55 \text{ Mpa}$$

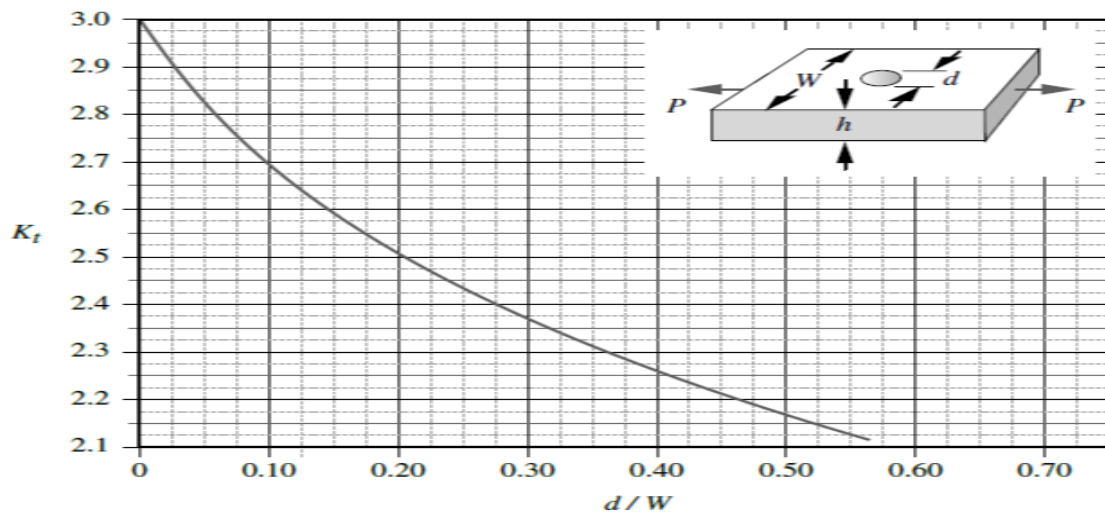
$$\sigma_a = \frac{F_r}{A} = \frac{3934.2N}{0.000474m^2} = 8.30 \text{ Mpa}$$

$$\sigma_f = \frac{M * c}{I_y} = \frac{3108.1 * 120.5x10^{-3} * 3x10^{-3}}{2.49x10^{-7}} = 4.52 \text{ Mpa} \quad \text{ecuación 14}$$

$$\tau_t = \frac{T * r}{J} = \frac{3108.1 * 3x10^{-3} * 3x10^{-3}}{5x10^{-7}} = 0.05 \text{ Mpa} \quad \text{ecuación 15}$$

Debido al cambio de geometría se presentan concentradores de esfuerzo por lo que es necesaria la multiplicación de los esfuerzos por su factor de corrección.

- Axial

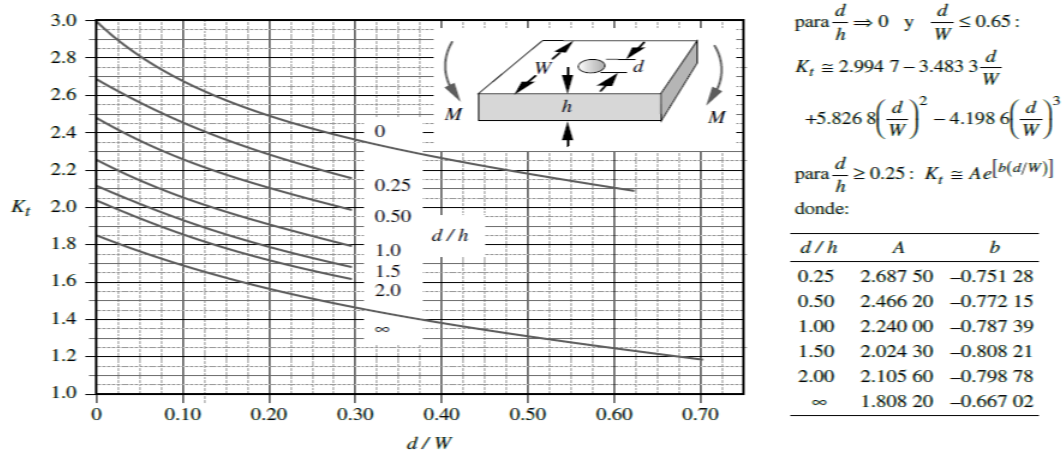


**Figura 2. 19. Factor geométrico de concentración de esfuerzos  $K_t$  para una barra plana con orificio transversal en tensión axial.**

Fuente: Robert L. Norton, 2011.

$$K_t = 2.5$$

- Flexión



**Figura 2. 20. Factor geométrico de concentración de esfuerzos  $K_t$  para una barra plana con orificio transversal en flexión.**

Fuente: Robert L. Norton, 2011.

$$K_t = 1.8$$

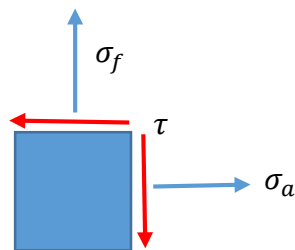
- Torsión, Cortante

$$K_{ts} = 3$$

$$\sigma_a * K_t = 2.5 * 8.30 = 25.6 \text{ Mpa}$$

$$\sigma_f * K_t = 1.8 * 4.52 = 8.14 \text{ Mpa}$$

$$\tau * K_t = 3 * (8.09 + 0.05) = 24.42 \text{ Mpa}$$



**Figura 2. 21. Elemento diferencial en la sección B.**

Fuente: Elaboración Propia.

Consiguiente a esto realizamos esfuerzo von Mises para el cálculo del factor de seguridad.

$$\sigma' = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x * \sigma_y + 3 * \tau_{xy}^2}$$

$$\sigma' = \sqrt{25.6^2 + 8.14^2 - 25.6 * 8.14 + 3 * 24.42^2} = 47.98 \text{ Mpa}$$

$$n = \frac{S_y}{\sigma'}$$

$$n = \frac{645.76 \text{ Mpa}}{47.98 \text{ Mpa}} = 13.40$$

Para establecer la resistencia a la fatiga de la cuchilla se requiere calcular un conjunto de coeficientes de corrección correspondiente a los entornos de fabricación y parámetros de trabajo de la cuchilla en el equipo. La resistencia a la fatiga tomando en consideración dichos factores está dada por la ecuación 16.

$$S_e = C_{SU} * C_{CA} * C_{TA} * C_{TE} * C_R * S_e' \quad \text{ecuación 16}$$

Donde,

$C_{SU}$  = factor de modificación de la condición superficial.

$C_{CA}$  = factor de modificación de la carga.

$C_{TA}$  = factor de modificación de tamaño.

$C_{TE}$  = factor de modificación de temperatura.

$C_R$  = factor de confiabilidad.

$S_e'$  = límite de resistencia a la fatiga en viga rotatoria.

$S_e$  = límite de resistencia a la fatiga corregido.

La resistencia nominal a la fatiga de un material en específico está proporcionada por la ecuación 17, y se evaluó considerando las propiedades mecánicas establecidas por el material de la cuchilla.

$$S_e' = 0.5 * S_{ut} \quad \text{ecuación 17}$$

$$S_e' = 513.96 \text{ Mpa}$$

El factor de modificación de la condición superficial depende del método de fabricación/manufactura de la cuchilla. Si se considera el maquinado en frío como su proceso de origen, entonces la relación de dependencia con la resistencia del material está dada por la ecuación 18 a través de la tabla.2.7.

Maquinado:  $A = 4.51$ ;  $b = -0.265$

$$C_{SU} = A * Sut^b \quad \text{ecuación 18}$$

$$C_{SU} = 4.51 * 1027.92^{-0.265} = 0.72$$

**Tabla 2. 7. Coeficientes del factor de acabado superficial**

**Tabla 4-3 Coeficientes del factor de superficie de la ecuación 4.7e**  
Fuente: Shigley y Mischke, *Mechanical Engineering Design*, 5a. ed., McGraw-Hill, Nueva York, 1989, p. 283, con autorización

Acabado superficial	Para $S_{ut}$ en MPa se usa		Para $S_{ut}$ en kpsi (no psi) se usa	
	A	b	A	b
Esmerilado	1.58	-0.085	1.34	-0.085
Maquinado o rolado en frío	4.51	-0.265	2.7	-0.265
Rolado en caliente	57.7	-0.718	14.4	-0.718
Forjado	272	-0.995	39.9	-0.995

Fuente: Robert L. Norton, 2011.

Para obtener el factor de modificación de la carga se toma en cuenta que la cuchilla está sometida a esfuerzos combinados (esfuerzo axial, flexión y torsión); y considerando el caso más conservador entonces se tiene un valor equivalente a 0.7 como se expresa en la ecuación 19.

$$C_{CA} = 0.7 \quad \text{ecuación 19}$$

El factor de modificación de tamaño depende de la geometría de la cuchilla. Cuando las muestras de prueba de las vigas giratoria y estática son pequeñas (cerca de 0.3 in de diámetro), entonces su factor de tamaño es la unidad. Debido a que la pieza es mayor en dimensión, es necesario aplicar un factor de tamaño de reducción de resistencia, para considerar el hecho de que piezas más grandes fallan con menores esfuerzos; por lo que se usó un factor de 0.6 como se muestra en la ecuación 20. (Norton, 2011)

$$C_{TA} = 0.6 \quad \text{ecuación 20}$$

Para el factor de modificación por temperatura se toma en cuenta que la cuchilla está operando a temperatura ambiente por lo que este factor equivaldrá a la unidad como se muestra en la ecuación 21.

$$C_{TE} = 1 \quad \text{ecuación 21}$$

Para el factor de confiabilidad, si se desea que la cuchilla cumpla o exceda su resistencia en un 99.99% entonces se multiplicara el valor de la resistencia media por 0.702 como se presenta en la tabla.2.8 según su porcentaje de confiabilidad.

**Tabla 2. 8. Tabla de factor de confiabilidad**

% de confiabilidad	C <sub>conf</sub>
50	1.000
90	0.897
95	0.868
99	0.814
99.9	0.753
99.99	0.702
99.999	0.659
99.9999	0.620

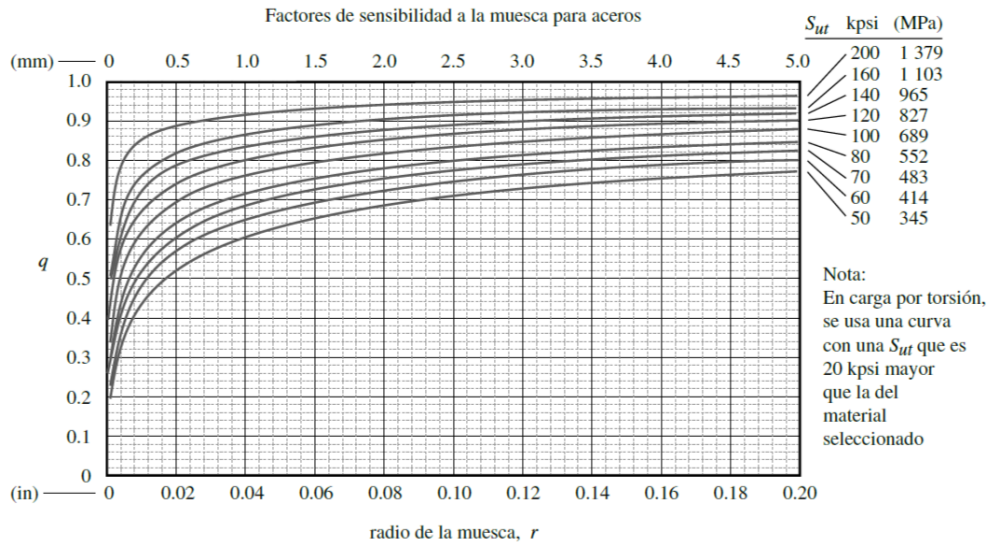
Fuente: Robert L. Norton, 2011.

La resistencia a la fatiga tomando en cuenta los factores de modificación está dada por la ecuación 16.

$$S_e = 0.72 * 0.7 * 0.6 * 1 * 0.99 * 513.96 = 146.17 \text{ Mpa}$$

Para un diseño conservador y para asegurar la confiabilidad de la cuchilla al momento del corte de la caña de azúcar, debido cambios en su geometría o desperfectos superficiales se utiliza el concepto de factor de sensibilidad a la muesca de acuerdo al esfuerzo ultimo del material seleccionado (ver en la tabla 3.3), en el que se escogió factores iguales tanto para tracción como para cortante como protección para las diferentes alteraciones en la cuchilla, como se muestra en las ecuaciones 22 y 23.





**Figura 2. 22. Curva de sensibilidad a la muesca para aceros.**

Fuente: Robert L. Norton, 2011.

$$q = 0.94 \quad \text{ecuación 22}$$

$$q_{cortante} = 0.94 \quad \text{ecuación 23}$$

Los factores de sensibilidad a la muesca son utilizados para el cálculo de los factores de concentración de esfuerzos tanto para tensión/flexión como para cortante bajo la dependencia del  $K_T$  estático como se muestra en las ecuaciones 24, 25 y 26

Flexión

$$K_f = 1 + q * (K_T - 1) = 1.75 \quad \text{ecuación 24}$$

Axial

$$K_f = 1 + q * (K_T - 1) = 2.35 \quad \text{ecuación 25}$$

Cortante

$$K_{fs} = 1 + q_{cortante} * (K_{Ts} - 1) = 2.88 \quad \text{ecuación 26}$$

Evaluando el factor de seguridad a fatiga en el filo del extremo de la cuchilla bajo el criterio de Goodman modificado ( $\sigma_m \neq 0$ ), dando como resultado un valor equivalente a 9 como se aprecia en la ecuación 27.

$$\frac{1}{n} = \frac{\sigma'_a}{Se} + \frac{\sigma'_m}{Sut} \quad \text{ecuación 27}$$

$$\sigma'_a = \sigma'_m$$

$$\frac{1}{n} = \sigma'_a * \left( \frac{1}{Se} + \frac{1}{Sut} \right)$$

$$\frac{1}{n} = 14.06 * \left( \frac{1}{146.17} + \frac{1}{1027.92} \right)$$

$$n = 9.10$$

Se analiza también en el punto de sujeción de la cuchilla, para ello consideramos los factores de concentración de esfuerzos para cada una de las fuerzas a la que está sometida la cuchilla.

$$\sigma_a * K_f = 2.35 * 8.30 = 19.51 \text{ Mpa}$$

$$\sigma_f * K_f = 1.75 * 4.52 = 7.91 \text{ Mpa}$$

$$\tau * K_f = 2.88 * (8.09 + 0.05) = 23.44 \text{ Mpa}$$

Evaluando el factor de seguridad a fatiga en ese punto bajo el criterio de Goodman modificado se tiene:

$$\frac{1}{n} = \frac{\sigma'_a}{Se} + \frac{\sigma'_m}{Sut}$$

$$\sigma'_a = \sigma'_m$$

$$\frac{1}{n} = \sigma'_a * \left( \frac{1}{Se} + \frac{1}{Sut} \right)$$

$$\sigma'_a = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x * \sigma_y + 3 * \tau_{xy}^2}$$

$$\sigma'_a = \sqrt{19.51^2 + 7.91^2 - 19.51 * 7.91 + 3 * 23.44^2} = 44.01 \text{ Mpa}$$

$$\frac{1}{n} = 44.01 * \left( \frac{1}{127.07} + \frac{1}{893.59} \right)$$

$$n = 2.25$$

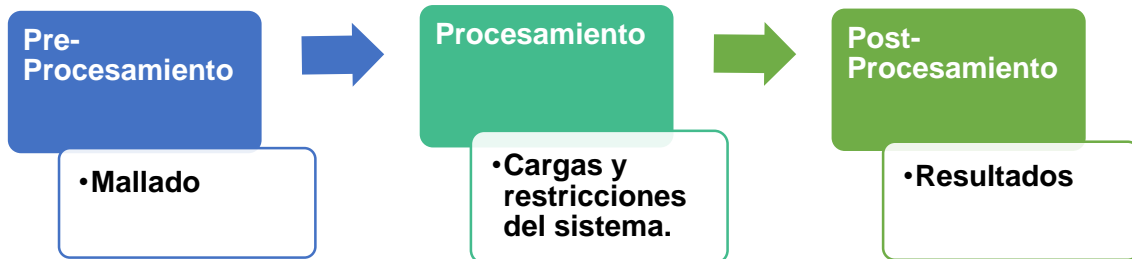
Nota: La cuchilla que se prestó para su análisis estático y de fatiga fue la de origen australiano (muestra 1).

### 2.3.2.1 Modelado y Simulación

La simulación se realizará para cada una de los tipos de cuchillas en el software ANSYS Workbench 17.0 Academic, que tendrá como meta comprobar el comportamiento del mismo bajo esfuerzos de tensión, flexión y torsión; y corroborar los resultados teóricos obtenidos, y sobre todo realizar una

comparación entre las cuchillas. La importancia de la simulación consiste en calcular los esfuerzos en puntos cualesquiera de la cuchilla mediante el método de elementos finitos (FEA, por sus siglas en inglés). El software de análisis estructural de ANSYS permite resolver complejos problemas de ingeniería estructural y tomar mejores decisiones de diseño y más rápidas.

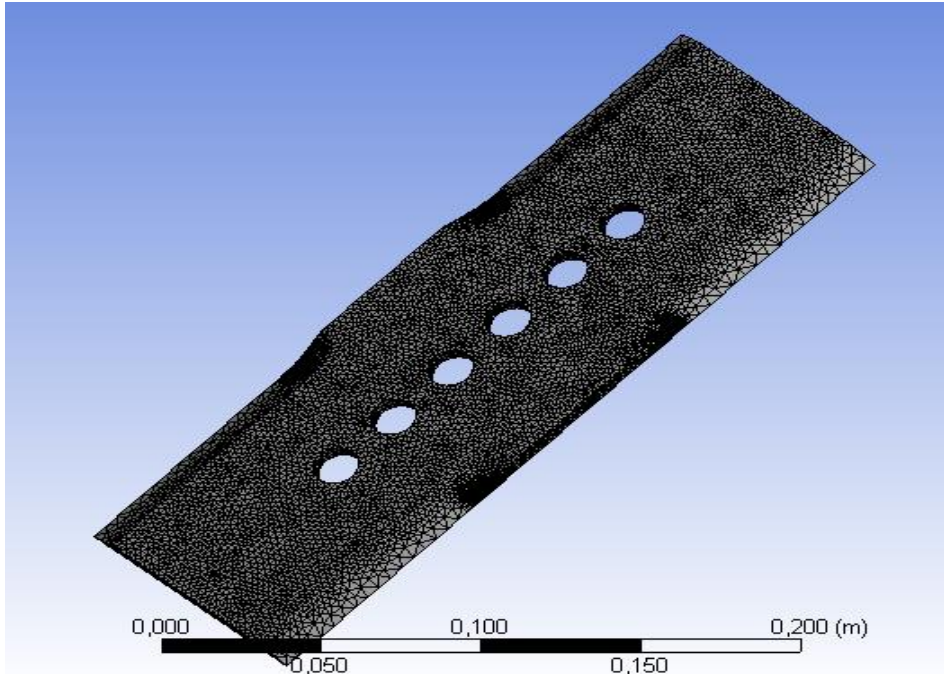
Las etapas del análisis de elementos finitos son:



**Figura 2. 23. Etapas del análisis de elementos finitos.**

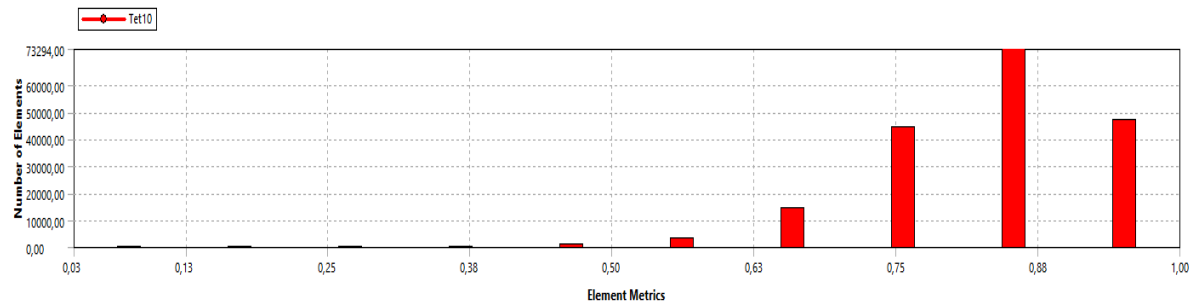
Fuente: Elaboración propia.

- 1ero: Pre-Procesamiento: En donde se establece la geometría del cuerpo (CAD) y se realiza el mallado.



**Figura 2. 24. Diagrama del Mallado de la cuchilla.**

Fuente: Elaboración propia.

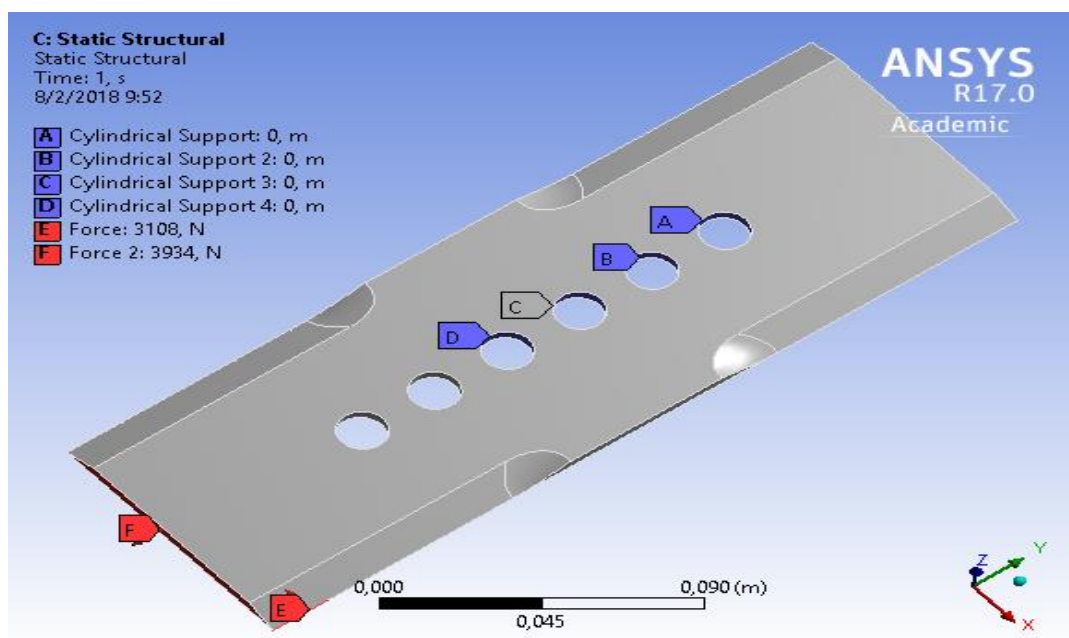


**Figura 2. 25. Calidad de Mallado de la cuchilla.**

Fuente: Elaboración propia.

El mallado se realizó solo con elementos tetraédricos (ver figuras 2.24 y 2.25), con una calidad en el mismo del 87%, aceptable para el análisis propuesto, en el que se aplica una relevancia del 100% y el modelo de proximidad y curvatura generando un mallado fino en todo el cuerpo, en especial en secciones con cambios en su geometría.

- 2do: Procesamiento: Intervienen las ecuaciones lineales y no lineales, van acompañadas con las respectivas condiciones de borde.



**Figura 2. 26. Cargas y restricciones aplicadas al sistema.**

Fuente: Elaboración propia.

Consiguiente al mallado, se establecieron condiciones de frontera, como lo son los puntos de sujeción en el cortador base que se encuentra fija a la

cosechadora, girando a una velocidad angular constante de 1200 RPM en el que se consideró su fuerza inercial radial de 3934 Newton. La carga a la que se encuentra sometida la cuchilla es la fuerza de impacto en la caña de azúcar al momento de su corte (casos del 1 al 4 – sección 2.3.2); un caso crítico para su análisis, se produce cuando la misma cuchilla impacta con piedras debido al terreno que se encuentra al realizar la cosecha (casos del 5 al 7 – sección 2.3.2). Un ejemplo de estas restricciones es el caso 1 como se muestran en la figura 2.26.

- Zero: Post- Procesamiento: Se presentan los resultados en formas:
  - Analíticas
  - Graficas

Todo con el objetivo de calcular fuerzas, esfuerzos, deformaciones, etc. A continuación, se detallará el procedimiento realizado para la simulación de la cuchilla.

Primero se ejecutó Ansys Workbench, luego se procedió a escoger el tipo de análisis en este caso un análisis estructural “Static Structural”. Después se ingresó el material de cada una de las cuchillas en “Engineering Data” con el que se realizó la simulación. Una vez seleccionado el material se procedió a cargar el CAD en “Geometry”. Una vez realizado lo anterior se procedió a abrir “Model” donde generaremos nuestro mallado, colocación de las fuerzas y restricciones, y por último la solución del mismo sea esta deformación, esfuerzo equivalente, factor de seguridad, etc.

# CAPÍTULO 3

## 3. Resultados

En este capítulo, se analizará los resultados obtenidos en cada uno de los ensayos realizados, así también en cada uno de los casos planteados para la caracterización de diseño los resultados obtenidos en el modelado virtual de cada una de las muestras.

### 3.1. Análisis de Falla de Cuchillas

El análisis de falla de las cuchillas para corte de caña de azúcar permite evaluar la posibilidad de mejora en la reducción de costos asociados con materia prima y manufactura; además de ello reducir tiempos de reposición y prolongar la vida útil del material debido a que se conocen las causas de la falla.

#### 3.1.1. Ensayos Destructivos

##### Análisis Químico

La tabla 3.2 resume los resultados de la composición química de las distintas cuchillas en evaluación. Estas piezas están fabricadas con aceros de bajo carbono, muestras 1 y 3, y a aceros de medio carbono, muestras 2 y 4, según lo establecido en la norma ASTM E 415. No obstante, las composiciones químicas se encuentran modificadas con la adición de otros elementos aleantes, tal como se detalla a continuación.

Los resultados obtenidos permiten clasificar a las muestras por su composición química como:

Muestra 1: Acero AISI-SAE 1019 con la adición de 1.68 % de silicio. Este elemento se adiciona comúnmente a los aceros para mejorar su resistencia mecánica (Serrano, 2008).

Muestra 2: Acero AISI-SAE 1118 con adición de 0.35% cromo que se agrega con el propósito de mejorar la resistencia al desgaste, dureza y tenacidad del material. (Serrano, 2008)

Muestra 3: Acero AISI-SAE 1005 con contenido adicional de 0.644% cromo, 0.974% manganeso y 0.59% de silicio que en combinación, mejoran su resistencia al desgaste, dureza y tenacidad del material. (Serrano, 2008)

Muestra 4: Acero AISI-SAE 1030 con adición de 1.58% silicio y 0.20% cromo que son agregados al acero para incrementar su resistencia mecánica. La tenacidad se ve afectada por el mayor contenido de carbono y silicio. (Serrano, 2008).

**Tabla 3. 1. Composición química de las cuchillas**

Elemento / Proveedor	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4
	17-1288	17-1289	17-1290	17-1291
Carbono	0.136	0.223	0.059	0.330
Manganeso	0.945	1.15	0.974	0.715
Silicio	1.68	0.095	0.593	1.58
Fosforo	0.026	0.002	0.000	0.003
Cromo	0.006	0.351	0.644	0.201
Níquel	0.003	0.082	0.025	0.057
Molibdeno	0.013	0.043	0.019	0.037
Aluminio	0.010	0.036	0.065	0.008
Vanadio	0.001	0.007	0.006	0.003
Titanio	0.004	0.041	0.011	0.005
Tungsteno	0.004	0.019	0.009	0.006

Fuente: Elaboración propia.

El carbono es uno de los elementos principales en la composición de los aceros, debido a que con un bajo porcentaje del mismo (Tabla 3.2) presenta alta ductilidad y tenacidad. El incremento de contenido de carbono en los aceros eleva su resistencia mecánica a la tracción y la dureza, pero reduce la ductilidad.

Para la manufactura de cuchillas se emplean aceros donde el manganeso se encuentra en un rango de 0.03 – 2.0%, el aumento de este elemento en la composición, incrementa su resistencia y templabilidad. La presencia de Si para este tipo de aplicaciones por lo general se encuentra en porcentajes superiores a los aceros al carbono comunes, porque favorece ligeramente la templabilidad y aumenta sensiblemente el límite elástico y su resistencia a la fatiga sin causar ningún efecto en la tenacidad.

Para el fin de este tipo de cuchillas se pretende que el contenido de fósforo sea menor al 0.085 %, en mayores porcentajes aumenta la fragilidad del acero. Todos los elementos aleantes mencionados con anterioridad son capaces de contribuir en las propiedades mecánicas de los aceros, como también lo hace el cromo al aumentar su resistencia a la corrosión y la templabilidad, al disolverse en la austenita.

### **Ensayo de Dureza**

Los resultados de dureza obtenidos se exponen en la tabla 3.1 corresponde a los materiales de los 4 tipos de cuchillas que maneja el ingenio SAN CARLOS, en donde se puede apreciar una ligera variación de dureza de las mismas. Las ligeras variaciones de los valores obtenidos en el ensayo pudieran estar asociadas a diferencias en la composición química de las distintas cuchillas y en las condiciones de procesamiento.

La dureza de la muestra 1 es menor que las demás muestras, pero de acuerdo a las especificaciones de la norma ASTM, se estipula una variación en dureza en un rango superior a 3 HRC para argumentar las diferencias de durezas entre materiales, por lo que se puede decir que las durezas de las muestras se encuentran en un mismo rango de variación al ser todas muy similares.

La dureza de la muestra 2 y 3 son iguales, estas muestras tienen diferentes composiciones de carbono y de contenidos aleantes, en especial difieren en el contenido de cromo, elemento que mejora las propiedades del material entre ellas la dureza del material. Los valores de dureza de las muestras son típicos de materiales endurecidos por temple.



**Tabla 3. 2. Valores de dureza de las cuchillas en estudio**

Numero de medida / Proveedor	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4
	17-1292	17-1293	17-1294	17-1295
1	38.1	44.7	42.8	42.2
2	43.1	43.7	46.7	43.9
3	39.3	47.4	43.5	41.4
4	44.1	45.1	45.9	45.8
5	42.8	45.5	46.2	43.4
6	42.3	45.6	44.5	41.4
7	43.5	44.3	46.7	40.1
<b>Promedio</b>	<b>41.8 ±2,2</b>	<b>45.2±1,2</b>	<b>45.2±1,6</b>	<b>42.7±1,9</b>

Fuente: Elaboración propia.

### Ensayo de Tracción

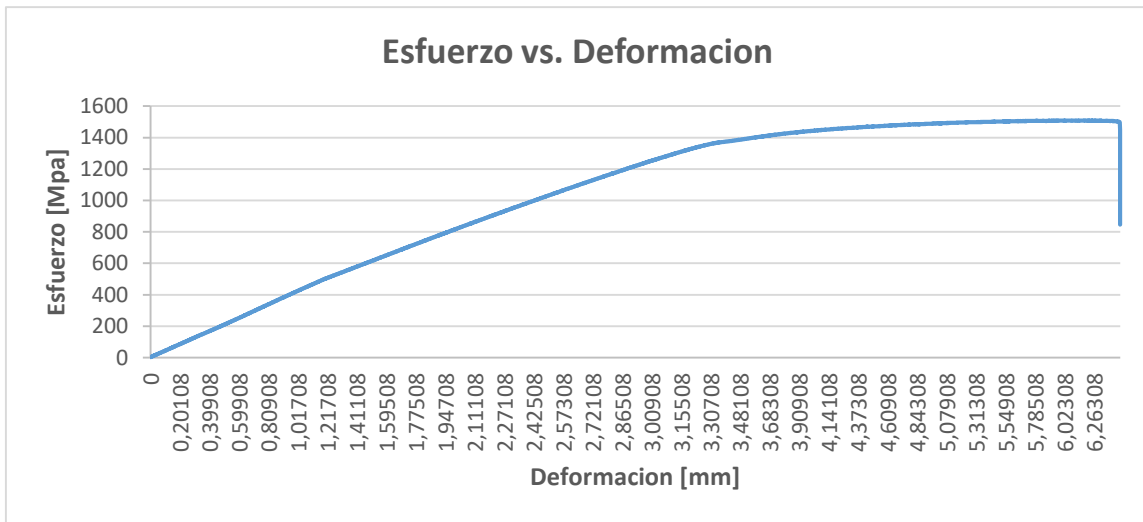
Para este ensayo se realizaron dos pruebas en la sección transversal para cada una de las cuchillas con el objetivo de obtener dichas propiedades mecánicas como lo son: esfuerzo de fluencia, esfuerzo máximo y porcentaje de elongación. A través de la máquina de ensayos universal, se verifico el comportamiento de cada una de las muestras al ser sometidas a tensiones para obtener la gráfica Esfuerzo vs deformación (ejemplo, ver figura.3.1), de donde son obtenidas sus propiedades mecánicas, que se muestran en la tabla 3.3.

**Tabla 3. 3. Propiedades mecánicas de las cuchillas ensayadas a tracción.**

Nombre	Esfuerzo de Fluencia ( $\sigma_{y0,2\%}$ )	Esfuerzo Máximo	Elongación luego de rotura
<b>Unidades</b>	MPa	MPa	%
<b>Muestra 1</b>	1403.91	1542.18	8.39
<b>Muestra 2</b>	1392.41	1573.04	12.77
<b>Muestra 3</b>	1495.77	1574.88	12.88
<b>Muestra 4</b>	1528.22	1666.6	9.24

Fuente: Elaboración propia.

Las muestras 1 y 4 presentan menor porcentaje de elongación a la rotura, además en el estudio estadístico se evidencio que las cuchillas de la muestra 1 se fracturan más rápido y por otro lado la muestra 2 y 3 presentan un porcentaje de elongación similar y mucho más elevado que las otras dos muestras. Los esfuerzos de fluencia y máximo son mayores en la muestra 3 y 4 y esto se debe a la influencia de los elementos aleantes en la muestra.



**Figura 3. 1. Curvas de Esfuerzo vs alargamiento para la muestra 1**

Fuente: LEMAT, 2018.

A través de la curva de esfuerzo y deformación se obtuvieron los esfuerzos de fluencia con un valor de 1403 MPa, esfuerzo máximo con 1392 MPa y elongación de 8,39%, los dos primeros parámetros permitirán la caracterización de diseño. En el apéndice A se muestra las curvas esfuerzo vs. Deformación para cada una de las muestras ensayadas y las propiedades mecánicas se presentan en la tabla 3.3.

### Ensayo Charpy o de Impacto

Para la determinación de la tenacidad se realizó un ensayo de impacto o charpy, el mismo consistió en la ruptura de las probetas entalladas mediante la aplicación de un impacto con un martillo, con el fin de medir la energía absorbida por el material a la fractura, cuyos resultados se exponen en la Tabla 3.5, correspondientes a los materiales de los diferentes tipos de cuchillas.

La muestra 1 y 4 presenta una menor resistencia al impacto en comparación a las otras dos muestras, esto fue corroborado en el estudio estadístico donde se evidenció que dichas cuchillas presentan mayor frecuencia de fractura, mientras que la muestra 3 presenta mayor tenacidad por su elevado contenido de cromo al igual que la muestra 2.

**Tabla 3. 4. Tabla de valores de la tenacidad en las cuchillas.**

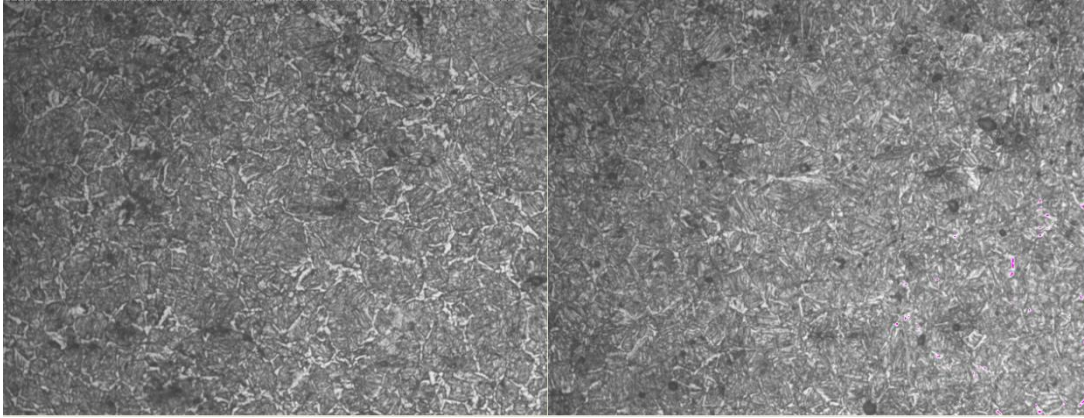
<b>Proveedor</b>	<b>Nombre</b>	<b>Tenacidad [kg*m]</b>
Muestra 1	18 – 1794	0.8
Muestra 2	18 – 1795	2.6
Muestra 3	18 – 1796	1.9
Muestra 4	18 – 1797	0.7

Fuente: Elaboración propia.

### **Caracterización microestructural**

Correlacionando las propiedades de los materiales ensayados con sus correspondientes microestructuras, se puede argumentar que los elevados valores de dureza, esfuerzo de fluencia y de tracción están asociadas a la presencia de martensita. Para la obtención de esta fase los materiales son sometidos a tratamientos térmicos de temple y por lo general este tratamiento es seguido de un revenido. En análisis microestructural de las muestras se hizo mediante microscopía óptica. Las imágenes obtenidas se muestran en las Figura 3.2. a 3.5.

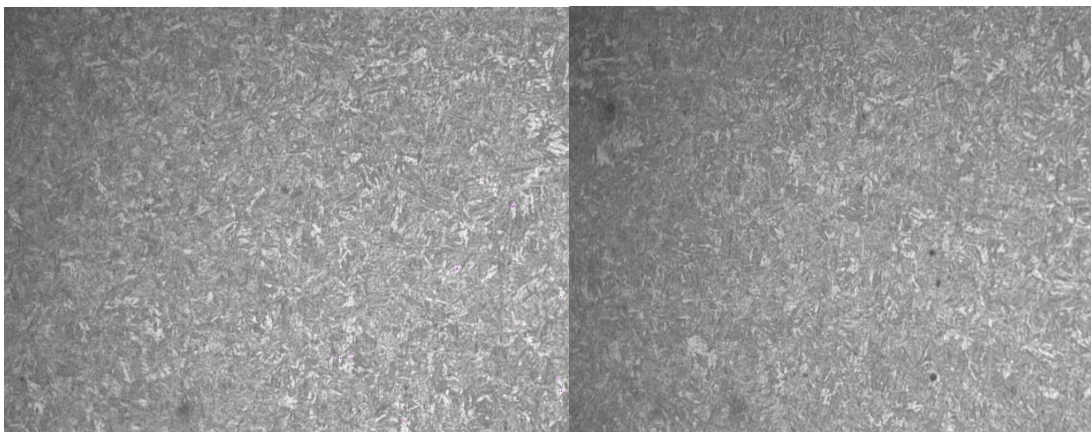
En la figura 3.2 se aprecia una microestructura representativa de la muestra 1 constituidas por martensita como fase mayoritaria y ferrita. Mediante metodologías estandarizadas, se obtuvo que la proporción de ferrita (zonas claras) encontrado en la microestructura de la muestra 1 fue de 20% y de la martensita (zona oscura) de un 80%, la formación de mayor contenido de martensita en la microestructura es típico en aceros templados.



**Figura 3. 2. Microestructura de la muestra 1 a X500**

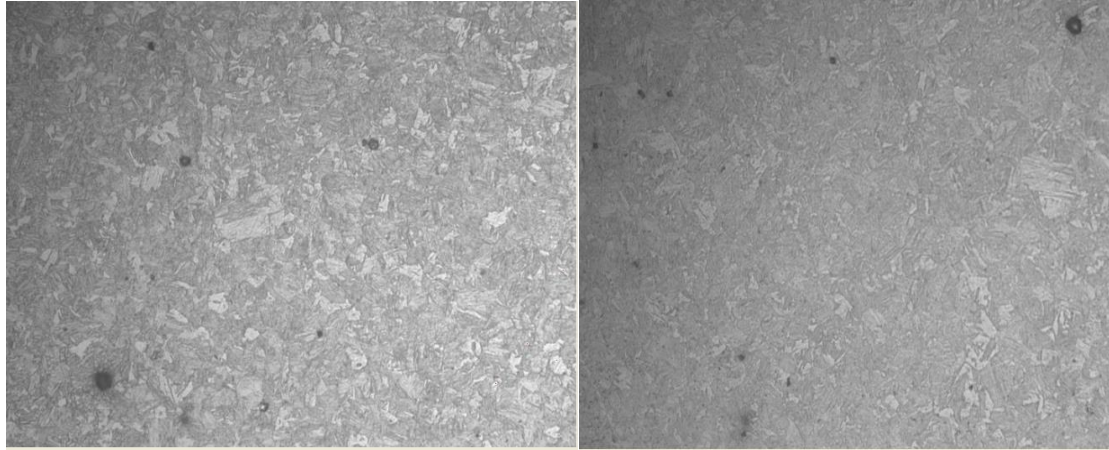
Fuente: Elaboración propia.

Bajo el mismo procedimiento se analizaron las muestras 2, 3 y 4 correspondientes a las figuras 3.3 a 3.5 en las que se observa una microestructura constituida por ferrita – martensita, los porcentajes de variación de fases antes mencionadas se resumen en la tabla 3.6 se aprecia que los porcentajes de ferrita varían en un rango de 20 a 28% y martensita de 80 a 72%. Se afirma que las muestras están constituidas principalmente por martensita, lo que significa que es un acero templado y con mayor dureza, justificando los valores de la dureza obtenidos en los ensayos previos.



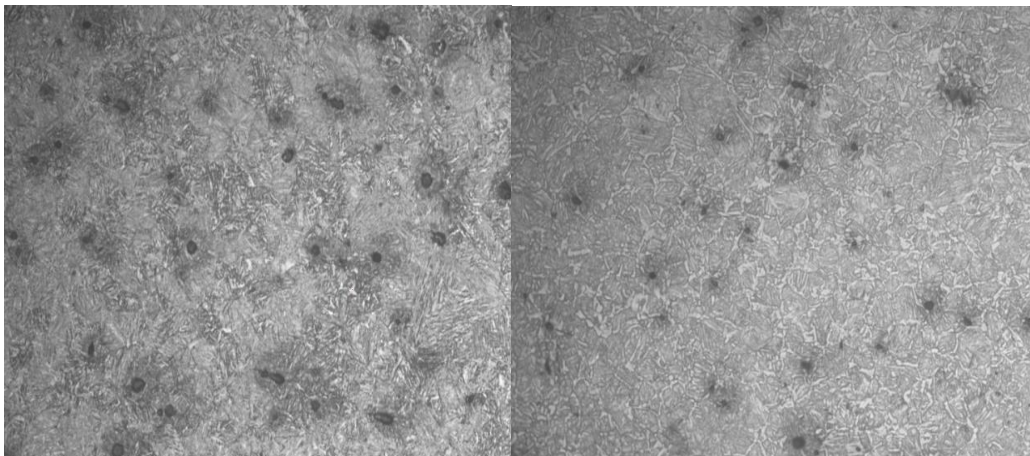
**Figura 3. 3. Microestructura de la muestra 2 a X500.**

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 3. 4. Microestructura de la muestra 3 a X500**

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 3. 5. Microestructura de la muestra 4 a X500**

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 3. 5. Porcentaje de fases en las cuchillas evaluadas.**

<b>Muestra</b>	<b>Porcentaje de ferrita [±1]</b>	<b>Porcentaje de martensita [±1]</b>
PRATCO	20	80
BONEN	28	72
CHRONIT	25	75
KULIN	24	76

Fuente: Elaboración propia.

### 3.1.2. Ensayos No Destructivos

#### Ensayo de Partículas Magnéticas Fluorescente en Suspensión

En el ensayo de partículas magnéticas, reveló que el filo de las cuchillas desgastadas no presenta anomalías relevantes; sin embargo, en la sección de los orificios de sujeción de la misma (ver figura 3.6.), específicamente alrededor de estos, se presenta un pequeño agrietamiento, que fue examinado mediante la exposición de una luz ultravioleta cerca de la zona afectada. Por lo que es una de las principales razones por la cual la cuchilla se fractura. Este tipo de defecto puede suceder de manera regular debido a las cargas cíclicas a las que está sometida; además de ello, dicha afectación puede darse de manera inmediata debido a las malas condiciones de terreno, en un tipo de terreno pedregoso/rocoso.

Este ensayo fue realizado a través de las muestras obtenidas en el estudio estadístico, con un número específico de cuchillas, para ser exactos 10 por cada proveedor, de las cuales para la muestra 1 cada 10 cuchillas 2 de ellas fallan por fractura.



**Figura 3. 6. Fisura alrededor de la zona de sujeción de la cuchilla**

Fuente: Albuja, Riera, 2017.

Elaboración propia

#### Ensayo de Medición Ultrasónica de Espesores

A continuación, se muestran los resultados obtenidos del ensayo de medición ultrasónica de espesores, donde se determinó que durante el proceso de

desgaste las cuchillas pierden su espesor un rango de 0.2 a 0.3 entre el espesor inicial y final.

**Tabla 3. 6. Comparación de espesores de cuchillas nuevas y desgastadas**

<b>Espesor</b>	<b>Muestra 1</b>	<b>Muestra 2</b>	<b>Muestra 3</b>	<b>Muestra 4</b>
<b>Inicial [mm]</b>	6	6	5.5	6
<b>Final [mm]</b>	5.7	5.8	5.3	5.8
<b>Variación</b>	5	3.6	3	3

Fuente: Elaboración propia.

### 3.2. Análisis de la simulación

#### CASO I: CORTE DE UNA CAÑA.

**Tabla 3. 7. Resultados obtenidos para el caso 1 a través del método de elementos finitos.**

	<b>Parámetros</b>	<b>Sección</b>	<b>Muestra 1</b>	<b>Muestra 2</b>	<b>Muestra 3</b>	<b>Muestra 4</b>
<b>Análisis Estático</b>	<b>Esfuerzo (Von Mises) [Mpa]</b>	<b>A</b>	616.57	529.71	449.77	498.46
		<b>B</b>	88.08	75.67	64.25	62.30
	<b>Deformación [mm]</b>	<b>A</b>	0.20	0.21	0.21	0.23
		<b>B</b>	0	0	0	0
	<b>Factor de Seguridad</b>	<b>A</b>	1.77	2.04	2.58	2.72
		<b>B</b>	15+	15+	15+	15+
<b>Análisis por Fatiga</b>	<b>Vida [ciclos]</b>	<b>A</b>	1213.2	2092.3	3939.4	4588.8
		<b>B</b>	1E6	1E6	1E6	1E6
	<b>Factor de Seguridad</b>	<b>A</b>	0.20	0.24	0.28	0.29
		<b>B</b>	3	3	3	3

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 3.7 se puede apreciar la comparación entre las cuchillas cuando estas son sometidas a una sola fuerza de corte de caña de azúcar, realizando su análisis en dos secciones específicos: el filo donde se produce el corte (sección A) y la zona de sujeción de la cuchilla con en el cortador base (sección B). Presentando mayores esfuerzos la cuchilla de origen australiano (Muestra 1) con valores de 616.57 MPa y 88.08 MPa en la sección A y B respectivamente. Por el contrario, en la cuchilla de producción Nacional (Muestra 3) se obtiene valores de esfuerzos bajos 449.77 MPa y 64.25 MPa en las secciones ya mencionadas. En todas las cuchillas la deformación presenta valores similares, estando en un rango entre 0.20 mm y 0.23 mm en la zona del filo de aplicación de la carga.

El factor de seguridad para el análisis estático presenta valores mayores a 1 en ambas secciones, lo que indica que las cuchillas no van a fallar, para el supuesto caso. Sin embargo, en la zona del filo (sección A) mediante un análisis por fatiga presenta valores de factor de seguridad menores a 1, lo que indica que inicia un desgaste; mientras que en la sección B presenta valores de factor de seguridad mayores a 1, lo que indica que las cuchillas no fallan (fracturan). El desgaste inicial en las Muestras 3 y 4 se encuentra alrededor de los 4000 ciclos, mientras que las muestras 1 y 2 se encuentran en un rango de 1200 a 2100 ciclos.



## CASO II: CORTE DE DOS CAÑAS.

**Tabla 3. 8. Resultados obtenidos para el caso 2 a través del método de elementos finitos.**

	Parámetros	Sección	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4
Análisis Estático	Esfuerzo (Von Mises) [Mpa]	A	704.82	543.61	573.29	501.29
		B	100.69	77.66	71.66	62.66
	Deformación [mm]	A	0.31	0.32	0.34	0.35
		B	0	0	0	0
	Factor de Seguridad	A	1.54	1.99	2.31	2.70
		B	15+	15+	15+	15+
Análisis por Fatiga	Vida [ciclos]	A	747.34	1904.5	2592.1	4493.1
		B	1E6	1E6	1E6	1E6
	Factor de Seguridad	A	0.18	0.23	0.25	0.29
		B	3	3	3	3

Fuente: Elaboración Propia.

En la tabla.3.8 se realiza la comparación entre las cuchillas cuando estas son sometidas a dos fuerzas de cortantes de caña de azúcar, realizando el análisis en dos secciones específicas: el filo donde se produce el corte (sección A) y la zona de sujeción de la cuchilla con en el cortador base (sección B). Presentando mayores esfuerzos la cuchilla de origen australiano (Muestra 1) con valores de 704.82 MPa y 100.69 MPa en la sección A y B respectivamente. Por el contrario, en la cuchilla de producción Nacional (Muestra 3) se obtiene valores de esfuerzos bajos 501.29 MPa y 62.66 MPa en las secciones ya mencionadas. En todas las cuchillas la deformación presenta valores similares, estando en un rango entre 0.39 mm y 0.44 mm en la zona del filo de aplicación de la carga.

El factor de seguridad para el análisis estático presenta valores mayores a 1 en ambas secciones, lo que indica que las cuchillas no van a fallar, para el supuesto caso. Sin embargo, en la zona del filo (sección A) mediante un análisis por fatiga presenta valores de factor de seguridad menores a 1, lo que indica que existe un

desgaste inicial; mientras que en la sección B presenta valores de factor de seguridad mayores a 1, lo que indica que las cuchillas no fallan (fracturan). El desgaste inicial en las muestras 3 y 4 se encuentran en un rango de 2500 a 4500 ciclos, mientras que las muestras 1y 2 se encuentran en un rango de 700 a 2000 ciclos.

### CASO III: CORTE DE TRES CAÑAS.

**Tabla 3. 9. Resultados obtenidos para el caso 3 a través del método de elementos finitos.**

	Parámetros	Sección	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4
Análisis Estático	Esfuerzo (Von Mises) [Mpa]	A	705.61	622.04	608.72	501.48
		B	100.80	77.75	76.09	62.68
	Deformación [mm]	A	0.39	0.40	0.43	0.44
		B	0	0	0	0
	Factor de Seguridad	A	1.54	1.98	2.18	2.70
		B	10	10	10	10
Análisis por Fatiga	Vida [ciclos]	A	744.23	1896.8	2049.4	4487
		B	1E6	1E6	1E6	1E6
	Factor de Seguridad	A	0.17	0.23	0.24	0.29
		B	0.17	0.23	0.24	0.29

Fuente: Elaboración Propia.

En la tabla 3.9 se realiza la comparación entre las cuchillas cuando estas son sometidas a tres fuerzas cortantes de caña de azúcar, realizando el análisis para las dos secciones descritas anteriormente. Presentando mayores esfuerzos la cuchilla de origen australiano (Muestra 1) y menor esfuerzo la de origen nacional (Muestra 3).

El factor de seguridad para el análisis estático presenta valores mayores a 1 en ambas secciones, mientras que en el análisis por fatiga ya se evidencian la

presencia de fisuras en la sección B de la cuchilla (la más crítica) por lo que se tiene el factor de seguridad menor a 1.

#### **CASO IV: CORTE DE CUATRO CAÑAS.**

En la tabla 3.10 se realiza la comparación entre las cuchillas cuando estas son sometidas a cuatro fuerzas cortantes de caña de azúcar, realizando el análisis para las dos secciones descritas anteriormente. Presentando mayores esfuerzos la cuchilla de origen australiano (Muestra 1) y menor esfuerzo la de origen nacional (Muestra 3).

El factor de seguridad para el análisis estático presenta valores mayores a 1 en ambas secciones, mientras que en el análisis por fatiga ya se evidencian la presencia de fisuras en la sección B de la cuchilla (la más crítica) por lo que se tiene el factor de seguridad menor a 1.

**Tabla 3. 10. Resultados obtenidos para el caso 4 a través del método de elementos finitos.**

	Parámetro	Sección	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4
Análisis Estático	Esfuerzo (Von Mises) [Mpa]	A	705.83	544.45	627.55	503.63
		B	100.83	77.78	78.44	62.95
	Deformación [mm]	A	0.43	0.45	0.49	0.5
		B	0	0	0	0
	Factor de Seguridad	A	1.54	1.98	2.11	2.69
		B	10	10	10	10
Análisis por Fatiga	Vida [ciclos]	A	743.37	1894.9	1842.7	4415.8
		B	4.49E5	4.98E5	4.96E5	5.47E5
	Factor de Seguridad	A	0.17	0.23	0.23	0.28
		B	0.17	0.23	0.23	0.28

Fuente: Elaboración Propia.

## CASO V: CORTE DE UNA CAÑA E IMPACTANDO UNA PIEDRA

En la tabla 3.11 existe una variación significativa de los esfuerzos con valores mayores a 6800 MPa debido que para este caso además de cortar una caña, la cuchilla está impactando con una piedra a una distancia corta de la zona de sujeción, dichos valores se encuentran por encima del esfuerzo de fluencia de cada una de la cuchillas, lo que indica vida finita; fallando de manera inmediata el filo, mientras que en la zona de sujeción falla alrededor de los 10000 ciclos, dicho esto, las cuchillas pueden seguir operando hasta ciclos mencionados sin realizar ningún corte.

**Tabla 3. 11. Resultados obtenidos para el caso 5 a través del método de elementos finitos.**

	Parámetro	Sección	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4
Análisis Estático	Esfuerzo (Von Mises) [Mpa]	A	10834.0	7316.7	8665.57	6895.52
		B	1547.7	914.60	1238.0	985.06
	Deformación [mm]	A	3.20	3.30	3.47	3.65
		B	0	0	0	0
	Factor de Seguridad	A	0.10	0.16	0.13	0.17
		B	0.10	0.16	0.13	0.17
Análisis por Fatiga	Vida [ciclos]	A	0	0	0	0
		B	1E4	1E4	1E4	1E4
	Factor de Seguridad	A	0.012	0.019	0.014	0.018
		B	0.012	0.019	0.014	0.018

Fuente: Elaboración Propia.

## CASO VI: IMPACTO DE UNA PIEDRA

En la tabla.3.12 se presenta el caso de impacto de una piedra en el filo del extremo de la cuchilla (sexto caso), siendo uno de los casos críticos debido a que los esfuerzos se encuentran por encima del esfuerzo de fluencia, obteniendo valores de factores de seguridad menores a 1 tanto para el análisis estático como el análisis por fatiga, lo que indica que las cuchillas fallan no más allá de su primer

ciclo de operación como se observa en dicha tabla. Este caso se lo realizo considerando como parámetro uno de los tipos de terreno que posee el ingenio como tal.

**Tabla 3. 12. Resultados obtenidos para el caso 6 a través del método de elementos finitos.**

		Sección	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4
<b>Análisis Estático</b>	<b>Esfuerzo (Von Misses) [Mpa]</b>	<b>A</b>	9697.7	8715.2	6892.4	7022.5
		<b>B</b>	1616.3	1245.0	1148.7	1003.3
	<b>Deformación [mm]</b>	<b>A</b>	5.08	5.30	5.53	5.78
		<b>B</b>	0	0	0	0
	<b>Factor de Seguridad</b>	<b>A</b>	0.09	0.12	0.14	0.16
		<b>B</b>	0.09	0.12	0.14	0.16
<b>Análisis por Fatiga</b>	<b>Vida [ciclos]</b>	<b>A</b>	0	0	0	0
		<b>B</b>	1	1	1	1
	<b>Factor de Seguridad</b>	<b>A</b>	0.011	0.014	0.015	0.018
		<b>B</b>	0.011	0.014	0.015	0.018

Fuente: Elaboración Propia.

## **CASO VII: IMPACTO DE DOS PIEDRAS**

En la tabla.3.13 se presenta el caso de impacto de dos piedras en el filo del extremo de la cuchilla (séptimo caso), siendo uno de los casos más críticos debido a que los esfuerzos se encuentran por encima del esfuerzo de fluencia, obteniendo valores de factores de seguridad menores a 1 tanto para el análisis estático como el análisis por fatiga, lo que indica que las cuchillas fallan de manera inmediata. Este caso se lo realizo considerando como parámetro uno de los tipos de terreno que posee el ingenio como tal.

**Tabla 3. 13. Resultados obtenidos para el caso 7 a través del método de elementos finitos.**

	<b>Parámetro</b>	<b>Sección</b>	<b>Muestra 1</b>	<b>Muestra 2</b>	<b>Muestra 3</b>	<b>Muestra 4</b>
<b>Análisis Estático</b>	<b>Esfuerzo (Von Misses) [Mpa]</b>	<b>A</b>	11330.0	8728.0	8801.4	7053.3
		<b>B</b>	1618.5	1246.9	1257.4	1007.7
	<b>Deformación [mm]</b>	<b>A</b>	7.04	7.41	8.03	8.07
		<b>B</b>	0	0	0	0
	<b>Factor de Seguridad</b>	<b>A</b>	0.09	0.12	0.13	0.16
		<b>B</b>	0.09	0.12	0.13	0.16
<b>Análisis por Fatiga</b>	<b>Vida [ciclos]</b>	<b>A</b>	0	0	0	0
		<b>B</b>	0	0	0	0
	<b>Factor de Seguridad</b>	<b>A</b>	0.011	0.014	0.014	0.018
		<b>B</b>	0.011	0.014	0.014	0.018

Fuente: Elaboración Propia.

# CAPÍTULO 4

## 4. Discusión y Conclusiones

### 4.1. Conclusiones

El modo en que fallan las cuchillas son de dos tipos: desgaste en su filo cuando se está cortando la caña de azúcar, y otro cuando se produce la fractura prematura de la cuchilla debido a un tipo de terreno rocoso/piedroso donde se está realizando la cosecha.

La estructura de las cuchillas es predominantemente martensítica con un porcentaje menor de ferrita, la presencia de la martensita en la estructura nos indica que estos aceros fueron sometidos a un tratamiento térmico de temple y revenido.

Las cuchillas fueron elaboradas con aceros de bajo-medio carbono con adiciones de Si, Mn o Cr, se logró apreciar que el contenido de Cr es un elemento influyente en las mejoras de las propiedades mecánicas.

Mediante las simulaciones en los casos iniciales, en los que la cuchilla está sometida solo al corte de una o más cañas, se pudo corroborar que las cuchillas más resistentes son las muestras 3 y 4 debido a su geometría uniformidad en el filo (no presenta cambios bruscos a lo largo del filo), mientras que las muestras 1 y 2 presentan cambios bruscos a lo largo de su filo, generándose de esta manera concentradores de esfuerzo en esta sección. A partir de estos casos también se puede concluir que las cuchillas tienen vida infinita a la fatiga (no se fractura), sin embargo, su modo de falla es por roce, presentando un desgaste inicial en el filo de las cuchillas generado por las cargas cíclicas a las cuales está sometida.

Analizando el efecto del impacto de las piedras en las cuchillas se pudo determinar que con el impacto de las rocas disminuye la vida de las cuchillas.

En base a la simulaciones realizadas y considerando el cuarto caso, cuando la cuchilla corta cuatro cañas de azúcar simultáneamente se obtiene que los esfuerzos son inversamente proporcionales con la vida útil en las muestras, donde la muestra 1 presenta un mayores esfuerzos y la muestra 4 menores esfuerzos (*muestra 1 > muestra 2 > muestra 3 > muestra 4*); obteniendo valores de vida útil en ciclos producidos en el filo de las cuchillas.

La muestra 3 presenta mejores características de material y diseño en comparación a las otras muestras, debido a su microestructura uniforme y su mayor contenido de cromo, el cual mejora las propiedades mecánicas.

#### **4.2. Recomendaciones**

Se recomienda un estudio estadístico más extenso con una gama más amplia de muestras para un análisis más exhaustivo y detallado para corroborar resultados.

Para la fabricación, el material de las cuchillas debe ser un acero con medio contenido de carbono, con un contenido elevado de cromo, similar al de la composición de la muestra 3.

Para el diseño de la cuchilla, se recomienda evitar cambios bruscos de sección en los filos, de manera que no se generen concentradores de esfuerzos; y evitar cargas excesivas debido a las condiciones de terreno.

Se recomienda una evaluación más amplia de ensayos de las muestras 2 y 3 para corroborar resultados obtenidos en la caracterización del material y la caracterización de diseño.



# BIBLIOGRAFÍA

- ASM-International. (2002). Failure Analysis and Prevention. En A. International. *Failure Analysis and Prevention*, (Vol. XI, pag. 577).
- ASTM. (2002). *Standard Test Methods for Rockwell Hardness and Rockwell Superficial Hardness of Metallic Materials*. West Conshohocken, PA.: ASTM International.
- ASTM. (2015). *Standard Practice for Measuring Thickness by Manual Ultrasonic Pulse-Echo Contact Method*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM. (2016). *Standard Test Method for Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel by Atomic Emission Spectrometry*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM. (2016). *Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM. (2016). *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- Elsevier. (1997). Rings discs and cylinders subjected to rotation and thermal gradients. *Elsevier*.
- Hocking. (2000). Chopper System in Cane Harvester. *Proceedings - International Society of Sugar Cane Technologists*, 251.
- International, A. (2002). Failure Analysis and Prevention. En. *ASM HANDBOOK*, (Vol. XI, pag. 50) Ohio: The Materials Information Company.
- ISO. (2015). Non-destructive testing - Magnetic particle testing. *ISO 9934*.
- Johnson. (2012). Características de energía de corte de caña con ángulo oblicuo variable y velocidad de corte. *Biosystems Engineering*, 42-48.
- Leon. (2010). *Optimización de parámetros en la fabricación de cuchillas trozadoras para la cosecha de caña de azúcar*. Medellín : Universidad Nacional de Colombia.
- Liu, Q. (2012). Propiedades biomecánicas de los tallos de caña de azúcar. *Transactions of the ASABE*, 1125-1131.

- Meyer. (1999). Issues to consider when implementing a mechanical harvester system . *Proceedings - International Society of Sugar Cane Technologists*, Vol II, 147-153.
- Norton. (2011). *Diseño de máquinas*. Mexico: Prentice Hall.
- Rein. (2012). *Ingeniería de Caña de Azúcar* . Berlin : Elbe Druckerei Wittenberg.
- Ridge. (1996). Factors Influencing Industries Harvesting Transport Performance. *Australian Society of Sugar Cane Technologists ( ASSCT ) Proceedings*, 7.
- Serrano. (2008). *Guía de estudio del curso de Materiales de Ingeniería* . Guayaquil: ESPOL.
- Taghijarah. (2011). Las características de corte de los tallos de la caña de azúcar en función de la tasa de la fuerza aplicada. *Australian Journal of Crop Science* 5:, 630-634.
- Toledo, A. d., Silva, P. d., & Furlani, A. (2011). *Quality of cut and basecutter blade configuration for the mechanized harvest of green sugarcane*. Sao Paulo: UNESP/FCAV.
- Vignes. (1980). The Implications of cane washing. *Proceedings - International Society of Sugar Cane Technologists*, 2231.

# APÉNDICES

## APENDICE A

### Graficas Esfuerzo vs. Deformación

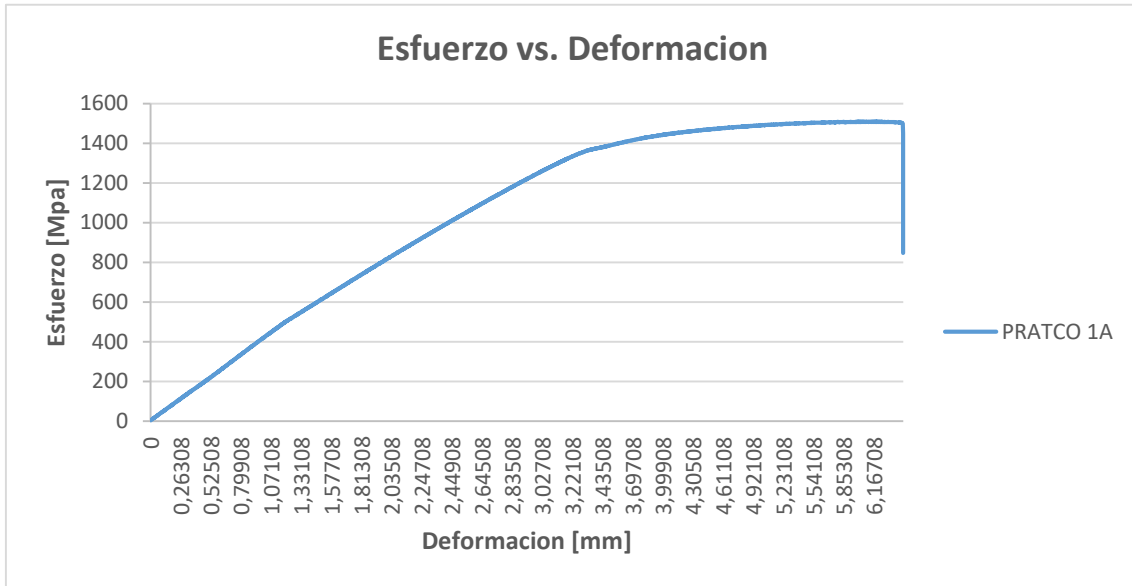


Figura 5. 1. Grafica Esfuerzo vs. Deformación prueba 1 – muestra 1.

Fuente: LEMAT, 2018.

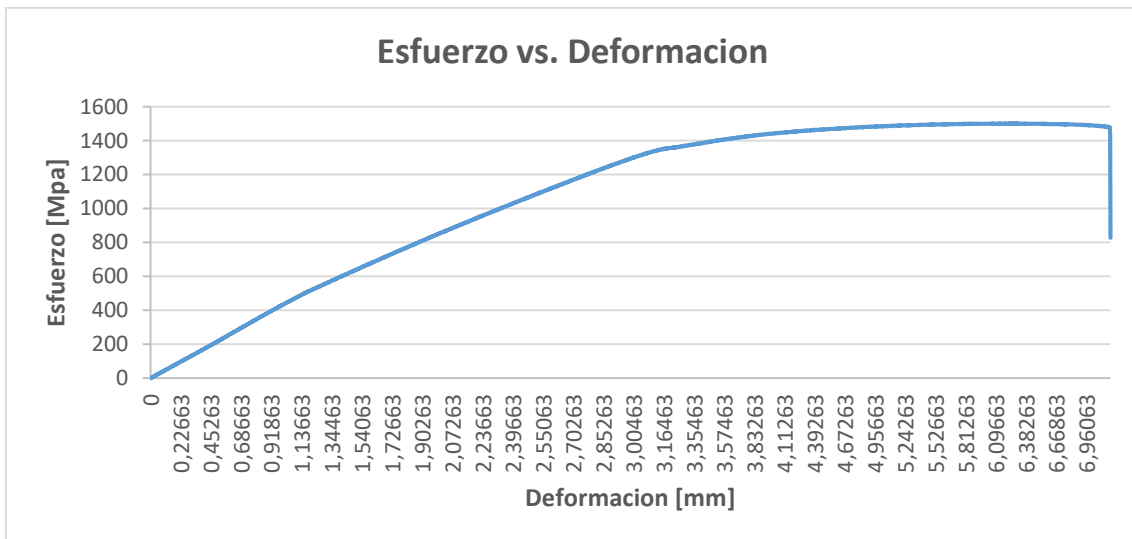
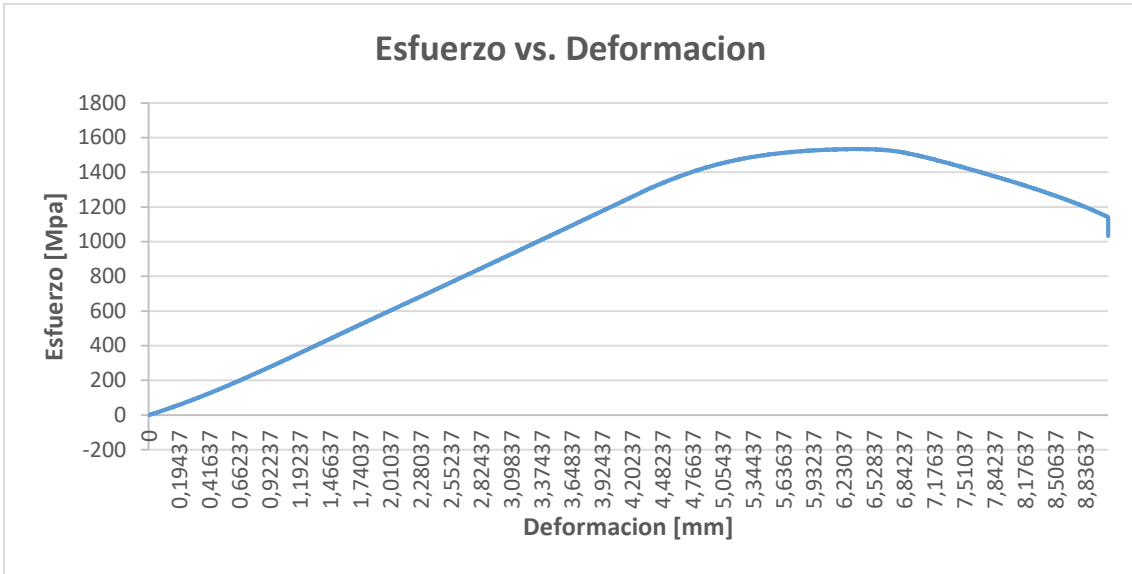


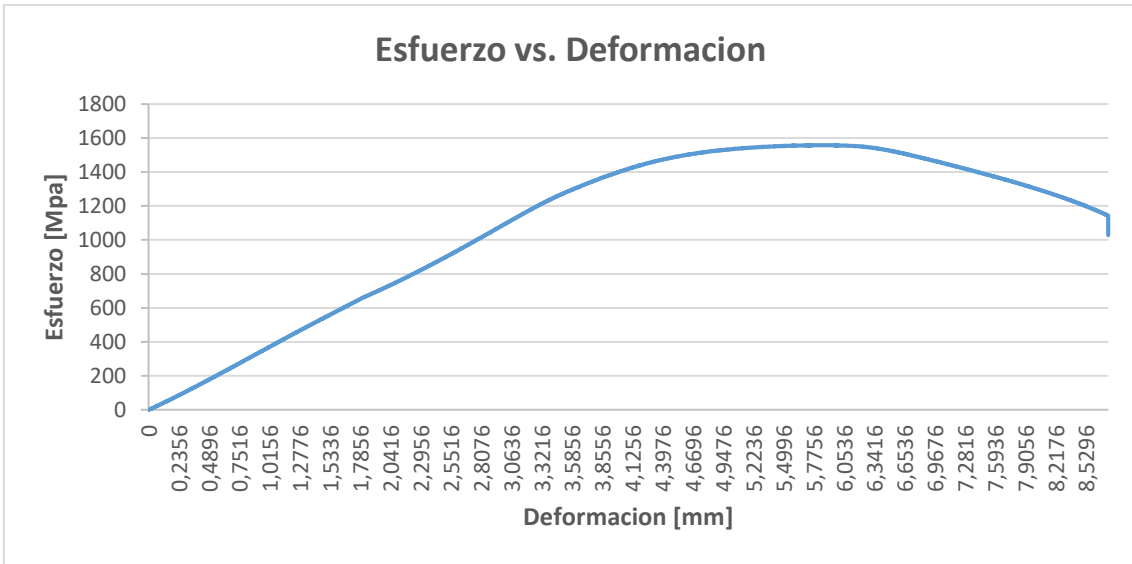
Figura 5. 2. Grafica Esfuerzo vs. Deformación prueba 2 – muestra 1.

Fuente: LEMAT, 2018.



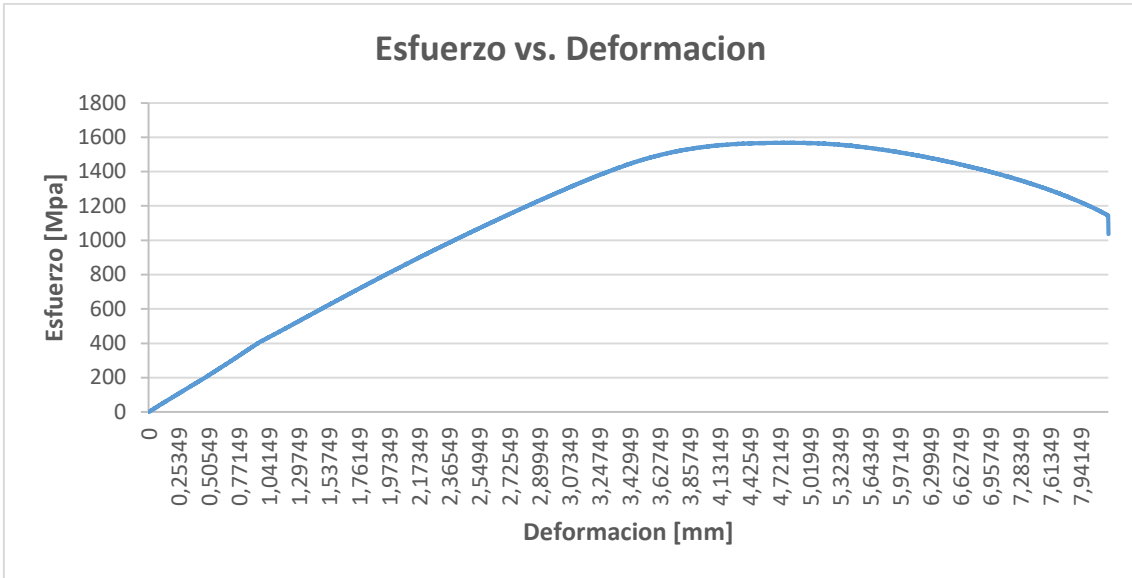
**Figura 5. 3. Grafica Esfuerzo vs. Deformación prueba 1 – muestra 2.**

Fuente: LEMAT, 2018.



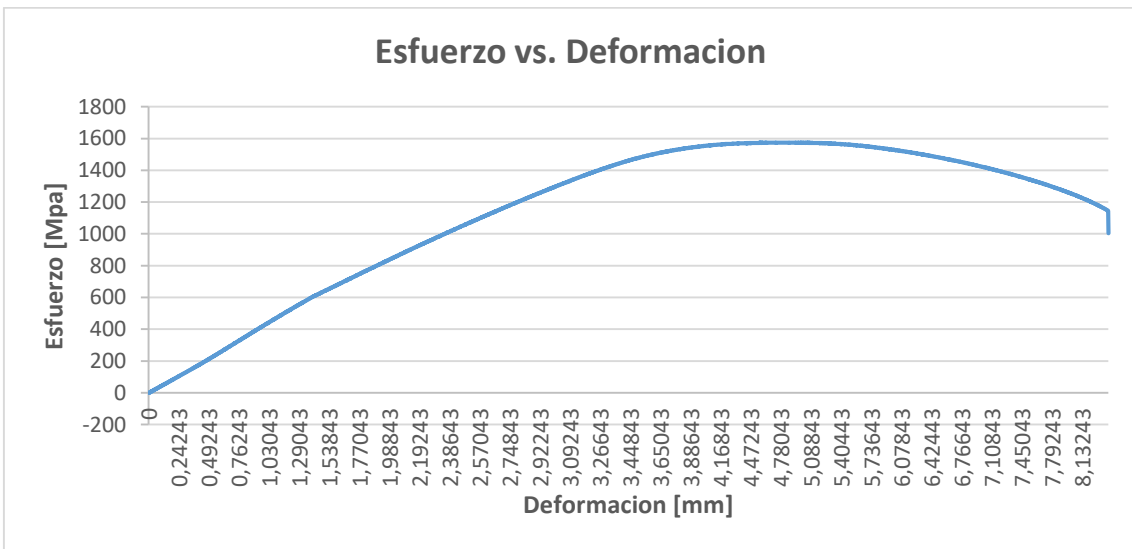
**Figura 5. 4. Grafica Esfuerzo vs. Deformación prueba 2 – muestra 2.**

Fuente: LEMAT, 2018.



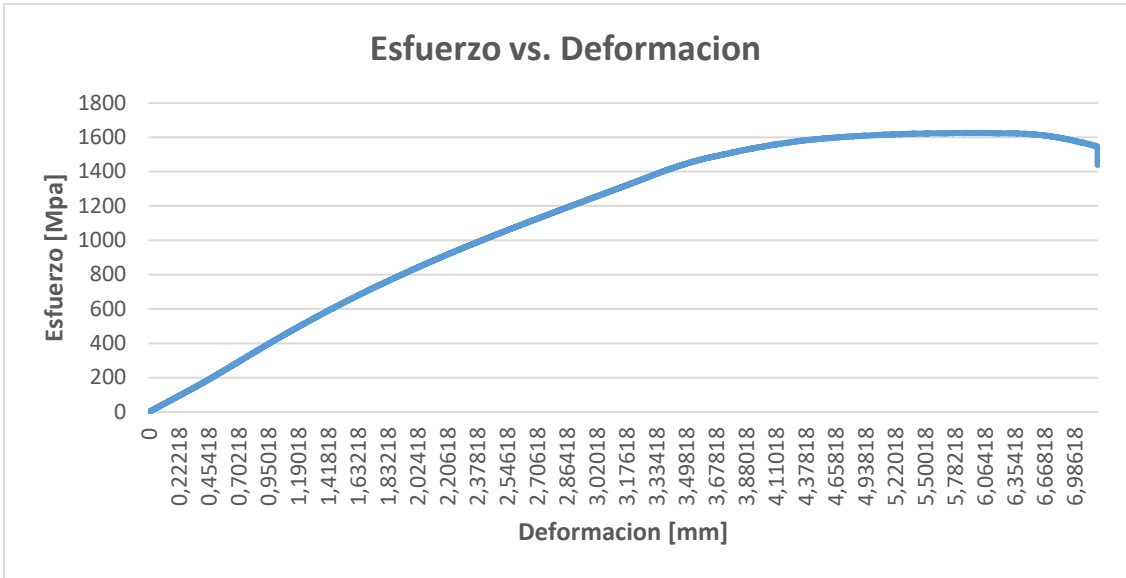
**Figura 5. 5. Grafica Esfuerzo vs. Deformación prueba 1 – muestra 3.**

Fuente: LEMAT, 2018.



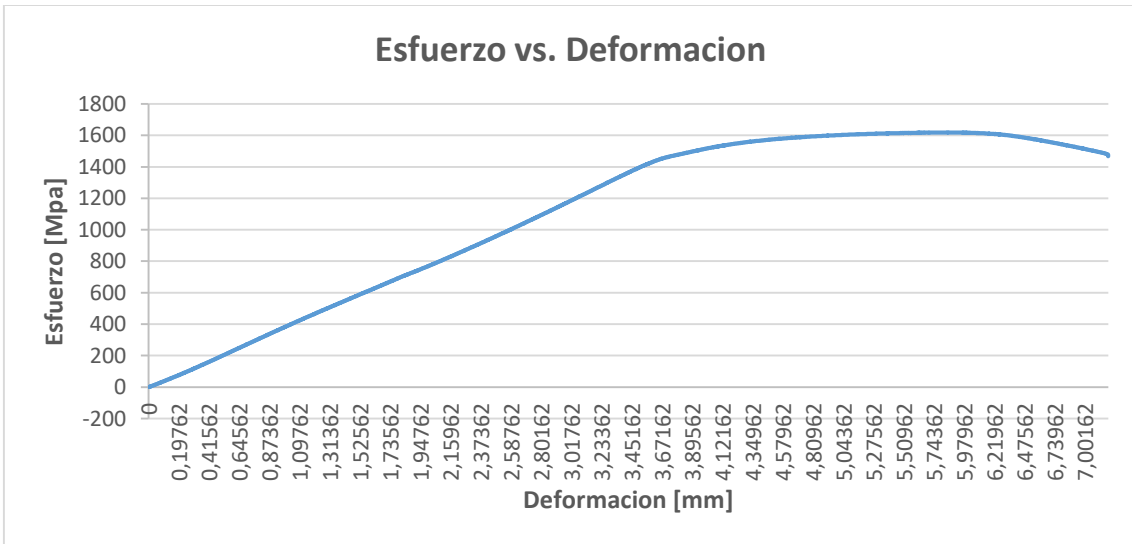
**Figura 5. 6. Grafica Esfuerzo vs. Deformación prueba 2 – muestra 3.**

Fuente: LEMAT, 2018.



**Figura 5. 7. Grafica Esfuerzo vs. Deformación prueba 1 – muestra 4.**

Fuente: LEMAT, 2018.



**Figura 5. 8. Grafica Esfuerzo vs. Deformación prueba 2 – muestra 4.**

Fuente: LEMAT, 2018.

## APENDICE B

### Modelado Virtual de la Cuchilla

#### MUESTRA 1

#### CASO I: CORTE DE UNA CAÑA.

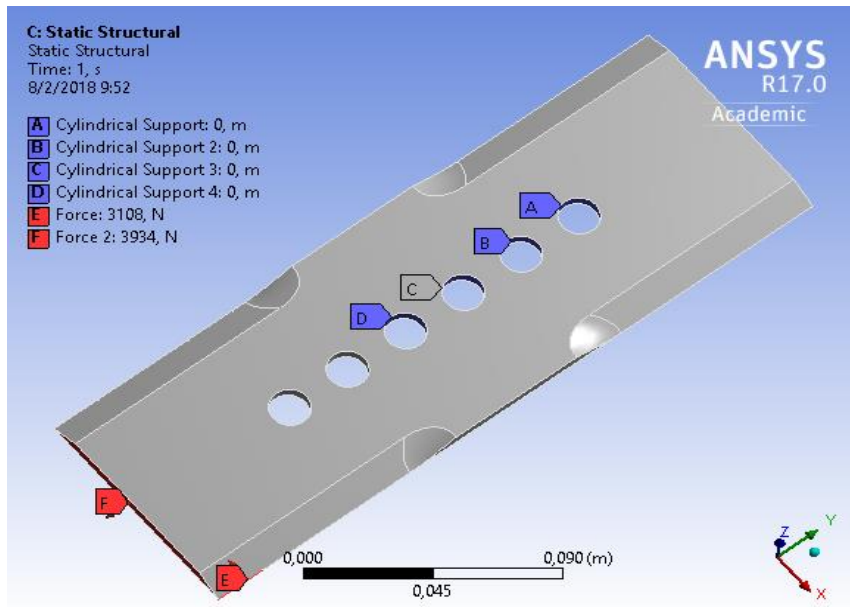


Figura 5. 9. Cargas y restricciones aplicadas al sistema - muestra 1 (Caso I).

Fuente: Elaboración Propia.

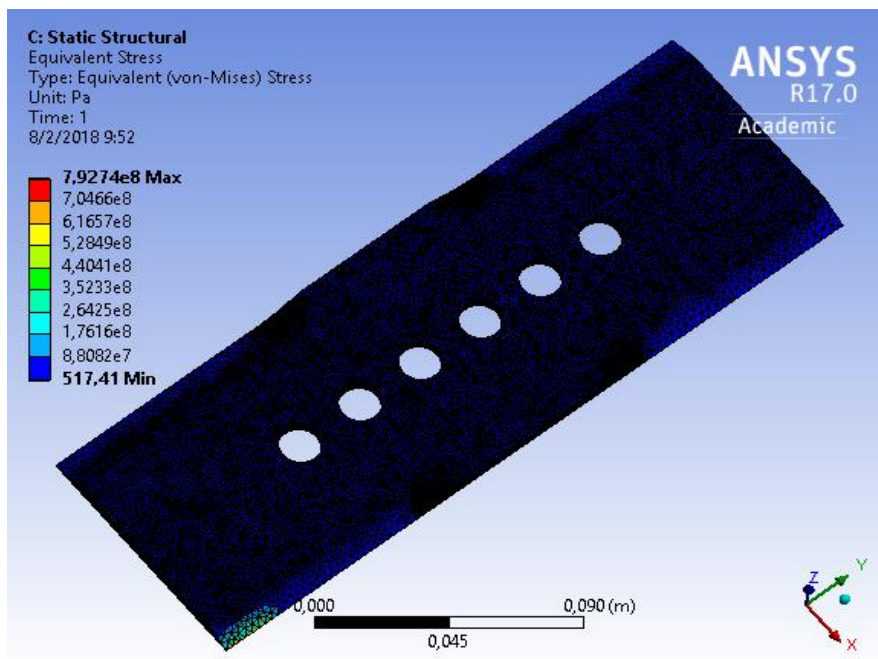
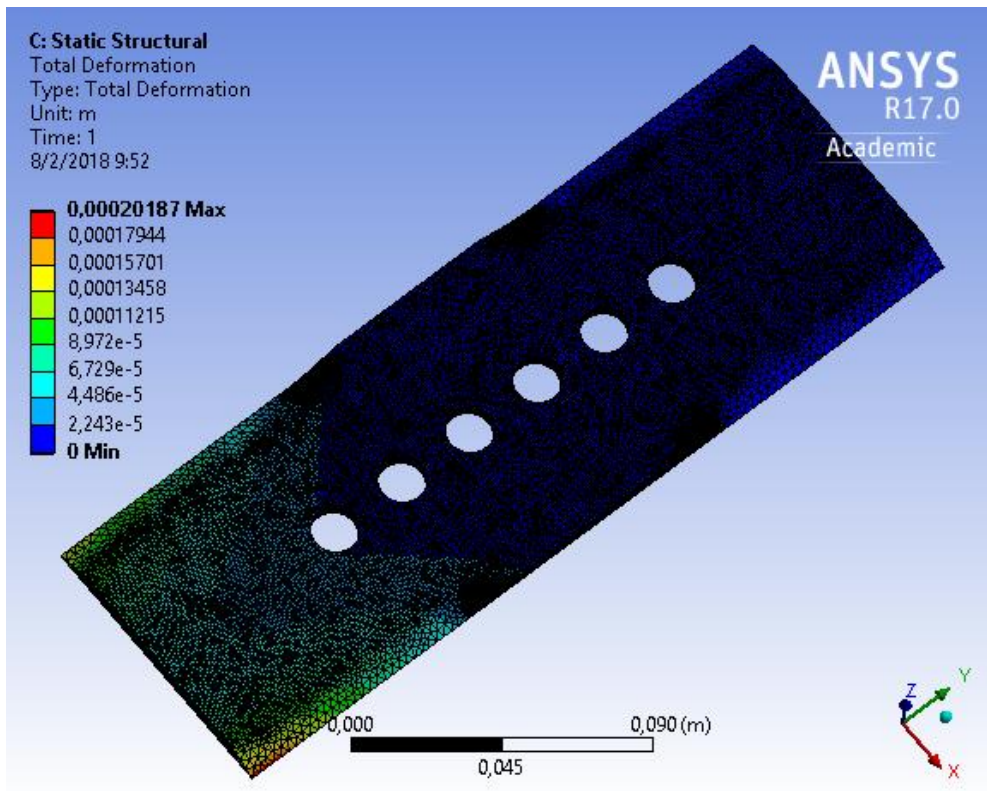


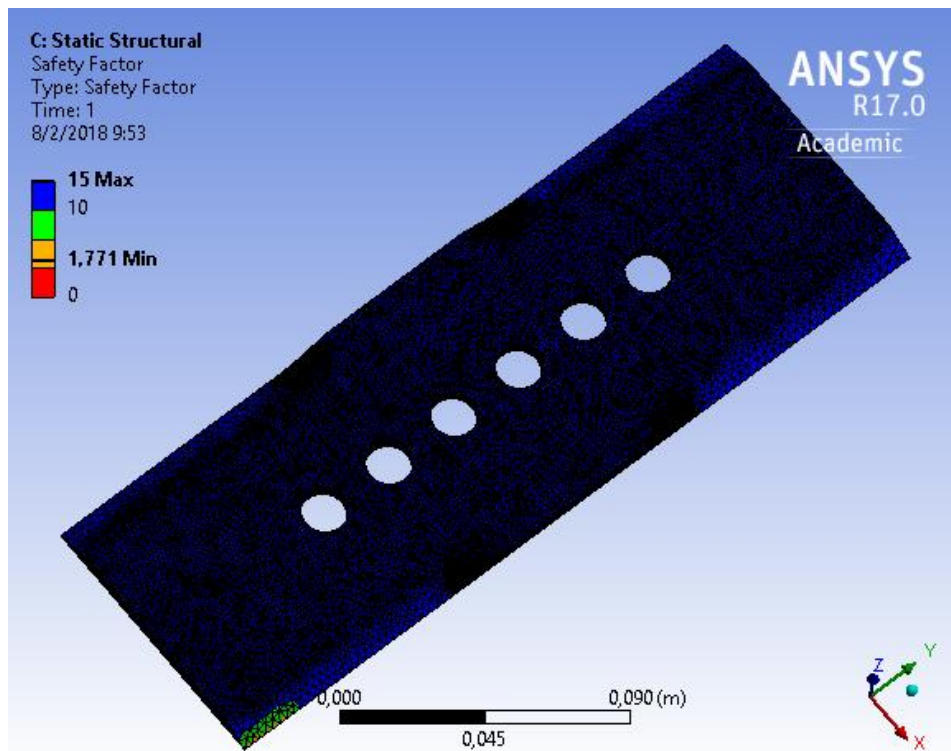
Figura 5. 10. Esfuerzo equivalente de Von Misses en la muestra 1 (Caso I).

Fuente: Elaboración Propia.



**Figura 5. 11. Deformación en la muestra 1 (Caso I).**

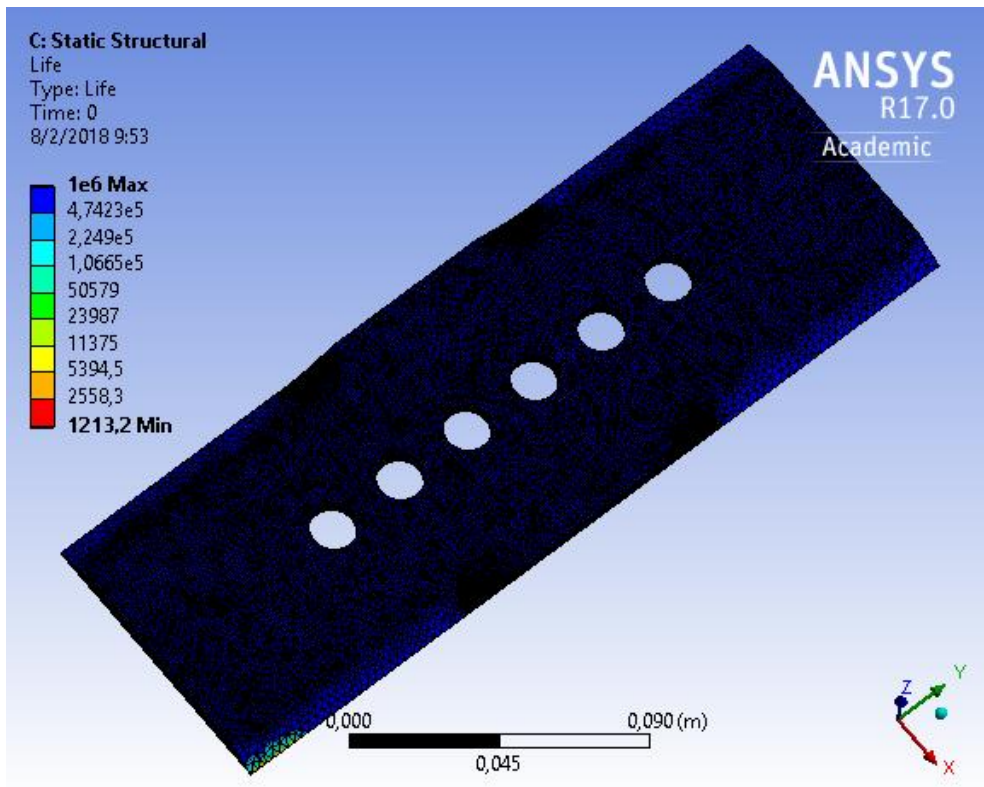
Fuente: Elaboración Propia.



**Figura 5. 12. Factor de seguridad estático de la muestra 1 (Caso I).**

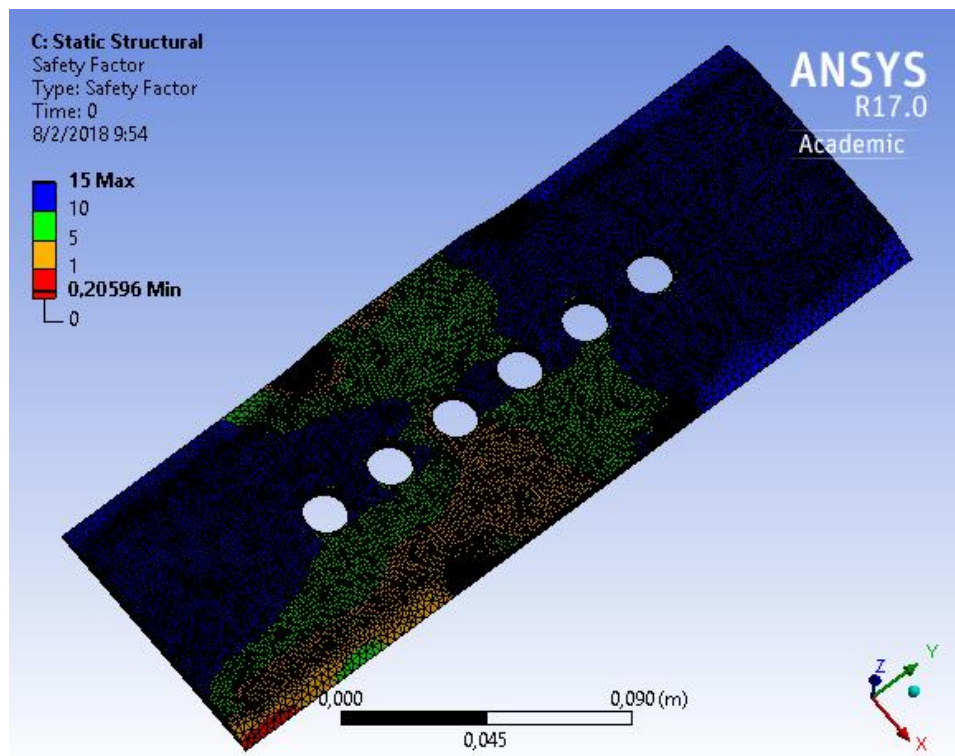
Fuente: Elaboración Propia.





**Figura 5. 13. Estimación de ciclos de trabajo de la muestra 1 (Caso I).**

Fuente: Elaboración Propia.



**Figura 5. 14. Factor de seguridad por fatiga de la muestra 1 (Caso I).**

Fuente: Elaboración Propia.

## CASO II: CORTE DE DOS CAÑAS.

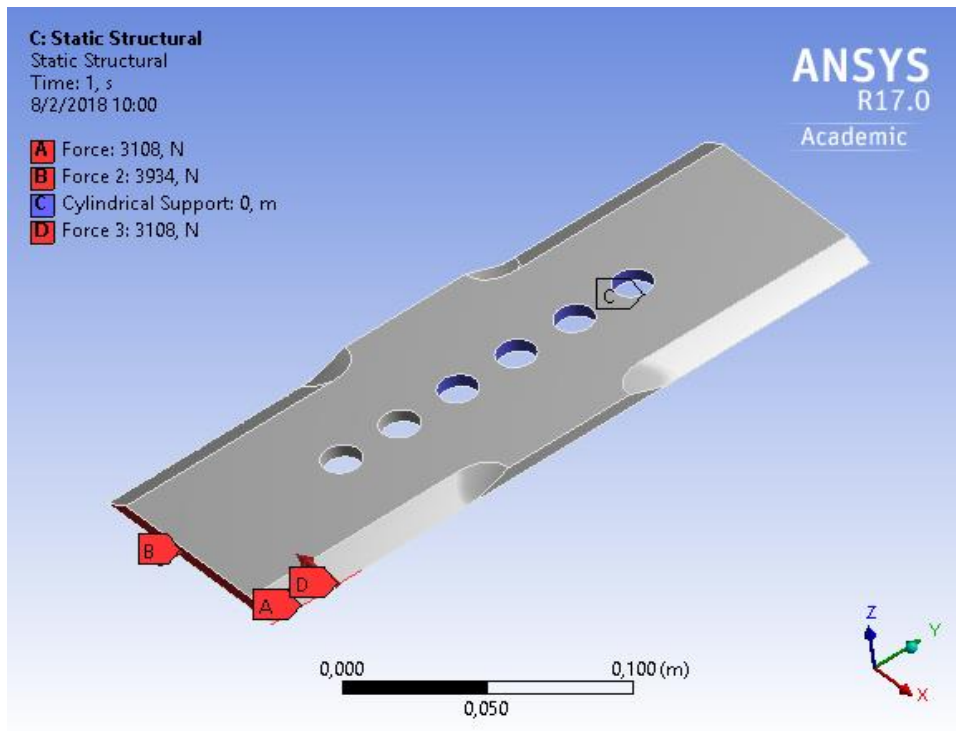


Figura 5. 15. Cargas y restricciones aplicadas al sistema - muestra 1 (Caso II).

Fuente: Elaboración Propia.

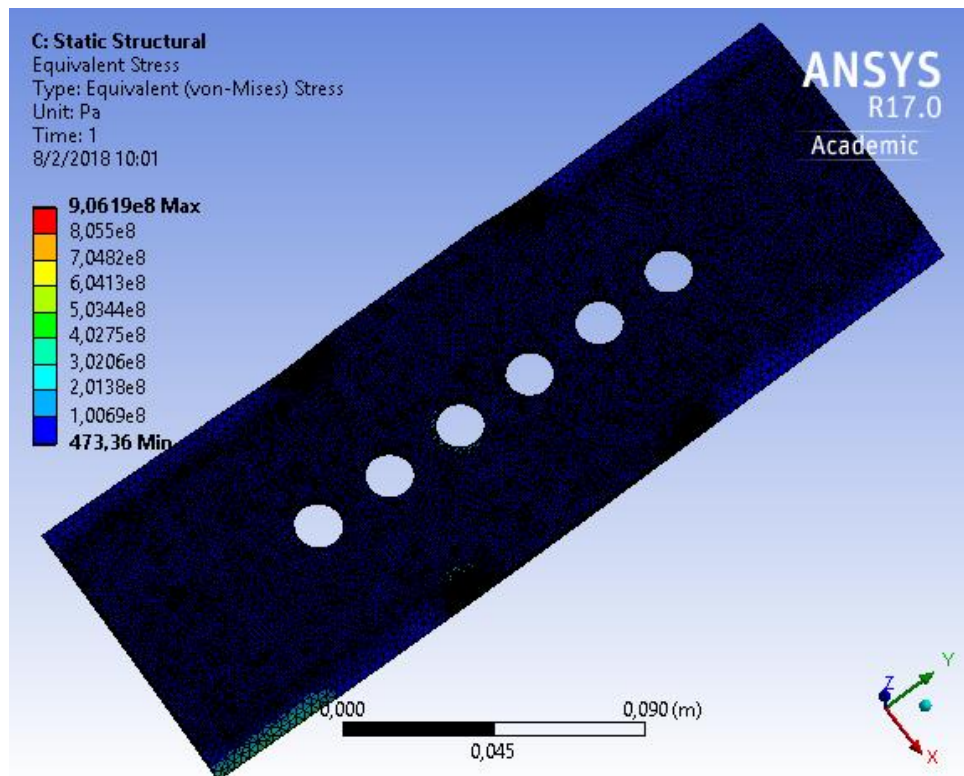
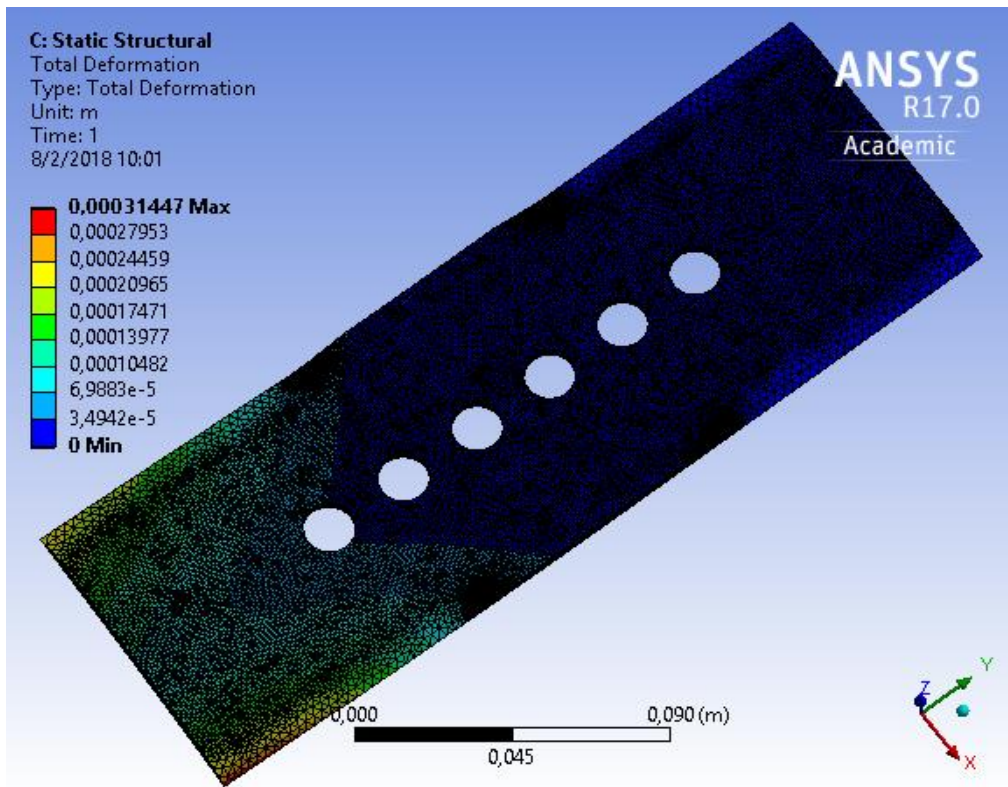


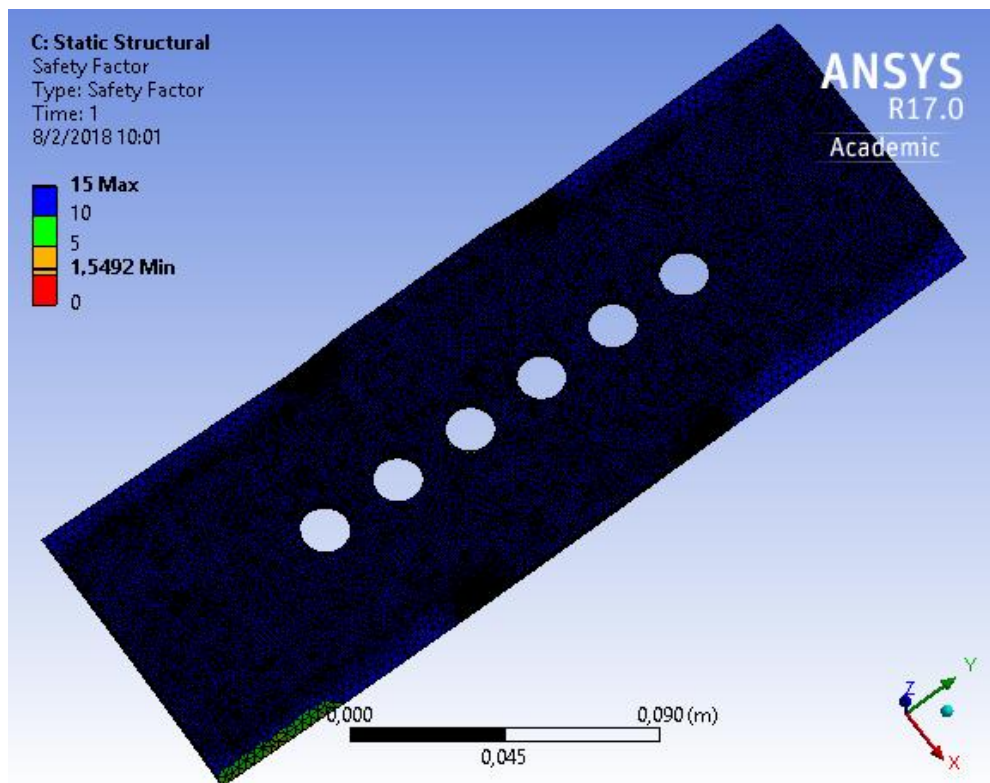
Figura 5. 16. Esfuerzo equivalente de Von Mises en la muestra 1 (Caso II).

Fuente: Elaboración Propia.



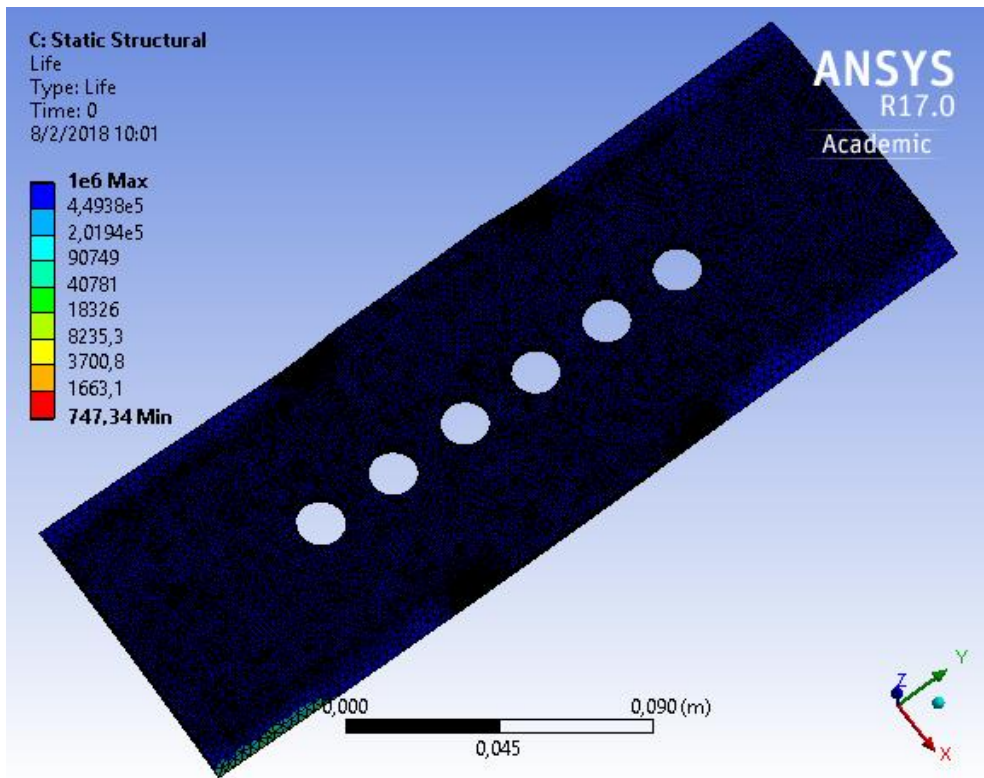
**Figura 5. 17. Deformación en la muestra 1 (Caso II).**

Fuente: Elaboración Propia.



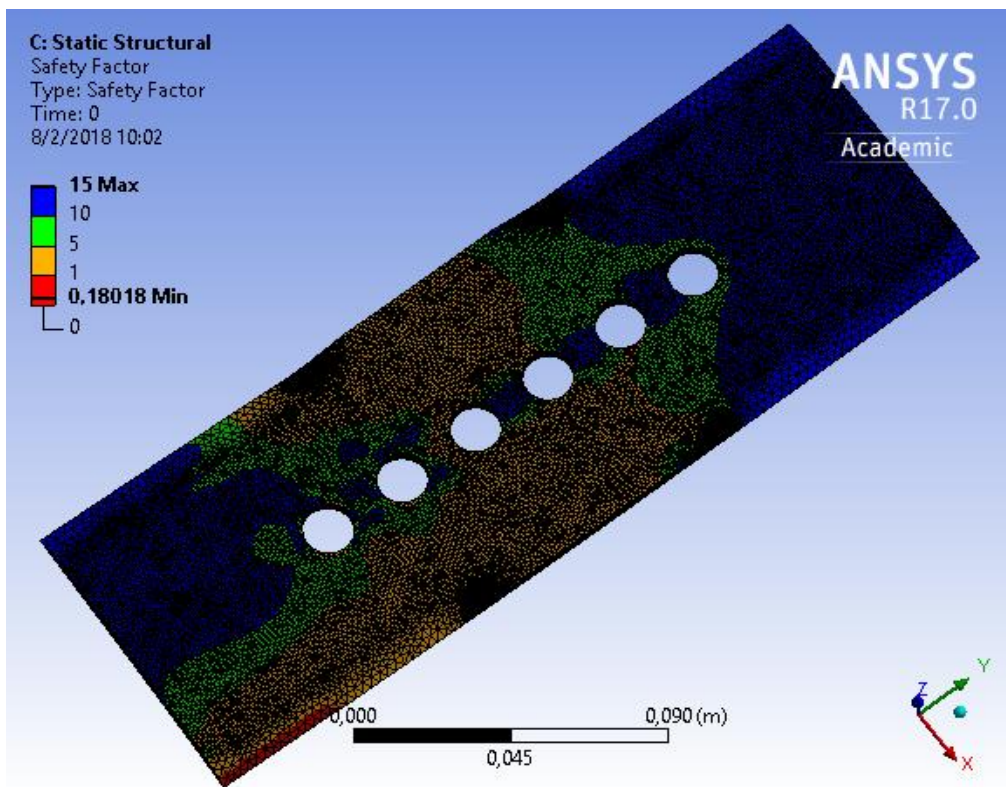
**Figura 5. 18. Factor de seguridad estático de la muestra 1 (Caso II).**

Fuente: Elaboración Propia.



**Figura 5. 19. Estimación de ciclos de trabajo de la muestra 1 (Caso II).**

Fuente: Elaboración Propia.



**Figura 5. 20. Factor de seguridad por fatiga de la muestra 1 (Caso II).**

Fuente: Elaboración Propia.

### CASO III: CORTE DE TRES CAÑAS.

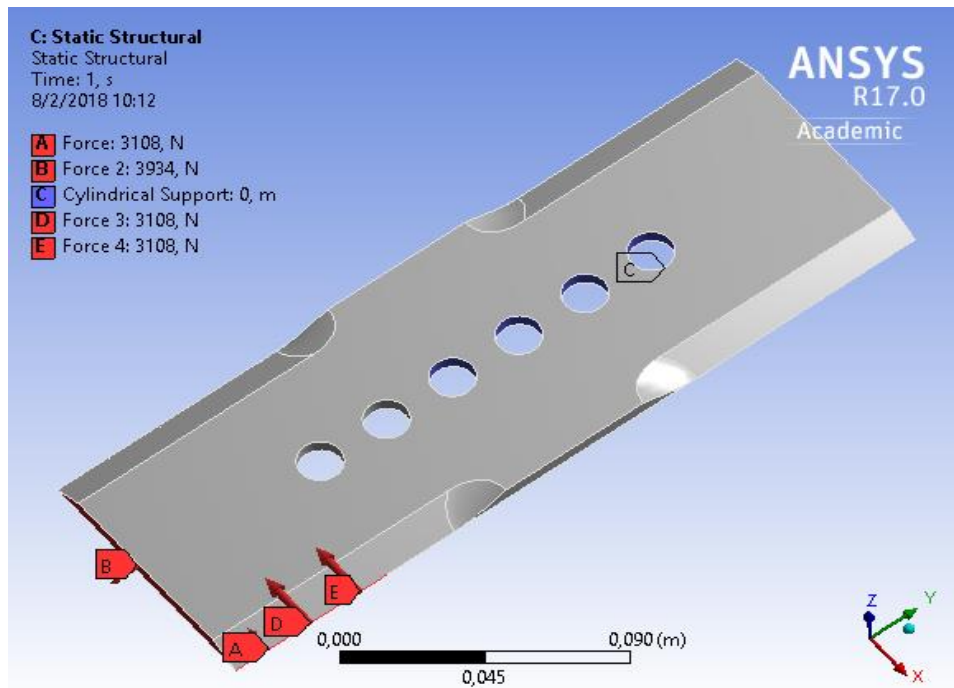


Figura 5. 21. Cargas y restricciones aplicadas al sistema - muestra 1 (Caso III).

Fuente: Elaboración Propia.

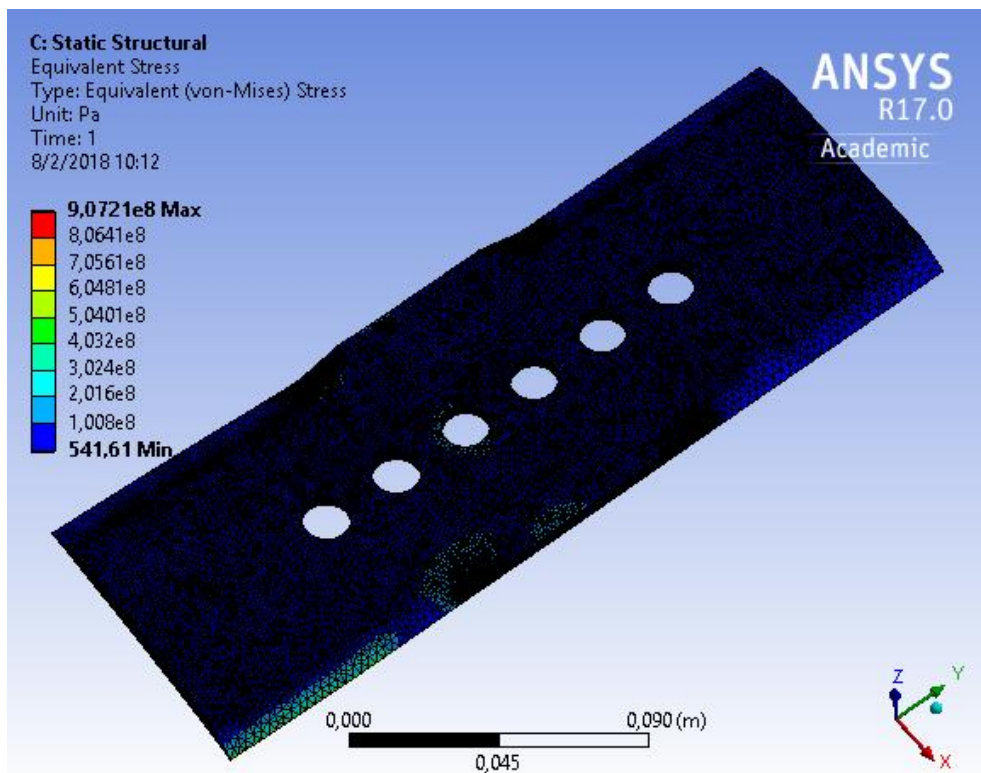
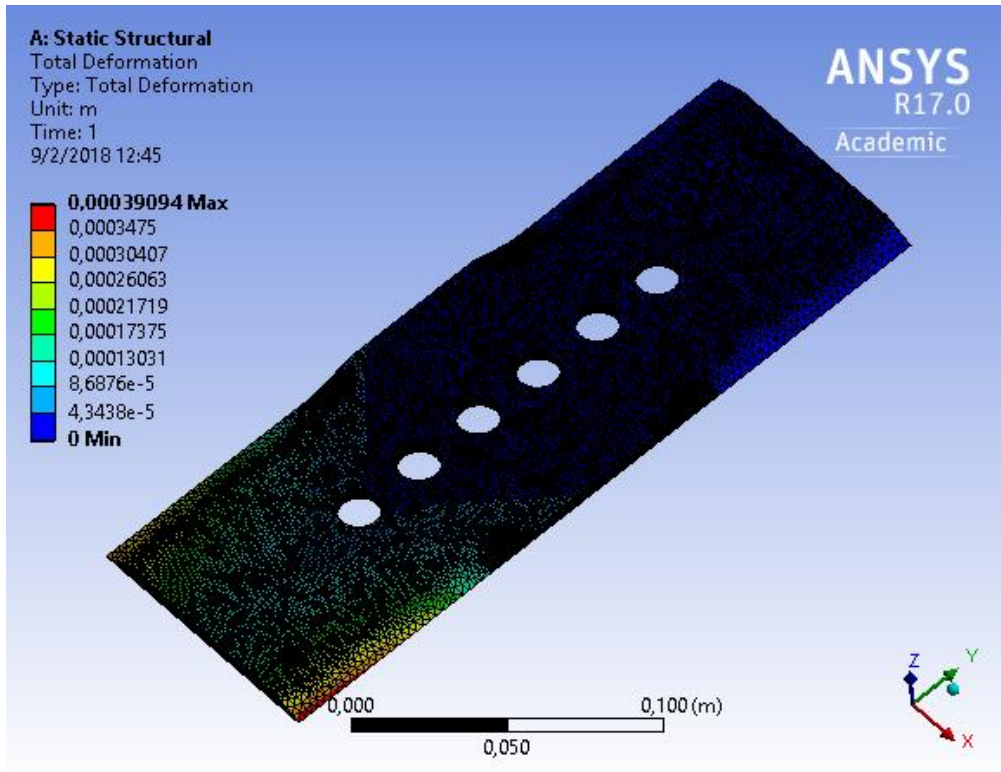


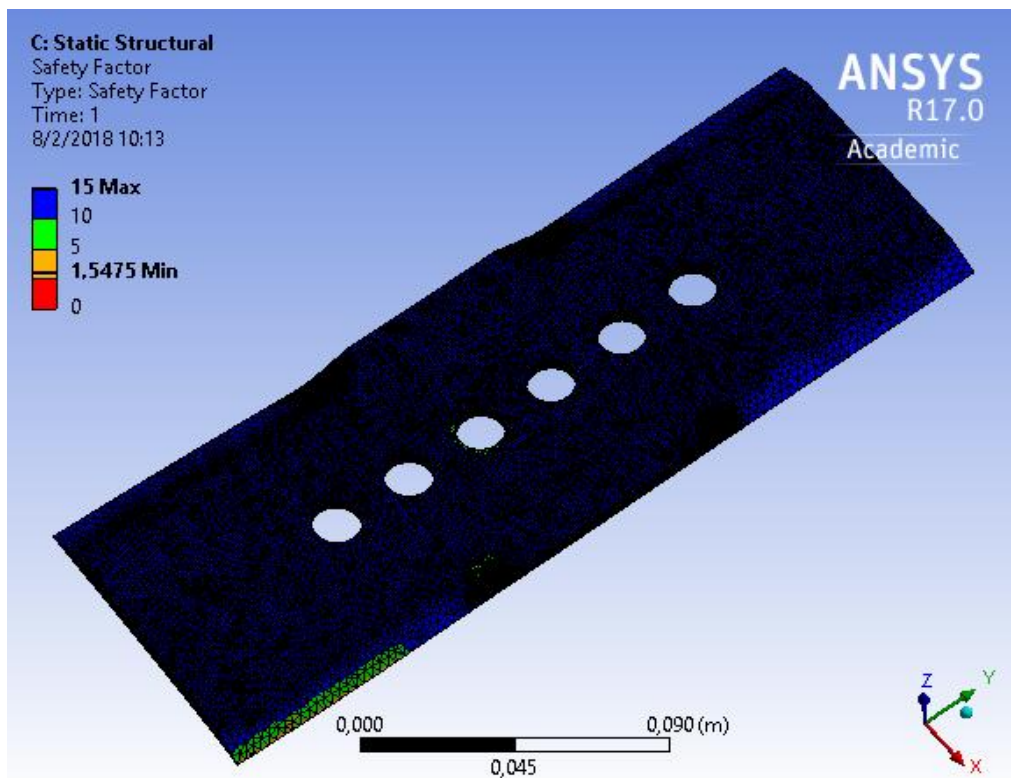
Figura 5. 22. Esfuerzo equivalente de Von Mises en la muestra 1 (Caso III).

Fuente: Elaboración Propia.



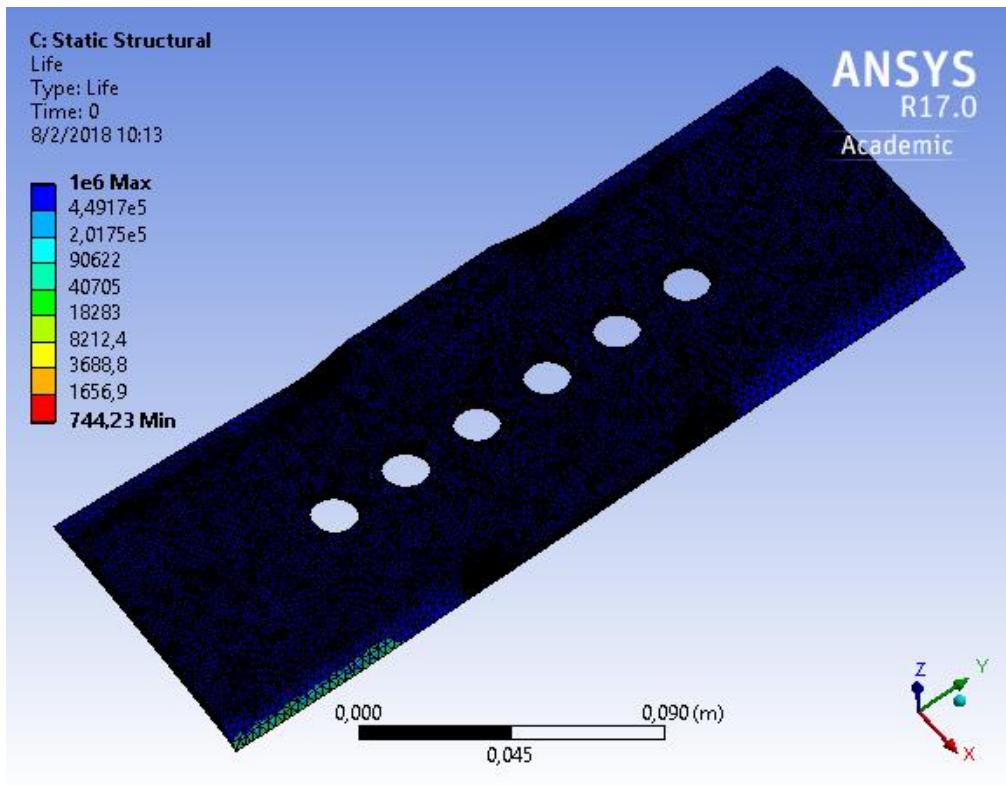
**Figura 5. 23. Deformación en la muestra 1 (Caso III).**

Fuente: Elaboración Propia.



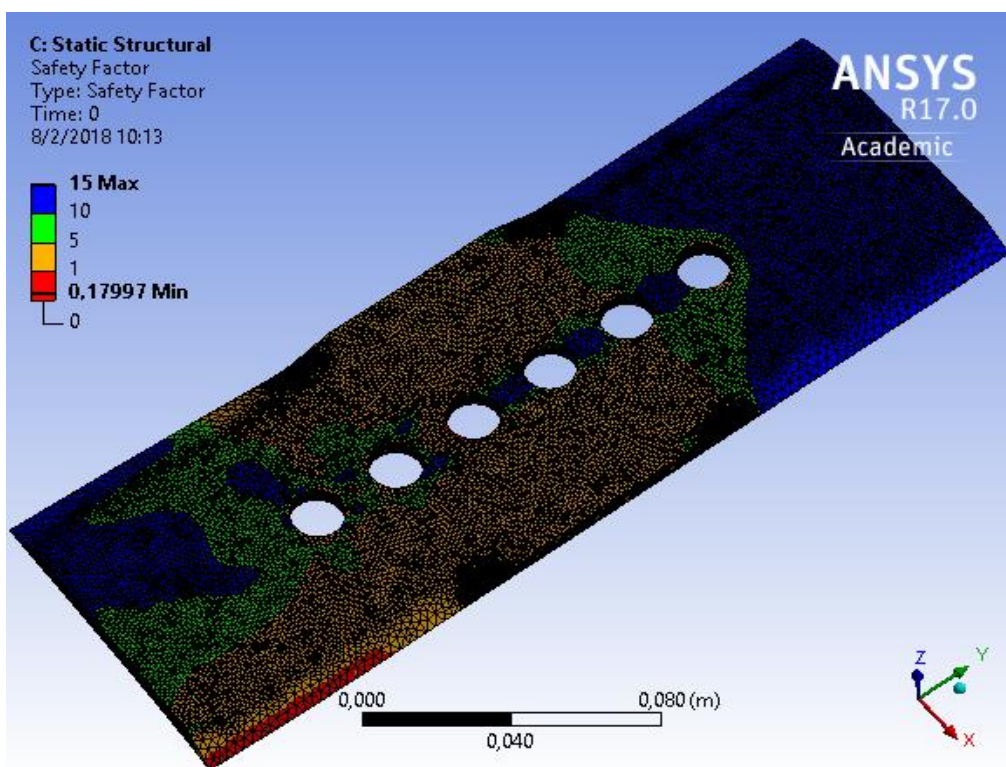
**Figura 5. 24. Factor de seguridad estático de la muestra 1 (Caso III).**

Fuente: Elaboración Propia.



**Figura 5. 25. Estimación de ciclos de trabajo de la muestra 1 (Caso III).**

Fuente: Elaboración Propia.



**Figura 5. 26. Factor de seguridad por fatiga de la muestra 1 (Caso III).**

Fuente: Elaboración Propia.

## CASO IV: CORTE DE CUATRO CAÑAS.

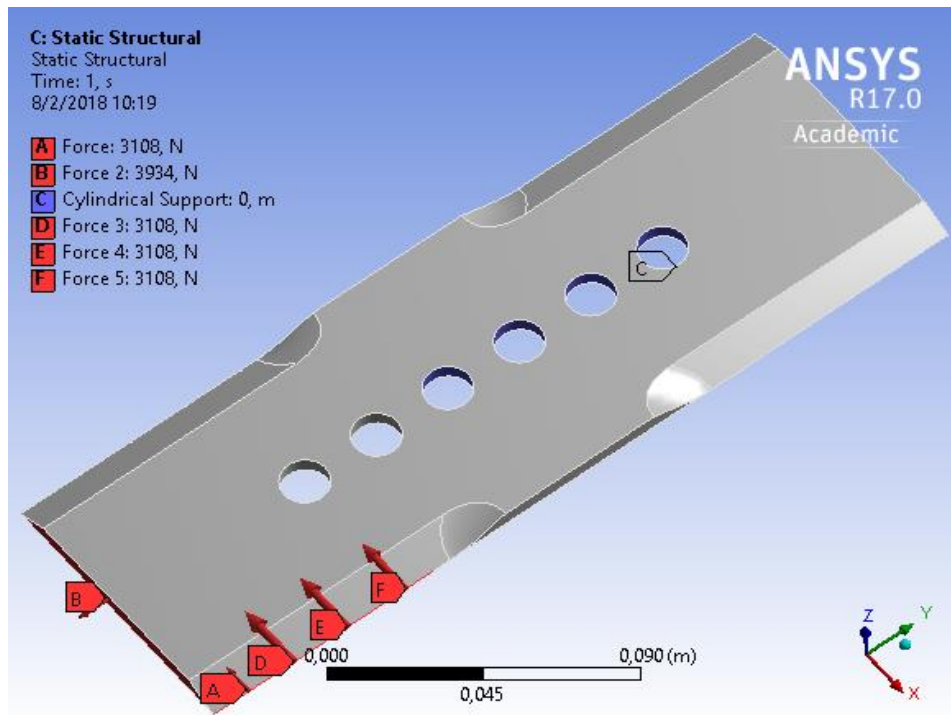


Figura 5. 27. Cargas y restricciones aplicadas al sistema - muestra 1 (Caso IV).

Fuente: Elaboración Propia.

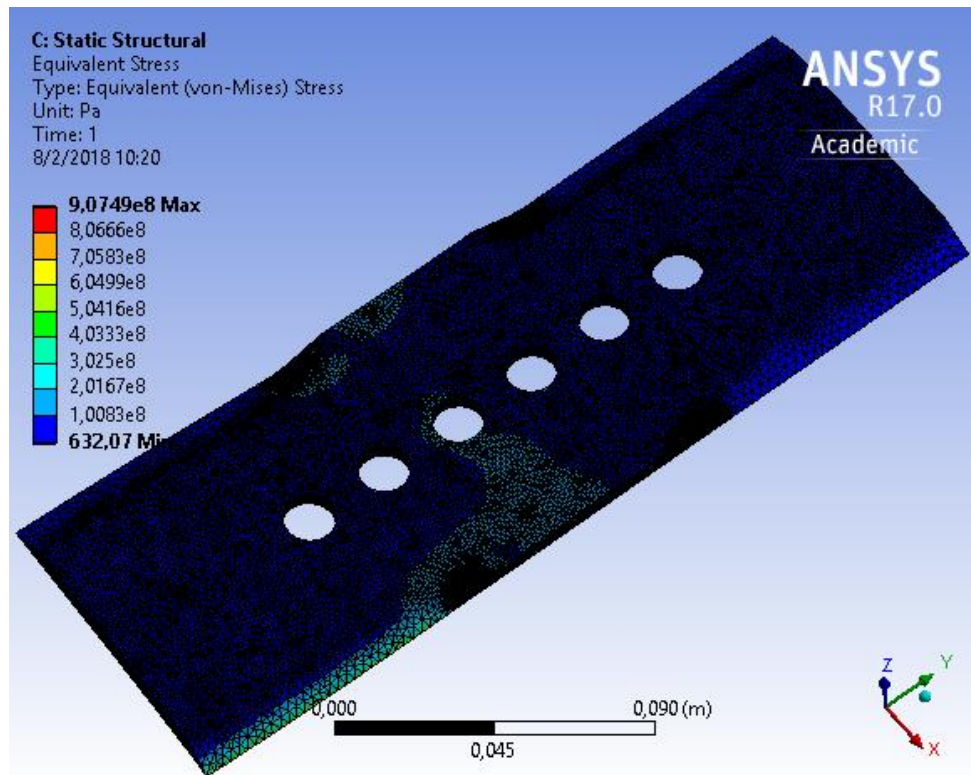
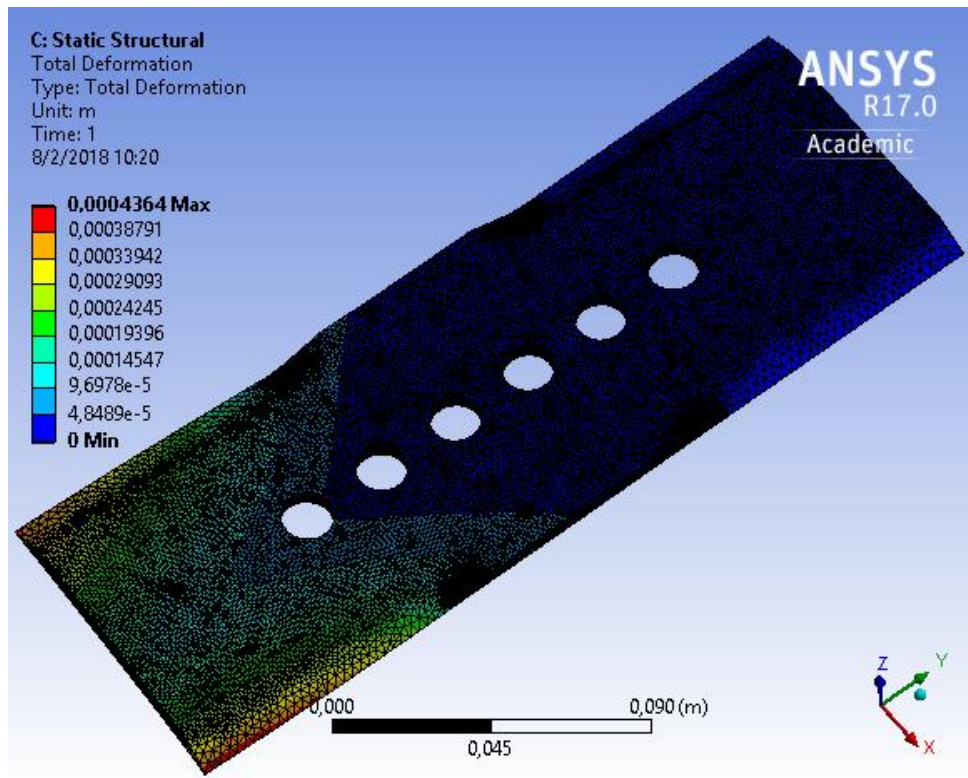


Figura 5. 28. Esfuerzo equivalente de Von Misses en la muestra 1 (Caso IV).

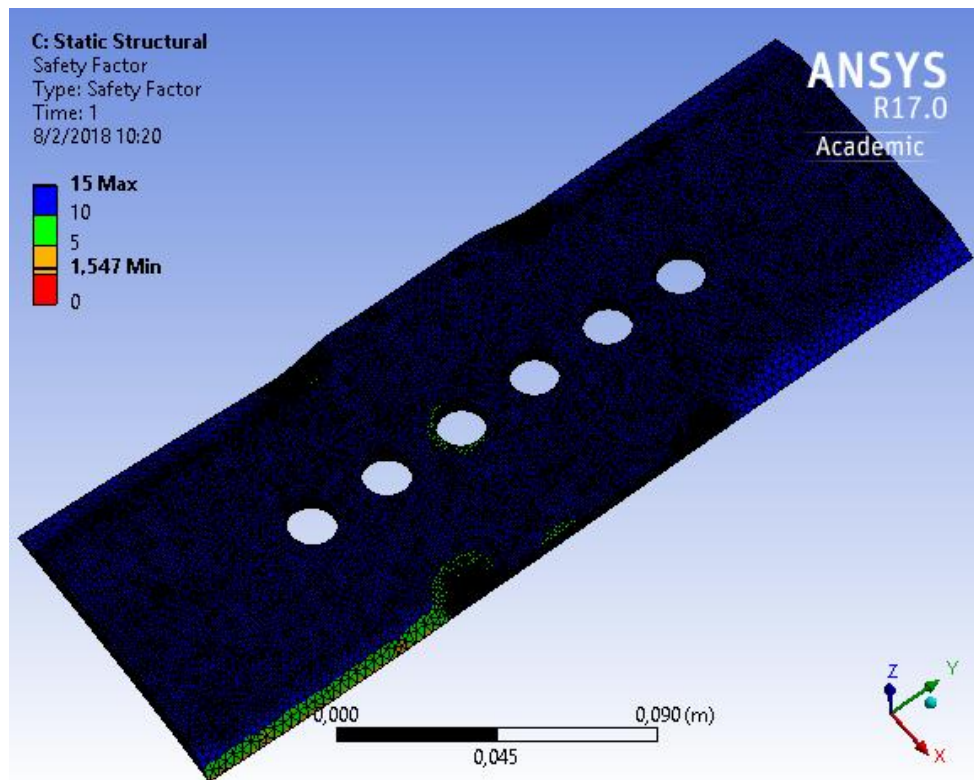
Fuente: Elaboración Propia.





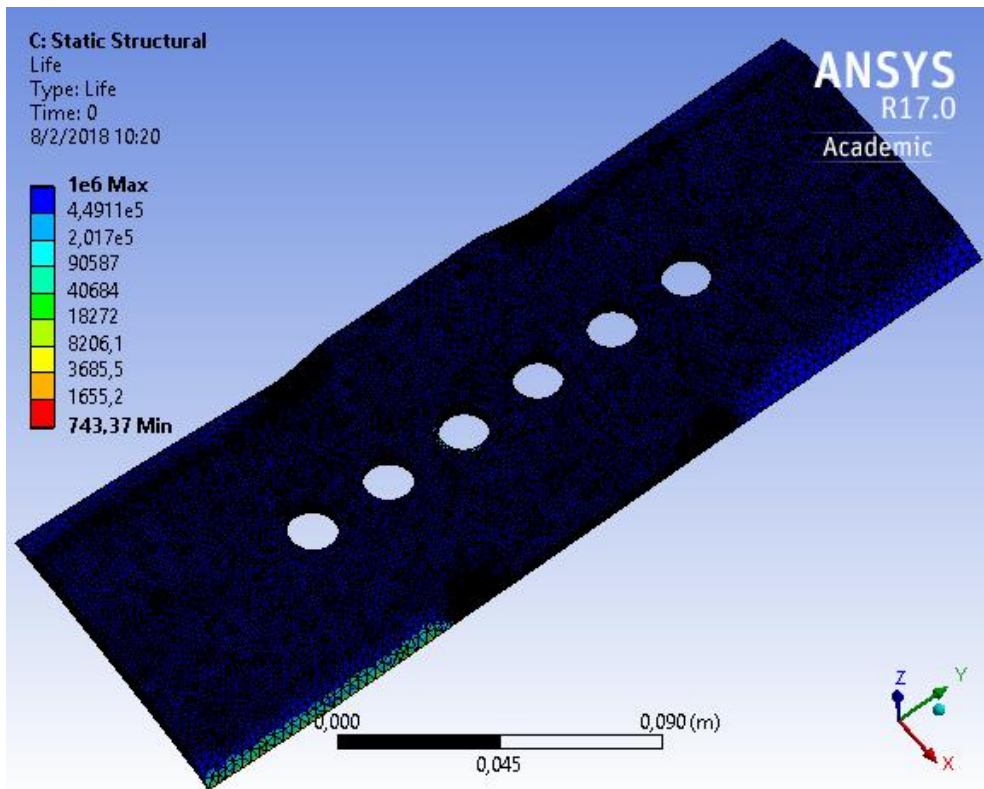
**Figura 5. 29. Deformación en la muestra 1 (Caso IV).**

Fuente: Elaboración Propia.



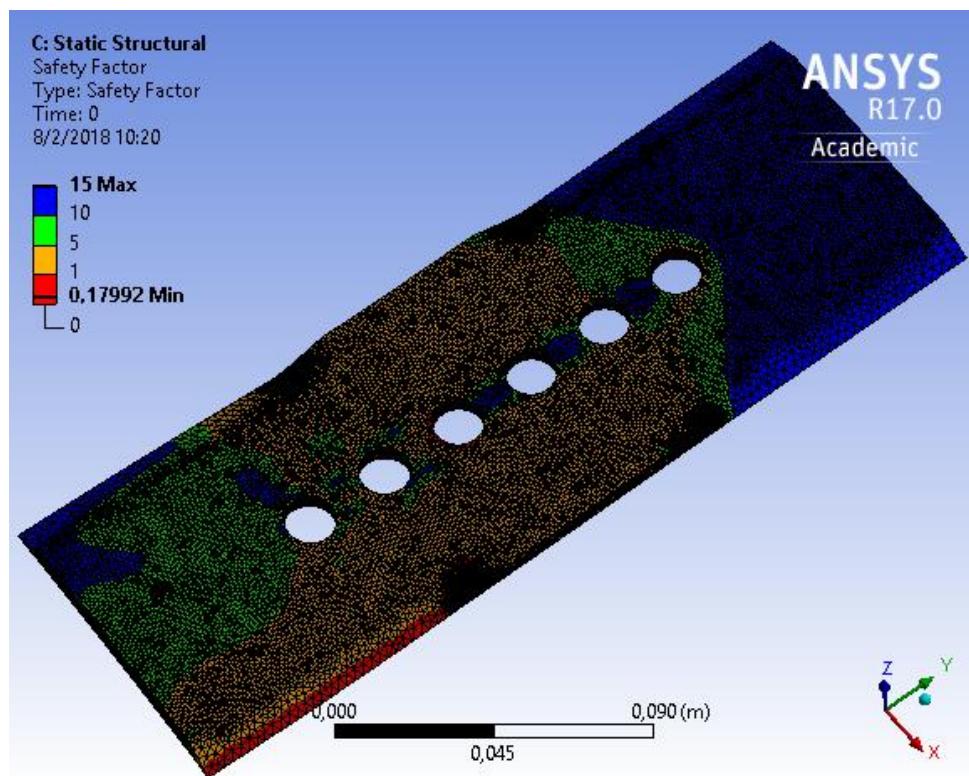
**Figura 5. 30. Factor de seguridad estático de la muestra 1 (Caso IV).**

Fuente: Elaboración Propia.



**Figura 5. 31. Estimación de ciclos de trabajo de la muestra 1 (Caso IV).**

Fuente: Elaboración Propia.



**Figura 5. 32. Factor de seguridad por fatiga de la muestra 1 (Caso IV).**

Fuente: Elaboración Propia.

## CASO V: CORTE DE UNA CAÑA E IMPACTANDO UNA PIEDRA

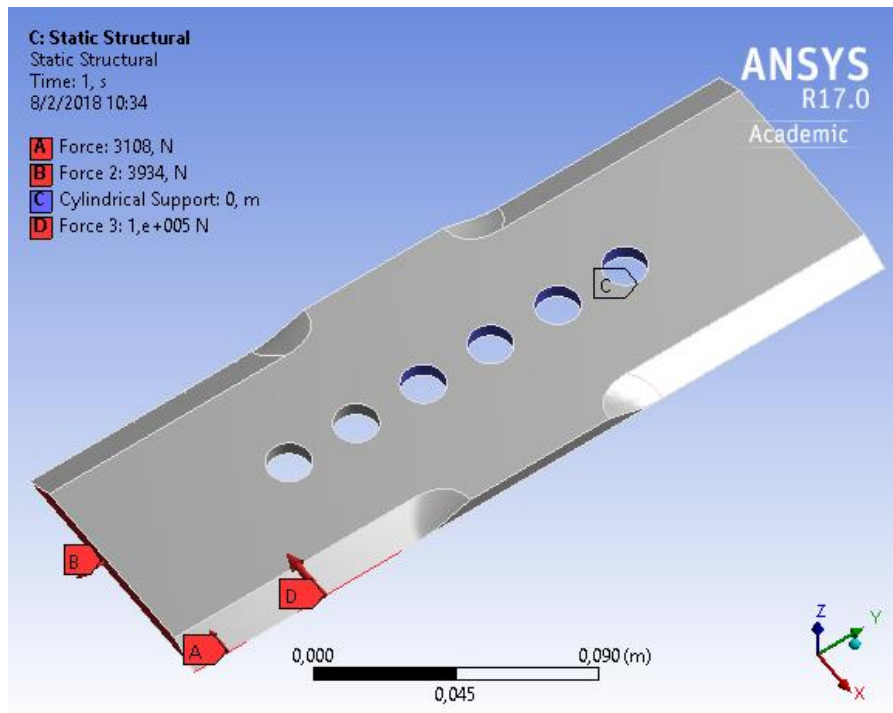


Figura 5. 33. Cargas y restricciones aplicadas al sistema - muestra 1 (Caso V).

Fuente: Elaboración Propia.

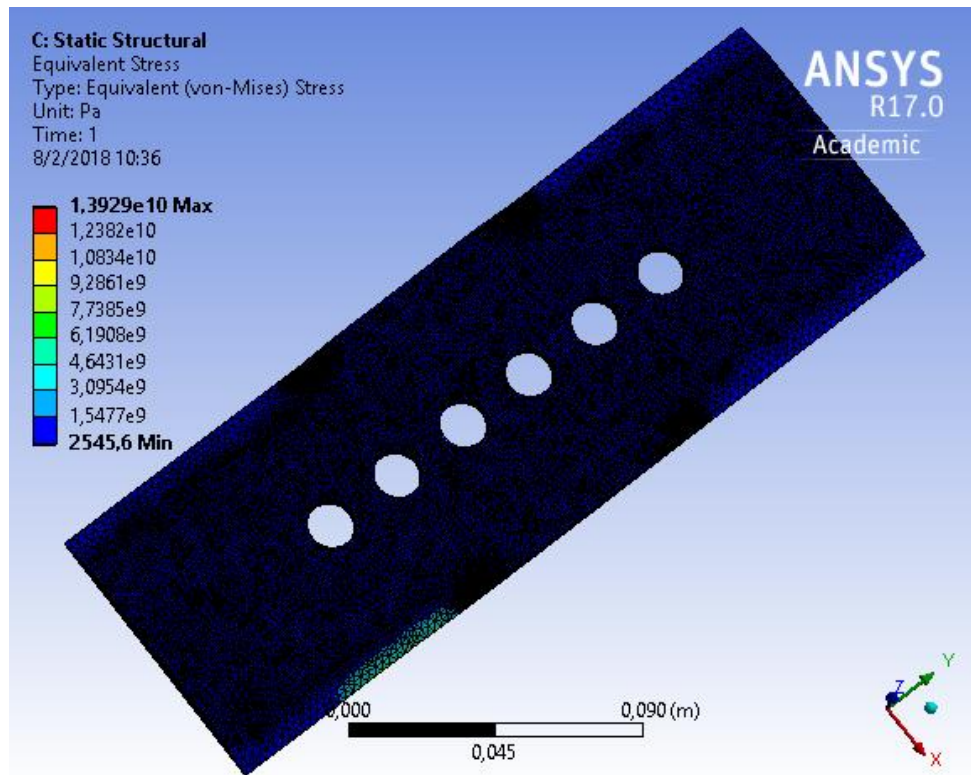
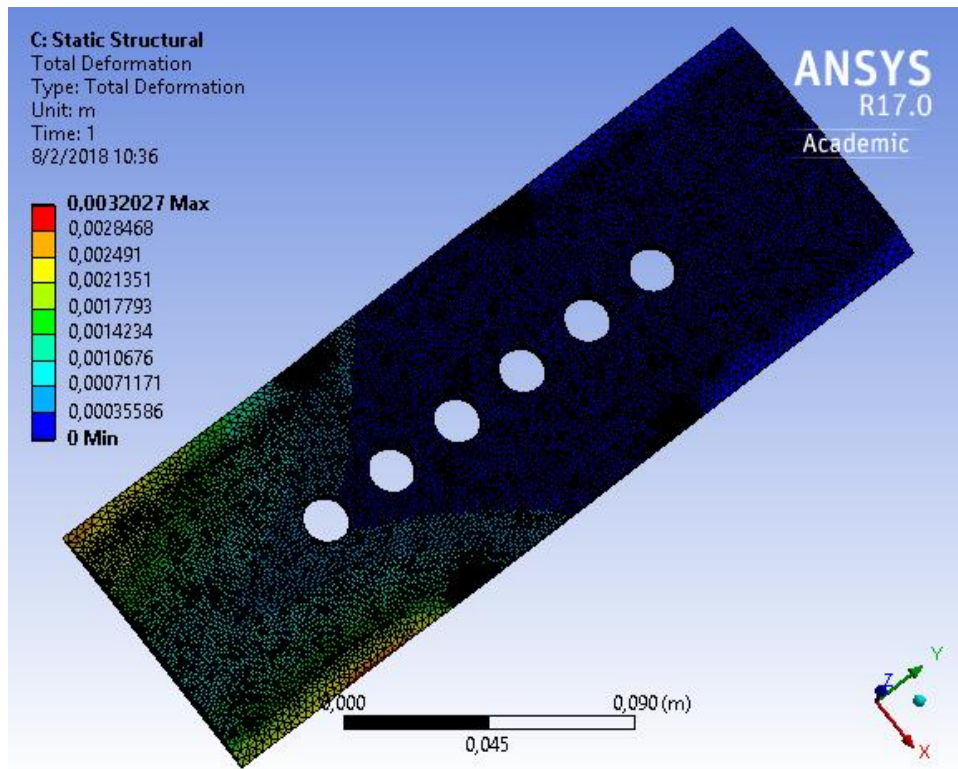


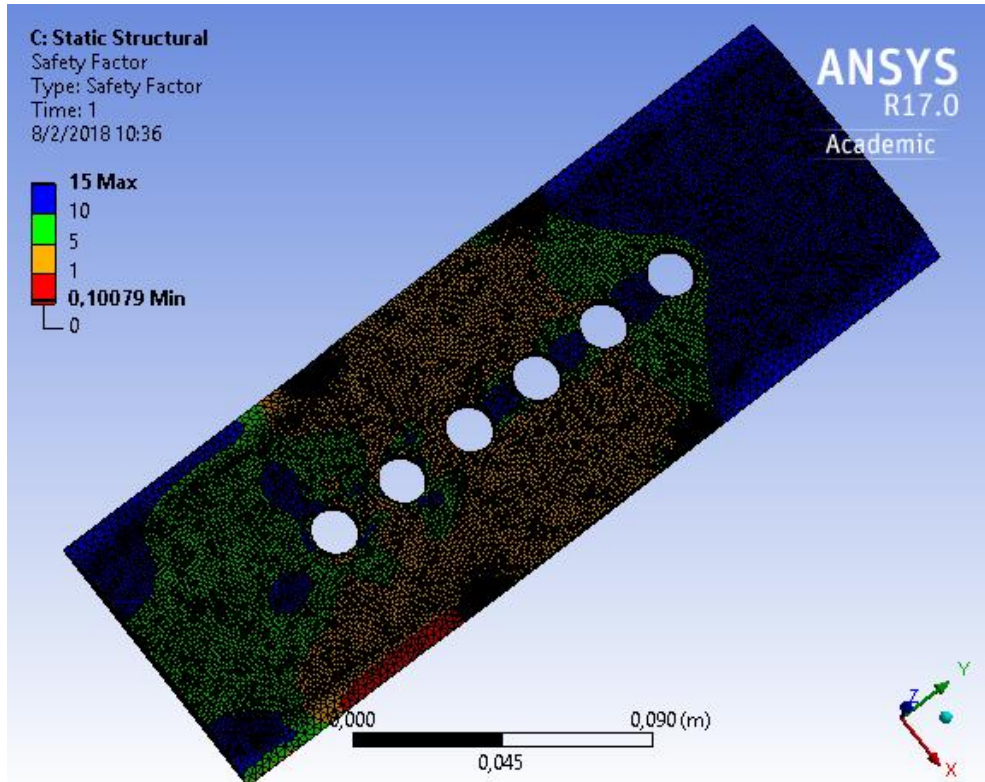
Figura 5. 34. Esfuerzo equivalente de Von Mises en la muestra 1 (Caso V).

Fuente: Elaboración Propia.



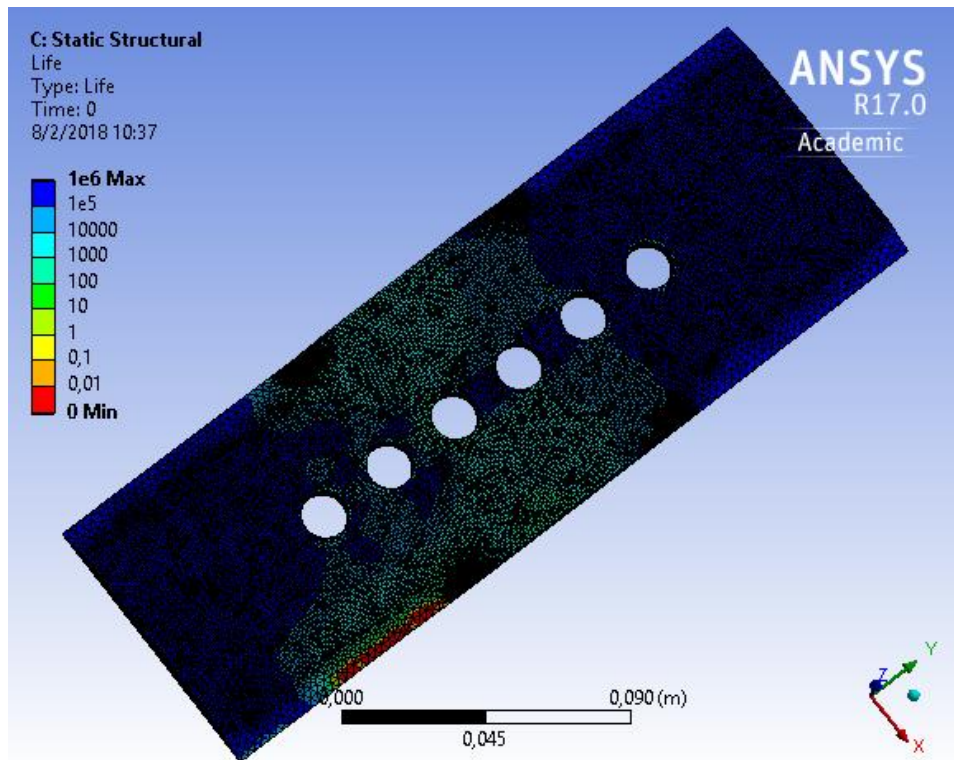
**Figura 5. 35. Deformación en la muestra 1 (Caso V).**

Fuente: Elaboración Propia.



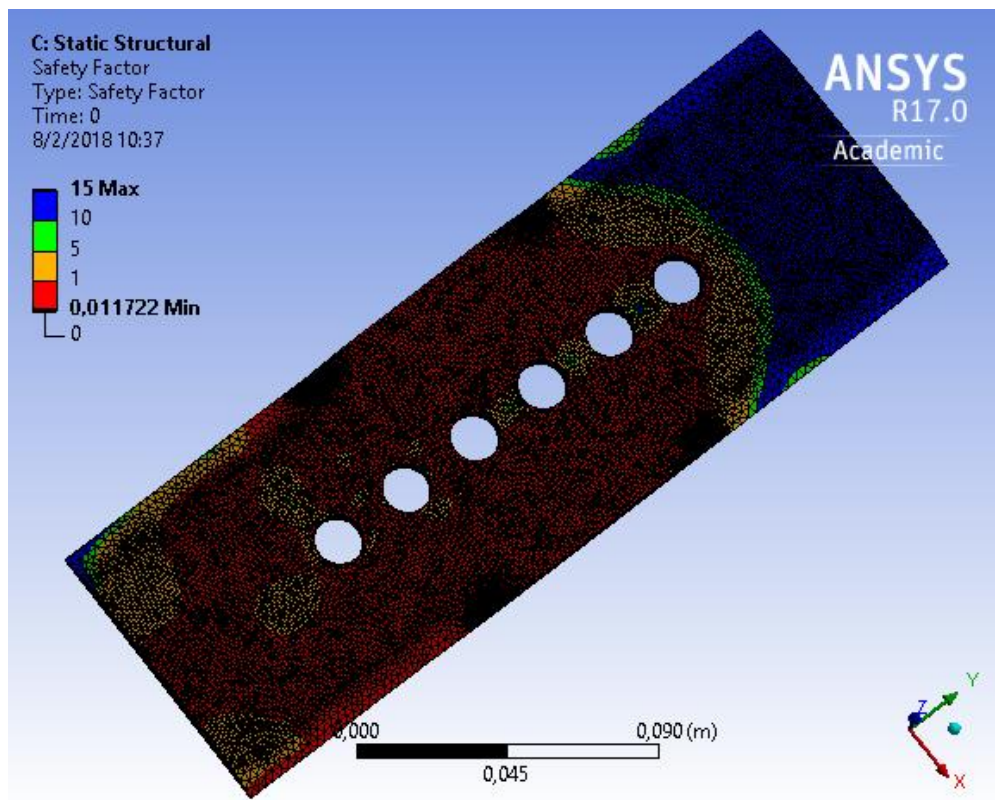
**Figura 5. 36. Factor de seguridad estático de la muestra 1 (Caso V).**

Fuente: Elaboración Propia.



**Figura 5. 37. Estimación de ciclos de trabajo de la muestra 1 (Caso V).**

Fuente: Elaboración Propia.



**Figura 5. 38. Factor de seguridad por fatiga de la muestra 1 (Caso V).**

Fuente: Elaboración Propia.

## CASO VI: IMPACTO DE UNA PIEDRA

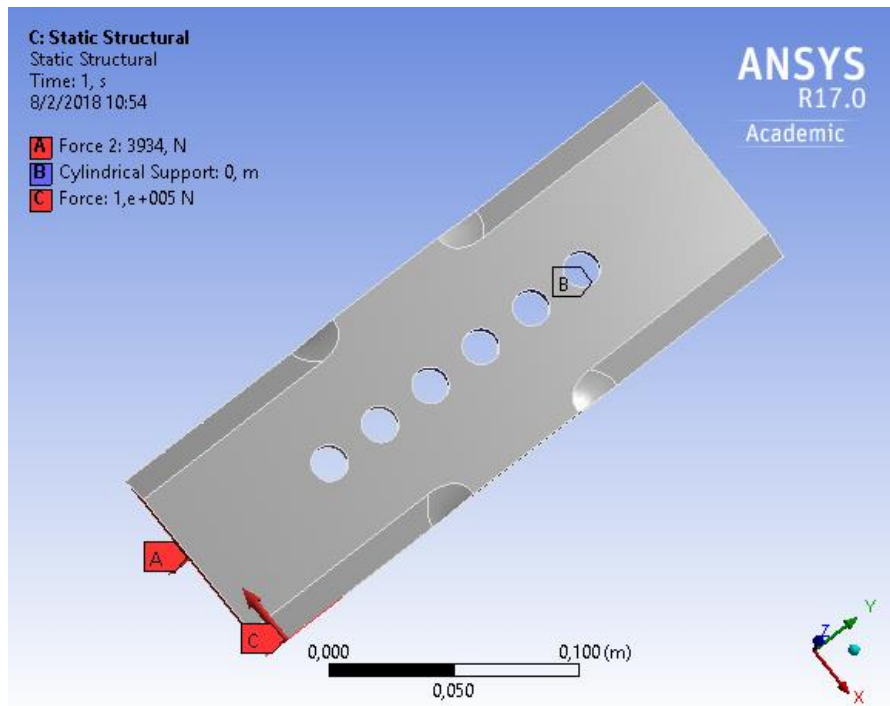


Figura 5. 39. Cargas y restricciones aplicadas al sistema - muestra 1 (Caso VI).

Fuente: Elaboración Propia.

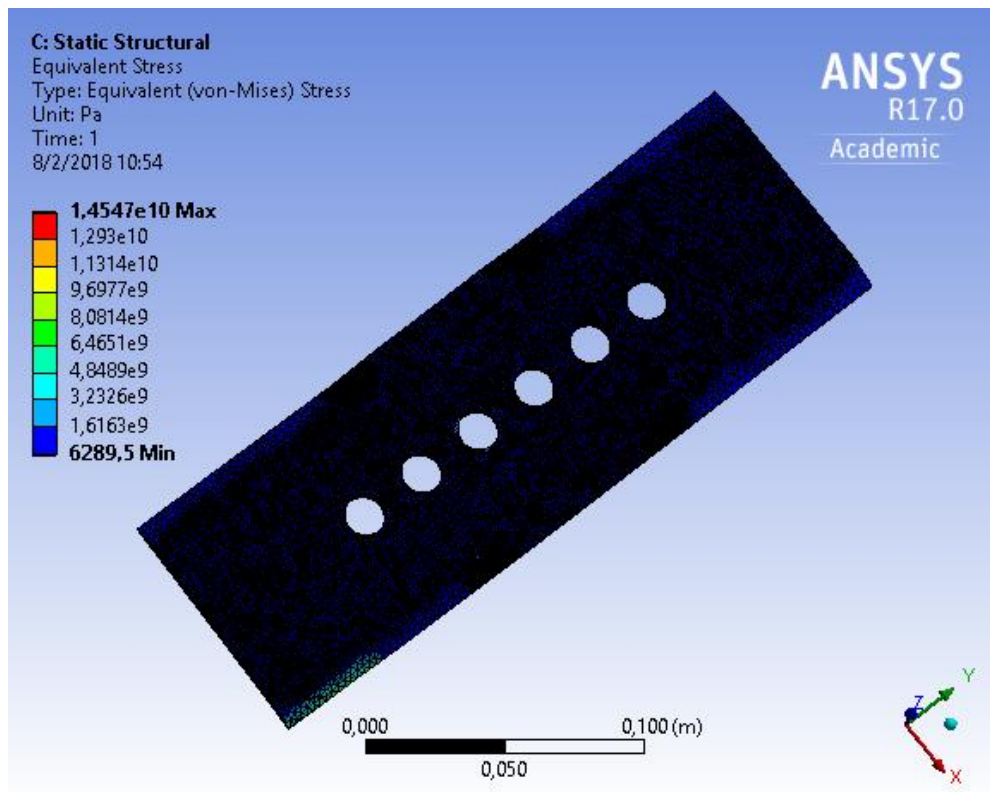
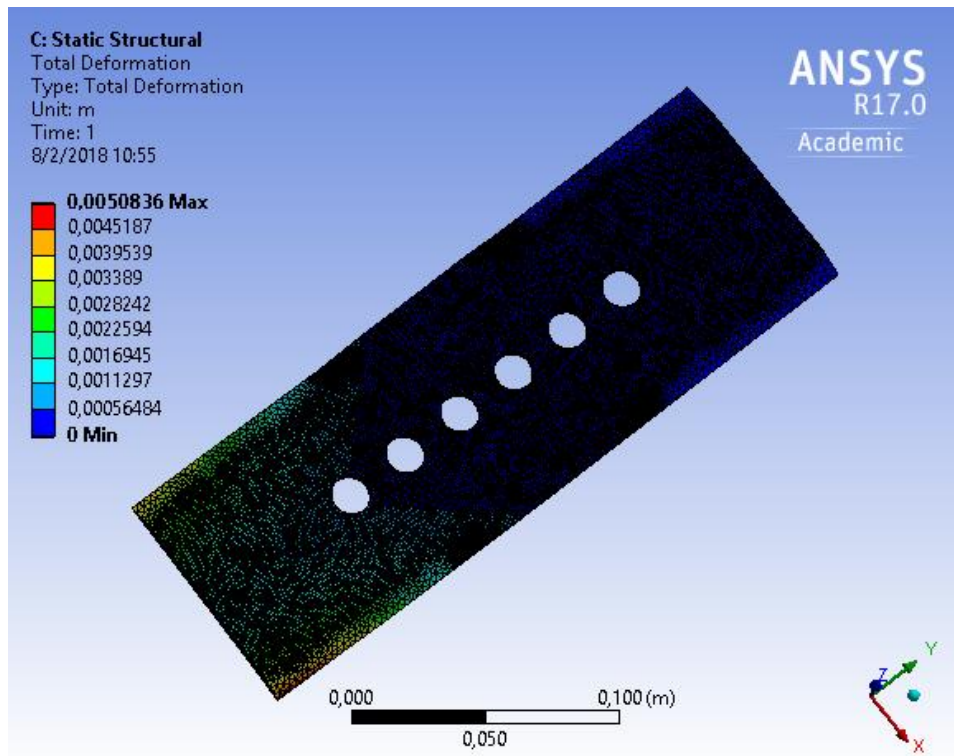


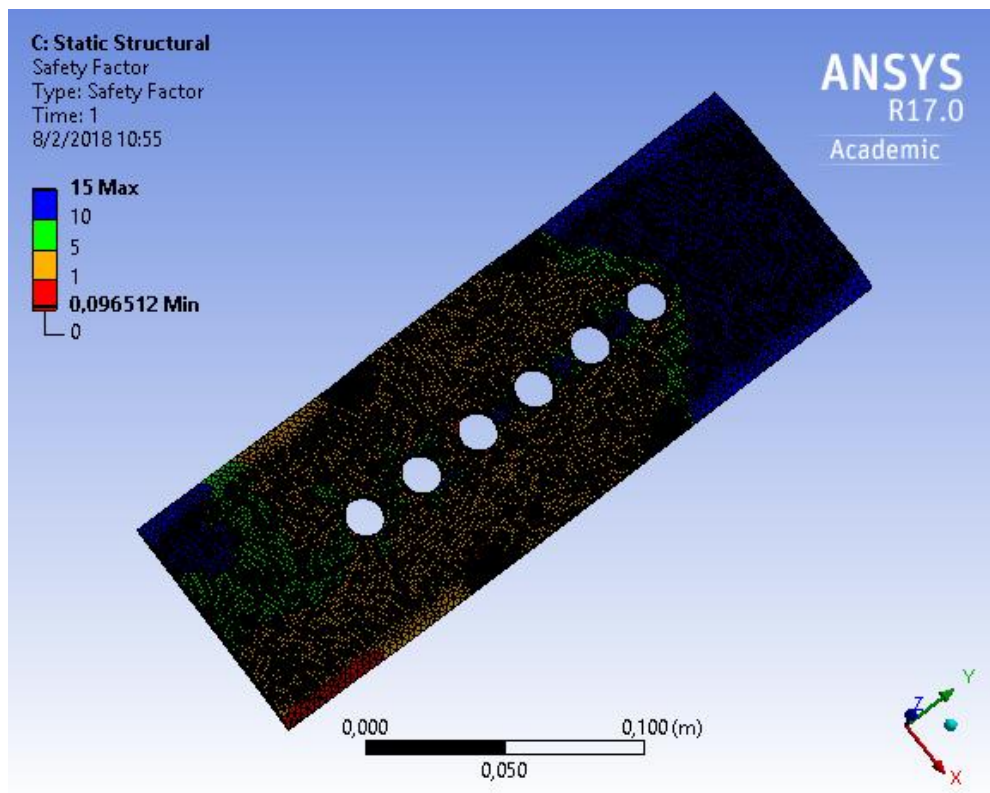
Figura 5. 40. Esfuerzo equivalente de Von Mises en la muestra 1 (Caso VI).

Fuente: Elaboración Propia.



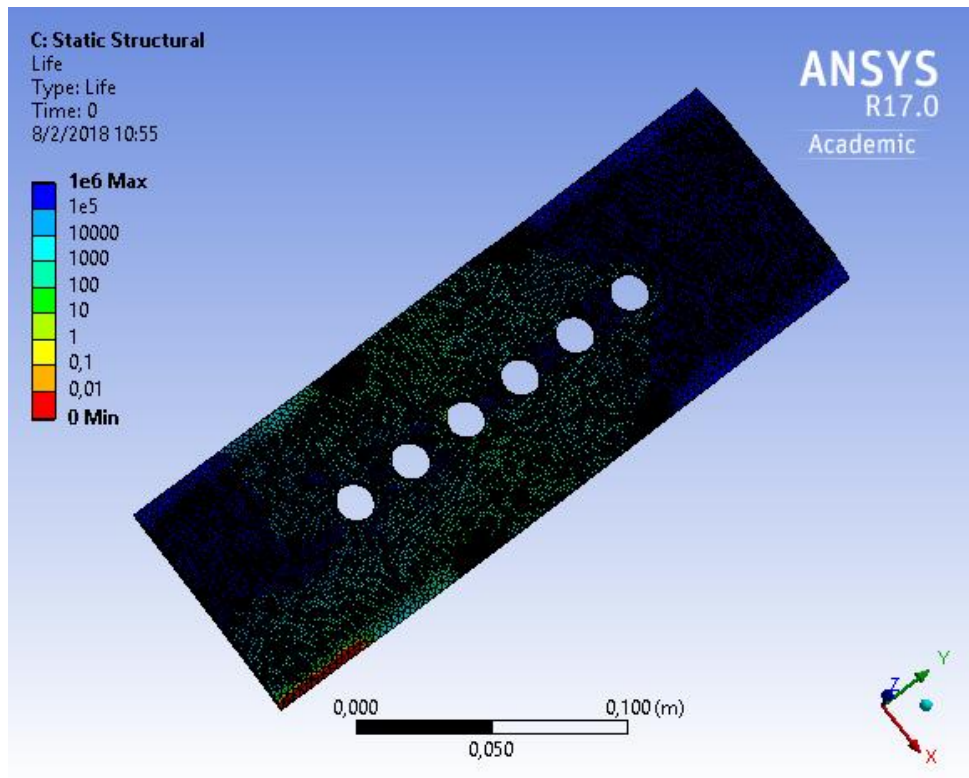
**Figura 5. 41. Deformación en la muestra 1 (Caso VI).**

Fuente: Elaboración Propia.



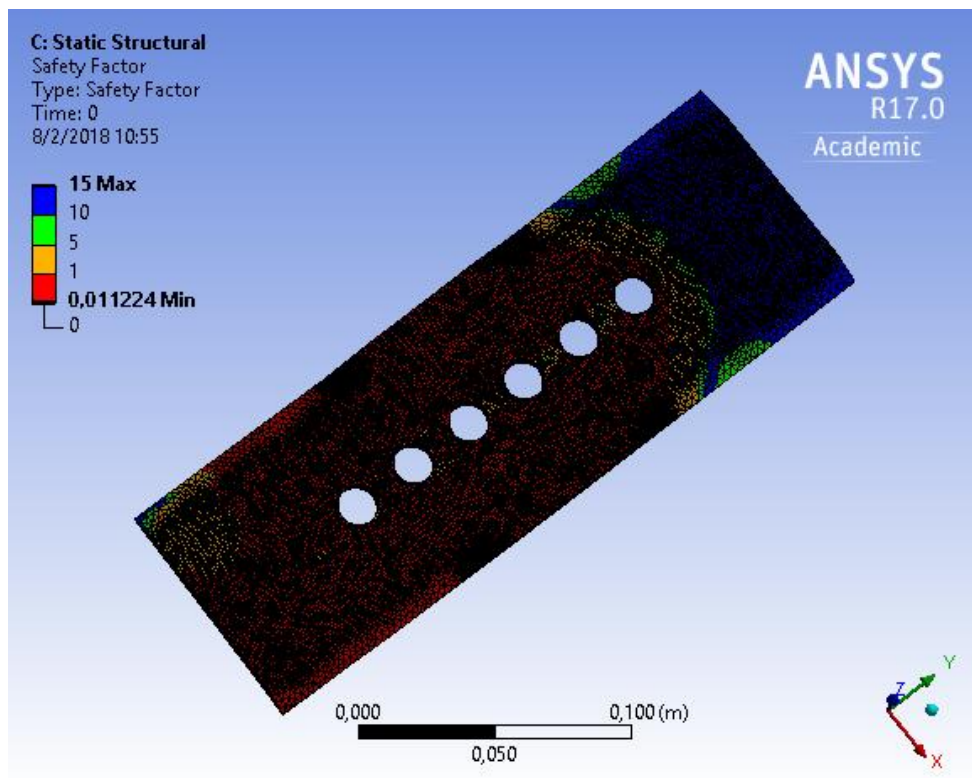
**Figura 5. 42. Factor de seguridad estático de la muestra 1 (Caso VI).**

Fuente: Elaboración Propia.



**Figura 5. 43. Estimación de ciclos de trabajo de la muestra 1 (Caso VI).**

Fuente: Elaboración Propia.



**Figura 5. 44. Factor de seguridad por fatiga de la muestra 1 (Caso VI).**

Fuente: Elaboración Propia.



## CASO VII: IMPACTO DE DOS PIEDRAS.

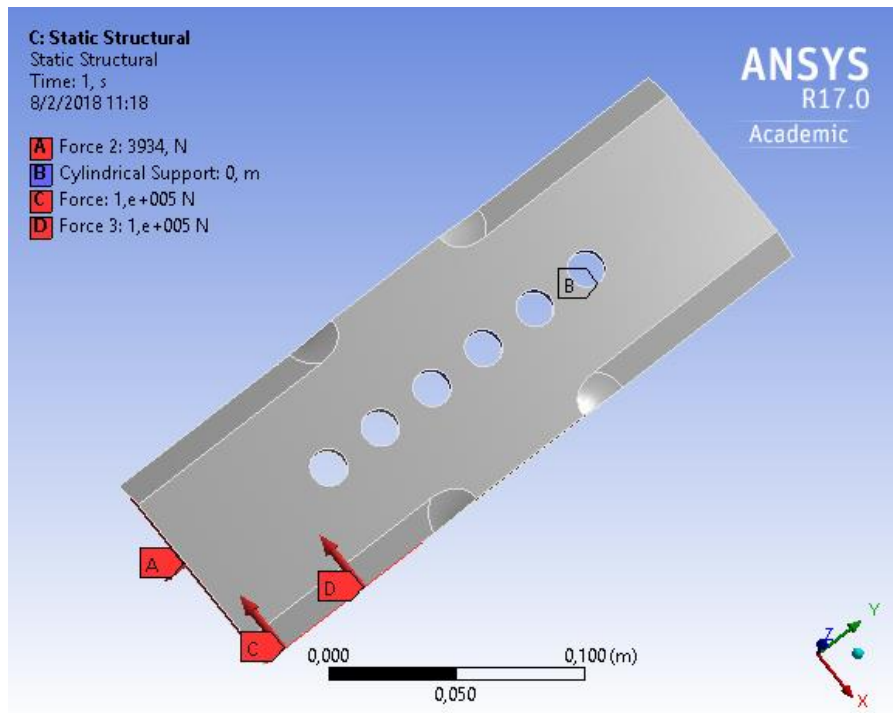


Figura 5. 45. Cargas y restricciones aplicadas al sistema - muestra 1 (Caso VII).

Fuente: Elaboración Propia.

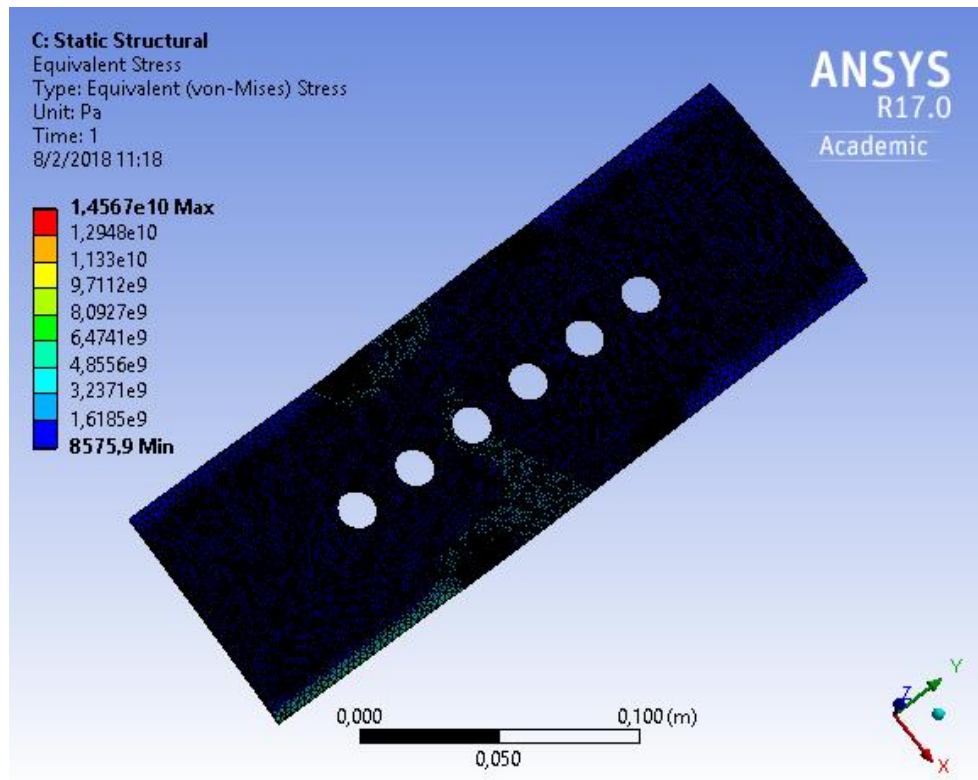
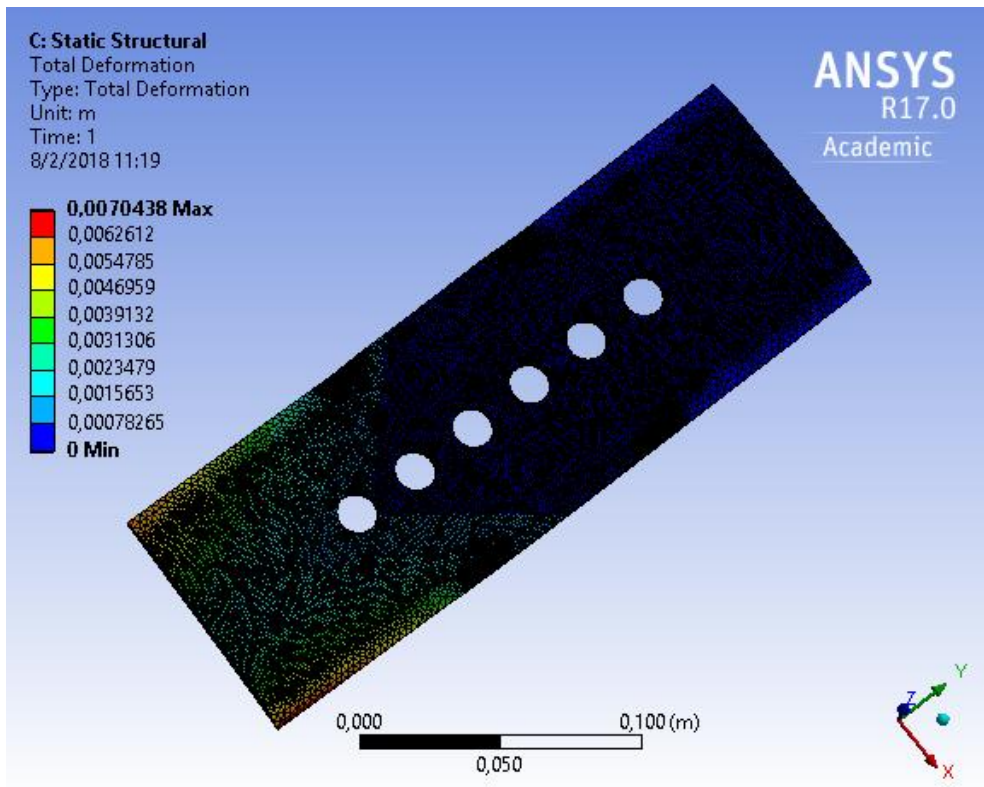


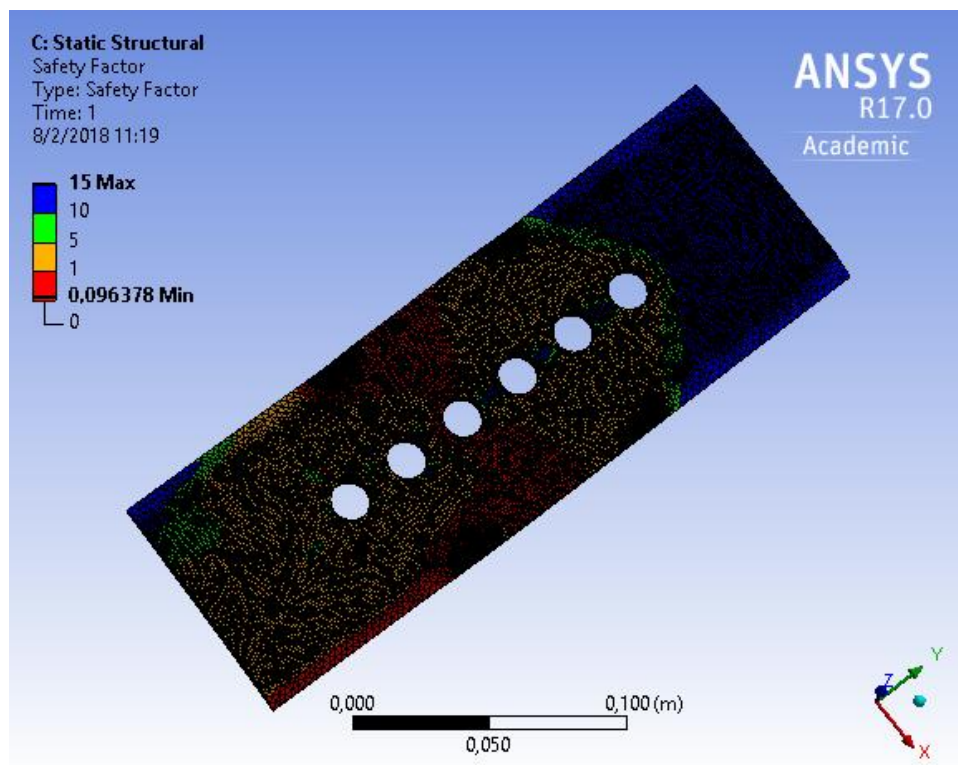
Figura 5. 46. Esfuerzo equivalente de Von Mises en la muestra 1 (Caso VII).

Fuente: Elaboración Propia.



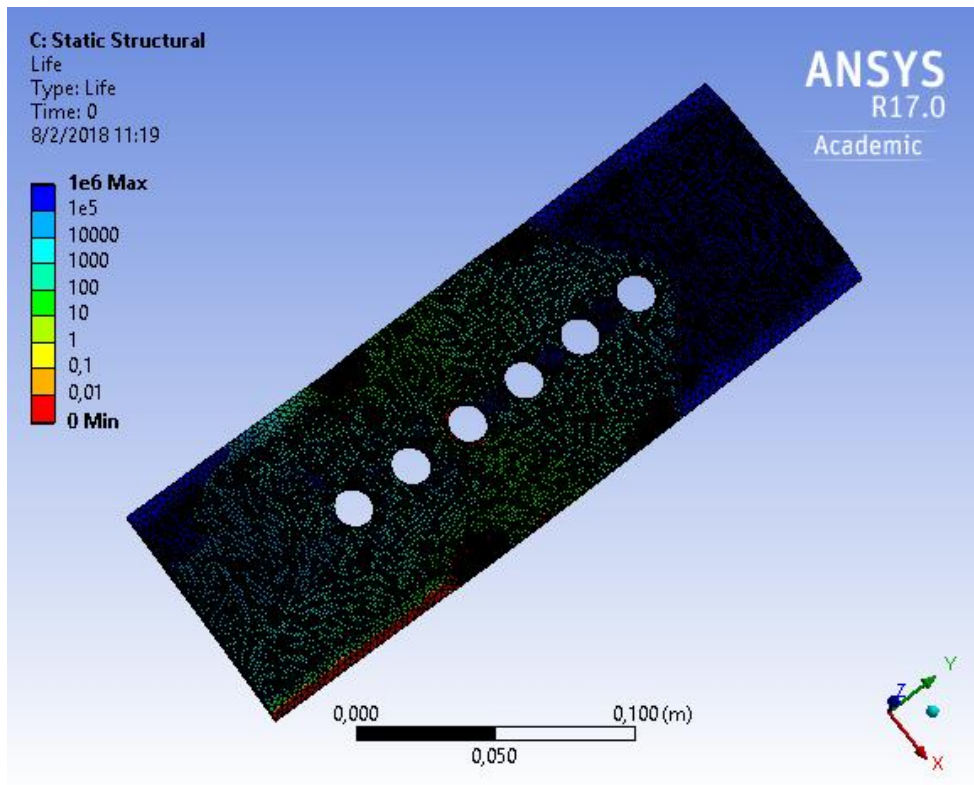
**Figura 5. 47. Deformación en la muestra 1 (Caso VII).**

Fuente: Elaboración Propia.



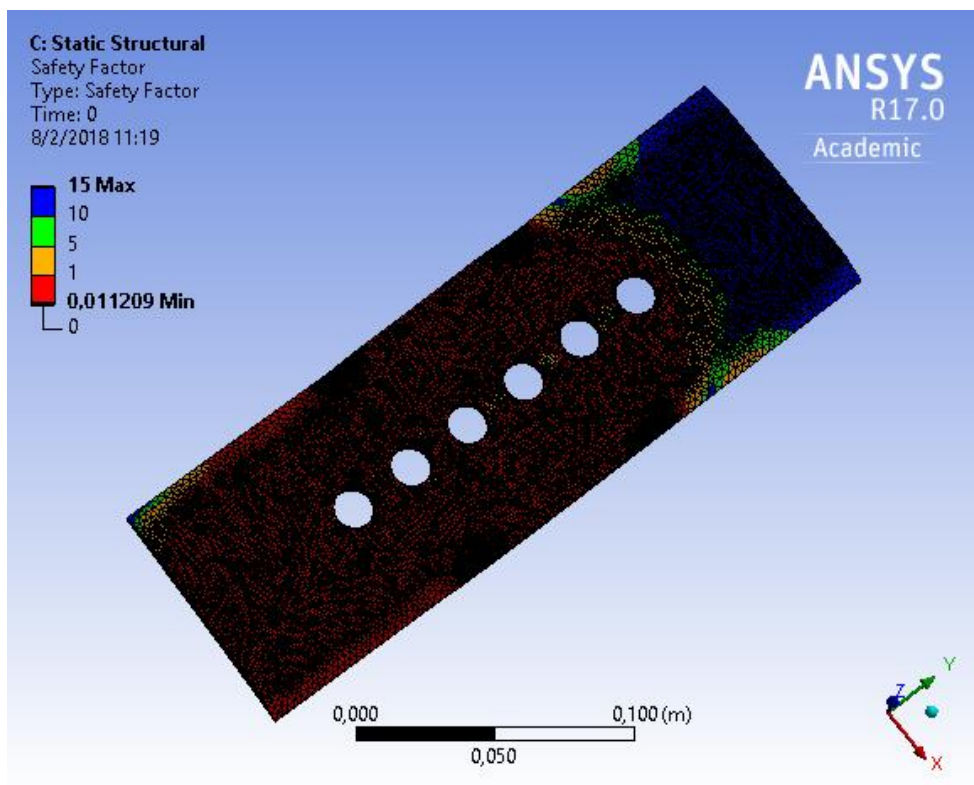
**Figura 5. 48. Factor de seguridad estático de la muestra 1 (Caso VII).**

Fuente: Elaboración Propia.



**Figura 5. 49. Estimación de ciclos de trabajo de la muestra 1 (Caso VII).**

Fuente: Elaboración Propia.



**Figura 5. 50. Factor de seguridad por fatiga de la muestra 1 (Caso VII).**

Fuente: Elaboración Propia.

## MUESTRA 2

### CASO I: CORTE DE UNA CAÑA.

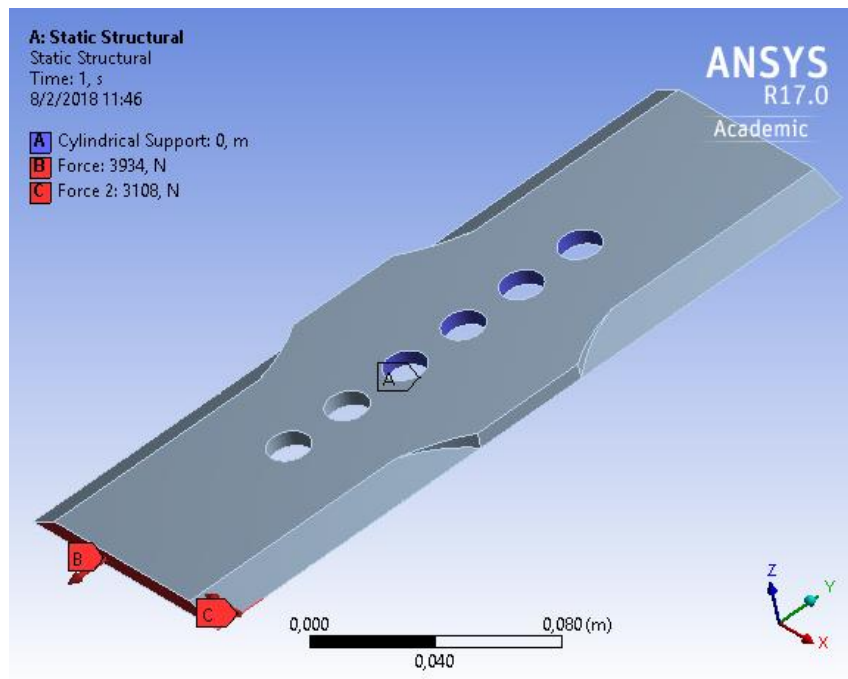


Figura 5. 51. Cargas y restricciones aplicadas al sistema - muestra 2 (Caso I).

Fuente: Elaboración Propia.

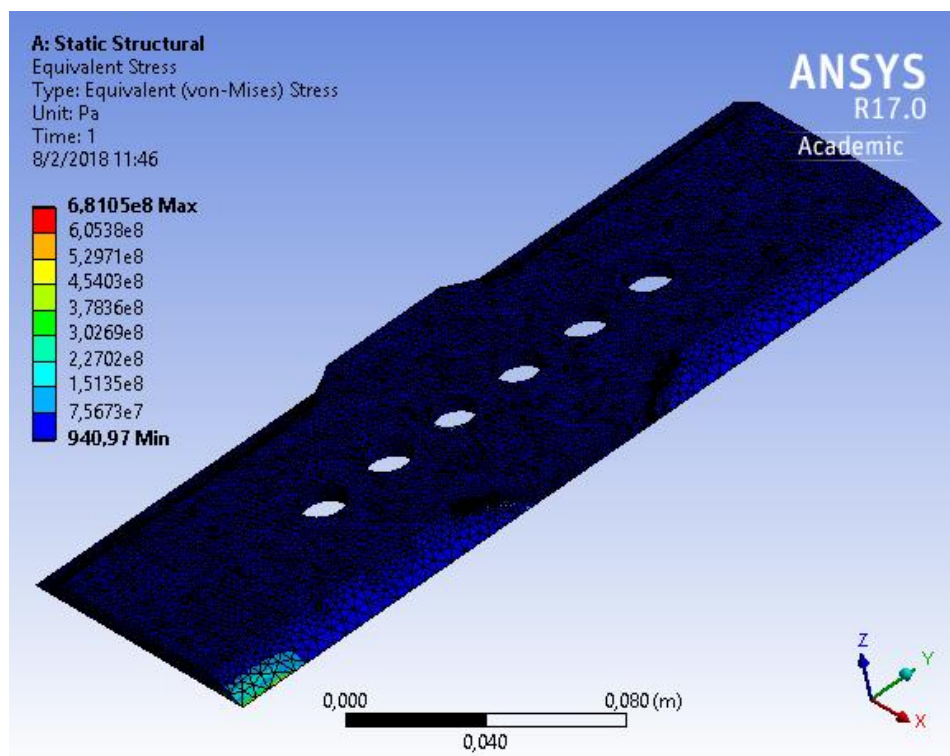
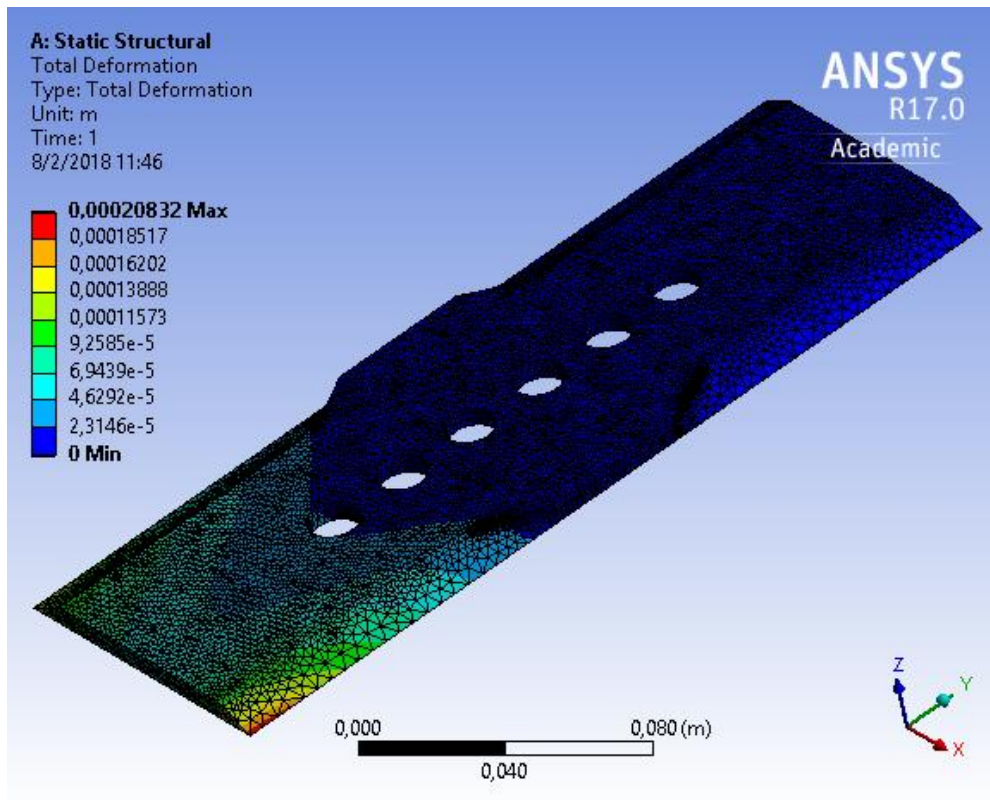


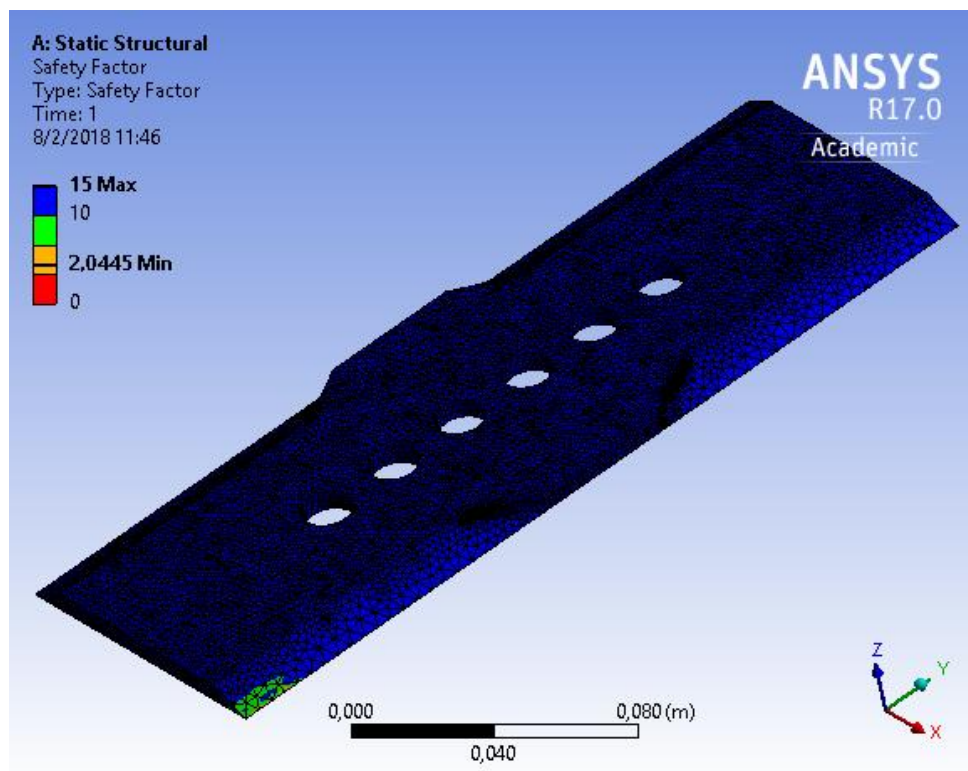
Figura 5. 52. Esfuerzo equivalente de Von Mises en la muestra 2 (Caso I).

Fuente: Elaboración Propia.



**Figura 5. 53. Deformación en la muestra 2 (Caso I).**

Fuente: Elaboración Propia.



**Figura 5. 54. Factor de seguridad estático de la muestra 2 (Caso I).**

Fuente: Elaboración Propia.

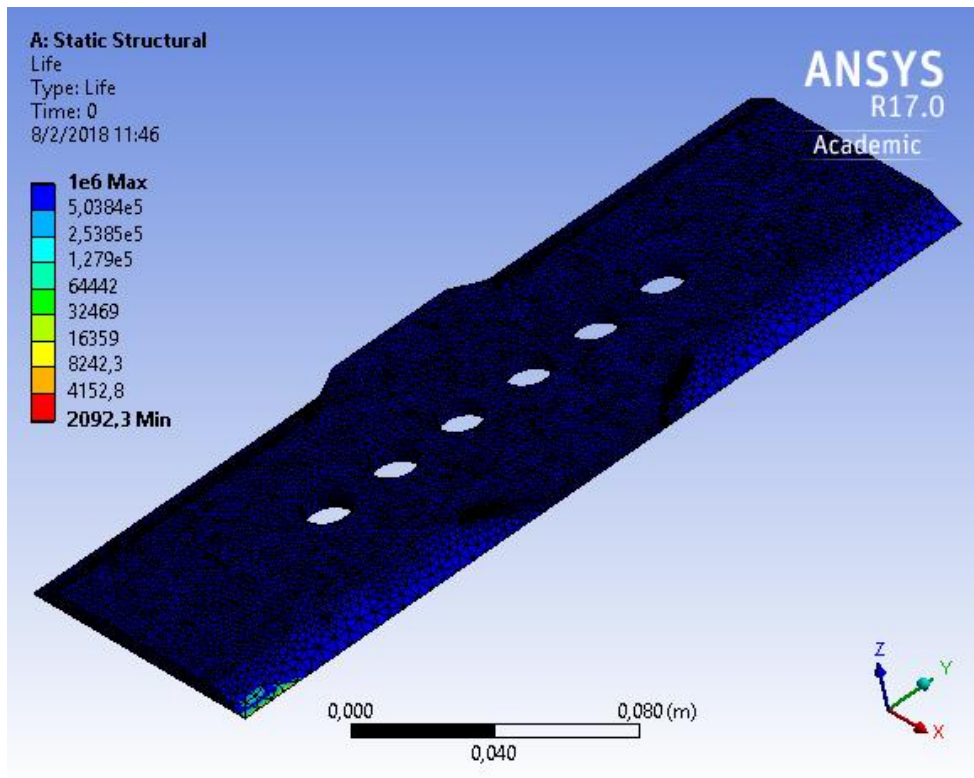


Figura 5. 55. Estimación de ciclos de trabajo de la muestra 2 (Caso I).

Fuente: Elaboración Propia.

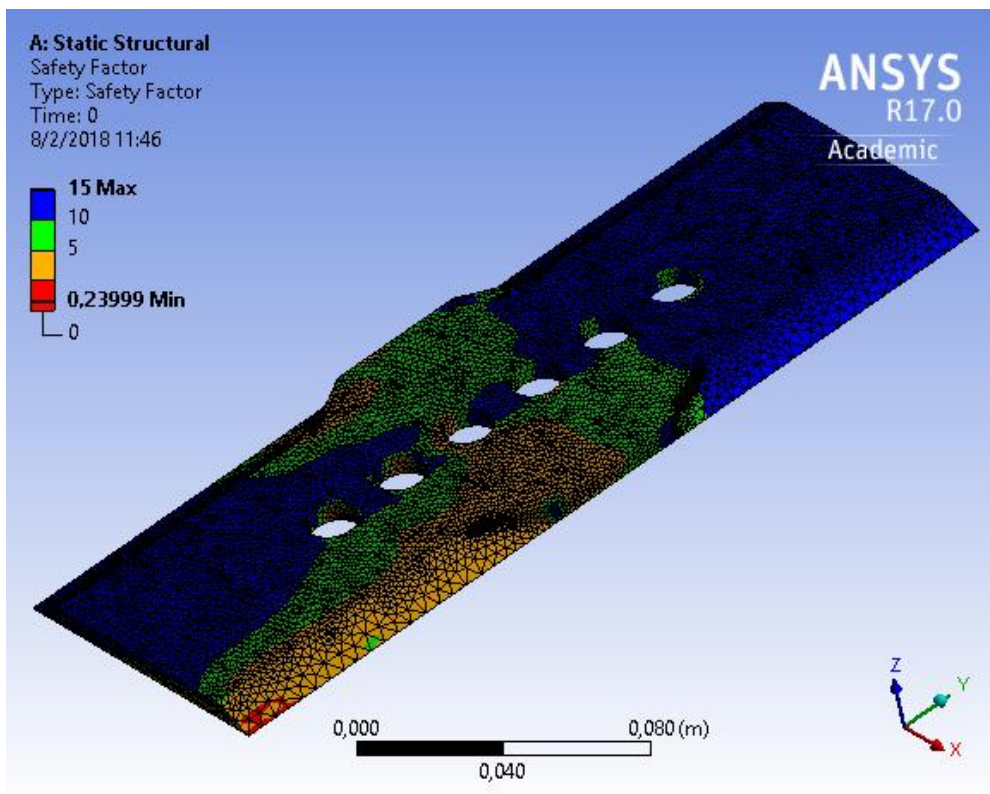


Figura 5. 56. Factor de seguridad por fatiga de la muestra 2 (Caso I).

Fuente: Elaboración Propia.

## CASO II: CORTE DE DOS CAÑAS.

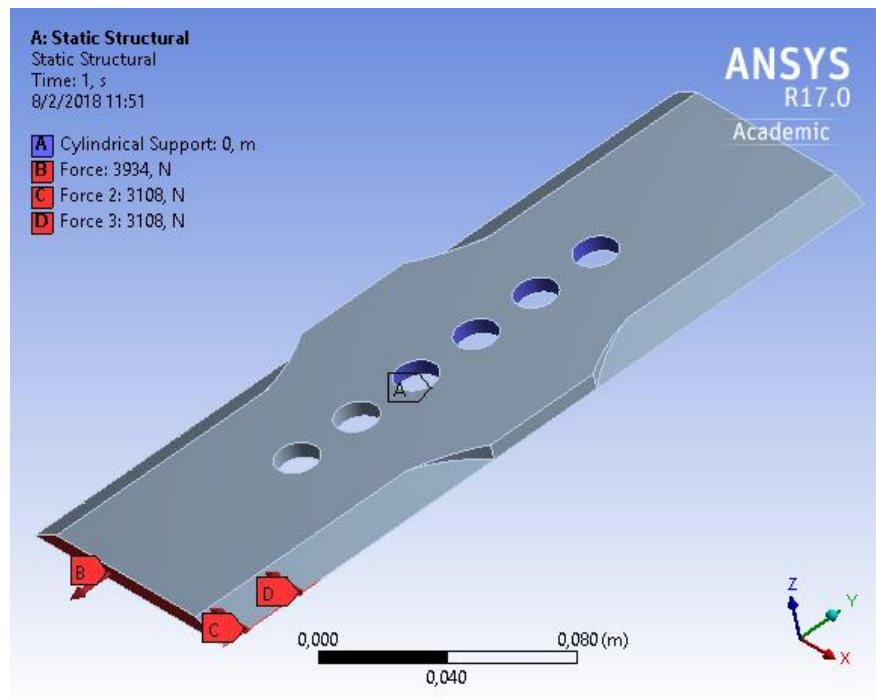
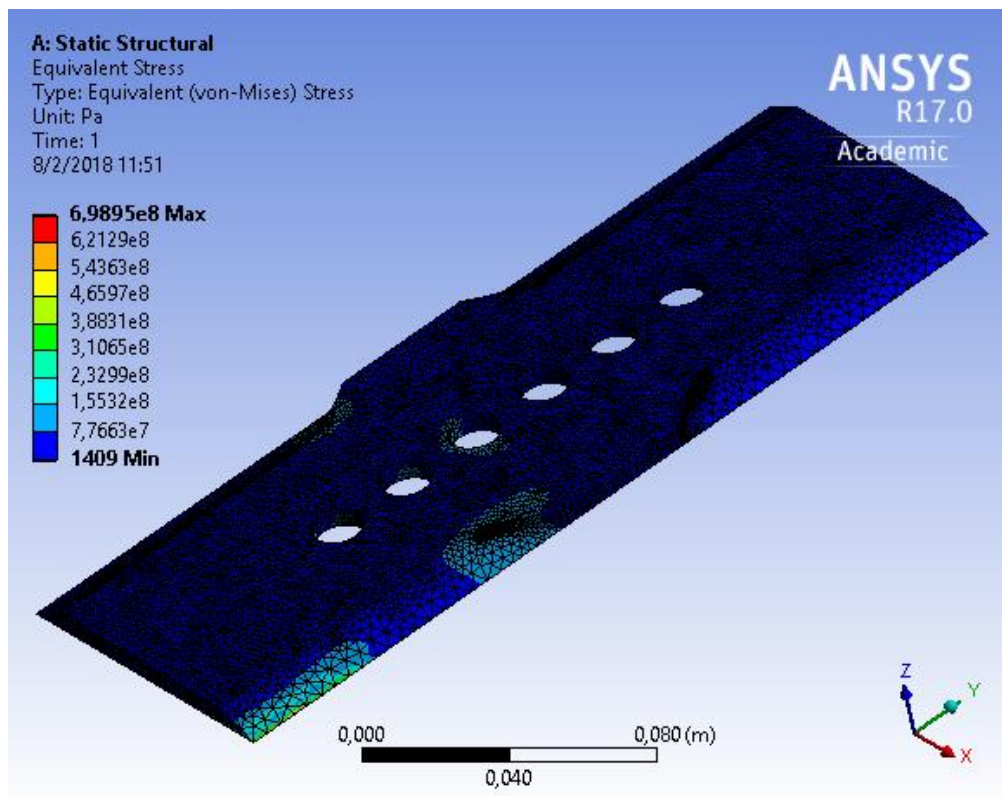


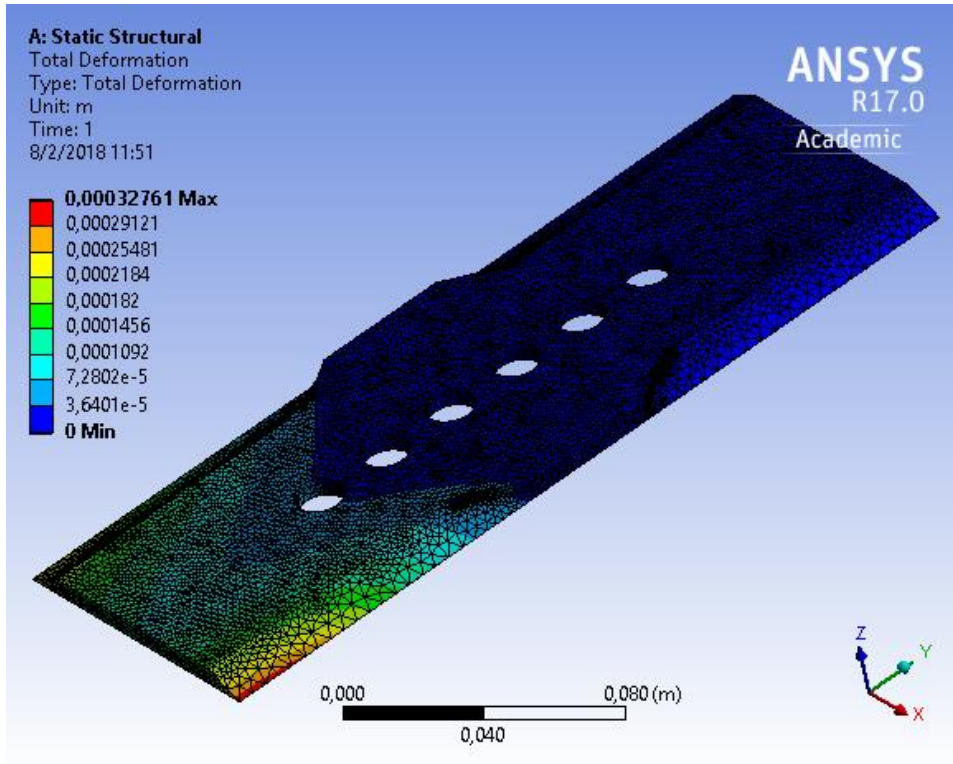
Figura 5. 57. Cargas y restricciones aplicadas al sistema - muestra 2 (Caso II).

Fuente: Elaboración Propia.



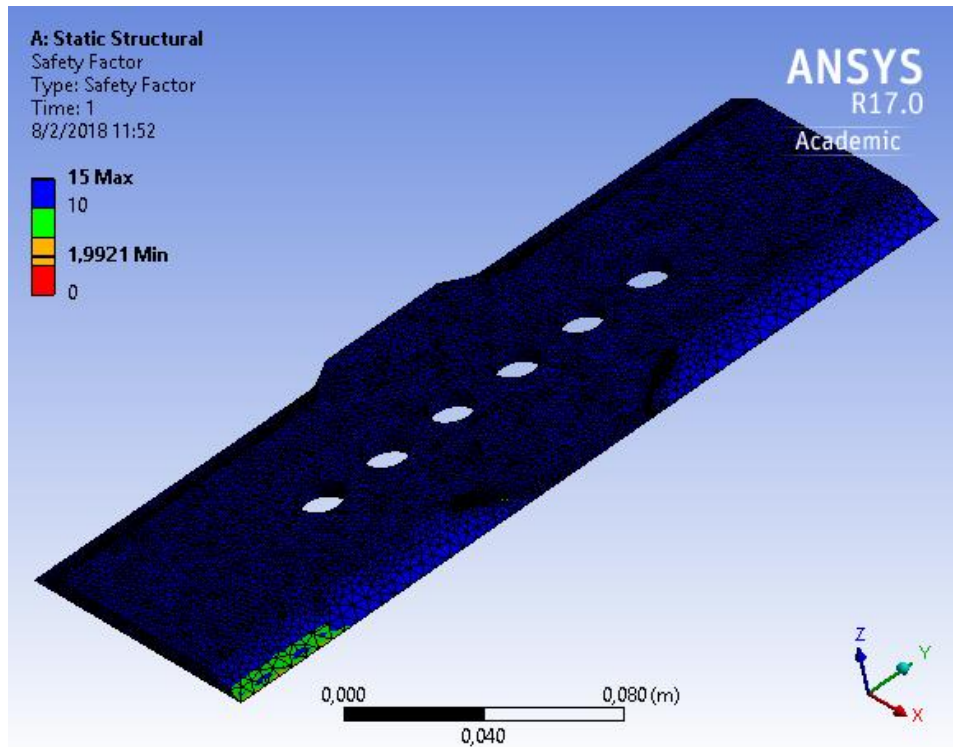
**Figura 5. 58. Esfuerzo equivalente de Von Mises en la muestra 2 (Caso II).**

Fuente: Elaboración Propia.



**Figura 5. 59. Deformación en la muestra 2 (Caso II).**

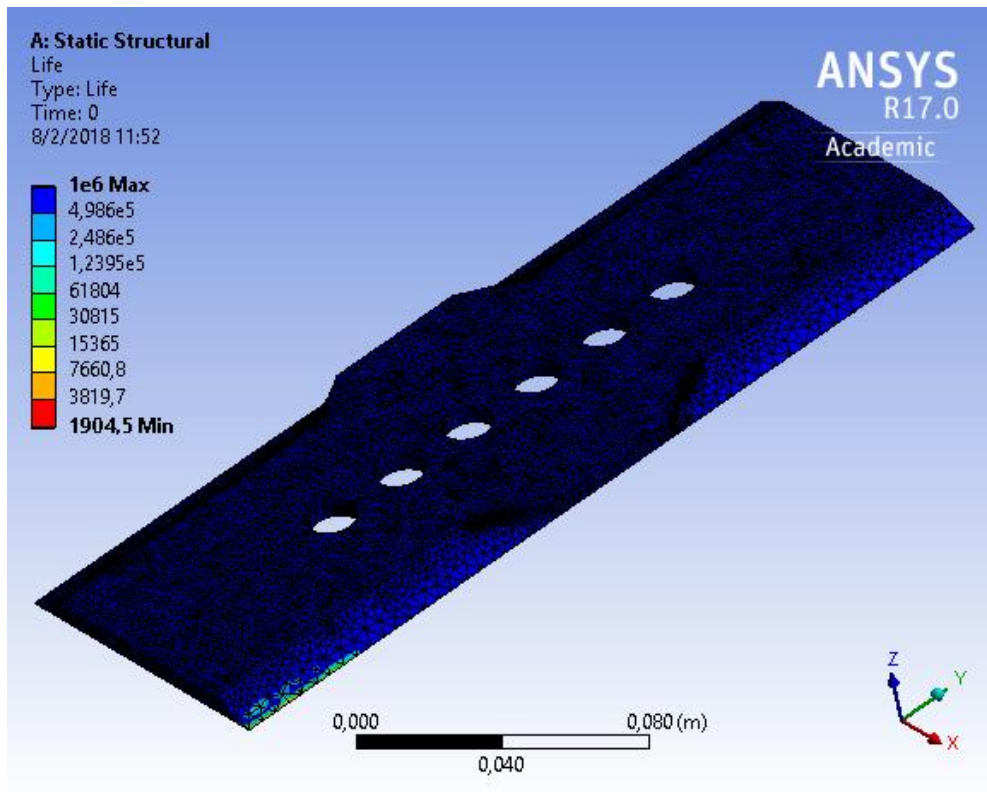
Fuente: Elaboración Propia.





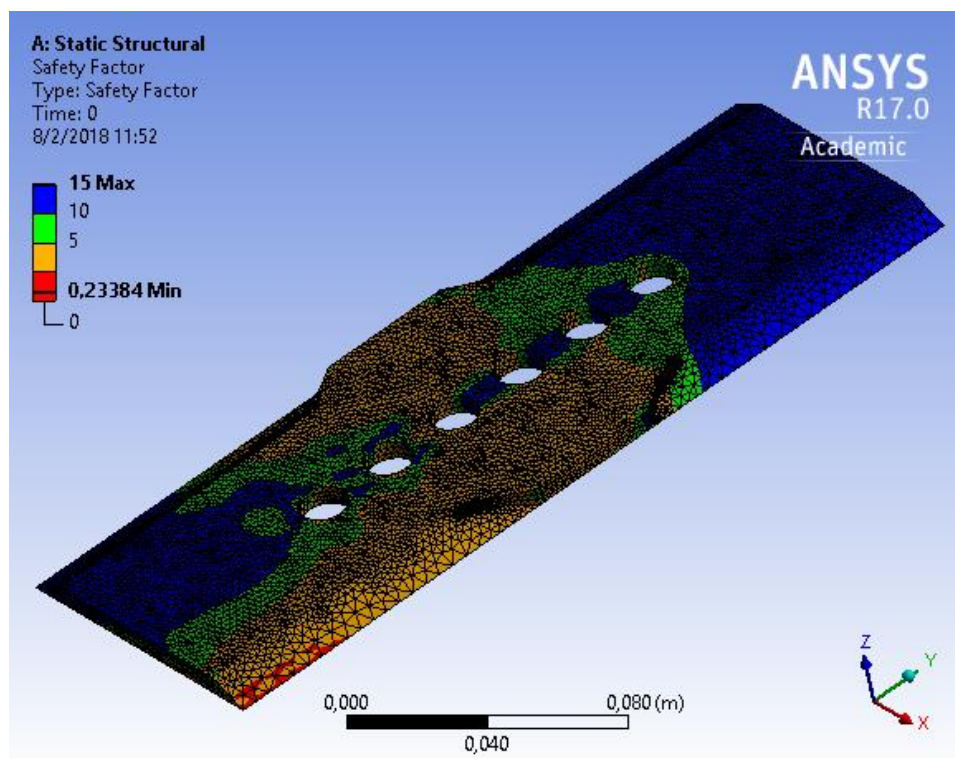
**Figura 5. 60. Factor de seguridad estático de la muestra 2 (Caso II).**

Fuente: Elaboración Propia.



**Figura 5. 61. Estimación de ciclos de trabajo de la muestra 2 (Caso II).**

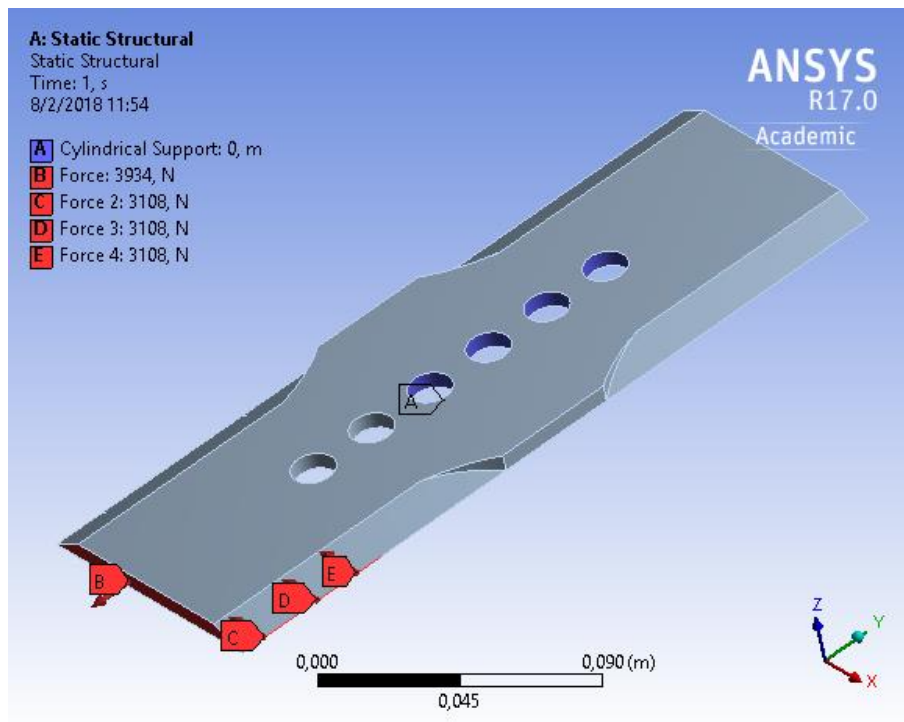
Fuente: Elaboración Propia.



**Figura 5. 62. Factor de seguridad por fatiga de la muestra 2 (Caso II).**

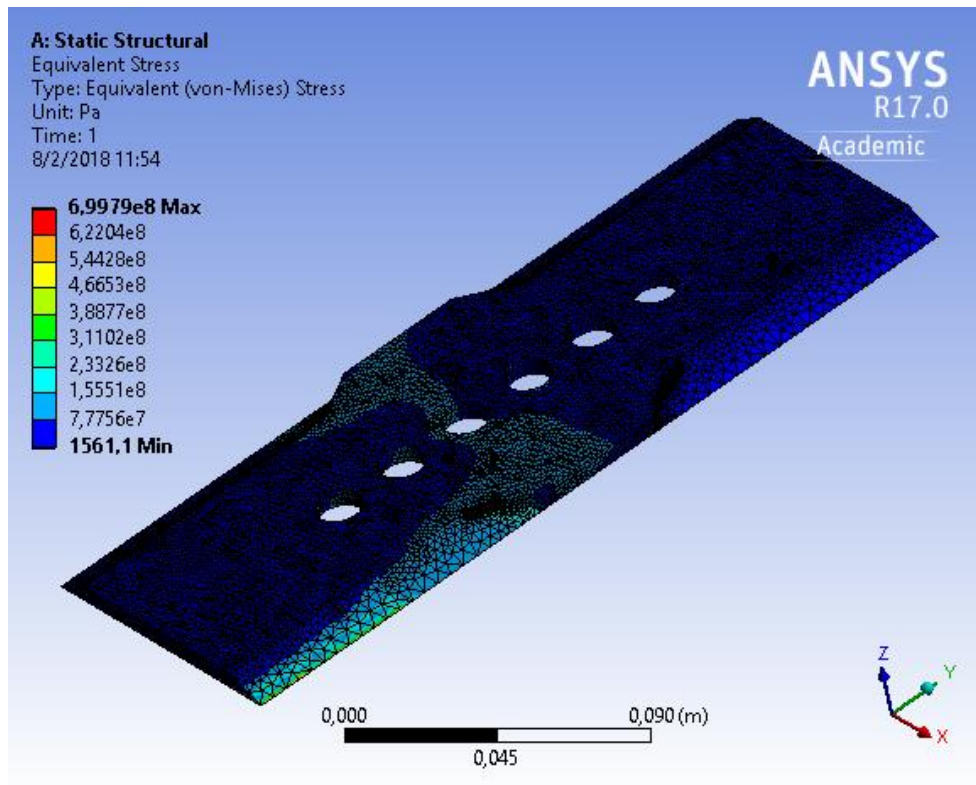
Fuente: Elaboración Propia.

### **CASO III: CORTE DE TRES CAÑAS.**



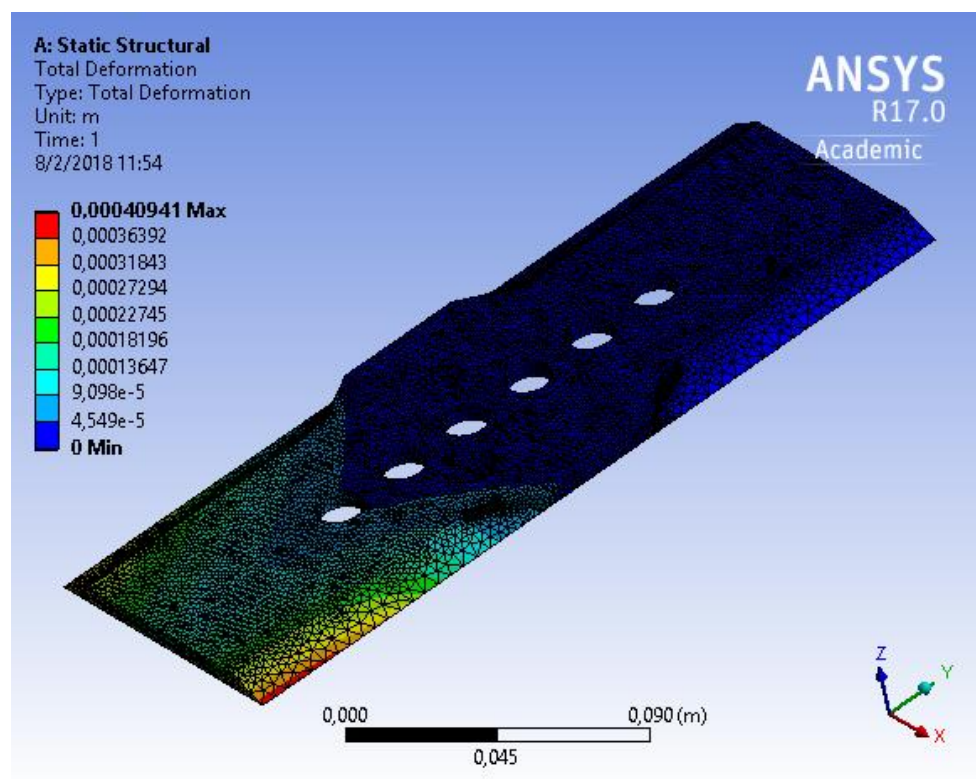
**Figura 5. 63. Cargas y restricciones aplicadas al sistema - muestra 2 (Caso III).**

Fuente: Elaboración Propia.



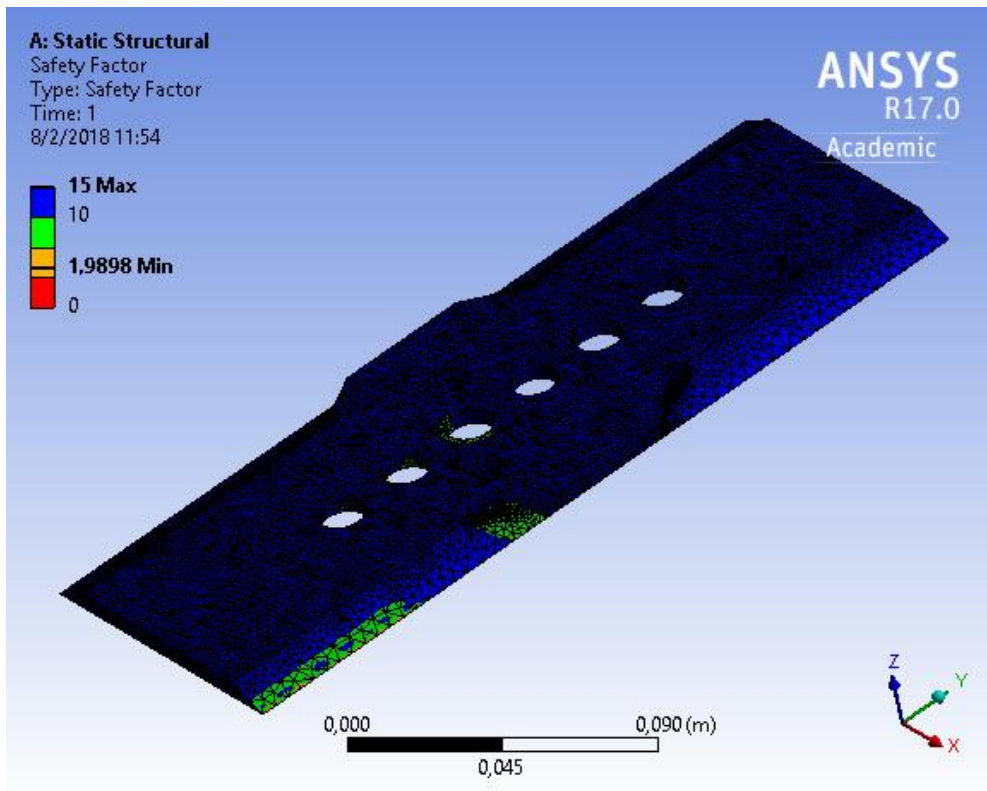
**Figura 5. 64. Esfuerzo equivalente de Von Misses en la muestra 2 (Caso III).**

Fuente: Elaboración Propia.



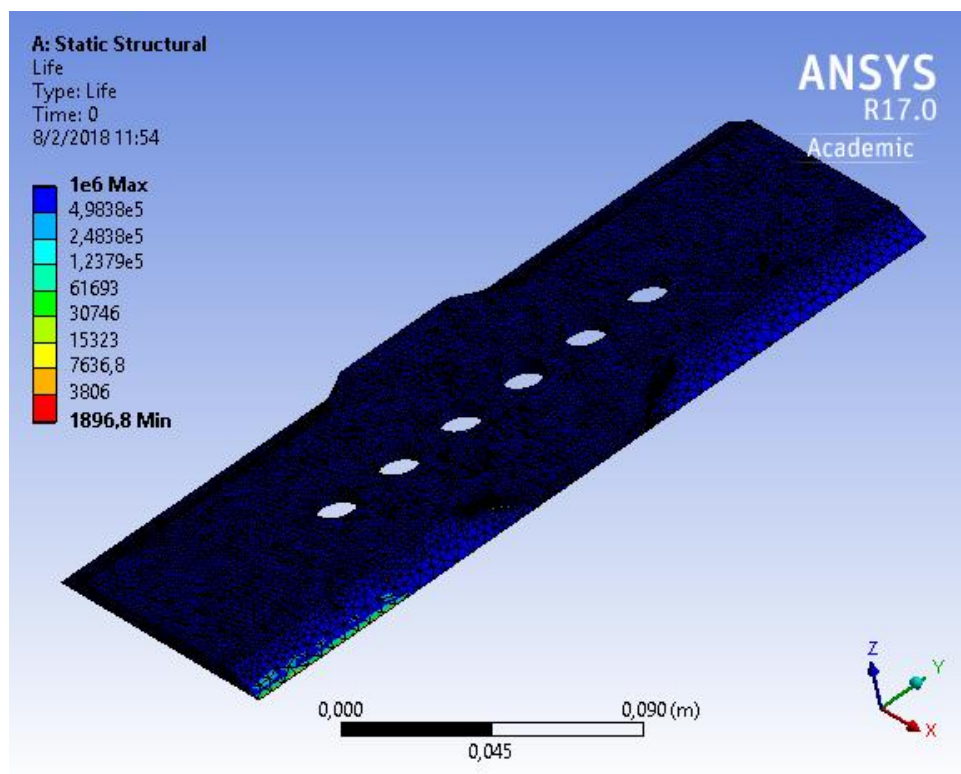
**Figura 5. 65. Deformación en la muestra 2 (Caso III).**

Fuente: Elaboración Propia.



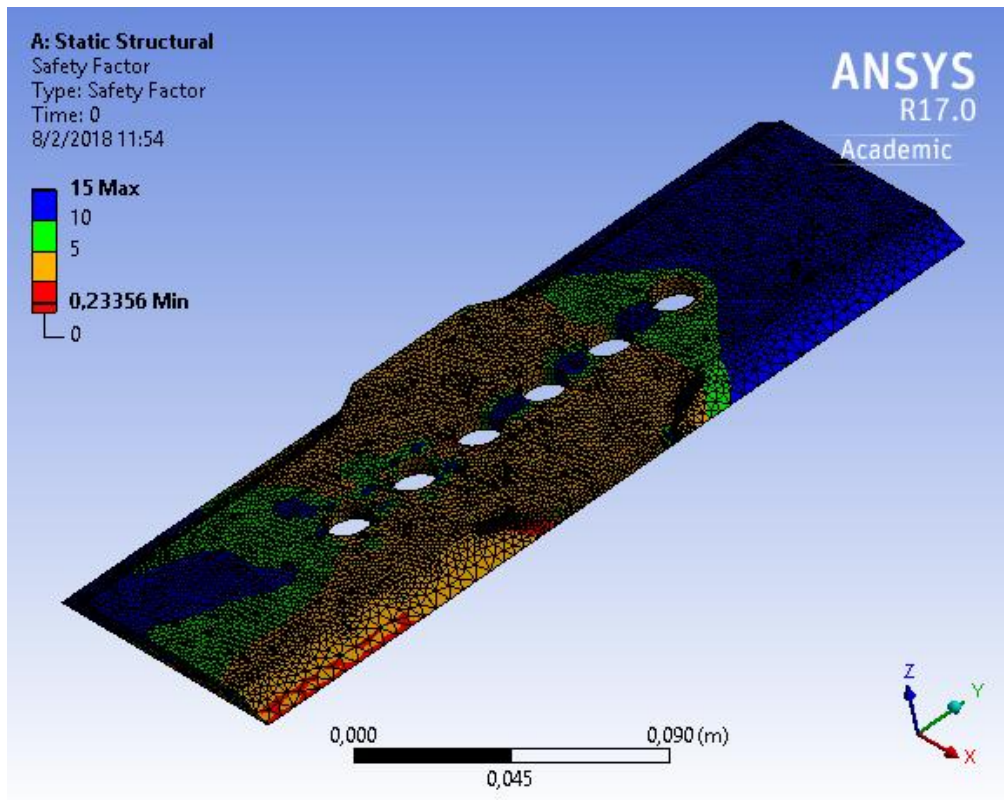
**Figura 5. 66. Factor de seguridad estático de la muestra 2 (Caso III).**

Fuente: Elaboración Propia.



**Figura 5. 67. Estimación de ciclos de trabajo de la muestra 2 (Caso III).**

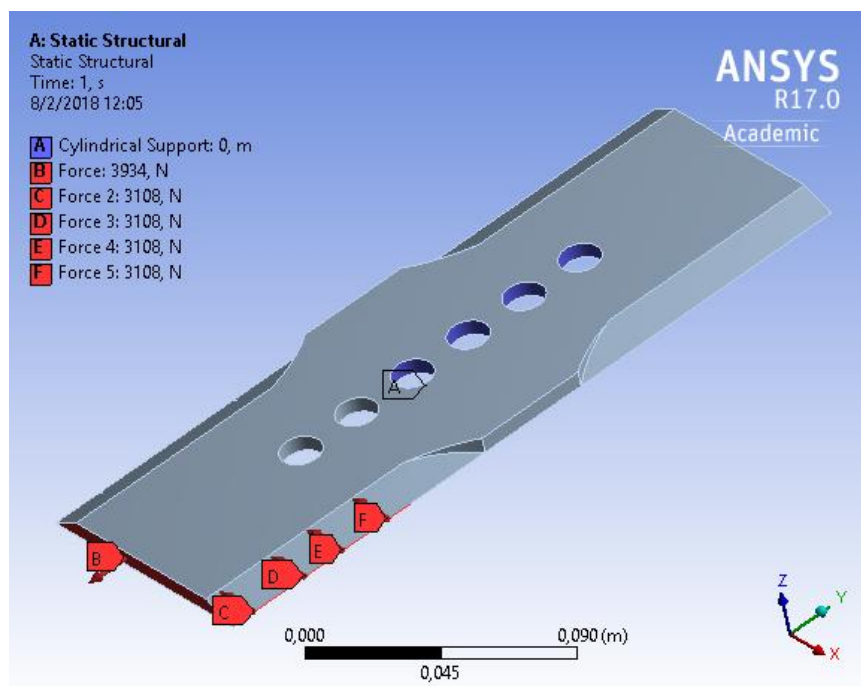
Fuente: Elaboración Propia.



**Figura 5. 68. Factor de seguridad por fatiga de la muestra 2 (Caso III).**

Fuente: Elaboración Propia.

#### CASO IV: CORTE DE CUATRO CAÑAS.



**Figura 5. 69. Cargas y restricciones aplicadas al sistema - muestra 2 (Caso IV).**

Fuente: Elaboración Propia.

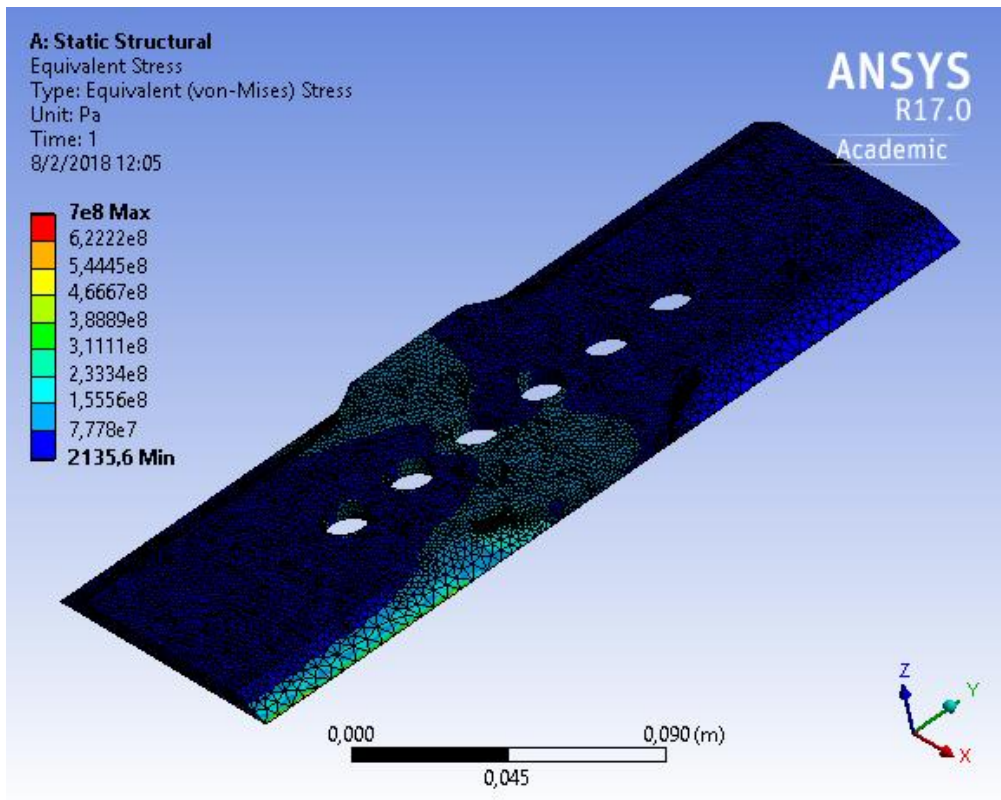


Figura 5. 70. Esfuerzo equivalente de Von Misses en la muestra 2 (Caso IV).

Fuente: Elaboración Propia.

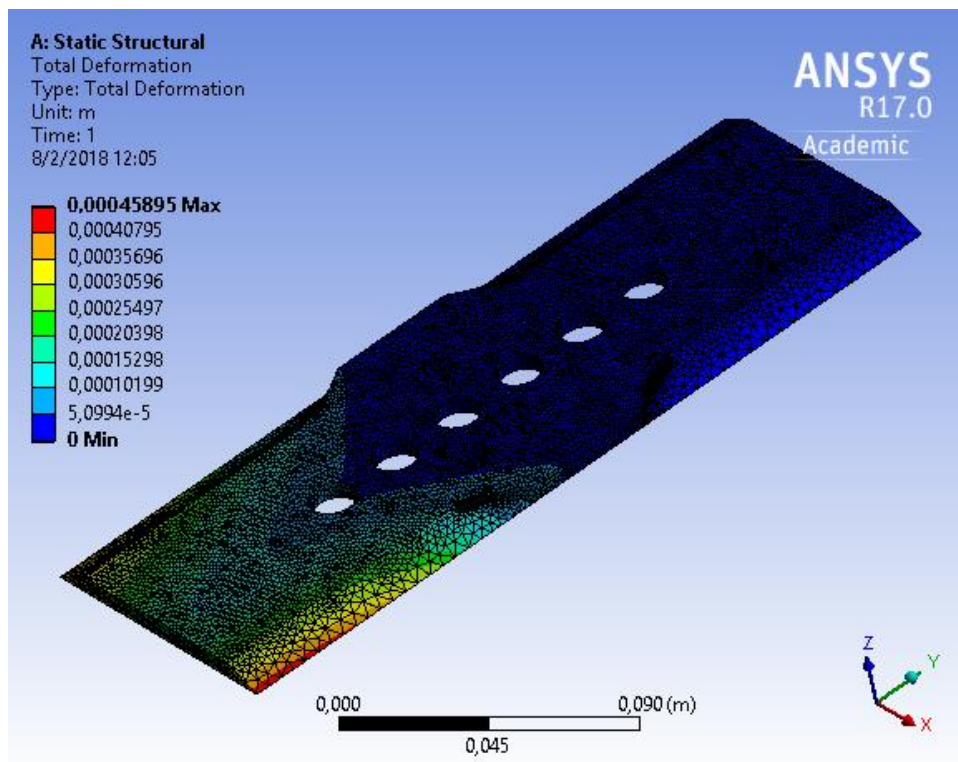


Figura 5. 71. Deformación en la muestra 2 (Caso IV).

Fuente: Elaboración Propia.

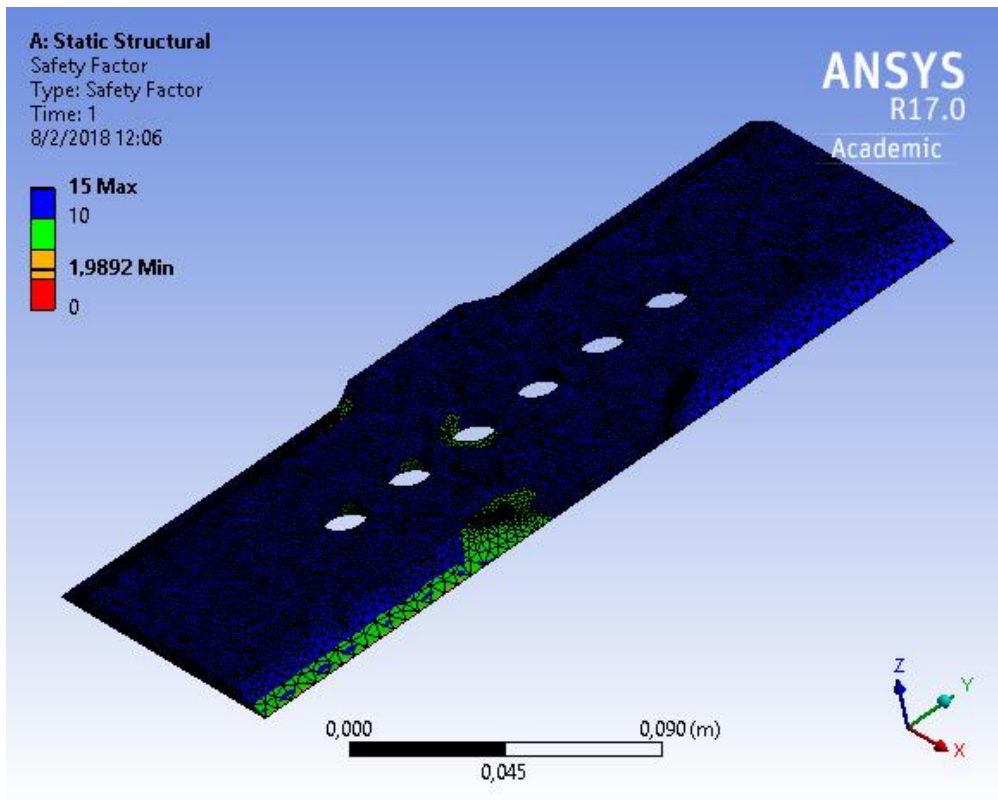
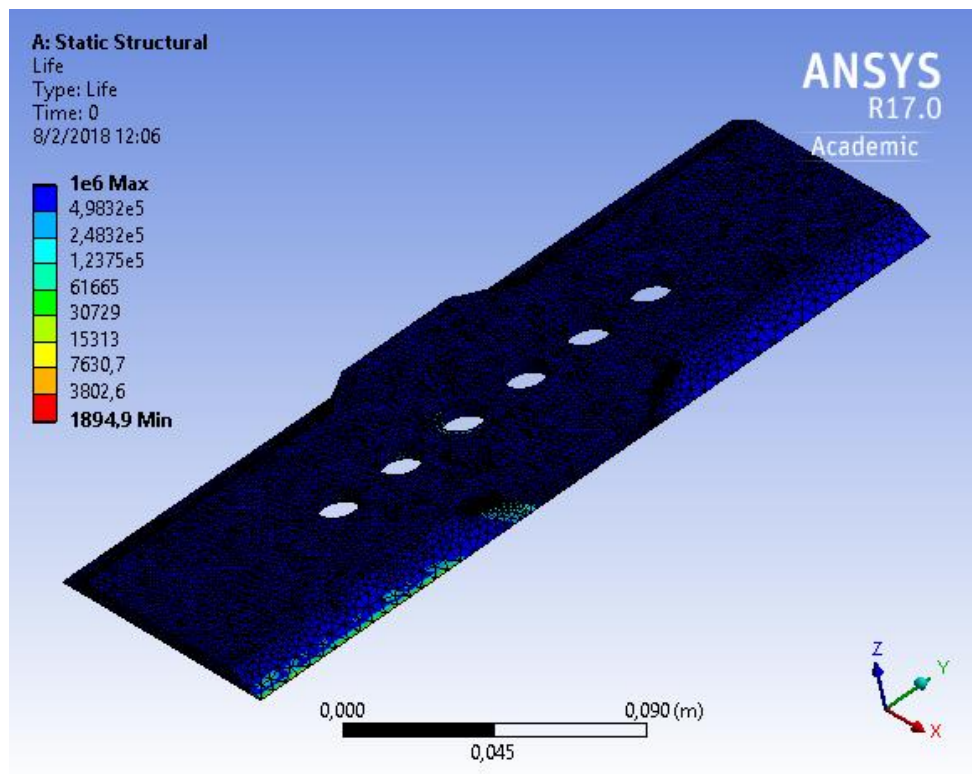


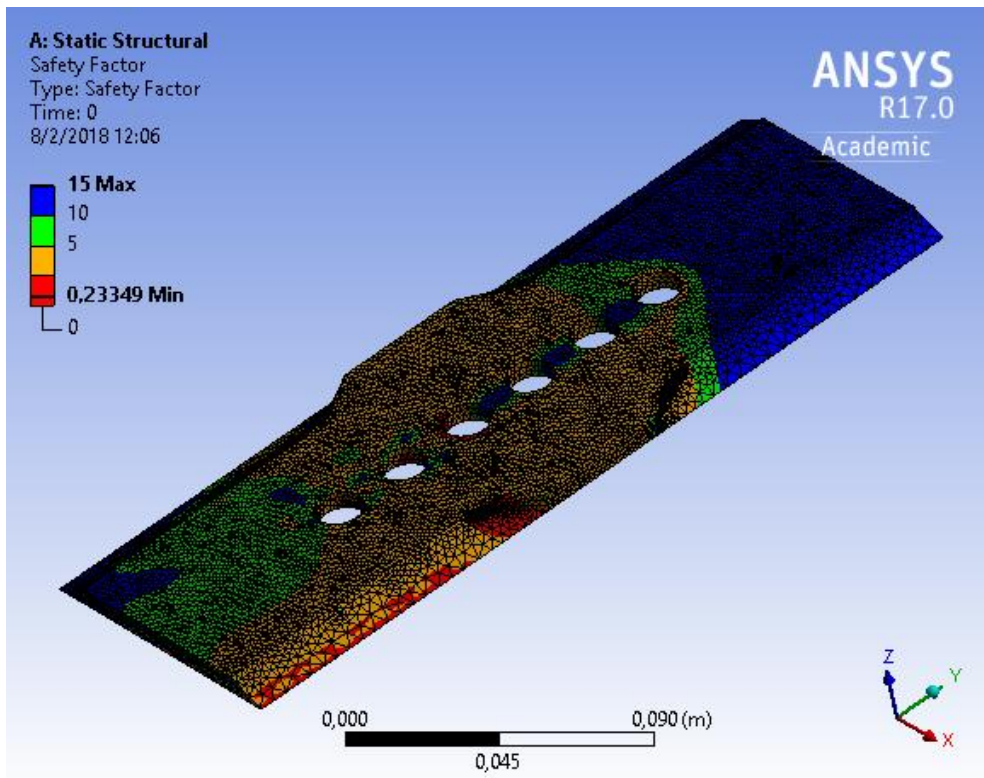
Figura 5. 72. Factor de seguridad estático de la muestra 2 (Caso IV).

Fuente: Elaboración Propia.



**Figura 5. 73. Estimación de ciclos de trabajo de la muestra 2 (Caso IV).**

Fuente: Elaboración Propia.

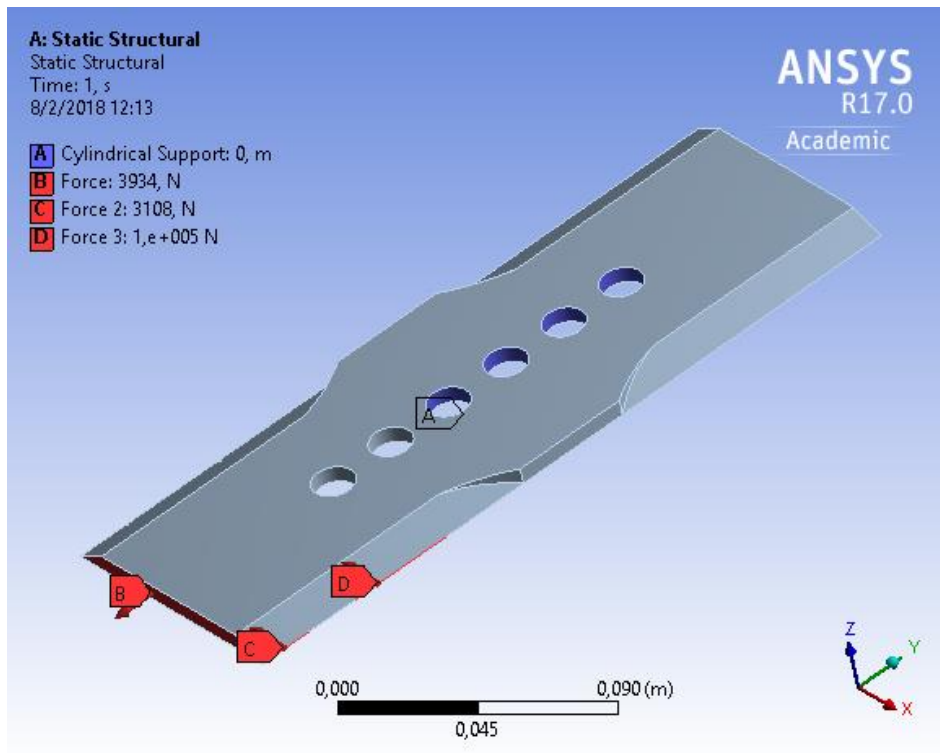


**Figura 5. 74. Factor de seguridad por fatiga de la muestra 2 (Caso IV).**

Fuente: Elaboración Propia.

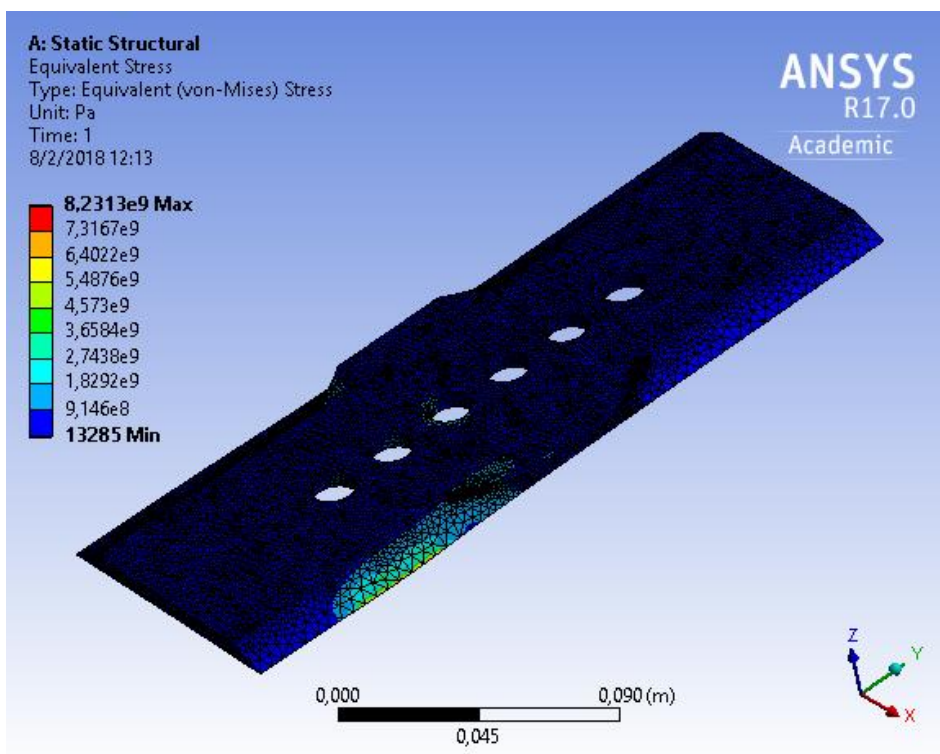
## CASO V: CORTE DE UNA CAÑA E IMPACTANDO UNA PIEDRA





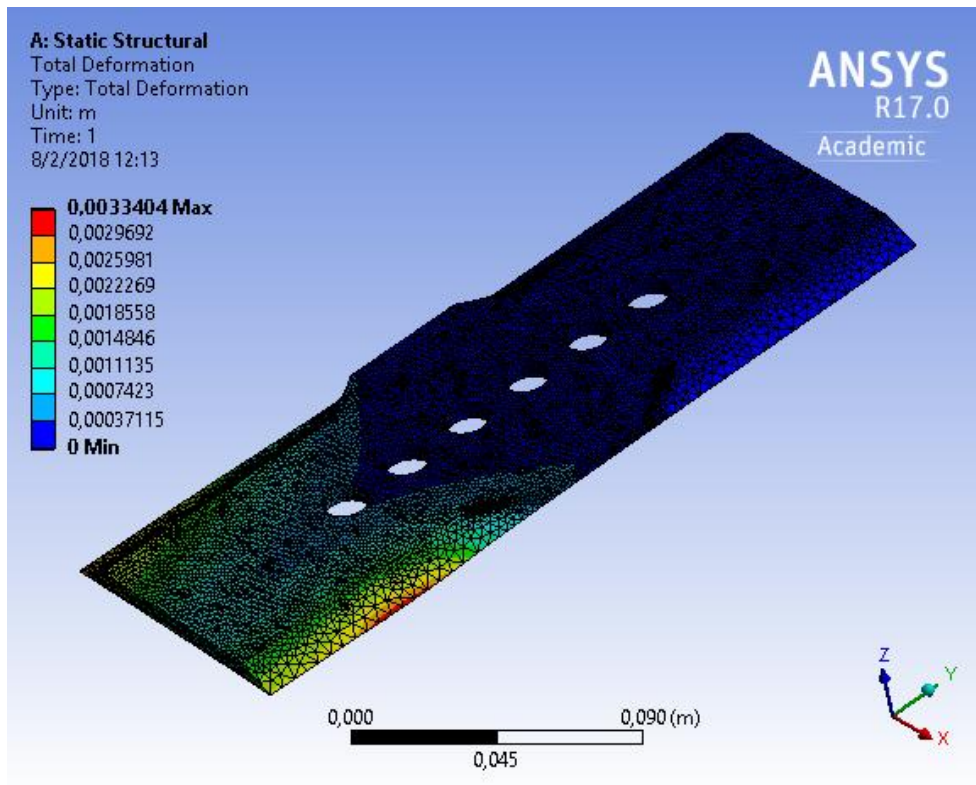
**Figura 5. 75. Cargas y restricciones aplicadas al sistema - muestra 2 (Caso V).**

Fuente: Elaboración Propia.



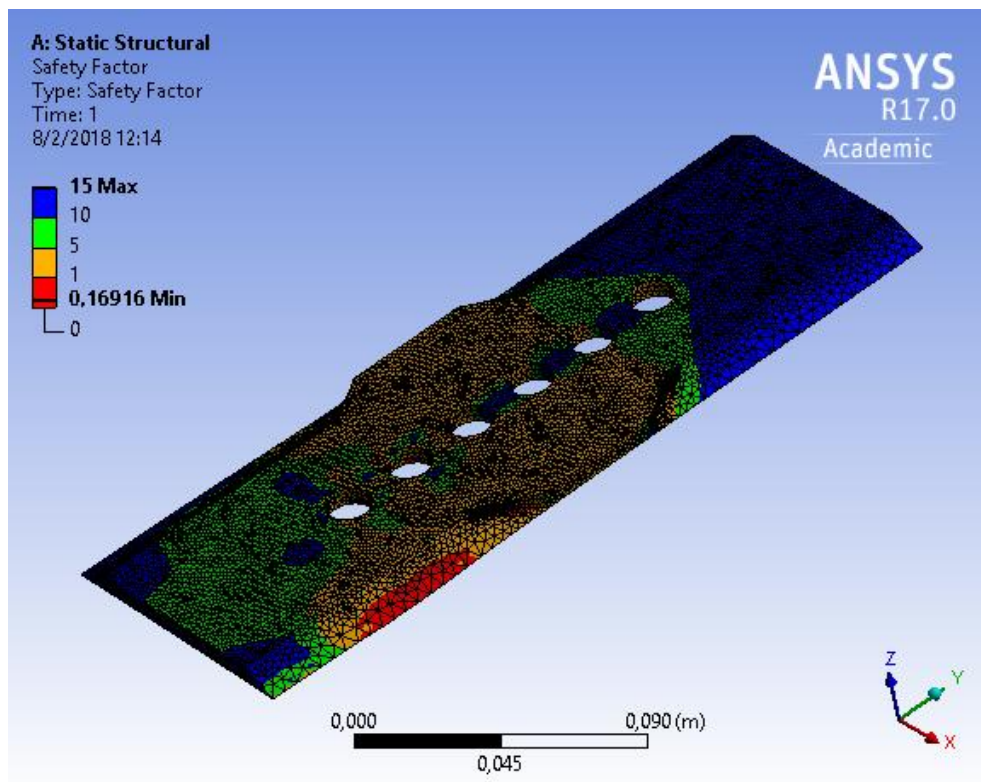
**Figura 5. 76. Esfuerzo equivalente de Von Misses en la muestra 2 (Caso V).**

Fuente: Elaboración Propia.



**Figura 5. 77. Deformación en la muestra 2 (Caso V).**

Fuente: Elaboración Propia.



**Figura 5. 78. Factor de seguridad estático de la muestra 2 (Caso V).**

Fuente: Elaboración Propia.

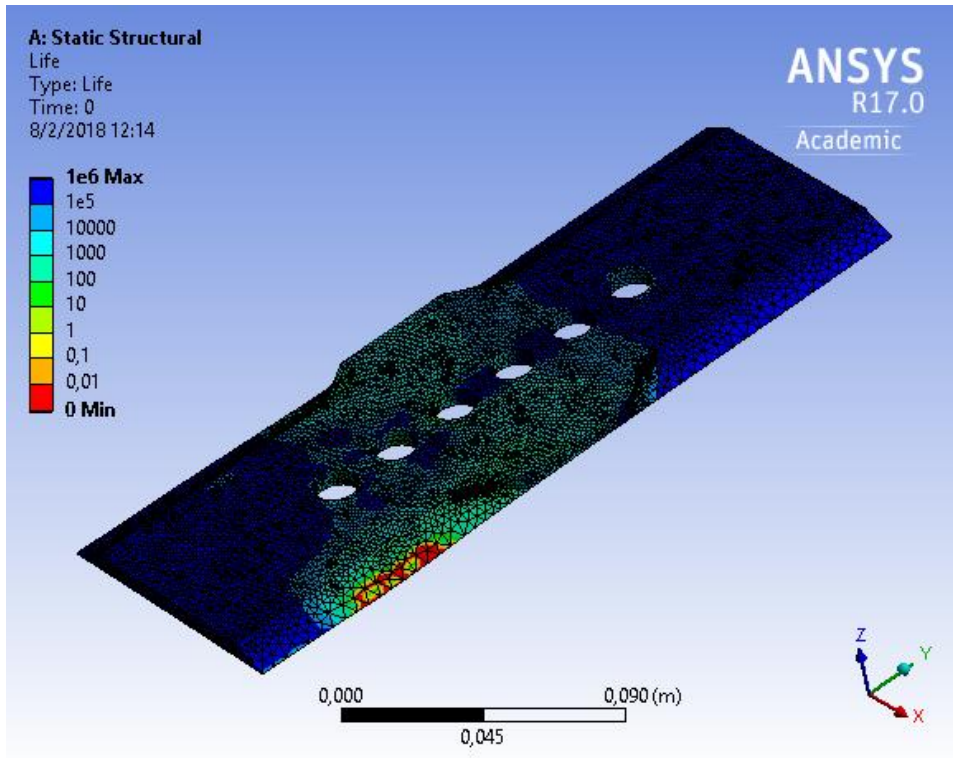


Figura 5. 79. Estimación de ciclos de trabajo de la muestra 2 (Caso V).

Fuente: Elaboración Propia.

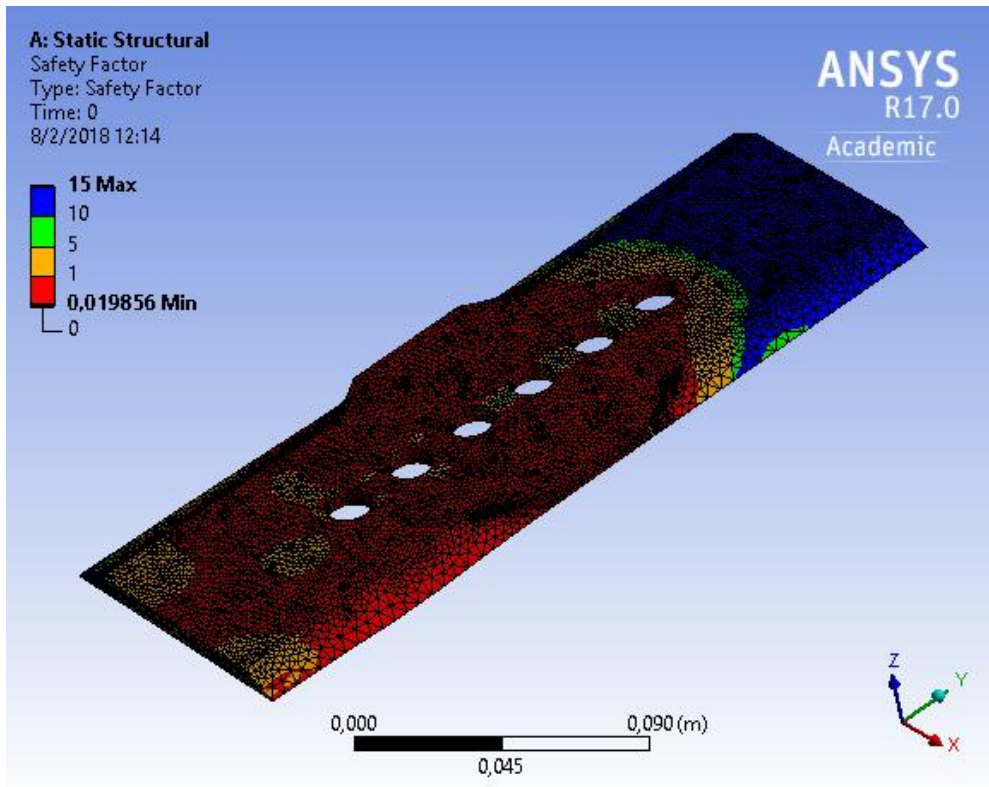


Figura 5. 80. Factor de seguridad por fatiga de la muestra 2 (Caso V).

Fuente: Elaboración Propia.

### CASO VI: IMPACTO DE UNA PIEDRA

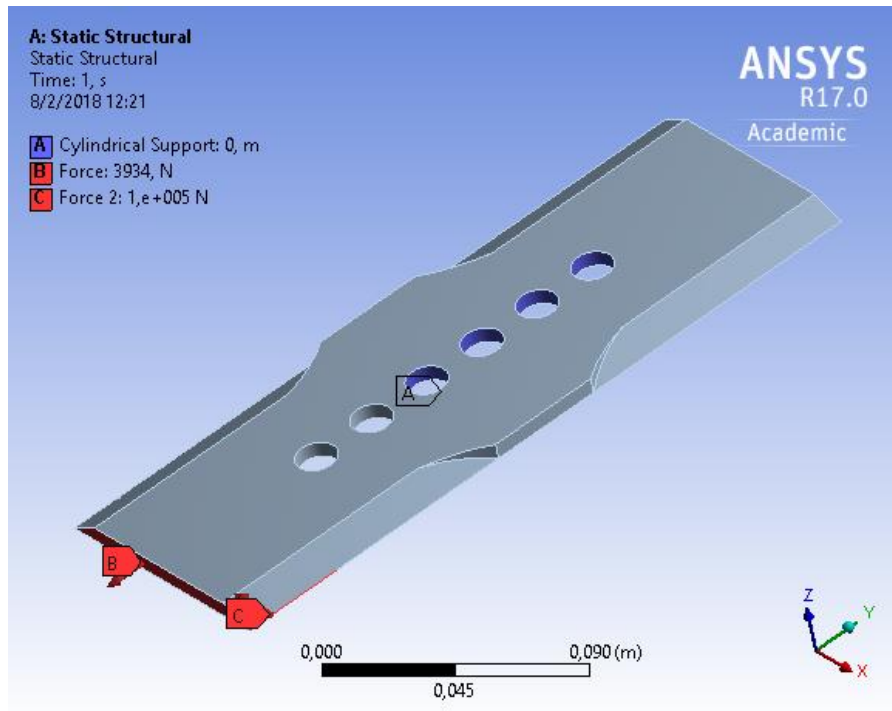


Figura 5. 81. Cargas y restricciones aplicadas al sistema - muestra 2 (Caso VI).

Fuente: Elaboración Propia.

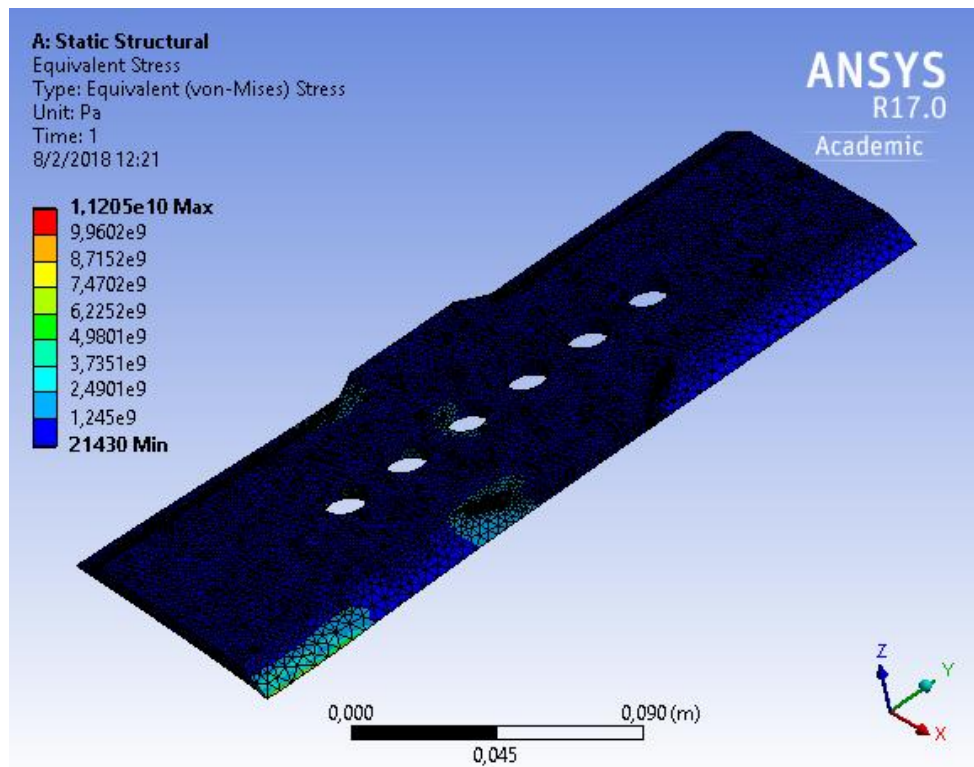


Figura 5. 82. Esfuerzo equivalente de Von Mises en la muestra 2 (Caso VI).

Fuente: Elaboración Propia.

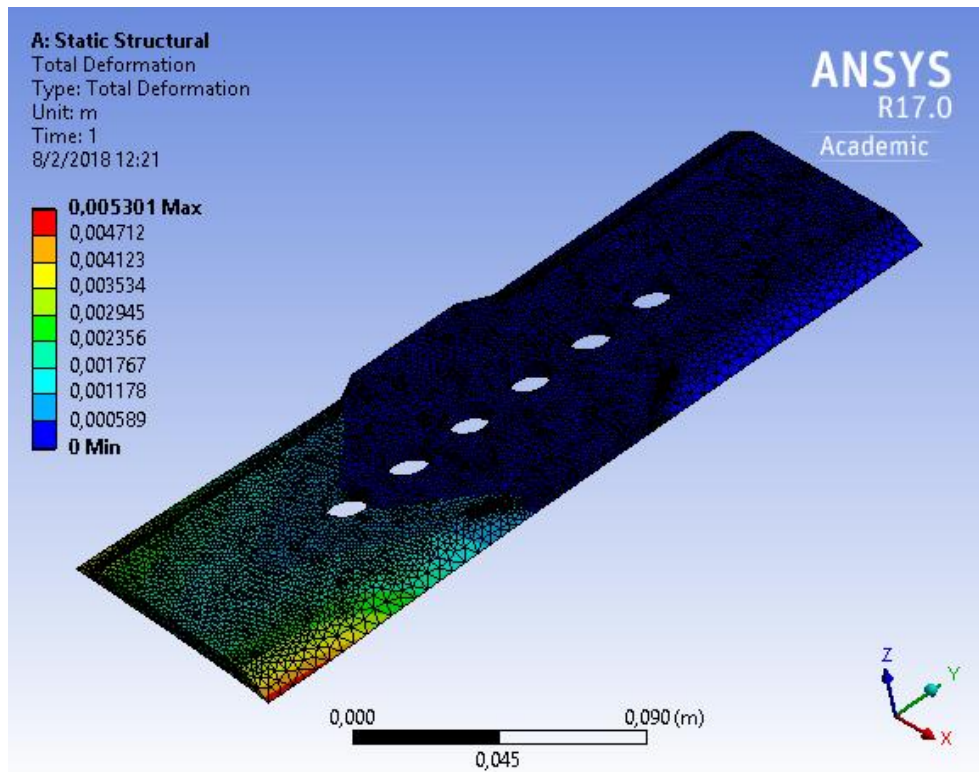
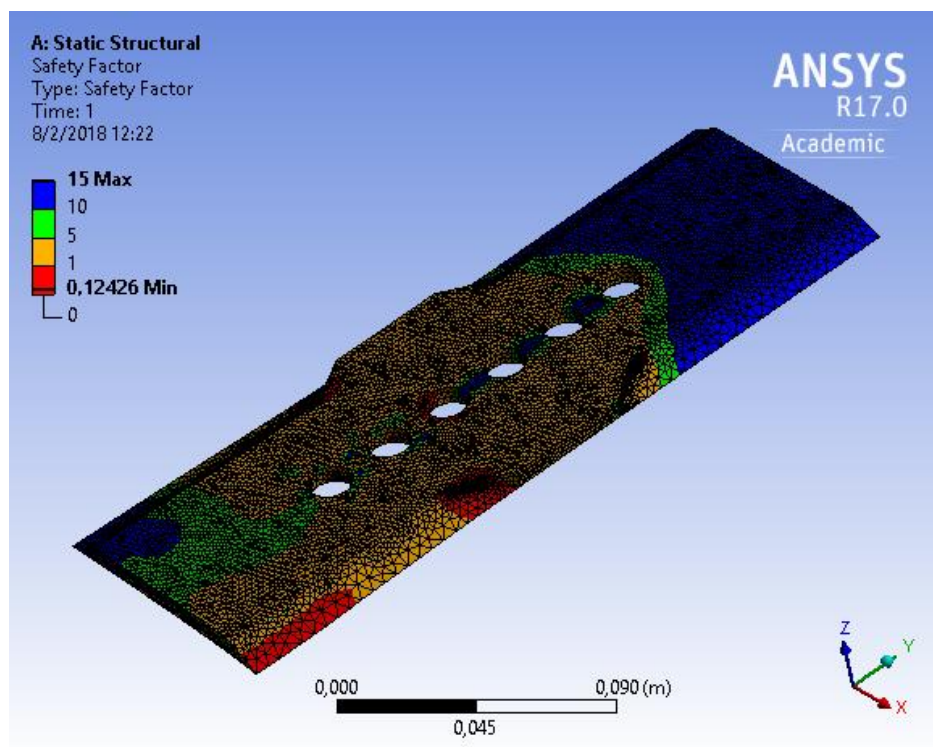


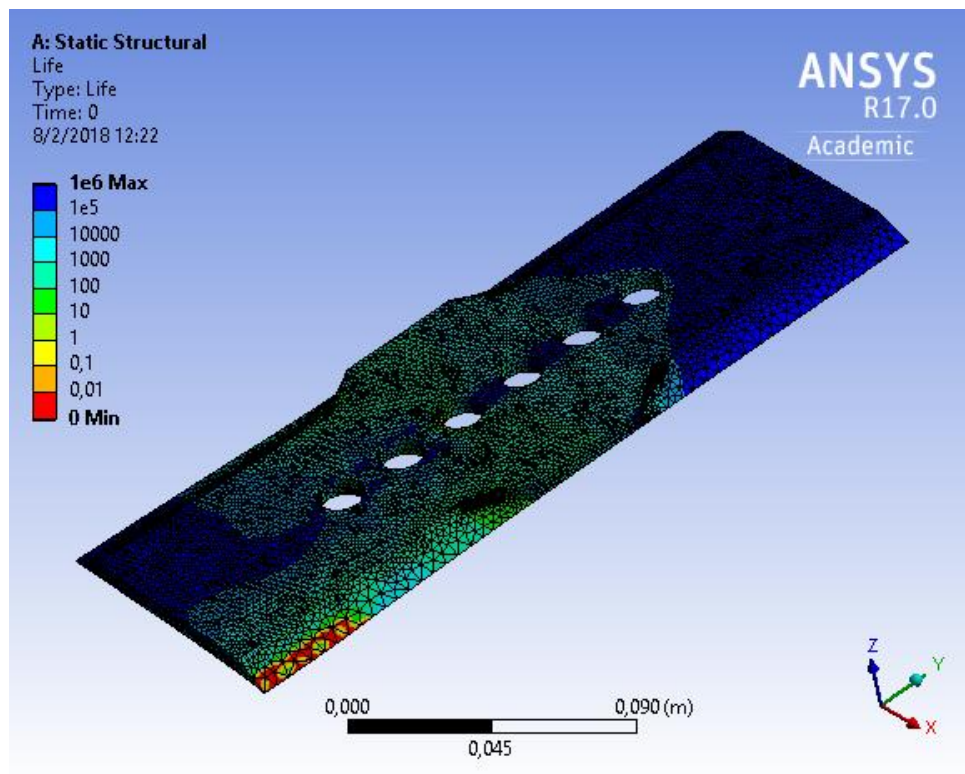
Figura 5. 83. Deformación en la muestra 2 (Caso VI).

Fuente: Elaboración Propia.



**Figura 5. 84. Factor de seguridad estático de la muestra 2 (Caso VI).**

Fuente: Elaboración Propia.



**Figura 5. 85. Estimación de ciclos de trabajo de la muestra 2 (Caso VI).**

Fuente: Elaboración Propia.

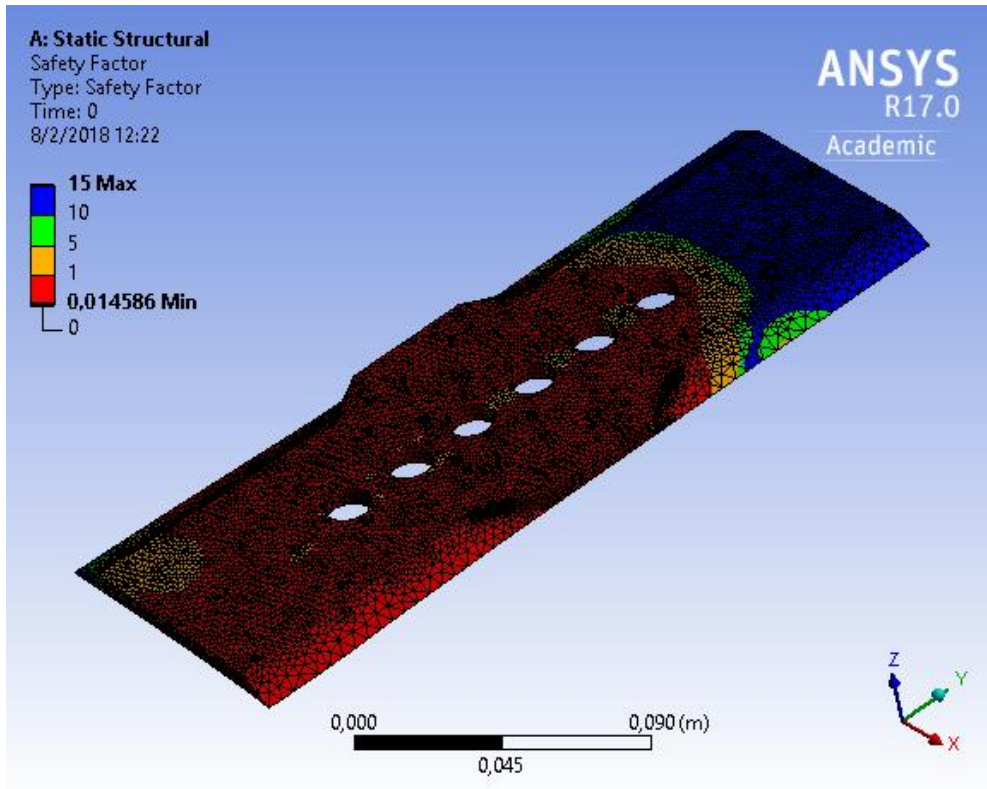


Figura 5. 86. Factor de seguridad por fatiga de la muestra 2 (Caso VI).

Fuente: Elaboración Propia.

**CASO VII: IMPACTO DE DOS PIEDRAS.**

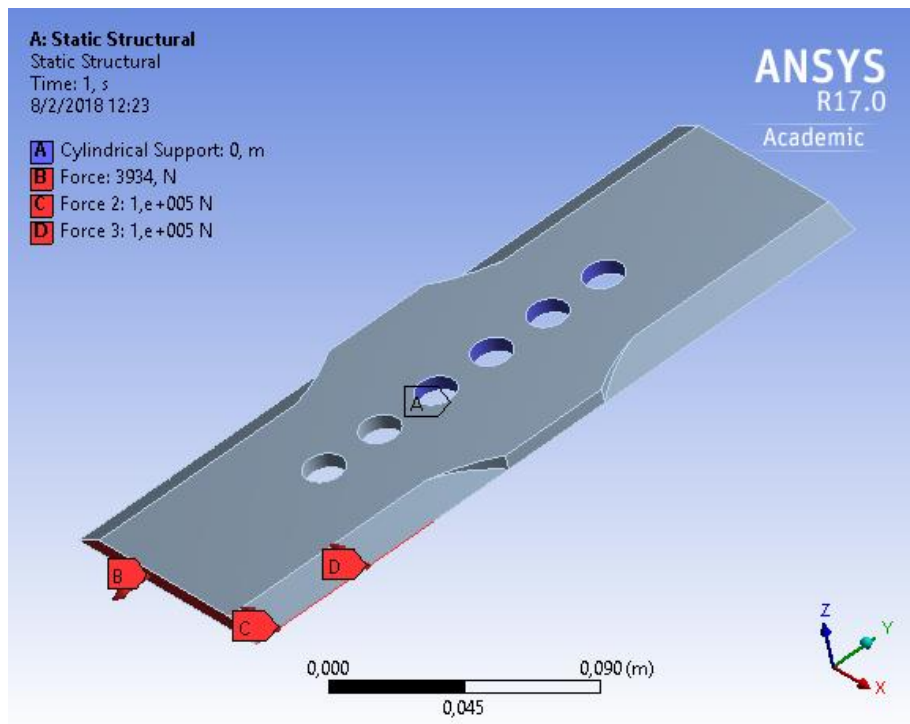


Figura 5. 87. Cargas y restricciones aplicadas al sistema - muestra 2 (Caso VII).

Fuente: Elaboración Propia.

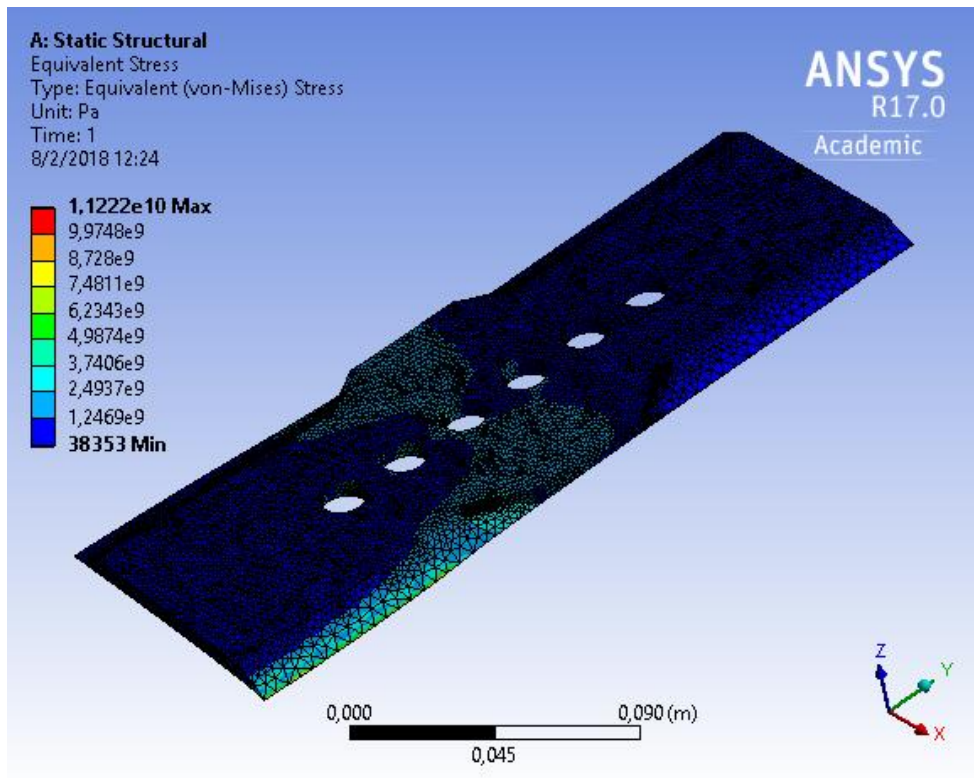
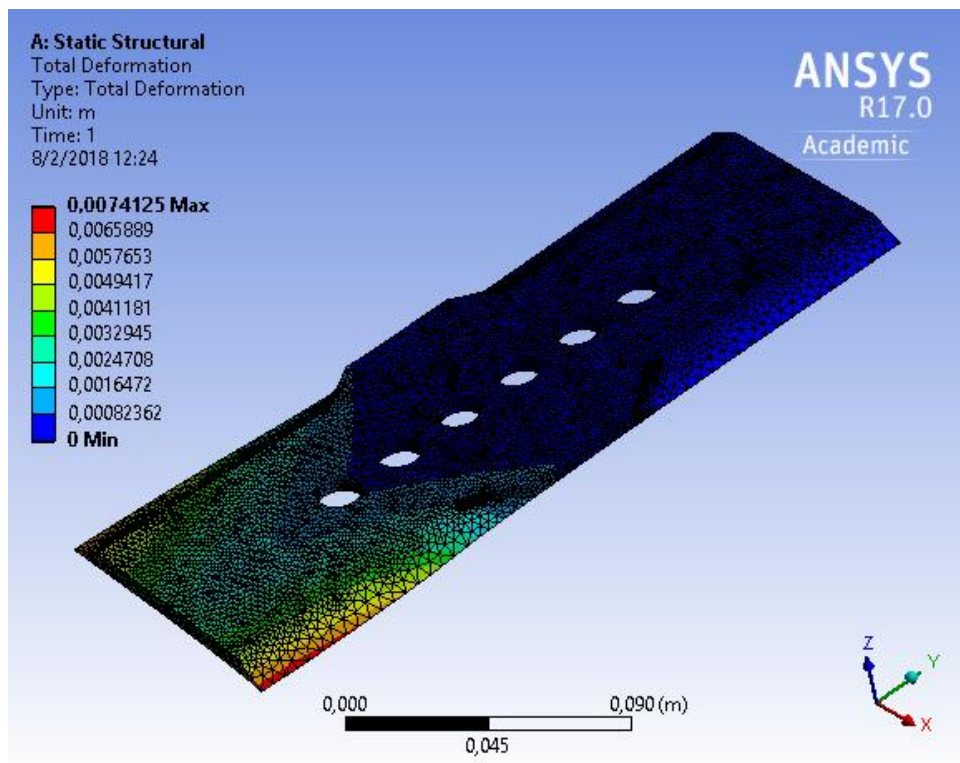


Figura 5. 88. Esfuerzo equivalente de Von Mises en la muestra 2 (Caso VII).

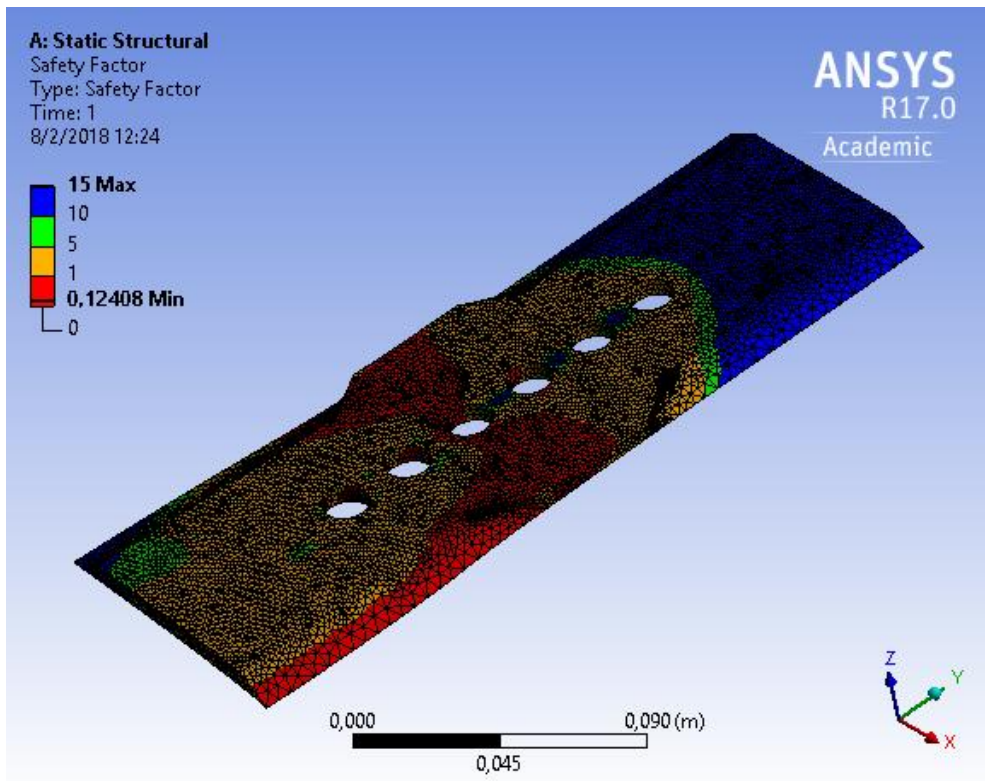
Fuente: Elaboración Propia.





**Figura 5. 89. Deformación en la muestra 2 (Caso VII).**

Fuente: Elaboración Propia.



**Figura 5. 90. Factor de seguridad estático de la muestra 2 (Caso VII).**

Fuente: Elaboración Propia.

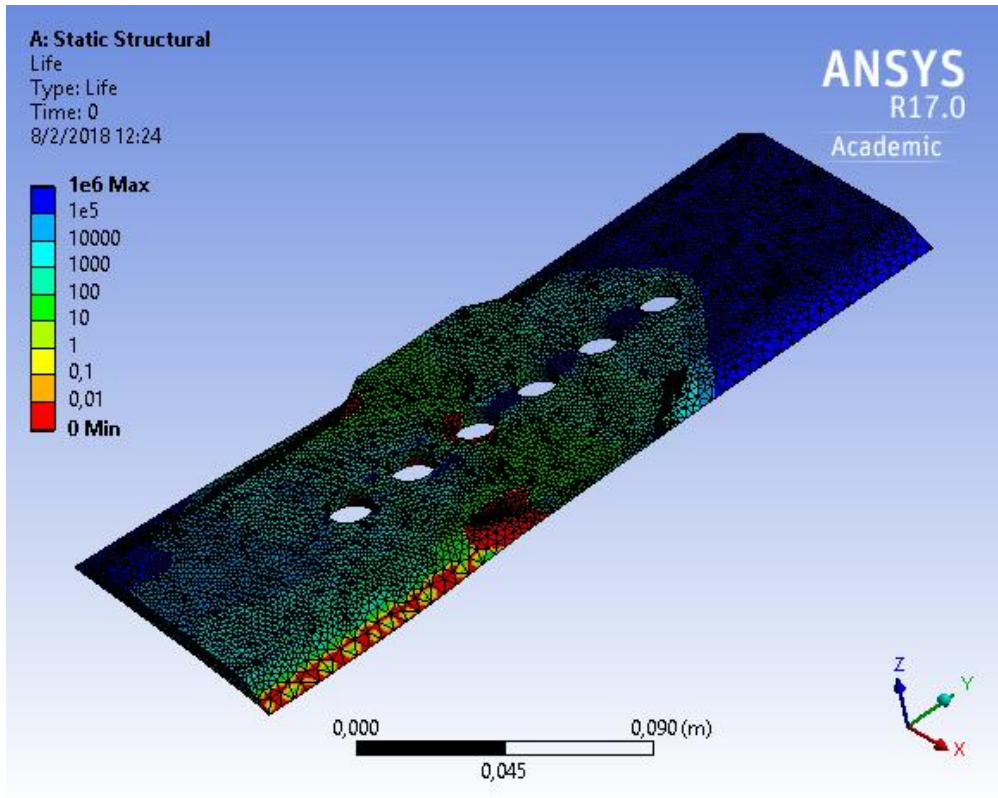


Figura 5. 91. Estimación de ciclos de trabajo de la muestra 2 (Caso VII).

Fuente: Elaboración Propia.

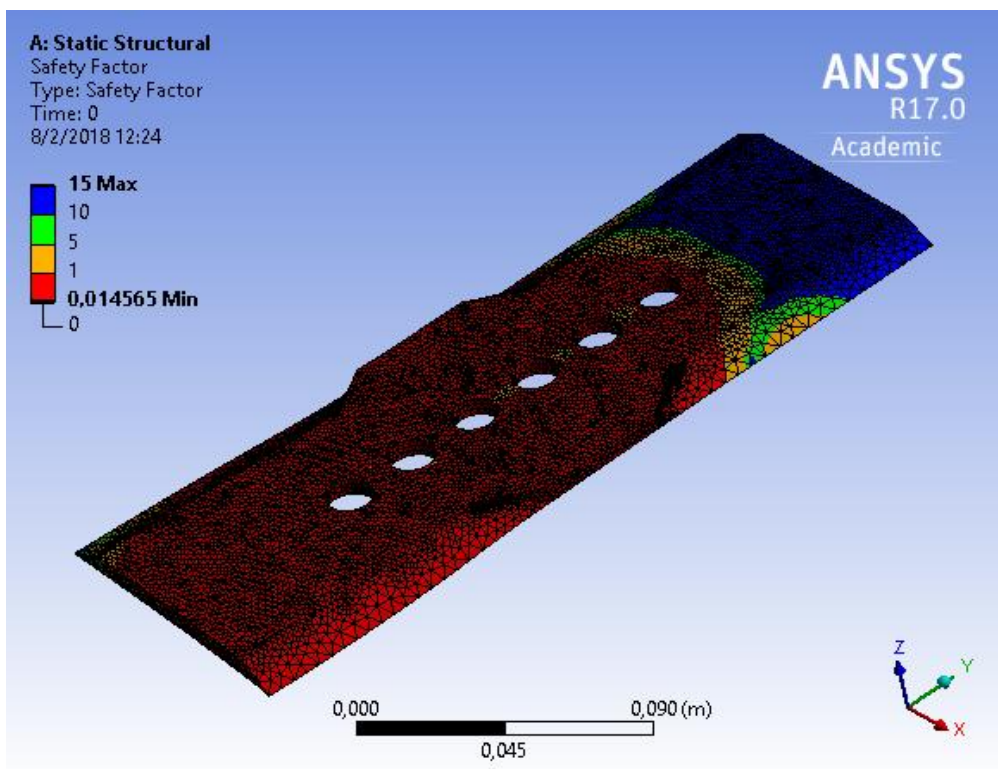


Figura 5. 92. Factor de seguridad por fatiga de la muestra 2 (Caso VII).

Fuente: Elaboración Propia.

### MUESTRA 3

#### CASO I: CORTE DE UNA CAÑA.

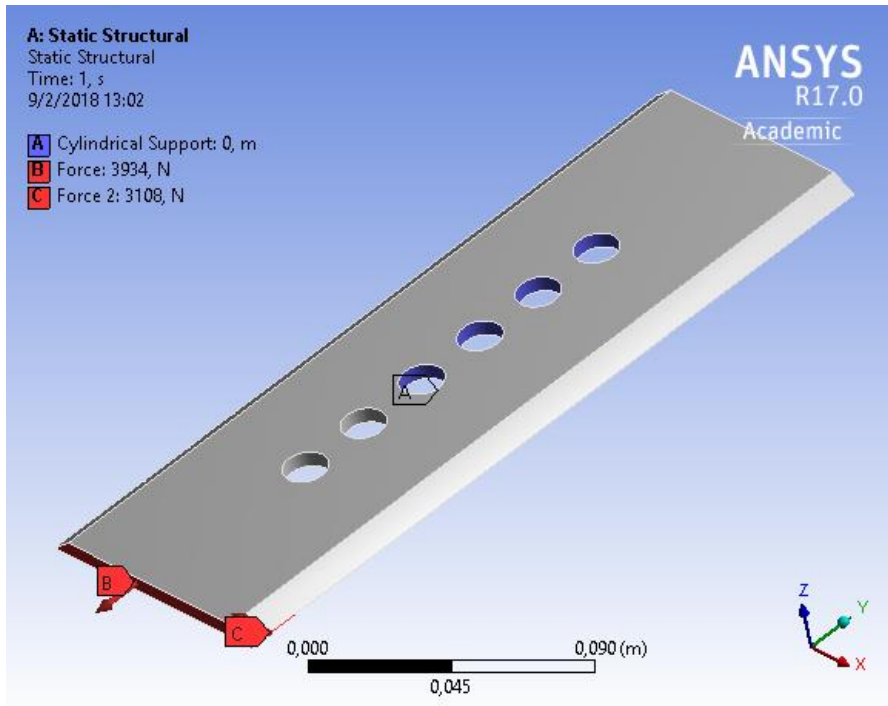
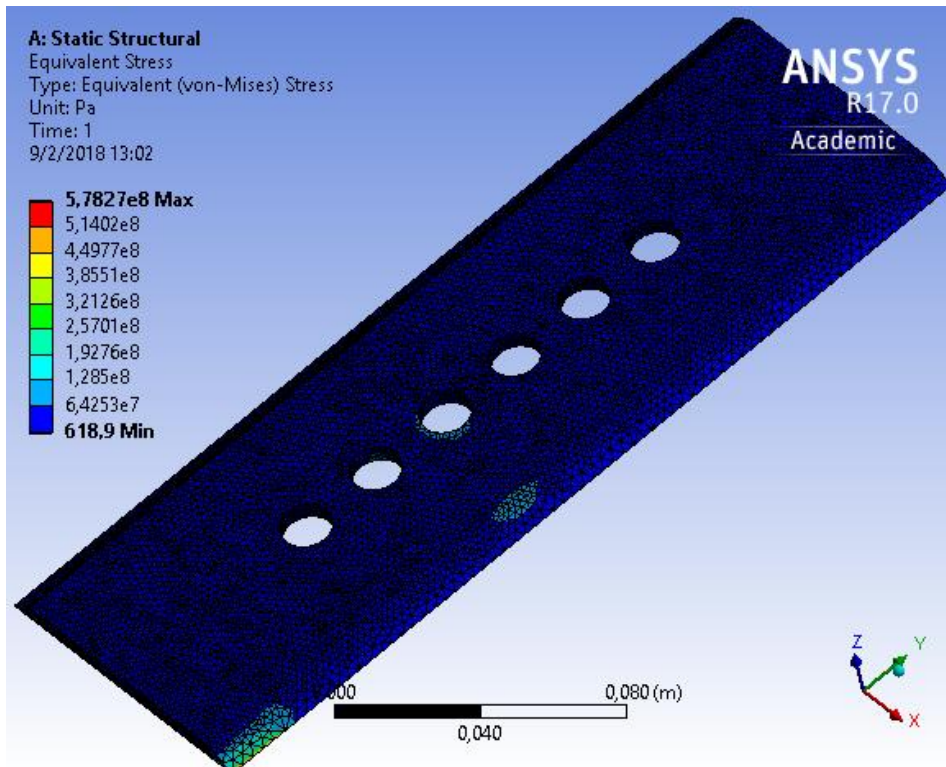


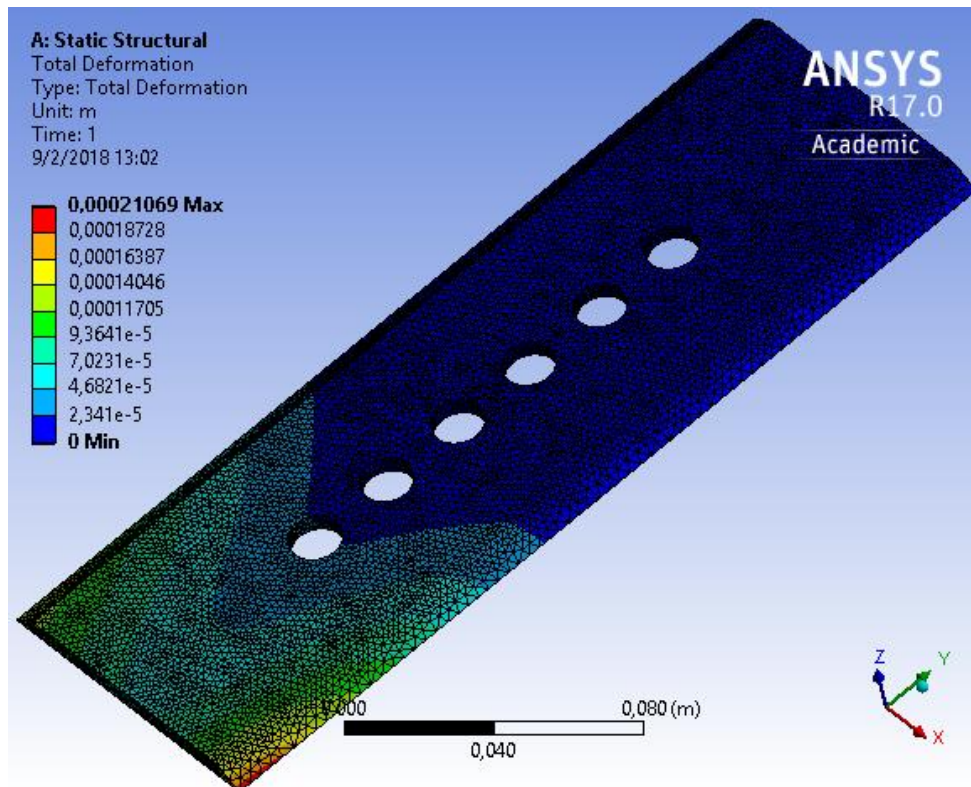
Figura 5. 93. Cargas y restricciones aplicadas al sistema - muestra 3 (Caso I).

Fuente: Elaboración Propia.



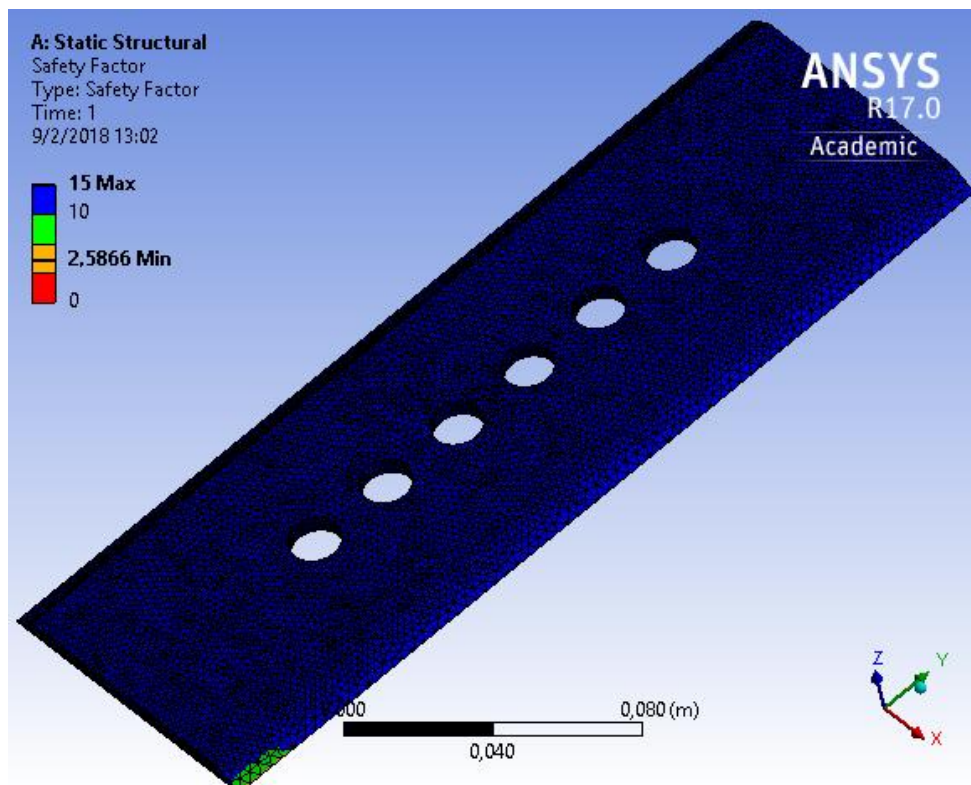
**Figura 5. 94. Esfuerzo equivalente de Von Mises en la muestra 3 (Caso I).**

Fuente: Elaboración Propia.



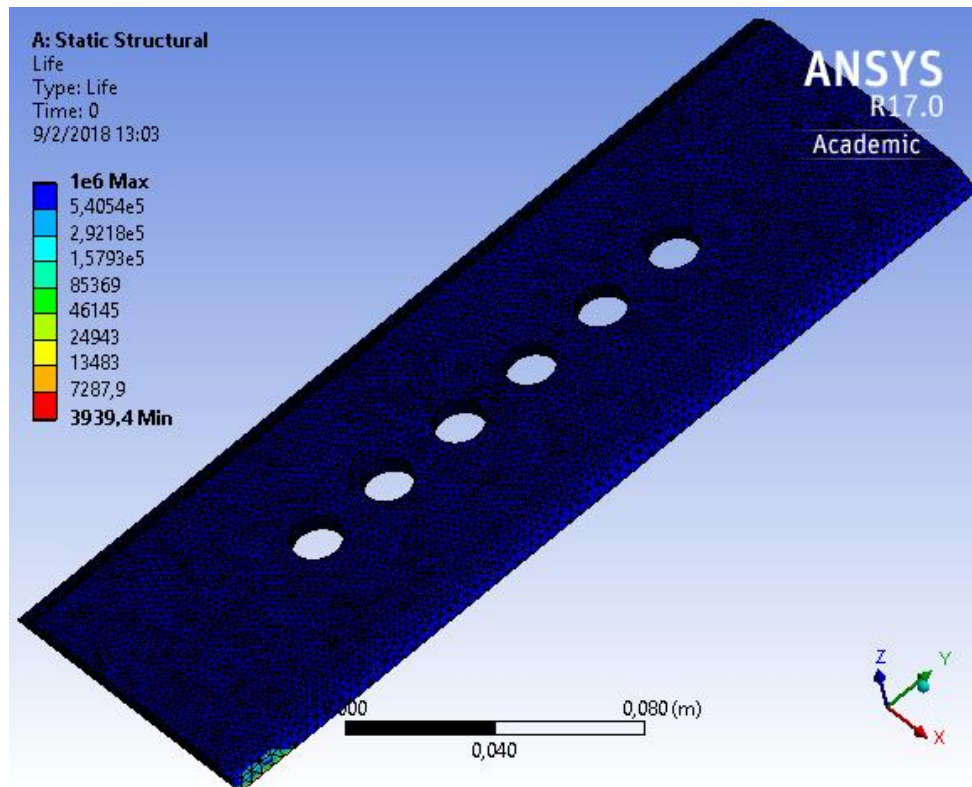
**Figura 5. 95. Deformación en la muestra 3 (Caso I).**

Fuente: Elaboración Propia.



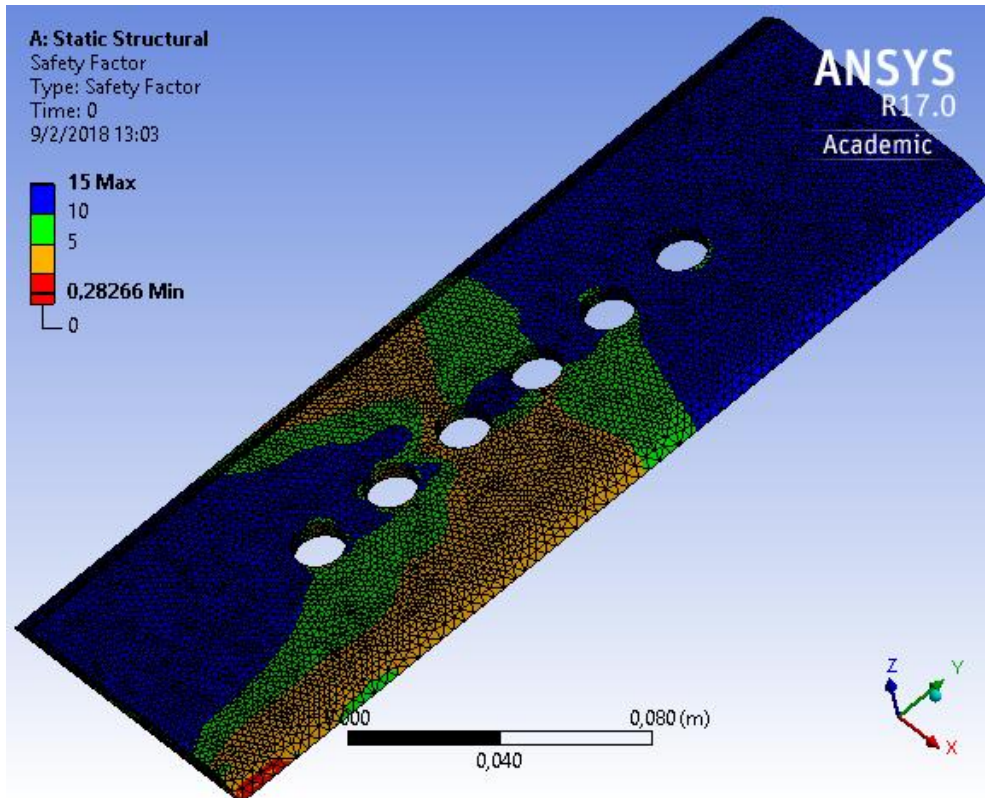
**Figura 5. 96. Factor de seguridad estático de la muestra 3 (Caso I).**

Fuente: Elaboración Propia.



**Figura 5. 97. Estimación de ciclos de trabajo de la muestra 3 (Caso I).**

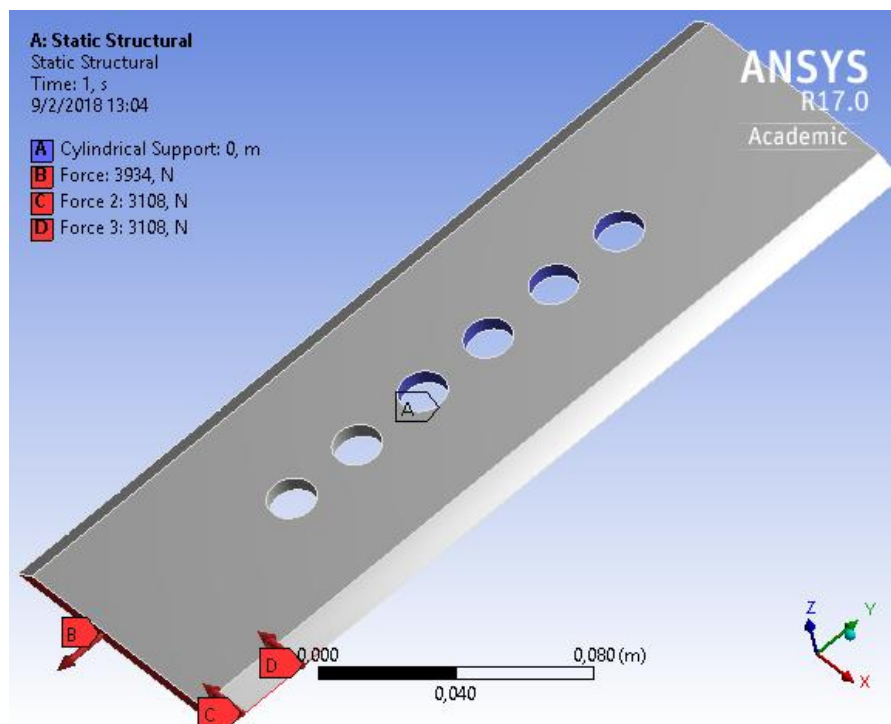
Fuente: Elaboración Propia.



**Figura 5. 98. Factor de seguridad por fatiga de la muestra 3 (Caso I).**

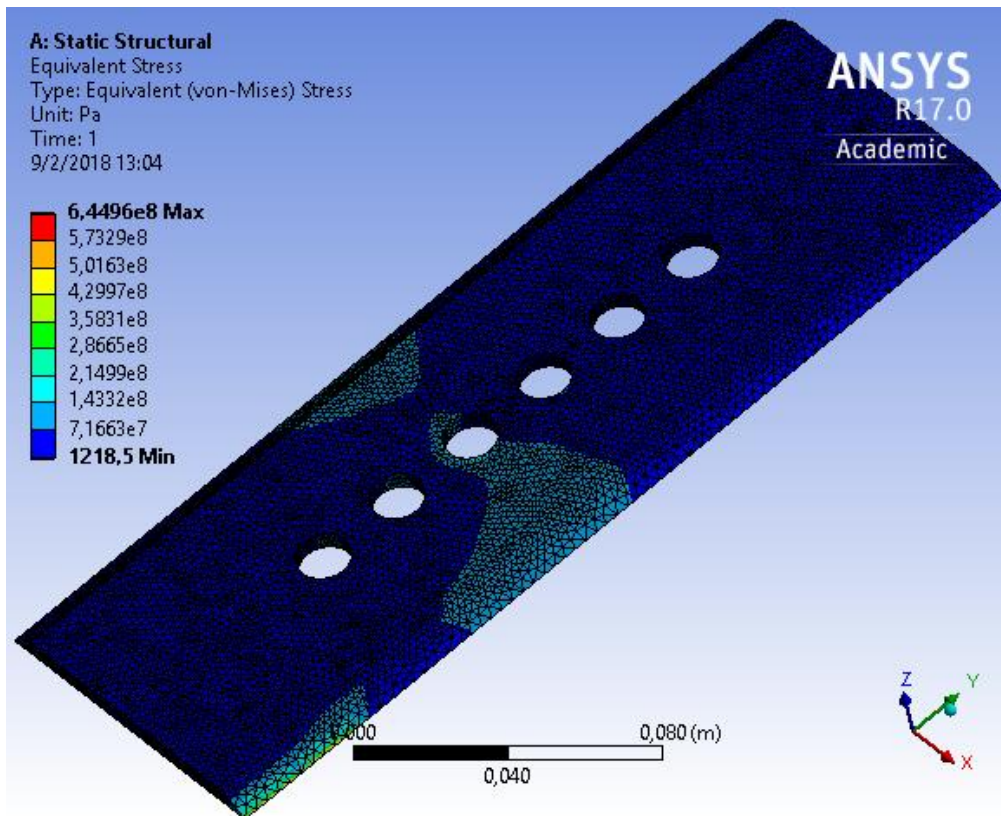
Fuente: Elaboración Propia.

**CASO II: CORTE DE DOS CAÑAS.**



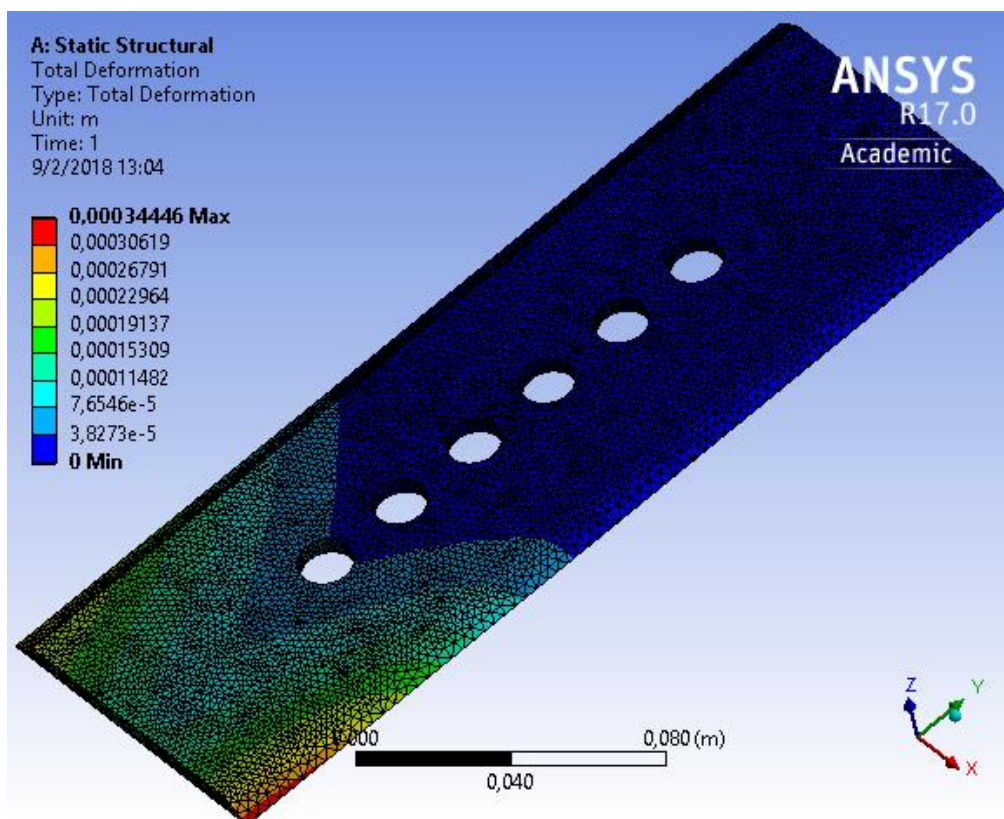
**Figura 5. 99. Cargas y restricciones aplicadas al sistema - muestra 3 (Caso II).**

Fuente: Elaboración Propia.



**Figura 5. 100. Esfuerzo equivalente de Von Mises en la muestra 3 (Caso II).**

Fuente: Elaboración Propia.



**Figura 5. 101. Deformación en la muestra 3 (Caso II).**

Fuente: Elaboración Propia.

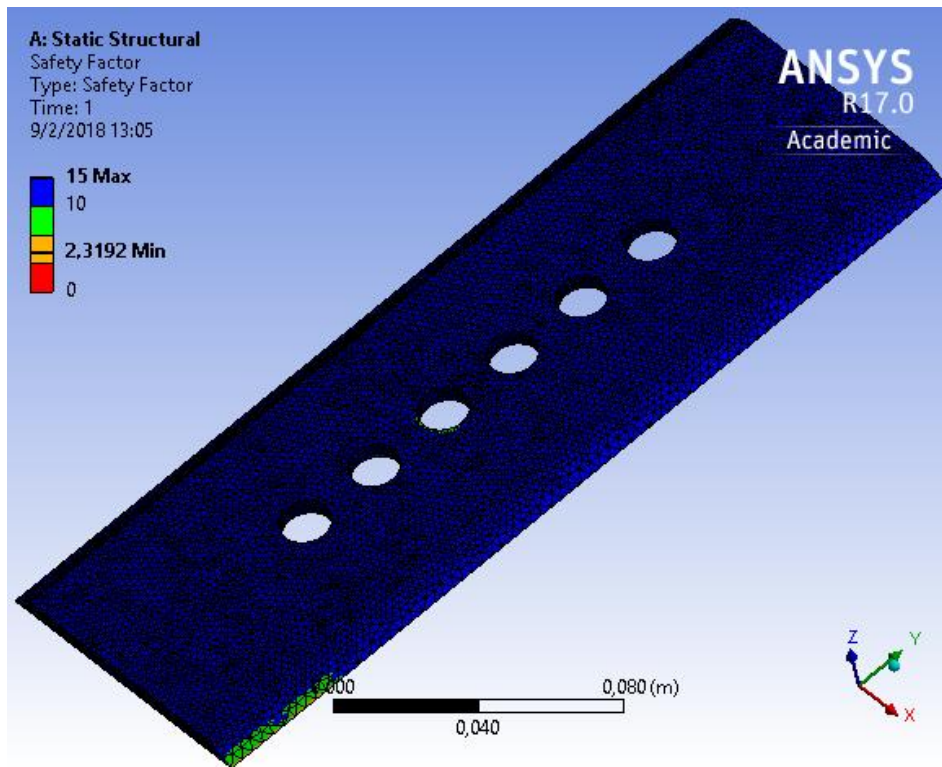


Figura 5. 102. Factor de seguridad estático de la muestra 3 (Caso II).

Fuente: Elaboración Propia.

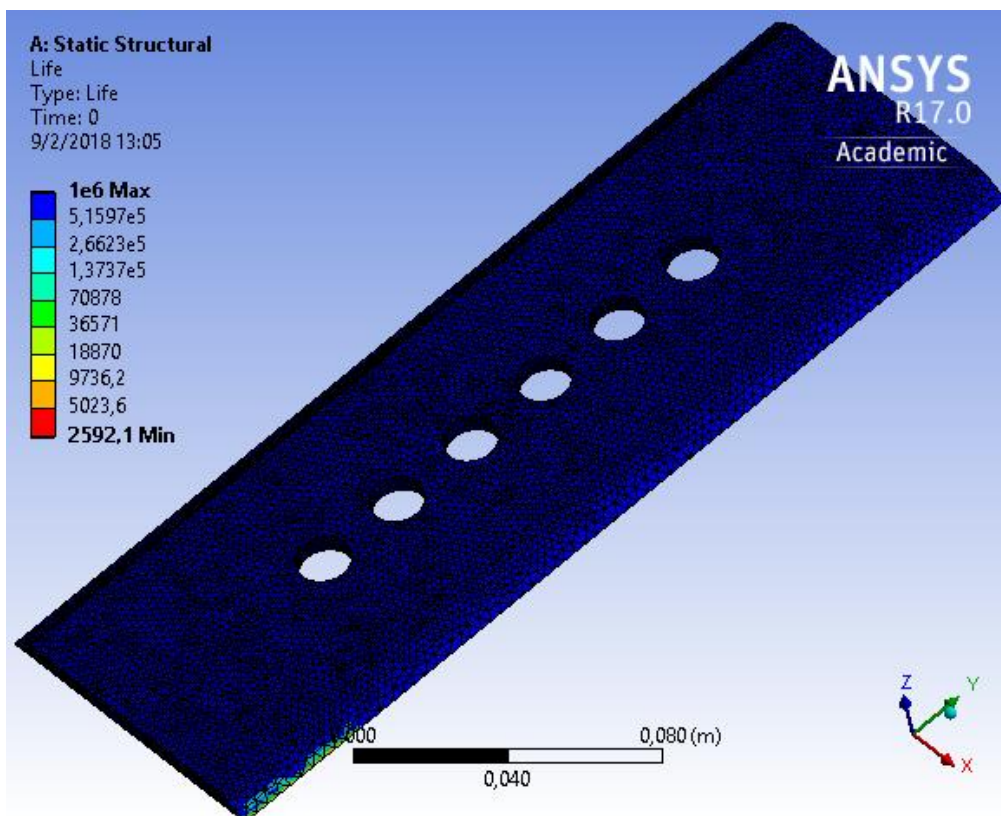




Figura 5. 103. Estimación de ciclos de trabajo de la muestra 3 (Caso II).

Fuente: Elaboración Propia.

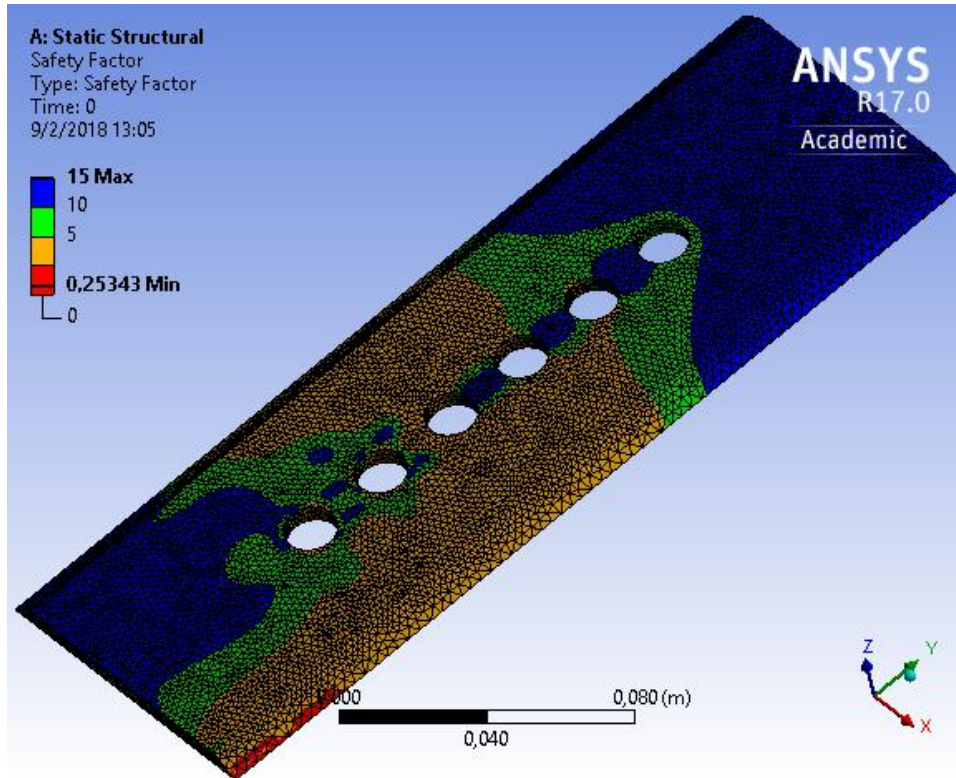
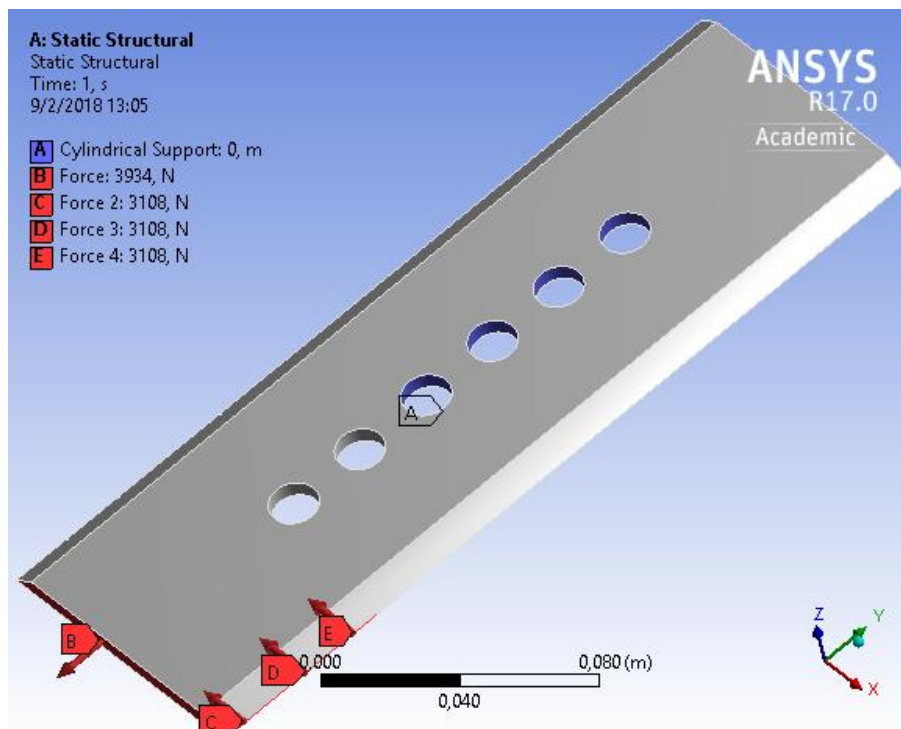


Figura 5. 104. Factor de seguridad por fatiga de la muestra 3 (Caso II).

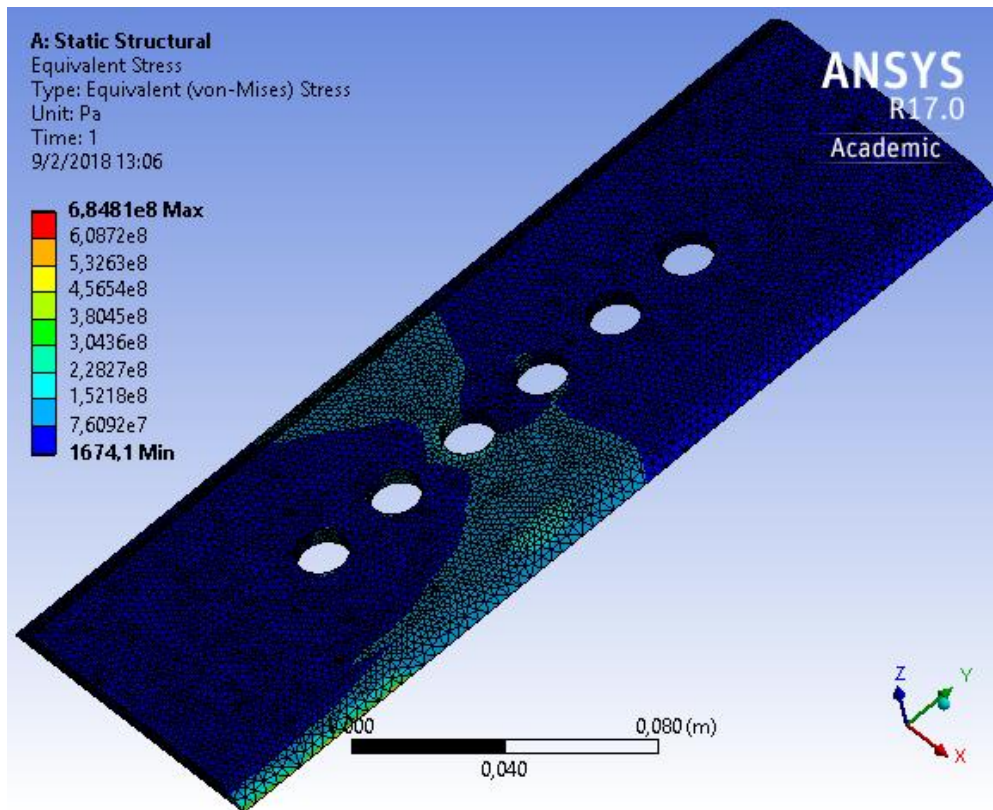
Fuente: Elaboración Propia.

### CASO III: CORTE DE TRES CAÑAS.



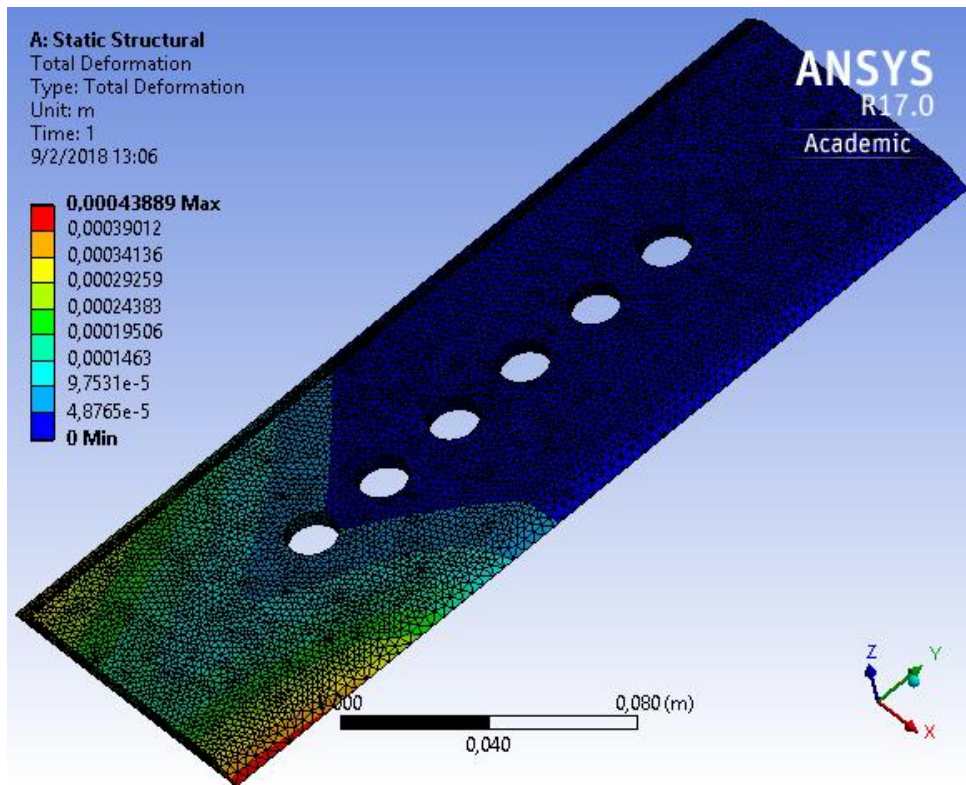
**Figura 5. 105. Cargas y restricciones aplicadas al sistema - muestra 3 (Caso III).**

Fuente: Elaboración Propia.



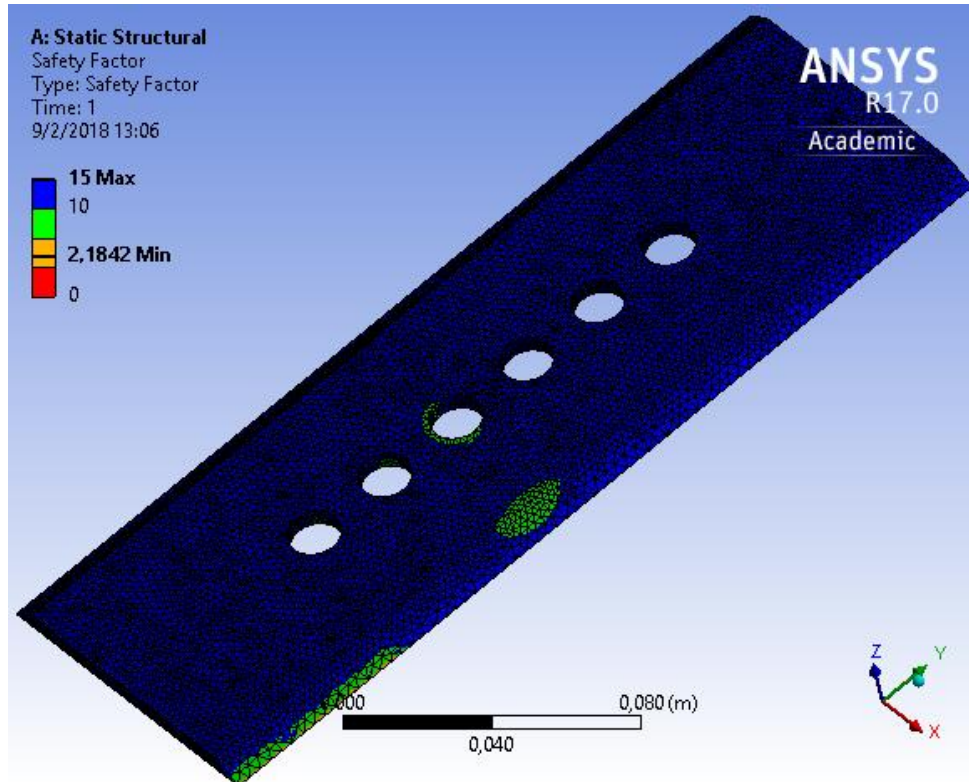
**Figura 5. 106. Esfuerzo equivalente de Von Mises en la muestra 3 (Caso III).**

Fuente: Elaboración Propia.



**Figura 5. 107. Deformación en la muestra 3 (Caso III).**

Fuente: Elaboración Propia.



**Figura 5. 108. Factor de seguridad estático de la muestra 3 (Caso III).**

Fuente: Elaboración Propia.

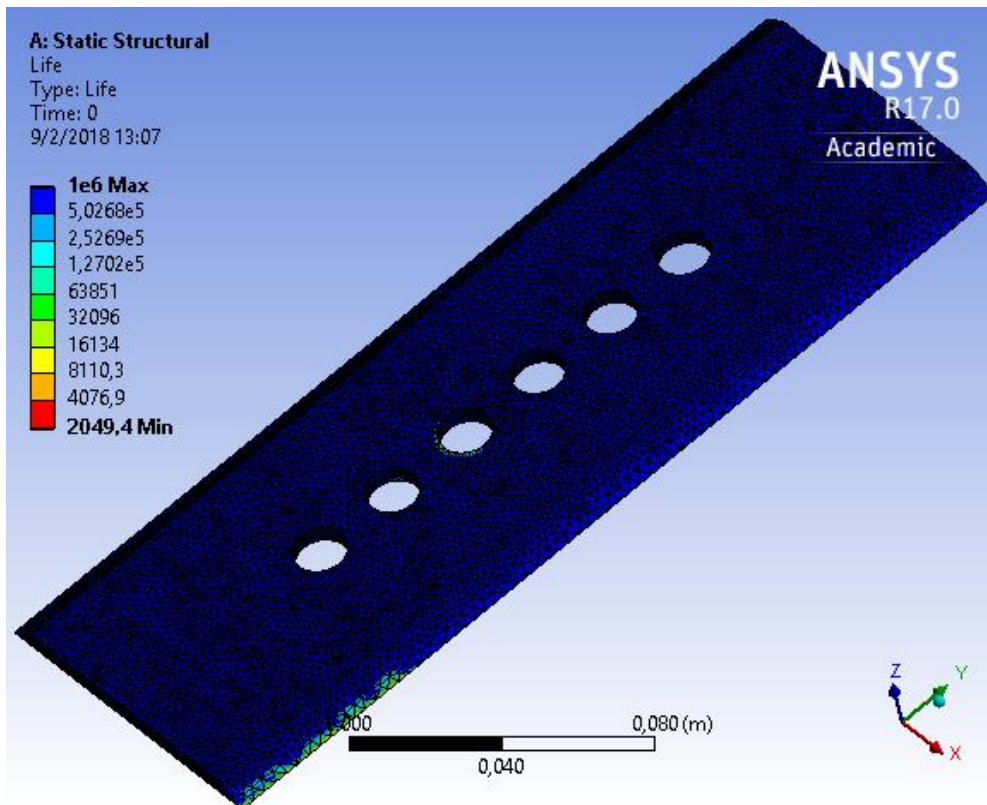


Figura 5. 109. Estimación de ciclos de trabajo de la muestra 3 (Caso III).

Fuente: Elaboración Propia.

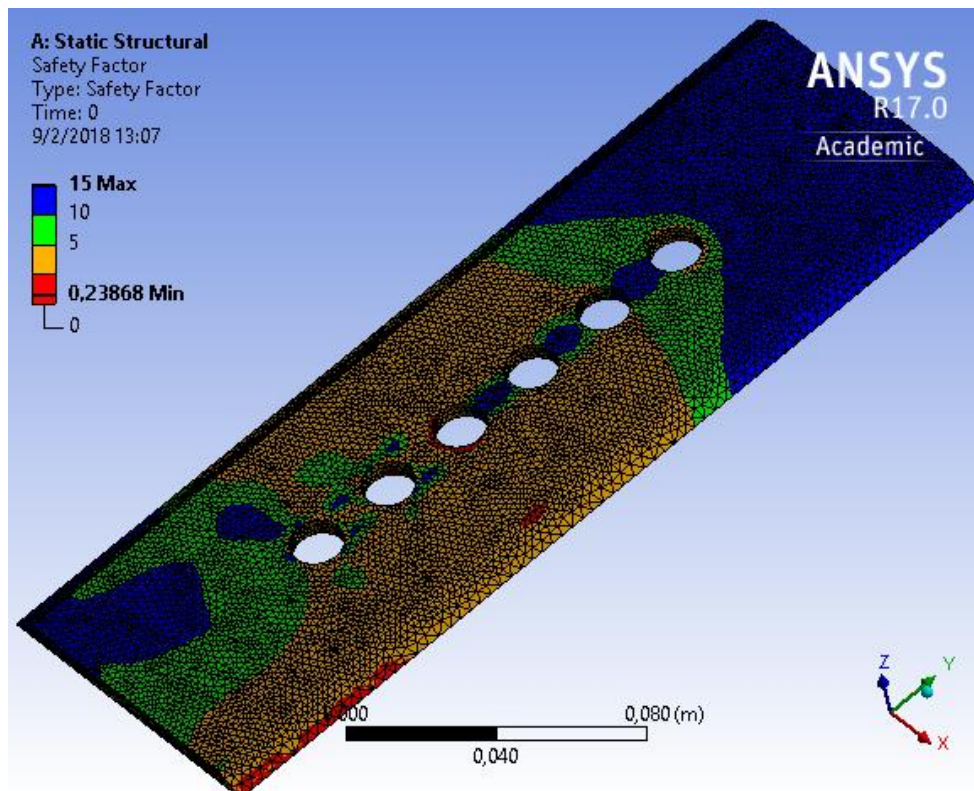


Figura 5. 110. Factor de seguridad por fatiga de la muestra 3 (Caso III).

Fuente: Elaboración Propia.

### CASO IV: CORTE DE CUATRO CAÑAS.

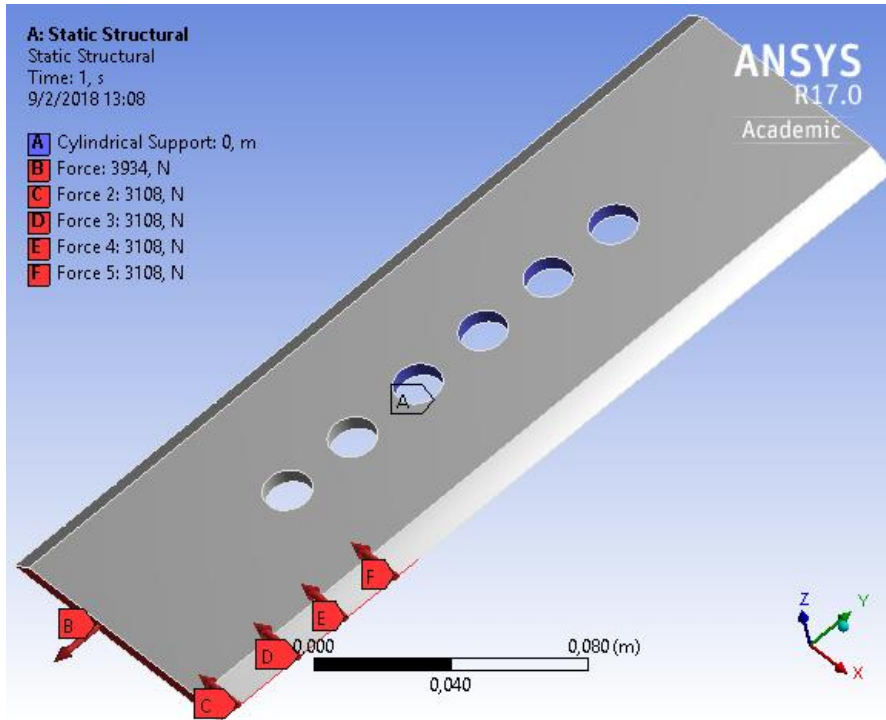
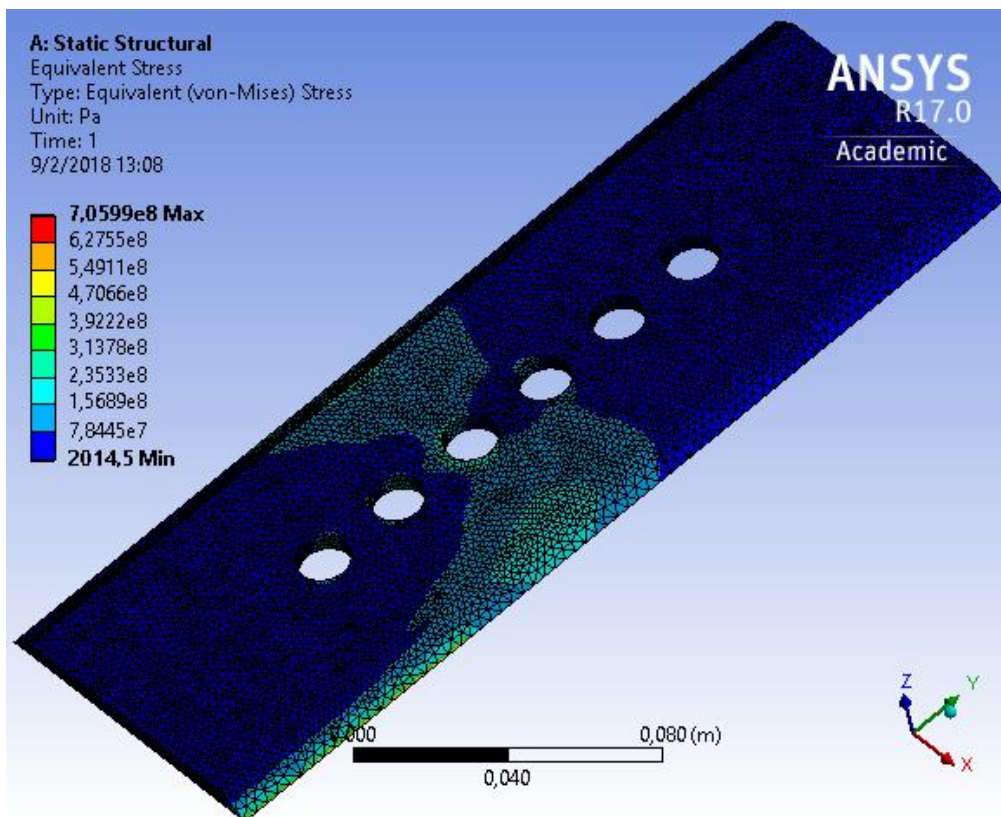


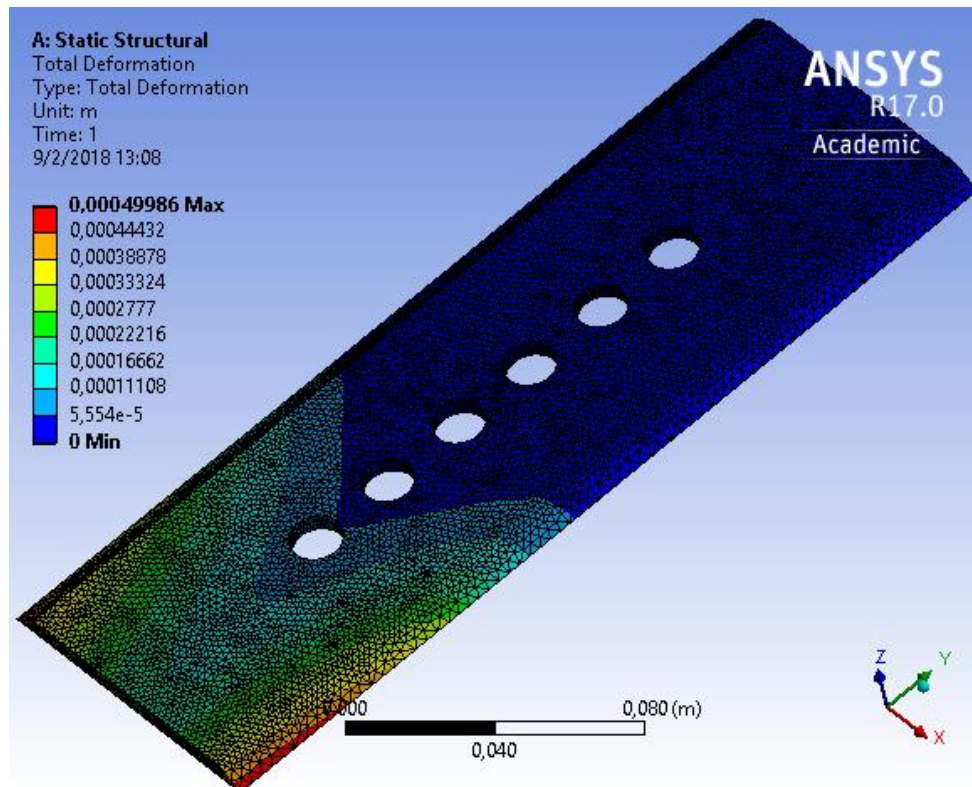
Figura 5. 111. Cargas y restricciones aplicadas al sistema - muestra 3 (Caso IV).

Fuente: Elaboración Propia.



**Figura 5. 112. Esfuerzo equivalente de Von Mises en la muestra 3 (Caso IV).**

Fuente: Elaboración Propia.



**Figura 5. 113. Deformación en la muestra 3 (Caso IV).**

Fuente: Elaboración Propia.

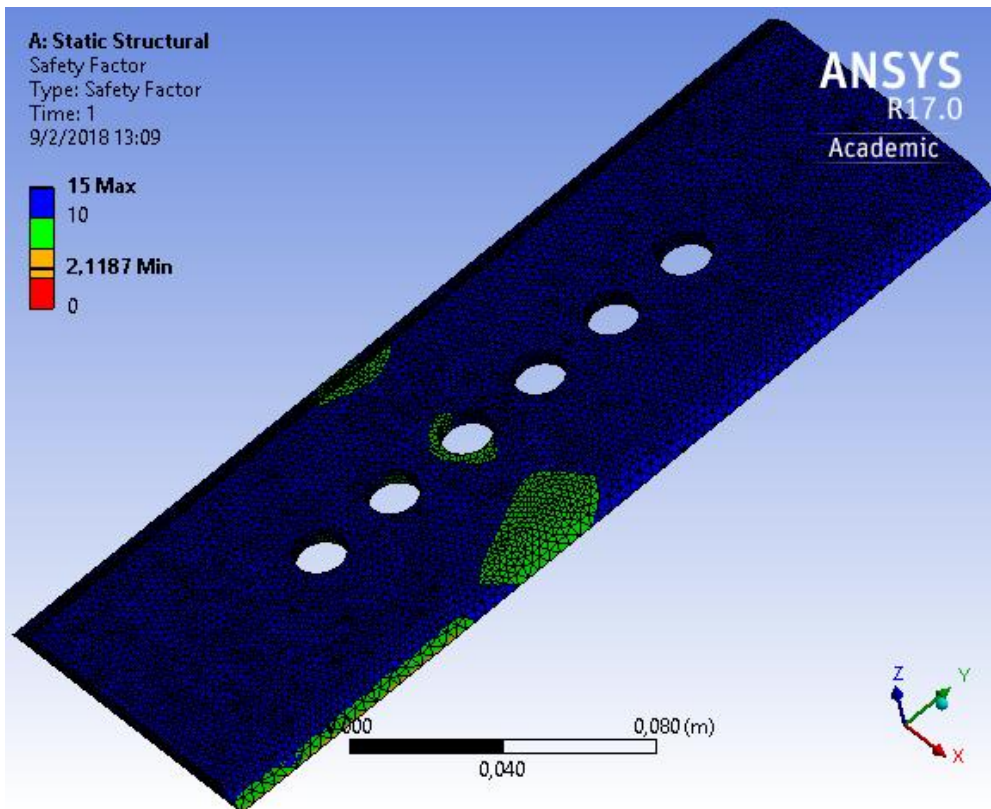


Figura 5. 114. Factor de seguridad estático de la muestra 3 (Caso IV).

Fuente: Elaboración Propia.

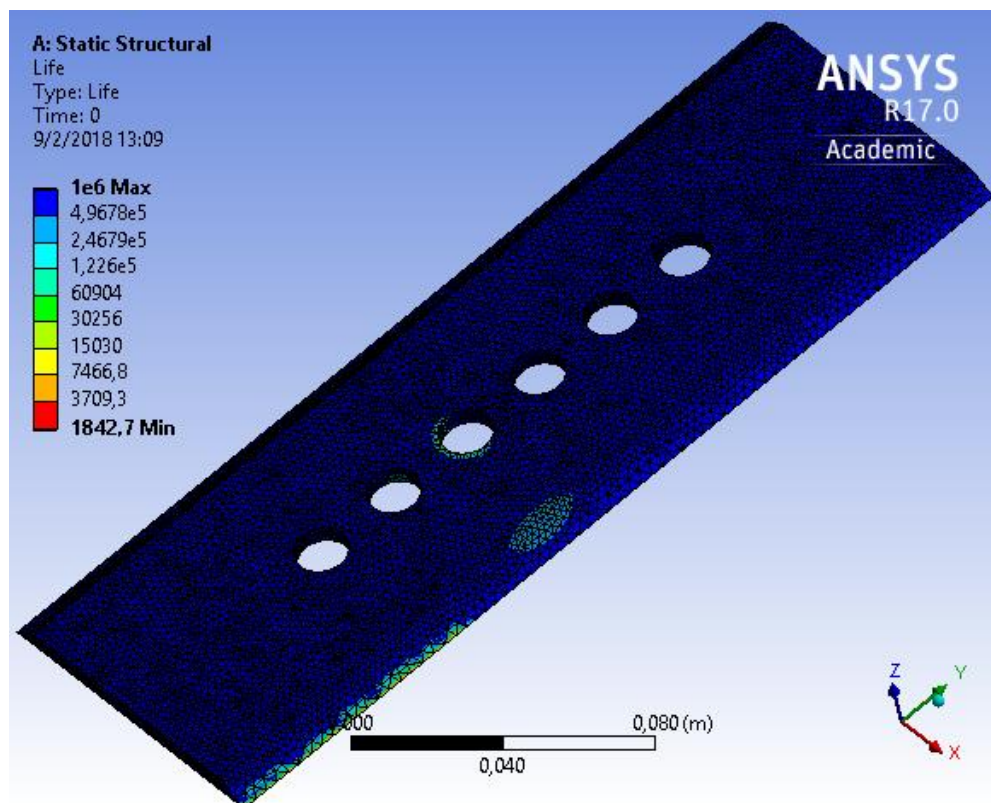


Figura 5. 115. Estimación de ciclos de trabajo de la muestra 3 (Caso IV).

Fuente: Elaboración Propia.

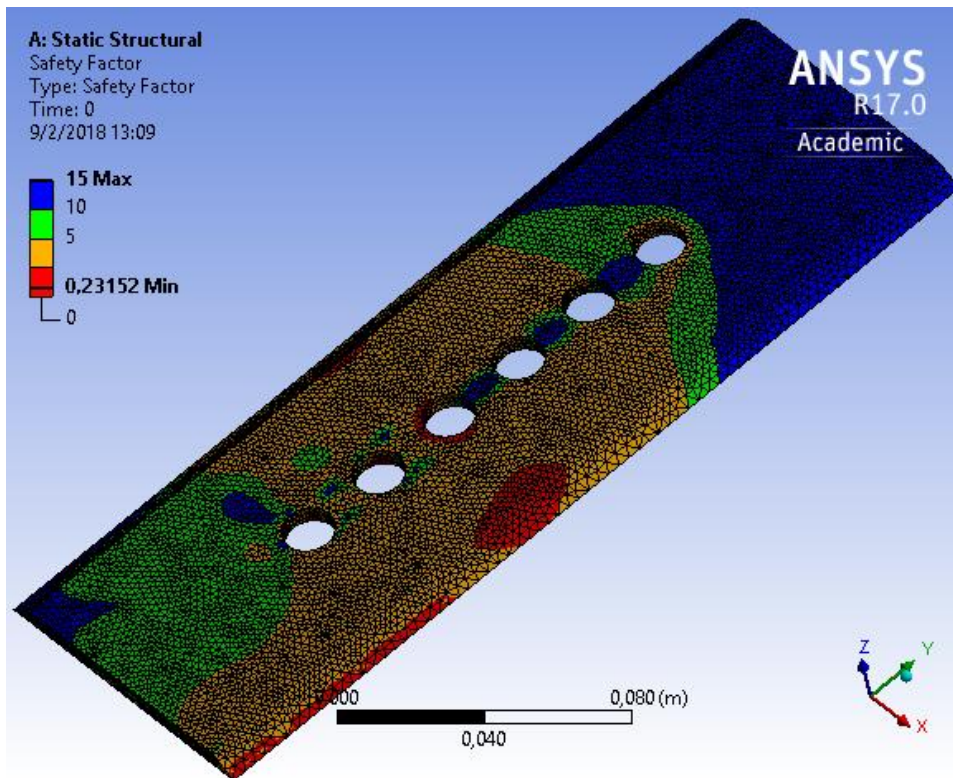
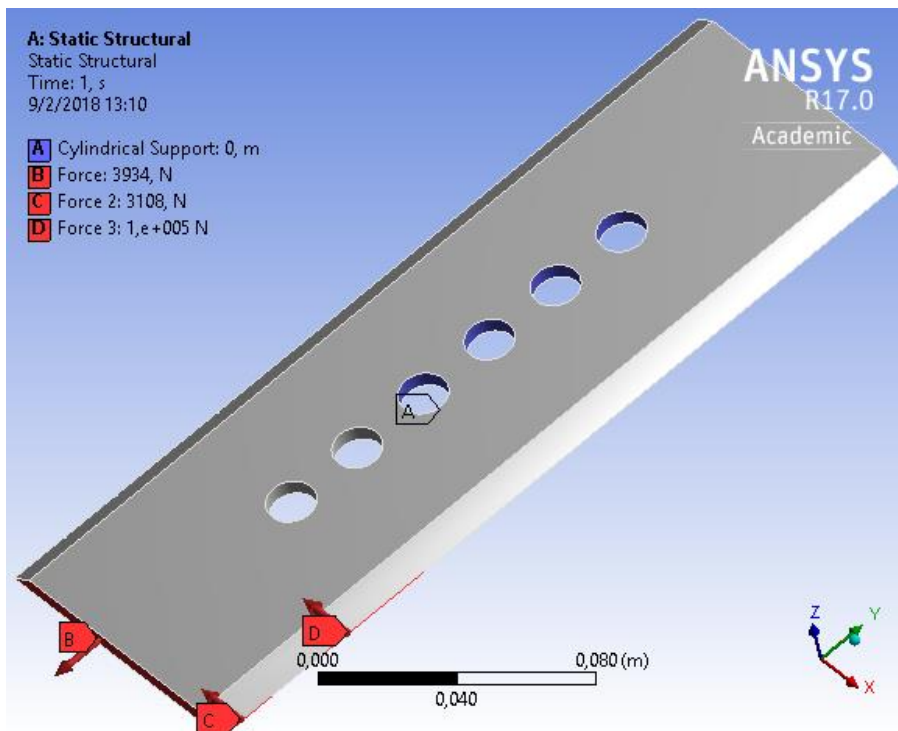


Figura 5. 116. Factor de seguridad por fatiga de la muestra 3 (Caso IV).

Fuente: Elaboración Propia.

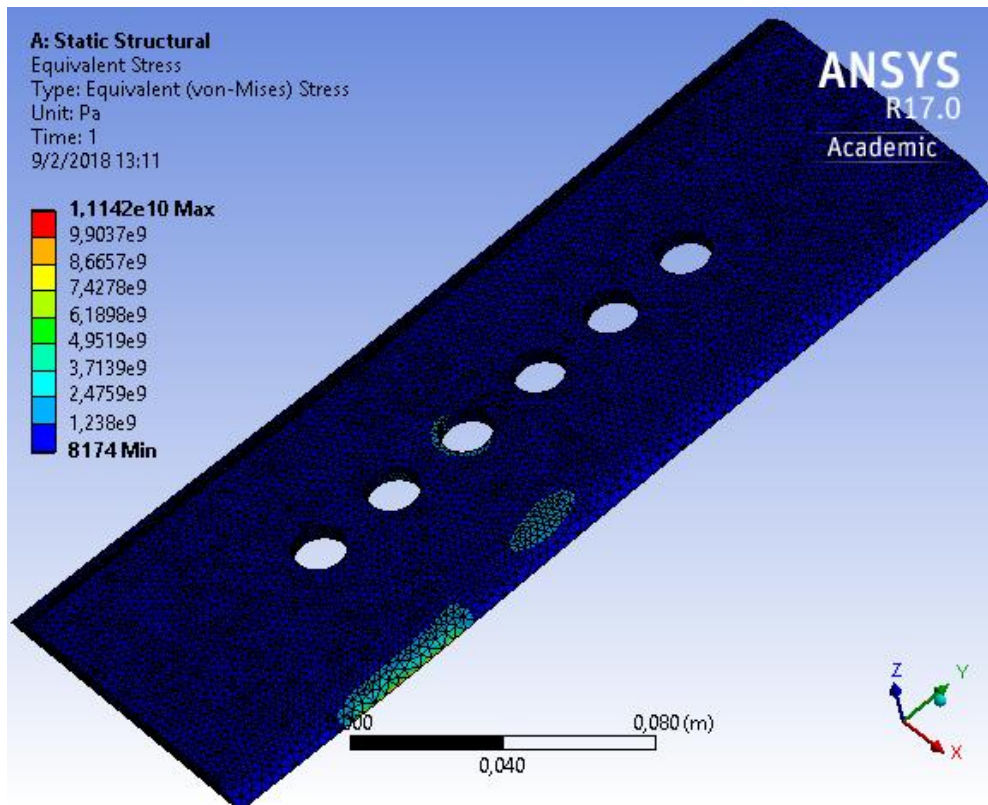
### CASO V: CORTE DE UNA CAÑA E IMPACTANDO UNA PIEDRA





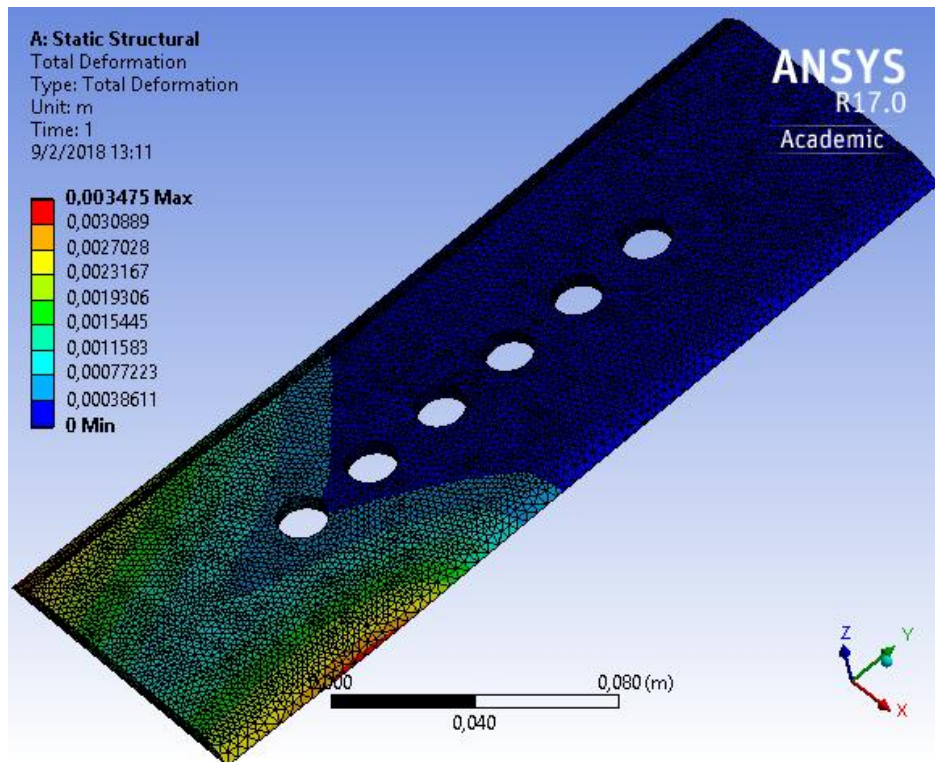
**Figura 5. 117. Cargas y restricciones aplicadas al sistema - muestra 3 (Caso V).**

Fuente: Elaboración Propia.



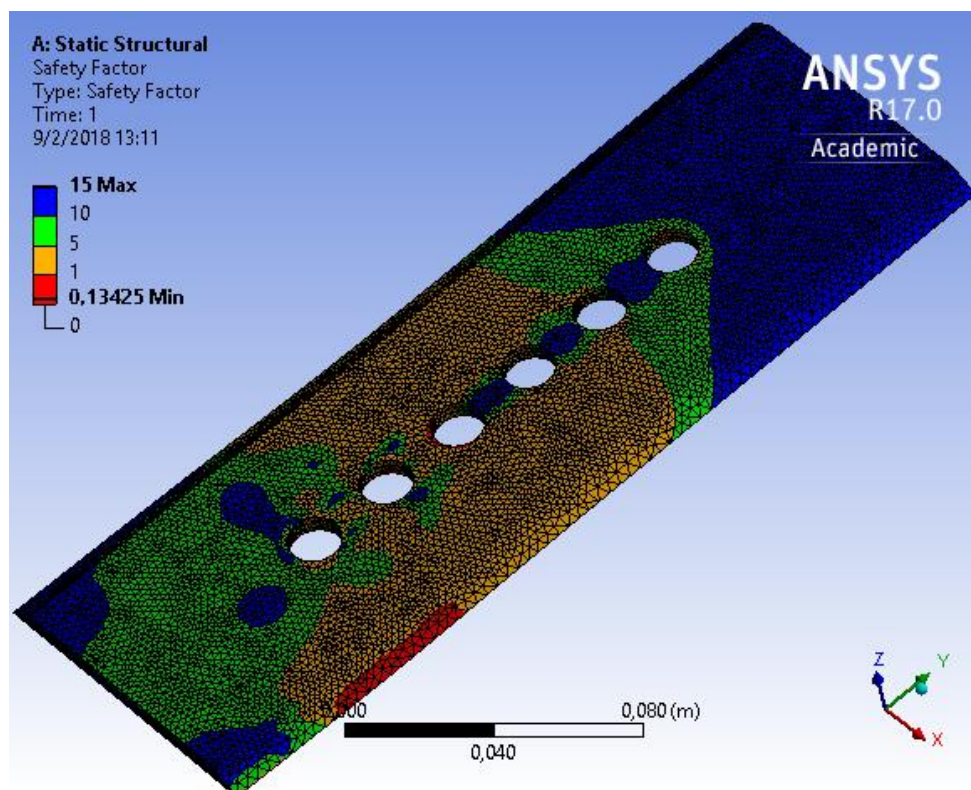
**Figura 5. 118. Esfuerzo equivalente de Von Mises en la muestra 3 (Caso V).**

Fuente: Elaboración Propia.



**Figura 5. 119. Deformación en la muestra 3 (Caso V).**

Fuente: Elaboración Propia.



**Figura 5. 120. Factor de seguridad estático de la muestra 3 (Caso V).**

Fuente: Elaboración Propia.

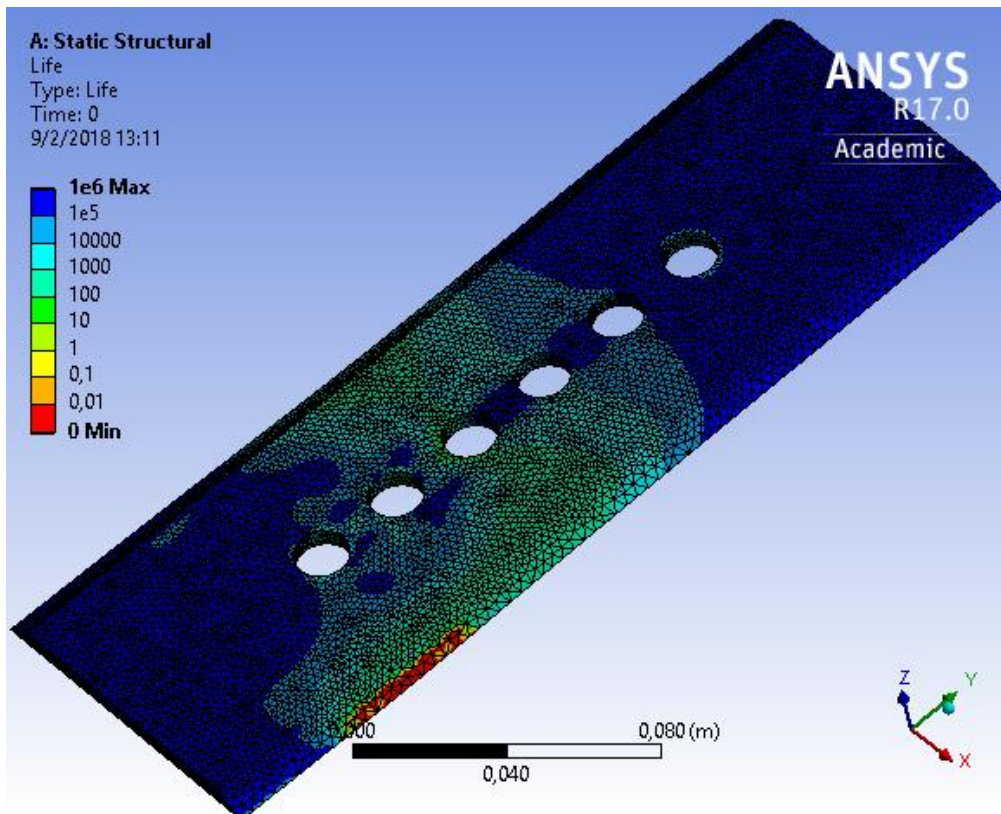


Figura 5. 121. Estimación de ciclos de trabajo de la muestra 3 (Caso V).

Fuente: Elaboración Propia.

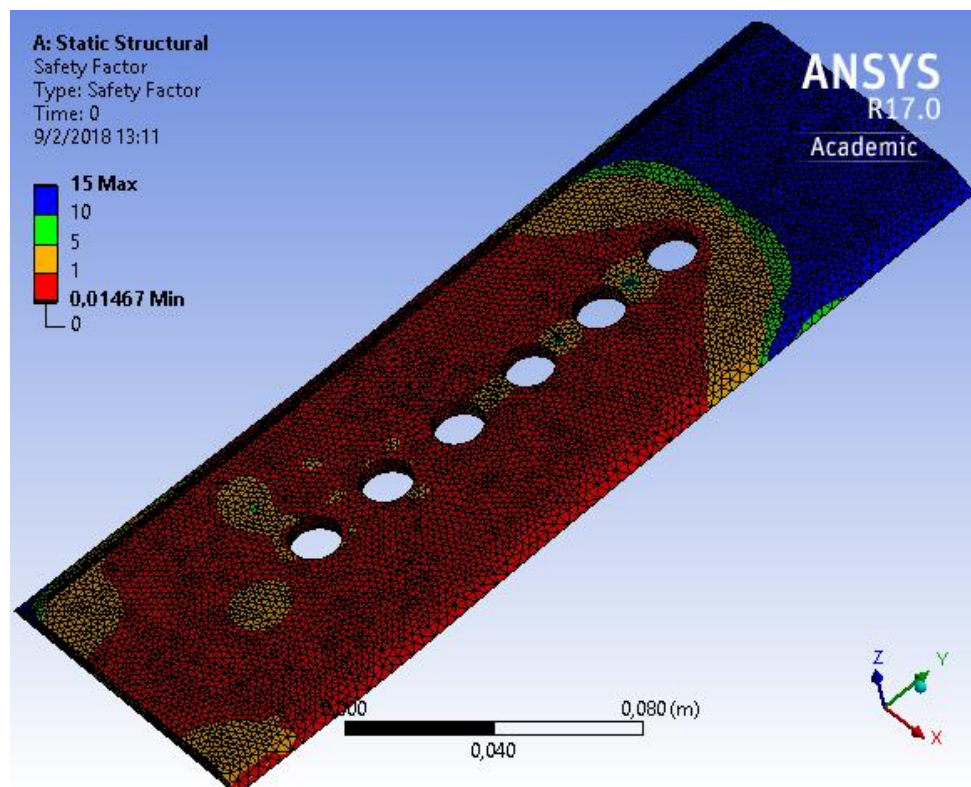


Figura 5. 122. Factor de seguridad por fatiga de la muestra 3 (Caso V).

Fuente: Elaboración Propia.

## CASO VI: IMPACTO DE UNA PIEDRA

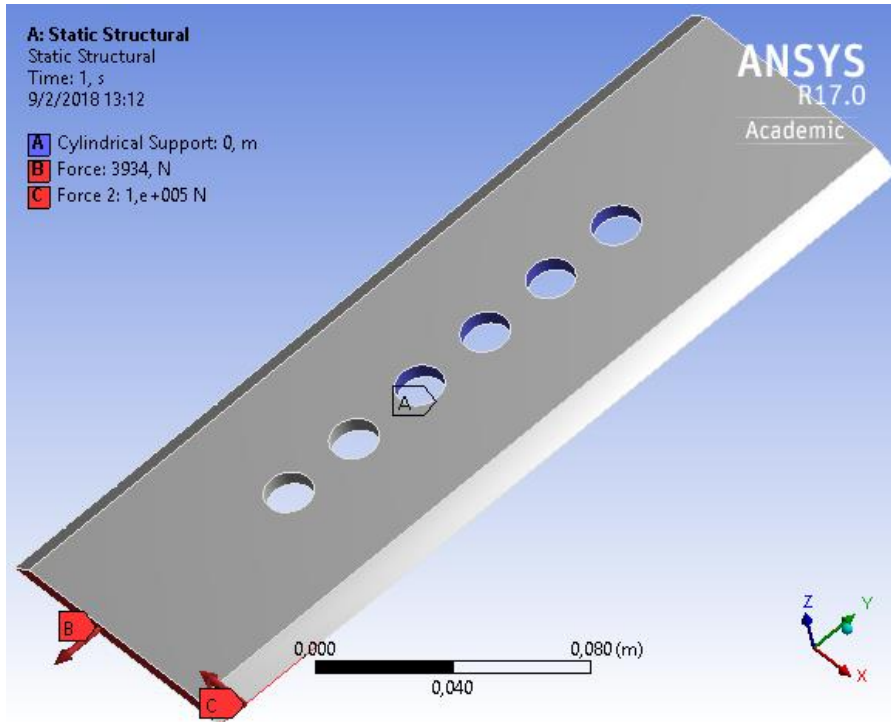
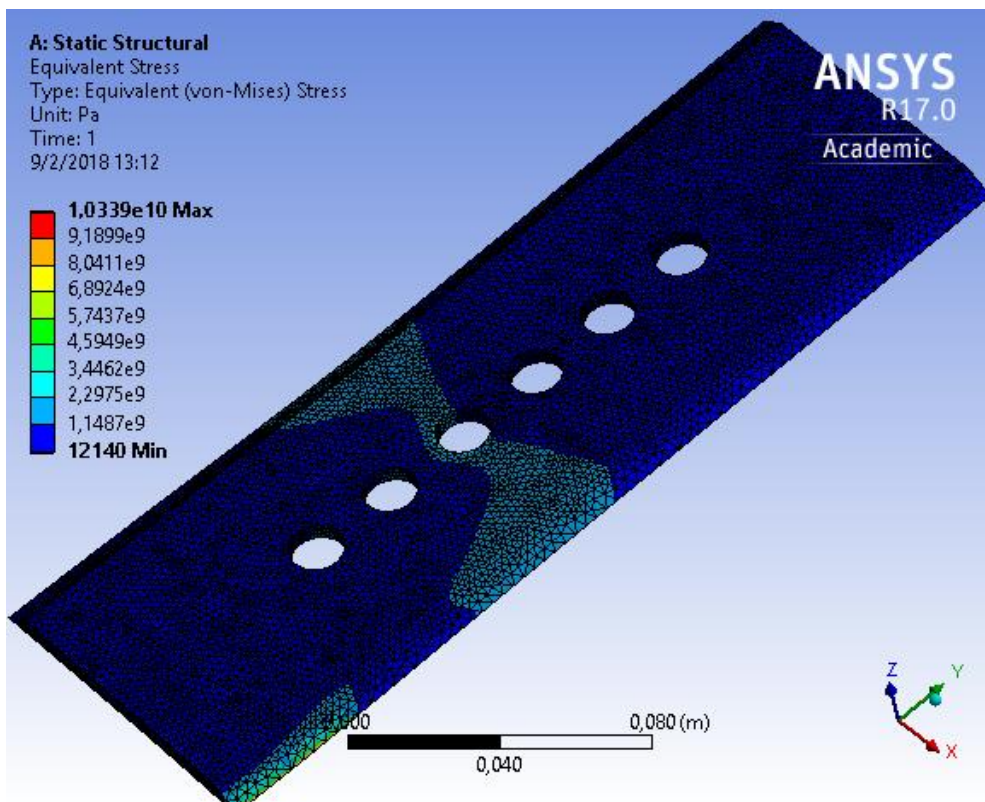


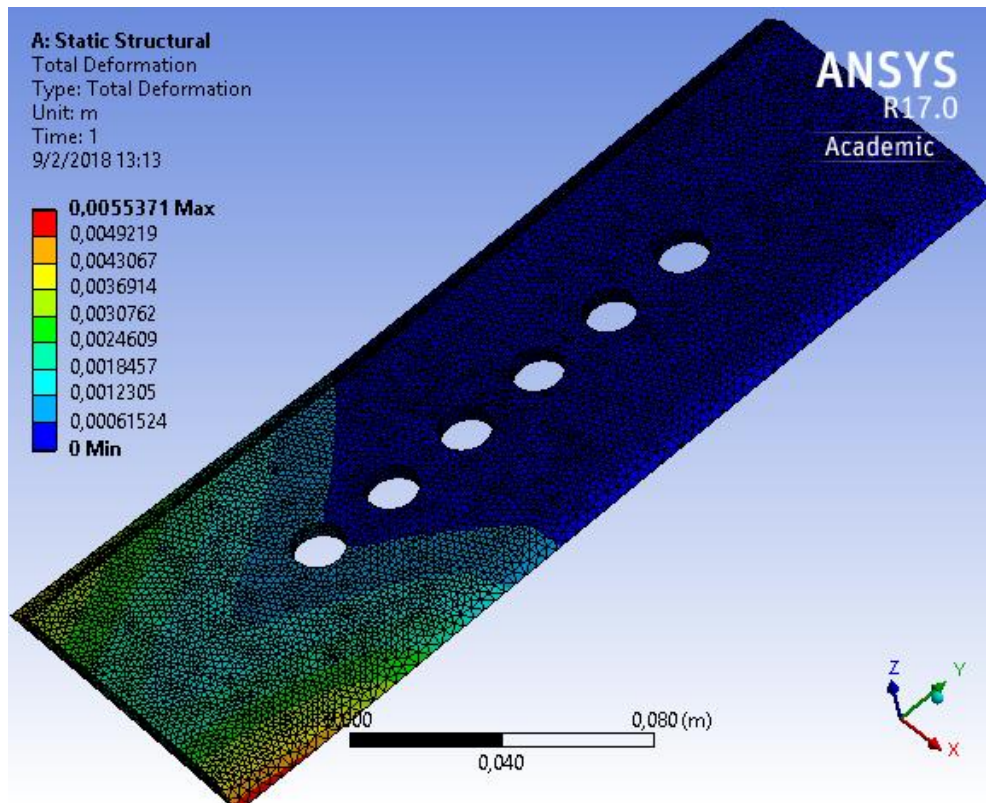
Figura 5. 123. Cargas y restricciones aplicadas al sistema - muestra 3 (Caso VI).

Fuente: Elaboración Propia.



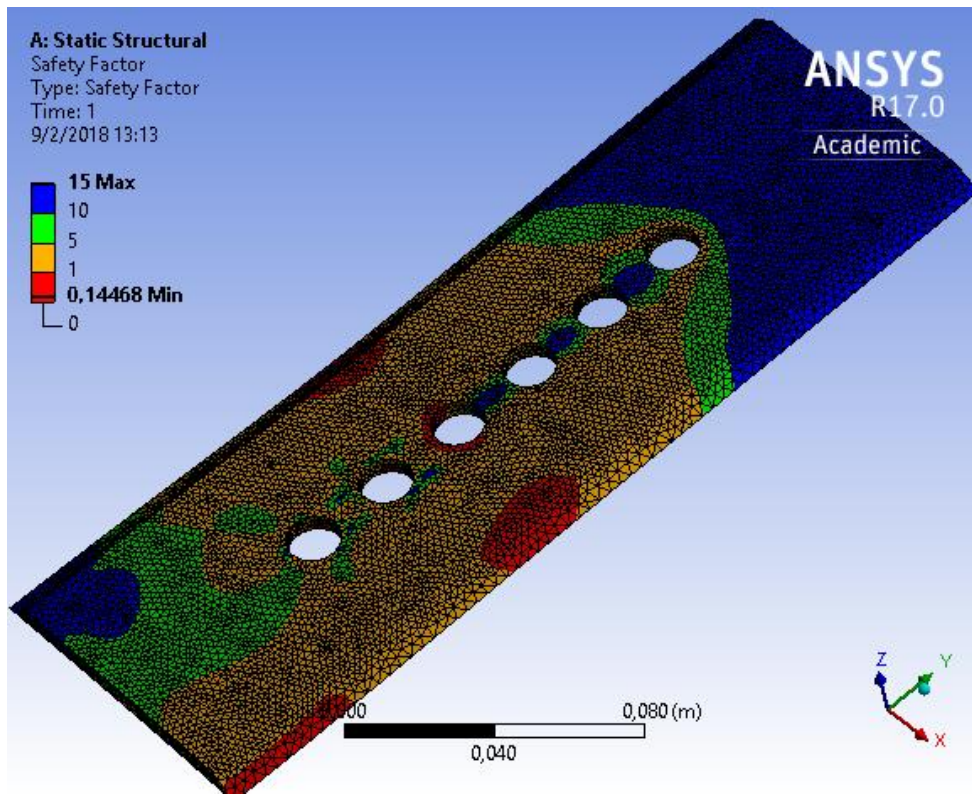
**Figura 5. 124. Esfuerzo equivalente de Von Mises en la muestra 3 (Caso VI).**

Fuente: Elaboración Propia.



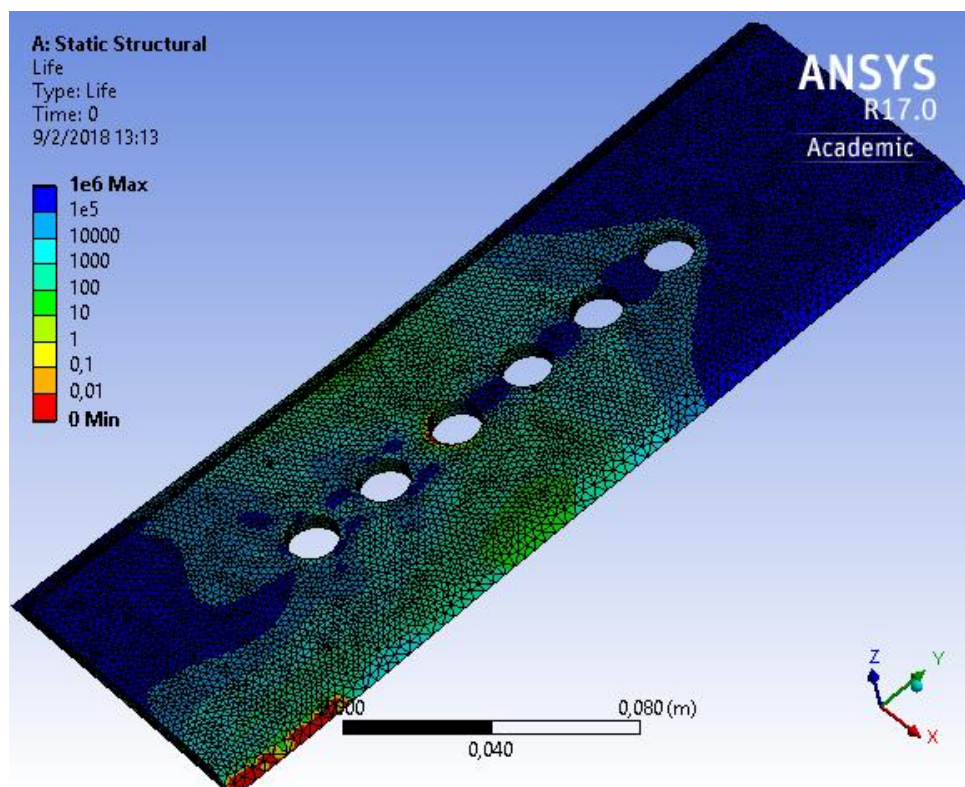
**Figura 5. 125. Deformación en la muestra 3 (Caso VI).**

Fuente: Elaboración Propia.



**Figura 5. 126. Factor de seguridad estático de la muestra 3 (Caso VI).**

Fuente: Elaboración Propia.



**Figura 5. 127. Estimación de ciclos de trabajo de la muestra 3 (Caso VI).**

Fuente: Elaboración Propia.

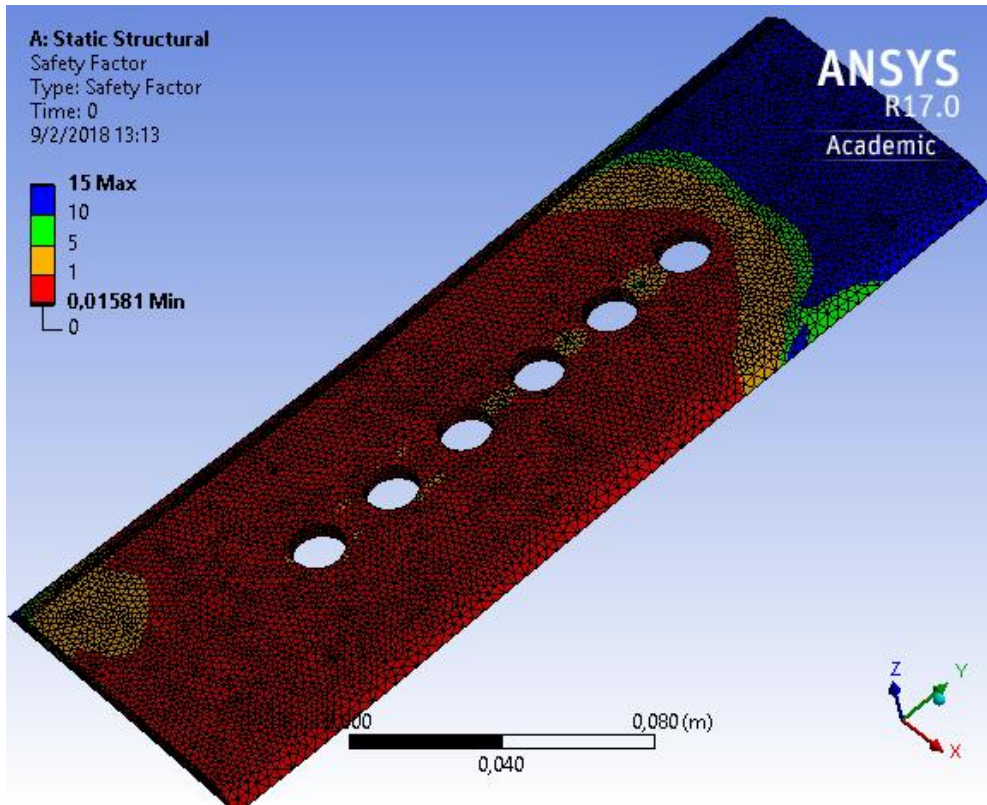


Figura 5. 128. Factor de seguridad por fatiga de la muestra 3 (Caso VI).

Fuente: Elaboración Propia.

### CASO VII: IMPACTO DE DOS PIEDRAS.

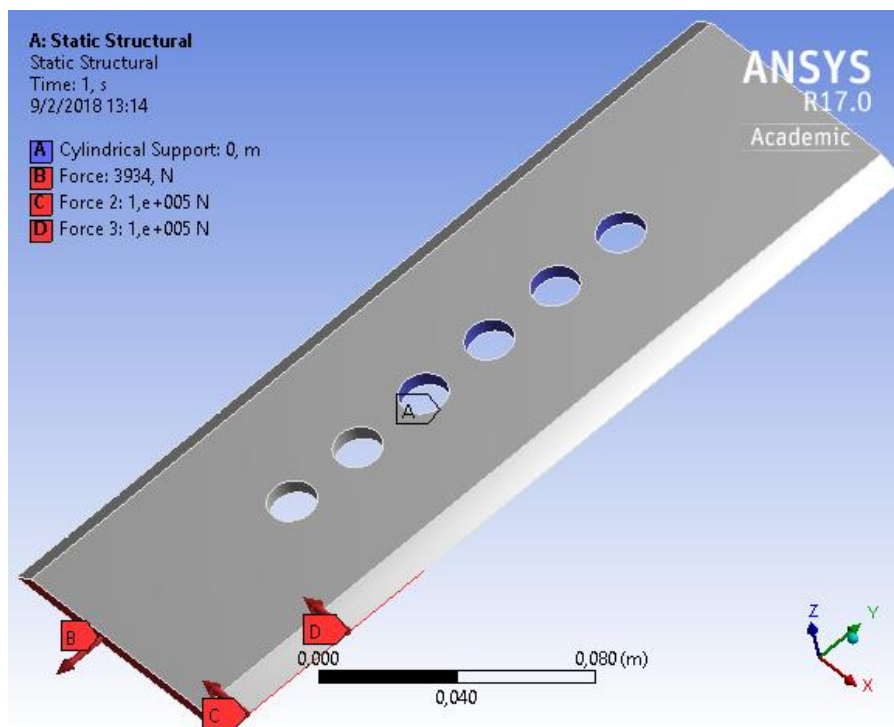
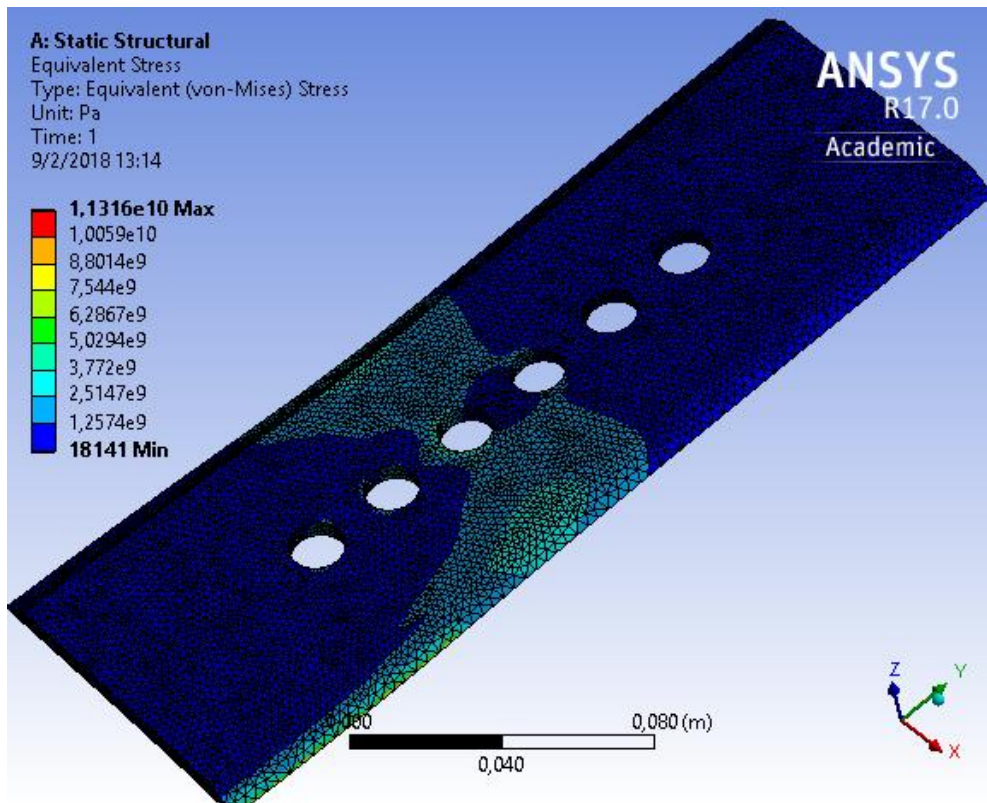


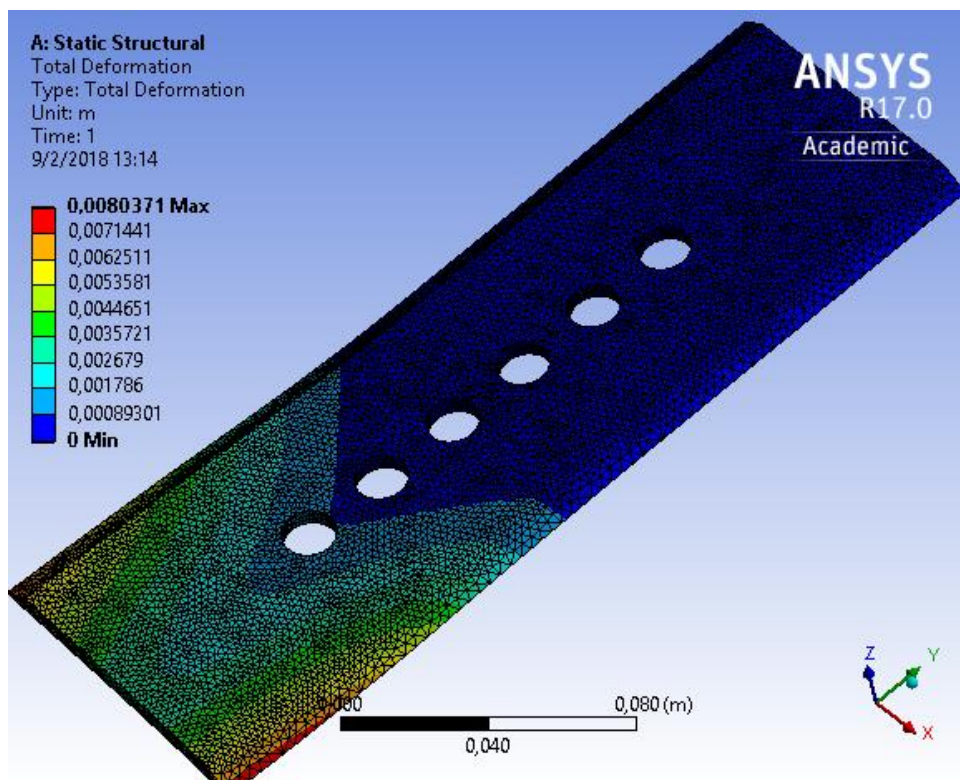
Figura 5. 129. Cargas y restricciones aplicadas al sistema - muestra 3 (Caso VII).

Fuente: Elaboración Propia.



**Figura 5. 130. Esfuerzo equivalente de Von Mises en la muestra 3 (Caso VII).**

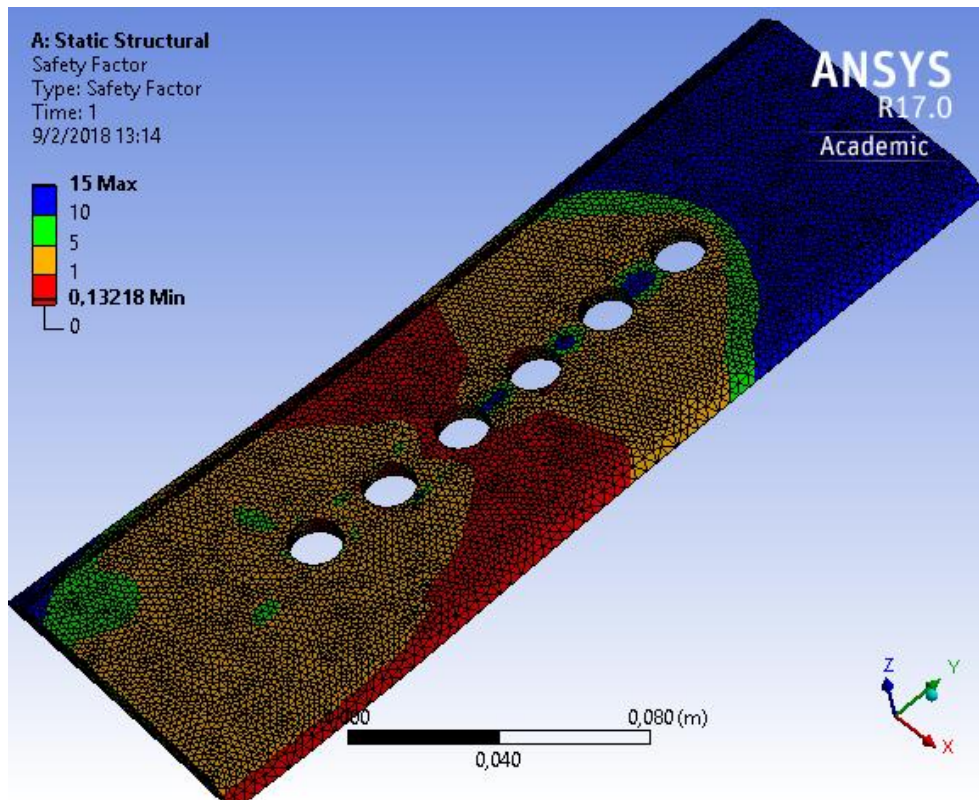
Fuente: Elaboración Propia.



**Figura 5. 131. Deformación en la muestra 3 (Caso VII).**

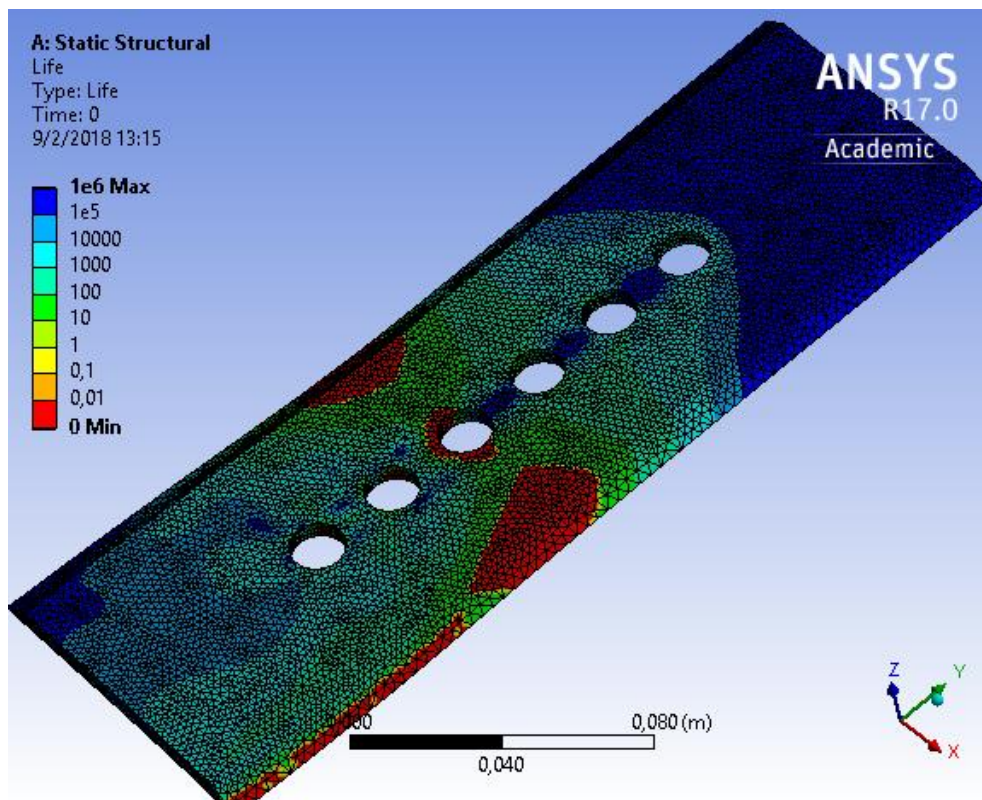
Fuente: Elaboración Propia.





**Figura 5. 132. Factor de seguridad estático de la muestra 3 (Caso VII).**

Fuente: Elaboración Propia.



**Figura 5. 133. Estimación de ciclos de trabajo de la muestra 3 (Caso VII).**

Fuente: Elaboración Propia.

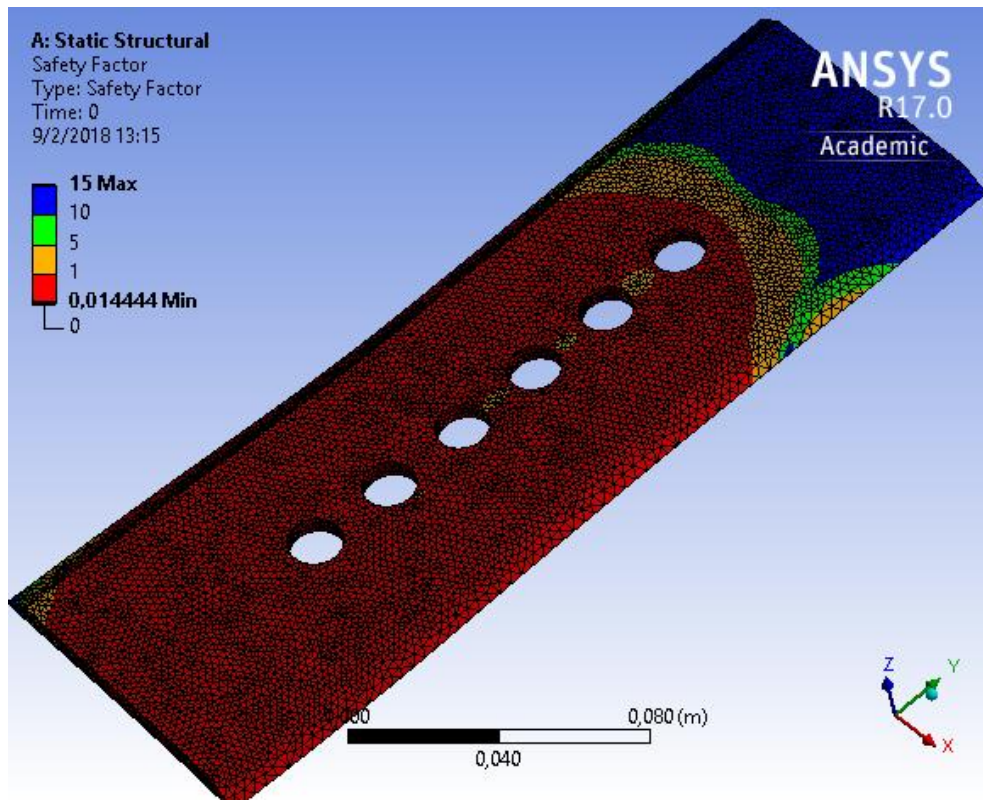
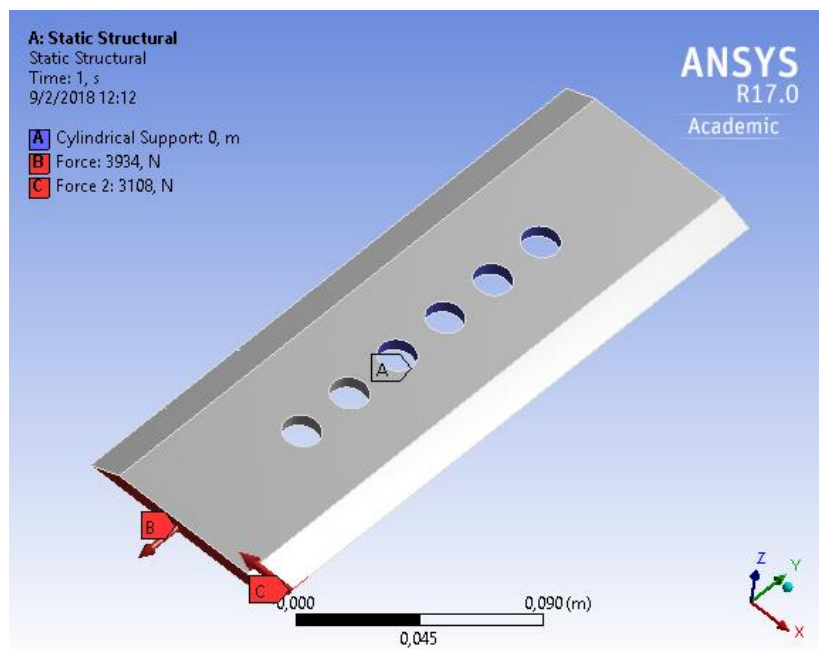


Figura 5. 134. Factor de seguridad por fatiga de la muestra 3 (Caso VII).

Fuente: Elaboración Propia.

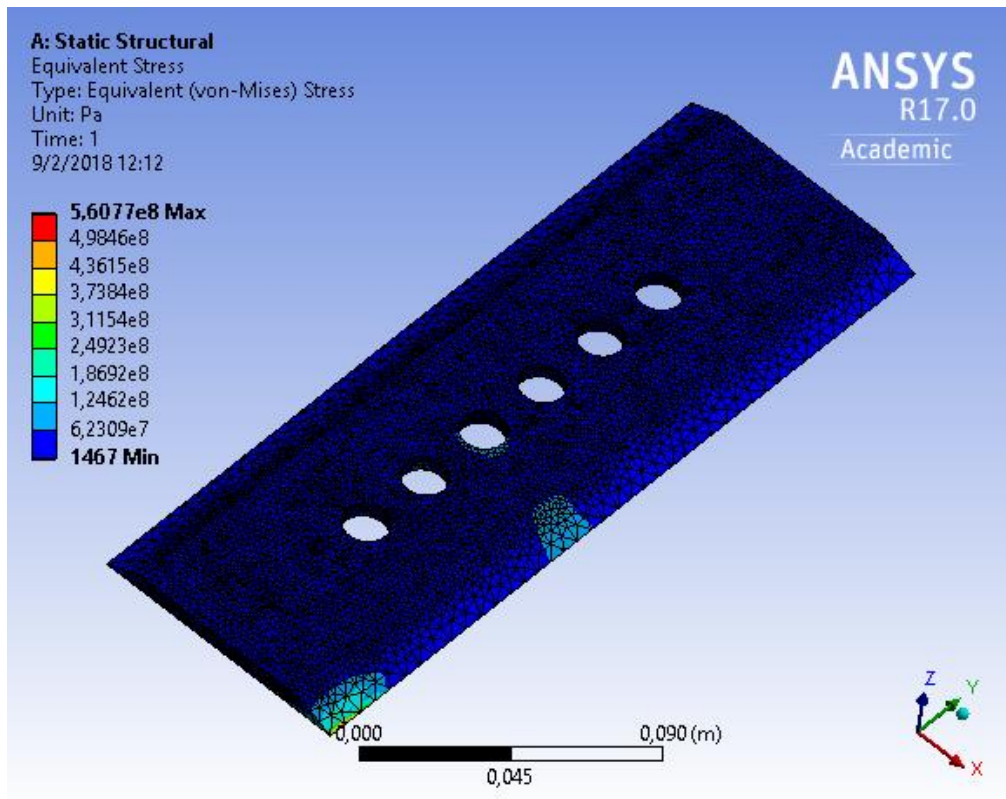
## MUESTRA 4

### CASO I: CORTE DE UNA CAÑA.



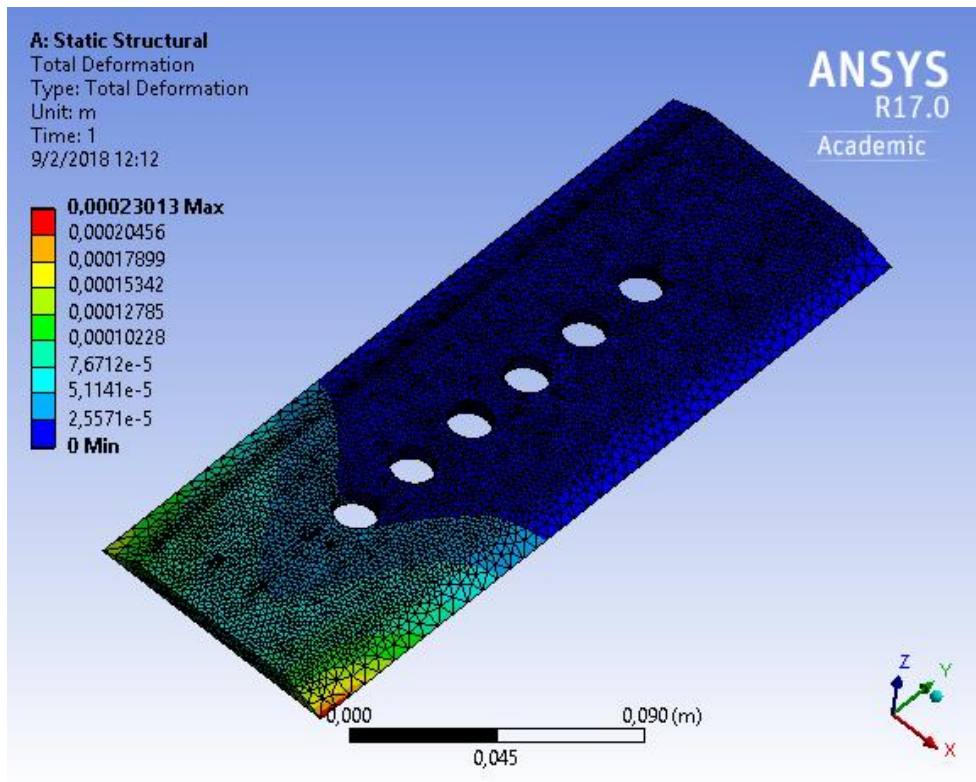
**Figura 5. 135. Cargas y restricciones aplicadas al sistema - muestra 4 (Caso I).**

Fuente: Elaboración Propia.



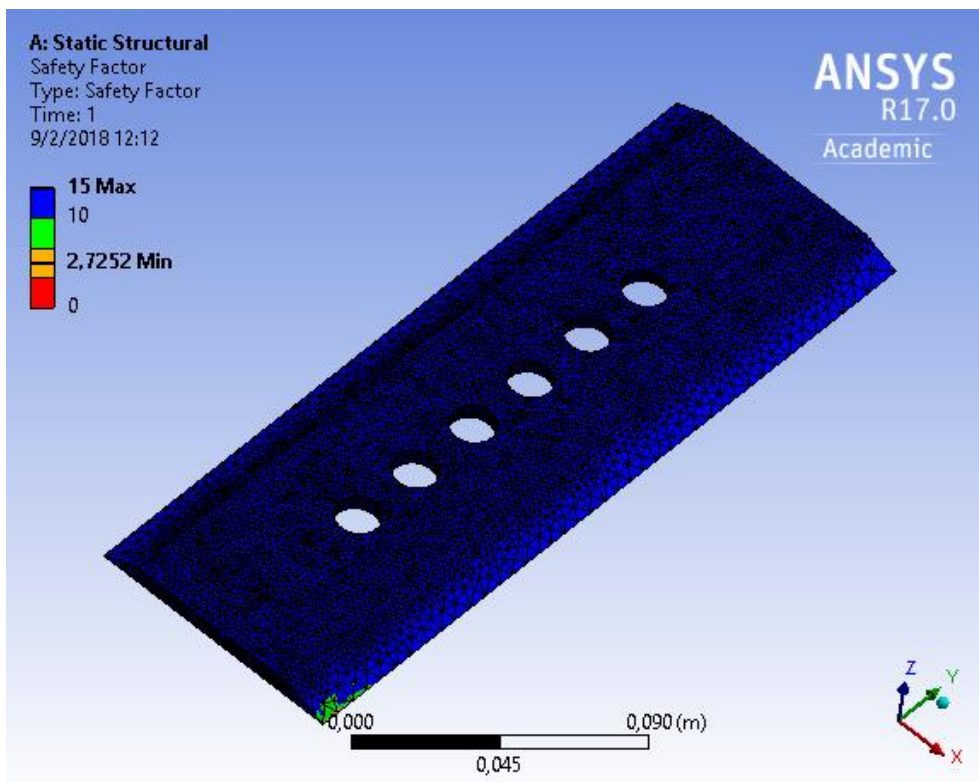
**Figura 5. 136. Esfuerzo equivalente de Von Mises en la muestra 4 (Caso I).**

Fuente: Elaboración Propia.



**Figura 5. 137. Deformación en la muestra 4 (Caso I).**

Fuente: Elaboración Propia.



**Figura 5. 138. Factor de seguridad estático de la muestra 4 (Caso I).**

Fuente: Elaboración Propia.

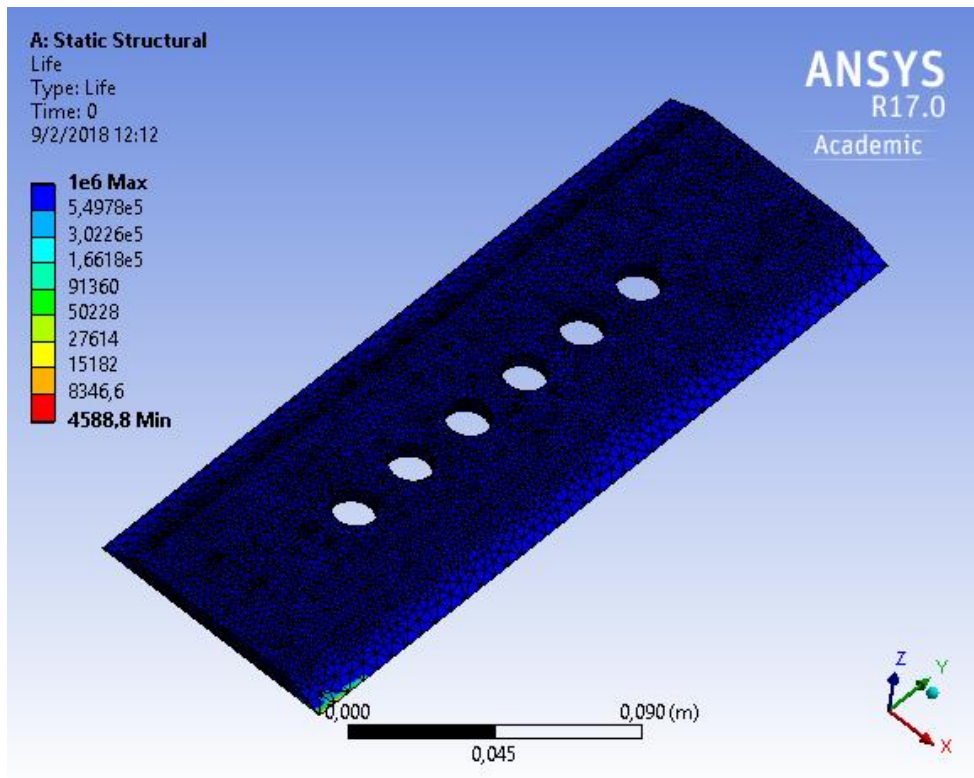
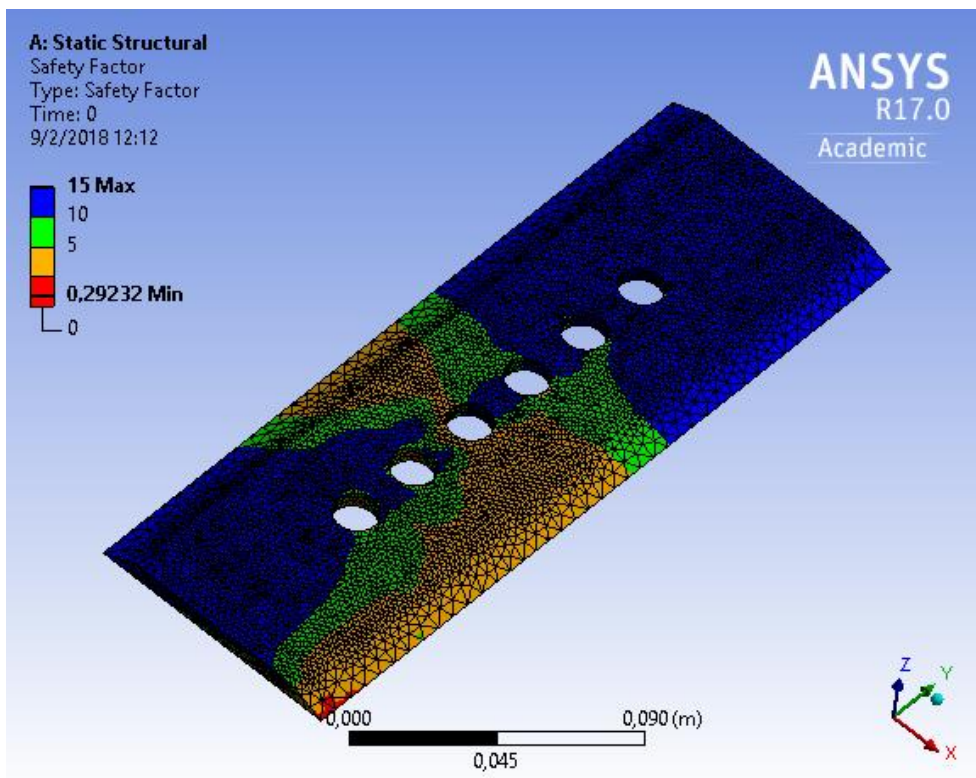


Figura 5. 139. Estimación de ciclos de trabajo de la muestra 4 (Caso I).

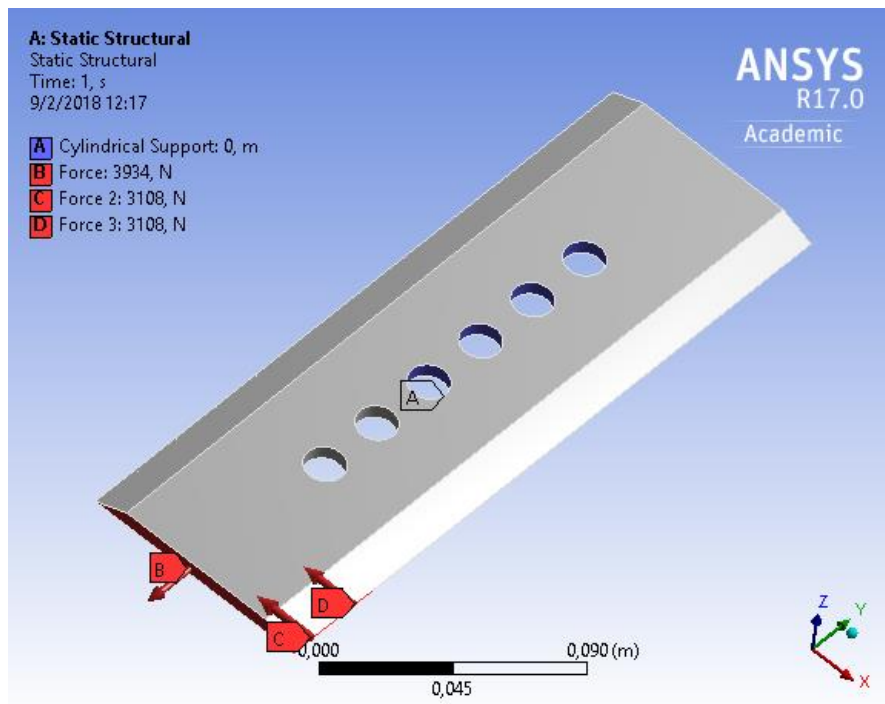
Fuente: Elaboración Propia.



**Figura 5. 140. Factor de seguridad por fatiga de la muestra 4 (Caso I).**

Fuente: Elaboración Propia.

## CASO II: CORTE DE DOS CAÑAS.



**Figura 5. 141. Cargas y restricciones aplicadas al sistema - muestra 4 (Caso II).**

Fuente: Elaboración Propia.

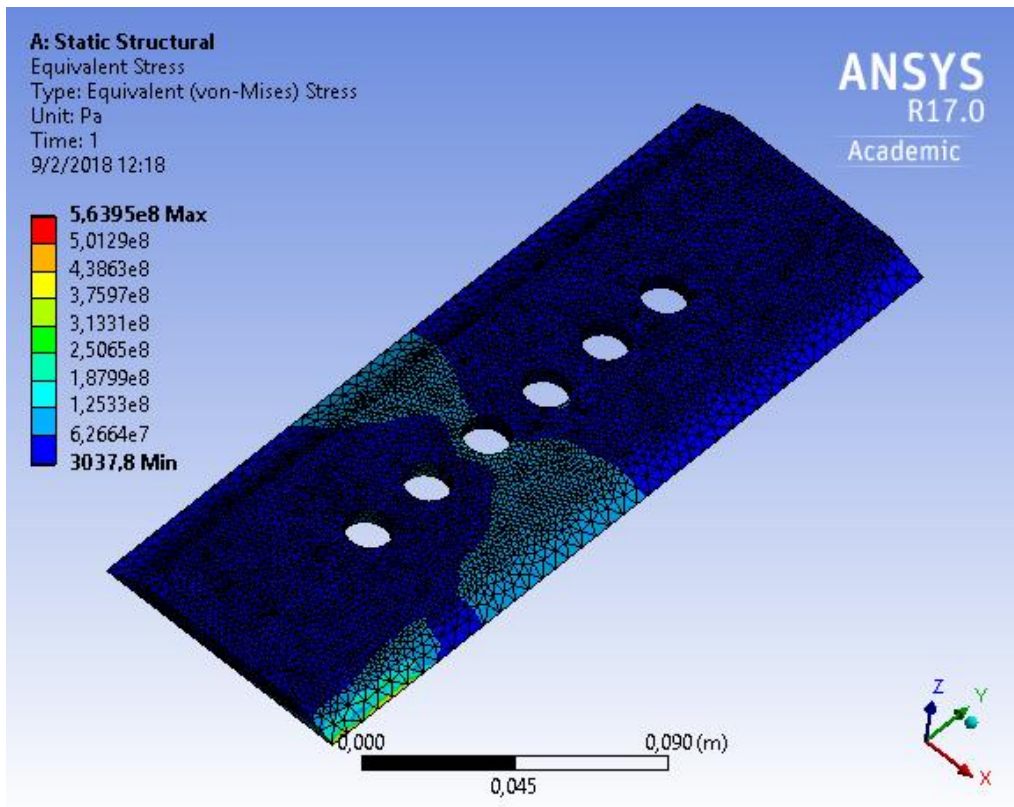


Figura 5. 142. Esfuerzo equivalente de Von Mises en la muestra 4 (Caso II).

Fuente: Elaboración Propia.

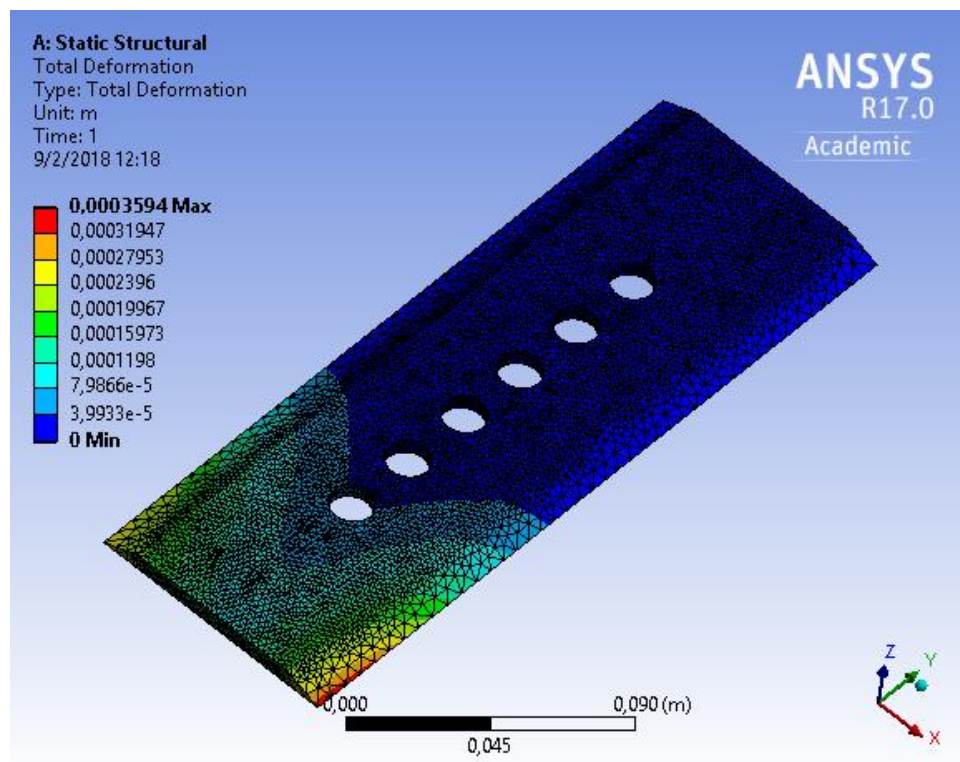


Figura 5. 143. Deformación en la muestra 4 (Caso II).

Fuente: Elaboración Propia.

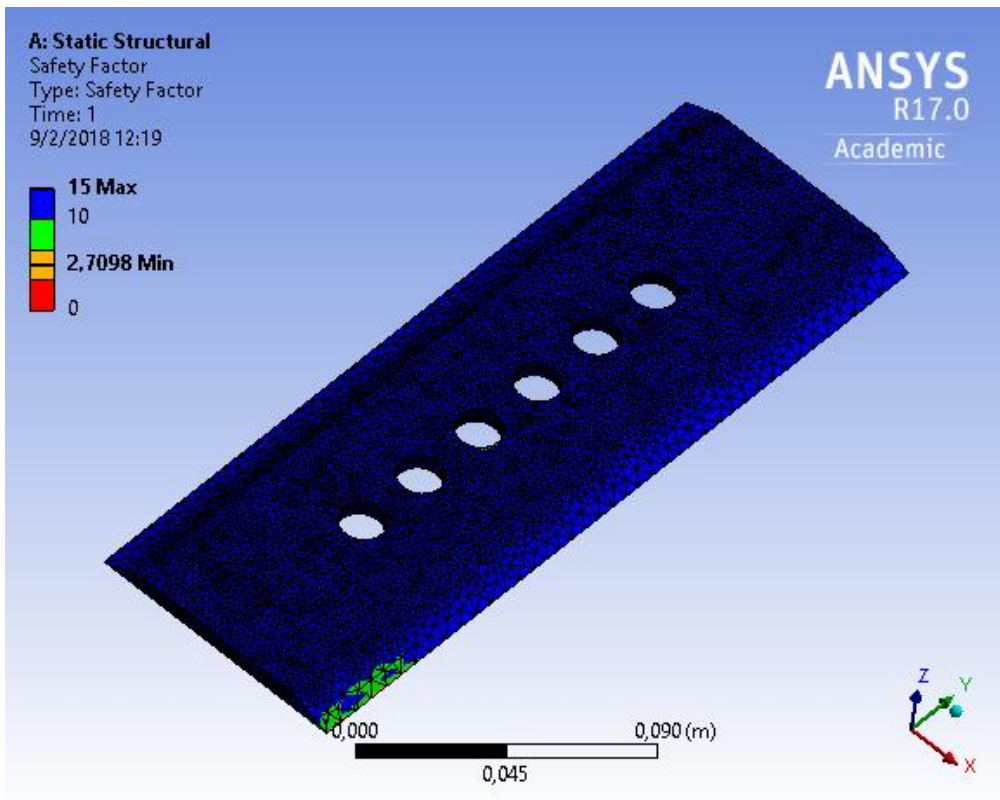
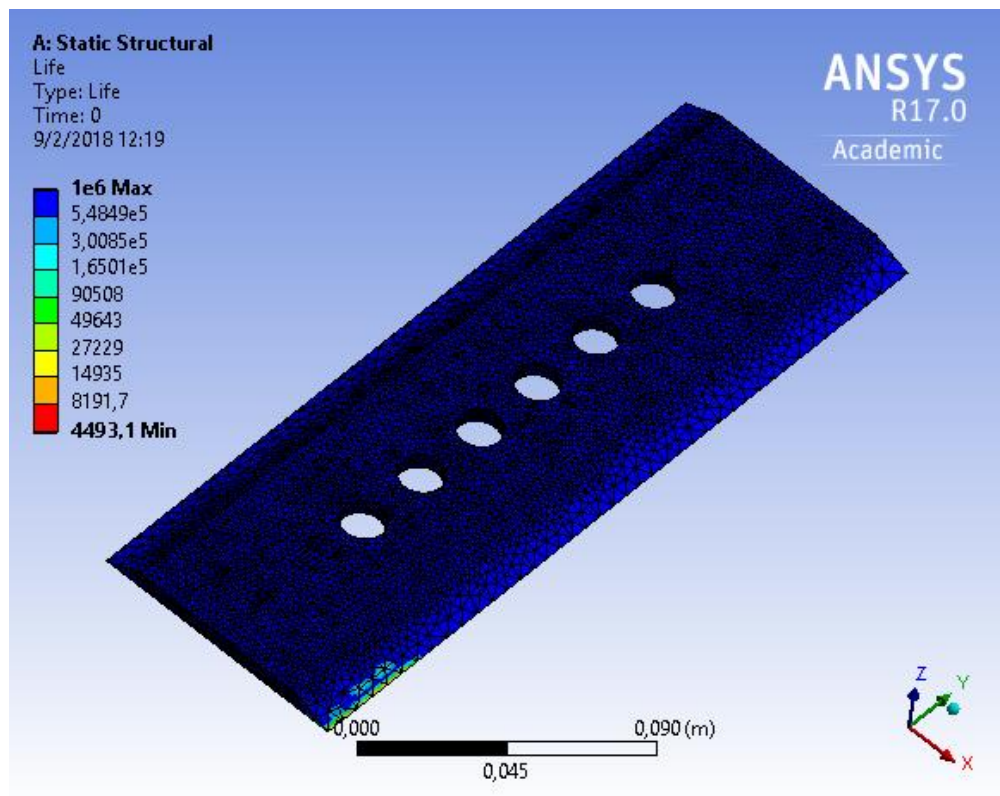


Figura 5. 144. Factor de seguridad estático de la muestra 4 (Caso II).

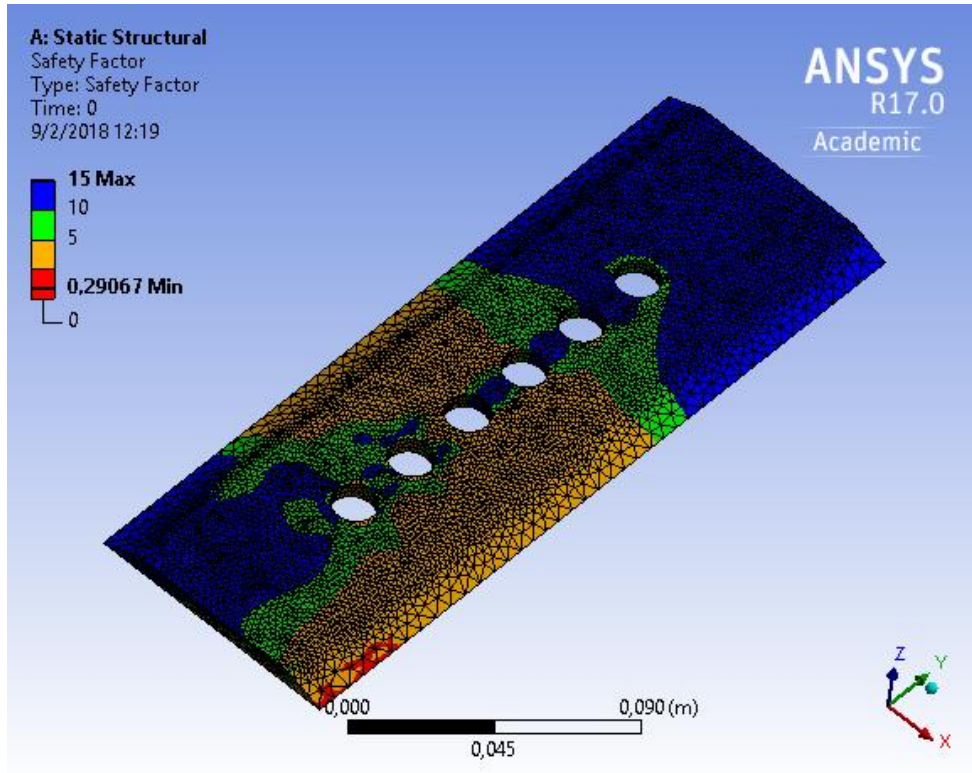
Fuente: Elaboración Propia.





**Figura 5. 145. Estimación de ciclos de trabajo de la muestra 4 (Caso II).**

Fuente: Elaboración Propia.



**Figura 5. 146. Factor de seguridad por fatiga de la muestra 4 (Caso II).**

Fuente: Elaboración Propia.

### CASO III: CORTE DE TRES CAÑAS.

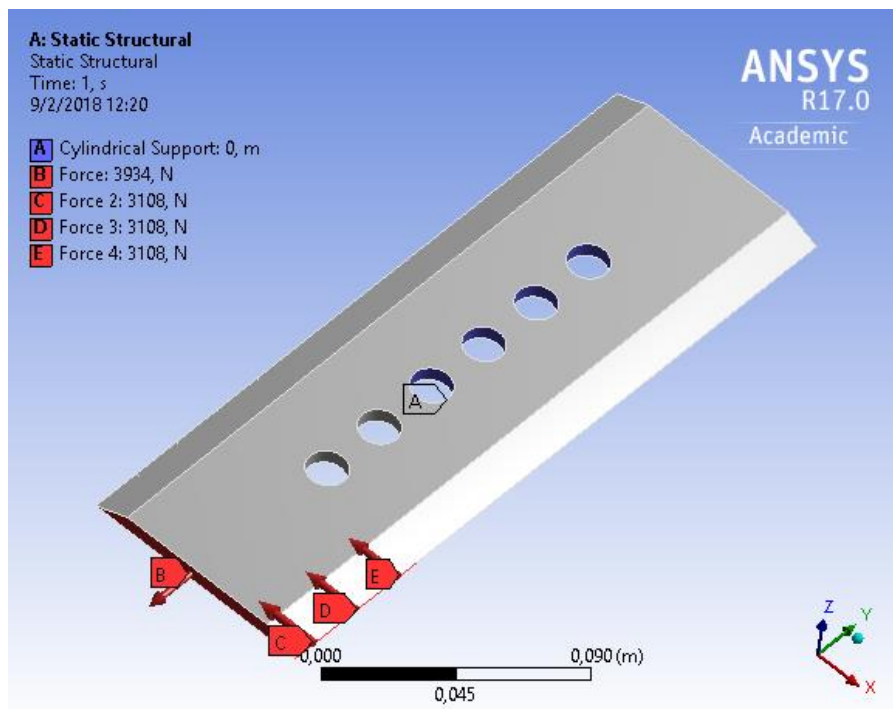


Figura 5. 147. Cargas y restricciones aplicadas al sistema - muestra 4 (Caso III).

Fuente: Elaboración Propia.

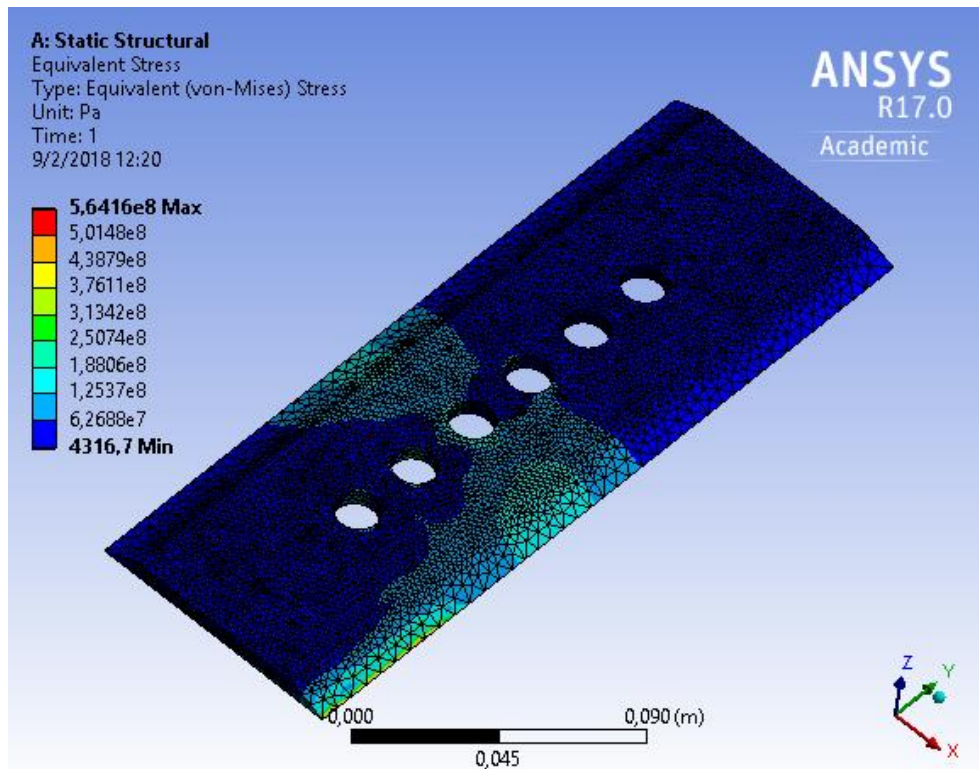
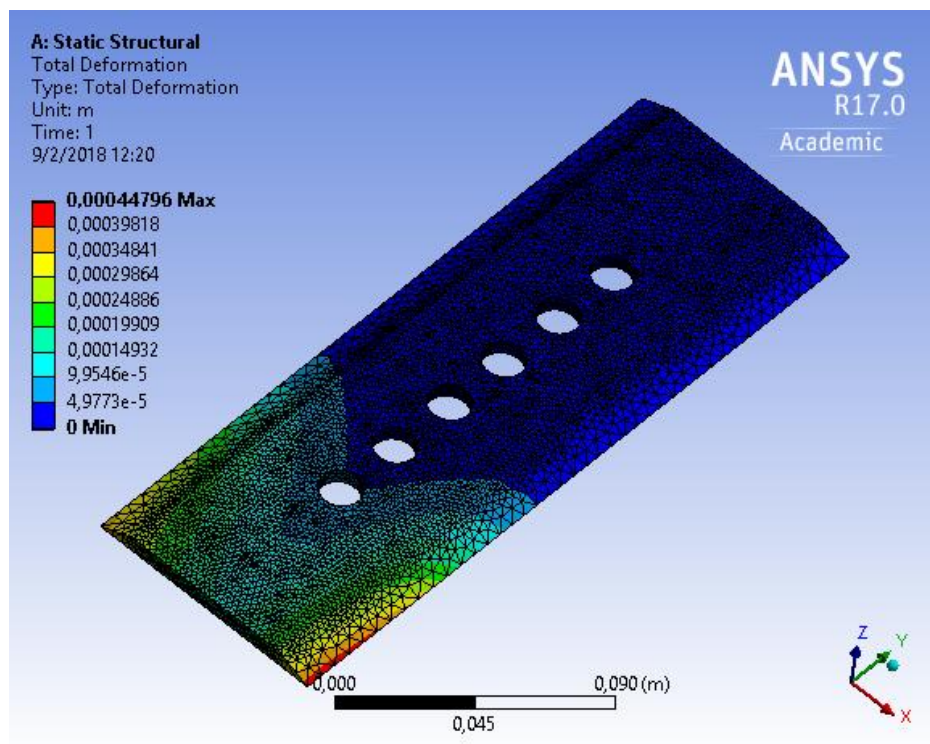


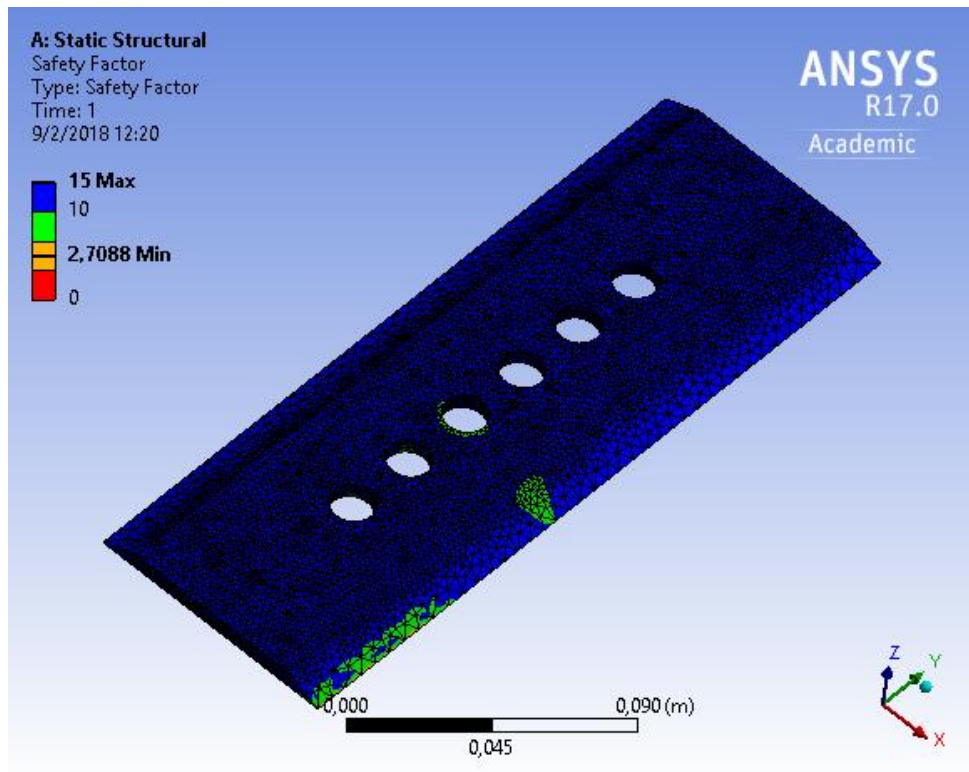
Figura 5. 148. Esfuerzo equivalente de Von Mises en la muestra 4 (Caso III).

Fuente: Elaboración Propia.



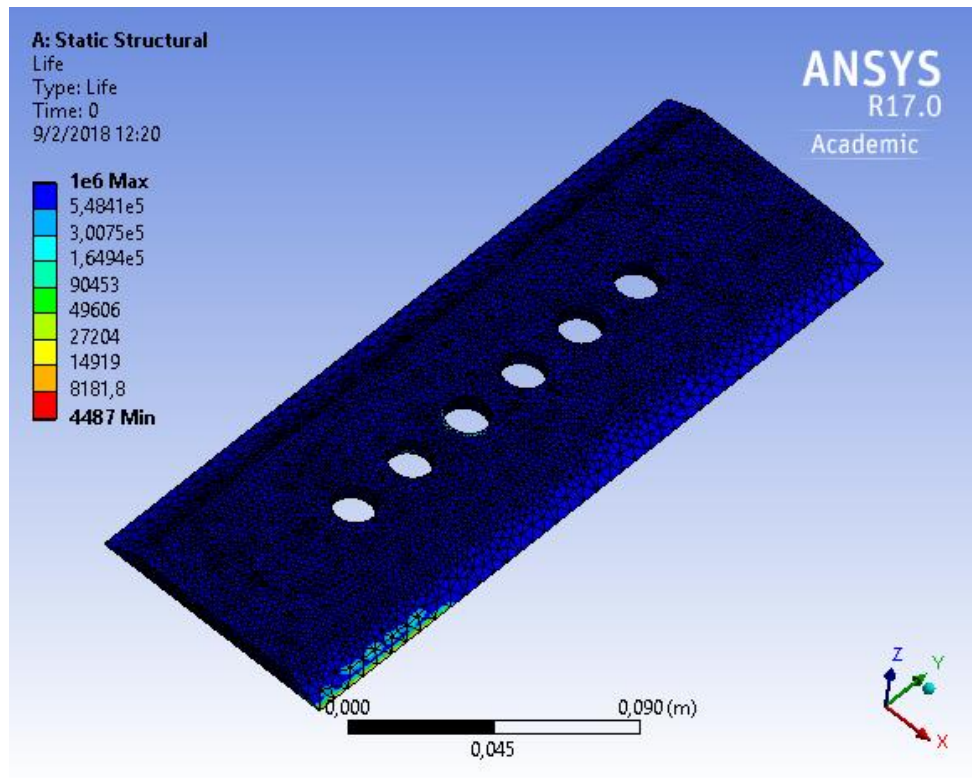
**Figura 5. 149. Deformación en la muestra 4 (Caso III).**

Fuente: Elaboración Propia.



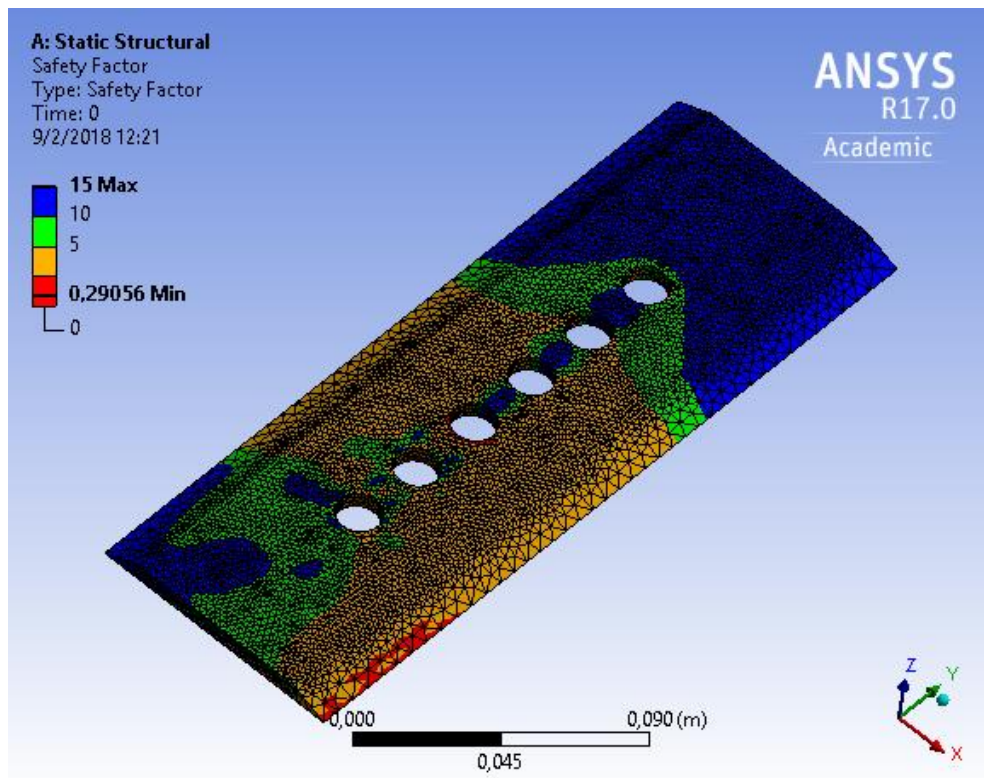
**Figura 5. 150. Factor de seguridad estático de la muestra 4 (Caso III).**

Fuente: Elaboración Propia.



**Figura 5. 151. Estimación de ciclos de trabajo de la muestra 4 (Caso III).**

Fuente: Elaboración Propia.



**Figura 5. 152. Factor de seguridad por fatiga de la muestra 4 (Caso III).**

Fuente: Elaboración Propia.

## CASO IV: CORTE DE CUATRO CAÑAS.

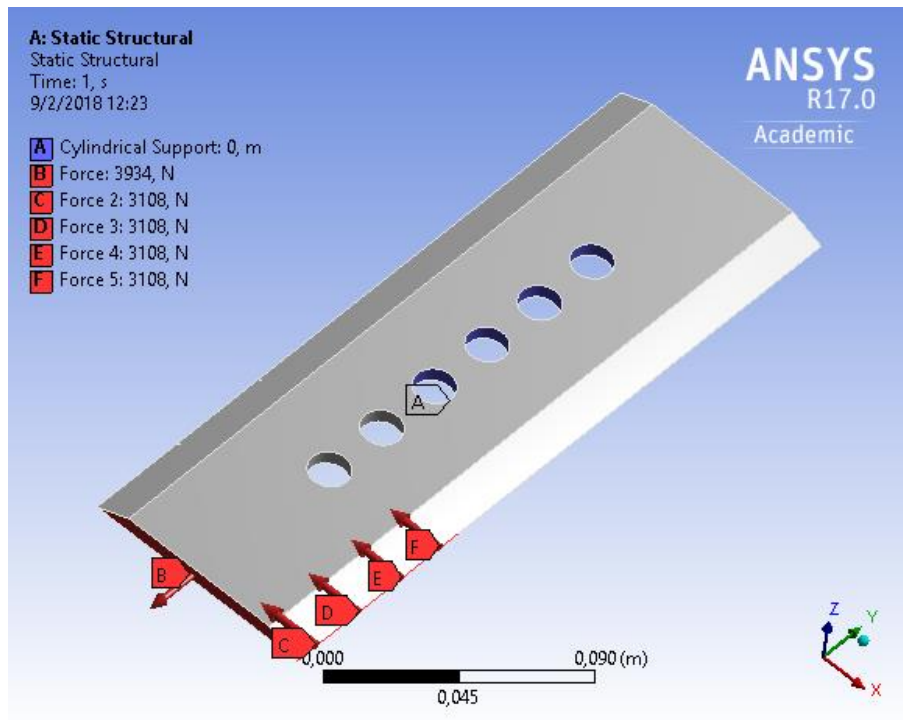


Figura 5. 153. Cargas y restricciones aplicadas al sistema - muestra 4 (Caso IV).

Fuente: Elaboración Propia.

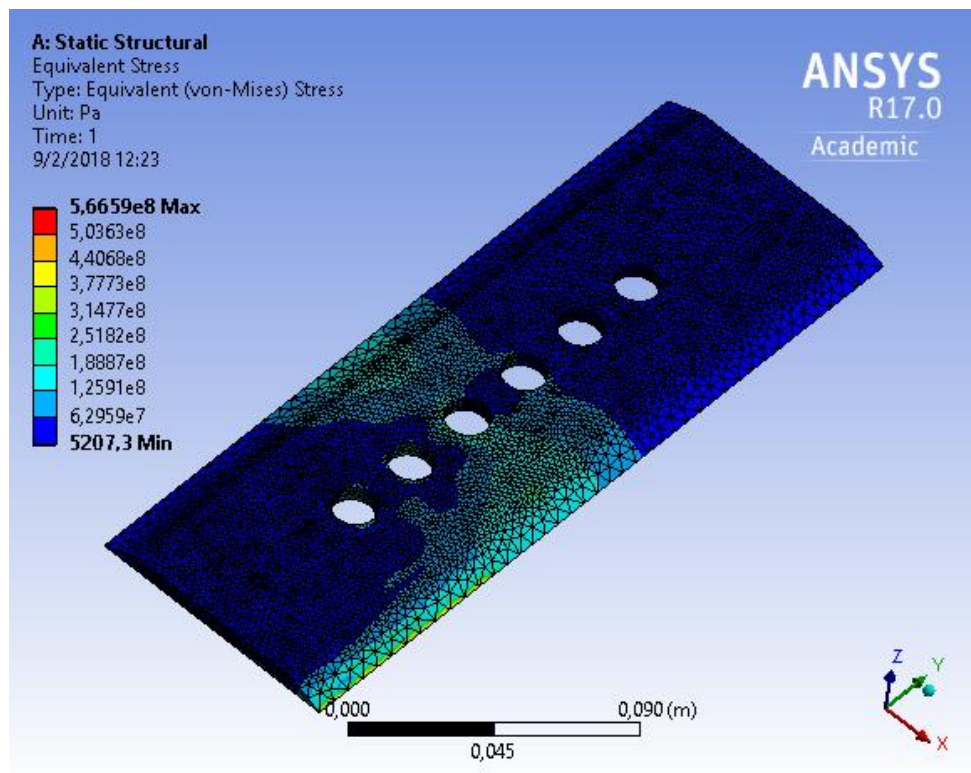
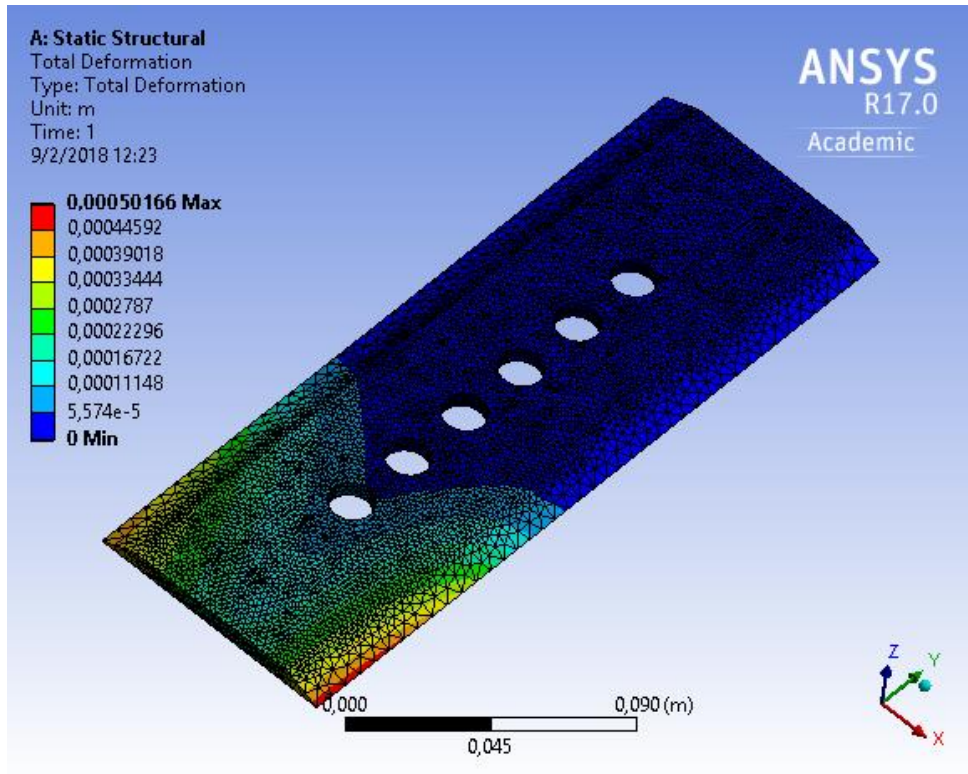


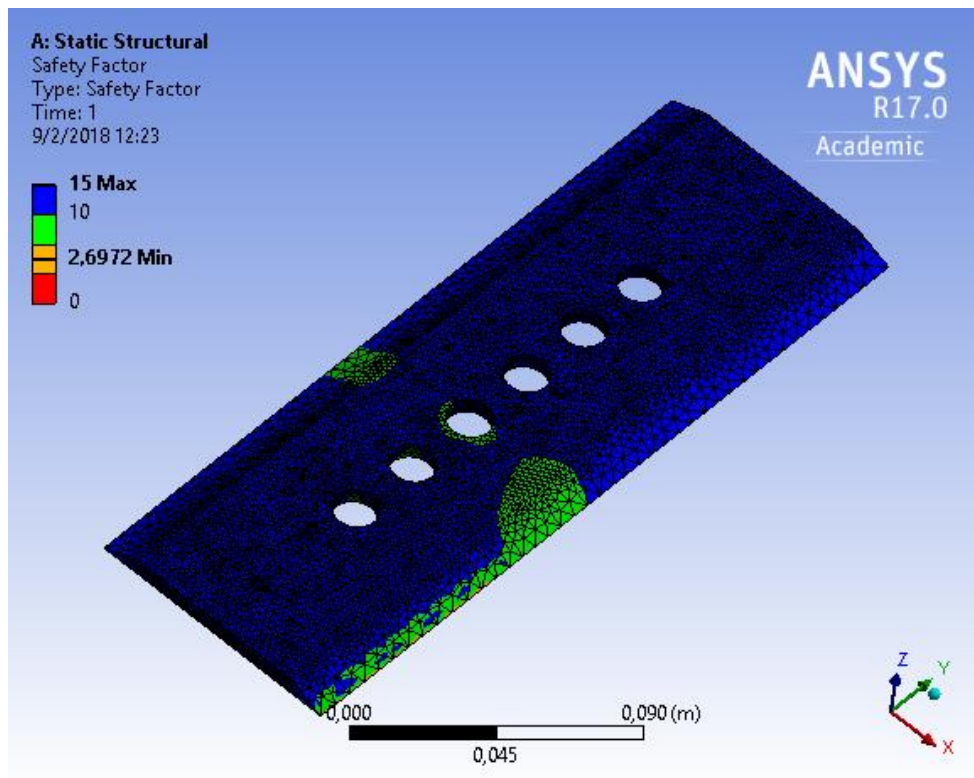
Figura 5. 154. Esfuerzo equivalente de Von Mises en la muestra 4 (Caso IV).

Fuente: Elaboración Propia.



**Figura 5. 155. Deformación en la muestra 4 (Caso IV).**

Fuente: Elaboración Propia.



**Figura 5. 156. Factor de seguridad estático de la muestra 4 (Caso IV).**

Fuente: Elaboración Propia.

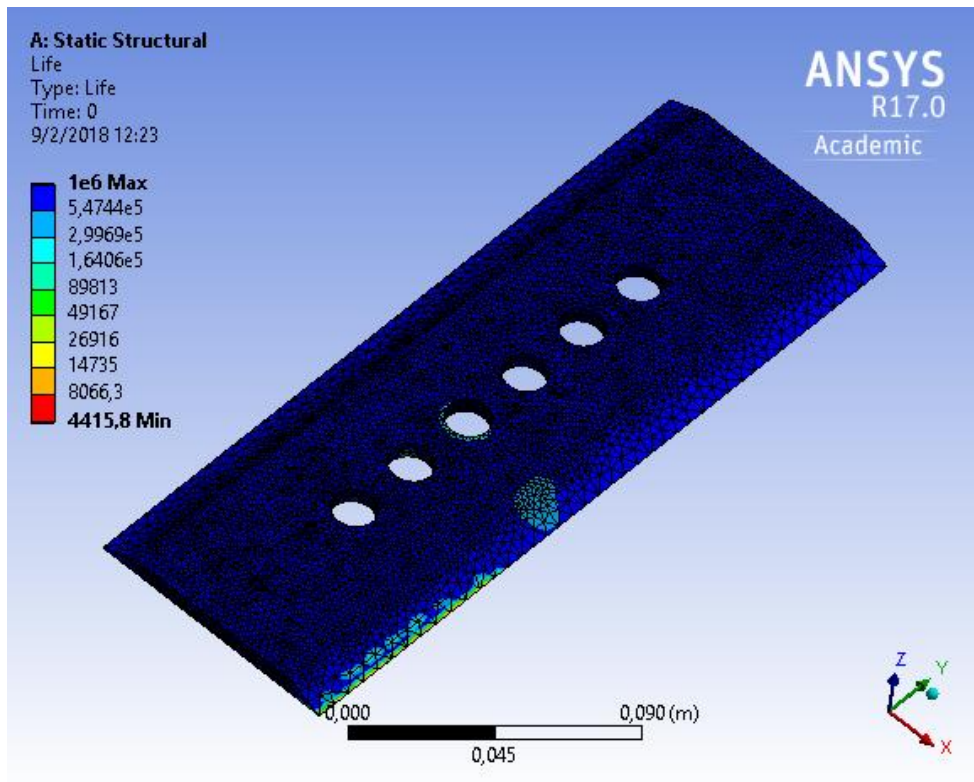


Figura 5. 157. Estimación de ciclos de trabajo de la muestra 4 (Caso IV).

Fuente: Elaboración Propia.

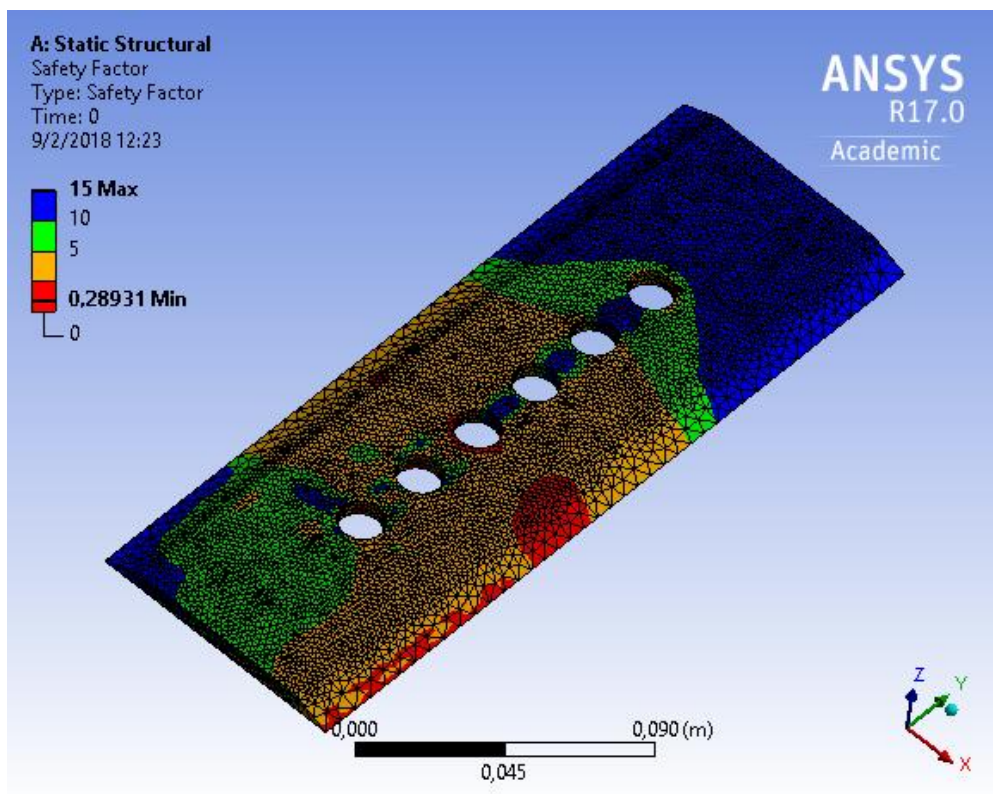


Figura 5. 158. Factor de seguridad por fatiga de la muestra 4 (Caso IV).

Fuente: Elaboración Propia.

## CASO V: CORTE DE UNA CAÑA E IMPACTANDO UNA PIEDRA

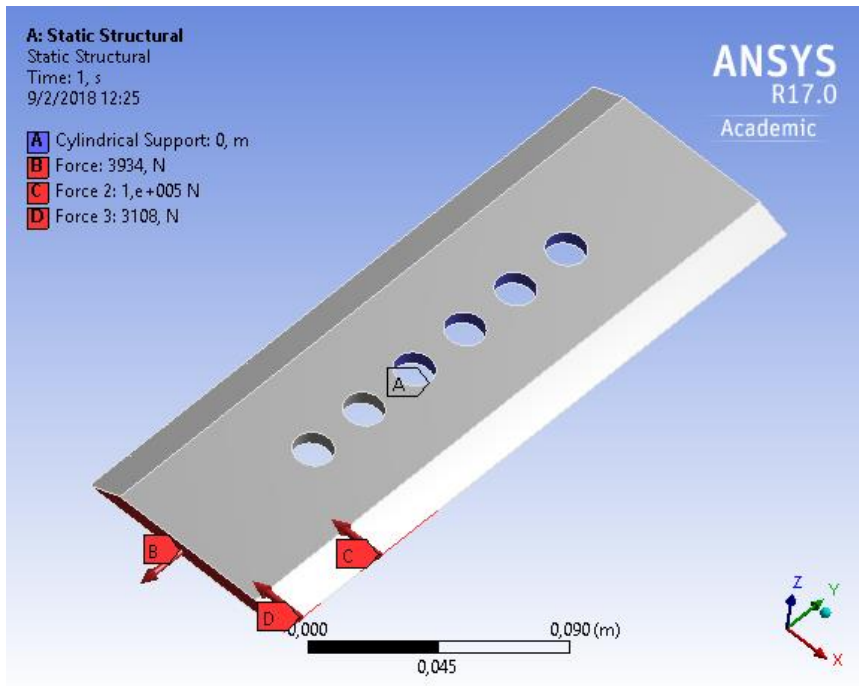
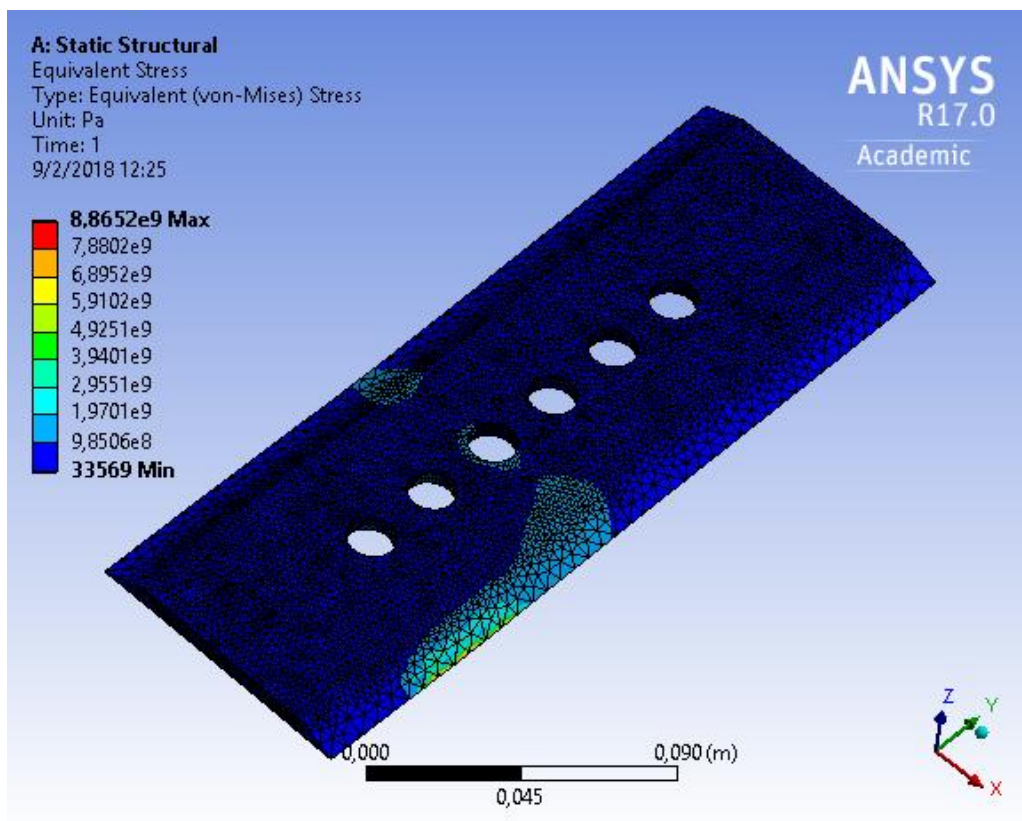


Figura 5. 159. Cargas y restricciones aplicadas al sistema - muestra 4 (Caso V).

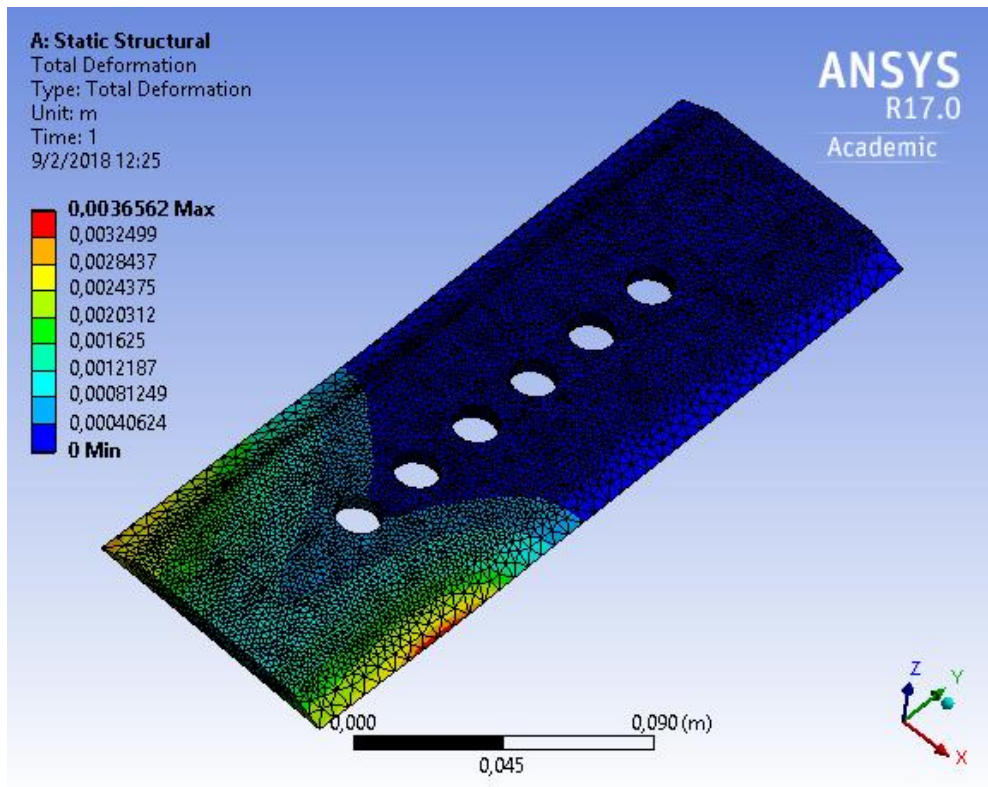
Fuente: Elaboración Propia.





**Figura 5. 160. Esfuerzo equivalente de Von Mises en la muestra 4 (Caso V).**

Fuente: Elaboración Propia.



**Figura 5. 161. Deformación en la muestra 4 (Caso V).**

Fuente: Elaboración Propia.

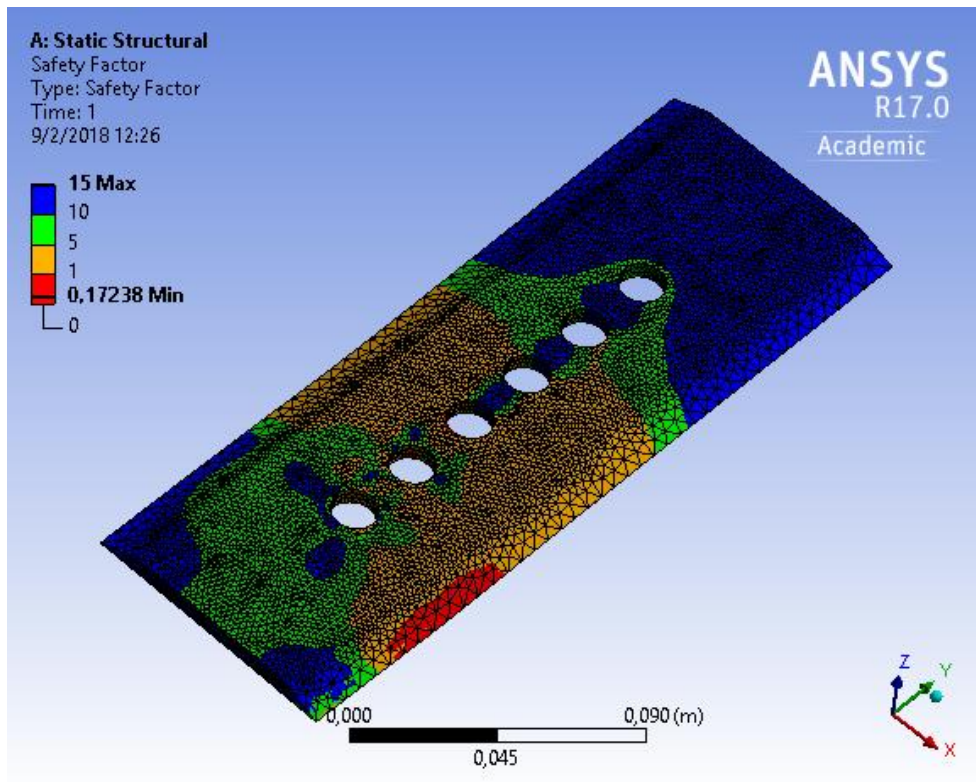


Figura 5. 162. Factor de seguridad estático de la muestra 4 (Caso V).

Fuente: Elaboración Propia.

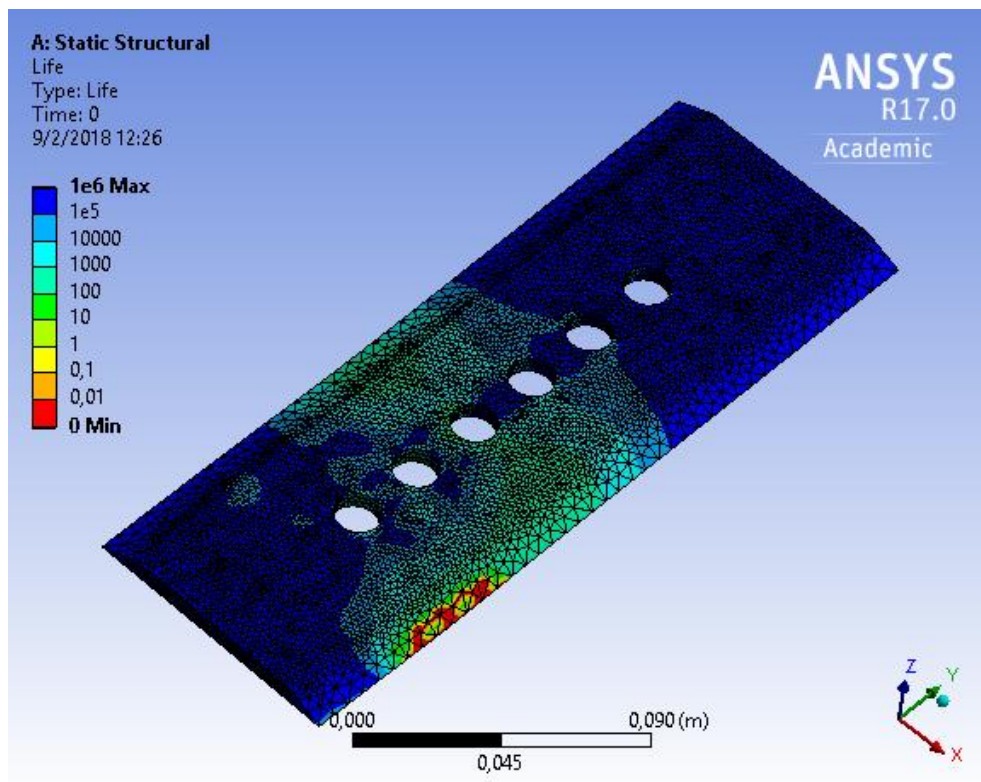


Figura 5. 163. Estimación de ciclos de trabajo de la muestra 4 (Caso V).

Fuente: Elaboración Propia.

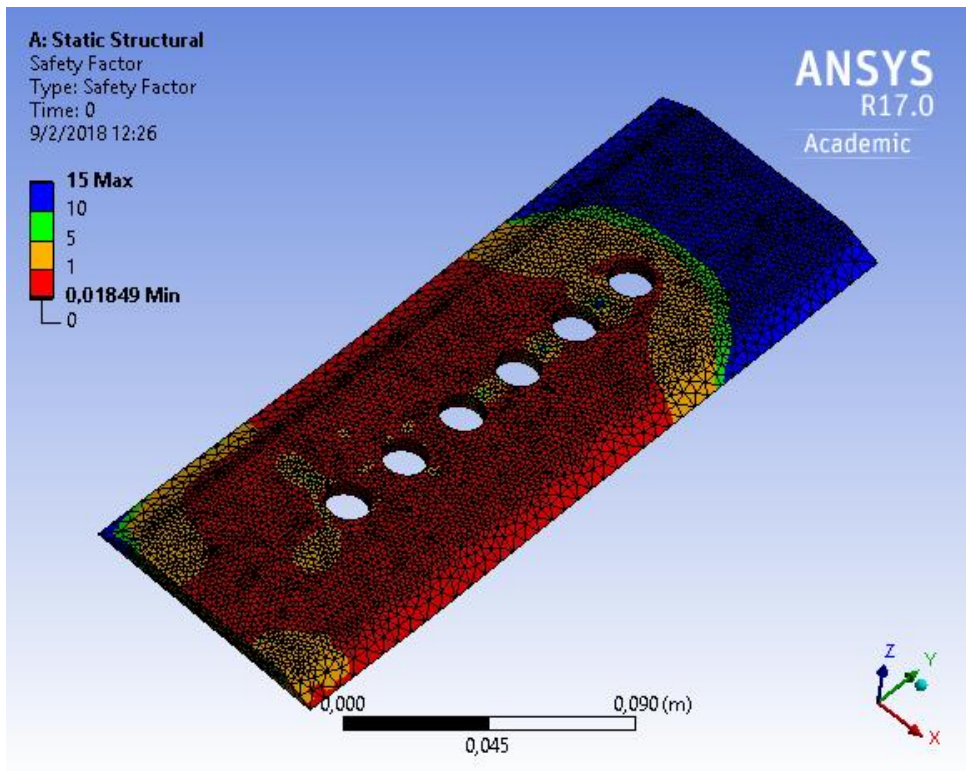
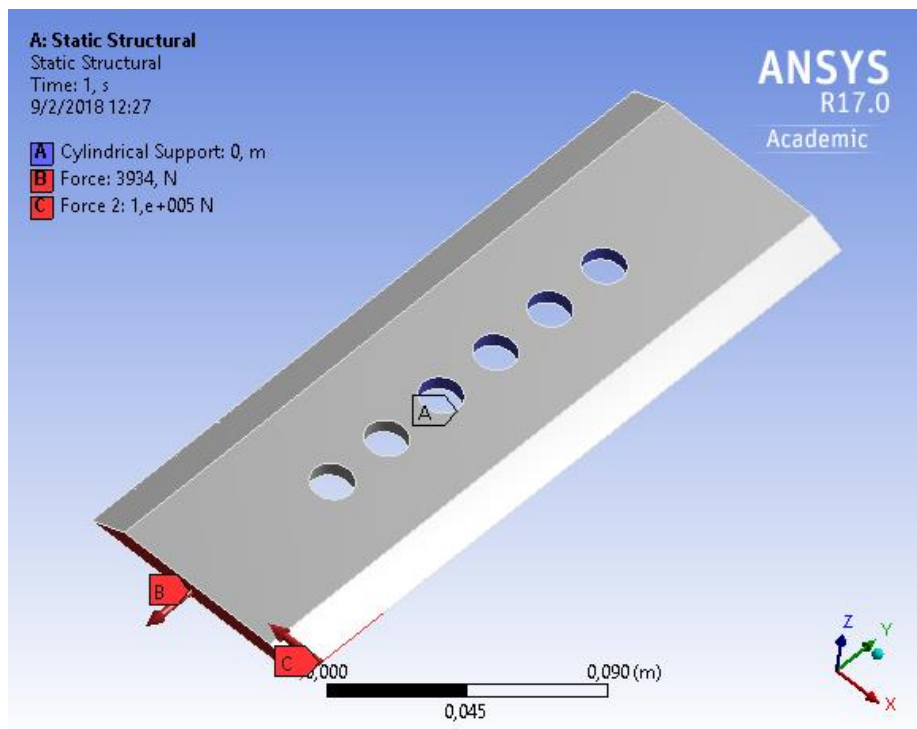


Figura 5. 164. Factor de seguridad por fatiga de la muestra 4 (Caso V).

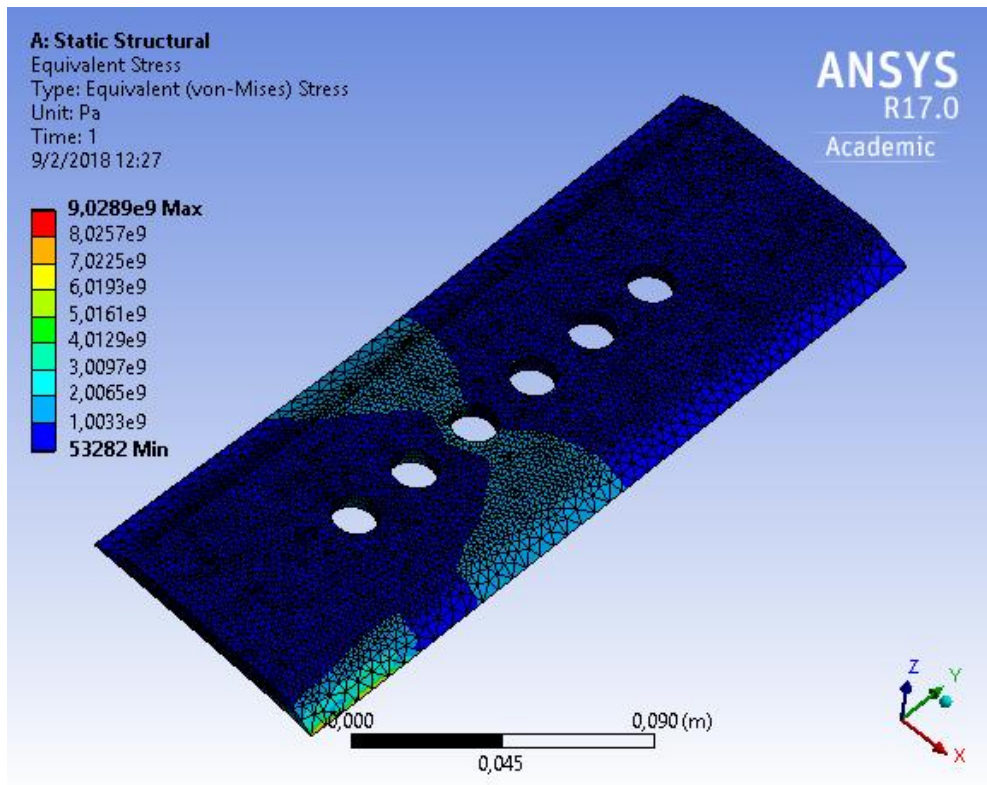
Fuente: Elaboración Propia.

### CASO VI: IMPACTO DE UNA PIEDRA



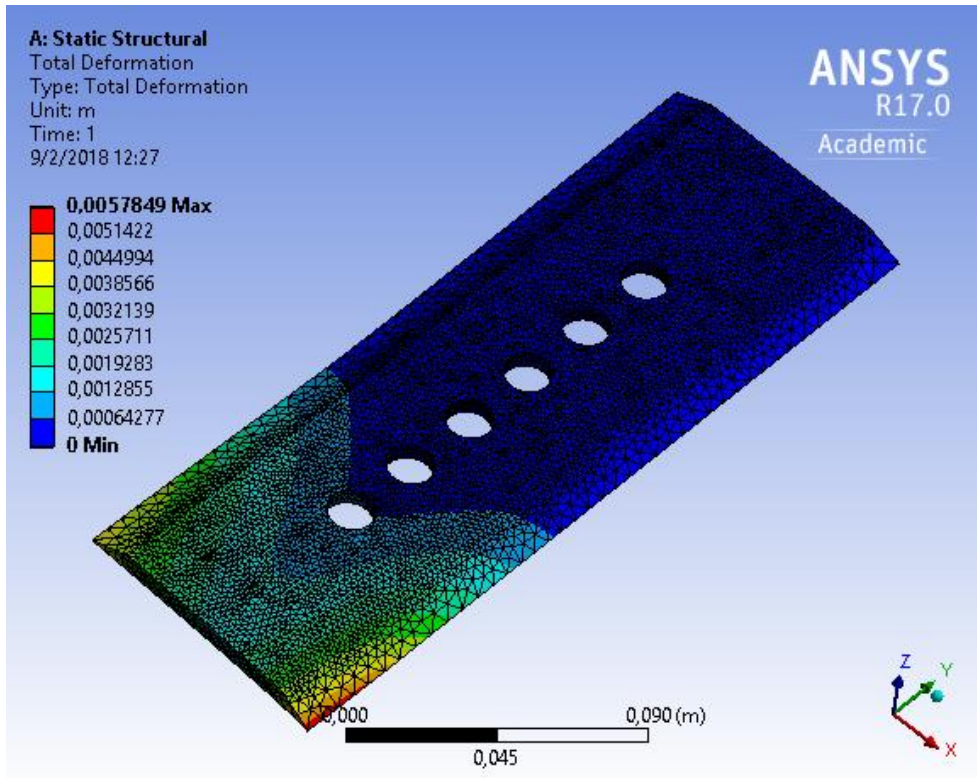
**Figura 5. 165. Cargas y restricciones aplicadas al sistema - muestra 4 (Caso VI).**

Fuente: Elaboración Propia.



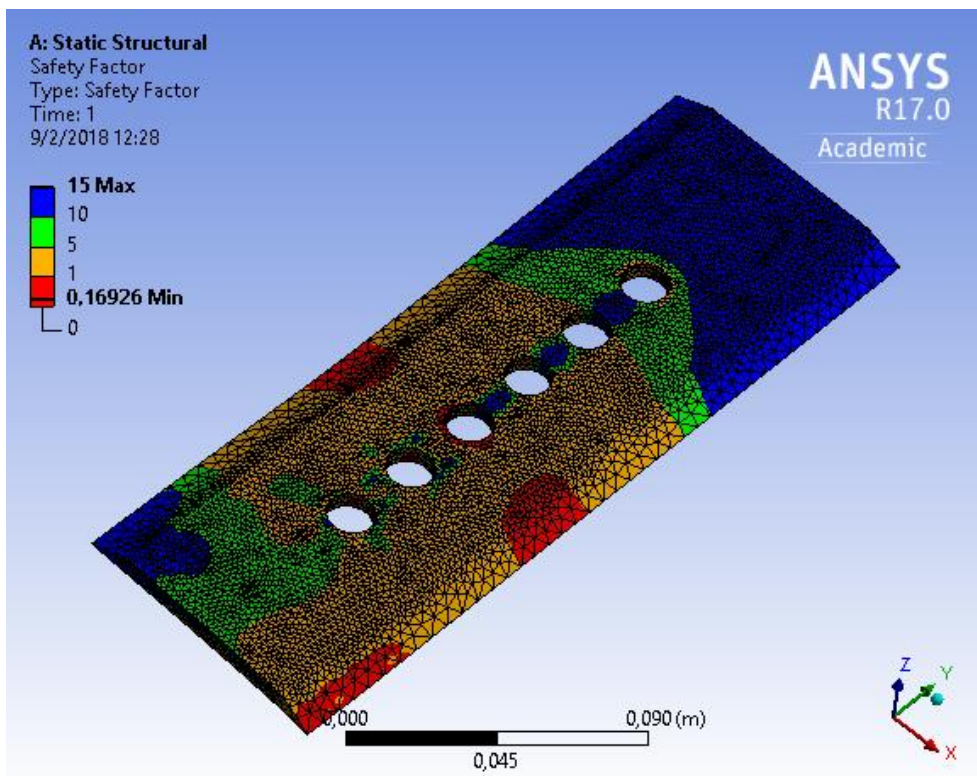
**Figura 5. 166. Esfuerzo equivalente de Von Mises en la muestra 4 (Caso VI).**

Fuente: Elaboración Propia.



**Figura 5. 167. Deformación en la muestra 4 (Caso VI).**

Fuente: Elaboración Propia.



**Figura 5. 168. Factor de seguridad estático de la muestra 4 (Caso VI).**

Fuente: Elaboración Propia.

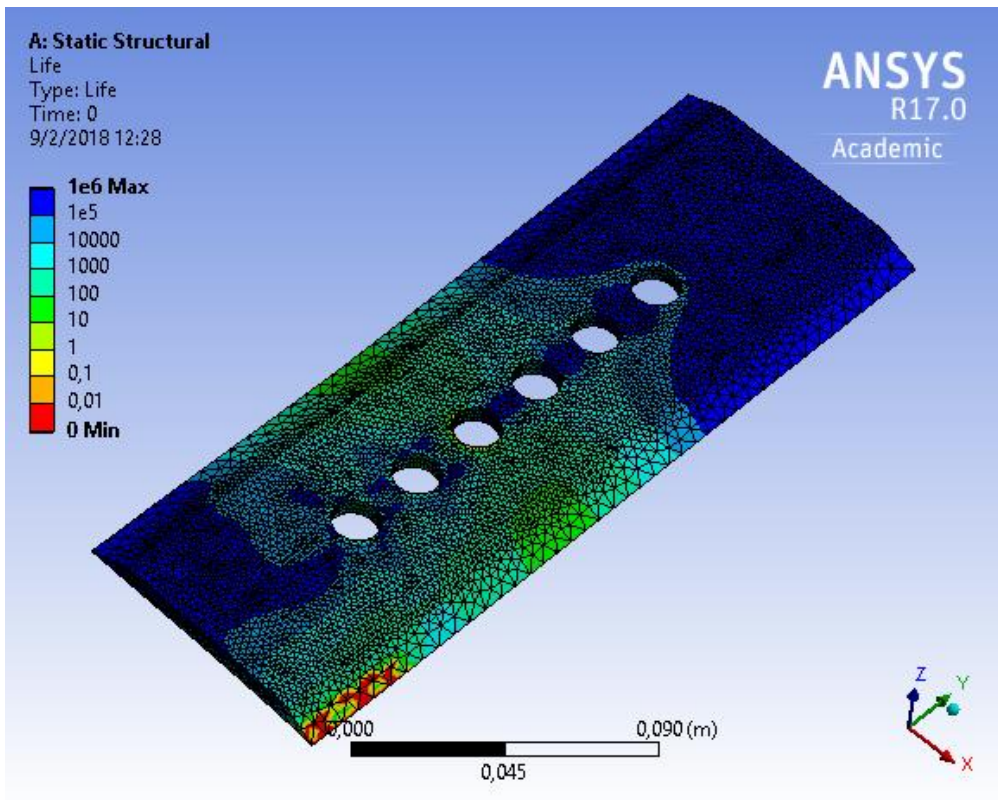
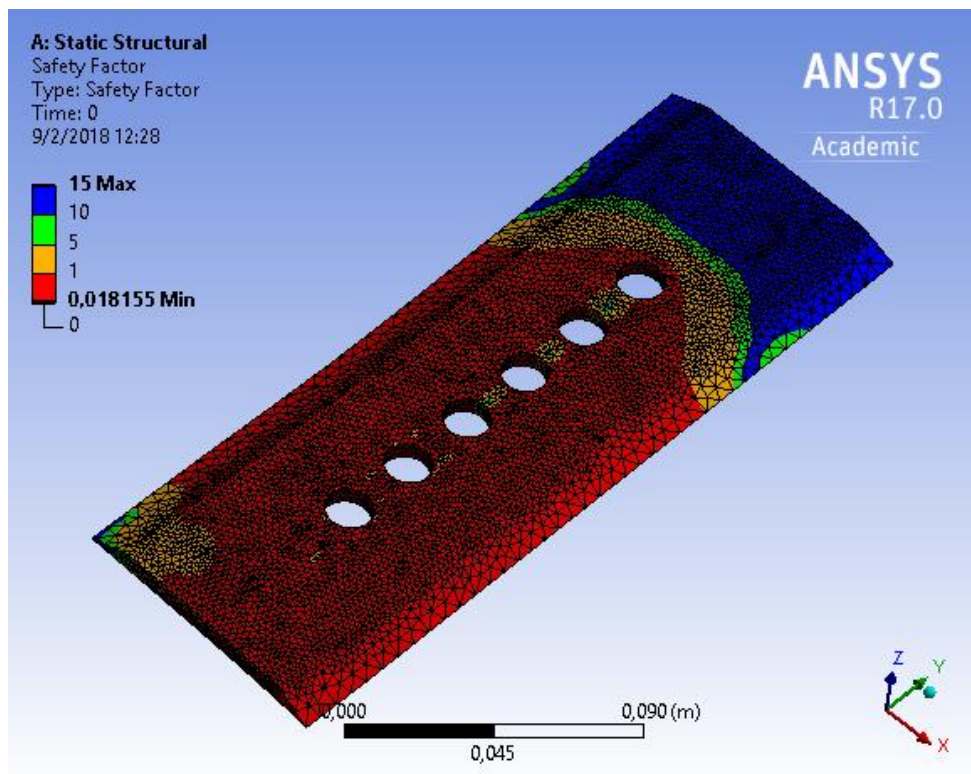


Figura 5. 169. Estimación de ciclos de trabajo de la muestra 4 (Caso VI).

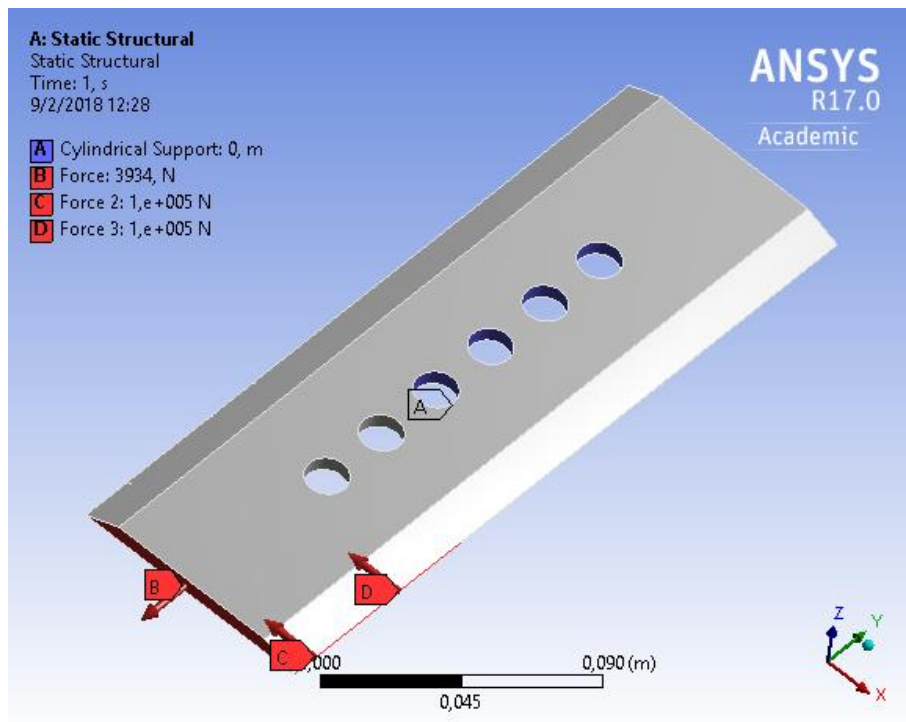
Fuente: Elaboración Propia.



**Figura 5. 170. Factor de seguridad por fatiga de la muestra 4 (Caso VI).**

Fuente: Elaboración Propia.

### CASO VII: IMPACTO DE DOS PIEDRAS.



**Figura 5. 171. Cargas y restricciones aplicadas al sistema - muestra 4 (Caso VII).**

Fuente: Elaboración Propia.

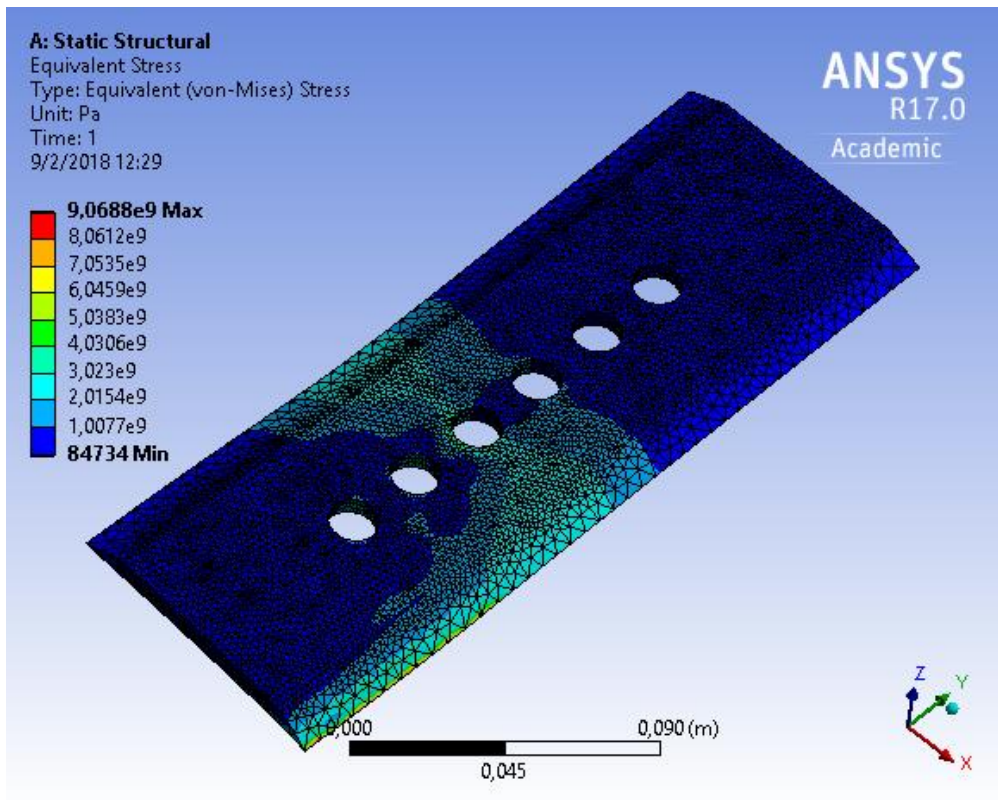


Figura 5. 172. Esfuerzo equivalente de Von Mises en la muestra 4 (Caso VII).

Fuente: Elaboración Propia.

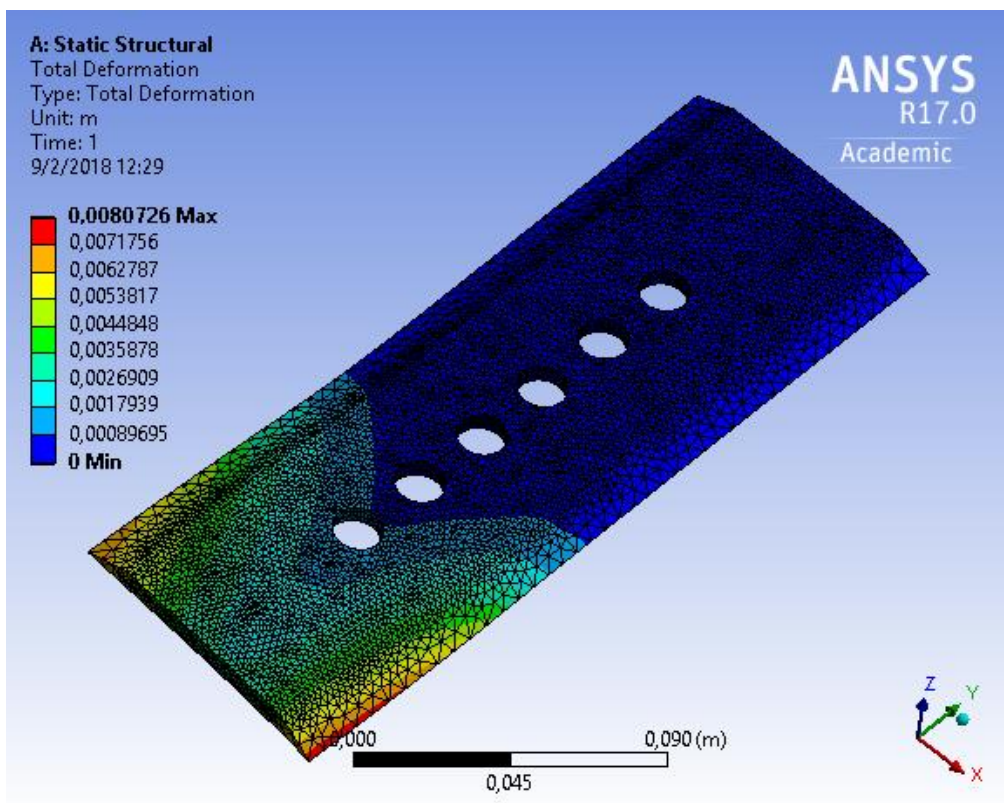


Figura 5. 173. Deformación en la muestra 4 (Caso VII).



Fuente: Elaboración Propia.

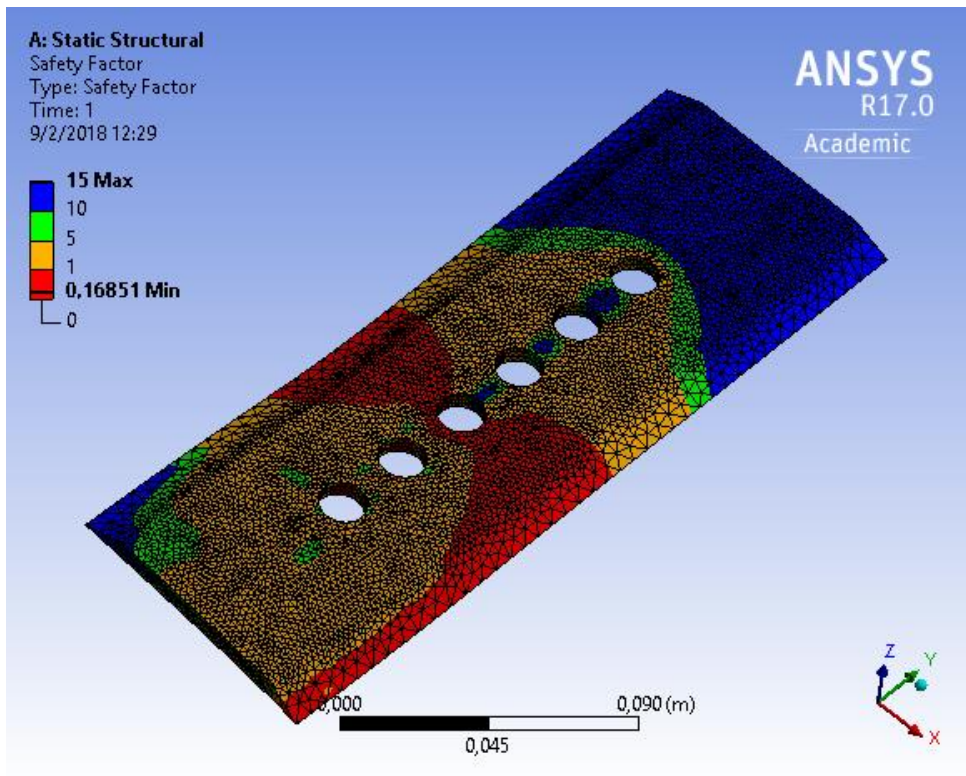


Figura 5. 174. Factor de seguridad estático de la muestra 4 (Caso VII).

Fuente: Elaboración Propia

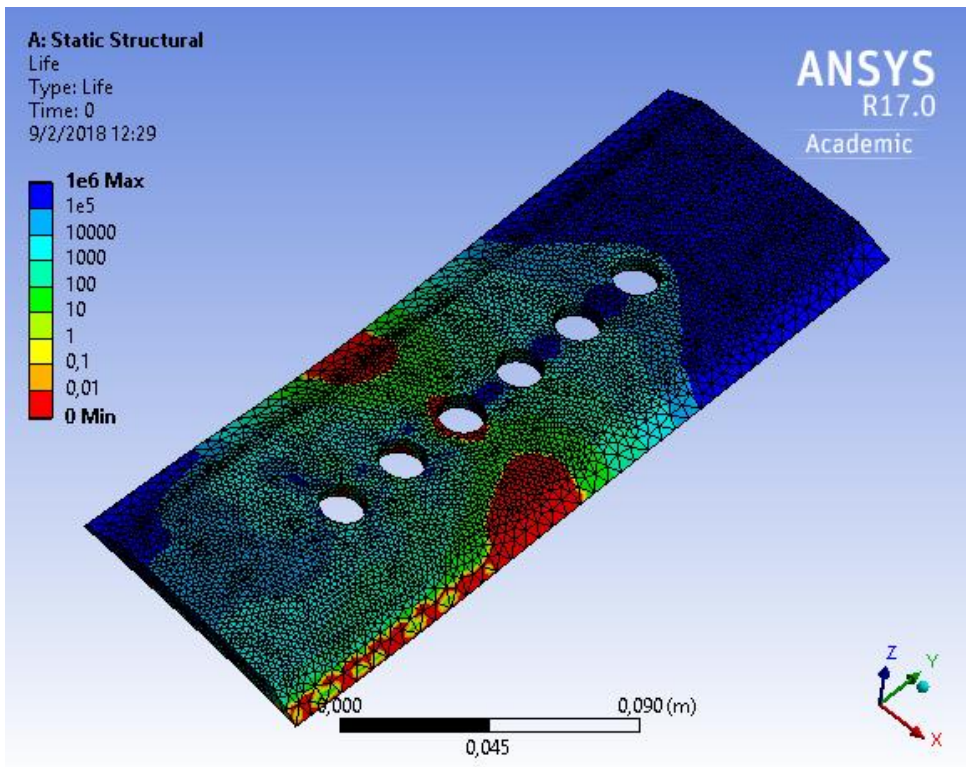


Figura 5. 175. Estimación de ciclos de trabajo de la muestra 4 (Caso VII).

Fuente: Elaboración Propia.

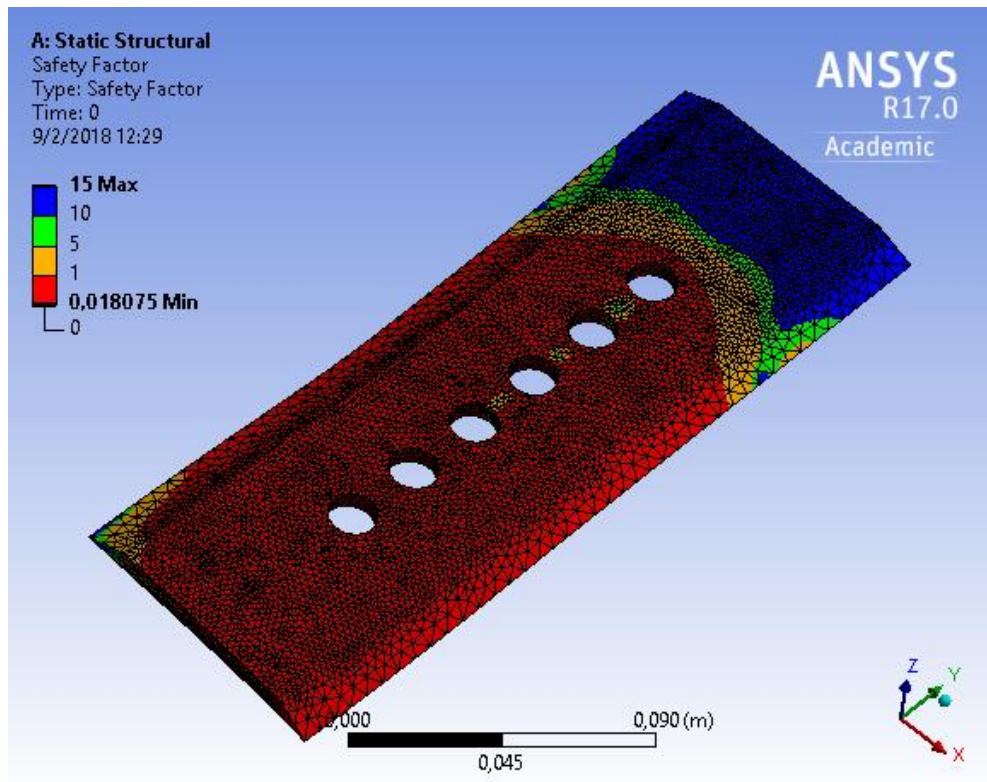


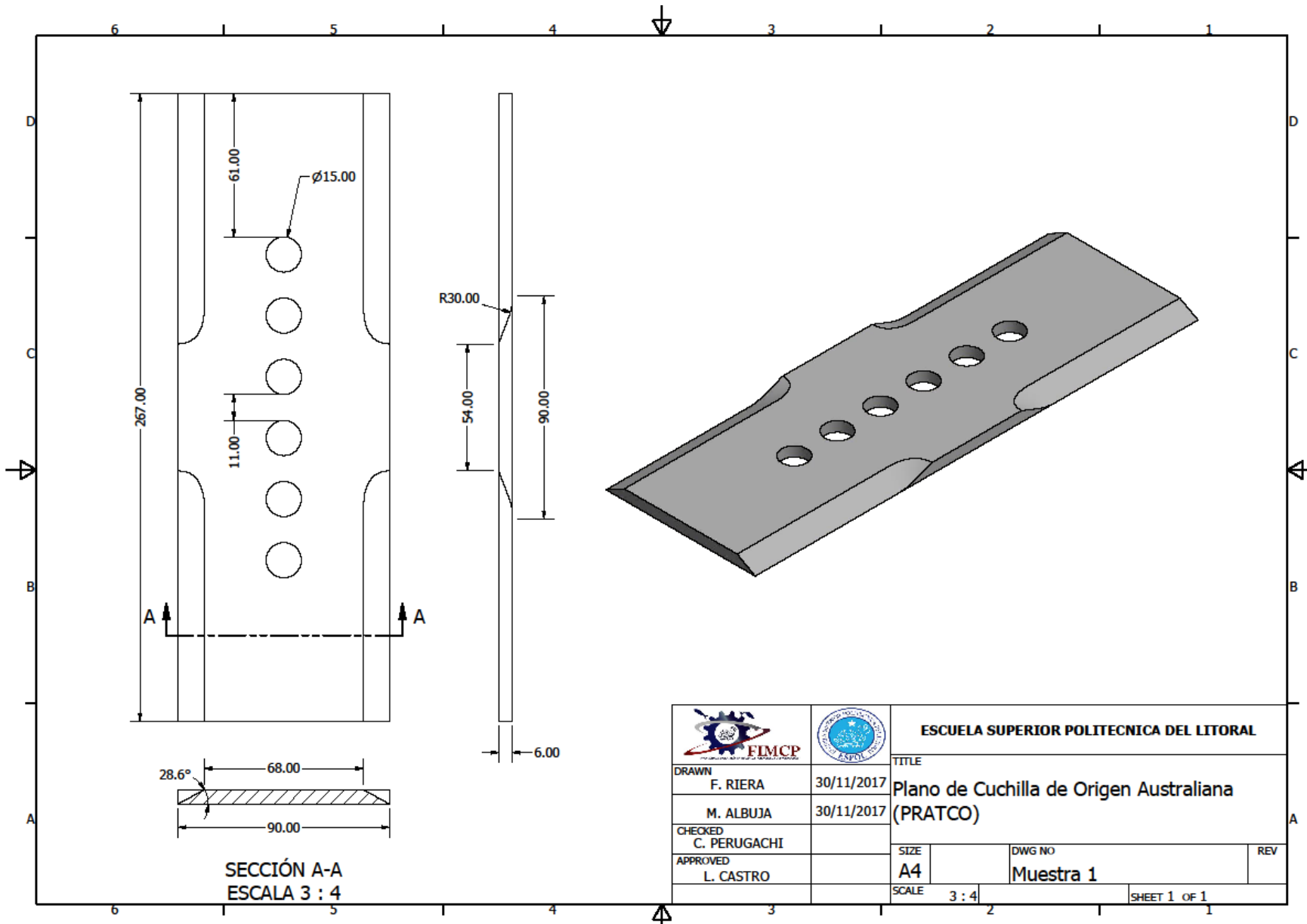
Figura 5. 176. Factor de seguridad por fatiga de la muestra 4 (Caso VII).

Fuente: Elaboración Propia.


## APÉNDICE C

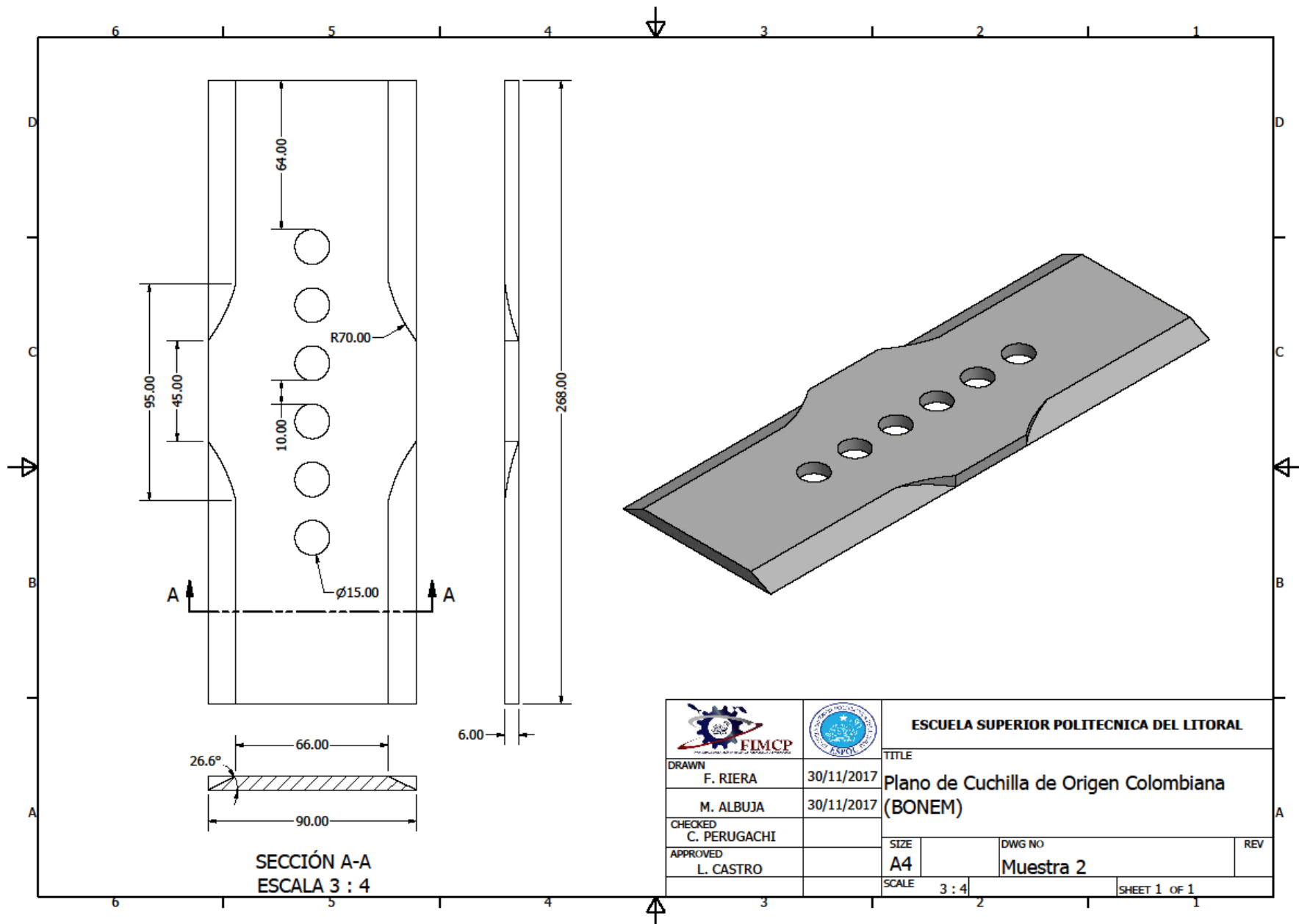
### Planos de las cuchillas







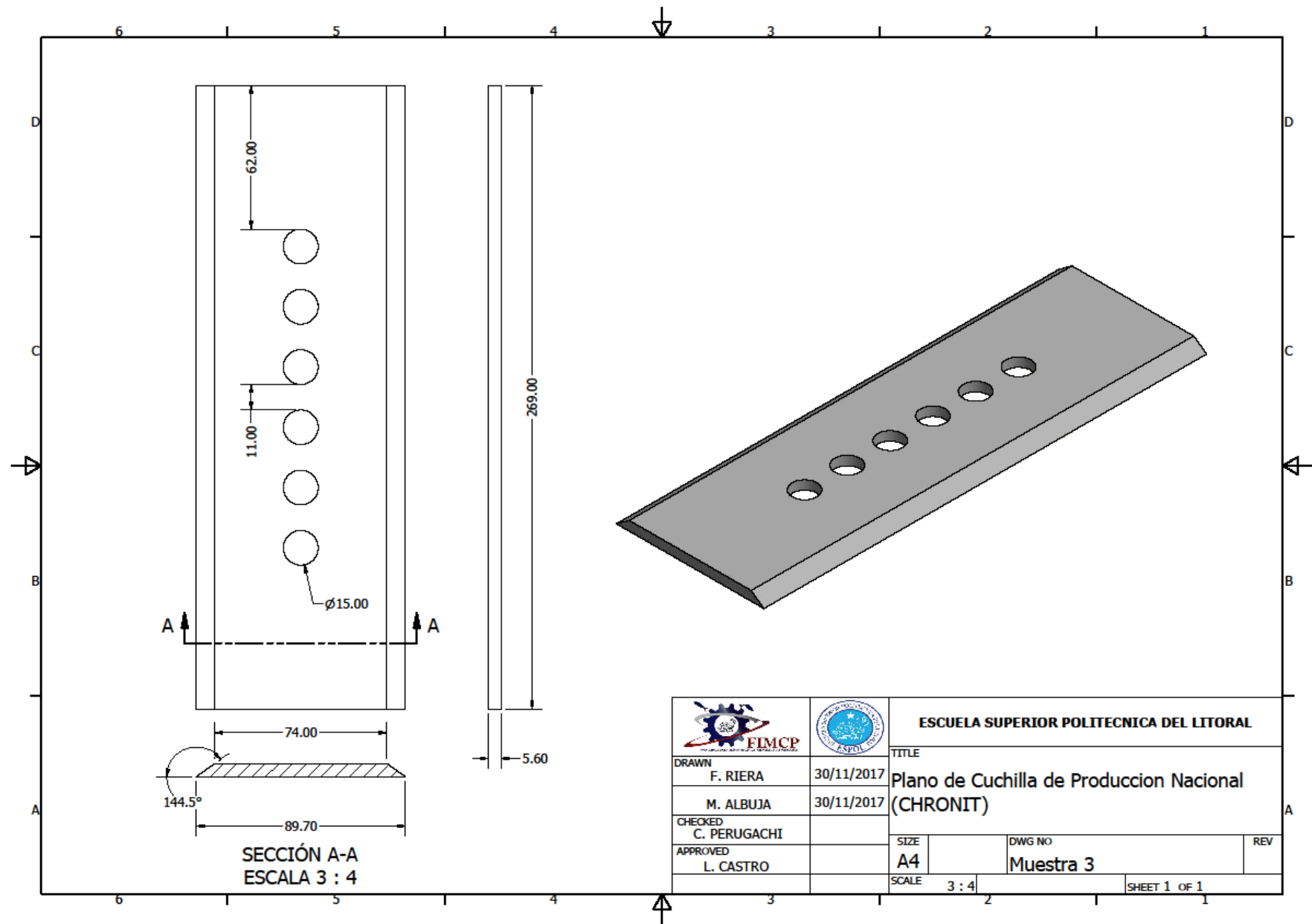
SECCIÓN A-A  
ESCALA 3 : 4

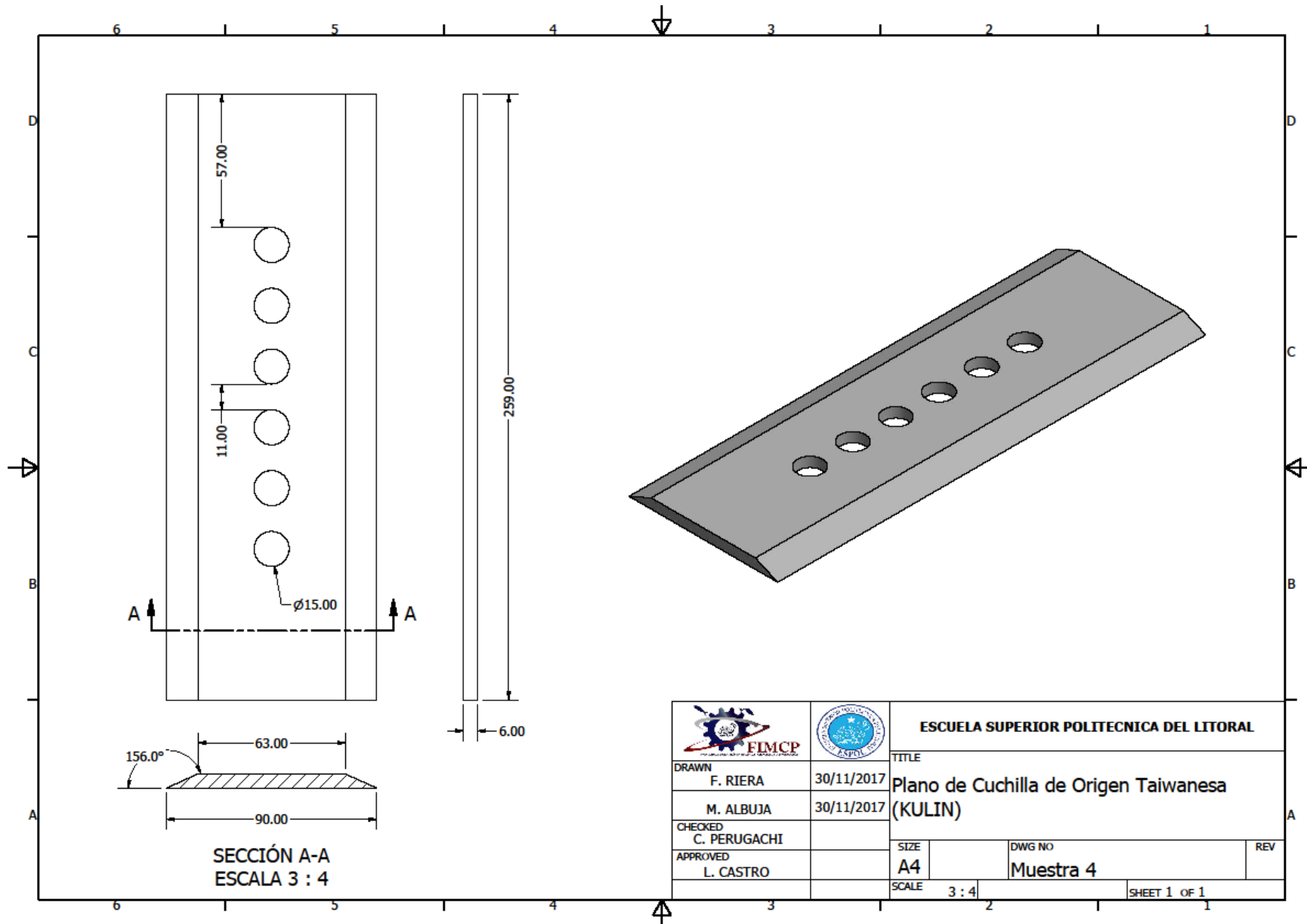
		<b>ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL</b>	
<b>DRAWN</b> F. RIERA 30/11/2017	<b>CHECKED</b> C. PERUGACHI	<b>TITLE</b> Plano de Cuchilla de Origen Australiana (PRATCO)	
<b>APPROVED</b> L. CASTRO	<b>SIZE</b> A4	<b>DWG NO</b> Muestra 1	<b>REV</b>
<b>SCALE</b> 3 : 4		<b>SHEET 1 OF 1</b>	




SECCIÓN A-A  
ESCALA 3 : 4

 		<b>ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL</b>	
DRAWN F. RIERA		30/11/2017	
CHECKED C. PERUGACHI		30/11/2017	
APPROVED L. CASTRO			
TITLE Plano de Cuchilla de Origen Colombiana (BONEM)		SIZE A4	DWG NO Muestra 2
SCALE 3 : 4		REV	
		SHEET 1 OF 1	





SECCIÓN A-A  
ESCALA 3 : 4

 		<b>ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL</b>	
DRAWN <b>F. RIERA</b> 30/11/2017	CHECKED <b>C. PERUGACHI</b> APPROVED <b>L. CASTRO</b>	TITLE <b>Plano de Cuchilla de Origen Taiwanese (KULIN)</b>	
		SIZE <b>A4</b>	DWG NO <b>Muestra 4</b>
		SCALE <b>3 : 4</b>	REV SHEET 1 OF 1