

**ANÁLISIS DEL ESTADO DE ESFUERZOS EN ANSYS**

**Análisis del estado de esfuerzos para diferentes materiales variando el ángulo de aplicación de la carga a partir del ensayo tipo Arcan en el software de elementos finitos ANSYS**

**Yerson Gustavo Gutiérrez Sanabria**

**Universidad Industrial de Santander  
Facultad De Ingenierías Físico mecánicas  
Escuela de Ingeniería Mecánica  
Bucaramanga  
2023**

**Análisis del estado de esfuerzos para diferentes materiales variando el ángulo de aplicación de la carga a partir del ensayo tipo Arcan en el software de elementos**

**Finitos ANSYS**

**Yerson Gustavo Gutiérrez Sanabria**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de**

**Ingeniero Mecánico**

**Director**

**Msc, Dsc. William Pinto Hernández**

**Universidad Industrial de Santander**

**Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas**

**Escuela de Ingeniería Mecánica**

**2023**

### **Dedicatoria**

En primer lugar, a Dios por permitirme llevar a cabo mi proceso, por permitirme alcanzar cada logro que me propongo y por brindarme tantas oportunidades en la vida.

A mi madre por su apoyo incondicional durante mi formación profesional, por su esfuerzo, por enseñarme y ayudarme a luchar en la vida.

A mi padre por su apoyo y ejemplo a lo largo de la vida.

### **Agradecimientos**

Lleno de profundo sentimiento de agradecimiento, resalto la colaboración del profesor William Pinto Hernández, director de este proyecto de grado, por su acompañamiento y enseñanza durante este proceso.

A mis padres por su esfuerzo, su entrega y su apoyo para lograr este sueño.

Al ingeniero John Alexander Montoya Tejada por su comprensión y colaboración en mi formación profesional durante el desarrollo de este proyecto de grado.

Al ingeniero Alexander Guerrero Gómez por la enseñanza y experiencia compartida a mi formación profesional.

A mi prima Jessica Ximena Sanabria Vargas por su apoyo durante toda mi formación académica y por ser un ejemplo de vida.

A toda mi familia por brindarme su amor y su apoyo cada vez que debía tomar una decisión o escoger un nuevo rumbo.

Finalmente agradezco a cada una de las personas que ha hecho parte de mi vida y que estuvo durante este proceso, aquellos que con una voz de aliento o me ayudaron a continuar con este logro.

## Contenido

Introducción .....	1
1. Objetivos.....	2
1.1. Objetivo General .....	2
1.2. Objetivos Específicos.....	2
1.3. Planteamiento del problema.....	2
1.4. Justificación.....	3
2. Marco referencial .....	5
2.1. Estado del Arte .....	5
2.1.1. Simulación mediante el método de los elementos finitos de una estructura metálica... 5	
2.1.2. Interacción de ANSYS con entornos de ventanas a medida. Aplicación al campo de la Ingeniería Mecánica .....	6
2.1.3. Estudio del comportamiento mecánico a tensión de un material compuesto con matriz polimérica de resina epoxi reforzado con fibras de carbono de alta resistencia con un tejido cuatriaxial .....	6
2.1.4. Modelado de elementos finitos de ARCAN método de ensayo para dúctil y frágil material bajo configuración de carga diferentes.....	7
2.2. Marco Teórico .....	7
2.2.1. Esfuerzo en materiales.....	8
2.2.2. Módulo de Young o módulo de elasticidad longitudinal .....	12
2.2.3. Teoría de falla (Von Mises).....	14
2.3. Marco Conceptual .....	17

2.3.1. Material Ortotrópico .....	17
2.3.2. Material Isotrópico .....	18
2.3.3. Fatiga .....	18
3. Proceso Metodológico .....	20
3.1. Análisis del estado de esfuerzos variando el ángulo de aplicación de la carga para un espécimen de acero 4140, un espécimen de pino y un espécimen de PVC (Policloruro de vinilo) .....	20
3.1.1. Materiales utilizados.....	21
3.1.2. Procedimiento numérico.....	24
3.1.3. Análisis de resultados .....	28
3.2. Análisis del comportamiento de los materiales ante la variación de la dirección de la aplicación de la carga .....	40
3.3. Comparación del comportamiento entre los materiales escogidos .....	60
4. Conclusiones.....	62
Referencias Bibliográficas .....	64
Anexos .....	68

**Índice de Tablas**

Tabla 1. Propiedades mecánicas del pino, manejado como material ortotrópico.....	21
Tabla 2. Propiedades mecánicas del policloruro de vinilo (PVC).....	23
Tabla 3. Propiedades mecánicas del acero AISI SAE 4140 .....	24
Tabla 4. Zona de máximo esfuerzo para cada material y ángulo de aplicación de la carga .....	29
Tabla 5. Porcentaje de error entre el valor de Von Mises y el punto medio máximo de las trayectorias de Acero en Ansys .....	32
Tabla 6. Porcentaje de error entre el valor de Von Mises y el punto medio máximo de las trayectorias de PVC en Ansys.....	34
Tabla 7. Porcentaje de error entre el valor de Von Mises y el punto medio máximo de las trayectorias de pino en Ansys .....	37

## Índice de Figuras

Figura 1. Esfuerzo normal.....	8
Figura 2. Carga axial.....	9
Figura 3. Esfuerzo cortante .....	10
Figura 4. Esfuerzo cortante con fuerza tangencial.....	10
Figura 5. Dirección de los esfuerzos.....	11
Figura 6. Estado general de esfuerzos.....	12
Figura 7. Gráfica del esfuerzo versus la deformación para un material .....	13
Figura 8. Asignación de ejes a los tres ejes coordenados .....	22
Figura 9. Trayectoria central de la probeta .....	25
Figura 10 Trayectoria frontal de la probeta .....	25
Figura 11. Trayectoria trasero de la probeta .....	26
Figura 12. Mallado de la probeta de las caras frontal (izquierda) y trasera (derecha).....	26
Figura 13. Soporte fijo .....	27
Figura 14. Partes de la probeta afectados por la incidencia de la fuerza .....	29
Figura 15. Orificios de contacto de los pines con la probeta .....	30
Figura 16. Punto medio crítico para cada ángulo de aplicación de la carga en el Acero AISI SAE 4140 y la teoría de falla Von Mises .....	32
Figura 17. Punto medio de cada Trayectoria y ángulo de aplicación de la carga en el Acero AISI SAE 4140 y la teoría de falla Von Mises.....	33
Figura 18. Punto medio crítico para cada ángulo de aplicación de la carga en el PVC y la teoría de falla Von Mises .....	35

Figura 19. Punto medio de cada trayectoria y ángulo de aplicación de la carga en el PVC y la teoría de falla Von Mises .....	36
Figura 20. Punto medio crítico para cada ángulo de aplicación de la carga en el Pino y la teoría de falla Von Mises .....	37
Figura 21. Punto medio de cada trayectoria y ángulo de aplicación de la carga en el Pino y la teoría de falla Von Mises .....	39
Figura 22. Montaje a 90 grados de Acero AISI SAE 41440 con 5 milímetros de espesor.....	41
Figura 23. Esfuerzo en las tres trayectorias de acero AISI SAE 4140 a 90 grados .....	41
Figura 24. Vista frontal mariposa de Acero AISI SAE 4140 a 90 grados .....	42
Figura 25. Vista trasera mariposa de Acero AISI SAE 4140 a 90 grados .....	43
Figura 26. Montaje a 75 grados de Acero AISI SAE 41440 con 5 milímetros de espesor.....	43
Figura 27. Esfuerzo en las tres trayectorias de acero AISI SAE 4140 a 75 grados .....	44
Figura 28. Vista frontal mariposa de Acero AISI SAE 4140 a 75 grados .....	45
Figura 29. Vista trasera mariposa de Acero AISI SAE 4140 a 75 grados .....	45
Figura 30. Montaje a 60 grados de Acero AISI SAE 41440 con 5 milímetros de espesor.....	46
Figura 31. Esfuerzo en las tres trayectorias de acero AISI SAE 4140 a 60 grados .....	47
Figura 32. Vista frontal mariposa de Acero AISI SAE 4140 a 60 grados .....	47
Figura 33. Vista trasera frontal mariposa de Acero AISI SAE 4140 a 60 grados .....	48
Figura 34. Montaje a 45 grados de Acero AISI SAE 41440 con 5 milímetros de espesor.....	49
Figura 35. Esfuerzo en las tres trayectorias de acero AISI SAE 4140 a 45 grados .....	49
Figura 36. Vista frontal mariposa de Acero AISI SAE 4140 a 45 grados .....	50
Figura 37. Vista trasera mariposa de Acero AISI SAE 4140 a 45 grados .....	50
Figura 38. Montaje a 30 grados de Acero AISI SAE 4140 con 5 milímetros de espesor.....	51

Figura 39. Esfuerzo en las tres trayectorias de acero AISI SAE 4140 a 30 grados .....	51
Figura 40. Vista frontal mariposa de Acero AISI SAE 4140 a 30 grados .....	52
Figura 41. Vista trasera mariposa de Acero AISI SAE 4140 a 30 grados .....	53
Figura 42. Montaje a 15 grados de Acero AISI SAE 41440 con 5 milímetros de espesor.....	53
Figura 43. Esfuerzo en las tres trayectorias de acero AISI SAE 4140 a 15 grados .....	54
Figura 44. Vista frontal mariposa de Acero AISI SAE 4140 a 15 grados .....	54
Figura 45. Vista trasera mariposa de Acero AISI SAE 4140 a 15 grados .....	55
Figura 46. Montaje a 0 grados de Acero AISI SAE 41440 con 5 milímetros de espesor.....	55
Figura 47. Esfuerzo en las tres trayectorias de acero AISI SAE 4140 a 0 grados .....	56
Figura 48. Vista frontal mariposa de Acero AISI SAE 4140 a 0 grados .....	57
Figura 49. Vista trasera mariposa de Acero AISI SAE 4140 a 0 grados .....	57
Figura 50. Montaje a 75 grados de acero AISI SAE 4140 con 2 milímetros de espesor.....	58
Figura 51. Vista frontal del comportamiento de la mariposa con 2 milímetros de espesor de acero AISI SAE 4140 .....	59
Figura 52. Vista trasera del comportamiento de la mariposa con 2 milímetros de espesor de acero AISI SAE 4140 .....	60

**Índice de Anexos**

Anexo 1. Esfuerzo en las tres trayectorias de PVC a 90 grados .....	68
Anexo 2. Vista delantera y trasera del comportamiento de la mariposa de PVC a 90 grados.....	68
Anexo 3. Esfuerzo en las tres trayectorias de PVC a 75 grados .....	69
Anexo 4. Vista delantera y trasera del comportamiento de la mariposa de PVC a 75 grados.....	69
Anexo 5. Esfuerzo en las tres trayectorias de PVC a 60 grados .....	70
Anexo 6. Vista delantera y trasera del comportamiento de la mariposa de PVC a 60 grados.....	70
Anexo 7. Esfuerzo en las tres trayectorias de PVC a 45 grados .....	71
Anexo 8. Vista delantera y trasera del comportamiento de la mariposa de PVC a 45 grados.....	71
Anexo 9. Esfuerzo en las tres trayectorias de PVC a 30 grados .....	72
Anexo 10. Vista delantera y trasera del comportamiento de la mariposa de PVC a 30 grados....	72
Anexo 11. Esfuerzo en las tres trayectorias de PVC a 15 grados .....	73
Anexo 12. Vista delantera y trasera del comportamiento de la mariposa de PVC a 15 grados....	73
Anexo 13. Esfuerzo en las tres trayectorias de PVC a 0 grados .....	74
Anexo 14. Vista delantera y trasera del comportamiento de la mariposa de PVC a 0 grados.....	74
Anexo 15. Esfuerzo en las tres trayectorias de pino a 90 grados.....	75
Anexo 16. Vista delantera y trasera del comportamiento de la mariposa de pino a 90 grados ....	75
Anexo 17. Esfuerzo en las tres trayectorias de pino a 75 grados.....	76
Anexo 18. Vista delantera y trasera del comportamiento de la mariposa de pino a 75 grados ....	76
Anexo 19. Esfuerzo en las tres trayectorias de pino a 60 grados.....	77
Anexo 20. Vista delantera y trasera del comportamiento de la mariposa de pino a 60 grados ....	77
Anexo 21. Esfuerzo en las tres trayectorias de pino a 45 grados.....	78

Anexo 22. Vista delantera y trasera del comportamiento de la mariposa de pino a 45 grados ....	78
Anexo 23. Esfuerzo en las tres trayectorias de pino a 30 grados.....	79
Anexo 24. Vista delantera y trasera del comportamiento de la mariposa de pino a 30 grados ....	79
Anexo 25. Esfuerzo en las tres trayectorias de pino a 15 grados.....	80
Anexo 26. Vista delantera y trasera del comportamiento de la mariposa de pino a 15 grados ....	80
Anexo 27. Esfuerzo en las tres trayectorias de pino a 0 grados.....	81
Anexo 28. Vista delantera y trasera del comportamiento de la mariposa de pino a 0 grados .....	81

## Resumen

**Título:** Análisis del estado de esfuerzos para diferentes materiales variando el ángulo de aplicación de la carga a partir del ensayo tipo Arcan en el software de elementos finitos ANSYS.

**Autor:** Yerson Gustavo Gutiérrez Sanabria

**Palabras clave:** Arcan, Esfuerzo, Resistencia, Rigidez, Tensión.

**Descripción:** por medio del presente proyecto de grado, se lleva a cabo el análisis mediante simulaciones del ensayo Arcan de la aplicación de la carga y la variación de la dirección de aplicación de la misma sobre tres materiales diferentes, como lo son la madera, el acero y el plástico, permitiendo observar el comportamiento, no solo a tensión pura o corte puro (ángulo de cero y noventa grados respectivamente). Esto llevado a cabo por medio de un software de elementos finitos. Se analizaron los diferentes estados de esfuerzos variando el ángulo de aplicación de la carga para un espécimen de acero 4140, un espécimen de pino y un espécimen de PVC (Policloruro de vinilo). Los resultados muestran la variación de esfuerzos en cada uno de los tres materiales utilizados.

**Abstract**

**Title:** Analysis of the state of stress for different materials by varying the angle of application of the load from the Arcan type test in the ANSYS finite element software.

**Author:** Yerson Gustavo Gutiérrez Sanabria

**Key words:** Arcan, Effort, Resistance, Stiffness, Tension.

**Description:** through this degree project, the analysis is carried out through simulations of the Arcan test of the application of the load and the variation of the direction of application of the same on three different materials, such as wood, steel and the plastic, allowing to observe the behavior, not only in pure tension or pure shear (angle of zero and ninety degrees respectively). This is carried out by means of finite element software. The different stress states were analyzed by varying the load application angle for a 4140-steel specimen, a pine specimen and a PVC (Polyvinyl Chloride) specimen. The results show the variation of efforts in each of the three materials used.

## Introducción

En la industria actual, se destaca la amplitud en cuanto al uso de materiales de diferentes tipos debido a las propiedades que estos ofrecen, tales como resistencia, flexibilidad, tenacidad, entre otras, razón por la cual han surgido constantes intereses en el desarrollo de variadas aplicaciones para materiales como la madera, el acero y el plástico, tres grandes grupos de los cuales pueden ser seleccionados algunos de ellos y conocer sus múltiples aplicaciones (Morocho, 2013). En el caso de la madera, el pino es empleado para construcciones navales, balcones, suelos, etc. En los plásticos, el PVC (policloruro de vinilo) se utiliza para interiores de vehículos, tuberías, revestimiento de cables, etc., y, por último, en los aceros, el AISI SAE 4140 se emplea en la industria automotriz para la elaboración de engranajes, ejes, cigüeñales, en la fabricación de partes de máquinas como espárragos o árboles para turbinas (Velosa, Olaya, & Guerrero, 2018).

Debido a la variedad de usos y las propiedades que estos materiales poseen, el estudio del comportamiento es fundamental. Para esto se lleva a cabo el análisis mediante simulaciones del ensayo arcan que permite la aplicación de la carga y además la variación de la dirección de aplicación de la misma, permitiendo observar el comportamiento, no solo a tensión pura o corte puro (ángulo de cero y noventa grados respectivamente), sino también modos mixtos como lo son tensión y corte simultáneamente, todo esto realizado en un software de elementos finitos que muestra el estado de la probeta trabajada junto con los esfuerzos y demás datos de interés como deformaciones y el factor de seguridad en determinado lugar o del espécimen de prueba. Además de lo mencionado anteriormente se usa la teoría de falla de Von Misses para calcular esfuerzos que serán comparados con los valores obtenidos en la simulación.

## **1. Objetivos**

### **1.1. Objetivo General**

Analizar el estado de esfuerzos para diferentes materiales variando el ángulo de aplicación de la carga a partir del ensayo tipo a Arcan en el software de elementos finitos ANSYS.

### **1.2. Objetivos Específicos**

Analizar el estado de esfuerzos variando el ángulo de aplicación de la carga para un espécimen de acero 4140, un espécimen de pino y un espécimen de PVC (Policloruro de vinilo).

Analizar el comportamiento de los materiales ante la variación de la dirección de la aplicación de la carga.

Comparar el comportamiento entre los materiales escogidos.

### **1.3. Planteamiento del problema**

Los componentes de una estructura deben ser capaces de soportar cargas y fuerzas externas a la estructura, además de su propio peso. Los elementos o partes de las estructuras soportan varios tipos de esfuerzos según su ubicación dentro de la estructura y los tipos de fuerzas que actúan sobre ellos. Cuando se aplica una fuerza a un objeto, tiende a deformarse; el grado de deformación producido depende de la dirección, sentido y punto de aplicación donde se ejerce la fuerza. Las diferentes fuerzas provienen de diferentes fuentes, como las producidas por

el propio peso del objeto (toda estructura debe sostenerse a sí misma), el peso, el movimiento o la vibración de los componentes individuales que componen el sistema técnico y las fuerzas producidas por agentes externos al sistema técnico en sí mismo, como los efectos del viento, la nieve y otros factores relacionados con el clima. Aunque una estructura generalmente se construye para resistir la deformación, las fuerzas mencionadas anteriormente frecuentemente dan como resultado esto, por lo que debe tenerse en cuenta al elegir los materiales (Canet, 2012).

Concentradores de tensión, cargas axiales, propiedades mecánicas, elementos finitos y otros temas relacionados, son algunas de las temáticas sobre las que trata este proyecto, basado en los enunciados de la ciencia y la ingeniería. El desarrollo de nuevas tecnologías de la información y la comunicación en la estructuración y selección de modelos matemáticos computarizados que agilicen los cálculos y resuelvan problemas de selección de materiales mediante el análisis de elementos finitos son fundamentales en la aplicación de diseños estructurales (Clavijo & Montoya, 2015). Por ello es crucial entender las variables a considerar al realizar un estudio de ingeniería, así como las aplicaciones tecnológicas que ayudan a que los cálculos y diseños metodológicos se realicen de manera rápida y eficiente.

#### **1.4. Justificación**

La aplicación de análisis de deformación y tensión de varios materiales ha sido crucial para maximizar el uso de diferentes materiales, incluidos el acero, el plástico y la madera. El método de los elementos finitos se ha convertido en una potente herramienta para la solución numérica de una amplia gama de problemas de ingeniería. Debido al alto coste de los ensayos de ingeniería experimental, se han utilizado modelos numéricos derivados por simulación a partir de las caracterizaciones de los materiales ensayados experimentalmente. Como resultado, el diseño

puede llevarse a cabo aproximadamente sin pruebas experimentales adicionales. Estos modelos numéricos tienen en cuenta tanto la región de diseño en la que se utilizará el material como el porcentaje de deformación que sufrió el material durante la prueba (Celigüeta, 2011).

Las metodologías de diseño y los procesos industriales a nivel mundial han mejorado significativamente gracias al rápido desarrollo de las tecnologías informáticas, siendo necesario mantener los conocimientos y la gestión actuales de las distintas aplicaciones y metodologías. Estos ayudan a reducir los tiempos y costos del proceso de diseño, disminuyendo la cantidad de prototipos físicos necesarios para definir un producto, brindando a los departamentos de ingeniería una gran cantidad de información sobre sus procesos y productos más rápido que con los métodos analíticos, y optimizando elementos de máquinas de una manera más rápida, precisa y eficiente, que si se hiciera manualmente (Jacas, Rodríguez, & Ordoñez, 2005).

El uso de computadoras y software tiene un impacto significativo en el proceso de diseño porque permite la búsqueda de información, la gestión de registros, la reducción de datos, la resolución de ecuaciones, la optimización iterativa, el dibujo y la simulación de los componentes de herramientas, equipos y maquinaria. El modelado por simulación computacional, orientado a elementos finitos, identifica las variables necesarias y toma estos parámetros como argumentos de entrada, con el fin de retroalimentar al software, para que reproduzca el modelado creado a partir de un archivo de salida. Con la ayuda de las soluciones de software de análisis estructural de ANSYS, se puede resolver problemas de ingeniería estructural desafiantes de manera más rápida y efectiva. Las empresas pueden reducir los costos, acortar la duración de los ciclos de diseño y lanzar productos más rápidamente utilizando ANSYS (2023).

## **2. Marco referencial**

### **2.1. Estado del Arte**

A continuación, se presenta una recopilación de algunos estudios previos, relacionados con el tema principal de la presente investigación, los cuales tienen como fundamento, ampliar el conocimiento sobre el programa de simulación ANSYS, los parámetros de esfuerzos y deformidades, el método Arcan, entre otros.

#### ***2.1.1. Simulación mediante el método de los elementos finitos de una estructura metálica***

El objetivo de este proyecto era utilizar el método de elementos finitos para analizar una estructura real. El programa de simulación ANSYS se utilizó como programa de elementos finitos para este análisis. La resolución de diversas simulaciones estáticas de estructuras en este caso ha sido el tema a resolver. Hay muchos enfoques diferentes de resolución y diseño que se utilizaron en cada uno de estos problemas o simulaciones, lo que ha brindado una amplia gama de resultados. Estos resultados siempre deben ser interpretados por alguien con la experiencia necesaria para que la información del modelo se pueda aprovechar. Las fallas básicas en la resolución del modelo se generan durante el proceso de construcción de la geometría. Para evitar estas fallas, que requieren mucho tiempo para simular y estudiar y son difíciles de detectar y resolver, es crucial que el modelo se construya bien desde el principio (Martín, 2010).

### ***2.1.2. Interacción de ANSYS con entornos de ventanas a medida. Aplicación al campo de la Ingeniería Mecánica***

Este proyecto utiliza Microsoft Office Excel y Visual Basic para programar una hoja de cálculo para dimensionar un elevador de cangilones según las especificaciones deseadas. Luego utiliza el programa FEM (Finite Element Methods) ANSYS para estudiar los esfuerzos y las deformaciones que se producen en el elevador de cangilones. La creación de diseños complejos que puedan ser analizados es posible gracias a la compatibilidad de Microsoft Excel y el programa de análisis de elementos finitos ANSYS, que facilita enormemente la simulación de un elemento mecánico. La simulación por computadora permite una comprensión más rápida e intuitiva del funcionamiento de este componente mecánico en específico (cinta elevadora de cangilones), en todos los dominios de la ingeniería, incluidos los estructurales, térmicos, magnéticos, entre otros (González, 2010).

### ***2.1.3. Estudio del comportamiento mecánico a tensión de un material compuesto con matriz polimérica de resina epoxi reforzado con fibras de carbono de alta resistencia con un tejido cuatriaxial***

En este estudio, se examinó el comportamiento mecánico de un material compuesto hecho de una matriz polimérica de resina epoxi reforzada con un tejido de fibra de carbono cuatriaxial bajo tensión para determinar propiedades como la tensión última a la rotura, el límite elástico y el módulo de elasticidad con base en la Norma ASTM D3039. /D3039M-14. Se descubrió que la orientación de las fibras en materiales compuestos afecta las propiedades del material. Así como la dirección del tejido plano sin fibras es de 45 grados, el tejido propuesto es de 30 grados, al estudiar orientaciones donde no hay fibras. y se puede ver que, en este caso, el

comportamiento del tejido cuadriaxial es un 66 por ciento mayor que el valor de la tensión (Pedraza & Toloza, 2016).

#### ***2.1.4. Modelado de elementos finitos de ARCAN método de ensayo para dúctil y frágil material bajo configuración de carga diferentes***

El objetivo de este estudio fue el de utilizar el análisis de elementos finitos (FEA) para investigar las características de tracción de ambos tipos de materiales bajo el método de prueba Arcan. El método de prueba se llevó a cabo metódicamente utilizando ANSYS CAD, involucró un software de análisis de elementos finitos e involucró el modelado de la muestra en forma de mariposa utilizando elementos finitos. Este espécimen luego se cargó en condiciones de tracción con varias configuraciones de carga. La capacidad de verificar la forma de los elementos ANSYS proporciona una validación geométrica para el modelo de elementos finitos. Está claro a partir del análisis de elementos finitos que diferentes configuraciones de carga dan como resultado diferentes tensiones en las características del campo. Los resultados muestran que Arcan puede establecer de forma fiable configuraciones para determinar el módulo de corte de ambos materiales (Izzah, Abu Hassan, & Ahmad, 2016).

## **2.2. Marco Teórico**

A continuación, se describen las principales teorías que hacen parte de la presente investigación y que definen los aspectos fundamentales que se requieren para comprender de mejor manera, cada uno de los puntos a tratar durante el desarrollo de los objetivos específicos, que a su vez dan respuesta al objetivo general del proyecto.

### 2.2.1. Esfuerzo en materiales

Los esfuerzos de tracción, flexión, compresión y cortante son todos tipos de fuerzas que actúan sobre la unidad de área en la que se aplican y a esto se le denomina esfuerzo, mientras que, al cambio de dimensión por unidad de longitud, se le llama deformación. Los pascales (pa) o psi (libras por pulgada cuadrada) son las unidades comúnmente utilizadas para medir el esfuerzo en los materiales. Como cantidad adimensional, la deformación se expresa con frecuencia en pulg/pulg o cm/cm. La deformación es el resultado, y el esfuerzo es la causa (Plata, 2017). Los esfuerzos cortantes se encuentran durante el procesamiento de materiales, en procesos como la extrusión de polímeros y en aplicaciones estructurales en muchas aplicaciones sujetas a cargas dinámicas. También pueden estar presentes esfuerzos de tracción o compresión.

**Esfuerzo normal:** si se tiene un elemento de área transversal  $A$  sujeto a una carga axial  $P$ , como en la Figura 1, el esfuerzo es definido como la magnitud de la carga sobre el área transversal. Al esfuerzo normal comúnmente se le representa con la letra griega sigma ( $\sigma$ ):

$$\sigma = \frac{N}{A}$$

Donde  $N$  simboliza la componente de la carga o fuerza que se encuentra distribuida sobre el eje principal de la carga.

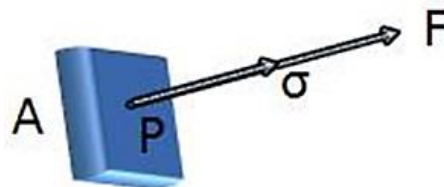


Figura 1. Esfuerzo normal

En el caso de la Figura 2,  $N=F$ . A la unidad  $N/m^2$  se le llama Pascal (Pa).

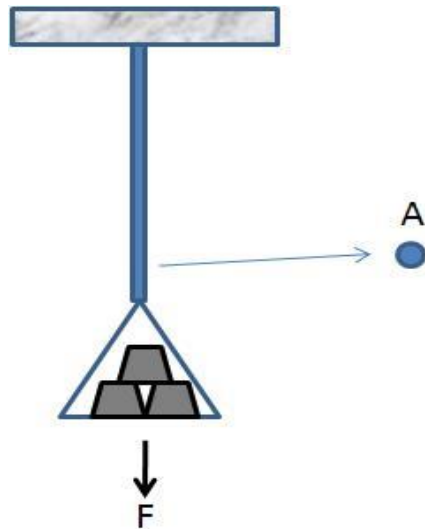


Figura 2. Carga axial

Dado que el eje principal de la columna o barra es donde se aplica la fuerza, este tipo de aplicación de fuerza se denomina con frecuencia carga axial. Como la dirección es idéntica a esta (F), el esfuerzo se ha expresado como un escalar.

**Esfuerzo cortante:** el esfuerzo cortante también es una función del área de la sección transversal del componente que está sujeto a un par de fuerzas opuestas que actúan en el mismo lugar de la estructura, que es perpendicular al eje de carga principal de la misma, como se muestra en la Figura 3. El esfuerzo cortante tiene las mismas unidades que el esfuerzo normal y está relacionado con la variable tau ( $t$ ):

$$\tau = \frac{V}{A}$$

donde V representa la componente de la fuerza resultante que se encuentra tangente al área transversal de la pieza en análisis. En el ejemplo de la figura,  $V = 2F$ .

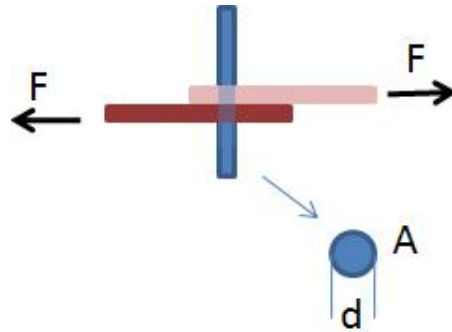


Figura 3. Esfuerzo cortante

El esfuerzo cortante se expresa en las mismas unidades (Pa). Se considera cómo se ha configurado el sistema de fuerzas en el cálculo para que solo se aplique la fuerza tangencial a la superficie, lo que limita el cálculo solo al área y la fuerza actuante.

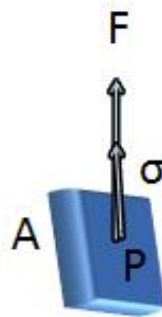


Figura 4. Esfuerzo cortante con fuerza tangencial

Debido a que puede causar la fractura de la sección transversal de la pieza considerada, este se denomina esfuerzo cortante.

**Estado general de los esfuerzos:** en la mayoría de los casos, la fuerza que se aplica no es paralela al eje principal de la pieza o al área de su sección transversal. La fuerza normal es la proyección de la resultante sobre el eje principal de la pieza dividida por el área en la que se aplica la fuerza resultante  $F$ . En el ejemplo que se muestra a continuación, se puede ver cómo el

esfuerzo cortante se proyecta sobre el área de la sección transversal mientras que el esfuerzo normal tiene la dirección de la componente x (Díaz, 2008).

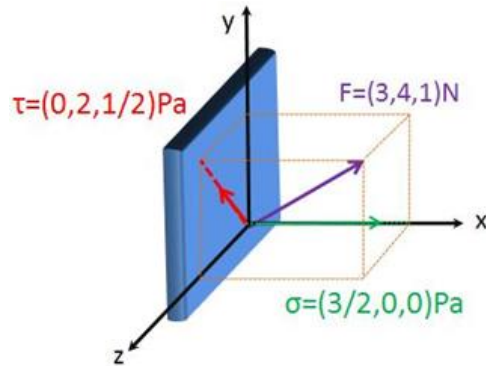


Figura 5. Dirección de los esfuerzos

Como resultado, existe un estado de tensión general que relaciona cada unidad de volumen con los vectores de tensión normal y cortante que corresponden a cada cara del diferencial de volumen. Se debe tener en cuenta que el esfuerzo cortante se ha dividido en componentes que corresponden a las dos direcciones por las que se extiende la superficie en la siguiente figura, donde estos esfuerzos se han representado en tres de las caras. El estado general de esfuerzos es el nombre que se le da a esta representación (Cervera & Blanco, 2015).

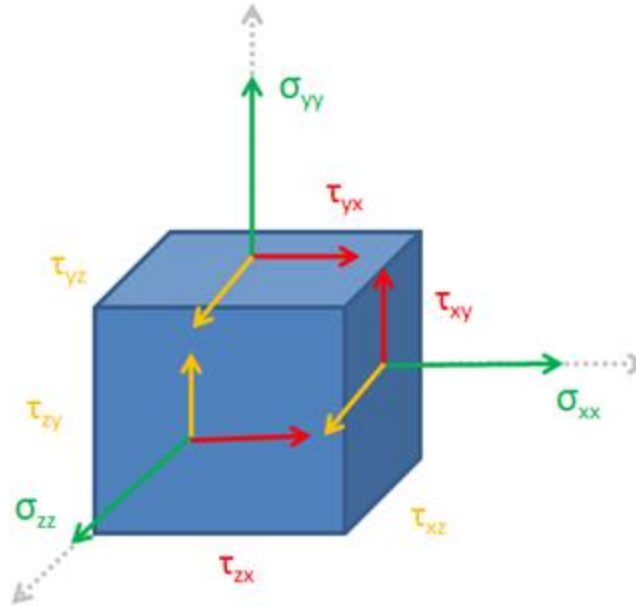


Figura 6. Estado general de esfuerzos

### 2.2.2. Módulo de Young o módulo de elasticidad longitudinal

El módulo de Young hace referencia a Thomas Young, un científico que investigó esta idea en el siglo XIX. Sin embargo, Leonhard Euler no ideó la técnica hasta 1727, y Giordani Riccati no comenzó a usarla en su forma actual hasta 1782. El módulo de Young, también conocido como elasticidad longitudinal, es un parámetro que se puede usar para determinar cómo un material elástico responderá a diferentes tipos de fuerzas aplicadas y al consiguiente alargamiento o acortamiento de ese material. Por lo tanto, su objetivo es determinar la relación entre la tensión ejercida sobre el objeto a lo largo de su eje longitudinal y la deformación observada a lo largo del mismo eje. Por lo tanto, evalúa el comportamiento elástico del material y pronostica cuánto se estirará un material dado (Ortiz & Cruz, 2022).

Dependiendo de la dirección en la que se aplique una fuerza, un material elástico se comportará de cierta manera según un parámetro llamado módulo de Young. Es una de las técnicas más populares para calcular la elasticidad de un material. El módulo de Young, una

constante independiente de la tensión siempre que no supere un valor máximo conocido como límite elástico, y siempre mayor que cero, tiene el mismo valor a tracción que a compresión para un material elástico lineal e isotrópico. Para varios materiales, el módulo de Young y el límite elástico varían. Al igual que el límite elástico, el módulo de elasticidad se puede determinar empíricamente mediante la prueba de tracción de un material. El módulo de elasticidad transversal de un material (también conocido como módulo de corte) se puede definir además del módulo de elasticidad longitudinal (Servosis, 2020).

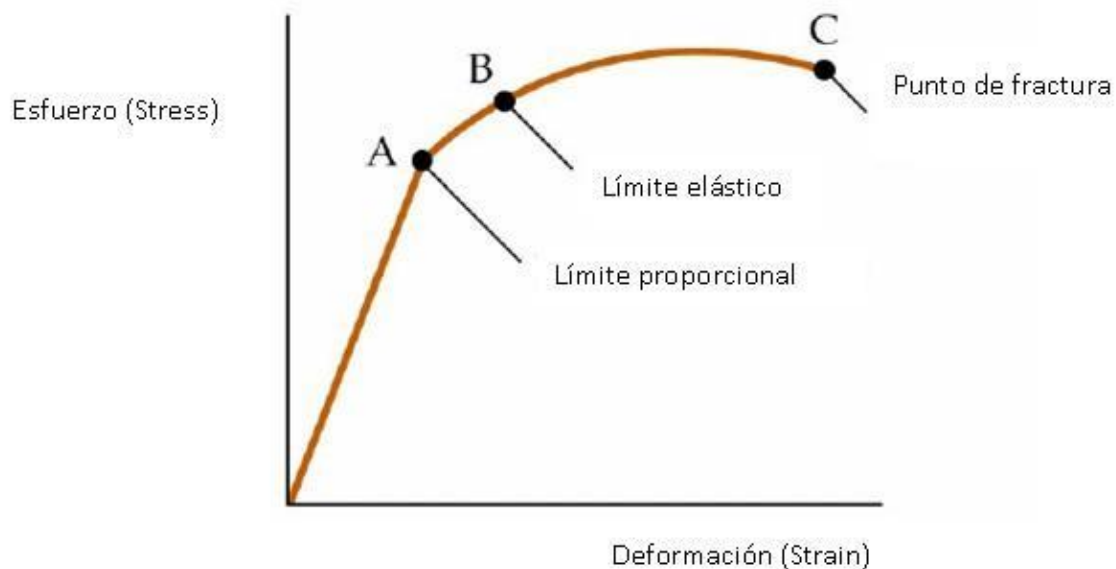


Figura 7. Gráfica del esfuerzo versus la deformación para un material

La forma de calcular el módulo de Young es:

$$E = \sigma/\epsilon$$

Siendo:

E = módulo de Young, en pascal.

$\sigma$  = tensión uniaxial o fuerza uniaxial por superficie de la unidad, en pascal.

$\varepsilon$  = deformación o deformación proporcional (esto quiere decir el cambio de longitud dividido por la longitud original).

El módulo de Young se puede usar para muchas cosas diferentes, como en un proyecto en el que una roca sirve como base para otras estructuras, para comparar resultados entre diferentes materiales o para medir la rigidez de un material sólido. Para evaluar la resistencia a la tracción de un material u objeto, el módulo de Young es crucial (Martínez & Azuaga, 1997). Al elegir los mejores materiales para una aplicación determinada, ya sea para crear un ala de avión o un cojinete de automóvil, la ciencia de los materiales considera cuán elásticamente responde un material a diferentes tensiones. La respuesta esperada del material está determinada en gran medida por sus propiedades. Conocer el trabajo que se pondrá en una pieza en particular lo ayudará a elegir el material que tendrá los mejores resultados. También debe elegir el material cuyas propiedades coincidan más con el diseño (Zapata, 2020).

### ***2.2.3. Teoría de falla (Von Mises)***

La teoría de máxima energía de distorsión indica que cualquier material esforzado elásticamente sufre un ligero cambio en su forma, volumen o en ambos, entonces, la energía que se necesita para producir el cambio se almacena en el material en forma de energía elástica. Se postula que un material tiene la capacidad para absorber energía de distorsión y que, al ser sometido a mayores cantidades de energía de distorsión, tiende a la cedencia o deformación. A continuación, se mostrará la ecuación de Von Mises para el caso bidimensional (Sánchez, 2013).

$$\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 * \sigma_2}$$

Para el esfuerzo de Von Mises en términos de esfuerzos máximos y mínimos se tiene:

Ecuación 1.

$$\sigma_1^2 = \left[ \left( \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \right) + \left( \left( \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \right)^2 + \tau_{xy}^2 \right)^{\frac{1}{2}} \right]^2 = (\sigma_{prom} + R)^2$$

Ecuación 2.

$$\sigma_2^2 = \left[ \left( \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \right) - \left( \left( \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \right)^2 + \tau_{xy}^2 \right)^{\frac{1}{2}} \right]^2 = (\sigma_{prom} - R)^2$$

Usando la Ecuación 1 y la Ecuación 2 en la Ecuación 3 se obtiene:

Ecuación 3.

$$\sigma = \sqrt{(\sigma_{prom} + R)^2 + (\sigma_{prom} - R)^2 - (\sigma_{prom} + R)(\sigma_{prom} - R)}$$

Resolviendo los términos de la Ecuación 3:

$\sigma$

$$= \sqrt{\sigma_{prom}^2 + 2\sigma_{prom}R + R^2 + \sigma_{prom}^2 - 2\sigma_{prom}R + R^2 - (\sigma_{prom}^2 - \sigma_{prom}R + \sigma_{prom}R - R^2)}$$

Simplificando la ecuación:

Ecuación 4.

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{prom}^2 + 3R^2}$$

Además de las ecuaciones mostradas anteriormente se tiene:

Ecuación 5.

$$\sigma_{prom}^2 = \left(\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}\right)^2$$

Ecuación 6.

$$R = \left(\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2\right)^{\frac{1}{2}}$$

Reemplazando la Ecuación 5 y la Ecuación 6 en la Ecuación 4 se obtiene:

Ecuación 7.

$$\sigma = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}\right)^2 + 3\left(\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2\right)}$$

Resolviendo la Ecuación 7:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sigma_x^2 + 2\sigma_x\sigma_y + \sigma_y^2}{4} + \frac{3}{4}(\sigma_x^2 - 2\sigma_x\sigma_y + \sigma_y^2) + 3\tau_{xy}^2}$$

Simplificando la Ecuación 7 se tiene que:

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

Para el cálculo teórico en el plano, se asume el valor del esfuerzo normal en Y igual a cero. Por lo tanto, la ecuación empleada para hallar los esfuerzos con la teoría de falla de Von Mises en la siguiente:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_x^2 + 3\tau_{xy}^2}$$

### **2.3. Marco Conceptual**

A continuación, se muestra la definición de algunos de los conceptos más importantes que se tratan a lo largo del desarrollo del presente trabajo, los cuales son necesarios para comprender con mayor claridad, cuáles son las actividades que se llevaron a cabo para cumplir a cabalidad con los objetivos específicos de la investigación.

#### **2.3.1. Material Ortotrópico**

Cuando las propiedades mecánicas o térmicas de un material son distintas e independientes en tres direcciones mutuamente perpendiculares, se dice que el material es ortotrópico. La madera, numerosos vidrios y metales laminados son algunos ejemplos de materiales ortotrópicos. Por ejemplo, las direcciones longitudinal, radial y tangencial se utilizan para describir las características mecánicas de la madera en un punto específico. El eje tangencial

(3) es perpendicular a los anillos de crecimiento, el eje radial (2) sigue la dirección del grano (fibra), y el eje longitudinal (1) es paralelo a la dirección del grano (fibra). Las direcciones ortotrópicas del material de un componente están determinadas por la geometría de referencia elegida. Si una pieza se fabrica sin tener esto en cuenta, debe modelarla como piezas diferentes para definir correctamente las direcciones ortotrópicas (Dassault Systèmes, 2022).

### ***2.3.2. Material Isotrópico***

En cualquier punto dado, los materiales isotrópicos tienen las mismas características materiales en todas las direcciones. Esto significa que los materiales isotrópicos mostrarán la misma resistencia, tensión, deformación, módulo de Young y dureza cuando se aplica una carga específica en cualquier punto del eje x, y o z. Los materiales isotrópicos no cambian según la dirección en la que viaja la luz, lo que es consistente con la forma en que la luz interactúa con la materia. Solo tendrá un único índice de refracción fijo para cada longitud de onda. Es muy fácil dar forma y moldear una sustancia isotrópica. El comportamiento de sus microcomponentes también es muy predecible porque sus características son las mismas independientemente de la orientación. Los materiales isotrópicos incluyen, entre otros, metales, vidrios, la mayoría de los líquidos y polímeros (Ruiz & Tascón, 2013).

### ***2.3.3. Fatiga***

Es una falla progresiva de una parte bajo cargas repetitivas, cíclicas o fluctuantes. Si una estructura está sujeta a este tipo de fuerzas puede fracturarse a un nivel de tensión más bajo que el que normalmente provocaría una falla en condiciones estáticas. La fatiga es un fenómeno que con frecuencia provoca las fallas primarias de los metales utilizados en las aplicaciones. Hay dos

categorías principales de fallas por fatiga: simples y compuestas. La falla directa ocurre cuando una falla por fatiga se origina en una sola fisura y se extiende hasta que ocurre la falla final.

Cuando una fisura por fatiga comienza en dos o más lugares y se propaga desde esos lugares, da como resultado una falla por fatiga compuesta; el efecto del encuentro conduce entonces a la falla total (Chamie, 2014).

### 3. Proceso Metodológico

#### 3.1. Análisis del estado de esfuerzos variando el ángulo de aplicación de la carga para un espécimen de acero 4140, un espécimen de pino y un espécimen de PVC (Policloruro de vinilo)

Para implementar los montajes en el software de elementos finitos Ansys, se pueden construir en el mismo programa o utilizar uno que tenga herramientas de dibujo y permita compartir la geometría con Ansys, para este caso el programa utilizado es SolidWorks, allí se hicieron cada una de las piezas para luego ser ensambladas y contar con los 21 montajes que se analizarán. El procedimiento en Ansys exige algunos requerimientos y parámetros para la simulación, dentro de ellos se encuentran los materiales junto con las propiedades mecánicas necesarias, la geometría definida y por último el modelo que debe llevar algunos detalles como los contactos entre superficies, el refinamiento de la malla, la asignación de las cargas y definir los puntos o lugares donde se desea obtener resultados.

El proyecto se desarrolla partiendo de materiales empleados en la construcción de diversos mecanismos, obras civiles, máquinas, entre otras aplicaciones ingenieriles, de tres grandes grupos como lo son los metales, los plásticos y la madera, se eligió uno de cada uno para realizar el respectivo análisis, del grupo de la madera se tomó el pino, de los aceros el acero AISI SAE 4140 y en los plásticos el PVC (Policloruro de vinilo), para cada uno de ellos se hacen los mismos procedimientos de montaje y aplicación de cargas.

Para realizar el análisis se hace necesario conocer algunas de las propiedades mecánicas de los materiales, como la resistencia a la tracción, módulo de Young, coeficiente de Poisson, esfuerzo último de tensión, resistencia a la compresión entre otras cuando se trata de los

materiales isotrópicos (Acero AISI SAE y PVC), para el caso del material ortotrópico, el pino, se necesitan las propiedades en cada uno de los ejes y planos, debido a que el comportamiento varia si la carga aplicada está en dirección de las fibras o si está en otra dirección.

### 3.1.1. Materiales utilizados

**Pino:** el pino es uno de los materiales más utilizados entre los que son tipo madera, gracias a que se encuentra de manera abundante, es muy versátil y se deja trabajar de manera sencilla, posee una buena resistencia, buena contracción y flexibilidad, como otros materiales se encuentra en diferentes tipos y cada uno de ellos tiene propiedades relevantes, algunos de estos tipos son pino radiata, pino silvestre y pino marítimo, cabe resaltar que cada uno de los tipos tiene un lugar de proveniencia dependiendo de las condiciones que este requiera para darse.

Tabla 1. Propiedades mecánicas del pino, manejado como material ortotrópico

	data found in the literature				calculations in this paper			
	$E_1$	$G_{12}$	$\nu_{12}$	$\nu_{21}$	$-c_{12}$	$-c_{21}$	$\lambda_1$	$\lambda_4$
	$E_2$	$G_{13}$	$\nu_{13}$	$\nu_{31}$	$-c_{13}$	$-c_{31}$	$\lambda_2$	$\lambda_5$
	$E_3$	$G_{23}$	$\nu_{23}$	$\nu_{32}$	$-c_{23}$	$-c_{32}$	$\lambda_3$	$\lambda_6$
	[MPa]		[-]		$[10^{-12}\text{Pa}^{-1}]$		$[10^{-6}\text{Pa}^{-1}]$	
Pine [21]	6919	262	0.388	0.015	56	56	0.00014	0.00382
	271	354	0.375	0.024	54	54	0.00170	0.00423
	450	34	0.278	0.462	1027	1027	0.00282	0.02941

Fuente: elaboración propia

Para agregar las propiedades de la madera de pino en la simulación, se asumieron los ejes coordenados como se observa en la Figura 8.

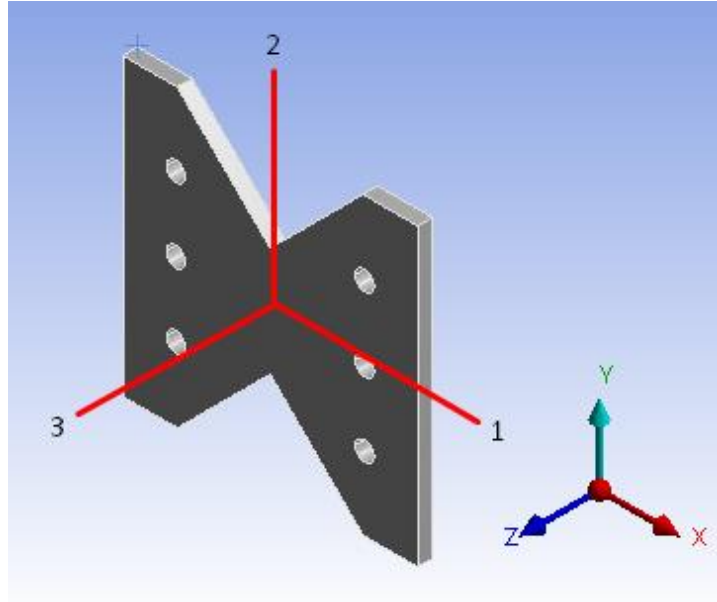


Figura 8. Asignación de ejes a los tres ejes coordenados

**Policloruro de vinilo (PVC):** el policloruro de vinilo es un termoplástico que tiene la capacidad de modificar sus propiedades empleando la adición de aditivos, es un material muy usado debido a que posee o se puede conseguir en diferentes grupos de productos como lo son flexible, rígido y plastisol, cada uno de ellos tiene propiedades que serán mostradas a continuación. El PVC flexible presenta alta resistencia al impacto, a la tensión y a la elongación, además posee un alto aislamiento eléctrico y poder de auto extinguirse, tiene buena resistencia química a los ácidos, bases y solventes orgánicos.

El PVC rígido es un producto resistente a la tensión y flexión, posee buena dureza, su resistencia al impacto es baja, pero como se mencionó anteriormente con algunos aditivos se pueden modificar sus propiedades, por último, se puede decir que tiene una buena resistencia a químicos con excepción de oxidantes. En la Tabla 2 se presentan algunas de las propiedades mecánicas del policloruro de vinilo.

Tabla 2. Propiedades mecánicas del policloruro de vinilo (PVC)

POLICLORURO DE VINILO RIGIDO (NO PLASTIFICADO)				PVC - U
PROPIEDADES MECANICAS A 23°C	UNIDAD	ASTM	DIN	VALORES
PESO ESPECIFICO	gr/cm <sup>3</sup>	D-792	53479	1.45
RESIST. A LA TRACC.(FLUENCIA / ROTURA)	Kg/cm <sup>2</sup>	D-638	53455	550 / --
RES. A LA COMPRESION ( 1 Y 2 % DEF)	Kg/cm <sup>2</sup>	D-695	53454	170 / 300
RESISTENCIA A LA FLEXION	Kg/cm <sup>2</sup>	D-790	53452	700
RES. AL CHOQUE SIN ENTALLA	Kg.cm/cm <sup>2</sup>	D-256	53453	NO ROMPE
ALARGAMIENTO A LA ROTURA	%	D-638	53455	> 20
MODULO DE ELASTICIDAD (TRACCION)	Kg/cm <sup>2</sup>	D-638	53457	31000
DUREZA	Shore D	D-2240	53505	80 - 83
COEF. DE ROCE ESTATICO S/ACERO		D-1894		--
COEF. DE ROCE DINAMICO S/ACERO		D-1894		--
RES. AL DESGASTE POR ROCE				MALA
PROPIEDADES TERMICAS	UNIDAD	ASTM	DIN	VALORES
CALOR ESPECIFICO	Kcal/Kg.°C	C-351		0.28
TEMP. DE FLEXION B/CARGA (18.5Kg/cm <sup>2</sup> )	°C	D-648	53461	55
TEMP. DE USO CONTINUO EN AIRE	°C			-15 a 60
TEMP. DE FUSION	°C			150
COEF. DE DILATACION LINEAL DE 23 A 100°C	por °C	D-696	52752	0.00011
COEF. DE CONDUCCIOTERMICA	Kcal/m.h.°C	C-177	52612	0.22

Fuente: COPLASTIC. Catalogo comercial, s.l.: s.f. p. 3

**Acero AISI SAE 4140:** es un acero aleado al cromo molibdeno de buena penetración al temple y con buen desempeño en aplicaciones donde se necesita alta resistencia y tenacidad en algunas secciones, es un material apto para ser empleado en condiciones de fatiga y torsión, para tener mejores propiedades se recomienda realizar tratamientos térmicos, por ejemplo, endurecimiento superficial por temple. Para este material se tienen aplicaciones como fabricación de ejes, engranajes, cigüeñales, bielas, herramientas de corte, rodillos, árbol de levas, resortes, etc., todas aquellas aplicaciones donde requieren las propiedades mencionadas anteriormente.

En la Tabla 3 se observan algunas de las propiedades mecánicas más relevantes a la hora de realizar un análisis o una simulación en este caso para el acero AISI SAE 4140.

Tabla 3. Propiedades mecánicas del acero AISI SAE 4140

Propiedades mecánicas en condiciones de tratamiento térmico o trabajo en frío.							
Acero	Resistencia a la tracción (Mpa), $\geq$	Esfuerzo de fluencia (Mpa), $\geq$	Elongación en 50 mm, %, $\geq$	Reducción en área, %, $\geq$	Dureza (HB)	Diámetro de la muestra	Condiciones
AISI SAE 4140	1020	655	17.7	46.8	302	25,4 mm (1 pulgada)	Normalizado a 870 °C (1600 °F)
	655	414	25.7	56.9	197		Recocido a 815 °C (1500 °F)
	1075	986	15.5	56.9	311		Agua enfriada a partir de 845 °C (1550 °F) y templada a 540 °C (1000 °F)

Fuente: Fuente: elaboración propia

### 3.1.2. Procedimiento numérico

El primer paso es este proceso es la creación de un análisis estructural estático, este tipo de análisis posee algunos requerimientos como las propiedades del material. Como se mencionó anteriormente, se debe contar con la geometría del montaje, la cual será importada desde SolidWorks, después de tener el montaje se generan los sólidos en Ansys y de en el módulo de modelo para continuar con el proceso de simulación.

En este paso se generan condiciones y restricciones que debe tener el modelo en cuanto a posibles lugares de análisis, conexiones entre partes o contactos entre superficies, el mallado del montaje, fuerzas presentes y las soluciones deseadas como esfuerzos, deformaciones, etc. Por tanto, con la intención de observar el comportamiento más real y saber si los esfuerzos varían con el espesor del espécimen y con el contacto entre el espécimen y el ensayo, se procede a generar tres rutas de análisis (trayectoria) en tres lugares diferentes, cara frontal, la mitad del espesor y en la cara trasera, estas rutas se extienden a lo largo de los lugares que se desean

analizar y ubican puntos cada cierta distancia hasta completar la longitud designada para cada trayectoria.

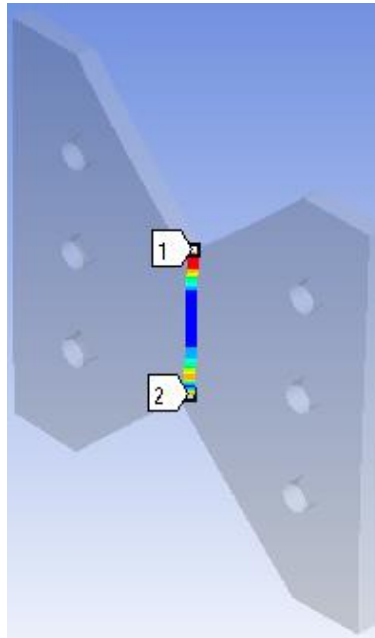


Figura 9. Trayectoria central de la probeta

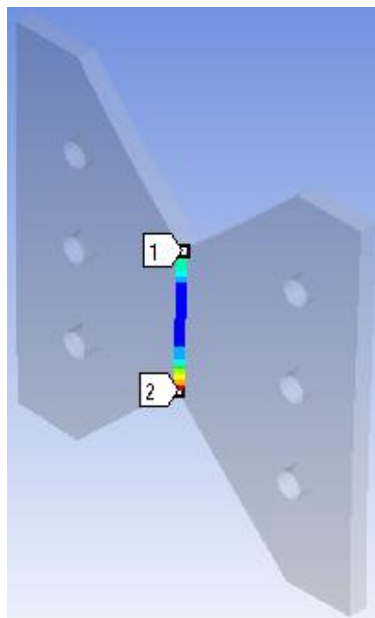


Figura 10. Trayectoria frontal de la probeta

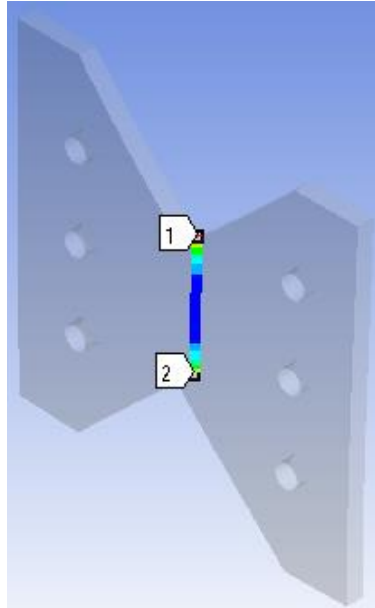


Figura 11. Trayectoria trasera de la probeta

Contando con los puntos de análisis, se especifican las conexiones y contactos entre superficies dependiendo de las condiciones que se necesiten, en el siguiente paso se construye la malla que llevará el modelo teniendo en cuenta que la pieza de mayor importancia es la mariposa o probeta situada en la parte media del ensayo, por lo tanto, a ese elemento se le aplica una sensibilización de la malla para obtener resultados más efectivos (Figura 12).

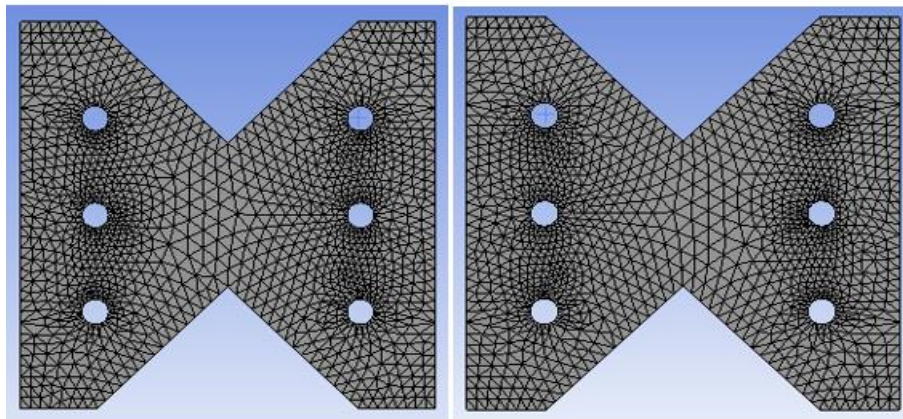


Figura 12. Mallado de la probeta de las caras frontal (izquierda) y trasera (derecha)

En la Figura 12 se observa el mallado de la probeta de las caras frontal (izquierda) y trasera (derecha), después de haber sensibilizado en la parte de contactos con los pasadores y los concentradores de esfuerzos.

Realizada la parte anterior, se procede a la restringir el movimiento y la adición de fuerzas según lo contemplado para cada montaje, todos los materiales y modelos poseen restricción de desplazamiento en el lugar de aplicación de la fuerza, solo se permite en el eje Y, se agrega la fuerza de gravedad y la fuerza que se aplicará, la cual será en dirección Y, el valor de dicha fuerza varía para cada material debido a que no todos soportan la misma carga porque sus propiedades mecánicas son más limitadas. En el caso del acero la fuerza es de 12000 N, para el PVC se usaron 2600 N y en el pino 600 N, estas magnitudes se asignaron después de probar en todos los montajes con diferentes cargas y se asegurara que el material no excediera más del 40% del valor de sus propiedades, por último, se implementó un soporte en la parte de abajo del ensayo (Figura 13).

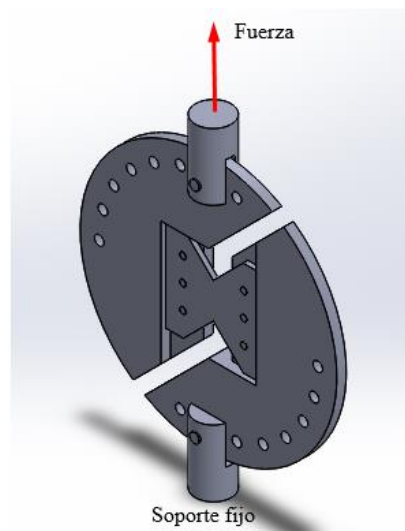


Figura 13. Soporte fijo

Finalmente se agregan los tipos de estudios que se quieren conocer para las tres trayectorias creadas, esto con el fin de analizar observar el comportamiento que tuvo la probeta después de haber aplicado la carga, para este caso se utilizó el estudio de esfuerzo equivalente, deformación total y el factor de seguridad, cabe resaltar que el énfasis estuvo centrado en la parte media de cada espécimen pero de igual manera se puede evidenciar el comportamiento completo de cada cuerpo luego de aplicada la fuerza.

### ***3.1.3. Análisis de resultados***

La parte trasera de la probeta es bastante relevante en los comportamientos debido al contacto directo con el ensayo Arcan, los pines que sujetan la mariposa causan mayor esfuerzo en los contactos, este comportamiento en la simulación puede ser el esperado debido a que son los concentradores y lugares de la probeta que son de vital importancia para el ensayo. Cabe resaltar que el análisis está dirigido a la parte central del espécimen (mariposa) donde se crearon las trayectorias, teniendo en cuenta la cara frontal, trasera y la parte media, debido a que pueden existir variaciones por el espesor de la probeta y por el contacto. El software permite realizar estudios en cualquier parte de la probeta gracias a que se puede hacer mallado en su totalidad.

Teniendo en cuenta una revisión general de cada material, en el pino se encuentra un mayor esfuerzo en la parte de contacto de los pines y los orificios de la mariposa en la mayoría de los montajes excepto a 90 y 0 grados (cortante puro y tensión pura respectivamente), la parte trasera es la afectada directamente sin importar la dirección de aplicación de la fuerza debido al contacto que existe entre el ensayo y la probeta, en el acero siempre son críticos los lugares de contacto entre la probeta y los pines, en el PVC solo los primeros dos primeros ángulos de aplicación de la carga (90 y 75 grados) se presenta un mayor esfuerzo en el punto de contacto, en

los demás montajes se encuentra en el concentrador de esfuerzos o muesca. En la Figura 14 se especifican los lugares o regiones de la mariposa relevantes y que pudieron llegar a ser afectadas por la incidencia de la fuerza.

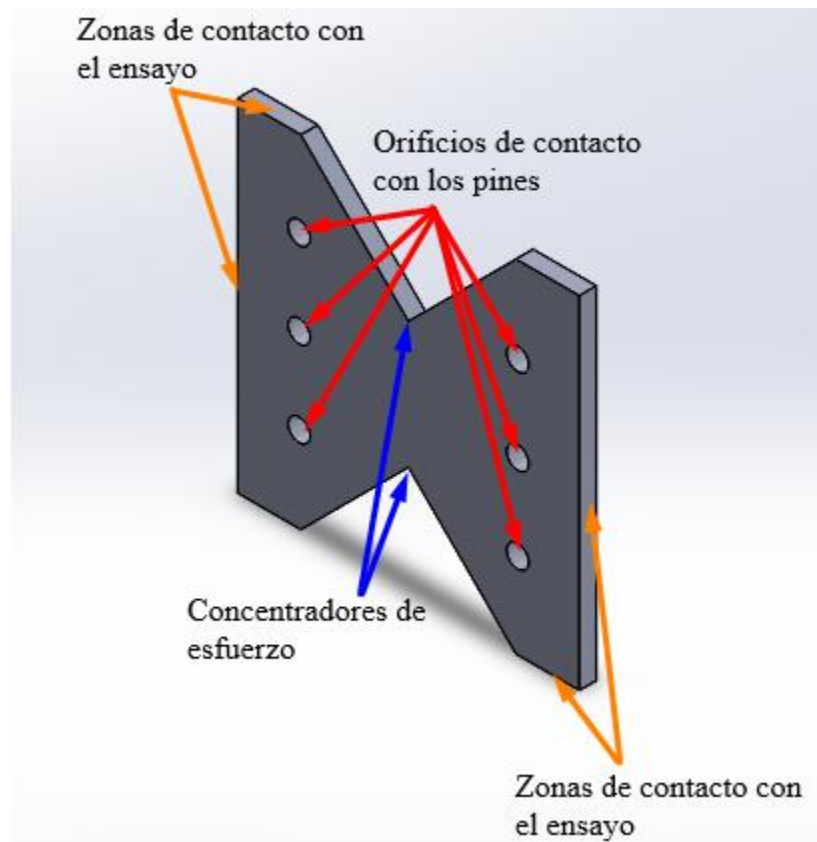


Figura 14. Partes de la probeta afectados por la incidencia de la fuerza

Tabla 4. Zona de máximo esfuerzo para cada material y ángulo de aplicación de la carga

Material	Montaje	Mayor esfuerzo
Pino	90 grados	Concentrador de esfuerzos
Pino	75 grados	Contacto pin inferior izquierdo
Pino	60 grados	Contacto pin inferior izquierdo
Pino	45 grados	Contacto pin inferior izquierdo

Tabla 4. (Continuación)

Material	Montaje	Mayor esfuerzo
Pino	30 grados	Contacto pin inferior izquierdo
Pino	15 grados	Contacto pin medio derecho
Pino	0 grados	Concentrador de esfuerzos
PVC	90 grados	Contacto pin inferior izquierdo
PVC	75 grados	Contacto pin superior izquierdo
PVC	60 grados	Concentrador de esfuerzos
PVC	45 grados	Concentrador de esfuerzos
PVC	30 grados	Concentrador de esfuerzos
PVC	15 grados	Concentrador de esfuerzos
PVC	0 grados	Concentrador de esfuerzos
Acero	90 grados	Contacto pin superior izquierdo
Acero	75 grados	Contacto pin inferior derecho
Acero	60 grados	Contacto pin inferior derecho
Acero	45 grados	Contacto pin inferior derecho
Acero	30 grados	Contacto pin inferior derecho
Acero	15 grados	Contacto pin medio derecho
Acero	0 grados	Contacto pin medio derecho

Fuente: elaboración propia

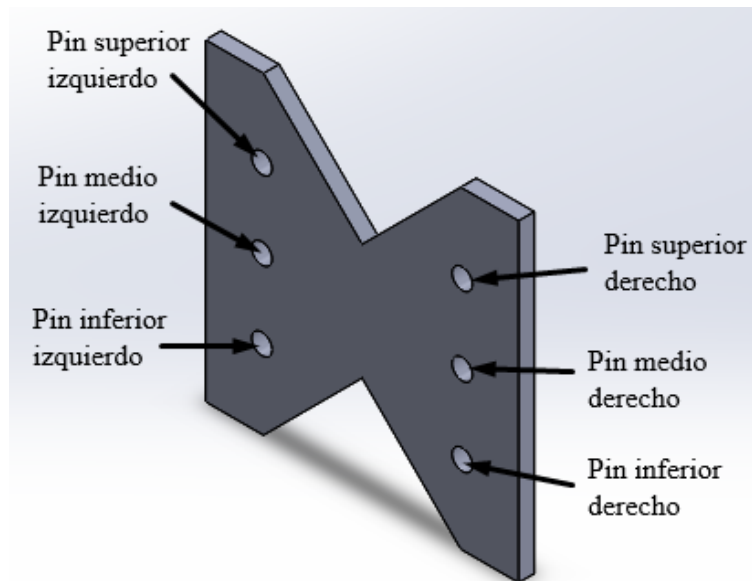


Figura 15. Orificios de contacto de los pines con la probeta

Cabe resaltar que se está trabajando con dos materiales isotrópicos (Acero AISI SAE 4140 y PVC) y un material ortotrópico (pino), es notorio en el comportamiento de los isotrópicos porque los esfuerzos presentes se encuentran en el campo elástico mientras que la madera por no ser un material elástico y tener propiedades mecánicas diferentes para cada eje y plano, comparando los ángulos de aplicación de la fuerza posee un comportamiento con cambios bruscos en el esfuerzo.

El estudio estuvo encaminado en el comportamiento de los tres materiales nombrados anteriormente y la comparación con la teoría de Von Mises la cual es un concepto que hace referencia a la energía de distorsión que un material puede acumular antes de cambiar su forma, pero no su tamaño, los datos que conforman la teoría son dos tipos de esfuerzos (cortante y tensión). El software de elementos finitos Ansys emplea la ecuación de Von Mises para el proceso de simulación.

Basados en la Figura 16, Figura 17 y la Figura 18, los valores de la teoría de falla están distantes de los resultados en la simulación con el software Ansys, teniendo en cuenta los puntos medios tomados de cada uno de los materiales, montajes y trayectoria realizadas, muy pocos datos coinciden con los valores obtenidos en la teoría de falla, esto ocurre debido a que la ecuación de Von Mises no tiene en cuenta ninguna zona de la probeta, como un concentrador de esfuerzos o un cambio en la geometría, solo emplea los esfuerzos producidos por la fuerza en cada uno de los ángulos de aplicación. Partiendo de las trayectorias realizadas (frontal, central, trasera) los mayores esfuerzos no se presentan en la misma ruta de análisis de resultados (trayectoria) varía a medida que disminuye el ángulo de aplicación de la fuerza en cada uno de los materiales.

Tabla 5. Porcentaje de error entre el valor de Von Mises y el punto medio máximo de las trayectorias de Acero en Ansys

Angulo	Ensayo Acero [Pa]	Von Mises (Teórico) [Pa]	Porcentaje
90 (Cortante)	1,13E+08	1,12E+08	0,23
75	1,04E+08	1,10E+08	5,12
60	9,47E+07	1,03E+08	7,66
45	8,35E+07	9,17E+07	8,95
30	6,74E+07	7,94E+07	15,10
15	5,15E+07	6,91E+07	25,44
0 (Tensión)	4,39E+07	6,49E+07	32,39

Fuente: elaboración propia

Para este material el porcentaje de error aumenta a medida que el ángulo de aplicación de la carga disminuye, en los primeros ángulos el error es mínimo, pero cuando el esfuerzo por tensión se hace más representativo esa diferencia entre los esfuerzos incrementa.

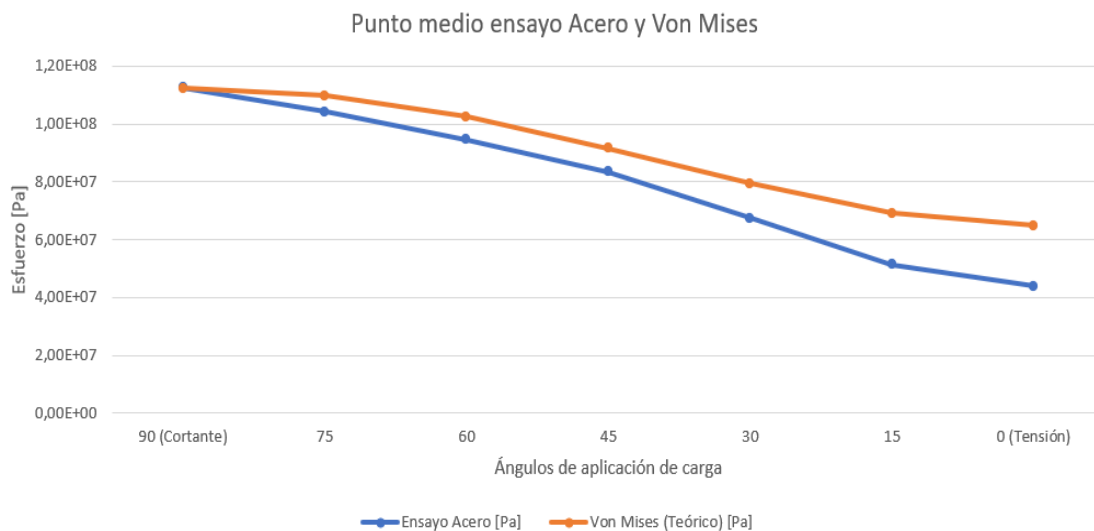


Figura 16. Punto medio crítico para cada ángulo de aplicación de la carga en el Acero AISI SAE 4140 y la teoría de falla Von Mises

En el acero el porcentaje de error es casi nulo en el primer montaje (cortante puro), en los siguientes montajes el error empieza a incrementar un poco y en los últimos tres (30, 15 y 0 grados) el error aumenta notoriamente llegando aproximadamente a un 32,39% para el modo de tensión pura.

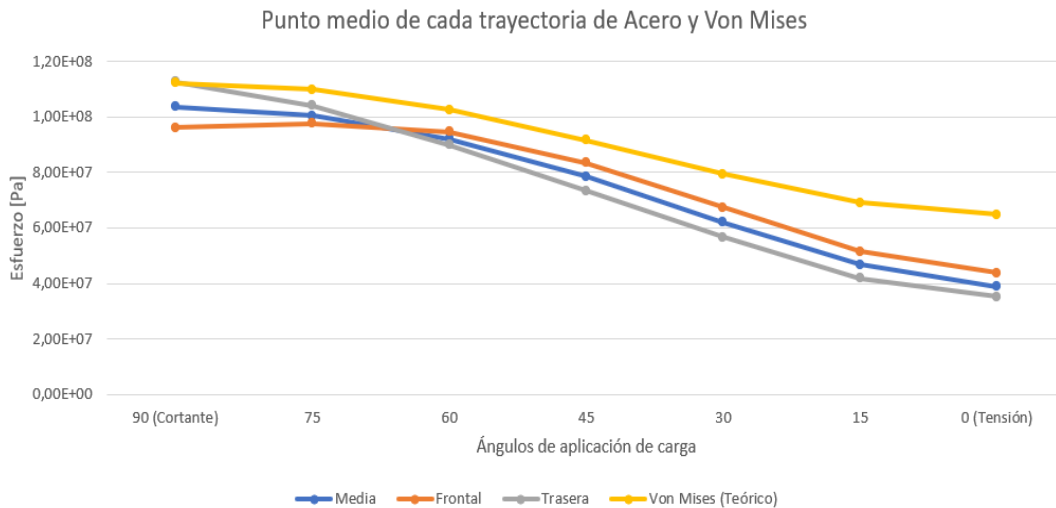


Figura 17. Punto medio de cada trayectoria y ángulo de aplicación de la carga en el Acero AISI SAE 4140 y la teoría de falla Von Mises

Los resultados de las tres trayectorias para cada ángulo de aplicación de la carga es variante y más crítico en el trasero cuando se encuentra a 90 grados, a medida que el ángulo de aplicación de la carga disminuye y el esfuerzo por tensión se hace más relevante la trayectoria con el mayor esfuerzo es el frontal (60 grados) debido a que es un extremo sin restricción alguna en los ejes X y Z, en la simulación pueden ocurrir torceduras que generan un esfuerzo que lo hace más crítico que los otros dos (medio y trasero). Se observa que, al aplicar la fuerza a un ángulo entre 75 y 60 grados, el valor medio de esfuerzo de las 3 trayectorias se hace semejante.

Partiendo de los análisis del Acero AISI SAE 4140 se puede asegurar que es un material crítico a esfuerzos cortantes y más resistente a esfuerzos de tensión, debido a que la Figura 17 muestra que a medida que el ángulo de aplicación de la fuerza se aproxima a cero el esfuerzo tiene una caída significativa en comparación con el montaje a 90 grados.

Tabla 6. Porcentaje de error entre el valor de Von Mises y el punto medio máximo de las trayectorias de PVC en Ansys

Angulo	Ensayo PVC [Pa]	Von Mises (Teórico) [Pa]	Porcentaje
90 (Cortante)	2,26E+07	2,43E+07	7,20
75	2,20E+07	2,38E+07	7,61
60	2,03E+07	2,22E+07	8,79
45	1,73E+07	1,99E+07	12,91
30	1,39E+07	1,72E+07	19,40
15	1,06E+07	1,50E+07	29,15
0 (Tensión)	9,17E+06	1,41E+07	34,79

Fuente: elaboración propia

Se tiene un error mínimo en los primeros modos (montajes) pero va en aumento con el cambio de la dirección de aplicación de la fuerza, de los materiales analizados este es el que presenta el ángulo de mayor diferencia con la teoría de falla de Von Mises.

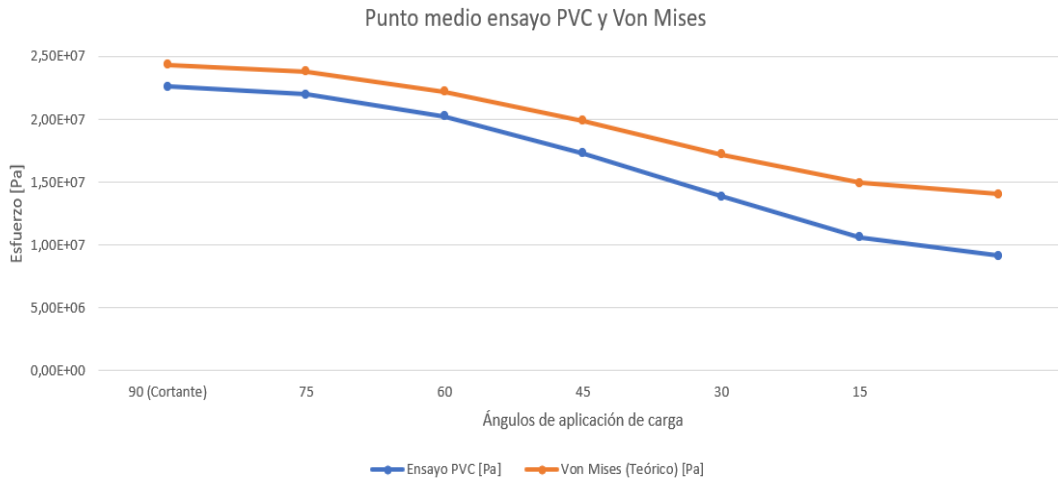


Figura 18. Punto medio crítico para cada ángulo de aplicación de la carga en el PVC y la teoría de falla Von Mises

En comparación los resultados encontrados entre la teoría de falla y la simulación en Ansys son bastante distantes siendo mayores todos los calculados con Von Mises, los valores del esfuerzo disminuyen a medida que el ángulo de aplicación también disminuye, esto determina que es un material crítico a esfuerzos cortantes y es más resistente a esfuerzo de tensión, el error es del 34.79 aproximadamente en el montaje a cero grados, es el valor más grande que se encontró en todos las mariposas analizadas.

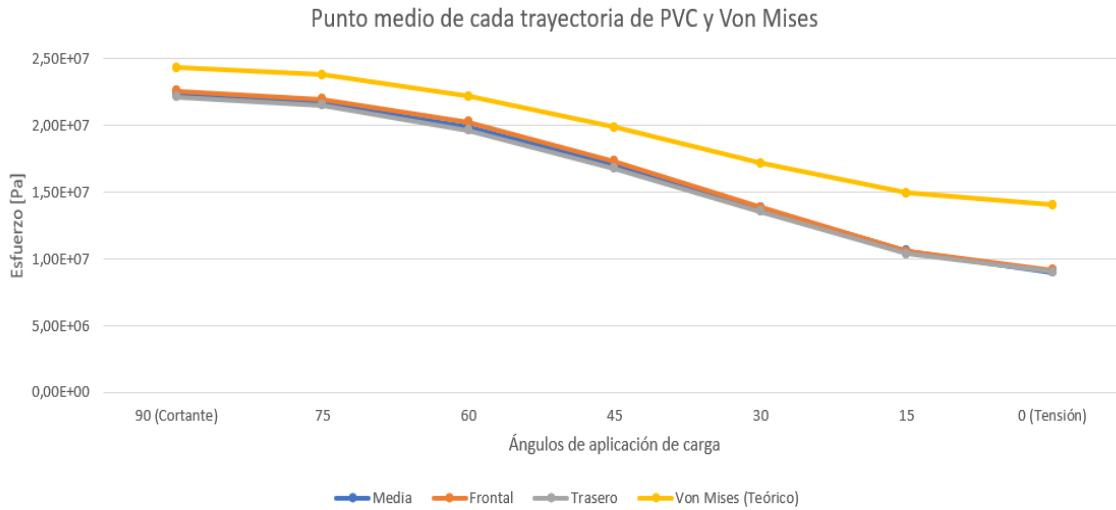


Figura 19. Punto medio de cada trayectoria y ángulo de aplicación de la carga en el PVC y la teoría de falla Von Mises

Teniendo en cuenta los puntos medios de cada montaje (ángulos de aplicación de la carga), el PVC fue el material que tuvo el comportamiento con menos variación entre las tres trayectorias realizadas, el espesor de la probeta incide muy poco en el valor del esfuerzo que se produce por la dirección y fuerza aplicada, los resultados de la teoría de falla siguen estando distantes de los valores de la simulación. A diferencia del pino este material no posee saltos o cambios bruscos en el esfuerzo. Con excepción del montaje a 15 grados, donde el mayor esfuerzo lo presentó la trayectoria media, la trayectoria frontal siempre fue el más crítico mostrando los resultados más grandes, pero no muy distantes de los obtenidos con las otras trayectorias.

Tabla 7. Porcentaje de error entre el valor de Von Mises y el punto medio máximo de las trayectorias de pino en Ansys

Angulo	Ensayo Pino [Pa]	Von Mises (Teórico) [Pa]	Porcentaje
90	4,23E+06	5,62E+06	24,65
75	4,37E+06	5,49E+06	20,50
60	5,24E+06	5,13E+06	2,19
45	5,98E+06	4,59E+06	30,31
30	4,73E+06	3,97E+06	19,15
15	2,64E+06	3,45E+06	23,46
0	2,75E+06	3,24E+06	15,14

Fuente: elaboración propia

Comparación del valor obtenido con la teoría de falla de Von Mises y el punto medio máximo de las tres trayectorias de la mariposa de pino en la simulación, el error no baja o aumenta a medida que se disminuye el ángulo, presenta elevado error en casi todos los montajes excepto a 60 grados con un valor de 2,19%, la diferencia puede producirse debido a las propiedades del material ortotrópico.

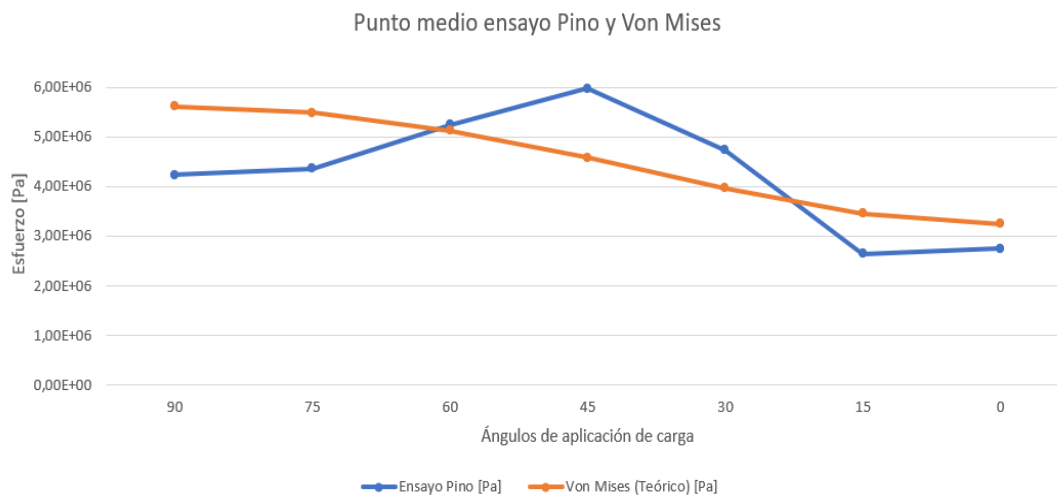


Figura 20. Punto medio crítico para cada ángulo de aplicación de la carga en el Pino y la teoría de falla Von Mises

Comparando el valor obtenido en la teoría de falla de Von Mises y el punto medio máximo de las tres trayectorias utilizadas, se observa una gran diferencia en algunos valores y en otros algo cercanos los resultados, por ejemplo a 60 grados se aprecia un porcentaje de error de 2.19 error calculado tomando como valor teórico la ecuación de Von Mises, las diferencias evidenciadas en el caso del pino se le pueden atribuir al hecho de simularse como un material ortotrópico el cual toma propiedades mecánicas diferentes en cada uno de los ejes y planos, por ejemplo el módulo de elasticidad con un valor diferente para el eje X, eje Y y el eje Z, además de lo mencionado anteriormente la teoría de falla es más conservadora porque no considera los concentradores de esfuerzos y solo estima los esfuerzos de tensión y cortante presentes en la probeta.

En la madera no existe un patrón de aumento o disminución del error, debido a que el esfuerzo en este material también depende de la aplicación de la carga y de la ubicación de las fibras para los ejes, por ser un material ortotrópico, su comportamiento es diferente en cada una de las direcciones y planos coordenados. En el montaje a 45 grados se tiene un cambio brusco en la gráfica y allí también se obtiene el error más alto de todas las simulaciones realizadas para el pino.

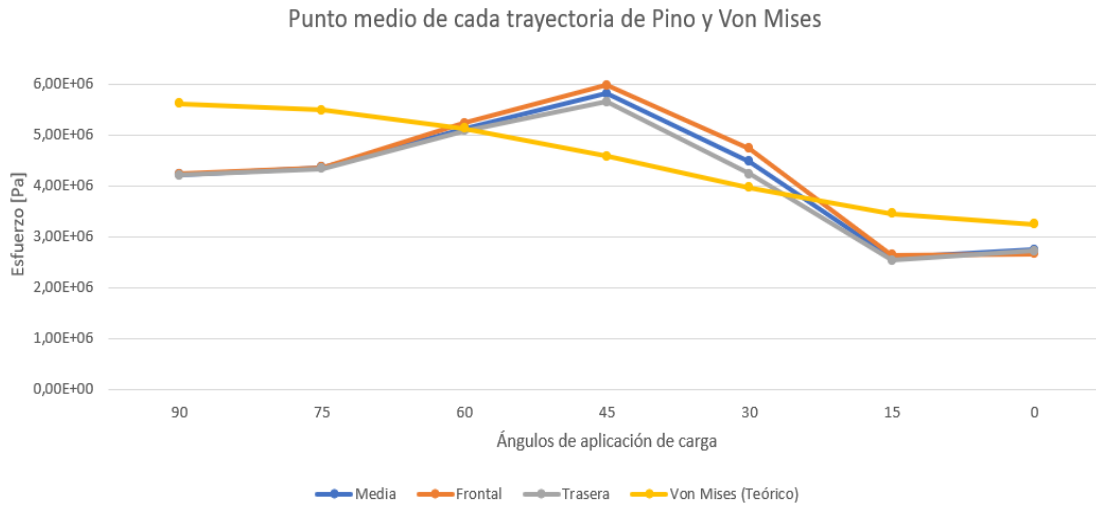


Figura 21. Punto medio de cada trayectoria y ángulo de aplicación de la carga en el Pino y la teoría de falla Von Mises

Entre las tres trayectorias existen diferencias en los valores medios atribuido principalmente a las propiedades de este material, algunos valores de uno de las trayectorias pueden estar por encima de los otros dos debido a la superficie de contacto de la mariposa en la parte trasera o por la incidencia del esfuerzo normal a medida que el ángulo disminuye, la variación respecto a los datos calculados mediante la ecuación de Von Mises existe todo el tiempo debido a que la teoría de falla no tiene en cuenta ningún otro factor que no sean los dos esfuerzos presentes (cortante y tensión). Analizando las tres trayectorias, se encuentra que la trayectoria frontal es el que presenta el mayor esfuerzo, la única excepción es a cero grados o tensión pura donde la trayectoria central tiene el valor más grande, hay variación en cuanto al esfuerzo en las tres trayectorias, pero no es relevante en todos los ángulos de aplicación de la carga, solo en los montajes a 30 y 45 grados, es apreciable la diferencia del esfuerzo (Figura 21).

El pino a 15 grados fue el montaje con el menor esfuerzo producido al aplicar la fuerza en cuanto a los puntos medios de cada trayectoria, sin embargo, en el modelo a 0 grados (tensión

pura) se presentaron los esfuerzos más bajos en los concertadores de esfuerzo por debajo de seis megapascales.

Teniendo en cuenta los tres comportamientos fueron realizados, se hace un análisis más profundo y significativo al Acero AISI SAE 4140 debido a que es un material bastante empleado en elementos mecánicos por sus buenas características como alta resistencia y buena tenacidad, los resultados obtenidos son diferentes en las tres trayectorias (frontal, medio y trasera) y el que posee el esfuerzo crítico cambia a medida que disminuye el ángulo de aplicación de la carga.

Se encontrarán figuras del modelo analizado y las vistas frontal y trasera con sus comportamientos, las cuales constan de diferentes colores dependiendo del esfuerzo, este se encuentra representado en una escala de colores donde rojo es la zona más crítica y azul oscuro la región menos afectada por la fuerza aplicada, cabe resaltar que se encontraran números del 1 al 49 en todas las gráficas de los montajes realizados, representan los diferentes puntos que la ruta de análisis (trayectoria) asocia a cada distancia tomada, se toma un punto de análisis cada 0.77083 milímetros.

### **3.2. Análisis del comportamiento de los materiales ante la variación de la dirección de la aplicación de la carga**

El ensayo dispone de siete modos que se surgen según el ángulo de aplicación de la carga, inicialmente se trabaja con una fuerza a 90 grados medido desde la horizontal, los siguientes modos o montajes se obtienen disminuyendo el ángulo de la carga cada 15 grados hasta llegar a 0 grados, para todas las simulaciones se realiza el mismo proceso para no tener variaciones significativas debidas a un cambio o adición de herramientas del software.

✓ Acero AISI SAE 4140 a 90 grados

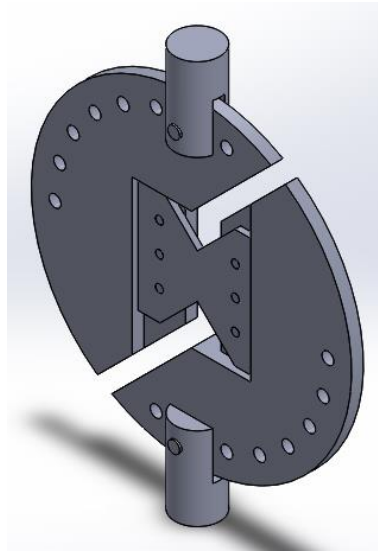


Figura 22. Montaje a 90 grados de Acero AISI SAE 4140 con 5 milímetros de espesor

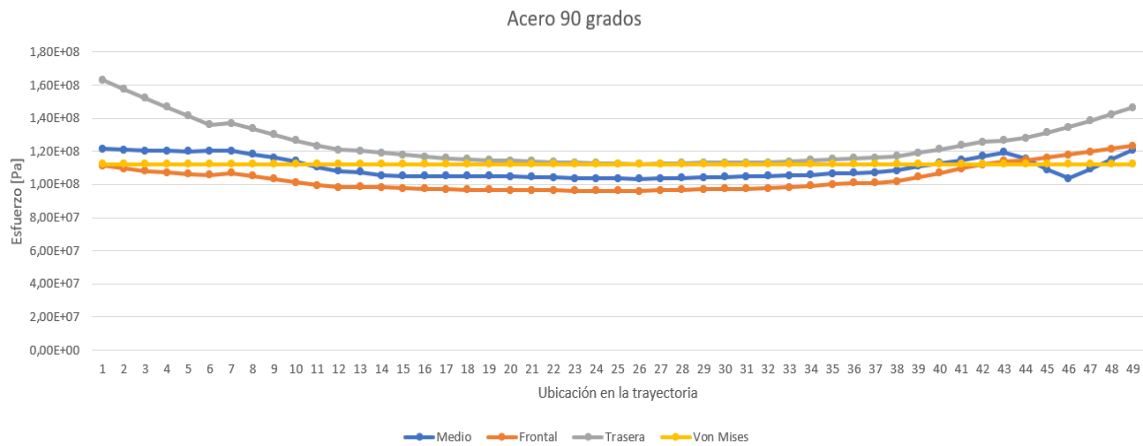


Figura 23. Esfuerzo en las tres trayectorias de acero AISI SAE 4140 a 90 grados

En el modo de cortante puro (90 grados) se identifica que es el esfuerzo con mayor incidencia en un material, en este caso al aplicar la fuerza paralela a la sección central de la probeta, la parte trasera es afectada primero debido a que se encuentra en contacto con la

superficie del ensayo Arcan, los esfuerzos de tensión son nulos y es crítico siempre la trayectoria trasera. En todos los montajes los primeros y los últimos (punto 1 al 7 y del punto 42 al 49 respectivamente) el esfuerzo tiene un mayor valor debido a que son puntos que se encuentran cercanos a los concentradores de esfuerzos del espécimen (mariposa), los cálculos de la teoría de falla se encuentran por debajo de algunos de los valores obtenidos en la simulación.

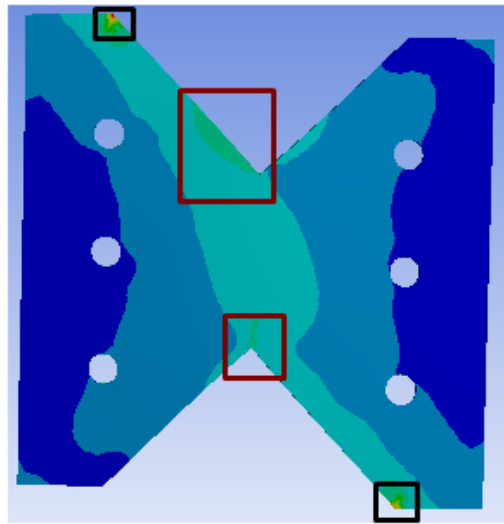


Figura 24. Vista frontal mariposa de Acero AISI SAE 4140 a 90 grados

La mariposa presenta mayores esfuerzos en la parte superior e inferior en los lugares de color rojo, amarillo y verde encerrados en los en los recuadros de color negro, el recuadro de color vino tinto muestra otros lugares que podrían ser críticos, los cuales se encuentran cerca de los concentradores de esfuerzos de la probeta. También existen lugares donde el esfuerzo es mínimo o donde la probeta no es afectada notablemente, están representadas por las zonas que se encuentran en color azul oscuro.

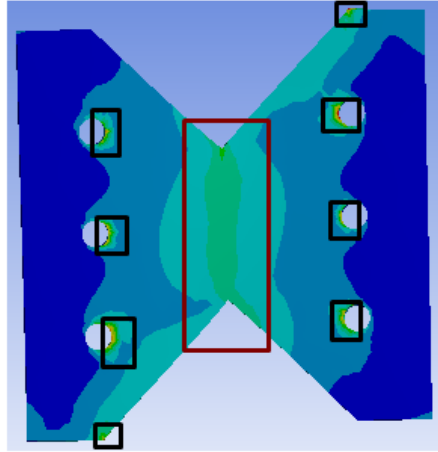


Figura 25. Vista trasera mariposa de Acero AISI SAE 4140 a 90 grados

La parte trasera de la mariposa presenta mayor esfuerzo en la parte de contacto con los pines, en los lugares encerrados con color negro y la parte encerrada en vino tinto también se ve afectada pero no es la más crítica, se evidencia la mayor incidencia de la fuerza en la parte de atrás, existe mayor cantidad de zona menos afectada (zona azul) pero es la vista donde ocurren los mayores esfuerzos presentes en la probeta.

✓ **Acero AISI SAE 4140 a 75 grados**

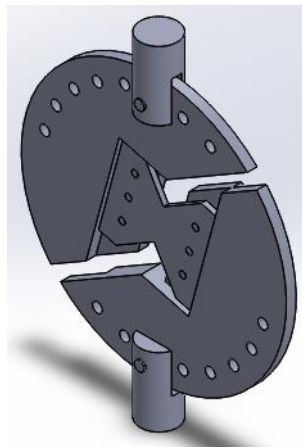


Figura 26. Montaje a 75 grados de Acero AISI SAE 41440 con 5 milímetros de espesor

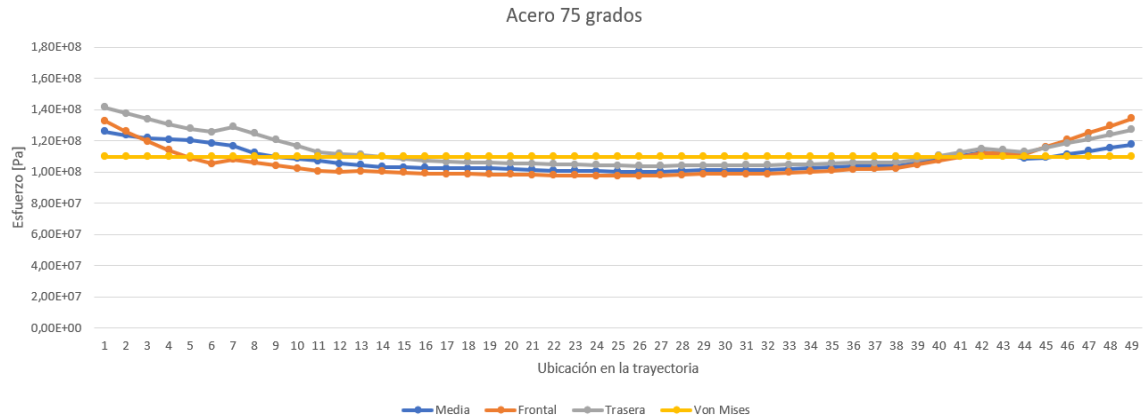


Figura 27. Esfuerzo en las tres trayectorias de acero AISI SAE 4140 a 75 grados

El comportamiento del material cercano a los concentradores de esfuerzo tiene un valor de esfuerzo alto en comparación con la parte media de la probeta, al igual que todos los demás montajes y materiales, generalmente donde existe un cambio de sección o geometría exista uno o varios puntos críticos, teniendo en cuenta que se están tomando los puntos medios de cada trayectoria, en el montaje anterior (90 grados) el valor de Von Mises fue cercano a uno de las trayectorias, para este caso ya está por encima de los tres análisis realizados (trayectoria frontal, medio y trasera), como se dijo anteriormente algunos valores son mayores debido a que se encuentran en los extremos y en ese punto los esfuerzos tienden a ser máximos para cada ruta de análisis.

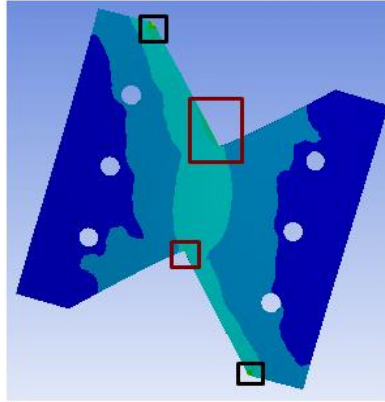


Figura 28. Vista frontal mariposa de Acero AISI SAE 4140 a 75 grados

La cara frontal muestra mayor esfuerzo en las zonas de color negro y las zonas en vino tinto muestran un lugar con esfuerzos altos, pero no los más críticos, las zonas de color rojo para esta vista son aquellas que entran en contacto con el ensayo Arcan cuando se aplica la carga, las otras zonas (azul claro, verde claro y azul oscuro) son las afectadas por la fuerza y los esfuerzos producidos, se tienen lugares poco afectados o de mínimo esfuerzo (zona azul oscuro).

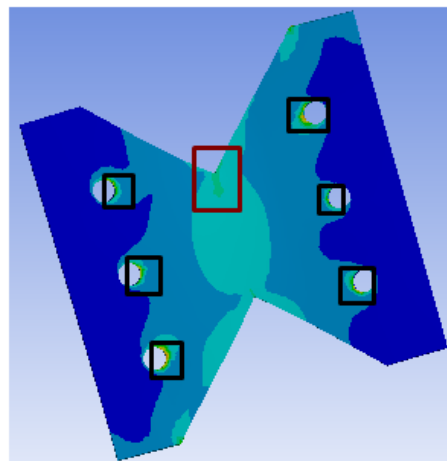


Figura 29. Vista trasera mariposa de Acero AISI SAE 4140 a 75 grados

Todos los puntos de contacto de la probeta sufren un esfuerzo mayor en comparación con el resto de la mariposa, la parte media en los concentradores también se ve afectada pero no es la más crítica, existe una mayor zona afectada en la parte central de la probeta (zona azul claro) y se afecta la parte derecha e izquierda de la probeta. Esta vista posee los mayores esfuerzos en los puntos encerrados en los recuadros de color negro y tiene una zona con valor elevado en el recuadro vino tinto, pero no es la más crítica.

✓ **Acero AISI SAE 4140 a 60 grados**

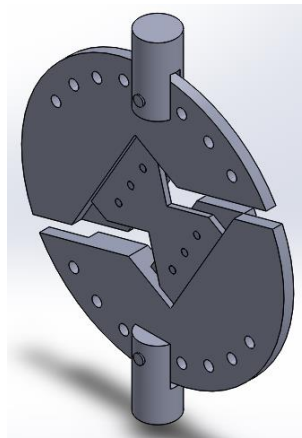


Figura 30. Montaje a 60 grados de Acero AISI SAE 41440 con 5 milímetros de espesor

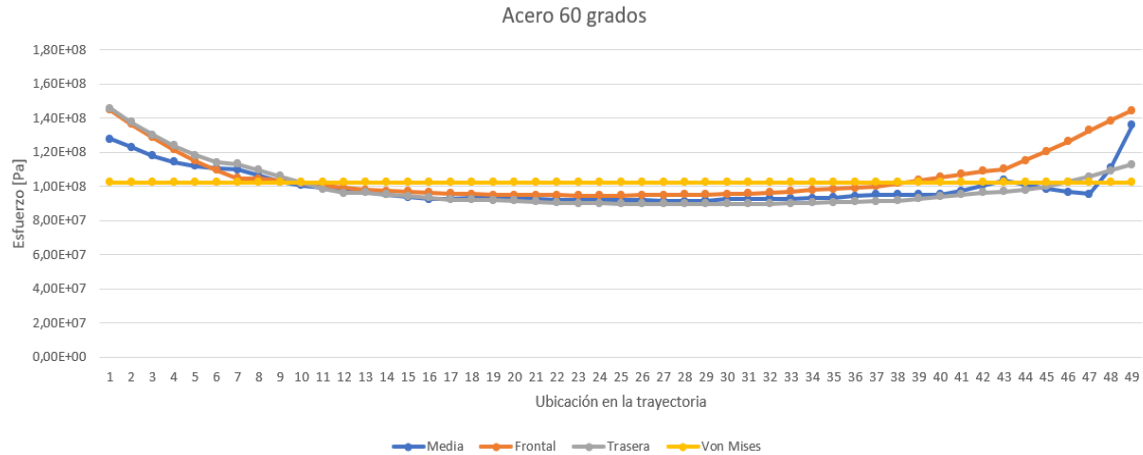


Figura 31. Esfuerzo en las tres trayectorias de acero AISI SAE 4140 a 60 grados

El comportamiento del acero a 60 grados muestra los mayores esfuerzos cerca de los concentradores, los valores entre los puntos 10 y 34 de las tres trayectorias son cercanas, en la zona media (10 a 37) los resultados de la teoría de falla son mayores, entre los puntos 1 y 10 se encuentra por debajo de la mayoría de los esfuerzos de las tres trayectorias y en los extremos la diferencia entre las rutas de análisis y la teoría de falla es más grande debido a que la se acerca a los concentradores de esfuerzo del espécimen.

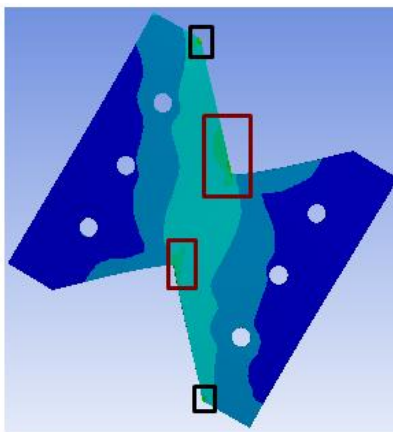


Figura 32. Vista frontal mariposa de Acero AISI SAE 4140 a 60 grados

Los lugares de mayor esfuerzo en la probeta están en los recuadros de color negro los cuales son los puntos de contacto con el ensayo al aplicarse la carga, las zonas encerradas en color vino tinto muestran posibles puntos críticos o de mayor esfuerzo en comparación con las otras partes de la mariposa.

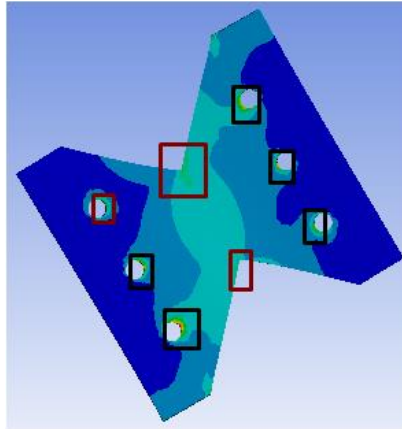


Figura 33. Vista trasera frontal mariposa de Acero AISI SAE 4140 a 60 grados

En esta vista se tienen los mayores esfuerzos de la simulación a 60 grados en la parte de contacto de la probeta con los pines de sujeción del ensayo, estos puntos son los encerrados en color negro y la parte seleccionada en color vino tinto son algunas zonas que se ven bastante afectadas, pero no son las más críticas.

✓ **Acero AISI SAE 4140 a 45 grados**

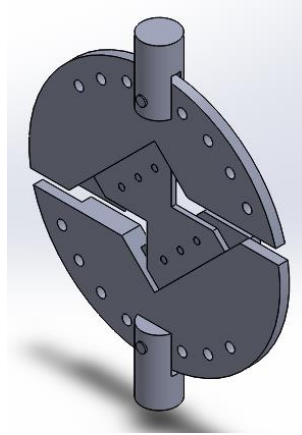


Figura 34. Montaje a 45 grados de Acero AISI SAE 41440 con 5 milímetros de espesor

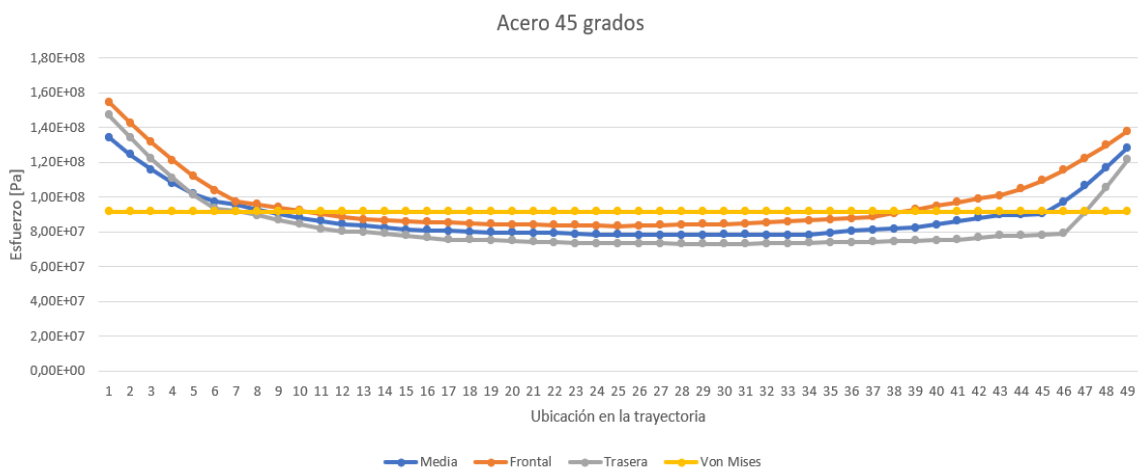


Figura 35. Esfuerzo en las tres trayectorias de acero AISI SAE 4140 a 45 grados

Entre los puntos 1 y 6 los esfuerzos de las tres trayectorias están por encima de los resultados de la teoría de falla, se encuentran cerca del concentrador de esfuerzos de la parte superior del espécimen al igual que los que están del 43 en adelante en la parte inferior de la mariposa, en estas zonas los esfuerzos tienden a ser mayores. La región media que está entre los puntos 10 y 37, se encuentra por debajo de los resultados de la ecuación de Von Mises, pero no muy distantes como en algunos de los extremos de la gráfica.

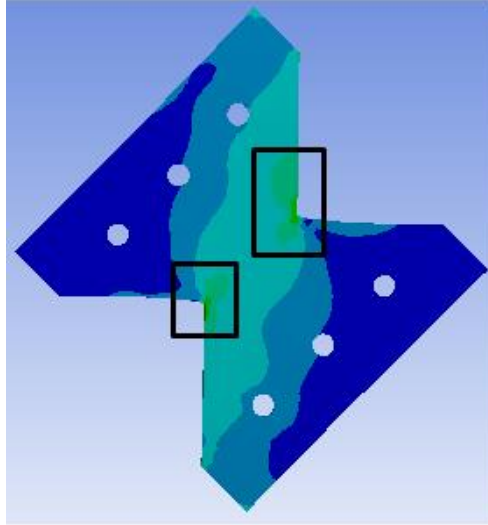


Figura 36. Vista frontal mariposa de Acero AISI SAE 4140 a 45 grados

En el montaje a 45 grados se observa que la probeta en su vista frontal tiene los mayores esfuerzos en la parte de los concentradores de esfuerzo (recuadros en color negro), la región más afectada es la central del espécimen y sus alrededores. Los puntos de contacto con el ensayo esta vez no son los más críticos, pero si poseen esfuerzos notables en comparación con las otras partes de la probeta (zona en azul oscuro).

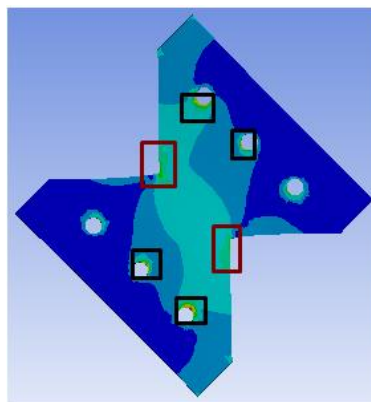


Figura 37. Vista trasera mariposa de Acero AISI SAE 4140 a 45 grados

La vista trasera de la mariposa nuevamente presenta esfuerzos altos en la parte de los concentradores de esfuerzo, pero los contactos con los pines del ensayo (selección en color negro) siguen siendo los lugares más críticos de la probeta, también se puede observar que no hay un comportamiento simétrico ya que la proporción de colores que presenta el espécimen no son los mismos para la parte de arriba y la parte de abajo, los mayores esfuerzos se encuentran en la parte de abajo en la zona en color rojo.

✓ **Acero AISI SAE 4140 a 30 grados**

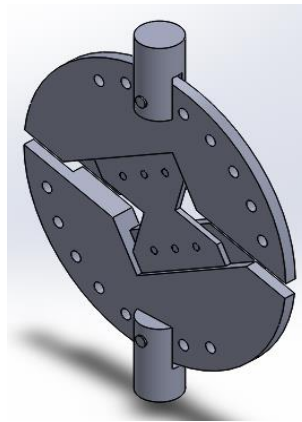


Figura 38. Montaje a 30 grados de Acero AISI SAE 4140 con 5 milímetros de espesor

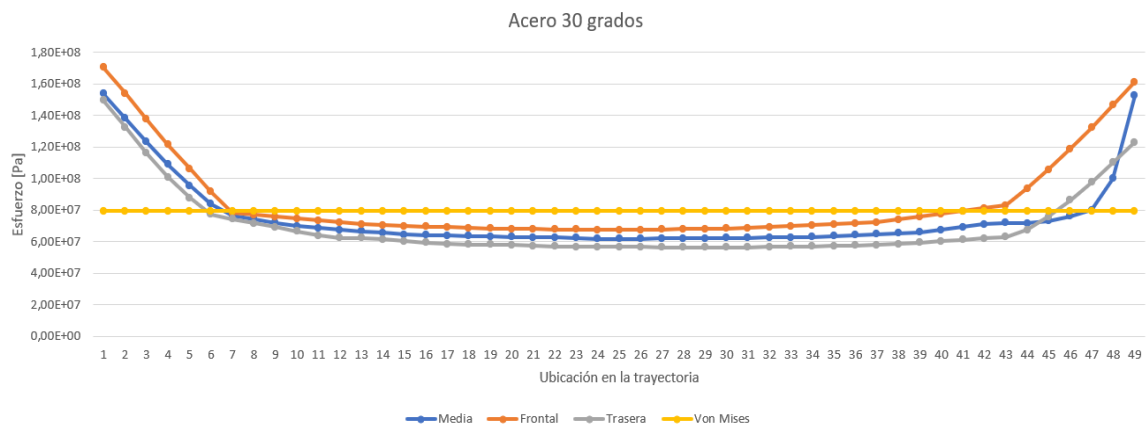


Figura 39. Esfuerzo en las tres trayectorias de acero AISI SAE 4140 a 30 grados

Tiene un comportamiento similar a los demás montajes en cuanto al lugar donde se encuentran los mayores esfuerzos de las tres trayectorias realizadas, en los extremos de las gráficas están los puntos más cercanos a los concentradores de esfuerzo de la probeta, la trayectoria frontal posee los valores más altos de esfuerzo y para los primeros puntos (1 a 5) el comportamiento del material en las tres trayectorias es similar a una línea recta. Aplicando la fuerza de 12000 N a este ángulo se encontró el mayor esfuerzo de todos los montajes y la teoría de Von Mises es cercana a los esfuerzos de la simulación, pero en diferentes puntos de cada trayectoria.

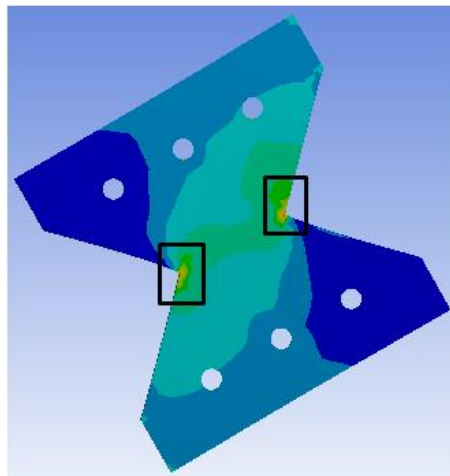


Figura 40. Vista frontal mariposa de Acero AISI SAE 4140 a 30 grados

Los concentradores de esfuerzo son los más afectados en esta cara de la probeta, se presentan los mayores esfuerzos en la zona que está encerrada en los recuadros de color negro, se tienen franjas en color verde claro, amarillo y rojo, colores que indican el esfuerzo del menor al mayor valor, se muestra una pequeña parte poco afectada (color azul oscuro) y se empiezan a generar regiones más grandes de altos esfuerzos (azul claro).

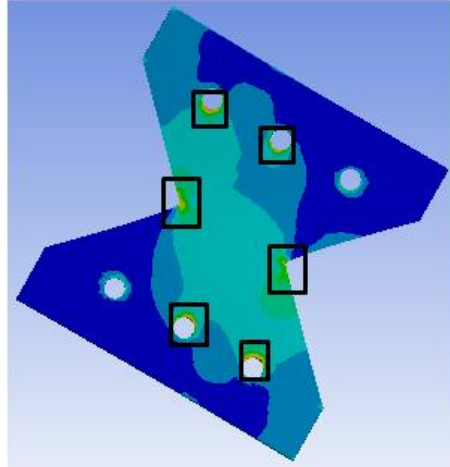


Figura 41. Vista trasera mariposa de Acero AISI SAE 4140 a 30 grados

La cara trasera de la mariposa muestra los puntos más críticos en los lugares de contacto de los pines con los orificios de la probeta, también existen dos zonas con un esfuerzo notable en los concentradores de la parte media de la probeta.

✓ **Acero AISI SAE 4140 a 15 grados**

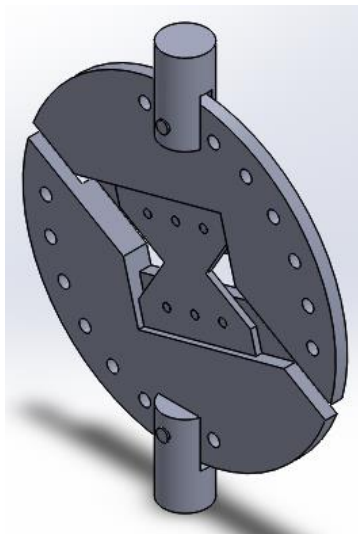


Figura 42. Montaje a 15 grados de Acero AISI SAE 41440 con 5 milímetros de espesor

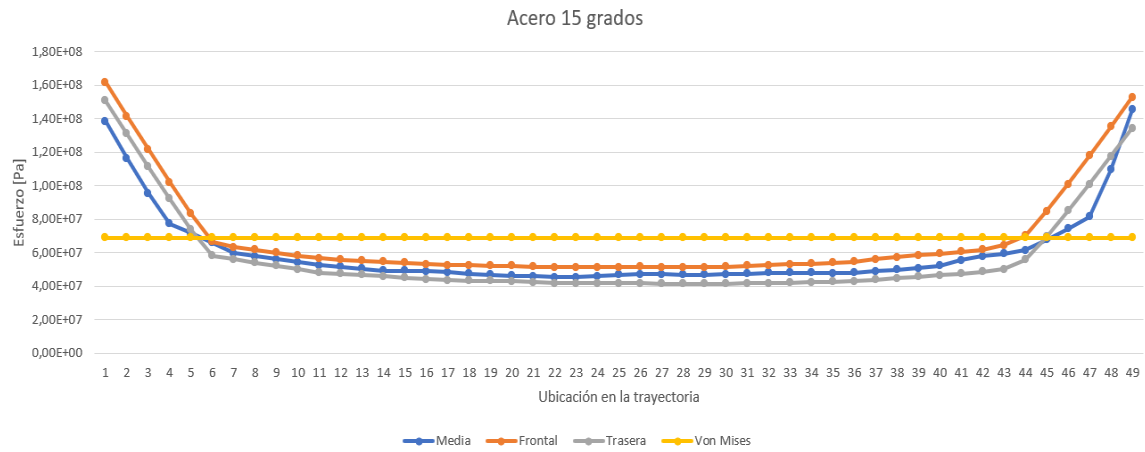


Figura 43. Esfuerzo en las tres trayectorias de acero AISI SAE 4140 a 15 grados

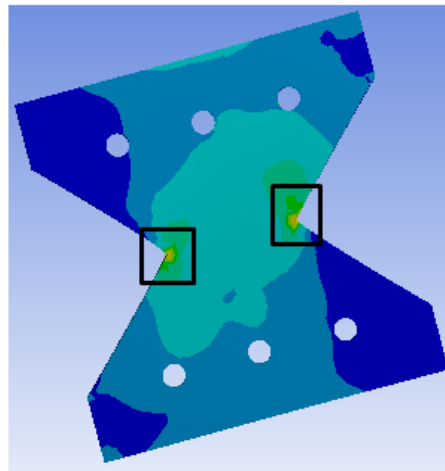


Figura 44. Vista frontal mariposa de Acero AISI SAE 4140 a 15 grados

La zona crítica de la probeta de Acero a 15 grados se encuentra en la muesca de superior e inferior del espécimen, gran parte de la mariposa sufre esfuerzo notorio y hay una zona poco afectada pequeña en los extremos del espécimen.

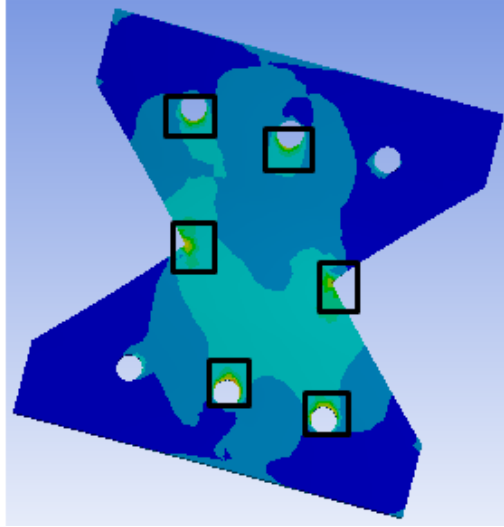


Figura 45. Vista trasera mariposa de Acero AISI SAE 4140 a 15 grados

La cara trasera de la mariposa es afectada en los puntos de contacto con los pines y en los concentradores de esfuerzo ubicados en la mitad de la probeta, a diferencia de la vista frontal, la parte trasera tiene una mayor zona poco afectada (color azul oscuro).

✓ **Acero AISI SAE 4140 a 0 grados**

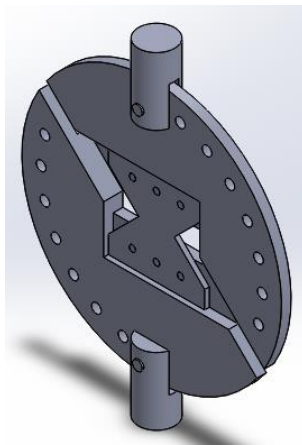


Figura 46. Montaje a 0 grados de Acero AISI SAE 41440 con 5 milímetros de espesor

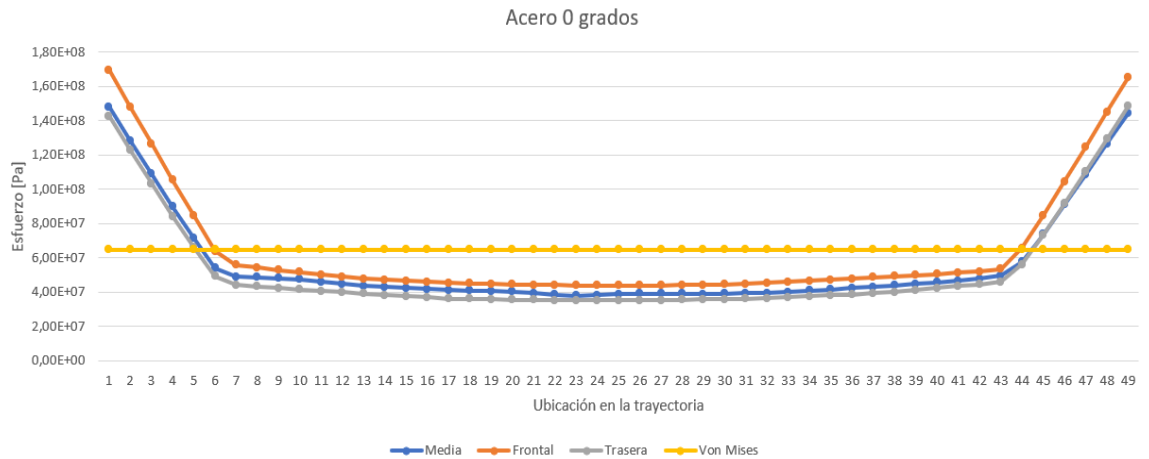


Figura 47. Esfuerzo en las tres trayectorias de acero AISI SAE 4140 a 0 grados

En el modo de tensión pura la trayectoria frontal es la más crítica, presenta los mayores esfuerzos de todas las rutas de análisis realizadas (trayectoria), entre los puntos 1 y 5 y del punto 44 en adelante, el comportamiento del acero es similar a una línea recta. Los resultados de la teoría de falla están alejados de los valores de la zona media de la probeta. A pesar de en la simulación se obtienen de los datos de esfuerzo bastante grandes, cabe resaltar que este montaje presenta el esfuerzo más bajo, de esta manera se puede asegurar que el material es más crítico a esfuerzos cortantes que a esfuerzos de tensión.

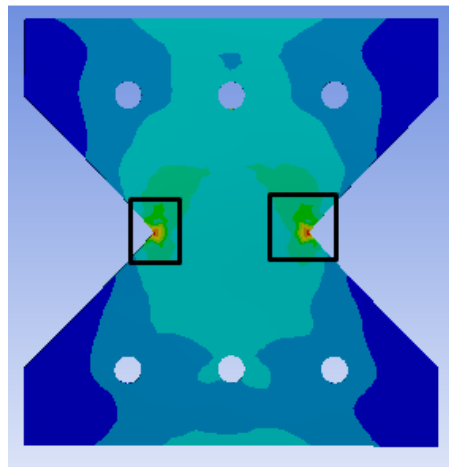


Figura 48. Vista frontal mariposa de Acero AISI SAE 4140 a 0 grados

En la cara frontal de la probeta el modo de tensión pura, los concentradores de esfuerzos son los más críticos, se tienen esfuerzos notables en la parte media y sus alrededores (azul claro) y en los extremos de la probeta se presentas zonas con bajo esfuerzo o con poca afectación por la carga aplicada (color azul oscuro).

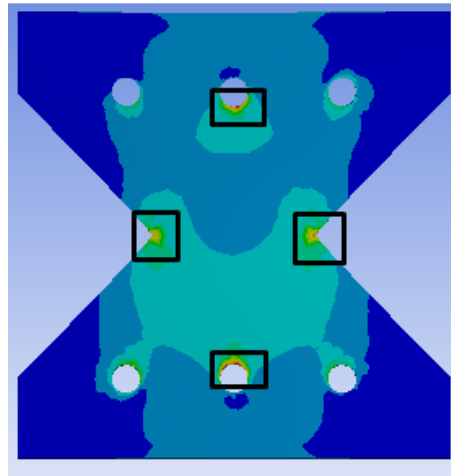


Figura 49. Vista trasera mariposa de Acero AISI SAE 4140 a 0 grados

La cara trasera de la mariposa tiene los mayores esfuerzos en dos de los puntos de contacto de los pines con la probeta y en los concentradores de esfuerzo de la probeta (recuadros negros), hay una menor zona afectada en comparación con la vista frontal del espécimen.

Partiendo de los resultados obtenidos en todos los montajes de los tres materiales, se tiene que el material que mayor variación presentó comparando las tres trayectorias realizadas, es el acero AISI SAE 4140, es evidente que el espesor de la probeta y el contacto de la mariposa con el ensayo tienen un papel importante en el comportamiento del material, debido a que producen una diferencia entre los valores de las rutas de análisis. Lo esperado al utilizar el ensayo tipo

Arcan es observar la mayor incidencia de la fuerza en la parte central del espécimen, lugar donde se realizaron las tres trayectorias.

Visualizando las vistas traseras y frontales, las zonas más críticas no estuvieron en la parte media o central, se encontraban en los contactos de la mariposa con los pines del ensayo, basados en eso y en que el espesor de la probeta de acero AISI SAE 4140 provocó variaciones en los esfuerzos entre las tres trayectorias, a modo de comparación se decide generar una simulación disminuyendo el espesor de la mariposa de acero en el montaje con el mayor esfuerzo general presente.

El valor más crítico se encontró en el modelo a 75 grados, se disminuyó el espesor del espécimen a 2 milímetros y se realizó el mismo procedimiento aplicado a los demás montajes, a continuación, se muestra el montaje y las vistas frontal y trasera con su respectivo comportamiento al aplicar la misma fuerza de 12000 N.

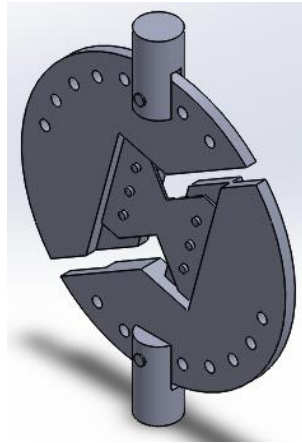


Figura 50. Montaje a 75 grados de acero AISI SAE 4140 con 2 milímetros de espesor

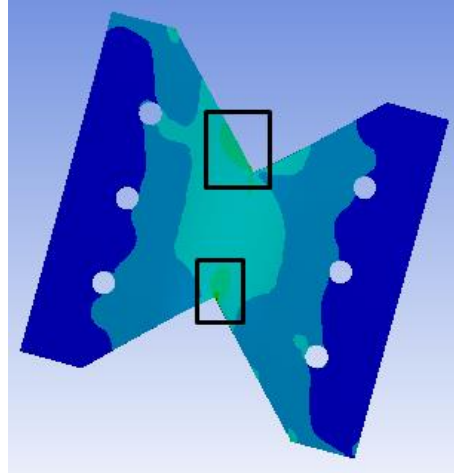


Figura 51. Vista frontal del comportamiento de la mariposa con 2 milímetros de espesor de acero

AISI SAE 4140

En comparación con el comportamiento a 15 grados y 5 milímetros de espesor, es más crítico a 2 milímetros, es un comportamiento esperado debido a que en este material el espesor si influye, se tiene una zona con mayor afectación (azul claro) y además los concentradores de esfuerzo muestran una región con esfuerzo más altos (recuadro de color negro), los puntos de contacto inferior y superior no son los más críticos en este caso.

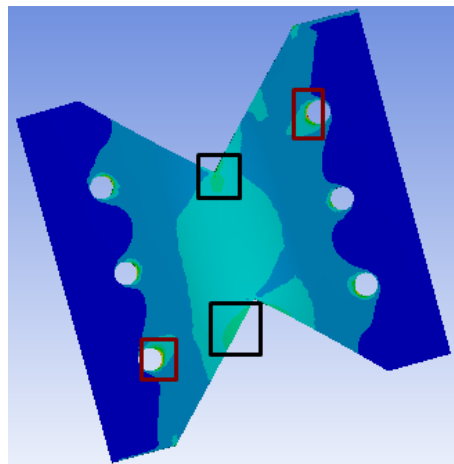


Figura 52. Vista trasera del comportamiento de la mariposa con 2 milímetros de espesor de acero  
AISI SAE 4140

En esta vista se observa que los puntos de contacto de los pines con la probeta son los más críticos (zona encerrada en color vino tinto), pero en este modelo no sufren todos los 6 lugares de ubicación de los pines en comparación con el comportamiento de la probeta con 5 milímetros de espesor, adicional a ello, en esta mariposa se encuentran dos regiones con esfuerzos altos, pero no máximos en los concentradores de esfuerzo (recuadros en color negro).

El estudio de los materiales faltantes (pino y PVC) en cuanto a las probetas y su comportamiento se encuentra evidenciado en los anexos del proyecto, se tienen todos los montajes desde 90 grados hasta cero grados, en el caso del pino Anexo O hasta Anexo BB, el estado de las mariposas después de aplicada la fuerza de 600 N, para el PVC el comportamiento se encuentra representado desde el Anexo A al Anexo N con una carga de 2600 N, la configuración de colores es la misma, donde la zona más crítica está en color rojo y la zona menos afectada en azul oscuro. Además, se tienen todos los comportamientos, se proporcionan las gráficas del esfuerzo producido con la aplicación de la fuerza en las tres trayectorias realizadas para cada montaje.

### **3.3. Comparación del comportamiento entre los materiales escogidos**

El estudio del comportamiento de los tres materiales seleccionados permitió concluir que realizados las 3 trayectorias en la mariposa de cada montaje, los comportamientos para el pino y el PVC son similares en cuanto al valor del esfuerzo, para el acero hay diferencias en este valor y la trayectoria crítica o de mayor esfuerzo varía de la trasera a la frontal a medida que el ángulo de aplicación de la carga disminuye, por lo tanto el espesor de la probeta en el caso del

acero influye en los esfuerzos, en cambio para la madera de pino y el PVC el espesor no afecta notoriamente, por el contrario son cercanos.

#### 4. Conclusiones

Se analizaron los diferentes estados de esfuerzos variando el ángulo de aplicación de la carga para tres especímenes diferentes, acero 4140, pino y PVC (Policloruro de vinilo). Los resultados muestran la variación de esfuerzos en cada uno de los tres materiales utilizados. Se demostró en la mayoría de los casos que a medida que el ángulo disminuye desde 90 grados hasta 0 grados, el esfuerzo comienza en un valor máximo y luego se hace casi constante hasta llegar a un valor no mayor al inicial, la mayor variación se presenta en los extremos de las trayectorias definidas para cada uno de los materiales en cada uno de los ángulos de aplicación de la carga, para el caso del acero el único material dúctil de los tres analizados, el error entre los esfuerzos de la trayectoria y los valores de la teoría de Von Mises es reducido, sin embargo a medida que se acerca a la tensión pura el error incrementa de la misma manera que lo hace el PVC. En cuanto al valor de esfuerzo más alto encontrado en cada simulación realizada, tanto el acero como el PVC presentaron el máximo a 90 grados (cortante puro), en el caso del pino se presentó a 45 grados en todas las trayectorias y montajes realizados.

Se analizó el comportamiento de los materiales ante la variación de la dirección de la aplicación de la carga, variando el ángulo de incidencia de la fuerza aplicada, iniciando con 90 grados y reduciendo este valor, hasta alcanzar los cero grados, lo que permitió por medio de la simulación, identificar como se comportaba cada uno de estos materiales. Las zonas de mayor afectación fueron los concentradores de esfuerzo y los orificios donde se ubicaban los pines que sujetaban la probeta.

Finalmente se realizó la comparación de cada uno de los comportamientos de cada material, partiendo de las tres trayectorias realizadas, se encontró que para el pino y el PVC los resultados del esfuerzo son similares. Para el acero, hay diferencias en este valor y la trayectoria crítica o de mayor esfuerzo varía de la trasera a la frontal a medida que el ángulo de aplicación de la carga disminuye, lo que demuestra que a medida que el ángulo varía, el punto crítico puede cambiar debido al espesor de la probeta, mientras que para la madera de pino y el PVC el espesor de esta no lo afecta considerablemente.

### Referencias Bibliográficas

ANSYS. (2023). *Software ANSYS*. Obtenido de Análisis Estructural:

<https://www.esss.co/es/ansys-simulacion-computacional-1/analisis-estructural/>

Canet, J. (2012). *Resistencia de Materiales y Estructuras*. Barcelona: Ediciones CIMNE.

Celigueta, J. (2011). *Método de los Elementos Finitos Cuarta edición para Análisis Estructural* .

UNICOPIA C.B. ISBN: 84-921970-2-1.

Cervera, M., & Blanco, E. (2015). *Resistencia de Materiales ISBN: 978-84-944244-4-1*.

Barcelona: Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería.

Chamie, R. (2014). *Análisis de las condiciones de falla por fatiga en un material con*

*concentradores de esfuerzo*. Bogotá D.C.: Universidad de los Andes.

Clavijo, J., & Montoya, C. (2015). *Cálculo del factor de concentrador de esfuerzos en placas*

*planas variando las ecuaciones de forma por medio del método de elementos finitos*.

Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira.

Dassault Systèmes. (2022). *Utilización de SOLIDWORKS*. Obtenido de Material ortotrópico:

[https://help.solidworks.com/2022/spanish/SolidWorks/cosmosxpresshelp/c\\_Orthotropic\\_Material.htm](https://help.solidworks.com/2022/spanish/SolidWorks/cosmosxpresshelp/c_Orthotropic_Material.htm)

Díaz, F. (2008). *Fundamentos de mecánica de sólidos*. Cuautitlán Izcalli: Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán.

González, F. (2010). *Interacción de ANSYS con entornos de ventanas a medida. Aplicación al campo de la Ingeniería Mecánica*. Madrid: Universidad Carlos III de Madrid.

Izzah, T., Abu Hassan, C., & Ahmad, Y. (2016). Modelado de elementos finitos de ARCAN método de ensayo para dúctil y frágil material bajo configuración de carga diferentes. *Diario de Medio Ambiente Construido, Tecnología e Ingeniería, vol. 1 (Sept.) ISSN 0128-1003*, 289 - 298.

Jacas, M., Rodríguez, M., & Ordoñez, U. (2005). Modelación por Elementos Finitos como Método para la Sustitución de Piezas de Acero por Hierro Nodular. *Ingeniería Mecánica, vol. 8, núm. 3*, 1 - 8 .

Martín, A. (2010). *Simulación mediante el método de los elementos finitos de una estructura metálica*. Madrid: Universidad Carlos III de Madrid .

Martínez, P., & Azuaga, M. (1997). *Laboratorio IV - Dpto. de Física - UBA*. Obtenido de Medición del módulo de elasticidad de Young:

[https://www.fisicarecreativa.com/informes/infor\\_mecanica/young97.pdf](https://www.fisicarecreativa.com/informes/infor_mecanica/young97.pdf)

Morocho, V. (2013). *Estudio del Comportamiento a Fatiga Mecánica de Polímeros Compuestos con Fibra Natural y su Incidencia en la Aplicación para la Fabricación de Accesorios de la Industria Carrocera*. Ambato – Ecuador: Universidad Técnica de Ambato.

Ortiz, M., & Cruz, A. (2022). Determinación del módulo de Young. *Ingenio y Conciencia Boletín Científico de la Escuela Superior Ciudad Sahagún Publicación semestral*, Vol. 9, No. 17, 52 - 63.

Pedraza, S., & Toloza, S. (2016). *Estudio del comportamiento mecánico a tensión de un material compuesto con matriz polimérica de resina epoxi reforzado con fibras de carbono de alta resistencia con un tejido cuatriaxial*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.

Plata, F. (2017). *Comportamiento de la deformación con el esfuerzo al que se someten los materiales*. Ciudad de México: Universidad Autónoma del Estado de México.

Ruiz, A., & Tascón, D. (2013). *Medición de propiedades elásticas de materiales isotrópicos por ultrasonido*. Santiago de Cali: Universidad Autónoma de Occidente.

Sánchez, S. (2013). *Teorías de fallo bajo estado tensional plano para materiales frágiles*.

Valencia, España: Universitat Politècnica de València. Obtenido de Teoría de falla bajo carga estática.

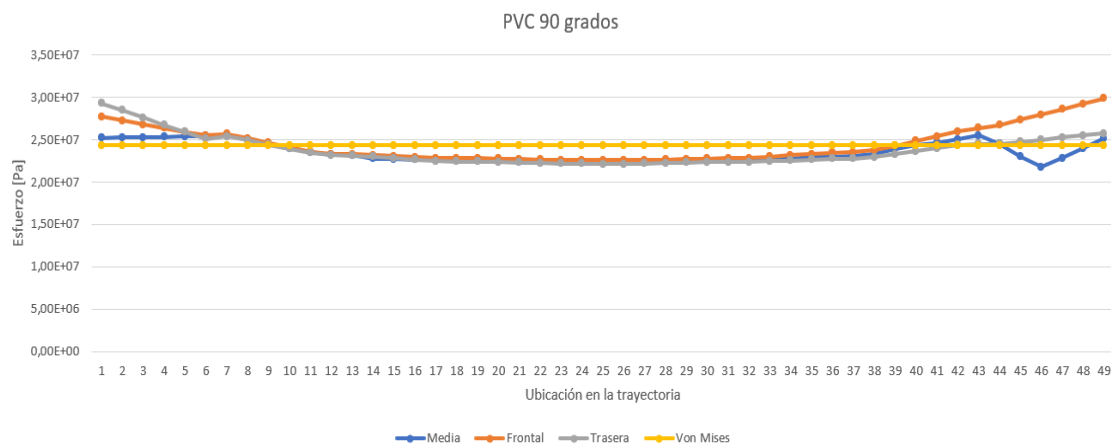
Servosis. (29 de junio de 2020). *Servosis*. Obtenido de El módulo de Young o módulo de elasticidad longitudinal: <https://www.servosis.com/el-modulo-de-young-o-modulo-de-elasticidad-longitudinal/>

Velosa, A., Olaya, G., & Guerrero, A. (2018). *Caracterización de las Propiedades Mecánicas de un Acero AISI-SAE 4140 al Aplicarle un Proceso de Nitruración por Plasma*. Bucaramanga: Unidades Tecnológicas de Santander.

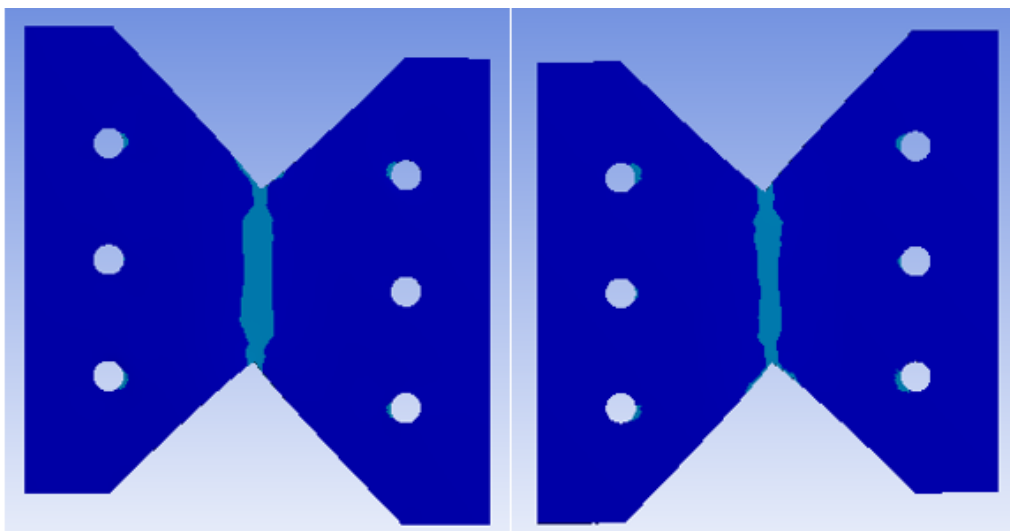
Zapata, F. (14 de abril de 2020). *Lidefer*. Obtenido de Módulo de Young: cálculo, aplicaciones, ejemplos, ejercicios: <https://www.lifeder.com/modulo-de-young/>

## Anexos

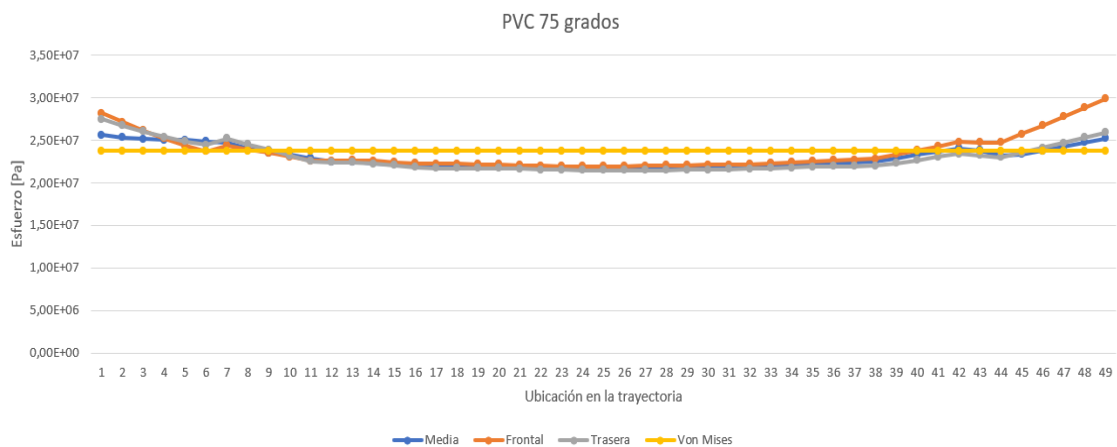
### Anexo 1. Esfuerzo en las tres trayectorias de PVC a 90 grados



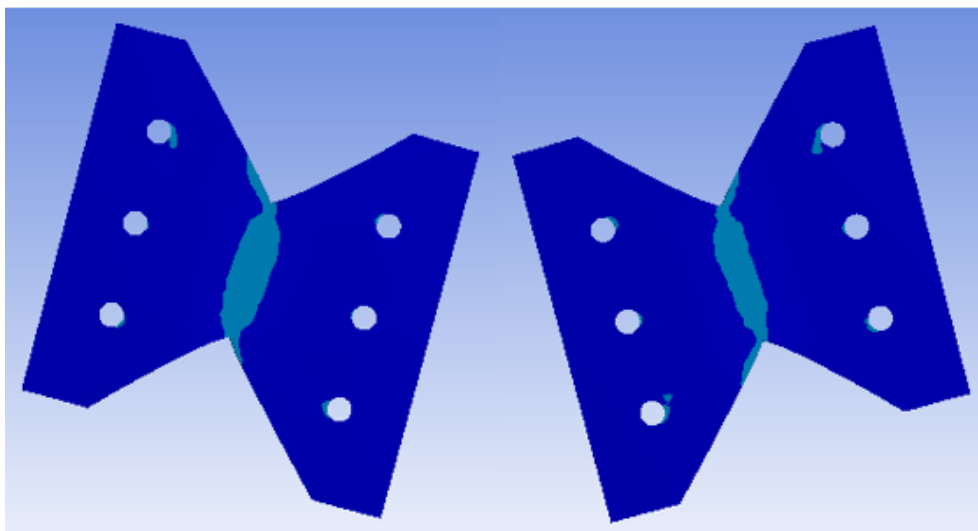
### Anexo 2. Vista delantera y trasera del comportamiento de la mariposa de PVC a 90 grados



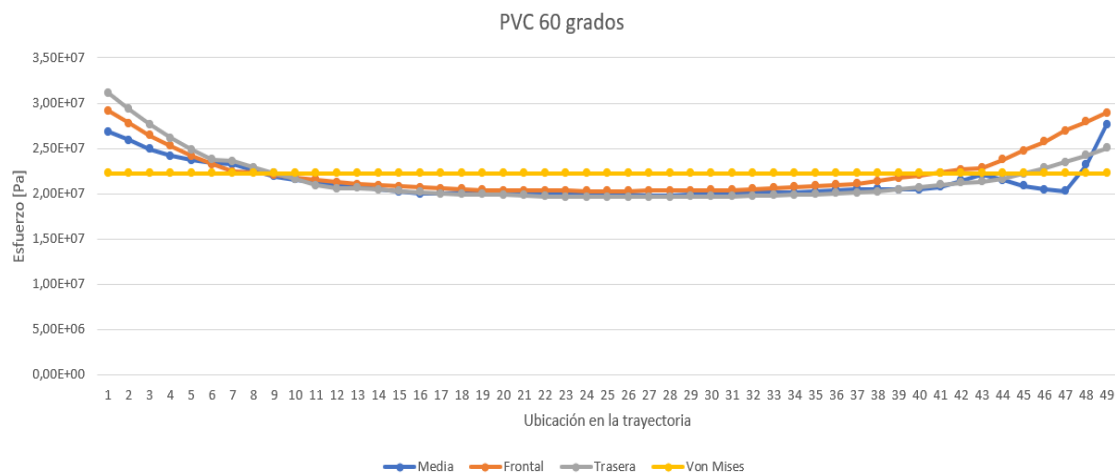
## Anexo 3. Esfuerzo en las tres trayectorias de PVC a 75 grados



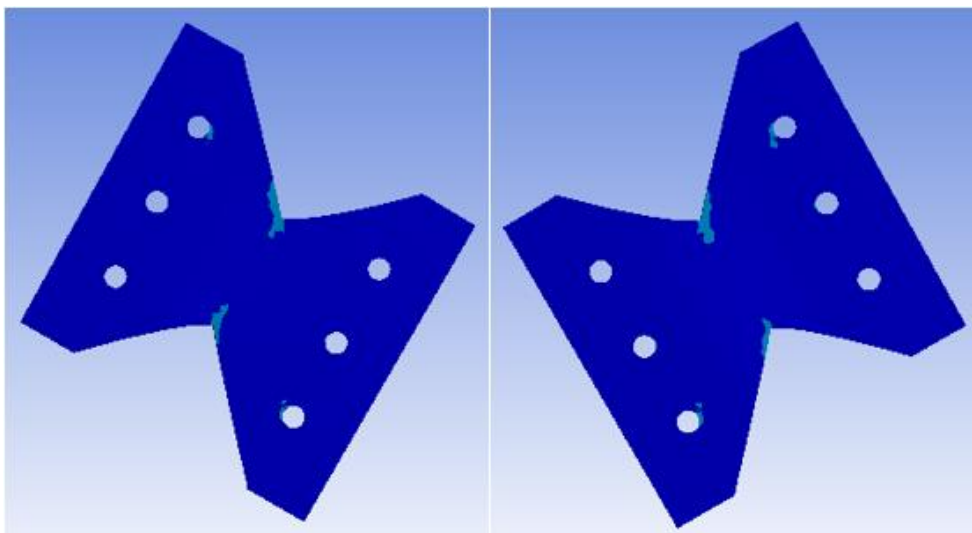
## Anexo 4. Vista delantera y trasera del comportamiento de la mariposa de PVC a 75 grados



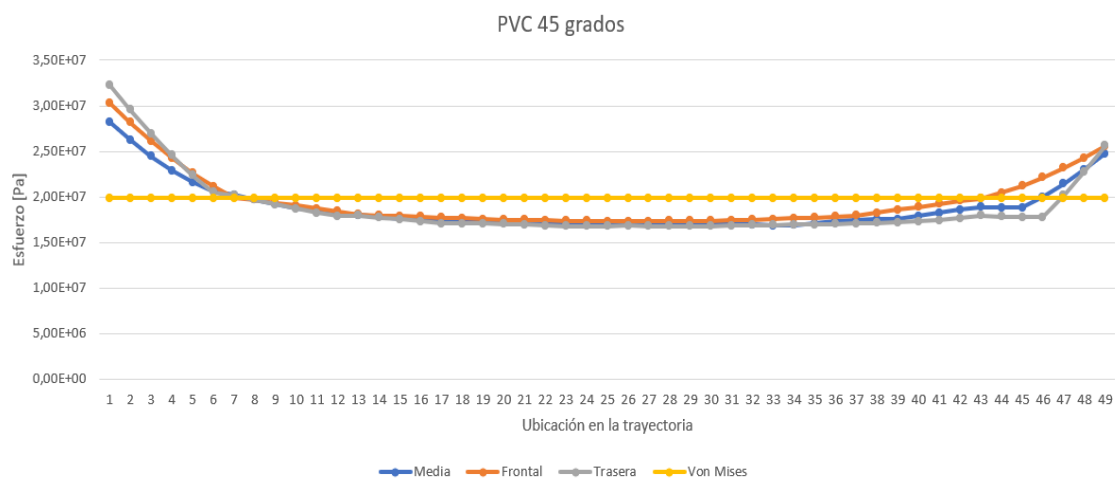
## Anexo 5. Esfuerzo en las tres trayectorias de PVC a 60 grados



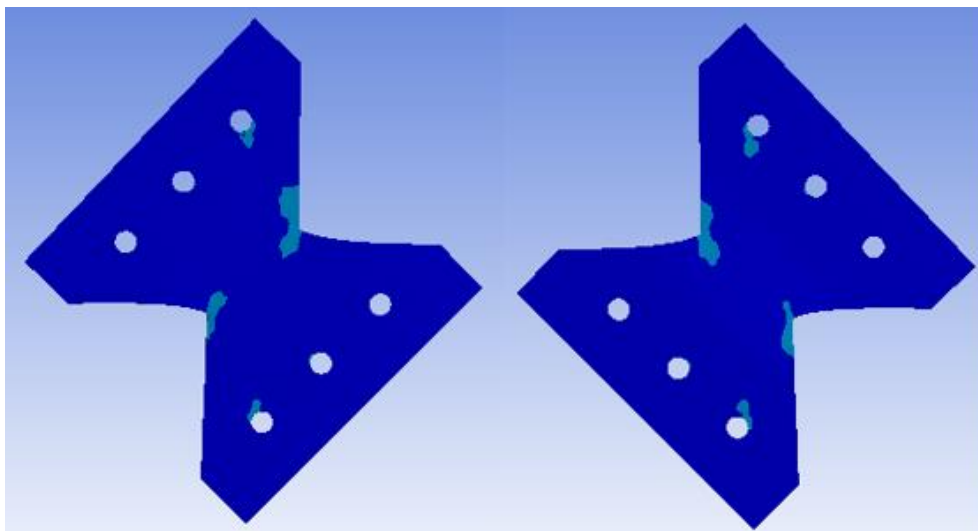
## Anexo 6. Vista delantera y trasera del comportamiento de la mariposa de PVC a 60 grados



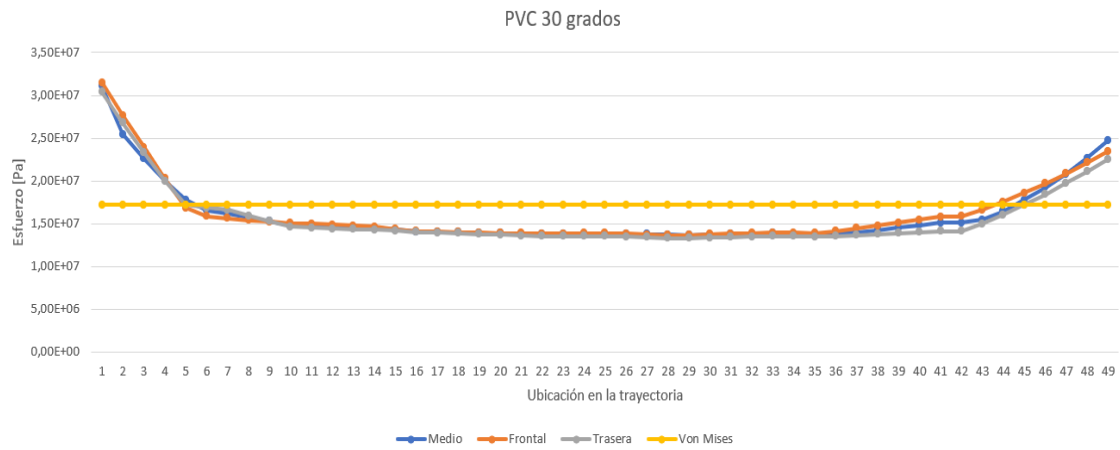
## Anexo 7. Esfuerzo en las tres trayectorias de PVC a 45 grados



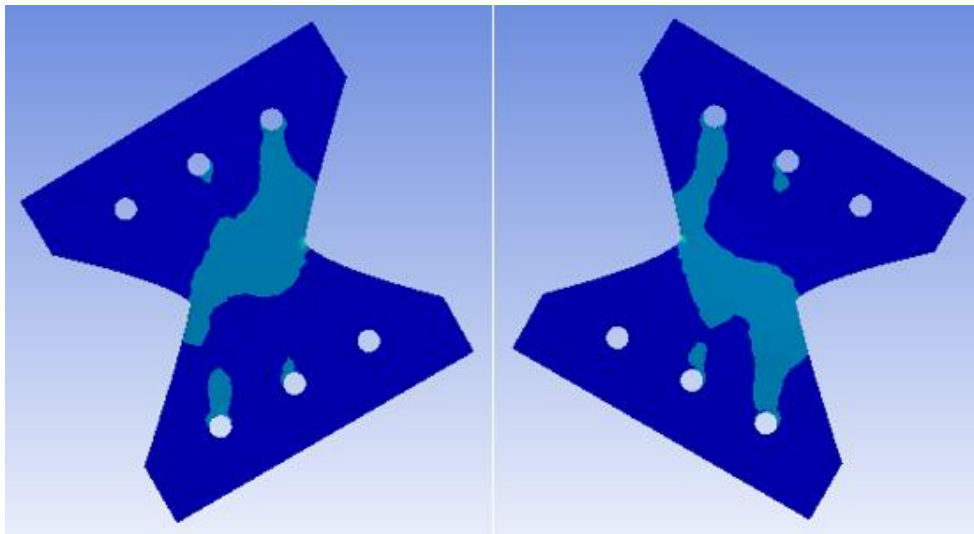
## Anexo 8. Vista delantera y trasera del comportamiento de la mariposa de PVC a 45 grados



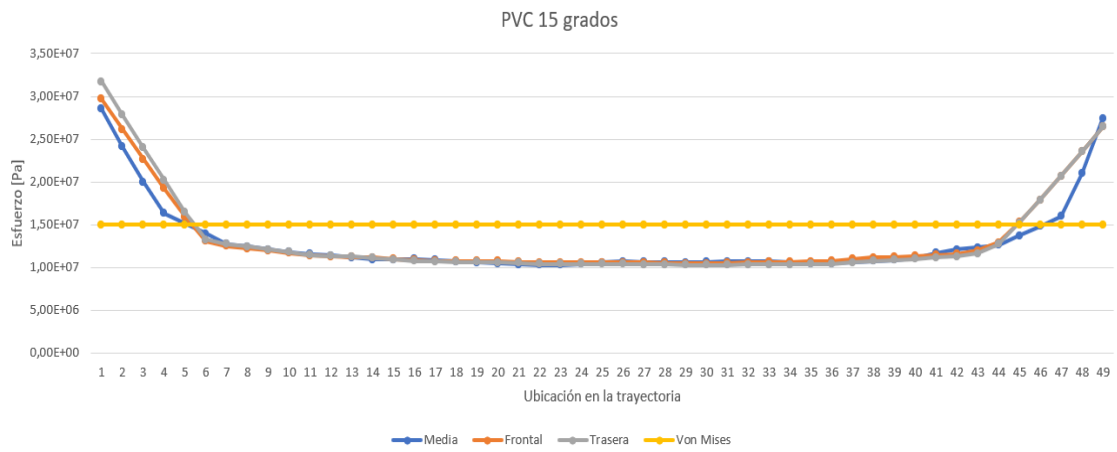
## Anexo 9. Esfuerzo en las tres trayectorias de PVC a 30 grados



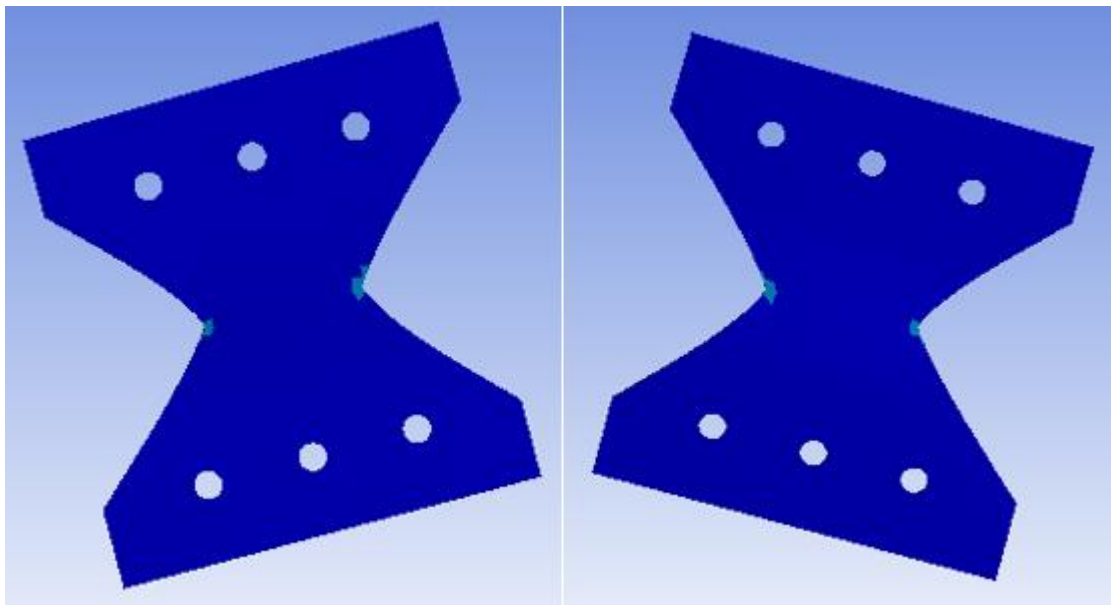
## Anexo 10. Vista delantera y trasera del comportamiento de la mariposa de PVC a 30 grados



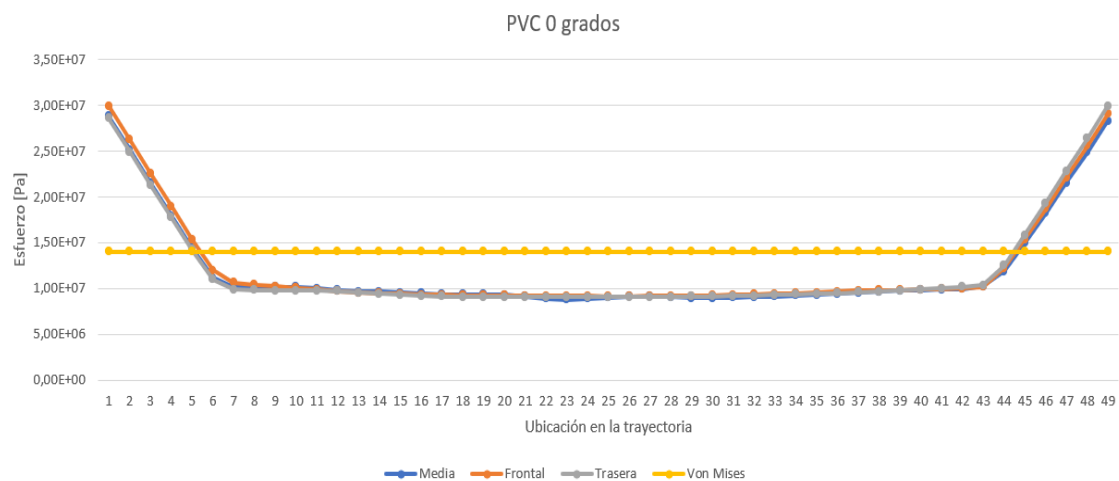
## Anexo 11. Esfuerzo en las tres trayectorias de PVC a 15 grados



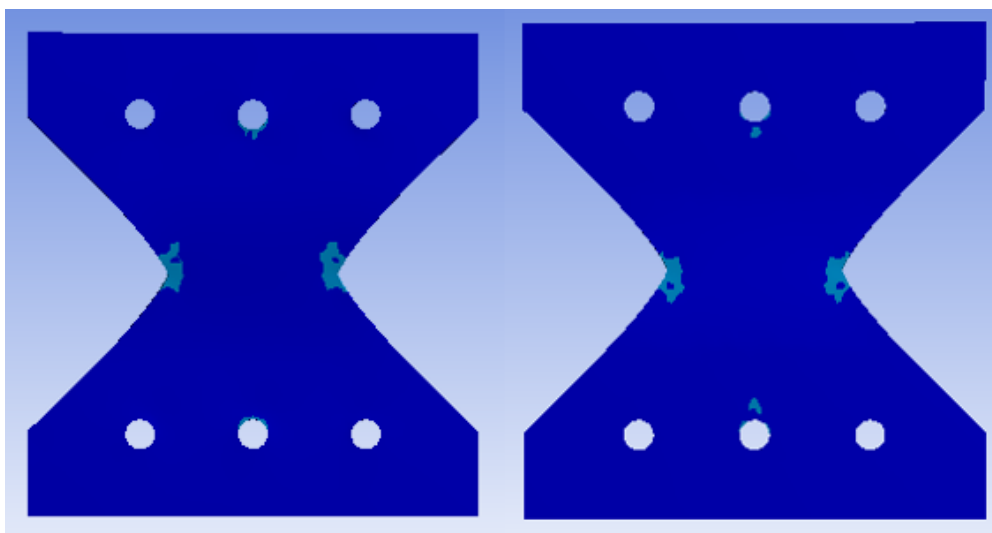
## Anexo 12. Vista delantera y trasera del comportamiento de la mariposa de PVC a 15 grados



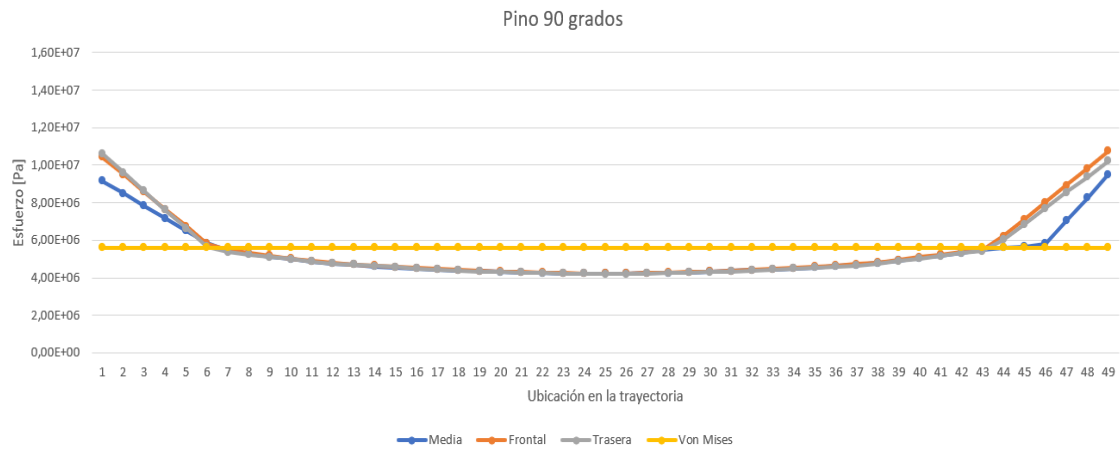
## Anexo 13. Esfuerzo en las tres trayectorias de PVC a 0 grados



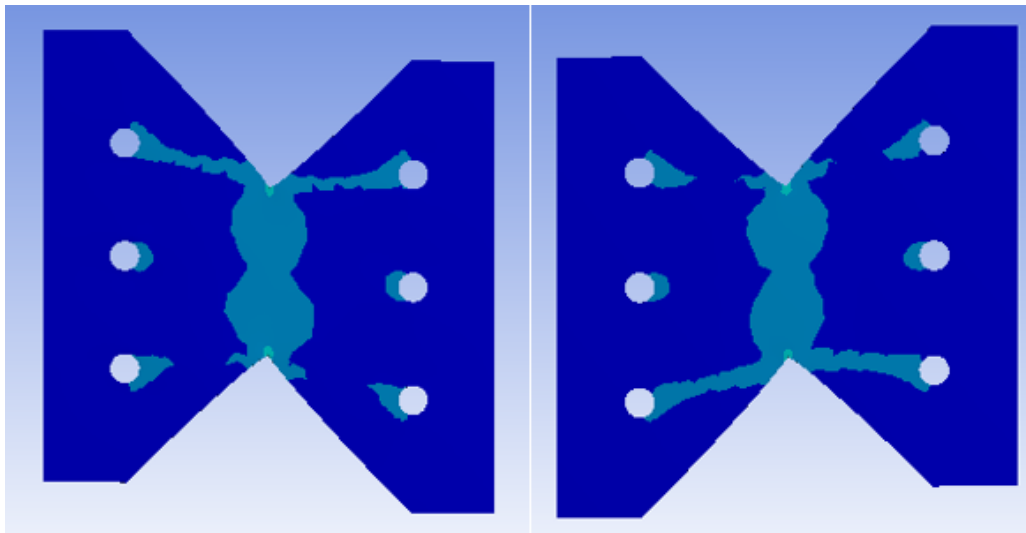
## Anexo 14. Vista delantera y trasera del comportamiento de la mariposa de PVC a 0 grados



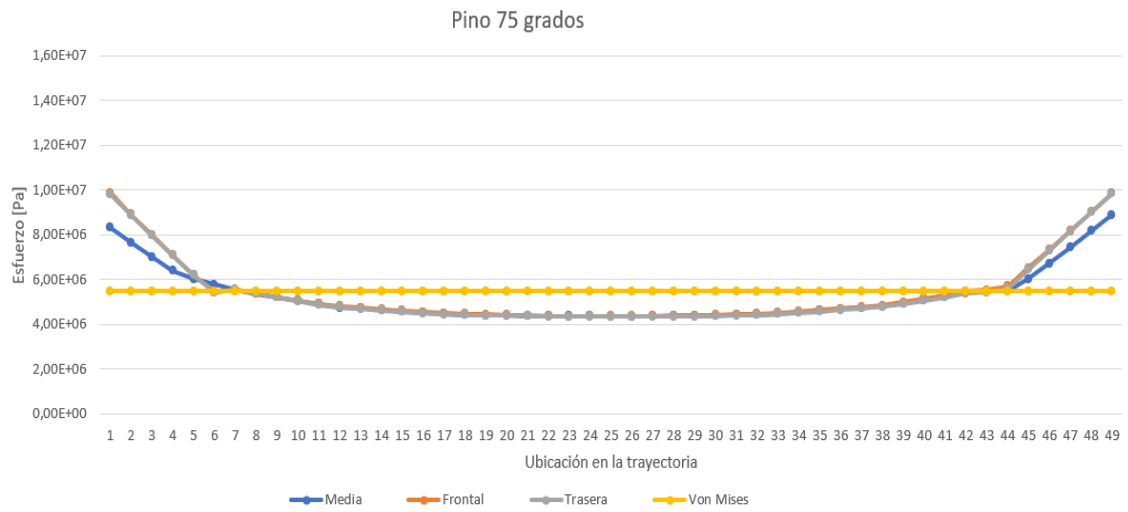
## Anexo 15. Esfuerzo en las tres trayectorias de pino a 90 grados



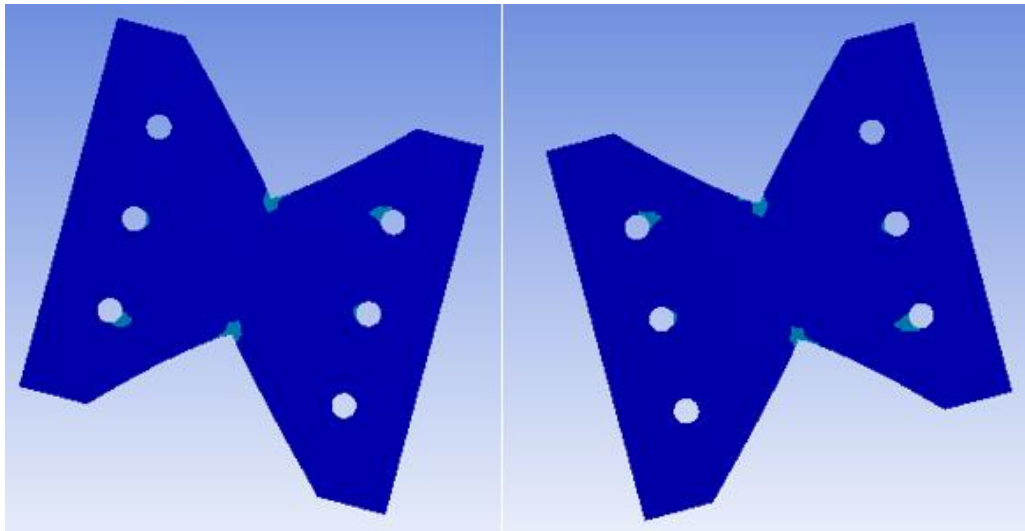
## Anexo 16. Vista delantera y trasera del comportamiento de la mariposa de pino a 90 grados



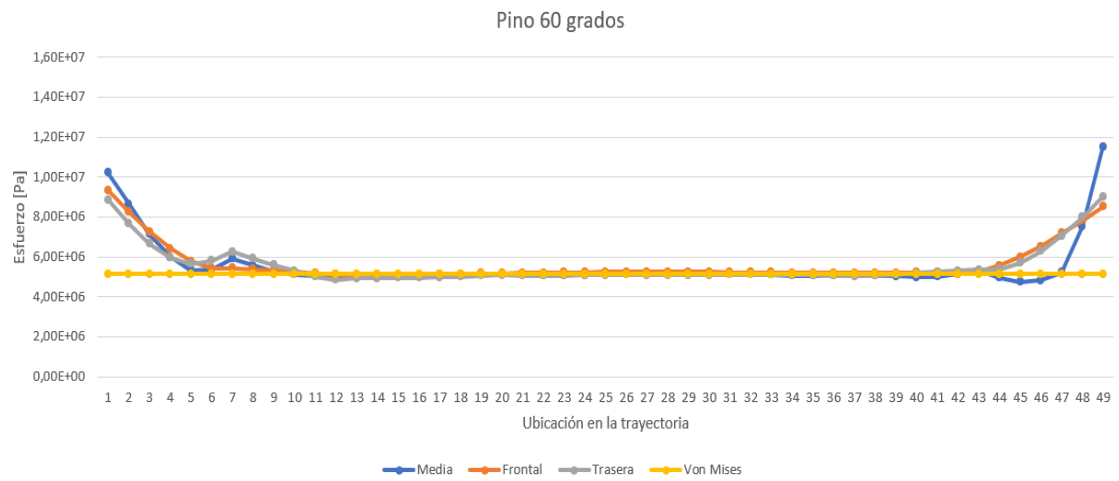
## Anexo 17. Esfuerzo en las tres trayectorias de pino a 75 grados



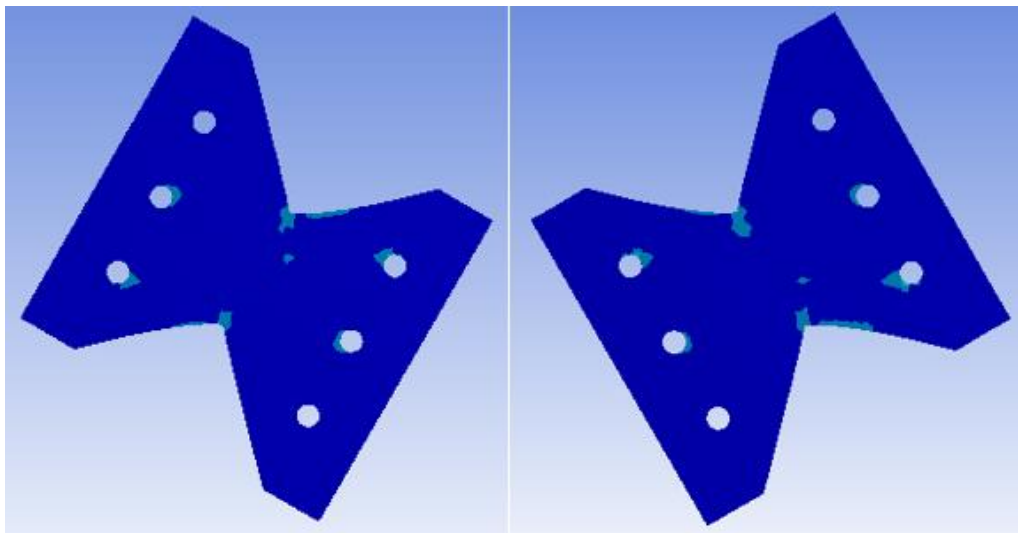
## Anexo 18. Vista delantera y trasera del comportamiento de la mariposa de pino a 75 grados



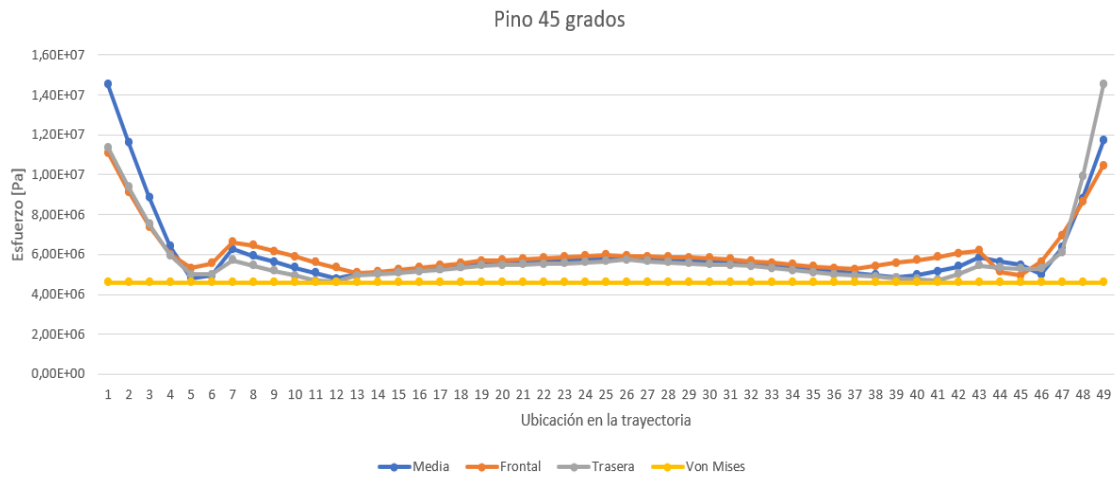
## Anexo 19. Esfuerzo en las tres trayectorias de pino a 60 grados



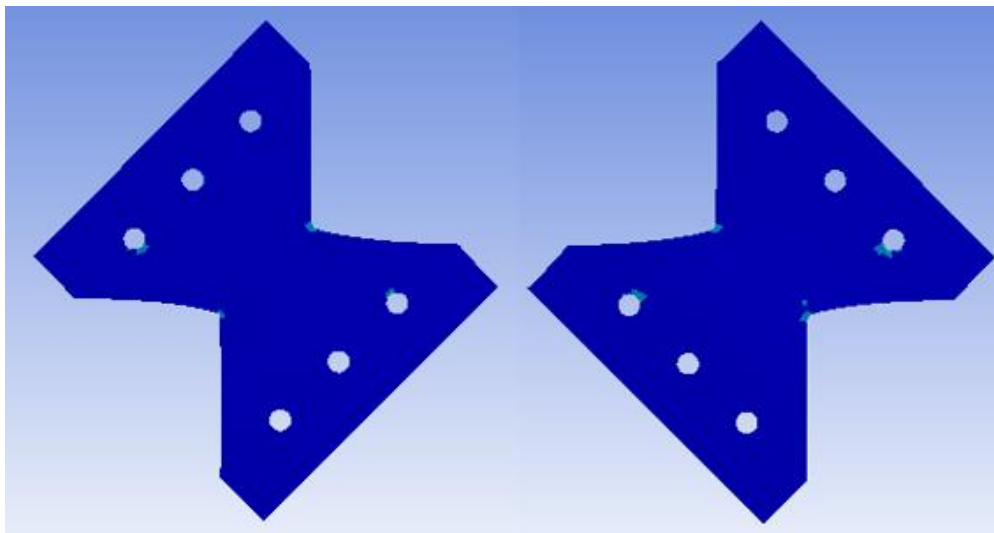
## Anexo 20. Vista delantera y trasera del comportamiento de la mariposa de pino a 60 grados



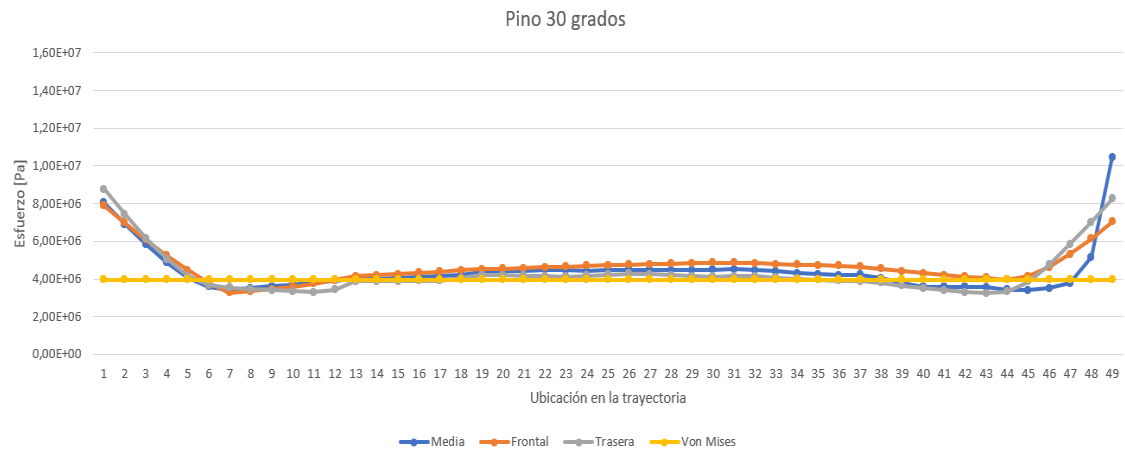
## Anexo 21. Esfuerzo en las tres trayectorias de pino a 45 grados



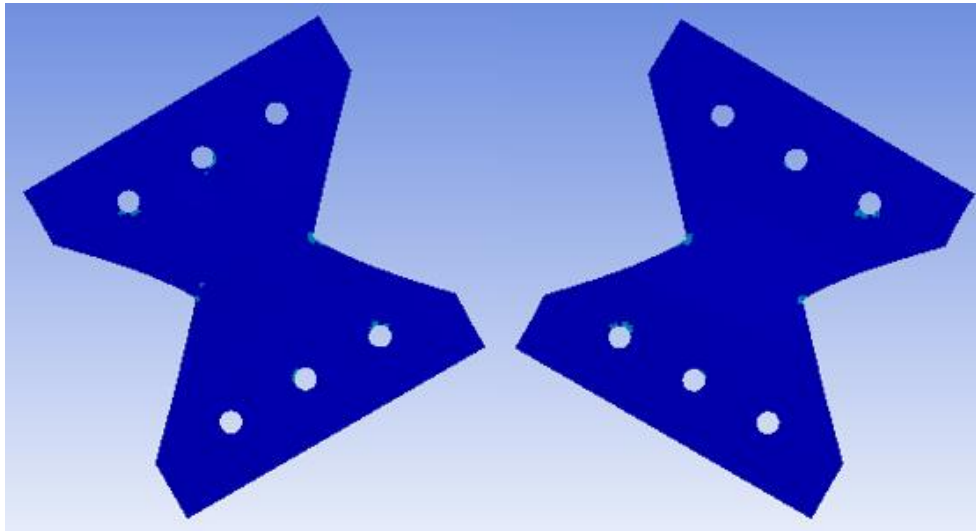
## Anexo 22. Vista delantera y trasera del comportamiento de la mariposa de pino a 45 grados



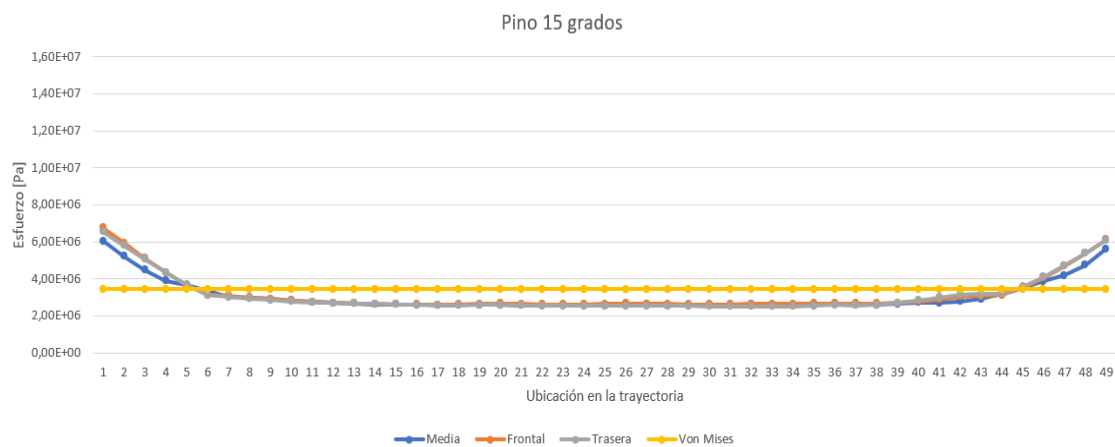
## Anexo 23. Esfuerzo en las tres trayectorias de pino a 30 grados



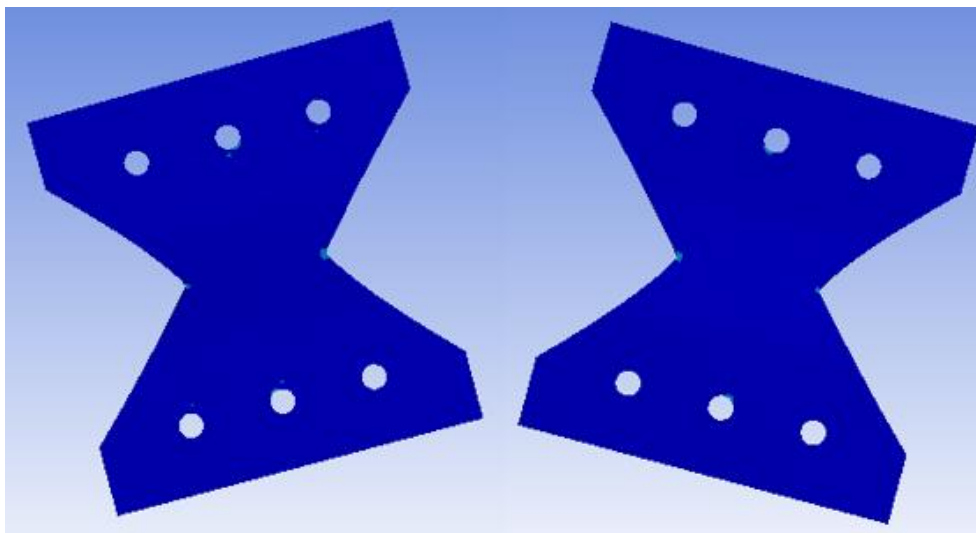
## Anexo 24. Vista delantera y trasera del comportamiento de la mariposa de pino a 30 grados



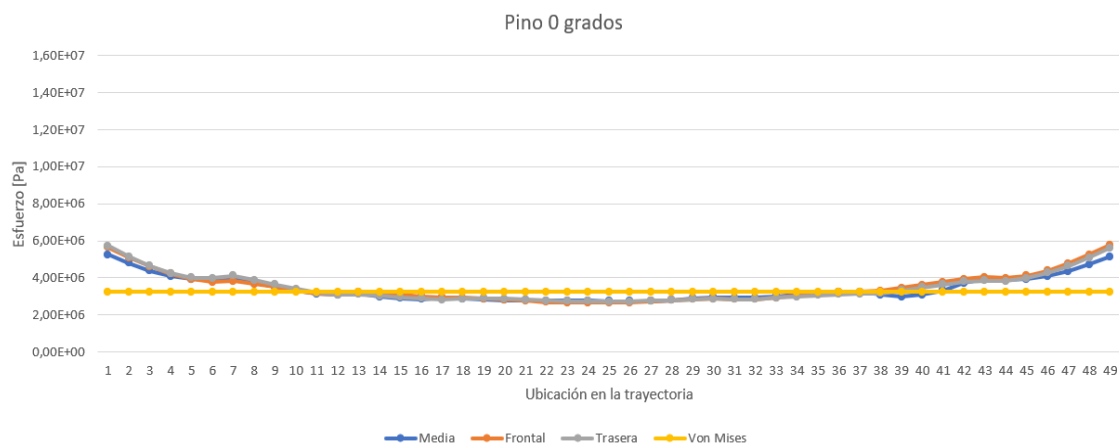
## Anexo 25. Esfuerzo en las tres trayectorias de pino a 15 grados



## Anexo 26. Vista delantera y trasera del comportamiento de la mariposa de pino a 15 grados



## Anexo 27. Esfuerzo en las tres trayectorias de pino a 0 grados



## Anexo 28. Vista delantera y trasera del comportamiento de la mariposa de pino a 0 grados

