



**COMITÉ ASESOR**

**ING. GERARDO ENRIQUE CHACÓN ROJAS**

**TUTOR**

**ING. RONALD EUGENIO JIMENEZ CASTRO**

**LECTOR**

**ING. DOMINGO ERNESTO DELGADO MARTÍNEZ, PH.D**

**REPRESENTANTE DE RECTORÍA**



### TRIBUNAL EXAMINADOR

Este proyecto titulado: "COMPARACIÓN SIMULADA DE CONEXIONES APERNADAS DE ACERO MEDIANTE PERNOS SAE Y ASTM.", fue aprobado por el Tribunal Examinador de la carrera de Licenciatura en Ingeniería Civil de la Universidad Latina, Sede Heredia, como requisito para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil:

**ING. GERARDO ENRIQUE CHACÓN ROJAS**

**TUTOR**

**ING. RONALD EUGENIO JIMENEZ CASTRO**

**LECTOR**

**ING. DOMINGO ERNESTO DELGADO MARTÍNEZ, PH.D**

**REPRESENTANTE DE RECTORÍA**

**CARTA DE APROBACIÓN POR PARTE DEL PROFESOR TUTOR DEL  
TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN MODALIDAD TESIS DE GRADO**

Heredia, 5 de septiembre, de 2018

Sres.  
Miembros del Comité de Trabajos Finales de Graduación  
SD

Estimados señores:

He revisado y corregido el Trabajo Final de Graduación, modalidad Tesis de Grado bajo el título COMPARACIÓN SIMULADA DE CONEXIONES APERNADAS DE ACERO MEDIANTE PERNOS SAE Y ASTM por parte del estudiante: Ingrid Marmol Heudenfeld, como requisito para que el citado estudiante puedan optar por la Licenciatura en Ingeniería Civil.

Considero que dicho trabajo cumple con los requisitos formales y de contenido exigidos por la Universidad, y por tanto lo recomiendo para su defensa oral ante el Consejo Asesor.

Suscribe cordialmente,

  
Ing. Gerardo Chacon.



**CARTA DE APROBACIÓN POR PARTE DEL PROFESOR LECTOR DEL  
TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN MODALIDAD TESIS DE GRADO**

Heredia, 5 de septiembre, de 2018

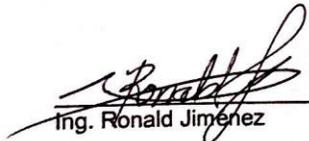
Sres.  
Miembros del Comité de Trabajos Finales de Graduación  
SD

Estimados señores:

He revisado y corregido el Trabajo Final de Graduación, modalidad Tesis de Grado bajo el título COMPARACIÓN SIMULADA DE CONEXIONES APERNADAS DE ACERO MEDIANTE PERNOS SAE Y ASTM por parte del estudiante Ingrid Marmol Heudensfeld, como requisito para que el citado estudiante puedan optar por la Licenciatura en Ingeniería Civil.

**Considero que dicho trabajo cumple con los requisitos formales y de contenido exigidos por la Universidad, y por tanto lo recomiendo para su defensa oral ante el Consejo Asesor.**

Suscribe cordialmente,

  
Ing. Ronald Jiménez



## “Carta Autorización del autor(es) para uso didáctico del Trabajo Final de Graduación”

Vigente a partir del 31 de Mayo de 2016

**Instrucción:** Complete el formulario en PDF, imprima, firme, escanee y adjunte en la página correspondiente del Trabajo Final de Graduación.

**Yo (Nosotros):**

Escrba Apellidos, Nombre del Autor(a). Para más de un autor separe con " ; " ;

Ingrid Marmol Heudendorf

De la Carrera / Programa: Licenciatura de ingeniería civil  
autor (es) del (de la) (Indique tipo de trabajo): Tesis de grado  
titulado:

COMPARACIÓN SIMULADA DE CONEXIONES APERNADAS DE ACERO MEDIANTE PERNOS SAE Y ASTM

Autorizo (autorizamos) a la Universidad Latina de Costa Rica, para que exponga mi trabajo como medio didáctico en el Centro de Recursos para el Aprendizaje y la Investigación (CRAI o Biblioteca), y con fines académicos permita a los usuarios su consulta y acceso mediante catálogos electrónicos, repositorios académicos nacionales o internacionales, página web institucional, así como medios electrónicos en general, internet, intranet, DVD, u otro formato conocido o por conocer; así como integrados en programas de cooperación bibliotecaria académicos dentro o fuera de la Red Laureate, que permitan mostrar al mundo la producción académica de la Universidad a través de la visibilidad de su contenido.

De acuerdo con lo dispuesto en la Ley No. 6683 sobre derechos de autor y derechos conexos de Costa Rica, permita copiar, reproducir o transferir información del documento, conforme su uso educativo y debiendo citar en todo momento la fuente de información; únicamente podrá ser consultado, esto permitirá ampliar los conocimientos a las personas que hagan uso, siempre y cuando resguarden la completa información que allí se muestra, debiendo citar los datos bibliográficos de la obra en caso de usar información textual o paráfrasis de esta.

La presente autorización se extiende el día (Día, fecha) 18 del mes septiembre del año 2018 a las 14:00 . Asimismo declaro bajo fe de juramento, conociendo las consecuencias penales que conlleva el delito de perjurio: que soy el autor(a) del presente trabajo final de graduación, que el contenido de dicho trabajo es obra original del (la) suscrito(a) y de la veracidad de los datos incluidos en el documento. Eximo a la Universidad Latina; así como al Tutor y Lector que han revisado el presente, por las manifestaciones y/o apreciaciones personales incluidas en el mismo, de cualquier responsabilidad por su autoría o cualquier situación de perjuicio que se pudiera presentar.

**Firma(s) de los autores** Según orden de mención al inicio de ésta carta:

San Ramón, 21 de setiembre de 2018

Señores  
Miembros del Comité de Trabajos Finales de Graduación  
Escuela de Ingeniería Civil  
Facultad de Ingeniería y Arquitectura  
Universidad Latina de Costa Rica

Estimados señores

Leí y corregí el Trabajo Final de Graduación, denominado: "COMPARACIÓN SIMULADA DE CONEXIONES APERNADAS DE ACERO, MEDIANTE PERNOS SAE Y ASTM", elaborado por la estudiante **Ingrid Marmol Heudendorf**, Cédula N°. 186200589008: como requisito para que la citada estudiante pueda optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil.

Corregí el trabajo en aspectos, tales como: construcción de párrafos, vicios del lenguaje que se trasladan a lo escrito, ortografía, puntuación y otros relacionados con el campo filológico, y desde ese punto de vista considero que está listo para ser presentado como Trabajo Final de Graduación; por cuanto cumple con los requisitos establecidos por la Universidad.

Suscribe cordialmente,



Lic. Carlos María Palma Zúñiga MSc.  
Filólogo y Curriculista  
Cédula N° 202260865  
Número de Carnet Colypro 33367





**UNIVERSIDAD LATINA  
DE COSTA RICA**  
LAUREATE INTERNATIONAL UNIVERSITIES®

Universidad Latina de Costa Rica

Facultad de Ingeniería y Arquitectura

Escuela de Ingeniería Civil

Programa académico Licenciatura en Ingeniería Civil

Tesis de grado

COMPARACIÓN SIMULADA DE CONEXIONES APERNADAS DE ACERO MEDIANTE  
PERNOS SAE Y ASTM

Autora: Ingrid Marmol Heudenfeld

Tutor: Ing. Gerardo Chacón Rojas

Heredia, Costa Rica

Abril, 2018

## Contenido

<b>1. Introducción</b> .....	4
<b>1.1 Antecedentes</b> .....	4
<b>1.2 Planeamiento del problema</b> .....	4
<b>1.3 Hipótesis</b> .....	5
<b>1.4 Objetivos</b> .....	5
1.4.1 Objetivo general.....	5
1.4.2 Objetivos específicos .....	5
<b>1.5 Justificación</b> .....	5
<b>1.6 Alcances y limitaciones</b> .....	6
CAPÍTULO I .....	7
<b>Capítulo I</b> .....	8
<b>1. Marco teórico</b> .....	8
<b>1.1 Pernos estructurales</b> .....	11
1.1.1 Tipos de juntas .....	11
1. 1.2 Pernos SAE J429 .....	15
1.1.2.1 Propiedades mecánicas.....	15
1.1.2.2 Requisitos químicos.....	16
1.1.3 Pernos A325 .....	16
1.1.3.1 Propiedades mecánicas.....	17
1.1.3.2 Rendimiento mecánico.....	17
1.1.3.3 Requisitos químicos.....	18
<b>1.2 Planos de falla</b> .....	19
<b>1.3 Tornillos de control de tensión</b> .....	21
<b>1.4 Modos de falla</b> .....	22
1.4.1 Requisitos de rendimiento, espaciado y distancia de borde .....	25
1.4.2 Requisitos de espaciado y distancia entre bordes.....	30
1.4.3 Pernos en corte .....	30
1.4.4 Métodos de tensión.....	33
<b>1. 5 Elemento finito</b> .....	34
1.5.1 Historia.....	35
1.5.2 Teorías de falla .....	36
1.5.2.1 Teoría de la tensión tangencial máxima .....	36

CAPÍTULO II .....	39
<b>Capítulo II.....</b>	<b>40</b>
<b>2. Marco metodológico .....</b>	<b>40</b>
<b>2.1 Paradigma, enfoque metodológico y método(s) de investigación propuestos .....</b>	<b>40</b>
<b>2.2 Categorías de análisis de la investigación (operacionalización de variables) .....</b>	<b>41</b>
<b>2.3 Población y muestra. Técnicas de muestreo .....</b>	<b>43</b>
<b>2.4 Técnicas e instrumentos para la recolección de datos .....</b>	<b>43</b>
<b>2.5 Técnicas e instrumentos para el procesamiento y análisis de los datos .....</b>	<b>43</b>
CAPÍTULO III.....	49
<b>Capítulo III.....</b>	<b>50</b>
<b>3. Análisis de resultados.....</b>	<b>50</b>
<b>3.1 Análisis racional.....</b>	<b>50</b>
3.1.1. Tipos de fallas a evaluar.....	53
3.1.1.1. Falla por pandeo de la placa.....	53
3.1.1.2. Falla por compresión de la placa .....	53
3.1.1.3. Falla por aplastamiento de la placa .....	54
3.1.1.4. Falla por aplastamiento del perno.....	54
3.1.1.5. Falla por cortante del perno .....	54
3.1.1.6 Falla por fricción del perno. ....	54
<b>3.2 Dimensiones de la conexión .....</b>	<b>55</b>
<b>3.3 Simulación en ANSYS .....</b>	<b>61</b>
3.2.1 Conexión con pernos A-325.....	73
3.2.1.2. Fuerza de 22,84 toneladas.....	73
3.2.1.2. Fuerza de 21 toneladas .....	77
3.2.1.3. Fuerza de 5,7 toneladas .....	84
3.2.2. Conexión con pernos J-429.....	86
3.2.2.1. Fuerza de 21 toneladas .....	86
3.2.2.2. Fuerza de 5,7 toneladas .....	90
<b>3.4 Comparación de resultados .....</b>	<b>92</b>
<b>Conclusiones.....</b>	<b>98</b>
<b>Recomendaciones .....</b>	<b>98</b>
<b>Referencias bibliográficas .....</b>	<b>100</b>

## Índice de imágenes

Ilustración 1 Puente Coalbrookdale. Fuente: Plasencia, 2011. ....	8
Ilustración 2 Tipos de conexiones según el comportamiento de la carga .....	10
Ilustración 3 Propiedades mecánicas pernos J429. . <b>Error! Bookmark not defined.</b>	
Ilustración 4 Requisitos químicos. .... <b>Error! Bookmark not defined.</b>	
Ilustración 5 Propiedades mecánicas pernos A325. <b>Error! Bookmark not defined.</b>	
Ilustración 6 Rendimiento mecánico por diámetro. . <b>Error! Bookmark not defined.</b>	
Ilustración 7 Propiedades químicas. ....	18
Ilustración 8 Pernos A325. ....	19
Ilustración 9 Planos de corte en pernos A325 y J429 .....	20
Ilustración 10 Tipos de conexiones .....	22
Ilustración 11 cortante simple y doble .....	23
Ilustración 12 Dimensiones del agujero. ....	25
Ilustración 13 Falla de borde. ....	25
Ilustración 14 Superficie de Falla .....	26
Ilustración 15 Nomenclatura en las placas, separación entre agujeros. ....	28
Ilustración 16 Distancia del borde al centro del agujero. ....	29
Ilustración 17 Carga Típica de corte vs curvas de deformación A325 y A490. ....	31
Ilustración 18 Comparación de diagrama de Tresca y diagrama de Von Mises. de Cevera, Miguel. ....	37
Ilustración 19 Listado de estudios posibles en la zona de trabajos de ANSYS Fuente: ANSYS 2018. ....	45
Ilustración 20 Celdas de trabajo en la zona de trabajo del Workbench ANSYS. ....	47
Ilustración 21 Regularidad de los polígonos de malla según su uniformidad. ....	47

## 1. Introducción

Desde hace muchos años se han estudiado los diferentes tipos de estructuras con la idea de optimizar recursos y hacer dichas estructuras más seguras. Uno de los principales materiales de construcción es el acero y parte de la idea de este proyecto es aumentar la implementación de estructuras de acero en las construcciones de Costa Rica, realizando una comparación entre la resistencia de dos tipos de pernos, los cuales son el ASTM A325 y el SAE J429.

Se realizará un estudio sobre el comportamiento de conexiones con este tipo de pernos, basándose en la modelación de ANSYS de placas a cortante doble con pernos SAE y ASTM. Dicha comparación se realizará considerando que los pernos SAE J429 no están especificados en los códigos de diseño, pero su comportamiento mecánico es similar al implementado en la construcción. Dicha modelación permitirá estudiar el comportamiento básico de este tipo de pernos en el momento de trabajar bajo esfuerzos; facilitando el uso en situaciones más complejas.

### 1.1 Antecedentes

Sobre la comparación de pernos ASTM A325 y SAE J429 existe muy poca información. En donde se puede obtener información más similar o relevante es del trabajo de Swanson, realizada en el 2002, donde se estudian conexiones en T con los pernos por estudiar, donde se concluye que no hay mucha diferencia entre las resistencias entre ambos pernos, pero si hay diferencia en su rigidez. También obtendremos información de Green et al. del 2005, que trata de la comparación de pernos A325 y A490 en conexiones a cortante, donde se realizan pruebas experimentales y se utiliza el método de modelaje en elemento finito

### 1.2 Planeamiento del problema

Se realizará la modelación en *solidworks* y *ANSYS* a cortante doble de dos placas y de los pernos SAE J429 y ASTM A325, cuyos esfuerzos de fluencia y elasticidad son muy similares, 120 ksi y 85 ksi respectivamente, pero según las

normas ASTM y SAE estos no se pueden suplantar uno por el otro. Ambos serán sometidos a una fuerza máxima de tensión de 21 toneladas, las placas van a ser diseñadas con la idea de que la falla se genere en los pernos y no en ellas, y así realizar la comparación entre ambos pernos. Considerando que la información sobre los pernos SAE J429 es realmente escasa para su uso en las construcciones de acero, se desea aumentar su implementación en el país, y así poder llegar a disminuir costos en este tipo de construcciones.

### **1.3 Hipótesis**

Es posible sustituir pernos A-325 por J-429 en conexiones diseñadas para pernos ASTM y obtener los mismos resultados.

### **1.4 Objetivos**

#### **1.4.1 Objetivo general**

- Comparar la resistencia a cortante y deslizamiento crítico de los pernos SAE J429 y ASTM A325, mediante la modelación en ANSYS.

#### **1.4.2 Objetivos específicos**

1. Diseñar conexiones mediante las metodologías del AISC 360, utilizando pernos ASTM A325, para los casos de falla por aplastamiento, fricción y cortante.
2. Modelar por el método de elemento finito las conexiones de cortante doble de pernos ASTM A325 y SAE J429.
3. Comparar la capacidad desarrollada por los pernos A325 y J429 en cortante doble.

### **1.5 Justificación**

El acero ha demostrado ser un material bastante viable en la construcción de edificaciones por su gran resistencia, además, dichas estructuras poseen menor peso y volumen que las realizadas con otros materiales, pero en Costa Rica las

construcciones en acero son costosas debido al tipo de conexiones que se utiliza. Estos son unos de los principales elementos en estas estructuras, ya que hay varios tipos de conexiones, pero las apernadas son unas de las más sencillas debido a la mano de obra poco calificada que se necesita y además con ellas se reduce la vulnerabilidad de las edificaciones. Los estándares internacionales especifican pernos tipo ASTM, pero no se consiguen fácilmente en el país, por lo que aumentan los costos del proyecto, por eso se desea realizar la comparación entre ambos pernos que tienen características geométricas distintas pero sus propiedades mecánicas son similares.

## **1.6 Alcances y limitaciones**

En este trabajo de investigación se hará la modelación en ANSYS de los pernos SAE J429 y ASTM A325, con el fin de estudiar su comportamiento a cortante doble con una fuerza cortante máxima, aplicada de 21 toneladas, su estudio se realizará con el método de elemento finito ya que ANSYS trabaja con este método. Además, para poder realizar la modelación a cortante doble se diseñarán las dimensiones adecuadas para ambas placas con la finalidad de que soporten cargas mayores a las de los pernos, así en el momento de realizar la simulación con el programa, las placas no afecten el comportamiento de los pernos.

# CAPÍTULO I

## Capítulo I

### 1. Marco teórico

Una construcción en acero es aquella donde la mayoría de sus elementos estructurales son de acero, todas las estructuras tienen elementos básicos como lo son las columnas y vigas entre otros, lo que significa que estos diferentes elementos deben ensamblarse de alguna manera que garantice el comportamiento de la estructura tal y como fue diseñada, dicha manera se realiza por medio de conexiones. Las conexiones en los miembros de acero estructural son de gran importancia; ya que el error en estos miembros es poco común; pero si su diseño es deficiente o el detalle constructivo es escaso, se pueden generar muchas fallas.

El acero estructural tiene muchos usos en la construcción, como para la construcción de puentes, muelles, edificios entre otros, su utilización se ha popularizado ya que disminuye el costo de las estructuras debido a su gran resistencia. También, si se compara con el concreto reforzado, se puede observar que las estructuras son menos voluminosas. El primer uso del metal como base de una estructura fue en Shropshire, Inglaterra en el año 1779, donde fue construido el primer puente con hierro colado llamado Coalbrookdale.



*Ilustración 1 Puente Coalbrookdale.  
Fuente: Plasencia, 2011.*

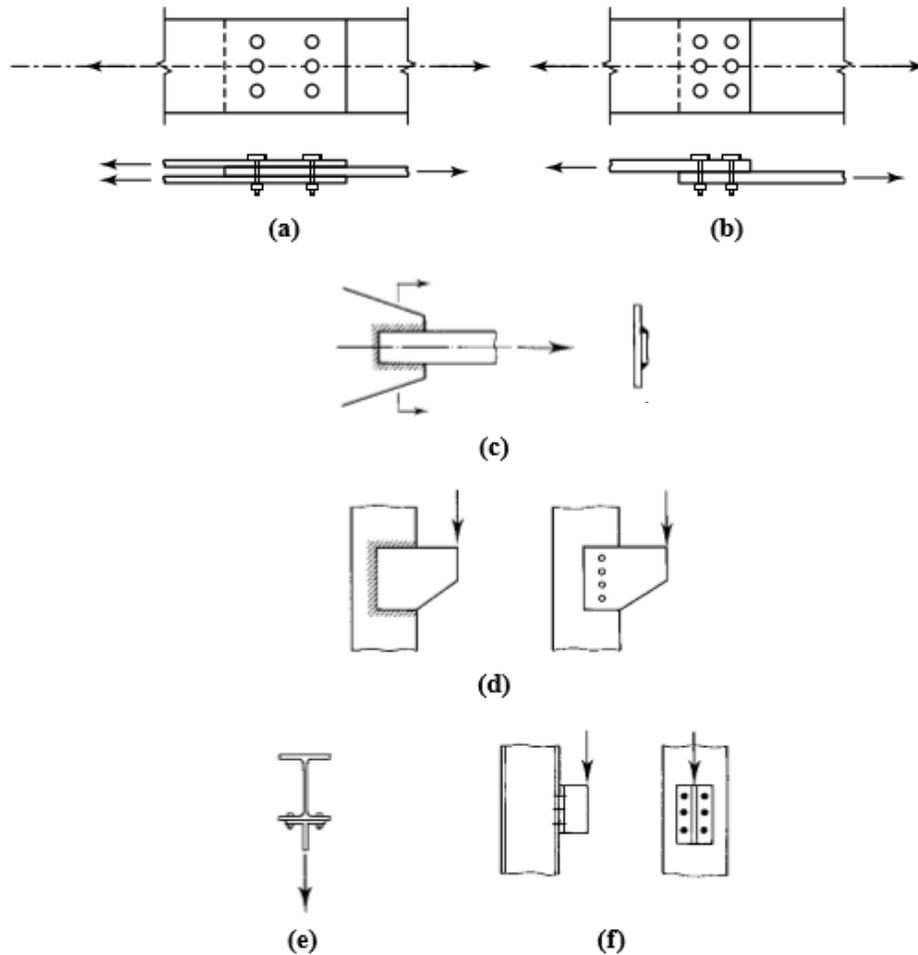
Gran parte de las estructuras de acero se conectan mediante soldadora o apernado. En el año 1947, se formó el Consejo de Investigación de Juntas Estructurales Rebordeadas y Atornilladas, su primera especificación fue emitida en 1951. En este documento se autoriza la sustitución de pernos de alta resistencia por remaches, lo que hizo que el atornillado de alta resistencia fuera de uso generalizado en estructuras de construcción; esto se debe a la facilidad de instalación de los pernos de alta resistencia en los cuales obreros poco calificados pueden instalarlos y para el remachado es necesario cuatro obreros calificados.

Es conveniente clasificar los diferentes tipos de conexiones, según el comportamiento de la carga. Los empalmes de elementos de tensión que se muestran en la figura 2 a y b sostienen los sujetadores a fuerzas que tienden a cortar el vástago del sujetador; la soldadura mostrada en la figura 2c debe resistir las fuerzas de corte. La conexión de un soporte a una brida de columna, como en la figura 2d, ya sea mediante sujetadores o soldaduras, somete la conexión a corte cuando se carga. La conexión de suspensión de la figura 2e pone los sujetadores en tensión.

La conexión mostrada en la figura 2f produce tanto cizallamiento como tensión en la fila superior de sujetadores. La resistencia de un sujetador depende de si está sometido a cizallamiento o tensión, o ambos. Las soldaduras son débiles en cizallamiento y generalmente se supone que fracasan en el cizallamiento, independientemente de la dirección de carga. (William T, 2012, p. 379)

La fuerza por sujetador o fuerza por unidad de longitud de soldadura, facilita la evaluación de la conexión; lo cual permite determinar dos categorías de conexiones. Si la línea de acción de la fuerza resultante a ser resistida pasa por el centro de gravedad de la conexión, se supone que cada parte de la conexión resiste una parte igual de la carga y la conexión se denomina conexión simple. En tales

conexiones, ilustradas en la figura 2 a, b y c, cada sujetador o cada longitud unitaria de soldadura resistirá una cantidad igual. (William T, 2012, p. 379)



*Ilustración 2. Tipos de conexiones según el comportamiento de la carga*

*Fuente: William T, 2012.*

La capacidad de carga de una conexión se puede calcular multiplicando la capacidad de cada perno por el número total de pernos. Al respecto existen varios tipos de pernos utilizados para conectar miembros de acero. Están los pernos sin tornear, también conocidos como pernos comunes, el ASTM los designa como pernos fabricados con aceros al carbono con esfuerzos similares al acero 36, su resistencia de diseño es menor que la de los remaches o pernos de alta resistencia,

el principal uso es en estructuras ligeras sujetas a cargas estáticas y en miembros secundarios de la estructura como los largueros, riostras, plataformas, armaduras pequeñas, entre otros. Los pernos de alta resistencia o estructurales son fabricados con base en carbono mediano, tratado térmicamente y aceros aleados, existen dos pernos básicos estructurales el A325 y el A490; la diferencia entre ellos es que el segundo tiene mayor resistencia por su composición.

En este proyecto se estudiarán los pernos de alta resistencia A325 y J429, por lo que se explicará de una manera más detallada este tipo de pernos.

## **1.1 Pernos estructurales**

C.Batho y E.H. Bateman sostuvieron por primera vez en 1934, que los tornillos de alta resistencia podrían emplearse satisfactoriamente para el ensamble de estructuras de acero, pero fue hasta 1947, que se fundó el Research Council on Riveted and Bolted Structural Joints of the Engeneering Foundation (consejo para la investigación de juntas estructurales remachadas y atornilladas de la fundación de ingeniería) (Csrnak, 2012). Las primeras especificaciones fueron publicadas en 1951, momento en el cual los pernos estructurales son aceptados, e inicia su implementación en las estructuras sometidas a cargas.

### **1.1.1 Tipos de juntas**

Dependiendo del tipo de carga que van a soportar los sujetadores se determina el tipo de junta por utilizar:

- Tornillos apretados sin holgura: Normalmente en las conexiones los pernos se aprietan sin holgura, esto se logra cuando los paños de una conexión se encuentran en contacto. Para estas condiciones hay diferentes grados de apretado, solo son usados cuando no se requieran pernos pre tensionados o de fricción.

- Juntas pre tensionadas: en este tipo de juntas los pernos se encuentran en esfuerzos de tensión elevados, aproximadamente el 70% de sus esfuerzos mínimos a tensión. Son utilizados en conexiones en donde se aplican las cargas totales en una dirección y luego se invierten (cargas sísmicas), cargas de fatiga donde no existe la inversión de cargas, fatiga por la tensión, este tipo de juntas no son permitidas, si se debe tomar en cuenta la resistencia al deslizamiento.

Para llegar a las juntas pretensionadas, los pernos se deben llegar a la condición de apretado sin holgura y luego se aprietan más, según alguno de estos cuatro métodos.

1. Método del giro de la tuerca: luego de que ya estar en la condición de apretado sin holgura, se le da un giro y un tercio a una vuelta completa con una llave de impacto, la cantidad de vueltas necesarias depende de su longitud y de la superficie en la que se encuentren.
2. Método de la llave calibrada: los pernos son apretados con una llave de impacto, ajustada para detenerse cuando se alcanza el par teóricamente necesario para lograr la tensión deseada, de acuerdo con su diámetro y la clasificación determinada por el ASTM.
3. Indicador directo de tensión: consiste en una rondana templada con protuberancias en una de sus caras en forma de pequeños arcos. Los arcos se aplanan conforme se aprieta el tornillo. La magnitud de la abertura en cualquier momento es una medida de la tensión del tornillo. (Csrnak, 2012)
4. Sujetadores de diseño alternativo: en este método se utilizan boquillas especiales en las llaves para ajustar las tuercas hasta el momento en el que se degüellan los extremos ranurados.

A continuación se describirán ciertas características de los pernos estructurales.

#### *1.1.1.1 Dureza*

La dureza es la capacidad que tiene un material para resistir la abrasión. Los aceros al carbono pueden usarse para estimar las propiedades de resistencia a tracción.

#### *1.1.1.2 Ductilidad*

Es la capacidad de un material para deformarse antes de presentar fracturas. Cuando un material que experimenta poca o ninguna deformación plástica, después de la fractura, se considera que es un material quebradizo.

#### *1.1.1.3 Resistencia a la tracción*

Cuando un perno falla en tensión pura, normalmente se fractura a través de la parte roscada, que es su área más pequeña, por ende, más débil, cuando se aproxima el sujetador a la resistencia máxima de la porción roscada, se deforma permanentemente. Para evitar que esto suceda, la mayoría de los pernos de acero al carbono o de aleación tienen una carga de prueba definida, que representa el rango de resistencia útil para ese sujetador en particular. La carga de prueba es una carga de tracción aplicada que el sujetador debe soportar sin deformación permanente, el perno vuelve a su forma original una vez que se retira la carga.

#### *1.1.1.4 La relación entre la tensión y el estiramiento del perno*

Se puede observar en un diagrama tenso-esfuerzo de la tensión. El acero posee una cierta elasticidad. Un perno tensado está en el rango elástico, si se retira la carga y el sujetador sigue estando dentro del rango, el sujetador volverá siempre a su forma original. Por el contrario, si la carga aplicada hace que el sujetador supere su límite de elasticidad, entra en el rango de plástico; en el que el acero ya no puede volver a su forma original si se retira la carga. (Fastenal Company, 2009)

## *Resistencia a la deformación*

Se da en el momento en el que ocurre una cantidad específica de deformación permanente. Si se aplica una carga continua, se alcanzaría un punto de tensión máximo llamado resistencia a la tracción final; luego el sujetador continúa con el cuello hacia abajo y se alarga más con una reducción. El estiramiento adicional hará que finalmente el sujetador se rompa en el punto de tensión. Mientras mayor sea la resistencia a la tracción que tengan los pernos, tienden a ser menos dúctiles.

## *Resistencia al corte*

Se refiere a la carga máxima que puede soportar un perno antes de la fractura, cuando se aplica en ángulo recto al eje del sujetador. Cuando la carga se encuentra en un plano transversal, se conoce como cortante simple. El doble cortante es una carga aplicada en dos planos donde el sujetador puede ser cortado en tres piezas.

Los planos de corte se pueden producir en la porción roscada del perno; ya que la resistencia al cizallamiento está directamente relacionada con el área de la sección neta; cantidad de material sólido del perno en el diámetro, un área más estrecha resultará en una resistencia a la cizalladura del perno más baja. En el vástago del cuerpo del perno debe estar dentro de los planos de corte para aprovechar al máximo las propiedades de resistencia.

## *Resistencia a la fatiga*

La resistencia a la fatiga es la tensión máxima que un perno puede soportar sobre una carga repetitiva antes de que se genere su falla. Un perno que es sometido a cargas cíclicas repetidas, puede romperse de manera inesperada, incluso si las cargas están muy por debajo de la resistencia del material.

Los tornillos ASTM A325 son estructurales estándar de EE.UU. Al realizar una comparación en la parte mecánica ASTM A325 y SAE J429 son idénticos.

### 1. 1.2 Pernos SAE J429

Los pernos J-429 pertenecen a las normas SAE (Sociedad de Ingenieros Automotores, existen varios tipos de estos pernos, estos se clasifican en grados dependiendo de su capacidad mecánica. En este caso se estarán utilizando de grado 5 cuyas dimensiones serán definidas en el estudio racional por realizar.



Ilustración 4 Perno J-429 grado 5  
Fuente: propia



Ilustración 3 Cabeza de perno J-429 grado 5  
Fuente:propia

#### 1.1.2.1 Propiedades mecánicas

En la siguiente tabla se puede observar los límites del perno J-429 en distintos grados del acero.

Tabla 1 Propiedades mecánicas de pernos J429.  
Traducido de [www.portlandbolt.com](http://www.portlandbolt.com)

Grado	Diámetro normal pulgadas	Tamaño completo de carga de prueba. (psi)	Limite elástico mín. (psi)	Resistencia a la tracción mín. (psi)
1	1/4 a 1-1/2	33000	36000	60000
	1/4 a 3/4	55000	57000	74000
2	más de 3/4 a 1-1/2	33000	36000	60000
5	1/4 a 1-1/2	85000	92000	120000
	más de 1 a 1-1/2	74000	81000	105000
8	1/4 a 1-1/2	120000	130000	150000

### 1.1.2.2 Requisitos químicos

En la siguiente tabla se puede observar la composición química de este tipo de pernos dependiendo de su grado.

Tabla 2 Requisitos químicos.  
Traducido de [www.portlandbolt.com](http://www.portlandbolt.com)

Grado	Material	Carbón, %.	Fosforo, %.	Sulfuro, %.	Marca
1	Acero de bajo carbono o carbono medio.	0.55 Max	0.030 máx.	0.050 máx.	N/A
2	Acero de bajo carbono o carbono medio.	0.15 - 0.55	0.030 máx.	0.050 máx.	N/A
5	Acero de carbono medio.	0.28 - 0.55	0.030 máx.	0.050 máx.	
8	Acero de aleación de carbono medio.	0.28 - 0.55	0.030 máx.	0.050 máx.	

### 1.1.3 Pernos A325

Estos pernos pertenecen a las normas ASTM, que es una sociedad americana de pruebas y materiales es decir esta desarrolla y publica normas técnicas para una gama de materiales, productos, sistemas y servicios.

### 1.1.3.1 Propiedades mecánicas

Tabla 3 Propiedades mecánicas pernos A-325. Traducido de [www.portlandbolt.com](http://www.portlandbolt.com)

Diámetro	Resistencia a la tracción, Ksi.	Limite elástico min, Ksi.	Elongación %, mín.
1/2 a 1	120 min	92	14
1 1/8 a 1 1/2	105 min	81	14

### 1.1.3.2 Rendimiento mecánico

A continuación, se presenta una tabla de las tensiones según el diámetro del perno.

Tabla 4 Rendimiento mecánico por diámetro. Traducido de [www.portlandbolt.com](http://www.portlandbolt.com)

Diámetro, pulg.	Tensión de rotura, lbs.	Tracción, lbs.
1/2	13,054	17,028
5/8	20,792	27,12
3/4	30,728	40,08
7/8	42,504	55,44
1	55,752	72,72
1 3/8	61,803	80,115
2 3/4	78,489	101,745
1 5/8	93,555	121,275
5 1/2	104,814	147,525

### 1.1.3.3 Requisitos químicos

Elemento	Acero con aleación de carbono	Acero con aleación de carbono	Aleación de acero	Acero con aleación de boro
Carbon	0.30 - 0.52%	0.30 - 0.52%	0.30 - 0.52%	0.30 - 0.52%
Manganesio, min	0.60%	0.60%	0.60%	0.60%
Fosfor, max	0.04%	0.04%	0.04%	0.04%
Sulfuro, max	0.05%	0.05%	0.04%	0.04%
Silicon	0.15-0.30%	0.10 - 0.30%	0.15 - 0.35%	0.15 - 0.35%
Boro		0.0005 - 0.003%		0.0005 - 0.003%
Aleación de elementos			*	*

*Ilustración 5 Propiedades químicas.*

*Traducido de [www.portlandbolts.com](http://www.portlandbolts.com)*

### 2.1.3.4 Disponibilidad en pernos ASTM A325 y resistencia

Los pernos ASTM A325 están disponibles en diámetros de ½ a 1-1/2 pulgadas, en el caso de diámetros mayores a 1-1/2, debe considerarse las especificaciones de ASTM A449, con una resistencia a la tracción mínima de 120.000 PSI para diámetros de una pulgada y menos y 105.000 PSI para tamaños de más de una pulgada a 1-1/2.

Existen dos tipos de materiales para los pernos ASTM A325, los cuales son los siguientes:

- Tipo 1: es un acero de carbono medio y puede ser galvanizado.
- Tipo 3: es un acero resistente a la intemperie; ofrece resistencia a la corrosión atmosférica similar a la de los aceros ASTM A242 o A588. Los tornillos A325 de tipo 3 se marcan como "A325" para distinguirlos del estándar.

A continuación, se brindan otras características de los pernos por evaluar.



*Ilustración 6 Pernos A325.*

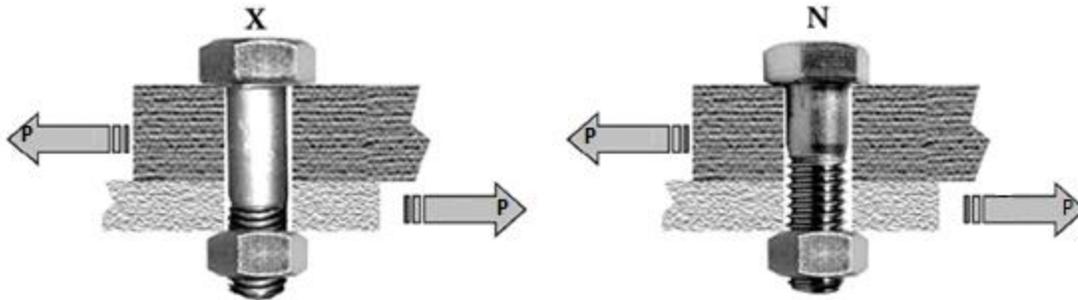
*Fuente: propia..*

- Los pernos A325 tienen una configuración de cabeza hexagonal pesada que proporciona una superficie de apoyo amplia sobre la cual se distribuye la carga.
- La sección más débil de los sujetadores estándar de acero al carbono, se ubica a través de la región roscada, esto puede crear una conexión de tracción más fuerte. La longitud de la parte no roscada del cuerpo en los pernos A325 está diseñada para ser mayor por lo que las longitudes de rosca son más cortas que su tornillo hexagonal.
- Para ambos pernos se necesita mano de obra poco calificada.
- Ninguno necesita pernos de montaje.
- La diferencia en la longitud de la rosca genera cambios en la resistencia al corte.

## **1.2 Planos de falla**

Los siguientes diagramas muestran la diferencia entre los planos de corte de los pernos.

Cuando la fuerza está actuando a través del cuerpo, el plano en el que se encuentra la fuerza es en el plano X, mientras que el perno tiene su plano de corte a través de la porción roscada se encuentra en el plano N.



*Ilustración 7 Planos de corte en pernos A325 y J429*

*Fuente: Alejandro Verdugo.2008.*

Perno X tiene el área de la sección transversal en el vástago (diámetro del cuerpo), el diámetro mínimo del cuerpo es 0,729 pulgadas. Aplicando los principios de geometría se puede calcular el área de un círculo con este diámetro. El perno X tiene un área de sección transversal de material de 0,417 pulgadas cuadradas. Para el cálculo del perno N, se debe utilizar el área de raíz que es de 0.302 pulgadas cuadradas. Estos valores se multiplican por 72.000 PSI cuyo resultado es de 30,000 y 21,740 libras respectivamente.

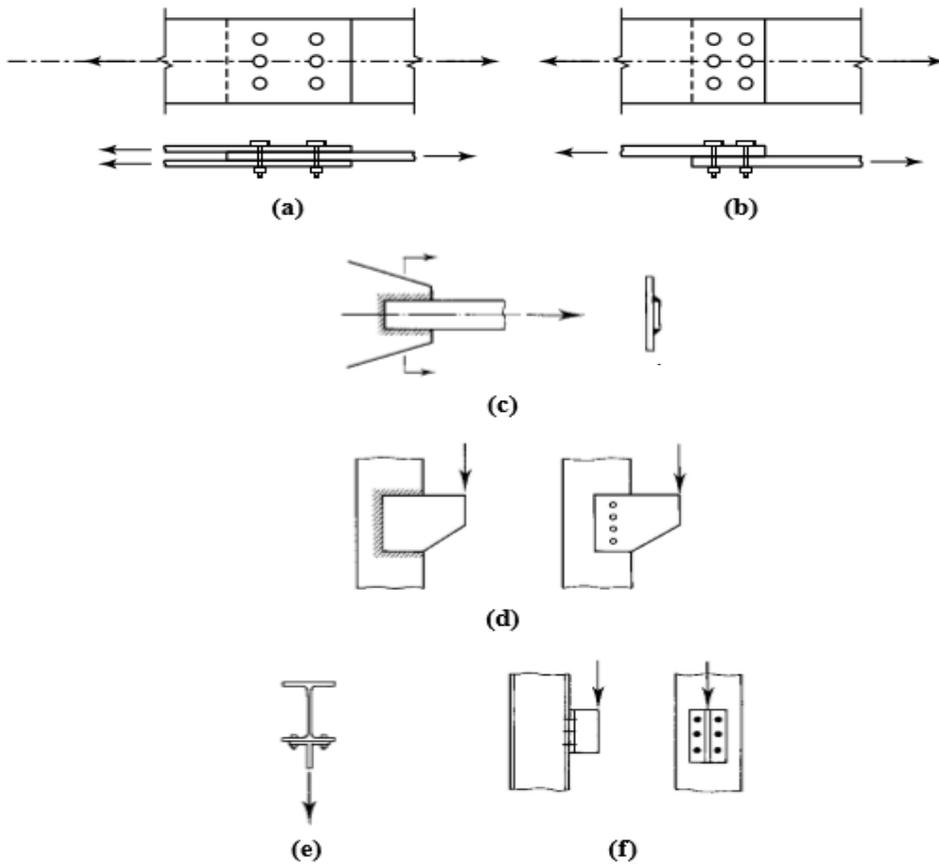
Al asegurar la carga de cizallamiento se aplica al cuerpo del perno, es decir en el plano X, la resistencia al cizallamiento puede mejorar por 8,260 libras. Si la aplicación requiere que el vástago esté en el plano de cizallamiento, sustituyendo un Grado 5 con rosca larga, colocaría las roscas en el plano de corte, resultando en 8,260 libras. La reducción de la resistencia al corte se observa en los dibujos y planos que indican la estructura con una designación X que indica que las roscas están excluidas del plano de corte y una N que las roscas pueden estar incluidas en el plano de cizallamiento.

### **1.3 Tornillos de control de tensión**

Los pernos de control de tensión que indican indirectamente la tensión, el más común es el perno de torsión o perno de control de tensión (TC). El perno se sostiene desde el extremo de la tuerca mediante una herramienta de ensamblaje mientras que un tornillo interior sujeta una sección de estría conectada al extremo del perno. Al girar la tuerca y apretar el sujetador, se logra el par de torsión designado, la ranura se quita, lo que permite una inspección rápida, si no se encuentra ranura el perno está adecuadamente apretado.

Es conveniente clasificar los diferentes tipos de conexiones según el comportamiento de la carga. Los empalmes de elementos de tensión que se muestran en la figura 8 a y b sostienen los sujetadores a fuerzas que tienden a cortar el vástago del sujetador. La soldadura mostrada en la figura 8 c debe resistir las fuerzas de corte. La conexión de un soporte a una brida de columna, como en la figura 8 d, ya sea mediante sujetadores o soldaduras, somete la conexión a cizalladura cuando se carga. La conexión de suspensión de la figura 4e pone los sujetadores en tensión.

La conexión mostrada en la figura 8 f produce tanto cizallamiento como tensión en la fila superior de sujetadores. La resistencia de un sujetador depende de si está sometido a cizallamiento o tensión, o ambos. Las soldaduras son débiles en cizallamiento y generalmente se supone que fracasan en el cizallamiento, independientemente de la dirección de carga. (William T, 2012, p. 379)



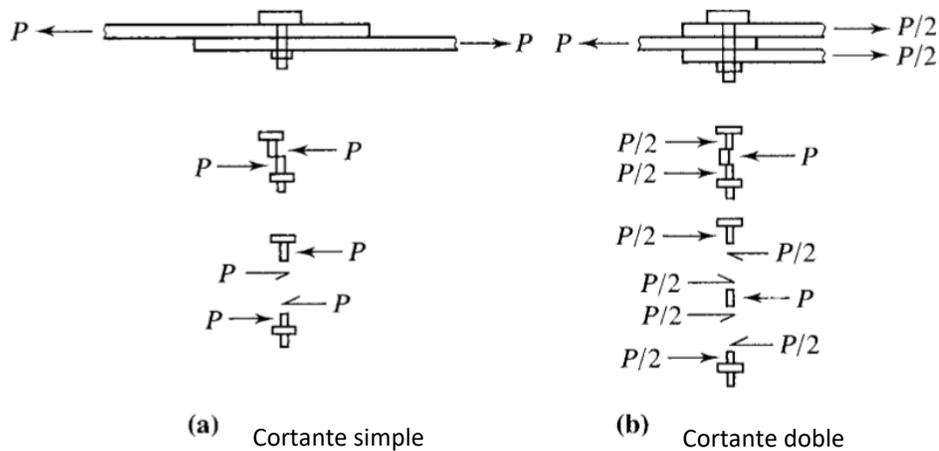
*Ilustración 8 Tipos de conexiones*  
*Fuente: William T, 2012*

## 1.4 Modos de falla

En las conexiones apernadas existen diferentes modos de falla cuando estos son sometidos a cortante. Existen dos categorías de falla del perno y falla de las partes que están conectadas.

En este proyecto de investigación, el tipo de falla que se busca es la del perno, por esta razón se diseñan las placas para evitar la falla del medio. Los principales modos de esfuerzo para que el perno falle son a cortante simple y cortante doble.

El esfuerzo por cortante simple se produce cuando se aplican fuerzas perpendiculares al eje del perno, y es cortado a través de su sección transversal, por un esfuerzo cortante, solo una sección transversal es el que resiste la fuerza aplicada, como se puede observar en la figura 9 a, y a cortante doble cuando dos secciones transversales resisten la fuerza aplicada, como se puede observar en la figura 9 b. En este proyecto se realizará el diseño y simulación en *solidworks* y *ANSYS* a cortante doble.



*Ilustración 9 cortante simple y doble*  
*Fuente: William T, 2012*

El esfuerzo cortante promedio en este caso será:

$$f_v = \frac{P}{A} = \frac{P}{\pi d^2 / 4} \quad \text{Ec. 1}$$

Donde;

P: es la carga que actúa sobre un sujetador individual.

A: es el área de la sección transversal del sujetador

d: es su diámetro.

La carga se puede escribir como

$$P = f_v A \quad \text{Ec. 2}$$

## Carga de doble cizallamiento

$$P = 2f_v A$$

Ec. 3

Para que ocurra una carga de doble cizallamiento en la conexión es necesario un aumento de espesores de material a la conexión; de esta manera aumenta el número de planos de cizallamiento y a su vez reducirá aún más la carga en cada plano. Sin embargo, esto también aumentará la longitud del sujetador y podría someterlo a flexión. (William T, 2012, p. 381)

Otros modos de falla en las conexiones por corte implican el fallo de las piezas conectadas y caen en dos categorías generales

**1.** Falla resultante de una tensión excesiva, cortante o flexión en las partes que están conectadas. En los miembros que se encuentran a tensión se debe investigar la tensión en el área bruta como en el área neta efectiva. Además, es necesario considerar también la cizalladura de bloques y ser analizados en conjunto a las conexiones de viga a columna en las que la brida superior de la viga está protegida.

Dependiendo del tipo de conexión y carga, los accesorios de conexión, tales como placas de refuerzo y ángulos de encuadre, pueden requerir un análisis de cizallamiento, tensión, flexión. El diseño de una conexión de miembro de tensión usualmente se hará en paralelo con el diseño del propio miembro porque los dos procesos son interdependientes.

**2.** Fallo de la pieza conectada debido al perno: Si el orificio es ligeramente mayor que el sujetador y se supone que el sujetador se coloca libremente en el orificio, el contacto entre el sujetador y la parte conectada existirá sobre aproximadamente la mitad de la circunferencia del sujetador cuando se aplica una carga. Esta condición se ilustra en la Figura 11.

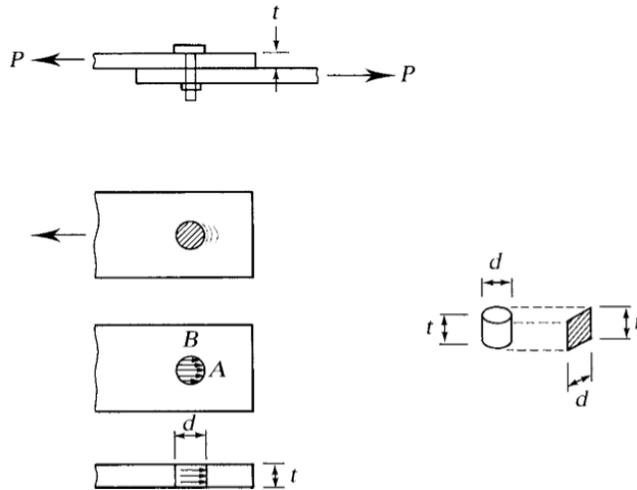


Ilustración 10 Dimensiones del agujero  
Fuente: William T, 2012.

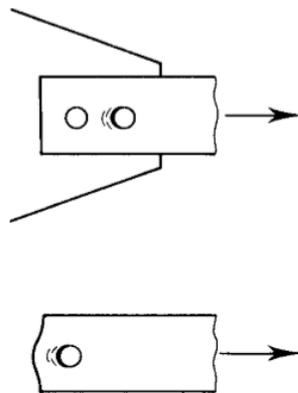


Ilustración 11 Falla de borde.  
Fuente: William T, 2012.

Las situaciones pueden complicarse por la presencia de un perno a un borde de cualquier placa ya que se puede generar una falla de borde en la dirección de la carga.

#### 1.4.1 Requisitos de rendimiento, espaciado y distancia de borde

La resistencia del cojinete es independiente del tipo de sujetador; ya que la tensión se encuentra en la parte que está conectada en lugar del sujetador. Por lo que se considera la resistencia de los cojinetes y sus requerimientos de

separación y distancia de los bordes, que también son independientes del tipo de sujetador, antes de la resistencia a la tracción y tensión. (William T, 2012, p. 382)

Un posible modo de fallo resultante de una placa es el desgarro por cizallamiento al final de un elemento conectado, como se muestra en la figura 14 a. Si la superficie de falla está idealizada como se muestra en la figura 14.b, la carga de falla en una de las dos superficies es igual a la tensión de fractura por cizallamiento en función del área de corte. (William T, 2012, p. 382)

$$\frac{R_n}{2} = 0.6F_u l_c t \quad \text{Ec. 6}$$

Donde,

$0.6F_u$  = Tensión de rotura por cizallamiento de la parte conectada.

$l_c$  = Distancia del borde del orificio al borde de la parte conectada.

$t$  = espesor de la pieza conectada.

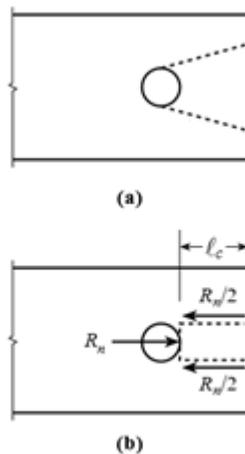


Ilustración 12 Superficie de Falla  
Fuente: RCSC, 2009, William T, 2012.

Resistencia nominal

$$R_n = 2(0.6F_u l_c t)$$

$$R_n = 1.2F_u l_c t \quad \text{Ec. 7}$$

El desgarre por cizallamiento puede tener lugar en el borde de una parte conectada o entre dos orificios en la dirección de la carga del cojinete. Para evitar el alargamiento excesivo del orificio, se coloca un límite superior sobre la carga de apoyo dada por la Ecuación 7 (William T, 2012, p. 383).

Límite superior es proporcional al área de apoyo proyectada multiplicada por la tensión de fractura.

$$R_n = c * \text{área de apoyo} * F_u$$

$$R_n = c * dt * F_u \quad \text{Ec. 8}$$

Dónde,

C = una constante

D = diámetro del perno

T = espesor de la pieza conectada

La Especificación AISC usa la Ecuación 7 para la resistencia de los pernos, sujetos a un límite superior dado por la Ecuación 8. Si la deformación excesiva a la carga de servicio es una preocupación, por lo que generalmente, C se toma como 2.4. Este valor corresponde a un alargamiento de agujero de aproximadamente 1/4 de pulgada (RCSC, 2009) (William T, 2012, p. 383).

Resistencia nominal de los cojinetes de un único perno

$$R_n = 1.2F_u l_c t \leq 2.4dtF_u \quad \text{Ec. 9 (AISC Ecuación J3-6a)}$$

Dónde,

c = distancia libre, en la dirección paralela a la carga aplicada, desde el borde de

El agujero del perno al borde del agujero adyacente o al borde del material

$t$  = espesor de la parte conectada

$F_u$  = tensión de tracción final de la pieza conectada (no el perno)

La ecuación J3-6a de AISC es válida para orificios (agujeros de 1/16 pulgadas más grande que el diámetro del perno) estándar, sobredimensionados, de ranura corta y ranuras largas con la ranura paralela a la carga. En este caso se diseñará con agujeros de 1/16 de pulgadas más grande que el diámetro del perno.

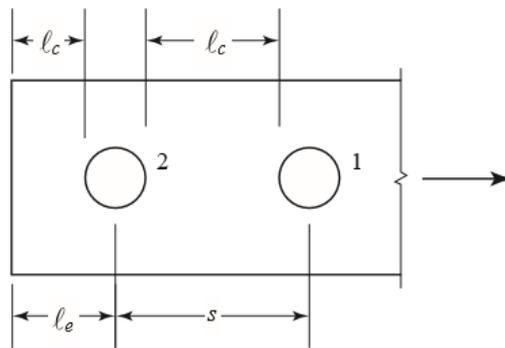


Ilustración 13 Nomenclatura en las placas, separación entre agujeros.  
Fuente: William, 2012.

Para el diseño de carga y factor de resistencia, el factor de resistencia es  $\phi = 0.75$ , y la resistencia de diseño es

$$\phi R_n = 0.75 R_n \quad \text{Ec. 10}$$

Para el diseño de resistencia admisible, el factor de seguridad es  $\Omega = 2.00$ , y la resistencia permisible es

$$\frac{R_n}{\Omega} = \frac{R_n}{2.00} \quad \text{Ec. 11}$$

La figura 13 ilustra la distancia  $l_c$ . Al calcular la fuerza de apoyo para un perno, use la distancia desde ese perno al perno o borde adyacente en la dirección de la carga del cojinete en la parte conectada. Para el caso mostrado, la

carga del rodamiento estaría en el lado izquierdo de cada agujero. La resistencia para el perno 1 se calcula con  $l_c$  medida al borde del perno 2, y la resistencia para el perno 2 se calcula con  $l_c$  medida al borde de la parte conectada. (William T, 2012, p. 384)

Para los pernos de borde,

$$l_c = l_e - \frac{h}{2} \quad \text{Ec. 12}$$

Para otros pernos,

$$l_c = s - h \quad \text{Ec. 13}$$

Dónde,

$l_e$  = distancia del borde al centro del agujero

$s$  = separación entre centros de los orificios

$h$  = diámetro del orificio

Para aquellos casos en los que la deformación no es una consideración de diseño, y para agujeros de ranura larga con la ranura perpendicular a la dirección de la carga, AISC da otras expresiones de resistencia. Al calcular la distancia  $l_c$ , utilice el diámetro real del orificio (que es 1/16 pulgada más grande que el diámetro del perno). (William T, 2012, p. 384)

Diámetro de orificio

$$h = d + \frac{1}{16} \text{ in} \quad \text{Ec. 14}$$

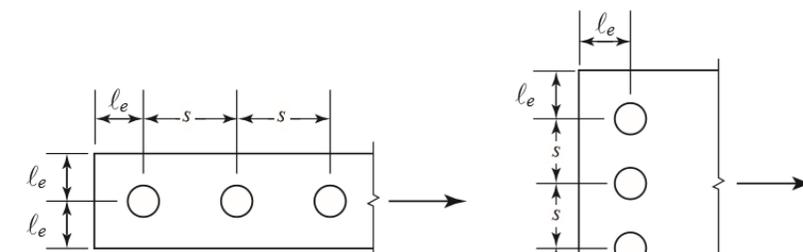


Ilustración 14 Distancia del borde al centro del agujero.  
Fuente: William, 2012.

#### 1.4.2 Requisitos de espaciado y distancia entre bordes

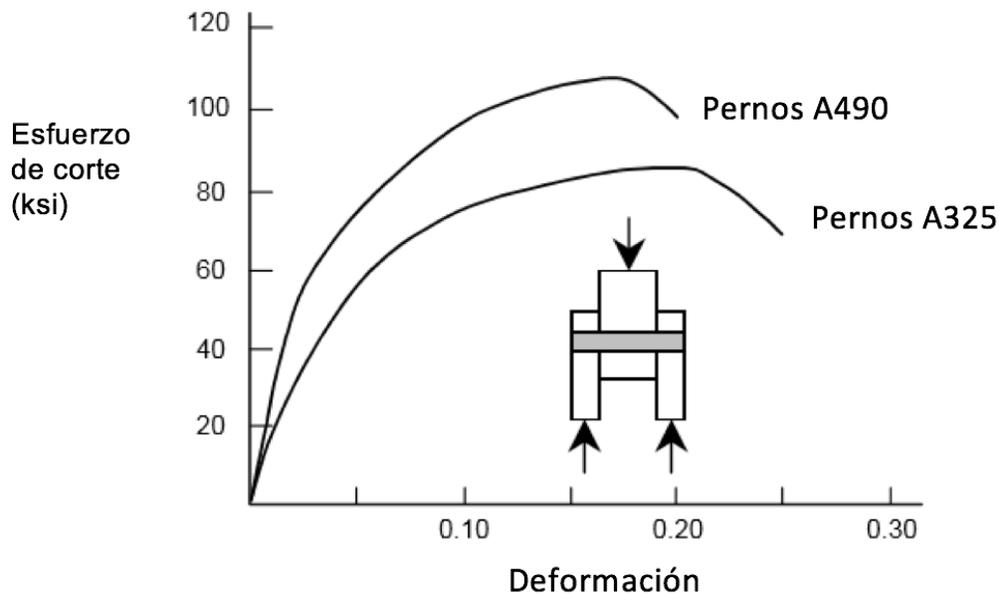
Para mantener las distancias entre las tuercas de los pernos y para proporcionar espacio para los casquillos de la llave, el AISC J3.3 se requiere:

- La separación entre centros de los sujetadores sea no menos de  $22/3d$  y preferiblemente no menor de  $3d$ , donde  $d$  es El diámetro del sujetador.
- Las distancias mínimas de los bordes, medidas desde el centro del agujero, se indican en la tabla J3.4 de AISC en función del tamaño del tornillo.
- El espaciado y la distancia del borde por considerar, denotados  $s$  y  $l_e$ , se ilustran en la Figura 7.9 (William T, 2012, p. 385)

#### 1.4.3 Pernos en corte

La respuesta de un perno cargado con una fuerza cortante se muestra en la figura 15 para tornillos A325 (uno de los estudiados en este proyecto) y A490; el tipo de prueba ilustrada se realiza utilizando placas de conexión que se cargan en compresión. Existen ensayos similares, que utilizan placas de conexión cargadas en tensión, estas muestran fuerzas de corte en los pernos ligeramente inferiores. La diferencia es el resultado de la presión de la placa, en las pruebas de la plantilla de la tensión, que crea un estado combinado de la tensión, corte más tensión en el perno. La mejor medida de la capacidad de corte de un perno es su resistencia al corte final y el uso de algunos de los denominados límites de elasticidad del cerrojo no es apropiado.

Los pernos no trabajan a límite de fluencia, se evalúan a la capacidad última, el gráfico especifica que el material o el acero no es línea, cuando el acero es así hay algunos procedimientos que se pueden utilizar para obtenerlo, es el 2% de la longitud, lo que se quiere decir aquí es que estos métodos no son aplicables a menos que se trabajes con la resistencia última.



*Ilustración 15 Carga Típica de corte vs curvas de deformación A325 y A490.*

*Fuente Guía de diseño 17, 2017*

Los ensayos demuestran que la resistencia al corte de un perno está relacionada con su resistencia a la tracción final. El valor medio de la relación entre la resistencia al corte de los pernos y la resistencia a la tracción de los pernos es 0,62, desviación estándar de 0,03. En las pruebas de corte de pernos el nivel de pretensión presente inicialmente en el perno no afecta a la resistencia al corte; esto se debe a que los alargamientos utilizados son muy pequeños como para tomarla en cuenta, se toma en cuenta cuando el perno experimenta una deformación por cortante.

Con base en ensayos de resistencia al corte en diversos niveles de pretensión inicial, se ha logrado comprender que las pretensiones de los pernos son prácticamente nulas cuando el perno alcanza su resistencia final al corte. Si la capacidad de una conexión se basa en la resistencia al cizallamiento final de los pernos, como ocurre en una conexión denominada de cojinete, la inspección

de la pretensión es inútil, incluso en los casos en que los pernos estaban pretensados.

La resistencia al corte de pernos está relacionada con la zona de corte disponible, si las roscas de los pernos son interceptadas por uno o más planos de corte, es decir que el área de corte es menor a que si la zona no roscada es interceptada. Ensayos en los que están presentes dos planos de cizallamiento, afirman la idea de que la resistencia al corte del perno es un reflejo directo del área de cizalladura disponible.

Un plano de cizalladura pasa a través de las roscas y otro a través del vástago, usando un área de cizallamiento total que es la suma del área de la raíz del hilo más el área del vástago del perno, lo cual apoya la posición de que la relación de resistencia entre la falla de cizalladura a través de los hilos y el fallo de cizallamiento a través del vástago era de aproximadamente 0.70. Es decir, la relación entre el área de la raíz del hilo y el área del vástago para los tornillos de los tamaños estructurales habituales, en pruebas de cizallamiento único esta relación es más alta alrededor de 0.83. Tanto la Especificación RCSC como la Especificación LRFD AISC utilizan el valor más alto redondeado a 0.80.

La regla de LRFD AISC para la fuerza de diseño de un perno en corte sigue la discusión presentada hasta ahora. La regla se da en el Artículo J3.6 de la Especificación, como sigue:

$$\Phi R_n = \Phi F_v A_b \quad \text{Ec. 15}$$

Donde,

$\Phi R_n$  = Tensión de tracción de diseño en tensión, kips

$\Phi$  = factor de resistencia, tomado como 0,75

$F_v$  = Resistencia nominal al corte, ksi

$A_b$  = área de sección transversal del perno correspondiente al diámetro nominal, in<sup>2</sup>

El cálculo del área debe reflejar el número de planos de corte b presentes.

Según lo indica la tabla J3.2 de la Especificación, la resistencia nominal al cizallamiento del perno se ve afectada:

- Cuando se excluyen las roscas del plano de cizallamiento.

Para los pernos A325 o A490 debe tomarse como 60 ksi, cuando se excluyen las roscas del plano de corte. Estos valores corresponden a 0.50 veces la resistencia a la tracción final del perno de 120 ksi para los pernos A325.

- Cuando las roscas están presentes en el plano de cizallamiento

La resistencia nominal al cizallamiento debe tomarse como 48 ksi para los pernos A325, respectivamente. Los últimos valores corresponden al 80 % del caso excluido. La relación adecuada es de 0.50 en lugar de 0.62; esto se debe a que si sólo hay un perno, este se lleva toda la carga de cizallamiento, si están presentes dos pernos alineados en la dirección de la carga, cada uno lleva la mitad de la carga total. En el caso de este proyecto se evaluará un solo perno en la conexión esto quiere decir que se llevará toda la carga, y se utiliza 0.50.

Cuando la línea de pernos es mayor a dos, el último perno será el más cargado. El efecto aumenta con el número de pernos en la línea, incluso las juntas relativamente cortas deben reflejar este efecto. De acuerdo con esto, la relación entre la resistencia al corte de los pernos y la resistencia a la tracción final del perno es descontada en un 20 % para tener en cuenta el efecto de la longitud de la junta. El producto  $0.62 \times 80\%$  es 0.50, que es el valor utilizado en la regla AISC para la capacidad de corte. Si la junta es de 50 pulgadas o más, se aplica una reducción adicional del 20 %. El factor de resistencia utilizado para los pernos en cizalla Ec. 21 es  $\phi=0.75$ . El factor de resistencia recomendado es de 0.80.

#### 1.4.4 Métodos de tensión

Los sujetadores roscados contienen los materiales sólo cuando están sometidos a la cantidad adecuada de tensión. Existen una serie de métodos de

tensión, los tradicionales son suficientes para determinar de forma consistente y precisa la tensión del perno, se realiza un sobre diseño de las juntas evitando fallas catastróficas a un costo menor que el control del proceso de montaje y los métodos complicados con un costo elevado, sin embargo, las tendencias actuales están alejándose del uso del sobre diseño.

Las demandas crecientes en cuanto a costo, relación entre la fuerza y el peso, la seguridad del producto, el desempeño del producto y la seguridad ambiental han ejercido presión sobre los diseñadores, fabricantes y ensambladores para aumentar la eficiencia del diseño. Esta tendencia ha llevado a la invención de más opciones en el control de la precarga del perno (Fastenal Company, 2009)

El apriete de un perno sigue una secuencia definida de eventos y causa resultados predecibles dentro del sujetador. Si la tuerca y la cabeza del perno están firmemente asentadas contra materiales no compresibles, la acción torsional de apriete del conjunto estira el perno, creando de este modo tensión en el perno que se requiere para hacer una fijación. Al controlar el par, el giro o el estiramiento, se puede controlar la acumulación de tensión. Por lo que un método que dirija el control de la tensión será más caro. Algunas opciones para los controles de tensión durante el montaje son: control de par, control de par y giro, control de estiramiento y control de tensión directa. (Fastenal Company, 2009)

### **1. 5 Elemento finito.**

El método del elemento finito se define como una técnica numérica utilizado para la resolución de ecuaciones diferenciales, parciales o que pueden ser formulados por medio de una minimización de un cálculo variacional de problemas de ingeniería y física. Es una herramienta de análisis que permite obtener soluciones aproximadas a una gran variedad de problemas de mecánica

La premisa básica es que una región de solución puede ser modelada analíticamente reemplazándola con un arreglo de elementos discretos. Esto permite reducir un número infinito de incógnitas del problema a uno, con un número finito de incógnitas. Por otro lado, el método también permite variar las condiciones

(parámetros elásticos, viscosidad, densidad, temperatura, etc.) de los elementos individualmente o en grupos, de acuerdo con las ecuaciones constitutivas que se empleen en el problema. (Valero A. F., 2004)

### **1.5.1 Historia**

Se dice que Arquímedes utilizó métodos similares al del elemento finito para la determinación del volumen de ciertos sólidos, la relación de sus técnicas con el elemento finito es bastante escasa, se puede decir que la medida del volumen de un objeto es una función escalar de su geometría, si se sustituye es medida por energía y objetos por elementos, se podrían asemejar un poco más a lo establecido por el elemento finitos. Esta dice que la energía de un sistema es igual a la suma de la energía de cada elemento, pero para la época de Arquímedes se necesitaban las derivadas que se desarrollaron 20 siglos después.

En 1943, se publicó un artículo de Hrenikoff, donde presenta una solución para problemas elásticos; usando el método de trabajo del marco. La creación del elemento finito se enfocaba principalmente en el análisis estructural de las aeronaves entre 1950 y 1962, cuando trabajó en la Boeing perfeccionando el método por Rigidez Directo. Turner y otros investigadores desarrollaron las matrices de rigidez para armaduras, columnas y otros elementos cuyos resultados fueron publicados en 1956. En 1960, se utilizó por primera vez el término de elemento finito por Clough.

En la década de los 60, el método se utilizó para obtener respuestas aproximadas en análisis de esfuerzos, flujos de fluidos, transferencia de calor, entre otras áreas. El primer libro sobre este tema fue publicado en 1960, cuyos autores fue Zienkiewicz y Cheng. El día de hoy ya se ha desarrollado el elemento finito de tal forma que existen programas que basan su programación, desarrollo y análisis con este lo es el programa Solidworks.

## 1.5.2 Teorías de falla

Se entiende como teoría de falla a los criterios utilizados en el momento de determinar los esfuerzos estáticos permisibles en materiales, estructuras o componentes de maquinaria. Dichas teorías son utilizadas en análisis de elementos finitos para determinar el estado multiaxial de esfuerzos en un elemento. Dependiendo de la función que dicho material va a cumplir, se diseña para que salga de su rango elástico o permanezca en él. Como en este caso los pernos se diseñan para que el material llegue a su esfuerzo último, saliéndose así de su rango elástico.

Dependiendo de si el material es dúctil o frágil se utilizan distintas teorías, para materiales dúctiles, las cuales serían las siguientes:

### 1.5.2.1 Teoría de la tensión tangencial máxima

También conocido como el criterio de Tresca, indica que la deformación plástica inicia en el momento en el que el esfuerzo cortante máximo rebasa un valor dado llamado K, definido por:

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} = k \quad \text{Ec. 16}$$

O también se podría decir de la siguiente manera, que un material falla cuando:

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_y}{2} = k \quad \text{Ec.17}$$

Siendo  $\sigma_y$  la tensión de límite elástico de la pieza.

$\sigma_1$  y  $\sigma_3$  la mayor y menor tensión principal en el punto considerado.

### 2.5.2.2 Teoría de la máxima energía de distorsión (criterio de Von Mises)

Se puede considerar de la misma manera que Tresca pero Von Mises es menos conservador, este criterio nos indica que si los esfuerzos a compresión y tensión de un material se encuentran dentro del área de la siguiente imagen este material no se plastificará.

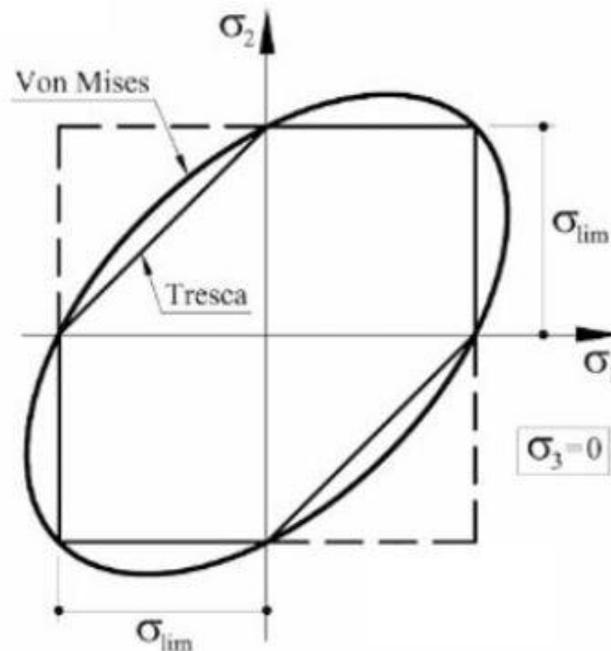


Ilustración 16 Comparación de diagrama de Tresca y diagrama de Von Mises. de Cevera, Miguel.

Si el valor del esfuerzo efectivo o tensión equivalente de Von Mises es mayor que la tensión necesaria para la fluencia del material, el material ha entrado en el rango plástico. Esto se identifica fácilmente, en los programas de elementos finitos en los modelos, mediante los llamados mapas de cedencia, que clasifican por regiones de colores, las distintas zonas según las magnitudes del esfuerzo (Velázquez, 2003, pág. 882).

En términos de tensiones se puede describir con la siguiente ecuación:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{1}{2}((\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2)} \quad \text{Ec.18}$$

Donde sigma eq es el estado de los esfuerzos equivalentes Von Mises y el resto de las sigmas representan el estado de los esfuerzos tangenciales en los ejes coordenados.

Y para los materiales frágiles, que son aquellos que presentan poca deformación antes de romperse, son la teoría del máximo esfuerzo normal y el criterio de falla de Mohr, en este caso no serán explicados ya que solo se utilizará el criterio de Von Mises.

## CAPÍTULO II

## **Capítulo II**

### **2. Marco metodológico**

#### **2.1 Paradigma, enfoque metodológico y método(s) de investigación propuestos**

El trabajo de investigación sobre la comparación de los pernos ASTM A325 y SAE J429 utiliza un método de investigación denominado científico, ya que se basa en argumentos lógicos compuesto de proposiciones, comparando la capacidad desarrollada por ellos en cortante doble, con la finalidad de conseguir más información sobre la capacidad del perno SAE J429, y así poder implementarlo en la construcción de estructuras en el país.

Se emplea este método debido a que es un proceso ordenado, sujeto a criterios, principios y normas que permiten lograr el objetivo propuesto obteniendo los resultados deseados del análisis de la simulación de conexiones con dichos pernos en el programa Ansys, el cual trabaja bajo la técnica numérica del elemento finito. Previamente a la simulación se realizará una evaluación racional para el diseño de la conexión con la finalidad de obtener una resistencia menor en los pernos a los distintos tipos de falla como los es la fricción, aplastamiento, cortante que opera en las placas.

Utilizando dos tipos de investigación que son el exploratorio y correlacionales se pretende dar a conocer un tema poco estudiado como es la resistencia en cortante doble de los pernos SAE J429, la manera con la que dicha resistencia se obtendrá será por medio de la comparación de capacidades desarrolladas por los pernos ASTM A325 y SAE J429, en diferentes planos de cortes como lo son el plano X y N, es decir, en el vástago del perno y en la zona roscada de ellos respectivamente.

## 2.2 Categorías de análisis de la investigación (operacionalización de variables)

A continuación, se identifican las variables del proyecto de investigación de la simulación de falla de las conexiones previamente mencionadas.

Tabla # 1 Categoría de análisis

Objetivo	Actividad	Variable
Diseñar conexiones mediante las metodologías del AISC 360 utilizando pernos ASTM A325 y SAE J429, para los casos de falla por aplastamiento, fricción y cortante, en los planos de conexión N	Diseñar en Excel la conexión, obteniendo así las resistencias de los elementos de esta.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Grado del acero de los pernos.</li> <li>2. Dimensiones de los pernos a emplear.</li> <li>3. Tipo de conexión a estudiar</li> <li>4. Dimensiones de las placas a emplear.</li> <li>5. Tipos de falla (pandeo de la placa, falla por fricción, cortante y aplastamiento de la placa y los pernos).</li> </ol>
Modelar en Ansys las conexiones de cortante simple de pernos ASTM A325 y SAE J429	Simulación de las conexiones previamente diseñadas en distintos planos de corte	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Carga máxima admisible</li> <li>2. Fricción máxima admisible</li> </ol>

Fuente: Propia.

Esta tesis será dividida de la siguiente manera

- Investigación teórica.
- Diseño la conexión en Excel, guiándonos del procedimiento del AISC 360.
- Obtención de dimensiones de la conexión.
  - Dimensiones de la placa.
  - Dimensiones del procedimiento por utilizar en la conexión.
  - Determinación de las fuerzas por implementar en el momento de la simulación con ANSYS.
- Modelación de la conexión en *SolidWorks*.
- Implementación del *Software ANSYS* para la obtención de resultados finales.
  - Definir tipo de estudio a realizar.
  - Configuración de los materiales por utilizar.
  - Generación del mallado del modelo.
  - Introducción de Fuerzas y restricciones.
- Análisis final de los resultados obtenidos de los distintos estudios realizados en ANSYS.
- Obtención de conclusiones y recomendaciones.

### **2.3 Población y muestra. Técnicas de muestreo**

La población por analizar en el programa de Ansys es finita ya que son dos pernos ASTM A-325 y SAE J-429 de una longitud de 4 pulg, tipo 1 y grado 5 respectivamente. Con las placas diseñadas previamente.

### **2.4 Técnicas e instrumentos para la recolección de datos**

La recolección de datos por emplear será a por medio de bibliografía, como tesis relevantes, catálogos, normas y teoría previamente establecida y aprobada para el diseño y la construcción en conexiones de acero como lo es el AISC 360, además, se contará con la colaboración en el tema como es el profesor tutor y personas capacitadas en los programas por utilizar como *SolidWorks* y *ANSYS*.

### **2.5 Técnicas e instrumentos para el procesamiento y análisis de los datos**

Para el procesamiento y análisis de datos se utilizan diferentes técnicas como son las fórmulas obtenidas de bibliografía calificada para primer diseño de la conexión a estudiar como el AISC 360, el libro de conexiones estructurales de Hibeler. Dicho análisis racional será realizado en el programada de *office Excel* ya que este facilita de gran manera la realización de cálculos numéricos y la implementación de fórmulas, también ayuda con la implementación de tablas y variables que se deben implementar en este tipo de análisis

Su interfaz se divide en dos partes, la zona de trabajo donde podemos encontrar celdas y columnas, que facilitan el trabajo en el momento de trabajar con fórmulas como es este caso, y la zona donde se puede editar de diferentes maneras la zona de trabajo, como implementar colores en las celdas, unirlas separarlas e incluso implementar fórmulas ya predeterminadas por el programa.

Luego de realizar el estudio racional, el siguiente paso es la modelación de la conexión, esta será realizada en *SolidWorks un software CAD* (es

decir diseño asistido por computadora) utilizado para la modelación de piezas mecánicas en dos y tres dimensiones. Permite modelar piezas y ensamblajes, obtener de estos planos técnicos, estudio de fluidos, cambios de temperatura, estudio de esfuerzo von mises entre otros.

Dicho programa es sencillo de utilizar ya que permite al usuario, implementar las medidas que desee, puede generar sólidos, con todo tipo de curvaturas, rellenos, vaciados y otros tipos de superficies y luego en un archivo aparte se genera un ensamblaje con todas las piezas previamente creadas. Este es utilizado principalmente en la industria mecánica, pero dependiendo del tipo de estudio por realizar, se puede implementar en otro tipo de industrias como será este caso que se implementa para la industria de la ingeniería civil.

Como paso final se realiza el estudio en ANSYS, este también es un *software* diseñado para la simulación de piezas y colocarlas en las situaciones en las que se supone trabajarán en el momento de ser creadas, con la implementación de diseños en dos y tres dimensiones. La simulación con ese *software* se divide en varios pasos; el primero es trabajar con la fase de “*workbench*” del programa, donde se decide qué tipo de estudio se utilizará. En este caso será un estudio estático estructural, el listado se puede observar en la ilustración número 17.

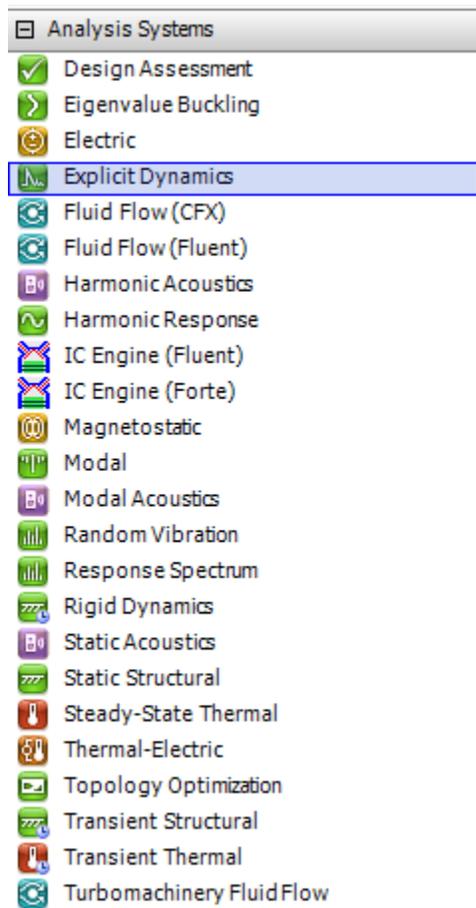


Ilustración 17 Listado de estudios posibles en la zona de trabajos de ANSYS Fuente:ANSYS 2018.

Luego de definir el tipo de estudio por realizar, aparecen los pasos que se deben llevar a cabo para poder obtener los resultados finales esperados, como se observa en la ilustración número 18. El primer paso por realizar es definir las propiedades de los materiales que se utilizan, en la parte de datos de ingeniería, donde definimos los esfuerzos de fluencia, los esfuerzos últimos, la curva de esfuerzos vs deformación unitaria de cada material.

En este caso se implementarán tres materiales para la primera conexión será acero A-36 con la implementación de los pernos ASTM A-325 y para el otro tipo de conexión será acero A-36 y el perno SAE J-429. Luego de tener los materiales definidos nos dirigimos a la geometría que será importada de *SolidWorks*, luego de importar nuestra conexión a ANSYS pasamos a la celda número cuatro que nos

llevara a una nueva interfaz del programa llamada “mecánico” , donde se completará la conexión definiendo el material de cada pieza modelada, se especificara el tipo de contacto que tienen cada pieza entre si puede ser unido, con fricción, sin fricción, entre otros tipos, en este caso será empleado la conexión con fricción que será una variable en nuestro estudio.

Luego de definir el tipo de contacto entre ellas, se definen las fijaciones necesarias para que el ensamblaje sea estable, se aplican las fuerzas obtenidas del estudio racional, como último paso se genera el mallado. ANSYS tiene un mallado automático, pero no es el ideal para nuestra conexión ya que hay que obtener una calidad ideal para la obtención de resultados más exactos. Para la calidad ideal hay maneras de modificar el mallado entre la cantidad de separaciones deseadas en el borde de alguna pieza, el tamaño de este en una cara, que este coincida entre la cara de una pieza y otra.

La manera de darnos cuenta si el mallado es el ideal, es dirigiéndonos a calidad, en la zona de sesgo “o *skewness*”, que se encarga de evaluar la calidad de la malla basándose en la regularidad de los polígonos formados en el momento de crear la malla, mientras estos sean más uniformes mejores resultados se obtendrá de la simulación. Los valores de la malla son con un sesgo entre 0- 0.25 el mallado es excelente si llega a 0,50 es bueno, hasta 0,85 es regular y mala si llega a 1. Pero también se puede definir por un gráfico ya que si las zonas que no son de gran relevancia en la simulación tienen un sesgo mayor a 0,5 no afecta de manera importante la simulación.

En la ilustración 19 se puede observar cómo deberían ser dichos polígonos, también hay que tomar en cuenta la ortogonalidad, de ella también depende la

calidad del mallado y su valor debe ser lo más cercano a uno, como sea posible y con este se puede saber la uniformidad que hay entre todos los polígonos de este.

Ilustración 18 Celdas de trabajo en la zona de trabajo del Workbench ANSYS.

Fuente: ANSYS 2018

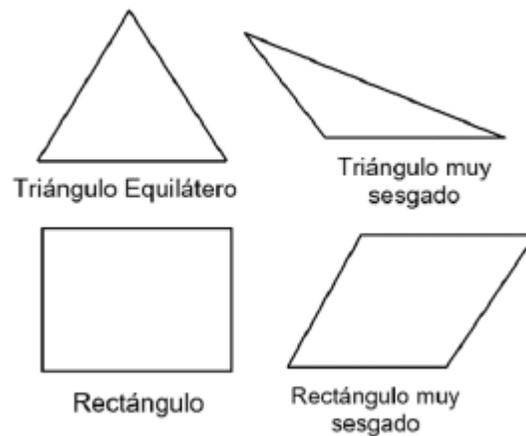
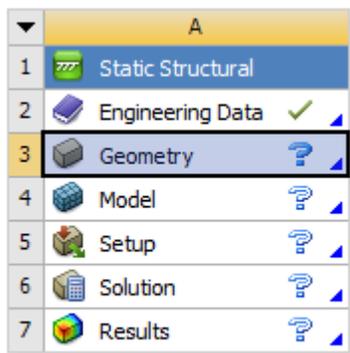


Ilustración 19 Regularidad de los polígonos de malla según su uniformidad.

Fuente: ANSYS, 2018.

El tipo de referencia física que debe tener el mallado para este caso es el no lineal ya que el comportamiento de la conexión es no lineal.



Debido a la capacidad de proceso de datos limitado, la calidad de la malla por utilizar estará entre buena y regular, donde la zona del mallado regular será en la zona externa de las placas, y buena o excelente en la zona de los orificios de la placa, el

vástago del perno y gran parte de la simulación de la tuerca, también debido a esto no será diseñada la zona roscada; solo se implementará una reducción de diámetro en el vástago del perno. Para finalizar con la simulación se debe dar a solucionar y dependiendo de los resultados que deseamos estudiar se pueden elegir distintos tipos de deformación, esfuerzos, factores de seguridad, entre otros, en este caso se va a trabajar con esfuerzos von mises y deformaciones totales.

## CAPÍTULO III

## Capítulo III

### 3. Análisis de resultados

En el momento de iniciar con el análisis de resultados se debe realizar una serie de comparaciones entre los resultados obtenidos del método racional, los datos obtenidos de las curvas de deformación de esfuerzos de fluencia y máximos, con los valores obtenidos de la simulación realizada con el programa ANSYS.

#### 3.1 Análisis racional

Para iniciar este proyecto se debe realizar un análisis racional para obtener las dimensiones de la conexión por simular y analizar, dicho análisis será realizado bajo la normativa del *ANSI/AISC 360-16*. Donde se define que el acero para las placas será A-36, cuyo esfuerzo de fluencia es de 280 MPA y su esfuerzo último 400 MPA, cuya curva de esfuerzo vs deformación unitaria se puede observar en la siguiente imagen.

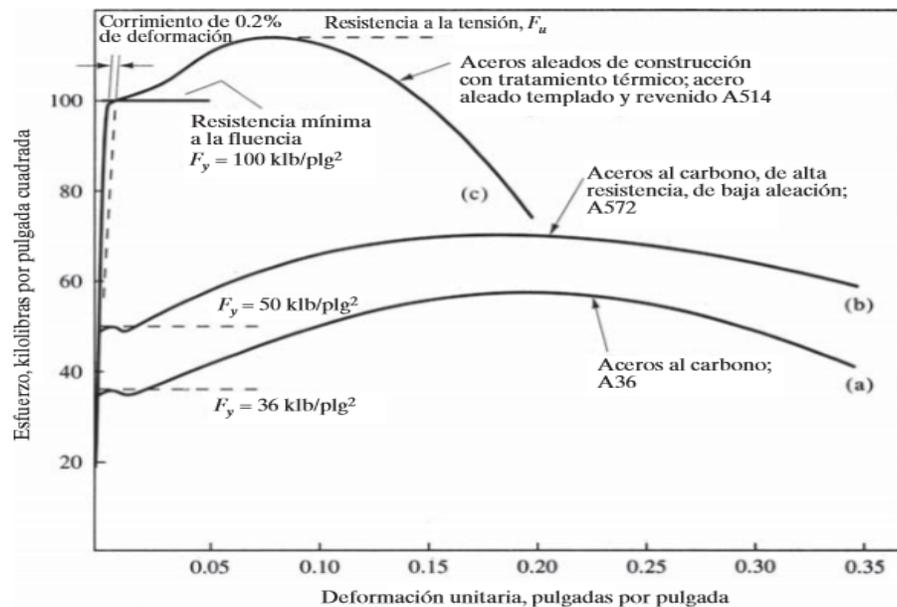


Ilustración 20 Curva esfuerzo deformación A-36.

Fuente: *Diseño de estructuras de acero*. McMacormac. Pag 17.

El perno con el que se diseña la conexión es el A-325 de  $\frac{3}{4}$ " de diámetro con la zona roscada dentro del plano de falla, cuyo esfuerzo de fluencia es de 732 MPA y esfuerzo último de 816 MPA, se diseña con este tipo de perno ya que es el permitido por el ASTM para su uso en la construcción. Cuya curva esfuerzo vs deformación unitaria se puede observar en la siguiente imagen.

Pensemos que hacer, ahora llamemos

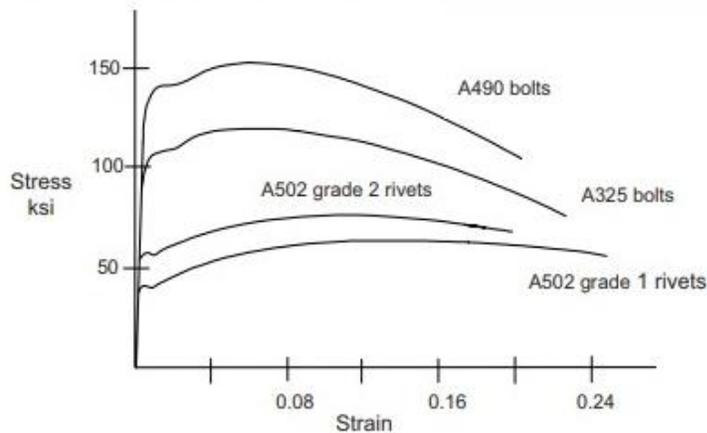


Ilustración 21 Curva esfuerzo deformación perno A-325.  
Fuente: Especificación para pernos A-325.

Del análisis racional realizado para conexiones apernadas, según el ANSI/AISC 360-16, obtenemos los siguientes datos mostrados en las siguientes tablas.

Tabla 5 Dimensiones de las placas a utilizar.  
Fuente: Propia.

Datos de la placa		
Espesor	1,905	cm
Ancho	10	cm
Largo	15	cm
Ag	19,05	cm <sup>2</sup>

A continuación, se puede observar los datos del perno con el que se realiza el análisis de la conexión.

Tabla 6 Datos del perno a utilizar en la conexión.  
Fuente: Propia.

Datos del perno		
Cantidad de pernos	1	
Pernos del Grupo A (tipo A325), cuando las roscas no están excluidas de los planos de corte.	54 Klb/Plg2	372mpa
Lc	10 cm	
Diámetro del perno	3/4 pulg	1,91 cm
Área del perno	0,4418 pulg2	2,8502 cm2

Como se dijo previamente el acero por utilizar en la conexión para las placas es el A-36.

Tabla 7 Acero utilizar en las placas de la conexión.  
Fuente: Propia.

Acero			
Fy	<u>A</u>	<u>36</u>	2520 kg/cm2
Fu	Acero A36	58ksi	
Clase A	Superficies limpias sin pintar, superficies con escamas de laminadora o superficies con recubrimientos Clase A en superficies de acero limpiadas con chorro de arena.		0,3

Debido a limitaciones presentadas en el programa de simulación Ansys el coeficiente de fricción máximo aceptado es de 0,2; esto se debe a la limitación de procesamiento de datos, por lo que se utilizará 0,2 y no 0,3 como sería el caso para el acero. Ya teniendo toda la información necesaria obtenemos las fallas de la conexión.

### 3.1.1. Tipos de fallas a evaluar.

#### 3.1.1.1. Falla por pandeo de la placa.

Como todo elemento esbelto tiende a sufrir pandeo, hay que comprobar que nuestra conexión, en el momento de ser cargada con fuerzas axiales, no se vea afectada por este fenómeno por lo que procedemos a realizar el estudio por pandeo de las placas.

$$\phi Fr = 0.9 * \left( 0,658 \frac{F_y}{F_e} \right) * F_y \quad \text{Ec.19}$$

Esfuerzo por pandeo critico elástico.

$$F_e = \frac{\pi^2 * E}{\left( \frac{kl}{r} \right)^2} \quad \text{Ec.20}$$

Por lo que obtenemos un esfuerzo de pandeo de

$$\phi Fr = 1949,26 \text{ kg/cm}^2$$

#### 3.1.1.2. Falla por compresión de la placa

$$\phi T_n = \phi * (F_y * A_g) \quad \text{Ec.21}$$

Se obtiene una fuerza de 33.42 ton pero como lo que se desea es lograr la falla de la conexión principalmente del perno, no se utiliza el factor de seguridad 0,90, y se obtiene una falla por compresión de 37,13 ton.

$$\phi_{Tn} = 33,42 \text{ Ton}$$

$$Tn = 37,13 \text{ ton}$$

### 3.1.1.3. Falla por aplastamiento de la placa

$$R_n = 2.4 * (d * t) * F_u * \#pernos \quad \text{Ec.22}$$

$$R_n = 35,36 \text{ ton}$$

### 3.1.1.4. Falla por aplastamiento del perno

$$R_n = 1.2 * l_c * t * F_u * \#pernos \quad \text{Ec.23}$$

$$R_n = 92,81 \text{ Ton}$$

### 3.1.1.5. Falla por cortante del perno

$$R_n = F_{nv} * A_b * \#pernos \quad \text{Ec.24}$$

$$R_n = 21,55 \text{ Ton}$$

### 3.1.1.6 Falla por fricción del perno.

$$R_n = \mu * D_u * h_f * T_b * n_s \quad \text{Ec.25}$$

$$R_n = 5,74 \text{ Ton}$$

Al comparar los resultados de las fallas de la conexión por cortante doble con pernos A-325 y placas de acero A-36, con la zona roscada incluida en el plano de corte, podemos observar que la falla que rige es la falla por cortante del perno cuya magnitud es de 21,55 ton, no se toma en consideración la falla por fricción ya

que esta se tomará en cuenta en el momento de utilizar un coeficiente de fricción de 0,2 a diferencia de la evaluación por realizar con las otras simulaciones que será de 0,15. Este dato es tomado así, ya que en el momento de la investigación los datos recomendados para este tipo de simulaciones en tutoriales del programa y debido a la capacidad computacional que se tiene, lo más recomendable es dicho número . Al igual que la pretensión obtenida por otras investigaciones estudiadas es de 6260 N, dicho número es obtenido de una calculadora virtual.

En el momento en que se tomará en cuenta la falla por fricción se debería utilizar una pretensión de 89,2 ksi (aproximadamente 250000 N) obtenido de las tablas del AISC capitulo J, tablas J-31 donde nos indican las pretensiones mínimas de los pernos y de la tabla J-32, donde se muestra la capacidad de los pernos. Pero nuevamente debido a la capacidad computacional disponible para las simulaciones, se utilizará 150000 N de pretensión que para el resto de las simulaciones.

### 3.2 Dimensiones de la conexión

Del análisis racional realizado y explicado anteriormente se obtienen las dimensiones por utilizar en la conexión que se va a estudiar, obtenemos dos placas de 1.905 cm de espesor por 10 cm por 15 cm como se muestra en la figura 22, dichas placas serán las externas de la conexión como se puede observar en la imagen de la conexión 23, la placa del centro tendrá las mismas dimensiones, exceptuando el espesor que será de 2,54 cm como se puede observar en la imagen 25, ya que en esta placa será aplicada la fuerza y su deformación será mayor que en las remanentes.

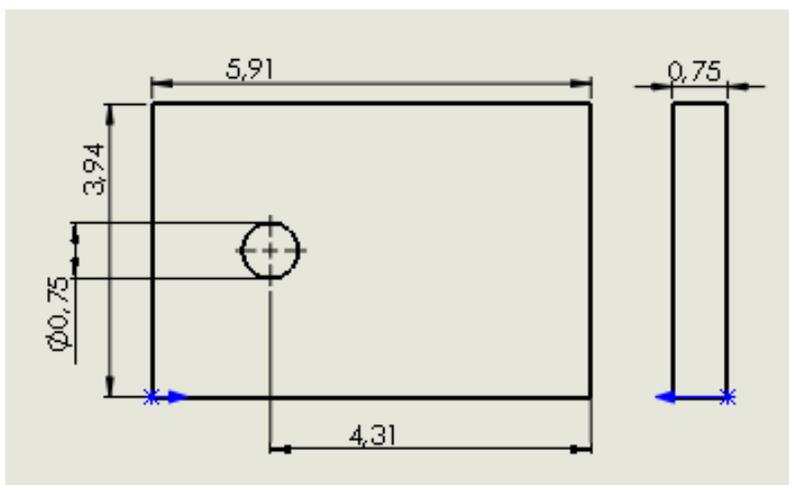


Ilustración 22. Dimensiones en pulg de placa superior e inferior.  
Fuente: Propia.



Ilustración 23. Visualización del orden de las placas en la conexión a cortante doble.  
Fuente: Propia.

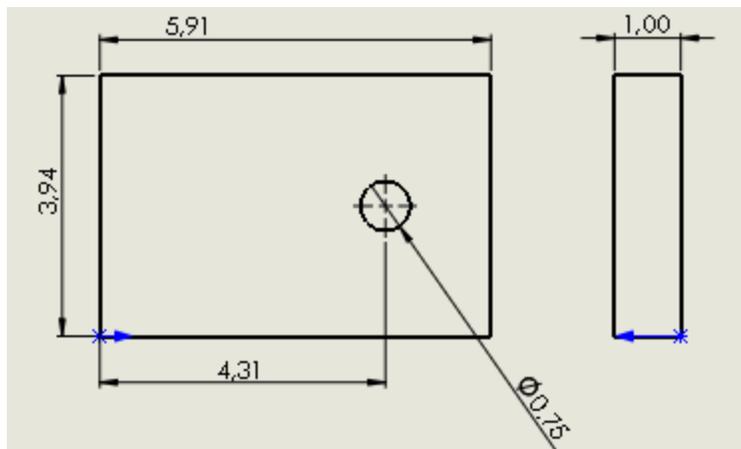


Ilustración 25. Dimensiones en pulgadas de la placa central de las conexiones a estudiar.  
Fuente: Propia.

Todas las conexiones usan arandelas y tuercas especificadas según el perno que se utilice, para las conexiones diseñadas con el perno A-325, se debe

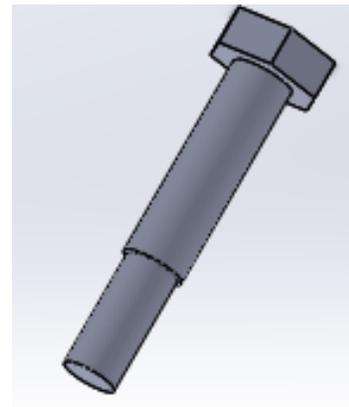


Ilustración 24. Pernos vista de simulación de zona roscada. Fuente: Propia.

utilizar la arandela F-426 especificada por el ASTM y la tuerca “*heavyhex*” A563, también del ASTM.

Pero debido a la forma que dichas figuras poseen, en el momento de generar el mallado en ANSYS no se iba a lograr resolver de la manera adecuada como para tener resultados confiables debido a la capacidad computacional con la que se cuenta para la resolución de este trabajo. Por esta razón, se decidió sustituir la tuerca y la arandela por un cilindro hueco que se adaptara al grosor del vástago del perno que queda expuesto. De igual manera sucede con la zona roscada del perno, solo se hizo una reducción del diámetro, pero no se generó la zona roscada, como se puede observar en la siguiente imagen, tanto como para el J-429 y el A-325.

Debido al grosor de la conexión se decidió utilizar pernos de 4 pulg de largo, como se mostró previamente, mecánicamente tienen los mismos esfuerzos, pero tienen dimensiones distintas como se puede observar en las siguientes tablas. Se debe tomar en cuenta siempre el tamaño de la conexión, ya que esto es lo que nos rige en el momento de escoger el largo de los pernos por utilizar ya que en el caso del A-325 que tiene una zona roscada bastante corta, existe la posibilidad de que dicha zona no llegue a alcanzar o estar en contacto con las placas, como sería el caso si todas las placas midieran 0,75 pulg.

Esto afectaría porque no sería posible utilizar la rosca como es debido porque no se encontraría a ras o también funcionaria dentro de la conexión, haciendo que la tuerca no esté en contacto con la placa inferior por lo que no se generaría la pretensión necesaria o establecida para este tipo de conexiones y pernos.

Tabla 8 Dimensiones de perno A-325.

Fuente: Propia

	Pulgadas	Milímetros
L	3,9435	100,1649
Lt	1,4415	36,6141
E	0,7385	18,7579
E'	0,6415	16,2941
H	0,466	11,8364
F	1,226	31,1404
G	1,4005	35,5727

Tabla 9 Dimensiones de perno J-429.

Fuente: Propia.

	Pulgadas	Milímetros
L	3,9615	100,6221
Lt	1,92	48,768
E	0,738	18,7452
E'	0,6395	16,2433
H	0,466	11,8364
F	1,105	28,067
G	1,2295	31,2293

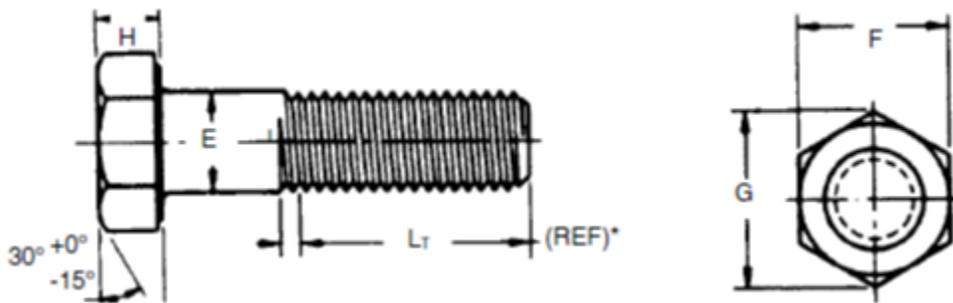
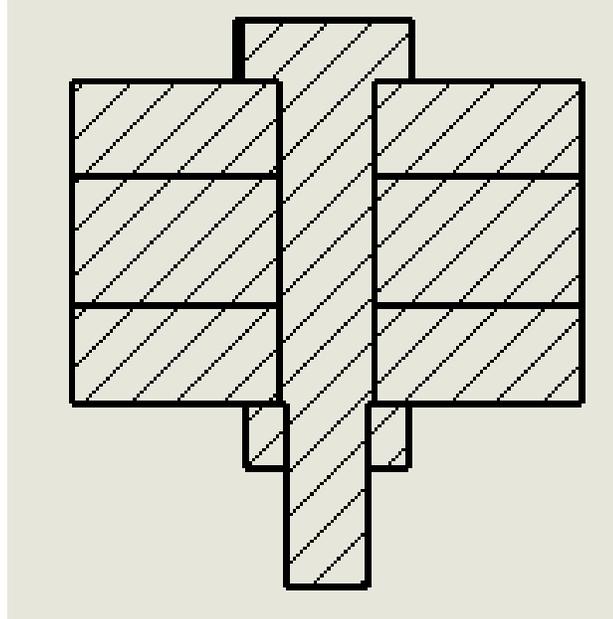


Ilustración 26 Dimensiones de peros.

Fuente: Fastener technical data and Charts sections.

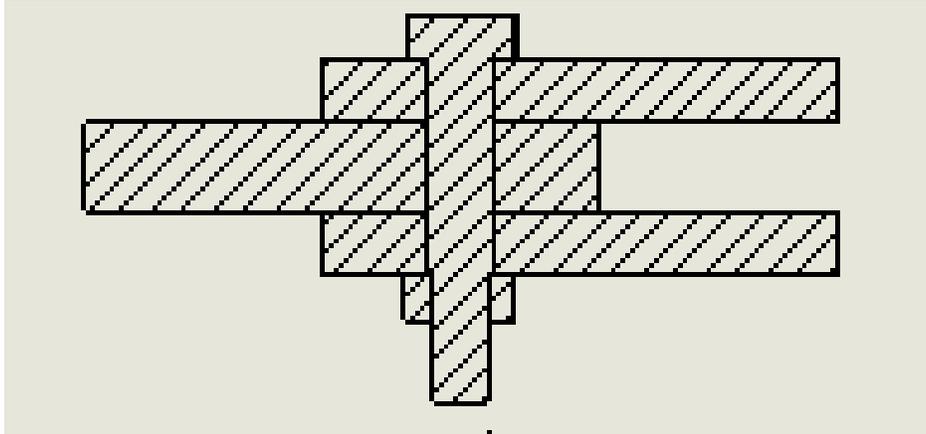
Como se puede observar, si se comparan ambas tablas de dimensiones, los pernos por estudiar son muy similares, pero tienen ciertas variaciones, como en la cabeza que el perno A-325 tiene mayores dimensiones,



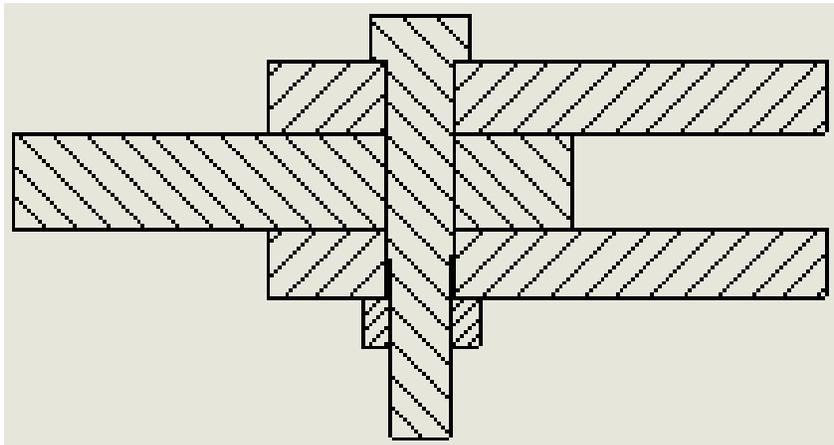
*Ilustración 27. Sección de conexión A-325.  
Fuente: Propia.*

pero el espesor es el mismo. La otra diferencia es el tamaño de la zona roscada, la del perno J-429 es mayor que la del A-325. Esto puede afectar ya que la conexión del perno J-429 tendrá menos contacto entre la placa inferior y el perno generando mayor concentración de esfuerzo en otras regiones.

Su plano de corte será X, esto quiere decir que la zona roscada se encuentra fuera del plano de falla, al igual de la conexión A-325, ambos casos se pueden observar en las imágenes 27, 28, 29 y 30. Pero el J-429 tiene zona roscada dentro de la conexión a diferencia del A-325 que su zona roscada se encuentra a ras.



*Ilustración 28. Sección de conexión con perno A-325.  
Fuente: Propia.*



*Ilustración 29. Sección de conexión J-490.  
Fuente: Propia*

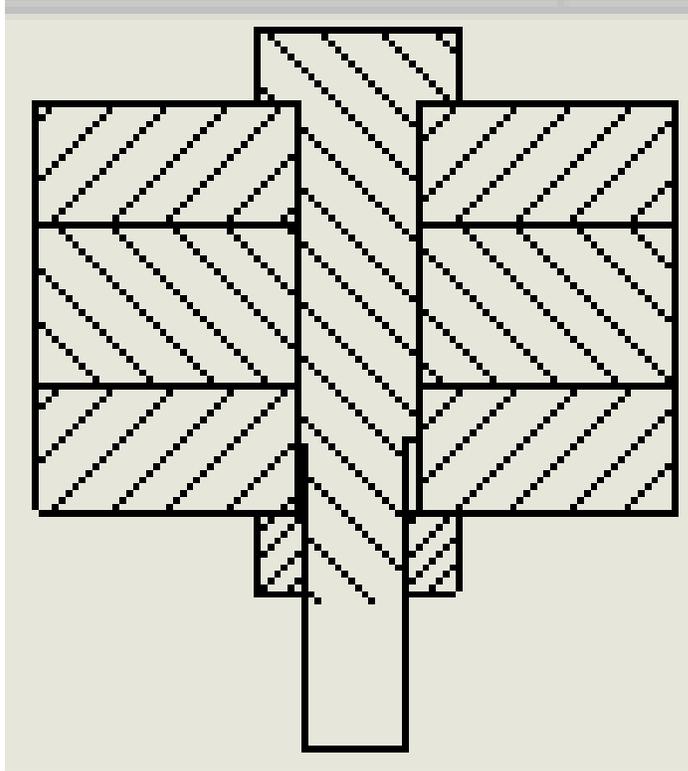


Ilustración 30. Sección de conexión J-490.

Fuente: Propia.

### 3.3 Simulación en ANSYS

Utilizando este *software*, se realizarán varias simulaciones de conexiones con ambos pernos previamente mencionados, variando las fuerzas aplicadas y como última simulación varía con respecto al coeficiente de fricción, con la intención de comparar dicho comportamiento, y concluir si ambos pernos se aguantan de manera similar.

En el momento de iniciar se debe realizar el modelo como ya se mostró anteriormente, todas las simulaciones muy similares. A continuación, se explicará el proceso que se llevó a cabo para obtener los resultados finales y que serán iguales en todas. Lo principal es cargar el modelo de la conexión, en la zona de trabajo del estudio estático estructural del *Workbench de Ansys*. Este fue realizado

en *solidworks* para facilidad del estudiante debido al conocimiento que ya tenía en este programa.

Después son asignados los materiales para ambas conexiones, se trabaja con el A-36, se introducen los datos de la curva esfuerzo deformación utilizados por el programa SAP. Se utilizaron los datos de dicho programa ya que este tiene el comportamiento del material bien definido. Y basándose en la curva de esfuerzo vs deformación unitaria, como se muestra en la imagen 20. Se deben agregar dichos datos para que la simulación conozca el comportamiento que tiene dicho material tanto en la zona elástica como plástica. En el estudio por realizar con la conexión es probable que los materiales alcancen la zona plástica, por lo que se realizará un estudio no lineal.

En la zona de “*multilinear kinematic hardening*” se deben ingresar los siguientes datos y obtenemos el siguiente gráfico, también se pueden ingresar datos de temperatura, pero en esta tesis no serán tomados en cuenta por lo que omitiremos este dato. En esta zona se describe la conducta inelástica del material.

Tabla 10. Datos del A-36 en

Def unitaria	Esfuerzo (pa)	<i>Multilinear Kinematic hardening.</i>
0	248000000	
0,00124	248000000	
0,02	248000000	
0,0333	289000000	
0,0733	366000000	
0,14	400000000	

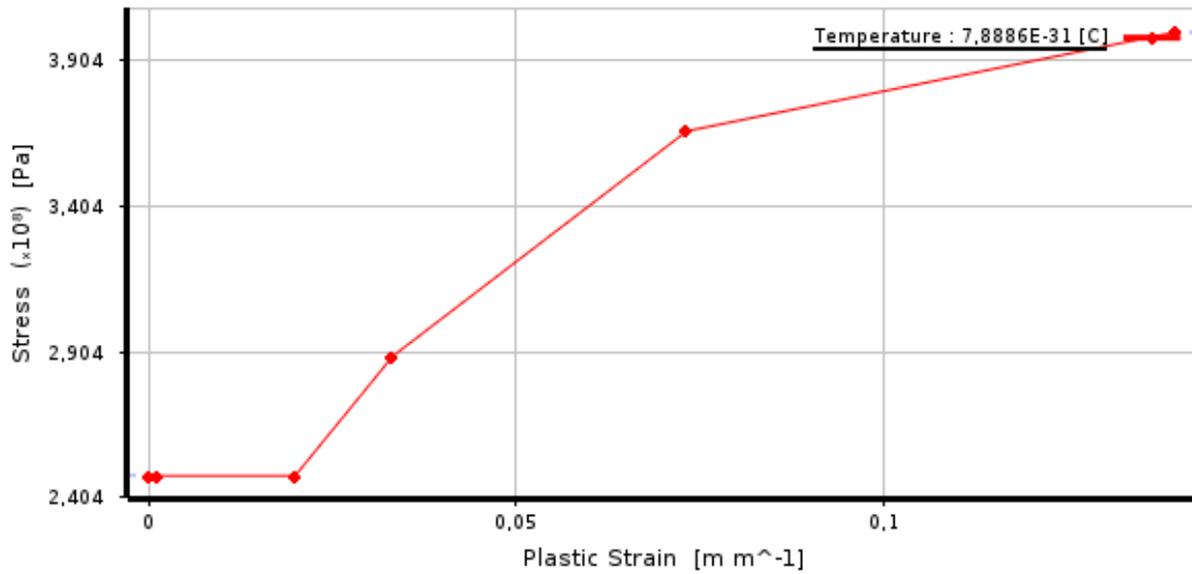


Ilustración 31. Curva de Multilinear Kinematic Hardening A-36 Obtenido de ANSYS. Fuente: Propia.

En la zona de “*uniaxial test data*” se deben ingresar los siguientes datos y obtenemos el siguiente gráfico. Como se explicó previamente, estos datos son los que la simulación siga trabajando; incluso cuando los materiales superan el límite de fluencia.

Tabla 11.. Datos del A-36 en *Uniaxial test data*.

Def unitaria	Esfuerzo (pa)
0	0
0,00124	248000000
0,02	248000000
0,0333	289000000
0,0733	366000000
0,14	400000000
0,17	396000000
0,2	386000000
0,22	0

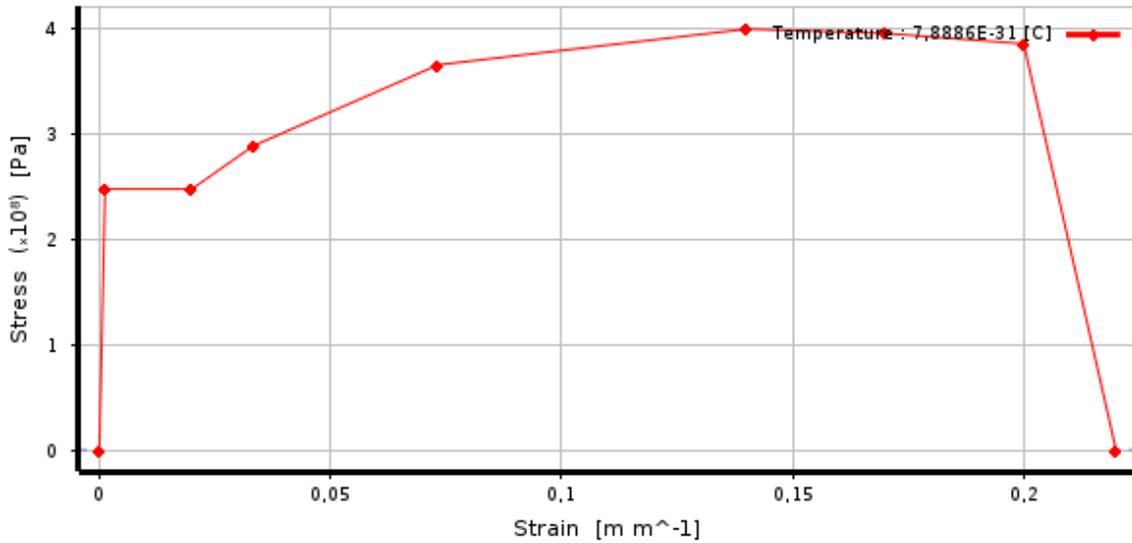


Ilustración 32. Curva de uniaxial test data A-36. Obtenido de ANSYS. Fuente: Propia

Además, se ingresan los valores de esfuerzos máximos para el A-36 el límite elástico es 248 mpa y el de ruptura 400 mpa

De esta misma forma se trabaja con el material de cada perno en Ansys y con la curva de deformación respectivamente en el caso del A-325 la podemos observar en la imagen número 21.

Tabla 12. Datos del A-325 en Uniaxial test data.

Def unitaria	Esfuerzo (Mpa)
0	0
0,0041	650,726124
0,0102	732,90201
0,0207	748,268233
0,0398	807,728834
0,08	816,41409

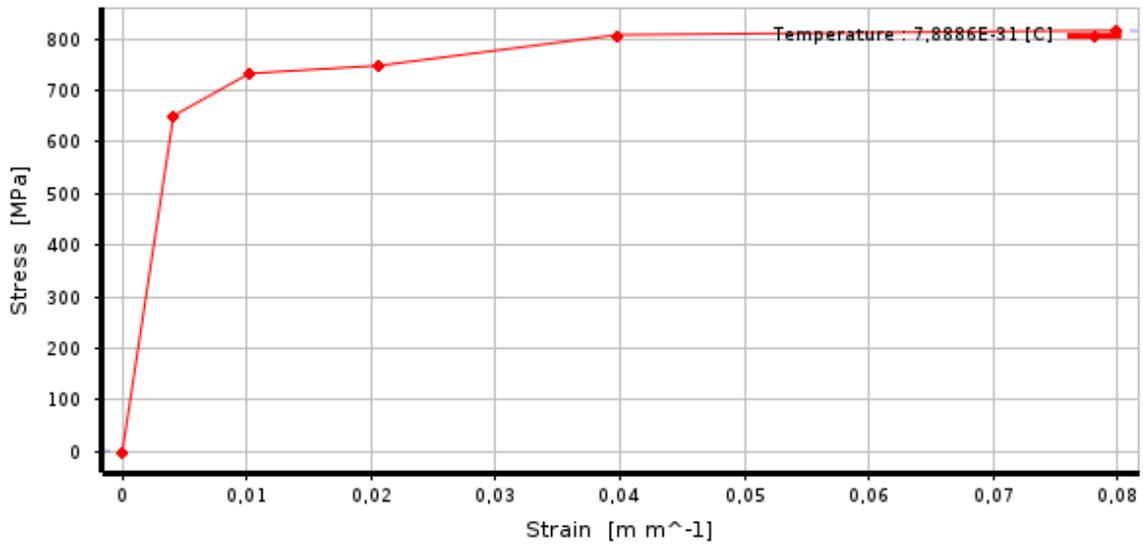


Ilustración 33. Curva de uniaxial test data A-325. Obtenido de ANSYS. Fuente: Propia

Tabla 13.. Datos del A-325 en Multilinear Kinematic hardening

Def unitaria	Esfuerzo (Mpa)
0	732,29
0,0102	732,29
0,0207	748,27
0,0398	807,7
0,08	816,41

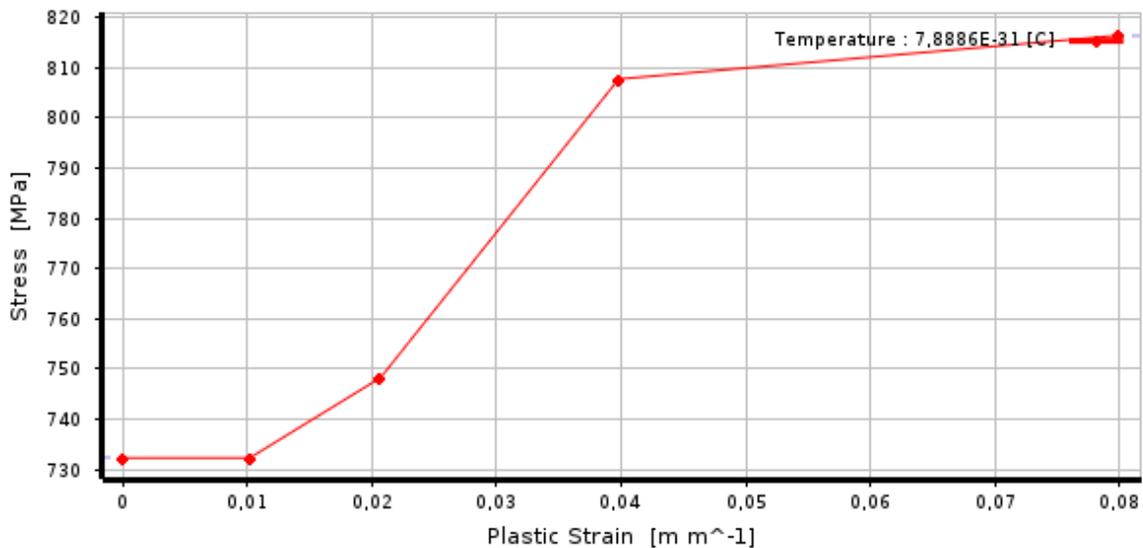


Ilustración 34. Curva del A-325 en Multilinear Kinematic hardening. Obtenido de ANSYS. Fuente: Propia.

Al final agregamos los esfuerzos últimos para este material son  $F_y$  igual a 732,9 mpa y  $F_u$  816,41 mpa

Al momento de ingresar la curva de deformación vs esfuerzo unitario del perno J-429 hubo mayor dificultad ya que en las especificaciones técnicas brindadas por las páginas y catálogos de referencia no coinciden con el gráfico obtenido, esto se debe a la escasa información disponible acerca de ellos y además, ya que en las pruebas de laboratorio de los ensayos de tracción realizados para determinar el esfuerzo de fluencia y ruptura del material son muy poco constantes. De los datos obtenidos se observó que la curva es muy plana como para identificar el verdadero punto de fluencia de este. En la siguiente imagen podemos observar la curva de esfuerzo vs elongación implementada para determinar el material.

Cuando se presentan curvas de este tipo, se aplica o se suele utilizar la teoría del 0,2 % que consiste básicamente en crear una línea paralela al módulo de elasticidad del material ( $E$ ) desde la deformación unitaria de 0,002 y donde esta línea paralela corte la curva ese será el límite de elasticidad del material como se observa en la siguiente imagen.

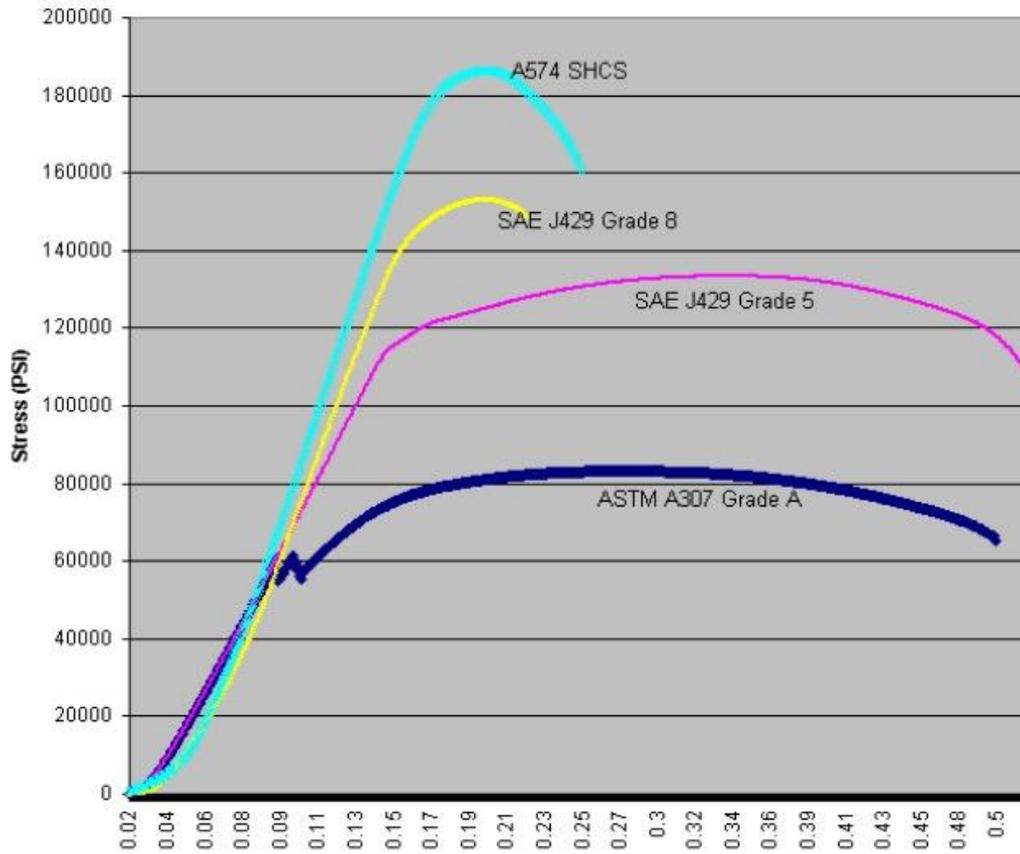


Ilustración 35. Curva esfuerzo vs elongación en pulgadas de diversos materiales.  
 Fuente: Requerimientos mecánicos y de calidad para J-429.

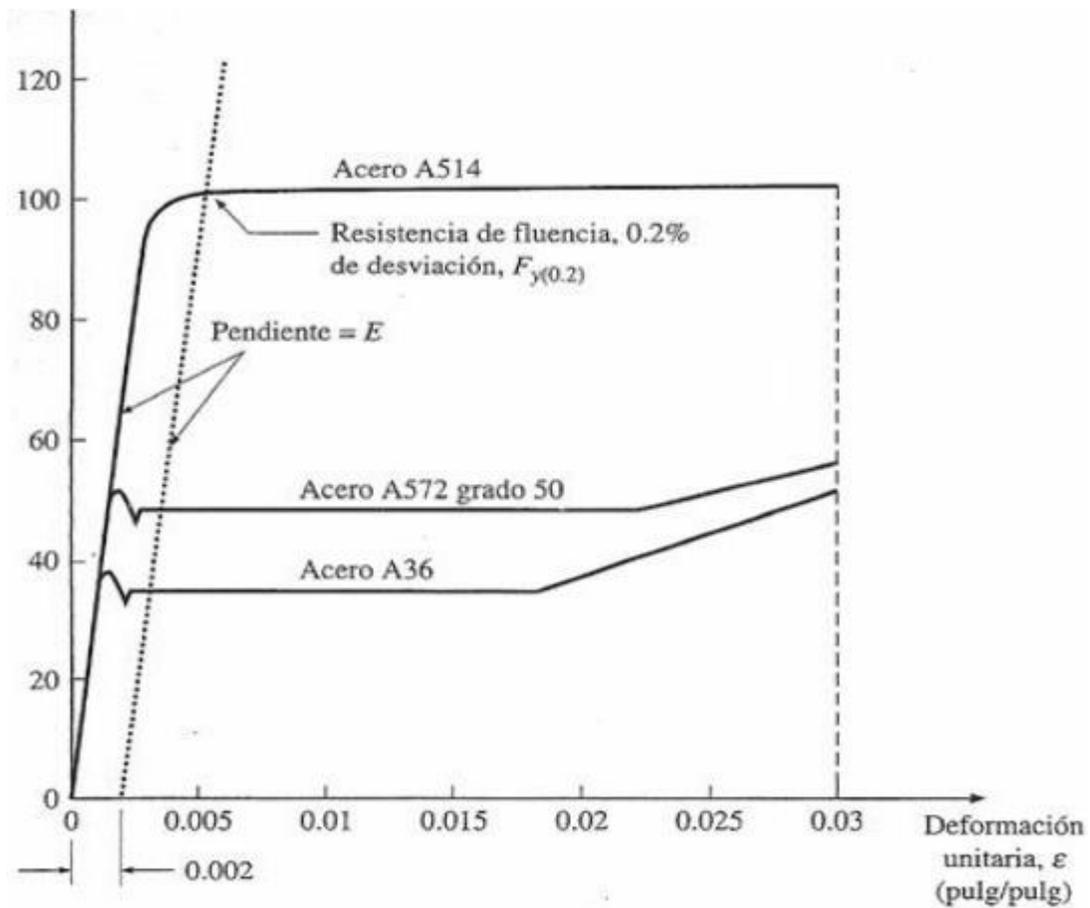


Ilustración 36. Teoría del 0,002%.  
Fuente: Resistencia de materiales para estudiantes de ingeniería.

En este caso no se utilizó, debido a que la curva que se tiene no es comparada con la deformación unitaria sino con la elongación por lo que primero hay que obtener la deformación unitaria. Esto se consigue de la siguiente manera, se sabe que la deformación unitaria es igual al diferencial de longitud entre la longitud como se observa en la siguiente ecuación.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$$

Ec.26

Donde:

L es igual a la longitud total de la elongación después de la fractura.

$\Delta L$  es la deformación parcial de la elongación según el esfuerzo aplicado.

$\epsilon$  es la deformación unitaria. Que en este caso es lo que se desea obtener para poder introducir la curva de manera correcta en el programa,



*Ilustración 37. Visualización de la elongación de un perno después de la fractura. Cuya deformación equivale a 2 Fuente: SAE J-429 Requerimientos mecanicos.*

Luego de conseguir la deformación unitaria que va con los valores de los esfuerzos respectivos se introducen en los datos de los materiales del programa ANSYS.

*Tabla 14. Datos Uniaxial test data J-429*

*. Fuente: Ansys*

Def unitaria	Esfuerzo (Mpa)
0,00	0,00
0,06	586,05
0,06	586,05
0,07	586,05
0,09	824,95
0,12	827,37
0,17	813,58
0,22	806,69
0,22	0,00

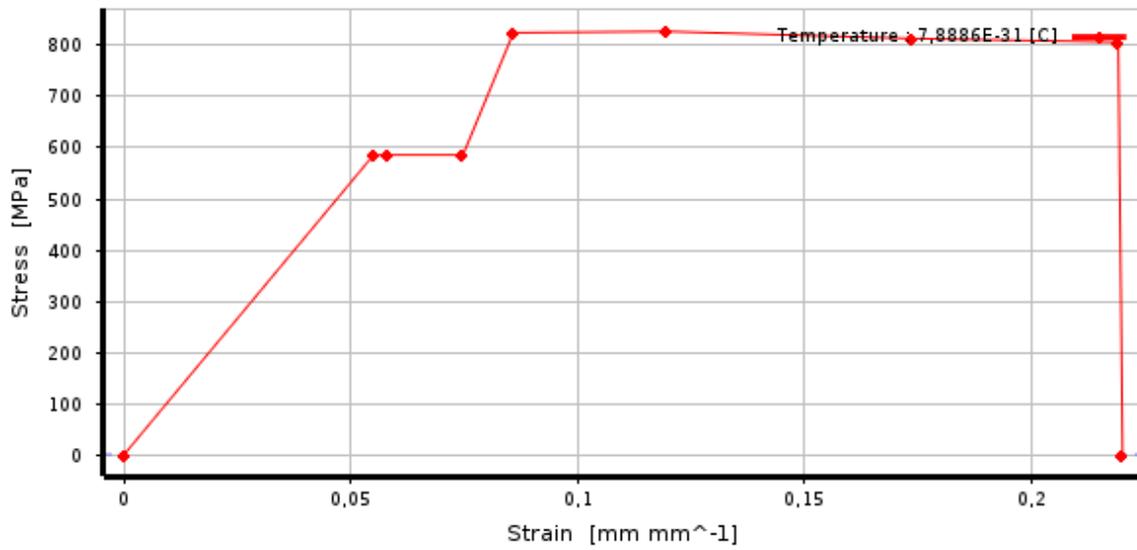


Ilustración 38. Grafica uniaxial test data J-429. Obtenido de ANSYS. Fuente: Propia.

Tabla 15. Datos de multilinear kinematic data.J-429

Def unitaria	Esfuerzo (Mpa)
0,00	586,05
0,06	586,05
0,06	586,05
0,07	782,21
0,09	824,95
0,12	827,37

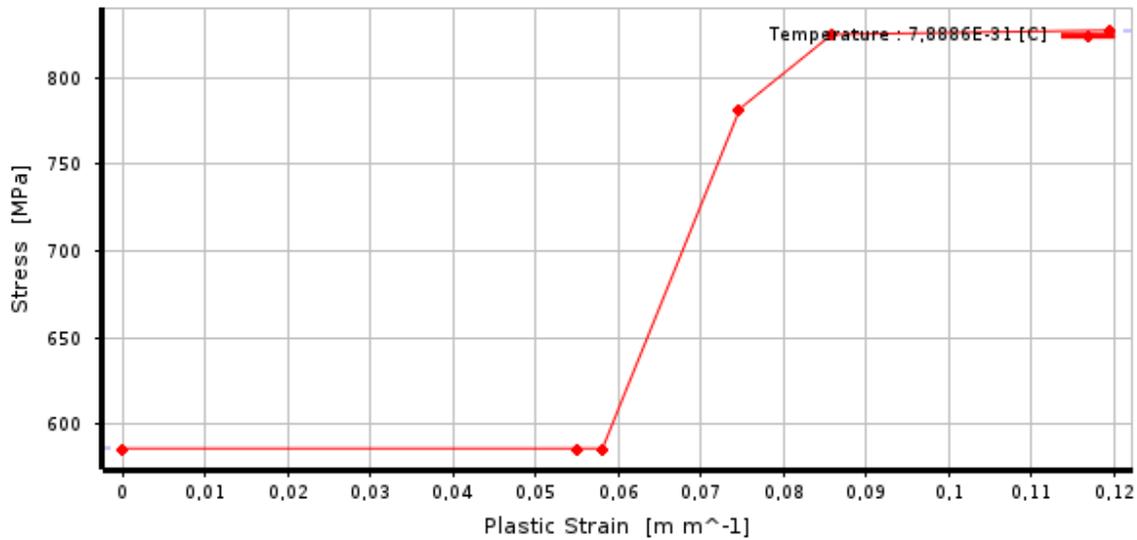


Ilustración 39. Curva de multilinear kinematic data.J-429. Obtenido de ANSYS. Obtenido de ANSYS. Fuente: Propia.

Del gráfico de esfuerzo deformación se obtiene que el esfuerzo de fluencia es de 586,05 mpa y el esfuerzo de ruptura igual a 827,37 mpa.

Luego de ingresar los datos necesarios de cada material donde se especifica cómo funcionará la conexión, el mallado que tendrá como se explica a continuación.

En el momento de definir el tipo de contacto que habrá entre los elementos hay que fijarse como sería este en la vida real, por lo que se establece contacto por fricción entre las placas, placa y perno y tuerca y placa con un coeficiente de fricción de 0,15 para facilitar los cálculos del *software*. A diferencia del contacto entre el perno y la tuerca que simula como si estos estuvieran casi soldados.

El siguiente paso es establecer el mallado de la conexión, que es de gran importancia ya que esto define la calidad y certeza de los resultados finales.

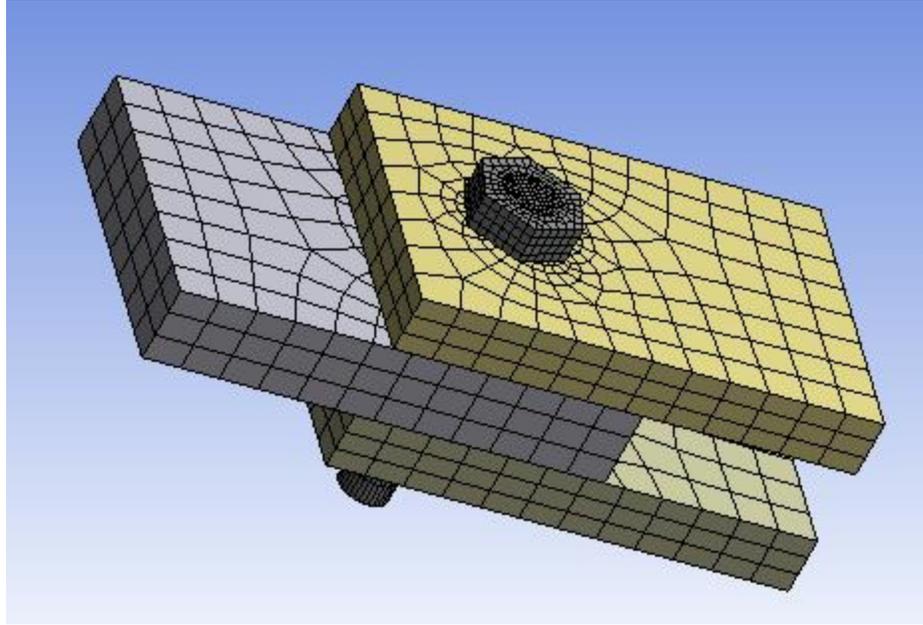


Ilustración 40. Mallado de la conexión. Fuente: Propia.

En el caso de la conexión con el perno A-325 se tiene una oblicuidad “skewness” en un rango de 0 a 0,54 como se explicó previamente esto indica que la calidad es buena, de la misma manera se observa en el grafico que la ortogonalidad se encuentra en un rango de 0,74 a 1.

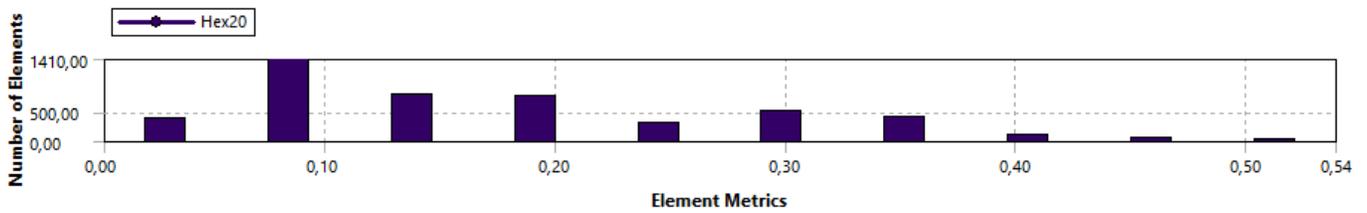


Ilustración 42. oblicuidad del mallado de la conexión A-325. Fuente: Propia.

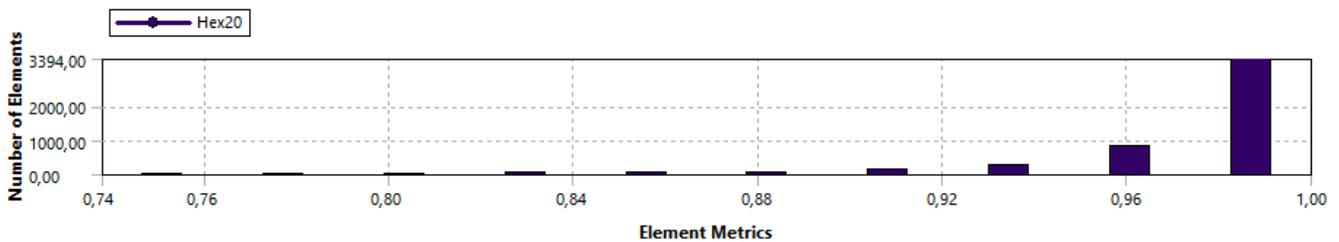
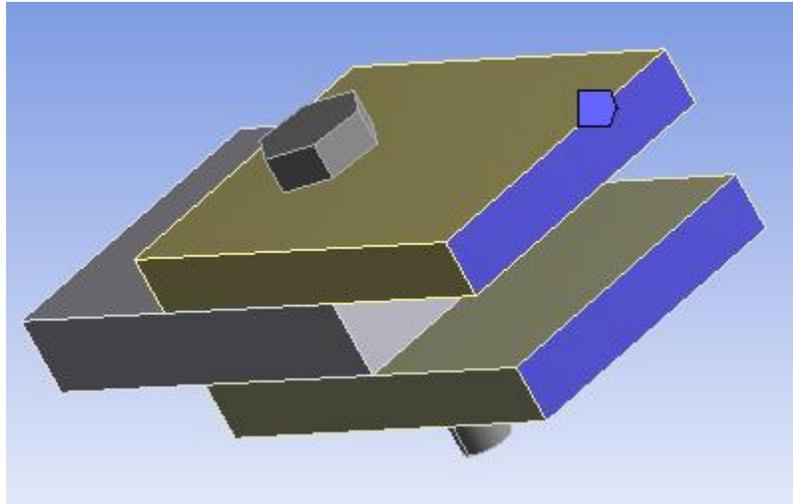


Ilustración 41. Ortogonalidad del mallado aplicado a la conexión A-325. Fuente propia.

Como paso siguiente, se aplican las sujeciones, en este caso tendremos una cara de dos placas fijas como se muestra en la figura 43, con este tipo de sujeción se evita cualquier tipo de movimiento, simula un empotramiento.



*Ilustración 43. Caras fijas de la conexión. Fuente: Propia.*

Luego se aplica la fuerza que en este proyecto será una de las principales variables para el estudio de los pernos. Y por último se aplica la pretensión del perno que en todas las simulaciones será igual a 6260 N que simula una pretensión de ajustado.

### **3.2.1 Conexión con pernos A-325**

Se realizan tres simulaciones de la conexión con este tipo de perno. En todas las simulaciones se revisarán los esfuerzos y las deformaciones de la conexión haciendo énfasis en los orificios de las placas y en el perno.

#### **3.2.1.2. Fuerza de 22,84 toneladas**

A continuación, se presentarán los resultados obtenidos de la simulación realizada con una fuerza mayor a la fuerza de diseño por 1,29 toneladas.

Análisis de las deformaciones presentadas por la conexión:

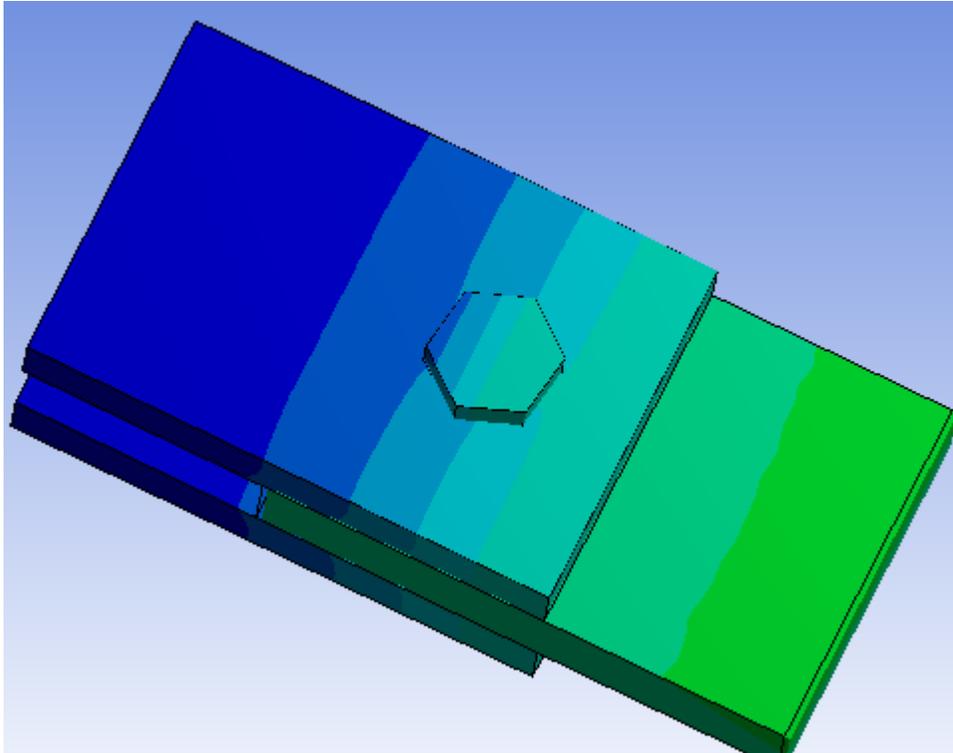


Ilustración 454. Deformación de la conexión bajo la aplicación de una fuerza de 22,85 ton.  
Fuente: propia.

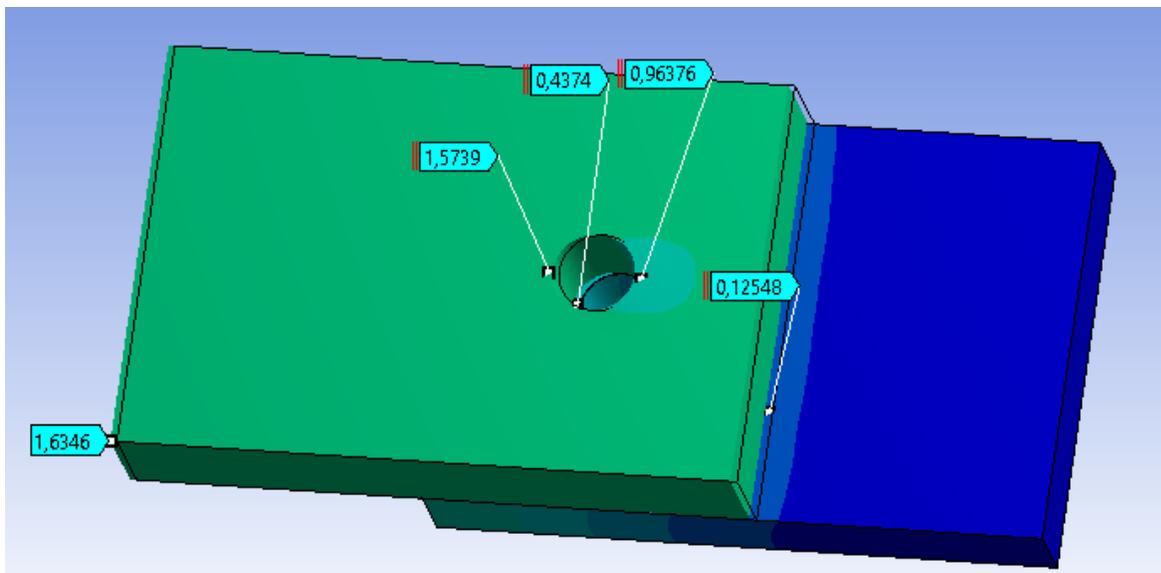


Ilustración 44. Deformaciones varias en milímetros en placa central e inferior Fuente: propia.

En la imagen anterior se puede observar que la mayor deformación presentada en la conexión se genera donde es aplicada la fuerza, y se puede

observar que el agujero de dicha placa sufre una deformación considerable comparada con la deformación máxima.

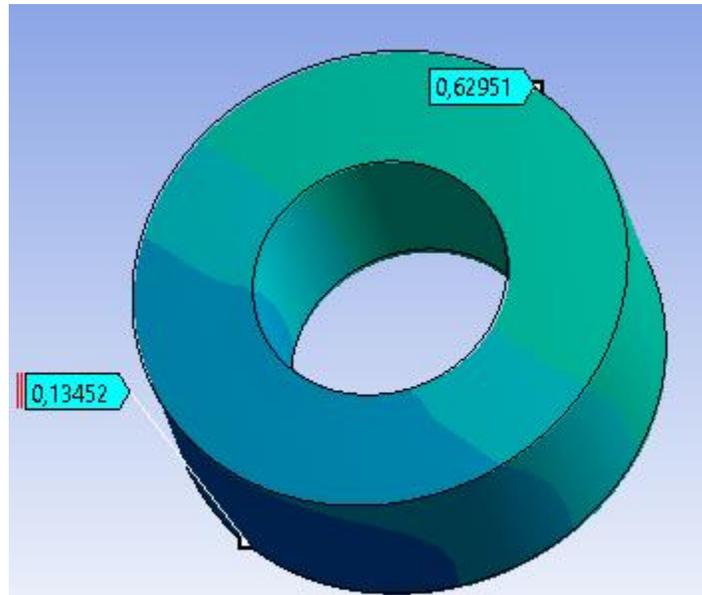


Ilustración 46. Tuerca bajo deformaciones en milímetros cuando se aplica 22,85 ton. Fuente: Propia.

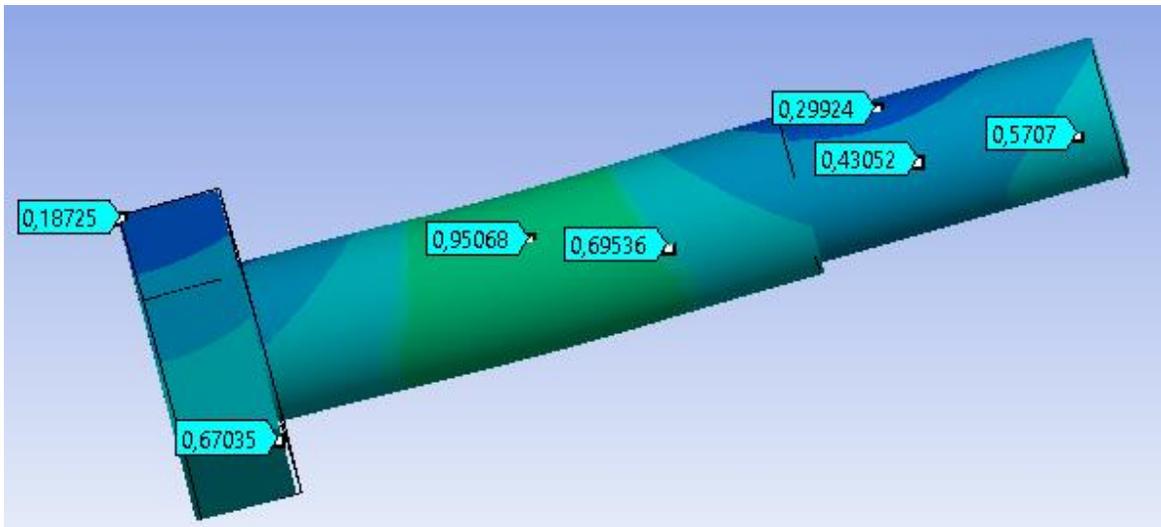


Ilustración 47. Deformaciones en milímetros en perno A-325 al momento de aplicarse una fuerza de 22,85 ton. Fuente: Propia.

En la ilustración anterior se pueden observar las deformaciones presentadas por el perno A-325 cuando se aplica una fuerza de 22,85 ton en la conexión a cortante doble. Se observa como el perno presenta una pequeña

curvatura en la zona del vástago, en esta parte es donde se genera la mayor deformación de 0,95068mm. También se observa cómo la cabeza del perno sufre deformación en el lado donde es aplicada la fuerza en la conexión.

En las siguientes imágenes se analizarán los esfuerzos presentados en la conexión cuando se aplica una fuerza de 22,85 ton. Siendo esta una fuerza mayor a la que rige en el análisis racional.

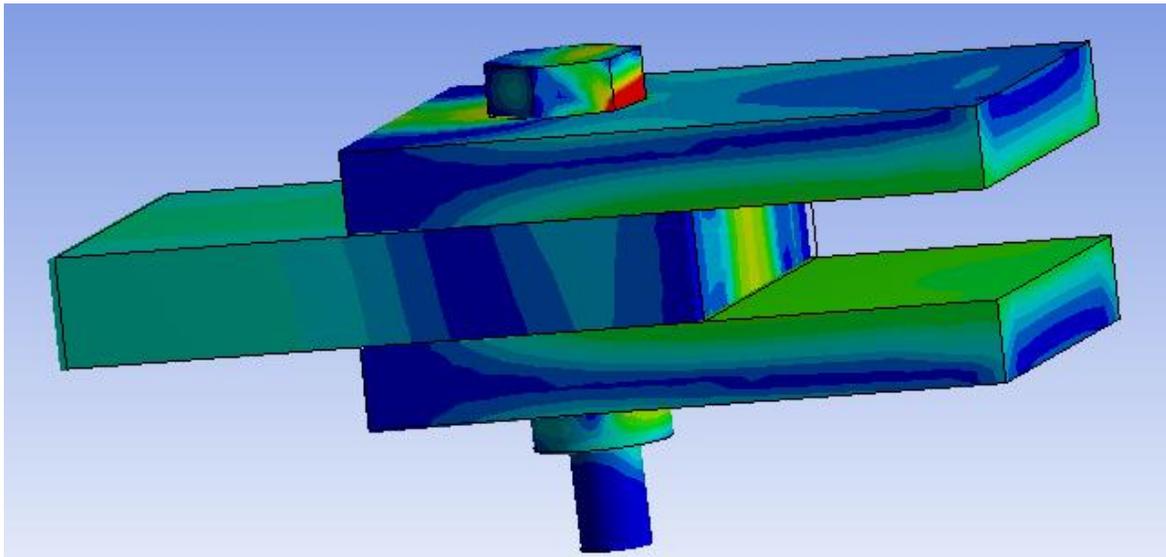


Ilustración 498. Esfuerzos de la conexión A-325. Fuente: Propia.

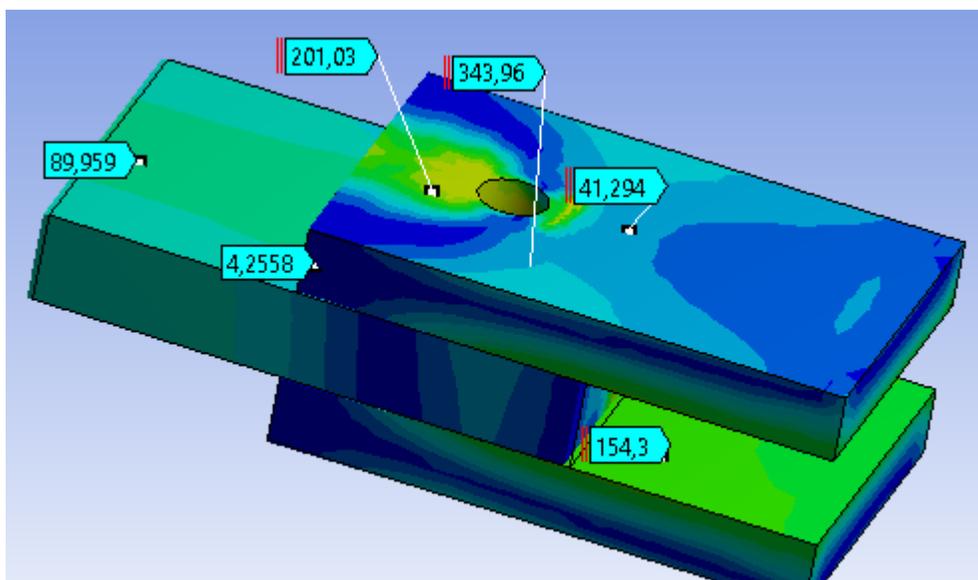


Ilustración 489. Esfuerzos varios en mpa presentados en las placas. Fuente: Propia.

Como se puede observar en las dos imágenes previas, las placas externas sufren esfuerzos de aproximadamente 154,3 mpa . Esto se debe a la fricción generada entre las placas y es la forma en la que se transmite el esfuerzo a través de ellas. El mayor esfuerzo presentado en las placas se genera en la placa central en la zona del orificio, alcanzando un esfuerzo de 343, 96 mpa es decir la placa casi llega a su ruptura, También se puede observar que solo esta parte de la placa sobrepasa el límite de fluencia, el resto de las placas se mantienen en su límite elástico.

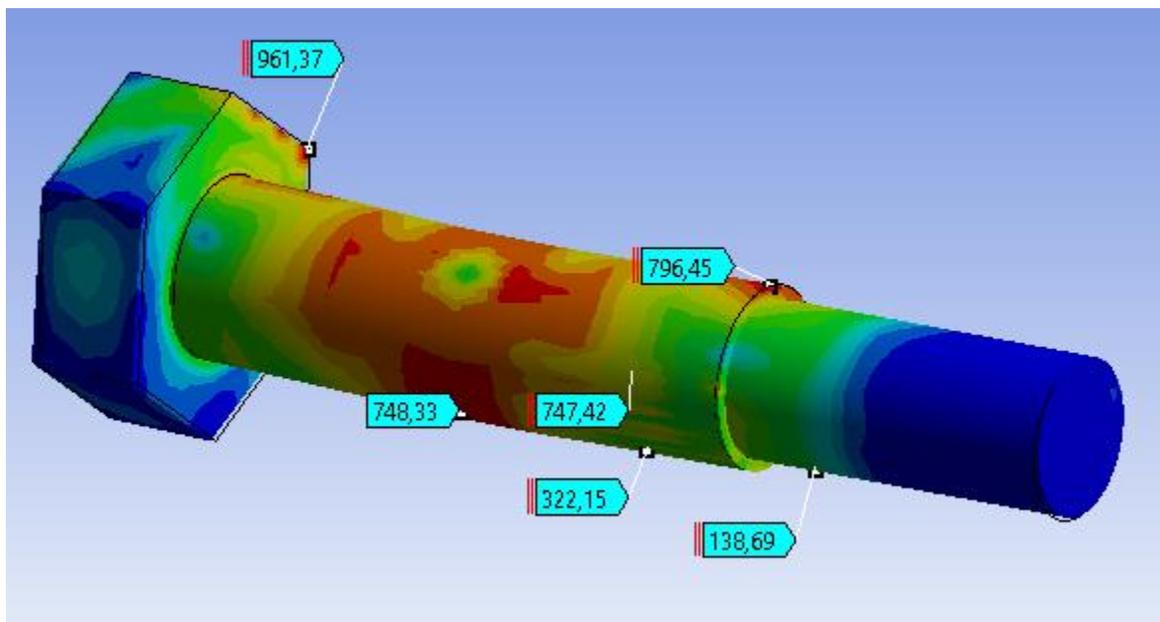


Ilustración 50. Esfuerzos varios presentados en el perno A-325 en mpa Fuente: propia.

En la ilustración 50 se puede observar que el esfuerzo máximo se presenta en una zona de la cabeza del perno equivalente a 961, 37 mpa, superando el esfuerzo de ruptura del material. En la zona plano de corte se pueden observar esfuerzos elevados mayores al esfuerzo de fluencia, en esta zona los esfuerzos van desde 738 mpa a 750 mpa. Justo donde inicia la zona roscada el perno también sufre un esfuerzo elevado de 796,46 mpa , sin alcanzar la ruptura.

### 3.2.1.2. Fuerza de 21 toneladas

#### 3.2.1.2.1. Análisis por deformación en milímetros.

Este análisis trabaja con una leyenda de colores, asignando a la conexión, colores según su deformación.

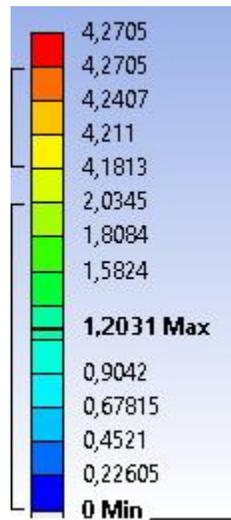


Ilustración 51. Leyenda de deformaciones en mm.

A continuación, se realizará el análisis de las deformaciones presentadas en la conexión cuando es aplicada una fuerza de 205,94025 KN (21 ton).

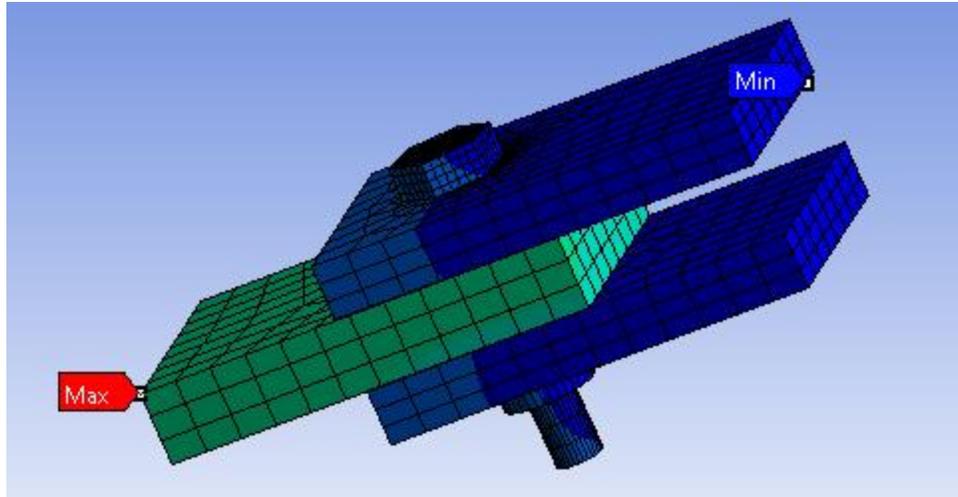


Ilustración 52. Deformación en la conexión. Fuente: Propia.

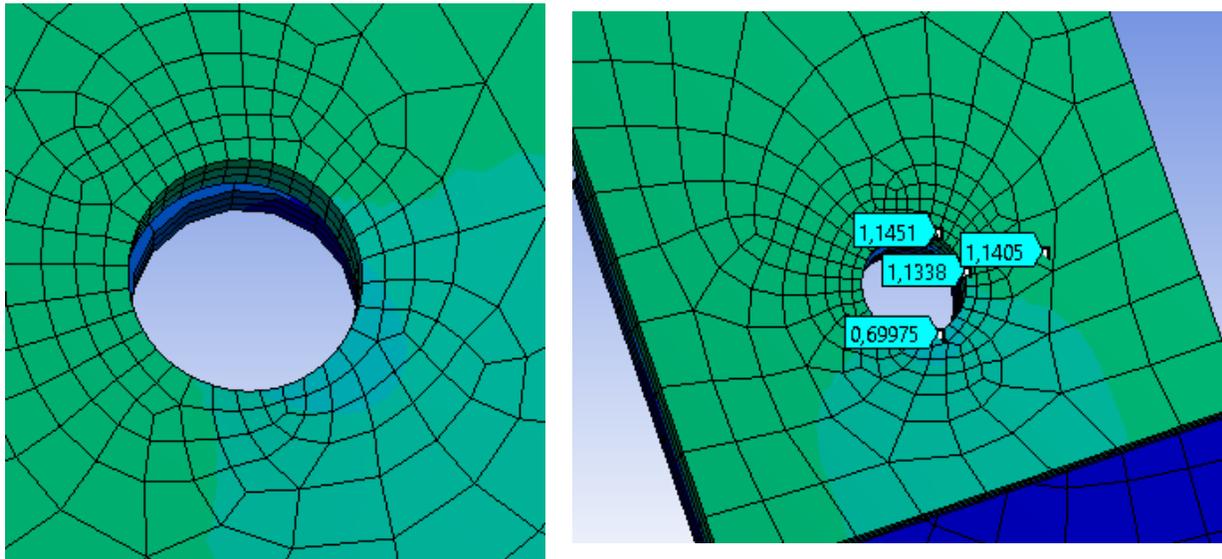


Ilustración 53. Deformación en milímetros en la placa central de la conexión. Fuente: Propia.

Como se puede observar en la imagen número 52, la mayor deformación a nivel de placas se presenta en la placa central en la cara donde es aplicada la fuerza, dicha deformación equivale a 1,20 mm. Como se observa en la imagen 52 y 54, la deformación en las placas externas es nula, tanto en los orificios como en las zonas más cercanas al perno. En la ilustración 53 se puede observar la deformación de la placa central, mientras la zona del orificio se acerca más a la

parte externa de la conexión (donde es aplicada la fuerza) mayor es su deformación, pasa de 0,69mm a 1,145mm.

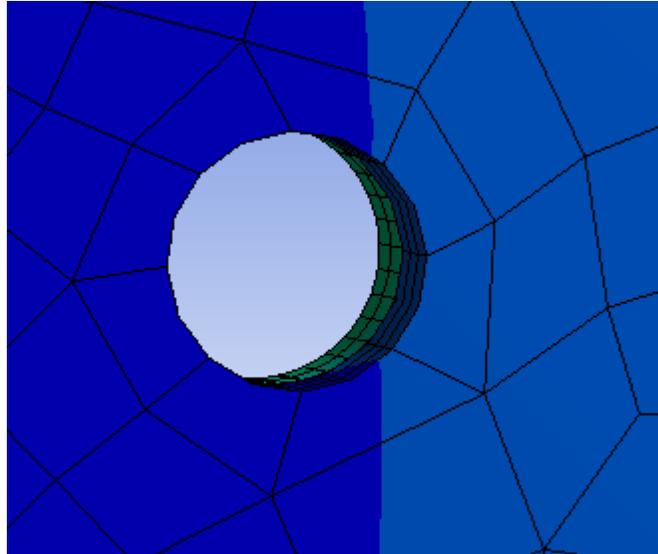


Ilustración 54. Deformación de los orificios de las placas externas.  
Fuente: Propia.

La tuerca también sufre deformaciones, aunque bastante leves como se puede observar en la siguiente imagen van de 0,11mm a 0,43mm, de igual manera la zona que está más cercana a la fuerza aplicada es donde esto ocurre.

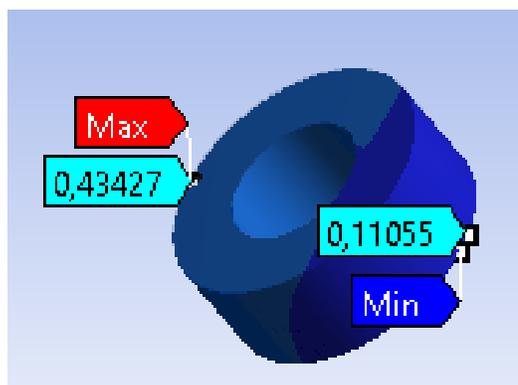


Ilustración 55. Deformaciones en milímetros en la tuerca. Fuente: propia.

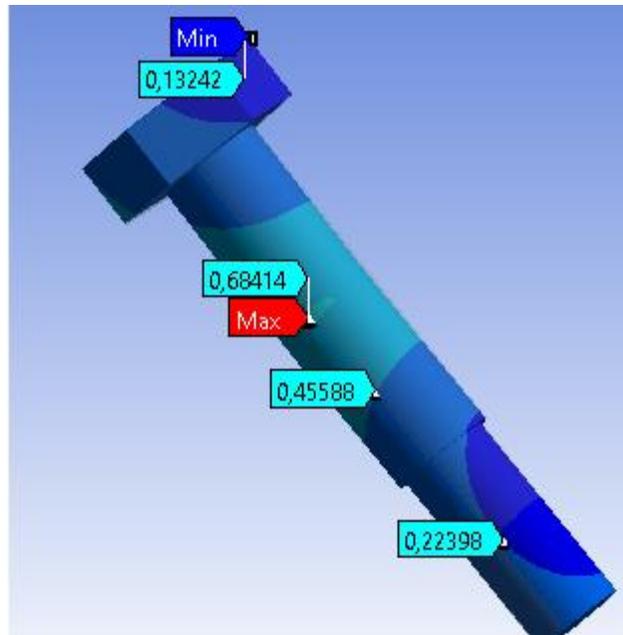


Ilustración 56. Deformación en mm del perno A-325. Fuente Propia.

Como se observa en la imagen anterior y como era de esperarse, la mayor deformación presentada en el perno es en la zona central donde se encuentra la placa de 1 pulgada de espesor con una deformación máxima de 0,684 mm, en la zona donde se encuentran las placas restantes se tiene una deformación aproximada de 0,45mm. En una zona de la cabeza se tiene una deformación de 0,3mm aunque en otra parte de esta, no sufre casi deformación (0,1mm).

#### 3.2.1.1.2 Análisis de esfuerzos *von-mises*

A continuación, se analizarán los esfuerzos presentados en cada elemento de la conexión, con la intención de obtener la manera en la que estos se comportan. Los esfuerzos están expresados en mega pascales donde el mayor esfuerzo es de 870,91 mpa y el mínimo es de 0,16775 mpa y siguen la siguiente leyenda de colores,

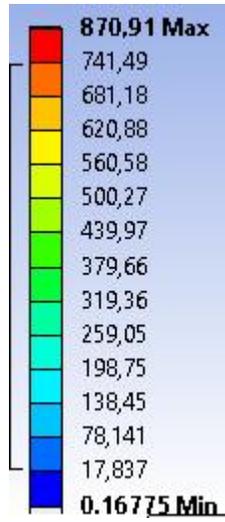


Ilustración 57. Leyenda de esfuerzos de la conexión en MPA

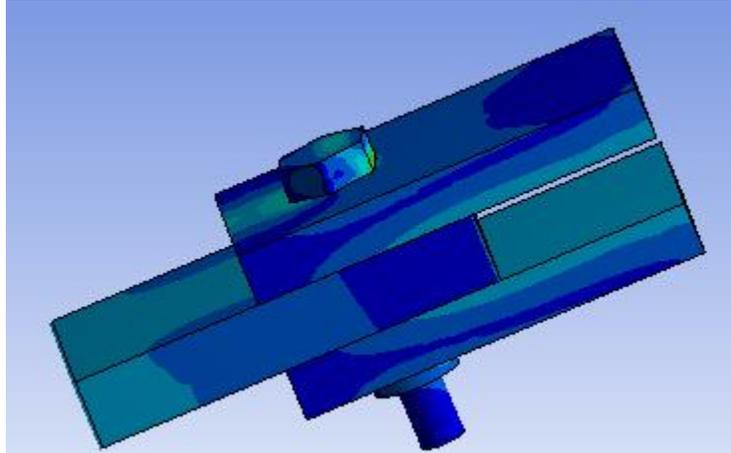


Ilustración 59. Esfuerzos en la conexión con perno A-325. Fuente: propia.

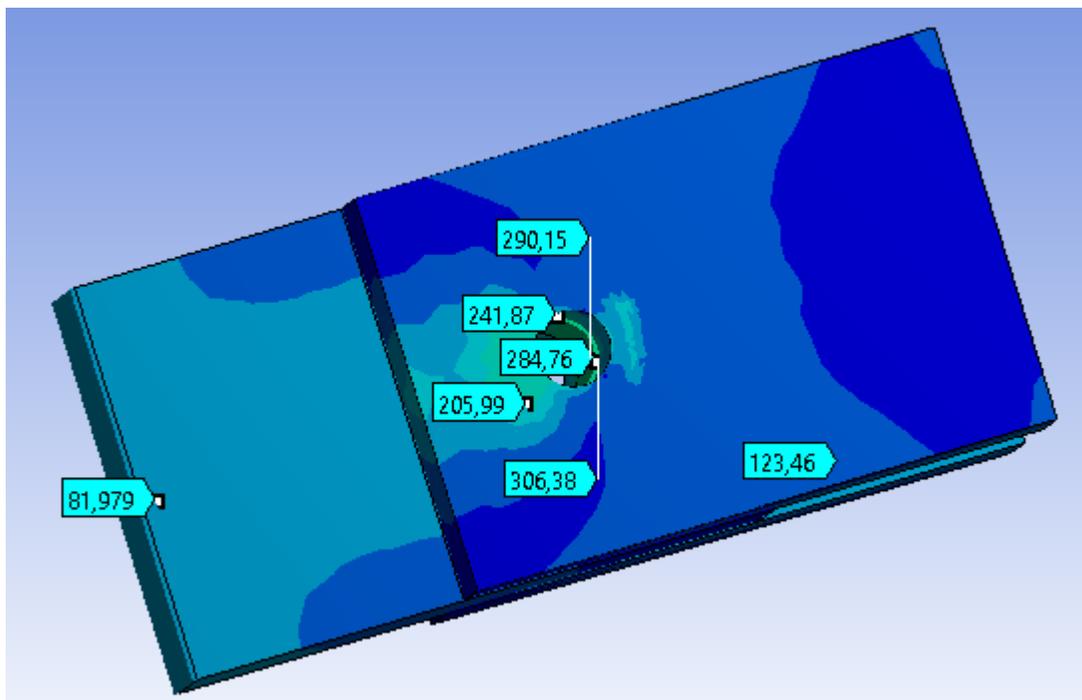


Ilustración 58. Esfuerzos varios en mpa en placas de la conexión bajo el efecto de una carga aproximada de 21 ton. Fuente: propia

En la imagen anterior se puede observar que la placa central supera su límite de plasticidad, es decir que ya no puede volver a su estado original ya que alcanza un esfuerzo de 306,38 mpa y su límite plástico es de 248 mpa, pero con esto demostramos que no alcanza la ruptura ya que no llega a los 400 mpa.

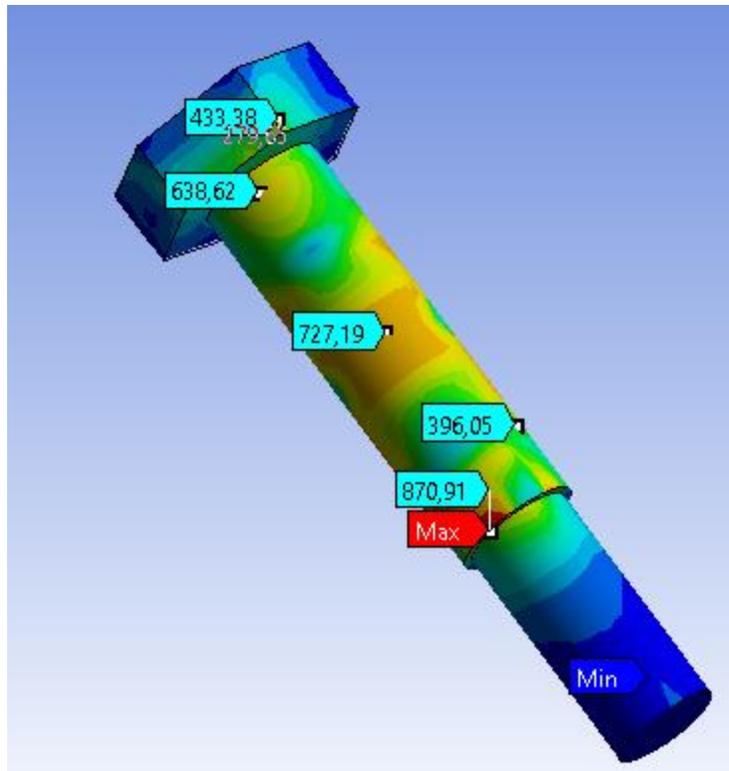


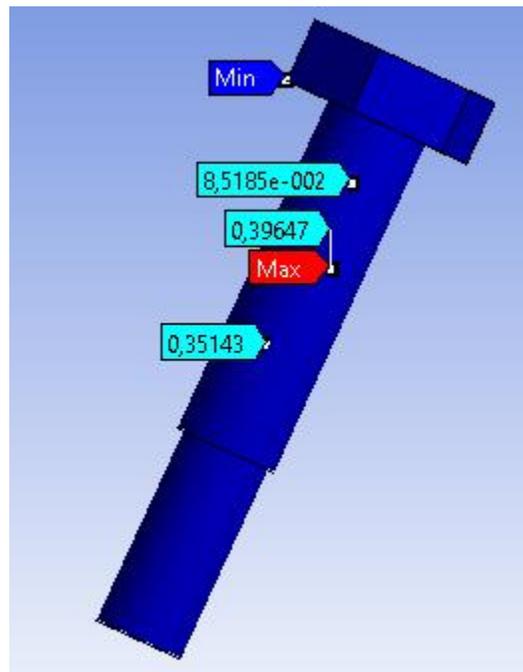
Ilustración 60. Esfuerzos en mpa presentados en el perno A-325 cuando se aplica una fuerza de 25 ton. Fuente: Propia.

En esta imagen se pueden observar los esfuerzos a los que está siendo sometido el perno, cuando se aplica una fuerza de 25 ton en la conexión, en la zona donde se encuentra la mayor deformación el elemento tiene un esfuerzo de 727,19 mpa. Este no es el mayor esfuerzo al que está sometido, en casi ninguna zona, el material sale de la zona elástica, el elemento sobrepasa el límite de ruptura justo en la zona del cambio de diámetro, alcanzando un esfuerzo máximo de 870,91 mpa mayor a 816,41 mpa.

### 3.2.1.3. Fuerza de 5,7 toneladas

Esta simulación se realiza con la idea de analizar la conexión con el coeficiente de fricción del acero que es 0,3, pero como se explicó previamente, debido a la capacidad computacional, se utiliza un coeficiente de 0,2. De igual manera está sucediendo con la pretensión mínima el AISC solicita que dicho valor sea de 701170,15 N, pero se utilizan 150000 N. En el momento de analizar las

deformaciones en los elementos de esta simulación, se puede observar que son bastante bajas a tal nivel que no se ven representadas en la leyenda de colores. La mayor deformación presentada es de 0,39647 mm en el vástago del perno, las placas no sufren deformación alguna ni en los orificios que normalmente se ve afectada.



*Ilustración 61. Deformación en mm presentada en el perno bajo el efecto de una fuerza de 5,7 ton. Fuente: propia.*

A diferencia de las deformaciones, los esfuerzos sí varían ya que la zona de la cabeza y donde se ubica la tuerca son las que se ven más afectadas en la conexión. Esto se debe a la pretensión aplicada, en la unión del perno con la rosca es donde se presenta el mayor esfuerzo de la conexión, este está en el límite elástico del material y el mayor esfuerzo generado es de 395,25 mpa, en el vástago del perno también se genera un esfuerzo representativo igual a 538,84 mpa.

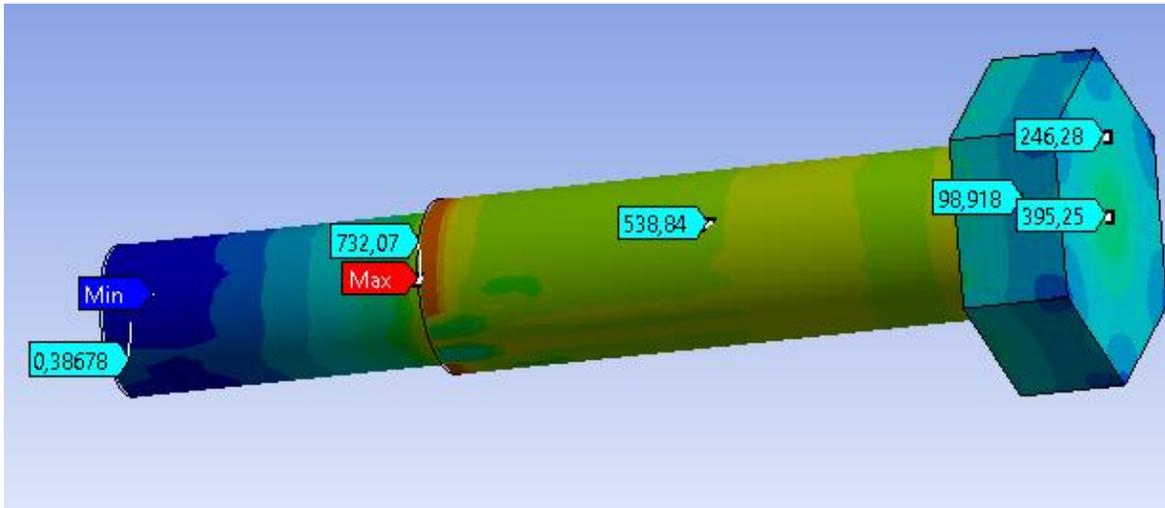


Ilustración 62. Esfuerzos varios en mpa en el perno A-325 bajo una pretensión de 150000 N. Fuente: Propia

### 3.2.2. Conexión con pernos J-429

Se realizan dos simulaciones de la conexión con este tipo de perno. En todas las simulaciones se revisarán los esfuerzos y las deformaciones de la conexión haciendo énfasis en los orificios de las placas y en el perno.

#### 3.2.2.1. Fuerza de 21 toneladas

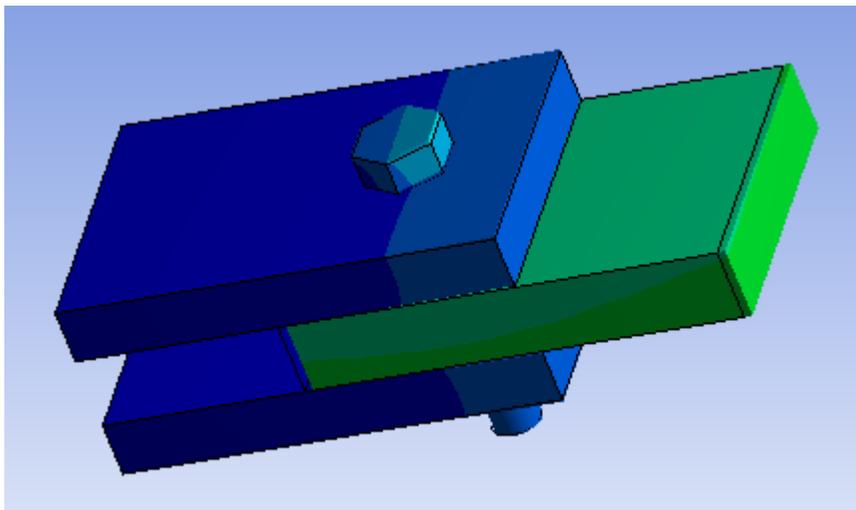


Ilustración 63. Deformaciones en mm guiándose de un espectro de colores. Fuente: propia.

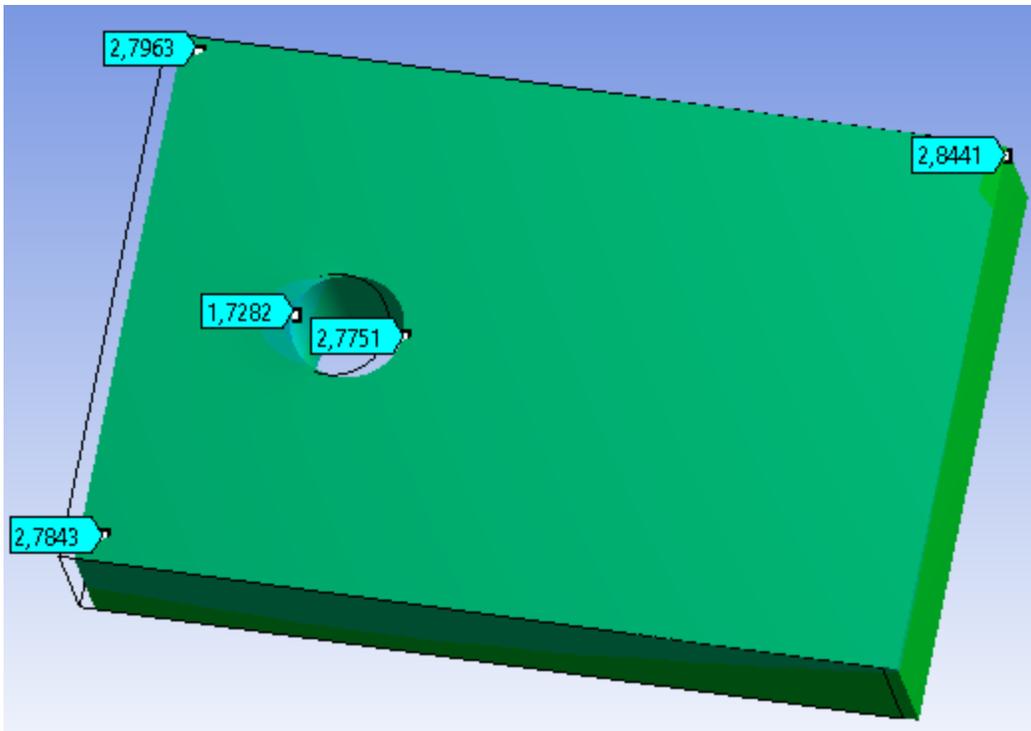


Ilustración 64. Deformación en mm de la placa central de conexión J-429 bajo el efecto de una fuerza de 21 ton. Fuente: propia.

En la imagen previa se pueden observar las deformaciones en mm presentadas por la placa central, el valor mayor se presenta en la cara donde es aplicada la fuerza externa igual a 2,8441 mm. También se puede observar cómo el

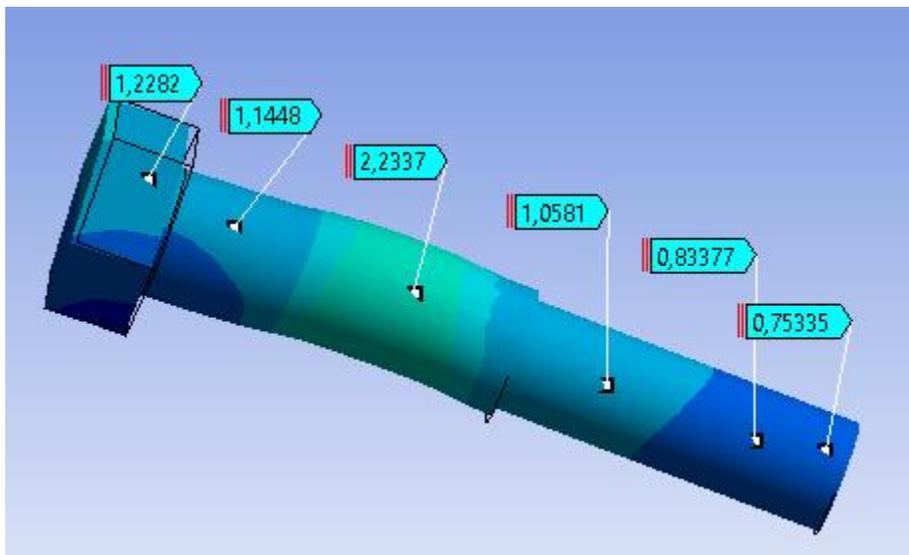
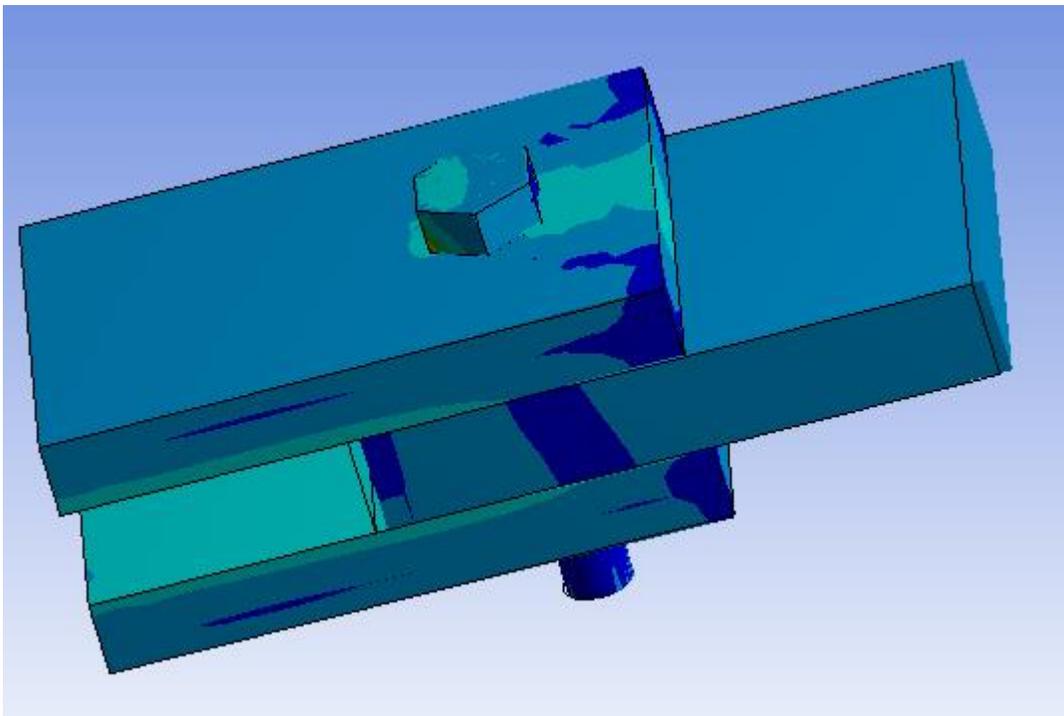


Ilustración 65. Deformaciones en mm presentadas por el perno J-429 bajo una fuerza de 21 ton. Fuente: propia.

orificio alarga su forma y tiene una deformación de 1,73mm a 2,78.

En la imagen 65 se puede observar la deformación presentada por el perno J-429. Como se observa en la ubicación del plano de falla del vástago se tiene la mayor deformación de una magnitud de 2,2337mm, a medida que se alejan de este plano las deformaciones disminuyen.



*Ilustración 67. Representación gráfica de los esfuerzos en una conexión a cortante doble con un perno J-49 y una fuerza aplicada de 21 ton. Fuente: propia.*

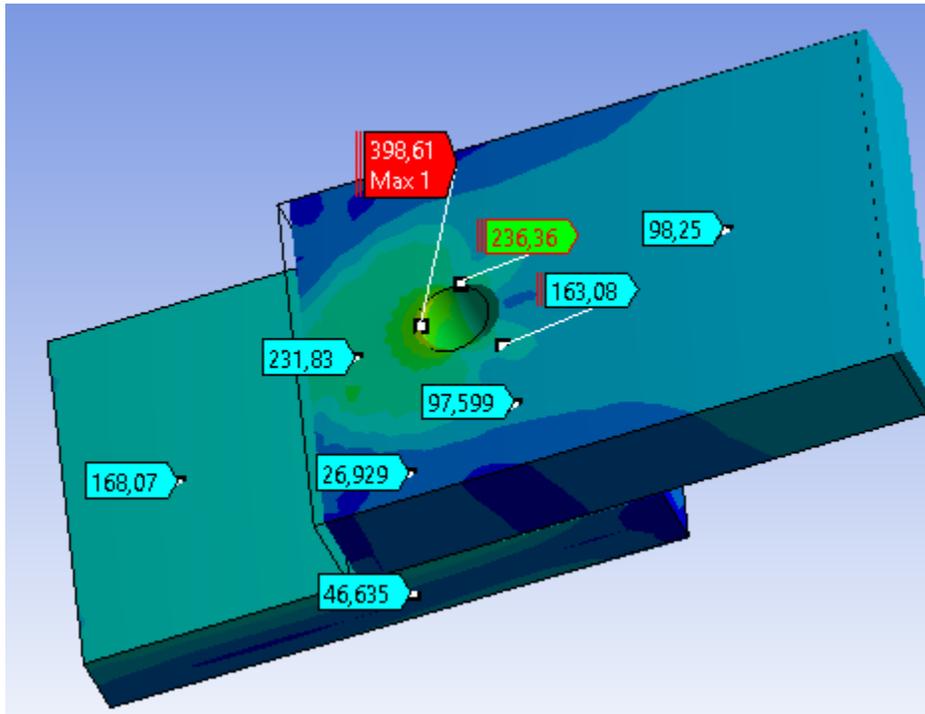


Ilustración 68. Esfuerzos en mpa varios conexión con J-429. Fuente: propia.

Se puede observar en la imagen anterior, el esfuerzo al que son sometidas dos de las placas de la conexión, el mayor se encuentra en la parte externa del orificio de una magnitud de 398,61 mpa, esta zona y la mayoría de esta, supera el límite plasticidad. Al analizar el perno se puede observar que este pasa su límite de ruptura en ciertas zonas de la cabeza, alcanzando el mayor esfuerzo de la conexión igual a 942,01 mpa, ciertas zonas del vástago entran en la plasticidad, ya que es donde hay mayor concentración de esfuerzos.

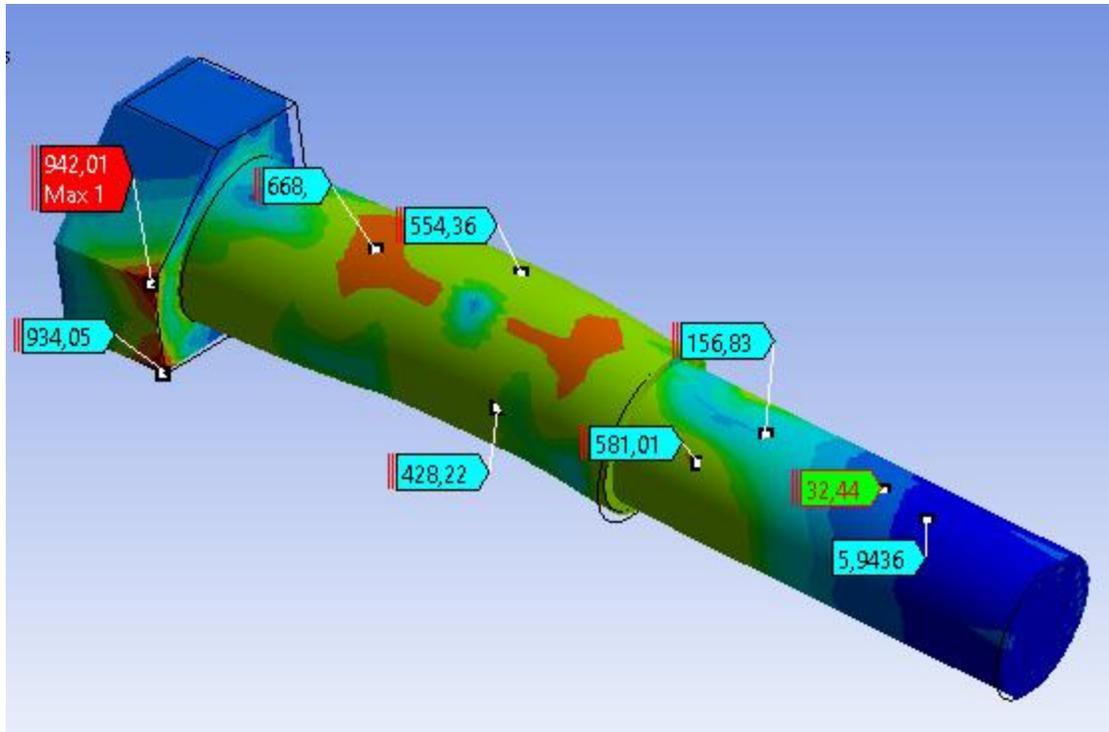


Ilustración 69. Esfuerzos en mpa varios presentados por el perno J-429. Fuente: propia.

### 3.2.2.2. Fuerza de 5,7 toneladas

Al igual que en el caso con la conexión A-325 se deciden utilizar esos valores debido a la capacidad computacional. En las siguientes imagines se pueden observar las deformaciones y esfuerzos presentados en la conexión, ya que la fuerza aplicada es de 5,7 toneladas las deformaciones presentadas en la placa son despreciables, la mayor deformación presente es de 1,7096 mm en el plano de falla del perno. A diferencia de la mayor deformación presentada en el perno, el mayor esfuerzo presentado en la conexión se encuentra en la cabeza de este, y tiene un valor de 716,15 mpa entrando en el rango plástico sin alcanzar la ruptura.

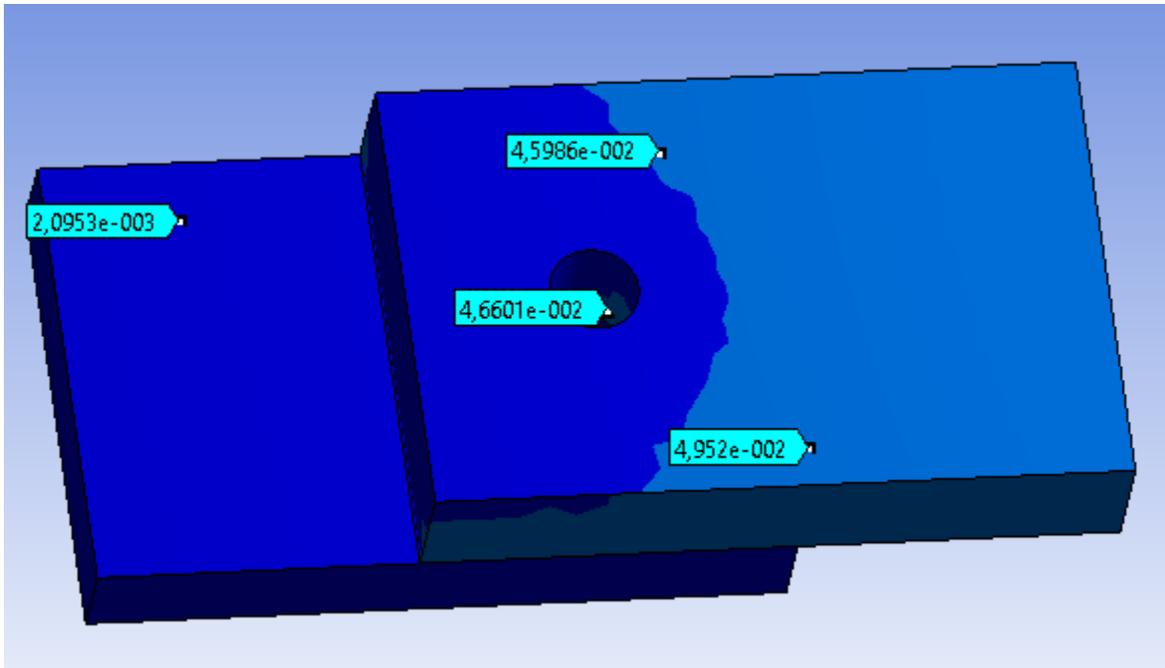


Ilustración 70. Deformaciones en mm presentes en las placas. Fuente:propia

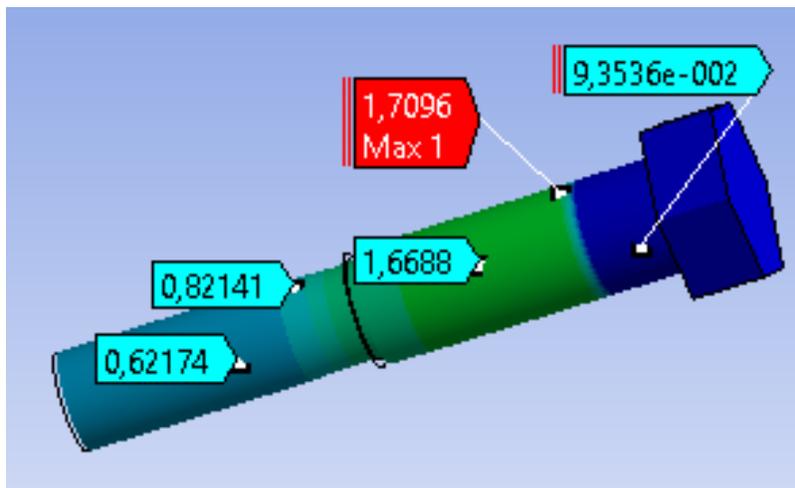


Ilustración 71. Deformaciones en mm presentes en el perno J-429. Fuente: propia.

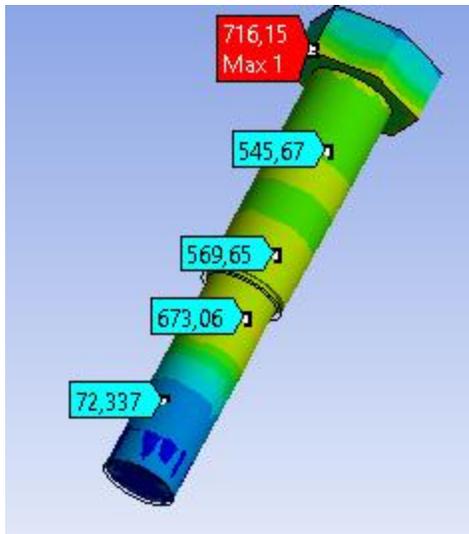


Ilustración 72. Esfuerzos en mpa presentados en el perno J-429. Fuente: propia

### 3.4 Comparación de resultados

A continuación, se realiza la comparación de las simulaciones entre ambas conexiones tanto en las placas como en los pernos.

Tabla 16. Comparación de esfuerzos y deformaciones en los pernos A-325 y J-429

Fuerza aplicada en ton		J-429		A-325	
		Deformación (mm)	Esfuerzos (Mpa)	Deformación (mm)	Esfuerzos (Mpa)
21	MAX	2,2453	942,01	0,68468	870,91
	MIN	0,2506	0,82037	0,12563	0,20967
5,7	MAX	1,7096	716,15	0,39647	732,07
	MIN	0,036985	0,27797	0,085185	0,38678

En la tabla anterior se puede observar cómo, en el momento de aplicar la carga por aplastamiento (21 ton) el perno j-429 sufre mayores deformaciones, y alcanza mayores esfuerzos, y al comparar la falla por deslizamiento ocurre de igual manera, exceptuando en los esfuerzos máximos ya que el perno A-325 alcanza y llega a los 732, 07 mpa y el J-429 a 716,15 mpa.

Tabla 17. Esfuerzos y deformaciones presentadas en las placas de la conexión A-325.

Fuerza aplicada en ton		Placa central conexión A-325		Placas externas conexión A-325	
		Deformación (mm)	Esfuerzos (Mpa)	Deformación (mm)	Esfuerzos (Mpa)
21	MAX	1,2031	316,65	0,41966	318,23
	MIN	0,6719	1,0461	0	1,2846
5,7	MAX	0,06322	163,4	0,097132	262,45
	MIN	0,036771	0,49694	0	0,26808

Tabla 18. Esfuerzos y deformaciones presentadas en las placas de la conexión J-429.

Fuerza aplicada en ton		Placa central conexión J-429		Placas externas conexión J-429	
		Deformación (mm)	Esfuerzos (Mpa)	Deformación (mm)	Esfuerzos (Mpa)
21	MAX	2,921	398,61	1,221	396,61
	MIN	1,6234	2,3441	0	2,6907
5,7	MAX	0,063345	163,24	1,0639	306,19
	MIN	0,029767	0,4889	0	0,2598

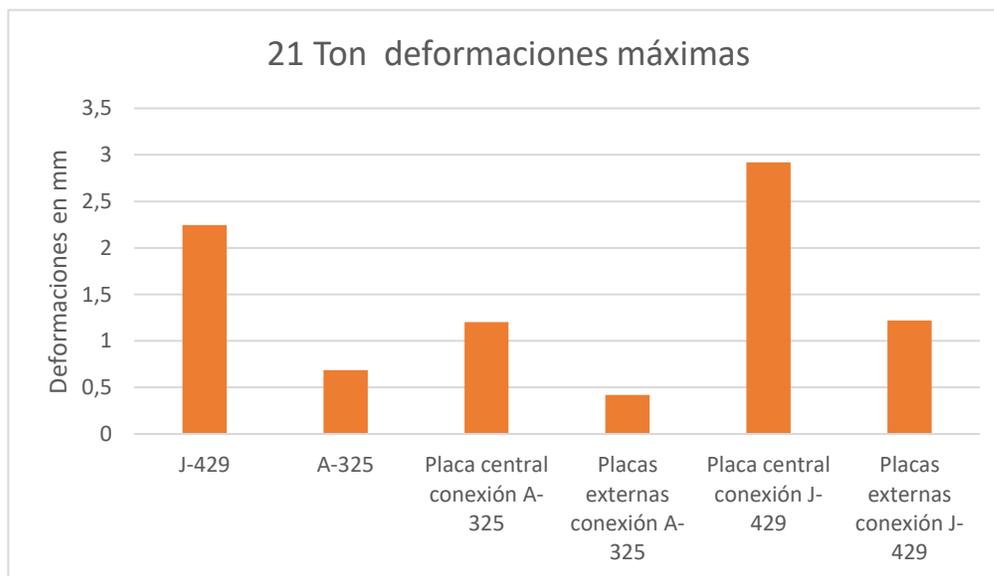


Gráfico 1 Comparación de las deformaciones máximas de los elementos de las conexiones bajo el efecto de una fuerza de 21 ton

En este gráfico se puede observar que la deformación máxima presentada en las simulaciones la tiene la placa central de la conexión J-429, también se puede observar que el perno j-429 se deforma considerablemente más que el A-325.

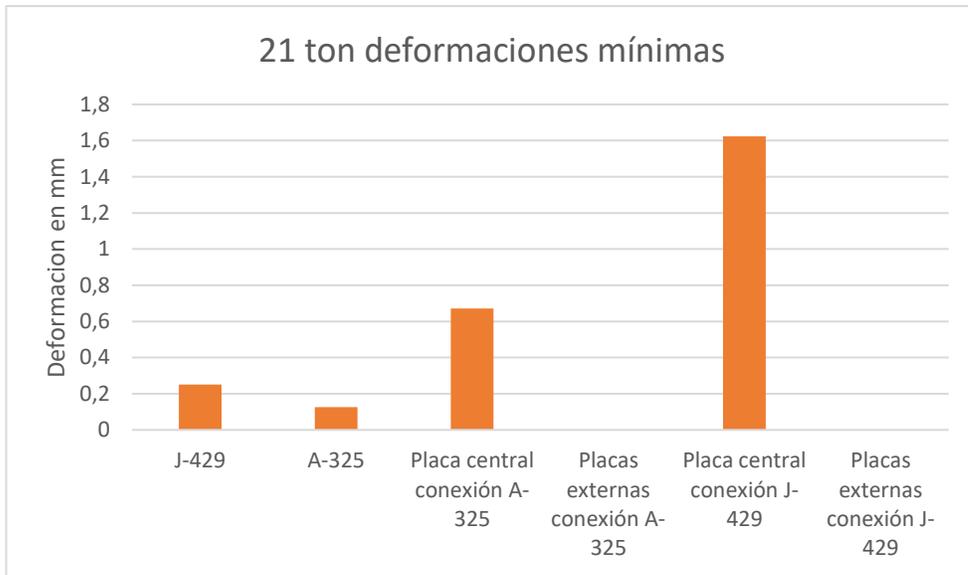


Gráfico 2. Comparación de las deformaciones mínimas de los elementos de las conexiones bajo el efecto de una fuerza de 21 ton

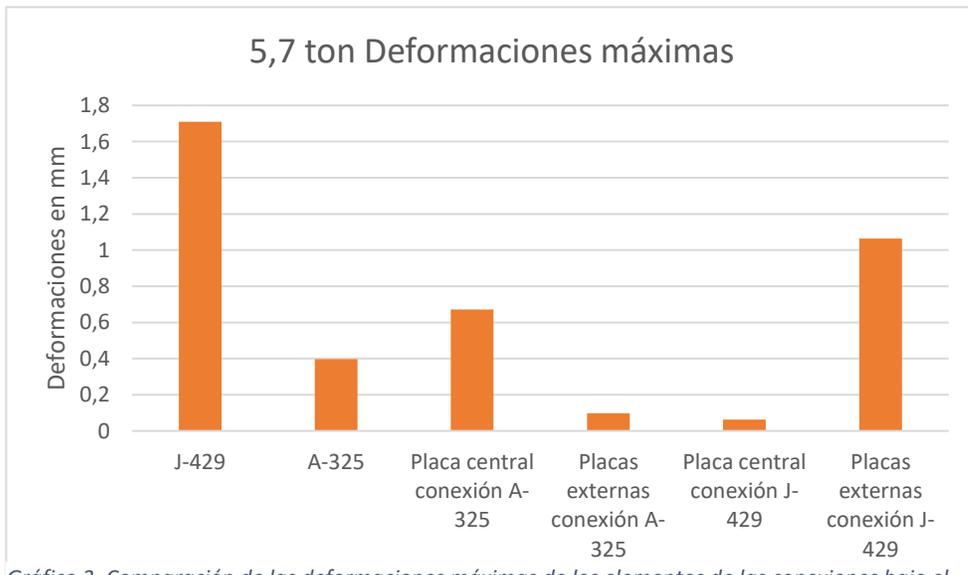


Gráfico 3. Comparación de las deformaciones máximas de los elementos de las conexiones bajo el efecto de una fuerza de 5,7 ton.

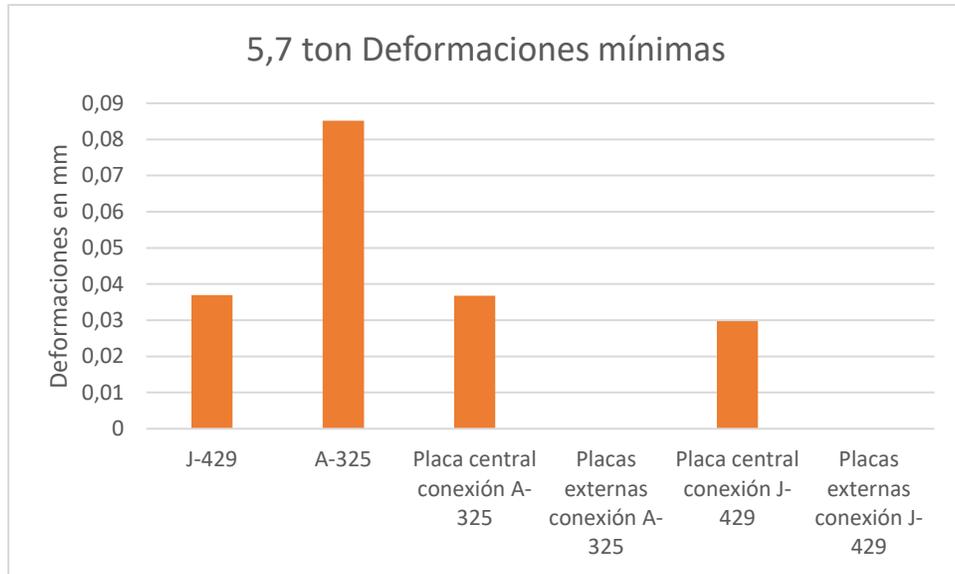


Gráfico 5. Comparación de las deformaciones mínimas de los elementos de las conexiones bajo el efecto de una fuerza de 5,7 ton.

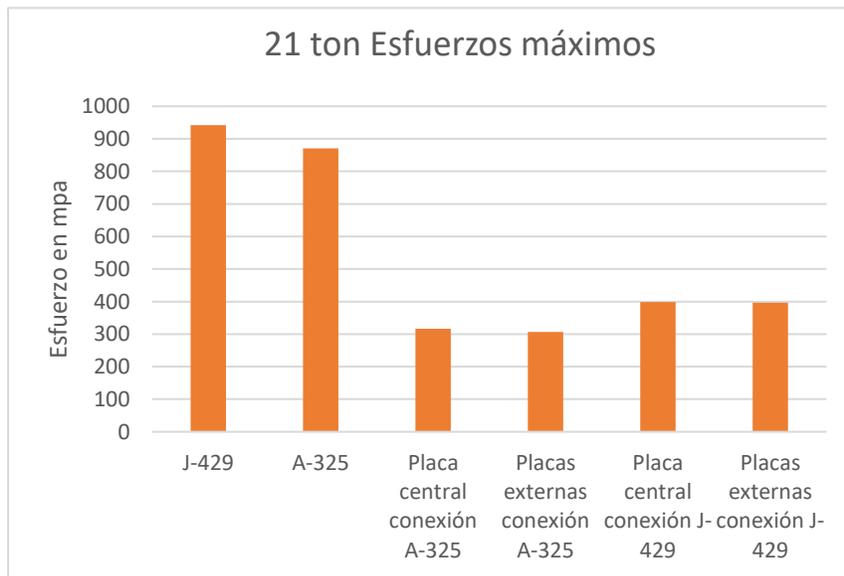


Gráfico 4. Comparación de los esfuerzos máximos de los elementos de las conexiones bajo el efecto de una fuerza de 21 ton.

En los gráficos relacionados con las deformaciones de las conexiones se puede observar cómo los elementos de la conexión que utiliza el perno J-429 es el que se ve más afectado, en el momento de aplicar la fuerza de 21 ton la placa

central es la que sufre mayores deformaciones, y al aplicar la fuerza de 5,7 ton con una pretensión mayor el perno J-429 es el que se ve más afectado, esto puede deberse al tamaño de su cabeza.

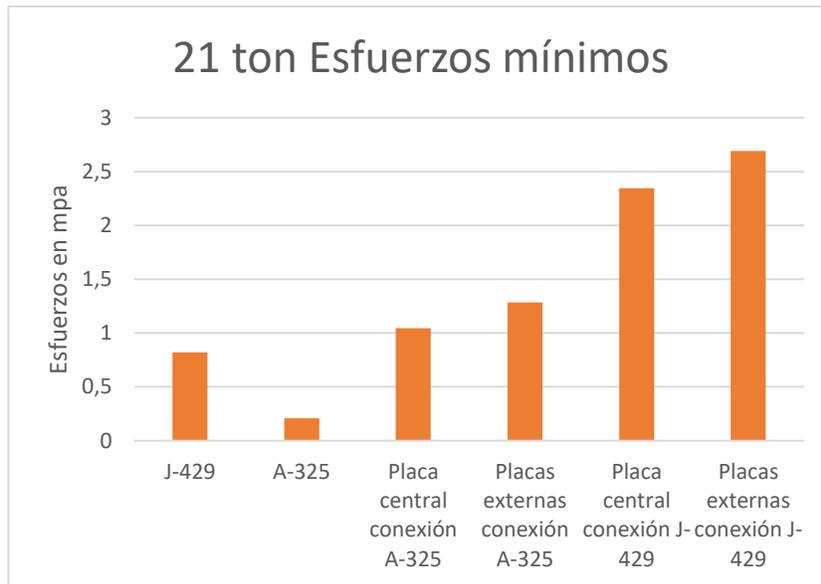


Gráfico 7. Comparación de los esfuerzos mínimos de los elementos de las conexiones bajo el efecto de una fuerza de 21 ton.

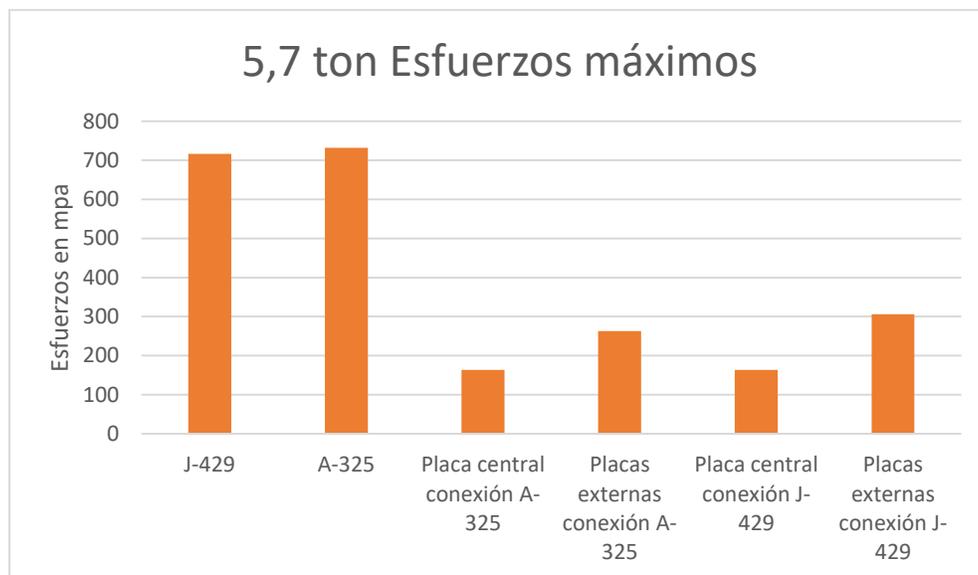


Gráfico 6. Comparación de los esfuerzos máximas de los elementos de las conexiones bajo el efecto de una fuerza de 5,7 ton.

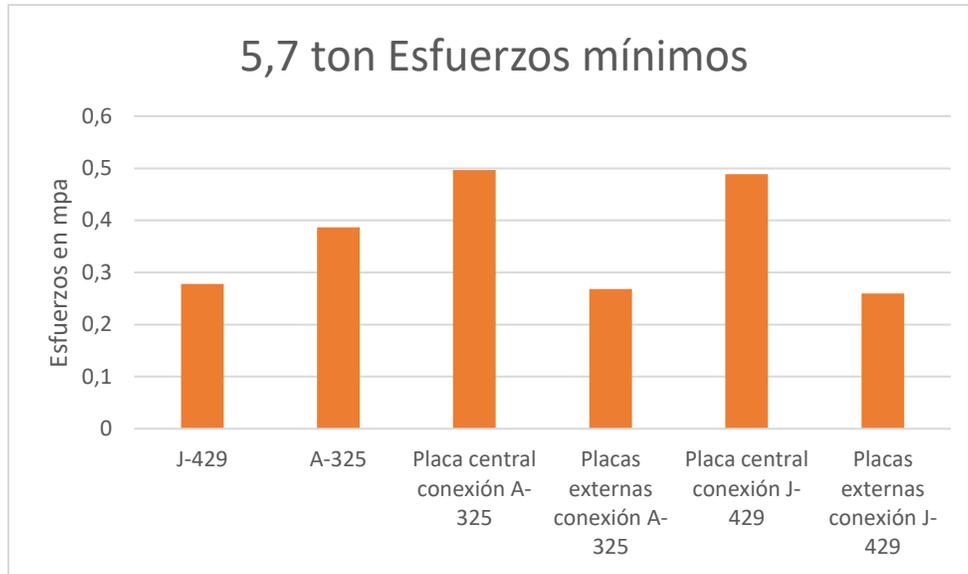


Gráfico 8. Comparación de los esfuerzos mínimos de los elementos de las conexiones bajo el efecto de una fuerza de 5,7 ton.

En el momento de comparar los esfuerzos presentados en los elementos de las diferentes conexiones es variable ya que cuando se aplica una fuerza de 21 ton bajo el socado y no pretensionado, el mayor esfuerzo lo presenta el perno J-429 pero en el momento de aplicar una pretensión mayor y una fuerza de 5,7 ton ambos pernos llegan a un esfuerzo máximo muy similar.

## Conclusiones

- El programa ANSYS 19,1 realiza simulaciones de manera efectiva, la veracidad de sus resultados depende del mallado aplicado y de la capacidad de procesamiento de datos disponible.
- El perno A-325 soporta la carga de 21 ton sin llegar al límite de fluencia.
- El perno J-429 supera el límite elástico al aplicarse la fuerza de diseño de 21 ton.
- La pretensión de los pernos a cortante, dentro de una conexión, no genera grandes efectos en ellos.
- El perno J-429 es apreciablemente menos rígido que el A-325.
- En el momento en el que el perno J-429 sufre mayor deformación, se genera mayor esfuerzo y deformaciones en las placas de la conexión.
- El tamaño de la cabeza del perno sí afecta el comportamiento del perno, sobre todo cuando se aumenta la pretensión.
- Aunque las deformaciones en la zona del vástago en el plano de corte del perno J-429 sean mayores a las del A-325, los esfuerzos presentados por este en dicha zona, son menores.
- Aunque se nota que la zona roscada del J-429 es mayor a la del A-325 no se debe buscar uno con una longitud mayor, ya que se observa que dicha zona no queda en el plano de falla por cortante.

## Recomendaciones

1. Se recomienda realizar nuevamente las simulaciones, sin la limitación de procesamiento de datos, para poder emplear la rosca del perno, la tuerca y la arandela, y además, mejorar así el mallado de la conexión, para la obtención de resultados más exactos.
2. Se recomienda utilizar placas de acero A-50 o aumentar las dimensiones de estas.
3. Se recomienda validar experimentalmente los resultados obtenidos en las simulaciones.

4. Se recomienda nutrir el modelo de ANSYS con datos obtenidos de pruebas de laboratorio y no con datos teóricos.
5. Se recomienda implementar arandelas especiales en la zona de la cabeza del perno J-429 para analizar cómo esto colaboraría en su comportamiento en el momento de aumentar la pretensión.

## Referencias bibliográficas

- Andes, U. d. (s.f.). *Capítulo 8 Conexiones apernadas*. Obtenido de <http://webdelprofesor.ula.ve/nucleotrujillo/americanb/08-conexionesApernadas/8-6.html>.
- Anónima. (2018). *Anchor bolt and construccionfastener manufacturer*. Obtenido de <http://www.portlandbolt.com/technical/specifications/sae-j429/>.
- Anónimo. (2018). *Glasser & Associates, INC*. Obtenido de <https://www.glaserbolt.com/materials-structural-bolts-in-ASTM-a325>.
- Anónimo. (s.f.). *alibaba.com*. Obtenido de <https://spanish.alibaba.com/product-detail/heavy-hex-bolt-astm-a325-a490-bolt-for-steel-structure-high-strength-structural-bolts-carbon-steel-bolt--900616423.html>.
- Arias, F. G. (Julio de 2012). *Sexta*. Obtenido de <http://evidencia.com/wp-content/uploads/2014/12/EL-PROYECTO-DE-INVESTIGACIÓN-6ta-Ed.-FIDIAS-G.-ARIAS.pdf>
- Csernak, J. M. (2016). *Diseño de estructuras de acero*. Mexico: Alfaomega.
- Csrnak, J. C. (2012). *Diseño de estructuras de acero*. Mexico: Alfaomega.
- Fastenal Company. (04 de 03 de 2009). *Fastenal*. (Fastenal Engineering and Design Support) Recuperado el 19 de 02 de 2017, de Fastenal Engineering: <https://www.fastenal.com/en/61/bolted-joint-design-analysis;jsessionid=OVKrEgHv+5lYX+iw6m06yD6l.443d7b2e-1555-3602-a586-c0d73327934b>
- Fastenal Company. (s.f.). *Fastenal*. (Fastenal) Obtenido de Engineering Glossary: <https://www.fastenal.com/en/81/engineering-glossary#top>
- Mendoza, B. (2005). *Modelacion de proceso de manufactura* . <http://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/13631/1391%202006.pdf?sequence=1>.
- Salazar, J. (s.f.). *Resistencia de materiales*. Obtenido de Universidad nacional de Colombia: [http://www.bdigital.unal.edu.co/5855/1/jorgeeduardosalazartrujillo20072\\_Parte1.pdf](http://www.bdigital.unal.edu.co/5855/1/jorgeeduardosalazartrujillo20072_Parte1.pdf)
- Swanson, J. A. (2002). *Effects of variable pretension on bolted connection behavior*. Cincinnati.
- T, W. (2012).

Trujillo. (s.f.). *Capítulo 8, Conexiones Apernadas*. Obtenido de <http://webdelprofesor.ula.ve/nucleotrujillo/americanab/08-conexionesApernadas/8-3.html>.

Valero, A. F. (2004). *aplicaciones de los elementos finitos*.

Valero, E. F. (2004). *aportaciones al estudio de las maquinas electricas de flujo axial mediante la aplicación del metodo de los elementos finitos*. Cataluña.

Verdugo, A. (s.f.). *Capítulo 6 Conexiones*. Obtenido de [file:///C:/Users/Ingeniero/Downloads/Capitulo\\_6\\_Conexiones.pdf](file:///C:/Users/Ingeniero/Downloads/Capitulo_6_Conexiones.pdf).

W. S. (2012). Simple Connections. En W. T. Segui, *Steel Design* (M. V. Hernández, Trad., pág. 382). Estados Unidos de América: Cengage Learning.