

**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL ESFUERZO EN UNA PLACA PLANA
CON AGUJEROS CIRCULARES UTILIZADOS POR ELEMENTOS DE SUJECCIÓN,
MEDIANTE EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS.**

DANIELA RODAS RODRÍGUEZ

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

PEREIRA

2018

**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL ESFUERZO EN UNA PLACA PLANA
CON UNO Y DOS AGUJEROS CIRCULARES UTILIZADOS POR ELEMENTOS DE
SUJECCIÓN, MEDIANTE EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS.**

DANIELA RODAS RODRÍGUEZ

**PROYECTO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO PARA OPTAR POR EL
TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO.**

DIRECTOR

MSc. LUIS CARLOS FLOREZ GARCÍA

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

PEREIRA

2018

Nota de aceptación:

Firma del jurado

Pereira, __ de noviembre de 2018

CONTENIDO

| | | |
|--------|---|----|
| 1. | INTRODUCCIÓN | 9 |
| 2. | JUSTIFICACIÓN | 10 |
| 3. | OBJETIVOS | 11 |
| 3.1. | OBJETIVO GENERAL | 11 |
| 3.2. | OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 11 |
| 4. | MARCO TEÓRICO | 12 |
| 5. | MODELO MATEMATICO | 15 |
| 5.1. | MODELO DE CALCULO PARA CONCENTRACION DE ESFUERZO | 15 |
| 5.2. | MODELO GEOMÉTRICO | 16 |
| 5.2.1. | PLACA CON UN AGUJERO | 16 |
| 5.2.2. | PLACA CON DOS AGUJERO | 18 |
| 5.3. | MALLADO | 20 |
| 5.4. | CONDICIONES DE FRONTERA | 22 |
| 6. | VALIDACIÓN EXPERIMENTAL PARA UNA PLACA CON UN AGUJERO | 25 |
| 6.1. | CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL | 26 |
| 6.1.1. | ENSAYO DE TRACCIÓN | 26 |
| 6.1.2. | ENSAYO METALOGRAFICO | 29 |
| 6.2. | PRUEBAS DE LABORATORIO | 31 |

| | |
|--|----|
| 6.2.1. ELEMENTOS DE SUJECIÓN | 32 |
| 7. RESULTADOS | 34 |
| 7.1. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN | 34 |
| 7.1.1. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN PARA PLACA CON UN AGUJERO | 34 |
| 7.1.2. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN PARA PLACA CON DOS AGUJEROS | 37 |
| 7.2. RESULTADOS DE LABORATORIO | 41 |
| 8. ANÁLISIS DE RESULTADOS | 43 |
| 9. CONCLUSIONES | 44 |
| 10. BIBLIOGRAFIA | 45 |
| 11. ANEXOS | 47 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Parámetros geométricos para una placa plana con un agujero | 18 |
| Tabla 2. Parámetros geométricos para una placa plana con dos agujeros | 20 |
| Tabla 3. Tipo de mallado y número de elementos | 21 |
| Tabla 4. Composición química del material | 26 |
| Tabla 5. parámetros geométricos para pruebas experimentales | 33 |
| Tabla 6. Resultados para el ensayo de tracción | 41 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Distribución de esfuerzos en placa plana | 12 |
| Figura 2. Geometría para placa plana con un agujero | 16 |
| Figura 3. Geometría para placa plana con dos agujeros | 19 |
| Figura 4. Independencia de malla | 21 |
| Figura 5. Malla con elementos combinados | 22 |
| Figura 6. Carga axial | 23 |
| Figura 7. Soporte sin fricción | 23 |
| Figura 8. Soporte de compresión | 24 |
| Figura 9. Diagrama de validación experimental | 25 |
| Figura 10. Máquina de ensayos universal umib 600-s | 27 |
| Figura 11. Curva característica del material | 28 |
| Figura 12. Probeta para ensayo | 28 |
| Figura 13. Montaje de la muestra | 29 |
| Figura 14. Microestructura del material a 500x | 30 |
| Figura 15. Acero astm a1011 a 500x | 31 |
| Figura 16. Geometría de la placa plana con concentrador circular. | 32 |
| Figura 17. Elemento de sujeción | 32 |
| Figura 18. Montaje para el ensayo de tracción | 33 |
| Figura 19. Esfuerzo normal en la placa cargada axialmente. | 35 |
| Figura 20. Simulación placa con un agujero | 36 |

| | |
|--|----|
| Figura 21. Concentradores de esfuerzo en placa plana con agujero central sometida a carga axial | 37 |
| Figura 22. Esfuerzo normal en placa con dos agujeros, $\theta = 60^\circ$ | 38 |
| Figura 23. Agujero superior de la placa plana con dos agujeros sometida a carga axial, $\theta = 60^\circ$ | 38 |
| Figura 24. Agujero inferior de la placa plana con dos agujeros sometida a carga axial, $\theta = 60^\circ$ | 39 |
| Figura 25. Resultados para un ángulo de inclinación de 0° , 30° , 60° y 90° | 40 |
| Figura 26. Resultados para el ensayo de tracción | 42 |
| Figura 27. Placa plana con pasador sometida a carga axial | 43 |
| Figura 28. Placa plana con dos agujeros sometida a carga axial, $r_c/h=0,23$ | 44 |
| Figura 29. Placa plana con dos agujeros sometida a carga axial, $\theta = 90^\circ$ | 47 |
| Figura 30. Agujero superior de la placa plana con dos agujeros sometida a carga axial, $\theta = 45^\circ$ | 48 |
| Figura 31. Agujero inferior de la placa plana con dos agujeros sometida a carga axial, $\theta = 45^\circ$ | 48 |
| Figura 32. Agujero superior de la placa plana con dos agujeros sometida a carga axial, $\theta = 30^\circ$ | 48 |
| Figura 33. Agujero inferior de la placa plana con dos agujeros sometida a carga axial, $\theta = 30^\circ$ | 48 |
| Figura 34. Agujero superior de la placa plana con dos agujeros sometida a carga axial, $\theta = 0^\circ$ | 48 |
| Figura 35. Agujero inferior de la placa plana con dos agujeros sometida a carga axial, $\theta = 0^\circ$ | 48 |

1. INTRODUCCIÓN

A nivel industrial es recurrente el uso de placas planas sometidas a cargas de tracción con agujeros pasantes, los cuales son utilizados por elementos de sujeción como pernos, remaches u otros elementos cilíndricos para unir las placas a otros cuerpos. Estudios realizados previamente por [1], [2], [3], presentan el análisis bajo diferentes cargas con un solo agujero como elemento de soporte, pero se hace evidente la necesidad de profundizar el estudio en placas planas con dos agujeros.

En este trabajo se determinará el comportamiento del esfuerzo por medio del método de elementos finitos en placas planas sujetas a tracción con perforaciones desde uno hasta dos agujeros circulares utilizados como soporte mediante elementos pasantes sin holgura. Se variarán algunos parámetros geométricos como la posición y el diámetro de los agujeros con el fin de obtener el valor del factor de concentración de esfuerzo en función de las relaciones geométricas presentes en la placa plana. El presente estudio se limitará a placas de acero ASTM A1011 por ser uno de los materiales más usados para la fabricación de perfiles y láminas en Colombia [4], con el fin de obtener resultados útiles para la industria Colombiana.

2. JUSTIFICACIÓN

Según cifras del Departamento Administrativo Nacional de Estadística DANE, el sector siderúrgico y metalmecánico ha tenido una participación del 13% en la industria nacional, durante el 2016 [5]. De allí la importancia de estudiar los principales aceros fabricados y utilizados por este sector, como el acero ASTM A1011, del cual se abastecen a empresas del sector de la construcción [6], el transporte [7], entre otros.

En la industria Colombiana existen procesos de manufactura en los cuales las perforaciones de placas planas sometidas a tracción son recurrentes, sin embargo, hay una carencia de información concerniente a tablas de concentradores de esfuerzo para placas planas con perforaciones que utilicen estos agujeros como soporte. Por lo tanto, se hace necesario un estudio que permita analizar el factor de concentración de esfuerzo presente en una placa plana con uno y dos agujeros circulares utilizados como soporte por elementos de sujeción.

Con este trabajo se pretende plantear un estudio del comportamiento del esfuerzo a través de simulaciones con el software Ansys Workbench y ensayos de tracción sobre placas planas de acero ASTM A1011 con agujeros circulares utilizados por elementos de soporte y sometidas a tracción, que permita identificar el valor del factor de concentración de esfuerzo para posiciones relativas de dichas perforaciones. Adicional a esto, se espera encontrar una metodología que permita el uso de esta información en forma práctica y efectiva.

3. OBJETIVOS

3.1.OBJETIVO GENERAL

Determinar el comportamiento del esfuerzo en la zona elástica del material para una placa plana con uno y dos agujeros circulares, utilizados como soporte mediante elementos pasantes bajo múltiples configuraciones, sometidas a cargas de tracción por medio del método de elementos finitos.

3.2.OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Efectuar una revisión bibliográfica sobre ensayos destructivos reales y simulados por medio de elementos finitos como base conceptual para este trabajo.
- Realizar el análisis por medio de elementos finitos del comportamiento del esfuerzo en placas planas sometidas a tracción con uno y dos agujeros circulares como soporte.
- Validar experimentalmente las propiedades mecánicas suministradas por los fabricantes como el esfuerzo último y el límite de fluencia del acero ASTM A1011, por medio de ensayos destructivos
- Validar mediante ensayos de tracción los resultados obtenidos de la simulación y las características mecánicas para la placa plana con un agujero circular centrado.
- Compilar los resultados obtenidos de la simulación y consignarlos en una guía que permita determinar rápidamente los valores de concentración de esfuerzo de las geometrías estudiadas.

4. MARCO TEÓRICO

A nivel industrial es recurrente el uso de placas planas sometidas a cargas de tracción con agujeros pasantes, los cuales son utilizados por elementos de sujeción como pernos, remaches u otros elementos cilíndricos para unir las placas a otros cuerpos.

Esta geometría es encontrada usualmente en industrias como la aeronáutica [8], la automotriz [9] y las obras civiles [10]. Actualmente existen algunos estudios desarrollados a través de simulaciones computacionales y validados experimentalmente, que consideran el efecto de un solo agujero como elemento de soporte bajo diferentes cargas [11]; o bien, estudios que analizan múltiples perforaciones sin el efecto del aplastamiento que genera el elemento pasante [1], [3], lo que implica una desviación importante del comportamiento mecánico real del cuerpo durante su vida útil.

Un concentrador de esfuerzos es cualquier discontinuidad en la sección transversal de una pieza que provoca un aumento de los esfuerzos en las cercanías a dicha discontinuidad. Para el caso analizado en este estudio que comprende una placa plana con agujeros circulares, los esfuerzos normales producidos en la zona elástica del material por una carga axial de tracción se muestran en la Figura 1.

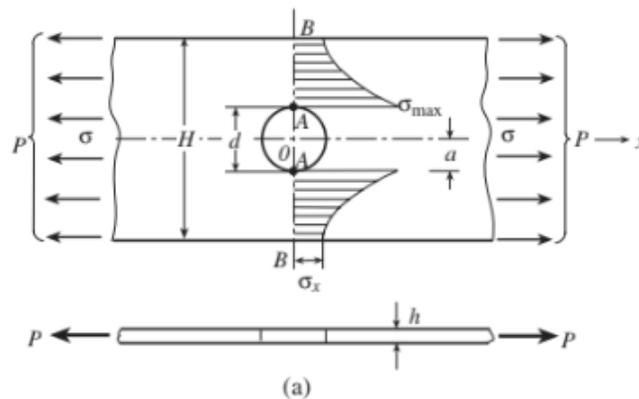


Figura 1. Distribución de esfuerzos en placa plana

La sección A-A en la que los esfuerzos no se distribuyen de manera uniforme, es el lugar donde se genera la concentración de esfuerzos y por lo tanto el esfuerzo es máximo en el borde del concentrador.

Sin embargo, para la sección B-B que está alejada del cambio de sección, la distribución de esfuerzos es uniforme y el valor del esfuerzo se reduce al mínimo.

El valor del esfuerzo en una sección está determinado por la ecuación

$$S_o = \frac{F}{A} \quad (1)$$

Esta ecuación puede ser utilizada para el diseño de piezas estructurales con una sección constante o una sección con cambio gradual de contorno, una vez exista discontinuidad en la sección transversal que genere el efecto de concentración de esfuerzos, el esfuerzo máximo S_{max} es diferente al esfuerzo nominal.

El factor de concentración de esfuerzo para elementos idealmente elásticos se calcula a partir de la relación entre S_o y S_{max} con la ecuación 2.

$$K_t = \frac{S_{max}}{S_o} \quad (2)$$

Este factor representa el incremento del esfuerzo debido al efecto de la concentración de esfuerzo. Depende del tipo de concentración de esfuerzo como acanaladuras, chaveteros, roscas agujeros, etc, la presencia de estos elementos da como resultado modificaciones en la distribución de la tensión presente en el cuerpo, el tipo de carga aplicada y la geometría de la pieza.

Los primeros estudios sobre el efecto del factor de concentración de esfuerzo fueron realizados en 1937 [12]. Para 1977 se realizó un amplio compendio de modelos para el cálculo de este factor de concentración de esfuerzos que son aplicables a cuerpos con variaciones leves en su geometría [11].

Existen métodos computacionales, analíticos y experimentales que permiten el análisis del efecto de la concentración del esfuerzo. Algunos de los métodos experimentales que resultan útiles para geometrías más complejas son, la medición de tensiones superficiales adecuadas mediante extensómetros y medidores de tensión, el ensayo de fotoelasticidad, el ensayo con strain gages de

alta precisión, ensayo de capa frágil o Brittle coat, ensayo de foto esfuerzo (introducido por Zadman (foto elástico-capa frágil) entre otros [13].

Adicional a los métodos experimentales, los factores de concentración de esfuerzo se obtienen analíticamente de la teoría de elasticidad, la cual propone soluciones que se basan en formulaciones que incluyen supuestos tales como que el material es isotrópico y homogéneo [14]. Además, existen soluciones computacionales como el método de elementos finitos, este último utilizado en el desarrollo de este análisis.

5. MODELO MATEMATICO

Para una placa plana con perforaciones circulares el análisis del comportamiento del esfuerzo en la zona elástica del elemento se lleva a cabo a través de la determinación del esfuerzo normal paralelo a la carga de tracción aplicada y el esfuerzo equivalente de von Mises, estos resultados son obtenidos a partir del método de elementos finitos.

5.1.MODELO DE CALCULO PARA CONCENTRACION DE ESFUERZO

En este estudio se determina el valor del esfuerzo presente en la placa mediante el método de elementos finitos (MEF). Para una mayor comprensión del comportamiento del esfuerzo en la placa plana se determina un esfuerzo equivalente por medio del cálculo del esfuerzo cortante octaédrico con el uso de la ecuación (1), la cual es utilizada en la práctica para el diseño de materiales dúctiles [3].

$$\tau_o = \frac{1}{3}\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2} \quad (1)$$

El esfuerzo máximo, S_{max} , presente en una placa con discontinuidad en la sección transversal se define por medio de la ecuación (2) y (3) [11]. Donde

$$S_{max} = K_t \cdot S_o \quad (2)$$

Donde;

$$S_o = \frac{F}{A} \quad (3)$$

Para esta ecuación, K_t representa el factor de concentración de esfuerzo, S_o el esfuerzo nominal, F es la carga de tracción aplicada a la placa y A el área de la sección transversal a la carga.

5.2.MODELO GEOMÉTRICO

Este estudio comprende el análisis de dos modelos geométricos, el primero que comprende una placa plana con uno agujero circular y centrado y el segundo que abarca dos agujeros ubicados alrededor de una circunferencia, ambos modelos geométricos son empleados por elementos pasantes como puntos de sujeción, el análisis se lleva a cabo de manera independiente para las dos geometrías planteadas.

5.2.1. PLACA CON UN AGUJERO

El modelo geométrico consta de un cuerpo con forma de placa plana, una sección transversal rectangular y un agujero pasante próximo al costado izquierdo de la placa. En la Figura 2 **Error! Reference source not found.** se muestra el esquema con las variables básicas necesarias para el análisis.

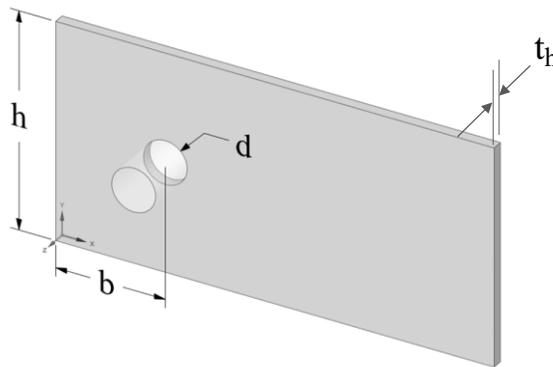


Figura 2. Geometría para placa plana con un agujero

Donde;

h : Ancho de la placa

t_h : Espesor de la placa

b : Distancia desde el centro del agujero hasta el borde de la placa

d : Diámetro de la perforación

Con el fin de realizar el análisis en función de las relaciones geométricas entre las variables descritas anteriormente, se mantienen como constantes los parámetros h, L, Th .

Para realizar la simulación de las placas planas con un pasador como apoyo en los agujeros y sometidas a tracción se tienen como consideraciones geométricas las ecuaciones (4) y (5) que, mediante la variable e que representa el valor mínimo entre el agujero y el bore izquierdo de la placa y la variable f que representa la separación mínima entre el agujero y el borde superior de la placa, determinan el rango para el diámetro del agujero en la placa teniendo en cuenta las variables involucradas en el modelo geométrico. Las variables d y b son objeto de estudio y por tanto se modifican teniendo presente las restricciones geométricas.

$$\frac{d}{2} < b + e \quad (4)$$

$$d < h + f \quad (5)$$

En la Tabla 1, se muestran los valores para la variación del diámetro de los agujeros, d , y la distancia de estos con el borde izquierdo de la placa, b , que se consideran variables independientes para este análisis. El incremento de las variables observado en esta tabla obedece a un crecimiento lineal determinado por los valores máximos que pueden tomar las variables de acuerdo con las restricciones establecidas previamente y al número de iteraciones que son utilizadas para la construcción de las gráficas usadas en el análisis de los resultados.

| b [cm] | d [cm] |
|--------|--------|
| 2,0 | 1,0 |
| 2,5 | 2,2 |
| 3,0 | 3,4 |
| 4,0 | 4,6 |
| 5,0 | 5,8 |
| 10 | 7,0 |

Tabla 1. Parámetros geométricos para una placa plana con un agujero

La combinación de estas variables da como resultado 33 puntos de diseño válidos para ingresar a la matriz de parametrización de ANSYS y para cada uno de ellos se obtienen valores diferentes de esfuerzo en la placa.

5.2.2. PLACA CON DOS AGUJERO

También se analiza una placa plana sometida a tracción y sujeta por medio de dos elementos pasantes en los agujeros de acuerdo con la Figura 3.

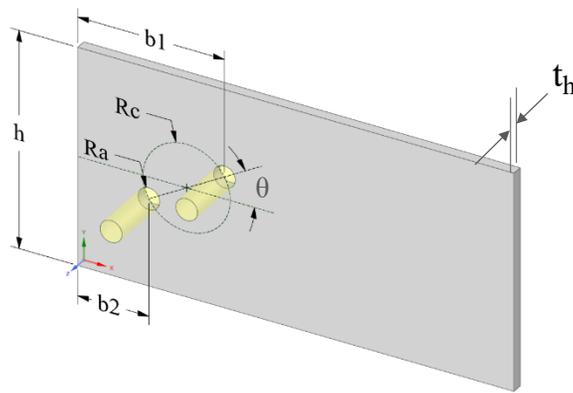


Figura 3. Geometría para placa plana con dos agujeros

Donde;

h : Ancho de la placa

t_h : Espesor de la placa

R_c : Radio de la circunferencia que separa los agujeros

d_1 : Diámetro de la perforación 1

d_2 : Diámetro de la perforación 2

b : Distancia entre el centro de R_c con el borde de la placa

Las restricciones geométricas presentes en este modelo están descritas por la ecuación (2) que limita la posición de los agujeros con respecto al borde de la placa, en esta ecuación se involucra la variable e que representa la separación mínima entre los agujeros y el borde izquierdo de la placa. Con la ecuación (3) se determinan las posibles dimensiones de los agujeros las cuales son dependientes, allí, la variable f representa la separación mínima entre agujeros. Finalmente, la ecuación (4) que define el tamaño de los dos agujeros con un mismo valor debido a que en la práctica difícilmente se utilizan agujeros de sujeción con diferentes diámetros sobre una misma placa.

$$R_c + \frac{d_1}{2} + e < b \quad (2)$$

$$2R_c < d_1 + f \quad (3)$$

$$d_1 = d_2 \quad (4)$$

Estas ecuaciones se cumplen para una relación entre el ancho de la placa y la distancia desde el centro de centro de la perforación hasta el borde de

$$b = \frac{h}{2} \quad (5)$$

De los parámetros enunciados anteriormente, se establecen las constantes para el modelo geométrico y las dimensiones que variarían en el análisis. La Tabla 2 contiene los parámetros geométricos para el análisis y las variaciones de los mismos.

| Rc [cm] | θ | Ra [cm] |
|---------|----------|---------|
| 2 | 90° | 1 |
| 2,3 | 60° | 1,5 |
| 2,6 | 45° | 2 |
| 2,9 | 30° | 2,5 |
| 3,2 | 0° | |

Tabla 2. Parámetros geométricos para una placa plana con dos agujeros

La combinación de estas variables da como resultado 85 puntos de diseño para ingresar a la matriz de parametrización de ANSYS. Una vez realizada la simulación de donde se obtiene el valor del esfuerzo presente en la placa, para todos los puntos de diseño, es posible analizar el comportamiento del esfuerzo en función de las variaciones del modelo geométrico descrito anteriormente.

5.3.MALLADO

Se plantea para el proceso de discretización del modelo aplicar 3 configuraciones diferentes de mallado, con el fin de determinar aquel que transfiera la energía absorbida por el concentrador de esfuerzo con la menor cantidad de elementos, buscando un equilibrio entre la cantidad de elementos y la aproximación al valor de esfuerzo presente en la placa.

Como primera configuración de mallado se aplican elementos tetraédricos para todo el cuerpo y se varía el parámetro de tamaño. Como segunda opción, se aplican elementos hexaédricos para todo

el cuerpo y finalmente una tercera configuración combina elementos hexaédricos y tetraédricos mediante una función de inflación. En la Figura 4. se puede apreciar el comportamiento del esfuerzo en función del número de elementos del mallado, para cada una de las configuraciones estudiadas.

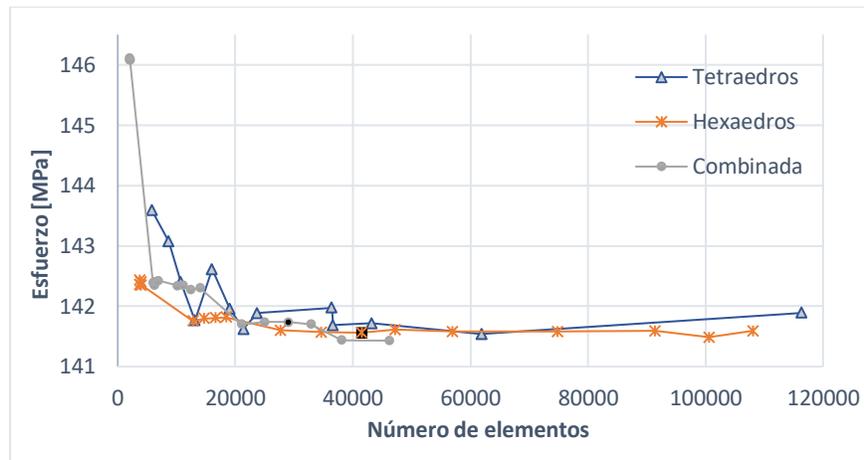


Figura 4. Independencia de malla

La Tabla 3 presenta los valores equivalentes de independencia de malla para las tres configuraciones de malla empleadas, donde se observa que el valor del esfuerzo máximo presenta variaciones menores de 0,2 MPa

| Mallado | Número de elementos | Esfuerzo máximo [MPa] |
|----------------|---------------------|-----------------------|
| 1. Tetraédrico | 61826 | 141.54099 |
| 2. Hexaédrico | 41464 | 141.56475 |
| 3. Combinado | 29012 | 141.73597 |

Tabla 3. Tipo de mallado y número de elementos

Para asegurar una calidad de mallado cercana a 1, y una transición de los elementos discretizantes entre la sección que rodea la perforación y el resto del cuerpo se plantea una malla con elementos combinados. Junto al concentrador de esfuerzos se emplean elementos hexaédricos con la función de inflación y para los alrededores una malla conformada por elementos tetraédricos. En la Figura 5 se muestra el resultado de esta configuración.

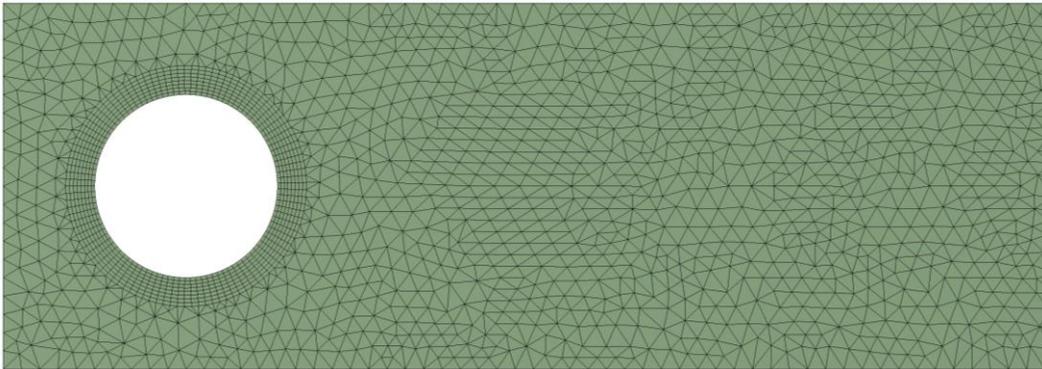


Figura 5. Malla con elementos combinados

Para una placa plana con dos agujeros se conserva la misma configuración descrita previamente, realizando un refinamiento de malla alrededor de los dos agujeros presentes en la placa. Esto es posible ya que la calidad de los elementos del mallado no se ve afectada significativamente al agregar un agujero en el modelo geométrico.

5.4.CONDICIONES DE FRONTERA

La carga a la que está sometida la placa es de tracción y los máximos esfuerzos que se presentan son los generados en el cambio de sección de la placa, donde se encuentra el concentrador de esfuerzo. La carga se aplica en un costado de la placa, esta condición se muestra en color rojo en la Figura 6.

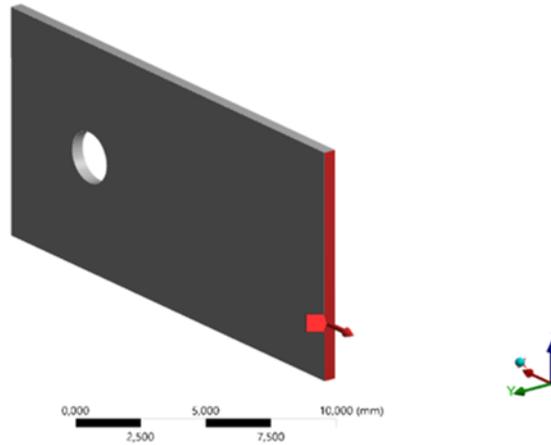


Figura 6. Carga axial

Sobre una de las caras laterales de la placa se inserta una restricción sin fricción que evite el movimiento del cuerpo en la dirección del eje axial del pasador, esta condición se muestra en color azul en la Figura 7.

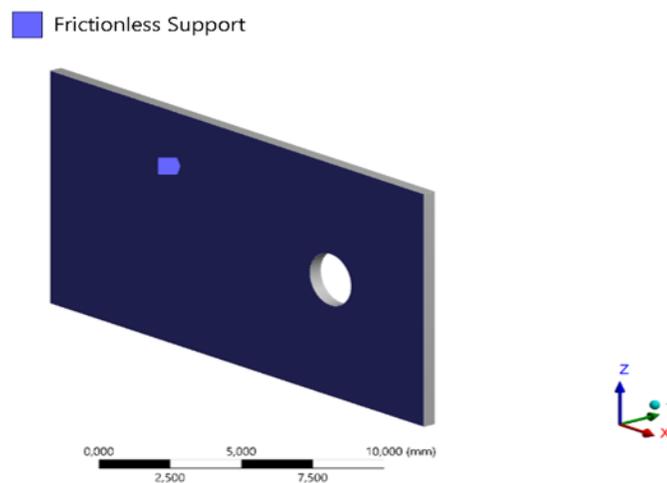


Figura 7. Soporte sin fricción

La interacción entre el agujero de la placa y el pasador, es simulada mediante una restricción de compresión en la superficie interna el agujero. Para la simulación se optó por la configuración mostrada en la Figura 8 que se muestra en color azul.

■ Compression Only Support

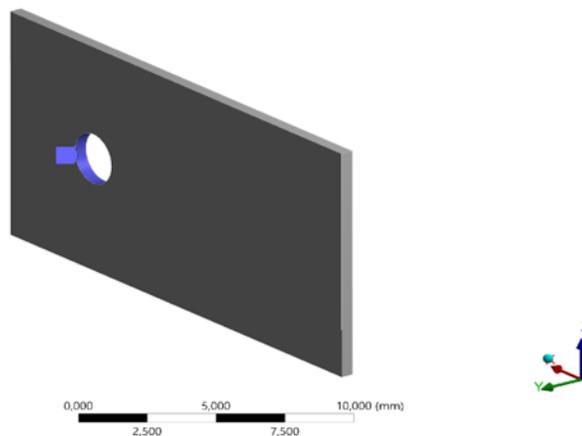


Figura 8. Soporte de compresión

6. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL PARA UNA PLACA CON UN AGUJERO

Para realizar la validación experimental de la placa plana con un agujero se procede con el estudio de las propiedades mecánicas del material utilizado. Para esto se realiza la caracterización del material a través de ensayos metalográficos y el ensayo universal de tracción para determinar las características del material sometido a cargas de tracción como el esfuerzo último, el límite de fluencia y la transferencia de energía en la probeta. Una vez realizada la caracterización del material se inicia el proceso de validación por medio de la realización de ensayos destructivos en la geometría estudiada dándole validez al análisis computacional realizado. Este capítulo se desarrolla de acuerdo al diagrama de acción planteado en la Figura 9.

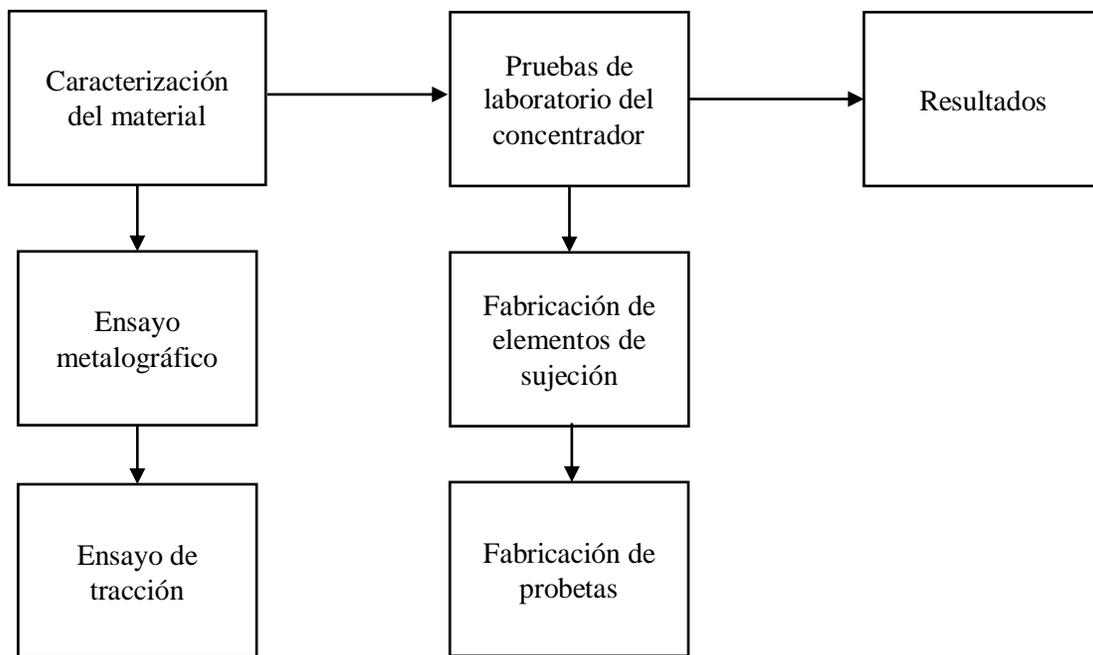


Figura 9. Diagrama de validación experimental

6.1. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL

El material utilizado para el desarrollo del estudio es un acero ASTM A1011 CS, que corresponde a una aleación de acero al carbono laminada en caliente que presenta alta resistencia y alta conformabilidad. Es empleado como materia prima en la industria agrícola, automotriz, metalmecánica y obras civiles, en general [15]. En la Tabla 4 se presentan algunos valores aproximados de la composición química que determina las propiedades mecánicas más relevantes para la simulación del ensayo de tracción al cual van a ser sometidas las placas y las propiedades mecánicas de este.

| Componente | | | | Propiedad mecánica | | |
|------------|-----------|---------|--------|------------------------|----------------------|------------|
| Carbono | manganeso | fosforo | azufre | Esfuerzo a la tracción | Esfuerzo de fluencia | Elongación |
| 0,15% | 0,60% | 0,03% | 0,035% | 340 MPa | 205 MPa | 25 % |

Tabla 4. Composición química del material

6.1.1. ENSAYO DE TRACCIÓN

Los ensayos de tracción se realizaron en el laboratorio de resistencia de materiales de la Universidad Tecnológica de Pereira, el cual se encuentra en proceso de acreditación institucional. Para esto se utilizó la máquina de ensayos universal hidráulica con travesaños móviles UMIB 600-S que tiene una capacidad de ensayo de hasta 2000 kN unido a los travesaños móviles mediante cilindros y bloqueos hidráulicos. En la Figura 10 se presenta una imagen de la máquina utilizada.



Figura 10. Máquina de ensayos universal UMIB 600-s

Debido a que en este estudio se contempla el análisis en la zona elástica del material, se realiza el ensayo universal de tracción para una probeta estandarizada con el fin de obtener la curva característica de este en términos del esfuerzo y la deformación unitaria. El resultado de este ensayo de laboratorio se evidencia en la Figura 11.

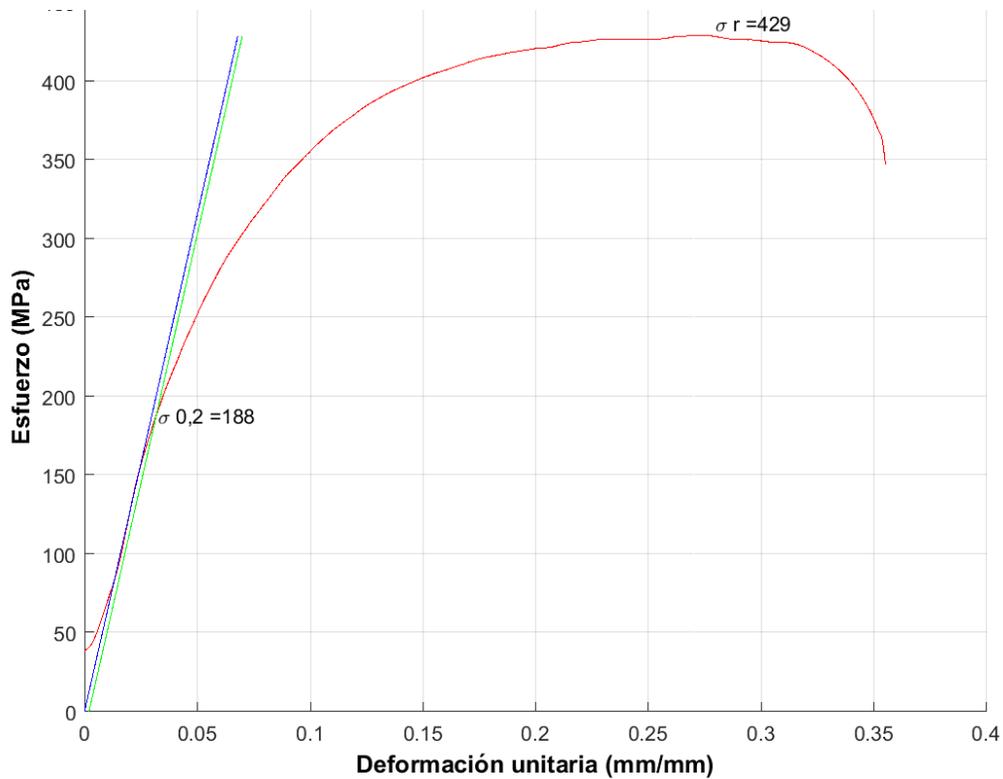


Figura 11. Curva característica del material

En la Figura 12 se observa la probeta utilizada en este ensayo, la cual cuenta con un espesor de 3 mm una longitud total de 254 mm, una longitud de trabajo de 104 mm, un ancho en la zona de sujeción de tanto 36 mm , un ancho en la zona de trabajo de tanto 18 mm y un redondeo con un radio de 18.72 mm.



Figura 12. Probeta para ensayo

Al finalizar la caracterización del material se observó que este presenta una resistencia última de 429 MPa y un límite de fluencia de 188MPa, estas propiedades mecánicas se asemejan a las de un acero ASTM A1011 CS tipo B, laminado en caliente.

6.1.2. ENSAYO METALOGRAFICO

Para comprender el comportamiento del material que se está utilizando, se realiza un análisis microestructural, el cual incluye; selección de la muestra del material utilizado, montaje de la muestra para proporcionar una base que sostenga y facilite la manipulación del espécimen, para este caso, se realizó un montaje en caliente con la ayuda de una prensa especializada. El montaje final de la muestra está en la Figura 13, para este caso se utilizó baquelita como base para el montaje.



Figura 13. Montaje de la muestra

A continuación, se preparó la superficie con una secuencia de pulido en la cual se va disminuyendo el tamaño del grano de la lija para proporcionar un mejor acabado. Posteriormente, se realizó el ataque químico que depende de la temperatura, el tiempo de ataque y el material utilizado, para este caso se empleó Nital al 5% para originar una corrosión controlada de la muestra. En la Figura 14 se muestra la microestructura del material a 500X obtenida del ensayo metalográfico.

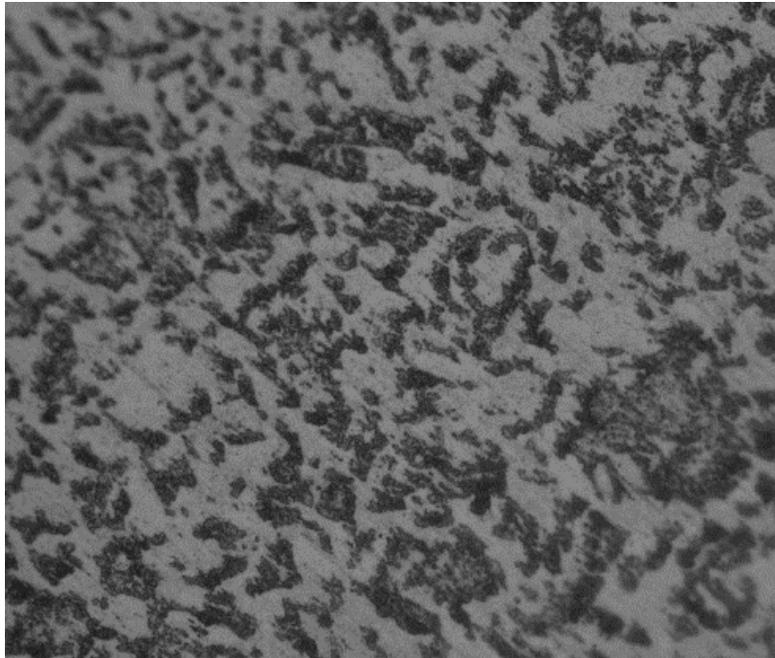


Figura 14. Microestructura del material a 500x

6.1.3. COMPARACIÓN DL ENSAYO UNIVERSAL Y EL ENSAYO METALOGRAFICO

Una vez terminado el análisis microscópico, se realizó una comparación con microestructuras de la literatura para determinar las semejanzas con otro material. De ahí se obtuvo la imagen que corresponde a un acero ASTM A1011. En la Figura 15 se muestra la microestructura de este material a 500x.

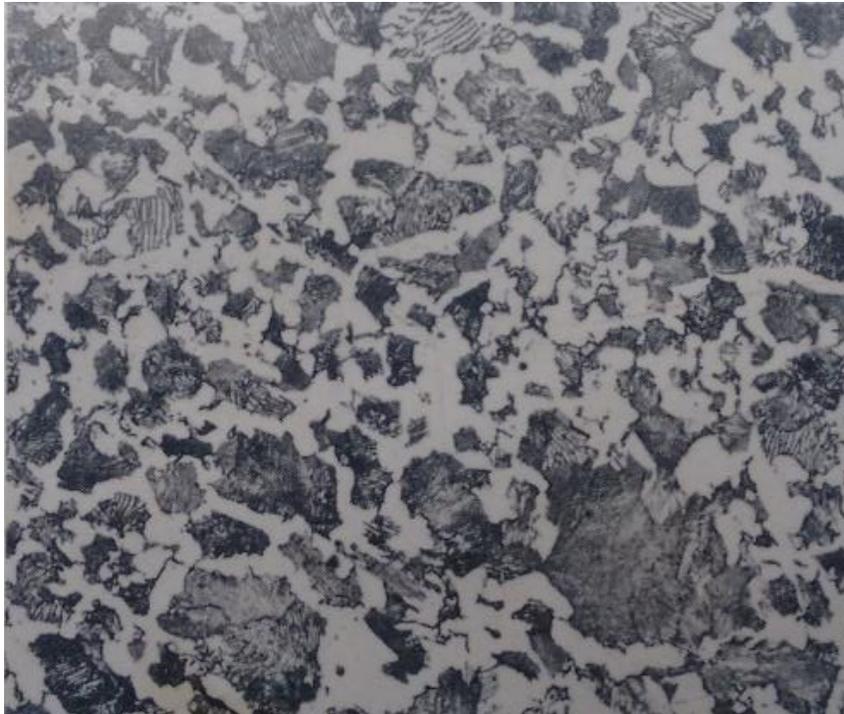


Figura 15. Acero ASTM A1011 a 500X

De acuerdo a la prueba universal y a al ensayo metalográfico se puede concluir que se trata de un acero con propiedades mecánicas y microestructura similar a la de un acero ASTM A1011 CS tipo B.

6.2. PRUEBAS DE LABORATORIO

En este capítulo se realiza el proceso de validación por medio de la realización de ensayos destructivos en la geometría estudiada. A través de ensayos de tracción a placas planas con un agujero para validar al análisis computacional realizado. En la Figura 16 se muestra la geometría de las placas para el ensayo.

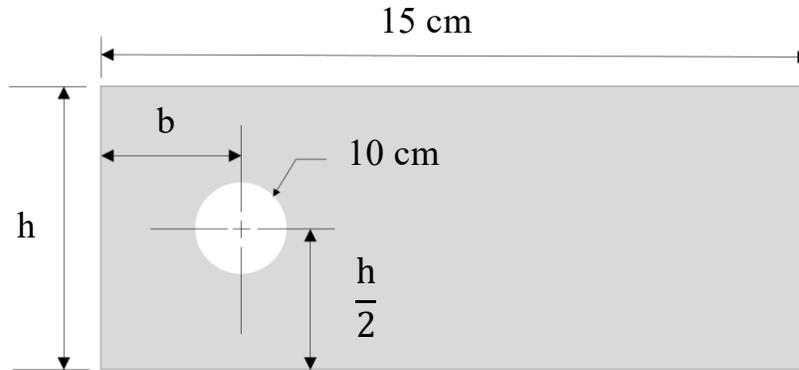


Figura 16. Geometría de la placa plana con concentrador circular.

6.2.1. ELEMENTOS DE SUJECIÓN

El montaje para realizar los ensayos consiste en un elemento de sujeción que permite fijar la placa plana, en uno de sus extremos, a través del agujero por medio de un elemento pasante, y una mordaza que hace parte de la estructura de la máquina de ensayos universal en el otro extremo que sujeta la placa. Este elemento de sujeción se observa en la Figura 17.



Figura 17. Elemento de sujeción

Adicional a esto, la máquina de ensayos universal cuenta con un cabezal móvil que garantiza que la carga que se aplica a la placa sea totalmente axial, en la Figura 18 se observa este elemento y el montaje completo para el ensayo



Figura 18. Montaje para el ensayo de tracción

6.2.2. DIMENSIONES DE LAS PROBETAS

Debido a la restricción en el ensayo de mantener constante el diámetro del agujero de la placa, y para obtener la variación de la relación geométrica que relaciona el ancho de la placa h , con el diámetro del agujero d , se propone la variación de los parámetros enunciados en la **Error!**
Reference source not found..

| h [cm] | b [cm] |
|--------|--------|
| 5 | 1 |
| 4 | 1,1 |
| | 1,2 |
| | 1,3 |
| | 1,4 |

Tabla 5. parámetros geométricos para pruebas experimentales

Con base en las variables de la tabla anterior se realizaron las probetas para los ensayos dando como resultado 10 geometrías diferentes que serían repetidas dos veces para un total de 20 ensayos de tracción.

7. RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de las simulaciones computacionales y los ensayos de laboratorio para las dos geometrías analizadas.

7.1. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

Para mostrar los resultados de las simulaciones computacionales realizadas a través de software ANSYS, para los diferentes modelos geométricos planteados, se presentan en primer lugar las imágenes con el diagrama de esfuerzos presente en la placa y, en segundo lugar, los valores de esfuerzo obtenidos de la simulación se compilan en graficas que permite evidenciar el comportamiento del factor de concentración de esfuerzo en función de las relaciones geométricas presentes en el cuerpo.

7.1.1. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN PARA PLACA CON UN AGUJERO

Para el caso de una placa con un agujero, el análisis se lleva a cabo en tres puntos A, B y B', situados alrededor de la circunferencia que conforma el concentrador de esfuerzo, estos puntos se observan en la Figura 19. **Error! Reference source not found.** El punto A sufre un esfuerzo de aplastamiento generado entre el pasador y el borde de la placa. Los puntos B y B' sufren los mayores esfuerzos normales y tienen el mismo comportamiento de esfuerzo debido a la simetría del cuerpo.

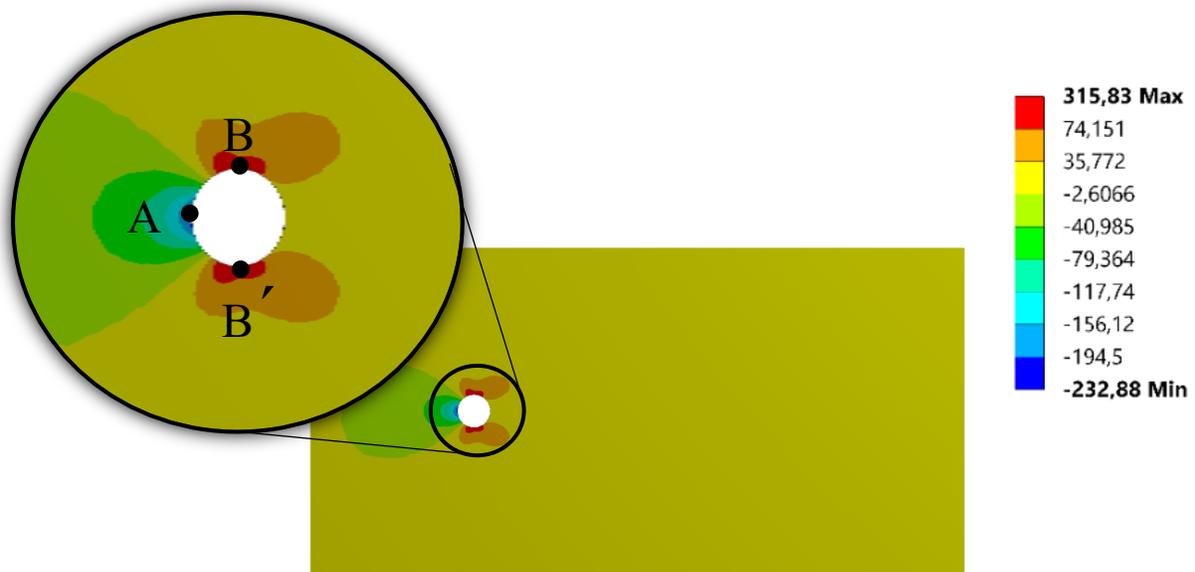


Figura 19. Esfuerzo normal en la placa cargada axialmente.

En la Figura 20, se presenta el resultado de la simulación de tres placas con un agujero y un pasador como elemento de sujeción, donde se observan los esfuerzos equivalentes y normales. En esta figura se plantea la variación del diámetro del agujero, donde la distancia en el eje x del centro de la perforación al borde de la placa es 10 cm. En los resultados de esfuerzo normal para las tres placas se observa que el máximo esfuerzo se encuentra en el borde superior del concentrador de esfuerzo, también se observa el esfuerzo de aplastamiento representado en color azul en cada placa, el cual tiene un valor despreciable para el caso del esfuerzo equivalente, y un valor elevado para el caso del esfuerzo normal. En los resultados de esfuerzo equivalente de las tres placas se aprecia la rotación del punto de máxima concentración de esfuerzos, haciéndose más evidente para el caso del agujero de menor diámetro.

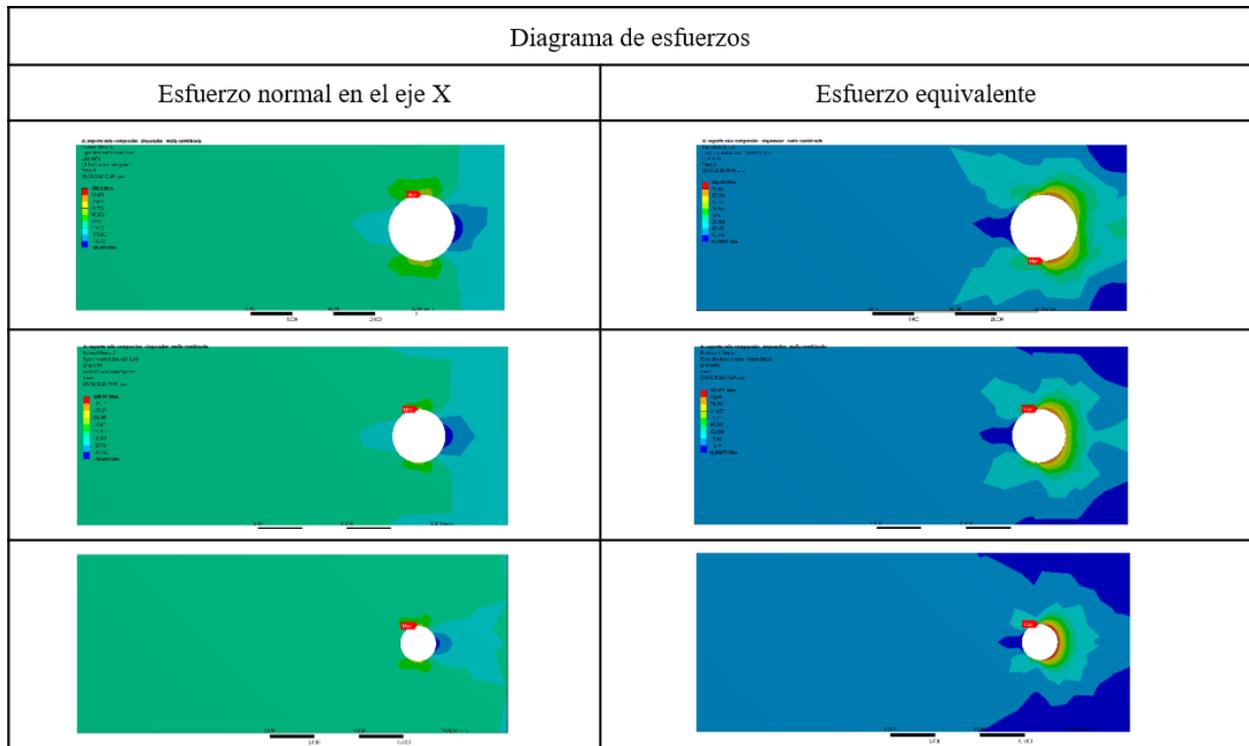


Figura 20. Simulación placa con un agujero

El comportamiento del esfuerzo debido a la variación geométrica del agujero en una placa, se hace evidente obteniendo el valor del factor de concentrador de esfuerzo presente en la discontinuidad de la placa, por lo tanto, se muestra la Figura 21 que involucran las variables geométricas descritas en el modelo y el factor de concentración de esfuerzo Kt . Se observa como el factor de concentración de esfuerzo se incrementa en la medida en la que disminuye el diámetro del agujero presente en la placa. Por el contrario, si se aumenta la separación del agujero con respecto al borde

izquierdo de la placa, representada por la variable b , el factor de concentración de esfuerzo disminuye.

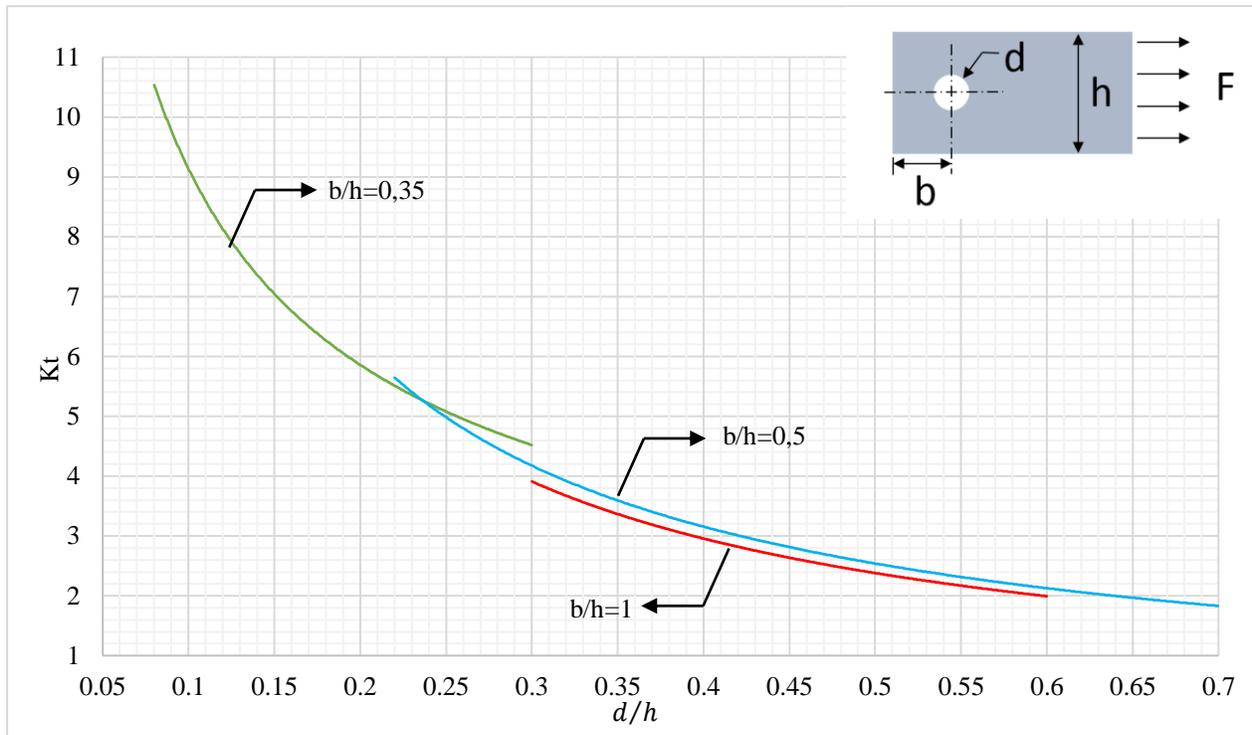


Figura 21. Concentradores de esfuerzo en placa plana con agujero central sometida a carga axial

7.1.2. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN PARA PLACA CON DOS AGUJEROS

En la Figura 22 se observa el comportamiento del esfuerzo normal presente en una placa con dos agujeros y radio de los agujeros, R_a , de 1 cm y separación entre agujeros, R_c , de 2,3 cm para un ángulo de inclinación de los agujeros de 60° .

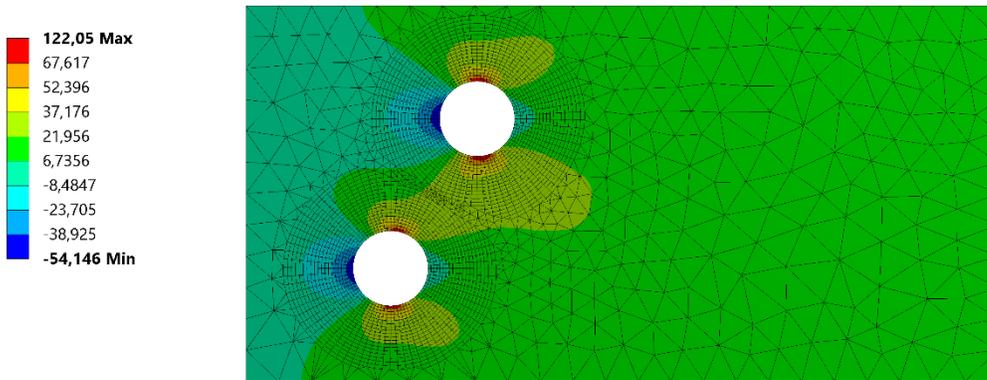


Figura 22. Esfuerzo normal en placa con dos agujeros, $\theta=60^\circ$ En las Figura 23 se presentan las curvas del comportamiento del esfuerzo para cada agujero presente en la placa. Para el agujero superior, el incremento en el factor de concentración de esfuerzo depende de la disminución de la separación entre los agujeros.

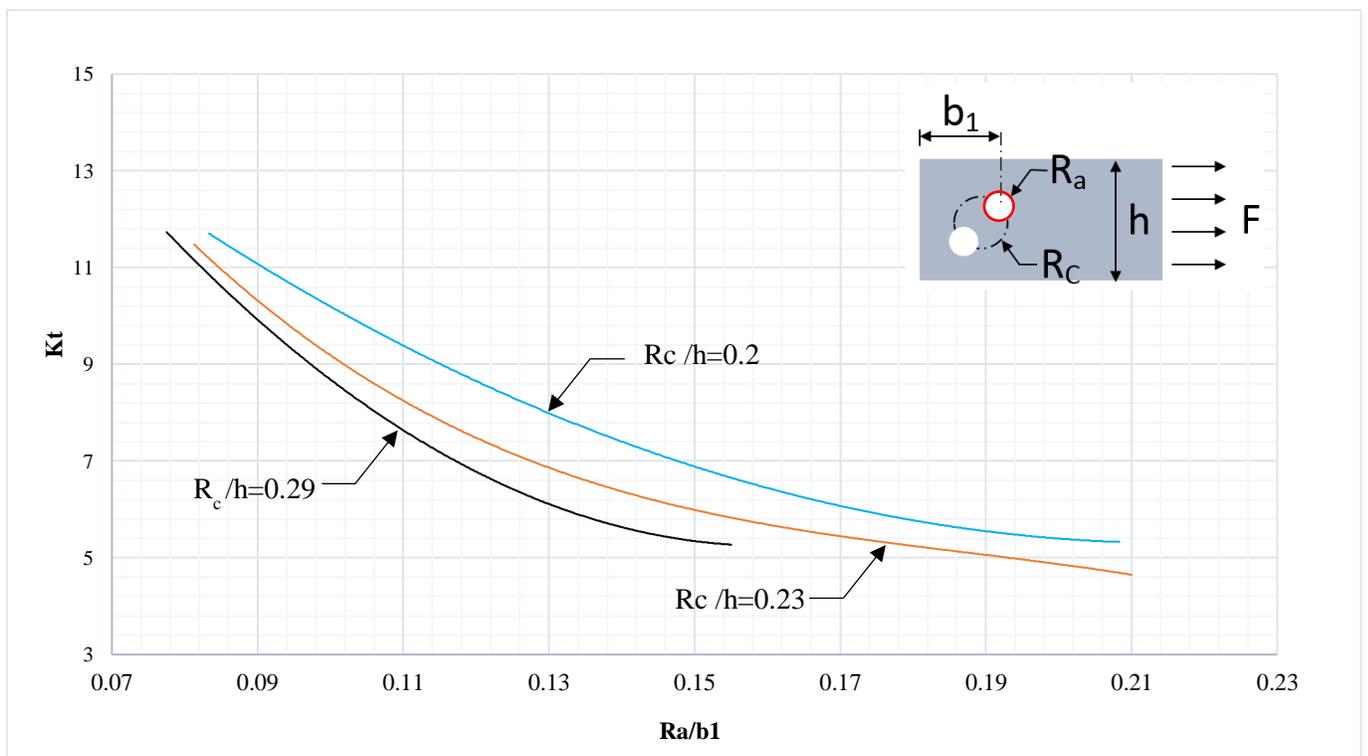


Figura 23. Agujero superior de la placa plana con dos agujeros sometida a carga axial, $\theta = 60^\circ$

En la Figura 24 se observa el comportamiento del agujero inferior, en el cual aumenta el factor de concentración de esfuerzo en la medida en la que se alejan los agujeros.

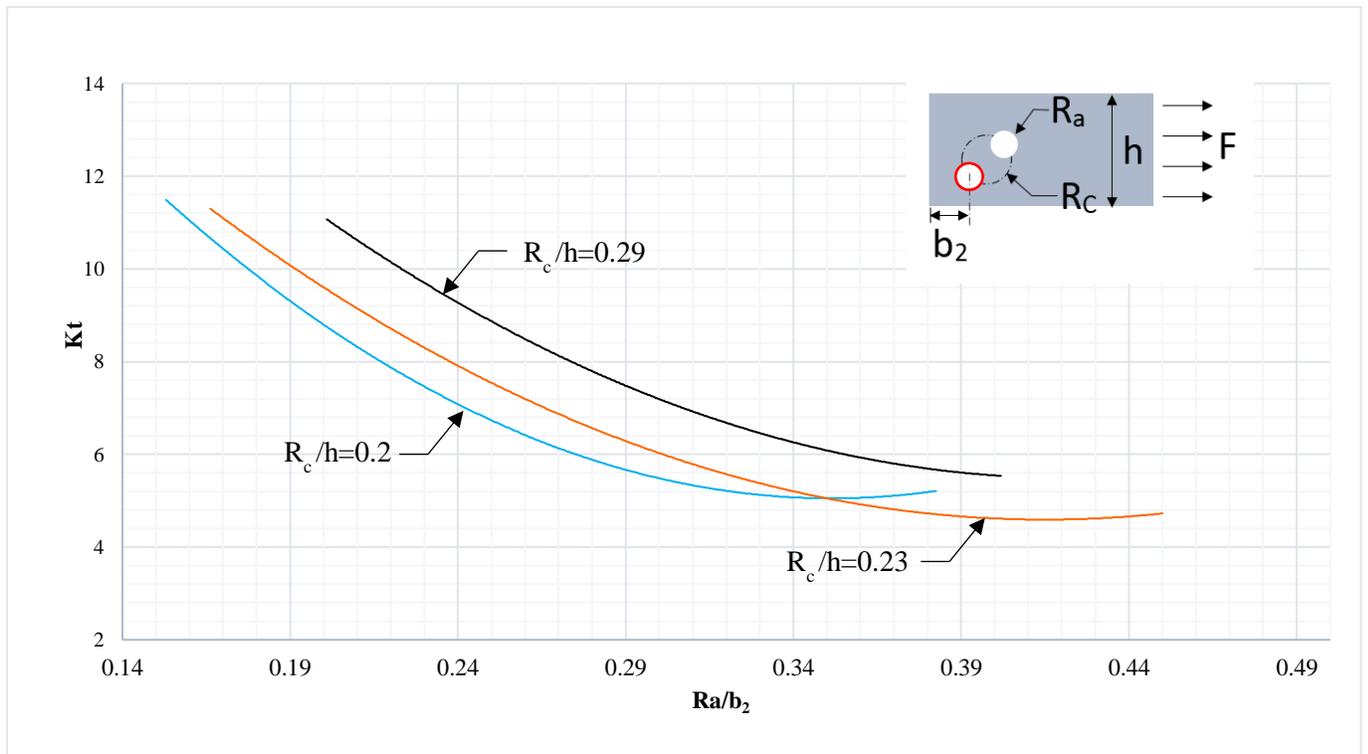


Figura 24. Agujero inferior de la placa plana con dos agujeros sometida a carga axial, $\theta = 60^\circ$

Los resultados de la simulación para los ángulos de inclinación analizados ($0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$) están consignados en la Figura 25, donde se puede observar la distribución de esfuerzos en función del ángulo de inclinación de los agujeros, en los resultados para un ángulo $\theta=0^\circ$ se observa como el esfuerzo es absorbido en su totalidad por el agujero que se encuentra más cercano a la carga, por el contrario, para el caso en el que $\theta=90^\circ$, la distribución de esfuerzos es uniforme entre los dos agujeros.

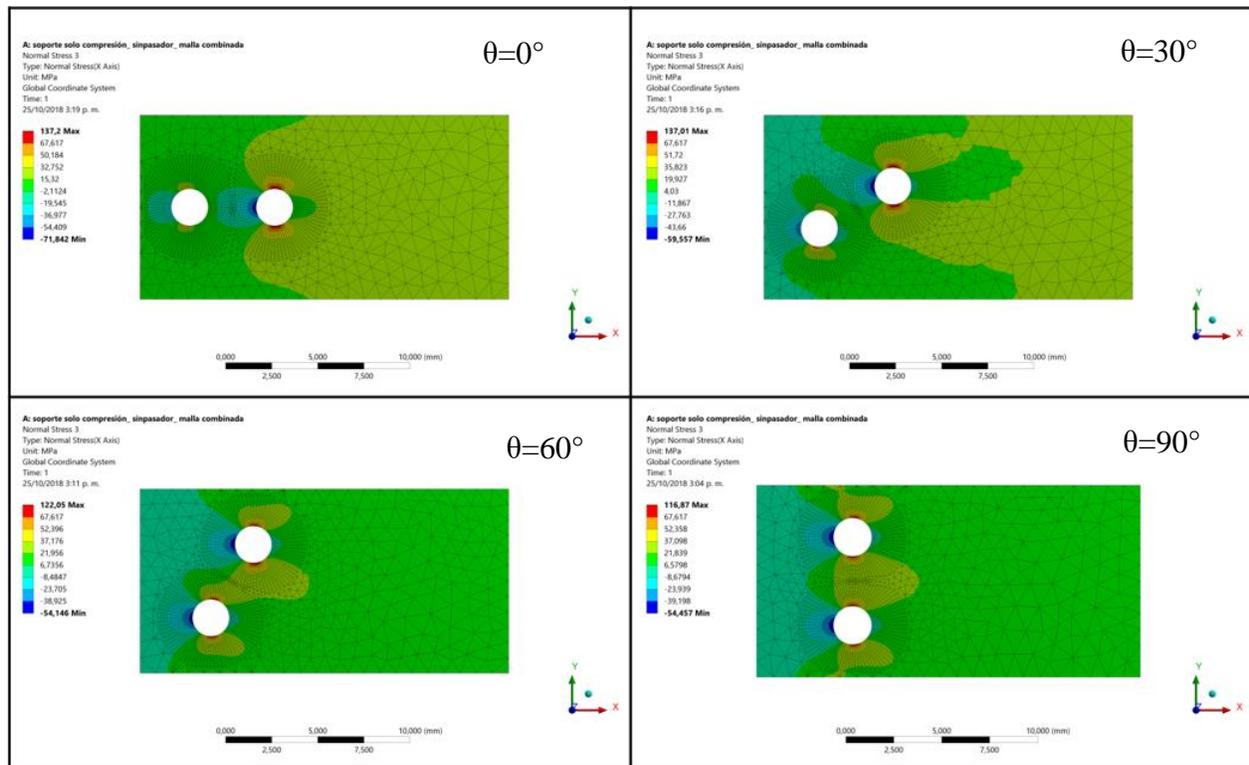


Figura 25. Resultados para un ángulo de inclinación de 0° , 30° , 60° y 90°

7.2. RESULTADOS DE LABORATORIO PARA PLACAS CON UN AGUJERO

Los resultados de los ensayos destructivos realizados para 20 probetas se observan en la Tabla 6. Al analizar estos resultados, construyendo una gráfica por cada ensayo realizado, es posible obtener el factor de concentración de esfuerzo experimental que se presenta en cada placa.

| No | b/h | d/h | Fuerza [N] | Carrera [mm] | Sy_max [Mpa] | Su_max [Mpa] | Kt_exp |
|----|-------|------|------------|--------------|--------------|--------------|--------|
| 1 | 0,2 | 0,2 | 14457,2 | 10,22 | 95,6 | 120,5 | 6,500 |
| 2 | 0,2 | 0,2 | 14013,3 | 10,14 | 91,5 | 116,8 | 6,791 |
| 3 | 0,22 | 0,2 | 15588,5 | 12,34 | 102,1 | 129,9 | 6,039 |
| 4 | 0,22 | 0,2 | 14956,9 | 11,15 | 95,2 | 124,6 | 6,477 |
| 5 | 0,22 | 0,2 | 15877,2 | 12,61 | 101,1 | 132,3 | 6,099 |
| 6 | 0,24 | 0,2 | 17052,9 | 12,34 | 105,2 | 142,1 | 5,816 |
| 7 | 0,24 | 0,2 | 17193,9 | 12,61 | 109,6 | 143,3 | 5,582 |
| 8 | 0,26 | 0,2 | 18623,5 | 12,6 | 115,2 | 155,2 | 6,664 |
| 9 | 0,28 | 0,2 | 20163,7 | 11,73 | 120,9 | 168 | 6,300 |
| 10 | 0,28 | 0,2 | 20232,7 | 17,33 | 120,3 | 168,6 | 6,331 |
| 11 | 0,25 | 0,25 | 13938,2 | 18,84 | 127,1 | 154,9 | 6,097 |
| 12 | 0,25 | 0,25 | 13348,9 | 12,96 | 118,5 | 148,3 | 6,540 |
| 13 | 0,275 | 0,25 | 14968,9 | 12,46 | 126,7 | 166,3 | 6,005 |
| 14 | 0,275 | 0,25 | 15245,8 | 12,51 | 134,7 | 169,4 | 5,649 |
| 15 | 0,3 | 0,25 | 16957,7 | 9,97 | 140,9 | 188,4 | 5,400 |
| 16 | 0,3 | 0,25 | 16479,2 | 9,56 | 139,1 | 183,1 | 5,470 |
| 17 | 0,325 | 0,25 | 18098 | 13,06 | 149,4 | 201,1 | 5,300 |
| 18 | 0,325 | 0,25 | 17551,1 | 13,18 | 152 | 195 | 5,582 |
| 19 | 0,35 | 0,25 | 19993,4 | 20,39 | 160,1 | 222,1 | 5,200 |
| 20 | 0,35 | 0,25 | 19451 | 12,92 | 160,5 | 216,1 | 5,187 |

Tabla 6. Resultados para el ensayo de tracción

Los resultados anteriores se presentan en la gráfica de la Figura 26 para su mayor comprensión.

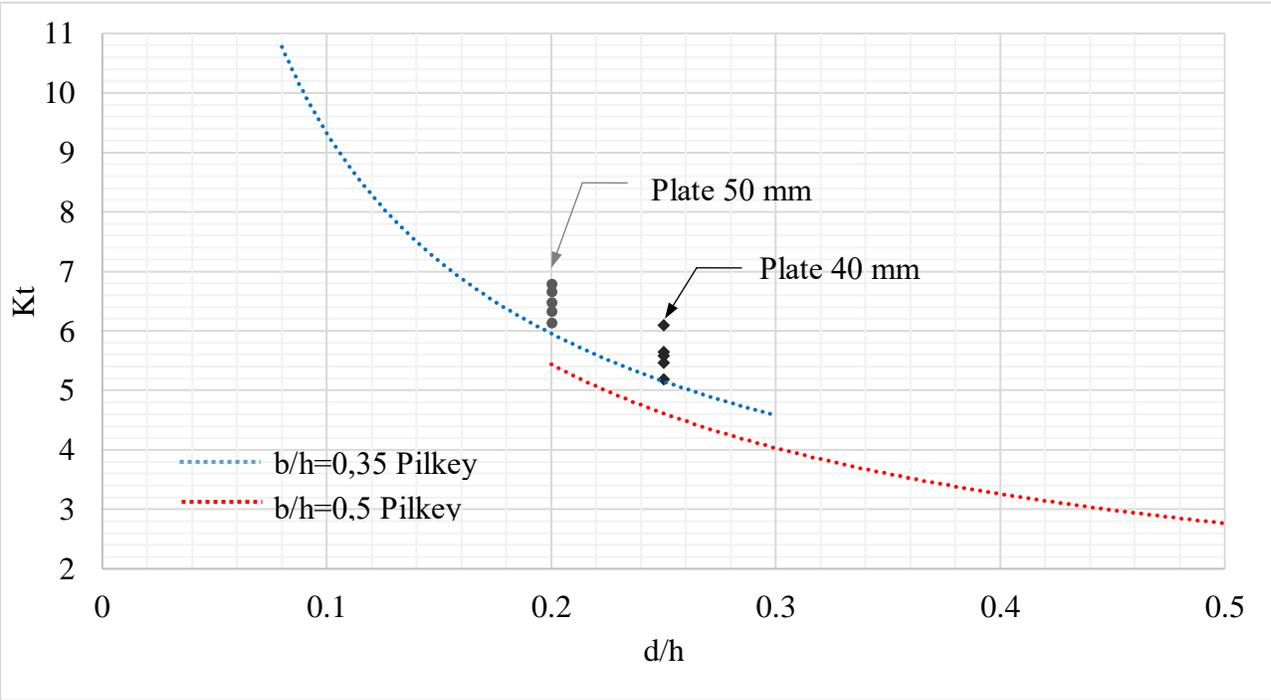


Figura 26. Resultados para el ensayo de tracción

8. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Con el fin de validar la metodología planteada para la simulación, se realiza una comparación de la placa plana con un solo agujero que permite observar la variación entre los datos obtenidos de la simulación y los hallados por Pilkey [11] con un error promedio del 8.458%, para el caso más común que comprende un pasador en un agujero, esto se observa en la Figura 27 en la cual se obtiene el valor del factor de concentración de esfuerzo a partir del cálculo de las relaciones geométricas de la placa plana.

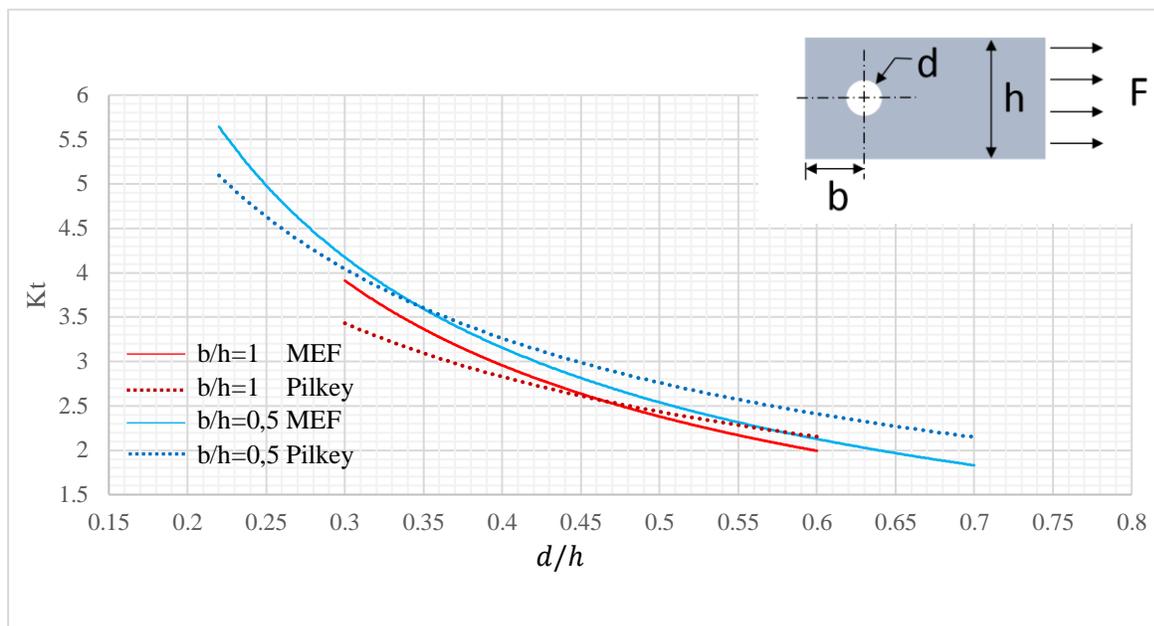


Figura 27. Placa plana con pasador sometida a carga axial

Para el procesamiento de los datos para una placa con dos agujeros, se plantean una serie de graficas que involucran las variables geométricas descritas en el modelo y el esfuerzo presente en el cuerpo

En la Figura 28 se presenta el comportamiento del factor de concentración de esfuerzo K_t en función de la relación entre el radio de los agujeros R_a y la separación de los agujeros con el borde de la placa b , esto, para todos los ángulos de inclinación de los agujeros analizados, con una relación geométrica entre la separación de los agujeros y el ancho de la placa de $R_c/h=0,23$. Las

líneas continuas corresponden al agujero superior y las líneas punteadas al agujero inferior de la placa.

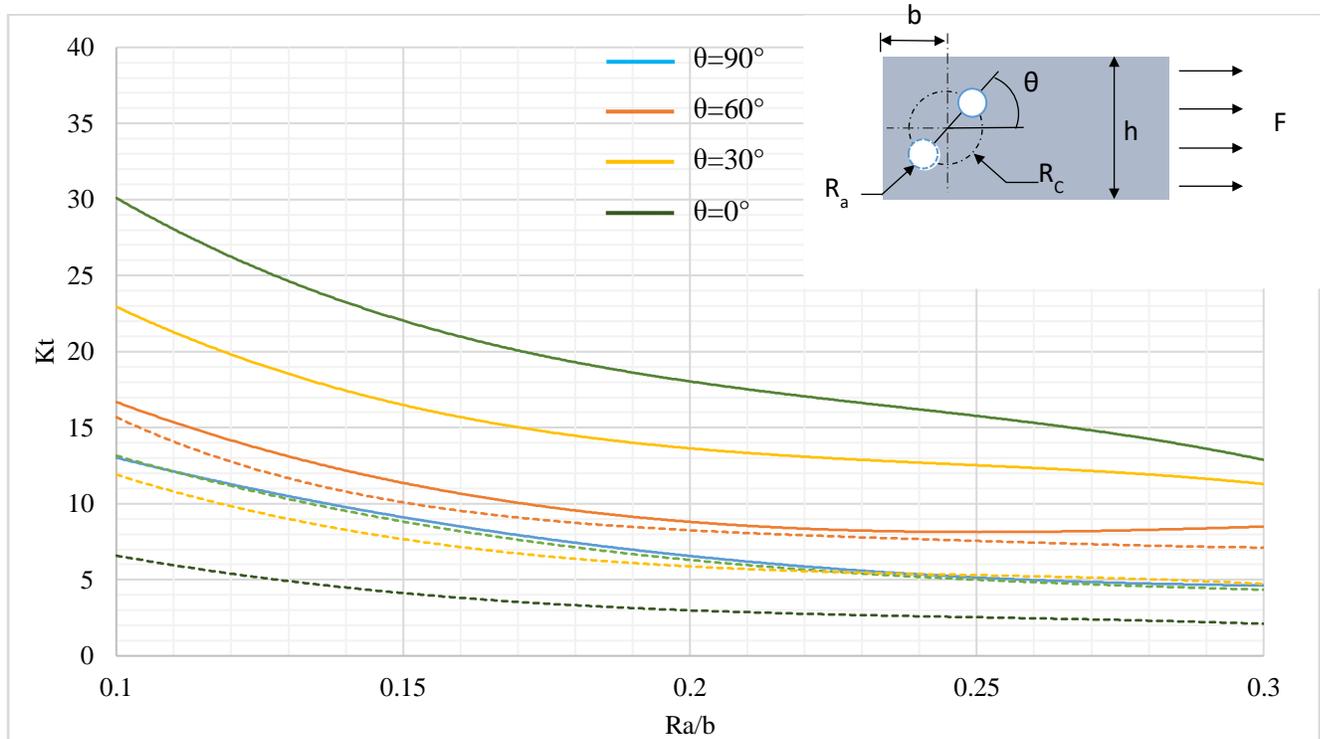


Figura 28. Placa plana con dos agujeros sometida a carga axial, $R_c/h=0,23$

9. CONCLUSIONES

Este trabajo presenta el análisis del comportamiento del esfuerzo sobre una placa plana con agujeros utilizados como soporte, al variar los parámetros geométricos presentes en la placa para obtener el factor de concentración de esfuerzo en dicho cuerpo. Se utilizó el método computacional de elementos finitos y se realizó una validación a través de ensayos experimentales. Los resultados hacen evidente como la distribución geométrica de los agujeros en la placa plana generadas por las

variables de diámetro del agujero y distancia del agujero al borde de la placa afecta la concentración de esfuerzos presentados en el cuerpo.

Como se muestra en la sección 7.1.1 En el caso de un agujero se pudo determinar a partir de las simulaciones que el valor correspondiente a la relación geométrica b/h mayor resulta ser más óptima debido a la reducción del valor del factor de concentración de esfuerzo en comparación con valores menores de b/h .

Para el segundo caso analizado, que corresponde a una placa plana con sujeción en dos agujeros circulares, los resultados permiten establecer la distribución de los esfuerzos que actúan sobre la placa plana para identificar el ángulo de inclinación de los agujeros para el cual el factor de concentración de esfuerzo se incrementa en mayor medida y por lo tanto es más crítico.

También se pudo determinar que agujero soporta la mayor fuerza de reacción. La diferencia entre el valor de la fuerza de reacción que resulta en cada agujero varía en función del diámetro de los agujeros R_a , la separación entre los agujeros R_c y el ángulo de inclinación con un comportamiento directamente proporcional al aumento de estas variables.

10. BIBLIOGRAFIA

- [1] A. zhong Lu, Z. Xu, and N. Zhang, “Stress analytical solution for an infinite plane containing two holes,” *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 128–129, no. 2, pp. 224–234, 2017.
- [2] C. Hwu, S. T. Huang, and C. C. Li, “Boundary-based finite element method for two-dimensional anisotropic elastic solids with multiple holes and cracks,” *Eng. Anal. Bound. Elem.*, vol. 79, no. January, pp. 13–22, 2017.
- [3] F. Darwish, G. Tashtoush, and M. Gharaibeh, “Stress concentration analysis for countersunk rivet holes in orthotropic plates,” *Eur. J. Mech. A/Solids*, vol. 37, pp. 69–78, 2013.

- [4] E. Alzate L., “Cadena de valor regional en Acero,” *Ternium Colombia*, 2017. .
- [5] DANE, “DANE,” *Encuesta Anual Manufacturera Bogotá*, 2017. [Online]. Available: <http://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/industria/encuesta-anual-manufacturera-enam.> .
- [6] J. C. McCormac and S. F. Csernak, *Structural Steel Design*, Fifth. 2012.
- [7] D. R. Tobergte and S. Curtis, *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*, vol. 53, no. 9. 2013.
- [8] P. G. Hild. F and S. Pinelli X., “Laboratoire de Mécanique et Techonologie LMT – Cachan,” 2018. [Online]. Available: http://lmt.ens-paris-saclay.fr/version-francaise/bienvenue-sur-le-site-du-lmt-273778.kjsp?RH=DL_LMT-FR.
- [9] S. Timoshenko and J. N. Goodier, *Theory of Elasticity*. 1951.
- [10] F. P. Beer, E. R. Johnston, J. T. Dewolf, and D. F. Mazurek, *Mechanics of materials*. 2009.
- [11] W. D. Pilkey and D. F. Pilkey, *Peterson’s Stress Concentration Factors, Third Edition*. 2008.
- [12] A. P. Boresi, K. P. Chong, and J. D. Lee, *Elasticity in Engineering Mechanics*, Third edit. 2010.
- [13] J. P. Faurie, A. P. Monnier, and L. Niku, “Guide du Dessinateur: Les Concentrations de Contraintes,” *Cent. Tech. des Ind. Mec. CETIM*, 1996.
- [14] D. Gonzáles, “Determinación del factor de concentración de esfuerzos en una placa con múltiples concentradores de esfuerzo mediante Algor,” Universidad de las Américas Puebla, 2003.
- [15] J. T. Celigüeta, *Método de los Elementos Finitos para Análisis Estructural*. 2008.

11. ANEXOS

En las siguientes figuras (29, 30, 31, 32, 33) se presentan las curvas del comportamiento del esfuerzo para los ángulos analizados que no han sido presentadas anteriormente (90° , 45° , 30° , 0°), para cada agujero presente en la placa. Para el caso en el que el ángulo de inclinación de los agujeros corresponde a 90° , el comportamiento de los dos agujeros presentes en la placa es idéntico por lo que solo se presenta una gráfica.

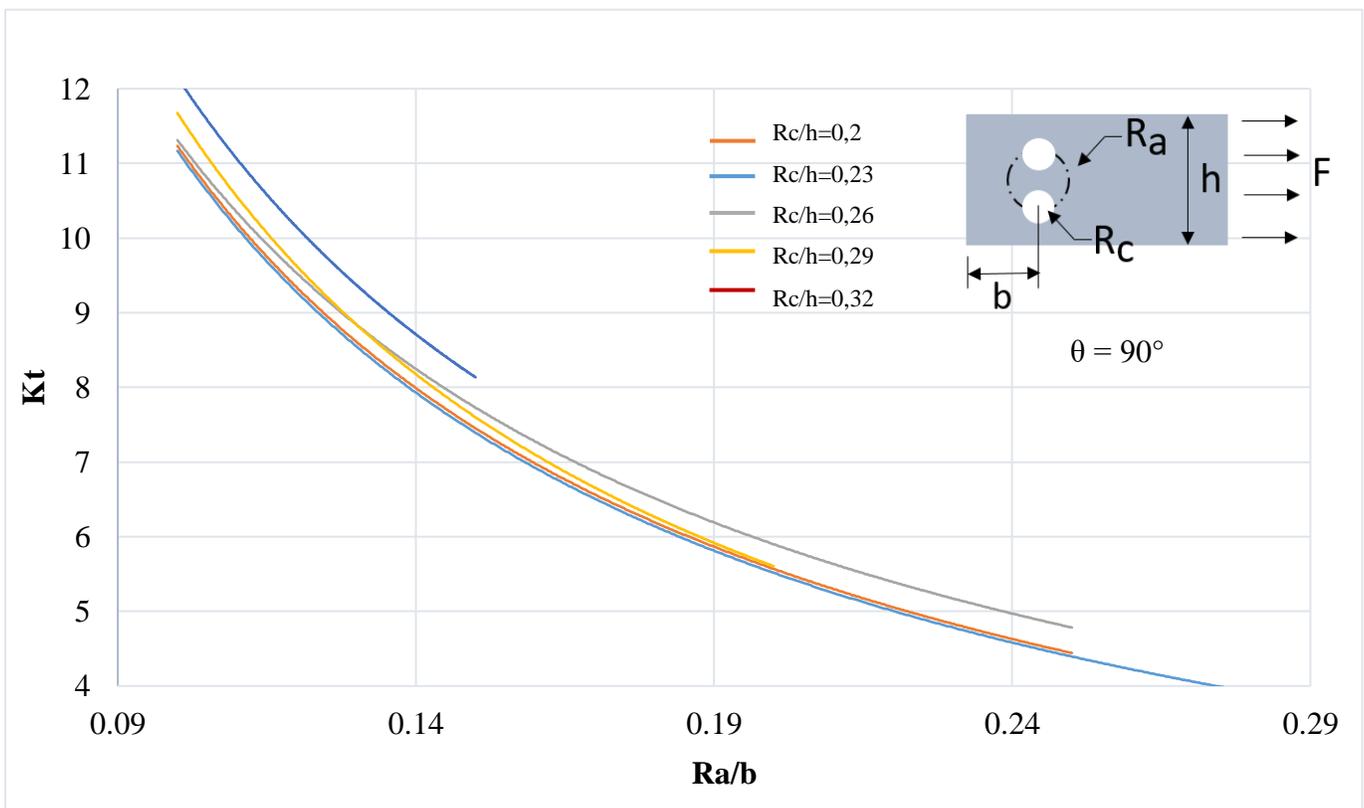


Figura 29. Placa plana con dos agujeros sometida a carga axial, $\theta = 90^\circ$

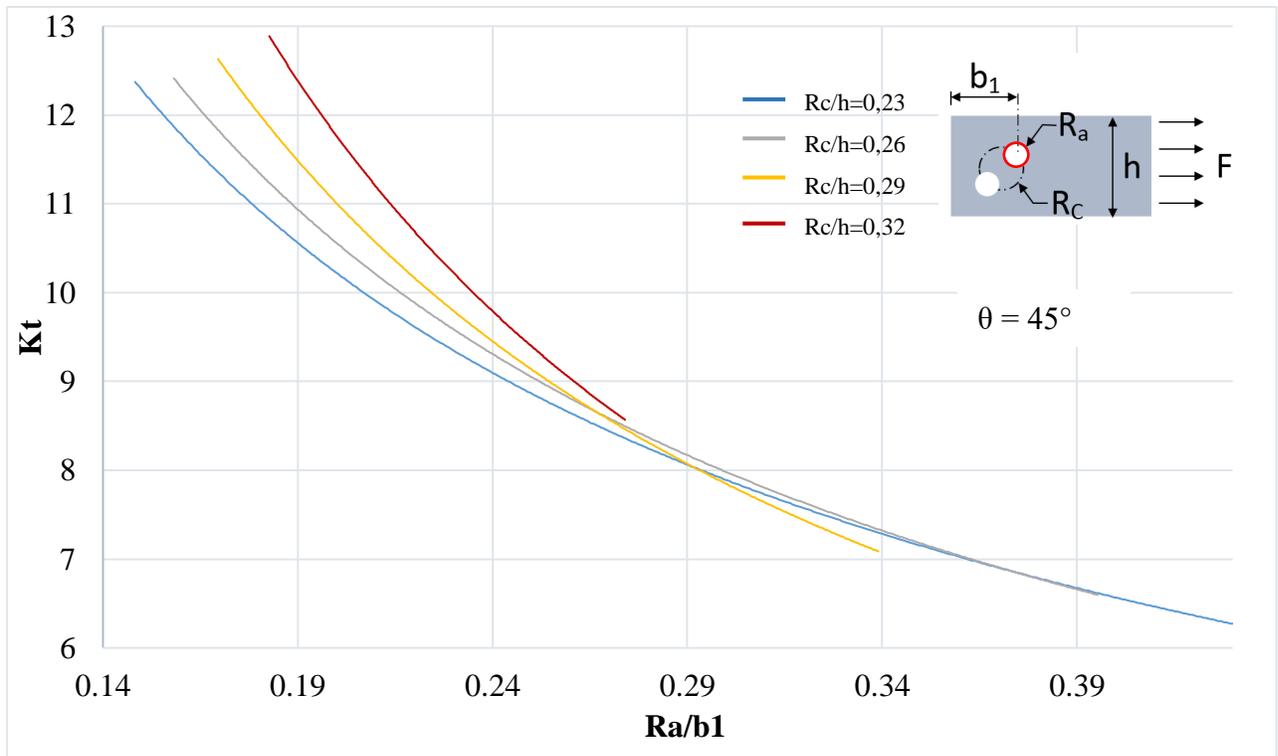


Figura 30. Agujero superior de la placa plana con dos agujeros sometida a carga axial, $\theta = 45^\circ$

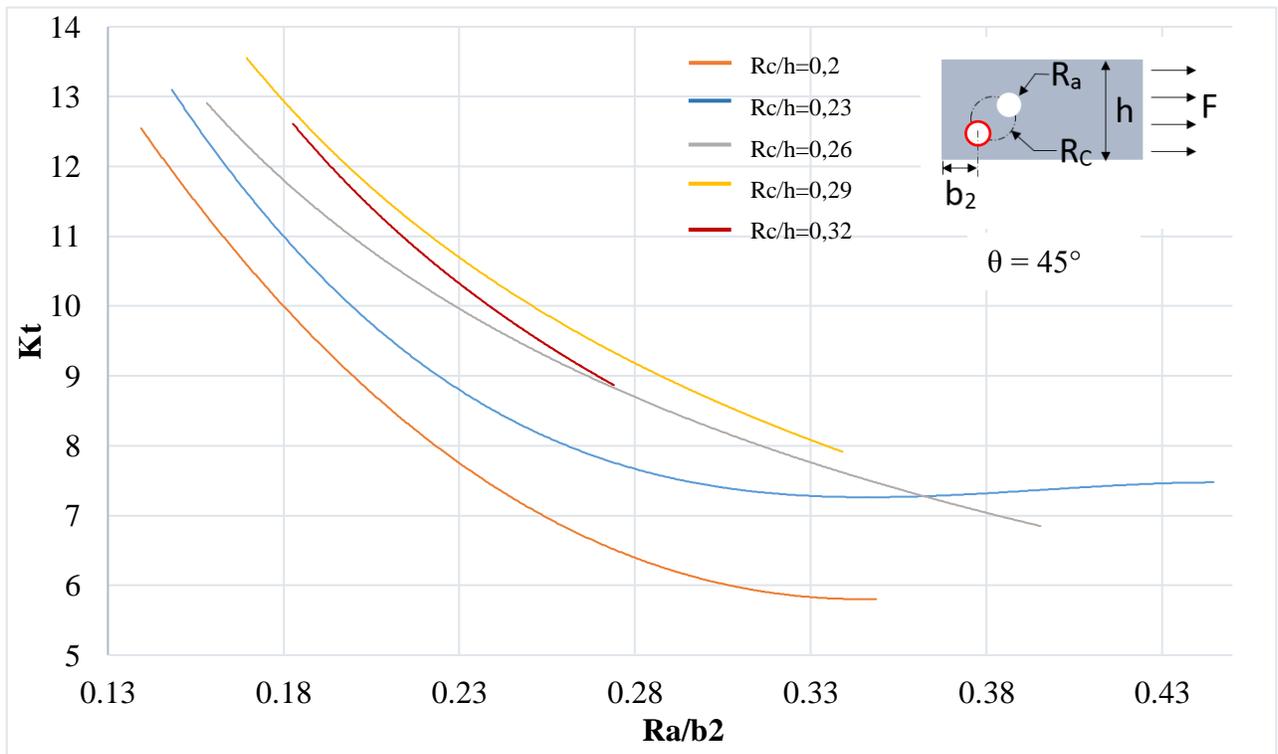


Figura 31. Agujero inferior de la placa plana con dos agujeros sometida a carga axial, $\theta = 45^\circ$

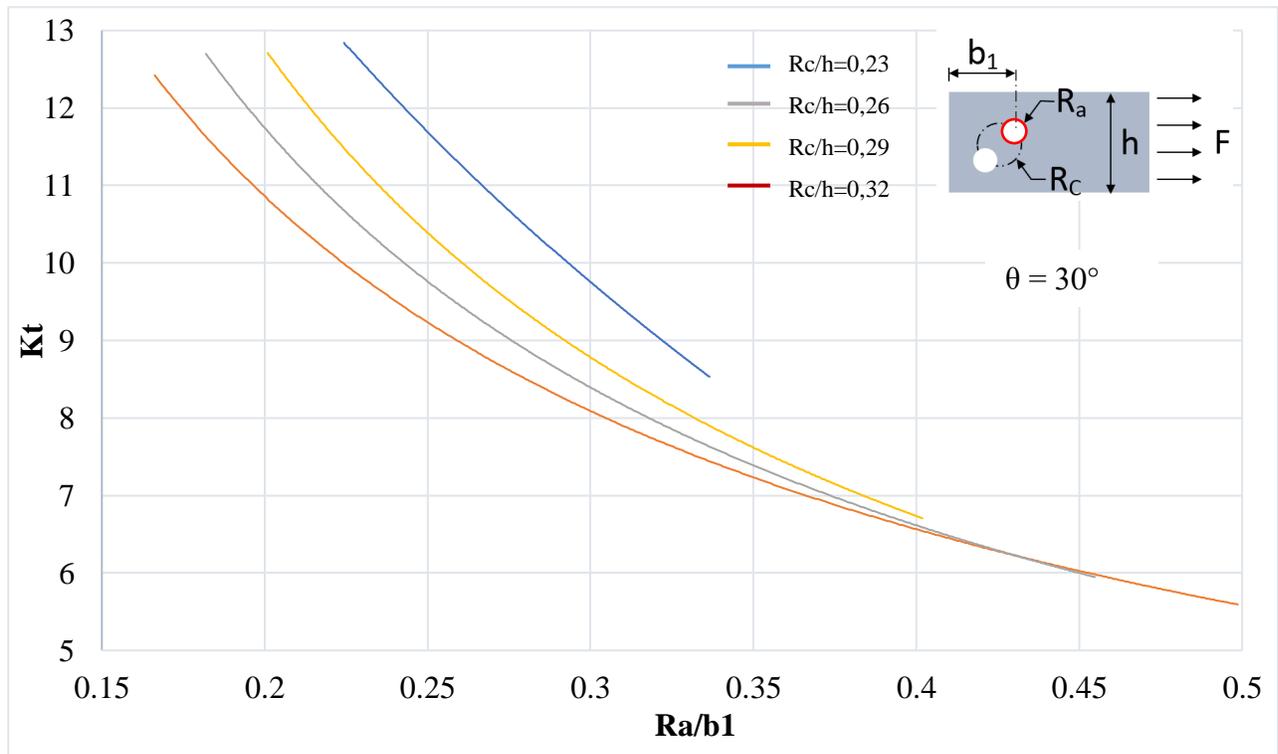


Figura 32. Agujero superior de la placa plana con dos agujeros sometida a carga axial, $\theta = 30^\circ$

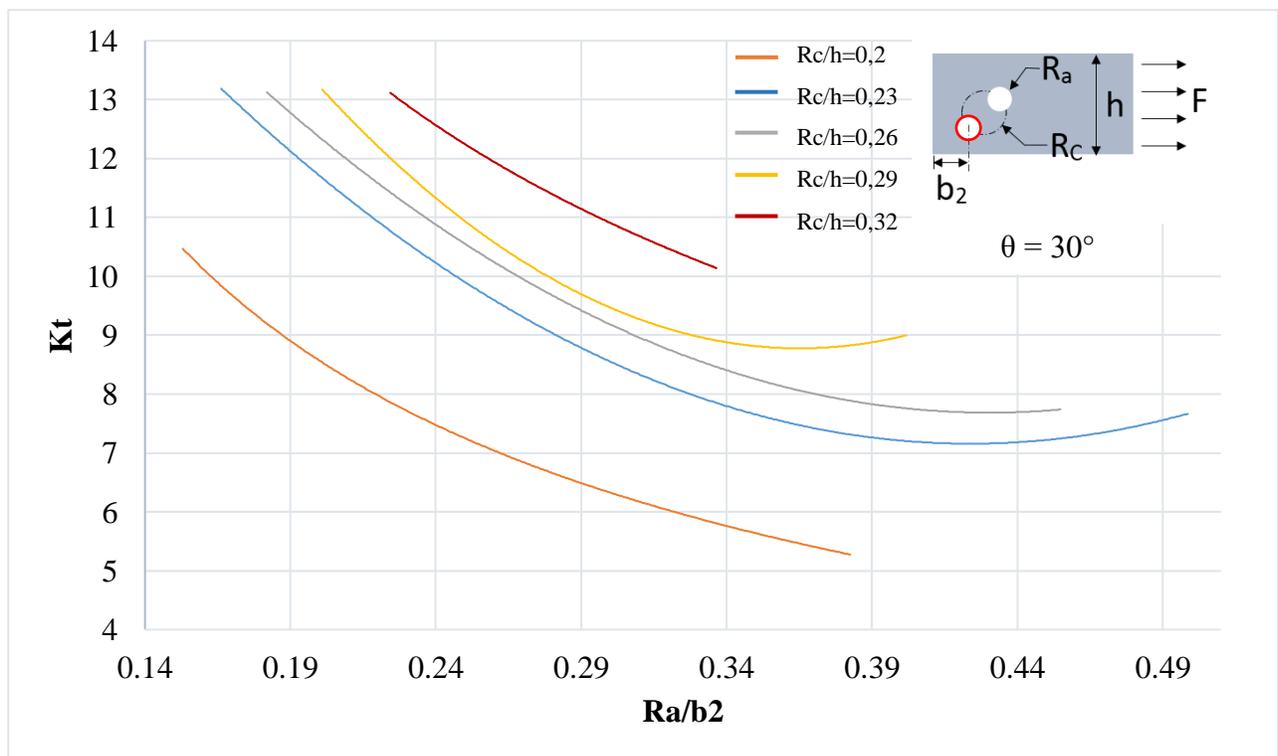


Figura 33. Agujero inferior de la placa plana con dos agujeros sometida a carga axial, $\theta = 30^\circ$

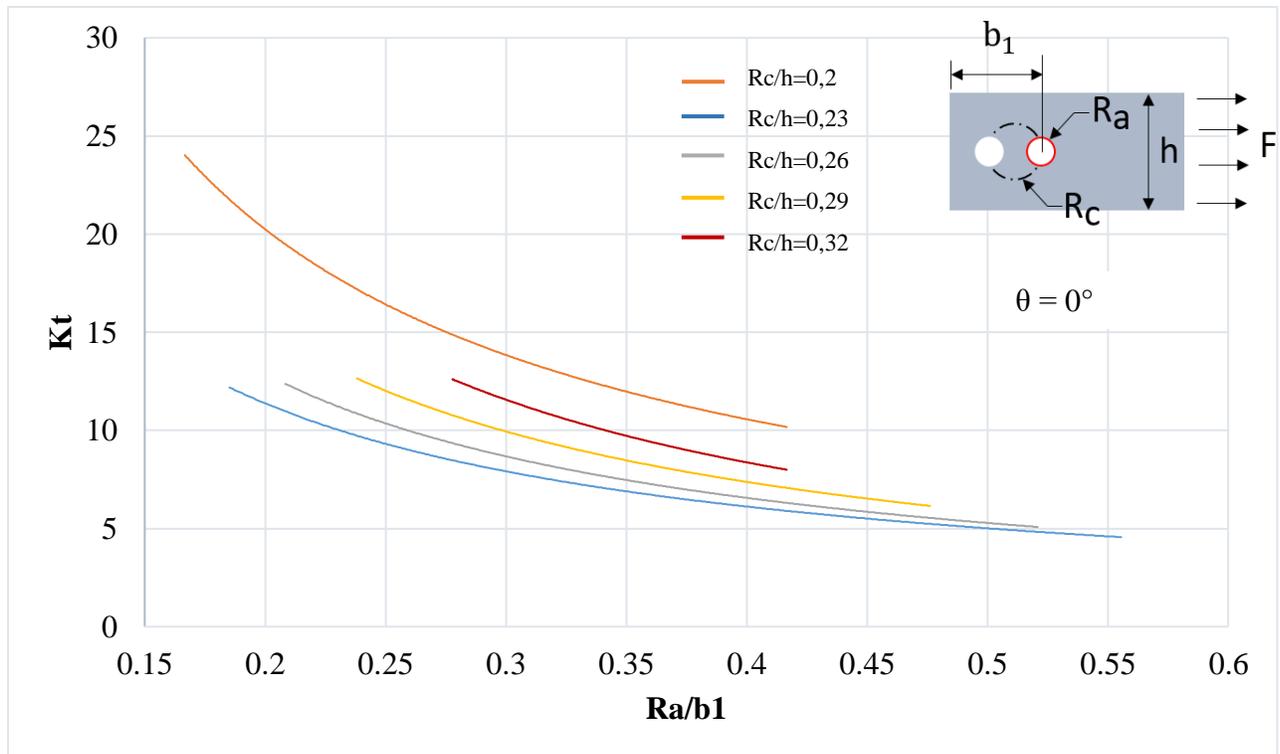


Figura 34. Agujero superior de la placa plana con dos agujeros sometida a carga axial, $\theta = 0^\circ$

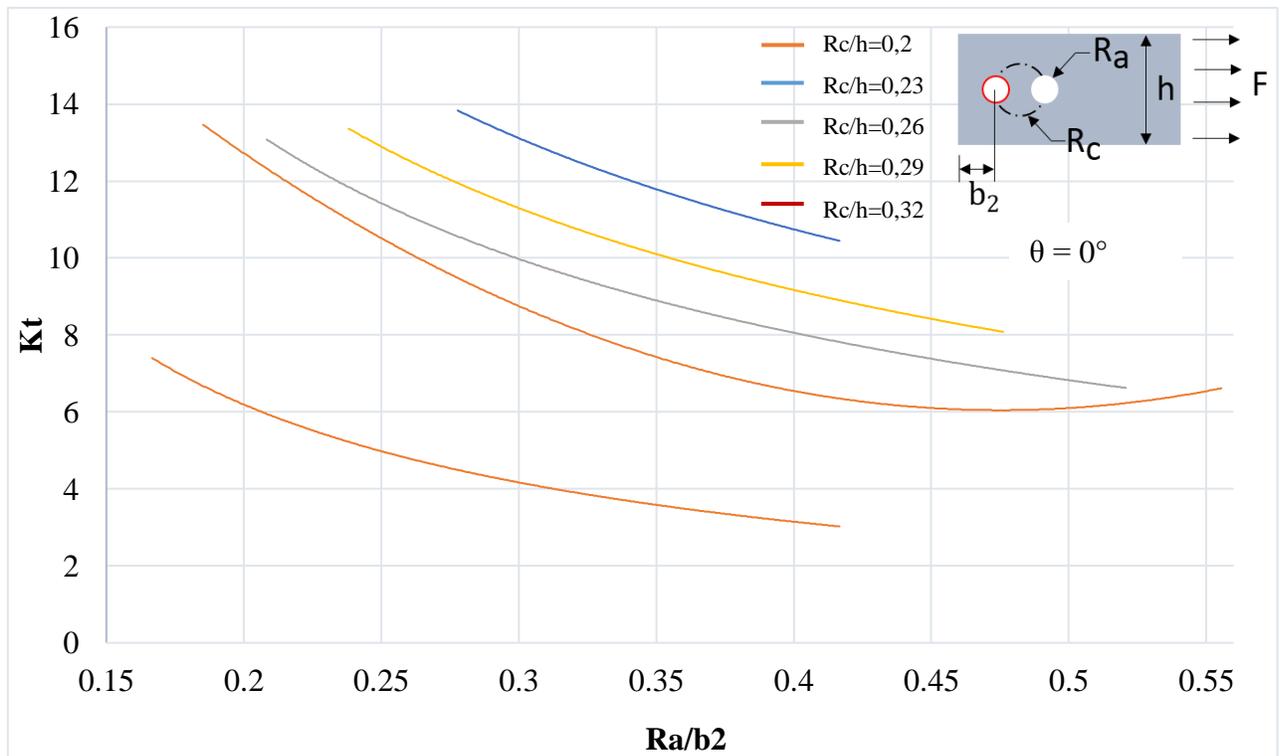


Figura 35. Agujero inferior de la placa plana con dos agujeros sometida a carga axial, $\theta = 0^\circ$