



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

MODELADO ASISTIDO POR COMPUTADORA DE ALIVIADORES DE ESFUERZOS BAJO CARGAS AXIALES

***¹ Ing. Cesar Gustavo Veroli**

*¹ Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional del Nordeste
Av. Las Heras 727 Resistencia Chaco Argentina
correo: gveroli@yahoo.com.ar

RESUMEN

El presente trabajo se ha elaborado para ejemplificar la influencia de aliviadores geométricos de esfuerzos, aplicados al caso de barras de sección circular maciza que presentan un cambio brusco de sección, solicitadas bajo cargas estáticas axiales.

Los cambios bruscos de sección, en barras circulares macizas, también llamados "hombros" o "resaltos", tienen mucha aplicación en el diseño mecánico ya que permiten montar rodamientos, poleas, ruedas dentadas, volantes, etc. El diseño de estos concentradores de esfuerzos en la mayoría de los casos queda sujeto a la geometría de la pieza a montar (diámetros, radios de acuerdos), generando en algunas situaciones elevadas concentraciones de esfuerzos que pueden poner en riesgo dicho diseño sobre todo cuando las cargas o solicitaciones producen fatiga del material.

Existen varias maneras de aliviar la concentración de esfuerzos. Por ejemplo aumentando los radios de encuentro del concentrador, lo cual no siempre es posible ya que un radio de encuentro excesivo provocará un montaje incorrecto de la pieza. Otra manera puede ser adoptar un material dúctil que permita absorber la concentración de esfuerzos con una fluencia localizada en algunos casos; lo cual no siempre es viable, por ejemplo cuando tenemos fatiga del material o solicitaciones aplicadas en forma brusca (impacto).

En muchos casos estos concentradores de esfuerzos se diseñan complementándolos con los que se denominan "aliviadores geométricos de esfuerzos". Estos aliviadores están diseñados con el concepto de evitar los cambios bruscos de la geometría de una pieza, reduciendo la concentración de esfuerzos.

La aplicación de estos aliviadores solo figura en algunas bibliografías, con poca información sobre la efectividad y aplicación específica, quedando supeditadas a resultados de ensayos mecánicos específicos o ensayos foto elásticos por ejemplo.

Este trabajo ha sido desarrollado para ser aplicado como trabajo práctico en la asignatura Elasticidad Aplicada de la Carrera de Ingeniería Electromecánica de la U.N.N.E. Se ha ejemplificado la efectividad de tres aliviadores de esfuerzos trabajando bajo las mismas solicitaciones, utilizando simulaciones asistidas por computadora. Los resultados son comparados con el concentrador de esfuerzos, sin aliviador geométrico.

Palabras Claves: Esfuerzos, aliviadores, concentración, diseño, simulación.



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

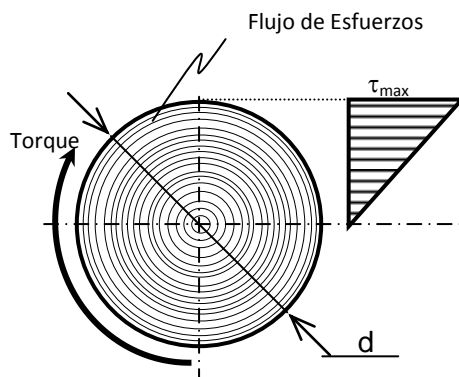
FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

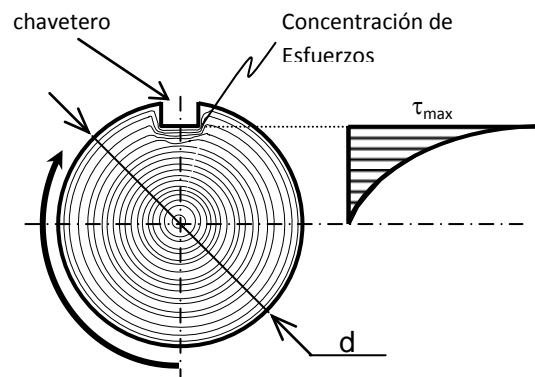
1. INTRODUCCIÓN

Toda pieza mecánica o elemento de máquina, observada a nivel macro, presenta por lo menos una discontinuidad como resultado de su diseño; como son las gargantas, agujeros, chaveteros, hombros o resaltes, necesarios para el montaje de accesorios como sellos mecánicos, chavetas, rodamientos, poleas, etc. Otras piezas como por ejemplo las ruedas dentadas o elementos de sujeción, como bulones y tuercas; tienen una configuración geométrica con cambios de dirección bruscos y repetidos simétricamente (por ejemplo los dientes de engranajes o filetes de rosca de un bulón).

Todas estas discontinuidades geométricas, si bien son necesarias para la funcionalidad del elemento de máquina, también son un obstáculo al libre flujo o normal distribución de los esfuerzos que se generan por efecto de las solicitaciones (cargas o momentos) sobre la pieza, lo cual lleva a una concentración de dichos esfuerzos en la cercanía de la discontinuidad, con valores de estos, por lo general mucho mayores a los esfuerzos nominales que podemos calcular con las ecuaciones deducidas de la teoría de la resistencia de los materiales. A modo de ejemplo, en la figura 1 y 2 se pueden observar el flujo y distribución teórica de esfuerzos en una barra de sección circular con y sin chavetero. [1].



$$\tau_{max} = \frac{T_{max}}{W_o} \quad (1)$$



$$\tau_{max} = K \cdot \frac{T_{max}}{W_o} \quad (2)$$

Figura 1. Barra de sección circular sin macro discontinuidad

Figura 2. Barra de sección circular con chavetero



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

Muchas veces, en el diseño de un árbol o eje, la influencia de una discontinuidad o concentrador de esfuerzos toma un valor tan importante que dicha sección pasa a ser crítica, gobernando el diseño de la pieza.

Las salidas o alternativas para solucionar estructuralmente el problema pueden ser varias, por ejemplo adoptar otro material con mejores propiedades mecánicas o dimensionar la pieza en base a una seguridad mínima aceptable en la sección más crítica. A veces este criterio de diseño lleva a resultados conservadores y hasta anti económicos si las piezas se deberán producir en serie.

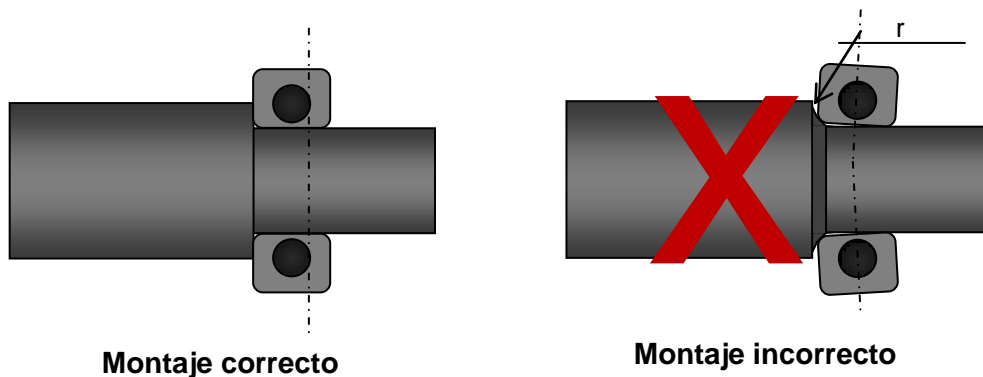


Figura 3. Necesidad de utilizar cambios de sección bruscos

Otra solución es modificar la geometría del concentrador, aumentando los radios de encuentro. Esta alternativa en muchas ocasiones no es posible de aplicar, ya que un cambio de sección donde se va a montar un rodamiento como en la figura 3, el radio de acuerdo o de encuentro en la sección del concentrador, deberá ser menor o igual al radio de encuentro de las aristas del rodamiento para permitir un montaje adecuado.

Muchas bibliografías relacionadas con el diseño de elementos de máquinas, cuando tocan el tema "concentraciones de esfuerzos", hacen mención a los denominados aliviadores de tensiones o aliviadores de esfuerzos, como uno de los métodos de diseño utilizados para disminuir la severidad de un concentrador de esfuerzos sobre todo ante el diseño de piezas que van a trabajar a fatiga.[3] Otros autores los conocen como concentradores múltiples de tensión. Estos aliviadores no son más que discontinuidades ubicadas estratégicamente en la pieza a efectos de que el flujo de esfuerzos no se vea perturbado bruscamente. La figura 4, muestra en forma aproximada la distribución teórica de las líneas de flujo en las proximidades de un cambio de sección, hombro o resalte bajo una carga axial de tracción.

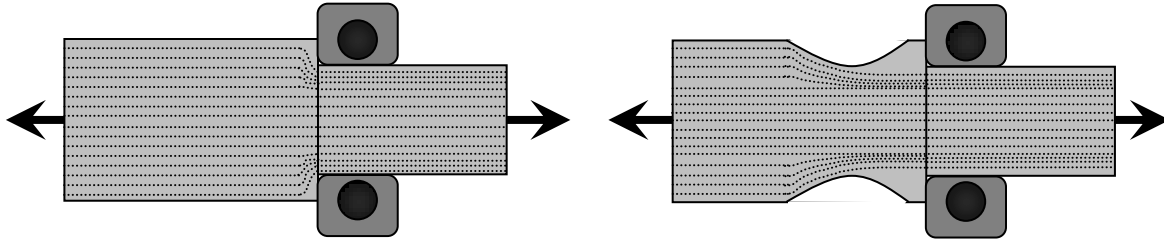


Figura 4. Flujo de esfuerzos bajo cargas axiales

1.1 Objetivo del Trabajo

Debido a que la información disponible en las bibliografías sobre la influencia que pueden tener los aliviadores de esfuerzos en la disminución de la severidad de un concentrador, solo tienen un alcance teórico, sin cuantificar la mejora en casos específicos; se pretende, con fines de aplicación didácticos, llevar a cabo un análisis estructural basado en un caso de un concentrador de esfuerzos generado por un cambio de sección brusco o también llamado resalte, solicitado a una carga de tracción pura. El análisis se llevará a cabo a través de la aplicación de un método numérico como el de los elementos finitos, ayudado o asistido con SolidWorks.

2 MÉTODOS DE ANÁLISIS

Se analizan tres casos de concentración de esfuerzos:

2.1 Caso 1:

- Análisis teórico de la Concentración de esfuerzos y determinación del factor de forma para un radio de encuentro de 1 [mm], sin ningún tipo de aliviador de esfuerzos, utilizando ecuaciones deducidas de la teoría matemática de la elasticidad.
- Análisis numérico de la Concentración de esfuerzos sobre un modelo equivalente, discretizado, utilizando el método de los elementos finitos.

2.2 Caso 2:

- Análisis numérico de la Concentración de esfuerzos sobre un modelo con un radio de encuentro de 1 [mm], y aliviador de esfuerzos definido como "Aliviador N° 1", utilizando el método de los elementos finitos.

2.3 Caso 3:



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

- Análisis numérico de la Concentración de esfuerzos sobre un modelo con un radio de encuentro de 1 [mm], y aliviador de esfuerzos definido como "Aliviador N° 2", utilizando el método de los elementos finitos.

3. DESARROLLO

3.1 Análisis Teórico del Caso 1:

3.1.1 Datos

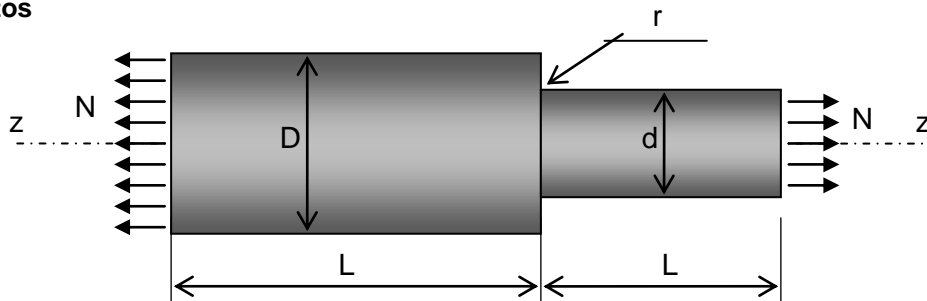


Figura 5. Modelo Analizado en el Caso 1

La figura 5 muestra un croquis de la geometría del concentrador analizado. Los datos del problema son:

Geométricos

D = 30 mm
d = 20 mm
r = 1 mm
L = 50 mm

Material

E = 200.000 MPa
 $\mu = 0,3$

Cargas

N = 50.000 N

3.1.2 Estimación del coeficiente teórico de concentración de tensiones utilizando la teoría matemática de la elasticidad

Hipótesis:

- Se analizan los esfuerzos para un material Hookeano.
- Carga estática aplicada en dirección coincidente con eje z .
- Factor teórico de concentración de esfuerzos referido al esfuerzo normal en la sección de menor diámetro.
- Ecuación de cálculo del Factor teórico de concentración de esfuerzos extraída de Diseño en Ingeniería Mecánica- Shigley; Mischke- Sexta Edición. Ecuación (4) [2].



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

$$k_t = 0.493 + 0.48 \times \left(\frac{D}{d}\right)^{-2.43} + \left(\frac{r}{d}\right)^{-0.48} \times \sqrt{\frac{3.43 - 3.41 \times (D/d)^2 - 0.0232 \times (D/d)^4}{1 - 8.85 \times (D/d)^2 - 0.078 \times (D/d)^4}} \quad (4)$$

Reemplazando

$$\Rightarrow K_t = 2,67 \quad (5)$$

3.1.3 Esfuerzo Nominal

$$\sigma_0 = \frac{N \cdot 4}{\pi \cdot D^2} \quad (6)$$

Reemplazando

$$\Rightarrow \sigma_0 = 159,15 \text{ [MPa]} \quad (7)$$

3.1.4 Esfuerzos máximo teórico en el concentrador

$$\sigma_{max} = k_t \cdot \sigma_0 \quad (8)$$

Reemplazando

$$\Rightarrow \sigma_{max} = 424,93 \text{ [MPa]} \quad (9)$$

3.1.5 Distribución Teórica De los Esfuerzos

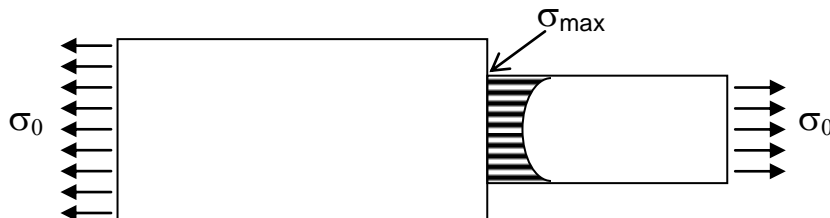


Figura 6. Distribución teórica de Esfuerzos

3.2 Análisis Numérico

El Análisis Numérico de los tres casos se llevó a cabo con la aplicación del método de los elementos finitos a través del software SolidWorks, SP2.0. versión 2013, herramienta SIMULATION.[4]

Consideraciones para el análisis :

- Sollicitación Estática.
- Material Isótropo, Elástico, Lineal.
- Temperatura constante para deformación nula 298 Kº (24,85 Cº).



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

- Carga normal de tracción pura.
- El material adoptado es un acero AISI 1045, deformado en frío.
- Se analizan esfuerzos dentro del campo elástico (material Hookeano).
- Se utilizó un mallado basado en la curvatura de la pieza, con elementos tridimensionales tetraédricos curvilíneos.
- Para la resolución del problema el software aplica un método adaptativo para refinar el mallado en las zonas con mayor probabilidad de errores en el cálculo. La precisión definida inicialmente es de un 99%.
- Se prestó atención a no tener elevadas relaciones de aspecto entre los elementos. (99% de los elementos con relaciones de aspecto menores al 3% y ninguna relación mayor al 10%.[4])
- Las vinculaciones a tierra utilizadas en todos los casos analizados son de restricción de traslación en el sentido longitudinal de la barra, y utilización de muelle blando para estabilizar el modelo.

Propiedades Mecánicas del Material adoptado:

- Acero AISI 1045 (Estirado en frío)
- Modulo de Elasticidad Longitudinal = 205.000 [MPa]
- Coeficiente de Poisson = 0,29
- Limite Elástico = 530 [MPa]
- Limite Ultimo = 625 [MPa]

3.2.1 Caso 1:

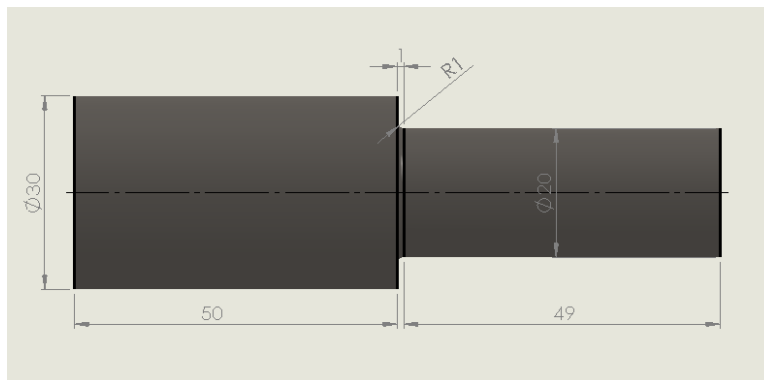


Figura 7. Modelo del Caso 1 en CAD.



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

Especificación del Mallado:

- Tamaño Máximo de elementos: 3 [mm]
- Tamaño Mínimo de elementos: 0,5 [mm]
- Número total de nodos: 115.537
- Número total de elementos: 79.475

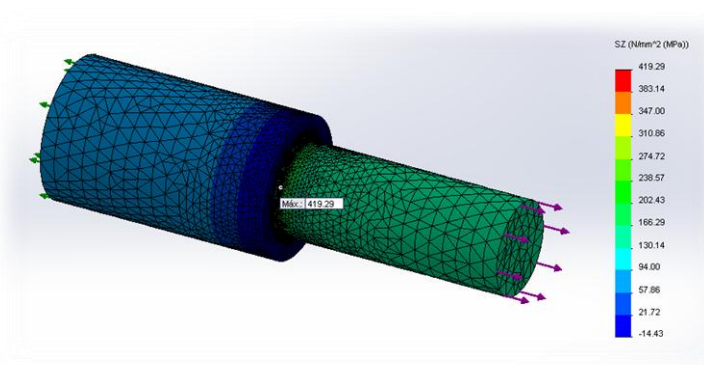


Figura 8. Análisis Numérico del Concentrador sin aliviador de esfuerzos. Caso 1

3.2.2 Caso 2:

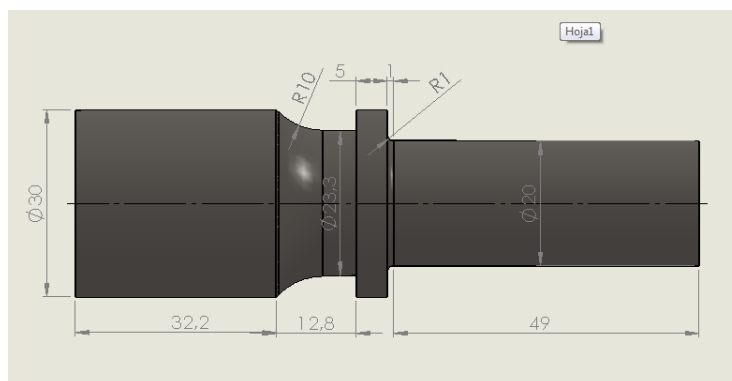


Figura 9. Modelo del Caso 2 en CAD

Especificación del Mallado:

- Tamaño Máximo de elementos: 3 [mm]
- Tamaño Mínimo de elementos: 0,5 [mm]
- Número total de nodos: 117.179
- Número total de elementos: 79.642



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

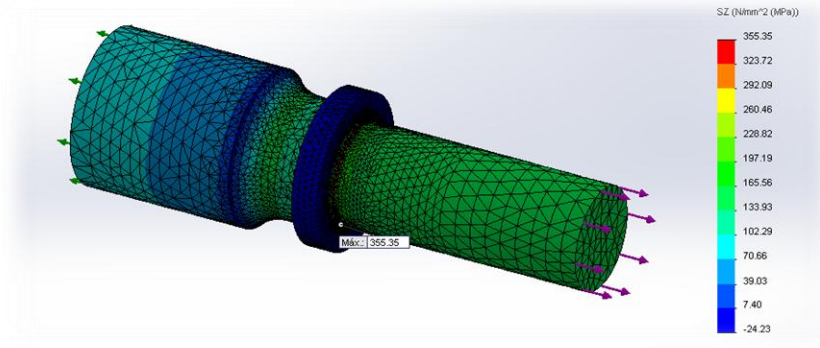


Figura 10. Análisis Numérico del Concentrador sin aliviador de esfuerzos. Caso2

3.2.3 Caso 3:

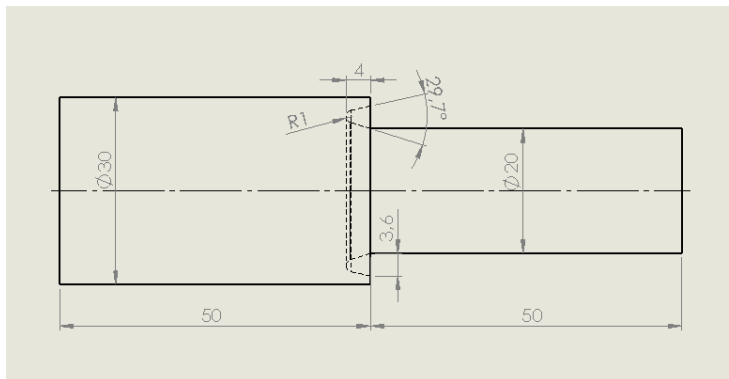


Figura 11. Modelo del Caso 3 en CAD

Especificación del Mallado:

- Tamaño Máximo de elementos: 3 [mm]
- Tamaño Mínimo de elementos: 0,5 [mm]
- Número total de nodos: 78.804
- Número total de elementos: 53.947



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

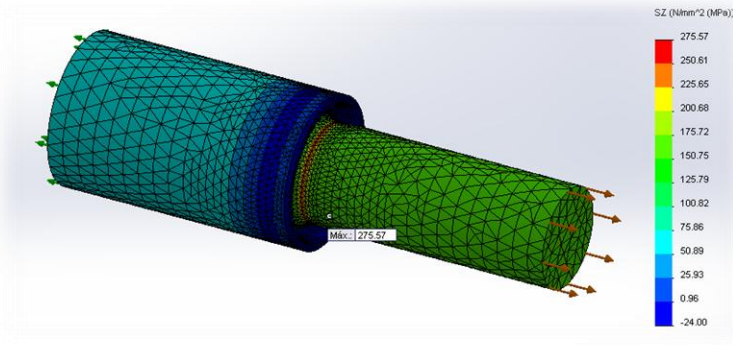


Figura 12. Análisis Numérico del Concentrador sin aliviador de esfuerzos. Caso3

4 RESULTADOS

Tabla N°1 - Cuadro Comparativo de Esfuerzos Localizados Calculados con el Método de los Elementos Finitos

Caso Analizado	σ_0 [MPa] (nominal)	σ_{max} [MPa] (concentrador)	Kt (teórico)	% respecto del Kt sin aliviador
Caso 1 (Concentrador con radio de encuentro $r = 1$ [mm] sin aliviador)	158,29	419,29	2,65	-
Caso 2 Concentrador con radio de encuentro $r = 1$ [mm] y Aliviador N°1	158,83	355,35	2,24	19,23 % menor
Caso 3 Concentrador Aliviador N°2	158,72	275,57	1,73	34,27 % menor



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

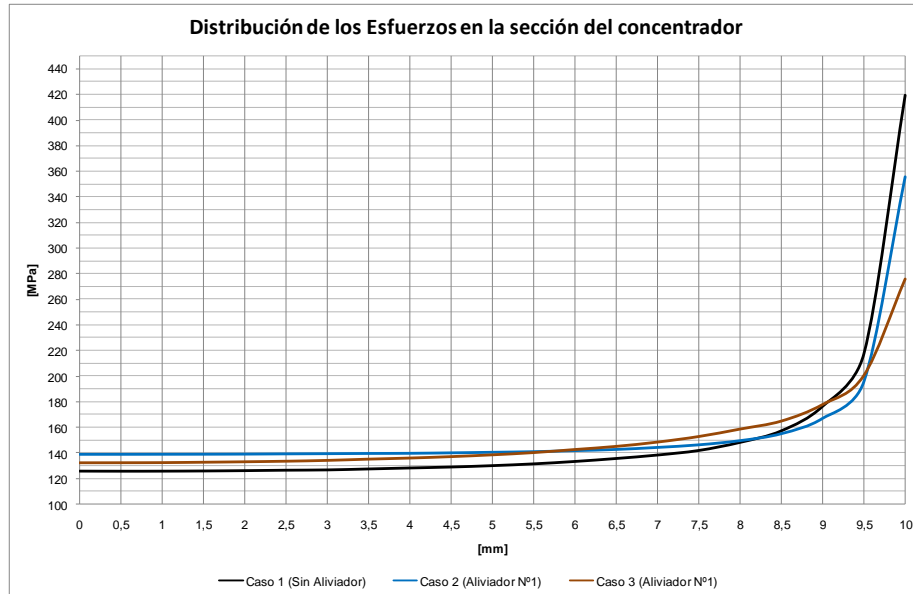


Figura 13. Análisis del Gradiente de Esfuerzos para los Casos Analizados

5. CONCLUSIONES

Analizada la influencia de dos tipos de aliviadores geométricos de tensiones trabajando junto a un concentrador de esfuerzos de amplia utilización en el diseño mecánico, solicitado con una carga normal de tracción pura; se deduce que estos aliviadores para la sollicitación planteada, ayudan significativamente a disminuir los picos de esfuerzos teóricos, desde un 19% para el Caso 2, hasta un 34% para el Caso 3. No se observan grandes modificaciones en la forma de la distribución de los esfuerzos por la utilización de los aliviadores. El Caso 1 (sin aliviador) presenta el mayor gradiente de esfuerzos (figura 14), los Casos 2 y 3, solo reducen los valores picos, tomando prácticamente los mismos valores de esfuerzos nominales en puntos alejados del concentrador (5 [mm] aproximadamente).

El pequeño radio de acuerdo en el concentrador, considerado para el análisis, pone de manifiesto que las concentraciones teóricas de esfuerzos analizadas en los tres casos, dan como resultado picos de tensiones con valores elevados, pero que luego disminuyen rápidamente a pocas décimas de milímetros de la superficie de la pieza (figura 14). Este fenómeno, desde el punto de vista de la colaboración que pueda tener el material para absorber la concentración de esfuerzos, no presenta mayores dificultades ya que la concentración de tensiones está reducida a zonas muy pequeñas, lo que hace que el material utilizado en este caso (Acero con tenor medio de carbono) pueda



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

absorber cómodamente dichos picos frente a sollicitaciones estáticas o de fatiga, siempre refiriéndonos a los niveles de carga planteados.

Este trabajo solo muestra un ejemplo específico del trabajo de los aliviadores geométricos de esfuerzos, analizado por un método numérico. Para obtener resultados confiables, se deberían complementar los análisis llevados a cabo, con métodos experimentales de validación (fotoelasticidad por ejemplo) y analizar otras sollicitaciones.

4. REFERENCIAS

- [1] Fred B. Seely, M. S., James O. Smith, A. M., Curso Superior de Resistencia de Materiales, Librería y Editorial Nigar SRL, Buenos Aires, AÑO 1967.
- [2] Robert L. Norton, Diseño de Máquinas, Editorial Prentice Hall, AÑO 1999.
- [3] Rafael Avilés, Análisis de Fatiga en Máquinas, Editorial Parainfo, AÑO 2005.
- [4] Sergio Gomez González, SolidWorks Simulation^R, Editorial Alfa Omega Ra-Ma, AÑO 2010.

5. AGRADECIMIENTOS

A la Facultad de Ingeniería UNNE, que me ha dado mucho, es el lugar donde me he formado y donde hoy llevo a cabo gran parte de mi trabajo profesional.

Al profesor Ingeniero Carlos G. Micuzzi, titular de la Asignatura Elasticidad Aplicada, a quien también debo mucho.

Muchas gracias.