

Tensiones localizadas producidas por discontinuidades geométricas combinadas

Ricardo Mario Amé

Correo electrónico:ingricardoame@gmail.com

Gabriel María Dasso

Daniel Lezama

Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Lomas de Zamora, Buenos Aires, República Argentina

Resumen

Los componentes mecánicos, especialmente en máquinas y estructuras metálicas, se diseñan con formas diversas que incluyen cambios de sección, agujeros, zonas roscadas, chaveteros y múltiples discontinuidades geométricas que producen elevaciones localizadas de las tensiones. En muchas oportunidades se presenta la superposición de dos o más discontinuidades en una misma sección o en secciones muy cercanas dificultando la determinación del valor de la tensión localizada. En el presente trabajo se aplica el software ABAQUS a la determinación del incremento localizado de tensiones en secciones con más de una discontinuidad geométrica. Se elaboran gráficos de utilización simple a los fines prácticos del diseño mecánico. El análisis de casos se limita a cuerpos con discontinuidades geométricas de dimensiones macroscópicas de las entallas. El software es empleado para situaciones comprobadas dadas por la bibliografía aceptada con el fin de validar el método; posteriormente se aplica a diseños genéricos de concentradores geométricos combinados en piezas planas simétricas, con cargas axiales. Se demuestra que el software es pertinente, se comprueban los valores del K_t ofrecidos por la bibliografía habitualmente reconocida. Se obtienen resultados para discontinuidades combinadas y se elaboran gráficos para el diseño mecánico. Se concluye afirmando que la información disponible en la bibliografía para concentradores geométricos combinados es escasa y en algunos casos de aplicación dudosa. La disponibilidad de herramientas informáticas permite obtener valores para diseños complejos. Los gráficos elaborados a partir de los resultados obtenidos por aplicación de dichos softwares mejora la eficacia de los diseños.

Palabras clave: concentración de tensiones, fatiga, elementos de máquinas, diseño mecánico, elementos finitos

Recibido: 6 de diciembre del 2010

Aprobado: 24 de febrero del 2011

INTRODUCCIÓN

Es inobjetable la importancia de considerar los efectos de la concentración de tensiones en los diseños de cuerpos sometidos a tensiones, especialmente en los elementos de máquinas vinculados a tensiones variables. Se considera concentradores de tensión a todas aquellas discontinuidades geométricas, rugosidades e imperfecciones superficiales,

ajustes con apriete entre partes, corrosión y todo producto de la manufactura o de los tratamientos térmicos y superficiales que incrementen localmente las tensiones nominales.

Es objetivo de este trabajo obtener el valor del factor de concentración de tensiones teórico o geométrico para casos de piezas cargadas axialmente con más de una discontinuidad geométrica en una misma sección o en

secciones muy cercanas, mediante curvas de relaciones geométricas, útiles para el diseño mecánico. A partir de datos secundarios, obtenidos de la bibliografía especializada se ha comprobado la escasa y precaria información que cuantifica el factor de concentración de tensiones debido a efectos combinados.

A partir de ello se diseña una estrategia de análisis, para algunos casos particulares, aplicando el software ABAQUS para determinar la variación de las tensiones de modo que permita obtener información de tipo gráfica que facilite y agilice la tarea del cálculo y diseño mecánico.

Como primera instancia y a fin de validar los resultados obtenidos, se aplica el análisis de la variación de las tensiones por elementos finitos al caso presentado en [1], específicamente en la figura 69. Como paso siguiente se agrega el límite a las dimensiones de dichas figuras. Finalmente y como aporte novedoso, se realiza el análisis de tensiones y sus variaciones sobre una chapa, de espesor uniforme, cargada con una tensión normal de tracción uniformemente distribuida, de dimensiones establecidas, con ranuras semicirculares en los bordes y agujero central en la misma sección transversal.

Es conocida la definición del factor teórico de concentración de tensiones como el cociente entre la máxima tensión producida por su presencia respecto a la tensión nominal posible si dicho concentrador no existiera.

$$K_t = \frac{\sigma_{m\acute{a}x.}}{\sigma_{nom.}} \quad (1)$$

Lo anterior es válido ya sea para tensiones normales como para las tangenciales, sólo que en este último cambian las tensiones de referencia.

Esta relación es admitida en aquellos casos de cargas simples aplicadas a cuerpos con un único concentrador de tensión y lleva implícita la posibilidad de expresarla en función de la acumulación o incidencia de más de un concentrador.

Particularmente en los elementos de máquinas es común encontrar varias discontinuidades geométricas combinadas y en presencia de otros factores de concentración. Esta disposición se suma a la existencia de estados de cargas complejos que generan diferentes tipos de tensiones combinadas.

Algunos textos [2, 3] ofrecen información para la determinación del factor teórico resultante de la aplicación de esfuerzos combinados sobre una única discontinuidad geométrica. En otros textos [4, 5] la determinación o bien el criterio a utilizar cuando los concentradores de tensión combinados incluyan una discontinuidad geométrica y un efecto relacionado con otros parámetros no geométricos, tales como corrosión, tensiones residuales o direccionalidad. Con respecto al tratamiento de los concentradores geométricos compuestos, dejando de lado aquellas combinaciones *ad-hoc* con el fin de atenuarlos, se han encontrado algunos valores del factor teórico o criterio de aplicación o simples recomendaciones [6 - 8].

No obstante en muchos casos los autores presentan solo criterios de difícil implementación.

Por ello, la cantidad y variedad de información referida a la determinación cuantitativa del factor de concentración de tensiones debido a la presencia de varias discontinuidades geométricas en una misma sección continua siendo limitada. Los autores citados presentan trabajos que se circunscriben a esquemas particulares no resultando extensivo al diseño general. Esta falta de información práctica y la difícil generalización de lo poco disponible, obliga a que se elaboren estrategias de solución no siempre confiables con el fin de avanzar en el cálculo y diseño mecánico.

VALIDACIÓN DEL SOFTWARE UTILIZADO

La utilización de softwares que permitan determinar las tensiones en cualquier sección de un cuerpo en un estado complejo de tensiones, es una herramienta poderosa para tal fin, y por ello el método ha merecido múltiples aplicaciones en la mecánica. [9 - 12].

Previo a la obtención de los resultados buscados, se impone la validación de la herramienta informática utilizada. El software ABAQUS ha sido ampliamente utilizado tal como lo reflejan las citas indicadas en el párrafo anterior. No obstante se verifica, aplicándolo a una placa de ancho finito W sometida a una carga axial distribuida P , con un agujero transversal de diámetro d , en posición central según se observa en la figura 1.

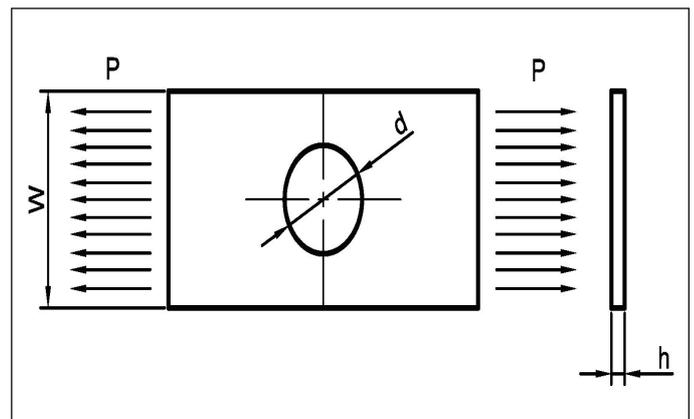


Fig. 1. Espécimen de validación del software utilizado.

De acuerdo con [1], este caso está en concordancia a la solución de Howland, quien sostiene que la relación entre el factor de concentración de tensiones K_t y d/W , queda expresada por las ecuaciones (2) y (3):

$$K_t = \frac{\sigma_{m\acute{a}x.}}{\sigma_{min}} \text{ basado en la sección neta} \quad (2)$$

$$\sigma_{nom} = \frac{P}{(W - d)h} \quad (3)$$

Para realizar la comprobación del programa, se dimensiona una placa de $W = 100$ mm, con una tensión axial σ de 200 MPa, para lo cual la fuerza P será de 200 00 N.

Dentro del programa se analiza un cuarto de la figura, aprovechando la simetría para trabajar con un cuerpo más pequeño y disminuir los tiempos de proceso, cabe aclarar, que en [1] los valores son para una placa de ancho finito, con el concentrador de tensiones lo suficientemente alejado de los extremos de la placa. Se utiliza un largo de $10W$ para asegurar que la tensión en el concentrador, no sea afectada por la proximidad de la carga aplicada. Los autores han detectado que cuando el concentrador está cercano a la carga, los valores de tensión se elevan, en algunos casos duplicando su valor.

Se realizó el procedimiento para obtener los valores máximos S11 de tensión normal en el concentrador de tensiones (S11, en la dirección de la carga aplicada, según la denominación dada por ABAQUS, o σ_x según denominación de los autores).

Con los resultados del software, se realizó la comparación con la solución de Howland, que se observa en la figura 2.

Finalmente, se puede concluir que el resultado obtenido con la aplicación del programa es satisfactorio. Las diferencias son poco significativas, del orden del 4 %.

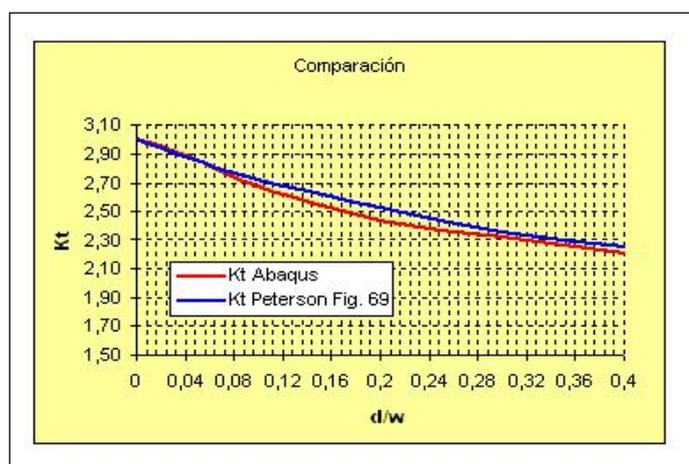


Fig. 2. Comparación de la curva obtenida por el método de elementos finitos (ABAQUS) y el análisis matemático de Howland.

APLICACIÓN DE SOFTWARE ABAQUS AL CÁLCULO DEL INCREMENTO DE LA TENSIÓN LOCALIZADA POR DISCONTINUIDADES GEOMÉTRICAS COMBINADAS

Se aplica el software ABAQUS a una placa de sección finita, con un agujero central y dos entallas alineadas en la misma sección transversal, tal como se indica en la figura 3.

El estado de tensiones es axial puro debido a la aplicación de una carga distribuida en sus extremos. El procedimiento aplicado es similar al anterior, utilizando diferentes relaciones geométricas, se obtienen valores de tensión máxima $\sigma_{máx}$ en los puntos A y A'.

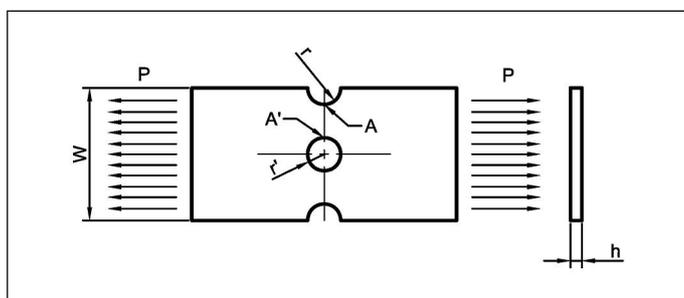


Fig. 3. Especimen de análisis de tensiones localizadas por combinación de discontinuidades geométricas.

Se llama K_t nominal -ecuación (4)- al factor teórico obtenido con la tensión nominal σ_{nom} (S11 del software), siendo esta el cociente entre la carga aplicada y la sección neta -ecuación (5)-, es decir, descontados los agujeros y entallas, asumiendo una distribución uniforme de la tensión, en concordancia con el criterio de Howland.

$$K_{t\ nominal} = \frac{\sigma_{máx}}{\sigma_{nom}} \quad (4)$$

basado en la sección neta

$$\sigma_{nom} = \frac{P}{[W - 2(r + r')] \cdot h} \quad (5)$$

Se llama K_t remota -ecuación (6)- al obtenido con la tensión remota, siendo esta el cociente entre la carga aplicada y una sección suficientemente alejada de los concentradores y otras perturbaciones -ecuación (7).

$$K_{t\ remota} = \frac{\sigma_{máx}}{\sigma_{remota}} \quad (6)$$

basado en la sección total

$$\sigma_{remota} = \frac{P}{W \cdot h} \quad (7)$$

Operando con la (5) y la (7) se puede obtener la siguiente relación:

$$\frac{\sigma_{nom}}{\sigma_{remota}} = \frac{1}{1 - \frac{2}{W}(r + r')} \quad (8)$$

La (8) indica que σ_{nom} es mayor que σ_{remota} y que depende de las relaciones r/r' y r/W .

Los gráficos se obtuvieron en función de la relación r/W y dado que W es constante, cada una de estas curvas representa un radio de la entalla (agujero exterior) determinado. En las abscisas se indica la relación r/r' , de

forma tal que en una recorrida desde la derecha y hacia el origen, para un valor dado del radio de la entalla r , el radio del agujero central r' es mayor. Es decir, que a medida que se consideran sectores más hacia la izquierda en los gráficos se va hacia porciones de la chapa en estudio de menor sección neta o remanente. Ver figuras 4, 5, 6 y 7.

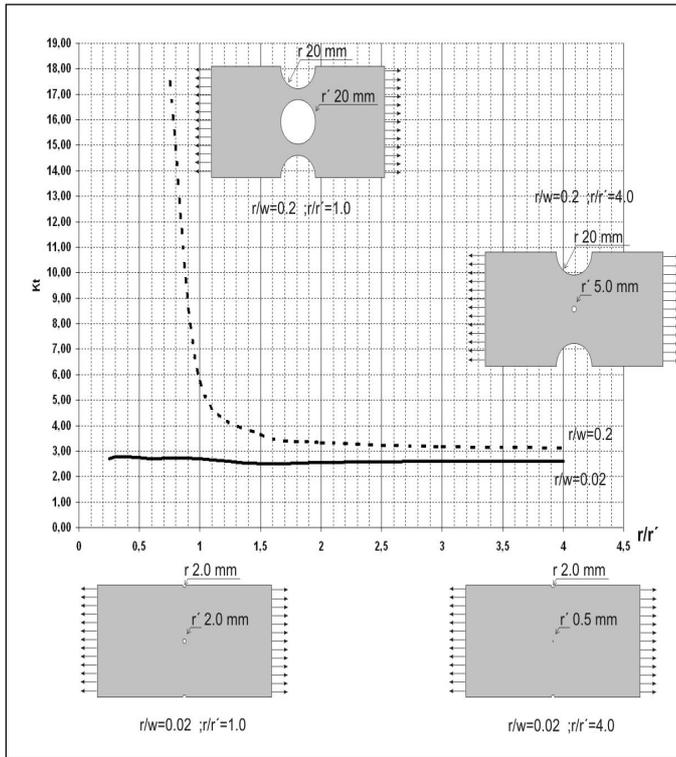


Fig. 4. Variación de K_t según la tensión σ_{remota} en el punto A.

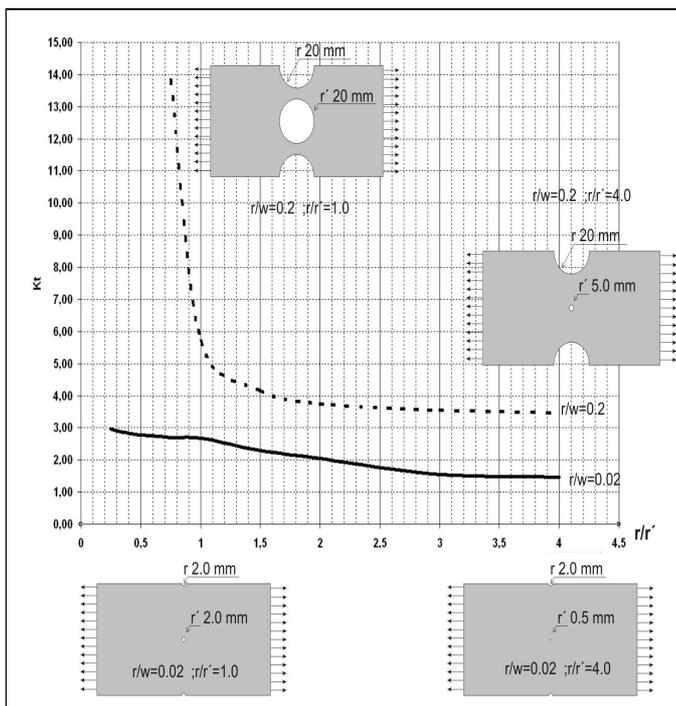


Fig. 5. Variación de K_t según la tensión σ_{remota} en el punto A'.

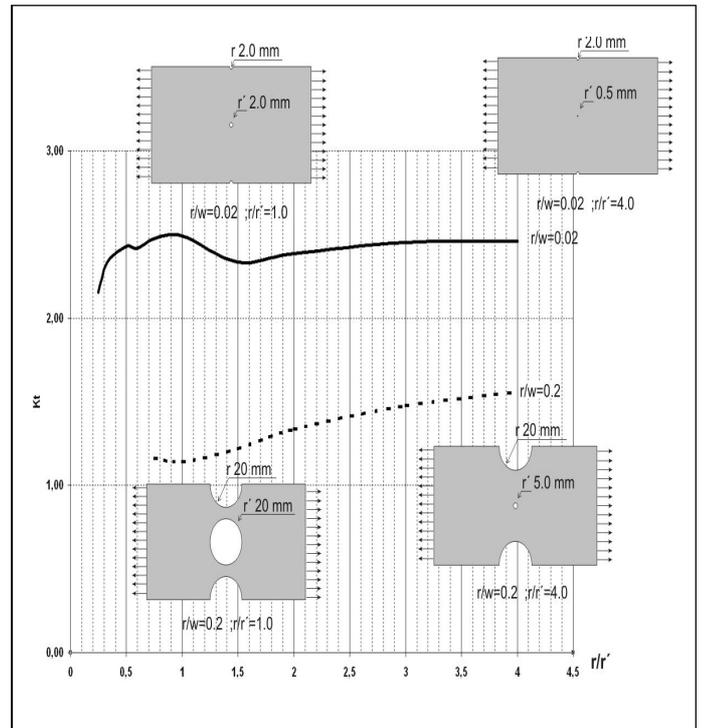


Fig. 6. Variación de K_t según la tensión $\sigma_{nominal}$ en el punto A.

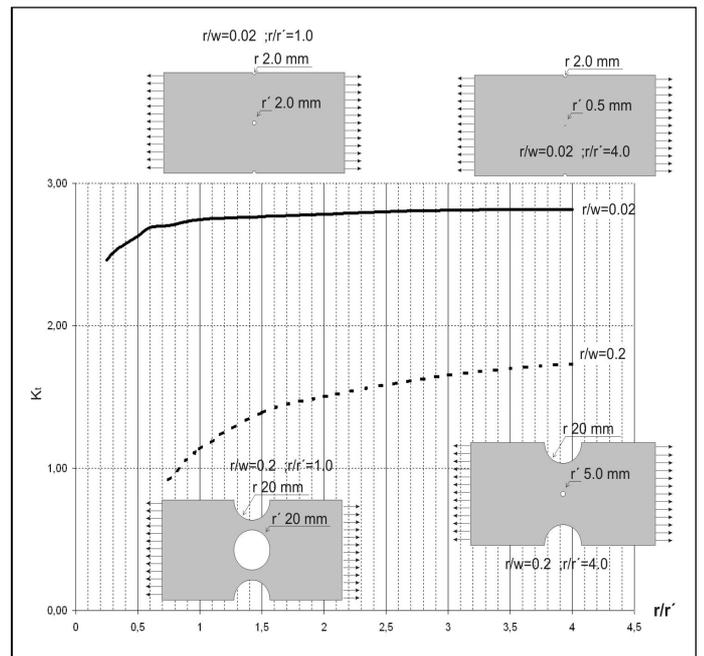


Fig. 7. Variación de K_t según la tensión $\sigma_{nominal}$ en el punto A'.

CONCLUSIONES

Se observa en los gráficos que muestran el valor del concentrador basados en la tensión remota, que para pequeños tamaños tanto de la entalla como del agujero central (valores bajos de r/w y altos de r/r') los valores de K_{trem} resultan, previsiblemente, muy parecidos a tres, valor del concentrador para un agujero circular, obtenido matemáticamente y ampliamente validado. No obstante, a

medida que se desplaza hacia la izquierda el punto en estudio (aumento del radio del agujero central r') se observa un crecimiento considerable del coeficiente K_{trem} . Sin dudas hay un efecto debido a la disminución de la sección neta, dado que en algunos casos se llega a tener la cuarta parte o aún menos de la sección total. Para separar este fenómeno del de la concentración de tensiones, que es el que interesa estudiar, se ha confeccionado la misma serie de gráficos, refiriendo el concentrador a la tensión nominal. Se considera que así se mejora la posibilidad de discriminar la incidencia de los concentradores.

En estos gráficos se puede notar que las curvas comienzan, en un recorrido de derecha a izquierda, con valores de $K_{t nom}$ próximos pero inferiores a tres, descendiendo el valor del concentrador en forma consistente para todas las curvas y para ambos puntos, A (entalla exterior) y A' (agujero central). Así, para una disminución muy intensa de la sección neta, caso de la curva $r/W = 0,2$ y $r/r' = 0,75$ ($r = 20$ y $r' = 26,67$), que implica una $\sigma_{nom} = 3000$ MPa, se observa que el coeficiente $K'_{t nom}$ resulta inferior a uno y el $K_{t nom}$ muy poco por encima de uno, ya que vale, según este estudio. Estos resultados se pueden explicar, imaginando la figura en escala, porque la sección remanente es muy pequeña frente a los radios, de forma tal que éstos dejan de comportarse como concentradores, guiando en cambio de alguna manera el flujo de tensiones y eliminando en forma prácticamente total el efecto de concentración de tensiones esperable. A medida que los radios disminuyen de valor frente a la sección neta (valores de r/W más bajos y r/r' más altos, porción derecha superior de los gráficos) este efecto desaparece y se obtienen valores de los coeficientes acorde con los resultados usuales. Nuevamente y aun para valores de r/W bajos (pequeño radio de la entalla o agujero exterior), al aumentar el radio del agujero central (disminución de r/r') se observa un descenso del coeficiente, para ambos puntos en estudio. Se observan incluso valores inferiores a la unidad en dos curvas ($r/W = 0,15$ y $0,20$) para grandes valores del radio del agujero central, es decir tensiones nominales realmente altas, siendo éste un efecto sin explicación dentro del contexto de este trabajo.

Como una conclusión de este trabajo se puede expresar, que para casos como los que se estudiaron, el efecto de concentradores múltiples no produce un incremento en el coeficiente de concentración sino más bien una disminución, notable para reducciones importantes de la sección neta. Este resultado es diferente de los que se encuentra en la bibliografía acerca del tema, por lo que es un objetivo de los autores continuar con el estudio de la interacción entre diferentes concentradores para otros casos.

REFERENCIAS

1. PETERSON, R. E. *Stress Concentration Design Factors*. EE.UU.: John Wiley & Sons Inc. 1974. 155 pp.
2. AVILÉS, R. *Análisis de fatiga en máquinas*. España: International Thomson Editores Spain Paraninfo, 2005. 445 pp. ISBN 84-9732-344-0.
3. CHAPETTI, M. D. *Mecánica de materiales. Teorías de elasticidad, plasticidad y mecánica de fractura*. Argentina: Ediciones Al Margen, 2005. 469 pp. ISBN 987-1125-46-1.

4. AMERICAN SOCIETY FOR METALS: *Atlas of Fatigue Curves*. EE.UU.: Editorial H. E. Boyer, 1986. 518 pp. ISBN 0-87170-214-2.
5. THORNTON, P. A. y COLANGELO, V. J. *Ciencia de materiales para ingeniería*. México: Prentice-Hall Hispanoamericana SA, 1987. 420 pp. ISBN 968-880-110-0.
6. PEÑARANDA CARRILLO, M.; PEDROZA ROJAS, J. B. y MENDEZ ORELLANA, J. L. "Determinación del factor teórico de concentración de esfuerzo de una placa infinita con doble agujero". En *Actas del 8º Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica*, 2007.
7. SHIGLEY, J. E. y MITCHELL, L. D. *Diseño en Ingeniería Mecánica*, 4º edición. México: Mc Graw-Hill, 1983. 915 pp. ISBN 968-451-607-X.
8. TJERNBERG, A. "Load Distribution and Pitch Errors in a Spline Coupling". *Materials & Design*, 2001, vol. 22. n°. 4, pp. 259-266.
9. WESCOTT, R. J.; WATTERS, K. C. and HELLER, M. *Implementation of a Unified Constitutive Model Into the ABAQUS Finite Element Package*. Australia: Editado por Department of Defense, Aeronautical and Maritime Research Laboratory, 1999. 74 pp.
10. GHANAMEH, M. F.; THEVENET, D. and ZEGHLOUL, A. "Advanced Problems in Mechanics, Effects of Joint Configuration and Loading Type on Stress Concentration in Offshore Welded Tubular Joints". *Advanced Problems in Mechanics*. 2005, pp. 1-8.
11. SEN, S. and AKSAKAL, B. "Stress Analysis of Interference Fitted Shaft-hub System Under Transient Heat transfer conditions". *Materials & Design*, 2004, vol. 25, n°. 5, pp. 407-417.
12. MEDEKSHAS, H. and BALINA, V. "Assessment of Low Cycle Fatigue Strength of Notched Components". *Materials & Design*, 2006, vol. 27, no. 2, pp 132-140.
13. LAINO, S. y DOMMARCO, R. C. "Análisis de falla en eje de salida de caja reductora". En *Actas del Congreso SAM/CONAMET*, 2007.

AUTORES

Ricardo Mario Amé

Ingeniero Mecánico, Doctor, Profesor Titular, Ordinario de Elementos de Máquinas y Coordinador del Ciclo de Especialización de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Lomas de Zamora, República Argentina

Gabriel María Dasso

Ingeniero Electromecánico, Profesor Titular de Mecánica y Mecanismos de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Lomas de Zamora y de Mecanismos de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires, República Argentina

Daniel Lezama

Ingeniero Industrial, Ayudante en la Cátedra de Elementos de Máquinas, Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Lomas de Zamora, República Argentina

Localized Tension Produced by Combined Geometric Discontinuities

Abstract

Many mechanical components especially those in machinery and of steel structures are designed with various forms which may include section changes, holes, threaded parts, keyways or multiple discontinued geometrical elevations that produce localized stresses. Often, the overlapping of two or more discontinuities in the same section or in very close sections is observed and this overlapping makes it very difficult to determine the value of the localized tension. In this present work, ABAQUS software is applied to determine the increased localized tension in sections having more than one geometric discontinuity and helpful elaborated graphs are developed for practical purposes in simple mechanical design. However, this analysis is limited to geometric discontinued structures with slots of macroscopic dimensions. First a test run is carried out using the software on already verified situations accepted in the given literature so as to validate the method, after which the software is applied to a Hub of combined generic geometric designs in flat, symmetrical and with axial loads pieces. It is shown that the software is relevant because it verifies those tested K_t values offered by the commonly recognized literature. Results of the combined discontinuities are then obtained and represented by means of a graph which in the future will be useful in mechanical design. It can be concluded that the available information in the literature about combined geometric concentrators is limited and in some cases incur doubts. Now, values for complex designs can be obtained as a result of the availability of these software tools. In addition, the making of graphics using the results obtained from the application of such software is more practical which in return has improved the efficiency of designs.

Key words: stress concentration, fatigue, machine parts, mechanical design, finite elements