

Construcción de curvas de factor de concentración de esfuerzos por medio de simulaciones.

Stress concentration factor curves elaboration by means of simulation.

*F. Hoyos Gómez¹, J. D. Betancur Gómez²,
D. Osorio Patiño³, J. G. Ardila Marín⁴.

Recibido: 23 de febrero de 2016

Aceptado: 1 de junio de 2016

Resumen

El objetivo del presente estudio es comprobar que las curvas de factor de concentración de esfuerzos experimentales, disponibles en la literatura, pueden ser realizadas por medio de simulaciones logrando un ajuste significativo. Por tal motivo, se seleccionaron dos geometrías para el estudio: eje con perforación pasante y eje con cambio brusco de área de sección transversal, para ambas geometrías se obtuvo el esfuerzo máximo y se calculó el esfuerzo nominal como la relación entre la fuerza aplicada y el área mínima perpendicular a la fuerza, para poder, a partir de ellos, evaluar el factor de concentración de esfuerzo, graficarlo y compararlo con el experimental. Finalmente, con los resultados obtenidos podemos concluir que es posible construir curvas de factor de concentración de esfuerzo por medio de simulaciones, con la misma confianza que se tienen de los métodos experimentales convencionales, pero a un menor costo.

Palabras clave: factor de concentración, Estático, Fuerza axial, Elasticidad, Análisis mecánico.

* Facultad de Ingenierías Instituto Tecnológico Metropolitano, Calle 75 No 75 - 101, Medellín, Colombia.

1 felipehoyos151539@correo.itm.edu.co

2 juanbetancur134613@correo.itm.edu.co

3 danielosorio144724@correo.itm.edu.co

4 juanardila@itm.edu.co

Abstract

The objective of the present study is to check that curves of factor concentration available in the literature, experimental efforts, can be performed by means of simulations making a significant adjustment. For this reason, we selected two geometries for the study: shaft with thru hole and shaft with sudden change in cross-sectional area. For both geometries it was obtained the maximum effort and calculated nominal effort as the relations between the applied force and the minimum area perpendicular to the force, in order to be able, from them, assess the concentration of effort factor, plot and compare it to the pilot. Finally, with the obtained results we can conclude that it is possible to build curves of factor concentration of effort by means of simulations, with the same confidence that have conventional experimental methods, but at a lower cost.

Keywords: Concentration factor, Statics, Axial force, Elasticity, Mechanical analysis.

1 Introducción

A lo largo del tiempo los factores de concentración de esfuerzo se han analizado por medio de métodos experimentales como, fotoelasticidad, rejillas, revestimiento quebradizo y calibradores de tensión eléctrica [1-4]. Analizar los fenómenos de concentración de esfuerzos experimentalmente puede ser demorado y costoso [5], para ello se podrían implementar metodologías de simulación que proporcionen el mismo resultado con el valor agregado de ahorro de tiempo y dinero. Algunos autores han evidenciado problemas similares y como respuesta han desarrollado diferentes alternativas como las pruebas realizadas a diferentes geometrías por medio del software AlfaK®[6]. Dichas geometrías se muestran en la Tabla 1. Los resultados obtenidos son comparados en la Tabla 2 con los datos obtenidos en la literatura.

TABLA 1. PARÁMETROS DE ENTRADA PARA ALFAK®. TOMADO DE [6].

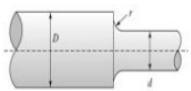
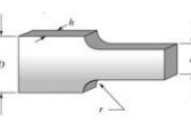
Número de la pieza	Tipo de geometría	Datos geométricos [mm]	Fuerza Axial F [N]	Momento Flexionante M [Nm]	Momento Torsionante T [Nm]
1		D = 30	2.000	200	200
		d = 20			
		r = 3			
2		D = 30	2.000	200	...
		d = 20			
		r = 3			
		h = 5			

TABLA 1. CONTINUACIÓN. PARÁMETROS DE ENTRADA PARA ALFAK®. TOMADO DE [6].

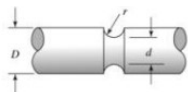
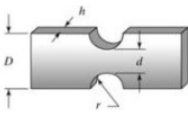
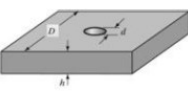
Número de la pieza	Tipo de geometría	Datos geométricos [mm]	Fuerza Axial F [N]	Momento Flexionante M [Nm]	Momento Torsionante T [Nm]
3		D = 30	2.000	200	200
		d = 20			
		r = 3			
4		D = 30	2.000	200	...
		d = 20			
		r = 3			
		h = 5			
5		D = 30	2.000	200	...
		d = 5			
		h = 5			
6		D = 30	...	200	200
		d = 5			
		...			

TABLA 2. RESULTADOS OBTENIDOS POR EL SOFTWARE ALFAK®. TOMADO DE [6].

Número de pieza	Carga	Factor de concentración de esfuerzo		Esfuerzo Nominal [MPa]		Esfuerzo Máximo [MPa]	
		AlfaK	Experimental	AlfaK	Experimental	AlfaK	Experimental
1	F	1,678	1,675	6,366	6,366	10,681	10,663
	M	1,507	1,510	254,640	254,647	383,778	383,563
	T	1,299	1,300	127,324	127,323	165,345	165,549
2	F	1,864	1,887	20,000	20,000	37,276	37,734
	M	1,580	1,620	600,000	600,000	948,264	973,327
3	F	1,983	2,012	6,366	6,366	12,626	12,809
	M	1,714	1,740	254,648	254,647	436,562	441,936
	T	1,387	1,400	127,324	127,323	176,542	177,645
4	F	2,252	2,268	20,000	20,000	45,034	45,351
	M	1,821	1,850	600,000	600,000	1092,52	1111,51
5	F	2,579	2,559	16,000	16,000	41,270	40,940
	M	1,828	1,960	1920,00	1920,00	3509,78	3771,86
6	F	2,091	2,110	105,223	105,223	219,979	221,495
	M	2,760	2,770	43,942	73,942	121,577	121,719

De los resultados mostrados en la Tabla 2, se puede decir que el software AlfaK® arroja resultados muy acertados con una precisión adecuada. En este proyecto se emplearon los programas ANSYS® y Microsoft Office Excel® para analizar los concentradores de esfuerzos de dos geometrías diferentes sometidas a una misma carga axial. A continuación, en este artículo se mostrará el paso a paso de cómo se logró demostrar que por medio de métodos computacionales se pueden realizar curvas de factores de concentración de esfuerzo con una precisión adecuada y a bajo costo.

2 Metodología

2.1 Geometrías, mallado, cargas y simulación.

Para este estudio se eligen dos geometrías, un eje de 1,5 in (38,1 mm) de radio con una perforación de radio variable (Fig. 1) y un eje con un cambio abrupto en la sección transversal (Fig. 2) con una relación entre diámetro mayor a diámetro menor o igual a 2,0, estas dos geometrías elegidas se dibujan en el módulo DesignModeler® [7], en las Figuras puede apreciarse la definición de algunos parámetros.

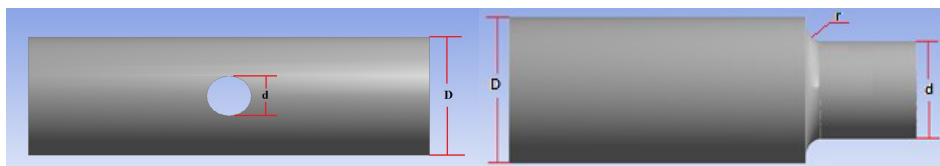


FIGURA 1. EJE CON PERFORACIÓN.

FIGURA 2. EJE CON CAMBIO ABRUPTO
EN LA SECCIÓN TRANSVERSAL

Luego de dibujar se procede a realizar el proceso de mallado de la pieza con elementos tetraédricos, haciendo énfasis en las áreas de la geometría en donde habrá mayor concentración de esfuerzo (Fig. 3), dicho énfasis se debe a que este tipo de problemas se caracteriza por un fuerte gradiente del campo de esfuerzos, muy a menudo dando lugar a singularidades que suelen representar una dificultad desde el punto de vista numérico requiriendo de un tamaño de elemento menor para su correcta caracterización, durante el presente estudio no se realizó la verificación de la independencia de malla; después de que el mallado esté listo, se procede a ubicar cargas de

10 klb (44,48 kN), en este caso axiales (Fig. 4). Estas se colocan una en sentido opuesto a la otra en las caras extremas de la geometría. Este proceso de mallado y configuración se realizó en el módulo Mechanical®.

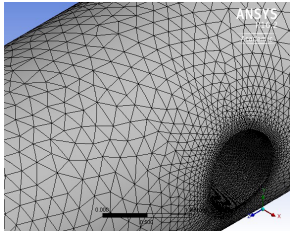


FIGURA 3. MALLADO DE LA PIEZA

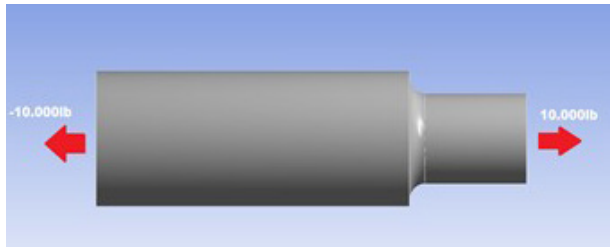


FIGURA 4. UBICACIÓN DE LA CARGA DE 10KLB

Después de haber mallado y ubicado las fuerzas correctamente se procede a seleccionar los resultados que se desean obtener de la simulación en la opción Solution®, en el caso de la fuerza axial se selecciona la opción esfuerzo de Von-Mises para así obtener el valor y la ubicación del esfuerzo máximo que luego será comparado gráficamente en Microsoft Office Excel® con los valores experimentales reportados en la literatura que fueron obtenidos de [8], dichos esfuerzos normales de tracción se han escogido así para evitar fenómenos de segundo orden.

2.2 Modelo de comparación

Después de registrar el esfuerzo máximo (σ_{max}), la fuerza (F) y los diámetros utilizados (D , d) en el archivo de Microsoft Office Excel®, se halla el esfuerzo nominal (σ_{nom}): Ecuación (1) como la relación entre la fuerza y el área transversal menor (A_{men}): Ecuación (2), para la carga aplicada y suponiendo una situación estático, material elástico que cumple la ley de Hooke y sufre pequeñas deformaciones; y después se divide el esfuerzo máximo hallado por simulación con el nominal hallado por fórmula para así hallar el factor de concentración de esfuerzos (k) computacional: Ecuación (3). Dicho factor es comparado gráficamente con factores experimentales reportados en literatura científica, dichas gráficas son reportadas y discutidas más adelante, en la sección resultados, evaluando el comportamiento del error relativo al dato experimental que se considera válido, este error se calcula como: Ecuación (4). Para este análisis se utilizan las siguientes fórmulas:

$$\sigma_{nom} = \frac{F}{A_{men}} \quad (1)$$

$$A_{men} = \frac{\pi d^2}{4} \quad (2)$$

$$K = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{nom}} \quad (3)$$

$$\%_{error} = \frac{K_{exp} - K}{K_{exp}} * 100 \quad (4)$$

3 Resultados

Los resultados gráficos arrojados por el programa ANSYS® se presentan en las Figura 5 y Figura 6, se toman los datos de esfuerzo máximo de Von Mises (σ_{max}) que son necesarios para poder hallar computacional, el cual será comparado con el experimental (K_{exp}) que se obtuvo de la literatura. En las Fig. 5 y Fig. 6 se puede observar en gama de colores la distribución del esfuerzo aplicado sobre toda la geometría, estos van desde el azul representando el esfuerzo mínimo, hasta el rojo que representa el esfuerzo crítico en un punto de terminado de la geometría. En la Figura 5 se puede ver que el punto de esfuerzo crítico (σ_{max}) es donde está concentrado el esfuerzo normal en la sección del agujero correspondiente al diámetro, donde el área de la sección transversal se vuelve mínima, tal como lo predijo la teoría.

En el eje con cambio de área de sección transversal reportado en la Fig. 6. Es posible observar que concentración de esfuerzos está al final del cuello donde el área del cilindro disminuye. Esto significa que es allí donde está el punto crítico, es decir, donde se concentra el esfuerzo causando riesgo de falla. Teniendo en cuenta estos dos resultados se puede decir, que el máximo esfuerzo (σ_{max}) se concentra en aquellos puntos en donde hay una reducción brusca en el área de la geometría y ella se vuelve mínima.

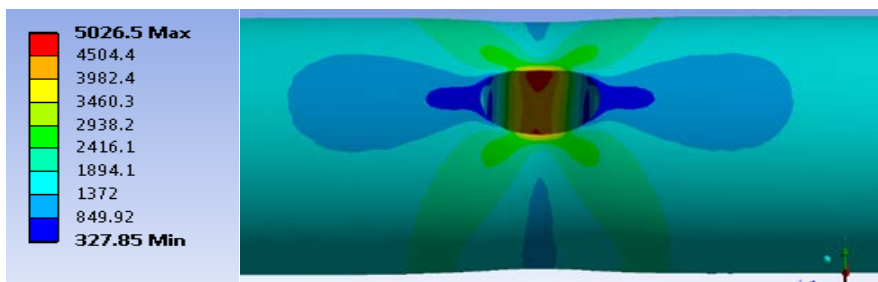


FIGURA 5. RESULTADO DE SIMULACIÓN DE EJE CON PERFORACIÓN:
ESFUERZO DE VON MISES [kPa].



FIGURA 6. RESULTADO DE SIMULACIÓN DE EJE CON CAMBIO ABRUPTO
EN LA SECCIÓN TRANSVERSAL: ESFUERZO DE VON MISES [kPa].

Soportados por el programa Microsoft Office Excel® se construye una tabla donde se ingresan todos los datos a comparar para después obtener los porcentajes de error ($\%_{\text{error}}$ – Ecuación (4)). Finalmente se grafican los dos valores de K con lo que se obtienen las curvas reportadas en las Figura 7 y Figura 8. En la Figura 7, para el eje con cambio de área en la sección transversal, se ven comparadas las curvas que se obtuvieron del software ANSYS® y de la literatura, de donde podemos ver que a medida que el radio del acuerdo o chaflán aumenta, el esfuerzo critico disminuye por tanto el factor de concentración de esfuerzo (K) va a disminuir también, además se ve una gran coincidencia de las dos curvas logrando un porcentaje de error que oscila entre -0,86% y 2,10%, haciendo efectivo el objetivo de esta investigación.

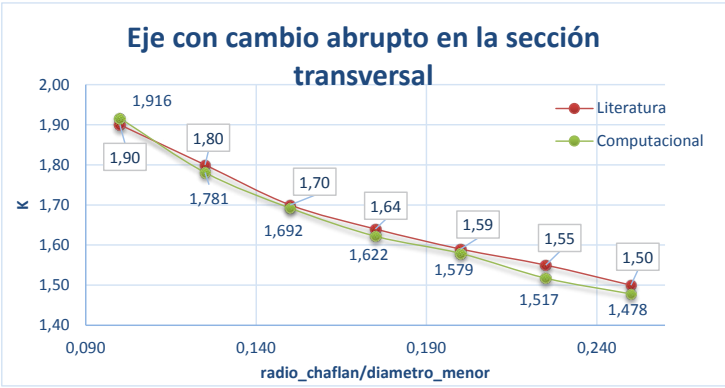


FIGURA 7. RESULTADOS DE LA COMPARACIÓN DE EJE CON ESCALÓN VS LITERATURA [8].

En la Figura 8, para el eje con perforación en la sección trasversal, se puede observar que a medida que el diámetro de la perforación aumenta la estructura de la pieza se muestra más débil. Debido a esto el esfuerzo critico aumenta, y por lo tanto el factor (K) también. La comparación entre las dos curvas arrojo un porcentaje de error mayor que en la anterior geometría, que varía entre 5,08% y 6,76%, lo que significa que el proceso de mallado en el software ANSYS® tendrá que refinarse más para alcanzar el mínimo de error posible, lo que nos lleva a la búsqueda de computadores más potentes que puedan soportar dicha refinación de mallado [5].

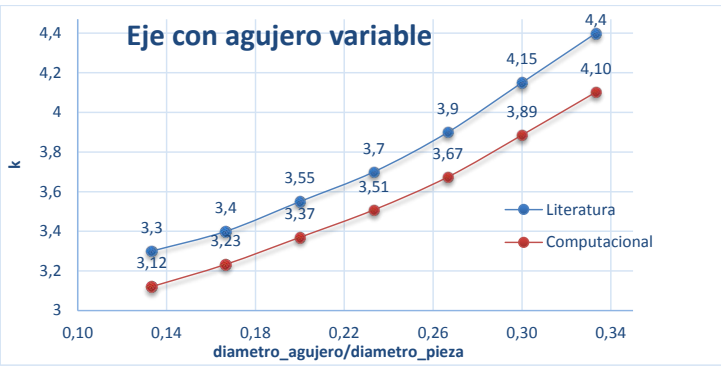


FIGURA 8. RESULTADOS DE LA COMPARACIÓN DE EJE CON PERFORACIÓN VS LITERATURA [5].

4 Conclusión

Es posible construir curvas de factor de concentración de esfuerzo por medio de simulaciones, con la misma confianza que se tienen de los métodos experimentales convencionales, pero a un menor costo. Con errores variables entre 0,86 y 6,76% que pueden disminuir con el ajuste de diversos parámetros de simulación como el tamaño de malla, el algoritmo de solución o el criterio de convergencia. Por tal motivo, a la hora de realizar el mallado en la geometría, es muy importante tener en cuenta en donde se va a hacer visible el factor de concentración de esfuerzo por que allí es donde la malla tiene que ser más densa [9-10]. Se seguirá refinando este método, de tal manera que se logre llevar estas curvas al mínimo porcentaje de error posible, reforzando la confiabilidad y la eficacia de los métodos computacionales. El hecho de que las predicciones numéricas arrojen resultados de factor de concentración de esfuerzos menores que los experimental podría representar un riesgo cuando se confían las decisiones de diseño a los resultados de simulación, por lo tanto, debe continuarse la investigación con el fin de determinar la causa de la diferencia entre resultados computacionales y empíricos para eliminarla y seguir teniendo en cuenta el/los, parámetros que la afectan.

5 Referencias

- [1] Heywood, R. B. Designing by photoelasticity. Chapman & Hall, 1952.
- [2] Moore, H. D. & Kibbey, D. R. Materiales y procesos de fabricación. Industria metal mecánica y de plásticos, 1996.
- [3] Haug, E. J., & Arora, J. S. Applied optimal design: mechanical and structural systems. John Wiley & Sons, 1979.
- [4] Jain, R. The art of computer systems performance analysis: techniques for experimental design, measurement, simulation, and modeling. John Wiley & Sons, 1990.
- [5] Nedele, M. R., & Wisnom, M. R. Three-dimensional finite element analysis of the stress concentration at a single fibre break. Composites science and technology, 51(4), 517-524, 1994
- [5] A. J. Muminovic, I. Saric & N. Repcic. "Numerical Analysis of Stress Concentration Factors" Procedia Engineering, vol. 100, pp. 707-713., 2015.
- [6] ANSYS, Inc., «ANSYS Meshing,» ANSYS, Inc. [En línea]. <http://www.ansys.com/Products/Workflow+Technology/ANSYS+Workbench+Platform/ANSYS+Meshing>, 2014.