

Estudio numérico de los campos de esfuerzos y el Factor de Intensidad de Esfuerzos en una placa con un agujero en forma de rombo

J. M. German-Carcaño, G. Urriolagoitia-Sosa, B. Romero-Ángeles, D. Maya-Anaya, A. Sánchez-Cervantes, R. I. Yparrea-Arreola y G. M. Urriolagoitia-Calderón

Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Sección de Estudios de Posgrado e Investigación, Unidad Zacatenco, Ciudad de México, México.

german_17jun@hotmail.com, guiurri@hotmail.com, romerobeatriz97@hotmail.com, danmaa02@gmail.com, artursc4@hotmail.com, ryparreaa2200@alumno.ipnmx, urrio332@hotmail.com.

Resumen

El estudio se centra en una placa con un agujero en forma de rombo, la cual está sometida a un esfuerzo de tensión y la presencia de grietas que surgen de los extremos de dicho rombo. Para las simulaciones numéricas, se recurre al software ANSYS®, el cual se basa en el Método de Elementos Finitos (MEF) como su algoritmo principal de resolución. La evaluación del Factor de Intensidad de Esfuerzos (FIE) se efectuó mediante el comando CINT, considerando cambios en el ángulo interno del rombo. De los resultados se observa que el FIE alcanza su valor máximo a los 10°, mientras que su valor mínimo a los 89°. Para las simulaciones de los campos de esfuerzos, se puede apreciar la importancia de supervisar el σ_y y el σ_{Max} . Por todo esto, el trabajo presentado podría ser útil para mejorar y/o acelerar las evaluaciones del FIE en piezas agrietadas y contribuir a la producción de componentes más seguros.

Palabras clave: FIE; MEF; ANSYS; Campos de esfuerzos.

Abstract

The study focuses on a plate with a rhombus-shaped hole, which is subjected to tensile stress and the presence of cracks emanating from the ends of the rhombus. For the numerical simulations, the ANSYS® software is utilized, which relies on the Finite Element Method (FEM) as its primary resolution algorithm. The evaluation of the Stress Intensity Factor (SIF) was conducted using the CINT command, considering changes in the internal angle of the rhombus. The results indicate that the SIF reaches its maximum value at 10°, while its minimum value is at 89°. For the simulations of the stress fields, it is crucial to monitor σ_y and σ_{Max} . Consequently, the presented work could be beneficial for improving and/or accelerating SIF evaluations in cracked components and contribute to the production of safer components.

Keywords: SIF; FEM; ANSYS; stress fields.

1. Introducción

Las grietas en los materiales siempre han sido un problema significativo. Recientemente se ha vuelto relevante gracias al avance tecnológico. También, las grietas pueden provocar pérdidas financieras y riesgos mortales en la industria. Es crucial caracterizar el comportamiento de las grietas, ya que su interacción provoca su crecimiento y debilita el material, resultando en posibles fallas graves [1]. En el pasado,

la Mecánica de Fractura Lineal Elástica (MFLE) se analizó de manera analítica, pero era difícil debido a lo complicado de los cálculos. Los métodos numéricos se convirtieron en una excelente herramienta de investigación. Sin embargo, su solución seguía siendo un gran y complicado problema. Se debe a la gran cantidad de cálculos requeridos. Hoy en día, el Método de Elementos Finitos (MEF) es una herramienta potente y comúnmente usada para analizar grietas y simplificar

el proceso. El MEF simplifica el problema con incógnitas al dividir el dominio en elementos y expresar las variables de campo desconocidas mediante funciones aproximadas en cada elemento. Estas funciones se definen en los nodos a partir de los valores de las variables de campo. Usualmente colocados en los límites de los elementos y conectando elementos vecinos [3]. En todos los campos, los procesos para analizar el MEF son iguales y se describen brevemente a continuación [4]:

Pre-procesamiento. – Determinar el tipo de análisis, los tipos de elementos, las propiedades mecánicas del material, generar la geometría, realizar el discretizado, aplicación de los agentes externos y las restricciones necesarias.

Solución. – Definir o modificar los agentes externos y las restricciones. Además de precisar las opciones de solución y resolver el problema.

Post-procesamiento. – Se trazan, se visualizan y se exportan los resultados.

2. Estimación numérica del FIE y los campos de esfuerzos

El análisis se focaliza en una placa con un orificio en el centro en forma de rombo, sujeta a un esfuerzo de tensión uniaxial uniforme (Modo I) y grietas a los extremos Figura 1.

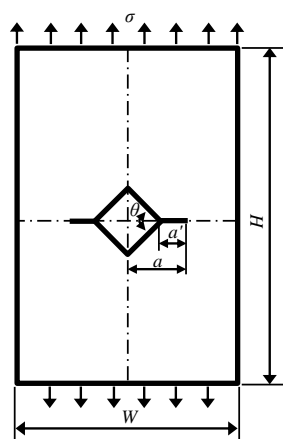


Figura 1. Probeta utilizada. Fuente: elaboración propia.

2.1. Parámetros por considerar en la evaluación

Para el desarrollo de las simulaciones numéricas del FIE y los Campos de esfuerzos, se usa el paquete computacional ANSYS®, el cual aprovecha el MEF como algoritmo de solución. Además de designar las consideraciones siguientes [5-7]:

Tipo de análisis. – Análisis estructural en 2D, basado en la teoría de la MFLE.

Tipo de elemento. – Elemento de alto orden PLANE 183 definido por 6 u 8 nodos, con 3 grados de libertad en cada nodo.

Teoría Mecánica. – Esfuerzo plano.

Propiedades mecánicas. – Se considera un material lineal, continuo, homogéneo e isotrópico con un Módulo de Young $E = 200\,000\text{ N/mm}^2$ y una relación de Poisson $\nu = 0.3$.

2.2. Dimensión y condiciones de frontera

Con el uso de las herramientas de simetría que emplea el programa ANSYS®, es posible generar el modelo considerando únicamente una cuarta parte de la placa original, con dimensiones y condiciones de frontera mostrados en la Figura 2:

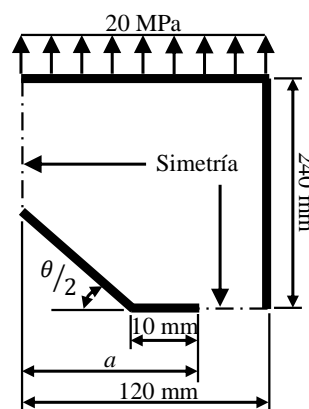


Figura 2. Dimensiones y condiciones de frontera de la probeta utilizada. Fuente: elaboración propia.

La estimación del FIE o también conocido como K_I se realiza por medio del comando CINT, considerando los ángulos internos del rombo $\theta/2 = 1^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 16^\circ, 22^\circ, 33^\circ, 45^\circ, 59^\circ, 73^\circ$ y 89° . Para realizar las simulaciones correspondientes, se siguen los pasos presentados en el trabajo presentado por German-Carcaño et al [8].

3. Resultados

3.1. Resultados numéricos de K_I para los distintos modelos

Los resultados del FIE obtenidos mediante las simulaciones realizadas para los distintos casos se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Recopilación de resultados numéricos conseguidos de K_I .

a(mm)	$\theta/2(^{\circ})$	K_I (MPa $\sqrt{\text{mm}}$)
67.2899	1	364.4216
67.1502	5	365.5060
66.7128	10	366.0540
65.7986	16	365.6919
64.4519	22	364.1351
60.8155	33	357.5398
55	45	342.0997
45.4507	59	305.6436
32.3183	73	240.2729
11.5535	89	134.8979

Fuente: elaboración propia.

Para tener una perspectiva más visual del comportamiento del valor de K_I con respecto a la inclinación del ángulo interno del rombo $\theta/2$ se presenta un gráfico (Figura 3) con los datos alcanzados en la Tabla 1.

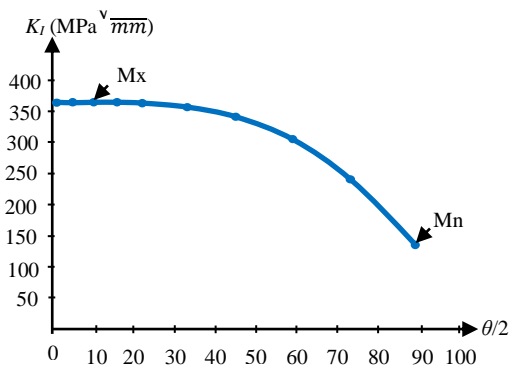


Figura 3. Comportamiento de los valores de K_I con respecto al ángulo $\theta/2$. Fuente: elaboración propia.

3.2. Campos de esfuerzos modelo $\theta/2=1^{\circ}$

Además, se muestran en las Figuras 4 a la 9 los campos de esfuerzo σ_x , σ_y , τ_{xy} , σ_{Max} , σ_{Min} y $\sigma_{Von Mises}$ respectivamente para el modelo $\theta/2=1^{\circ}$.

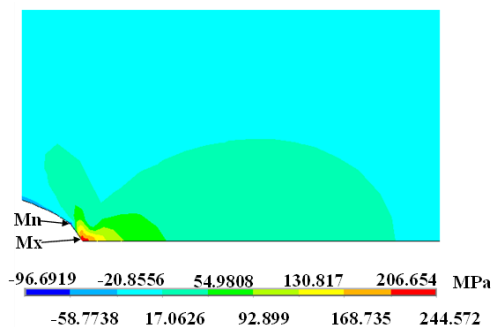


Figura 4. Campos de esfuerzo σ_x en la punta de la fisura modelo $\theta/2=1^{\circ}$. Fuente: elaboración propia.

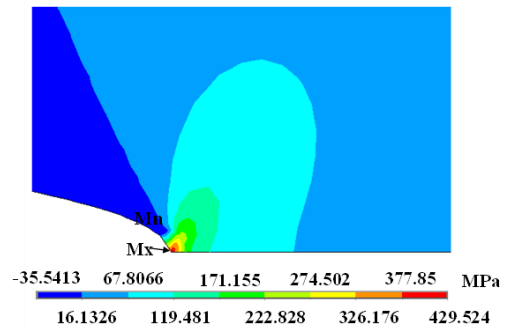


Figura 5. Campos de esfuerzo σ_y en la punta de la fisura modelo $\theta/2=1^{\circ}$. Fuente: elaboración propia.

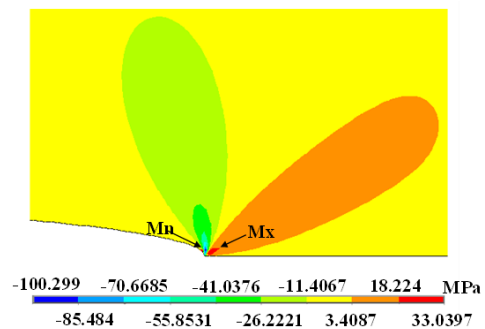


Figura 6. Campos de esfuerzo τ_{xy} en la punta de la fisura modelo $\theta/2=1^{\circ}$. Fuente: elaboración propia.

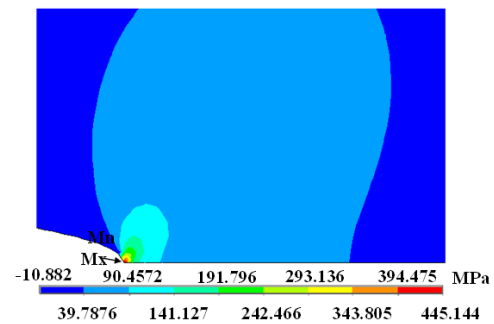


Figura 7. Campos de esfuerzo σ_{Max} en la punta de la fisura modelo $\theta/2=1^{\circ}$. Fuente: elaboración propia.

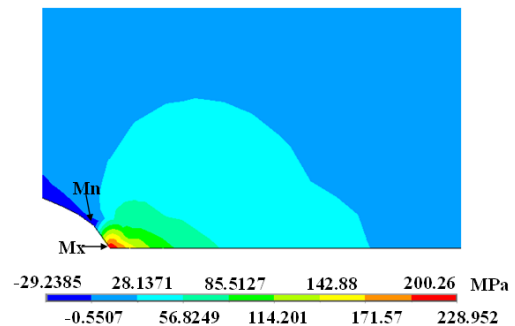


Figura 8. Campos de esfuerzo σ_{Min} en la punta de la fisura modelo $\theta/2=1^{\circ}$. Fuente: elaboración propia.

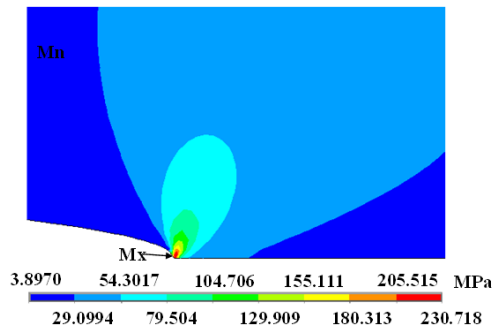


Figura 9. Campos de esfuerzo $\sigma_{Von Mises}$ en la punta de la fisura modelo $\theta/2 = 1^\circ$. Fuente: elaboración propia.

3.3. Campos de esfuerzos modelo $\theta/2 = 10^\circ$

En las Figuras 10 a la 15 se exponen los campos de esfuerzo σ_x , σ_y , τ_{xy} , σ_{Max} , σ_{Min} y $\sigma_{Von Mises}$ respectivamente para el modelo $\theta/2 = 10^\circ$.

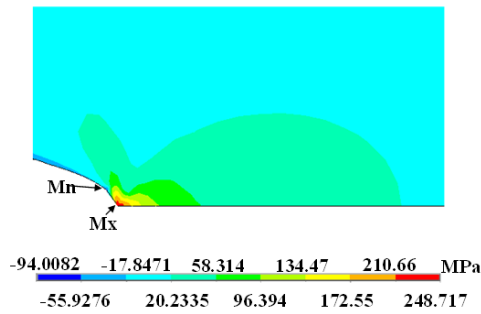


Figura 10. Campos de esfuerzo σ_x en la punta de la fisura modelo $\theta/2 = 10^\circ$. Fuente: elaboración propia.

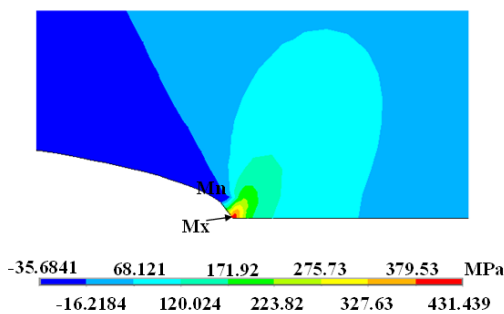


Figura 11. Campos de esfuerzo σ_y en la punta de la fisura modelo $\theta/2 = 10^\circ$. Fuente: elaboración propia.

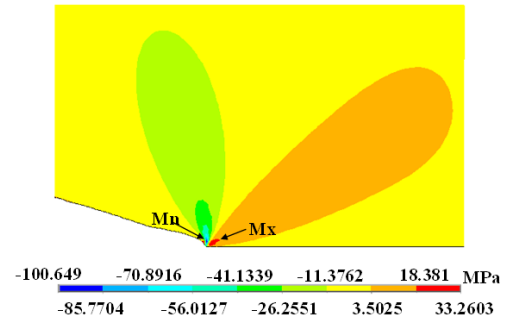


Figura 12. Campos de esfuerzo τ_{xy} en la punta de la fisura modelo $\theta/2 = 10^\circ$. Fuente: elaboración propia.

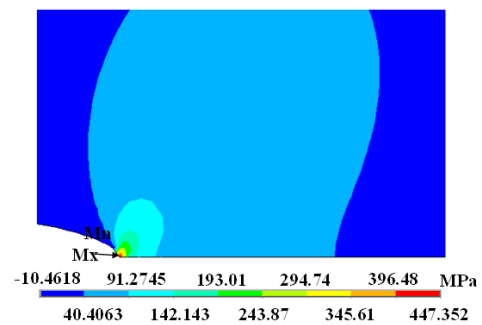


Figura 13. Campos de esfuerzo σ_{Max} en la punta de la fisura modelo $\theta/2 = 10^\circ$. Fuente: elaboración propia.

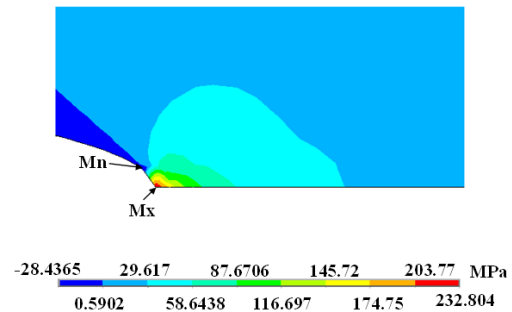


Figura 14. Campos de esfuerzo σ_{Min} en la punta de la fisura modelo $\theta/2 = 10^\circ$. Fuente: elaboración propia.

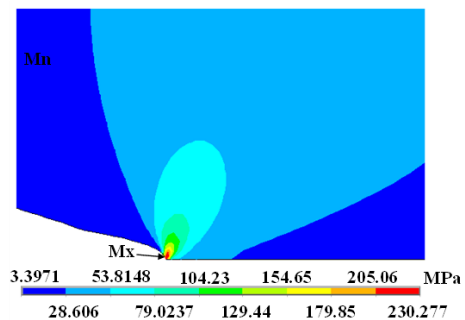


Figura 15. Campos de esfuerzo $\sigma_{Von Mises}$ en la punta de la fisura modelo $\theta/2 = 10^\circ$. Fuente: elaboración propia.

3.4. Campos de esfuerzos modelo $\theta/2 = 22^\circ$

En las Figuras 16 a la 21 se exponen los campos de esfuerzo σ_x , σ_y , τ_{xy} , σ_{Max} , σ_{Min} y $\sigma_{Von Mises}$ respectivamente para el modelo $\theta/2 = 22^\circ$.

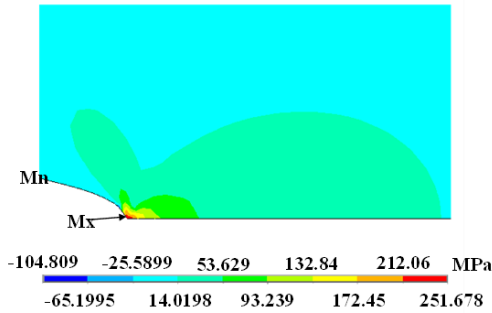


Figura 16. Campos de esfuerzo σ_x en la punta de la fisura modelo $\theta/2 = 22^\circ$. Fuente: elaboración propia.

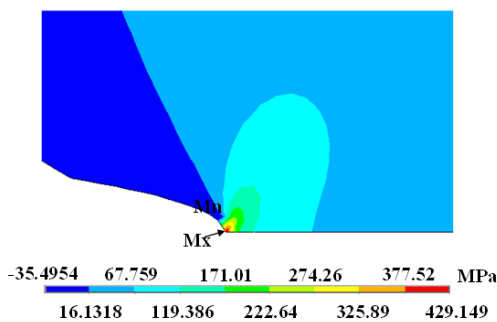


Figura 17. Campos de esfuerzo σ_y en la punta de la fisura modelo $\theta/2 = 22^\circ$. Fuente: elaboración propia.

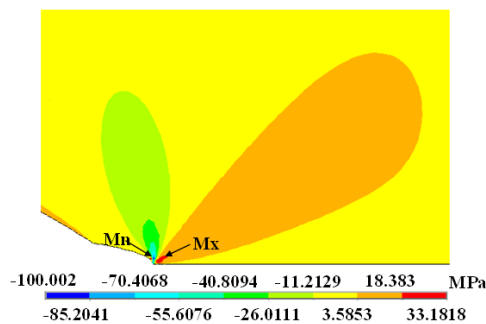


Figura 18. Campos de esfuerzo τ_{xy} en la punta de la fisura modelo $\theta/2 = 22^\circ$. Fuente: elaboración propia

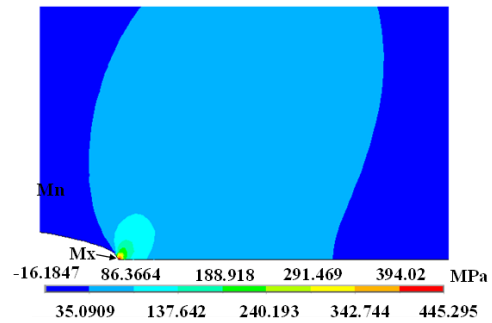


Figura 19. Campos de esfuerzo σ_{Max} en la punta de la fisura modelo $\theta/2 = 22^\circ$. Fuente: elaboración propia.

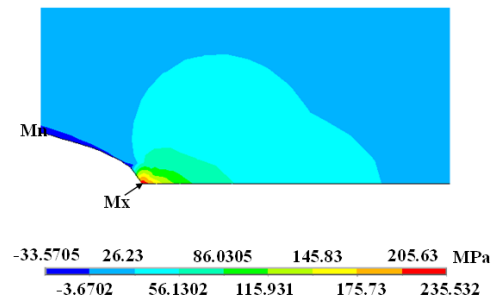


Figura 20. Campos de esfuerzo σ_{Min} en la punta de la fisura modelo $\theta/2 = 22^\circ$. Fuente: elaboración propia.

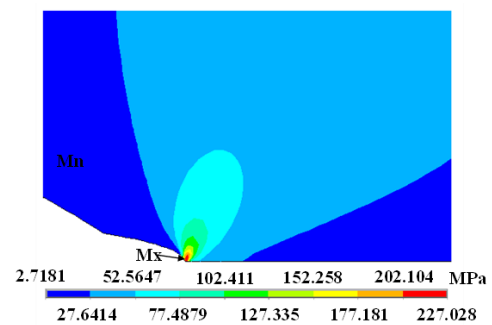


Figura 21. Campos de esfuerzo $\sigma_{Von Mises}$ en la punta de la fisura modelo $\theta/2 = 22^\circ$. Fuente: elaboración propia

3.5. Campos de esfuerzos modelo $\theta/2 = 45^\circ$

En las Figuras 22 a la 27 se exponen los campos de esfuerzo σ_x , σ_y , τ_{xy} , σ_{Max} , σ_{Min} y $\sigma_{Von Mises}$ respectivamente para el modelo $\theta/2 = 45^\circ$.

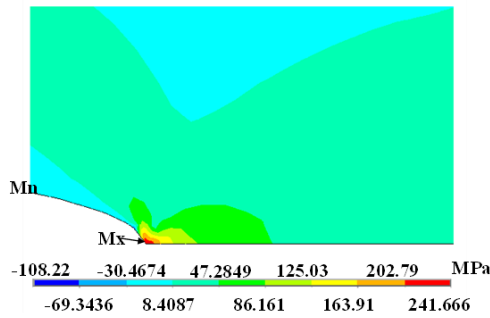


Figura 22. Campos de esfuerzo σ_x en la punta de la fisura modelo $\theta/2=45^\circ$. Fuente: elaboración propia.

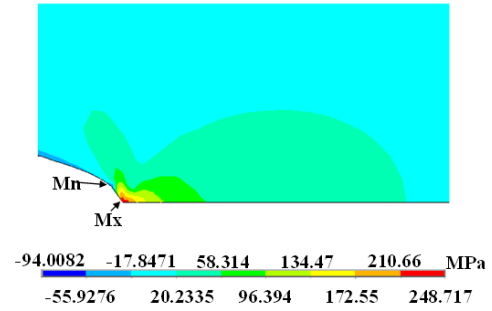


Figura 26. Campos de esfuerzo σ_{Min} en la punta de la fisura modelo $\theta/2=45^\circ$. Fuente: elaboración propia.

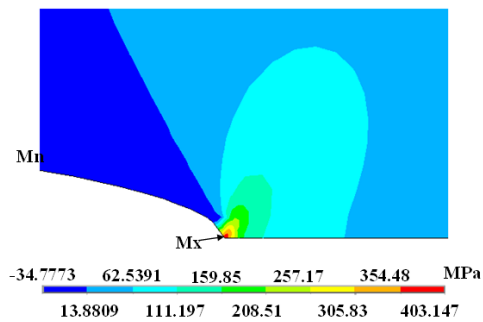


Figura 23. Campos de esfuerzo σ_y en la punta de la fisura modelo $\theta/2=45^\circ$. Fuente: elaboración propia.

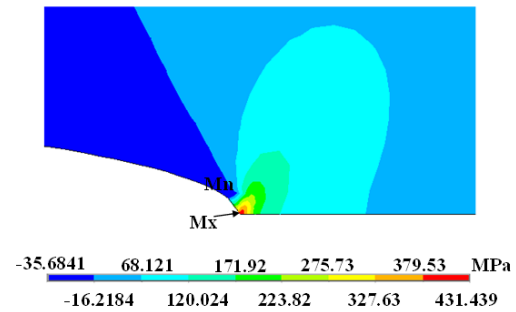


Figura 27. Campos de esfuerzo $\sigma_{Von Mises}$ en la punta de la fisura modelo $\theta/2=45^\circ$. Fuente: elaboración

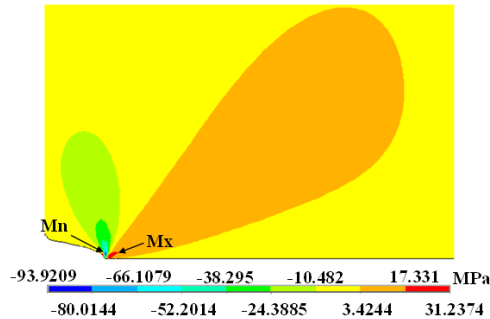


Figura 24. Campos de esfuerzo τ_{xy} en la punta de la fisura modelo $\theta/2=45^\circ$. Fuente: elaboración propia.

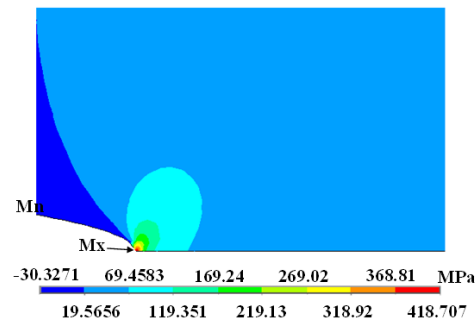


Figura 25. Campos de esfuerzo σ_{Max} en la punta de la fisura modelo $\theta/2=45^\circ$. Fuente: elaboración propia

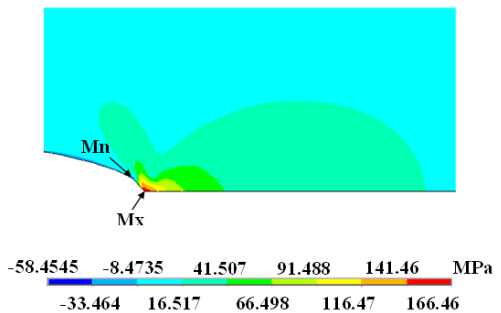


Figura 28. Campos de esfuerzo σ_x en la punta de la fisura modelo $\theta/2=73^\circ$. Fuente: elaboración propia.

3.6. Campos de esfuerzos modelo $\theta/2=73^\circ$

En las Figuras 28 a la 33 se exponen los campos de esfuerzo σ_x , σ_y , τ_{xy} , σ_{Max} , σ_{Min} y $\sigma_{Von Mises}$ respectivamente para el modelo $\theta/2=73^\circ$.

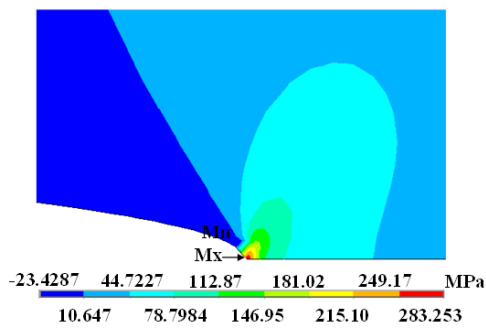


Figura 29. Campos de esfuerzo σ_y en la punta de la fisura modelo $\theta/2 = 73^\circ$. Fuente: elaboración propia.

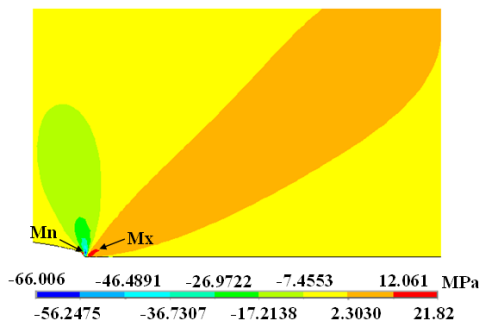


Figura 30. Campos de esfuerzo τ_{xy} en la punta de la fisura modelo $\theta/2 = 73^\circ$. Fuente: elaboración propia.

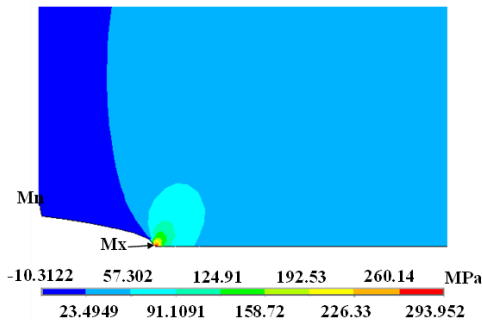


Figura 31. Campos de esfuerzo σ_{Max} en la punta de la fisura modelo $\theta/2 = 73^\circ$. Fuente: elaboración propia.

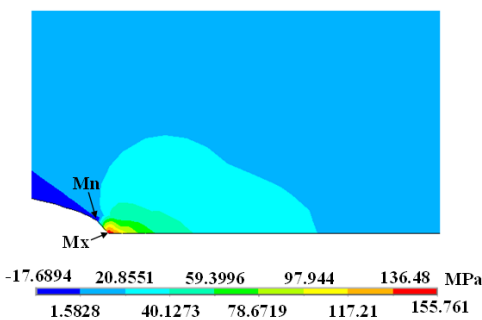


Figura 32. Campos de esfuerzo σ_{Min} en la punta de la fisura modelo $\theta/2 = 73^\circ$. Fuente: elaboración propia.

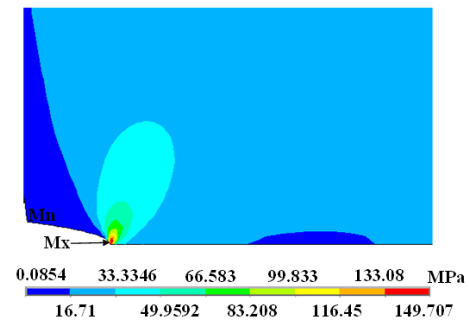


Figura 33. Campos de esfuerzo $\sigma_{Von Mises}$ en la punta de la fisura modelo $\theta/2 = 73^\circ$. Fuente: elaboración propia.

3.7. Resultados numéricos de los valores máximos para los distintos esfuerzos

Con el fin de compactar la información obtenida en las diferentes simulaciones, los valores máximos para los esfuerzos σ_x , σ_y , τ_{xy} , σ_{Max} , σ_{Min} y $\sigma_{Von Mises}$ se presentan en la Tabla 2. Para tener una perspectiva más visual del comportamiento de estos esfuerzos con respecto a la inclinación del ángulo interno del rombo se realiza y exhibe un gráfico (Figura 34) con dichos datos.

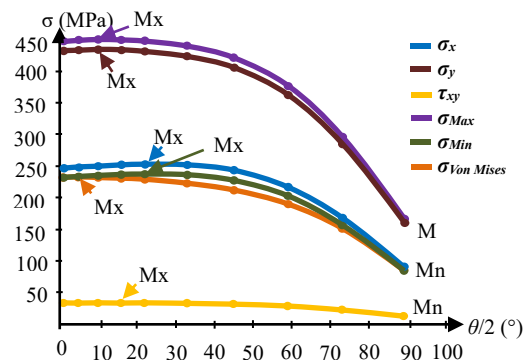


Figura 34. Comportamiento de los valores máximos de los esfuerzos σ_x , σ_y , τ_{xy} , σ_{Max} , σ_{Min} y $\sigma_{Von Mises}$ con respecto al ángulo $\theta/2$. Fuente: elaboración propia.

Tabla 2. Recopilación de resultados numéricos obtenidos para los esfuerzos σ_x , σ_y , τ_{xy} , σ_{Max} , σ_{Min} y $\sigma_{Von Mises}$.

$\theta/2$ ($^\circ$)	MPa					
	σ_x	σ_y	τ_{xy}	σ_{Max}	σ_{Min}	$\sigma_{Von Mises}$
1	244.572	429.524	33.039	445.144	228.952	230.718
5	246.525	430.83	33.003	446.576	230.779	230.822
10	248.717	431.439	33.260	447.352	232.804	230.277
16	250.622	431.001	33.268	447.057	234.567	229.016
22	251.678	429.149	33.181	445.295	235.532	227.028
33	250.457	421.345	32.642	437.453	234.349	221.340
45	241.666	403.147	31.237	418.707	226.105	210.839
59	215.432	360.213	27.864	374.082	201.563	188.618

73	166.46	283.253	21.820	293.952	155.761	149.707
89	89.880	159.169	12.140	164.936	84.1138	85.907

Fuente: elaboración propia.

4. Conclusiones

Una vez concluidas las simulaciones, de los resultados se puede observar que el Factor de Intensidad de Esfuerzos alcanza su cifra más alta de 366.054 MPa√mm a un ángulo de 10°, mientras que su valor más bajo de 134.897 MPa√mm se registra a un ángulo de 89°. También es notorio que la disminución en el valor del Factor de Intensidad de Esfuerzos es más pronunciada a medida que el ángulo aumenta desde los 33°, esta situación se ajusta al pronóstico inicial, ya que cuanto más larga sea la grieta, el Factor de Intensidad de Esfuerzos será proporcionalmente mayor, sin embargo, no se asemeja al patrón de comportamiento observado en una placa agrietada en su punto central. En otro orden de ideas, de las simulaciones de los campos de esfuerzos se puede apreciar que el valor máximo de los esfuerzos σ_x es de 251.678 MPa y σ_{Min} es de 235.532 MPa cuando el ángulo es de 22°, mientras que el valor mínimo de σ_x es de 89.8805 MPa y σ_{Min} es de 84.1138 MPa cuando el ángulo es de 89°. En tanto que, el valor máximo de los esfuerzos σ_y fue de 431.439 MPa y σ_{Max} fue de 447.352 MPa, alcanzándose en el ángulo de 10°, mientras que el valor mínimo de σ_y se registró en 159.169 MPa y para σ_{Max} en 164.936 MPa, en el ángulo de 89°. También es visible que, el valor más alto en el esfuerzo τ_{xy} , que asciende a 33.2684 MPa, se presenta cuando el ángulo es de 16°, mientras que el valor más bajo de τ_{xy} se registra en 12.1404 MPa cuando el ángulo es de 89°. Finalmente, se distingue que el valor máximo de esfuerzo $\sigma_{Von Mises}$ es de 230.822 MPa y se encuentra ubicado precisamente en el ángulo de 5 grados, mientras que el valor mínimo de $\sigma_{Von Mises}$ es de 85.907 MPa, situado en el ángulo de 89°. Esto señala que es importante centrarse en supervisar principalmente el nivel de esfuerzo normal a lo largo del eje Y y el esfuerzo principal máximo, dado que estos dos valores alcanzan su punto máximo en el caso específico de un ángulo de 10 grados. Como resolución final, el análisis numérico mencionado en este informe podría ser útil para mejorar y acelerar las evaluaciones del Factor de Intensidad de Esfuerzos en situaciones donde las piezas están agrietadas, lo que a su vez puede contribuir a la creación de componentes con mayor nivel de seguridad.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen al Instituto Politécnico Nacional y al Consejo Nacional de Humanidades,

Ciencia y Tecnología (CONAHCyT) el apoyo prestado para la elaboración de este trabajo.

6. Referencias

- [1] J. Lancaster. The technical background, Engineering Catastrophes, Elsevier, 2005, pp. 139-198. Disponible: Doi: 10.1533/9781845690816.139.
- [2] S. S. Rao. Overview of Finite Element Method, The Finite Element Method in Engineering, Butterworth-Heinemann, 2011, pp. 3-50. Disponible: <https://doi.org/10.1016/B978-1-85617-661-3.00001-5>
- [3] K. J. Bathe. Finite Element Procedure, Prentice Hall, 2006. [en línea]. Disponible en: <https://books.google.com.mx/books?id=rWvefGICfO8C>.
- [4] R. D. Cook. Finite Element Modeling for Stress Analysis, Wiley, 1995. [en línea]. Disponible en: <https://books.google.com.mx/books?id=rZasQAAACAAJ>.
- [5] F. C. Campbell. Fatigue and Fracture, Understanding the Basics, ASM International, 2012. Disponible en: <https://doi.org/10.31399/asm.tb.ffub.9781627083034>
- [6] F. Farahmand. Linear Elastic Fracture Mechanics (LEFM) and Applications, Springer US, 2001, pp. 52-117. Disponible: Doi: 10.1007/978-1-4615-1585-2_2
- [7] ANSYS Mechanical APDL Verification Manual. Release 15.0. ANSYS, Inc. November 2013. [en línea]. Disponible en: <https://www.researchgate.net/profile/Girish-Prajapati-2/post/How-composites-can-be-modeled-in-ANSYS-Using-Solid185/attachment/59d6250379197b8077983549/AS%3A315291291062272%401452182710434/download/ANSYS+Mechanical+APDL+Verification+Manual.pdf>
- [8] J. M. German-Carcano et al. “Estudio analítico y numérico de probetas agrietadas sometidas a tensión”. *Rev. Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*, n.º 91, pp. 1-19, 2024. Disponible en: <https://revistas.uaa.mx/index.php/investycien/article/view/4481>