

## **Análisis de falla de un árbol de un rodillo de horno de Clinker.**

Adrián Flamant<sup>a</sup>, Valeria Simó<sup>a</sup>, Sergio Giudici<sup>a</sup>, Matías Caparros<sup>a</sup>, Gerónimo Lucero<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Grupo IEMI, Unidad Investigación DIDEME, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional  
Mendoza

adrian.flamant@docentes.frm.utn.edu.ar

### **Resumen**

En este trabajo se estudió una falla en árbol de un rodillo de horno de Clinker por medio de criterios de elementos finitos. El árbol presentó una falla en la zona donde se encuentra un acuerdo por cambio de sección. Dicha rotura presenta signos de fatiga por flexión alternada y rotura de un acero frágil. Se ha determinado que el proceso de falla se inició en una discontinuidad en forma de ranura en V o rayón. Debido al concentrador de tensiones propio del acuerdo y se le sumaron los efectos del rayón, se generaron condiciones de entalla desfavorables, favoreciendo el crecimiento de una grieta. Para el estudio, se utilizó un software de cálculo: ANSYS..

**Palabras Clave:** Árbol-Concentrador de Tensiones- Elementos Finitos.

### **1 Introducción**

En la práctica de la ingeniería cuando se diseñan elementos de máquinas, la determinación de la forma de los componentes impone cambios de sección, lo que crea condiciones de solicitaciones variadas. En el caso de los árboles, la combinación de los principales esfuerzos a que están sometidos, tales como flexión y torsión, generan en estas discontinuidades, propias del diseño, zonas donde los esfuerzos se incrementan de manera significativa en comparación a los de secciones contiguas. El caso de estudio fue un árbol de apoyo de un horno de clincker, cuya falla se puede observar en la Figura 1.

La Resistencia de Materiales utiliza estrategias diversas para evaluar los coeficientes de magnificación de las tensiones en discontinuidades diversas, posibilitando el análisis de las condiciones de sollicitación al momento de dimensionar los componentes, esto además es un tema de estudio importante de la asignatura Elementos de Máquinas.

El método matemático para determinar las tensiones localizadas se sustenta en la teoría matemática de la elasticidad y en general requiere de ecuaciones diferenciales de difícil solución. Cabe destacar que los modelos matemáticos suponen hipótesis simplificadoras tales como que la pieza es de un material homogéneo, isótropo y totalmente elástico, por lo que el valor de la tensión obtenida depende sólo de la forma geométrica.

Son muy usadas otras estrategias para resolver los casos donde se presentan discontinuidades, tales como los métodos experimentales para determinar el efecto de la concentración de tensiones, estos permiten validar los modelos matemáticos y definir las restricciones propias del uso de dichos modelos.

El objetivo principal de este trabajo fue modelar mediante los códigos bajo licencia del grupo DIDEME en el Software ANSYS 22 estudiando y aplicando diversos criterios de preparación de los sólidos geométricos, los criterios de discretización eficiente y los de procesos de simulación con sus modos de validación mediante los controles de sensibilidad de malla y criterios de distribución de elementos.

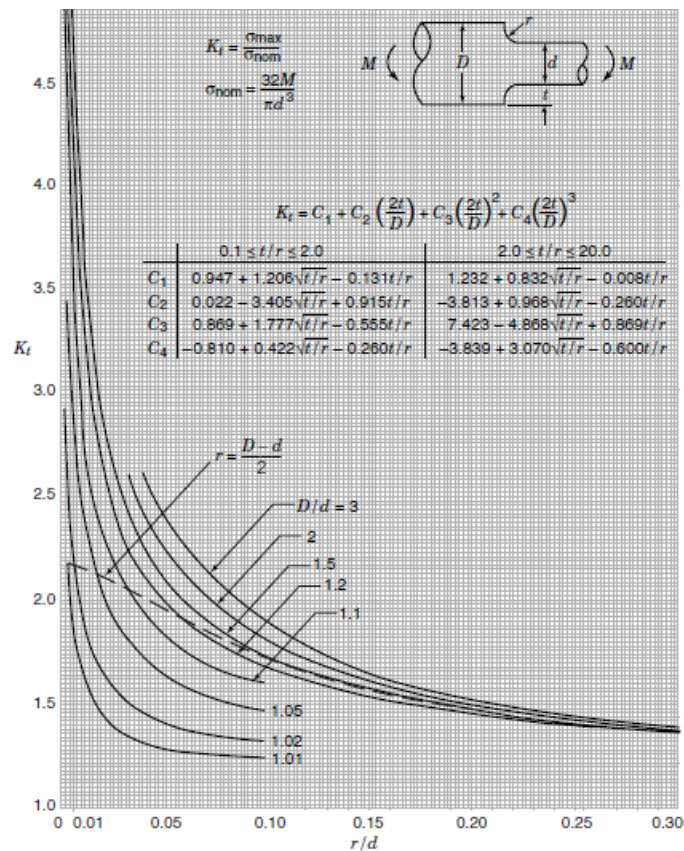


**Fig. 1.** Se ve la rotura provocada en el árbol.

El objetivo principal de este trabajo fue desarrollar un modelo numérico que describe cómo cambiaron las condiciones de sollicitación en el concentrador del acuerdo por la presencia del rayón. Cómo objetivos secundarios se plantearon explicitar cómo influye la presencia del rayón en las condiciones de servicio del componente y desarrollar el caso para su uso en las asignaturas Elementos de Máquinas y en Máquinas y Equipos industriales de la carrera de Ingeniería Electromecánica en la UTN FRM. Estas tienen incorporado el uso del cálculo y la simulación mediante los elementos finitos en el desarrollo curricular.

## 2 Materiales y métodos

Se han revisado y estudiado las experiencias específicas existentes sobre los coeficientes de concentración de tensiones para árboles sometidos a flexo torsión que presentan discontinuidades en diferentes bibliografías [2], [3], [4], [5]. Se adoptó una en particular, en la que estos coeficientes se encuentran agrupados en el compendio de estudios de concentración de tensiones Stress Concentration Factors [1], donde se ve la relación del aumento de los esfuerzos debido a la presencia del escalón en la Figura 2.



**Fig. 2.** Gráfico donde figura la concentración de tensiones en el acuerdo [1].

También se puede observar en la Fig. 3 que se recomienda para aliviar el aumento de las tensiones en los acuerdos, es hacer ranura semicircular en el árbol. Estas recomendaciones salen de prácticas realizadas con análisis por fotoelasticidad.

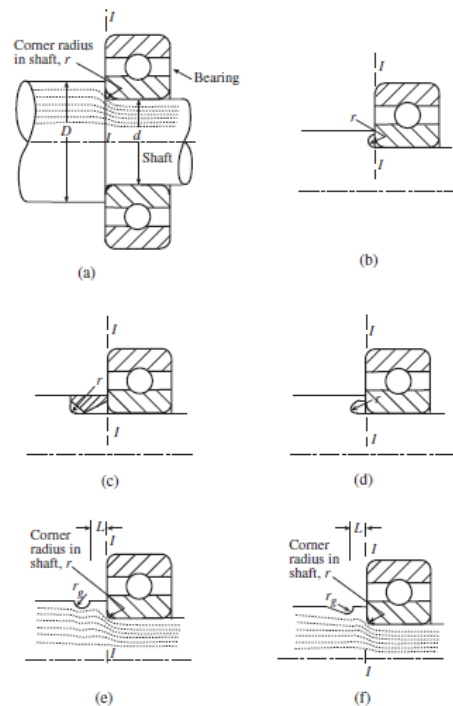


Figure 3.12 Techniques for reducing stress concentration in stepped shaft with bearing: (a) with corner radius only; (b) undercut; (c) inserted ring; (d) undercut to simulate a ring; (e) relief groove; (f) relief groove.

Fig. 3. Gráfico donde figura aliviadores para la concentración de tensiones en el acuerdo [1].

## 2.1 Modelado, cálculo y análisis por elementos finitos

Para la construcción del modelo se realizó respetando las dimensiones de los planos constructivos. Para el diseño y cálculo se utilizó el Software ANSYS 22. Se determinó una configuración que fuese la más adecuada en dimensiones, que limitara la cantidad de elementos a un valor suficientemente elevado de modo tal que los resultados obtenidos sean confiables y que no sobre exigiera al equipamiento de procesamiento. Se realizaron dos análisis, un modelo generando una pequeña ranura simulando un rayón en el montaje o funcionamiento del eje y otro modelo sin rayón. En la Figura 4 se ve el modelo del eje con el rodillo montado.

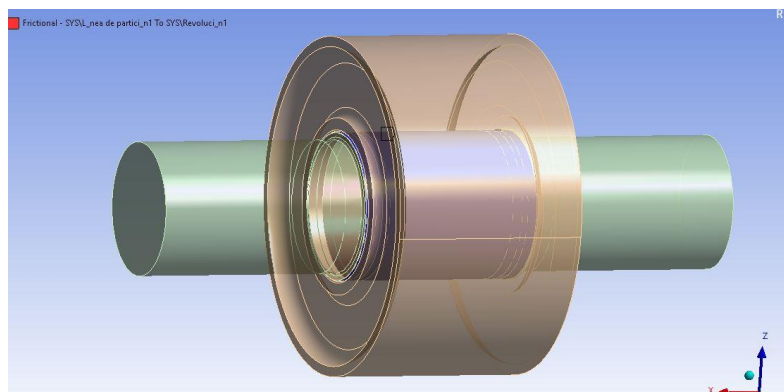
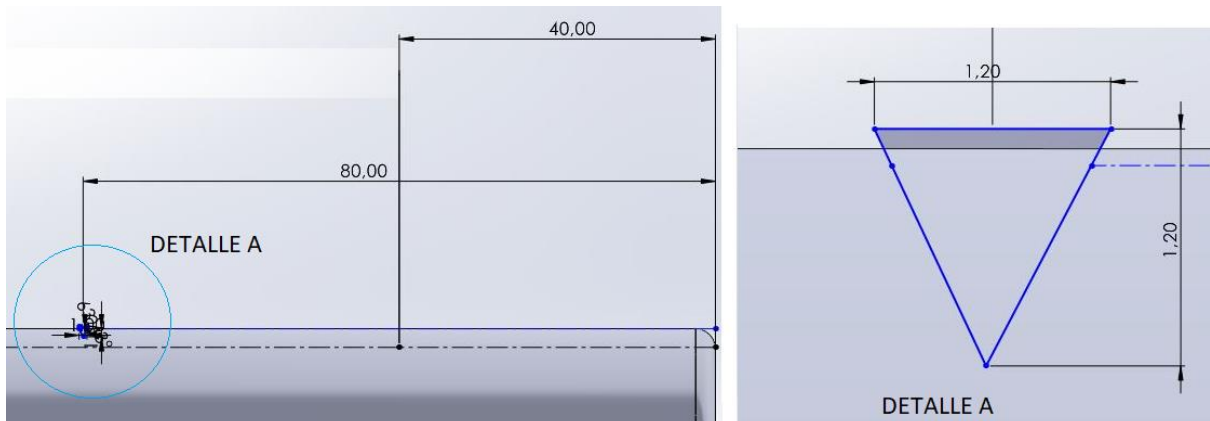


Fig. 4. Modelo, donde además se ve en color la zona de contacto friccional entre árbol y rodillo. Ajuste H7- s9.

En la Figura 5 se presenta la geometría del rayón generado en el árbol.

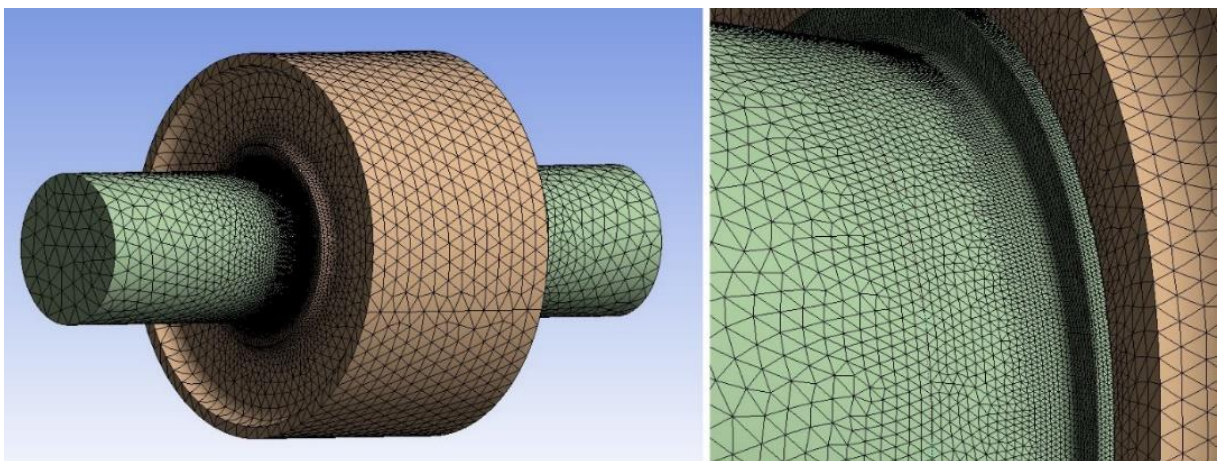


**Fig. 5.** Ubicación desde el borde del escalón y detalle de ranura simulando un rayón.

El motivo de generar un modelo con rayón, es debido a que haciendo las simulaciones del árbol con el escalón y rodillo montado según lo establecido para ese montaje, las mayores tensiones se generan en el acuerdo del escalón. Pero esto no condice con la rotura sufrida en el árbol, que rompió a casi 80 mm del borde del escalón en la sección de mayor diámetro, como se puede observar en la Figura 5.

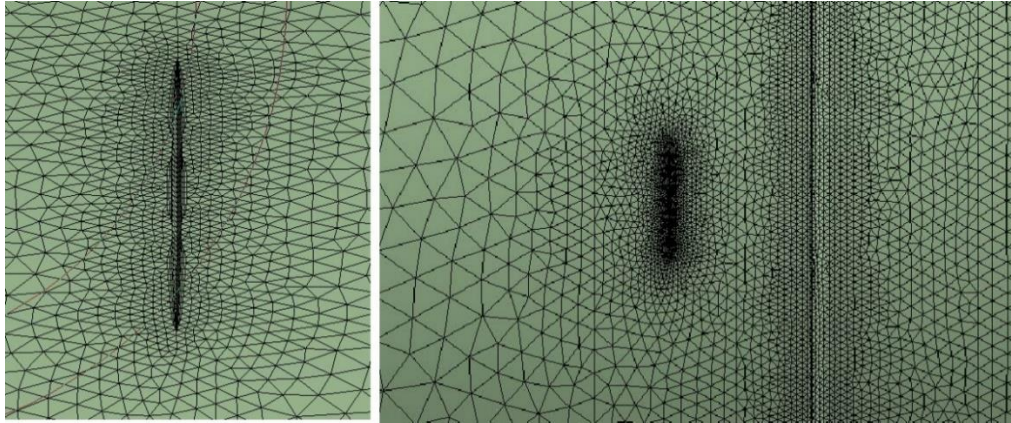
El material seleccionado para la simulación es un acero AISI 4340 Bonificado.

Diseñado el prototipo, se aplicaron las condiciones de restricción y de sollicitación de acuerdo al peso del horno y siendo una viga simplemente apoyada y sometida a flexión pura. Se utilizó un control de mallado en las zonas donde se producen mayores concentraciones de tensiones, que en este caso están presentes en los radios de acuerdo del escalón para el caso sin rayón, y para la pieza con rayón además se le aplicó un control de mallado en esa zona. Se presentan en las Figuras 6 y 7 los respectivos mallados a los dos casos de estudio descritos.



**Fig. 6.** Mallado del árbol y rodillo sin rayón.





**Fig. 7.** Mallado del rayón de cerca y vista del mallado adaptativo del rayón y acuerdo.

#### Mallado de contacto general

Details of "Mallado Contaco" - Sizing	
<b>Scope</b>	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	2 Faces
<b>Definition</b>	
Suppressed	No
Type	Element Size
<input type="checkbox"/> Element Size	15, mm
<b>Advanced</b>	
Behavior	Soft
<input type="checkbox"/> Growth Rate	1,1
Capture Curvature	No
Capture Proximity	No

#### Mallado cerca del acuerdo

Details of "Mallado cercano Acuerdo" - Sizing	
<b>Scope</b>	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	2 Faces
<b>Definition</b>	
Suppressed	No
Type	Element Size
<input type="checkbox"/> Element Size	8, mm
<b>Advanced</b>	
Behavior	Soft
<input type="checkbox"/> Growth Rate	1,1
Capture Curvature	No
Capture Proximity	No

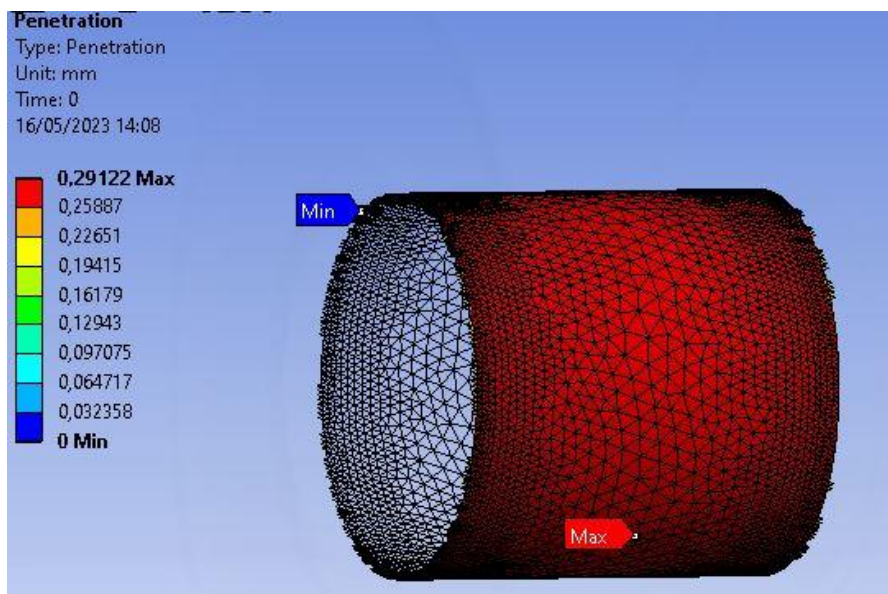
#### Mallado en acuerdo

Details of "Radio de Acuerdo" - Sizing	
<b>Scope</b>	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	2 Faces
<b>Definition</b>	
Suppressed	No
Type	Element Size
<input type="checkbox"/> Element Size	3,5 mm
<b>Advanced</b>	
<input type="checkbox"/> Growth Rate	1,
Capture Curvature	Yes
<input type="checkbox"/> Curvature Normal Angle	Default (70,395°)
<input type="checkbox"/> Local Min Size	Default (0,5 mm)
Capture Proximity	Yes
<input type="checkbox"/> Proximity Min Size	Default (0,5 mm)

#### Mallado adaptativo del rayón

Details of "Rayon" - Sizing	
<b>Scope</b>	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	4 Faces
<b>Definition</b>	
Suppressed	No
Type	Element Size
<input type="checkbox"/> Element Size	1, mm
<b>Advanced</b>	
Behavior	Hard
Capture Curvature	No
Capture Proximity	No

**Fig. 8.** Parámetros de mallado y de contacto entre árbol y rodillo.



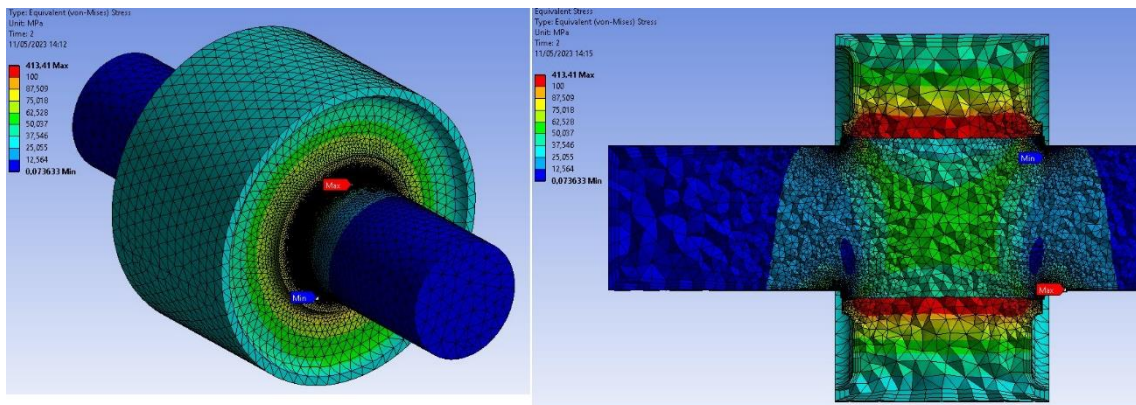
**Fig. 9.** Detalle de interferencia de contacto.

### 3 Resultados

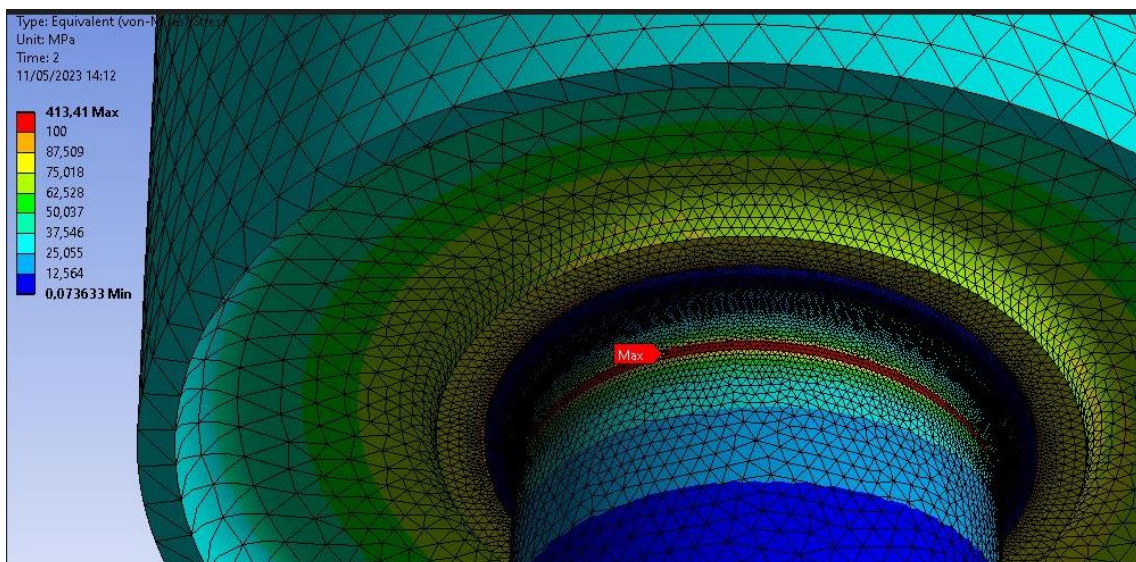
Se muestran en esta sección los resultados de ambas simulaciones, tanto para el modelo sin rayón como para el modelo con rayón. Una aclaración, es que sólo se muestran los resultados de las tensiones sobre el árbol, se han ocultado los resultados sobre el rodillo. El módulo de cálculo resolvió y determinó los valores de tensión punto a punto. Además, mostró los valores máximos y su ubicación para las condiciones de ensayo.

#### 3.1 Resultados en árbol sin rayón.

Se observan en las Figuras 10 y 11 los resultados de las tensiones y la ubicación de la máxima tensión.



**Fig. 10.** Resultados de simulación. Software ANSYS 22.



**Fig. 11.** Ubicación y resultado de máxima tensión de Von Mises.



### 3.2 Resultados en árbol con rayón.

Se observan en las Figuras 12 y 13 los resultados de las tensiones y la ubicación de la máxima tensión. En estas imágenes se puede observar que la máxima tensión no se ubica en el acuerdo, sino que se trasladó a la zona del rayón.

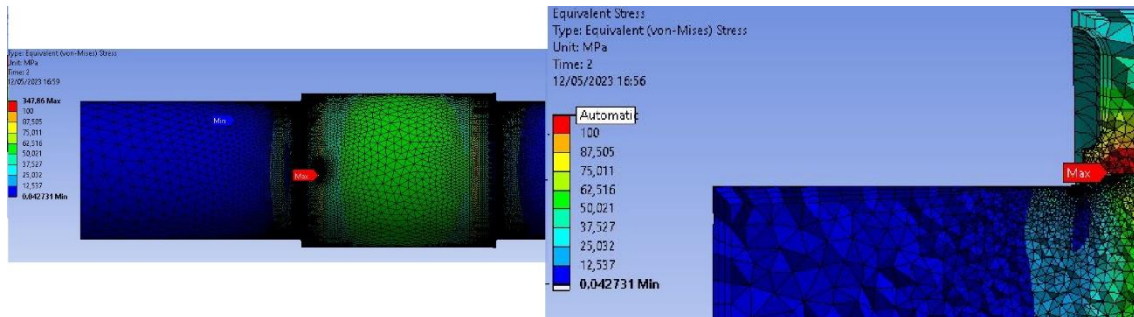


Fig. 12. Resultados de simulación. Software ANSYS 22.

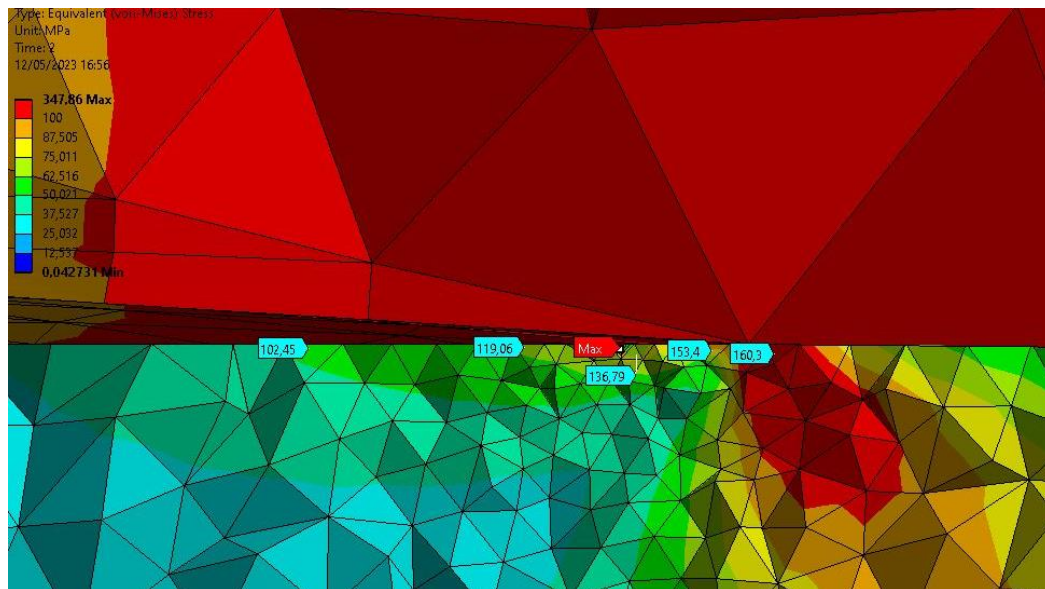


Fig. 13. Ubicación y resultado de máxima tensión de Von Mises.

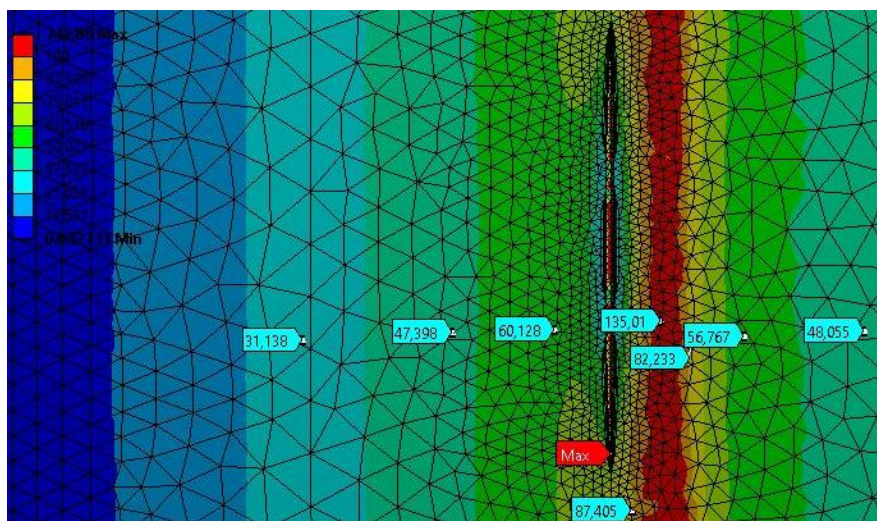


Fig. 14. Ubicación y resultado de máxima tensión de Von Mises.

#### **4 Discusión de resultados**

En la bibliografía existente se presentan valores de coeficientes de concentraciones de tensiones Stress Concentration Factors [1] que han sido obtenidos mediante métodos experimentales como es la fotoelasticidad y ensayos de laboratorio. En esta bibliografía no se encuentran resultados para cuando hay una discontinuidad como se presentó en la falla de éste árbol. Lo que sigue demostrando la utilidad de las simulaciones con software por Elementos Finitos.

En este estudio se verificó que defectos en la superficie de los elementos de máquinas que se pueden generar por medio de mal ensamblado. Esto se debe evitar ya que se genera un aumento del estado tensional mayor al de diseño de la pieza.

Para cuando se reemplace la pieza, es que se debe prestar mucha atención a evitar posibles rayaduras, elementos extraños por suciedad, que puedan volver a provocar una nueva rotura del árbol.

Si bien en la bibliografía de referencia en la Figura 3, se recomienda para aliviar el estado tensional en el acuerdo realizar una ranura de sección semicircular en la pieza de mayor sección. Este análisis realizado, muestra que, si se llega a utilizar esta técnica sugerida, se debe prestar atención en que dicha ranura tenga un radio adecuado, para evitar que se convierta en un concentrador de tensiones, en lugar de un aliviador de tensiones.

#### **5 Conclusiones**

El modelado clásico permite evaluar los efectos de las entallas que son necesarias para la construcción de la pieza, pero no se consideran concentradores de tensión particulares que se pueden presentar como el del caso estudiado. Las simulaciones con elementos finitos son una gran e importante herramienta.

Este tipo de árboles aparece todos los años en los proyectos de reductor de velocidades que se desarrolla como trabajo práctico integrador de la asignatura Elementos de Máquinas de la UTN FRM, por lo que el resultado de este estudio permite identificar criterios válidos para el diseño y su utilización en la asignatura.

Este caso demostró ser un caso muy completo como ejemplo de aplicación para trabajar con modelado numérico. Es un caso de aplicación para la capacitación de becarios y transferencia a las cátedras del área de la mecánica del sólido de la carrera de Ingeniería Electromecánica.

La utilización de Métodos de Elementos Finitos (MEF) permite desarrollar modelos que describen en forma eficiente las solicitaciones producidas por entallas y además permiten ver que se corresponden dichos resultados con la falla que se produjo en el árbol estudiado.

Un próximo análisis para hacer respecto de la falla de este árbol, es hacer un estudio por mecánica de fractura, simulando distintos tipos de entalla, que provoquen una rotura similar. Además, se deberá tener en cuenta en el estudio el tiempo que estuvo funcionando el componente, para analizar si fue un caso de fatiga u otra causa.

#### **Agradecimientos**

Los autores de este trabajo desean en su memoria, agradecer a nuestro amigo y colega Magister Ingeniero Carlos Bello, quien con su dedicación, insistencia, paciencia y ejemplo supo mostrar a sus alumnos y colegas el camino del docente investigador. También agradecer a la UTN Facultad Regional Mendoza por permitirnos realizar estos estudios, brindándonos los espacios necesarios.



## Referencias

- [1] Pilkey W. D. y Pilkey D. F. Peterson's Stress Concentration Factors (3era Ed.). John Wiley & Sons, Inc. 2008, page 135 to 175.
- [2] Richard G. Budynas, J Keith Nisbett, Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley, 9na Edición, McGraw Hill, New York, 2011.
- [3] Felix Kresinsky, Erhard Leidich, Alexander Hasse. Different Failure Mechanisms in Keyed Shaft-Hub Connections under Dynamic Torque Load, ICSI 2019 The 3rd International Conference on Structural Integrity, pages 162 to 169, 2019 .
- [4] H. R. Prajapatia, Dr. B. P. Patelb, N. V. Patelc. Investigation of Stress Concentration Factor for Keyway on Shaft under Different Loading Conditions: A Case Study, University Journal of Research – Ganpat University, pages 1 to 13, 2015 .
- [5] K. Varadi, D. M. Verguese, Contact state and stress analysis in a key joint by FEM, Institute of Machine Design Technical University of Budapest, Vol 96 pages 45 to 60, 1992 .