

# Modelación por Elementos Finitos de la ruptura del tubo en el transportador de mineral laterítico reducido

Isnel Rodríguez González<sup>1</sup> / [irgonzalez@ismm.edu.cu](mailto:irgonzalez@ismm.edu.cu)  
Tomás Fernández Columbié<sup>1</sup> / [tfernandez@ismm.edu.cu](mailto:tfernandez@ismm.edu.cu)  
Rafael Guardado Lacaba<sup>1</sup> / [rguardado@ismm.edu.cu](mailto:rguardado@ismm.edu.cu)  
Victor Ngendanzi<sup>1</sup> / [vgendanzi@ismm.edu.cu](mailto:vgendanzi@ismm.edu.cu)

## RESUMEN

En la planta de hornos de reducción de las empresas niqueleras de tecnología Caron son frecuentes las roturas en el tubo del transportador sinfín de las instalaciones de transporte de mineral reducido. Para determinar el mecanismo de rotura se modelaron y simularon tubos con agujeros circulares usando diferentes relaciones diámetro interior/diámetro exterior con el fin de conocer la respuesta en el dominio de las tensiones. Se analizaron dos variantes, una con agujero rectangular de extremos redondeados y otra con agujero elíptico. Se observó que las tensiones aumentan linealmente en la medida que el diámetro del agujero se hace mayor y que las tensiones tangenciales máximas ocurren en los concentradores de tensión. En las variantes analizadas la grieta que provoca la ruptura comienza por la parte interior de los agujeros para las mayores relaciones diámetro interior/diámetro exterior así como en aquellos lugares donde la concentración de tensiones es mayor.

## PALABRAS CLAVE

Modelación, MEF, ruptura, transportador sinfín.

# Modelling by Finite Elements of pipe breaking in lateritic reduced mineral conveyors

## ABSTRACT

In the nickel industry using Caron technology, the screw conveyors of the lateritic mineral transport facilities suffers frequent breaks. To determine the breaking mechanism of tubes was carried out the simulation and modelling of pipes with circular holes of different inner/outer diameter relationships with the aim of knowing the answer in the stresses domain. Two variants were analyzed: rectangular hole of rounded ends and elliptic hole. It was observed that the stresses increase lineally when the diameter of the hole is increased and the maximum shear stresses are located in the stress concentration. It was found that, in both variants, the crack that causes the break begins in the inner part of the holes to the biggest inner/outer diameter relationships as well as in those places where the stress concentration is bigger.

## KEY WORDS

Modelling, FEM, breaking, screw conveyor.

## INTRODUCCIÓN

En la planta de hornos de reducción de las empresas niqueleras de proceso carbonato amoniacal (Caron), se encuentran varios transportadores de mineral del tipo sinfín (Yacoby), con el tornillo fijo en el interior del tubo que transporta el mineral ya reducido. La longitud de los transportadores varía entre 12 y 30 m y su diámetro es de 565 mm. Los de mayores dimensiones están seccionados en 6 tramos. Cada tramo está apoyado en dos rodillos como cojinetes de contacto plano. El tramo 5, que con mayor frecuencia se avería (figura 1), está construido de acero inoxidable austenítico AISI 321, tiene longitud de 2,5 m y tres agujeros de 350X150 mm, situados radialmente a 120°.



Figura 1. Tubo averiado (cortesía Empresa Ernesto Che Guevara. Moa)

En los transportadores de tipo sinfín la rotura de los tubos ocurre frecuentemente y de manera general se comporta de la misma forma (Lazar, 1999). Las grietas que provocan tales roturas no son detectadas de inmediato, lo que da lugar a grandes averías.

El tipo de rotura puede establecerse mediante el análisis de las superficies de fractura y la comparación de los datos iniciales disponibles. Es necesario tener en cuenta que además de las cargas de torsión y flexión que actúan sobre el tubo, las temperaturas y el tiempo afectan la durabilidad del mismo (Botella J. *et al.*, 1999).

En componentes de hornos y accesorios, las roturas están asociadas a la fragilización por precipitación de fases debido al envejecimiento (Botella J. *et al*, 1999). También son posibles en aceros austeníticos por precipitación de fases sigma en severas condiciones de operación y bajo tensiones térmicas (Lazar, 1999).

El Método de los Elementos Finitos (MEF) ha sido generalizado en la industria para caracterizar la forma de rotura de muchos elementos de ingeniería y constituye una herramienta de cálculo numérico capaz de resolver cualquier problema formulable de la matemática, la física y la mecánica, permitiendo simular y realizar gran cantidad de análisis en componentes y estructuras complejos, difícilmente calculables por los métodos analíticos tradicionales.

El objetivo de la investigación fue evaluar, mediante el MEF, el comportamiento de las tensiones en los tubos de los transportadores de tipo sinfín empleados en plantas de hornos de reducción.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

Se construyeron probetas metalográficas y se analizaron en un microscopio óptico con aumento de 500X para identificar las características microestructurales del material de construcción de los tubos. Se hicieron ensayos de dureza y análisis químicos para determinar, a partir de la morfología de los defectos y su interacción con las características geométricas, el origen de las grietas, su modo de propagación y su relación con la acción combinada de efectos del medio y condiciones de carga.

Se tomaron varias muestras de tubos fallados del tramo 5 (figura 1), localizado muy cerca de los tambores rotatorios de enfriamiento de mineral, que emplean agua como medio de absorción de calor.

Se consideró el efecto de las cargas adicionales, no inherentes al proceso, debidas a las diferencias de nivel en el agua de enfriamiento (Lazar, 1999). Se hizo además una observación visual de los aspectos geométricos esenciales de tubos averiados y de las superficies de fractura, tamaño y posición relativa del defecto iniciador y con respecto a los extremos de los principales concentradores de tensión.

Los cálculos de resistencia en los tubos se realizaron teniendo en cuenta las condiciones de operación, la geometría y las cargas a las que están sometidos. Se compararon las tensiones actuantes con las admisibles del material AISI 321 (Key to Steel, 2006), asumiendo un coeficiente de seguridad de 2.

Se modelaron y simularon tubos con agujeros circulares usando diferentes relaciones diámetro interior/diámetro exterior para conocer la respuesta en el dominio de las tensiones. Se analizaron dos variantes, una con agujero rectangular de extremos redondeados y otra con agujero elíptico.

Se empleó el paquete de software ANSYS V.10 para el análisis por el MEF desarrollando el estudio en dos partes; en la primera se hizo la simulación de tubos de pequeño diámetro (entre 22 y 60 mm) y en la segunda, tubos del transportador sinfín, ya descritos anteriormente. Se desarrolló la secuencia de pasos siguiente:

- Obtención del modelo geométrico
- Aplicación de las condiciones de frontera y de las cargas
- Obtención de la solución
- Realización del post procesamiento y obtención de las respuestas en el dominio de las tensiones y los desplazamientos

En el MEF es necesario definir los esfuerzos y los desplazamientos; para los esfuerzos (Zienkiewicz, 2000) el sistema fijo de coordenadas cartesianas se denota como  $x, y, z$  o

en forma indexada  $x_1, x_2, x_3$ , de la misma manera los desplazamientos pueden ser denotados como  $u, v, w$  o  $u_1, u_2, u_3$ . Por ello es posible definir  $x_i$  como las coordenadas y  $u_i$  como los desplazamientos, siendo los rangos de 1, 2, 3. Para aplicaciones tridimensionales se puede definir el sistema de coordenadas de la manera siguiente:

$$x = \begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{Bmatrix}$$

y los desplazamientos como:

$$u = \begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{Bmatrix}$$

Las tensiones del objeto se expresan:

$$\sigma = [\sigma_{11} \quad \sigma_{22} \quad \sigma_{33} \quad \sigma_{12} \quad \sigma_{23} \quad \sigma_{31}] = [\sigma_{xx} \quad \sigma_{yy} \quad \sigma_{zz} \quad \sigma_{yx} \quad \sigma_{yz} \quad \sigma_{zx}]$$

y los esfuerzos:

$$\xi = [\xi_{11} \quad \xi_{22} \quad \xi_{33} \quad \gamma_{12} \quad \gamma_{23} \quad \gamma_{31}] = [\xi_{xx} \quad \xi_{yy} \quad \xi_{zz} \quad \gamma_{yx} \quad \sigma_{yz} \quad \sigma_{zx}]$$

Siendo:  $\gamma_{ij}$  - tensor de simetría, asumido teniendo en cuenta criterios de ingeniería con el valor de  $2\xi_{ij}$

La aproximación de los desplazamientos de los elementos finitos y los desplazamientos virtuales se denotan en forma isoparamétrica por:

$$u(\xi, i) = N(\xi)\ddot{u}(t); \quad \xi u(\xi) = N(\xi)\delta i \quad \text{con} \quad x(\xi) = N(\xi)\bar{x}$$

Para computarizar los esfuerzos virtuales se empleó:  $\delta\varepsilon = S\delta u = (SN)\varepsilon i = B\delta i$  en los que la matriz de esfuerzo-desplazamiento se calcula como:

$$B = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & 0 \\ 0 & N_2 & 0 \\ 0 & 0 & N_3 \\ N_2 & N_1 & 0 \\ 0 & N_3 & N_2 \\ N_3 & 0 & N_1 \end{bmatrix}$$

Siendo arbitrario el parámetro virtual  $\delta u$ , para el problema discreto se obtiene  $M\ddot{u} + P\sigma = f$ , donde:

$$M = \int_{\Omega} N^t \rho N d\Omega$$

$$f = \int_{\Omega} N^t b d\Omega + \int_{\Gamma_1} N^t t d\Gamma$$

El término  $P$  es comúnmente referido a la divergencia de las tensiones o de las fuerzas actuantes:

$$P(\sigma) = \int_{\Omega} B^t \sigma d\Omega$$

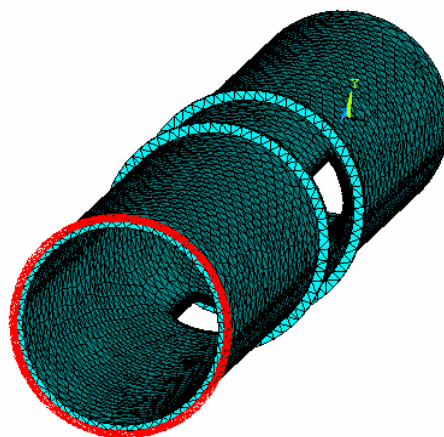


Figura 2. Tubo cargado y discretizado con elementos tetraédricos del tipo SOLID92

El modelo discretizado (figura 2) se obtuvo para realizar la simulación, conociendo las características geométricas, las

solicitaciones y las condiciones de borde, además de tener en cuenta que el tubo trabaja bajo grandes cargas y temperaturas muy severas, superiores a 650 °C.

Se hizo un análisis de convergencia para definir el nivel de error cometido al emplear el MEF, en el que tuvo influencia el nivel de fineza de la discretización.

## DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

### Análisis microestructural

Las evaluaciones microestructurales revelaron defectos internos, la micrografía (figura 3) muestra el agrietamiento típico en los aceros inoxidable austeníticos expuestos a elevadas temperaturas, corroborando lo reportado en la literatura ([Changan Cai et al, 1999](#)). Se observaron defectos que aparecen durante el proceso de fundición, proclives a la iniciación de la rotura debido a su forma alargada de extremos puntiagudos, además de la formación de superficies débiles que pueden romperse y generar grietas bajo la influencia de las tensiones de trabajo (Bilmes, 2000).

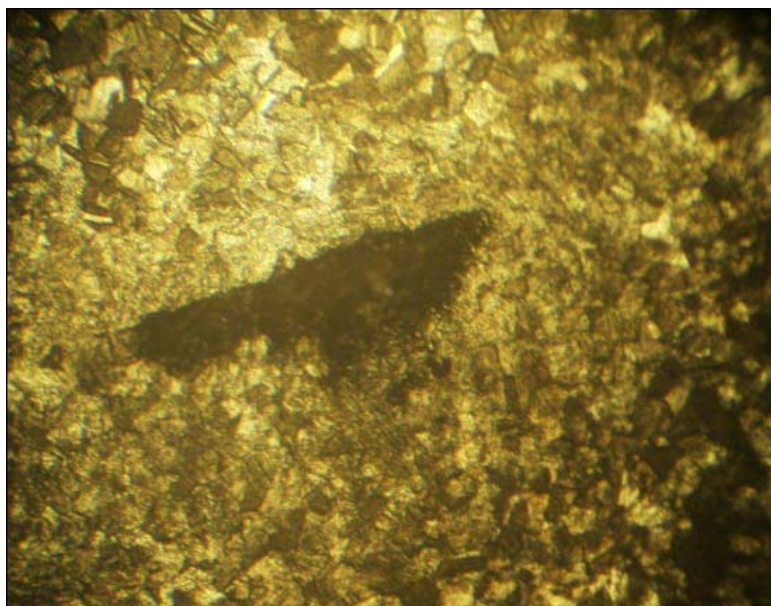


Figura 3. Defecto interno en una muestra de tubo averiado.



Existen antecedentes de casos similares reportados en la industria. Lamber y Herrero (2006) indican que muchas roturas involucran tubos de 565 mm de transportadores fisurados en plantas de hornos y se debe a que poseen varios concentradores de tensión además de procesos de corte no apropiados. En las roturas se observa fatiga por torsión influenciada por el levantamiento o desnivelación del transportador según las condiciones de trabajo de este equipo, jugando un papel importante la flotabilidad del enfriador de mineral que introduce combinación de esfuerzos normales y tangenciales.

### Modelación por MEF

#### *Tubos de pequeño diámetro*

Al modelar y simular tubos de pequeño diámetro con agujeros circulares de diferentes relaciones diámetro interior/diámetro exterior ( $d/D$ ), para observar la respuesta en el dominio de las tensiones empleando una carga constante, se observó (figura 4) que las tensiones aumentan en la medida que se incrementa la longitud ( $X_d$ ) del agujero, con una tendencia a la línea recta.

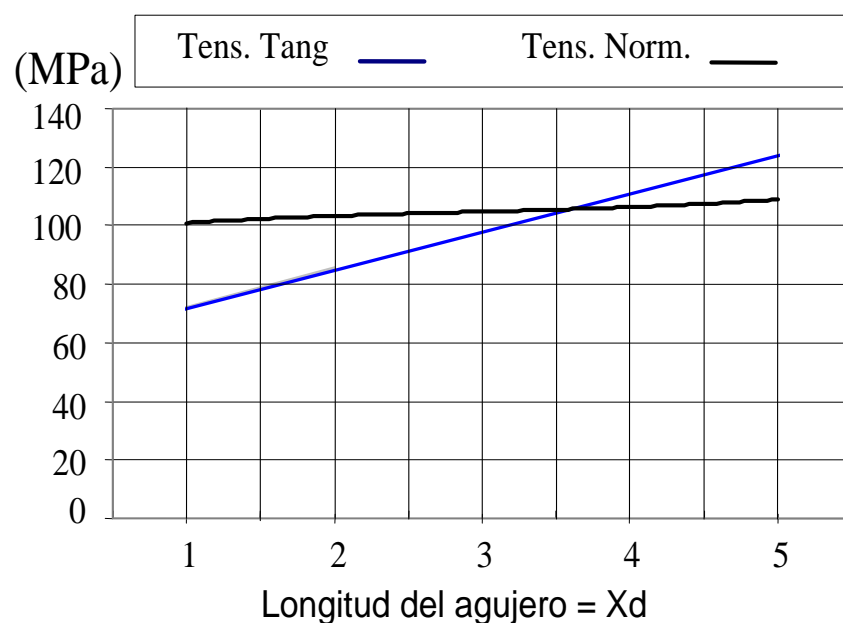


Figura 4. Dependencia entre las tensiones y la longitud del agujero.  
 $d/D = (2 - 94) \%$

### ***Tubos del transportador sinfín***

Las tensiones máximas ocurrieron en los concentradores de tensión de los agujeros. Como puede verse en la figura 5, la grieta que provoca la rotura comienza por la parte interior de los agujeros y en aquellos lugares donde la concentración de tensiones es mayor, o sea, en los cambios de sección de los agujeros. Esto se corrobora comparando la forma de la falla de los tubos (figura 1) con la respuesta de tensiones representada en las figuras 5 y 6, donde se muestra que el refuerzo simplemente se levanta y no se fractura específicamente por la zona donde comienza la grieta que lo avería; este comportamiento fue observado en simulaciones para diferentes configuraciones de agujeros y relaciones diámetro interior/diámetro exterior superiores al 75 %.

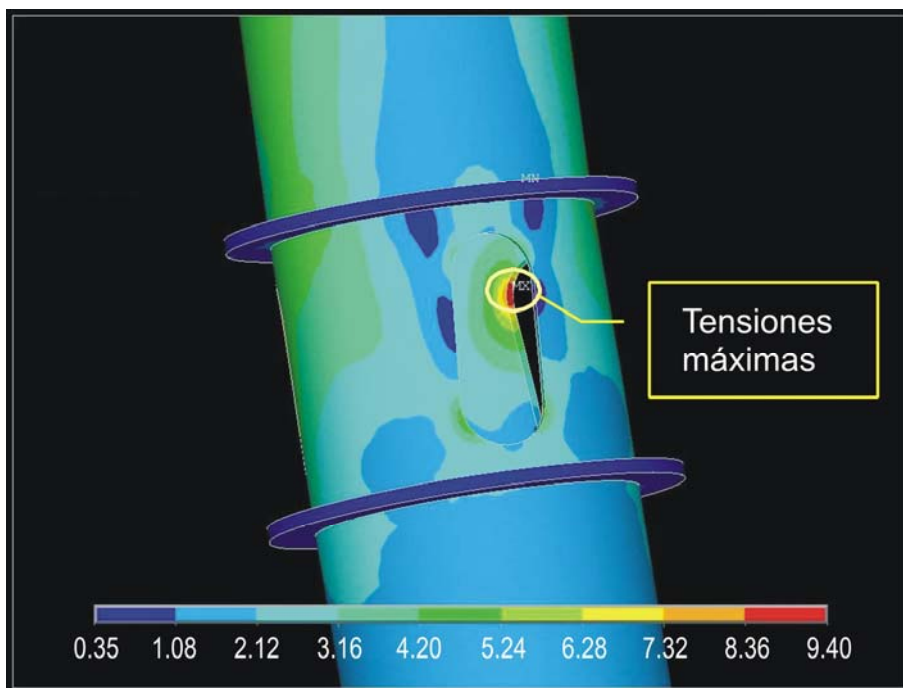


Figura 5. Tensiones en tubos con agujeros elípticos. Relación  $d/D$  superior a 75 %.

Para la combinación de esfuerzos de torsión y flexión, como resultado del levantamiento del enfriador, las tensiones

tomaron valores cercanos a los permisibles para el material, como se observa en la figura 7.

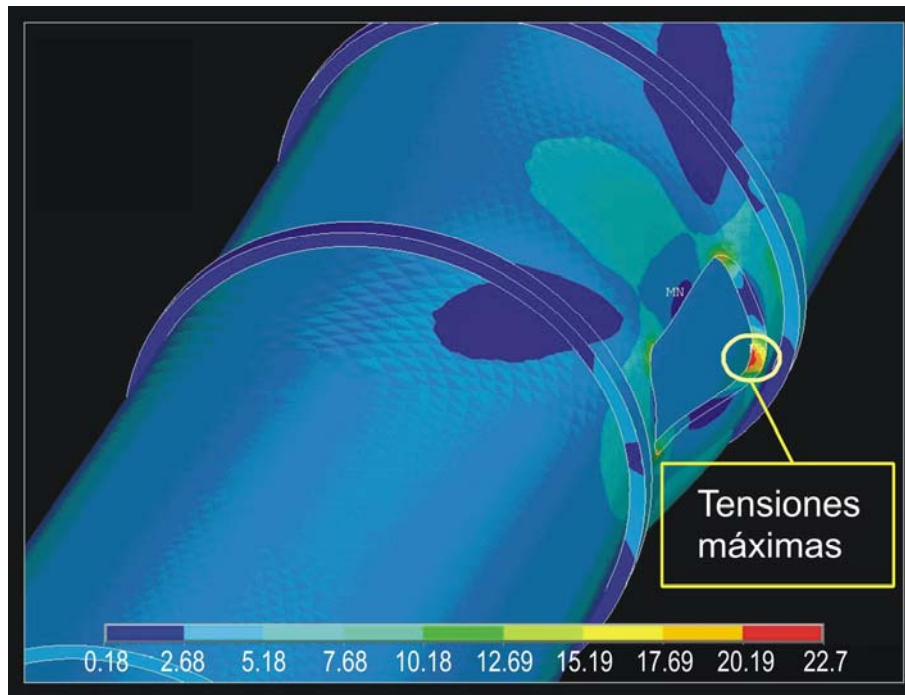


Figura 6. Tensiones en tubos con agujeros de esquinas redondeadas.

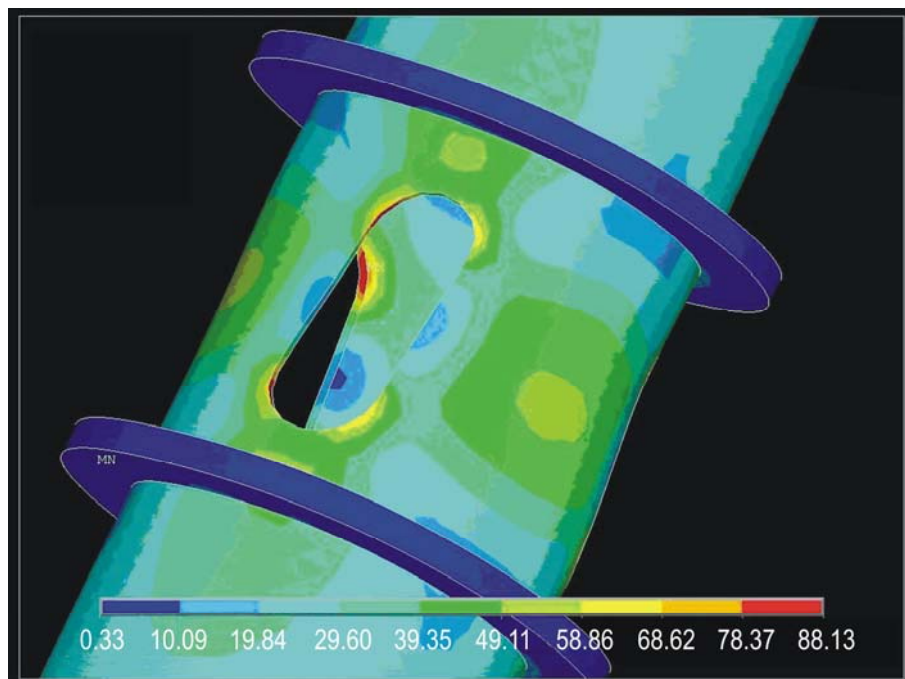


Figura 7. Combinación de esfuerzos en tubos con agujeros elípticos.

### Análisis de la convergencia

El análisis de convergencia arrojó que en todos los casos el error cometido al emplear el MEF no sobrepasó el 5,6 % (figura 8).

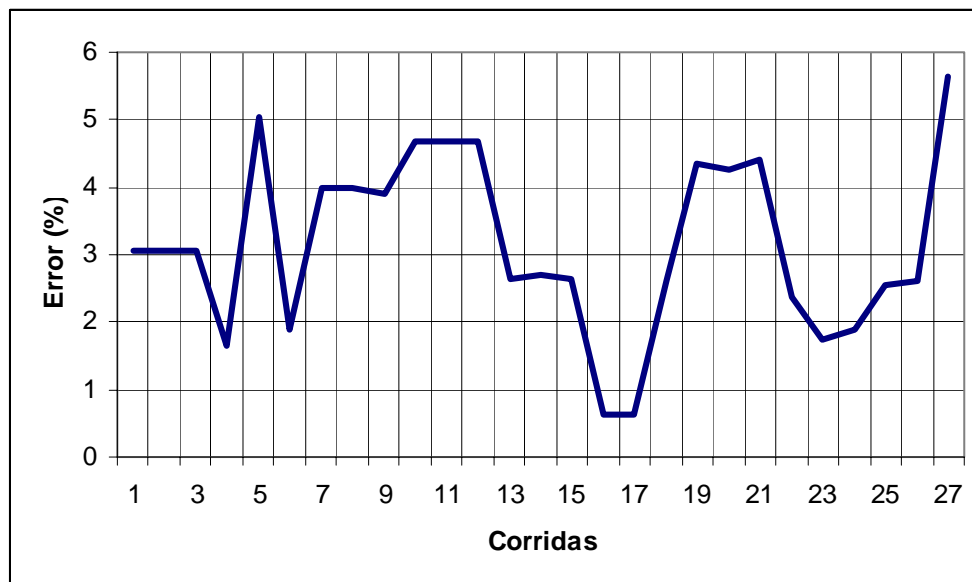


Figura 8. Error del método de simulación.

### CONCLUSIONES

Según la modelación por el MEF, la aparición de la grieta que origina la ruptura del tubo se produce siempre de adentro hacia afuera para el caso de relaciones entre diámetro interior/diámetro exterior superiores al 75 % y localizadas en aquellos lugares donde la concentración de tensiones es mayor. A este fenómeno se le suma la formación de grietas por defectos internos de fabricación y la sobrecarga provocada por el levantamiento o desnivelación del transportador debido a las condiciones de trabajo.

### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al departamento de ingeniería de la Empresa Ernesto Che Guevara, particularmente a los Ingenieros Ernesto Herrero y Ramón Baquero, por su valioso apoyo y oportunas sugerencias.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANSYS INC. 1999. Users guide. Swanson Analysis Systems, Version 5.7.
- BILMES, P., 2000. El análisis y prevención de fallas metalúrgicas en la ingeniería de los materiales. En: Memorias del IV taller científico internacional TECNOMAT' METANICA'2000. C. Habana.
- BOTELLA, J.; J. ALMAGRO; E OTERO; P. HIERRO Y C. MERINO., 1999. Fenómenos de envejecimiento y oxidación a altas temperaturas en tres aceros inoxidable altamente aleados. *Revista de Metalurgia*, 35 (1): 22-32.
- [CHANGAN CAI](#), [PETER K. LIAW](#), [MINGLIANG YE](#), & [JIE YU.](#), 1999. Recent developments in the thermomechanical fatigue life prediction of superalloys. *The Minerals, Metals & Materials Society*, 51 (4). [en línea] <http://www.tms.org/TMSHome.html> [consulta: 20 diciembre. 2006].
- KEY TO STEEL. 2006. Database developed by Key to Metals Task Force & INI International. INI Internacional. [en línea] [http://keytosteel.com/Article\\_Fractura.htm](http://keytosteel.com/Article_Fractura.htm). [consulta: 10 abril. 2007]
- LAMBER A. & HERRERO E., 2006. Libro de registro de datas y averías. Planta de Hornos de Reducción: Empresa Comandante Ernesto Ché Guevara. Moa, Cuba
- LAZAR M. KACHANOV. 1999. Rupture time under creep conditions. *International Journal of Fracture* 97: 26–31.
- ZIENKIEWICZ, O.C. & TAYLOR, R.L., 2000. *El método de los elementos finitos*. McGraw-Hill/Interamericana. Barcelona. España, 450 p.