

# Simulación Computacional de un Proceso de Soldadura por Aluminotermia en Rieles Ferroviarios

## Computer Simulation of a Welding Process by Aluminothermy in Railway Rails

Fecha de Presentación: 05/09/2023

### Héctor Sanzi

Grupo de Investigación de Ingeniería Estructural GIIE  
Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Haedo  
París 532, Haedo Buenos Aires Argentina  
[tecsaing@tecsaing.com.ar](mailto:tecsaing@tecsaing.com.ar)

### Agustín Sirolli

Grupo de Investigación de Ingeniería Estructural GIIE  
Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Haedo  
París 532, Haedo Buenos Aires Argentina  
[agustinsirolli@yahoo.com.ar](mailto:agustinsirolli@yahoo.com.ar)

### Gustavo Elvira

Grupo de Investigación de Ingeniería Estructural GIIE  
Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Haedo  
París 532, Haedo Buenos Aires Argentina  
[gustavoelvira@hotmail.com](mailto:gustavoelvira@hotmail.com)

### Resumen

La evaluación de los rieles ferroviarios comprende aspectos tales como la evaluación de su resistencia frente al desgaste, la determinación de la fatiga de contacto por rodadura, un análisis de integridad estructural y el comportamiento fractomecánico.

De presentarse un caso de falla, antes de llevar a cabo una evaluación integral del mismo y encarar su reparación, es necesario conocer el estado tensional residual que pudiera haberse alcanzado en el momento de su instalación, producto del proceso de construcción, además de considerar posibles deformaciones del mismo.

En la práctica habitual en ferrocarriles, existen dos situaciones donde se hace necesaria la soldadura entre tramos de rieles, uno por reemplazo debido a la rotura del mismo y el otro cuando se instala un tendido nuevo. En ambos casos, existen dos procedimientos de soldadura, siendo el más utilizado el denominado por Soldadura Aluminotérmica.

En este trabajo se presenta un modelo computacional simplificado por elementos finitos para simular el proceso descrito y determinar, considerando la soportación de ambas partes del riel, la distribución de temperaturas, deformaciones y tensiones residuales que se alcanzan del resultado de dicho proceso, lo cual permitiría tomar decisiones en el momento de llevar a cabo la reparación o construcción del mismo.

**Palabras clave:** Rieles Ferroviarios, Soldadura Aluminotérmica, Integridad y Desgaste

## Abstract

The evaluation of railway rails includes aspects such as the evaluation of their resistance against wear, the determination of rolling contact fatigue, an analysis of structural integrity and the fractomechanical behavior.

In the event of a failure, before carrying out an integral evaluation of it and addressing its repair, it is necessary to know the residual stress state that could have been reached at the time of its installation, as a result of the construction process, in addition to considering possible deformations of it.

In the usual practice in railways, there are two situations where welding between sections of rails is necessary, one for replacement due to its breakage and the other when a new line is installed. In both cases there are two welding procedures, the most widely used being called Aluminothermic Welding.

In this paper, a finite element computational model is presented to simulate the described process and determine, considering the support of both parts of the rail, the distribution of temperatures, deformations and residual stresses that are reached from the result of said process, which will allow taking decisions at the time of carrying out the repair or construction of the same.

**Keywords:** *Railway Rails, Aluminothermic Welding, Integrity and Wear*

## Introducción

Los altos requerimientos de los rieles ferroviarios hacen necesario un estudio cada vez más frecuente de sus propiedades, que permitan conocer mejor y en forma anticipada el comportamiento estructural frente a las condiciones de servicio, teniendo en cuenta que deben ser capaces de resistir elevadas cargas de ejes, altas velocidades y grandes volúmenes de tráfico.

En tal sentido son fundamentales las investigaciones que apuntan a garantizar la calidad de producción como así también el procedimiento de reparación que mejor resulte para garantizar la seguridad de operación para la vida en servicio del riel.

La evaluación de la integridad estructural de estos rieles ferroviarios comprende aspectos tales como la evaluación de su resistencia frente al desgaste, la determinación de la fatiga de contacto por rodadura, un análisis de integridad estructural y el comportamiento fractomecánico.

El proceso de daño de los rieles ferroviarios del tipo C-Mn tiene su origen en la cabeza del riel debido principalmente a desgaste y a un proceso de fatiga de contacto por rodadura, que, a partir de esfuerzos de flexión cíclica permite el desarrollo y crecimiento de las fisuras hasta que las mismas, como consecuencia del uso, pueden alcanzar su condición crítica y posterior rotura, Figura 1.



Figura 1: Tipo de daño estructural en rieles de uso ferroviario

En tal sentido son fundamentales las investigaciones que apuntan a garantizar la calidad de producción y la seguridad de operación para la vida de servicio del riel, como son las de Matsumoto (1978), Ochi(1988), Asta(1997), Sanzi (2021), BS 7910(2005) y Dabell (1978)

Para el material de rieles del tipo C-Mn, la composición química, propiedades mecánicas y fractomecánicas estáticas, obtenidas según normas Std ASTM (2001), se presentan en la tabla siguiente.

Composición química (% en peso)						Propiedades mecánicas básicas (MPa)			Tenacidad a fract. Estática (Mpa m <sup>1/2</sup> )		
C	Mn	P	S	Si	Al	S <sub>Rotura</sub>	S <sub>Fuercia</sub>	Al. Rot. (%)	K <sub>IC</sub> (K <sub>Q</sub> )	K <sub>C</sub> (J <sub>C</sub> )	K <sub>C</sub> (J <sub>C</sub> ) Corregida
0.75	1.18	0.023	0.016	0.30	0.012	935	489	12.2	48	41	83

Tabla 1: Propiedades de rieles de tipo C-Mn,ASTM (2001)

Sería de importancia, antes de evaluar los posibles mecanismos de falla de los rieles en servicio, contar con información cuantitativa si en su construcción original o de una eventual reparación, el riel no se encuentra con tensiones residuales producto del proceso de soldadura.

En la práctica habitual en ferrocarriles, existen dos situaciones donde se sueldan los rieles, uno por la rotura y el otro cuando se instala uno nuevo, en lugar de agregarle una junta con eclisa y bulón. En ambos casos existen dos procedimientos de soldadura, siendo el más utilizado el denominado por Soldadura Aluminotérmica.

Dicho procedimiento consiste en la fusión de ambos carriles a unir, vertiendo un metal de aporte líquido de aluminio a alta temperatura en el interior de un molde refractario que rodea los extremos de los carriles y que una vez finalizada la reacción química con el óxido de hierro, se retira la escoria y se cortan las partes sobrantes, y posteriormente se rehace mediante mecanizado, la cabeza del riel, Figura 2.



Figura 2: Procedimiento de soldadura por aluminotermia de rieles ferroviarios

En este trabajo se presenta un modelo computacional por elementos finitos para simular el proceso descrito y determinar, considerando la soportación de ambas partes del riel, la distribución de temperaturas, deformaciones y tensiones residuales que se manifiestan como resultado de dicho procesotérmico, lo cual permitirá tomar decisiones en el momento de llevar a cabo la reparación o construcción del mismo.

## Procedimiento del Proceso por Soldadura Aluminotérmica

En 1893 el químico alemán Hans Goldschmidt descubrió que la reacción exotérmica entre el polvo de aluminio y un óxido metálico en polvo puede iniciarse con una fuente de calor, la cual produce una reacción aluminotérmica conocida como reacción termita. Este proceso exotérmico se presenta de una reducción del óxido de hierro por el aluminio. El aluminio es oxidado por el óxido de hierro.

La temperatura teórica para que se produzca la reacción es de 3100 °C, sin embargo por la adición de compuestos no reactivos, la pérdida de calor por conducción y radiación, la temperatura se reduce a unos 2480 °C.

La primera aplicación comercial fue soldar tramos de vías ferroviarias en Essen, Alemania, en 1899. De ahí en más fue el método utilizado para unir rieles ferroviarios. Se pueden usar algunos otros óxidos metálicos para mejorar el proceso se pueden adicionar ferro aleaciones, ya sea para aumentar la fluidez o para disminuir la temperatura de solidificación de la escoria.

El proceso preparación de los rieles a soldar, Figura 3, consiste en:

- Preparación de las superficies a soldar, las cuales deberán estar perpendiculares y alineados con el eje longitudinal y libres de cualquier tipo de óxido.
- Aplicación del molde (o crisol) por encima de los rieles.
- Precalentamiento de las partes a soldar hasta los 800 a 1000°C.
- Colocación del crisol. Este es un recipiente de material refractario, en la zona superior se coloca un tapón de magnesita que se funde a la temperatura que se necesita para colar el metal. se usan mezclas de termita para ajustar la temperatura en las secciones a soldar.
- Colado del material. Después de alcanzadas las temperaturas de fundición (aproximadamente a 2480°C), la primera cantidad de material que se coló, pierde temperatura (escoria), por lo cual se descarta por medio de los boquetes que posee el crisol a ambos lados.
- Retiro del molde. Después del vertido y en un lapso especificado por el fabricante, se procede a romper el molde y cortar las rebabas.
- Terminación final, enfriamiento y mecanizado

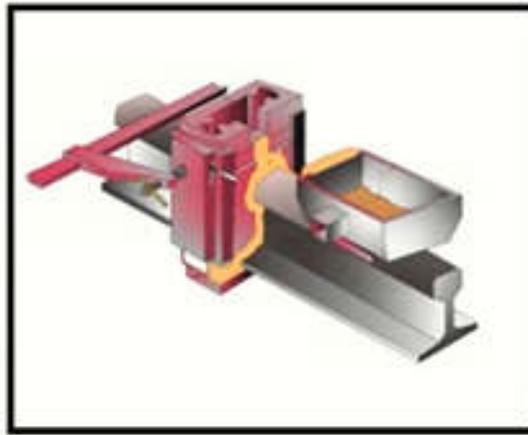


Figura 3: Accesorios y equipamiento utilizados para la soldadura por aluminotermia

## Simulación Computacional del Proceso de Soldadura por Aluminotermia

En este trabajo se presenta un modelo computacional simplificado por elementos finitos para simular el proceso de soldadura por aluminotermia y determinar la distribución de temperaturas, deformaciones y tensiones residuales que se manifiestan del resultado del dicho proceso.

El objetivo del presente estudio consiste en evaluar el nivel de tensiones residuales alcanzadas en la zona de unión, donde se realiza el proceso de soldadura, y conocer su influencia en el caso que deba encausarse un estudio de integridad o desgaste por rodadura y fatiga en la zona de interés.

Por lo tanto, con el fin de verificar la integridad estructural de la construcción de la unión entre rieles, se propone un modelo localizado de elementos finitos del tipo sólido del Programa Ansys R2 (2021), donde se han colocado las

restricciones correspondiente a los durmientes apoyos del riel, en conjunto con su enclavamiento. El modelo quedó conformado por 34394 elementos, Figura 4.

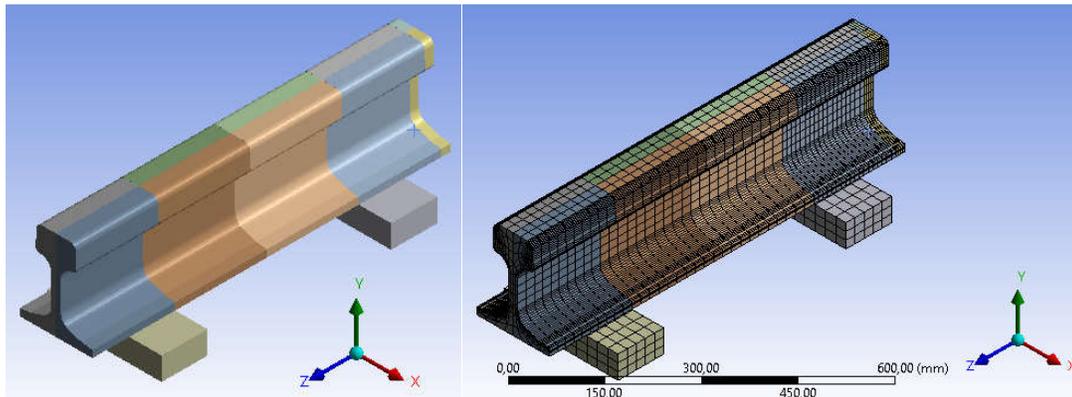


Figura 4: Modelo de Elementos Finitos

Para determinar las tensiones residuales producto de la soldadura, se consideran las condiciones reales que se presentan durante dicho proceso, Figuras 5, es decir:

a.- Restricciones de borde

Restricciones en desplazamiento en el apoyo donde se ubican los durmientes “B”

Desplazamiento perpendicular nulo en el plano donde se aplica la temperatura impuesta (Plano de simetría riel “A”).

b.- Condiciones Convectivas:

En todo el riel, a diferencia del plano donde se realiza el proceso de soldadura por aluminotermia, se han considerado condiciones convectivas, con circulación aire calmo, se adopta valor de  $30 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ } ^\circ\text{C}$ .

c.- Temperatura impuesta:

En un primer análisis, se considera temperatura impuesta de  $2500 \text{ } ^\circ\text{C}$  sobre el plano donde se realiza el proceso de soldadura por aluminotermia, “A”.

d.- Condiciones Temporales:

Se plantea que el proceso en el instante inicial  $t = 0 \text{ seg.}$ , la temperatura de precalentamiento es de  $800 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

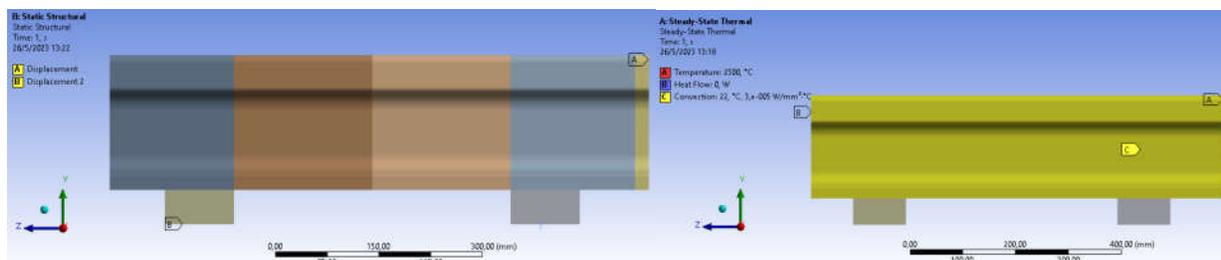


Figura 5: Condiciones de Borde estructurales, térmicas y temporales

El mecanismo de transferencia de calor esta dado por efectos de conducción y convección, se desprecian los fenómenos de radiación, mientras que la conductividad y calor específico se consideran, en esta primera aproximación, constantes con la temperatura.

A los fines de la presentación del procedimiento de análisis propuesto, el estudio se realiza en el campo lineal elástico, por lo cual las tensiones obtenidas son teóricas, ya que se requiere de un estudio elasto-plástico para determinar las tensiones residuales máximas alcanzadas.

En la figura 6 se presenta la distribución de temperaturas, mientras que en las figuras 7 y 8 se muestran las deformaciones y tensiones máximas alcanzadas de Von Mises, ambas para un determinado instante de tiempo, coincidentes con el comienzo del proceso de soldadura.

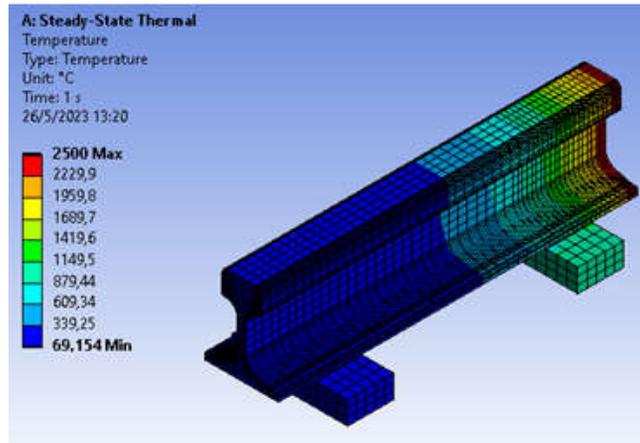


Figura 6: Distribución de Temperaturas, para el comienzo del proceso de soldadura

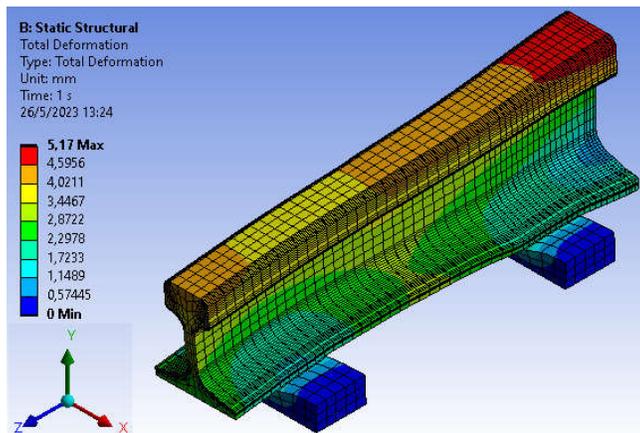


Figura 7: Deformaciones, para el comienzo del proceso de soldadura

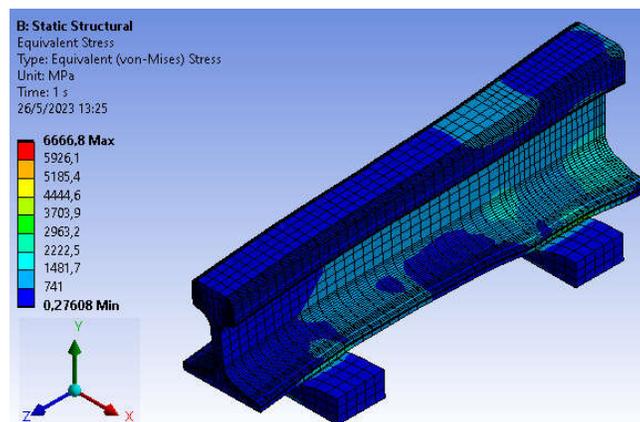


Figura 8: Tensiones Máximas de Von Mises (Teóricas), para el comienzo del proceso de soldadura

Del estudio se desprende que el sencillo modelo planteado, es apto para su utilización en la evaluación del nivel de tensiones residuales alcanzadas fundamentalmente sobre la cabeza del riel, producto del proceso de soldadura, cuya magnitud deberá ser incluida en el análisis completo de desgaste por rodadura y el mecanismo de fisura y fatiga.

## Conclusiones

Los altos requerimientos de los rieles ferroviarios hacen necesario un estudio cada vez más frecuente de sus propiedades, que permitan conocer mejor y en forma anticipada el comportamiento estructural frente a las condiciones de servicio, teniendo en cuenta que deben ser capaces de resistir elevadas cargas de ejes, altas velocidades y grandes volúmenes de tráfico.

De presentarse este caso de falla, antes de llevar a cabo una evaluación integral del mismo y encarar su reparación, es necesario conocer el estado tensional residual que pudiera haberse alcanzado en el momento de su instalación, producto del proceso de construcción, además de considerar posibles deformaciones del mismo.

En tal sentido son fundamentales las investigaciones que apuntan a garantizar la calidad de producción como así también el procedimiento de reparación que mejor resulte para garantizar la seguridad de operación para la vida en servicio del riel.

El procedimiento de soldadura más utilizado en la práctica habitual, en la unión entre tramos de rieles, ya sea por reemplazo debido a la rotura del mismo o cuando se instala un tendido nuevo, es el denominado por Soldadura Aluminotérmica.

En este trabajo se presentó un modelo computacional simplificado por elementos finitos para simular el proceso descripto y determinar, considerando la soportación de ambas partes del riel, la distribución de temperaturas, deformaciones y tensiones residuales que se alcanzan del resultado de dicho proceso, lo cual permitiría tomar decisiones en el momento de llevar a cabo la reparación o construcción del mismo.

En el caso de realizar un eventual análisis de integridad ante una posible reparación por desgaste por rodadura o presencia de fisuras y/o fatiga en la zona cercana de unión entre rieles, es fundamental conocer previamente el estado tensional residual que se hubiera alcanzado en el momento de la soldadura.

## Referencias

Ansys Versión R2 2021. Finite Element Program.

Asta, E.P., Balderrama, J.J., Cambiasso, F.A., (1997). Evaluación de la tenacidad a la fractura y del crecimiento cíclico de fisura en aceros de rieles ferroviarios, Revista Información Tecnológica, 8, 2, p37-42.

ASTM- E 1820-01. (2001). Standard Test Methods for Measurement of Fracture Toughness. Annual Book of ASTM Standards.

BS 7910. (2005). Guide to methods for assessing off laws in metallic structures. British Standard Institution.

Dabell, B., Hill, S., Watson, P. (1978). ASTM STP 644, p430-448.

Matsumoto, H., Sugino, K., Nishida, S., Kurihara, R., Matsuyama, S., (1978). ASTM STP 644, p233-255.

Ochi, I., Mac Evily, A.J., (1988), Engng.Fracture Mech. 29, 2, p159-172.

Sanzi H., E. Asta, G. Elvira, F. Cambiasso y J. Balderrama. Integridad Estructural de Rieles de Acero para Uso Ferroviario. "II Congreso Argentino de Ingeniería Ferroviaria" 2021 San Nicolas Buenos Aires Argentina.