

# ANÁLISIS DE LAS INCLUSIONES DE ESCORIA ESIS E ISIS EN LA RESISTENCIA MECÁNICA DE LAS JUNTAS SOLDADAS

## ANALYSIS OF SCORING INCLUSIONS ESIS AND ISIS IN THE MECHANICAL RESISTANCE OF THE SOLDIER JOINTS

---

**Carlos Oswaldo Serrano Aguiar**

Docente de la Facultad de Mecánica en el Área de Materiales. ESPOCH. Riobamba. Ecuador.

E-mail: [carlos.serrano@epoch.edu.ec](mailto:carlos.serrano@epoch.edu.ec)

**Jonathan Fernando Castro Revelo**

Docente de la Facultad de Mecánica en el Área de Materiales. EPN. Quito. Ecuador.

E-mail: [jonathan.castro@epn.edu.ec](mailto:jonathan.castro@epn.edu.ec)

**Eduardo Francisco García Cabezas**

Docente de la Facultad de Mecánica en el Área de Electricidad y Electrónica.

Grupo de nuevas tecnologías. ESPOCH. Riobamba. Ecuador.

E-mail: [edugarcia\\_87@hotmail.com](mailto:edugarcia_87@hotmail.com)

**Jhonny Marcelo Orozco Ramos**

Docente de la Facultad de Mecánica en el Área de Diseño, Producción y Automatización Industrial.

Grupo de nuevas tecnologías. ESPOCH. Riobamba. Ecuador.

E-mail: [ingjmorozco@gmail.com](mailto:ingjmorozco@gmail.com)

**Recepción:** 02/04/2019 **Aceptación:** 13/09/2019 **Publicación:** 13/12/2019

### **Citación sugerida:**

Serrano Aguiar, C.O., Castro Revelo, J.F., García Cabezas, E.F. y Orozco Ramos, J.M. (2019). Análisis de las inclusiones de escoria ESIs e ISIs en la resistencia mecánica de las juntas soldadas. *3C Tecnología. Glosas de innovación aplicadas a la pyme*, 8(4), 13-31. doi: <http://doi.org/10.17993/3ctecno/2019.v8n4e32.13-31>

## RESUMEN

La investigación surge de la necesidad de verificar el Item 9.3.8. Inclusiones de escoria alargadas (ESIs) y aisladas (ISIs) de la Norma API 1104, en donde establece las dimensiones que se consideran como defectos dichas discontinuidades y por ende rechazadas las juntas soldadas, siendo estos datos solo criterios empíricos. Requiriendo así determinar cuál es la influencia del tamaño de las inclusiones de escoria en la resistencia mecánica de la soldadura. Para la investigación, se obtiene probetas de material ASTM-A36 unidas con soldadura SMAW E-6010 con diferentes dimensiones de inclusiones (ESIs e ISIs), incrustando capsulas de escoria quemada en el interior de la soldadura con dimensiones de 1, 3 y 5 mm de diámetro para ISIs y una varilla de tungsteno con un diámetro de 1,6 mm y de 25mm de longitud que simula una ESIs debido a la no fusión con el material base. Las dimensiones de las discontinuidades y la no presencia de otro tipo de discontinuidades se verifican con Radiografía Industrial. Posterior a ello se determina la resistencia mecánica, obteniendo la curva Esfuerzo-Deformación mediante ensayos de tracción. La investigación se complementa con una simulación en el software ANSYS 16.1 para poder comparar los resultados obtenidos en el laboratorio y extrapolar a diferentes dimensiones de inclusiones que no se realizó en la metodología experimental. Con un análisis estadístico se determina la curva del tamaño de discontinuidades vs la resistencia mecánica, determinando en porcentajes cuanto influye la variación del tamaño de inclusiones tanto ISIs como ESIs en la resistencia tensil.

## PALABRAS CLAVE

Inclusiones de escoria, Resistencia mecánica, Influencia del tamaño, Juntas soldadas, SMAW.

## ABSTRACT

*The present research arises from the need to verify Item 9.3.8. Elongated slag inclusions (ESIs) and isolated (ISIs) of the API Standard 1104, where it establishes the dimensions that are considered as defaults these discontinuities and therefore rejected welded joints, these data are only empirical criteria. For that reason, it is necessary to determine the influence of the size of the slag inclusions on the mechanical strength of the weld. For the investigation, samples of material ASTM-A36 joined with welding SMAW E-6010 with different dimensions of inclusions (ISIs e (ESIs), incrustated burnt slag capsules inside the weld with dimensions of 1, 3 and 5 mm diameter for ISIs and a tungsten rod with a diameter of 1.6 mm and 25 mm in length are obtained and it simulates an ESI due to non-fusion with the material base. The dimensions of the discontinuities and the non-presence of other types of discontinuities are verified with Industrial Radiography. After this, the mechanical strength is determined obtaining the Stress-Deformation curve through tensile tests. The research is complemented by a simulation in the ANSYS 16.1 software in order to compare the results obtained in the laboratory and extrapolate to different dimensions of inclusions that were not made in the experimental methodology. With a statistical analysis the curve of the size of discontinuities vs the mechanical resistance is determined, establishing in percentages how much the variation of the size of inclusions influences in ISIs and ESIs in the tensile strength.*

## KEYWORDS

*Slag inclusions, Mechanical strength, Size influence, Welded joints, SMAW.*

## 1. INTRODUCCIÓN

Los métodos para unir metales se conocen desde hace miles de años, pero durante la mayor parte de este período, la única forma de soldadura fue la forja por un herrero. Una serie de principios de soldadura totalmente nuevos surgieron a fines del siglo XIX; se podría generar suficiente corriente eléctrica para la soldadura por resistencia y por arco. La soldadura de arco se llevó a cabo inicialmente utilizando electrodos de carbono, desarrollados por “Bemados”, y fue seguido en breve por el uso de varillas de acero. El sueco Oskar Kjellberg hizo un avance importante cuando desarrolló y patentó el electrodo recubierto. El resultado de la soldadura fue sorprendente y constituyó la base de la empresa de soldadura ESAB.

El sueco Oskar Kjellberg hizo un avance importante cuando desarrolló y patentó el electrodo recubierto.

La soldadura manual de arco de metal (MMA) a menudo se denomina soldadura de arco de metal recubierto (SMAW) o soldadura con electrodo de varilla. Era la forma predominante de soldadura por fusión hasta principios de los años ochenta. Las varillas de electrodo consisten en un núcleo de alambre con una capa externa. Están hechos en una gama de diámetros de núcleo, con cada diámetro destinado a un rango de corriente particular. La soldadura implica formar un arco entre el electrodo y la pieza de trabajo, con el calor del arco funde el electrodo (es decir, el material de relleno), y fundiéndose con el recubrimiento para formar una escoria protectora (Weman, 2003).

El proceso de soldadura por arco eléctrico con electrodo revestido (SMAW) es uno de los procesos más utilizados a nivel mundial por su bajo costo, flexibilidad, portabilidad y versatilidad (Jeffus, 2012).

La Norma API 1104 establece una reglamentación sobre las discontinuidades producidas en las uniones soldadas para tuberías de oleoductos y además es reconocida a nivel mundial (Sashi, 2011).

Las bases de aceptación dados en la sección 9 de la Norma API 1104 están fundamentados sobre criterios empíricos de mano de obra y da lugar de mucha importancia a una longitud de imperfección. Tales criterios han proporcionado un registro excelente de confiabilidad en servicio de tuberías durante muchos años (API, 2003). Sin embargo, no existe un estudio profundo que fundamente teóricamente si las discontinuidades producidas en la unión de juntas soldadas sean consideradas como defectos a una determinada medida, en este estudio se definió la fundamentación de discontinuidades producidas por inclusiones de escoria.

Una inclusión de escoria es un sólido no metálico atrapado en el metal de soldadura o entre el metal de soldadura y el material base. Las inclusiones de escoria pueden ser alargadas o aisladas.

Las inclusiones de escoria alargadas (ESIs) son encontradas generalmente en las zonas de fusión. Mientras que, las inclusiones de escoria aisladas (ISIs) son inclusiones irregularmente formadas y pueden ser ubicadas en cualquier lugar de las soldaduras (API, 2013).

Una inclusión ocurre cuando un sólido con alto punto de fusión, un sólido denso o ambos son atrapados dentro del cordón de soldadura durante la solidificación. Las escorias son óxidos o sólidos no metálicos que son los encargados de proteger el charco de soldadura, sin embargo, algunas veces quedan atrapados en la soldadura (AWS, 2004).

Las inclusiones de escoria se asocian frecuentemente con falta de penetración, falta de fusión, talón excesivamente grande, soldadura en V muy estrecha y manipulación defectuosa del electrodo (Gomez, 2009).

Las inclusiones de escoria según la Norma API 1104 se pueden considerar como defectos de acuerdo con el diámetro de las tuberías:

**Si tiene un diámetro mayor a 2.375 in.:**

- a) La longitud de una escoria alargada (ESI) excede las dos pulgadas (50 mm). Las indicaciones de ESIs que se encuentran separadas aproximadamente por el ancho del pase de raíz deben ser consideradas como una indicación individual. En cambio, si la separación entre dos ESIs supera los 1/32 in (0.8 mm) deben ser consideradas como indicaciones individuales.
- b) La longitud agregada de ESIs en una longitud continua de soldadura de doce pulgadas (300 mm) sobrepasa de dos pulgadas (50 mm).
- c) El ancho de una ESI excede 1/16 in (1.6 mm).
- d) La longitud agregada de ISI excede de media pulgada en una longitud continua de doce pulgadas (300 mm) de cordón de soldadura.
- e) El ancho de una ISI sobrepasa de 1/8 in (3mm).
- f) Si más de cuatro ISIs con un ancho máximo de 1/8 (3 mm) están presentes en una longitud continua de 12 pulgadas (300 mm) de soldadura.
- g) La longitud agregada de ESIs o ISIs excede el 8% de la longitud soldada.

**Si tiene un diámetro menor a 2.375 in.:**

- La dimensión sobrepasa el un cuarto de pulgada (6 mm) y la densidad en cualquier porción del quemón excede a la del material base adyacente
- La dimensión máxima sobrepasa en dimensión al espesor más delgado de la junta y la densidad en la porción del quemón excede a la del material base adyacente.
- La densidad de dos quemones o más de cualquier dimensión excede a la densidad del material base adyacente.

- La longitud agregada de indicaciones ESI e ISI excede del 8% de la longitud soldada (Castro y Serrano, 2016).

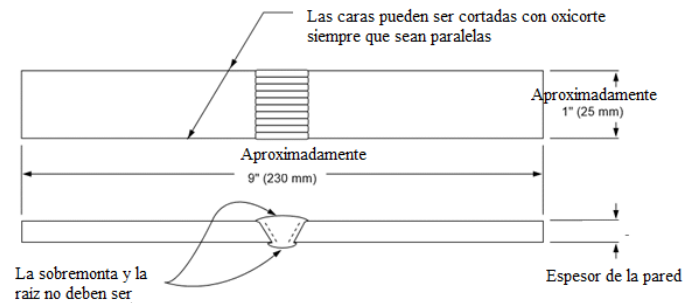
Para la investigación se requiere analizar el literal g) y d) respectivamente de las inclusiones de escoria, que corresponden al 8% de tamaño de la discontinuidad con referencia a la longitud de soldadura y comprobar si se reduce o no la resistencia a la tracción de las probetas con ese tamaño de discontinuidad, además se obtiene probetas con diferentes medidas de inclusiones ya sean ESIs o ISIs dentro de la soldadura para determinar cuánto influyen en la resistencia tensil, verificando mediante inspección visual que no exista otro tipo de discontinuidades que afecten a la resistencia del material. Además, se verifica la presencia y las medidas de inclusiones de escoria mediante radiografía industrial.

## 2. DESARROLLO

### 2.1. MATERIALES Y OBTENCIÓN DE PROBETAS

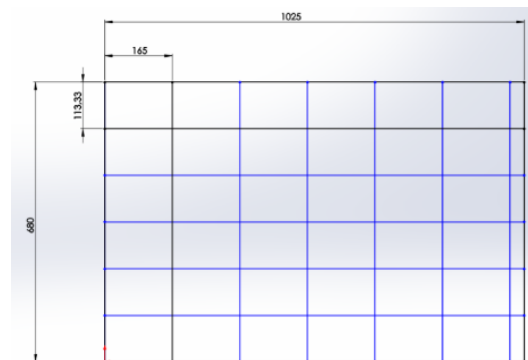
Para la elaboración de las probetas se utilizó acero estructural ASTM A36 de 0,5 in. de espesor con un bisel tipo V y soldadura a tope con un procedimiento de soldadura elaborado y calificado en el Laboratorio de análisis de esfuerzos y vibraciones de la Escuela Politécnica Nacional (Ecuador). Las probetas según la Norma API 1104 deben tener 9 in. de longitud y 1 in. de ancho como se muestra en el Gráfico 1. Se requiere cortar placas de 4.5 in. de longitud para unir mediante soldadura SMAW con inclusiones de escoria incrustadas en la parte interna del cordón y obtener probetas con longitud de 9 in.

Para la elaboración de las probetas se utilizó acero estructural ASTM A36 de 0,5 in. de espesor con un bisel tipo V y soldadura a tope con un procedimiento de soldadura elaborado y calificado en el Laboratorio de análisis de esfuerzos y vibraciones de la Escuela Politécnica Nacional (Ecuador).



**Gráfico 1.** Medidas de las probetas. **Fuente:** (API, 2013).

Para obtener un cordón homogéneo y sin defectos ulteriores a las inclusiones de escoria es necesario dimensionar placas (Gráfico 2) para luego extraer probetas mediante corte en frío sin afectar por calentamiento a las juntas soldadas. Sin embargo, la Norma ASME sección IX especifica que para extraer probetas se debe tener en cuenta espacios libres desechables al inicio y fin del cordón de soldadura con longitudes de 1 in. a cada extremo (ASME, 2003). Para el análisis de esfuerzos de las ISIs se realizaron de tres medidas distintas (1, 3 y 5 mm), teniendo 12 probetas en total (4 de cada una) que corresponden al 4, 12 y 20 % de la longitud total de soldadura (25mm), mientras que para las ESIs se requiere 4 probetas con longitud de defecto de 1 in. (100% de longitud de soldadura) (API, 2003).



**Gráfico 2.** Medidas de las placas. **Fuente:** (Castro y Serrano, 2016).



El biselado de placas según el WPS es de  $30^\circ$  dando un ángulo de surco de  $60^\circ$ . Además, el procedimiento calificado indica una altura de talón de 2 mm, realizado todo en una máquina herramienta limadora. La soldadura SMAW se realizó con 1 pase de raíz y 4 pases de relleno con E-6010 con una resistencia tensil de 60Ksi que es similar a la del acero estructural ASTM A36 y no afecta los resultados.

## 2.2. OBTENCIÓN DE INCLUSIONES DE ESCORIA

Para las inclusiones de escoria alargadas (Esis) se incrusto alambre rígido de tungsteno con un punto de fusión de  $3423^\circ\text{C}$  que al no fusionar con el acero de las placas simula el comportamiento de una inclusión de escoria. El alambre se incorporó en el segundo pase de relleno con una longitud total entre las placas (Figura 1), obteniendo longitudes de ESIs de 1 in. de longitud en cada probeta y con un diámetro de 1.6 mm de inclusión (alambre).



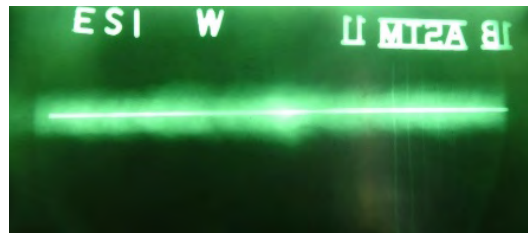
**Figura 1.** Alambre rígido de Tungsteno en el cordón. **Fuente:** (Castro y Serrano, 2016).

Para las inclusiones de escoria aisladas se obtuvo de 3 medidas distintas (1, 3 y 5 mm), incorporando en el segundo pase de relleno escoria quemada y pulverizada en taladros realizados con las mismas dimensiones (Figura 2).

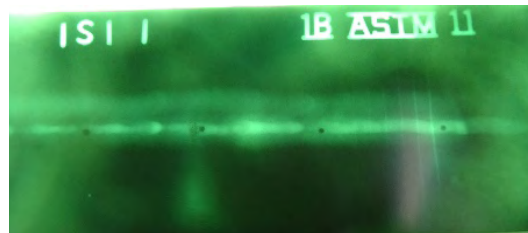


**Figura 2.** Escoria quemada y pulverizada en taladro (5mm). **Fuente:** (Castro y Serrano, 2016).

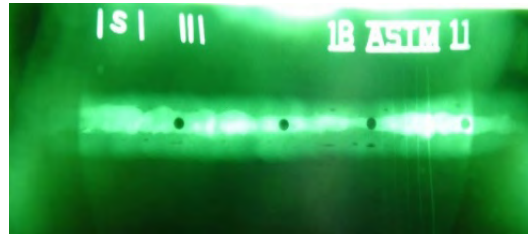
La verificación de la presencia de las discontinuidades y sus dimensiones tanto ESIs como ISIs se realizó mediante radiografía industrial (Figura 3, 4, 5, 6).



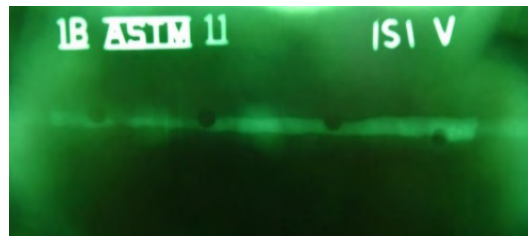
**Figura 3.** Radiografía de una ESI. **Fuente:** (Castro y Serrano, 2016).



**Figura 4.** Radiografía de una ISI (1mm). **Fuente:** (Castro y Serrano, 2016).



**Figura 5.** Radiografía de una ISI (3mm). **Fuente:** (Castro y Serrano, 2016).



**Figura 6.** Radiografía de una ISI (5mm). **Fuente:** (Castro y Serrano, 2016).

### 3. ENSAYO DE TRACCIÓN

Se utiliza la Máquina Universal con una velocidad de 1mm/s, obteniendo la curva Esfuerzo-Deformación de cada discontinuidad. El esfuerzo se determina mediante la fórmula:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad \text{Ec.1}$$

Donde:

F: Fuerza máxima de resistencia a tracción [lb].

A: Área de la sección transversal inicial de la probeta [in<sup>2</sup>].

Para medir la resistencia tensil de cada defecto se realiza un análisis estadístico y se determina la media aritmética, estos resultados se comparan con uniones soldadas que no tienen discontinuidades que se

específica en el procedimiento de soldadura calificado, identificando el porcentaje de reducción de resistencia tensil con diferentes tamaños de inclusiones de escoria.

## 4. SIMULACIÓN

Los resultados obtenidos en el laboratorio se deben validar mediante simulación, verificando que son correctos y extrapolando a más dimensiones de inclusiones de escoria para obtener una curva de reducción de resistencia mecánica de las probetas con discontinuidades. El software utilizado es ANSYS Workbench 16.1. El criterio de falla (Maximum equivalent plastic strain) es el 17% (Gao, Krishnamurthy, Tandon, y Arumugam, 2013).

Se considera un material bilineal isotrópico (ASTM A36) con un límite de fluencia 36000 psi. (ASTM INTERNATIONAL, 2014) y un módulo tangente de  $1,45 + E9$  según la base de datos de ANSYS (Castro y Serrano, 2016).

La geometría de las discontinuidades en las probetas se importa desde Solidworks en .step. La malla creada para la simulación es por default del software con configuración en el cordón de soldadura y en los defectos internos para garantizar resultados exactos.

Las condiciones de borde para la simulación constan de un extremo de la probeta anclado y el otro con libre movimiento con una sobredimensión de elongación (5cm) para visualizar la fractura del cordón.

El desarrollo de la simulación se realiza en la interfaz LSDYNA y los resultados gráficos y numéricos se visualiza mediante la interfaz LSDYNA LS-PrePost4.2 Beta.

## 5. RESULTADOS

Para las inclusiones de escoria aisladas se tiene 4 probetas con cada dimensión (1, 3 y 5mm) denominadas ISIx-Ty, donde x representa la dimensión de cada inclusión y “y” representa el número de probeta. Los resultados obtenidos en el laboratorio se muestran en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Resultados del ensayo de tracción realizado a las probetas con ISI.

Id.	Ancho promedio	Espesor Promedio	Carga máxima registrada	Resistencia a la tracción	Resistencia promedio	Coef. de Variación
	mm	mm	lbf	ksi	ksi	%
ISI1-T1	26,15	11,38	29751	64,50	64,73	0,26
ISI1-T2	26,24	11,95	31446	64,70		
ISI1-T3	27,01	11,58	31415	64,80		
ISI1-T4	26,81	11,40	30745	64,90		
ISI3-T1	26,85	12,15	32564	64,40	64,50	0,13
ISI3-T2	26,63	11,53	30697	64,50		
ISI3-T3	26,00	11,67	30335	64,50		
ISI3-T4	26,09	11,53	30121	64,60		
ISI5-T1	26,30	11,68	28140	59,10	59,18	0,50
ISI5-T2	25,89	11,35	27146	59,60		
ISI5-T3	25,96	11,48	27208	58,90		
ISI5-T4	25,88	11,69	27714	59,10		

**Fuente:** (Castro y Serrano, 2016).

La resistencia a la tracción en las probetas con inclusiones de escoria de 1 y 3 mm. No representa variación en comparación con la probeta sin discontinuidades (64 Ksi del WPS), mientras que las probetas con 5mm. de inclusión de escoria se reduce de 64Ksi a 59 Ksi.

Para las inclusiones de escoria alargadas se tiene 4 probetas con una longitud de alambre de tungsteno de 1 in (25mm). Los resultados obtenidos en el laboratorio se muestran en la Tabla 2.

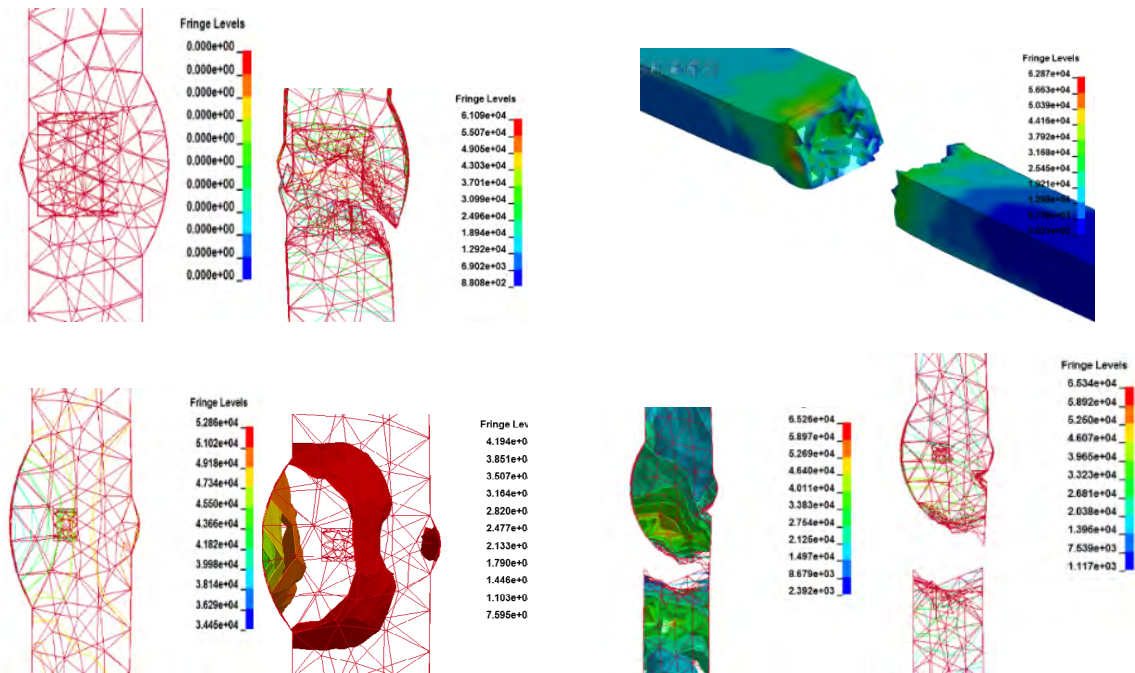
**Tabla 2.** Resultados del ensayo de tracción realizado a las probetas con ISI.

Id.	Ancho promedio	Espesor Promedio	Carga máxima registrada	Resistencia a la tracción	Resistencia promedio	Coef. de Variación
	mm	mm	lbf	ksi	ksi	%
ESI25-T1	25,76	11,88	23765	50,10	49,98	0,41
ESI25-T2	25,46	11,76	23112	49,80		
ESI25-T3	26,16	11,65	23525	49,80		
ESI25-T4	26,12	11,48	23332	50,20		

**Fuente:** (Castro y Serrano, 2016).

La resistencia a la tracción en las probetas con inclusiones de escoria alargadas tiene una resistencia a la tracción de 49 Ksi. Que reduce considerablemente la resistencia mecánica de 64 Ksi de una probeta sin discontinuidades.

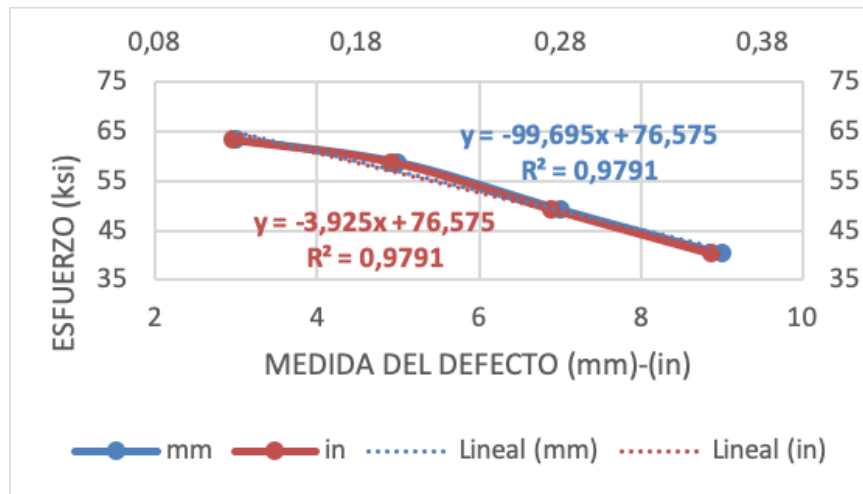
Estos resultados del laboratorio se compararán con la simulación y se determina que el error es menor al 5%. Esto indica que se pueden extrapolar más dimensiones de ISIs (3, 5, 7 y 9 mm) dentro del software para determinar su comportamiento y determinar la curva de influencia del tamaño de las ISIs en la resistencia mecánica. La fractura simulada se muestra en el Figura 7 de algunas muestras.



**Figura 7.** Simulación ESI (9 y 1mm respectivamente). **Fuente:** (Castro y Serrano, 2016).

La fractura de la ISI de 9mm empieza en la discontinuidad, mientras que la fractura de una ISI de 1mm se produce en el cambio de sección de la sobremonta del cordón de soldadura.

La curva de influencia del tamaño de las ISIs en la resistencia tensil se indican en el Gráfico 3.

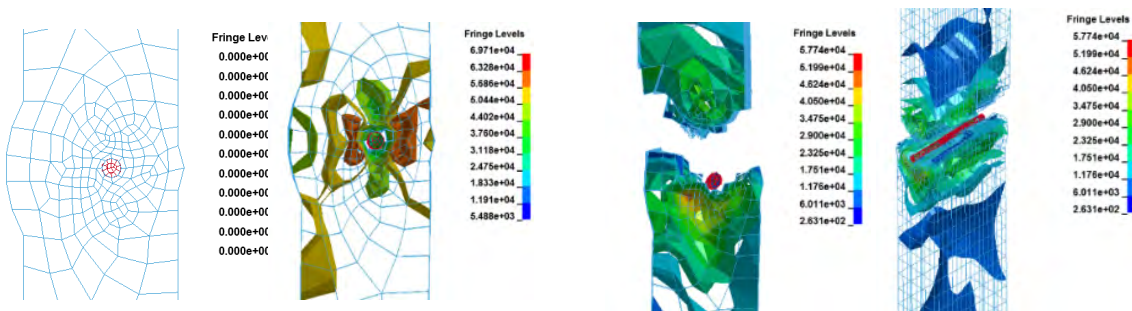


**Gráfico 3.** Esfuerzo vs Medida de ISIs. **Fuente:** (Castro y Serrano, 2016).

A medida que el tamaño de las ISIs aumenta la resistencia disminuye.

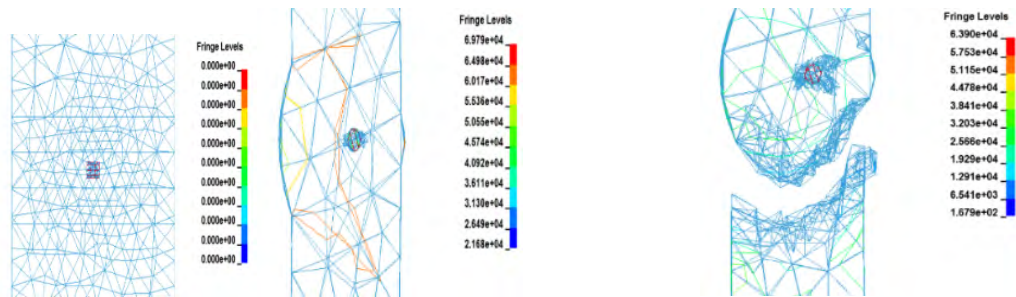
Para las ESIs se compara los resultados obtenidos en el laboratorio (con una longitud de 1in. de inclusión de escoria alargada) con la simulación y la misma longitud de ESIs obteniendo un error menor al 4%. Con estos resultados se extrapola a más dimensiones de ESIs en la simulación (25, 24, 14, 8 y 2 mm.)

La fractura de una ESI de 25 mm y de 2mm se muestra en el Figura 8.



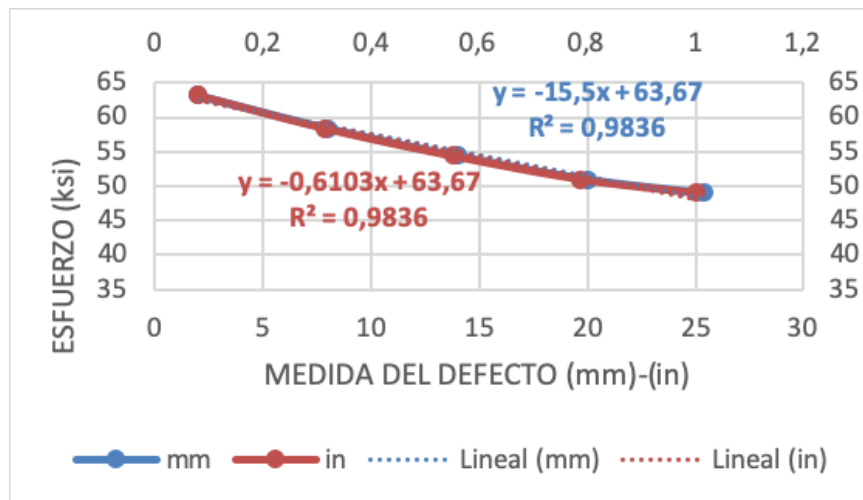
**Figura 8a.** Fractura de las probetas con ESIs (25 y 2mm respectivamente). **Fuente:** (Castro y Serrano, 2016).





**Figura 8b.** Fractura de las probetas con ESIs (25 y 2mm respectivamente). **Fuente:** (Castro y Serrano, 2016).

A medida que aumenta el tamaño de una inclusión alargada la resistencia a la tracción se reduce considerablemente (Gráfico 4).



**Gráfico 4.** Esfuerzo vs Medida de ESIs. **Fuente:** (Castro y Serrano, 2016).

## 6. CONCLUSIONES

Al comparar los ensayos realizados en el laboratorio con los resultados obtenidos en las simulaciones tienen un error máximo al 5%, permitiendo extrapolar más dimensiones de inclusiones de escoria en la simulación y obtener la curva de influencia del tamaño de las ISIs y ESIs en la resistencia mecánica.

Una inclusión aislada es permitida en un proceso de soldadura hasta una dimensión de 3mm. según al Norma API 1104, el estudio fundamenta que con una inclusión de escoria de 3mm no reduce la resistencia tensil de una junta soldada.

Inclusiones aisladas de 5, 7 y 9 mm de dimensión representan una caída de la resistencia mecánica de 10, 24% y 38% respectivamente, en comparación con los 64 Ksi de la probeta ensayada sin discontinuidades, lo cual afectara considerablemente a juntas soldadas y debiendo desechar el proceso de soldadura y catalogar como defecto dicha discontinuidad.

Las inclusiones alargadas son aceptables hasta un 8% de longitud de una inclusión respecto a la longitud del cordón de soldadura (2mm respecto a 25mm) que no reduce la resistencia mecánica.

Con mayores longitudes de inclusiones alargadas se reduce la resistencia a la tracción según el Gráfico 4, si se tiene una inclusión alargada que corresponde al 100% de longitud en comparación con la dimensión del cordón de soldadura se reduce un 27% la resistencia mecánica.

Este tipo de estudio contribuye al técnico encargado para realizar un control de calidad en las pegas de tuberías de transporte de oleoducto, dando una idea de cuál es la reducción de resistencia mecánica según el tamaño de inclusión encontrada en el interior de la soldadura. Permitiendo decidir si se debe reconstruir la pega de tubería o se debe aceptar en base a un fundamento técnico-científico.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- API.** (2003). *Welding of Pipelines and related Facilities*. Estados Unidos: American Petroleum Institute.
- API.** (2013). *Welding of pipelines and related facilities*. Estados Unidos: American Petroleum Institute.
- ASME.** (2003). *Qualification Standard for welding and brazing procedures, welders, brazers, and welding and brazers operators*. Estados Unidos: ASME.
- ASTM INTERNATIONAL.** (2014). Standard specification for carbon structural steel. *ASTM*, 1-3.
- AWS.** (2004). *Welding handbook*. Volume 2. Estados Unidos: American Welding Society.
- Castro, J., y Serrano, C.** (2016). Tesis previo a la obtencion del grado de Magister en Ingenieria Mecánica con mención en Materiales y procesos de manufactura. *Influencia del tamaño de las discontinuidades en las propiedades mecánicas de las uniones soldadas bajo la Norma API1104*. Quito, Pichincha, Ecuador: Escuela Politécnica Nacional.
- Gao, M., Krishnamurthy, R., Tandon, S., y Arumugam, U.** (2013). Critical Strain Based Ductile Damage Criterion and its Application to Mechanical Damage in Pipelines. *13th International Conference on Fracture*, 1-10.
- Gomez, H.** (2009). *Discontinuidades y defectogia de soldadura*. Colombia: Sena.
- Jeffus, L.** (2012). *Welding: Principles and Aplications*. Estados Unidos: Delmar cengage Learnig.
- Sashi, E.** (2011). *Pipeline planning and construction field manual*. Estados Unidos: Elsevier.
- Weman, K.** (2003). *Welding Processes Handbook*. Cambridge, England: Woodhead Publishing Ltd.