



UNIVERSIDAD DE HOLGUÍN

OSCAR LUCERO MOYA

Avenida XX Aniversario, Vía Guardalavaca, Piedra Blanca, Holguín, Cuba. Telf. 48 2501- 48 2380. www.uho.edu.cu

FACULTAD DE INGENIERÍA
CENTROS DE ESTUDIOS CAD/CAM

TRABAJO DE DIPLOMA EN OPCIÓN AL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

**SIMULACIÓN DEL ENSAYO A TRACCIÓN DE UNA UNIÓN
SOLDADA A TOPE DE ACERO AISI 1015 Y ELECTRODO
E6013**

AUTOR: Ramón Antonio Mulet Ochoa

TUTORES:

M. Sc. Ing. Pavel Michel Almaguer Zaldivar, Prof. Auxiliar

M. Sc. Ing. José Alejandro Martínez Grave de Peralta, Prof. Auxiliar

Mayo, 2015



UNIVERSIDAD DE HOLGUÍN

OSCAR LUCERO MOYA

Avenida XX Aniversario, Vía Guardalavaca, Piedra Blanca, Holguín, Cuba. Telf. 48 2501- 48 2380. www.uho.edu.cu

DEDICATORIA

A toda mi familia por siempre apoyarme en especial quiero agradecer a mis padres, mis hermanas, profesores y amigos.

AGRADECIMIENTOS

A toda mi familia por siempre apoyarme, en especial quiero agradecer a mis padres y hermanas por guiarme y confiar en mí en todo momento.

A mis tutores Pavel Almaguer Zaldivar y José Martínez Grave de Peralta por su sincera amistad y sus palabras de aliento en el desarrollo de mi tesis de grado.

A todos mis amigos.

RESUMEN

El ensayo a tracción permite determinar las propiedades mecánicas de los materiales utilizados en la fabricación de máquinas y estructuras. En este trabajo se presenta la simulación numérica del ensayo a tracción de una unión soldada a tope de acero AISI 1015 y electrodo E6013.

Está estructurado en introducción y dos capítulos. El primero de ellos trata sobre la fundamentación teórica necesaria para desarrollar esta tesis. El segundo capítulo muestra la definición del modelo geométrico para desarrollar la simulación numérica, así como el estudio para simular el ensayo a tracción. Se obtuvo la respuesta de las tensiones y los desplazamientos. Mediante la combinación de ambas curvas de respuesta se construyó un gráfico de tensión – deformación que tiene semejanza con los reportados en la bibliografía.

ABSTRACT

A tensile test allows to obtain the mechanical properties of the materials used in the machines and structures manufacturing. In this paper a welded joint tensile test numerical simulation is showed. AISI 1015 steel and E6013 electrode are the materials used in the joint.

It is structured in introduction and two chapters. First of them deals about the theory to develop this final work. In the second chapter are the geometric model definition to make the numerical simulation. Tensile test was simulated. Stresses and displacement response curves were obtained. With the combination of the both curve a stress – strain graphic was plotted. This one is similar to someone that are in the bibliography.

ÍNDICE

	Página
Introducción.....	6
Capítulo 1. Fundamentación teórica de la tesis.....	10
1.1. Introducción al capítulo.....	10
1.2. Propiedades mecánicas de los materiales.....	10
1.3. Ensayo de tracción. Características y objetivos.....	13
1.4. Modelos constitutivos del material.....	17
1.5. Uniones soldadas a tope.....	18
1.6. Software utilizado para el desarrollo de la tesis.....	19
Capítulo 2. Simulación del ensayo a tracción de la unión soldada.....	21
2.1. Introducción al capítulo.....	21
2.2. Modelo geométrico.....	21
2.3. Mallado del modelo.....	22
2.4. Caracterización del material base.....	23
2.4.1. Caracterización del material de aporte.....	24
2.5. Cargas y restricciones aplicadas al modelo.....	25
2.6. Análisis de resultados.....	27
Conclusiones.....	34
Recomendaciones.....	35
Bibliografía.....	36
Anexos.....	38

Introducción

La caracterización mecánica de los materiales ingenieriles es siempre un tema de interés de ingenieros e investigadores. Muchos materiales, cuando se encuentran en servicio están sometidos a cargas, en estos casos se hace necesario conocer las características del material y diseñar el elemento de tal forma que cualquier deformación resultante no sea excesiva y no ocurra la fractura del material. El comportamiento mecánico de un material refleja su respuesta ante la aplicación de una carga. Por tanto las propiedades mecánicas son aquellas propiedades de un material que están asociadas con una reacción elástica o inelástica cuando se aplica un esfuerzo, o que envuelven la relación entre tensión y deformación. Entre las propiedades mecánicas más importantes se encuentran los límites de fluencia y de rotura, el módulo de elasticidad, entre otras. De acuerdo al destino de servicio de la pieza, los materiales para las distintas aplicaciones se eligen porque poseen las propiedades mecánicas que le permitan responder ante las distintas sollicitaciones.

Las propiedades mecánicas de los materiales se obtienen realizando ensayos de laboratorio. En esos ensayos es necesario tener en cuenta los distintos factores que pudieran influir en los resultados que se obtengan, así como reproducir las condiciones a las que va trabajar la pieza. Es posible que la carga sea de tracción, de compresión, torsional, de flexión o de cizallamiento, y su magnitud puede ser constante en el tiempo, o puede fluctuar continuamente. El tiempo de aplicación puede ser desde tan sólo una fracción de segundo o extenderse por muchos años. También las temperaturas de servicio pueden ser un factor importante a la hora de determinar el comportamiento mecánico de un material.

Las propiedades mecánicas de los materiales son las características que describen la forma en que un material se comporta ante un sistema de fuerzas aplicadas. El conocimiento de estas propiedades es de vital importancia para todos los profesionales encargados del diseño y explotación de máquinas y estructuras.

El comportamiento mecánico de los materiales se describe a través de sus propiedades mecánicas, que son el resultado de ensayos simples e idealizados.

Estos ensayos están diseñados para representar distintos tipos de condiciones de carga. Las propiedades de un material que aparecen reportadas en diversos manuales, son los resultados de estas pruebas. En consecuencia, se debe recordar siempre, que los valores de los manuales son valores promedio, obtenidos a partir de pruebas ideales y, por tanto, deberán ser utilizados con cierta precaución. El ensayo a tracción estática describe la resistencia de un material a un esfuerzo aplicado lentamente.

Es muy importante para los ingenieros y técnicos conocer las propiedades mecánicas de los materiales estructurales. Esto permite predecir el comportamiento de los elementos de máquina y estructuras, incluso determinar sus dimensiones para que resistan las solicitaciones que surjan durante su vida útil, teniendo siempre en cuenta dos aspectos muy importantes: la economía y el respeto al medio ambiente.

Como antecedente de este trabajo se plantea:

En la Universidad de Holguín se está desarrollando el proyecto “Caracterización mecánica y a fatiga de uniones soldadas” (Código 24/2013) dirigido por uno de los tutores de este trabajo donde se pretende caracterizar mediante métodos experimentales uniones soldadas y realizar la simulación numérica de estos experimentos.

El **Problema de investigación** que da comienzo a esta tesis es:

En ocasiones no se puede realizar el ensayo a tracción de uniones soldadas porque no se cuenta con los materiales y medios para fabricar las probetas.

El **Objeto** que se estudia es:

La unión soldada a tope de acero AISI 1015 y electrodo E6013 de fabricación cubana utilizada en la fabricación de maquinaria agrícola.

El **Campo de acción** es:

El comportamiento de la unión soldada objeto de estudio solicitada por una carga estática de tracción.

La **Hipótesis** que se plantea en esta investigación es:

Si se logra simular el ensayo a tracción de una unión soldada a tope de acero AISI 1015 y electrodo E6013, entonces será posible predecir mediante la simulación

numérica el comportamiento de piezas fabricadas mediante estas uniones. Esto también permitirá que los estudiantes conozcan el ensayo a tracción antes de presentarse a las prácticas de laboratorio con lo que se mejorará el entendimiento del experimento, con la consiguiente mejora del proceso de enseñanza – aprendizaje.

El **Objetivo general** de esta investigación:

Simular el ensayo a tracción de una unión soldada a tope de acero AISI 1015 y electrodo E6013 cubano.

Objetivos Específicos:

1. Definir el modelo constitutivo que se utilizará para simular el experimento.
2. Caracterizar los materiales que componen la unión.
3. Construir la curva tensión – deformación obtenida mediante la simulación numérica.
4. Comparar la curva tensión - deformación simulada con ensayos reales.

Tareas de la investigación:

1. Búsqueda de bibliografía e información sobre el tema tratado.
2. Estudio de las características mecánicas y de los modelos constitutivos de los materiales.
3. Simular el comportamiento de la unión soldada solicitadas por cargas de tracción.
4. Buscar resultados de ensayos a uniones similares.
5. Elaborar el informe del trabajo de diploma.

Métodos de Investigación.

1.- Empíricos:

- **Consulta de expertos:** se realizaron entrevistas a profesores e ingenieros de la producción con el objetivo de obtener información sobre las uniones soldadas y su comportamiento mecánico.

- **Método de observación:** determina las posibles soluciones al problema planteado analizando las características de las probetas y los experimentos.

2.- Teóricos:

- **Histórico – lógico:** que facilitó conocer los antecedentes de la investigación y como continuarla.

- **Análisis y Síntesis:** Para el estudio de los aspectos teóricos que sustentan el trabajo y el análisis de los resultados.

Resultados esperados:

Con la realización de este trabajo se podrá simular el ensayo a tracción de una unión soldada, con lo que es posible ahorrar tiempo en el diseño y probetas, al no tener que realizar el experimento. Además permite que los estudiantes conozcan el experimento antes de ir al laboratorio, con lo que se puede mejorar el proceso de enseñanza – aprendizaje y el conocimiento del comportamiento de las uniones estructurales.

Capítulo 1. Fundamentación teórica de la tesis.

1.1. Introducción al capítulo

En este capítulo se analiza el comportamiento de los materiales solicitados a cargas axiales. Se describe el ensayo a tracción. Existen diferentes modelos constitutivos para describir la respuesta de los materiales ingenieriles. Se plantean las características de cada uno y se profundiza en el modelo bilineal. También se definen las uniones soldadas a tope, así como las características del programa *SolidWorks* que se tuvieron en cuenta para realizar su elección en el desarrollo de esta investigación.

1.2. Propiedades mecánicas de los materiales

El comportamiento mecánico de los elementos ingenieriles solicitados por cargas de tracción ha sido descrito por numerosos autores (Ibañez, 1966; Silovsky, 1975; Stiopin, 1976; Feodosiev, 1979; Megson, 1983, Álvarez, 1984; Fernández, 1982; Beer, 1982).

En el caso de la tracción, en el que las fuerzas exteriores actúan a lo largo del eje de la barra (Fig. 1.1.) para obtener las fuerzas interiores (fuerzas axiales) se utiliza el método de las secciones (Stiopin, 1976, Fernández, 1982)..

Se traza una sección. Por ejemplo la sección *a – a*, y se analiza el equilibrio de la parte separada inferior. Se sustituye la acción de la parte superior sobre la inferior por una fuerza axial que inicialmente se dirige hacia fuera de la sección; es decir, se supone que esta fuerza es de tracción. Se plantea, ahora, la ecuación de equilibrio. Para ello, se proyectan todas las fuerzas que actúan sobre la parte inferior, sobre el eje paralelo al de la barra y se iguala a cero la suma de dichas proyecciones. Así se obtiene:

$$N_1 + P_1 - P_2 = 0$$

Es decir, $N_1 = P_2 - P_1$. Como $P_1 > P_2$, la fuerza normal N_1 será de compresión.

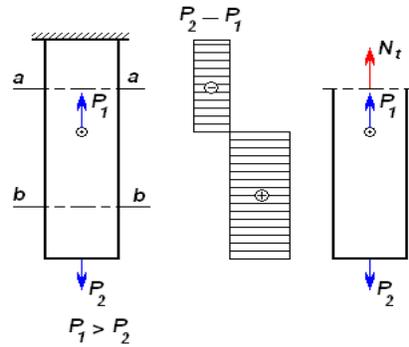


Fig. 1.1. Diagrama para el estudio de una barra traccionada. (Fernández, 1982)

Si se traza sobre la superficie de una barra prismática una red de líneas rectas, unas paralelas y otras perpendiculares al eje de la barra (Fig. 1.2 a), y si se somete la barra a una fuerza de tracción, se observa que, después de la deformación, las líneas de la red permanecen ortogonales entre sí en toda la superficie, excepto una pequeña zona, próxima al punto de aplicación de la fuerza, de la cual se prescinde mientras que las distancias entre las rectas varían (Fig. 1.2 b). Todas las rectas horizontales, la recta cd , por ejemplo, se desplazan hacia abajo, permaneciendo, sin embargo, rectas y horizontales. Es de suponer que en el interior de la barra tiene lugar el mismo fenómeno, es decir, que *las secciones de las barras que eran planas y perpendiculares a su eje, antes de la deformación, permanecen planas y normales a este después de ocurrir la deformación*. Esta hipótesis, que tiene gran importancia, se conoce como *hipótesis de las secciones planas o hipótesis de Bernoulli*.

Los ensayos confirman las fórmulas en que se basan esta hipótesis.

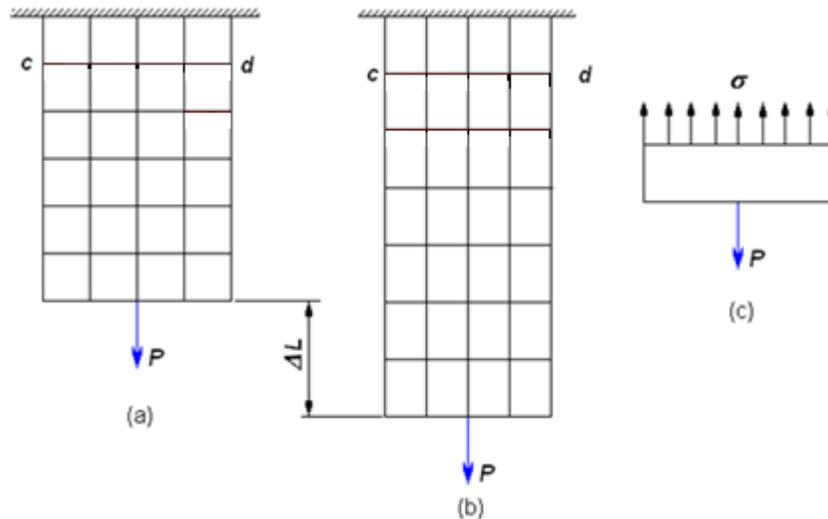


Fig. 1.2. Comportamiento de las tensiones en la tracción. (Stiopin, 1978).

Esto permite suponer que en las secciones transversales de la barra actúan solamente tensiones normales, distribuidas uniformemente.

De la ecuación de equilibrio de la parte de la barra representada en la Fig. 1.2 c, se obtiene:

$$\Sigma F_z = 0;$$

$$-\sigma A + P = 0$$

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (1.1)$$

Donde:

σ : Es la tensión a tracción en (N/m^2) o múltiplos.

P : Es la fuerza externa en (N) o múltiplos.

A : Es el área de la sección transversal en (m^2) .

En el caso general, cuando sobre la parte separada actúan varias fuerzas, en el numerador de la ecuación (1.1), se coloca la sumatoria algebraica de las proyecciones de esas fuerzas sobre el eje de la barra. Esta suma es igual a la fuerza axial (N) , es decir:

$$\sigma = \frac{N}{A} \quad (1.2)$$

Los ensayos demuestran que al estirar una barra su longitud aumenta, mientras que las dimensiones transversales disminuyen (Fig. 1.2 b).

Para muchos materiales se establece experimentalmente que, cuando las cargas se encuentran entre ciertos límites, entre la deformación unitaria ε y la tensión σ existe la relación siguiente:

Hasta el límite de proporcionalidad se establece para muchos materiales que:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (1.3)$$

Donde:

E : Es el módulo de elasticidad del material.

$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$: Es el alargamiento (acortamiento) unitario (específico) de la barra.

Δl : Es el alargamiento (acortamiento) total o absoluto de la barra. (Fig. 1.3.) Como se muestra también en la figura 1.3, cuando la barra es traccionada y aumenta su longitud, las secciones transversales sufren una disminución. La relación entre las deformaciones longitudinales y transversales viene dada por el coeficiente de Poisson μ .

La relación entre las tensiones normales y las deformaciones lineales unitarias se denomina *Ley de Hooke*. Su enunciado es: *las deformaciones unitarias lineales son proporcionales a las tensiones normales*. En el tramo recto de la figura 1.4. se presenta una representación esquemática de la misma.

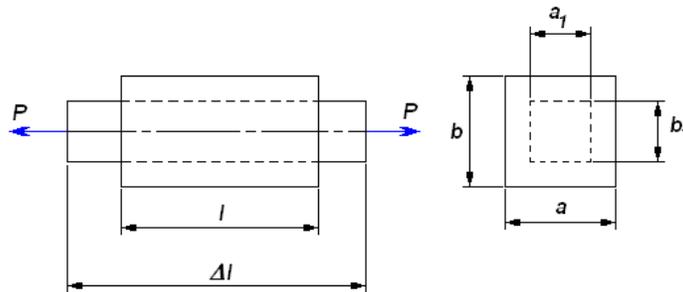


Fig. 1.3. Representación de las deformaciones y desplazamientos. (Feodosiev, 1979)

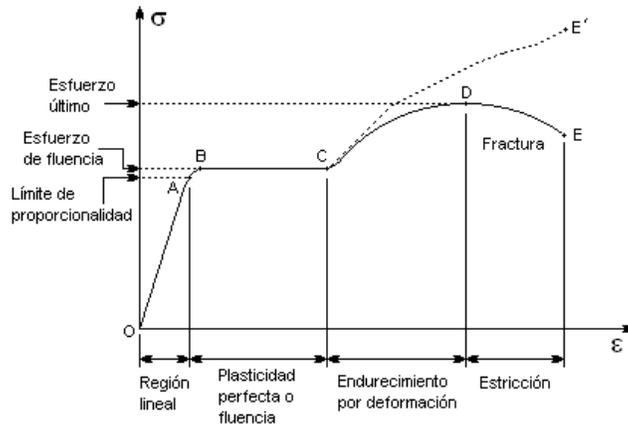


Fig. 1.4. Gráfico de tensión – deformación de un material dúctil. (Stiopin, 1978, Fernández, 1982)

1.3. Ensayo de tracción. Características y objetivos

Existen diversas teorías acerca de las diferentes respuestas de los materiales a los distintos regímenes de carga, las que permiten predecir el comportamiento de los mismos durante su vida útil, pero en su desarrollo juega un papel importante la experimentación que permite validar las condiciones aceptadas para la teoría en cuestión y la veracidad de los modelos asumidos, actividad que se encuentra más allá de la valoración de los expertos, sino que se basa fundamentalmente en los experimentos científicos, los que posibilitan de una forma más segura la efectividad y comportamiento de los materiales a prueba.

El propósito del ensayo a tracción es analizar el comportamiento de diversos materiales al ser sometidos a un esfuerzo de tensión uniaxial. Consiste en someter a una probeta normalizada fabricada con dicho material a un esfuerzo axial de tracción creciente hasta que se produzca la rotura de la probeta. Este ensayo mide la resistencia de un material a una fuerza estática o aplicada lentamente. Las velocidades de deformación en un ensayo de tensión deben ser muy pequeñas.

El ensayo se realiza en una máquina universal tradicional (Fig. 1.5) y la operación consiste en someter una probeta (Fig. 1.6) a una carga monoaxial gradualmente creciente (es decir, estática) hasta que ocurra la falla.



Fig. 1.5. Máquina universal de ensayos MTS 810. (Almaguer, 2014).

Las probetas para ensayos de tensión se fabrican en una variedad de formas. La sección transversal de la probeta puede ser redonda, cuadrada o rectangular. Para la mayoría de los casos, en metales, se utiliza comúnmente una probeta de sección redonda (NC 04 – 01). Para láminas y placas usualmente se emplea una probeta plana.

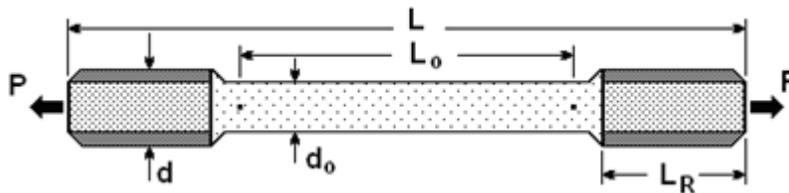


Fig. 1.6. Probeta para ensayo de tracción. (Stiopin, 1978)

La transición del extremo a la sección reducida debe hacerse por medio de un bisel adecuado para reducir la concentración de tensiones causadas por el cambio brusco de sección.

La tensión axial σ en la probeta se calcula dividiendo la carga P entre el área de la sección transversal, por la fórmula 1.2.

Cuando en este cálculo se emplea el área inicial de la probeta, el esfuerzo resultante se denomina tensión nominal (tensión convencional o tensión ingenieril). Se puede calcular un valor más exacto de la tensión axial, conocido como tensión.

La deformación unitaria axial media se determina a partir del alargamiento medido “ δ ” entre las marcas de calibración, al dividir δ entre la longitud calibrada L_0 . Si se emplea la longitud calibrada inicial se obtiene la deformación unitaria nominal (ε) (1.4).

$$\varepsilon = \frac{\delta}{L_0} \dots\dots\dots(1.4)$$

Después de realizar una prueba de tensión y de establecer el esfuerzo y la deformación para varias magnitudes de la carga, se puede trazar un diagrama de esfuerzo contra deformación. Tal diagrama es característico del material y proporciona información importante acerca de las propiedades mecánicas y el comportamiento típico del material.

En la figura 1.4 se muestra el diagrama tensión deformación representativo de los materiales dúctiles. El diagrama empieza con una línea recta desde O hasta A. En esta región, el esfuerzo y la deformación son directamente proporcionales, y se dice que el comportamiento del material es lineal. Después del punto A ya no existe una relación lineal entre el esfuerzo y la deformación, por lo que el esfuerzo en el punto A se denomina límite de proporcionalidad. La relación lineal entre el esfuerzo y la deformación puede expresarse mediante la ecuación (1.3). El módulo de elasticidad es la pendiente del diagrama tensión – deformación en la región linealmente elástica y su valor depende del material particular que se utilice.

Al incrementar la carga más allá del límite de proporcionalidad, la deformación empieza a aumentar más rápidamente para cada incremento en esfuerzo. La curva de esfuerzo deformación asume luego una pendiente cada vez más pequeña, hasta que el punto B de la curva se vuelve horizontal. A partir de este punto se presenta un alargamiento considerable, con un incremento prácticamente inapreciable en la fuerza de tensión (desde B hasta C en el diagrama). Este fenómeno se conoce como cedencia o fluencia del material, y el esfuerzo en el punto B se denomina esfuerzo de cedencia o punto de cedencia (o bien, esfuerzo de fluencia o punto de fluencia). En la región de B hasta C, el material se vuelve perfectamente plástico, lo que significa que puede deformarse sin un incremento en la carga aplicada.

Después de sufrir las grandes deformaciones que se presentan durante la fluencia en la región BC el material empieza a mostrar un endurecimiento por deformación. Durante este proceso, el material sufre cambios en sus estructuras cristalina y atómica, lo que origina un incremento en la resistencia del material a futuras deformaciones. Por tanto, un alargamiento adicional requiere de un incremento en la carga de tensión, y el diagrama esfuerzo-deformación toma una pendiente positiva desde C hasta D. Finalmente la carga alcanza su valor máximo y el esfuerzo correspondiente (en el punto D) se denomina esfuerzo último. De hecho, el alargamiento posterior de la barra se acompaña de una reducción en la carga y finalmente se presenta la fractura en un punto E, tal como se indica en el diagrama.

Se presenta una contracción lateral de la muestra cuando se alarga, lo que origina una reducción en el área de la sección transversal. La reducción en el área es muy pequeña como para tener un efecto apreciable en el valor de los esfuerzos calculados antes del punto C, pero más allá de este punto la reducción comienza a modificar el perfil del diagrama. Desde luego, el esfuerzo real es mayor que el esfuerzo nominal debido a que se calcula con un área menor.

En la cercanía del esfuerzo último, la disminución del área se aprecia claramente y ocurre un estrechamiento pronunciado de la barra, conocido como estricción. Si para el cálculo del esfuerzo se emplea el área de la sección transversal en la parte estrecha del cuello ocasionado por la estricción, la curva real tensión - deformación seguirá la línea punteada CE'. La carga total que puede resistir la probeta se ve efectivamente disminuida después de que se alcanza el esfuerzo último (curva DE), pero esta disminución se debe al decremento en área de la probeta y no a una pérdida de la resistencia misma del material. En realidad, el material soporta un aumento de tensión hasta el punto de falla (punto E').

Sin embargo, con fines prácticos la curva tensión – deformación convencional OABCDE, basada en el área transversal original de la muestra y que, por lo tanto, se calcula fácilmente, suministra información satisfactoria para emplearla en el diseño. La ductilidad de un material a tensión puede caracterizarse por su

alargamiento total y por la disminución de área en la sección transversal donde ocurre la fractura.

La elongación porcentual se define como sigue:

$$E_{\text{elongación}} = \frac{L_f - L_o}{L_o} (100) \dots\dots\dots(1.5)$$

Donde:

L_o es la longitud calibrada original y L_f es la distancia entre las marcas de calibración al ocurrir la fractura.

La reducción porcentual de área mide el valor de la estricción que se presenta y se define como sigue:

$$R_A = \frac{A_o - A_f}{A_o} (100) \dots\dots\dots(1.6)$$

Donde:

A_o es el área original de la sección transversal y A_f es el área final en la sección de la fractura.

En este ensayo las propiedades usualmente determinadas son: La resistencia a la fluencia (punto de fluencia), la resistencia a la tensión, la ductilidad (El alargamiento y la reducción de área), el módulo de elasticidad y el tipo de fractura.

1.4. Modelos constitutivos del material

Cuando se realizan cálculos en los que se consideran las deformaciones plásticas que ocurren en las piezas por encima del límite de fluencia, es necesario definir la relación que existe entre las tensiones y las deformaciones. Debido a las características de esta relación, se han propuesto diferentes modelos que describen el comportamiento entre las tensiones y las deformaciones por encima del límite de fluencia. (Stiopin, 1978). En la figura 1.6 aparecen diferentes modelos constitutivos, o sea, que describen el comportamiento de los materiales.

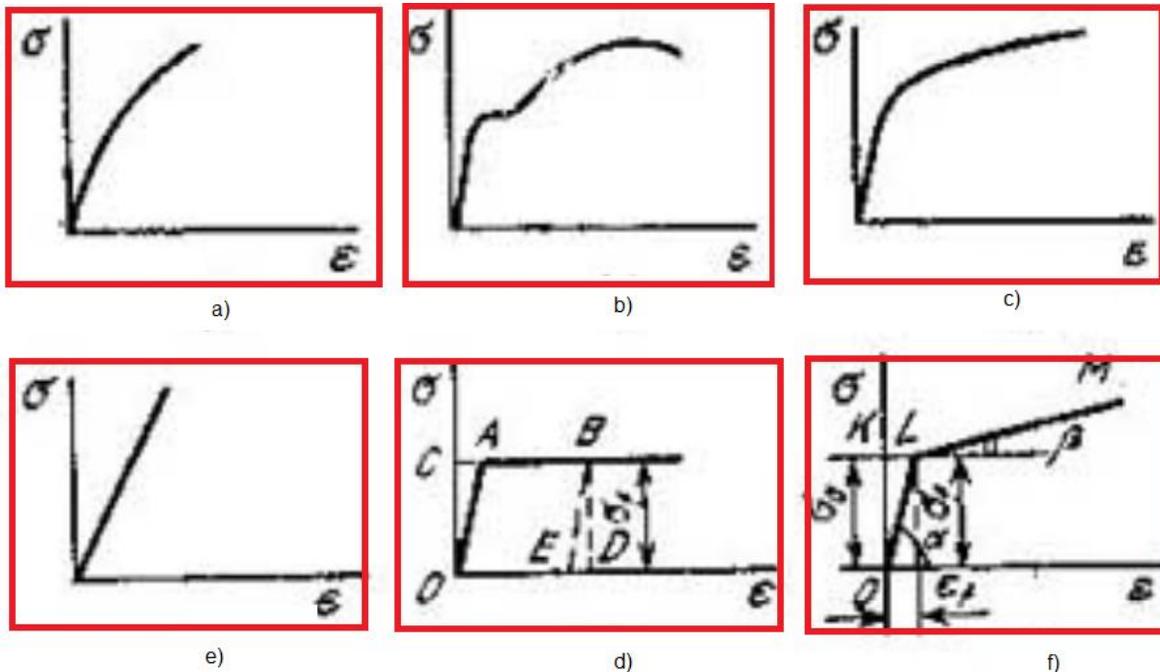


Fig. 1.7. Modelos constitutivos del material. (Stiopin, 1978).

Los diagramas mostrados deben ser, dentro de lo posible, simples y reflejar las principales propiedades del material.

De esta manera el gráfico de la figura 1.7 a) es característico de los materiales frágiles. En la figura 1.7 b) se presenta un diagrama típico de los materiales muy plásticos. En la figura 1.7 c) se representa un gráfico que representa a los aceros de pequeña y media plasticidad., así como a los metales no ferrosos y sus aleaciones de baja plasticidad.

Para los materiales frágiles, la desviación de la ley de Hooke es relativamente pequeña, por lo que al calcular las piezas de estos materiales, se desprecian las deformaciones plásticas, por ser éstas muy pequeñas. Se considera que el material hasta su destrucción sigue entonces la ley de Hooke (Figura 1.7 d)). Al calcular piezas de materiales muy plásticos (figura 1.7b)), el diagrama obtenido, teniendo en consideración las deformaciones plásticas, se acepta según la figura 1.7 e), es decir, se prescinde de la consolidación del material, puesto que cuando las tensiones se igualan al límite de fluencia, se desarrollan considerables deformaciones plásticas y aparecen desplazamientos, que impiden el ulterior funcionamiento seguro de la pieza (Stiopin, 1978).

Para los materiales de mediana plasticidad, en los cálculos se emplea el diagrama de las deformaciones elástico – plásticas de la figura 1.7 f), que tiene en consideración la consolidación del material. Este diagrama es conocido como modelo bilineal o criterio de plasticidad de von Mises. Hasta el punto L, se considera que el material se deforma elásticamente según la ley de Hooke, y después del punto L, que se deforma plásticamente (recta LM). Se han realizado ciertas investigaciones basándose en el diagrama OKM. Se debe señalar, que en el dominio de las deformaciones plásticas, las leyes de carga y descarga son distintas, siendo la de carga no lineal y la de descarga siempre lineal (Stiopin, 1978).

En la figura 1.7 e) la ley de carga se caracteriza por la línea OAB y la de la descarga, por la línea BE, que siempre es paralela a OA. La deformación completa OD está compuesta por dos partes: la plástica OE y la elástica ED, que desaparece después de retirar la carga (Stiopin, 1978).

1.5. Uniones soldadas a tope

Las uniones indesarmables de dos o más piezas obtenidas como resultado de la acción de soldar se denomina uniones soldadas.

Las uniones a tope son aquellas uniones indesarmables de dos o más piezas que se encuentran en el mismo plano (Rodríguez, 1983).

La composición química del material base, del aportado y las temperaturas a las que han estado sometidos durante el soldeo tienen una decisiva influencia sobre la estructura metalúrgica y, como consecuencia, en el comportamiento del conjunto soldado tanto desde el punto de vista mecánico como frente a la corrosión. Las zonas características del depósito de soldadura se representan en la figura 1.8. De ellas tiene vital importancia la zona de afectación térmica (ZAT), debido a que en ella ocurren transformaciones metalúrgicas, y por ende, mecánicas, debido a los gradientes de temperatura que ocurren en la unión soldada.

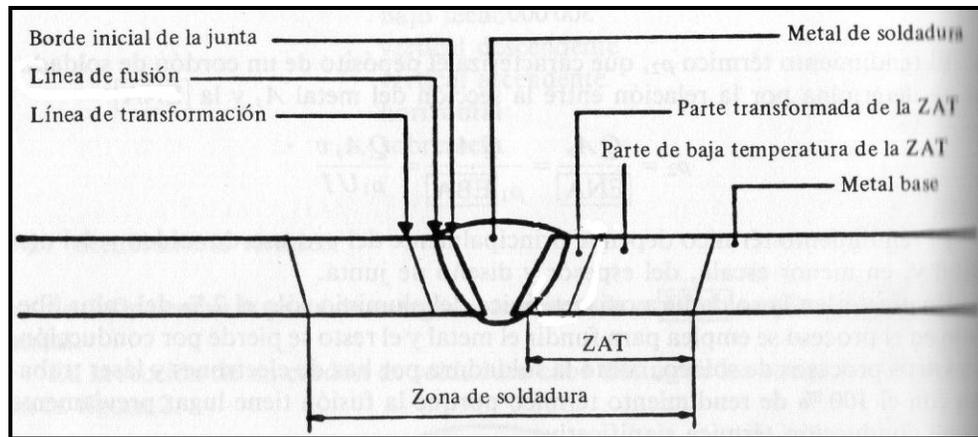


Fig. 1.8 Zonas características del depósito de soldadura. (Reina, 1994)

Es necesario señalar que debido a los procesos de aportación de calor que ocurren durante la soldadura, en la unión se forman diferentes estructuras metalográficas, cada una de ellas con un comportamiento mecánico diferente. Esto provoca que la predicción del comportamiento de una unión soldada pueda tornarse en un problema de difícil solución.

1.6. Software utilizado para el desarrollo de la tesis

El Método de Elementos Finitos (MEF) permite obtener una aproximación a las tensiones y deformaciones que surgen en elementos sometidos a diferentes solicitaciones, con el objetivo de evaluar su comportamiento mecánico. Mediante la aplicación del MEF es posible obtener una solución numérica aproximada de fenómenos mecánicos.

Los cálculos se realizan sobre una malla de puntos (llamados nodos), que sirven a su vez de base para la discretización del dominio en elementos finitos. El MEF es muy usado debido a su generalidad y a la facilidad de introducir dominios de cálculo complejos.

Existen numerosos programas para el cálculo mediante el MEF. Uno de ellos es el complemento Simulation que tiene incorporado el programa SolidWorks. Este es un programa de diseño asistido por computadora para modelado mecánico. Utiliza para la creación de los modelos el diseño paramétrico, que es, a nuestro criterio una tecnología de gran versatilidad y facilidad de aplicación, al permitir variar los diseños con solo modificar las dimensiones del mismo. Fue introducido en el

mercado en 1995 para competir con otros programas CAD como Pro/ENGINEER, NX, Solid Edge, CATIA, y Autodesk Mechanical Desktop.

El programa permite modelar piezas y conjuntos y extraer de ellos tanto planos como otro tipo de información necesaria para la producción. Es un programa que funciona con base en las nuevas técnicas de modelado con sistemas CAD. El proceso consiste en dibujar la idea mental del diseñador, en el sistema CAD, "construyendo virtualmente" la pieza o conjunto (Wikipedia, 2011).

Entre los módulos de cálculo que tiene incorporados el Simulation se encuentra el de análisis no lineal. Con el mismo es posible evaluar la respuesta mecánica de una pieza o conjunto determinado solicitado por cargas que tengan un comportamiento no lineal.

Las herramientas Identificar Valores, Isosuperficies y Gráfica de respuesta disponibles durante la etapa de postprocesamiento en el complemento Simulation son muy importantes a la hora de evaluar los resultados de los análisis. En esta tesis se persigue evaluar el resultado de aplicar una carga (desplazamiento) dinámica, y las herramientas mencionadas permiten resolver ese problema.

Las interfases gráficas, tanto en el SolidWorks, como en el Simulation son amigables con el usuario y permiten una rápida interacción.

El complemento Simulation ha sido utilizado por numerosos autores para desarrollar sus investigaciones.

La concentración de tensiones es un problema complejo de estudiar. En un artículo publicado en la revista Ingeniería Mecánica en el año 2012 se propuso una metodología basada en el método de los elementos finitos para evaluar el coeficiente de concentración de tensiones en grietas longitudinales y transversales de uniones soldadas (Almaguer, 2012). Los estudios para desarrollar la metodología fueron realizados con el Simulation.

Del Monte (del Monte, 2013) realizó el análisis tensional – deformacional de los miembros estructurales tipo viga de la cabria modelo JJ585/46-k. En esa investigación se realizaron varios estudios estáticos, variando los valores de las cargas y las restricciones para comprobar la reserva de resistencia de la estructura, un estudio de frecuencia para determinar los primeros cinco modos de

vibración de la estructura, además de comprobar la estabilidad de la estructura mediante estudios de pandeo. Este trabajo fue continuado por Sánchez (Sánchez, 2014), quien estudio el estado tensional – deformacional de la cabria solicitada por cargas sísmicas.

Gómez (2014) estudió cuatro variantes al fijador externo monolateral modelo Vargas, con el propósito de determinar el comportamiento del estado tensional - deformacional del hueso-fijador externo en la consolidación de fracturas proximales de cadera durante y después de retirado el implante. Este autor obtuvo las distribuciones de las tensiones de Von Mises en el fijador, así como las zonas peligrosas. Así como las tensiones que surgen en el fémur a raíz de la utilización del implante. También se determinó el porcentaje del modelo óseo que está sometido a tensiones de tracción y compresión con implante, y una vez retirado este, en comparación con el hueso sano.

Verdecia (Verdecia, 2014) propuso el cálculo del valor de las relaciones que surgen en el lugar. Los estudios numéricos realizados, sirvieron para determinar el factor de intensidad de tensiones en grietas determinadas.

En su tesis de maestría Almaguer (Almaguer, 2014) realizó la evaluación experimental y numérica del comportamiento a fatiga de una unión soldada. Para ello realizó experimentos a fatiga.

El desarrollo del diseño de un seguidor fotovoltaico a un panel generador fue realizado por Noa (Noa, 2015). Para ello calculo los diferentes elementos de la estructura portante, y mediante diseño paramétrico propuso las dimensiones seguras del elemento. Los cálculos realizados a priori, fueron contrastados con el método de los elementos finitos, utilizando el complemento Simultion-2013.

Capítulo 2. Simulación del ensayo a tracción de la unión soldada

2.1. Introducción al capítulo

En este capítulo se define la probeta que se emplea para realizar la simulación del ensayo a tracción de la unión soldada. También se caracterizan los materiales base y de aporte, además de que se calculan los valores del módulo tangente para cada uno de ellos.

Se describe la malla utilizada para los estudios, así como las cargas y restricciones aplicadas al modelo (probeta).

Se obtuvo un gráfico de tensión vs deformación mediante la simulación del ensayo a tracción.

2.2. Modelo geométrico

El modelo de la probeta utilizado en esta tesis es el propuesto por Almaguer en el trabajo “Evaluación experimental y numérica del comportamiento a fatiga de una unión soldada a tope de acero AISI 1015 y electrodo E6013 cubano” (Almaguer, 2014). Esto obedece a que se persigue, después de realizadas las simulaciones, compararlas con los resultados experimentales obtenidos por ese autor, además de con otras simulaciones realizadas en el programa ABAQUS. Como describió ese autor las probetas a utilizar tienen forma de “*dog bones*” o huesos de perro (figura 2.1).

Las dimensiones de la probeta (Figura 2.1) se determinan de acuerdo a la norma cubana NC 04-72. “Probeta para ensayos de tracción transversal en uniones soldadas a tope.” Para elaborar el modelo se utilizó el programa *SolidWorks 2013*.

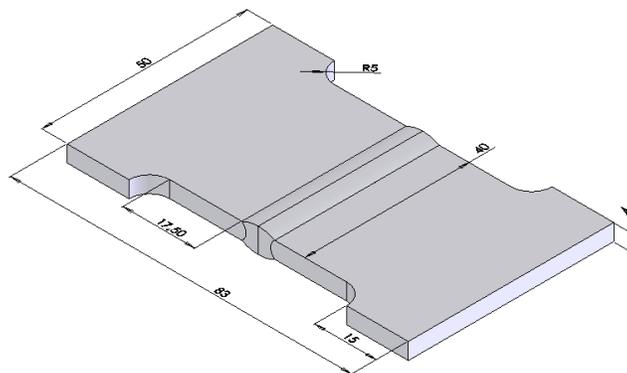


Fig. 2.1. Dimensiones de la probeta soldada.

La unión se realizará a tope sin preparación de bordes, con cordones a ambos lados atendiendo a las dimensiones propuestas en la figura 2.2. Para decidir esas dimensiones se consultó la norma cubana NC 08-06:82. “Costura de las uniones soldadas. Tipos y elementos del diseño.”

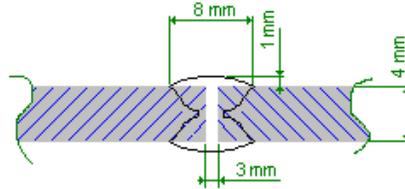


Fig. 2.2. Geometría del cordón para construir la probeta soldada. (NC 08-06:82).

2.3. Mallado del modelo

Los estudios realizados se basan en la utilización de un mallado sólido. El tipo de estudio es no lineal. Después de escogido el tipo de estudio se seleccionó la opción “Estático” atendiendo que la carga se varió desde su valor inicial hasta el final de forma gradual. También es importante señalar que se escogió como criterio de plasticidad el de Von Mises.

El tipo de elementos finitos utilizado fue tetraédrico de alto orden que producen mejores aproximaciones matemáticas, teniendo 10 nodos por cada elemento, los cuales poseen tres grados de libertad, correspondiéndose cada uno con un desplazamiento en un eje coordenado. El modelo tiene 13742 nodos y 7999 elementos.

Los elementos finitos utilizados tienen un tamaño de 2,46735497 mm y una tolerancia de 0,12336775 mm. En la figura 2.3 se muestra la probeta mallada con los valores expuestos.

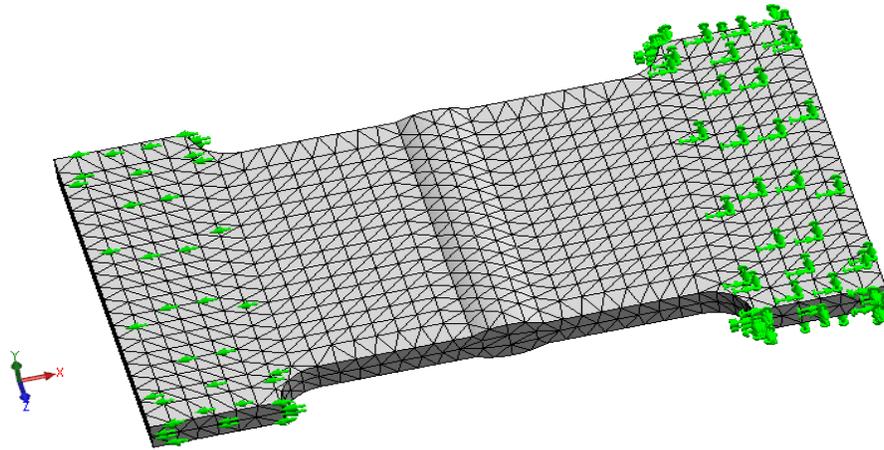


Figura 2.3. Mallado de la probeta.

2.4. Caracterización del material base

El acero AISI 1015 es un acero de construcción con una buena soldabilidad metalúrgica, operatoria y constructiva. Tiene un gran campo de aplicación como es en piezas de configuración simple, ejes y árboles pocos cargados.

En las tablas 2.1 y 2.2 que aparecen a continuación se muestran la composición química y las propiedades físicas y mecánicas que posee este tipo de acero.

Tabla 2.1 Composición química del AISI 1015. (Guliáev, 1978).

Elementos					
%C	%Mn	%Si	%S	%P	%Cr
0,12-0,18	0,8	0,17– 0,37	0,025	0,025	0,8 – 1,0

Tabla 2.2 Propiedades físicas y mecánicas del acero AISI 1015. (www.matweb.com).

Propiedades							
σ_r (MPa)	σ_f (MPa)	σ_{-1} (MPa)	μ	ρ (kg/m ³)	α (1/°C)	$\delta\%$	$\Psi\%$
420	315	215	0,3	7870	125×10^{-7}	32	65

Para realizar los estudios no lineales se seleccionó en esta tesis el modelo constitutivo bilineal descrito por Stiopin (1978) y que fue explicado en el epígrafe 1.4.

En ese modelo es necesario determinar el valor del módulo tangente E_t mediante la expresión (2.1) (Stiopin, 1978).

$$E_1 = \frac{\sigma_r - \sigma_f}{\delta} \dots\dots\dots(2.1)$$

$$E_1 = \frac{420 - 315}{0,32}$$

$$E_1 = 328,125 \text{ MPa}$$

2.4.1. Caracterización del material de aporte

El material de aporte a emplear para la soldadura en este tipo de aceros es el E 6013 de fabricación cubana, electrodo empleado para soldar aceros de construcción. Algunos de los casos en que este tipo de electrodo es utilizado son para las soldaduras en láminas delgadas tales como ventanería y balconería, así como en perfiles huecos, tolvas, tanques y recipientes, carrocerías, muebles metálicos, entre otros.

Para la soldadura con electrodo E6013 es posible realizarla con un amperaje relativamente bajo, aún con fuentes de poder de baja tensión en vacío, de tipo corriente alterna y continua.

El material de aporte E6013 tiene poca penetración, y por esta característica es adecuado para soldar chapas finas sin un quemado excesivo de las mismas. Al emplear este electrodo con corriente directa las escorias son eliminadas fácilmente.

Cuenta con la particularidad de producir cordones de superficie suave, de aspecto liso y limpio con poca penetración.

Las tablas 2.3 y 2.4 muestran las propiedades mecánicas y la composición química del depósito.

Tabla 2.3 Propiedades mecánicas del material del electrodo E6013. (Datos del fabricante: Acinox Camagüey).

Propiedades			
σ_r (MPa)	σ_f (MPa)	δ %	Ψ %
431-510	392	20-28	35-60

Tabla 2.4 Composición química del electrodo E6013. (Torres, 2003).

Elementos		
%C	%Mn	%Si

0,07	0,5	0,35
------	-----	------

La Sociedad Americana de Soldadura establece actualmente para soldaduras de aceros al carbono con electrodos revestidos, el siguiente sistema de clasificación:

El nombre de los electrodos se debe a la nomenclatura que lo compone. El electrodo E6013 cuenta con la nomenclatura siguiente:

E: Es un electrodo.

60: Límite de resistencia a la tracción del electrodo seleccionado, multiplicando el número que aparece por 10000 lb/pulg².

1: Permite soldar en todas las posiciones

3: Revestimiento rutílico, se puede soldar tanto con corriente alterna como directa, penetración ligera y tiene de 0 a 10% de polvo de hierro en el revestimiento.

De igual manera que para el material base, es necesario determinar el módulo tangente para el material de aporte. Para ello también se utilizó la fórmula (2.1).

$$E_1 = \frac{\sigma_r - \sigma_f}{\delta} \dots\dots\dots(2.1)$$

$$E_1 = \frac{431 - 392}{0,20}$$

$$E_1 = 195 \text{ MPa}$$

2.5. Cargas y restricciones aplicadas al modelo

En esta tesis se pretende simular un ensayo a tracción. Este tipo de ensayos se realiza en máquinas especiales que permiten fijar uno de los extremos de la probeta y en el otro aplicar una carga que va aumentando gradualmente en el tiempo. Este aumento de la carga provoca que en el extremo donde se está aplicando la misma ocurre un desplazamiento.

De acuerdo a lo que se plantea en el párrafo anterior se decidió para simular este ensayo aplicarle a la probeta las restricciones y cargas que se muestran en la figura 2.4.

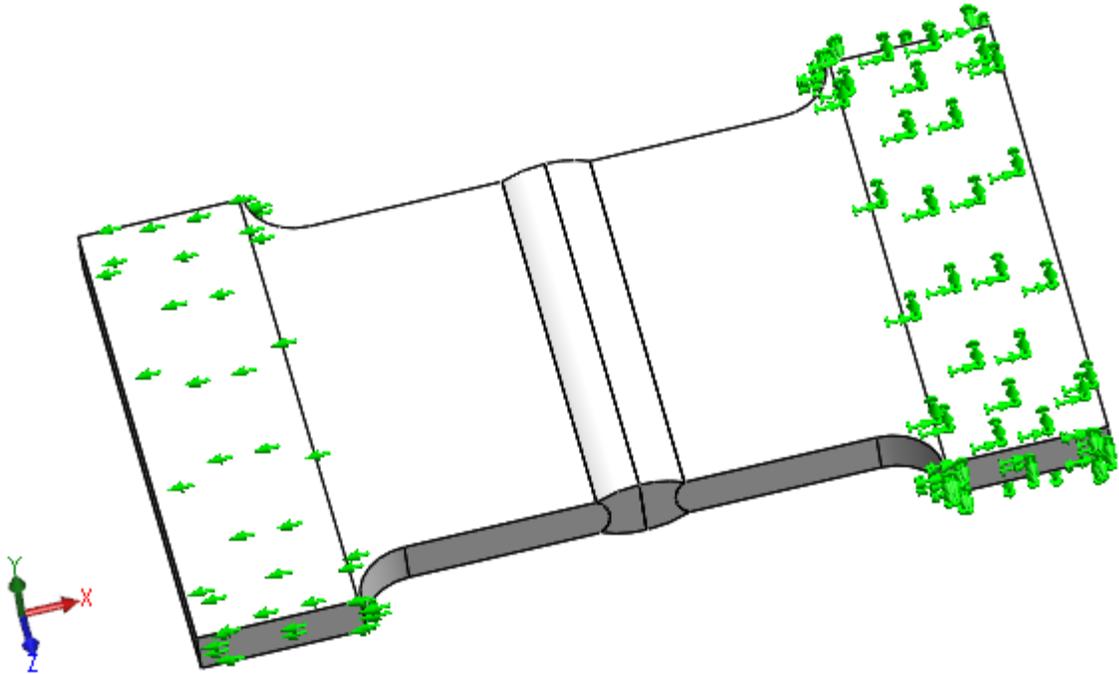


Fig. 2.4. Cargas y restricciones aplicadas a la probeta.

En el extremo derecho se aplicaron restricciones fijas, o sea, se considera que en ese lado se encuentra el cabezal fijo de la máquina de ensayos.

Para simular el cabezal móvil de la máquina, se decidió aplicar en el extremo izquierdo de la probeta; un desplazamiento que varíe en el tiempo desde cero hasta su valor final que fue de 20 mm. Para lograr esto se asocia a este desplazamiento una curva de tiempo (figura 2.5), que describe cómo se comporta el desplazamiento en el tiempo.

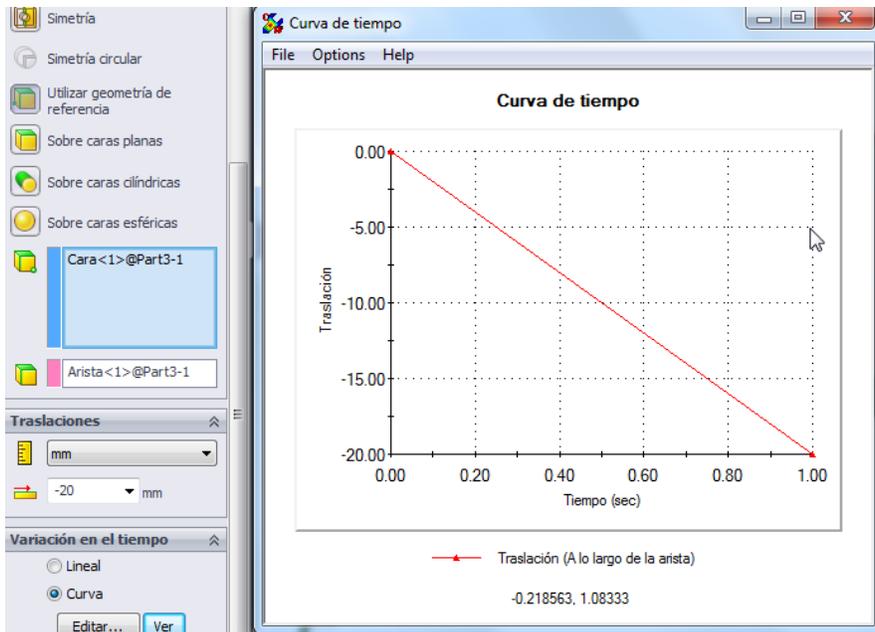


Fig. 2.5. Curva de tiempo para la variación del desplazamiento.

Es importante señalar que la curva tiene valores negativos porque el desplazamiento va a tener lugar en el sentido negativo del eje longitudinal de la probeta.

2.6. Análisis de resultados

A continuación se realiza un análisis de los resultados obtenidos. En esta tesis solo se ha realizado una simulación. Se pretende comparar los resultados de la simulación con experimentos realizados por otros autores.

En la figura 2.6 se muestra el estado tensional que se produce en la probeta al concluir con la aplicación de la carga. Como se aprecia en la probeta surgen elevados valores de tensiones. Estos tienen lugar sobre la línea de transición y en zonas muy pequeñas. Esto significa que el fallo de la unión va a ocurrir precisamente en la zona de afectación térmica, que es lo que pasa en uniones reales.

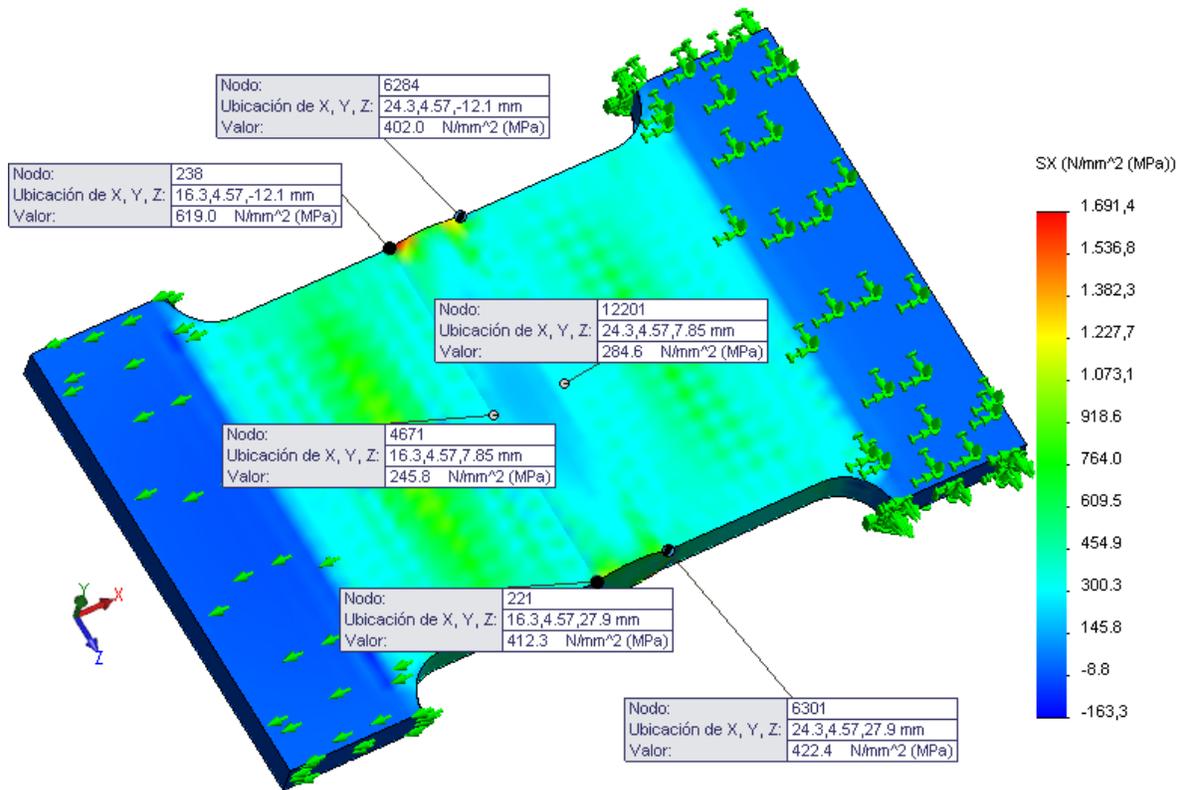


Fig. 2.6. Estado tensional en la probeta al primer segundo.

Los mayores valores de desplazamiento ocurren precisamente en el extremo libre donde se impuso la restricción del desplazamiento variable en el tiempo. Al segundo después de comenzar a aplicar la carga el desplazamiento máximo es de 20 mm, como se aprecia en la figura 2.7. El signo negativo indica que este desplazamiento ocurre en el sentido negativo del eje X.

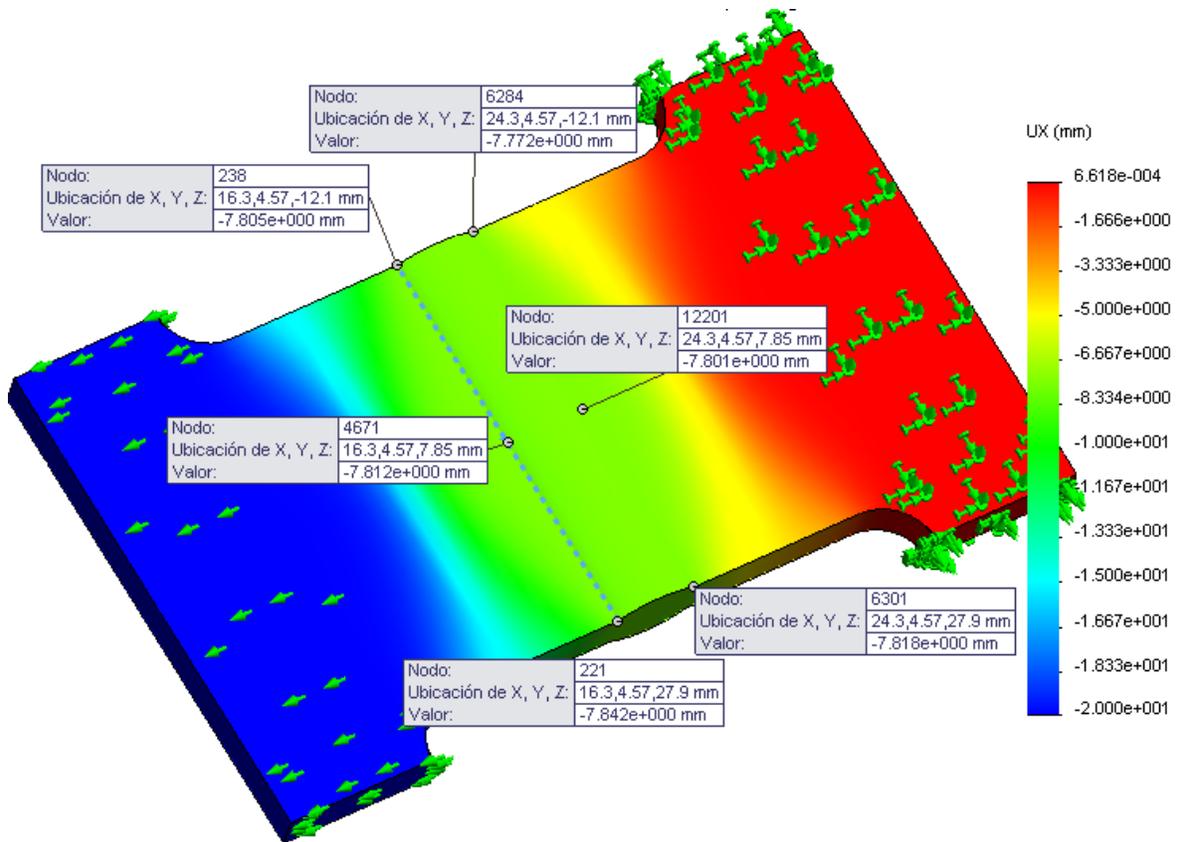


Fig. 2.7. Desplazamientos al finalizar la aplicación de la carga.

El programa *Simulation* permite obtener gráficas de respuesta sobre el desarrollo del ensayo. Las figuras 2.8 y 2.9 muestran las gráficas de respuesta tensión – tiempo y desplazamiento – tiempo respectivamente, para algunos nodos, todos situados sobre la línea de fusión.

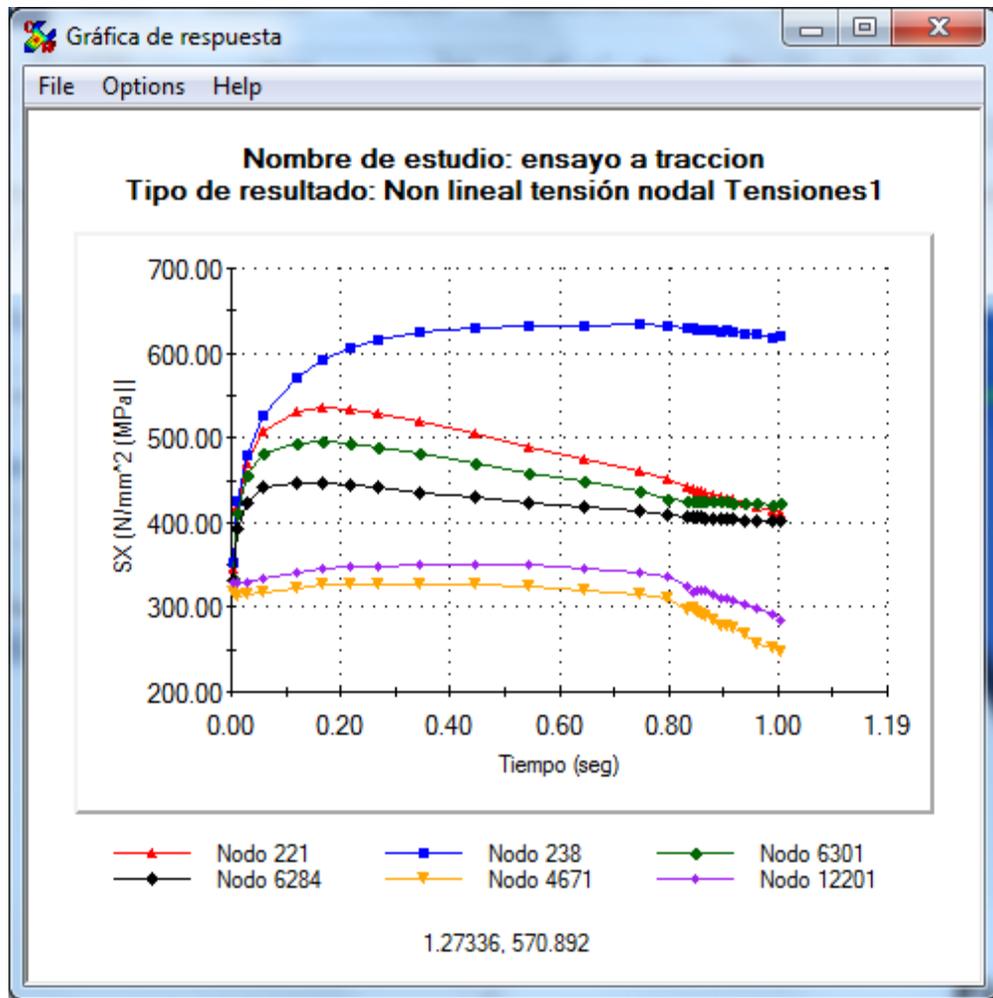


Fig. 2.8. Gráfica de respuesta de la tensión longitudinal vs tiempo.

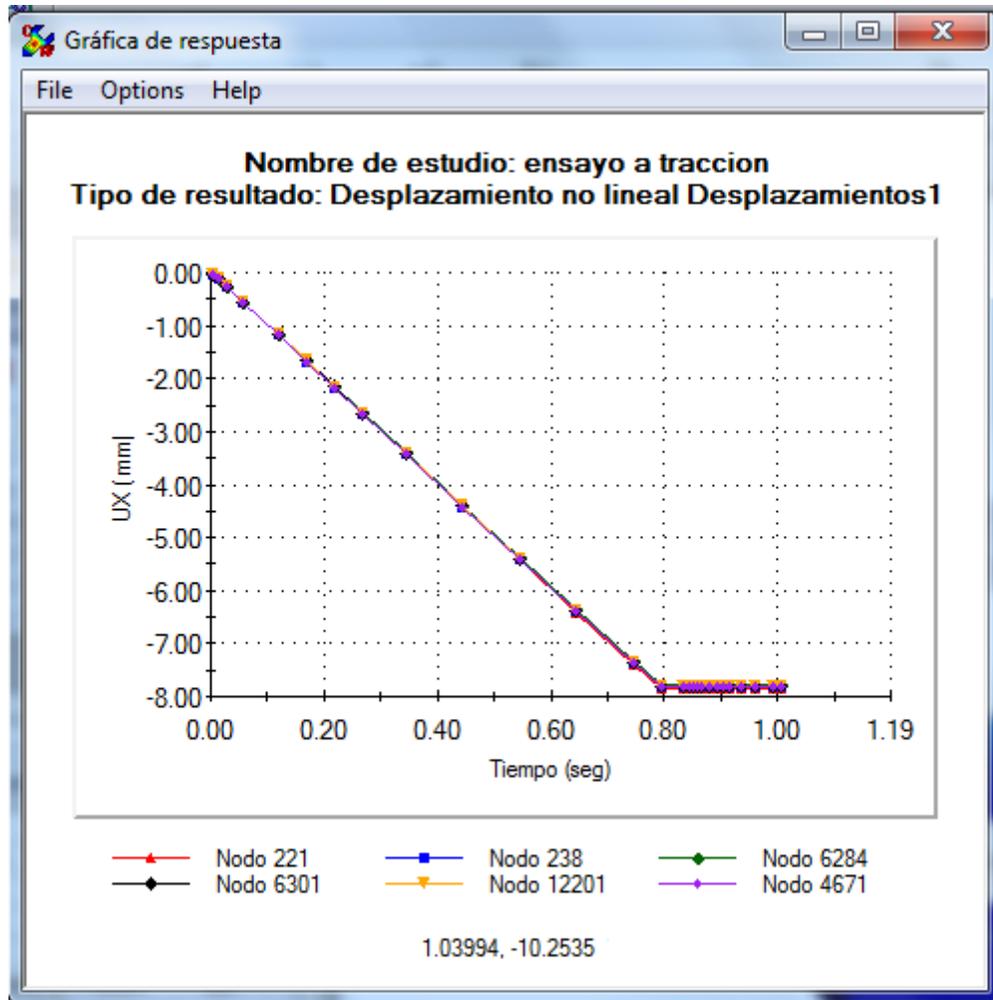


Fig. 2.9. Gráfica de respuesta del desplazamiento vs tiempo.

En la primera de ellas se muestra que en los diferentes nodos tienen lugar tensiones positivas, o sea, de tracción. También es posible observar la semejanza que existe entre la forma de las diferentes curvas del comportamiento de la tensión, con las que se reportan en la literatura sobre el tema. En la gráfica de los desplazamientos, sin embargo, se aprecia que los desplazamientos son negativos, esto se debe a que el desplazamiento ocurre en la dirección negativa del eje longitudinal de la probeta, como se explicó antes.

A continuación se muestra una curva de tensión - deformación obtenida mediante la simulación. Con el programa se obtienen las curvas de respuesta de tensión y desplazamiento en el tiempo. Para construir el gráfico de tensión – deformación se plotean ambas curvas, y con la combinación de los valores es posible obtener el

gráfico deseado. En este trabajo esto se realizó con el programa Excel 2013, del paquete Microsoft Office.

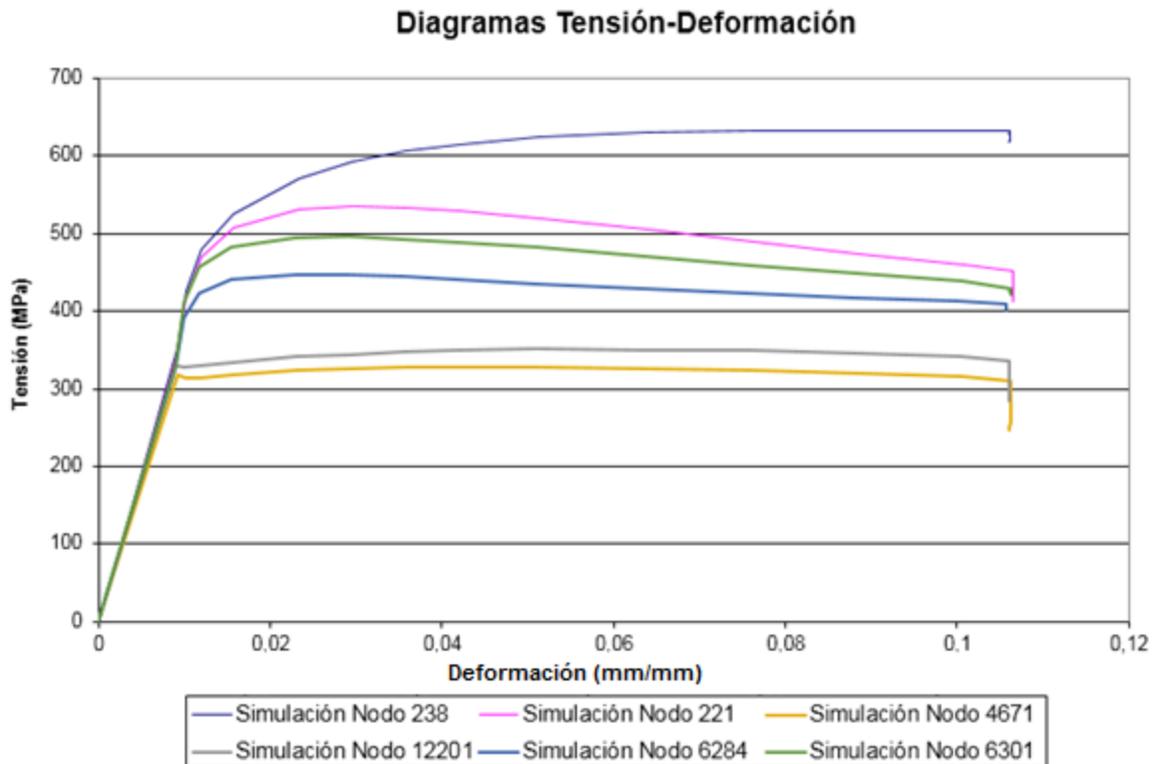


Fig. 2.9. Gráfico tensión – deformación obtenido mediante la simulación numérica del ensayo a tracción de la unión soldada.

En la figura 2.10 se encuentra el gráfico de tensión – deformación para uniones soldadas reales y la simulación numérica. Como se aprecia en esa figura, la pendiente del tramo elástico, o sea, el módulo de elasticidad de primer orden, es similar en las curvas simuladas y real. En el caso del tramo plástico, existen diferencias en las curvas. Esto es atribuible a que en la simulación no ocurren los procesos de plastificación y el desarrollo de microhuecos que tienen lugar en la tracción real de las probetas. Además del modelo constitutivo del material asumido. Es posible que si considera otro modelo, por ejemplo, la ecuación de Hollomon se obtuviera mejor coincidencia entre las curvas en la zona plástica.

Diagramas Tensión-Deformación

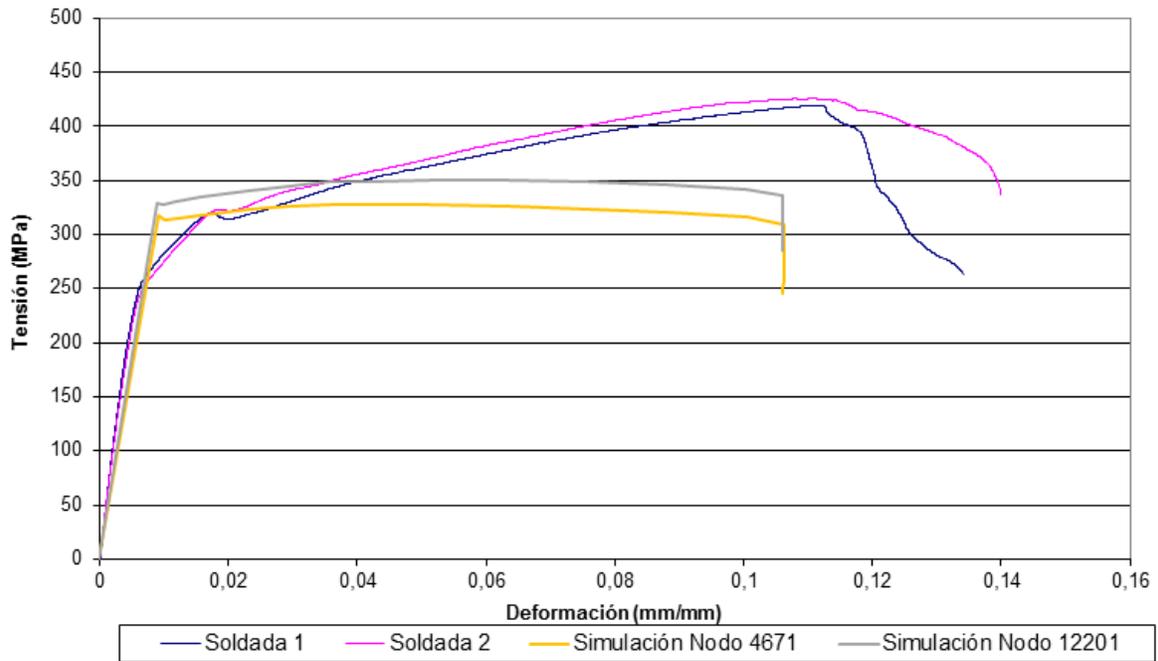


Fig. 2.10. Gráfico tensión – deformación para probetas soldadas reales ⁽¹⁾ y simuladas.

¹ Las curvas tensión – deformación reales de las uniones soldadas fueron tomadas de Almaguer, 2014.

Conclusiones

En este trabajo se han obtenido las siguientes conclusiones:

1. El ensayo a tracción permite caracterizar a los materiales ingenieriles, sin embargo para ello es preciso contar con las máquinas de ensayo y con probetas para realizar los experimentos.
2. Con la simulación numérica es posible obtener el comportamiento de uniones estructurales solicitadas por cargas de tracción.
3. La pendiente de la curva tensión – deformación simulada, en el tramo elástico es similar a la real.

Recomendaciones

A partir de los resultados obtenidos hasta el momento se recomienda:

1. Realizar mayor número de simulaciones considerando intervalos de variación para las propiedades mecánicas. Para ello es preciso realizar una revisión bibliográfica más exhaustiva con el propósito de encontrar esos valores.
2. Utilizar otros modelos constitutivos para simular el comportamiento a tracción de la unión soldada.
3. Realizar simulaciones con otros programas para comparar los resultados.

Bibliografía

1. Almaguer, Pavel. Informatización de la asignatura Resistencia de materiales en la Universidad de Holguín. Trabajo de Diploma en opción al título de Ingeniero Mecánico. Universidad de Holguín, 2002. –82 p.
2. Almaguer Zaldivar, P. Simulación numérica del coeficiente de concentración de tensiones en grietas de uniones soldadas a tope. Revista de Ingeniería Mecánica. 2012, Vol. 15. No. 3, septiembre-diciembre, p. 176-190 ISSN 1815-5944.
3. Almaguer, Pavel. Evaluación experimental y numérica del comportamiento a fatiga de una unión soldada a tope de acero AISI 1015 y electrodo E6013 cubano. Tesis en opción al título de master en CAD/CAM. Universidad de Holguín, 2014. – 62 p.
4. Álvarez Vasallo, José. Resistencia de Materiales I. Guía de prácticas de laboratorio. Ciudad de La Habana; Editorial ISPJAE, 1984.-- 56 p.
5. Beer, Ferdinand. Mechanics of Materials. Nueva York; Editorial Mc Graw Hill, 1992. —479 p.
6. Feodosiév, V. Resistencia de Materiales. Ciudad de La Habana. Editorial Pueblo y Educación, 1979.-- 2 tomos.
7. Fernández Levy, Gilda. Resistencia de Materiales. Ciudad de La Habana; Editorial Pueblo y Educación, 1981.—Tomo 1.
8. del Monte Crespo, L. (2013). Análisis tensional – deformacional de los miembros estructurales tipo viga de la cabria modelo jj585/46-k perteneciente a un taladro de perforación petrolera modelo zj70db. Trabajo de Diploma en opción al título de Ingeniero Mecánico. Universidad de Holguín. 96 p.
9. Gómez Cuenca, D. (2014). Estudio biomecánico del fijador externo monolateral modelo Vargas en la consolidación de las fracturas proximales de fémur. Trabajo de Diploma en opción al título de Ingeniero Mecánico. Universidad de Holguín. 66 p.
10. Guliaév, A. P. (1978). Metalografía. Editorial Mir. Moscú. 2 Tomos.

11. Ibañez García, Miguel. Resistencia de materiales y estructuras. Editorial Dossat, Madrid, 1966.-246 p.
12. Noa, Y. Diseño paramétrico de un seguidor a un eje polar. Trabajo de Diploma en opción al título de Máster en CAD/Cam. Universidad de Holguín. 66 p.
- 13.
14. Megson, T. H. G. Strength of materials for civil engineers. Londres; Editorial Edward Arnold, 1983.-- 245 p
15. Normas Cubanas NC – 01 – 04 Sobre ensayos mecánicos para materiales.
16. Reina Gómez, Manuel. (1994) Soldadura de los aceros Aplicaciones. Madrid. España.
17. Rodríguez Pérez, Héctor. (1978). Metalurgia de la soldadura. Editorial Pueblo y Educación. La Habana. Cuba.
18. Sánchez San Nicolás, E. (2014). Análisis tensional – deformacional de los miembros estructurales tipo viga de la cabria modelo JJ585/46-k bajo la acción de carga sísmica. Trabajo de Diploma en opción al título de Ingeniero Mecánico. Universidad de Holguín. 65 p.
19. Silovsky, K. Oliva, J. Resistencia de Materiales. Instituto Cubano del Libro. La Habana. 1975. 763 p.
20. Stiopin, P. A. (1976). Resistencia de Materiales. Editorial Mir 6ta Edición. Moscú.
21. Torres Alpizar, Eduardo. (2003). Determinación de tecnologías de soldadura por arco eléctrico. Universidad de Matanzas. Facultad de ingenierías química y mecánica. Matanzas. Cuba.
22. Verdecia Moya, L. (2014). Cálculo del factor de intensidad de tensiones en uniones soldadas por el método de los elementos finitos Trabajo de Diploma en opción al título de Ingeniero Mecánico. Universidad de Holguín. 80 p.
23. www.matweb.com. Consultado el 23 de mayo de 2011.

Anexos

Anexo 1. Preparación de la probeta antes de ser soldada.



Anexo 2. Probeta soldada utilizada en los ensayos reales (Almaguer, 2014).



Anexo3. Probeta rota en el ensayo a tracción (Almaguer, 2014).

