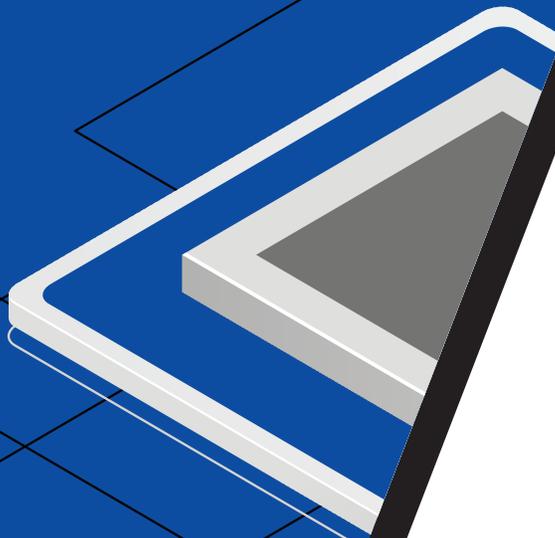


**ANÁLISIS TEÓRICO-PRÁCTICO
DE ESFUERZOS Y POR ELEMENTOS
FINITOS DE UN ENSAYO DE TRACCIÓN**

**ANALYSIS THEORETICAL-PRACTICE
OF EFFORTS AND BY FINITE
ELEMENTS OF A TENSION TEST**

**ANÁLISE TEÓRICO-PRÁCTICO
DE ESFORÇOS E POR
ELEMENTOS CARÁCTER
TERMINADO DE UM
ENSAIO DE TRACÇÃO**



**Saúl Hernández Moreno^a,
Edgar Cárdenas Rivera^b**

^a Ingeniería Mecánica,
Universidad Santo Tomás, Seccional Tunja,
saul.hernandez@usantoto.edu.co

^b Ingeniería Mecánica,
Universidad de Guanajuato,
Campus Irapuato-Salamanca,
edgarhernancardenas@hotmail.com

fecha de recepción: 25 de febrero 2018
Fecha de aprobación: 02 de abril 2018

Resumen

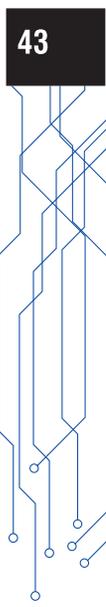
Este trabajo presenta una comparación entre los métodos teórico, experimental y numérico por simulación con elementos finitos, caracterizando el material mediante pruebas experimentales bajo análisis teórico-práctico y encontrando un modelo numérico por elementos finitos, que gobierne el comportamiento de una aleación de acero, sometido a un ensayo de tracción. En este documento se muestra el análisis de esfuerzos experimentales y por simulación, ajustando un modelo del material en el software ANSYS® APDL, a partir de los resultados de los ensayos de tracción y comparando tanto cualitativamente como cuantitativamente el comportamiento de la aleación de acero. Ajustar el modelo numérico por simulación, a partir del comportamiento del material en las pruebas experimentales, es de gran ventaja para realizar diseño de elementos o sistemas mecánicos utilizando este material, desde el software de elementos finitos, utilizando un modelo del material sin necesidad de realizar más pruebas experimentales, las cuales son costosas en la investigación y en el diseño en ingeniería. Este trabajo es de gran aporte, ya que hoy en día podemos contar con nuevos materiales y con diferentes aplicaciones, donde es importante conocer de manera acertada las propiedades mecánicas y el comportamiento del mismo para definir un mejor uso en la industria o la investigación. De esta misma forma se pueden analizar materiales hiperelásticos o elastoplásticos y ajustarlos mediante un modelo numérico por simulación en elementos finitos a partir de análisis teórico-práctico de los datos experimentales, dependiendo los porcentajes de deformación, para poder ajustarlos según los modelos numéricos del material en el software para cada tipo de comportamiento.

Palabras clave: Bilineal, Cedencia, Galga, Investigación, Modelos, Simulación, Tracción.

Abstract

This work presents a comparison between the methods theoretical, experimental and numerical by simulation with finite elements, characterizing the material by means of experimental tests under theoretical-practical analysis and finding a numerical model by finite elements, that the behavior of a steel alloy governs, put under to a tension test. In this document is to the experimental stress analysis and simulation, fitting a model of the material in software ANSYS®APDL, from the results of the tension tests and comparing as much qualitatively as quantitatively the behavior of the steel alloy. To fit the numerical model by simulation, from the behavior of the material in the experimental tests, is of great advantage to realize design of elements or mechanical systems being used this material, from the software of finite elements, using a model of the material without needing realizing more experimental tests, which are expensive in the investigation and the design in engineering. This work is of great contribution, since nowadays we can count on new materials and different applications, where it is important to know right way the mechanical properties and the behavior of the same to define a better use in the industry or the investigation. Of this same form they by means of a numerical model by simulation in finite elements from theoretical-practical analysis of the experimental datas can be analyzed hyperelastic or elastoplásticos materials and be fit, depending the percentage on deformation, to be able to fit them according to the numerical models of the material in software for each type of behavior.

Keywords. Bilineal, Cedencia, Gauge, Investigation, Models, Simulation, Traction.



Resumo

Est trabalho apresenta uma comparação entre os métodos teóricos, experimentais e numéricos por simulação com elementos caráter terminado, caracterizando o material através de ensaios experimentais sob análise teórica-prático e encontrando um modelo numérico por elementos caráter terminado, que governa o comportamento de uma mistura de aço, apresentada um ensaio de tração. Neste documento mostra-se a análise de esforços experimentais e por simulação, adaptando um modelo do material no software ANSYS®APDL, para partir tanto qualitativamente dos resultados dos ensaios de tração e comparando como quantitativamente o comportamento da mistura de aço. Adaptar o modelo numérico por simulação, partir do comportamento do material nos ensaios experimentais, é de uma grande vantagem para efetuar concepção elementos ou sistemas mecânicos utilizando este material, desde o software de elementos caráter terminado, utilizando um modelo do material sem ter necessidade efetuar mais ensaios experimentais, qual são dispendioso na investigação e a concepção em engenharia. Este trabalho é de um grande contributo, dado que hoje em dia podemos dispôr de novos materiais e de diferentes aplicações, onde é importante conhecer de maneira justa as propriedades mecânicas e o comportamento deste último para definir uma melhor utilização na indústria ou a investigação. Desta mesma maneira pode-se analisar materiais hiperelásticos ou elastoplásticos e adaptara-o por um modelo numérico por simulação em elementos caráter terminado a partirem de análise teórica-prático dos dados experimentais, dependendo as percentagens de deformação, para poder adaptar-o de acordo com os modelos numéricos do material no software para cada tipo de comportamento.

Palavras clave: Bilineal, Cedencia, Galga, Investigación, Modelos, Simulação, Tração.

I. INTRODUCCIÓN

Conocer las propiedades mecánicas de los materiales es esencial para el diseño en ingeniería, tanto para diseño de elementos o sistemas mecánicos, existen diferentes formas experimentales para conocer dichas propiedades.

En la industria automotriz, los materiales empleados deben ser muy apropiados en su composición y en el proceso de fabricación, para garantizar la seguridad de los productos, por esta razón cada día se es más exigente en los métodos para encontrar las propiedades mecánicas de los materiales, en especial los aceros empleados y

aluminios empleados en los elementos y carrocerías de los autos.

Las aleaciones de acero son muy utilizadas en el diseño de elementos mecánicos en la ingeniería automotriz aumentando la resistencia y disminuyendo el peso, por lo que se ha convertido en prioridad, el uso de buenos métodos para encontrar las propiedades mecánicas de estos aceros. Uno de los métodos experimentales más utilizados para encontrar las propiedades mecánicas, entre ellas la resistencia de fluencia y ultima del material, es el ensayo de tracción la cual está estandarizada en la norma ASTM E8-03(ASTM, 2016).

De acuerdo al mejoramiento continuo en el diseño de máquinas, se utilizan máquinas modernas como las máquinas universales de ensayos, variando con precisión la fuerza y velocidad que se puede implementar en las pruebas de tracción, junto con las galgas extensométricas para medir con mayor exactitud las deformaciones de los materiales ensayados. De esta forma conociendo el método de pegado y conexión de las galgas será favorable para la obtención de buenos resultados y posteriormente al análisis de los mismos.

El método de elementos finitos ha llegado a ser una herramienta poderosa en la solución numérica de un amplio rango de problemas de ingeniería (Tirupathi R., Ashok D., 1999), en la aplicación del análisis de deformación y esfuerzo de automóviles ha sido de gran importancia para optimizar el uso y la aplicación de los aceros empleados en los diseños. Para un buen análisis por elementos finitos se deben conocer acertadamente las propiedades mecánicas de la aleación de acero, el módulo de Young y el módulo de Poisson, esto bajo la suposición de que el material es isotrópico, o en un mejor caso alimentar el software de elementos finitos con la curva Fuerza-Desplazamiento obtenida del análisis de los datos arrojados de las pruebas experimentales.

Las pruebas experimentales en la ingeniería automotriz y la investigación son costosas, por lo que se ha empleado el uso de modelos numéricos encontrados por simulación a partir de las caracterizaciones de los materiales ensayados experimentalmente. Así se puede realizar diseño como aproximación, sin más pruebas experimentales. Estos modelos numéricos dependen del porcentaje de deformación que haya sufrido el material en las pruebas, y la región de diseño que se desea emplear el material. La mayoría de los elementos están diseñados en la región lineal del material, para este caso en el uso

de la aleación de acero que se investigó, pero en el diseño del formado de la carrocería se deben usar modelos numéricos por simulaciones no lineales, cubriendo esta zona plástica del material.

Software ANSYS® APDL maneja varios modelos numéricos con la que se pueden ajustar diferentes materiales, en este caso se restringió la cantidad de modelos numéricos que estén en el rango lineal, por lo que se quiere que el material no supere el límite de fluencia.

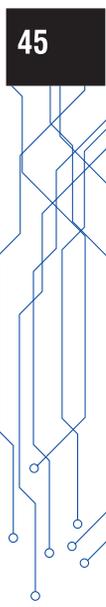
II. DESARROLLO GENERAL

La metodología del trabajo de investigación se planteó con la preparación del material a ensayar, cabe resaltar que no se puede revelar información sobre los componentes del material por ser secreto industrial.

El cuerpo del trabajo inicia con el método del pegado de la galga extensométrica sobre la probeta a ensayar, describiendo el uso del método para lograr una adherencia correcta sobre la probeta.

Seguido de la prueba experimental de tracción sobre el material preparado, donde se describe la forma en la que se recolectan los datos dados por la galga por medio de un instrumento de medición que es el puente de wheatstone. En esta misma sección se caracteriza el material mediante la prueba experimental, donde se muestran las curvas de Fuerza-Desplazamiento y Esfuerzo-Deformación Ingeniería y real.

Dos propiedades mecánicas importantes que se deben conocer en el diseño con aceros, son la rigidez y el módulo de elasticidad, ya que se quiere diseñar en la región lineal del material, para ello se analizó la desviación estándar de estas dos propiedades en la prueba experimental, para determinar qué tan precisas están las medidas.



En el modelo de elementos Finitos se realizó la simulación de la prueba experimental, alimentando el modelo del material de la probeta con el módulo de Poisson y el módulo de Young encontrado en la prueba de tracción, buscando encontrar las mismas deformaciones que sufrió la probeta que en el experimento, bajo las mismas condiciones de carga.

Una vez se obtuvieron los resultados de la simulación se calculó un módulo tangente que cubriera la región plástica del material, básicamente es un segundo módulo de elasticidad que se aproximara al comportamiento plástico del material, esto con el fin de tener un modelo numérico que gobierne todo el comportamiento del material, tanto elástico como plástico, encontrado en el ensayo experimental.

Con los datos anteriores se realizaron dos simulaciones más, con dos modelos numéricos que tiene el software ANSYS® APDL, el modelo Bilineal y Melas, en las que se adaptarían mejor al material ensayado.

Finalizando con el análisis de resultados, donde se hizo comparación de cuál de los dos modelos numéricos se ajusta más al análisis experimental y conclusiones que se resaltan de la investigación.

III. PEGADO DE LA GALGA EXTENSOMÉTRICA

Es necesario preparar la superficie, desengrasando el espécimen para retirar cualquier contaminante que se pueda encontrar sobre él, esto se realiza aplicando desengrasante en aerosol sobre la superficie, la cual se debe frotar con una gasa limpia; una vez la superficie esté libre de contaminantes se debe lijar la superficie sobre la cual se va adherir la galga, para llevar a cabo este procedimiento se aplicó

acondicionador am-prep sobre el área a tratar, ver Figura 1.

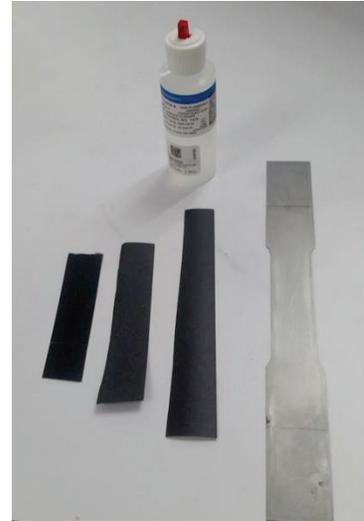


Figura 1. Acondicionador y lijas, Fuente: Autor

Se inicia con lija grado 220, luego se repite el procedimiento con lija grado 320 y 400 respectivamente, inicialmente en una sola dirección, luego en dirección perpendicular y finalmente en forma circular hasta obtener un acabado tipo espejo teniendo la precaución de siempre mantener el área a tratar húmeda. Una vez obtenido el acabado deseado se retira cualquier suciedad existente; se neutraliza el área tratada para una correcta adhesión de la galga, eso se logra aplicando neutralizador 5 am-prep. Con la superficie tratada limpia se trazan líneas de referencia perpendiculares entre sí, ver Figura 2, las cuales sirvieron para alinear la galga.



Figura 2. Trazo de líneas de referencia, Fuente: Autor

La galga se posicionó sobre una superficie de vidrio químicamente limpia, usando cinta adhesiva, cuidadosamente se levantó un extremo de la cinta y se aplicó catalizador, el cual se esperó un minuto hasta que se secó. Luego, se aplicaron dos gotas de pegamento M-bond 200 en la unión de la cinta, se colocó la cinta sobre la probeta y se aplicó presión por un minuto. Una vez transcurrido el tiempo se retiró la cinta.

Finalmente, ya con la galga adherida a la probeta, se procedió a soldar los terminales de la galga, ver Figura 3, una vez finalizada, la soldadura se limpió con acetona y se aplicó el recubrimiento de poliuretano m cota 8 que protege la galga y las soldaduras (Rodrigo Hernandez, 2015).



Figura 3. Soldadura de los terminales y recubrimiento de la galga,
Fuente: Autor

IV. PRUEBA DE TRACCIÓN

En la segunda etapa de este trabajo, ya con la galga adherida a las probetas, se realizaron los ensayos de tracción (Salamanca Sarmiento & Vaca rodríguez, 2017), siguiendo las recomendaciones de la norma ASTM E8-03 (ASTM, 2016) en la que se especifican la medida de la probeta y los parámetros generales para realizar un ensayo de tracción, de los que se tiene la velocidad de la prueba. Se realizaron pruebas experimentales en el mismo material, aleación de acero, con diferentes inclinaciones de la galga con el fin de ver las diferencias en las deformaciones y respuestas del material, siendo de más interés la probeta con la galga con inclinación 0° que está en dirección axial de la probeta y de la fuerza aplicada

en la maquina universal de ensayos Instron. Una vez se montó la probeta en la máquina de ensayos, se realizó las conexiones al puente de wheatstone P3 (HBM, 2015).

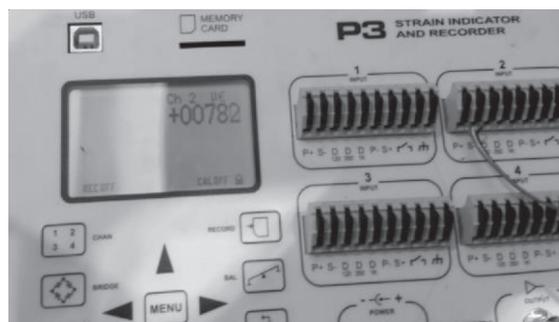


Figura 4. P3, amplificador y recolector de datos,
Fuente: Autor

El P3 es el encargado de recolectar los datos entregados por la galga, y se realizó la configuración teniendo como posibles conexiones, 1/4, 1/2, puente completo, en este caso se utilizó una conexión de un cuarto de puente.

Con los datos de la máquina universal y el P3 se obtuvieron las gráficas que permitieron el análisis y comparación de datos.

- Curvas de Fuerza contra desplazamiento.

En las gráficas de Fuerza contra Desplazamiento, ver Figura 5, representan la rigidez, que es la resistencia a las deformaciones elásticas producidas por un material, que contempla la capacidad de un elemento estructural para soportar esfuerzos sin sufrir grandes deformaciones, esto durante el límite elástico, en su totalidad la curva completa representa la energía total disipada durante la prueba de tracción, es decir, la energía total que resiste la probeta antes de fallar.

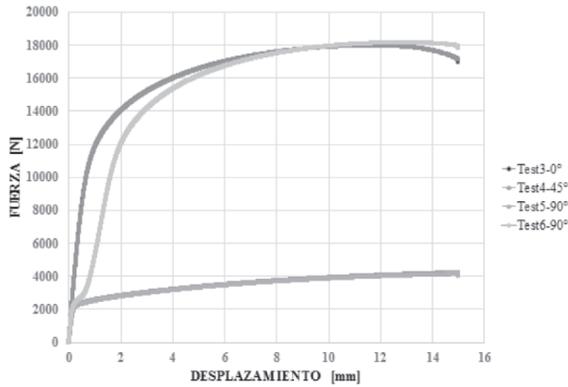


Figura 5. Fuerza contra Desplazamiento, Fuente: Autor

- Curvas de Esfuerzo ingenieril contra deformación unitaria.

Para materiales elásticos lineales, el módulo de elasticidad longitudinal es un parámetro importante ya que caracteriza el comportamiento de dicho material, según la dirección en la que se le aplica una fuerza (Askeland, 2004).

Las gráficas se obtuvieron calculando el esfuerzo mediante las siguientes ecuaciones:

$$\sigma = \frac{P}{A_T}$$

$P =$ Carga aplicada
 $A_T =$ Area de la sección transversal

$$\epsilon = \frac{L_f - L_o}{L_o}$$

$L_o =$ Longitud inicial
 $L_f =$ Longitud final

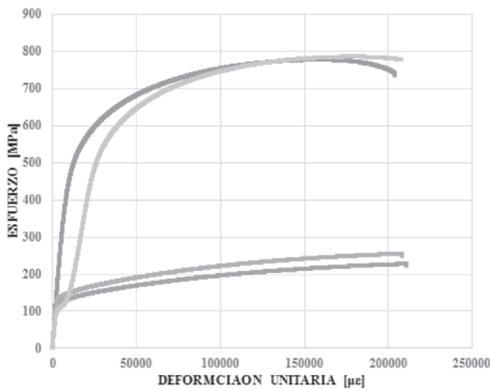


Figura 6. Esfuerzo Ingenieril contra Deformación unitaria, Fuente: Autor

- Curvas de Esfuerzo ingenieril contra deformación unitaria dentro de la región lineal.

En las gráficas de esfuerzo ingenieril contra deformación unitaria de la región lineal, ver Figura 7, se muestran la pendiente de las cuatro probetas que se sometieron al ensayo de tracción, la cual es muy similar, demostrando así el comportamiento lineal, teniendo en cuenta que se trabajó con el mismo material en todas las probetas.

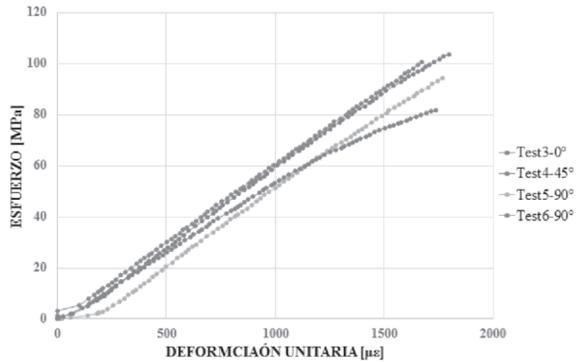


Figura 7. Región lineal del esfuerzo ingenieril contra deformación unitaria, Fuente: Autor

- Curvas de Esfuerzo ingenieril contra deformación unitaria dentro de la región lineal.

Las gráficas del esfuerzo real contra deformación unitaria, ver Figura 8, se obtuvieron contemplando la disminución del área de sección transversal, en este trabajo no se midieron las deformaciones transversales, lo cual se realizó una estimación de la disminución del área

$$\sigma_{real} = \sigma(1 + \epsilon)$$

$$\epsilon_{real} = \ln(L/L_{01})$$

$\epsilon =$ Deformación unitaria ingenieril

$\sigma =$ Esfuerzo ingenieril

$L =$ Longitud de la zona en estudio

$L_{01} =$ Longitud inicial de la zona en estudio

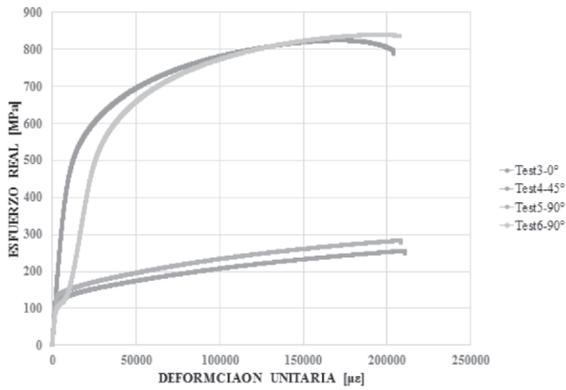


Figura 8. Esfuerzo Real contra Deformación unitaria, Fuente: Autor

- Distribución normal de los datos experimentales y obtención de rigidez y módulo de elasticidad del material.

Se calculó el valor medio y la desviación estándar de los datos obtenidos para todos los parámetros; esto con el fin de poder obtener una idea de que tan alejados están del valor de referencia.

La rigidez del material se obtuvo de las curvas de fuerza contra desplazamiento y el módulo de elasticidad se obtuvo de las curvas esfuerzo contra deformación.

En la Figura 9, se muestra el resultado para la probeta con la galga a 0° en la dirección axial de la prueba.

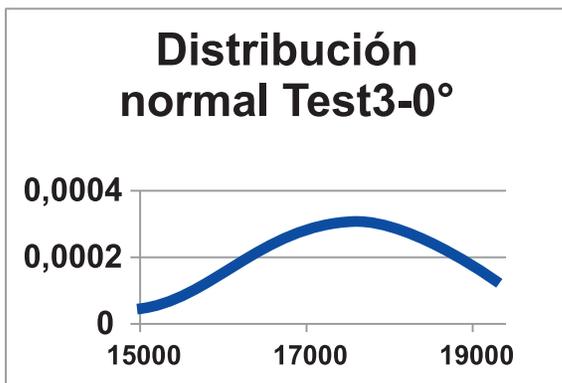


Figura 9. Distribución normal para la rigidez, Fuente: Autor

Los datos de la rigidez del material, para diferentes inclinaciones de la galga y su respectiva desviación estándar se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1. Resultados de la rigidez, Fuente: Autor

TEST	RIGIDEZ MEDIA [N/mm]	DESVIACIÓN ESTÁNDAR [N/mm]
Test3-0°	17600	1292
Test6-90°	16210	900
Test4-45°	12000	576
Test5-90°	11400	854

Con la misma metodología que se usó para el cálculo de la rigidez, se obtuvieron los valores del módulo de elasticidad y su respectiva desviación estándar, lo cual se muestra la distribución normal para la probeta con la galga con inclinación 0° en dirección axial a la prueba.

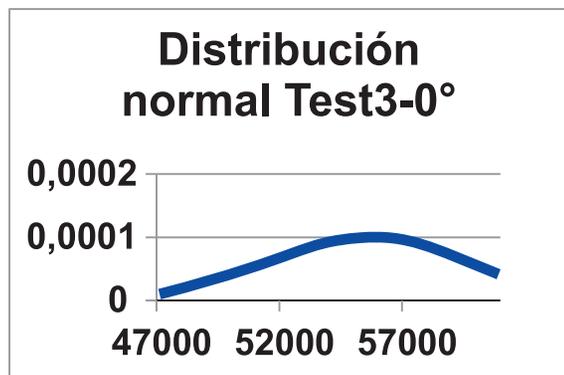


Figura 10. Distribución normal del módulo de elasticidad, Fuente: Autor

Los datos del módulo de elasticidad para todas las pruebas se detallan en la tabla 2.

Tabla 2. Resultados del módulo de elasticidad,
Fuente: Autor

TEST	ELASTICIDAD MEDIA [MPa]	DESVIACIÓN ESTÁNDAR [Mpa]
Test3-0°	55890	3992
Test6-90°	50420	2800
Test4-45°	56867	2728
Test5-90°	50845	3786

V. SIMULACIÓN DE LA PRUEBA DE TRACCIÓN

Se realizó la prueba de tracción (ASTM E8) para probetas de lámina de acero. Se tomó en cuenta los datos experimentales de la probeta con galga orientada 0°, tomando los resultados de los análisis de esfuerzos y deformaciones obtenidos, lo cual permitió la simulación numérica en ANSYS® 16.0.

Se realizó el dibujo CAD en SOLIDWORKS®, el cual permitió se exportará la geometría de la superficie de la probeta dibujada. Se realizó el modelo de media probeta con condiciones de simetría, esto con el fin de disminuir el tiempo de cómputo en la simulación por elemento finito. Para un buen análisis en ANSYS® APDL, se utilizó un elemento plano con espesor constante y se malló con una malla regular mapeada y se resolvió usando diferentes modelos de aproximación para el material: endurecimiento isotrópico bilineal inelástico; multi-lineal elástico, Lineal Isotrópico. Posteriormente se compararon los resultados de las simulaciones con los resultados experimentales y se concluyó cual es el modelo que mejor se ajustó al comportamiento real del material.

- Modelo CAD de la probeta.

El modelo se realizó en SOLIDWORKS® teniendo en cuenta la doble simetría que presenta la prueba de tracción, se hizo el modelo con solo una condición de simetría por lo cual se modeló solo la mitad de la probeta.



Figura 11. Modelo de la probeta,
Fuente: Autor

- Mallado y condiciones de frontera.

Se utilizaron los elementos: PLANE82 y PLANE182 los cuales son elementos planos con espesor constante, se usó el PLANE82 para realizar la simulación del modelo multi-lineal elástico y el PLANE182 para los otros dos modelos.

El PLANE182 se utilizó para el modelado de 2-D de estructuras sólidas. El elemento puede ser usado como elemento plano. Es definido por cuatro nodos que tienen dos grados de libertad: traducciones en x nodal y direcciones y. El elemento tiene la plasticidad, hiperelasticidad, rigidización por tensión, soporta grandes esfuerzos y deformaciones.

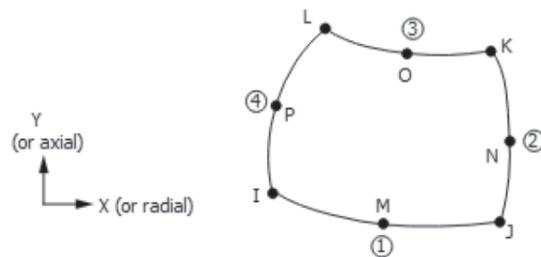


Figura 12. Elemento PLANE82, (ANSYS, 2016).

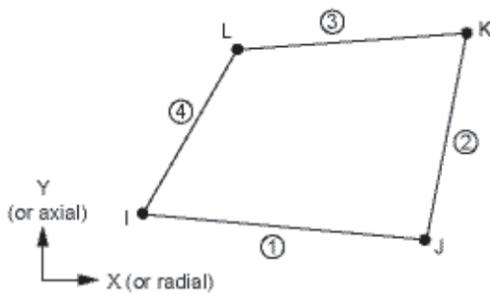


Figura 13. Elemento PLANE182, (ANSYS, 2016).

El PLANE82 es muy similar al elemento anterior solo que soporta el modelo: multi-linear elástico. La malla se realizó por secciones para obtener una malla más refinada, mediante la herramienta para mallado que nos ofrece el paquete de elemento finito. Con esto se obtuvo una malla rectangular homogénea de elementos mapeados. La malla con el PLANE82 tiene 981 nodos. La malla con el PLANE182 tiene 341 nodos (ANSYS, 2016)

Las condiciones de frontera que se aplicaron al modelo son las que simulan el agarre de la mordaza de la máquina universal de ensayos. Las cuales son una fuerza distribuida en el área que cubre la mordaza y una cara fija en el centro de la probeta la cual se puede inferir por simetría del ensayo. Adicionalmente se fijó las caras laterales para dar estabilidad al modelo y poder realizar la simulación, ver Figura 14.

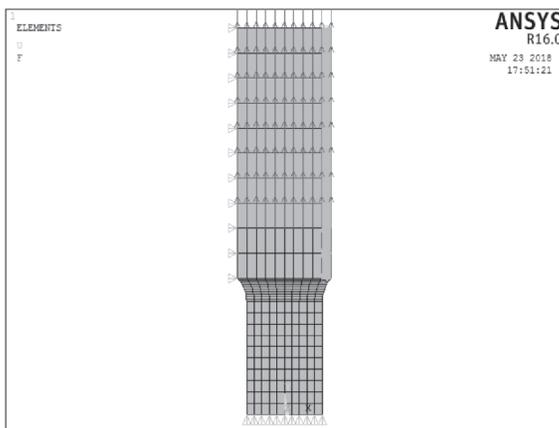


Figura 14. Condiciones de frontera, Fuente: Autor

- *Material de la probeta.*

El material de la probeta es una lámina de acero del cual se desconocen sus propiedades mecánicas, con lo que se buscó obtener y validar a partir del ensayo de tracción. Sin embargo, no se contó con una instrumentación adecuada para posibilitar la caracterización del módulo de Poisson de este acero, por lo cual se basó en el hecho que es un acero se utilizó el módulo de poisson teórico para un acero que es de 0.29 (MatWeb, 2015).

El módulo de elasticidad se calculó a partir de la prueba de tracción mediante un análisis estadístico, siendo un valor de: 55893 Mpa.

Estos dos valores se utilizaron para validar solamente la zona lineal elástica mediante el modelo linear elástico isotrópico.

De este tratamiento de datos se obtuvo en esfuerzo de fluencia de 550 Mpa.

Para el modelo bilineal se realizó un tratamiento a los datos de esfuerzo desde el esfuerzo de fluencia S_y hasta el máximo esfuerzo alcanzado en la gráfica esfuerzo ingenieril contra deformación unitaria, ya que los datos que siguen contienen un error bastante considerable de la zona en la que se presenta una estricción de la probeta (Eisenberg & Phillips, 1968), (Abdel-Karim, 2009).

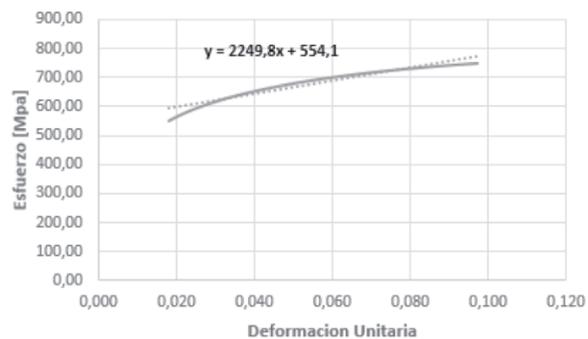


Figura 15. Módulo tangente de la región plástica, Fuente: Autor

Se obtuvo un modulo tangente elástico de la zona plástica, ver Figura 15, por medio de una regresión lineal, de $E_2 = 2250$ [Mpa]. Este dato junto con los anteriormente mencionados se utilizaron para realizar la simulación del modelo bilineal inelástico.

VI. RESULTADOS

Se alimentó el software ANSYS para que aplicara la carga por pasos y poder reconstruir las gráficas de fuerza contra desplazamiento, arrojando como resultado 12 puntos los cuales se compararon con los datos experimentales, para obtener el porcentaje de error.

- *Modelo lineal elástico isotrópico.*

Inicialmente se comparó la zona elástica lineal hasta el esfuerzo de cedencia que se calculó anteriormente, En la Figura 16 se muestra la congruencia de esta zona para el modelo estudiado por simulación y los datos obtenidos experimentalmente.

Este modelo solo es válido para miembros que estén sometidos a pequeñas deformaciones y es de utilidad por su simplicidad y practicidad.

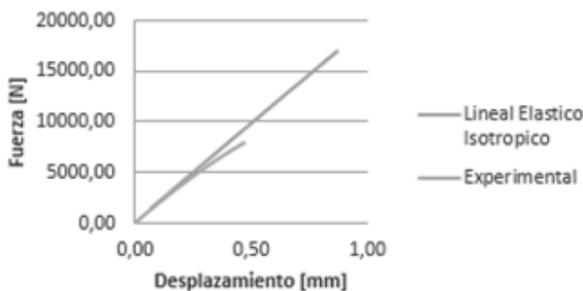


Figura 16. Simulación lineal elástica, Fuente: Autor

- *Modelo multilineal elástico.*

Este modelo se ajustó muy bien en la zona elástica para pequeños desplazamientos, sin embargo se

observó que para la zona superior plástica se alejó demasiado de los datos experimentales, (Abdel-Karim, 2009) ver Figura 17.

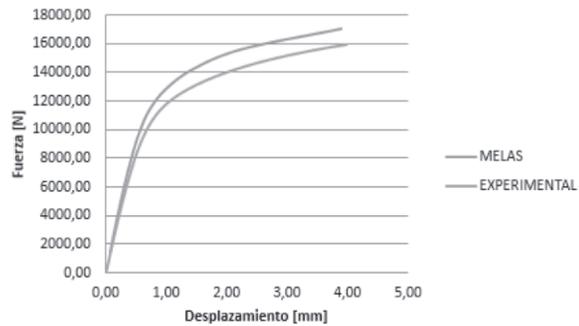


Figura 17. Simulación MELAS, Fuente: Autor

- *Modelo bilineal inelástico.*

Este modelo se aplicó por simplicidad para la simulación, sin embargo se observó que los datos se ajustan de manera apropiada en la curva de fuerza contra desplazamiento.

El inconveniente de este modelo es que en la zona de fluencia presenta una gran diferencia respecto la curva experimental, pero en conclusión es el modelo que mejor se ajusta a la curva experimental.

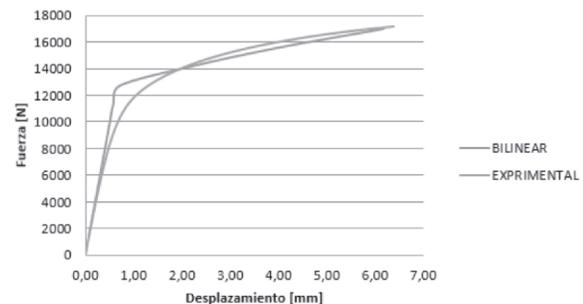


Figura 18. Simulación bilineal, Fuente: Autor

Como el modelo bilineal es el mejor modelo que se adapta a la curva experimental, se muestran los resultados del desplazamiento y el esfuerzo máximo que se obtuvieron mediante el análisis por elemento finito en ANSYS 16.0.

En la Figura 19, se muestra el contorno de desplazamientos para una fuerza de 15583 [N].

Cabe resaltar que se realizó solo una condición de simetría, con lo cual el desplazamiento obtenido es el desplazamiento total de probeta completa.

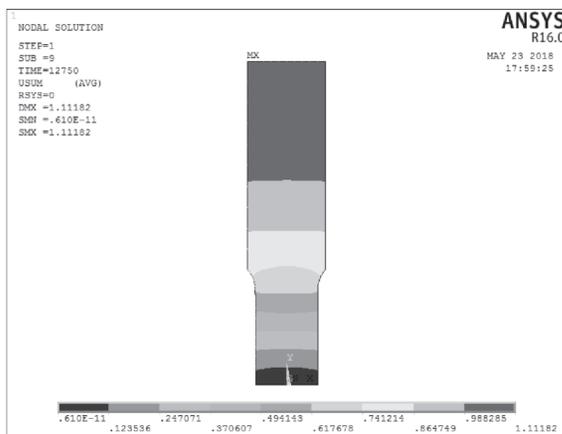


Figura 19. Contorno de desplazamiento, Fuente: Autor

En la Figura 20, se muestra el esfuerzo que sufre la probeta durante la deformación, teniendo en la parte más angosta de la probeta una concentración del esfuerzo, para lo cual está diseñada, con el fin que no se rompa por otra parte.

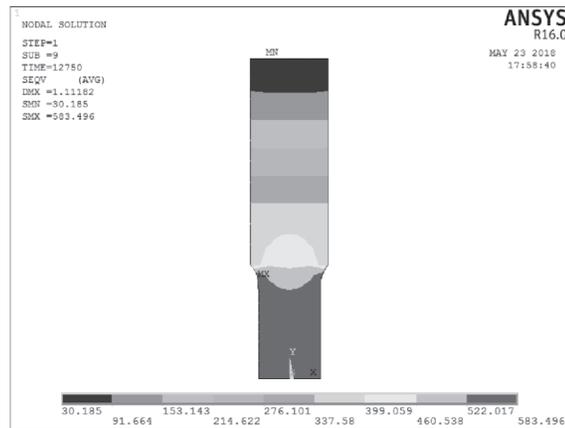


Figura 20. Contorno de esfuerzo, Fuente: Autor

- Comparación de los modelos del material y porcentaje de error.

Los tres modelos comparados con los datos experimentales son aproximados, pero se observó que la mayor similitud es el modelo bilineal, los demás solo tiene validez en la zona elástica.

Los errores obtenidos por los modelos bilineal y MELAS respecto de los datos experimentales en los puntos en los cuales se tomaron por comprobación, el error esta por debajo del 12% para la zona lineal en ambos modelos y a partir de la zona de fluencia. El modelo Melas empieza a aumentar el error, mientras que el modelo bilineal comienza a oscilar en la zona de fluencia dando unos valores de error muy altos en esta zona pero se vuelve a estabilizar hacia el final de la zona plástica.

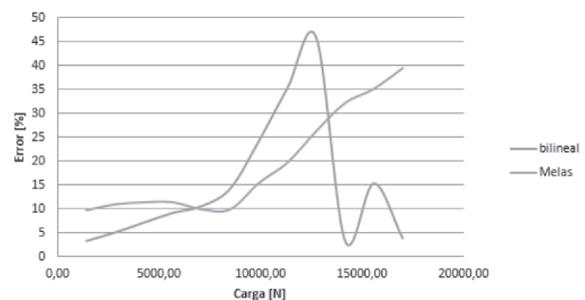


Figura 21. Porcentaje de error, Fuente: Autor

VII. CONCLUSIONES

- Con el fin de una prueba más exacta se propone utilizar una galga en dirección transversal y otra en dirección axial.
- Para la segunda prueba, correspondiente a la probeta de 90° grados, se observó una doble fluencia, lo cual se puede interpretar como un deslizamiento de la probeta respecto a la mordaza, induciendo un gran error en los datos.
- En los cuatro casos se observó una pendiente muy similar, lo que indica que se tienen un mismo módulo de elasticidad; sin embargo, se presentan diferentes esfuerzos de cedencia.
- Se determinó que las probetas son de acero; sin embargo, el módulo de elasticidad esperado solo se acerca al 25 % del valor teórico, motivo por el cual se pudo estimar que es una aleación especial de acero.
- El modelo bilineal es el que mejor se ajusta a los datos de la prueba experimental, por ende, se recomienda utilizar este modelo para una posible simulación estructural de algún elemento fabricado con este material.

VIII. AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Universidad de Guanajuato, a través de la División de Ingeniería Mecánica DICIS, Campus Irapuato-Salamanca, por el apoyo con los equipos de laboratorio para llevar a cabo las pruebas experimentales de este trabajo.

REFERENCIAS

- Abdel-Karim, M. (2009). Modified kinematic hardening rules for simulations of ratchetting. *International Journal of Plasticity*, 25 (8), 15601587. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2008.10.004>
- ANSYS. (2016). Release 16.0. SAS IP, Inc.
- Askeland, D. . (2004). *La Ciencia E Ingeniería De Los Materiales* (1a. ed.). Mexico D.F: International Thonsom Editores.
- ASTM. (2016). E8/E8M standard test methods for tension testing of metallic materials 1. *Metal Matrix Nanocomposites*, Springer,T, 42. <https://doi.org/10.1520/E0008>
- Beer, F. P., & Johnston, E. R. (2010). *Mecánica de Materiales* (5a ed.). Mexico D.F: Mc Graw Hill.
- Eisenberg, M. A., & Phillips, A. (1968). On nonlinear kinematic hardening. *Acta Mechanica*, 5(1), 113. <https://doi.org/10.1007/BF01624439>
- HBM. (2015). El puente de Wheatstone | Galgas extensométricas |
- HBM. Retrieved May 29, 2018, from <https://www.hbm.com/es/7163/el-puente-de-wheatstone-galgas-extensometricas/>
- MatWeb. (2015). AISI 4140 Steel, normalized at 870°C (1600°F), air cooled, 25 mm (1 in.) round. Retrieved May 29, 2018, from <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=8b43d8b59e4140b88ef66336ba7371a>
- Rodrigo Hernandez. (2015). ¿Cómo instalar una galga extensiométrica? Retrieved May 29, 2018, from <https://www.midebien.com/consejos-practicos-para-medir-bien/como-instalar-una-galga-extensiometrica>

Timoshenko, S. (1999). Elementos de Resistencia de Materiales (2a. ed.). Mexico D.F: Limusa.

Salamanca Sarmiento, J. R., & Vaca Rodríguez, J. S. (2017). Caracterización de un material compuesto de Tetra Pak, reforzado con polietileno de baja densidad (PEBD) y conformado en prensa de calor. *Ingenio Magno*, 8(1).

Tirupathi R., Ashok D. (1999). Elemento Finito en Ingeniería. Pearson Education.

