

## Resistencia a la tracción del acero ASTM A 36 con preparación de bordes a diferentes ángulos

**Héctor Leyva Pupo**

[hleyva@ismm.edu.cu](mailto:hleyva@ismm.edu.cu)

**Ledennis Suárez Torres**

[lstorres@ismm.edu.cu](mailto:lstorres@ismm.edu.cu)

**Juan Ramón Castillo Matos**

[rcastillonm@ismm.edu.cu](mailto:rcastillonm@ismm.edu.cu)

**Benigno Leyva de la Cruz**

[bleyva@ismm.edu.cu](mailto:bleyva@ismm.edu.cu)

Universidad de Moa

**Susana Padrosa Correa**

[susanapadrosacorrea@gmail.com](mailto:susanapadrosacorrea@gmail.com)

Empresa Comandante Che Guevara

**Resumen:** Se determinó la resistencia a la tracción del acero ASTM A 36 con preparación de bordes a diferentes ángulos y soldado con electrodos revestidos. A partir de planchas de 250x300x14 mm soldadas con preparación de bordes a 30 y 35° fueron maquinadas seis probetas (tres de cada una) las que fueron traccionadas. Se determinó que se requiere de una tensión de 531 MPa para el primero y de 527 MPa para el segundo, sin embargo, en ambos casos la rotura ocurre en la zona afectada por el calor, asociado a una modificación de la estructura cristalográfica por efecto del ciclo térmico. Por último, se necesita una fuerza de 98 783 N en el bisel de 30° y 95 100 N en el de 35°, asociado al comportamiento de la microestructural en correspondencia con el tamaño del ángulo.

**Palabras claves:** tracción; ASTM A 36; soldadura; bisel; ciclo térmico.

## Tensile strength of steel ASTM A 36 with edge preparation at different angles

**Abstract:** The microconstituents in a butt welded ASTM A 36 steel with edge preparation by means of electric arc welding with electrode E 7018 were quantified through digital image processing. Samples with bevels of 30 and 35o were prepared, which were called MI for the former and MII for the latter. The phases, the grain boundaries and the area present in the microstructure of this steel visualized in an element called pixel were identified. It was determined that, in the molten zone and in the zone affected by heat for the 30o bevel, the phase that predominates is pearlitic with 82.25%, which occupies the greatest distribution over the area of the matrix and in that of 35th, there is a tendency to remain the same, but with 56.82%; which is associated with the heat input due to the effect of the thermal cycle and the type of angle used.

**Keywords:** traction; ASTM A 36; welding; bevel; thermal cycling.

## Introducción

Los diagramas de esfuerzo deformación de diversos materiales varían y diferentes ensayos de tensión con el mismo material, pueden producir resultados diferentes de acuerdo con la temperatura de la probeta y la velocidad de carga. Sin embargo, es posible distinguir algunas características comunes en los diagramas de varios grupos y dividirlos en dos categorías: materiales dúctiles y frágiles (Fernández, Rodríguez & Alcántara, 2009).

Reportan Hernández *et al.* (2015); Suárez-Torres *et al.* (2018) que, el comportamiento de los materiales se ve reflejado en un diagrama esfuerzo-deformación el cual puede ser, elástico o elasto-plástico (tendencia ideal). En estudio realizado por Khalifa *et al.* (2016) refieren que, debido a los resultados obtenidos por vía computacional que reflejaron valores de esfuerzo superiores a fluencia, y en algunos casos a la resistencia máxima, al realizar el ensayo de tracción concluyeron que, si sucede en las zonas del metal base estas puedan fallar por fluencia, ocurra una saturación del esfuerzo y, por ende, deformación plástica del tipo ideal. En tal caso, habría que trabajar con una metodología numérica elasto-plástica.

De acuerdo con Careglio *et al.* (2010) y McCormac, Csernak & Stephen (2012), al aplicar el ensayo de tracción, aproximadamente el 90 % del trabajo mecánico efectuado sobre la probeta de material se disipa en forma de calor. Los metales disipan este con relativa facilidad y sin que se produzca un incremento significativo de temperatura. En el caso de materiales metálicos sometidos a un esfuerzo creciente, se propagan las dislocaciones existentes y se generan nuevos defectos casi desde los primeros valores de esfuerzo aplicado.

Aceros con porcentajes de carbono cercanos al límite superior como los de bajo carbono, en los que se encuentra el ASTM A 36, exhiben envejecimiento por deformación (causado por esfuerzos externos o deformación plástica por efecto de la temperatura) en el rango de 150 a 370 °C, se presenta un aumento en los esfuerzos de fluencia y a tensión. La resistencia a la tensión incrementa un 10 % con respecto a la temperatura ambiente y la fluencia puede recuperarse cerca de su valor a la misma al alcanzar entre los 260 a 320 °C. La maduración por deformación en altas temperaturas reduce la capacidad de ductilidad del acero (Castillo, Angarita & Rodríguez, 2018).

Askeland y Wright (2016) consideran que, durante el ensayo de tracción, si se descarga la probeta luego de alcanzar la zona plástica antes de producirse la ruptura, la curva  $\sigma$ - $\epsilon$  cambia de forma. La longitud tiende a recuperarse, pero no alcanza la inicial, quedando con una mayor que se denomina deformación permanente. A nivel gráfico, la curva se devuelve con la pendiente de la zona elástica. Si la curva  $\sigma$ - $\epsilon$  del material no presenta dónde termina la zona elástica y comienza la plástica, se define como punto de fluencia al correspondiente a una deformación permanente del 0,2 %.

León-Thomas *et al.* (2018) al estudiar la deformación plástica plantean que, existe una zona donde es necesario un esfuerzo adicional para producir deformación, denominada endurecimiento por deformación (acritud), porción del diagrama no considerado, refieren que, en un diagrama esfuerzo-deformación para acero dulce estructural, solo se muestra la parte inicial de la curva por la deformación que ocurre antes de la falla. En la de estos aceros, las deformaciones totales son del orden de 150 a 200 veces las elásticas. La curva continuará hasta el esfuerzo correspondiente a la resistencia final y luego descenderá, hasta la ruptura. Se presenta una aguda reducción (llamada estrangulamiento, cuello o extricción), en la sección transversal del miembro, seguida de la ruptura.

El estudio propone determinar la resistencia a la tracción del acero ASTM A 36 con preparación de bordes a diferentes ángulos y soldado con electrodos revestidos.

## **Desarrollo experimental**

### **Procedimiento experimental**

Para realizar el proceso de unión del acero ASTM A 36 se realizó una junta a tope con preparación de bordes en simple V a 30 y 35°, en planchas de 250x300x14 mm, según recomendaciones de la norma AWS D11.2. Se seleccionó un electrodo de aporte recubierto para soldadura por arco eléctrico. Se empleó los siguientes procedimientos: preparación del biselado en V previo a la soldadura, punteado del material y la soldadura.

Para la realización de un ensayo de tracción se utilizaron probetas normalizadas de acuerdo a las normas ASTM E-8. En estos ensayos pueden utilizarse probetas de sección transversal no circular, ya sea cuadrada o rectangular. El espécimen de prueba normalizado tipo-hoja se muestra en la figura 1. Este espécimen se usa por probar los

materiales metálicos tipo chapa, alambre plano, tira, rectángulos y formas que comprenden espesores nominales de 0,13 a 19 mm.

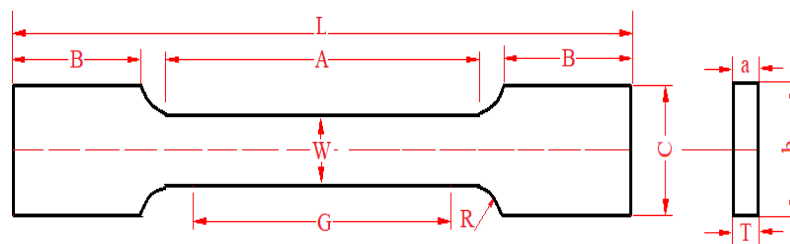


Figura 1. Probeta normalizada para el ensayo de tracción.

Para el diseño de la junta se consideró dos factores principales: el proceso de soldadura a utilizar y el espesor de las piezas. El diseño seleccionado se realizó, tomando como factor determinante la cantidad de dilución esperada entre el material base con el material de aporte.

Se estableció las dimensiones de las probetas fabricadas de acero ASTM A 36 soldada con ambos ángulos, se tiene que el área de la sección transversal inicial es de 240 mm<sup>2</sup>. En la tabla 1 se muestran las dimensiones para las muestras a traccionar.

Tabla 1. Dimensiones de las probetas

	<b>Denominación</b>	<b>Dimensiones (mm)</b>
G	Longitud del calibre	72,8
W	Ancho de la sección reducida	20
T	Espesor	14
R	Radio de filete mínimo	10
L	Longitud total mínimo	220
A	Longitud de la sección reducida	110,77
B	Longitud de agarre	X
C	Ancho de la sección de agarre	12

Las probetas fueron maquinadas a partir de tiras rectangulares de 220x20x14 mm hasta obtener la geometría especificada. Los bordes fueron redondeados para evitar que actuaran como concentradores de esfuerzos; así mismo, los refuerzos de la soldadura, tanto de cara como de raíz, se eliminaron mecánicamente con el uso de una fresadora.

### **Procedimiento para el ensayo de tracción**

En el ensayo de tracción se aplica una tensión de tracción uniaxial creciente a velocidad moderada a la vez que se registra el alargamiento que experimenta el material hasta el momento en el que se produce la fractura. Preliminar a este, se

realizó la elección de las dimensiones de las probetas de ensayo. Antes de colocarla en la máquina, con un Pie de Rey marca Mitutoyo de 300 mm y tolerancia de 0,05  $\mu\text{m}$  se determinó el espesor, estableciendo su longitud de trabajo. El orden de ejecución empleado en la realización fueron los siguientes:

1. Selección de la escala de carga a utilizar en la máquina.
2. Colocación de la probeta en las mordazas de la máquina de tracción.
3. Colocación de un medio de medición de los desplazamientos.
4. Aplicación de la carga.

Debido a la moderada velocidad de aplicación de la fuerza se considera que el ensayo de tracción es cuasi estático. En estas condiciones, el tiempo para realizarlo osciló entre segundos y varios minutos. Mientras la máquina tracciona la probeta, se observó el proceso que permitiera determinar alteraciones durante la ejecución del mismo.

### **Soldadura de las planchas de acero ASTM A 36**

La soldadura fue manual en posición plana (1G) aplicando dos pases. Ambas láminas fueron colocadas sobre un banco. Se empleó un sistema de sujeción mediante sargentos para minimizar la distorsión del conjunto y desplazamientos accidentales del mismo durante la deposición de los cordones. Las placas fueron punteadas como requisito para mantener la apertura de raíz constante en toda su longitud. En la figura 2 se muestran las planchas soldadas.



Figura 2. a) Soldadura con bisel a 30°. b) Soldadura con bisel a 35°.

La máquina soldadora empleada es un transformador tipo Miller. La regulación de los parámetros se realizó modificando la velocidad de soldadura, actuando para ello sobre la corriente y la tensión de arco. Se soldó con corriente directa electrodo positivo y con

intensidades de corriente de 105 y 160 Amp a 220 V. La intensidad de corriente empleada fue de 165 A y una tensión de 16 V.

Para el corte de las piezas se empleó una fresadora modelo 6 T 83 SH. La herramienta empleada fue de acero P6M5, de diámetro 100 mm con 80 dientes y espesor de 3 mm. En la figura 3 se muestra las probetas cortadas.



Figura 3. Piezas cortadas y fresadas.

Las probetas fueron designadas con las letras M1 y M2, las cuales están en correspondencia con el tipo de bisel realizado para la soldadura, la primera para 30° y la segunda para 35°. Se consideran tres probetas para cada tipo de preparación. Se tuvo en cuenta que en los posibles modelos que pudieran obtenerse a partir de la matriz experimental, los que incluyen las relaciones lineales entre las variables y sus interacciones, por lo que sería necesario examinar el error experimental de cada una y de sus interacciones.

## Resultados y discusión

### Análisis de la rotura de las probetas

Los efectos de los parámetros de soldadura dictaminarán la calidad final de la unión: la velocidad de soldadura influye en la calidad y la fusión del material base; el amperaje interviene en la cantidad de energía que se aporta y la capacidad de fusión del material base. En la figura 4 se observa las probetas fabricadas del acero ASTM A 36 después de fracturada. Estos resultados están en correspondencia con los biseles realizados en las mismas.



Figura 4. Probetas fracturadas.

Luego de haber realizado la tracción hasta la rotura en las seis muestras, tanto para 30 como 35°, se logra un estiramiento más prolongado en las primeras con relación a las segundas, corroborado en la estricción obtenida en el cuello, las cuales se corresponde con las diferentes zonas de la unión soldada, al tamaño de granos y las durezas en cada una. Producto de la fuerza de tracción, la probeta se rompe en la zona cercana al cordón de soldadura, en la zona de fragilidad azul. Esta zona es creada por una modificación de la estructura cristalográfica del acero, producto de las altas temperaturas alcanzadas y su brusco enfriamiento, criterio que coincide con lo planteado por Dauhajrea *et al.* (2017).

En la tabla 2 se muestra los resultados obtenidos según las dimensiones establecidas en las probetas para diferentes fuerzas.

Tabla 2. Resultados de los esfuerzos

Muestras	Fuerza aplicada (N)	Esfuerzo (MPa)
M1a (30°)	98 800	531
M1b (30°)	98 850	527
M1c (30°)	98 700	529
M2a (35°)	95 000	525
M2b (35°)	95 200	520
M2c (35°)	95 100	523

En los resultados de la fuerza se observa que, independiente en la medida que ocurre el alargamiento de las muestras, la máquina debe incrementar la misma, donde el valor promedio para llegar a la rotura del bisel de 30° fue de 98 783 N y para el de 35° de 95 100 N. Este comportamiento está asociado a que, a mayor ángulo la microestructura se comporta de forma similar a la del metal base porque el



enfriamiento es más lento, y la entrada de calor es menor, pero la ZAC es más ancha. En ángulo menor las zonas son más marcadas debido a que, la intensidad de corriente se eleva para realizar una penetración más efectiva y tiene un enfriamiento más rápido, así mismo la ZAC es menor y ocasiona que la microestructura tenga fases más duras en la térmica y el metal de aporte, según Adak, Mukherjee & Pal (2015).

A partir del módulo de Young y las deformaciones unitarias longitudinales, se determinó las deformaciones y los desplazamientos, la variación de la longitud y las deformaciones. En la tabla 3 se muestra los resultados.

Tabla 3. Resultados de las deformaciones longitudinales

Muestras	$\Delta l$ (mm)	$\xi$	Esfuerzo (MPa)
M1a (30°)	11	0,0165	492
M1b (30°)	10,5	0,01584	490
M1c (30°)	8,7	0,0132	495
M2a (35°)	12,4	0,01848	488
M2b (35°)	11,9	0,01782	480
M2c (35°)	8,9	0,01353	485

La variación de longitud es mayor para las muestras soldadas con bisel de 35°, de igual manera este comportamiento es similar en las deformaciones unitarias, pero inversamente proporcional en el esfuerzo. Según el diagrama tensión-deformación, hay una proporción entre la tensión aplicada y la deformación producida en el material. Más allá de esta zona, la deformación deja de ser proporcional a la tensión. Es donde se cumple la Ley de Hooke, hasta el límite elástico.

Gennifer, D'armas & Ciaccia (2007) han reportado que, la deformación unitaria que la precede por el endurecimiento es de diez a veinte veces mayor que la unitaria correspondiente a la iniciación del flujo plástico, por lo tanto, un miembro que desarrolle esta soporta grandes deformaciones antes de fallar. Por otro lado, los aceros exhiben deformaciones las cuales aumentan bajo cargas en función del tiempo; este fenómeno es conocido como flujo plástico del material.

Las deformaciones unitarias están en correspondencia con la variación del módulo de elasticidad, asociada a la relación del esfuerzo y la deformación en la región elástica inicial de la curva esfuerzo-deformación. Al traccionar estas probetas que se encuentran biselada y soldada, la resistencia al esfuerzo va ser modificado en relación a otra que no presente estas condiciones, considerando que en esta área se encuentra ubicado un material que, de forma general no comparte las mismas propiedades mecánicas a otro del mismo tipo sin tener restricciones, según Bolañosa *et al.* (2018).

Durante el ensayo de tracción por efecto de la fuerza aplicada, existe un alargamiento por deformación. En la tabla 4 se muestra los resultados.

Tabla 4. Alargamiento de las probetas

Probeta	Antes del ensayo			Después del ensayo			$\delta$	Elongación (%)
	$l_o$	$A_i$	$A_t = ab$	$l_f$	$A_f$	$A_f = ab$		
M1a (30°)	221	175	12,5,14	231	120,75	10,5,11,5	0,05	5,0
M1b (30°)	223	175	12,5,14	230,5	110,25	10,5, 10,5	0,048	4,7
M1c (30°)	219	175	12,5,14	228,7	121,00	11,0,11,0	0,04	3,9
M2a (35°)	220	175	12,5,14	232,4	105,00	10,5,10,0	0,056	5,6
M2b (35°)	222	175	12,5,14	231,9	132,21	11,7,11,3	0,054	5,4
M2c (35°)	225	175	12,5,14	228,9	132,00	11,0,12,0	0,041	4,0

El alargamiento de las probetas tienen diferentes comportamientos, aunque muy relacionados uno con otro independiente del tipo de bisel realizado en las probetas, no obstante, para la preparación de bordes de 30° existe un promedio en este parámetro de 0,138 y para el de 35° es de 0,151, lo que representa un 8,7 % de diferencia de uno con respecto al otro, lo cual está asociado a las características mecánicas que se obtienen en ambos biseles al ser expuesto a proceso de soldadura con electrodos E 7018.

Para ambos casos, esta es la cantidad de estricción o alargamiento que se genera en el acero ASTM A 36 soldado, por su unidad de longitud al ser sometido a esfuerzos axiales de tracción, lo cual es una característica que define la plasticidad del material. En las probetas se ha obtenido un alargamiento en su sentido longitudinal y un adelgazamiento de la sección transversal. En cuanto a la elongación de este acero, en condición de soldado, el promedio es de 4,7; sin embargo, en el caso de los estructurales está entre el 20 o 30 %, lo cual representa una disminución en un 15 % de lo establecido.

Durante el ensayo de tracción, el área de la probeta se reduce en la medida que se ejerce la fuerza de tensión. En la tabla 5 se muestra los resultados.

Tabla 5. Reducción del área en las probetas

Muestras	$\Psi$ (%)	% de $\Psi$
M1a (30°)	2,21	1,26
M1b (30°)	5,86	3,30
M1c (30°)	3,70	2,10
M2a (35°)	3,00	1,70
M2b (35°)	3,63	2,00
M2c (35°)	1,90	1,00

Se observa que, en las muestras con preparación de bordes de 30°, la reducción del área es menor que para aquellas con 35°, lo cual se debe a que, al tener menor preparación,

durante el proceso de enfriamiento, la disipación del calor introducido por el ciclo térmico lo hará más rápidamente con uno más rápido lo que trae consigo que adquiera mayor dureza y durante la tensión, ofrece mayor resistencia a ser fracturada. En un ángulo menor las zonas de la soldadura son más marcadas debido a que, la intensidad de corriente se eleva para realizar una penetración más efectiva y el cordón tiene un enfriamiento más rápido, la ZAC es menor y ocasiona que la microestructura tenga fases más duras y el metal de aporte, según lo ha reportado por León-Thomas *et al.* (2018).

Por lo anteriormente expuesto se puede plantear además que, esto no supone que la tensión necesaria se reduzca, de hecho, esta aumenta debido al endurecimiento por deformación por acritud, al igual que lo hace durante todo el ensayo a partir del límite elástico, lo que realmente ocurre es que el área resistente disminuye rápidamente y por ello, para aumentar la tensión de manera controlada es necesario reducir la carga. Estos resultados demuestran que, en muestras soldadas y sometidas a ensayos de tracción, este comportamiento disminuye la ductibilidad del acero y el área en la sección reducida, criterio que coincide con Gennifer, D'armas & Ciaccia (2007).

### Comportamiento del ensayo de tracción del acero ASTM A 36

Para determinar el comportamiento del acero ASTM A 36 sometido a proceso de soldadura con biseles a 30 y 35° se realizó el gráfico de esfuerzo-deformación para cada una de las probetas traccionadas. En la figura 5 se muestra el comportamiento para bisel de 30°.

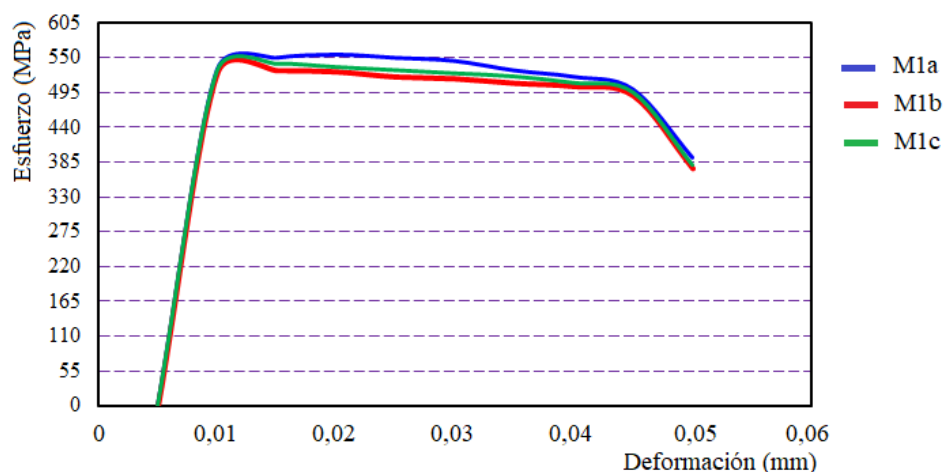


Figura 3.2. Gráfico esfuerzo-deformación para probetas con biseles de 30°.

Los resultados del ensayo de tracción, esfuerzo (S) vs deformación (e), correspondientes a la junta soldada para el bisel de 30°, muestra el comportamiento de las tres probetas. Se observa que, de forma general, las mismas casi mantienen una misma tendencia, aunque en la muestra M1a (531 MPa) hay una tendencia creciente con respecto a las demás, donde la M1c es de 529 MPa y la M1b es de 527 MPa. Este resultado presupone que todas ellas fueron realizadas bajo las mismas condiciones de soldadura. Los resultados obtenidos superan la resistencia última a la tracción del acero ASTM A 36, el cual se encuentra entre 400 y 500 MPa, obteniéndose una deformación promedio de 0,046 con este tipo de bisel.

En la figura 6 se muestra el comportamiento obtenido para las tres probetas de acero ASTM A 36 soldadas con preparación de bordes a 35°.

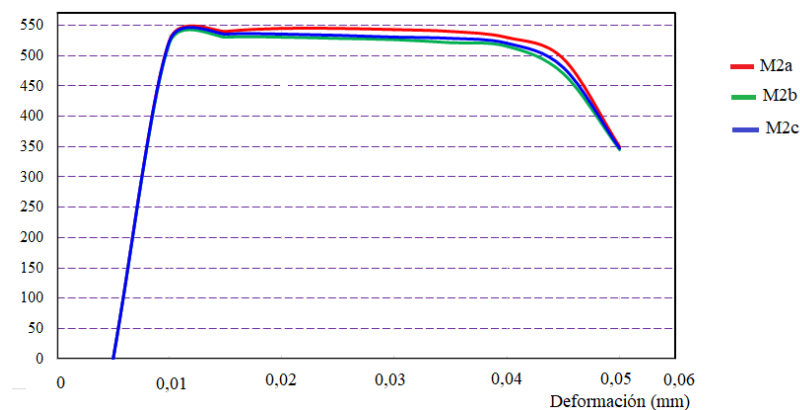


Figura 6. Gráfico esfuerzo-deformación para probetas con biseles de 35°.

Se observa en las muestras de 35° que, por efecto del valor máximo de la fuerza aplicada, se ha excedido el límite de fluencia del material, pero con valores inferiores, estos se encuentran entre 520, 523 y 525 MPa, lo cual es indicativo de que, una vez superado el límite elástico aparecen deformaciones plásticas remanentes tras retirar la carga. El esfuerzo de tensión de la soldadura, incluida la zona de fusión, debe ser superior o igual al mínimo esfuerzo especificado del material base no necesariamente tiene que ser superior o igual al actual esfuerzo de tensión del material, ya que, si el espécimen rompe en la zona de fusión y en la soldadura y satisface el mínimo esfuerzo de tensión, entonces, la soldadura es aceptada.

## Conclusiones

Al determinar la soldabilidad mediante tracción del acero ASTM A 36, con bisel de 30 y 35°, se requiere para la rotura en el primero de 531 MPa y para el segundo de 527 MPa, sin embargo, en ambos, ocurre en la zona afectada por el calor, con elongaciones entre los 3,9 y 5,6 %, correspondiéndose el último valor al bisel de 35°.

Se determinó que por efecto de la fuerza de tracción, el área de rotura de las probetas es en la zona cercana al cordón de soldadura, la frágil azul, la cual se origina luego del ciclo térmico por una modificación de la estructura cristalográfica del acero ASTM A 36, producto de las altas temperaturas alcanzadas y su brusco enfriamiento,

Para lograr la rotura de las probetas se requiere una fuerza de 98 783 N en el bisel de 30° y 95 100 N en el de 35°, debido a que a mayor ángulo la microestructura se comporta de forma similar a la del metal base porque el enfriamiento es más lento, y la entrada de calor es menor, pero la ZAC es más ancha.

## Referencias bibliográficas

- ADAK, D.; MUKHERJEE, M. & PAL, T. 2015. Development of a direct correlation of bead geometry, grain size and HAZ width with the GMAW process parameters on bead-on-plate welds of mild steel. *India: Springer India* 68(9): 839-849.
- ASKELAND, D. & WRIGHT, W. 2016. *Ciencia e Ingeniería de materiales*. Séptima Edición, Cengage Learning Editores, Ciudad de México, México.
- BOLAÑOSA, F.; CAICEDO, J.; ALFONZO, C.; SANTELIZ, A. & PORRELLO, A. 2018. Evaluación del comportamiento mecánico de un acero AISI 1045 sometido a tratamientos térmicos. *Revista Ingeniería UC* 25(1): 99-107.
- CAREGLIO, C.; MONGE, D.; PACINI, E.; MATEOS, C.; MIRASSO, A. & GARINO, C. 2010. Sensibilidad de resultados del ensayo de tracción simple frente a diferentes tamaños y tipos de imperfecciones. *Mecánica Computacional* 29(41): 4181-4197.
- CASTILLO, D.; ANGARITA, I. & RODRÍGUEZ, R. 2018. Caracterización microestructural y mecánica de aceros de fase dual (ferrita-martensita), obtenidos mediante procesos térmicos y termomecánicos. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería* 26(3): 430-439.

- DAUHAJREA, I.; ALFONZO, C.; PORRELLO, A. & TORRES, C. 2017. Determinación del comportamiento de la dureza en función del esfuerzo de tracción en un acero AISI 1005. *Revista Ingeniería UC* 24(3): 351-355.
- FERNÁNDEZ-COLUMBIÉ, T.; RODRÍGUEZ, I. & ALCÁNTARA, D. 2009. Tensión-deformación durante la deformación plástica superficial con rodillo. *Revista de Ingeniería Mecánica* 12(3): 13-22.
- GENNIFER, A.; D'ARMAS, H. & CIACCIA, M. 2007. Comportamiento elastoplástico en tracción de láminas de acero ASTM A-569. *Revista Ingeniería UC* 14(1): 57-63.
- HERNÁNDEZ, H.; CABELLO, J.; GOYTISOLO, R. & BALBIS, M. 2015. Tensiones en uniones soldadas a tope con perfiles abiertos bajo torsión. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería* 23(4): 638-646.
- KHALIFA, H.; MEGAHED, G.; HAMOUDA, R. & TAHA, M. 2016. Experimental investigation and simulation of structure and tensile properties of Tempcore treated rebar. *Journal of Materials Processing Technology* 230: 244-253.
- LEÓN-THOMAS, Y.; FERNÁNDEZ-COLUMBIÉ, T.; COBAS, M.; MOSQUEDA, M. 2018. Curva tenso-deformacional del acero AISI-1045 endurecido por deformación plástica superficial con rodillo. *Ciencia & Futuro* 8(4): 66-76.
- MCCORMAC, J.; CSERNAK, C. & STEPHEN, F. 2012. *Structural Steel Design*, Fifth edition. Editorial Prentice Hall-Pearson, California. pp 1-26.
- SUÁREZ-TORRES, L.; CORREA, O.; MACHADO, Y.; FERNÁNDEZ-COLUMBIÉ, T.; OLIVERO, E. 2018. Efecto de la torsión en muestras de acero AISI 1045 deformado por rodadura. *Ciencia & Futuro* 8(3): 59-72.