

Curva tenso-deformacional del acero AISI-1045 endurecido por deformación plástica superficial con rodillo*

Yalina León Thomas

ylthomas@mecanica.ismm.edu.cu

Tomás Fernández Columbié

tfernandez@ismm.edu.cu

Miguel A. Cobas Suárez

Maroldis A. Mosqueda Castaño

Especialidad: Ingeniería Mecánica

Instituto Superior Minero Metalúrgico (Moa).

Resumen: El objetivo del trabajo consistió en establecer el comportamiento de la curva tensión-deformación en un acero AISI 1045 deformado por el método de rodadura empleando rodillo simple. Para dar cumplimiento al objetivo propuesto se estableció un diseño de experimento teniendo en cuenta las características de las probetas a deformar; las variables fundamentales a considerar para el proceso de endurecimiento fueron avance (S), número de revolución (n) y fuerza (P) evaluadas en tres niveles cada una. Las probetas luego de ser endurecidas fueron sometidas a ensayos de tracción para determinar la curva tensión deformación del material previamente endurecido por acritud. Luego del proceso de deformación con rodillo y sometida a tracción, las muestras experimentan un incremento de las tensiones desde 674 MPa en la probeta patrón hasta 926 MPa para lo máximo en valores de deformación.

Palabras clave: tensión-deformación; rodillo simple; tracción.

* Recibido: 3 mayo 2018/ Aceptado 17 noviembre 2018.

Curve tense-deformation of the steel hardened AISI-1045 for superficial plastic deformation with roller

Abstract: The objective of the work is to establish the behavior of the curve tension-deformation in a steel AISI 1045 deformed by the rolling method using simple roller. To give execution to the proposed objective an experiment design he settled down keeping in mind the characteristics of the test tubes to deform, the fundamental variables to consider for the hardening process were advance (S), revolution number (n) and it forces (P) evaluated in three levels each one. The test tubes after being hardened were subjected to traction rehearsals to determine the curve tension deformation of the material previously hardened by acrimony. After the process of deformation with roller and subjected to traction, the samples experience an increment of the tensions from 674 MPa in the test tube pattern up to 926 MPa for the maximum values of deformation.

Key words: tension-deformation; single roller; traction.

Introducción

Las tensiones residuales en los metales son causadas por la deformación de partes de la estructura cristalina interna del propio material. Para restaurar esta retícula interna es necesaria la introducción de energía a la pieza. A diferencia de la deformación plástica superficial (DPS), las tensiones de compresión remanentes durante el temple surgen como resultado de las transformaciones estructurales, ante las cuales, la austenita se transforma en martensita con una estructura menos densa. Con el aumento del coeficiente de fricción externa y de la superficie de contacto del instrumento con la superficie de tratamiento, aumenta también las irregularidades de la deformación plástica, como consecuencia del nivel de las tensiones remanentes y la profundidad de su difusión (Korotcishe, 1989).

El trabajo en frío, refiere Martin (2002), aumenta la cantidad de tensión necesaria para el deslizamiento. Este hecho se puede relacionar con la teoría de la dislocación, ya que la red cristalina deformada del metal impide el movimiento de las dislocaciones y la dislocación bloqueada solamente puede desplazarse si se incrementa la tensión. De esta forma, un metal endurecido por deformación se puede someter a tensiones mayores que el mismo metal recocido antes de que ocurra la deformación. Esto es fundamental en la consolidación de los metales, tanto en los metales puros como en sus aleaciones.

Los valores de tensiones en la red cristalina se verán influenciados por la magnitud de las cargas aplicadas al material y la velocidad de aplicación de dichas cargas, entre otros factores que someten el enrejado cristalino a esfuerzos de tracción y compresión (las cuales actuarán en el mismo sentido o en sentido contrario a las provocadas por los desplazamientos de los cristales) y cuyos átomos constituyen barreras u obstáculos al movimiento de las dislocaciones (Pero-Sanz, 2000 y Key to Steel, 2002).

Los diagramas esfuerzo-deformación de diversos materiales varían ampliamente 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 de materiales y dividirlos en dos categorías: materiales dúctiles y materiales frágiles.

Se ha determinado que en la deformación plástica, con el empleo de rodillo, surgen tensiones residuales una vez finalizados los mismos. Fernández *et al.* (2017) plantean que las tensiones residuales internas constituyen el sistema de tensiones que puede existir en un cuerpo cuando está libre de la acción de fuerzas externas y se producen cuando un cuerpo sufre una deformación plástica no uniforme, y el signo de la tensión residual producida por dicha deformación será opuesto al de la deformación plástica que la produjo.

Para conocer las peculiaridades de la deformación plástica del material es necesario analizar su comportamiento de desplazamiento contra la fuerza aplicada al mismo.

Lubliner (1986) y Fernández y otros investigadores (2012) plantean que en la teoría de las dislocaciones se conoce que la deformación plástica en materiales dúctiles a baja temperatura resulta del movimiento de dislocaciones por deslizamiento bajo la acción de la tensión aplicada. Este mecanismo de deformación se define como deslizamiento cristalográfico y consiste en el deslizamiento de un plano de átomos sobre otro. Para que se produzca dicho deslizamiento, la tensión de cortadura sobre dicho plano deberá alcanzar un valor crítico, correspondiente al valor de la tensión de cortadura máxima en el ensayo de tracción y que se define como resistencia al deslizamiento.

El objetivo del trabajo es establecer la curva tenso-deformacional del acero AISI-1045 endurecido por deformación plástica superficial con rodillo.

Materiales y métodos

Normalización de las probetas para el ensayo de tracción

Para la realización del ensayo de tracción se utilizaron probetas normalizadas de acuerdo a las normas existentes, pueden ser probetas largas en las cuales la longitud de trabajo (l_0) es 10 d y probetas cortas donde $l_0 = 5 d$. En el experimento se emplearon probetas cortas con diámetro $D_0=11$ mm, atendiendo a la Norma NTC 595. En la Tabla 1 se muestran las especificaciones para la selección de las probetas; el tipo de probeta elegido es del tipo M II.

Tabla 1. Dimensiones de las probetas según NTC 595

	Dimensiones	Tipo M II
Do	Ancho de la sección reducida	11
W	Longitud de la sección reducida	60
D	Ancho total mínimo	20
Lo	Longitud total mínimo	120
G	Longitud de la marca	50
G	Longitud de la marca	-
L	Distancia entre mordazas	70

El cálculo del módulo de elasticidad (E) se realizó a partir de las mediciones de tensión y sus correspondientes deformaciones. Al romperse la probeta se retiró la misma de la máquina y con el pie de rey se determinó su longitud final (l_f), así como el diámetro (d_f) en la zona del cuello. El comportamiento plástico del material se estipuló a partir de las magnitudes $\% \delta$ y $\% \phi$. Los valores de la resistencia máxima a la tracción (σ_B), el límite de fluencia (σ_F) el alargamiento (δ) y la dureza (HB) para el acero AISI 1045, como se muestra en la Tabla 2, se consideró para comparar los resultados obtenidos luego del ensayo de tracción.

Tabla 2. Valores de (σ_B); (σ_F); (δ) y (HB) para el acero AISI 1045

No SAE AISI	σ_B		σ_F		δ	Dureza
	kgf/mm ²	MPa	kgf/mm ²	MPa	%	HB
1045	68,7	673,7	42,2	413,8	23	215

Determinación de las áreas iniciales y finales de las probetas

En la Tabla 3 se muestran los resultados obtenidos del ensayo de tracción, necesarios para determinar las tensiones. Se midieron los diámetros y las longitudes (l_0 ; l_f ; A_0 y A_f) de cada probeta ensayada.

Tabla 3. Resultados de las áreas iniciales y finales de las probetas

Probeta	Antes del ensayo			Después del ensayo		
	l_0	d_0	$A_0 = \frac{\pi \cdot d_0^2}{4}$	l_f	d_f	$A_f = \frac{\pi \cdot d_f^2}{4}$
	mm	mm	mm ²	mm	mm	mm ²
Pta Patrón	120,12	11,05	95,89	143,59	5,51	23,81
Pta 1	120,11	10,54	87,25	133,56	6,40	32,17
Pta 2	120,13	10,63	88,74	132,10	7,65	45,96
Pta 3	119,98	10,68	89,58	131,30	8,46	56,21
Pta 4	120,05	10,72	90,25	134,80	6,60	34,21
Pta 5	120,01	10,65	89,08	133,25	7,56	44,88
Pta 6	119,95	10,64	88,91	130,80	8,01	50,39
Pta 7	120,17	10,68	89,58	135,09	6,50	33,18
Pta 8	120,04	10,79	91,43	133,87	7,28	41,62
Pta 9	119,90	10,70	89,92	127,30	8,90	62,21

El primer resultado es de la probeta patrón, la misma no fue sometida al proceso de deformación, pero se traccionó para comparar la tensión al límite de resistencia a la tracción del acero AISI 1045. Los diámetros iniciales de las nueve probetas del experimento son tomados después del proceso de endurecimiento por deformación plástica superficial con rodillo.

Utilizando los valores de la Tabla 3, junto con el esfuerzo máximo indicado por la máquina de tracción-compresión, durante la realización del ensayo se obtuvo el valor de la tensión límite de resistencia a la tracción (σ_B).

Resultados y discusión

Curvas σ - ϵ para las probetas deformadas y ensayadas a tracción

Los resultados obtenidos de las tensiones límites de resistencia a la tracción y las tensiones de rotura describirán el comportamiento de la curva tenso-deformacional del acero AISI 1045 endurecido plásticamente con rodillo. En la Tabla 4 se muestran los valores de

esfuerzos aplicados (MPa) y las deformaciones (mm) obtenidos para la primera probeta.

Tabla 4. Valores del ensayo de tracción a la 1ra probeta

MPa	95	190	285	380	475	570	665	760	855	753
mm	0,026	0,053	0,080	0,106	0,133	0,160	0,186	0,213	0,240	0,267

Los valores obtenidos permitieron obtener el comportamiento de la primera probeta deformada, los cuales son válidos hasta el límite de rotura. Los resultados se muestran en la Figura 1 donde se valoran las variaciones del material hasta la rotura, según la dureza.

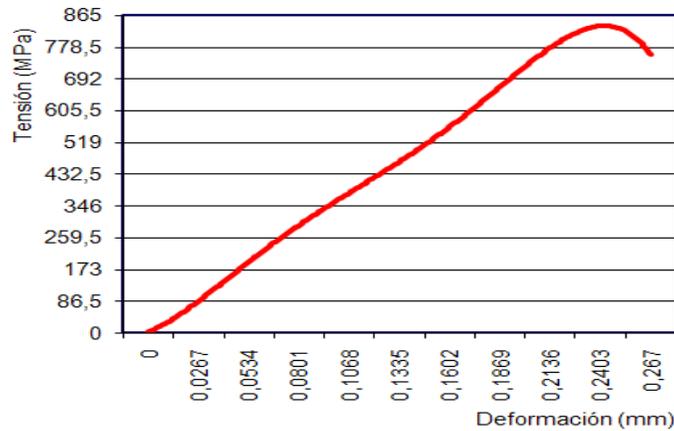


Figura 1. Curva σ - ϵ para fuerza de 500 N, S de 0,075 mm/rev y n de 27 r/min.

Los valores para determinar la curva tenso-deformacional para la segunda probeta se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5. Valores del ensayo de tracción a la segunda probeta

MPa	97,6	195,2	292,8	390,4	488	585,6	683,2	780,8	878,4	769
mm	0,026	0,052	0,079	0,105	0,132	0,158	0,184	0,211	0,237	0,264

En la Figura 2 se muestra la curva tenso-deformacional de la segunda probeta endurecida con los siguientes parámetros: P = 1 500 N; n = 27 r/min y S = 0,125 mm/rev.

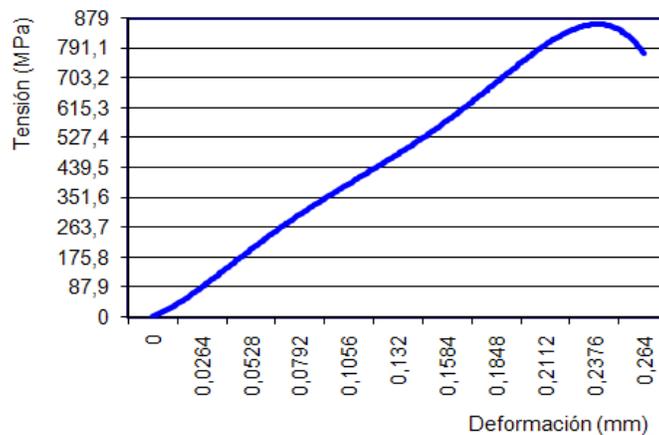


Figura 2. Curva σ - ϵ para fuerza de 1 500 N, S de 0,125 mm/rev y n de 27 r/min.

El valor máximo de tracción para esta probeta fue de 879 MPa y la rotura de 769 MPa.

Los valores para determinar la curva experimentada por la tercera probeta deformada, con los parámetros $P = 2\ 500\ N$; $n = 27\ r/min$ y $S = 0,075\ mm/rev$, se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6. Valores del ensayo de tracción para la tercera probeta

MPa	102,1	204,2	306,3	408,4	510,5	612,6	714,7	816,8	918,9	810
mm	0,026	0,052	0,078	0,105	0,131	0,157	0,184	0,210	0,236	0,263

En la Figura 3 se indica la curva tenso-deformacional de la tercera probeta, la cual fue endurecida con los parámetros relacionados anteriormente.

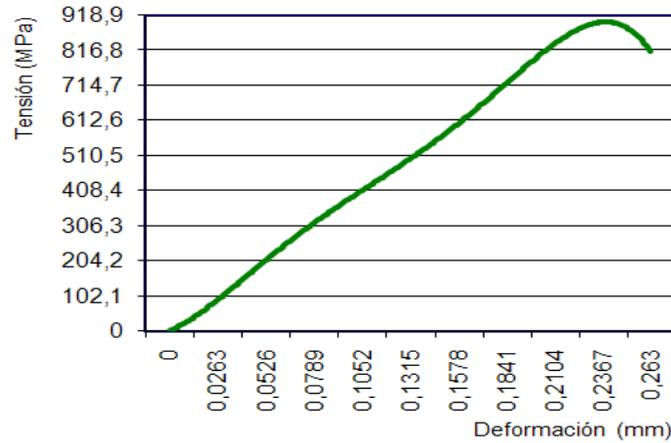


Figura 3. Curva $\sigma - \epsilon$ para fuerza de 2 500N; $n = 27\ r/min$ y $S = 0,075\ mm/rev$.

La curva tenso-deformacional para la cuarta probeta, con valores de deformación de: fuerza de 500 N; $n = 54\ r/min$ y $S = 0,25\ mm/rev$, se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7. Valores del ensayo de tracción para la cuarta probeta

MPa	90,7	181,4	272,1	362,8	453,5	544,2	634,9	725,6	816,3	708
mm	0,027	0,054	0,081	0,108	0,135	0,162	0,189	0,216	0,243	0,27

En la Figura 4 se expone la curva tenso-deformacional de la cuarta probeta.

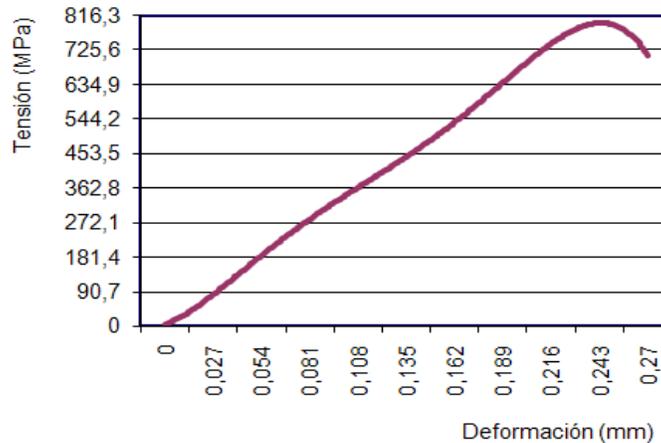


Figura 4. Curva $\sigma - \epsilon$ para fuerza de 500 N; $n = 54\ r/min$ y $S = 0,25\ mm/rev$.

Los valores para determinar la curva experimentada por la quinta probeta, con valores de endurecimiento: $P = 1\ 500\text{N}$; $n = 54\ \text{r/min}$ y $S = 0,125\ \text{mm/rev}$, se indican en la Tabla 8.

Tabla 8. Valores del ensayo de tracción a la 5ta probeta.

MPa	96,5	193	289,5	386	482,5	579	675,5	772	868,5	759
mm	0,026	0,053	0,080	0,106	0,133	0,160	0,186	0,213	0,240	0,267

En la Figura 5 se muestra la curva tenso-deformacional de la quinta probeta.

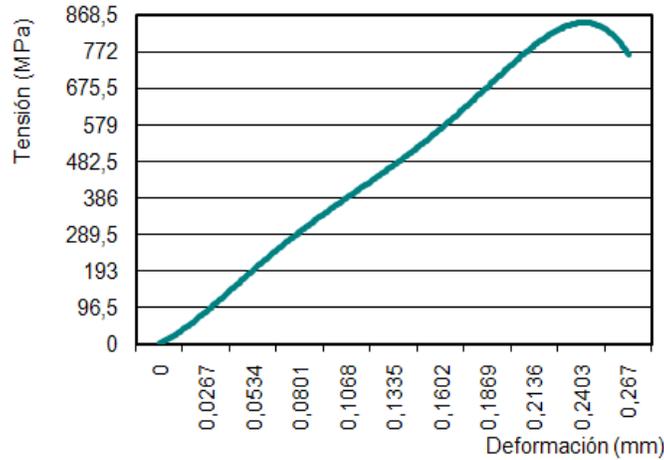


Figura 5. Curva σ - ϵ para fuerza de $1\ 500\text{N}$; $n = 54\ \text{r/min}$ y $S = 0,125\ \text{mm/rev}$.

Los valores para determinar la curva tenso-deformacional para la sexta probeta, con valores de $P = 2\ 500\ \text{N}$; $n = 54\ \text{r/min}$ y $S = 0,075\ \text{mm/rev}$ se exponen en la Tabla 9.

Tabla 9. Valores del ensayo de tracción para la 6ta probeta

MPa	101,2	202,4	303,6	404,8	506	607,2	708,4	809,6	910,8	800
mm	0,026	0,052	0,078	0,104	0,131	0,157	0,183	0,209	0,235	0,262

En la Figura 6 se exhibe la curva tenso-deformacional de la sexta probeta.

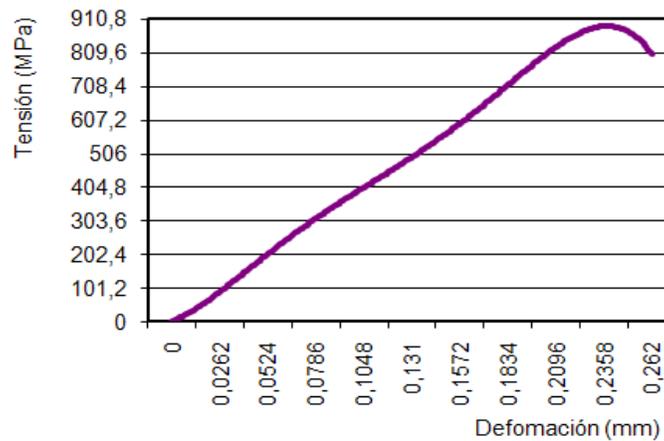


Figura 6. Curva σ - ϵ para fuerza de $2\ 500\ \text{N}$; $n = 54\ \text{r/min}$ y $S = 0,075\ \text{mm/rev}$.

Los datos para determinar el comportamiento de la rotura de la séptima probeta endurecida, con los siguientes parámetros: $P = 500 \text{ N}$; $n = 110 \text{ r/min}$ y $S = 0,25 \text{ mm/rev}$, se presentan en la Tabla 10.

Tabla 10. Valores del ensayo de tracción a la séptima probeta

MPa	90,4	180,8	271,2	361,6	452	542,4	632,8	723,2	813,6	704
mm	0,027	0,054	0,081	0,108	0,135	0,162	0,189	0,216	0,243	0,27

En la Figura 7 se muestra la curva tenso-deformacional de la séptima probeta.

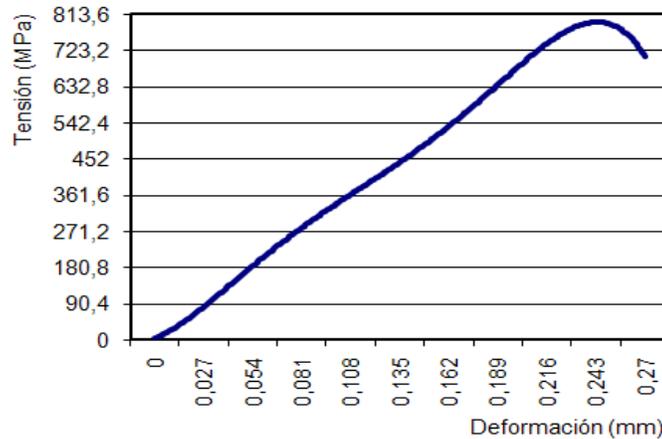


Figura 7. Curva $\sigma - \epsilon$ para fuerza de 500 N ; $n = 110 \text{ r/min}$ y $S = 0,25 \text{ mm/rev}$.

Los datos para determinar el comportamiento de la curva tenso-deformacional de la octava probeta endurecida, con los siguientes parámetros: $P = 1500 \text{ N}$; $n = 110 \text{ r/min}$ y $S = 0,125 \text{ mm/rev}$, se exponen en la Tabla 11.

Tabla 11. Valores del ensayo de tracción a la octava probeta

MPa	91,4	182,8	274,2	365,6	457	548,4	639,8	731,2	822,6	716
mm	0,026	0,053	0,080	0,107	0,134	0,160	0,187	0,214	0,241	0,268

En la Figura 8 se indica la curva tenso-deformacional de la octava probeta.

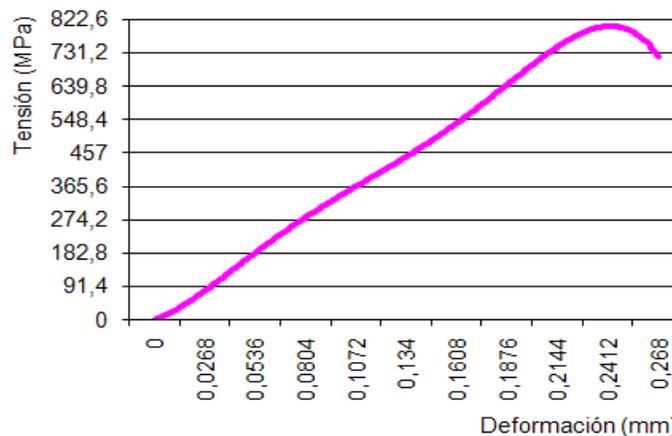


Figura 8. Curva $\sigma - \epsilon$ para fuerza de 1500 N ; $n = 110 \text{ r/min}$ y $S = 0,125 \text{ mm/rev}$.

Los datos para determinar el comportamiento tenso deformacional de la novena probeta endurecida, con los siguientes parámetros: $P = 2500 \text{ N}$; $n = 110 \text{ r/min}$ y $S = 0,075 \text{ mm/rev}$, se muestran en la Tabla 12.

Tabla 12. Valores del ensayo de tracción a la novena probeta

MPa	98,1	196,2	294,3	392,4	490,5	588,6	686,7	784,8	882,9	774
mm	0,025	0,051	0,076	0,102	0,127	0,153	0,178	0,204	0,229	0,255

En la Figura 9 se expone la curva tenso-deformacional de la novena probeta.

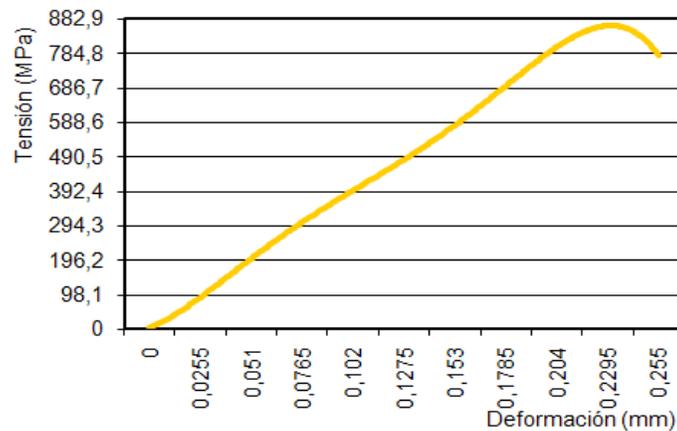


Figura 9. Curva σ - ϵ para fuerza de 2500 N; $n = 110 \text{ r/min}$ y $S = 0,075 \text{ mm/rev}$.

El comportamiento de las curvas tenso-deformacional de las nueve probetas endurecidas por deformación plástica superficial por rodadura fabricadas de acero AISI 1045 revela un incremento de (σ_B), si se tiene en cuenta que la tensión máxima de resistencia a la tracción de este material descrita en la Tabla 2 es de 673,7 MPa.

También se aprecia que en la medida en que se incrementa el parámetro (fuerza) aumenta el endureciendo de la capa superficial de la probeta, se incrementan las tensiones, por el efecto de la dureza superficial adquirida durante la deformación, por eso disminuye el porcentaje de alargamiento y se comportan menos elásticas, experimentando una tensión de rotura más alta que la normal, que oscilan entre los 704 MPa hasta 810 MPa. Esto demuestra que el método de deformación plástica superficial por rodillos es una variante tecnológica que se puede emplear para el endurecimiento de metales a piezas simétricas rotativas.

Conclusiones

Se estableció la curva tenso-deformacional de cada una de las muestras deformadas por rodillo, luego de ser sometidas a proceso de deformación plástica superficial, utilizando variables como: fuerza aplicada (P), número de revoluciones (n) y avance (S), atendiendo al diseño de experimento.

Se produjo un aumento considerable de la tensión máxima de resistencia a la tracción que incrementó las propiedades mecánicas del material, lo cual se evidencia si comparamos el valor de esfuerzo máximo $\sigma_B = 674$ MPa de la probeta patrón, con los mínimos y máximos obtenidos del cálculo de las nueve probetas ensayas, que oscilan entre 814 MPa y 926 MPa.

Los parámetros de deformación (n , P , S) constituyen factores principales para el trabajo de endurecimiento de metales y ellos pueden ser considerados a partir de las variables del proceso experimental: número de revoluciones del husillo, fuerza y avance (cada una de ellas evaluadas en tres niveles), que ofrecen la posibilidad de estimar la incidencia de dichas variables en el comportamiento mecánico del acero AISI 1045.

Referencias bibliográficas

FERNÁNDEZ-COLUMBIÉ, T.; RODRÍGUEZ-GONZÁLEZ, I.; QUINTANA-PUCHOL, R. & GARCÍA-DOMÍNGUEZ, A. 2012. Determinación de tensiones por rayos x del acero AISI 1045 deformado por rodillo. *Revista de Ingeniería Mecánica* 15(1): 23-33.

FERNÁNDEZ-COLUMBIÉ, T.; RODRÍGUEZ-GONZÁLEZ, I.; ALCÁNTARA-BORGES, D. & GAINZA-GALBÁN, N. 2017. Movimiento por cicloide en la deformación en frío del acero AISI 1045 empleando rodillo. *Minería y Geología* 33(1): 76-93.

KEY TO STEEL. 2002. Influence of Alloying Elements on Steel Microstructure. Disponible en: <http://www.key-to-steel.com>.

KOROTCISHE, L. 1989. *Procesos progresivos en la deformación plástica superficial por rodadura*. Mir, Moscú, p. 53-64.

LUBRINER, J. 1986. *Plasticity theory*. Dover publications, Inc., New York, Charter 2, p. 77-86.

MARTIN, J. 2002. Roller burnishing -A cold working tool to reduce weld induced residual stress. *American Society of Mechanical Engineers, Pressure Vessels and Piping Division (PVP)* 441(110): 115-122.

PERO-SANZ, J. 2000. *Ciencia de los Materiales*. Metalurgia Física: Estructura y Propiedades. 3ra ed. Editorial DUSSAT SA, España, p. 393-502.