

# Mechanical behavior in welding carbon steels at different levels of strain and carbon content.

X. Medina<sup>a</sup>, G. González<sup>a</sup>, S. Cabello<sup>\*,b</sup>

<sup>a</sup>Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela.

<sup>b</sup>Centro de Investigaciones en Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela.

---

## Abstract.-

A study concerning to mechanical behavior in welding carbon steels at different levels of strain and carbon content has been carried out. The investigation was conducted employing carbon steel samples of SAE 1006, SAE 1023 and SAE 1075 with three different strain levels. Welding parameters studied were current intensity, pressure and post heated time. Mechanical behavior was evaluated using tension test, and finally, a correlation with microstructure was established. It has been determined that an increment in level of strain or an increment in carbon content, produce a major sensibility of load coefficient. Additionally, the load coefficient is strongly influenced by post heated time in flash welding process.

**Keywords:** carbon steels, drawing, flash welding, strain.

## Influencia del contenido de carbono y grado de deformación acumulada en el comportamiento mecánico de la soldadura de alambre trefilado.

### Resumen.-

Se ha investigado la influencia del contenido de carbono y grado de deformación acumulada en el comportamiento mecánico de la soldadura realizada en alambres de aceros al carbono a lo largo del proceso de trefilado. Para ello se realizó procedimientos de soldadura a tope, variando los parámetros de intensidad de corriente, presión y tiempo de postcalentamiento. La evaluación se realizó en aceros al carbono SAE 1006, SAE 1023 y SAE 1075 con tres niveles de deformación por cada uno de ellos. El comportamiento mecánico se evaluó a partir de ensayos de tracción y fue correlacionado con la observación de la microestructura. Se encontró que a medida que aumenta el porcentaje de carbono o el grado de deformación en el material, aumenta la sensibilidad del coeficiente de carga frente a la variación de los parámetros de soldadura. Adicionalmente, la variable de mayor incidencia en el coeficiente de carga resultó ser el tiempo de postcalentamiento.

**Palabras clave:** aceros al carbono, trefilado, soldadura a tope, deformación.

Recibido: Octubre 2013

Aceptado: Noviembre 2014

### 1. Introducción.

El trefilado es uno de los procesos de fabricación más utilizados en la industria manufacturera de alambre. Por lo general se realiza como una

operación de trabajo en frío, donde la sección transversal del alambre se reduce al halar el material a través de una serie de dados que producen una deformación plástica importante [1]. El proceso también genera cambios microestructurales significativos y esfuerzos residuales a lo largo de la sección transversal del alambre, lo que resulta en elevados valores de resistencia a la fluencia y a la tracción, así como otras consecuencias potenciales en términos de fractura,

---

\*Autor para correspondencia

Correo-e: scabello@uc.edu.ve (S. Cabello)

fatiga y corrosión por esfuerzos [2, 3, 4].

La soldadura es un proceso adicional requerido en las líneas de producción de alambre trefilado [5], bien sea por rotura del producto a lo largo de su procesamiento o para permitir la unión entre atados y de esta manera asegurar la continuidad del proceso. Inevitablemente, la soldadura introduce en el producto una discontinuidad. Si ocurre a nivel del alambrón, aún cuando sea de unos pocos milímetros, aguas abajo del proceso se convierte en metros de alambre donde puede verse comprometida la calidad del producto. Por otra parte, aún cuando en el mejor de los casos pudiera unirse materiales de una misma colada, nunca constituirá de por sí una unión perfecta entre las dos partes. Generalmente, la incidencia de esta discontinuidad se evalúa a nivel de laboratorio para efectos de control de calidad a través de ensayos de tracción.

A partir del ensayo de tracción se puede determinar el coeficiente de carga, que es un indicativo de qué tan próximas son las propiedades mecánicas de la unión con respecto a la que tendría el material en ausencia de la soldadura, y constituye un criterio para la aceptación o rechazo de la unión. El coeficiente de carga es dependiente de la composición química del material, así como el grado de deformación previa del alambre, por lo que existe la necesidad de definir en qué medida la calidad de la soldadura se ve afectada por estos parámetros y en consecuencia, poder establecer criterios de aceptación o rechazo acordes con la factibilidad de obtener una estructura aceptable desde el punto de vista metalúrgico.

El coeficiente de carga puede determinarse experimentalmente a partir de la siguiente expresión:

$$CC = (CRS/CR) \quad (1)$$

Donde CRS representa la carga de rotura obtenida a partir de un ensayo de tracción al material soldado y CR corresponde la carga de rotura del material sin soldadura.

La presente investigación tiene como finalidad determinar el efecto que tiene el contenido de carbono y el nivel de deformación sobre el coeficiente de carga y redefinir, de ser posible, un intervalo

de variabilidad esperado del coeficiente de carga a diversas condiciones de composición química y nivel de deformación, empleando parámetros de soldeo característicos de una línea de producción de alambres de aceros al carbono.

## 2. Procedimiento experimental.

El estudio se llevó a cabo empleando muestras de acero en forma de alambrón, suministradas por VICSON S.A; Valencia, Venezuela. Las muestras evaluadas, de diámetro 5,5 mm y composición química mostrada en la Tabla 1, referidas por el fabricante de los alambres, fueron ensayadas en una máquina universal de ensayos Galdabini CTM 20, con capacidad de 20 Toneladas. Adicionalmente, por cada acero fueron trefiladas muestras en series existentes en el proceso productivo para generar los distintos grados de deformación para el estudio. En la Tabla 2 se muestran las diferentes condiciones de nivel de deformación y contenido de carbono evaluadas.

Los parámetros empleados en la soldadura fueron seleccionados en función de los equipos utilizados en el proceso productivo en las diferentes estaciones de trabajo. La Tabla 3 muestra los valores de intensidad de corriente (I), presión (P) y tiempo de postcalentamiento (t) utilizados en cada una de las combinaciones de material y grado de deformación (expresado en términos del diámetro).

Una vez identificados los parámetros de soldeo se procedió a realizar la soldadura por cuadruplicado, para cada una de las combinaciones posibles de amperaje, presión y tiempo de postcalentamiento correspondiente a cada acero y grado de deformación, arrojando un total de 27 condiciones por cada tipo de acero y grado de deformación, con lo que se evaluó un total de 243 condiciones diferentes. Ya habiéndolas soldado, se realizó los ensayos de tracción por triplicado, tanto a las muestras soldadas como a aquellas sin soldadura, para la obtención posterior del coeficiente de carga. Los ensayos de tracción se realizaron a una velocidad del cabezal móvil de 25 mm/min y con una distancia entre mordazas de 250 mm.

Tabla 1: Composición química (% peso) del material ensayado.

Material	C	Mn	Si	P	S	Al
SAE1006	0,05	0,35	0,06	0,012	0,006	0,002
SAE1023	0,23	0,88	0,133	0,019	0,015	0,001
SAE1075	0,77	0,70	0,175	0,019	0,009	0,0022

Tabla 2: Condiciones evaluadas en función del tipo de acero y nivel de deformación.

SAE 1006		SAE 1023		SAE 1075	
D (mm)	r (%)	D (mm)	r (%)	D (mm)	r (%)
5,50	0	5,50	0	5,50	0
3,15	67,2	3,16	66,99	3,50	59,5
1,35	93,98	1,44	93,15	0,96	93,98

D: diámetro del alambón o alambre.

r: reducción de área.

Tabla 3: Parámetros de soldeo empleados para cada combinación de material y nivel de deformación.

	SAE 1006			SAE 1023			SAE 1075		
	D (mm)	5,5	3,15	1,35	5,5	3,16	1,44	5,5	3,5
I0 (Amp)	410	165	24	330	125	21	400	140	9
I1 (Amp)	480	195	28	380	145	25	450	180	11
I2 (Amp)	530	230	34	430	180	29	480	205	13
P0 (MPa)	1,319	4,022	0,889	1,319	3,997	0,781	1,319	3,258	1,758
P1 (MPa)	1,979	5,028	1,185	1,979	4,996	1,042	1,979	4,072	2,344
P2 (MPa)	2,639	6,033	1,482	2,639	5,995	1,302	2,639	4,887	2,93
t0 (s)	4	1	0	4	2	1	6	2	2
t1 (s)	6	2	1	6	3	2	8	4	3
t2 (s)	8	3	2	8	4	3	10	6	4

Por cada condición fueron obtenidas las propiedades mecánicas promedio de esfuerzo de fluencia, esfuerzo máximo, porcentaje de alargamiento y, a partir de la carga de rotura se determinó mediante la ecuación (1) el coeficiente de carga.

La interacción de los tres parámetros de soldadura fueron analizados mediante el diseño factorial [6], para determinar desde el punto de vista estadístico, cuál de los parámetros es el de mayor incidencia en el comportamiento mecánico de la soldadura, tomando como variable de salida o respuesta del sistema el coeficiente de carga.

Para el diseño factorial se consideró la variación de los niveles de intensidad, presión y tiempo de post-calentamiento, definidos como los factores A, B y C respectivamente, para un diseño del tipo 33 para cada combinación de material y grado de

deformación.

En relación a la observación de la microestructura, se empleó para cada condición la muestra restante y se siguió el procedimiento señalado en las normas ASTM E-395 y ASTM E-407 que especifican las fases de embutido, desbaste, pulido y ataque, las cuales fueron realizadas a la sección longitudinal de los alambres a lo largo de la soldadura, de una longitud de aproximadamente 12 mm, que abarca la zona de fusión, zona de transición entre la zona de fusión y granos de mayor tamaño, zona de transición entre granos de mayor tamaño y aquellos de la zona afectada por el calor y por último, la zona afectada por el calor. Como reactivo de ataque se empleo Nital al 2 % con un tiempo de exposición cercano a 5 s.

### 3. Resultados y discusión.

La Tabla 4 muestra las propiedades mecánicas resultantes (Su: Resistencia a la tracción, Sy: Resistencia a la fluencia) para las diferentes condiciones de contenido de carbono y grado de deformación antes de la soldadura, así como la carga de rotura (CR).

Puede observarse el aumento de la resistencia y disminución del porcentaje de alargamiento a medida que aumenta el porcentaje de carbono y/o el nivel de deformación, lo cual es consistente con dos mecanismos de endurecimiento. Por una parte el endurecimiento debido al aumento con el contenido de carbono de la fracción volumétrica del constituyente perlítico, que al ser de mayor dureza y fragilidad en comparación con la fase ferrítica proeutectoide, provee al acero de mayor resistencia, así como de una ductilidad cada vez más limitada. Por otra parte, el endurecimiento debido al trabajo en frío, en el que, a medida que se deforma el acero, sin un mecanismo de compensación simultáneo (recuperación o ablandamiento) y con la consecuente deformación de la microestructura, se origina un aumento en la densidad de dislocaciones.

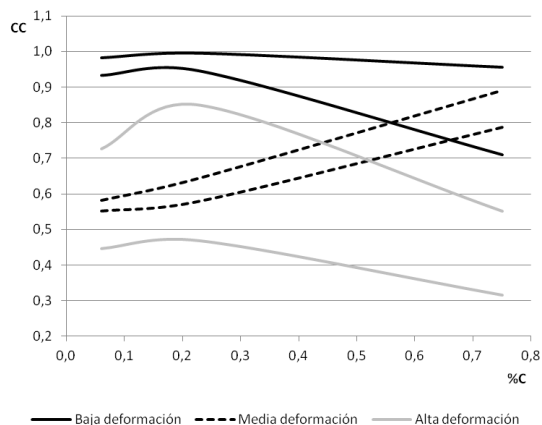


Figura 1: Banda de variación del coeficiente de carga en función del contenido de carbono por cada nivel de deformación.

En la Tabla 5 se muestra para cada acero y nivel de deformación las condiciones en las que determinadas combinaciones de intensidad de corriente, presión y tiempo de postcalentamiento producen el máximo y mínimo coeficiente de carga. Asimismo, se incluyen las propiedades

mecánicas. A partir de estos resultados se construyó las curvas en la Figura 1, que representan el intervalo de variabilidad del coeficiente de carga para diferentes condiciones de contenido de carbono y nivel de deformación.

La Figura 1 muestra las bandas de variación del coeficiente de carga por cada nivel de deformación y en función del contenido de carbono. Por cada nivel de deformación se distinguen dos curvas, obtenidas con los máximos y mínimos coeficientes de carga a diferentes contenidos de carbono, generándose las curvas superior e inferior, respectivamente. A medida que aumenta el contenido de carbono y nivel de deformación, disminuye el coeficiente de carga. Adicionalmente se observa, especialmente para los aceros SAE 1006 y SAE 1023, que a mayor nivel de deformación, aumenta la sensibilidad del coeficiente de carga frente a la modificación de los parámetros de soldadura, específicamente a medida que el porcentaje de carbono es mayor. Sin embargo, para el acero SAE 1075, del nivel de baja deformación al nivel de media deformación, el porcentaje de variación del coeficiente de carga en lugar de aumentar como en los otros dos aceros, disminuye. Esta inversión de la tendencia se atribuye a un proceso de patentado al cual es sometido este tipo de alambre para poder retrefilar hasta obtener el producto final. Ahora bien, del nivel de media al de alta deformación, se mantiene la misma tendencia de aumentar la sensibilidad del coeficiente de carga tal como se observa en los otros dos aceros de menor contenido de carbono.

El comportamiento esperado para el acero SAE 1075 (de no existir la etapa de patentado) es que a medida que aumente el grado de deformación y el porcentaje de carbono, aumente la sensibilidad del coeficiente de carga frente a cambios en los parámetros de soldadura. El comportamiento anterior se atribuye al hecho de que, por un lado, un mayor contenido de carbono equivalente disminuye la soldabilidad en los aceros, y por el otro, una estructura con mayor deformación constituye una mayor brecha en relación a la estructura resultante de un proceso de soldadura, que está altamente afectada por el calor, implicando granos recristalizados y con

Tabla 4: Propiedades mecánicas obtenidas para los distintos materiales y niveles de deformación.

	1006			1023			1075		
Diámetro (mm)	5,50	3,15	1,35	5,50	3,16	1,44	5,50	3,50	0,96
Sy (MPa)x10 <sup>-1</sup>	29,90	66,9	102,1	35,6	92,3	125,7	66,7	85,8	252,5
Su(MPa)x10 <sup>-1</sup>	39,40	75,9	102,1	56,4	98,9	134,3	109,3	121,8	252,5
% Alargamiento	24,67	2,64	1,22	25,62	3,52	1,71	10,5	10,8	2,1
Cr (N)	93,67	59,12	14,69	133,98	77,56	21,87	259,77	118,1	18,27

Tabla 5: Límites superior e inferior del coeficiente de carga por cada condición evaluada.

Acero	D (mm)	Tratamiento	C <sub>RS</sub> (N)	Sy (MPa)	Su (MPa)	% Alargamiento	CC
1006	5,50	I0P0t1	9209	300	388	20,34	0,983
		I2P2t1	8747	306	368	14,82	0,934
	3,15	I0P1t1	3439	405	441	1,79	0,582
		I0P2t2	3085	335	396	4,61	0,552
	1,35	I0P2t0	1068	746	746	0,57	0,727
		I0P2t2	656	407	459	1,79	0,447
1023	5,50	I1P1t1	13351	403	562	14,89	0,996
		I0P1t1	13271	393	559	15,62	0,946
	3,16	I0P2t0	5006	577	638	1,49	0,645
		I0P0t2	3096	301	395	3,08	0,580
	1,44	I2P0t1	1858	1139	1141	0,95	0,850
		I0P0t2	1025	615	629	0,65	0,469
1075	5,50	I2P1t0	24827	707	1045	7,90	0,956
		I0P2t1	18469	642	762	3,51	0,711
	3,50	I1P1t2	10509	807	1092	5,30	0,890
		I0P0t1	9306	967	967	4,00	0,788
	0,96	I1P0t0	1007	1391	1391	0,90	0,551
		I1P2t2	575	795	795	0,49	0,315

tendencia al aumento en su tamaño.

La zona de variabilidad del coeficiente de carga con el porcentaje de carbono, representa una banda de transición o zona en la que se espera resulten los valores del coeficiente de carga de alambre deformado desde 0 % hasta casi 100 %, con lo que se define por cada nivel de deformación un criterio de aceptación (para coeficientes de carga resultantes dentro de la banda de transición o por encima de ella) o de rechazo (para coeficientes de carga resultantes por debajo de la curva inferior). Este resultado, es de gran interés para los departamentos que controlan la calidad del producto trefilado y permite, por una parte calificar al personal dedicado a las operaciones de soldadura a tope a lo largo del proceso productivo y por otra, definir criterios para el control de la variabilidad del proceso, bien sea mediante cartas de control u otras técnicas para monitoreo de la calidad del producto.

En la Tabla 6 se muestran los resultados de los cálculos del diseño factorial. Se han tabulado las sumatorias de los cuadrados asociados a la interacción de los factores A (intensidad de corriente), B (presión) y C (tiempo de postcalentamiento) para las diferentes condiciones de material y nivel de deformación, y designadas como SCA, SCB y SCC, respectivamente. De estos valores se desprende que el parámetro de soldadura de mayor incidencia en el coeficiente de carga es el tiempo de postcalentamiento, con un 66,7 % de correspondencia entre los 9 sub-grupos, seguidamente la intensidad de corriente con una incidencia del 22,2 % y finalmente la presión, con una correspondencia de 11,1 %. Lo anterior se desprende de los valores más altos de la suma de los cuadrados asociados a los factores C, A y B, respectivamente.

Las Figuras 2, 3 y 4 muestran las estructuras a 400 X obtenidas por observación al microscopio

Tabla 6: Parámetros de interacción de los factores A, B y C para las distintas condiciones evaluadas.

D (mm)	SAE 1006			SAE 1023			SAE 1075		
	5,5	3,15	1,35	5,5	3,16	1,44	5,5	3,5	0,96
SCA	95,64011	29,63319	32,21607	98,24049	36,98470	38,25138	84,23263	71,37990	19,08420
SCB	95,64024	29,63179	32,13079	98,23823	36,98551	38,22101	84,14999	71,37952	19,10095
SCC	95,64318	29,65044	33,89773	98,23800	36,99828	40,56115	84,14288	71,53196	19,10039

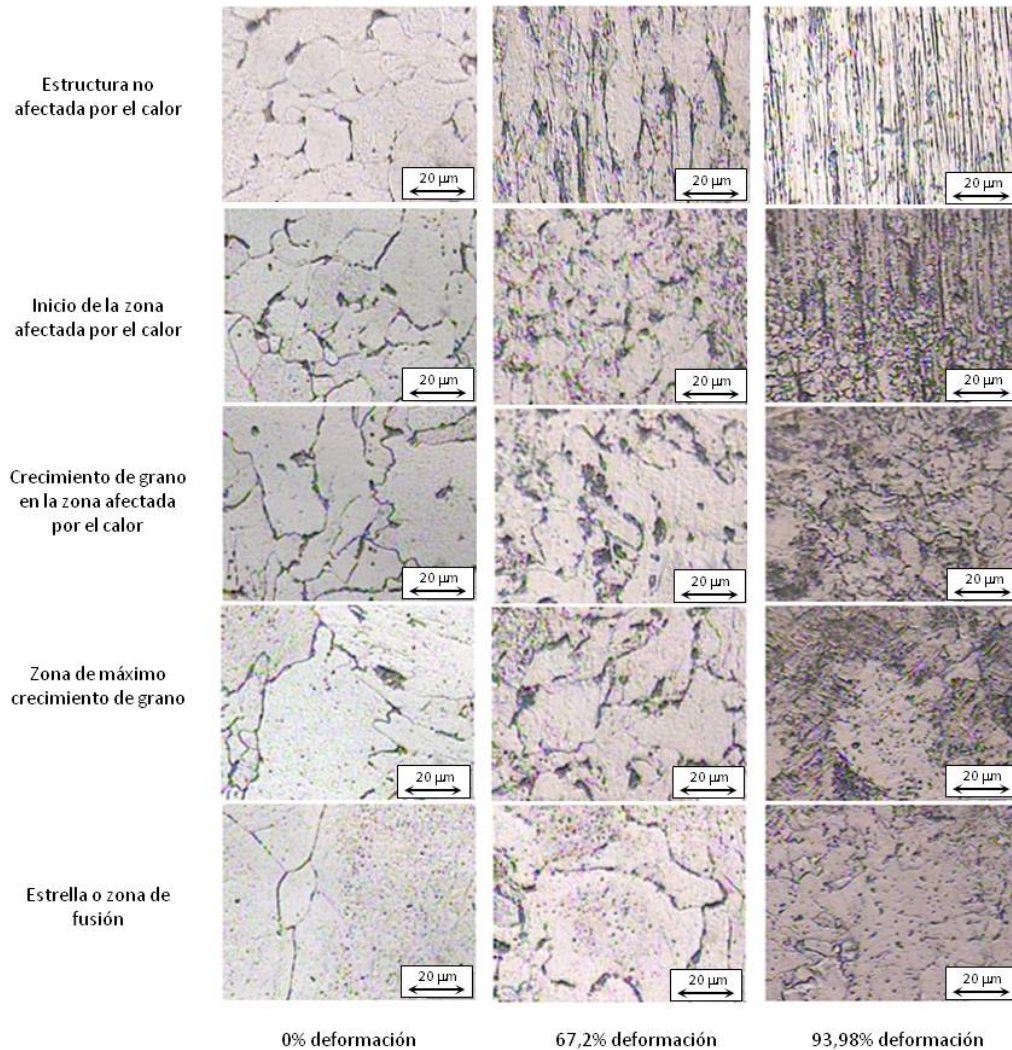


Figura 2: Imágenes del material SAE 1006 a 400 X.

óptico para los aceros estudiados a los distintos niveles de deformación.

Para el acero SAE 1006 se observa en la estructura no deformada ni afectada por el calor, la fracción de área ocupada predominantemente por ferrita, con presencia incipiente del constituyente eutectoide en los límites de grano. Por otra parte, la evolución del alargamiento en la estructura, que

obedece al proceso de deformación, con lo que se dificulta gradualmente la distinción de límites de grano. Se observa mayor heterogeneidad entre la estructura en la zona cercana a la de fusión con respecto a la estructura base, a medida que aumenta el nivel de deformación, lo que justifica la disminución del coeficiente de carga conforme avanza el grado de deformación.

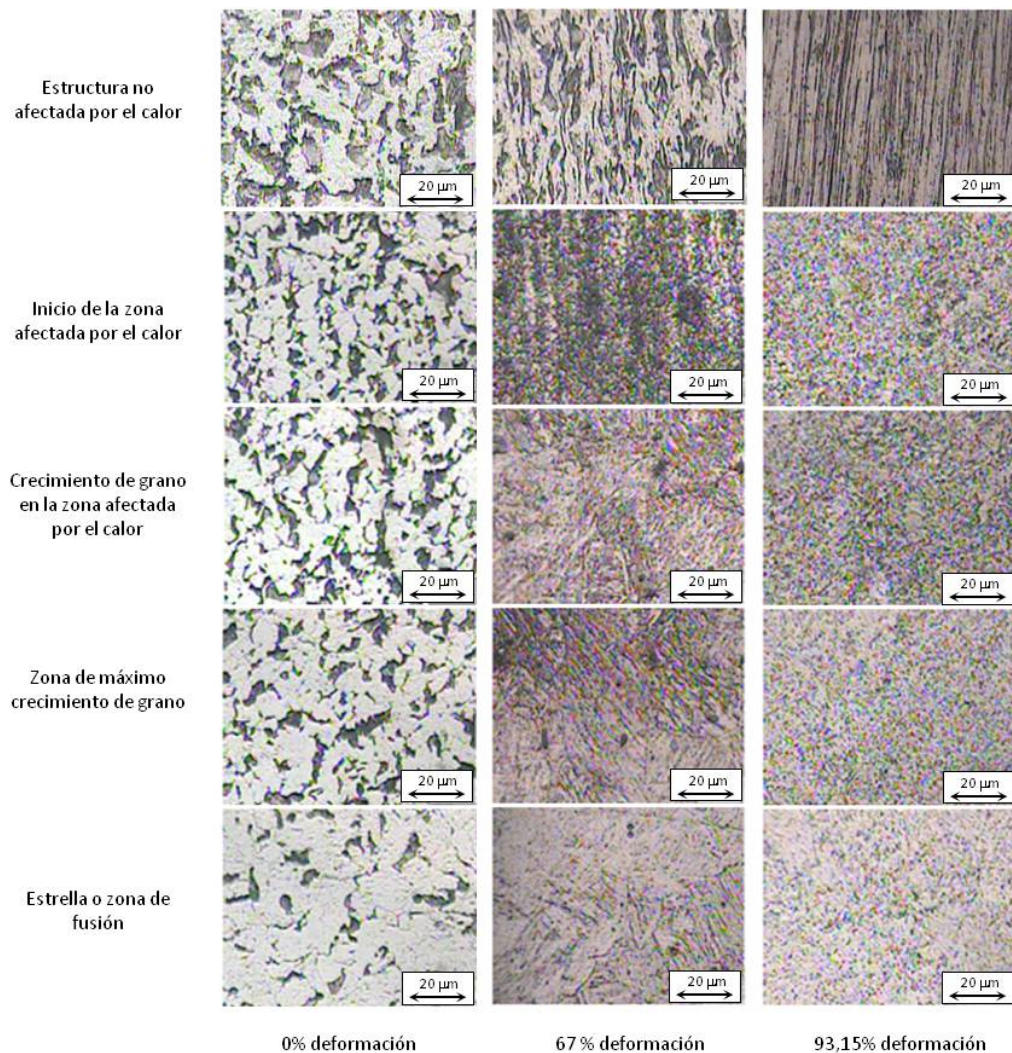


Figura 3: Imágenes del material SAE 1023 a 400 X.

Para el acero SAE 1023 se aprecia el incremento en la fracción de área ocupada por la perlita, como consecuencia del aumento en el contenido de carbono, sin embargo, un menor tamaño de grano en relación con las estructuras del acero SAE 1006. En general se evidencia nuevamente la heterogeneidad acentuada entre la estructura base deformada, con aquella generada producto de la fusión en la zona de la estrella.

El acero SAE 1075 muestra la estructura característica de un acero de composición cercana a la eutectoide y la evolución estructural con la deformación en frío es similar a los aceros de menor contenido de carbono, sin embargo, cerca a la zona de fusión, donde se espera un crecimiento de grano, se encuentra una estructura refinada, lo

cual se corresponde con un material recristalizado.

Aún cuando a partir de la observación metalográfica se identificó los distintos niveles de deformación y fracción de área ocupada por los constituyentes en función del contenido de carbono, no fue posible correlacionar la microestructura de manera directa con aquella correspondiente a los parámetros de soldeo que generan los máximos niveles de coeficientes de carga, lo cual, se atribuye a las limitaciones de la técnica de M.O. Se presume que pudieron darse cambios submicroscópicos dentro de los granos, como eliminación por el recocido de los defectos puntuales y de sus agrupamientos, la aniquilación y reacomodo de dislocaciones, la eliminación de los subgranos y su crecimiento, entre otros [7].

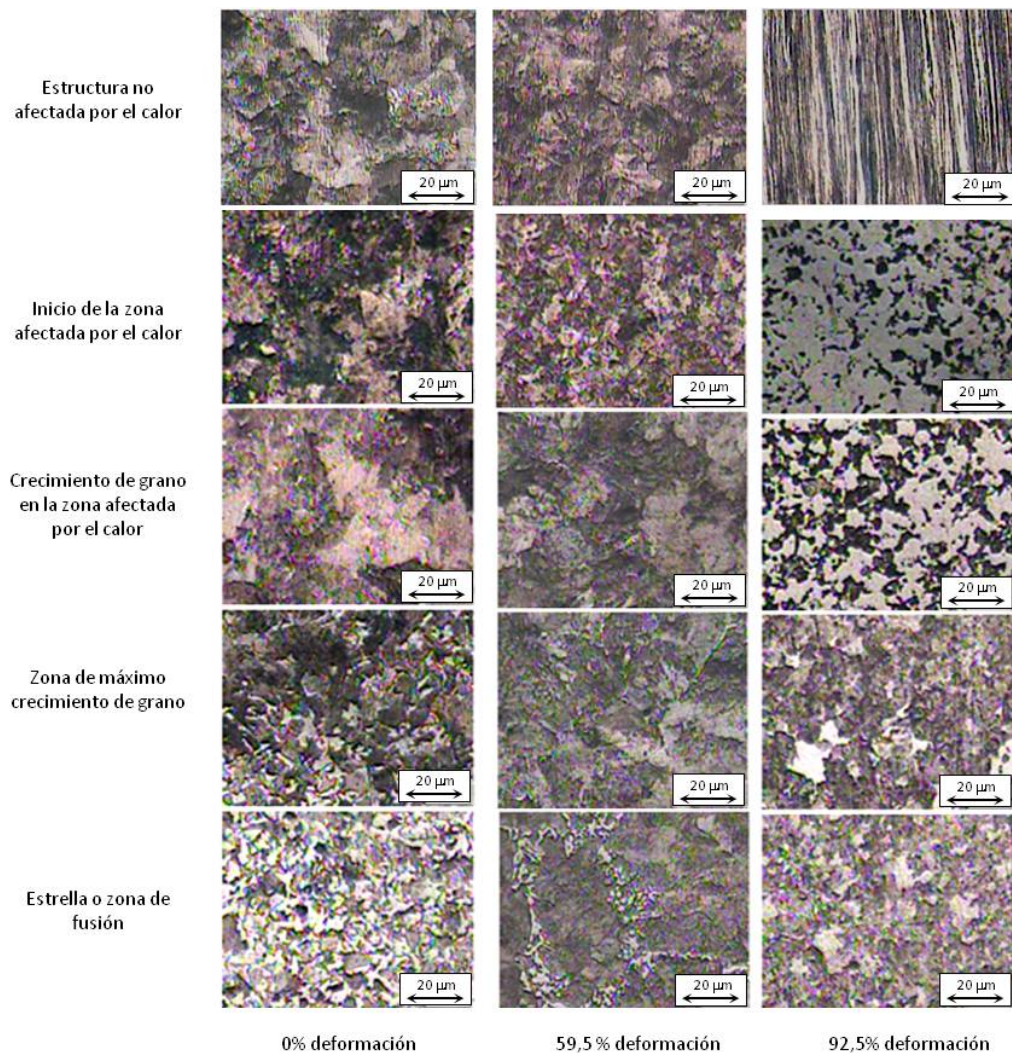


Figura 4: Imágenes del material SAE 1075 a 400 X.

#### 4. Conclusiones.

A medida que aumenta el grado de deformación y/o el porcentaje de carbono, aumenta la sensibilidad del coeficiente de carga frente a la variación de los parámetros de soldadura (intensidad de corriente, presión y tiempo de postcalentamiento).

La observación metalográfica permitió diferenciar los niveles de deformación, microconstituyentes característicos para cada acero y zonas relevantes de la soldadura, sin embargo, no se observó efectos de la intensidad de corriente, presión ni tiempo de postcalentamiento. Lo anterior se atribuye a la resolución limitada de las técnicas de M.O. frente a cambios submicroscópicos relacionados con la etapa de recuperación.

Según el análisis del diseño factorial, la variable de mayor incidencia en el coeficiente de carga resultó ser el tiempo de postcalentamiento con un 66,7 % de correspondencia, seguidamente la intensidad de corriente con 22,2 % y por último, la presión con incidencia del 11,1 %.

La banda de variabilidad del coeficiente de carga con el porcentaje de carbono para cada nivel de deformación facilita los procedimientos de calificación del personal dedicado a las operaciones de soldadura a tope a lo largo del proceso productivo, así como el establecimiento de criterios para el control de la variabilidad del proceso, bien sea mediante cartas de control u otras técnicas para monitoreo de la calidad del producto.

## Agradecimientos.

Al Consejo de Desarrollo y Humanístico de la Universidad de Carabobo por el financiamiento del proyecto de ayuda menor según N° CDCH-AM-0436-10. Asimismo, a Vicson Valencia por las muestras suministradas y el soporte técnico en la fase de caracterización.

## Referencias

- [1] S. K. Lee, D. C. Ko, and B. M. Kim. Pass schedule of wire drawing process to prevent delamination for high strength steel cord wire. *Materials & Design*, 30(8):2919–2927, 2009.
- [2] J. M. Atienza, J Ruiz-Hervias, M. L. Martinez-Perez, F. J. Mompean, M Garcia-Hernandez, and M Elices. Residual stresses in cold drawn pearlitic rods. *Scripta Materialia*, 52(12):1223–1228, 2005.
- [3] F. Yang, C. Ma, J. Q. Jiang, H. P. Feng, and S. Y. Zhai. Effect of cumulative strain on texture characteristics during wire drawing of eutectoid steels. *Scripta Materialia*, 59(8):850–853, 2008.
- [4] M. Zelin. Microstructure evolution in pearlitic steels during wire drawing. *Acta Materialia*, 50(17):4431–4447, 2002.
- [5] M. A. Béjar, W. Schnake, and R. Urqueta. Electrocontact-discharge forge welding of steel bars. *Journal of Materials Processing Technology*, 127(1):68–72, 2002.
- [6] D.C. Montgomery. *Design and Analysis of Experiments, Student Solutions Manual*. Wiley, 5th edition, 2002.
- [7] P. L. Mangonon. *Ciencia de materiales selección y diseño*. Prentice Hall, México, 2001.