

Figura 3.3.- Sistema de enfriamiento para hornos tipo campana.

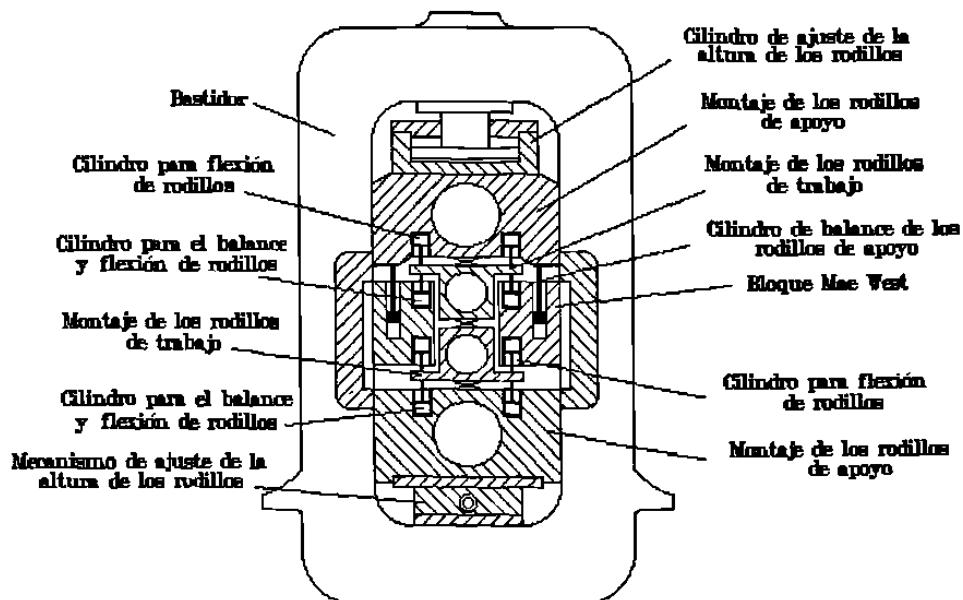


Figura 3.4.- Diagrama del molino reversible de 4 rodillos.

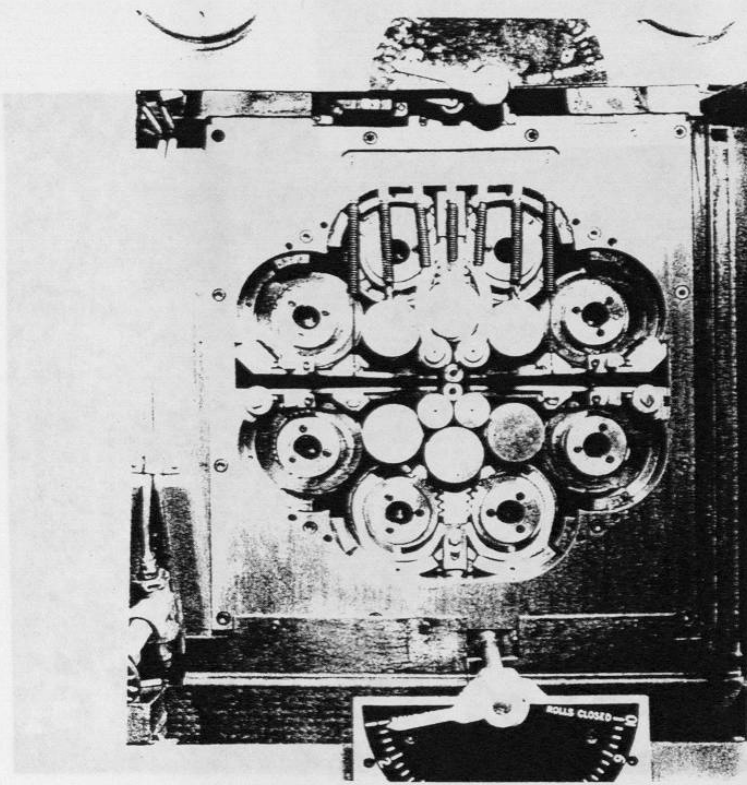


Figura 3.5.- Arreglo de rodillos del molino sendzimir.

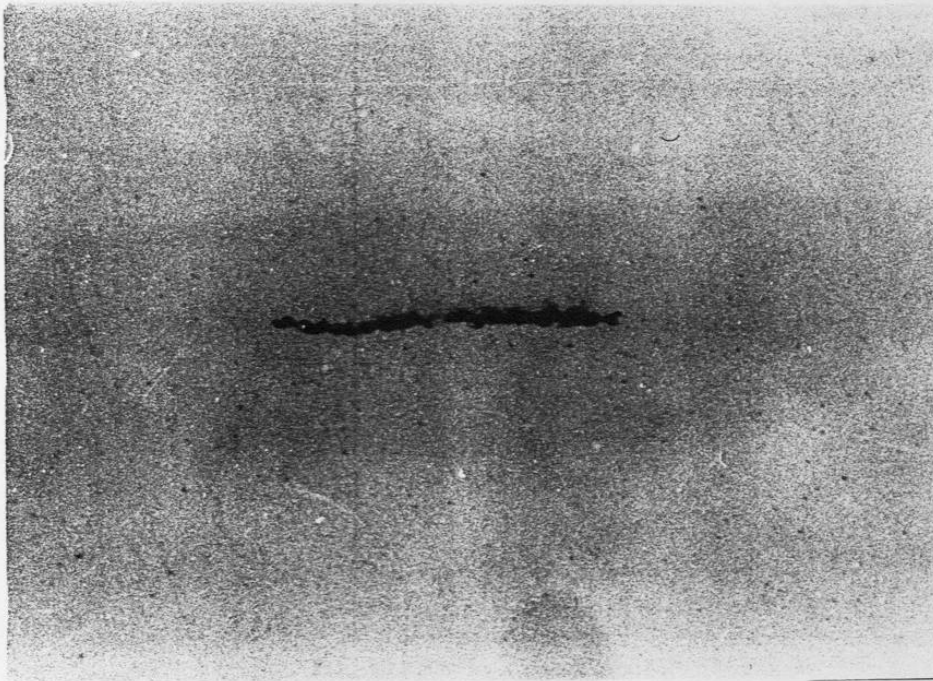
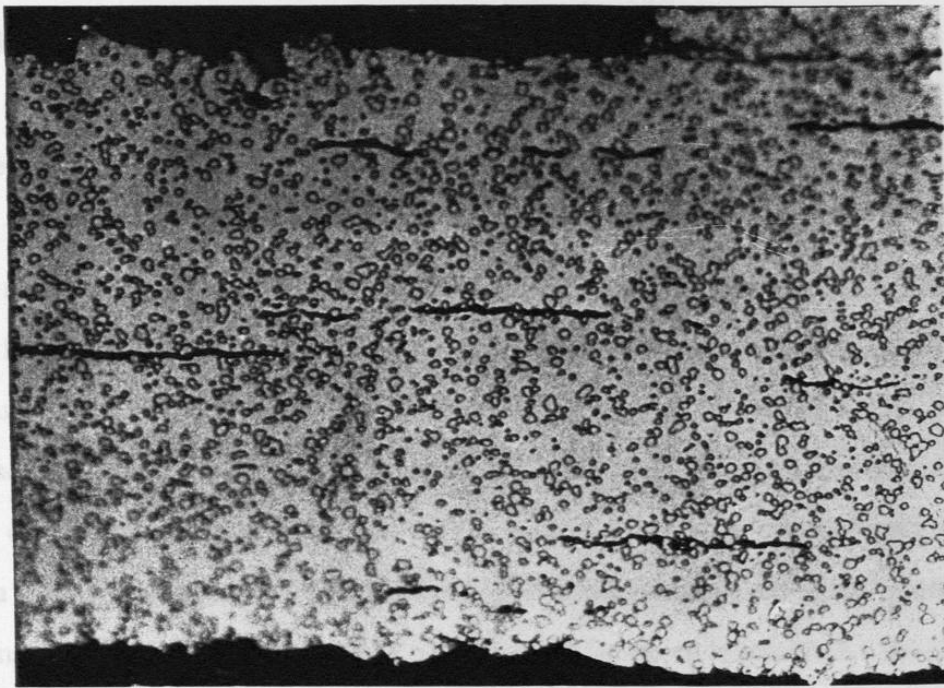


Figura 3.6.- Precipitados de grafito en muestras de 0.14mm de espesor sin ataque.

50 μm



100 μm

NUMERO DE MUESTRA	RESISTENCIA
1	120
2	125
7	130
8	135
11	140
12	145
13	150
14	155
15	160
16	165

Tabla 4.1 Muestras sometidas a prueba

En cuanto al acero 1075, se recolectaron las muestras de este material en frío o cuelas; igual cantidad de regularidad. Se recolectaron la obuvieron 6 muestras de este acero. Se sometieron a prueba de tensión

4.- Desarrollo experimental.

4.1.- Recolección de muestras.

Se tomaron muestras de acero SAE 1095 y 1075 de rollos de dos proveedores diferentes (Hoescht de Alemania y Marubeni de Japón), en las diferentes etapas del proceso de producción de cintas delgadas. Se recolectaron 5 muestras del acero 1095 de diferentes espesores (1.90, 0.635, 0.355, 0.203 y 0.137 mm) laminadas en frío o crudas, otras muestras de los mismos espesores fueron sometidas a un tratamiento de recocido de esferoidización a 710 °C con 6 horas de calentamiento, 14 horas de permanencia y 20 de enfriamiento. En total se tuvieron 10 especímenes de este acero, teniéndose así uno para cada una de las etapas del proceso de producción mencionado en la sección 3.1 del Capítulo 3. En la Tabla 4.1 se ilustran el número de muestra, espesor, condición, número de rollo y proveedor del acero 1095.

NUMERO DE MUESTRA	ESPESOR (mm)	NUMERO DE ROLLO	PROVEEDOR	CONDICION
1	1.90	502301	HOESCHT	CRUDA
2	1.90	502301	HOESCHT	RECOCIDA
7	0.635	502301	HOESCHT	CRUDA
8	0.635	502301	HOESCHT	RECOCIDA
11	0.355	502301	HOESCHT	CRUDA
12	0.355	502301	HOESCHT	RECOCIDA
13	0.203	23036031103	MARUBENI	CRUDA
14	0.203	23036031103	MARUBENI	RECOCIDA
15	0.137	2603601208	MARUBENI	CRUDA
16	0.137	2603601208	MARUBENI	RECOCIDA

Tabla 4.1 Muestras recolectadas de acero 1095.

En cuanto al acero 1075, se recolectaron tres muestras de espesores de 1.90, 1.27 y 0.599 mm laminadas en frío o crudas; igual número de especímenes fueron sujetos a un tratamiento de recocido, en total se obtuvieron 6 muestras de este acero, correspondientes a cada una de las etapas del proceso de producción.

En la Tabla 4.2 se incluye el número de muestra, espesor, condición, número de rollo y proveedor del acero 1075.

NUMERO DE MUESTRA	ESPEJOR (mm)	NUMERO DE ROLLO	PROVEEDOR	CONDICION
3	1.90	512964	HOESCHT	CRUDA
4	1.90	512964	HOESCHT	RECOCIDA
5	1.27	512964	HOESCHT	CRUDA
6	1.27	512964	HOESCHT	RECOCIDA
9	0.599	512964	HOESCHT	CRUDA
10	0.599	512964	HOESCHT	RECOCIDA

Tabla 4.2 Muestras recolectadas de acero 1075.

4.2.- Caracterización de las muestras recolectadas.

En la caracterización de las muestras recolectadas se incluye el análisis químico, destacando el porcentaje de aluminio libre y total, el porcentaje de nitrógeno libre y total, y el porcentaje de silicio, ya que estos elementos son muy importantes en la nucleación de los precipitados de grafito, al someter los aceros de alto carbono a recocidos largos en el intervalo de temperaturas de 550 a 700°C⁽²⁹⁾. También se incluyen la dureza y el análisis metalográfico de las diferentes muestras recolectadas.

4.2.1.- Análisis Químico.

El análisis químico se realizó por medio de espectroscopía de emisión para la mayoría de los elementos excepto el nitrógeno, carbono y aluminio soluble y total. Los elementos analizados fueron: C, Si, Mn, S, P, Ni, Cu, O, N, Al soluble, Al total y Oxígeno total.

4.2.2.- Dureza.

A las 16 muestras iniciales se les midió la dureza Vickers con una carga de 0.3 Kgf, con el fin de detectar si había cambios significativos en la dureza del material grafitizado, comparando su dureza con

respecto del material en condición inicial.

4.2.3.- Análisis metalográfico.

El análisis metalográfico incluye la microestructura observada con ataque de Nital, contenido de inclusiones reportadas según la norma A.S.T.M. E 45-81⁽⁵⁰⁾, tamaño de grano en muestras recocidas y presencia o ausencia de grafito. Las muestras fueron cortadas transversalmente a la dirección de laminación en frío y fueron montadas en baquelita, después fueron desbastadas en lijas de carburo de silicio de grados 180, 220, 320, 500, 1000 y 4000 y se pulieron con pasta de diamante de 1 μm para obtener el acabado a espejo, posteriormente fueron atacadas con nital para revelar la microestructura. Así se conoció el estado inicial de las muestras antes de someterlas a los recocidos de grafitización, para posteriormente detectar si hubo cambios significativos en la microestructura durante dicho proceso.

4.3.- Recocidos isotérmicos de las muestras.

Los recocidos isotérmicos se realizaron en el intervalo de temperaturas de 560 a 680 °C, durante tiempos de 20 a 500 horas en baños de sales neutras de cloruros. A las sales se les adicionó un 5 % de sal rectificadora al inicio de su operación y cada 8 horas de recocido para prevenir la decarburización de las muestras. Se prepararon 20 paquetes de 16 muestras cada uno, a cada paquete se le dió un tratamiento de grafitización isotérmico a un tiempo y temperatura determinados. En la Tabla 4.3 se muestran los tiempos y temperaturas utilizados para cada paquete de muestras.

Tiempo (hrs)	20	50	100	200	500
Temperatura (°C)					
560		1	2	3	4
590	5	6	7	8	
620	9	10	11	12	
650	13	14	15	16	
680	17	18	19	20	

Tabla 4.3 Tiempos y temperaturas de los recocidos de grafitización.

En cada temperatura se realizaron 4 pruebas a diferentes tiempos para poder construir las curvas de fracción transformada contra tiempo y, a partir de ellas, poder construir los diagramas de grafitización isotérmica. Estos tiempos y temperaturas se escogieron de acuerdo a los datos disponibles en la literatura sobre la grafitización en aceros de alto carbono, (Capítulo 2).

4.4.- Preparación metalográfica.

Las muestras sometidas a los recocidos subcríticos de grafitización, fueron cortadas transversalmente a la dirección de laminación en frío y montadas en baquelita, para ser preparadas para su observación de acuerdo al procedimiento indicado para la materia prima, con la excepción de que al pulir con pasta de diamante las muestras se rotaron constantemente para evitar que los nódulos de grafito fueran arrancados al momento del pulido final. Después fueron atacadas con nital para revelar su microestructura y se tomaron fotografías de sus estructuras.

4.4.1.- Metalografía cuantitativa.

Para cuantificar la cantidad de grafito formado durante los tratamientos isotérmicos, se utilizó un analizador de imágenes marca Kontron con el que se midió el número de precipitados, el área de cada uno, la suma de las áreas de todos ellos, el diámetro máximo y mínimo de cada uno y el porcentaje de área que ocupaban los precipitados con respecto a un área de referencia.

Para realizar la medición de los parámetros anteriores, se elaboró un programa con diferentes subrutinas cuyo listado aparece en el Apéndice 1.

Todas las mediciones se realizaron a 200 aumentos para poder medir los precipitados de grafito tanto en las muestras más gruesas (1.27 mm) como en las más delgadas (0.137 mm). También se incluyó en el programa una ventana de medición cuya área variaba de las 178,000 μm^2 en las muestras gruesas, hasta las 33,030 μm^2 en las muestras más delgadas. Las muestras 1 a 10 se midieron con una ventana de 178,000 μm^2 , las muestras 11 y 12 con una ventana de 117,800 μm^2 , las muestra 13 y 14 con una de 65,360 μm^2 y las muestras 15 y 16 con una de 33,030 μm^2 .

El tamaño de la ventana se ajustó al espesor de cada muestra para así poder medir el mayor número de precipitados por unidad de área en cada una de ellas. En cada muestra se realizaron 5 mediciones de los parámetros antes mencionados y se obtuvo el valor promedio de los mismos.

En el Apéndice 2 se detalla el procedimiento para determinar el número de aumentos y de mediciones que debían realizarse para cada muestra, utilizando el análisis de varianza de los datos obtenidos. Los resultados se presentaron en forma de histogramas y de listados, obteniendo el valor de la media de las mediciones, el valor más alto, el valor más bajo, la desviación estándar, y el número de conteos obtenidos en cada clase, para cada parámetro medido. Los parámetros de medición más importantes fueron el número de precipitados por unidad de área, el tamaño promedio, y el porcentaje de área que ocupaban los precipitados con respecto al área de la medición.

Con el número de precipitados medidos se sigue la cinética de nucleación al realizar mediciones a diferentes tiempos y temperaturas, con el tamaño promedio del diámetro máximo de los precipitados se sigue la cinética del crecimiento de los nódulos de grafito, y con el porcentaje de área ocupada se determina el porcentaje de fracción transformada del grafito.

4.4.2.- Microdurezas.

Para detectar los efectos de la grafitización en los aceros, se realizaron mediciones de microdureza Vickers en las muestras grafitizadas isotérmicamente a diferentes tiempos, y se construyeron curvas de dureza contra tiempo relacionándolas con las curvas de fracción transformada.

Para escoger la cantidad de carga a utilizar en cada muestra se midió en una misma muestra la dureza Vickers a diferentes cargas, y se compararon los resultados obtenidos para observar si había variaciones considerables entre los mismos. También se aplicó una misma carga a muestras de diferentes espesores y se observó el tamaño de huella, para escoger el tamaño adecuado en cada espesor.

Así se determinó que en las muestras de 0.127, 0.635 y 0.599 mm se utilizara una carga de 0.5 Kgf con un tiempo de penetración de 15 segs, y en las muestras de 0.203 y 0.137 mm se utilizara una carga de 0.3 Kgf.

En ambos casos se utilizó un penetrador Vickers de diamante, con un ángulo de 148.15° . Las huellas obtenidas en micras fueron convertidas a durezas Vickers (HV) por medio de la fórmula:

$$HV = \frac{2P \sin(\theta/2)}{d^2}$$

donde: P = Carga [Kgf], θ = Angulo del penetrador[°], y d = Tamaño de la huella [mm].

En cada muestra se realizaron 5 mediciones y se obtuvo su valor promedio y desviación estándar para poder construir las gráficas de dureza vs. tiempo, con un 95 % como límite de confiabilidad.

5.- Resultados.

Se presentan los resultados obtenidos en la caracterización del material inicial tanto en materia prima, como en el material en proceso. Además de aquellos obtenidos en las muestras sometidas a recocidos de grafitización a diferentes tiempos y temperaturas.

5.1.- Acero 1075.

5.1.1.- Materia Prima.

5.1.1.1.- Análisis químico.

En la Tabla 5.1 se presenta la composición química de las muestras # 3 y 4 de materia prima de acero 1075 de 1.91 mm de espesor.

% C	% Mn	% P	% S	% Cu	% Ni	% Si	% Cr	Al total	Al soluble	N (ppm)
0.75	0.61	0.014	0.001	0.03	0.02	0.22	0.17	0.026	0.017	140

Tabla 5.1 Análisis químico de materia prima de acero 1075.

5.1.1.2.- Dureza Vickers.

Se midió la dureza Vickers de la materia prima del acero 1075, encontrándose que en la condición de laminación en caliente tenía un valor de 247 HVN, mientras que la muestra recocida tenía una dureza de 177.5 HVN.

5.1.1.3.- Análisis metalográfico.

El análisis metalográfico efectuado mostró que los especímenes en condición de laminación en caliente, presentaban una microestructura de perlita laminar en el centro de las muestras, y de perlita globular en sus orillas (Figura 5.1.a). El tipo de inclusiones observadas fueron óxidos globulares tipo ASTM 1 - D (Figura 5.1.b). En las muestras recocidas se observó una microestructura de carburos globulares en una matriz de ferrita (Figura 5.1.c) e inclusiones globulares tipo 1 - D (Figura 5.1.d).

En la figura 5.1.1. se muestra la clasificación de las inclusiones de acuerdo a la norma A.S.T.M. E - 45 - 81.

5.1.2.- Material en proceso.

Se considera material en proceso al que fue sometido a una deformación en frío y al material recocido después de haber sido deformado en frío.

5.1.2.1.- Análisis químico.

En la Tabla 5.2 se presentan la composición química de las muestras # 5 y 6 de 1.27 mm de espesor y las # 9 y 10 de 0.59 mm de espesor, de material en proceso de acero 1075.

Espesor (mm)	% C	% Mn	% P	% S	% Cu	% Ni	% Si	% Cr	Al total	Al soluble	N (ppm)
1.27	0.70	0.59	0.020	0.001	0.07	0.05	0.22	0.10	0.044	0.031	67
0.59	0.73	0.66	0.020	0.001	0.07	0.03	0.21	0.17	0.045	0.031	189

Tabla 5.2 Análisis químico de material en proceso de acero 1075.

5.1.2.2.- Dureza Vickers.

Se midió la dureza Vickers del material en proceso del acero 1075, en la Tabla 5.3 se muestran los valores obtenidos para los diferentes espesores y condiciones de las muestras.

Espesor (mm)	Condición	Dureza Vickers
1.27	Cruda	302.6
1.27	Recocida	175.0
0.599	Cruda	363.7
0.599	Recocida	191.9

Tabla 5.3 Dureza Vickers de material en proceso de acero 1075.

5.1.2.3.- Análisis metalográfico.

En la Tabla 5.4 se muestran los resultados obtenidos para las muestras en proceso de acero 1075 para los diferentes espesores y condiciones de las muestras.

Espesor (mm)	Condición	Microestructura	Tamaño de grano ASTM	Inclusiones
1.27	CRUDA	Perlita globular y muy poca perlita laminar	---	1 - D
1.27	RECOCIDA	Carburos globulares y ferrita pocos carburos laminares	9.77	1 - D
0.599	CRUDA	Carburos globulares y ferrita de grano alargado	---	1 - D
0.599	RECOCIDA	Carburos globulares y ferrita de grano equiaxial fino	9.87	1 - D

Tabla 5.4 Análisis metalográfico de material en proceso de acero 1075.

5.2.- Acero 1095.

5.2.1.- Materia prima.

5.2.1.1.- Análisis químico.

En la Tabla 5.5 se presenta la composición química de las muestras # 1 y 2 de materia prima de acero 1095 de 1.91 mm de espesor.

% C	% Mn	% P	% S	% Cu	% Ni	% Si	% Cr	Al total	Al soluble	N (ppm)
1.03	0.41	0.017	0.003	0.02	0.02	0.17	0.20	0.000	0.000	124

Tabla 5.5 Análisis químico de materia prima de acero 1095.

5.2.1.2.- Dureza Vickers.

Se midió la dureza Vickers de la materia prima del acero 1095, encontrándose que en la condición de laminación en caliente tenía un valor de 263 HVN, mientras que la muestra recocida tenía una dureza de 171.7 HVN.

5.2.1.3.- Análisis metalográfico.

En el análisis metalográfico efectuado se observó que las muestras en condición de laminación en caliente presentaban una microestructura de perlita laminar en el centro de las muestras y de perlita globular en sus orillas (Figura 5.2.a). El tipo de inclusiones observadas fueron óxidos globulares tipo ASTM 1 - D (Figura 5.2.b).

En las muestras recocidas se observó una microestructura de carburos globulares en una matriz de ferrita (Figura 5.2.c) e inclusiones de óxido globular tipo 1 - D (Figura 5.2.d).

5.2.2.- Material en proceso.

5.2.2.1.- Análisis químico.

En la Tabla 5.6 se presentan los análisis químicos de las muestras de material en proceso de acero 1095 de diferentes espesores.

Espesor (mm)	%C	%Mn	%P	%S	%Cu	%Ni	%Si	%Cr	Al Total	Al Soluble	N (ppm)
0.635	0.96	0.42	0.015	0.001	0.09	0.06	0.19	0.17	0.022	0.013	68
0.355	0.96	0.42	0.015	0.001	0.09	0.06	0.19	0.17	0.022	0.013	68
0.203	0.96	0.43	0.019	0.001	0.11	0.07	0.17	0.17	0.020	0.014	171
0.137	1.01	0.39	0.021	0.001	0.10	0.07	0.21	0.18	0.000	0.000	132

Tabla 5.6 Análisis químico de material en proceso de acero 1095.

5.2.2.2.- Dureza Vickers.

Se midió la dureza Vickers del material en proceso del acero 1095, en la Tabla 5.7 se muestran los valores obtenidos para los diferentes espesores y condiciones de las muestras.

5.2.2.3.- Análisis metalográfico.

En la Tabla 5.8 se resumen los resultados obtenidos para las muestras en proceso de acero 1095 para los diferentes espesores y condiciones de las mismas.

En las muestras 13 y 15 se observaron precipitados redondos en la cara transversal, y alargados en la cara longitudinal, desconociéndose su composición. Para identificar de que elementos estaban constituidos se realizó un análisis de espectroscopía de energía dispersiva (EDS) encontrándose que era carbono, como lo muestran los espectros obtenidos figuras 5.2.1 y 5.2.2.

Número de Muestra	Espesor (mm)	Condición	Dureza Vickers	Carga (Kgf)
7	0.635	Cruda	329.7	0.5
8	0.635	Recocida	183.9	0.5
11	0.355	Cruda	284.9	0.5
12	0.355	Recocida	182.1	0.5
13	0.203	Cruda	175.0	0.3
14	0.203	Recocida	159.4	0.3
15	0.137	Cruda	247.0	0.3
16	0.137	Recocida	172.5	0.3

Tabla 5.7 Dureza Vickers del material en proceso de acero 1095.

Espesor (mm)	Condición	Microestructura	Tamaño de grano	Inclusiones
0.635	CRUDA	Carburos globulares y ferrita de grano alargado	-----	1 - C
0.635	RECOCIDA	Carburos globulares y ferrita de grano equiaxial	9.62	1 - D
0.355	CRUDA	Carburos globulares y ferrita de grano alargado	-----	2 - D
0.355	RECOCIDA	Carburos globulares y ferrita de grano grueso	9.69	2 - D
0.203	CRUDA	Carburos globulares y ferrita de grano fino	-----	1 - D
0.203	RECOCIDA	Carburos globularse y ferrita de grano grueso	9.27	1 - D
0.137	CRUDA	Carburos globulares y ferrita de grano fino	-----	1 - D
0.137	RECOCIDA	Carburos globulares y ferrita de grano grueso	8.98	1 - D

Tabla 5.8 Análisis metalográfico de material en proceso de acero 1095.

5.3.- Recocidos de grafitización.

Las muestras recolectadas fueron sometidas a recocidos subcríticos de grafitización, a diferentes tiempos y temperaturas, y se les caracterizó por medio de metalografía óptica, metalografía cuantitativa y microdureza.

5.3.1.- Metalografía óptica.

Se tomaron fotografías de las muestras que grafitizaron observándose su microestructura, tamaño de grano y presencia de grafito. En el acero 1075 sólo la muestra 5 de material en proceso, de 1.27 mm de espesor, sometida a un 33 % de deformación en frío, con una estructura inicial de mezcla de carburos globulares y laminares en una matriz de ferrita grafitizó. En las Figuras 5.3.1 a 5.3.5 se muestra el crecimiento de los nódulos de grafito a las temperaturas de 560, 590, 620, 650 y 680 °C a tiempos de 20, 50, 100, 200 y 500 horas de recocido.

En esta figura se observa el crecimiento de los nódulos de grafito a una misma temperatura, así como el crecimiento del grano ferrítico y la disolución de los carburos laminares al ir aumentando el tiempo del recocido. También se observa que a un mismo tiempo de recocido por ejemplo a (200 horas), el tamaño de los nódulos es mayor a temperaturas más altas (650 y 680 °C), mientras que a temperaturas bajas (560 °C, 500 horas) los nódulos de grafito son más pequeños, pero existen en una mayor cantidad. No se observa crecimiento en el tamaño de los carburos esferoidizados al aumentar el tiempo a temperaturas de 560, 590 y 620 °C, mientras que a 650 y 680 °C se observa un ligero aumento en su tamaño. Las muestras 3 y 4 de materia prima de 1.90 mm de espesor y las muestras 9 y 10 de material en proceso de 0.599 mm de espesor crudas y recocidas no presentaron grafitización al ser sometidas a los diferentes tiempos y temperaturas de recocido subcrítico. La muestra 6 de material en proceso recocido de 1.27 mm de espesor tampoco presentó grafitización.

En el acero 1095 se observó la grafitización de las muestras 7, 8, 11, 13, 15 y 16, siendo mayor la grafitización en las muestras deformadas en frío que en las muestras recocidas. Las muestras 12 y 14 no presentaron grafitización. La muestra 7, con espesor de 0.635 mm, deformada en frío 50 % y con una microestructura inicial de carburos globulares en matriz de ferrita de grano alargado, presentó

grafitización desde temperaturas bajas y tiempos cortos. En las Figuras 5.4.1 a 5.4.5 se muestra el crecimiento de los nódulos de grafito. A las 50 horas del recocido efectuado a 560 °C, se presentan unos pocos y pequeños nódulos de grafito, los cuales crecen al aumentar el tiempo de recocido hasta 500 horas, el tamaño de grano y los carburos globulares crecen muy poco al aumentar el tiempo de recocido. A las 20 horas de recocido efectuado a 590 y 620 °C se presentan muy pocos nódulos de grafito fino en una matriz ferrítica de grano fino.

El tamaño de los nódulos de grafito aumenta en forma notoria al aumentar el tiempo de recocido, mientras que el tamaño de grano ferrítico y el de los carburos globulares cambia poco, aún a 200 horas de recocido. A las 20 horas del recocido efectuado a 650 °C, se presenta un mayor número de nódulos de grafito finos en una matriz de ferrita de grano fino, al aumentar el tiempo de recocido aumenta el tamaño de los nódulos de grafito y el tamaño de grano ferrítico. Los carburos globulares disminuyen en cantidad pero aumentan ligeramente su tamaño al aumentar el tiempo de recocido isotérmico. A 680 °C, al aumentar el tiempo de recocido, el tamaño de grano ferrítico crece en forma más notoria en comparación con todas las temperaturas anteriores. Los nódulos de grafito crecen con el tiempo de recocido y los carburos globulares disminuyen en cantidad pero aumentan ligeramente su tamaño al aumentar el tiempo de recocido.

La muestra 8, con espesor de 0.635 mm y recocida a 710 °C con 6 horas de calentamiento y 14 horas de permanencia a dicha temperatura, grafitizó en menor cantidad que la muestra 7, deformada en frío. En las Figuras 5.5.1 a 5.5.5 se muestra el crecimiento de los nódulos de grafito. A 560 °C se observa que al aumentar el tiempo del recocido, aumenta el tamaño de los nódulos de grafito pero no así su cantidad. También se observan carburos globulares gruesos en una matriz de ferrita de grano más grueso 13.56 μ m (9.62 ASTM), que en la muestra 7. A 590 y 620 °C se observa que, al aumentar el tiempo de recocido, aumenta el tamaño de los nódulos de grafito apareciendo en menor cantidad a comparación de la muestra 7. El tamaño de los carburos globulares y el tamaño de grano ferrítico aumentan muy poco al incrementarse el tiempo del recocido. A 650 y 680 °C se observa un crecimiento de los nódulos de grafito al aumentar el tiempo del recocido, a 680 °C se observa un mayor crecimiento en el tamaño de grano ferrítico, en comparación con las otras temperaturas de recocido.

En todos los especímenes de la muestra 8 se observa un mayor tamaño en los carburos globulares en comparación con aquellos de la muestra 7.

La muestra 11, con espesor de 0.355 mm, deformada en frío 44 % y con una microestructura inicial de carburos globulares y ferrita de grano alargado, presentó muy poca grafitización a 20, 50, y 100 horas de recocido en el intervalo de temperaturas de 560 a 620 °C. En las Figuras 5.6.1 a 5.6.5 se muestra el crecimiento de los nódulos de grafito. A 560 °C se aprecia grafitización a las 200 horas de recocido isotérmico, preferentemente en una orilla de la muestra, siendo los nódulos de grafito de mayor tamaño que los de la muestra tratada a 560 °C 200 horas. A 650 y 680 °C se observa un mayor crecimiento de los nódulos de grafito y del tamaño de grano ferrítico al aumentar el tiempo del recocido isotérmico. El mayor crecimiento de grafito se obtuvo en el recocido efectuado a 650 °C durante 200 horas, pero en el efectuado a 680 °C durante 200 horas hubo un mayor número de nódulos de grafito de tamaño menor que los de la muestra antes mencionada.

La muestra 12, con espesor de 0.355 mm y recocida a 710 °C no presentó grafito al ser sometida a los mismos tratamientos de grafitización que las muestras anteriores, aún a tiempos largos y temperaturas altas.

La muestra 13, con espesor de 0.203 mm, deformada en frío 42 % y con una microestructura inicial de carburos globulares en matriz de ferrita de grano fino, presentó poca grafitización en el tratamiento efectuado a 620 °C. En las Figuras 5.7.1 a 5.7.5 se muestra el crecimiento de los nódulos de grafito. En las muestras recocidas a 560 °C se observan muy pocos precipitados de grafito muy fino, a los tiempos de grafitización de 50, 100 y 200 horas. Sólo a 500 horas se aprecian precipitados de grafito en mayor número y tamaño, el tamaño de grano ferrítico permanece fino al aumentar el tiempo del recocido isotérmico. A 590 °C se observa que los nódulos de grafito crecen al aumentar el tiempo de recocido y son visibles desde las 50 horas de tratamiento, también se observa un crecimiento en el tamaño de grano ferrítico con el tiempo de recocido. El tamaño de los carburos globulares no cambia en los tratamientos efectuados durante 20, 50 y 100 horas, pero crece ligeramente con el tratamiento de 200 horas.

A 620 °C se presenta muy poca grafitización en los tratamientos de 20, 50 y 100 horas, pero se hace un poco más visible en el de 200 horas con nódulos de grafito de tamaño mediano. El tamaño de grano ferrítico y de los carburos globulares casi no varía en los tratamientos de 20, 50 y 100 horas, pero crece ligeramente en el tratamiento de 200 horas.

A 650 °C casi no hay grafitización en los tratamientos de 20 y 50 horas, pero en el de 100 horas aparecen pocos nódulos medianos y en el de 200 horas los nódulos de grafito son más gruesos; entre 100 y 200 horas hay un mayor crecimiento de los nódulos de grafito, también se observa que el tamaño de grano ferrítico crece al aumentar la temperatura del recocido isotérmico, el tamaño de los carburos globulares se conserva en los 4 tiempos del recocido isotérmico.

A 680 °C se observan pocos nódulos de grafito en la muestra sometida a 20 horas de recocido y el tamaño de los nódulos crece al aumentar el tiempo de recocido hasta 200 horas. El tamaño de grano ferrítico crece con el tiempo de recocido y los carburos globulares crecen ligeramente con el tiempo de recocido. El tamaño de los carburos globulares es mayor que el de las muestras 7 y 11 a los diferentes tiempos y temperaturas de recocido.

La muestra 14, con espesor de 0.203 mm y recocida a 710 °C con 6 horas de calentamiento y 14 horas de permanencia a esa temperatura, no presentó grafito al ser sometida a los mismos tratamientos de grafitización que las muestras anteriores.

La muestra 15, con espesor de 0.137 mm, deformada en frío 32.5 % y con una microestructura inicial de carburos globulares y ferrita de grano fino, presentó una abundante grafitización aún a tiempos cortos de recocido (20 horas), a temperaturas de 650 y 680°C. En las Figuras 5.8.1 a 5.8.5 se muestra el crecimiento de los nódulos de grafito.

A 560 °C se presenta la grafitización hasta las 200 horas de recocido isotérmico, a 500 horas hay una mayor cantidad de nódulos casi del mismo tamaño de los que aparecieron a 200 horas.

Al aumentar el tiempo del recocido se incrementa ligeramente el tamaño de grano ferrítico, en tanto que el tamaño de los carburos globulares permanece casi igual. A 590 °C aparecen los nódulos de grafito finos y medianos a las 20 horas de recocido isotérmico, mismos que crecen al aumentar el tiempo de tratamiento hasta 200 horas. Desde el inicio los carburos globulares son gruesos y casi no crecen al aumentar el tiempo del recocido de grafitización. A esta temperatura no se observa crecimiento de grano ferrítico al aumentar el tiempo del tratamiento. A 620 °C se observa un comportamiento parecido al de 590 °C con respecto a los tamaños de los nódulos de grafito y de los carburos globulares, pero el tamaño de grano ferrítico aumenta con el tiempo de recocido isotérmico. A 650 °C se observa un crecimiento de los nódulos de grafito al aumentar el tiempo del recocido isotérmico, a esta temperatura hay una mayor cantidad de nódulos, presentándose los más grandes a las 200 horas de tratamiento.

También se observa claramente un mayor crecimiento en los granos ferríticos a comparación de las temperaturas de 560, 590 y 620 °C, no se observa crecimiento en el tamaño de los carburos globulares, pero disminuye el número de ellos al haber mayor grafitización al aumentar el tiempo de recocido. A 680 °C se observa un crecimiento de los nódulos de grafito al aumentar el tiempo del recocido y una mayor cantidad de ellos en comparación con las temperaturas inferiores. Se observa una mayor cantidad de nódulos, desde las 20 hasta las 200 horas de recocido, el tamaño de grano ferrítico aumenta con el tiempo de recocido y disminuye la cantidad de carburos globulares al aumentar el tiempo de recocido, el tamaño de éstos últimos permanece sin modificar.

La muestra 16, con espesor de 0.137 mm y recocida a 710 °C durante 14 horas, con una microestructura inicial de carburos globulares en una matriz de ferrita de grano grueso, presenta poca grafitización a 560 °C aún a tiempos de 500 horas de recocido isotérmico, el tamaño de grano ferrítico y el tamaño de los carburos globulares casi no varía con el tiempo de recocido. En las Figuras 5.9.1 a 5.9.5 se muestra el crecimiento de los nódulos de grafito. A 590 y 620 °C se presenta muy poca grafitización a tiempos de recocido de 20, 50 y 100 horas, en cambio a 200 horas de tratamiento se aprecia una mayor grafitización con nódulos medianos y gruesos en menor cantidad, a comparación de la muestra 15. El tamaño de grano ferrítico y el de los carburos globulares permanece sin cambiar al aumentar el tiempo del recocido isotérmico.

A 650 °C casi no hay grafitización a las 20 horas de recocido, pero comienza a aparecer a las 50 horas. El tamaño de los nódulos de grafito crece al aumentar el tiempo de recocido a 200 y 500 horas, el tamaño de grano ferrítico se incrementa al aumentar el tiempo de recocido y el tamaño de los carburos globulares permanece casi sin cambiar. También se observa una corrosión superficial en las muestras sometidas a 50, 100 y 200 horas, la severidad de ésta se incrementa con el tiempo del recocido.

A 680 °C se presenta la grafitización desde las 20 horas de recocido isotérmico y el tamaño de los nódulos de grafito crece al aumentar el tiempo de tratamiento. También se observa un mayor crecimiento del tamaño de grano ferrítico al aumentar el tiempo del tratamiento en comparación con las muestras tratadas a 650 °C. El número de los carburos globulares disminuye al aumentar el tiempo del recocido isotérmico, pero su tamaño permanece sin cambiar.

5.3.2.- Metalografía cuantitativa.

Se cuantificó el promedio del número de nódulos/mm², el diámetro máximo de los nódulos y el porcentaje de fracción transformada de grafito a los diferentes tiempos y temperaturas de los tratamientos de grafitización. En las Tablas 5.9 a 5.15 se muestran los resultados obtenidos de los parámetros antes mencionados para cada muestra; en ellas los límites de confianza se calcularon para un 95 %. Con estos datos se construyeron las gráficas de velocidad de nucleación (Figuras 5.10 a 5.16) y las gráficas de velocidad de crecimiento de los nódulos (Figuras 5.17 a 5.23).

5.3.3.- Microdurezas.

Los valores obtenidos de las microdurezas Vickers (HVN) se presentan en las Tablas 5.16 a 5.23 para las muestras crudas y recocidas de un espesor dado. Con estos datos se construyeron las gráficas de dureza Vickers contra tiempo para cada espesor de muestra a las temperaturas de grafitización de 560, 590, 620, 650 y 680 °C (Figuras 5.24 a 5.31).

Se observa que la dureza disminuye al aumentar el tiempo de recocido a una misma temperatura y para un mismo tiempo de grafitización la dureza disminuye al aumentar la temperatura del tratamiento en las muestras crudas.

Temperatura	tiempo	nódulos/mm ²	95% Lim.	D.máximo	95% Lim.	F. transformada	95% Lim.
(°C)	horas		Conf.	(μm)	Conf.	(%)	Conf.
560	50	0	0	0	0	0.1369	0.205
560	100	3.37	10	3.39	1.56	0.3285	0.438
560	200	4.49	5	3.48	1.41	0.438	0.465
560	500	169.66	47.76	5.18	4.62	30.72	5.55
590	20	1.12	5	3.42	0	0.0862	0.27
590	50	1.12	5	3.78	0	0.1642	0.41
590	100	11.23	11.23	4.24	2.88	2.29	2.43
590	200	32.58	14.60	8.49	7.66	18.76	14.78
620	20	1.12	5	2.66	0	0.13	0.251
620	50	1.12	5	5.25	0	0.2327	0.766
620	100	5.61	7.88	4.23	2.5	0.6845	1.12
620	200	22.47	11.23	8.91	7.74	15.3	16.16
650	20	1.12	5	3.15	0	0.1779	0.3
650	50	3.37	10	3.46	1.65	0.3698	0.52
650	100	8.98	23.53	5.71	4.82	10.52	6.02
650	200	57.30	26.78	8.04	7.5	22.64	13.69
680	20	1.12	5	2.66	0	0.1779	0.156
680	50	17.97	12.30	3.52	1.37	1.6	0.95
680	100	19.10	18.76	7.26	4.8	4.17	3.06
680	200	46.06	20.05	8.57	8.7	21.61	7.28

Tabla 5.9.- Resultados obtenidos en la muestra # 5 de acero 1075 con espesor de 1.27 mm, área medida de 0.89 mm², y deformada en frío 33 %.

Temperatura (°C)	tiempo horas	nódulos/mm ²	95% Lim. Conf.	D.máximo (µm)	95% Lim. Conf.	F. transformada (%)	95% Lim. Conf.
560	50	3.37	6.12	5.25	5.14	0.354	0.3
560	100	5.81	13.70	3.45	1.44	0.73	0.96
560	200	71.91	40.76	5.04	4.37	10.65	14.03
560	500	121.34	46.68	4.03	3.16	10.81	4.36
590	20	4.49	12.3	5.79	4.87	0.4364	0.87
590	50	51.68	33.08	3.95	2.92	5.1	2.02
590	100	153.93	94.47	4.88	3.98	20.01	16.77
590	200	153.93	57.56	5.99	5.2	33.95	15.82
620	20	7.66	12.80	3.08	0.718	0.7417	0.58
620	50	5.61	18.42	6.55	5.56	19.54	8.36
620	100	117.97	58.87	8.14	7.51	51.91	34.42
620	200	85.39	36.74	10.71	9.67	71.26	55.1
650	20	48.31	35.95	3.88	2.32	5.09	3.13
650	50	182.02	15.05	5.88	5.51	36.27	10.92
650	100	256.17	54.21	7.08	5.66	77.7	21.71
650	200	333.70	68.14	6.96	5.92	89.87	20.66
680	20	21.34	4.94	3.24	1.33	1.63	0.39
680	50	142.69	96.79	4.82	4.02	18.99	11.05
680	100	259.55	80.78	6.86	6.57	74.7	10.42
680	200	258.42	100.78	7.48	7.11	81.59	38.87

Tabla 5.10.- Resultados obtenidos en la muestra # 7 de acero 1095 con espesor de 0.635 mm, área medida de 0.89 mm², y deformada en frío 50 %.

Temperatura	tiempo	nódulos/mm2	95% Lim.	D.máximo	95% Lim.	F.Transformada	95% Lim.
(°C)	horas		Conf.	(μ m)	Conf.	(%)	Conf.
560	50	0	0	0	0	0.1085	0.23
560	100	2.24	6.12	2.66	0	0.1913	0.215
560	200	7.86	6.12	4.24	2.76	0.8385	0.946
560	500	8.98	10	3.95	2.18	0.8922	0.657
590	20	4.49	9.38	3.1	1.3	0.258	0.32
590	50	4.49	9.38	2.86	0.534	0.669	0.3
590	100	30.33	17.02	4.18	2.47	3.18	1.84
590	200	86.51	46.68	6.44	5.19	21.39	0.066
620	20	5.61	11.23	3.51	1.43	0.5912	0.94
620	50	17.97	12.30	5.9	1.98	3.44	2.2
620	100	50.56	22.47	5.55	4.84	8.55	4.4
620	200	48.31	24.60	6.28	5.64	11.64	2.28
650	20	19.10	16.96	3.19	1.71	1.59	0.6
650	50	31.46	24.60	3.43	2.67	2.74	3.39
650	100	64.04	56.46	5.77	5.24	13.13	8.6
650	200	125.84	45.33	5.95	5.05	25.35	17.02
680	20	8.98	10	3.04	0.92	0.7417	0.7
680	50	1.12	5	6.76	0	0.3547	0.73
680	100	19.10	12.80	4.94	3.66	2.62	1.54
680	200	82.02	37.75	8.16	8.58	26.21	14.94

Tabla 5.11.- Resultados obtenidos en la muestra # 8 de acero 1095 con espesor de 0.635 mm, área medida de 0.89 mm², recocida.

Temperatura	tiempo	nódulos/mm ²	95% Lim.	D. máximo	95% Lim.	F. Transformada	95% Lim.
(°C)	horas		Conf.	(μ m)	Conf.	(%)	Conf.
560	50	0	0	0	0	0.1612	0.23
560	100	3.39	2	2.98	0.89	0.215	0.58
560	200	5.09	3	3.43	1.54	0.5912	0.77
560	500	67.91	40	4.52	3.36	8.81	11.09
590	20	11.88	7	3.72	1.95	0.987	2.23
590	50	13.58	8	3.38	1.1	1.08	0.49
590	100	10.18	6	3.74	2.13	1.12	0.92
590	200	134.12	79	6.8	5.88	27.14	12.68
620	20	0	0	0	0	0.1397	0.258
620	50	1.69	1	2.66	0	0.258	3.87
620	100	5.09	3	3.55	1.6	1.12	0.82
620	200	96.77	57	8.62	6.26	38.67	21.3
650	20	5.09	3	3.42	0.0022	0.72	0.73
650	50	0	0	0	0	4.88	4.85
650	100	45.84	27	5.88	6.94	8.7	8.34
650	200	83.37	55	7.45	8.3	28.49	28.38
680	20	13.58	8	3.43	1.48	1.03	2.44
680	50	35.65	21	3.71	2.02	2.83	2.25
680	100	115.44	68	4.9	4.18	14.45	11.81
680	200	256.38	151	8.54	10.86	87.93	19.22

Tabla 5.12.- Resultados obtenidos en la muestra # 11 de acero 1095 con espesor de 0.355 mm, área medida de 0.589 mm², deformada en frío 44 %.

Temperatura	tiempo	nódulos/mm2	95% Lim.	D.máximo	95% Lim.	F. Transformada	95% Lim.
(°C)	horas		Conf.	(µm)	Conf.	(%)	Conf.
560	50	0	0	0	0	0.144	0.32
560	100	6.76	27.12	2.91	0.69	0.344	1.13
560	200	13.53	13.56	2.87	0.79	0.946	0.94
560	500	98.13	25.44	4.38	2.59	9.04	0.024
590	20	0	0	0	0	0.2784	0.23
590	50	6.76	27.12	3.42	0	0.6514	0.58
590	100	81.21	78.77	4.53	3.62	6.82	5.78
590	200	64.29	45.10	7.21	5.81	16.21	18.83
620	20	3.38	13.56	3.42	0	0.258	0.77
620	50	37.22	33.36	5.1	2.75	0.1397	0.25
620	100	3.38	13.56	4.5	0	0.241	0.987
620	200	20.30	13.56	7.88	6.98	6.66	10.36
650	20	3.38	13.56	2.88	0	0.344	0.73
650	50	23.89	16.60	4.62	3.27	1.83	1.77
650	100	64.29	25.44	6.19	4.66	11.65	11.18
650	200	138.74	54.39	9.26	12.8	66.28	47.3
680	20	6.76	27.12	3.04	1.08	0.688	1.75
680	50	60.91	83.08	4.32	3.6	5.49	5.34
680	100	118.44	80.60	7.06	5.22	26.84	23.04
680	200	209.81	76.33	9.17	10.07	88.69	41.94

Tabla 5.13.- Resultados obtenidos en la muestra # 13 de acero 1095 con espesor de 0.203 mm, área medida de 0.2955 mm², deformada en frío 42.81 %.

Temperatura	tiempo	nódulos/mm ²	95% Lim.	D.máximo	95% Lim.	F. Transformada	95% Lim.
(°C)	horas		Conf.	(μm)	Conf.	(%)	Conf.
560	50	0	0	0	0	0.215	1.07
560	100	0	0	0	0	0.247	0.79
560	200	42.39	34.81	4.38	2.84	3.34	2.17
560	500	48.45	53.89	4.22	0	4.77	5.65
590	20	84.79	50.56	3.81	2.51	6.12	5.43
590	50	84.79	26.94	4.44	3.52	6.99	3.28
590	100	90.85	154.10	5.58	3.8	18.82	31.39
590	200	327.07	250.98	4.99	4.8	40.3	28.48
620	20	30.28	42.68	3.69	1.28	3.23	2.73
620	50	115.08	50.56	5.78	4.86	14.4	12.25
620	100	175.65	116.25	6.17	4.78	27.58	12.92
620	200	272.56	154.10	5.52	5.24	45.26	18.27
650	20	24.22	50.56	2.94	0.76	1.5	1.33
650	50	54.51	26.94	4.52	3.68	4.89	4.51
650	100	496.66	198.91	6.26	6.02	35.8	13.54
650	200	266.50	116.25	5.21	4.18	99.48	17.2
680	20	6.058	26.94	3.29	0	1.23	1.8
680	50	60.56	113.23	4.98	5.08	6.15	9.98
680	100	102.96	69.02	4.87	4.94	11.49	8.87
680	200	575.40	230.39	5.45	5.22	80.3	48.8

Tabla 5.14.- Resultados obtenidos en la muestra # 15 de acero 1095 con espesor de 0.137 mm, área medida de 0.1651 mm², deformada en frío 32.51 %.

Temperatura (°C)	tiempo horas	nódulos/mm ²	95% Lim. Conf.	D.máximo (µm)	95% Lim. Conf.	F. Transformada (%)	95% Lim. Conf.
560	50	0	0	0	0	0.073	0.34
560	100	0	0	0	0	0.109	0.53
560	200	18.17	33	4.88	4.84	1.42	3.01
560	500	54.51	116.25	4.29	4.38	6.25	6.88
590	20	30.28	60.55	2.93	0.912	1.24	1.69
590	50	24.22	50.56	2.7	0.823	1.29	4.57
590	100	12.11	33	7.06	5.77	1.39	3.11
590	200	224.10	91.73	5.75	5.46	35.5	19.56
620	20	54.51	50.56	3.48	1.07	3.12	3.28
620	50	48.45	33	4.28	2.82	3.9	3.61
620	100	48.45	33	5.33	4.2	4.4	5.59
620	200	54.51	50.56	6.12	5.58	10.42	16.77
650	20	6.05	26.94	2.66	0	0.913	2.36
650	50	48.45	53.89	3.75	2.66	4.73	4.94
650	100	436.09	194.86	5.84	5.34	60.78	30.1
650	200	321.01	184.37	6.19	7	83.83	36.5
680	20	30.28	104.75	4.89	4.5	3.24	8.30
680	50	181.70	104.75	5.14	3.6	23.48	15.29
680	100	387.64	150.48	5.91	5.1	58.67	27.71
680	200	363.41	181.85	8.57	6.14	85.38	36.98

Tabla 5.15.- Resultados obtenidos en la muestra # 16 de acero 1095 con espesor de 0.137 mm, área medida de 0.1651 mm², recocida.

Dureza inicial cruda = 263 HVN, 95% Lim. Conf. = 20.9

Dureza inicial recocida = 187.7 HVN, 95% Lim. Conf. = 11.51

Temperatura	tiempo	Dureza HVN	95% Lim.	Dureza HVN	95% Lim.
(°C)	horas	Cruda	Conf.	Recocida	Conf.
560	50	248.84	22.2	227.07	15.9
560	100	247.94	17.21	182.94	25.4
560	200	230.6	16.22	193.51	27.3
560	500	224.97	14.83	165.22	7.21
590	20	238.23	28.94	178.11	11.7
590	50	249.9	30.3	199.96	33.8
590	100	215.74	19.06	192.86	45
590	200	196.69	24.45	169.95	32.5
620	20	251.23	18.86	161.84	8.39
620	50	240.34	21.57	170.64	11.6
620	100	217.76	19.09	166.08	5.82
620	200	246.34	15.08	178.56	12.3
650	20	249.38	6.02	167.39	5.29
650	50	228.3	2.83	165.18	3.44
650	100	223.47	5.11	173.41	12.5
650	200	220.76	4.23	200.83	5.9
680	20	228.6	19.04	181.27	18.4
680	50	221.01	17.25	172.34	4.69
680	100	188.65	18.3	164.31	2.71
680	200	191.44	12.61	167	8.48

Tabla 5.16.- Durezas Vickers de muestras de acero 1095 con espesor de 1.90 mm crudas y recocidas.

Dureza inicial cruda = 261.90 HVN, 95% Lim. Conf. = 8.5

Dureza inicial recocida = 174.75 HVN, 95% Lim. Conf. = 9.83

Temperatura	tiempo	Dureza HVN	95% Lim.	Dureza HVN	95% Lim.
(°C)	horas	Cruda	Conf.	Recocida	Conf.
560	50	247.8	9.1	233.42	13.3
560	100	248.56	4.36	167.99	14.45
560	200	214.5	20.25	171.26	18.93
560	500	243.87	8.88	171	7.21
590	20	246.86	33.63	180.56	26.89
590	50	225.77	19.5	201.35	46.75
590	100	217.11	21.34	165.19	3.84
590	200	189.47	20.03	154.99	11.56
620	20	221.46	6.65	158.51	7.04
620	50	220.31	15.98	159.29	4.16
620	100	203.77	6.03	158.18	4.17
620	200	214.67	22.87	170.59	9.73
650	20	220.12	6.55	161.79	4.87
650	50	208.02	8.65	161.79	4.87
650	100	209.26	9.18	166.98	7.44
650	200	226.24	7.05	194.59	4.39
680	20	208.19	15.97	165.31	10.96
680	50	217.69	17.09	158.97	9.67
680	100	190.88	11.57	158.54	8.46
680	200	183.98	5.2	159.72	5.48

Tabla 5.17.- Durezas Vickers de muestras de acero 1075 con espesor de 1.90 mm crudas y recocidas.

Dureza inicial cruda = 319.25 HVN, 95% Lim. Conf. = 18.84

Dureza inicial recocida = 160.57 HVN, 95% Lim. Conf. = 7.18

Temperatura	tiempo	Dureza HVN	95% Lim.	Dureza HVN	95% Lim.
(°C)	horas	Cruda	Conf.	Recocida	Conf.
560	50	188.86	27	194.18	14.39
560	100	200.86	27.04	199.33	33.53
560	200	204.46	38.14	154.97	10.41
560	500	161.36	4.25	191.58	19.17
590	20	194.77	31.45	214.33	12.96
590	50	201.54	14.31	211.06	29.97
590	100	177.34	19.47	189.1	24.21
590	200	162.77	13.28	152.57	6.87
620	20	172.75	19.97	173.58	17.31
620	50	180.58	11.45	179.54	9.07
620	100	167.84	6.07	164.83	21.63
620	200	178.04	6.85	191.6	17.69
650	20	179.06	9.47	156.56	9.92
650	50	170.95	0	166.5	4.75
650	100	167.88	8.79	164.76	5.05
650	200	165.47	16.3	213.75	15.28
680	20	209.41	15.9	191.54	16.08
680	50	179.63	12.81	190.29	25.07
680	100	162.25	7.45	156.47	4.67
680	200	154.49	4.58	162.7	4.59

Tabla 5.18.- Durezas Vickers de muestras de acero 1075 con espesor de 1.27 mm crudas y recocidas.

Dureza inicial cruda = 316.93 HVN, 95% Lim. Conf. = 18.42

Dureza inicial recocida = 165.34 HVN, 95% Lim. Conf. = 12.26

Temperatura	tiempo	Dureza HVN	95% Lim.	Dureza HVN	95% Lim.
(°C)	horas	Cruda	Conf.	Recocida	Conf.
560	50	205.11	13.98	186.55	43.5
560	100	198.73	30.14	203.53	22.59
560	200	174.24	7.1	162.67	23.32
560	500	188.7	9.16	175.82	15.8
590	20	194.59	4.91	161.37	4.75
590	50	215	32.63	199.31	17.72
590	100	184.48	26.33	176.39	30.04
590	200	169.45	19.08	159.48	14.88
620	20	194.9	12.39	159.49	13.79
620	50	188.26	12.76	172.8	21.31
620	100	182.73	19.24	159.56	15.83
620	200	176.25	15.38	159.68	2.36
650	20	196.8	2.27	169.72	10.93
650	50	178.5	3.63	169.11	23.33
650	100	166.78	16.2	169.8	13.89
650	200	147.03	9.09	195.27	12.39
680	20	195.16	24.52	191.39	10.32
680	50	190.28	24.18	157.49	14.14
680	100	193.57	10.48	182.53	9.81
680	200	167.46	9.43	151.64	14.55

Tabla 5.19.- Durezas Vickers de muestras de acero 1095 con espesor de 0.635 mm crudas y recocidas.

Dureza inicial cruda = 351.68 HVN, 95% Lim. Conf. = 15.72

Dureza inicial recocida = 165.55 HVN, 95% Lim. Conf. = 10.12

Temperatura	tiempo	Dureza HVN	95% Lim.	Dureza HVN	95% Lim.
(°C)	horas	Cruda	Conf.	Recocida	Conf.
560	50	210.47	8.08	162.35	26.24
560	100	208.05	11.61	188.8	14.74
560	200	186.65	12.41	172.81	23.75
560	500	200.96	14.12	179.02	7.53
590	20	198.55	7.4	158.06	2.86
590	50	204.61	19.45	153.31	3.42
590	100	194.65	10.09	186.47	48.99
590	200	185.37	49.27	176.38	48.7
620	20	192	14.32	168.81	22.18
620	50	189.9	14.72	157.32	8.17
620	100	175.44	27.37	162.75	11.44
620	200	184.53	8.28	155.7	6.77
650	20	196.25	3.54	161.36	4.25
650	50	187.57	2.08	157.36	10.1
650	100	233.48	14.74	171.88	3.72
650	200	182.11	13.09	157.28	5.5
680	20	202.16	38.6	163.57	10.52
680	50	188.91	16.91	169.22	8.76
680	100	176.16	9.19	195.43	17.72
680	200	186.58	7.87	161.47	10.5

Tabla 5.20.- Durezas Vickers de muestras de acero 1075 con espesor de 0.599 mm crudas y recocidas.

Dureza inicial cruda = 282.23 HVN, 95 % Lim. Conf. = 20.57

Dureza inicial recocida = 162.69 HVN, 95% Lim. Conf. = 8.58

Temperatura	tiempo	Dureza HVN	95% Lim.	Dureza HVN	95% Lim.
(°C)	horas	Cruda	Conf.	Recocida	Conf.
560	50	187.71	12.2	219.36	29.29
560	100	180.49	6.99	207.65	20.45
560	200	175.7	10.04	156.52	9.13
560	500	170.4	17.77	165.11	20.14
590	20	175.16	6.13	157.8	12.94
590	50	183.64	15.33	175.73	12.28
590	100	186.75	16.6	181.24	31.47
590	200	168.4	12.86	172.44	26.79
620	20	170.86	17.92	151.29	16.9
620	50	190.36	12.24	162.79	23.03
620	100	189.55	19.79	152.26	19.98
620	200	174.68	4.78	160.57	7.18
650	20	183.46	3.77	160.13	5.84
650	50	186.56	6.23	170.11	8.36
650	100	186.36	18.59	178.13	11.22
650	200	181.5	22.85	151.41	4.64
680	20	194.44	15.82	171.05	21.72
680	50	186.67	7.02	167.19	15.57
680	100	183.18	15.15	184	6.83
680	200	153.4	9.34	203.14	24.48

Tabla 5.21.- Durezas Vickers de muestras de acero 1095 con espesor de 0.355 mm crudas y recocidas.

Dureza inicial cruda = 192.97 HVN, 95% Lim. Conf. = 12.29

Dureza inicial recocida = 182.88 HVN, 95% Lim. Conf. = 14.37

Temperatura	. tiempo	Dureza HVN	95% Lim.	Dureza HVN	95% Lim.
(°C)	horas	Cruda	Conf.	Recocida	Conf.
560	50	209.33	29.89	181.31	47.74
560	100	205.64	16.86	222.5	32.57
560	200	149.82	13.17	165.94	28.61
560	500	169.92	12.41	189.76	36.78
590	20	178.53	19.75	165.37	14.39
590	50	171.06	12.96	157.52	21.3
590	100	177.88	33.12	164.18	27.66
590	200	184.88	17.32	167.12	16.55
620	20	175.87	11.86	161.52	23.66
620	50	184.35	19.37	188.83	32.23
620	100	172.07	22.93	177.93	30.27
620	200	175.92	11.16	155.68	9.77
650	20	174.53	5.42	173.51	14
650	50	192.86	5.69	186.68	6.61
650	100	176.96	2.46	184.2	14.64
650	200	161.56	13.74	150.6	4.81
680	20	208.35	29.93	179.04	28.78
680	50	190.82	9.81	180.17	8.5
680	100	162.13	14.43	204.11	16.74
680	200	151.08	18.85	203.76	26.5

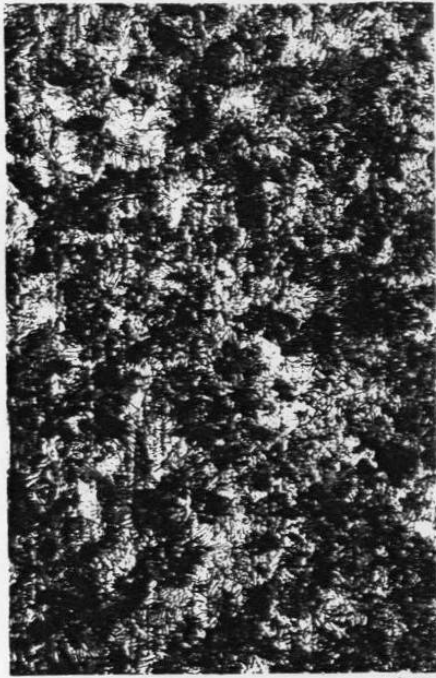
Tabla 5.22.- Durezas Vickers de muestras de acero 1095 con espesor de 0.203 mm crudas y recocidas.

Dureza inicial cruda = 263 HVN, 95% Lim. Conf. = 20.9

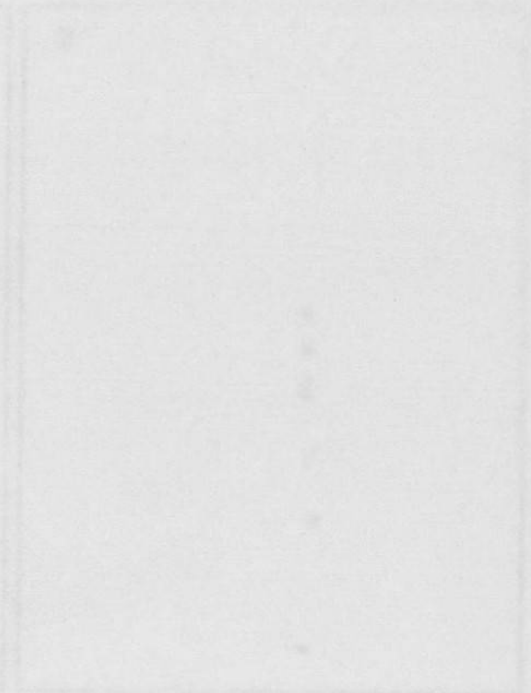
Dureza inicial recocida = 187.7 HVN, 95% Lim. Conf. = 11.51

Temperatura	tiempo	Dureza HVN	95% Lim.	Dureza HVN	95% Lim.
(°C)	horas	Cruda	Conf.	Recocida	Conf.
560	50	221.06	11.56	224.25	28.34
560	100	194.39	30.57	237.93	25.68
560	200	157.57	19.97	152.51	19.54
560	500	149.56	33	173.48	13.1
590	20	169.19	4.83	153.9	19.16
590	50	163.06	9.73	176.11	21.46
590	100	191.44	30.39	174.71	15.49
590	200	173.86	25.95	165.18	25.05
620	20	176	54.92	175.12	31.6
620	50	189.43	9.44	182.9	15.01
620	100	158.16	39.31	154.42	2.17
620	200	161.04	14.52	162.27	18.81
650	20	194.05	47.42	189.8	45.89
650	50	177.67	9.41	168	21.78
650	100	130.99	9.62	163.44	20.26
650	200	169.87	24.56	142.9	14.45
680	20	182.34	17.45	177.91	18.2
680	50	174.15	27.89	174.29	30.66
680	100	146.78	4.76	168.99	19.18
680	200	159.76	5.15	141.87	21.36

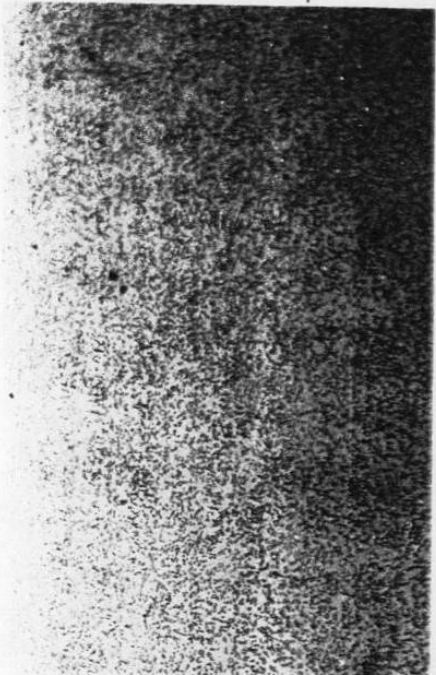
Tabla 5.23.- Durezas Vickers de muestras de acero 1095 con espesor de 0.137 mm crudas y recocidas.



(a)
50 μm



(b)
100 μm



(c)
50 μm



(d)
100 μm

Figura 5.1.- Micrografías del acero 1075 atacado con nital (a), sin atacar (b), después del recocido de esferoidización atacado con nital (c) y sin atacar (d).

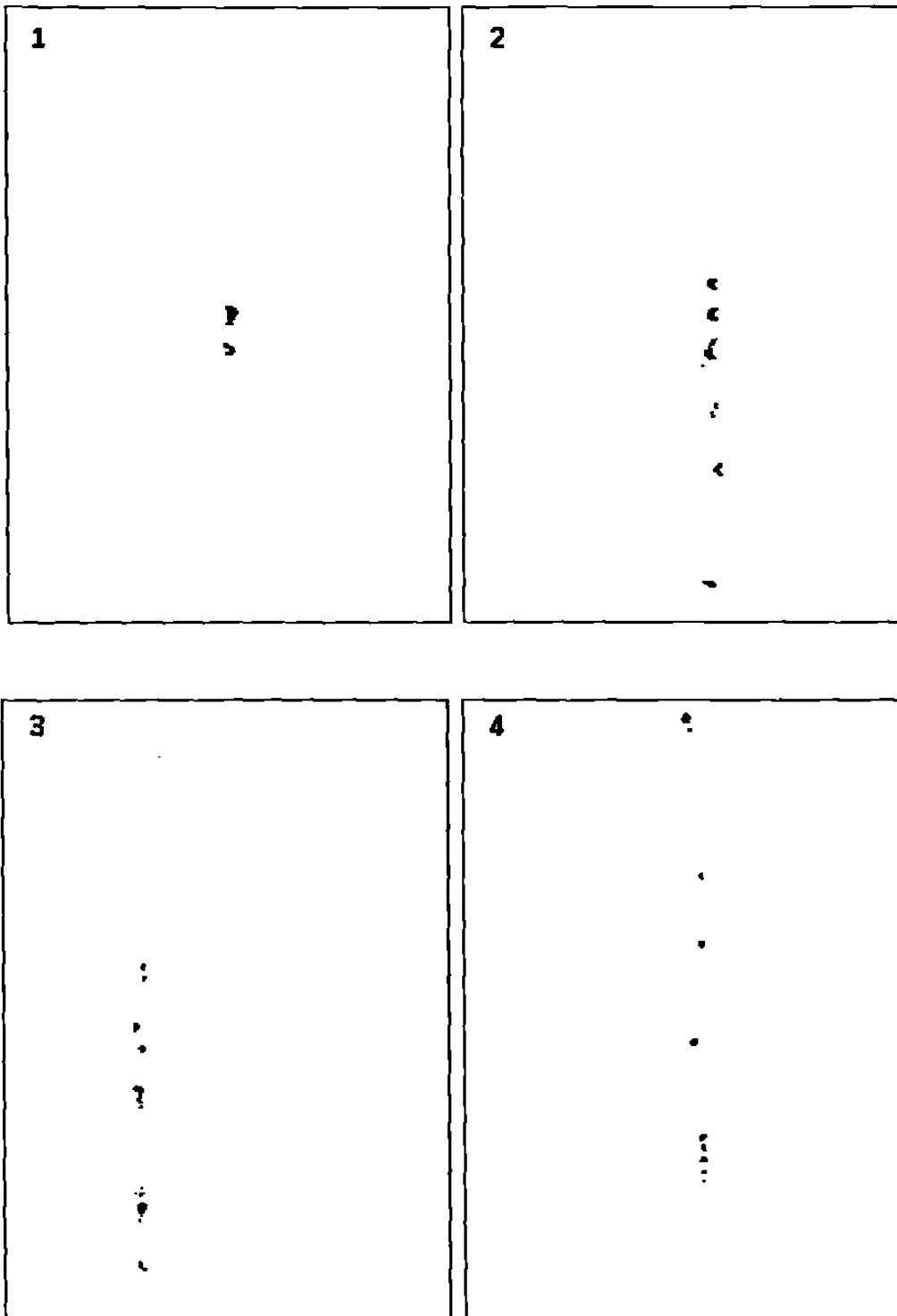


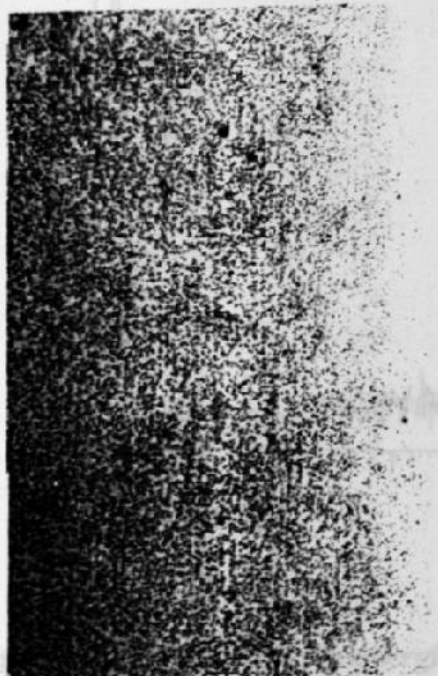
Figura 5.1.1.- Clasificación de inclusiones no metálicas (óxidos), de acuerdo a la norma A.S.T.M. E - 45 - 81 y S.A.E. J 422.



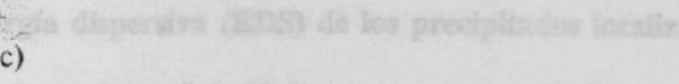
(a)
50 μm



(b)
100 μm



(c)
50 μm



(d)
100 μm

Figura 5.2.- Micrografía dispersiva (EDS) de los precipitados localizados en la muestra # 13, de acero 1095 deformada en frío 43 %.

Figura 5.2.- Micrografías del acero 1095 atacado con nital (a), sin atacar (b), después del recocido de esferoidización atacado con nital (c) y sin atacar (d).

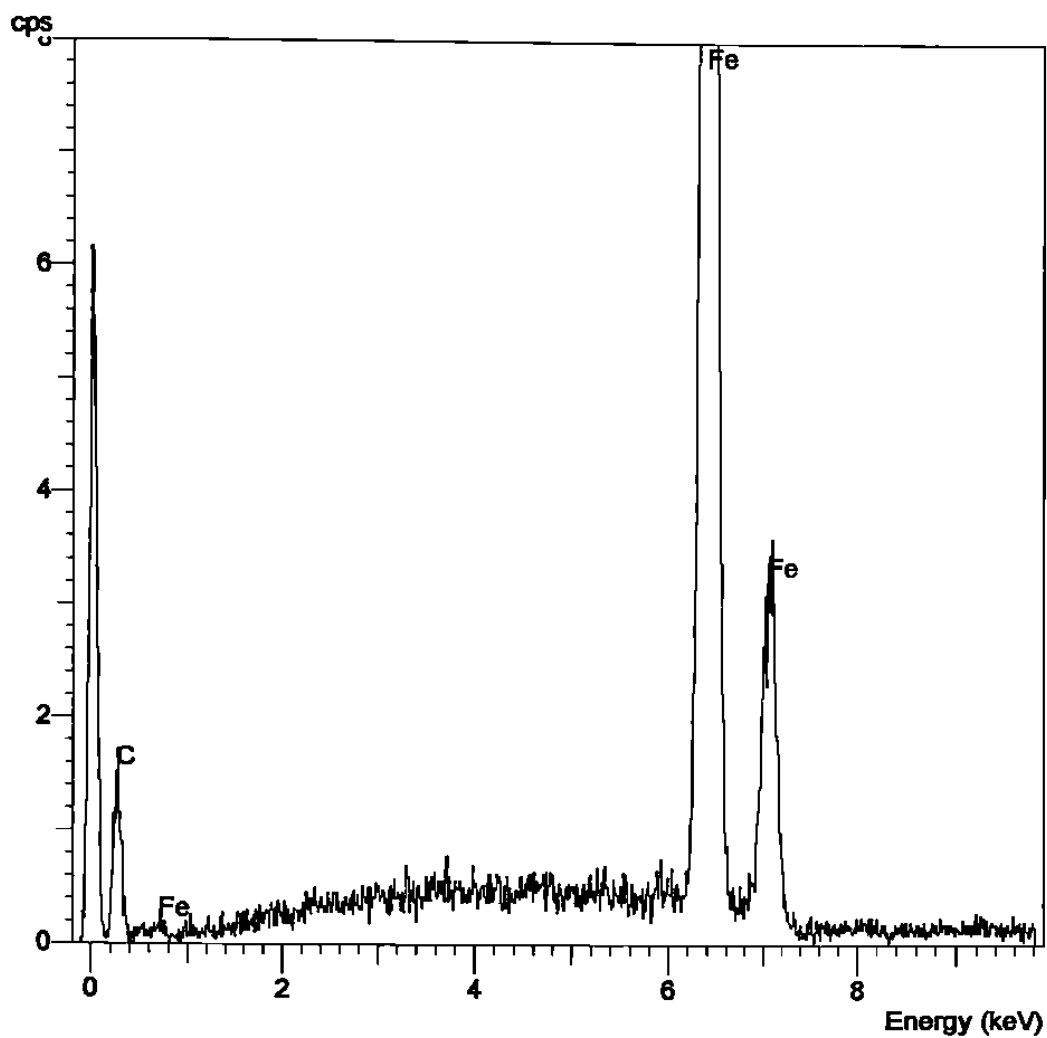


Figura 5.2.1.- Espectro de energía dispersiva (EDS) de los precipitados localizados en la muestra # 13, de acero 1095 deformada en frío 43 %.

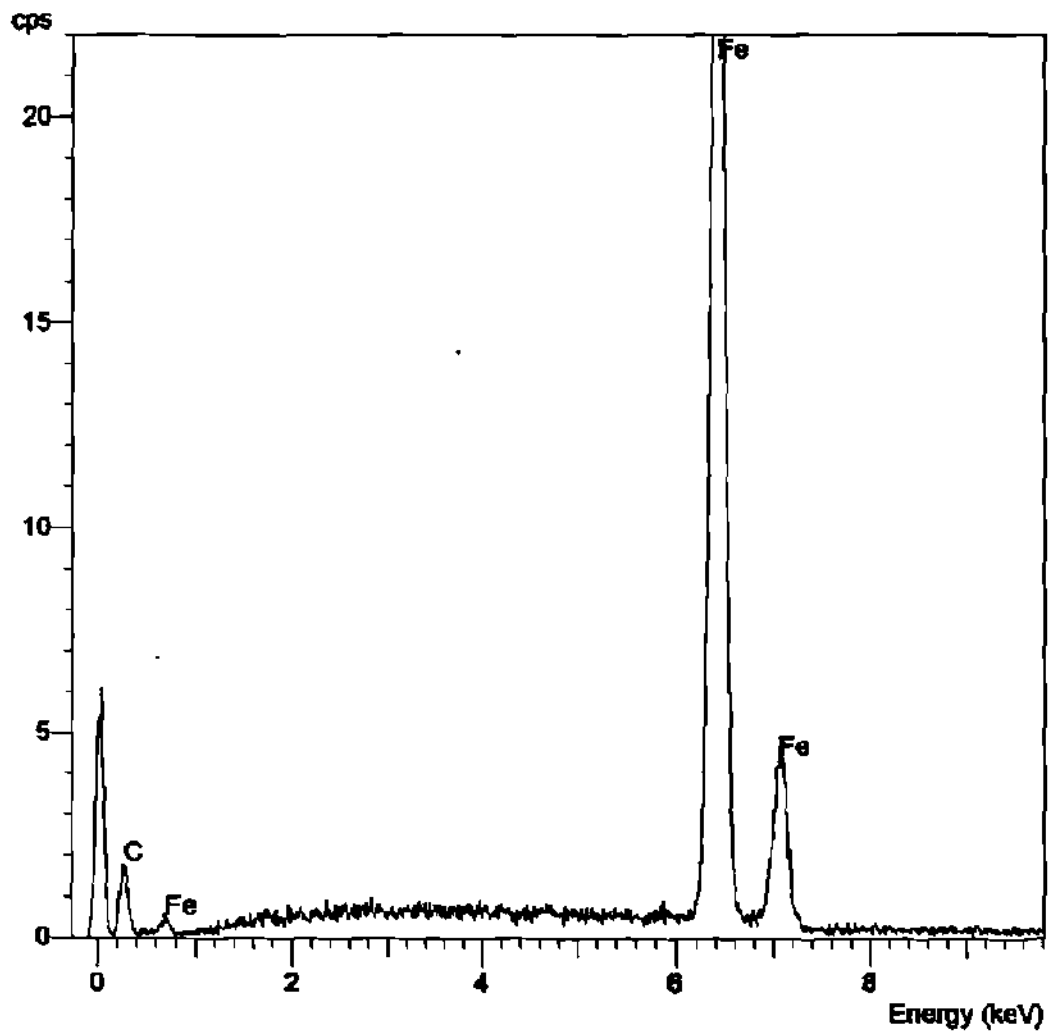
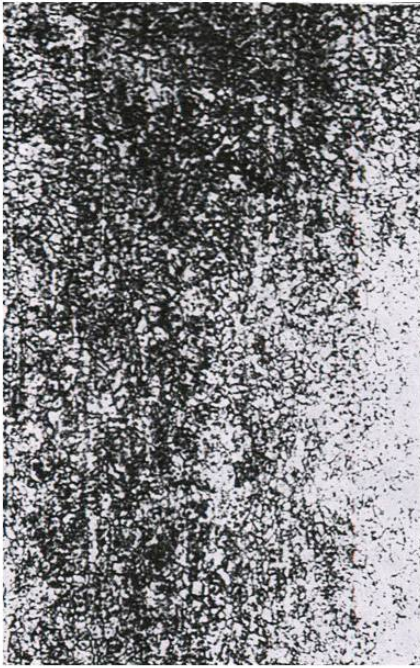


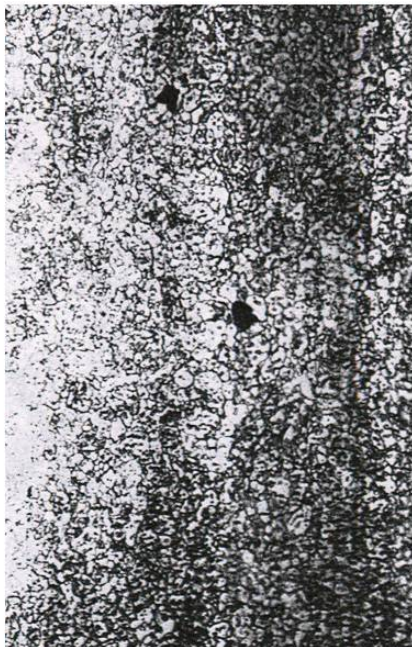
Figura 5.2.2.- Espectro de energía dispersiva (EDS) de los precipitados localizados en la muestra # 15, de acero 1095 deformada en frío 33 %.



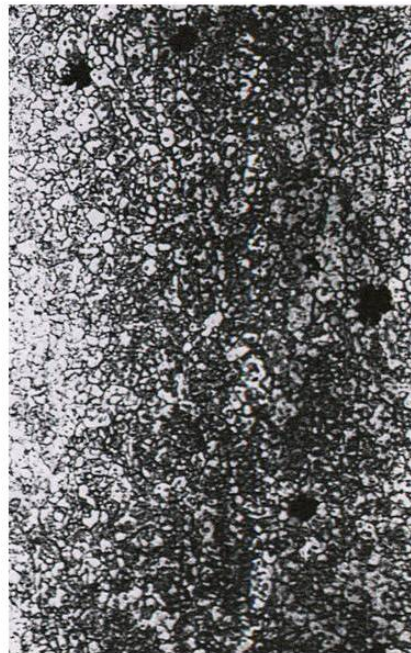
20 horas



50 horas



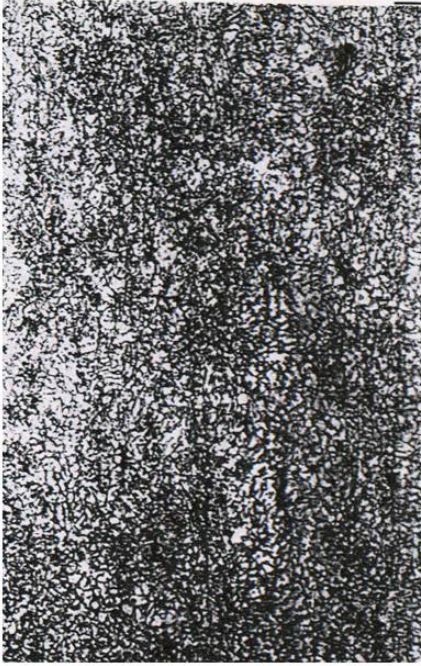
100 horas



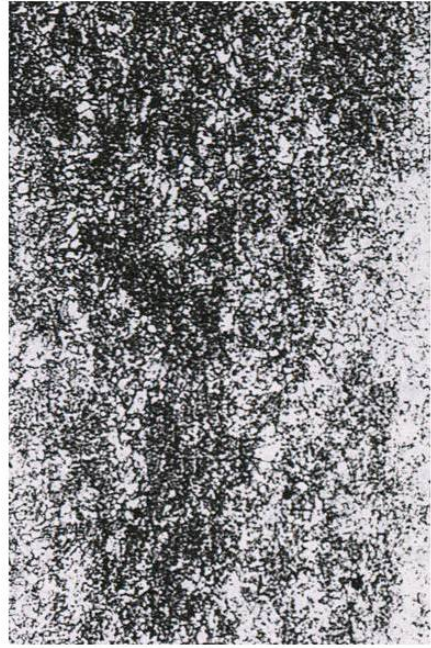
200 horas

Figura 5.3.1.- Crecimiento de los nódulos de grafito en la muestra # 5 de acero 1075 deformada en frío 33% y grafitizada a 680 °C.

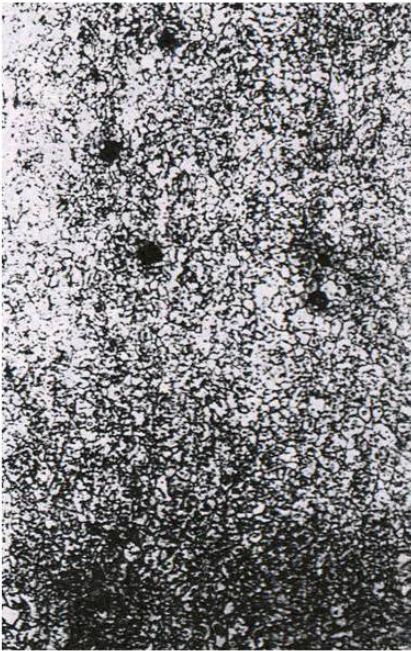
100 μm



20 horas



50 horas



100 horas



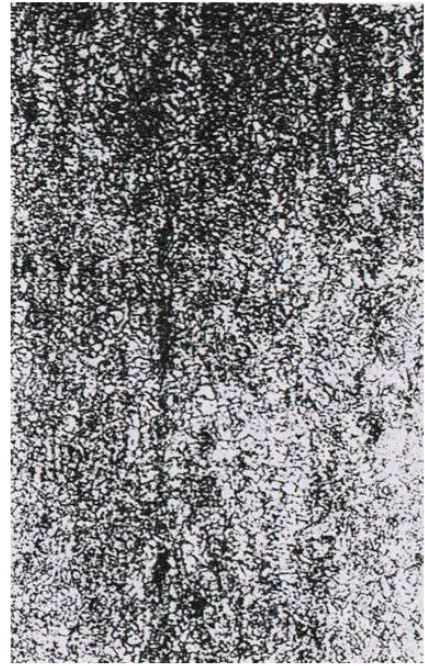
200 horas

Figura 5.3.2.- Crecimiento de los nódulos de grafito en la muestra # 5 de acero 1075 deformada en frío 33% y grafitizada a 650 °C.

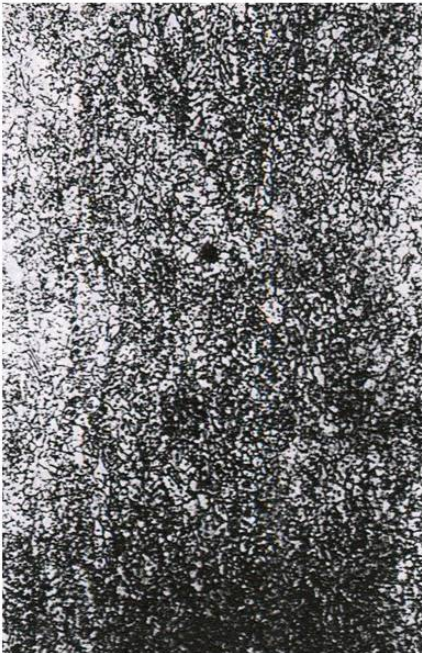
100 μm



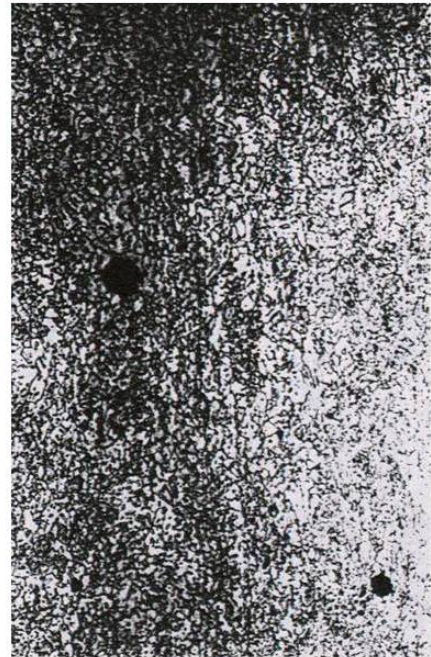
20 horas



50 horas



100 horas



200 horas

Figura 5.3.3.- Crecimiento de los nódulos de grafito en la muestra # 5 de acero 1075 deformada en frío 33% y grafitizada a 620 °C.

100 μm