

11161

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN

MICROESTRUCTURA Y PROPIEDADES MECANICAS DE UN ACERO

ASTM SA-612 SOLDADO POR ARCO SUMERGIDO

Y TRATADO TERMICAMENTE

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO

DE MAESTRO EN INGENIERIA

(METAL - MECÁNICA)

P R E S E N T A

MARIO EMIGDIO RODRÍGUEZ CASTILLO

ASESOR: M. I. ANA MARIA PANIAGUA M

CUAUTITLAN IZCALLI, ESTADO DE MEXICO 2000.

27.28.17



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN
COORDINACION GENERAL DE ESTUDIOS DE POSGRADO

CARTA DE VOTOS APROBATORIOS

Coordinación General de Estudios de Posgrado
FES-Cuautitlán
Presente.

Por medio de la presente nos permitimos comunicar a usted que revisamos la tesis titulada "MICROESTRUCTURA Y PROPIEDADES MECANICAS DE UN ACERO ASTM SA-612 SOLDADO POR ARCO SUMERGIDO Y TRATADO TERMICAMENTE".

que presenta el (la) alumno (a) MARIO EMIGDIO RODRIGUEZ CASTILLO

con número de cuenta 8980069-0 y número de expediente 75521

para obtener el grado de MAESTRIA

EN INGENIERIA (METAL-MECANICA)

Consideramos que dicha tesis reúne los requisitos necesarios para ser discutida en el Examen de Grado correspondiente, otorgamos el voto aprobatorio.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

_____ a _____ de _____ del _____

NOMBRE DE LOS SINODALES

Presidente

DRA. SUEMI RODRIGUEZ ROMO

Vocal

M.C. TOMAS RANGEL ORTIZ

Secretario

M.I. ANA MARIA PANIAGUA MERCADO

Primer Suplente

M.I. MARCO ANTONIO ALARCON RAMIREZ

Segundo Suplente

M.I. FELIPE DIAZ DEL CASTILLO RODRIGUEZ

→ Mi reconocimiento a:

M. I. Ana María Paniagua Mercado

Por su guía y asesoramiento.

AGRADECIMIENTOS :

→ Al personal Docente y administrativo de la UNAM – FES CUAUTITLAN

Y muy en especial al que pertenece ala Coordinación de estudios de
Posgrado e investigación, por sus finas atenciones.

→ A los sinodales, por sus correcciones tan acertadas.

→ A TATSA por haberme permitido en su planta, soldar las placas
por el proceso de arco sumergido.

→ A los señores: Tec. Eusebio Bautista P. Y Agustín Santillan G.
Por su ayuda desinteresada.

Dedico este trabajo:

→ A mi esposa, Juana A. E. Ruíz Manning

Por su comprensión y cariño.

→ a mis hijos: Mario, Ricardo, Ana Elena y María Guadalupe

→ a mis padres: Victórica Castillo V y Mariano Rodríguez G.

Por su impulso en todo momento.

→ a mis hermanos: Lucía, Bertha, Juan Y Norma

por apoyarme siempre.

→ a la memoria de mi primo Marcos Castillo J

→ a mis amigos.

**“MICROESTRUCTURA Y PROPIEDADES MECANICAS
DE UN ACERO ASTM SA – 612
SOLDADO POR ARCO SUMERGIDO
Y TRATADO TERMICAMENTE “**

INDICE

	Pag.
INTRODUCCION	1
I .- TRATAMIENTOS TERMICOS EN SOLDADURA POR ARCO SUMERGIDO	5
1.1.- Fundamentos	6
1.2.- Relevado de esfuerzos	7
1.3.- Recocido total	8
1.4.- Normalizado	9
1.5.- Temple y revenido	10
II .- EXPERIMENTACION	15
2.1.- Soldado de placas	16
2.1.1.- Preparación del material base	16
2.1.2.- Soldado de las placas por arco sumergido	18
2.2.- Corte de las probetas	21
2.3.- Tratamientos térmicos	21
2.3.1.- Relevados de esfuerzos	22
2.3.2.- Recocido total	22
2.3.3.- Normalizado	22
2.3.4.- Temple y revenido	23
2.3.5.- Horno de tratamiento térmico	23
2.4.- Diseño y fabricación de las probetas	27
2.5.- Pruebas mecánicas.	27
2.5.1.- Prueba de tensión	27
2.5.2.- Medición de dureza	28
2.5.3.- Prueba de impacto	29
2.6.- Microscopía óptica	29
2.7.- Difracción de rayos "x"	30
III.- RESULTADOS EXPERIMENTALES	32
3.1.- Material Base	33
3.2.- Propiedades mecánicas	33
3.2.1 Dureza Vickers	33
3.2.2.- Ensayo de tensión	35
3.2.3.- Ensayo de impacto	36
3.3.- Microestructuras	37
3.3.1.- Microscopio óptico	37
3.3.2.- Microscopía cuantitativa	55
3.3.3.- Tamaño de grano	56

3.4.- Difractogramas	56
IV.- ANALISIS DE LOS RESULTADOS	63
4.1.- Dureza y prueba de tensión	64
4.2.- Microestructuras	73
4.3.- Difracción de rayos " x "	74
V.- CONCLUSIONES	76
5.1.- Conclusiones	77
5.2.- Recomendaciones	79
ANEXO 1 Medición del tamaño de grano.	80
ANEXO 2 Microdureza HVN	83
BIBLIOGRAFIA	85

INTRODUCCION

En la unión de piezas metálicas, el proceso de soldadura es el mejor, el más eficiente y el más barato. Por tal motivo es muy utilizado en la industria metalmeccánica.

La soldadura por arco sumergido, es frecuentemente usada para soldar aceros de alta resistencia y baja aleación, siendo sus características importantes de este proceso: alta velocidad de soldado, alta penetración y depósitos no interrumpidos, haciendo posible cordones muy largos, generando de este modo que el proceso sea económico y altamente productivo. Gran parte del fundente utilizado al soldar es recuperado, para ser tratado y posteriormente volverlo a usar. La limitación de este proceso es que únicamente se puede soldar en la posición horizontal.

Sin embargo, hay algunos problemas especiales que se presentan en la mayoría de los procesos de soldadura y entre otros, es el cambio de microestructura en la zona afectada por el calor y consecuentemente la variación de las propiedades mecánicas en las tres regiones de la unión soldada: en el material base, la zona afectada por el calor y en la soldadura. Adicionalmente también se generan esfuerzos internos, principalmente en la zona afectada térmicamente. El proceso de arco sumergido no escapa de las situaciones antes planteadas.

En investigaciones anteriores ^(1,2,4,9,11,15), proponen una serie de tratamientos térmicos, para la solución de los problemas planteados, mencionando de manera general: un rango amplio de temperaturas, sin precisar los cambios esperados en las propiedades mecánicas y/o microestructura, además la información necesaria para tal efecto, no siempre esta disponible y algunos departamentos de ingeniería de la industria metalmecánica, desconocen los fundamentos.

El propósito del presente trabajo, fue determinar las condiciones, para mejorar las propiedades mecánicas, de una unión soldada, utilizando un acero de alta resistencia y baja aleación tipo ASTM SA612 como metal base y el proceso de arco sumergido, por medio de diferentes tratamientos térmicos, Analizando básicamente las variables de: resistencia a la tensión, resistencia a la fluencia, dureza, ductilidad y tenacidad, así como la microestructura correspondiente para cada caso.

Cabe destacar que con el relevado de esfuerzos – 3, se incrementó la ductilidad y la tenacidad con una baja no significativa de resistencia y dureza. Con el normalizado se logró una microestructura uniforme con aumentos considerables de tenacidad y ductilidad pero disminuyendo sustancialmente la resistencia y dureza.

En el capítulo 1 se hace una descripción de los principales tratamientos térmicos aplicados a las uniones soldadas, explicando los procedimientos de

aplicación de cada uno de ellos así como los cambios esperados en cuanto a estructura y propiedades mecánicas.

El capítulo 2 contiene los procedimientos que se llevaron a cabo en toda la fase experimental del trabajo de investigación. Se inicia con la limpieza de las dos placas, con los parámetros utilizados en el proceso de soldadura por arco sumergido y continúa la explicación del corte de muestras necesarias para llevar a cabo las pruebas de: tensión, dureza, impacto y metalografía. Posteriormente se comentan los tratamientos térmicos aplicados a cada grupo de probetas, para terminar con la metalografía y difracción de rayos "x".

En el capítulo 3 se describen los resultados obtenidos de los grupos de muestras: sin y con tratamiento térmico, de todas las pruebas realizadas en la fase de experimentación; haciendo un análisis de los mismos, en el capítulo 4, que incluye metalografía, dureza, resistencia, rayos x y tenacidad.

Finalmente en el capítulo 5 se presenta una serie de conclusiones y recomendaciones, generadas en el presente trabajo. Haciendo la aclaración que éstas pueden servir para futuras investigaciones.

Significado de los símbolos:

ASTM ⇒ American Standards of Testing Materials

AW ⇒ Tal como fue soldado

AWS ⇒ American Welding Society

e ⇒ Deformación unitaria

% E ⇒ Porcentaje de elongación

ε ⇒ Voltaje

EM12K ⇒ Electrodo tipo AWS

F7A2 ⇒ Fundente tipo AWS

H ⇒ Calor aportado ó Entrada de energía

HVN ⇒ Número de dureza Vickers

I ⇒ Corriente

MB ⇒ Material base

N ⇒ Normalizado

R ⇒ Recocido

% RA ⇒ Porcentaje de reducción de área

S ⇒ Resistencia máxima a la tensión

S_B ⇒ Resistencia a la ruptura

SR ⇒ Relevado de esfuerzos

S_y ⇒ Resistencia a la fluencia (en tensión)

T y R ⇒ Temple y revenido

TTT ⇒ Transformación Tiempo Temperatura

UNS ⇒ Unified Numbering System

v ⇒ Velocidad al soldar

ZAC ⇒ Zona afectada por el calor

CAPITULO I

TRATAMIENTOS TERMICOS EN SOLDADURA POR ARCO SUMERGIDO

1.1.- FUNDAMENTOS

Es importante, para todo proceso de soldadura, considerar el tipo de material a soldar y el espesor del mismo, por lo que para el presente trabajo, el material base utilizado, fueron dos placas de acero ASTM – SA 612, roladas en caliente, con un espesor de 10.84mm y su análisis químico se presenta en la tabla 4. Dicho material se considera de alta resistencia y de baja aleación y se utiliza para la fabricación de recipientes a presión en la industria.

Al soldar con arco sumergido, así como en los demás procesos de soldadura por fusión, se originan tensiones internas en el cordón y en sus partes adyacentes, afectando también al material base, debido a los diferentes regímenes de calentamiento y enfriamiento que se llevan a cabo, además las variaciones estructurales generadas por la soldadura, producirán también zonas de grandes esfuerzos internos, muy peligrosos para el desempeño de la unión soldada, ya que pueden fallar repentinamente.

Lo anterior también genera una variación en las propiedades mecánicas de la unión soldada, manifestándose con, zonas frágiles y un rango muy amplio de durezas. De la misma manera, los cordones presentan una estructura bruta de colada, originando que bajen; la resistencia a la tracción, ductilidad y tenacidad.

Por lo tanto se propone una serie de tratamientos térmicos que cambiarán, la estructura y como consiguiente las propiedades mecánicas, de la unión soldada.

1.2.- RELEVADO DE ESFUERZOS

Consiste en un calentamiento lento, para que sea lo mas uniforme posible, por debajo de la temperatura crítica inferior y mantenerla de 0.5 a 2 horas dependiendo del espesor del material, para posteriormente enfriarlo también muy lentamente, dentro del horno^(1,4,7,9,11), tal como lo muestra la gráfica de la figura 1.

El objetivo es el de reducir los esfuerzos internos, evitando que se produzcan agrietamientos, al montar o trabajar la unión soldada, sin producir en la misma variaciones esenciales en las propiedades mecánicas existentes.

Otra de las finalidades es revenir cualquier martensita, dentro de la zona afectada por el calor y restituir la ductilidad y tenacidad, aunque en poca escala, en la unión soldada.

En el relevado de esfuerzos, la temperatura es diferente para cada tipo de acero y el tiempo depende, del espesor de las placas utilizadas en la unión soldada. Cabe mencionar que si la temperatura es alta, se debe de calentar por etapas para esperar que sea lo más uniforme posible, en la unión soldada.

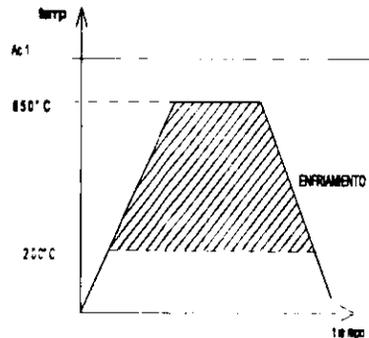


Figura 1.- Gráfica de relevado de esfuerzos, mostrando la gama de temperaturas.

1.3.- RECOCIDO TOTAL

En éste tratamiento térmico la unión soldada es calentada a una temperatura elevada la cual, depende del tipo de acero, es decir, si es un acero hipoeutectoide será 20 ó 30^o C por encima de la línea critica superior y si es un acero hipereutectoide también 20 ó 30^o C por arriba de la línea critica inferior. Después es necesario mantenerlo por un periodo largo de tiempo, para posteriormente recibir un enfriamiento muy lento, que regularmente es dentro del horno^(1,4,7,9) tal como se muestra en la figura 2.

Los propósitos del recocido son:

- desaparecer los esfuerzos internos,
- incrementa la ductilidad y tenacidad,
- afinar la estructura y uniformizar el grano.

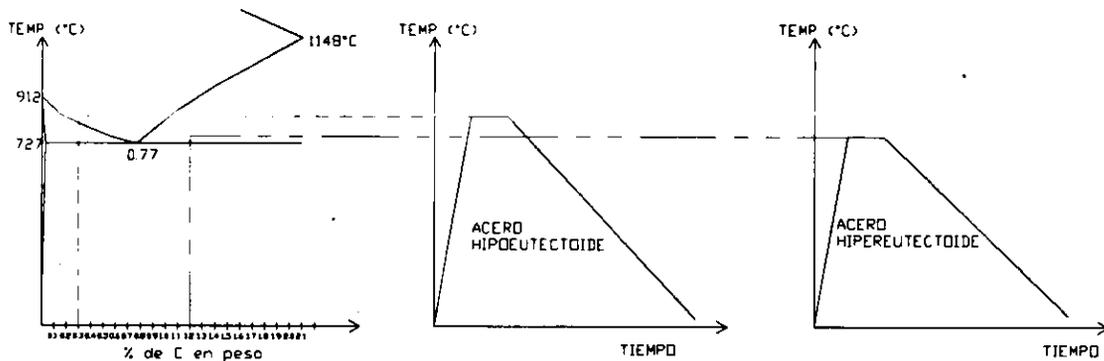


Figura 2.- Ciclos del recocido total

1.4.- NORMALIZADO

Consiste en calentar la unión soldada a temperaturas de 50 a 80 ° C arriba de la temperatura crítica superior (lo cual, depende de la composición química del acero) figura 3, después mantenerlo el tiempo suficiente para que se complete la transformación a austenita, y posteriormente enfriarlo en aire quieto a temperatura ambiente. (4,7,9,11,20)

El normalizado se usa en las uniones soldadas para eliminar las irregularidades estructurales y los esfuerzos internos, refinar el tamaño de grano, homogeneizar la estructura, refinar las estructuras dendríticas, y esencialmente donde las sollicitaciones son fuertes, como por ejemplo, elementos de construcción de máquinas y aparatos, así como de recipientes a presión.

Además éste tratamiento da como resultado, propiedades mecánicas uniformes en todas las secciones de la unión soldada.

1.5.- TEMPLE Y REVENIDO

Su objetivo principal es endurecer el material, incrementando de manera proporcional la resistencia, pero disminuyendo las medidas de ductilidad y tenacidad. En el temple, el material se calienta de 50 a 80 ° C arriba de la temperatura crítica superior (figura 3), manteniendo lo suficiente hasta completar la transformación a austenita para posteriormente enfriarlo rápidamente, en el medio de temple, que puede ser agua, aceite o aire, y depende principalmente; del % de Carbono presente en el acero y del contenido de elementos aleantes. (4,6,7,9,11)

Después del temple, el material no esta en condiciones de trabajar ya que es muy frágil, por lo que es necesario realizar otro tratamiento térmico llamado revenido, el cual consiste en calentar el material a temperaturas por debajo de la crítica inferior, manteniendo dicha temperatura durante un tiempo, dependiendo del tipo y espesor del material, para posteriormente enfriarlo dentro del horno. Si la temperatura es alta, el material adquirirá tenacidad y ductilidad, pero, perderá dureza y resistencia, y al contrario, si la temperatura es baja, obtendrá poca ductilidad y tenacidad, pero disminuirá muy poco la resistencia y dureza.

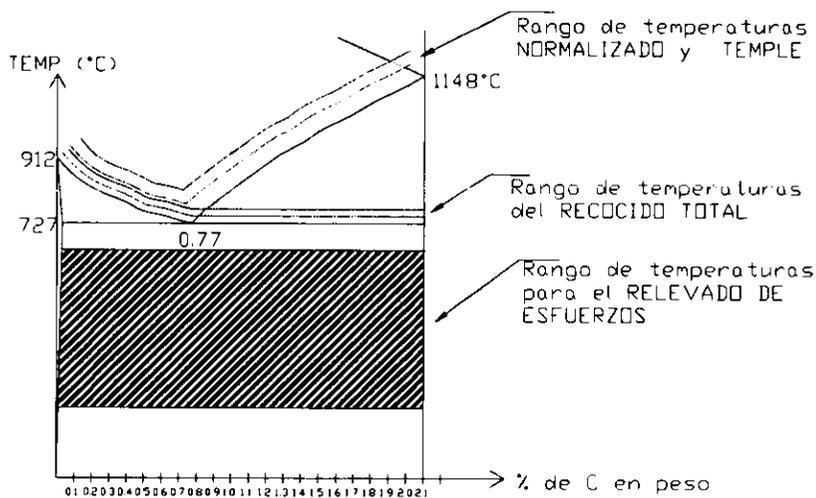
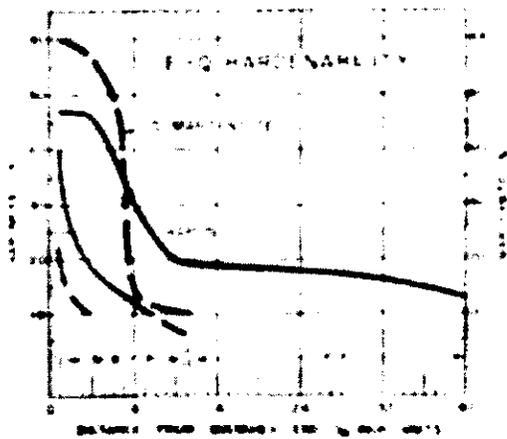
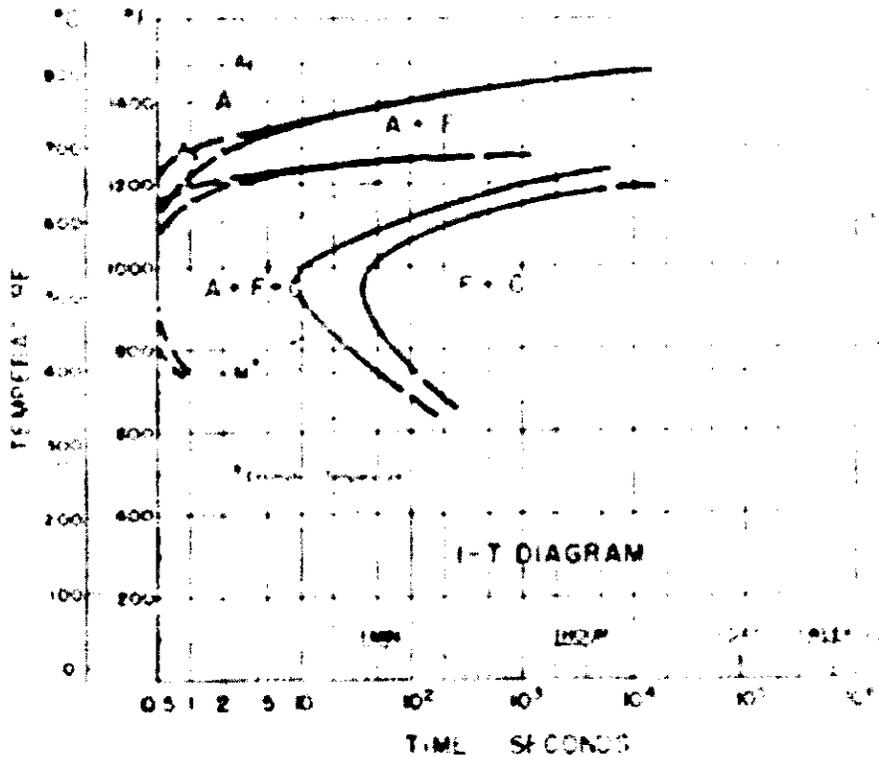


Figura 3.- Parte del diagrama de fases Fe-Fe₃C, que muestra el punto eutectoide e indica los rangos de temperatura de los tratamientos térmicos para los aceros al Carbono.

Una herramienta utilizada para la selección del medio de temple, en este tipo de tratamiento térmico, son los diagramas TTT. Se investigó el diagrama para el acero ASTM SA-612 (ver tabla 4)⁽¹⁸⁾, pero no se localizó o no se ha publicado, por lo que se usaron los diagramas de otros aceros, que corresponden aproximadamente a los elementos aleantes principales del acero utilizado en el presente trabajo y son los que se muestran en las figuras 4, 5 y 6⁽⁶⁾.



Line F₁ is Steel
 0.27C, 0.27Mn, 0.005P
 A₁ = 727°C, A_{cm} = 727°C
 A₂ = 727°C, A_{cm} = 727°C
 A₃ = 727°C, A_{cm} = 727°C
 A₁ = 727°C, A_{cm} = 727°C
 A₂ = 727°C, A_{cm} = 727°C
 A₃ = 727°C, A_{cm} = 727°C
 A₁ = 727°C, A_{cm} = 727°C
 A₂ = 727°C, A_{cm} = 727°C
 A₃ = 727°C, A_{cm} = 727°C

Figura 4.- Diagrama TTT correspondiente al acero AISI 1027.

En la gráfica de la figura 4, no se puede observar la nariz de la curva en el inicio de transformación.

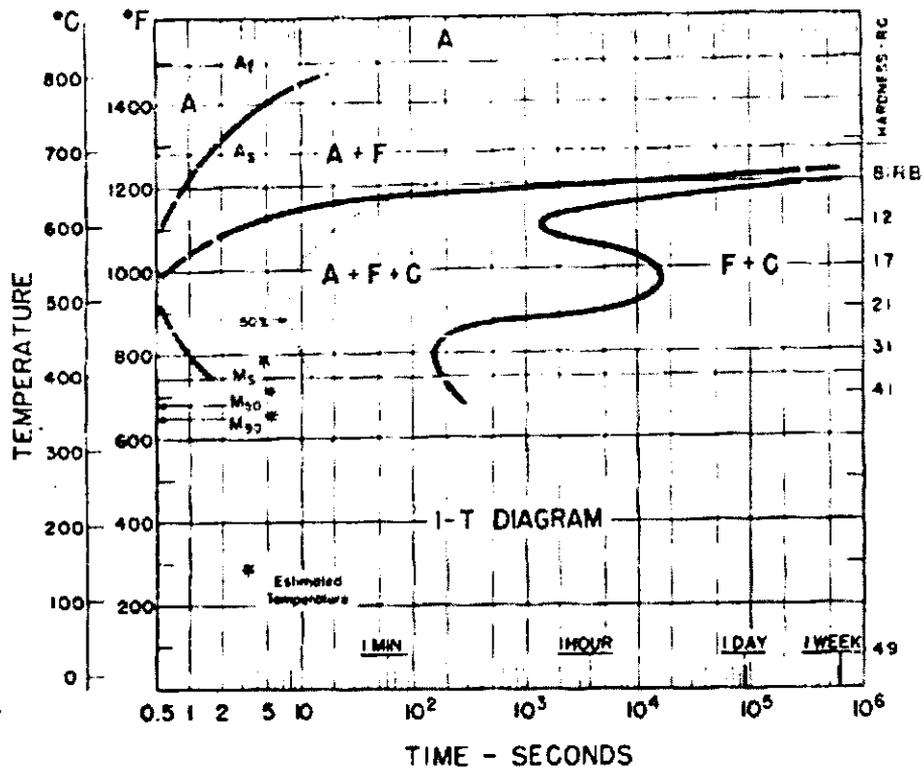
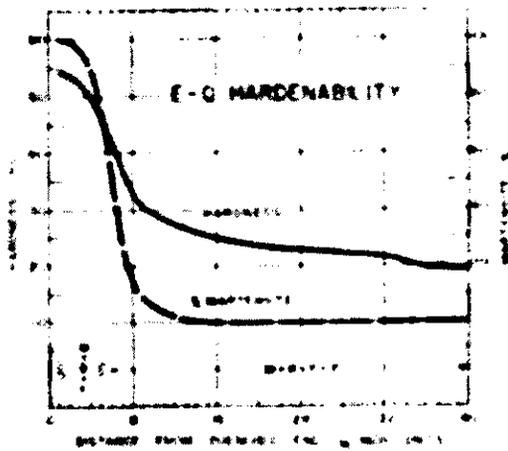
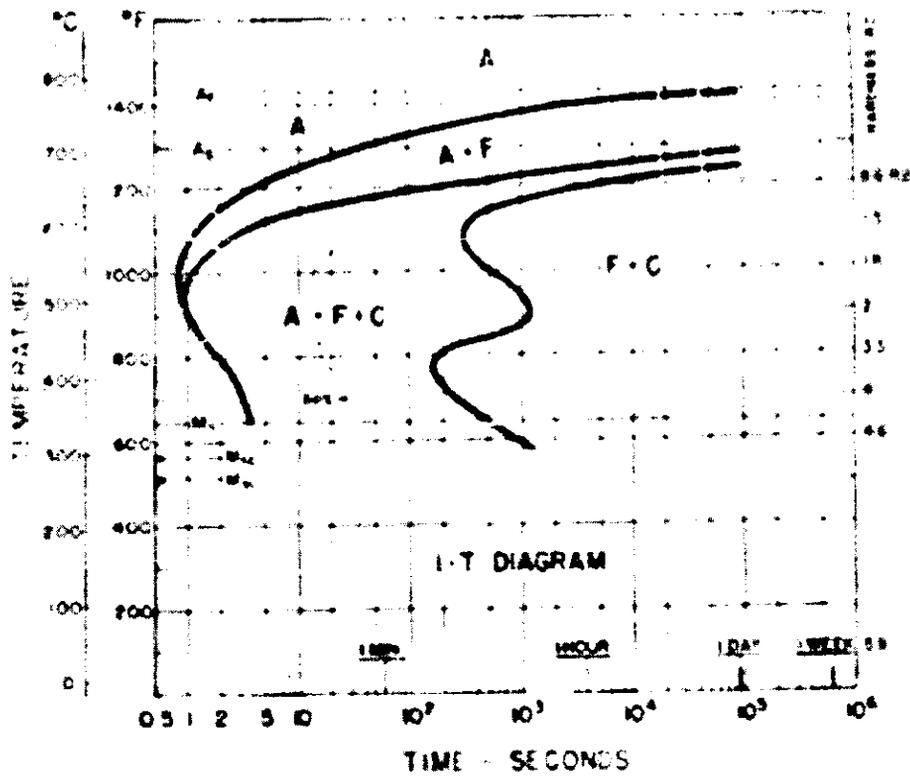


Figura 5.- Diagrama TTT correspondiente al acero AISI 1320, cuyos elementos principales son : %C = 0.20 y %Mn = 1.88

Analizando las figuras 4, y 5, se observa que en ambas, la nariz de la curva de inicio de transformación están indefinidas, a la izquierda del eje de las ordenadas. En la figura 6, se observa el inicio de la nariz , por consiguiente, se espera que para el acero ASTM SA-612, presente un diagrama similar al de dicha figura.

De lo anteriormente expuesto y en base a la revisión bibliográfica^(4,6,7,9,10,11,12,) se determinó, por un lado, que el medio de temple sea severo, por lo cual se utilizó agua y por otro lado, las estructuras esperadas, deben ser: martensita , bainita, perlita y ferrita.



1335
 C-0.35
 Mn-1.85
 Austempered at 1550 F
 Grain Size
 70% 7, 30% 2
 Legend:
 A - Austenite M - Martensite
 F - Ferrite B - Bainite
 C - Cementite P - Pearlite

Figura 6.- Diagrama TTT correspondiente al acero AISI 1335.

CAPITULO II
EXPERIMENTACION

2.1.- SOLDADO DE LAS PLACAS

2.1.1.- PREPARACION DEL MATERIAL BASE

Como ya se mencionó, en el tema 1.1, se partió de dos placas de acero ASTM "SA-612" roladas en caliente, de 10.8458 mm (0.427") de espesor por 4 m de largo y por 0.45m de ancho.

Los resultados obtenidos, del análisis químico del material y del ensayo de tensión, se presentan en el capítulo de resultados, tabla 4 y tabla 5, respectivamente.

A las dos placas de acero ASTM SA-612, se les desbastó una de las orillas con ayuda de un esmeril para formar una muesca ó bisel de cada lado de las placas, después se limpiaron los lados con una carda para eliminar las rebabas sueltas del proceso anterior así como el óxido, también se limpió, el polvo y/o grasas que pudieran tener.

Posteriormente las dos placas sueltas se colocaron horizontalmente para formar la junta, tal como se observa en la figura 7 y con el objeto de que no se separaran, en el momento de estar soldando con el proceso de arco sumergido, se punteó con soldadura de arco dos placas de inicio (ver figura 8), una en cada extremo y así poder mantener una separación uniforme a lo largo de las placas.



Figura 7.- Junta utilizada para soldar las dos placas

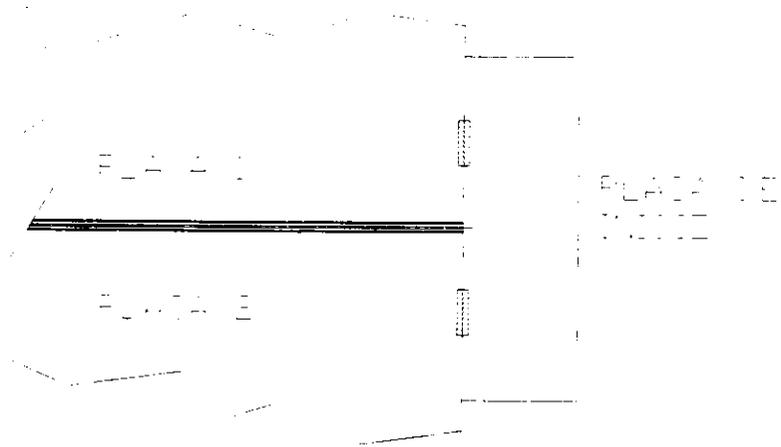


Figura 8.- Dibujo esquemático que muestra de un lado la placa de inicio.

2.1.2.- SOLDADO DE LAS PLACAS POR ARCO SUMERGIDO

Para la aplicación de la técnica de soldar por arco sumergido se llevaron a cabo los siguientes pasos:

i) Se lleno de fundente AWS F7A2, la tolva de la máquina de soldar.

Tabla 1.- Composición química del fundente AWS F7A2 (% en peso)

oxido de aluminio = 32,	magnesita = 22,
quarzo = 12,	Mn y/o aleaciones de Mn = 12,
silicatos y otros aglomerantes = 7,	fluoritas = 5,
Fe < 5 y	Si y/o aleaciones de Si < 5.

ii) Se instaló y preparó el electrodo en la maquina de soldar, el cual consiste en un rollo de alambre de acero al carbono de 3.96mm (5/32") de diámetro, tipo AWS EM12K , la tabla 2 muestra su composición.

Tabla 2.- Composición química del electrodo sólido.

Designación Numero		% en peso					
AWS	UNS	C	Mn	Si	S	P	Cu
EM12K	K01113	0.12 - 0.15	0.80 – 1.25	0.10 – 0.35	0.030	0.030	0.35

iii) Se colocaron las placas en la línea de soldadura de la maquina de soldar, con la ranura hacia arriba y el fundente cubriendo la junta ; ver figura 9. A continuación se deslizó lentamente el electrodo, para iniciar el arco y una vez hecho lo anterior, se

continuó soldando hasta terminar de unir las dos placas, con el primer cordón; después se regresó el manipulador y se soldó el segundo cordón. Posteriormente se le dió vuelta a las dos placas unidas y con el arc – air se procedió a abrir ranura, para terminar de formar la junta, tal como se muestra en la figura 7; y para concluir con el proceso de soldadura, se soldó el tercer cordón, quedando las dos placas unidas, como se observa en la figura 10.

Se utilizó una máquina automática longitudinal, marca LINCOLN ARC WELDER con corriente directa, así como un manipulador para soldar marca RANSOME. Dicha máquina trabaja industrialmente en la fabricación de productos que van soldados por arco sumergido.

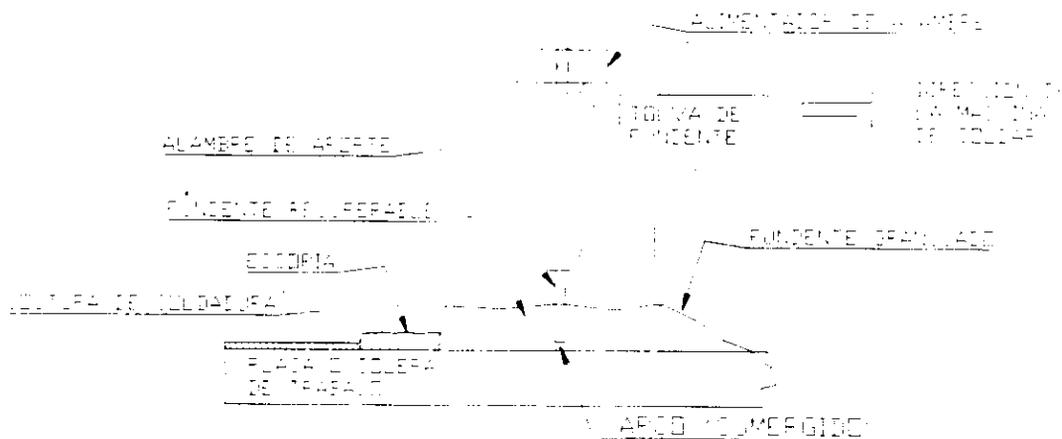


Figura 9.- Dibujo esquemático, mostrando el proceso de arco sumergido

Los parámetros de cómo fueron soldadas las placas, son listados en la tabla 3.

Tabla 3.- Parámetros utilizados en la soldadura por arco sumergido

Electrodo	Fundente	Corriente	voltaje	velocidad	Entrada	Velocidad
AWS	AWS	amperes	volts	de soldado	energía	alambre
EM12K	F7A2	550 A	32 V	8.89 mm/s	1.9KJ/mm	55 mm/s

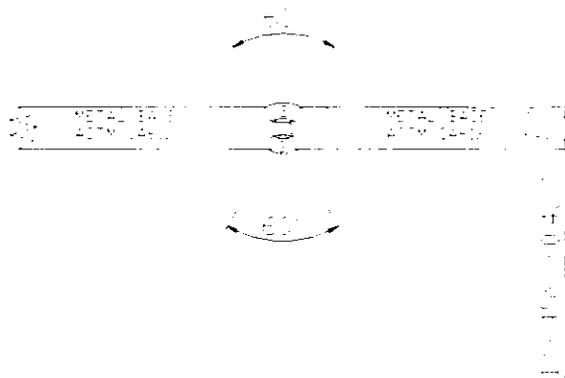


Figura 10.- Dibujo que muestra los tres cordones de soldadura.

La entrada de energía o calor aportado, a la unión soldada, de acuerdo a las variables utilizadas al soldar con arco sumergido, es :

$$H = 50\,285.71 \text{ Joules / plg} = 1979.75 \text{ Joules / mm}$$

2.2.- CORTE DE LAS PROBETAS

Ya teniendo las dos placas soldadas, se cortaron probetas para: tensión"1", impacto"2" , metalografía y dureza"3" . Fueron cortadas alternadamente en el orden antes dado, tal como lo muestra la figura 11, tomando la precaución de no utilizar los extremos soldados.

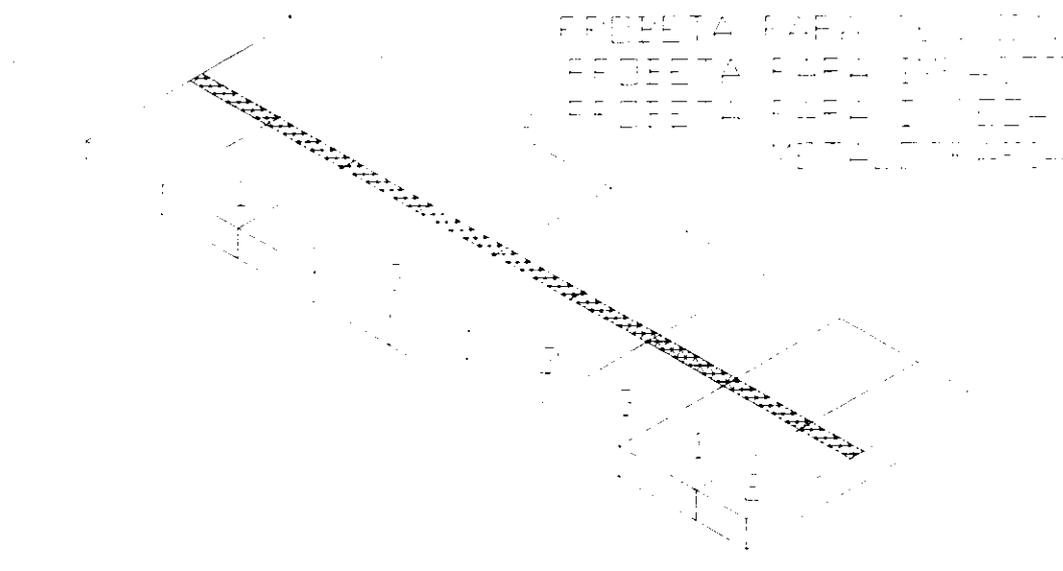


Figura 11.- Distribución del corte para la obtención de las probetas.

2.3.- TRATAMIENTOS TERMICOS .

Basándose en la bibliografía^(1,4,7,9,11,20) ,se eligieron las temperaturas y tiempos para cada uno de los tratamientos térmicos aplicados a las probetas.

2.3.1.- RELEVADOS DE ESFUERZOS

I.- Para el primer relevado de esfuerzos (SR - 1), se calentaron las piezas a una velocidad de $16.66^{\circ}\text{C}/\text{min}$, hasta alcanzar 300°C , después se mantuvo durante media hora, para posteriormente enfriar lentamente dentro del horno. Ver figura 12 a.

II.- En el segundo relevado de esfuerzos (SR - 2), se elevó primero a 300°C con velocidad de calentamiento de $16.6^{\circ}\text{C}/\text{min}$, y después se calentó hasta 450°C aplicando velocidad de calentamiento de $7.5^{\circ}\text{C}/\text{min}$, se mantuvo durante media hora en cada etapa y como último paso el enfriamiento fue dentro del horno. Figura 12 b.

III.- Para el tercer relevado de esfuerzos (SR - 3), se calentó primero a 300°C , posteriormente hasta 625°C , manteniendo al final de cada etapa media hora. En dichas elevaciones, se utilizaron velocidades de calentamiento de $16.6^{\circ}\text{C}/\text{min}$ y $5.4^{\circ}\text{C}/\text{min}$ respectivamente. El enfriamiento fue dentro del mismo horno. Figura 12 c.

2.3.2 – RECOCIDO TOTAL

IV.- Se calentaron las piezas primero a 300°C , después se elevaron a 600°C , y por último hasta 870°C , aplicando velocidades de calentamiento de $16.6^{\circ}\text{C}/\text{min}$, $5.45^{\circ}\text{C}/\text{min}$ y $3.375^{\circ}\text{C}/\text{min}$, respectivamente. En estas tres etapas se mantuvo dicha temperatura durante media hora. Para concluir se enfriaron dentro del horno hasta la temperatura ambiente. El diagrama se muestra en la figura 13

2.3.3 – NORMALIZADO

V.- Se calentaron las piezas también por etapas, y en cada una de ellas se mantuvieron durante media hora, la primera fue a 300°C , después a 600°C y por

ultimo a 930°C, para posteriormente enfriarlas en aire quieto hasta temperatura ambiente, Figura 14. Las velocidades de calentamiento aplicadas fueron de: 16.6°C/min, 6°C/min y 2.956°C/min, en cada etapa, respectivamente.

2.3.4 – TEMPLE Y REVENIDO

VI.- El calentamiento fue idéntico que en el tratamiento anterior hasta los 930°C, que corresponde a la temperatura de austenización, sosteniendo ésta temperatura durante media hora, enfriando las piezas rápidamente en agua. En la figura 15 muestra la evolución térmica de este tratamiento y se observa que después del temple se calentó nuevamente a 300°C, con el fin de realizar el revenido, a una velocidad de calentamiento de 16.6°C/min, manteniendo media hora esta temperatura y el enfriamiento se llevó a cabo dentro del horno, hasta la temperatura ambiente.

2.3.5.- HORNO DE TRATAMIENTO TERMICO

Los tratamientos térmicos se efectuaron en un horno eléctrico calentado por resistencias, marca LINDBERG HEVI DUTY y modelo SIB, con dimensiones del hogar de 0.94x1.2x0.75m de altura. El panel de control y el horno se muestran en la figura 16. Este horno tiene la característica de calentar lentamente tal y como se programó para los diferentes tratamientos térmicos, pero sobre todo para los relevados de esfuerzos.

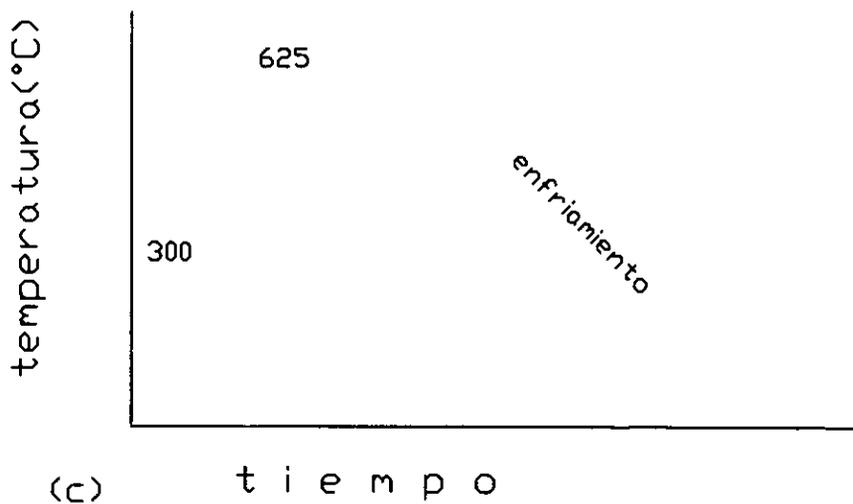
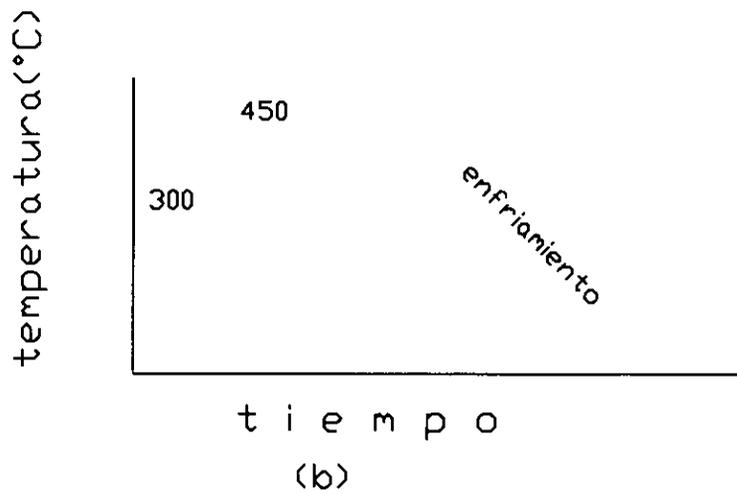
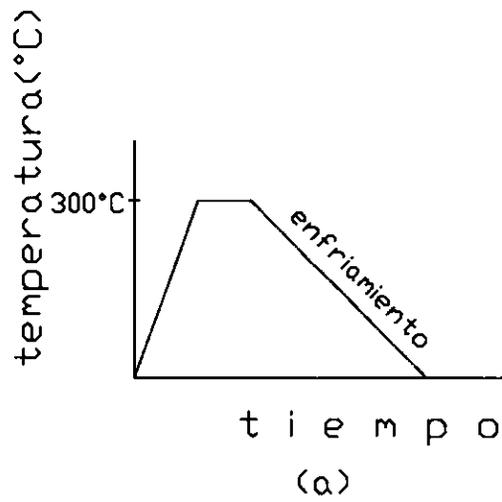


FIGURA 12.- Esquema de los relevados de esfuerzos,
 a) 300°C, b) 450°C, c) 625°C

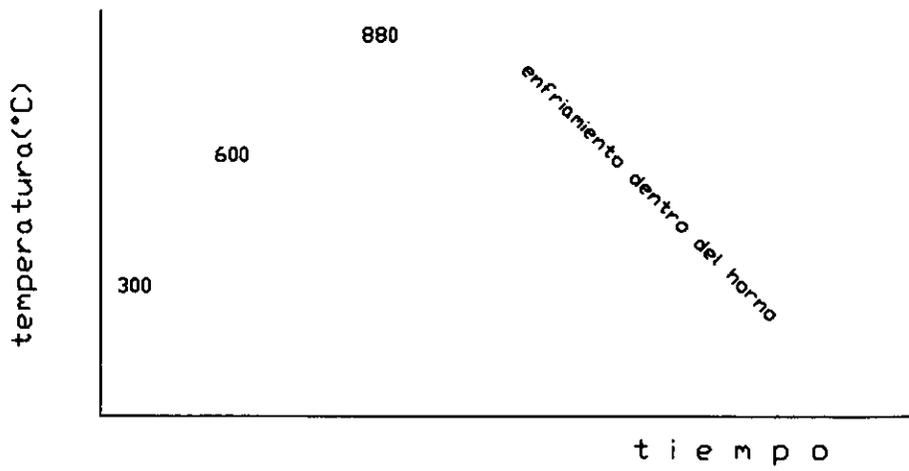


FIGURA 13.- Curso de la temperatura en el recocido total.

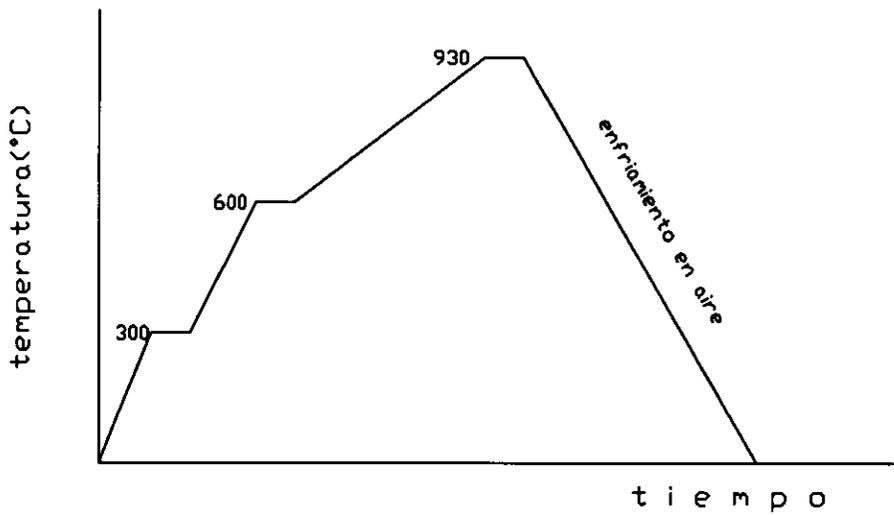


FIGURA 14.- Evolución térmica del Normalizado

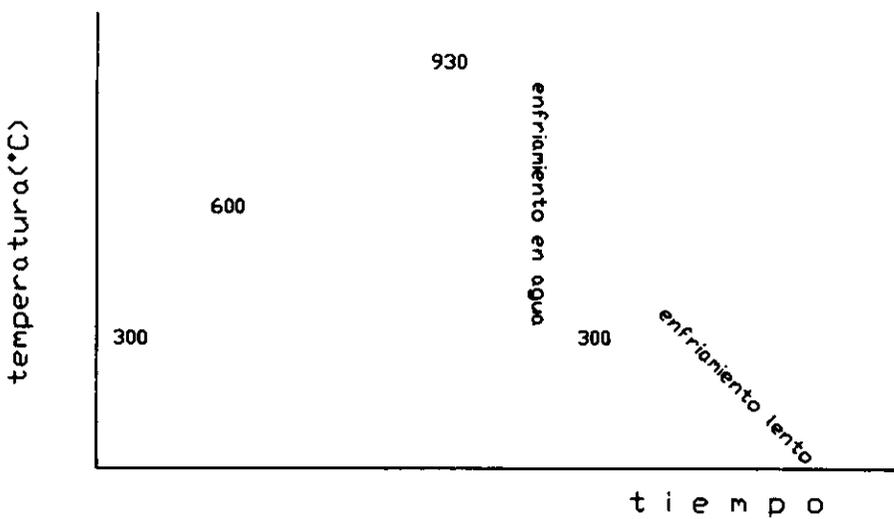


FIGURA 15.- Esquema de trabajo en el temple y revenido.

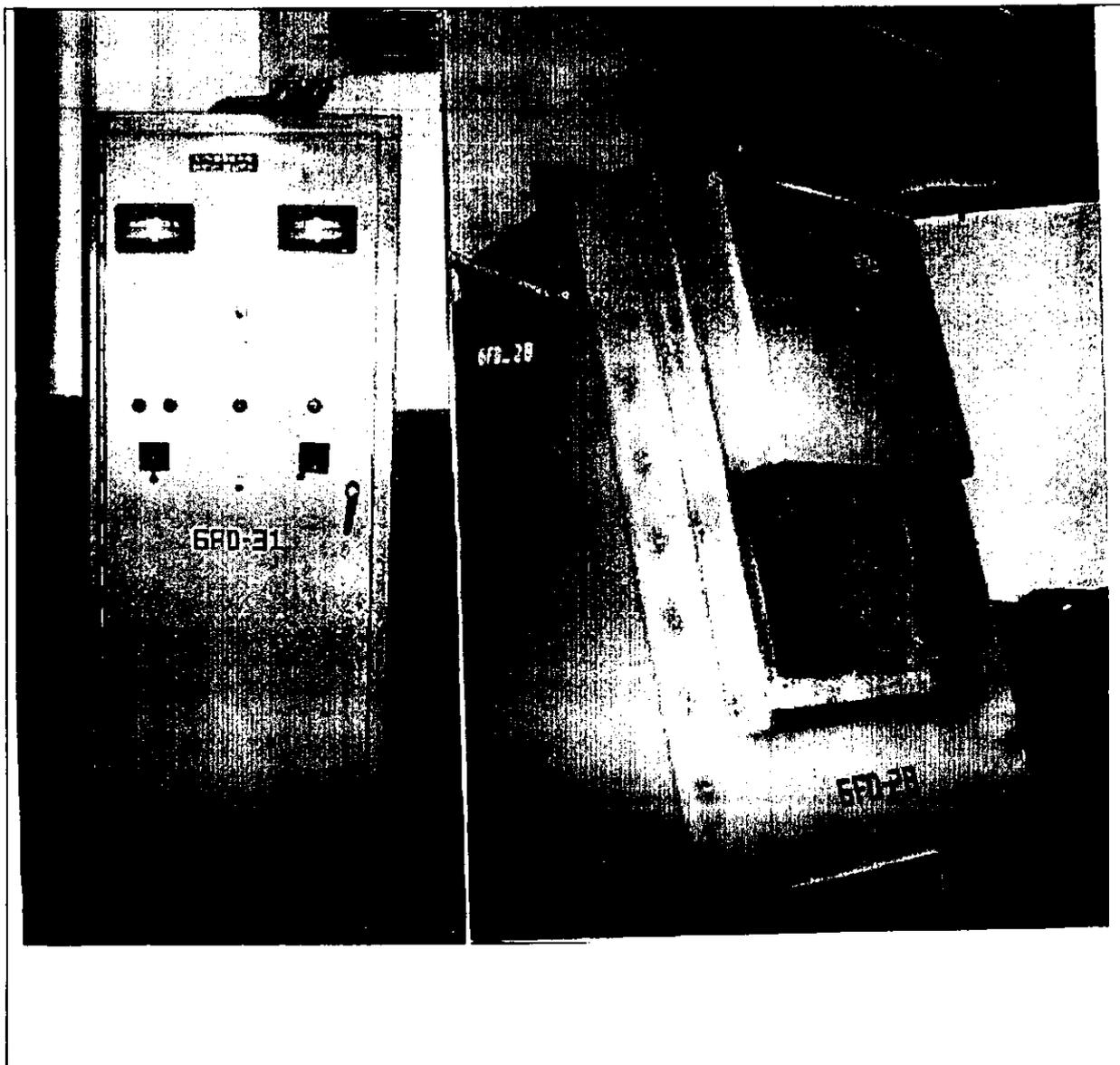


Figura 16.- Horno eléctrico de cámara y su panel de control.

2.4.- DISEÑO Y FABRICACION DE LAS PROBETAS

Se maquinaron con suficiente refrigerante las probetas de tensión e impacto, hasta cumplir con las dimensiones recomendadas por la norma ASTM E8⁽³⁾ (figura 17) y ASTM E23⁽³⁾ (figura 18), respectivamente.

Para metalografía y dureza, se cortaron probetas de 10 mm de espesor y también se maquinaron con suficiente refrigerante. Posteriormente todas las muestras se desbastaron, iniciando con lijas de SiC, de 120 hasta 800, utilizando agua como lubricante, teniendo el cuidado de eliminar las rayas anteriores en cada cambio de lija; después se pulieron con ayuda de paño y alumina con tamaño de partícula de 0.5 μ , hasta obtener una superficie a espejo. Para concluir, dichas probetas se atacaron con nital al 2% a temperatura ambiente.

Fue necesario que en cada muestra de metalografía y dureza, el desbaste y pulido se realizara en ambos lados, ya que una superficie, se utilizó para medición de durezas y la otra, para toma de: fotomicrografías, análisis cuantitativo y cualitativo de fases presentes y por último para difracción de rayos "x".

2.5.- PRUEBAS MECÁNICAS.

2.5.1.- PRUEBA DE TENSION

Las probetas de tensión utilizadas, se maquinaron de acuerdo a la norma ASTM E8 – ,1990⁽³⁾, tal como lo muestra la figura 17 y las pruebas de tensión se llevaron a cabo a temperatura ambiente y a la misma velocidad, en una máquina universal para prueba de materiales marca Galdabini de 50 toneladas (modelo PM)

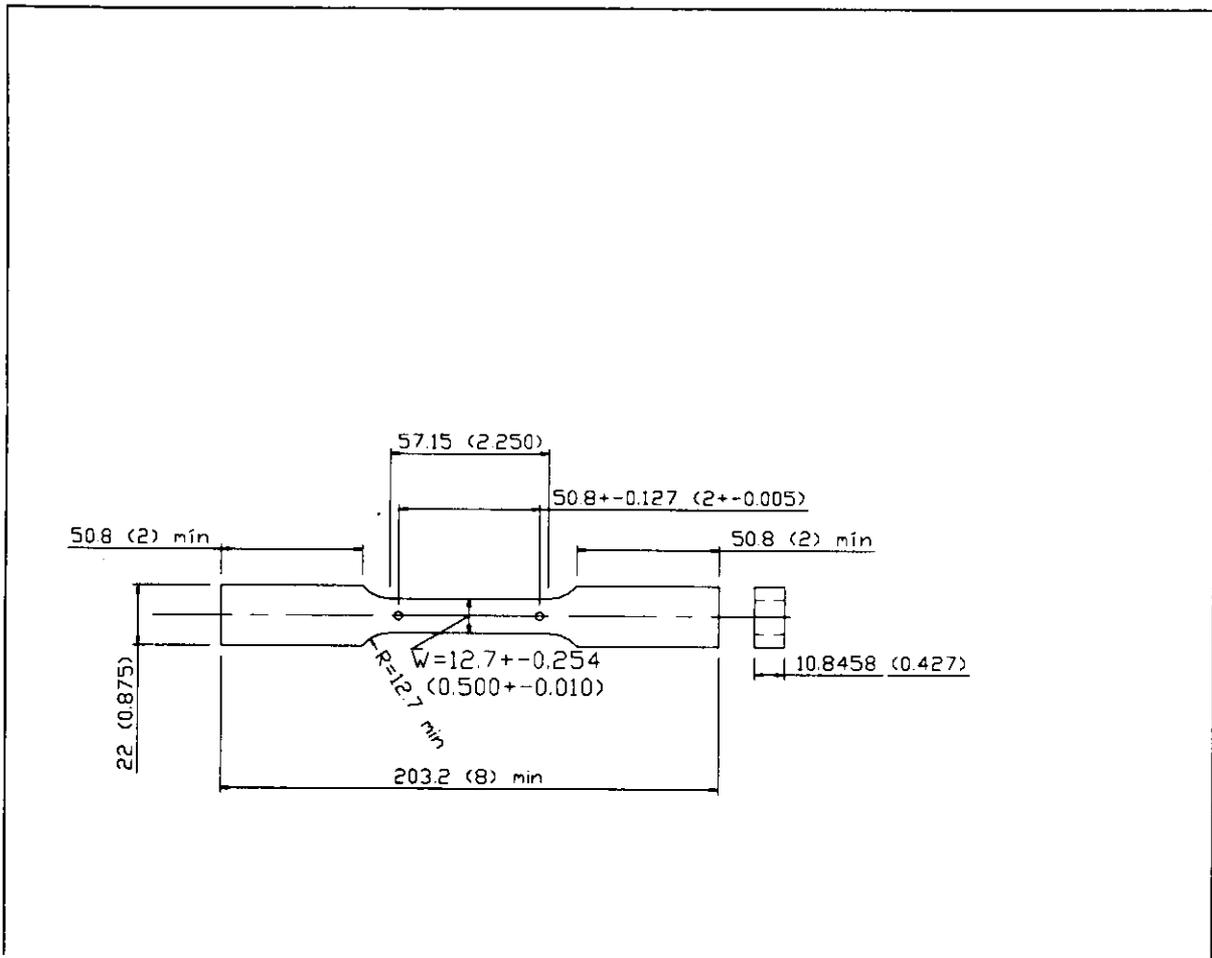


Figura 17 Probeta rectangular estándar para ensayo de tensión.(acot. mm(plg))

2.5.2.- MEDICION DE DUREZA

Las probetas utilizadas para medir dureza, fueron preparadas tal como se describió en 2.4. Después de la preparación, se realizaron 20 indentaciones en la zona afectada por el calor y 20 en el material base, así como 10 indentaciones en el metal soldado, de acuerdo a un patrón de tres líneas, recomendado por la AWS⁽⁵⁾.

Las pruebas de dureza se obtuvieron, en un durómetro marca VICKERS LIMITED - CRAYFORD KENT modelo htm 461.

2.5.3.- PRUEBA DE IMPACTO

Los ensayos de impacto practicados fueron del tipo Charpy, y se maquinaron las probetas de acuerdo a la norma ASTM E23, 1990⁽³⁾, tal como se muestra en el dibujo presentado en la figura 18. Las pruebas se llevaron a cabo en una máquina de marca SHENCK – TREBEL tipo RPS W/H, modelo 40920, bajo las siguientes circunstancias:

- a).- el tipo de probeta usado fue Charpy tipo "A",
- b).- con una velocidad del martillo en el instante de golpear de 5.42 m / s
- c).- con una energía del péndulo de 300 J, al instante de golpear la probeta y
- d).- una temperatura del medio ambiente de 21⁰ C.

2.6.- MICROSCOPIA OPTICA

Las muestras metalográficas para cada tratamiento térmico, ya preparadas en la superficie, tal como se describió en el tema 2.4, se procedió a la observación y análisis de cada probeta, en un microscopio óptico, y así de esta manera, seleccionar los lugares en donde se tomaron las fotomicrografías.

Dicha observación se llevó acabo en un microscopio óptico marca Nikon – Epiphot con cámara fotográfica tipo FX – 35DX, el cual se empleó además para tomar las fotomicrografías.

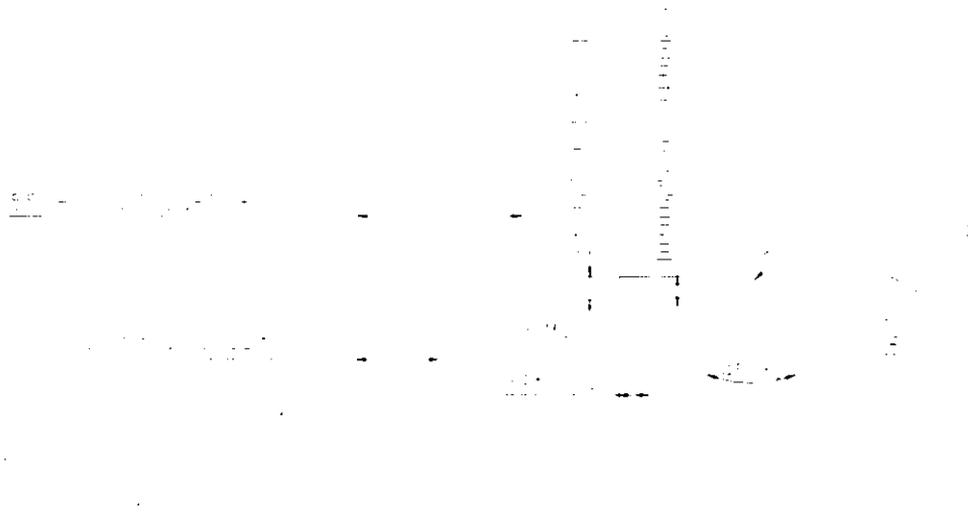


Figura 18.- Probeta para prueba de impacto, ASTM E23, 1990. (acot mm(plg))

Para el análisis cuantitativo, de las fases presentes y medición del tamaño de grano, se utilizaron las mismas muestras, de los párrafos descritos anteriormente, así y con la ayuda del analizador de imágenes, que consta básicamente de un microscopio óptico, marca Olympus tipo BX60M con un software de BUEHLER OMNIMENT 4.

2.7.- DIFRACCION DE RAYOS " X "

Para la realización de la difracción de rayos "x" en la soldadura, se tuvo un especial cuidado en la preparación de las muestras, observando que el acabado

superficial descrito en el tema 2.4, no presentara rayaduras y estuviera libre de partículas abrasivas, ya que cualquier material afecta, el resultado del estudio.

Los parámetros utilizados, en el difractómetro de rayos "x", fueron:
ánodo de **Cu** con una longitud de onda de 1.54 Å, 2θ inicial = 10°, 2θ final = 120°,
"d" inicial = 2.97541 Å y "d" final = 0.84992 Å.

Donde: "d" es el espaciamiento entre los planos adyacentes del cristal y 2θ , es conocido como "ángulo de difracción".

El equipo utilizado fue un difractómetro: marca PHILIPS ANALYTICAL, con Diffracción software tipo PC-APD.

CAPITULO III

RESULTADOS EXPERIMENTALES

3.1.- MATERIAL BASE

Los resultados obtenidos, del análisis químico y de las propiedades mecánicas, del acero ASTM SA-612 son mostradas a continuación:

Tabla 4.- Composición química del acero ASTM SA 612

% del elemento en peso												
C	S	Si	P	Cr	Mn	Ni	Cu	Mo	As	Sb	Sn	Al
0.25	0.015	0.17	0.021	0.01	1.25	0.02	0.01	0.01	0.005	0.003	0.002	0.061

En los resultados presentados en la tabla 5, es necesario aclarar, que son el promedio, del ensayo de tensión realizados a 9 probetas.

Tabla 5.- Propiedades mecánicas del acero ASTM SA 612

S _y	505 Mpa (73.2 KSI)
S	607.6 Mpa (88.15KSI)
% RA	65.7%
% E (en 50 mm)	28%
Energía en prueba de impacto Charpy	52.2 J
Dureza	95 HVN

3.2.- PROPIEDADES MECANICAS

3.2.1.- DUREZA VICKERS

A cada probeta se dividieron en tres regiones : 1) la zona afectada por el calor, 2) soldadura y 3) material base. En todas las probetas existentes: con

tratamiento térmico y en las de tal como fueron soldadas, se obtuvieron 25 durezas en la región 1, 15 durezas en la región 2 y 12 en el material base. Ver tabla 6.

Tabla 6.- HVN por zona y tratamiento térmico

TIPO	ZONA	HVN	RANGO
AW	ZAC	94.04	124 – 61 = 63
AW	SOLDADURA	88.25	116 – 57.7 = 58.3
AW	MB	89.37	110 – 48.6 = 61.4
SR-1	ZAC	91	108 – 73.6 = 34.4
SR-1	SOLDADURA	88.9	99 – 81.2 = 17.8
SR-1	MB	88.9	104 – 78.8 = 25.2
SR-2	ZAC	91.43	106 – 74.8 = 31.2
SR-2	SOLDADURA	88.81	102 – 62.6 = 39.4
SR-2	MB	84.85	94.6 – 70 = 24.6
SR-3	ZAC	71.77	100 – 47.7 = 52.3
SR-3	SOLDADURA	74.49	98.4 – 50.6 = 47.8
SR-3	MB	77.55	94.7 – 57.4 = 37.3
RECOCIDO	ZAC	42.14	45.8 – 37 = 8.8
RECOCIDO	SOLDADURA	44.236	49.5 – 37.8 = 11.7
RECOCIDO	MB	41.76	59.7 – 35.9 = 23.8
NORMALIZADO	ZAC	48.21	53.6 – 42.7 = 10.9
NORMALIZADO	SOLDADURA	46.09	53.8 – 42.2 = 11.6
NORMALIZADO	MB	45.09	50.1 – 39.4 = 10.7
TEMPLE Y REV	ZAC	119	151 – 104 = 47
TEMPLE Y REV	SOLDADURA	113.16	128 – 94 = 34
TEMPLE Y REV	MB	109.6	136- 110 = 26

En la figura 19 se puede visualizar las tres regiones antes mencionadas, que fueron objeto de indentaciones.

Un reporte de la dureza en la unión soldada así como el correspondiente rango y desviación estándar, es proporcionado en la tabla 7.



Figura 19.- Regiones donde se obtuvieron las durezas

Tabla 7.- Resumen de dureza para cada tipo de probetas.

TIPO	HVN	RANGO	DESV. TIPICA
AW	90.55	$124 - 48.6 = 75.4$	23.90
SR-1	89.61	$108 - 73.6 = 34.4$	5.83
SR-2	88.36	$106 - 62.6 = 43.4$	10.36
SR-3	74.6	$100 - 47.7 = 52.3$	15.34
RECOCIDO	42.71	$59.7 - 35.9 = 23.8$	3.46
NORMALIZADO	46.46	$53.8 - 39.4 = 14.4$	3.37
TEMPLE Y REV.	121	$151 - 94 = 57$	10.89

3.2.2.- ENSAYO DE TENSION

Todas las pruebas de tensión de la unión soldada por arco sumergido, se realizaron a temperatura ambiente y con la misma velocidad, la tabla 8 muestra el promedio de las variables obtenidas, por grupo de la misma condición de las probetas. En el capítulo 4 se muestran las gráficas Esfuerzo – Deformación, también por tratamiento térmico recibido.

Tabla 8.- Promedio de resultados del ensayo de tensión.

CONDICION DE PROBE TAS	S_y Mpa(KSI)	S Mpa (KSI)	S_B Mpa(KSI)	S_B REAL Mpa(KSI)	% RA	% E en 50 mm
AW	487 (70.6)	579 (84)	479.2 (69.5)	1260 (182.8)	61.9	19.3
SR - 1	510 (73.9)	574 (83.26)	415 (60.19)	1048.1 (152)	60.34	19.16
SR - 2	504.4 (73.13)	574.6 (83.35)	414.4 (60.1)	1072.2 (155.5)	61.27	19.5
SR - 3	464 (67.27)	553.8 (80.33)	392 (56.85)	1063.8 (154.3)	63.1	20.3
RECOCIDO	328 (47.55)	464.8 (67.37)	303.2 (43.98)	1077.7 (156.3)	71.86	31.26
NORMALIZA DO	344 (49.88)	508.5 (73.75)	337.87 (49)	1065.1 (154.4)	68.2	26.07
TEMPLE Y REV		867.3 (125.8)	784 (113.7)	1290.7 (187.2)	40	7.22

3.2.3.- ENSAYO DE IMPACTO

En la prueba de impacto se reporta, los valores obtenidos: de la tenacidad en Joules (J) y la apariencia de la superficie fracturada , por condición del material, tal como se observa en la tabla 9.

Tabla 9.- Promedios obtenidos en la prueba de impacto.

CONDICION	TENACIDAD (J)	APARIENCIA DE LA FRACTURA	
		% DUCTIL	% FRAGIL
AW	112.63	63	37
SR - 1	121	72.5	27.5
SR - 2	121	77	23
SR - 3	141	76	24
RECOCIDO	148.5	72.5	27.5
NORMALIZADO	130	57	43
TEMPLE Y REV	29	40	60

3.3.- MICROESTRUCTURAS

3.3.1.- MICROSCOPIO OPTICO

Para el análisis de las microestructuras de la unión soldada, presentadas en las micrografías ópticas siguientes, se partió de la región del material base, que no fue afectado, posteriormente en la zona afectada por el calor y para concluir en la región del depósito de soldadura. Lo anterior se realizó en todas las muestras y fueron atacadas químicamente con nital al 2%.



Figura 20.- Micrografía correspondiente al MB en la condición de tal como fue soldada, mostrando bandas oscuras de perlita y las bandas claras de ferrita. 400 x.

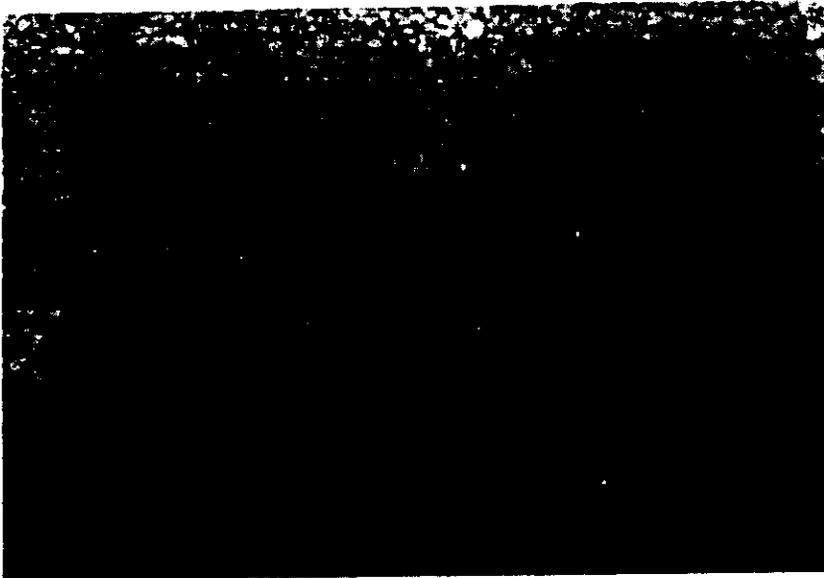


Figura 21.- Micrografía correspondiente a la zona afectada por el calor en la condición de tal como fue soldada. La microestructura es del tipo ferrítica - perlítica mostrando un grano fino. 400 x.



Figura 22.- Micrografía correspondiente a la ZAC, de una probeta tal como fue soldada. La microestructura muestra una mezcla de granos alargados y granos equiaxiados de ferrita que corresponden a las zonas claras y la perlita en las áreas oscuras.400 x.



Figura 23.- Micrografía correspondiente al depósito de soldadura en la condición de tal como fue soldada. La microestructura es del tipo ferrítica-perlítica y con granos columnares que crecieron hacia el centro de la unión soldada. 400 x.



Figura 24.- Micrografía correspondiente al depósito de soldadura en la parte central (cordon 1 ver fig 10), en la condición de tal como fue soldada, mostrando ferrita poligonal en zonas claras y perlita en las regiones oscuras.400 x.

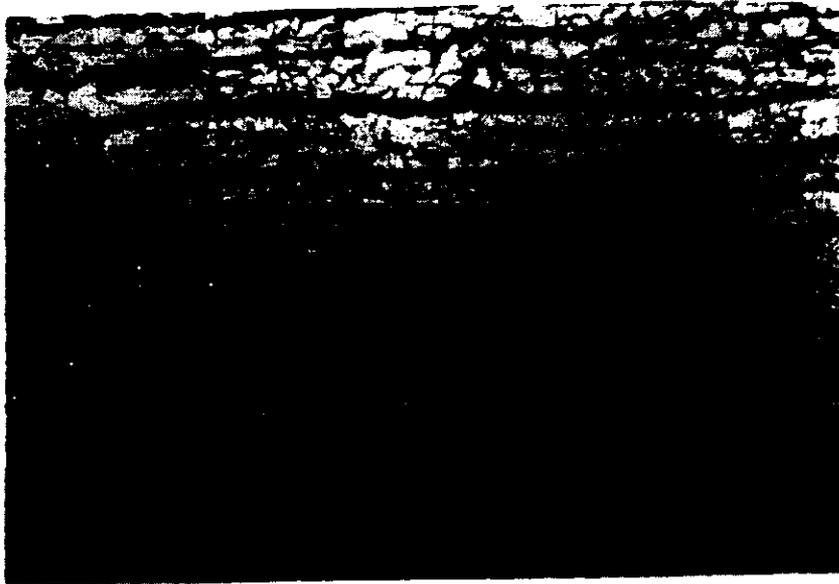


Figura 25.- Micrografía correspondiente al MB en la condición de SR - 1 , mostrando bandas oscuras de perlita y las bandas blancas de ferrita. 400 x.



Figura 26.- Micrografía correspondiente a la ZAC en la condición de relevado de esfuerzos -1 , presentando una microestructura de tipo ferrítica en donde tiene un refinamiento de grano, mostrando también perlita en las zonas oscuras. 400 x.

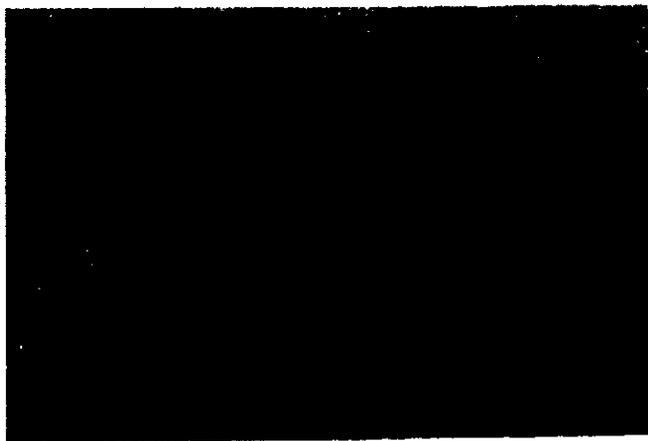


Figura 27.- Micrografía que muestra del lado izquierdo la ZAC con granos finos y del derecho el depósito de soldadura con granos columnares, en la condición de SR $- 1$. Mostrando la diferencia en tamaño y forma de los granos. Presentando las fases de ferrita(áreas blancas) y perlita (zonas oscuras). 400X



Figura 28.- Micrografía correspondiente al depósito de soldadura en la condición de SR – 1, se observa un crecimiento de grano tipo columnar con tendencia de crecimiento hacia el centro de la unión soldada. Las zonas oscuras corresponden a perlita y las claras a ferrita poligonal. 400X.



Figura 29.- Micrografía del SR – 1, en el depósito de soldadura, mostrando el grano de tipo columnar de la ferrita (zonas claras) , la perlita globular en zonas oscuras . 400x.



Figura 30.- Micrografía del material base en la condición de SR – 2, donde se observa bandas oscuras de perlita y las bandas blancas de ferrita. 400 x.

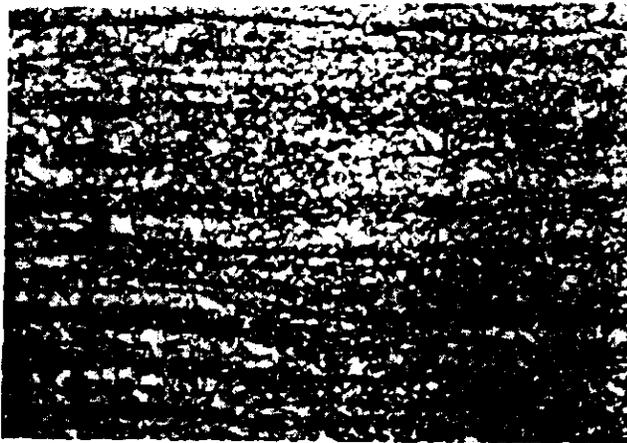


Figura 31.- Microestructura de la zona afectada por el calor en la condición de SR – 2, mostrando un refinamiento de grano, donde se observan zonas claras de ferrita y las oscuras de perlita fina. 400 x.



Figura 32.- Micrografía correspondiente a la ZAC en la condición SR – 2. La microestructura muestra una mezcla de granos alargados y granos equiaxiados de ferrita que corresponden a las zonas claras y perlita en la áreas oscuras.400 x.

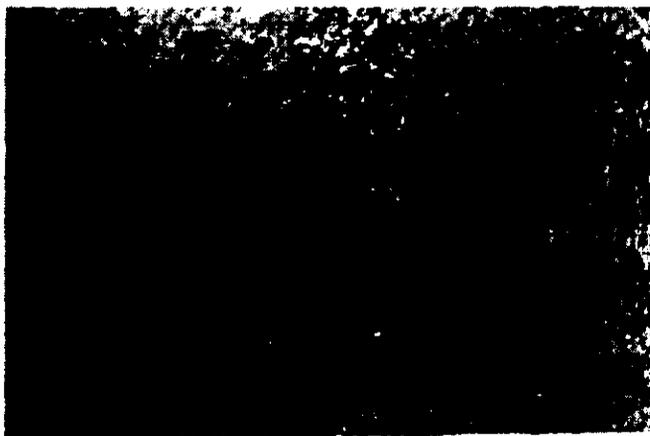


Figura 33.- Microestructura mostrando dos zonas : lado izquierdo inferior zona afectada por el calor y el lado superior derecho, parte del depósito de soldadura, en la condición de SR – 2. 400X



Figura 34.- Micrografía del depósito de soldadura, en la condición de SR -2, mostrando granos largos de ferrita (zonas claras), que en realidad son parte de dendritas y el resto, zonas oscuras de perlita. 400 x.



Figura 35.- Micrografía correspondiente al depósito de soldadura (parte central), en la condición de SR - 2, la microestructura es del tipo ferrítica - perlítica, con dendritas muy alargadas. 400x



Figura.- 36 Microestructura del material base en la condición de SR- 3, mostrando bandas oscuras de perlita y las bandas blancas de ferrita. 400 x.

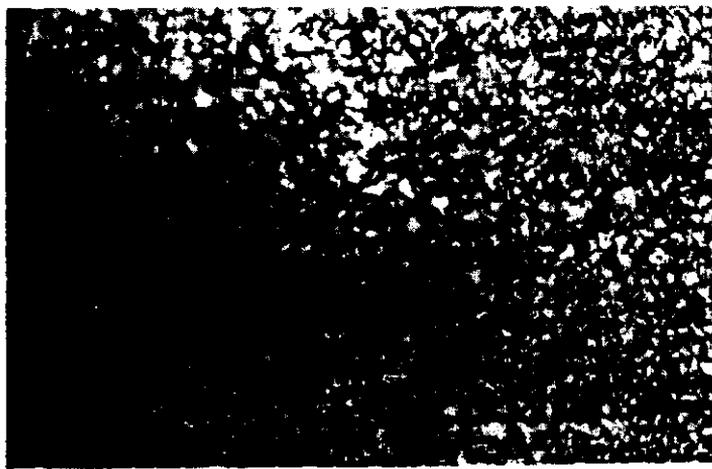


Figura 37.- Micrografía correspondiente a la zona afectada térmicamente, en la condición de SR - 3. La microestructura es ferrítica - perlítica con un tamaño de grano fino y de tipo globular o esferoidal. 400 x.

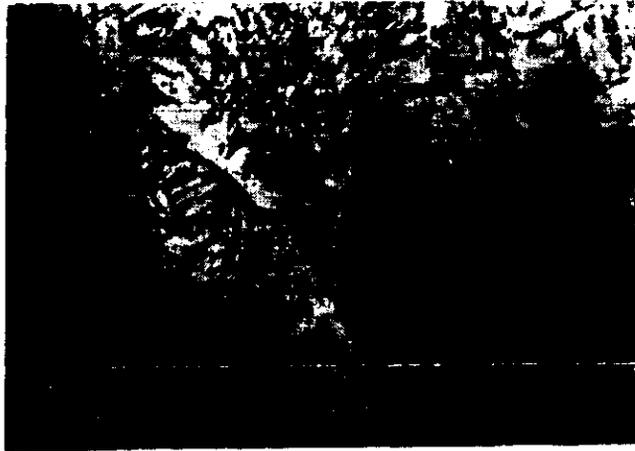


Figura 38.- Microestructura del depósito de soldadura, en la condición de SR – 3 del tipo ferrítica-perlítica y con dendritas que crecieron hacia el centro de la unión soldada. 400 x.

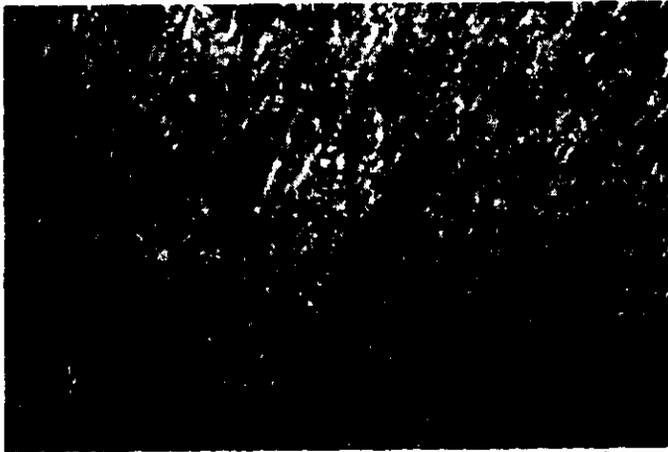


Figura 39.- Micrografía de la parte central del depósito de soldadura, mostrando granos muy largos de ferrita (blanca) que corresponden a dendritas y perlita (obscura), correspondiente a la condición de SR – 3. 400x



Figura 40.- Microestructura del material base en la condición de recocido, del tipo ferrítica – perlítica, y se observan las regiones blancas de ferrita y las bandas oscuras de perlita. 400 x.

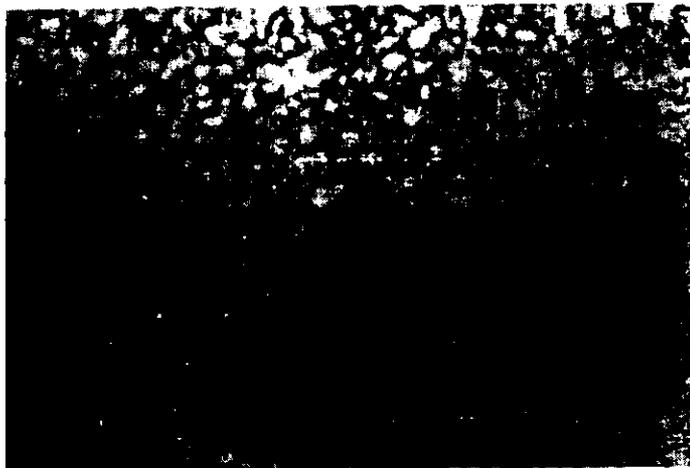


Figura 41.- Micrografía de la zona afectada térmicamente, en la condición de recocido. Microestructura del tipo ferrítica – perlítica, y se observan las regiones blancas de ferrita poligonal y las partes oscuras de perlita globular. 400 x.



Figura 42.- Microestructura del depósito de soldadura parte central, del tipo ferrítica – perlítica, y se observan las regiones blancas de ferrita poligonal y las zonas oscuras de perlita globular, en la condición de recocido. 400 x.

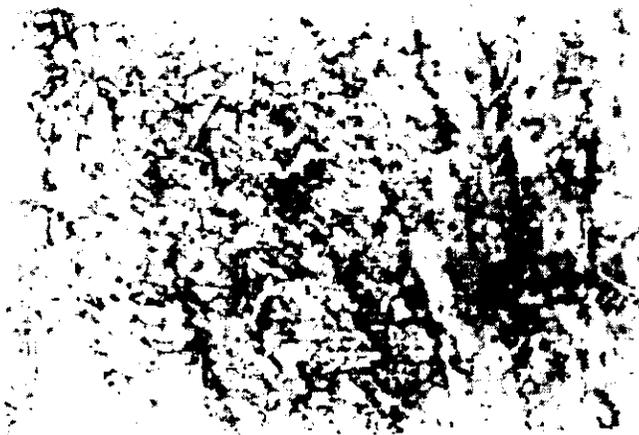


Figura 43.- Microestructura del depósito de soldadura, en la condición de recocido, mostrando en la gran mayoría, granos del tipo columnar, correspondientes a dendritas con zonas claras de ferrita poligonal y en las regiones oscuras perlita. 400 x.



Figura 44.- Micrografía del material base, en la condición de normalizado, mostrando una microestructura del tipo ferrítica – perlítica, donde las zonas blancas corresponden a la ferrita poligonal y las regiones oscuras a la perlita. 400 x.

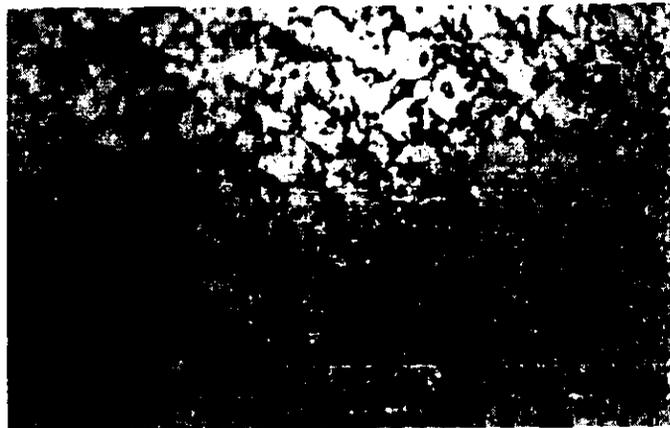


Figura 45.- Microestructura de la zona afectada térmicamente en la condición de normalizado, del tipo ferrítica – perlítica, y se observan las regiones blancas de ferrita y las zonas oscuras de perlita. 400 x.



Figura 46.- Microestructura en la condición de normalizado que muestra las tres regiones: depósito de soldadura, ZAC y el MB; de izquierda a derecha. 400 x.



Figura 47.- Microestructura del depósito de soldadura(parte superior) en la condición de normalizado, presentando ferrita poligonal (regiones blancas) y zonas oscuras de perlita. 400 x.



Figura 48.- Microestructura del depósito de soldadura parte central, en la condición de normalizado, donde las regiones blancas son de ferrita poligonal y las oscuras corresponden a perlita globular. 400x

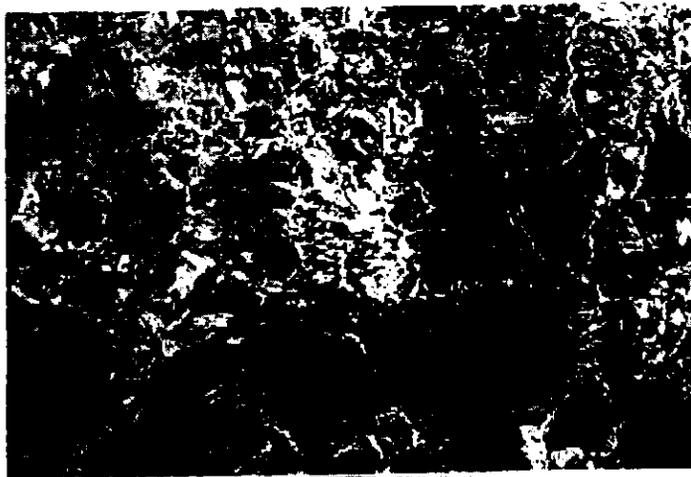


Figura 49.- Micrografía correspondiente al material base, en la condición de templado y revenido, mostrando una red de ferrita blanca, con algunas zonas grises de martensita revenida de bajo carbono y las áreas oscuras de perlita fina. 400 x.

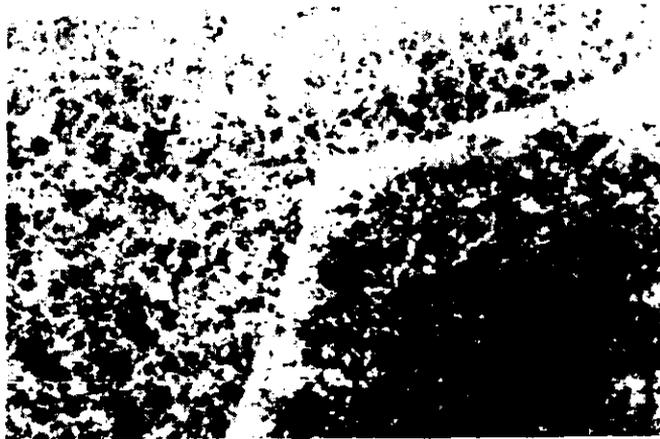


Figura 50.- Micrografía correspondiente a la condición de templado y revenido, mostrando la banda de la zona afectada por el calor. Del lado izquierdo esta el depósito de soldadura y del derecho el material base. 100X



Figura 51.- Micrografía correspondiente a la condición de templado y revenido, mostrando la banda de la zona afectada por el calor. Del lado izquierdo esta el depósito de soldadura y del derecho el material base. 400X



Figura 52.- Microestructura del depósito de soldadura en la condición de temple y revenido, mostrando Bainita (esferoidizada), con zonas oscuras de perlita fina y áreas claras de ferrita. 400 x.



Figura 53.- Micrografía que muestra: áreas oscuras de perlita fina, bainita en zonas grises y la ferrita (blancas). Corresponde al depósito de soldadura parte central en la condición de T y R. 400x.

3.3.2.-MICROSCOPIA CUANTITATIVA

Con la ayuda del analizador de imágenes, se determinó las fases existentes en las tres zonas de la unión soldada, con una amplificación de 300X, para cada condición de las probetas y el promedio de lo anterior, se muestra en las tablas 10 y 11, donde P significa perlita, F ferrita, B Bainita y M Martensita.

Tabla 10.- Cuantificación de fases presentes.

Condición	MAT. BASE		ZAC		SOLDADURA	
	P %	F %	P %	F %	P %	F %
AW	42.6	52.4	59.14	40.85	67.32	32.67
SR - 1	37.84	62.15	48.10	51.62	51.30	48.69
SR - 2	32.82	67.43	54.16	45.83	41.94	57.58
SR - 3	38.32	61.67	49.13	50.86	39.66	60.07
RECOCIDO	37.93	61.39	29.34	70.65	37.55	61.89
NORMALIZADO	46.37	53.63	38.71	61.3	24.67	75.32

Tabla 11.- Fases presentes en la unión soldada, en la condición de temple y revenido.

MATERIAL BASE				ZAC				SOLDADURA			
F%	P%	B%	M%	F%	P%	B%	M%	F%	P%	B%	M%
18	40	5	37	25	20	45	10	25	22	48	5

3.3.3.-TAMAÑO DE GRANO

Con el mismo equipo descrito en el subtema anterior, se midió el tamaño de grano, en la zona afectada por el calor y en el material base. Los promedios por región y por condición de las probetas se reportan en la tabla 12.

Tabla 12.- Promedio de tamaño de grano por zona y condición del material.

Condición	ZAC (μ m)	METAL BASE (μ m)
	150 X	750 X
AW	128.75	16.20
SR - 1	145.98	15.35
SR - 2	162.84	15.70
SR - 3	188.96	16.05
RECOCIDO	45.38	24.11
NORMALIZADO	27.8	26.31
TEMPLE Y REV.	43.99	13.22

3.4.-DIFRACTOGRAMAS

Se llevó a cabo un análisis por difracción de rayos " X " en la unión soldada, en y alrededor de la soldadura, a seis muestras: AW, SR - 1, SR - 2, SR - 3, normalizada y con temple y revenido, cada una con diferente condición de tratamiento térmico, obteniendo los difractogramas que se presentan en las figuras 54, 55, 56, 57, 58 y 59.

Figura 54.- Difractograma de la unión soldada, sin tratamiento térmico.

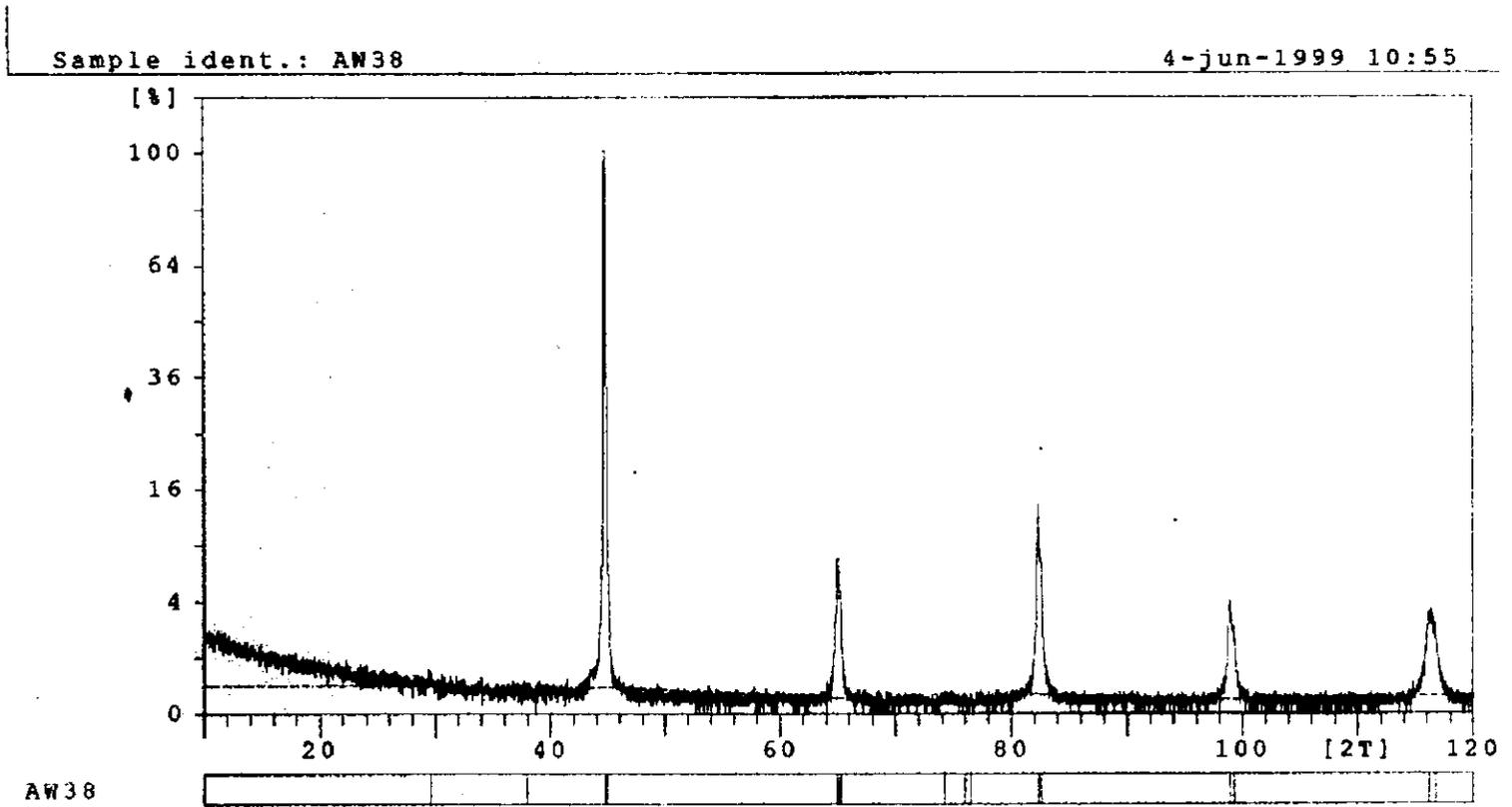


Figura 55.- Difractograma de la unión soldada, en la condición SR-1

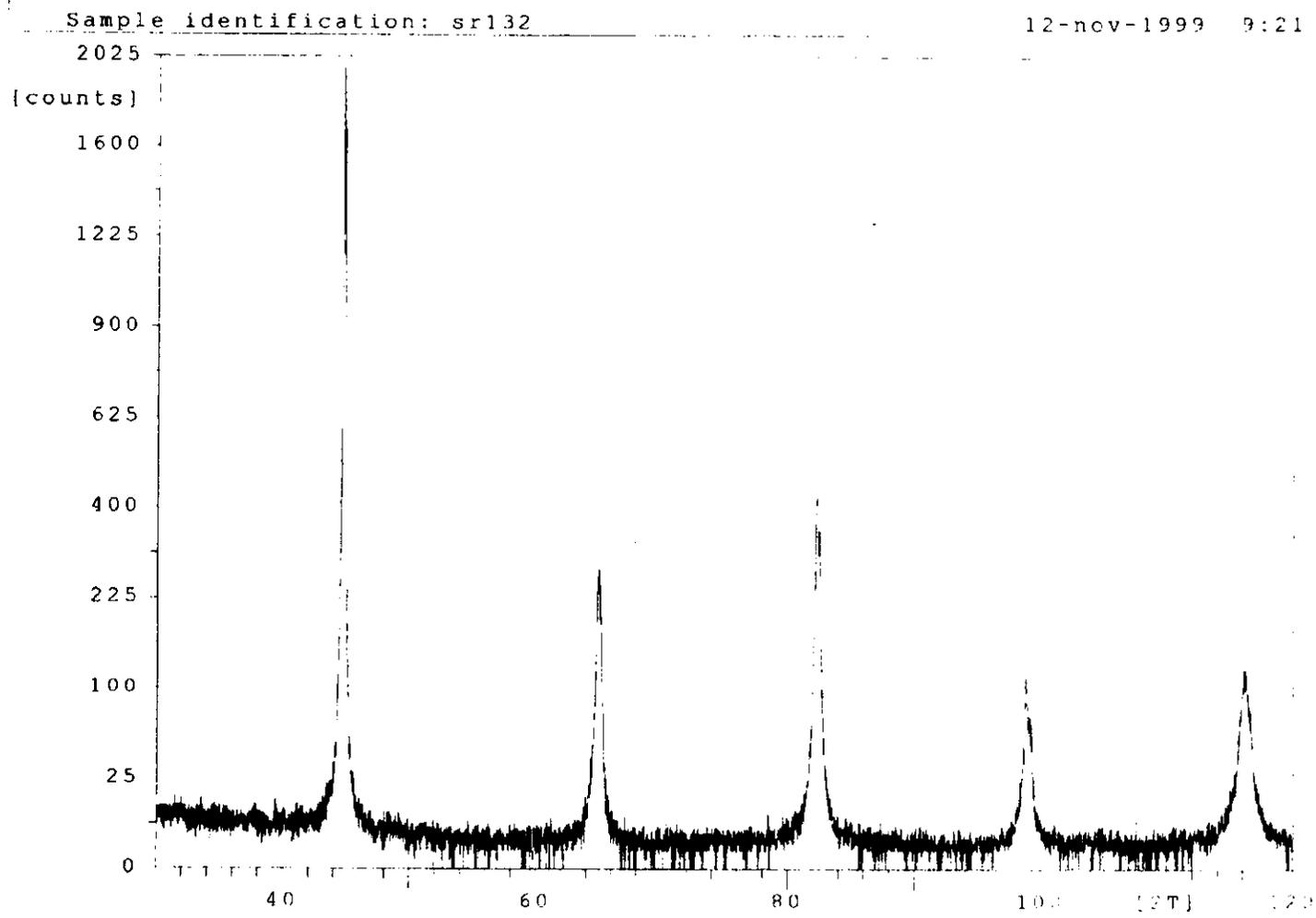


Figura 56.-Difractogramma de la unión soldada, en condición de SR-2

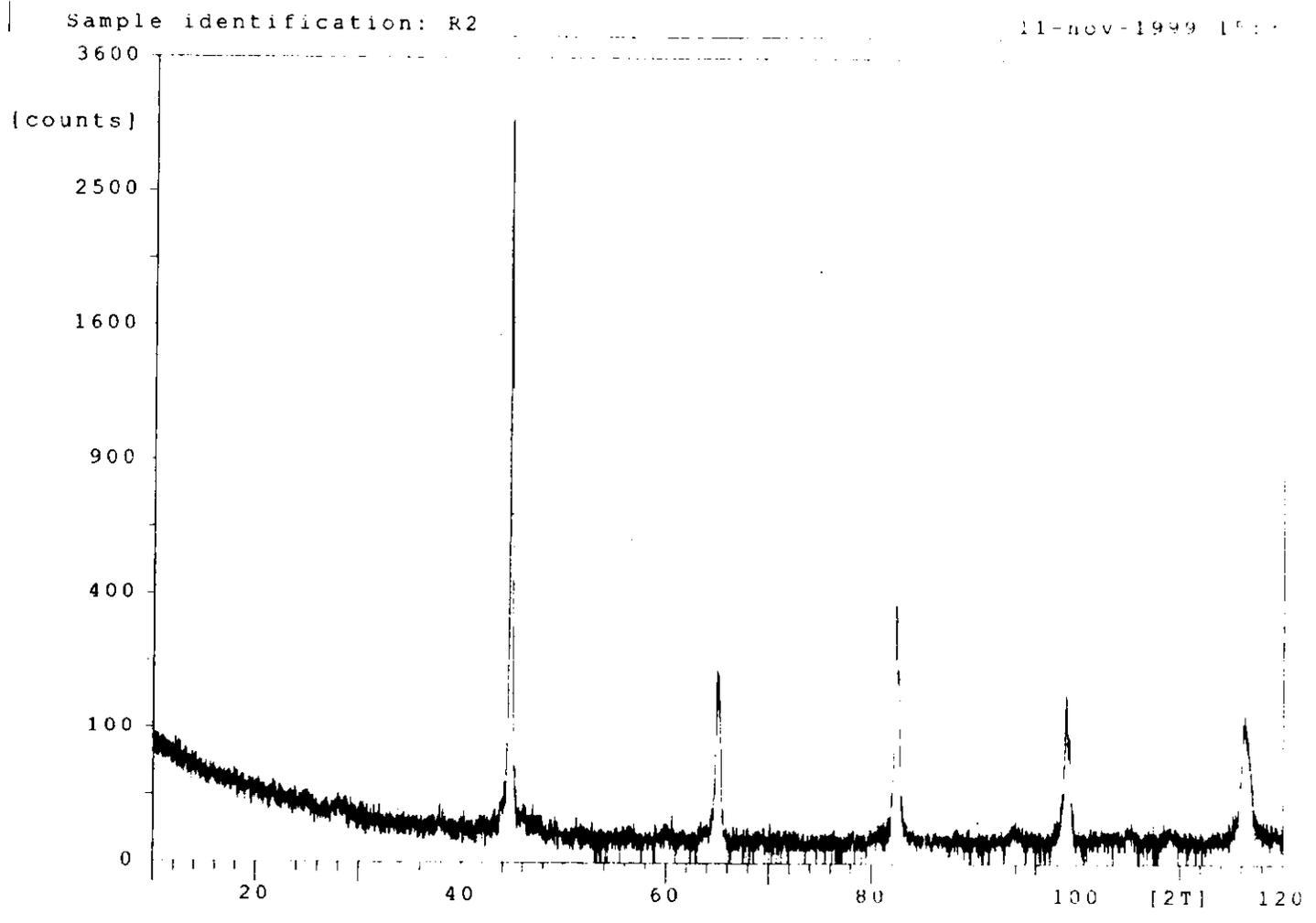


Figura 57.-Difractograma de la unión soldada, en condición de SR-3

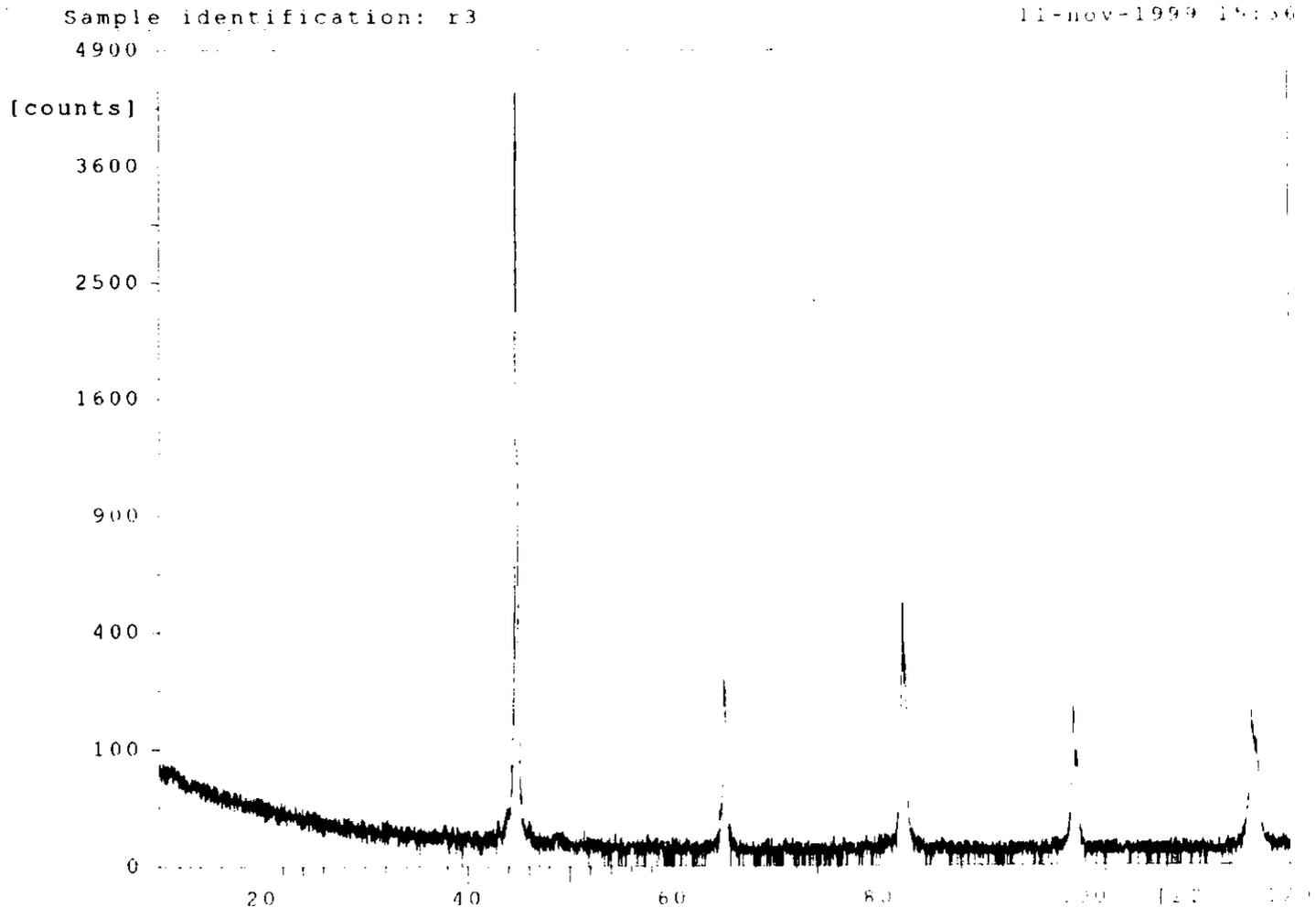


Figura 58.-Difractograma de la unión soldada con tratamiento térmico de normalizado.

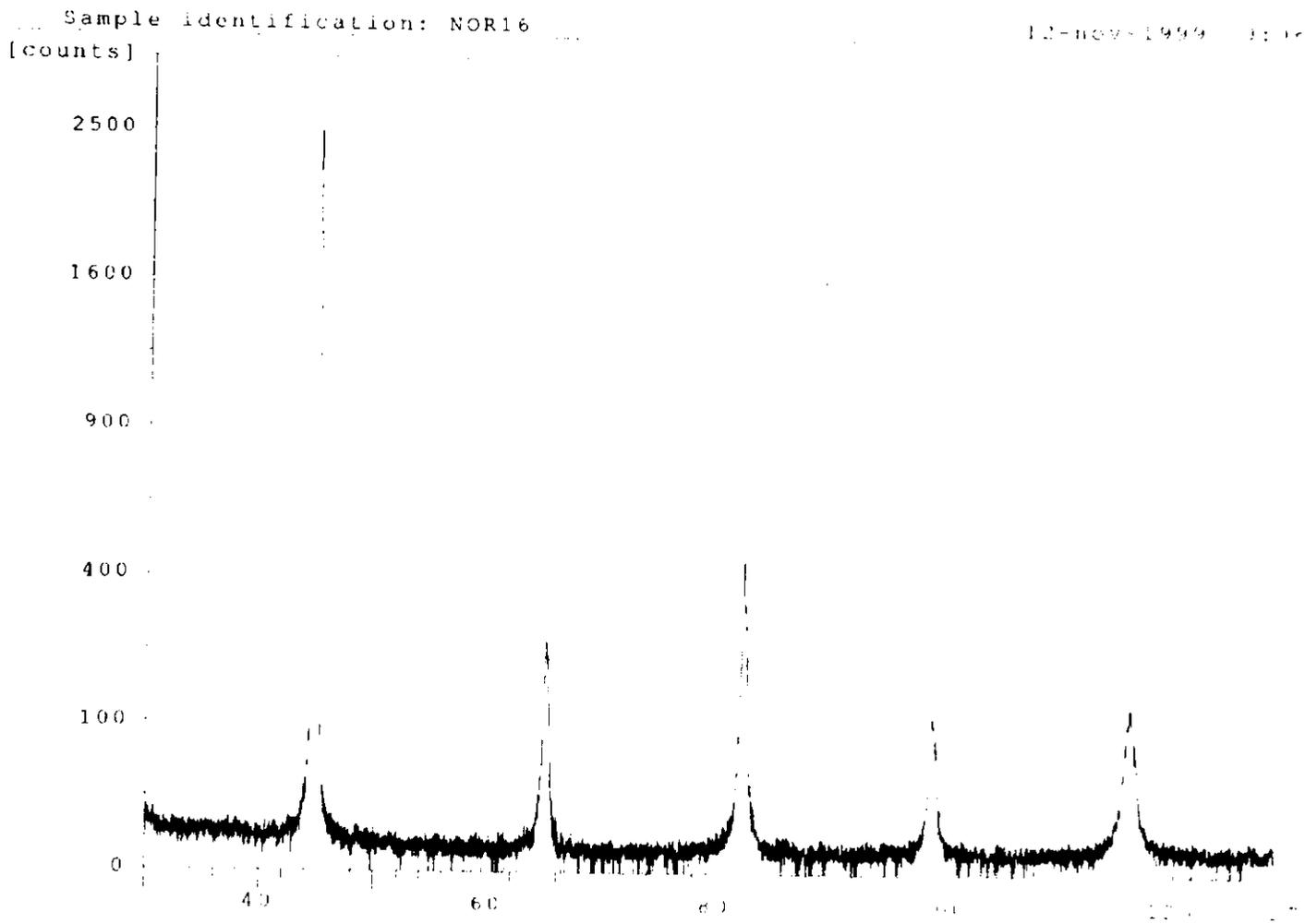
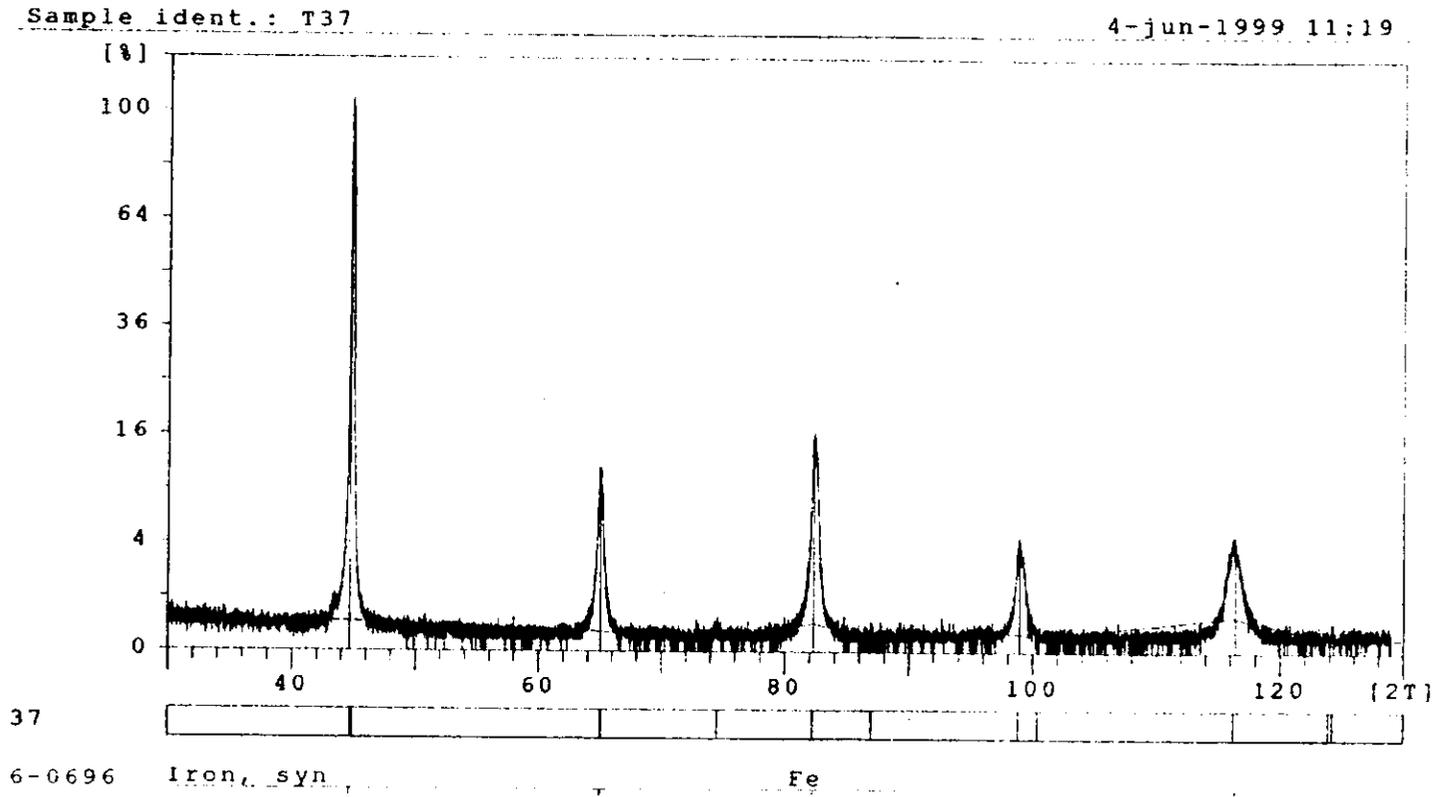


Figura 59.-Difractograma de la unión soldada, con temple y revenido



CAPITULO IV

ANALISIS DE LOS RESULTADOS

4.1.- PRUEBA DE DUREZA Y TENSION

En las mediciones de dureza Vickers, se pudo constatar que en las muestras de tal como fueron soldadas, presentan un mayor rango de valores y al contrario, en las muestras que recibieron el tratamiento térmico de normalizado, tienen una menor variación. Así mismo se incrementa dicha rango conforme se aumenta la temperatura en los diferentes relevados de esfuerzos.

En todas las muestras independientemente de la condición de las mismas, esto es ya sea tal como fueron soldadas o con algún tipo de tratamiento térmico, los picos de dureza más altos, se presentaron en la zona afectada por el calor, tal como lo muestra la figura 63.

Las propiedades mecánicas de la unión soldada, con los tratamiento térmicos planteados, en comparación con las muestras tal como fueron soldadas, se observa que conforme se incrementa la temperatura en los relevados de esfuerzos, **disminuye** : la dureza y la resistencia (ver figura No. 60), pero **aumenta**: la resistencia a la fluencia (en los dos primeros relevados SR – 1 Y SR – 2, ver la figura No. 61) , la tenacidad y en menor escala la ductilidad, representados por él % de elongación y él % de reducción de área. En la figura No. 62 se observa la variación de todas las variables antes mencionadas, en donde es notable la tendencia de crecimiento de la tenacidad.

Al comparar las propiedades mecánicas del tercer SR-3 con las muestras tal como fueron soldadas, se encontró lo siguiente: disminuye la microdureza HVN en un 9%; disminuye la resistencia a la fluencia y la resistencia en 5 % y 4.5 %

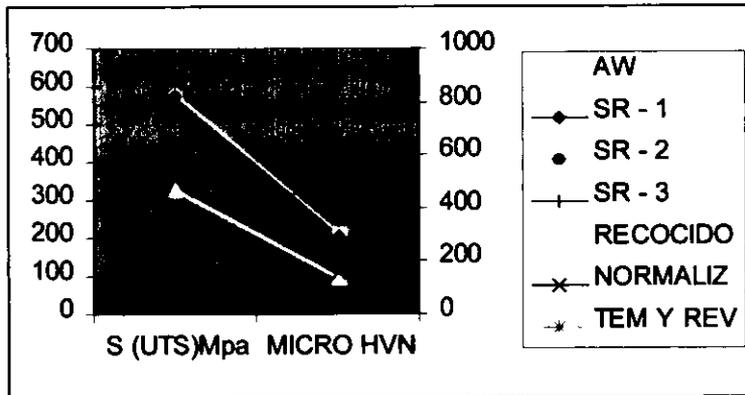


Figura 60.- Gráfica de correlación entre resistencia y microdureza HVN

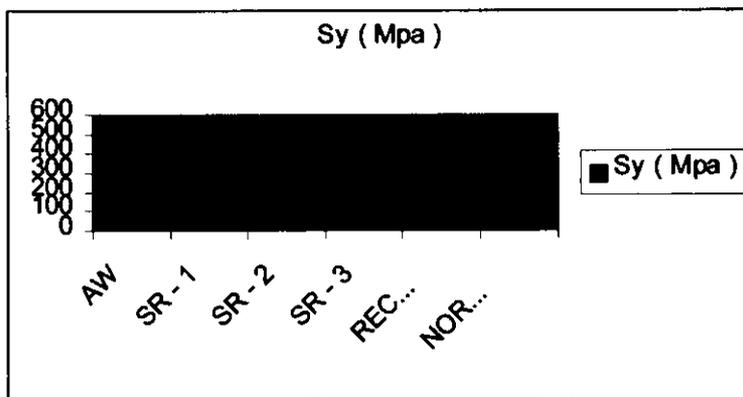


Figura 61.- Gráfica de la resistencia a la fluencia en todas las muestras.

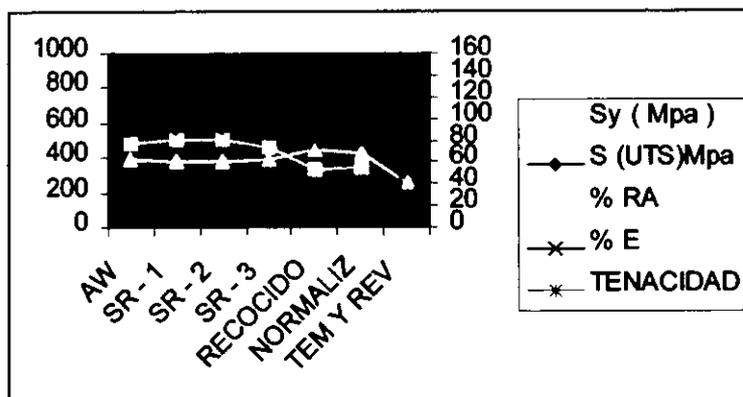


Figura 62.- Gráfica de variación de las propiedades mecánicas

respectivamente; por el contrario, aumenta las medidas de ductilidad: la elongación 5 % y la reducción de área 2 % ; y significativamente aumenta la tenacidad en un 25 %, tal como lo muestran las tres figuras anteriores.

En las muestras con tratamiento térmico de recocido y normalizado en comparación con las de tal como fueron soldadas, disminuye bastante la resistencia a la fluencia y la resistencia, pero también aumentan en la misma proporción las medidas de ductilidad y tenacidad. De manera contraria sucede con las muestras templadas y revenidas.

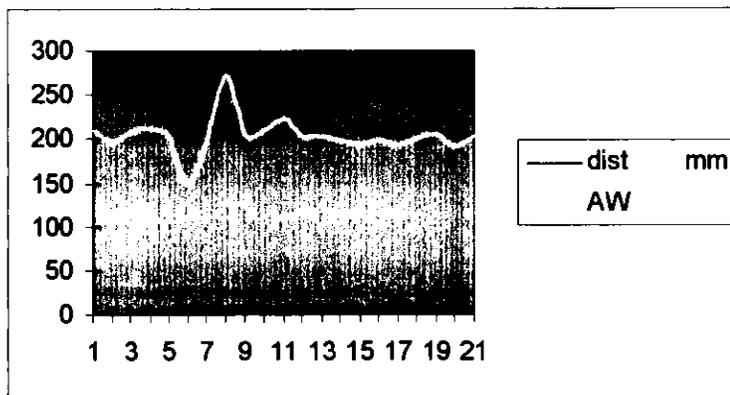


Figura 63.- Gráfica de variación de microdurezas HVN de las muestras tal como fueron soldadas.

En relación a la variación de la microdureza HVN, de las uniones tal como fueron soldadas (se observa en la figura 63) en comparación con las muestras, que se aplicaron relevado de esfuerzos y con las de recocido, normalizado y temple y revenido, se muestra en las figuras 64 y 65 respectivamente.

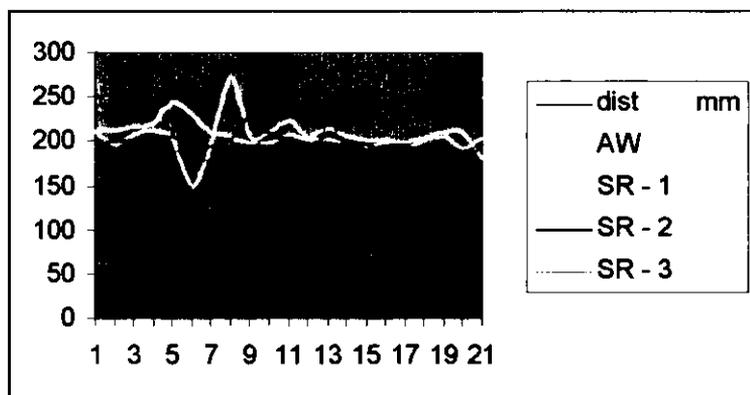


Figura 64.- Gráfica de variación de microdurezas.

Para la obtención de todos los datos de las figuras 63, 64, y 65 en las probetas de microdureza HVN, se trazó una línea central en el depósito de la soldadura perpendicular al eje longitudinal de la unión soldada y se tomaron las durezas hacia uno de los extremos, de tal manera, que las mediciones corresponden al depósito de soldadura, después a la ZAC, para concluir en el metal base. Repitiendo en otras dos direcciones paralelas al mencionado eje longitudinal.

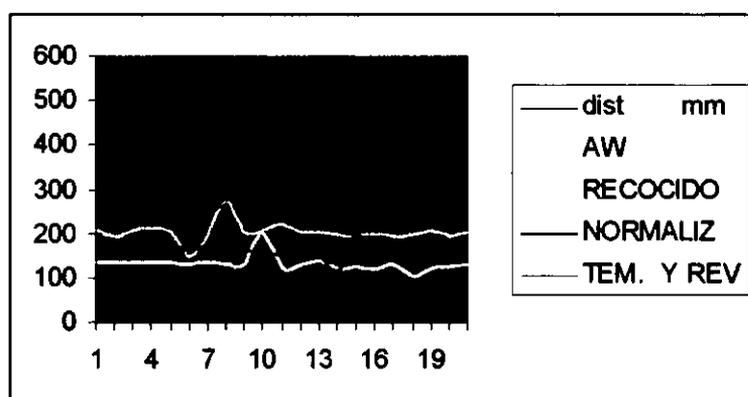


Figura 65.- Gráfica de variación de microdurezas HVN, de tal como fueron soldadas, con recocido, normalizadas y con temple y revenido.

En relación al ensayo de tracción, de la unión soldada, descrito en el subtema 2.5.1, donde se realizaron a temperatura ambiente, a cada grupo de probetas según el tratamiento térmico aplicado, se obtuvieron datos para dibujar los diagramas Esfuerzo – Deformación unitaria, también para cada condición de grupo de probetas. Es así como se presentan los diagramas correspondientes en las figuras 66,67,68 y 69, aclarando que en cada caso, se presenta en primer termino el diagrama convencional ó ingenieril y en segundo termino el diagrama real. Dichos gráficos se complementan con los resultados presentados en la tabla 8, de la pagina 36.

Se puede observar, que comparando las gráficas de los tres relevados de esfuerzos con la gráfica de tal como fueron soldadas, figuras 66 y 67, casi son los mismos diagramas, sin embargo es fácil observar que disminuye un poco la resistencia, pero que aumenta también en la misma proporción, la deformación, en los relevados de esfuerzos.

De la misma manera, si se comparan las gráficas S –e, de las probetas con tratamiento térmico de recocido y normalizado, contra las probetas tal como fueron soldadas, notamos, una gran diferencia en las variables de resistencia, resistencia a la fluencia y la deformación unitaria, ya que las dos primeras, bajan y la última variable sube en gran medida, tal como lo muestran las figuras, 66 y 68.

El diagrama S –e de la figura 69, es un gráfico típico de un material frágil, ya que cuenta con mucha resistencia y muy poca deformación. En la Figura 70 se presentan juntas las gráficas Esfuerzo-Deformación unitaria convencional y se puede apreciar fácilmente las diferencias antes mencionadas.

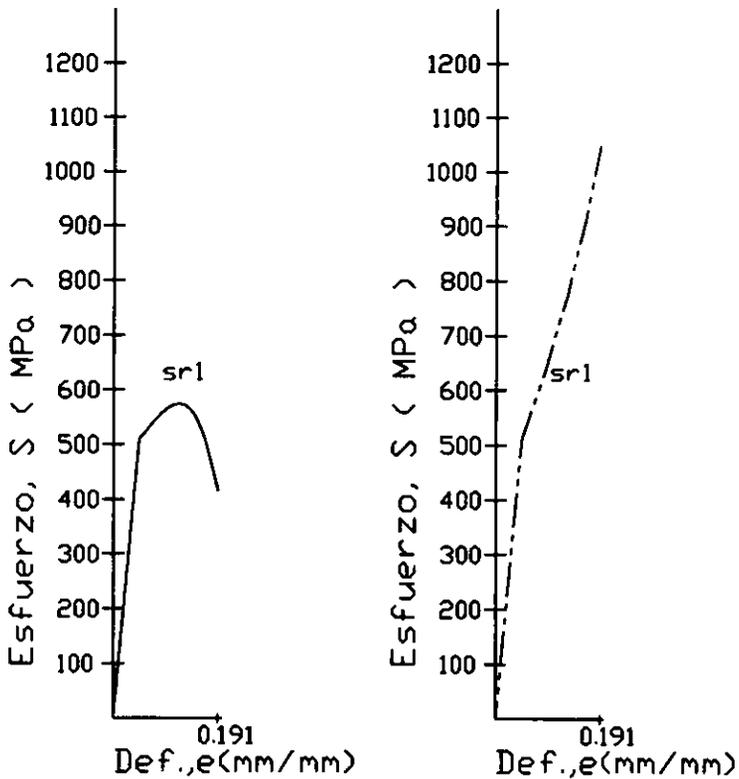
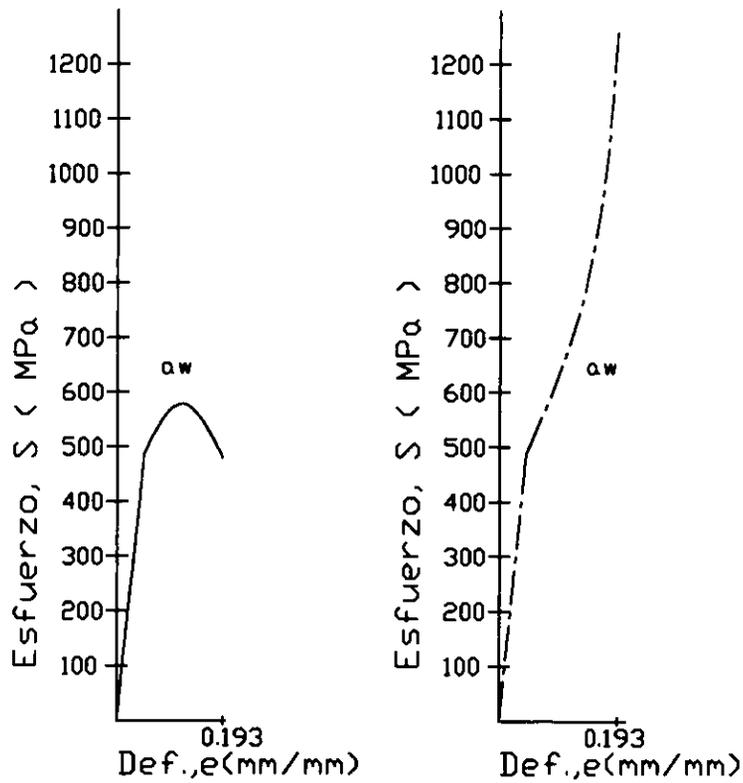


Figura 66.- Gráfica Esfuerzo - Deformación unitaria de la unión soldada; tal como fueron soldadas A) y B) y con el Relevado de esfuerzos -1 C) y D).

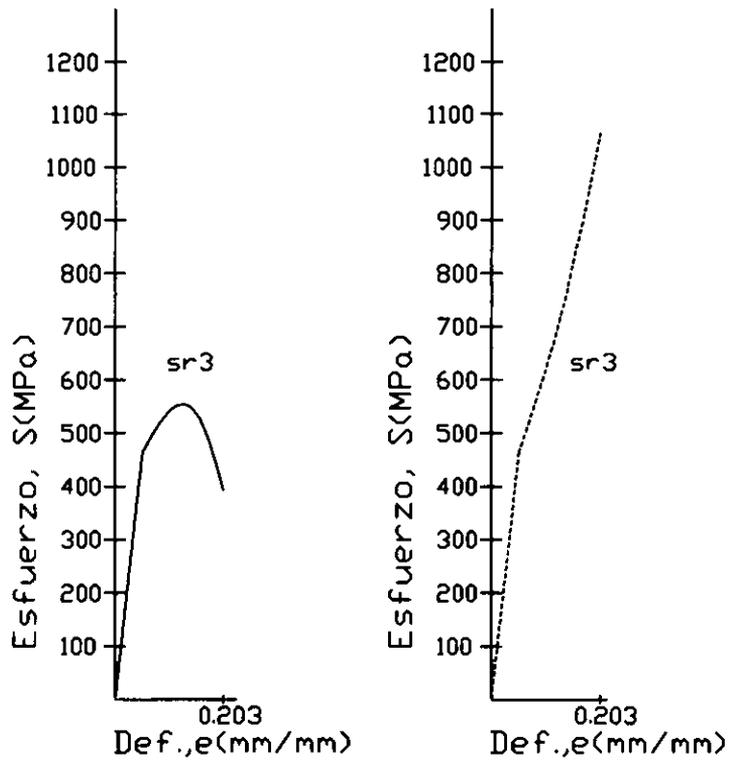
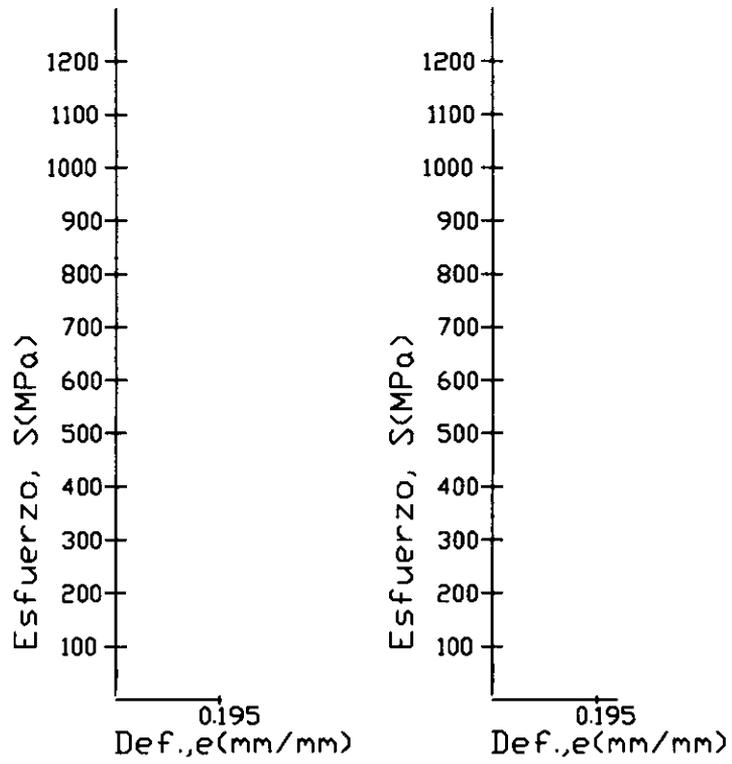


Figura 67.- Gráfica Esfuerzo - Deformación unitaria de la unión soldada; con relevado de esfuerzos-2 E) y F) y con relevado de esfuerzos-3 G) y H).

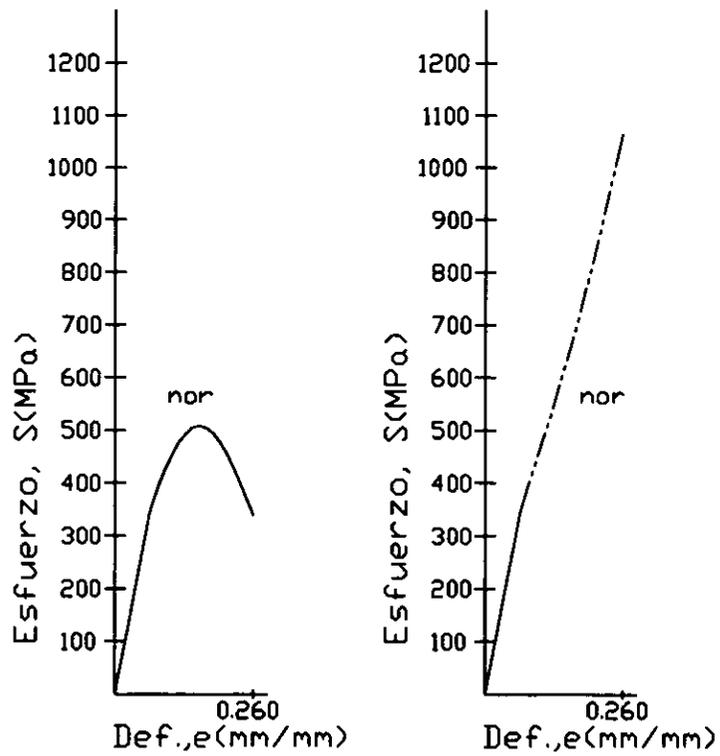
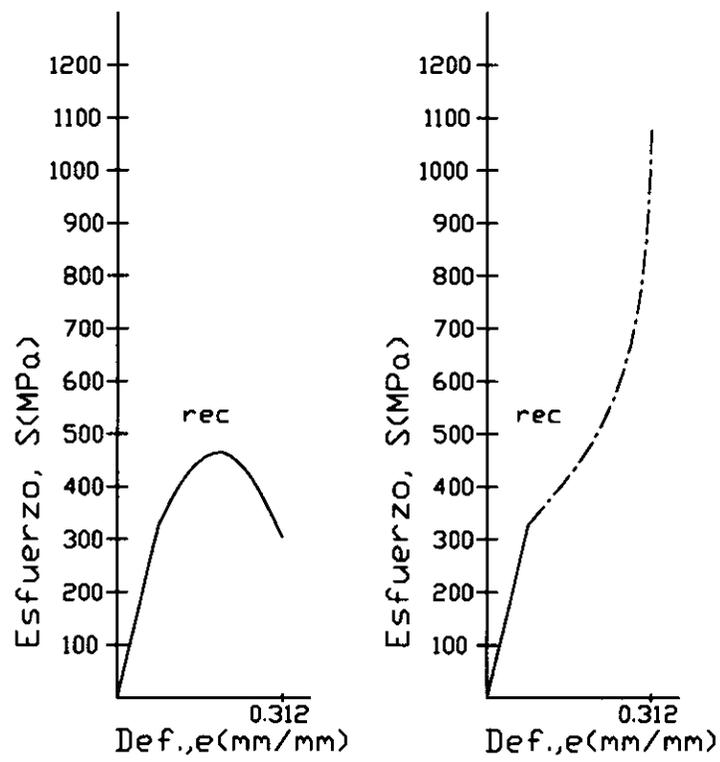


Figura 68.- Diagrama Esfuerzo - Deformación unitaria de la unión soldada; con recocido I) y J) y con normalizado K) y L)

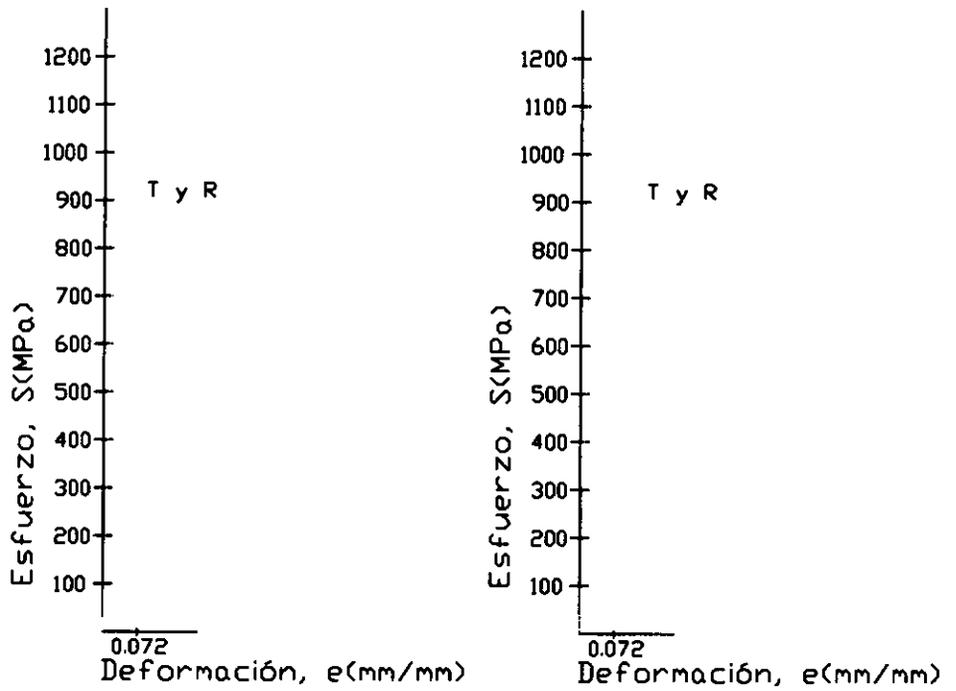


Figura 69.- Gráfica Esfuerzo - Deformación unitaria, de la unión soldada correspondiente a probetas que recibieron Temple y revenido M) y N).

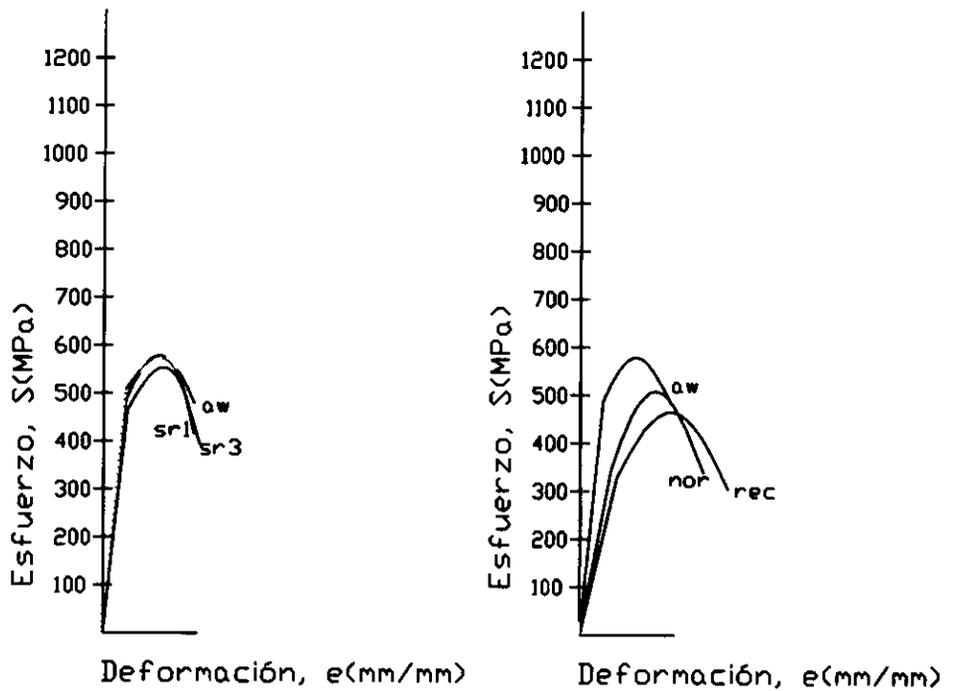


Figura 70.- Graficas Esfuerzo - Deformación unitaria, partiendo de un mismo vertice; en D) aw,sr1,sr2 y sr3; en P) aw,rec,nor y T y R.

4.2.- MICROESTRUCTURAS

Las microestructuras en la zona del material base, no sufrieron variación en los tres relevados de esfuerzos aplicados. Las bandas de perlita casi desaparecen en el recocido y en el normalizado, ya no se perciben.

La microestructura de tipo columnar en la zona del depósito de soldadura, está presente en los tres relevados de esfuerzos aplicados. En cambio en las muestras que recibieron como tratamiento térmico el normalizado, desapareció dicho tipo de microestructura.

Respecto al cambio de microestructura en las tres zonas de la unión soldada, la que presenta una distribución casi uniforme son las muestras normalizadas, es decir, las zonas del material base y el depósito de soldadura, son semejantes y únicamente presenta una ligera variación en la zona afectada térmicamente. En cambio en las muestras templadas y revenidas, la zona afectada térmicamente, presenta una microestructura muy diferente, respecto de las otras dos zonas, además con una desviación estándar más grande que las muestras tal como fueron soldadas.

Dentro de la zona afectada por el calor, en la región de la zona calentada o de refinamiento, en los tres relevados de esfuerzos todavía se conserva la típica estructura del material base (rolado en caliente) con las bandas de perlita y ferrita, en cambio en las muestras recocidas y normalizadas, se transformó a una microestructura donde la ferrita es del tipo poligonal.

La cantidad de perlita en las tres zonas de la unión soldada, regularmente es mayor en las muestras tal como fueron soldadas, en comparación con las muestras que recibieron tratamiento térmico, excepto las templadas y revenidas.

Respecto de las muestras tal como fueron soldadas, el tamaño de grano disminuye, conforme se le aplican los tratamientos térmicos de : relevado de esfuerzos, recocido y normalizado, y precisamente en este último presenta un tamaño de grano entre las zonas del metal base y afectada por el calor , muy semejantes.

La zona afectada por el calor y el metal base, presentan perlita y ferrita equiaxiada gruesa y fina, aclarando que en la primer zona antes mencionada, es posible la formación de martensita y/o bainita.

De lo anterior se concluye que las características microestructurales son las causantes de las diferentes propiedades mecánicas.

4.3.- DIFRACCION DE RAYOS " X"

Analizando los difractogramas realizados en las diferentes condiciones de las muestras, tal como muestran las figuras Nos. 54 –58, se observan que todos son iguales, es decir los picos corresponden exactamente en las gráficas, con los ángulos de difracción 2θ de: 44.6° (110), 64.9° (200), 98.8° (220), 82.38° (211) y 116.3° (310), correspondientes a la ferrita, y en la figura No. 59, la única diferencia es que están empalmados a un ángulo de difracción de 82° , correspondientes a martensita y ferrita (ver tabla 13).

De lo anteriormente expuesto, se puede esperar que en las muestras, tal como fueron soldadas y con relevado de esfuerzos, exista martensita en pequeña cantidad, pero en los difractogramas respectivos está empalmada con la ferrita en el mismo ángulo de difracción.

Tabla 13.- Resumen de los difractogramas.

No. de pico	2θ	Plano de difracción.	Distancia interplanar	Fases
1	44.7°	(110)	2.026Å	Ferrita
2	65.06°	(200)	1.400Å	Ferrita
3	82.38°	(211)	1.17Å	Ferrita &
4	99.02°	(220)	1.013Å	Ferrita
5	116.48°	(310)	0.090Å	Ferrita

& Para el caso de las muestras, aproximadamente a 82° también difracta la "martensita", por lo consiguiente en las probetas con temple y revenido, es muy probable que contenga dicha fase.

CAPITULO V
CONCLUSIONES

5.1.- CONCLUSIONES

Después del trabajo experimental realizado (soldar placas, aplicación de tratamiento térmico, prueba de tensión, medidas de dureza, metalografía y difracción de rayos "x") se puede establecer las siguientes conclusiones:

1.-Para el caso de obtener resultados significativos en los diferentes relevados de esfuerzos, en comparación, con las muestras de tal como fueron soldadas, es confiable aplicar dicho tipo de tratamiento utilizando una temperatura de 625°C, ya que disminuye muy poco: dureza, resistencia y resistencia a la fluencia; aumenta también un poco la ductilidad, pero incrementa notablemente la tenacidad. Aclarando que para un proceso considerable de piezas y si únicamente se requiere aumentar un poco la tenacidad de la unión soldada, se puede aplicar el relevado de esfuerzos – 1 con una temperatura de 300°C, ya que es económico, por la poca cantidad de energía utilizada en el calentamiento.

2. - El tratamiento térmico de temple, no debe aplicarse en las uniones soldadas, ya que provoca una disminución considerable en las variables de ductilidad y tenacidad, resultando una soldadura, desconfiable en el servicio o en el momento de soportar cargas y esfuerzos repentinos.

3.- Es pertinente aplicar el tratamiento térmico de normalizado, a equipos, aparatos o estructuras, en donde el proceso de fabricación principal sea la soldadura

por arco sumergido y el requerimiento de seguridad sea mayor, ya que la probabilidad de falla disminuye con este tratamiento.

4.- El recocido, por otro lado, genera cambios considerables en las tres zonas de la unión soldada en cuanto a microestructura y por consiguiente en las propiedades mecánicas, que son las mas bajas en resistencia y dureza, en los tratamientos térmicos planteados en el presente trabajo.

5.- La alta tenacidad obtenida en las muestras con recocido o normalizado es debido a la presencia de ferrita poligonal en las zonas de la unión soldada.

6.- Sí el propósito es liberar los esfuerzos internos generados al soldar, se debe únicamente aplicar el relevado de esfuerzos, a una temperatura por debajo de los 500°C.

7.- Aunque el material utilizado es de baja aleación, presentó, en la zona afectada térmicamente y en la soldadura, estructuras duras como la martensita y bainita.

8.- Con los tratamientos térmicos de relevado de esfuerzos, recocido y normalizado, se logró disminuir ese pico de dureza tan grande presentado en el tipo de probetas tal como fueron soldadas.

9.- En el análisis de los difractogramas se encontró en su gran mayoría ferrita, para toda condición de las probetas, incluyendo temple y revenido, y no se logro definir claramente la presencia de martensita ya que probablemente los picos de ambas fases están encimados a un ángulo de difracción de 82° .

5.2.- RECOMENDACIONES

1.- Si el propósito para un conjunto soldado es únicamente la relajación interna de los esfuerzos, sin cambios significativos en la microestructura y por consiguiente en las principales propiedades mecánicas, aplicar el tratamiento de relevado de esfuerzos.

2.- Explorar con diferentes ciclos de tratamientos térmicos para las uniones soldadas, como el siguiente : primero aplicar un recocido de recristalización y luego un normalizado.

3.- Experimentar con temperaturas en los relevados de esfuerzos dentro de un rango de 500°C a 670°C , ya que la utilizada en el SR – 3, esta dentro de dicho rango y fue donde se encontraron variaciones específicas en las principales propiedades mecánicas.

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

ANEXO 1.- MEDICIÓN DEL TAMAÑO DE GRANO

Para llevar a cabo la medición en el tamaño de grano, en el analizador de imágenes descrito en el subtema 2.6, en las figuras siguientes se muestran como se llevó a cabo.

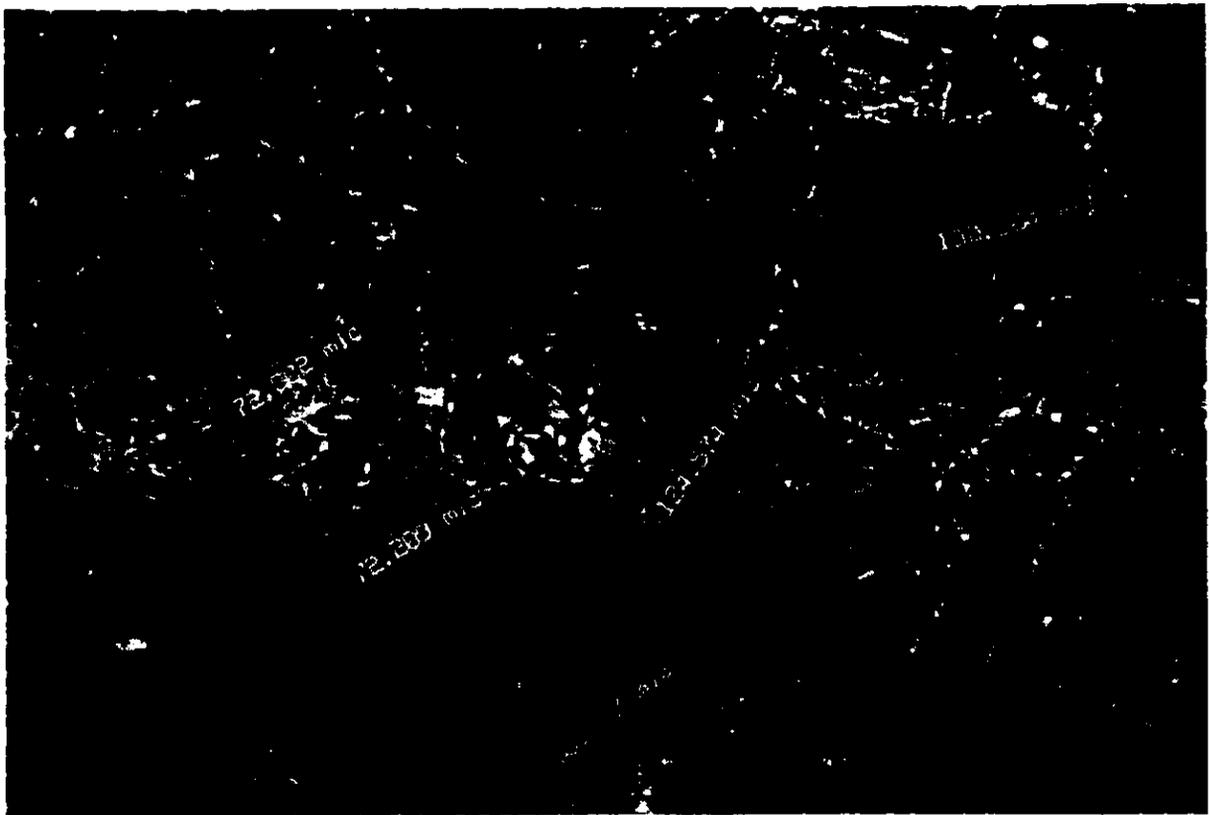


Figura 71.- Tamaños de grano de una muestra en la ZAC en la condición de tal como fue soldado.

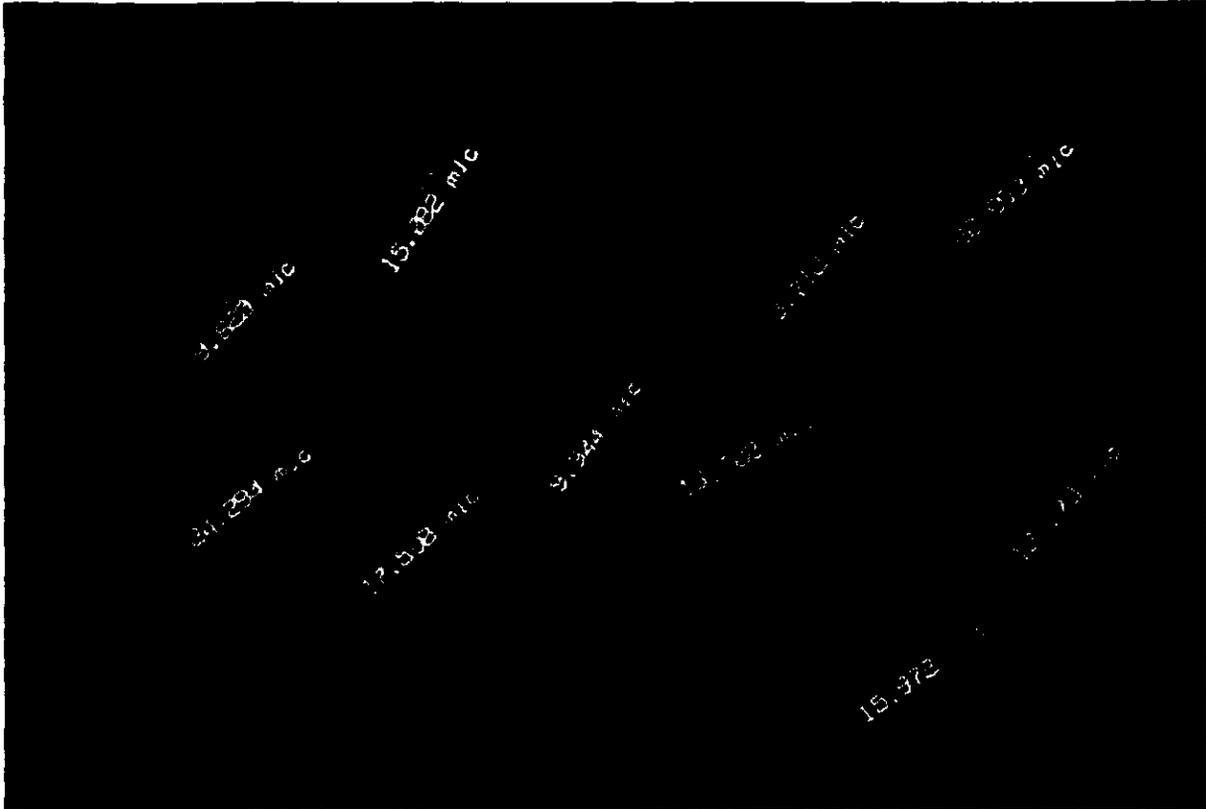


Figura 72.- Tamaños de grano en el metal base, en la condición de tal como fue soldado.

El procedimiento para obtener el tamaño de grano de una zona es el siguiente:

- 1.- Para una región de la zona que se observa en pantalla del analizador de imágenes (tal como se muestra en las figuras 71 y 72), se mide con el puntero del mouse varios granos de manera aleatoria. Es decir no se eligen o seleccionan los granos a medir, por un lado y por otro, tampoco se mide del lado más largo del grano.
- 2.- Se anotan todas las mediciones seleccionadas anteriormente.

3.- Se cambia de región (mínimo 8) en el microscopio cuidando que pertenezca a la misma zona y se repiten los pasos 1 y 2 descritos anteriormente.

4.- Se obtiene la media, la desviación estándar y demás parámetros estadísticos que se requieran.

Es necesario aclarar que el método descrito anteriormente, es aproximado, como todos los existentes.

ANEXO 2.- MICRODUREZA VICKERS

Con una carga de 200 gramos, se obtuvieron durezas, aproximadamente 90 indentaciones por probeta, a partir del centro de la soldadura hacia uno de los extremos hasta llegar al material base, pasando obviamente por la zona afectada térmicamente y en tres líneas paralelas al eje longitudinal de la probeta. Para tal efecto se utilizó un microdurómetro de marca : microhardness tester BUEHLER – LTD, modelo : M – II y número de serie : 551268. En la tabla 14 aparecen los resultados de la microdureza promedio, por estado o tratamiento térmico de las probetas así como por la zona de la unión soldada, además como el rango y la desviación típica o estándar, por tratamiento.

TIPO	MICRODUREZA HVN		RANGO	DESVIACIÓN TÍPICA
	PROM/ZONA	PROM.TOT.		
AW	ZAC=223 SOLD=216 MB =186	208.33	274 - 148 = 126	20.68
SR - 1	ZAC =209.07 SOLD=212.76 MB =197.61	206.5	243 - 181 = 62	17.41
SR - 2	ZAC =206 SOLD=204 MB =184	198	228 - 170 = 58	16.21
SR - 3	ZAC =199.8 SOLD=185.9 MB =184.3	190	222 - 164 = 58	14
RECOCIDO	ZAC =137.25 SOLD=136.11 MB =123.63	132.33	201 - 103 = 98	15.84
NORMALIZADO	ZAC =162.6 SOLD=157.9 MB =157.82	159.44	192 - 114 = 78	11.28
TEMPLE REV.	ZAC =432.28 SOLD=380.89 MB =424	412.39	483 - 327 = 156	39.03

Tabla 14.- Microdureza HVN con carga de 200 gramos.

BIBLIOGRAFIA

- 1.- American Welding Society ; Welding Handbook Vol. 1 – 5.
- 2.- American Welding Society ; INTRODUCTORY WELDING METALLURGY
- 3.- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS ; Metals – Physical, Mechanical, Nondestructive, metallography, Fatigue, Effect of temperature. 1990
- 4.- HANS STUDEMANN ; Tratamientos Térmicos de los aceros ; Urmo Ed.
- 5.- American Welding Society ; Structural Welding Code D1 – I – 94
- 6.- American Society for Metals ; Atlas of Isothermal Transformation and Cooling Transformation Diagrams ; ASM
- 7.- F. Martínez y J. Gordon ; Teoría y Tecnología del Tratamiento Térmico ; Ed. Pueblo y Educación. 1990
- 8.- American Society for Metals ; Metallography, Structures and phase diagrams ; METALS HANDBOOK, Eighth Edition
- 9.- Wanke y Schramm ; Manual para el tratamiento térmico de las aleaciones de hierro
- 10.- William D. Callister, Jr. ; Materials Science and Engineering ; John Wiley and Sons. Inc. 1990
- 11.- J. Pascual ; Tratamiento Térmico de los metales ferreos ; Ed. Blume
- 12.- James F. Shackelford ; Materials Science for Engineers ; Macmillan Publishing Company ; 3^o Ed. 1992
- 13.- Brick, Pense, and Gordon ; Structure and Properties of Engineering Materials ; Fourth Edition ; Mc Graw Hill

- 14.- Jesseman, R. J.,and Schmid, G. C. 1983 ; Submerged arc welding a low – carbon cooper – strengthened alloy steel ; Welding Journal ; 62(11) : 321 – s to 330 – s
- 15.- Smith, N. J.,McGrath, J. T., Gianetto, J. A., and Orr, R.F. ; Relationships of Submerged Arc Welds in HSLA 80 Steel ; Welding Journal ; (3) 112-s to 120-s.
- 16.- L.F. Mondolfo y Ottozmeskal ; Engineering Metallurgy ; Mc Graw Hill
- 17.- D. R. Askeland ; The Science and Engineering of materials ; PWS Engineering
- 18.- Code ASME: Sección 1, section III, section VIII y section IX; ASME 1992
- 19.- A. C. Davies ; The science and practice of welding ; Cambridge University Press. 7^o Ed.
- 20.- D.K. Bullens ; Steel and It is heat treatment ; Vol. 1 Principles John Wiley and Sons ; 5th Ed.1962