



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN  
INGENIERÍA**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
CUAUTITLAN**

**“ EFECTO DE DIFERENTES PROCEDIMIENTOS DE  
SOLDADURA EN LA ZONA AFECTADA POR EL CALOR,  
EN UN ACERO INOXIDABLE MARTENSÍTICO CA-15 ”**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:**

**MAESTRO EN INGENIERÍA**

**METAL - MECÁNICA**

**PRESENTA:**

**ING. NOÉ ALBERTO CORTÉS GUERRERO**

**TUTOR:**

**DR. ENRIQUE CURIEL REYNA**

**CUAUTITLÁN IZCALLI, EDO. DE MEX.**

**2010**



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.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a **“ DIOS ”** por brindarme la oportunidad de vivir y por permitirme desarrollar mis capacidades con plena libertad para descubrir su magnifico regalo, la “VIDA”. Vía por la que me ha dado muchas satisfacciones hasta hoy sin dudar de las que habrán de venir por su bendición y generosidad en el mañana.

A la **“FES-Cuautitlán”** que desde el año 1991 me recibió con las puertas abiertas y quien por su virtud e ideales me formó en gente de bien para contribuir al desarrollo y fortalecimiento de una sociedad con educación y dignidad, luego de haber sembrando en Mí aquellas palabras que por lema lleva nuestra muy querida Universidad Nacional Autónoma de México.

### **“POR MI RAZA HABLARÀ EL ESPÍRITU”**

A los **Directores y Profesores** de la FES-C quienes contribuyeron de manera directa con su dedicación y esfuerzo al desarrollo de mi formación profesional, misma que me ha permitido vivir y proyectar un desarrollo humano digno.

## DEDICATORIAS

Dedico el presente trabajo a mi esposa “**MARISOL MENDOZA**” e hijos, “**NOE ALBERTO Y DAVID LEONEL**”, quienes han sido el motivo de mi esfuerzo por concluir esta parte importante de mi formación profesional y por colaborar con su apoyo moral justo en esos momentos donde tan solo una sonrisa, un abrazo, un beso resultan tan eficaces para contrarrestar cualquier desánimo.

A mi Madre “**María Cristina Guerrero**”, a quien le agradezco el ejemplo de su gran trabajo y esfuerzo siempre constante por seguir adelante.

A mi Suegra “**Juana Rodríguez**” por su apoyo y sincera confianza siempre incondicional.

A mis, **Hermanos, Cuñados, Sobrinos y Amigos (as)**. Que de alguna manera me han brindado su valiosa amistad, cariño y apoyo en todo momento en que lo he necesitado.

## RECONOCIMIENTOS

**A:**

***DR. Enrique Curiel Reina:*** por la valiosa asesoría y dirección siempre disponibles para el desarrollo del presente trabajo de investigación.

***C.D.R. Tomás Rangel Ortíz:*** por la asesoría en la preparación de probetas para análisis metalográfico y realización de ensayos de dureza.

***M. EN C. Juan José García Ruíz:*** por las asesorías brindadas en materia de Software para la manipulación de la información del presente trabajo.

***ING. Pérez Hernández Guillermo:*** Por el apoyo recibido en materia de hardware y soporte técnico que fueron necesario para el desarrollo del presente trabajo.

# INDICE

PAG

## PROLOGO

## TEMA DE TESIS, OBJETIVO, HIPOTESIS,

## CAPITULO I: GENERALIDADES

I.1.- CLASIFICACIÓN DE LOS ACEROS INOXIDABLES.	1
I.2.- EFECTO DEL CROMO EN ACEROS INOXIDABLES MARTENSITICOS.	4
I.3.- SOLDADURA DE ACEROS INOXIDABLES MARTENSÍTICOS.	9

## CAPITULO II: PROCEDIMIENTOS DE LA INVESTIGACIÓN

II.1.- DESCRIPCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.	12
II.2.- PROCESOS DE SOLDADURA A REALIZAR	15

## CAPITULO III: DESARROLLO EXPERIMENTAL

III.1.- CORTE DE MATERIALES Y PREPARACIÓN DE MUESTRAS	21
---	----

## CAPÍTULO IV: RESULTADOS OBTENIDOS.

IV.1.- ENSAYOS DE TENSIÓN	31
IV.2.- ENSAYOS DE DUREZA	43
IV.3.- ANÁLISIS METALOGRAFÍCO	45

## CAPITULO V: DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

V.1.- TENSIÓN	54
V.2.- DUREZA	56
V.3.- METALOGRAFÍA	58

## CONCLUSIONES.

## BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

## PROLOGO

Los aceros inoxidables martensíticos han sido diseñados para obtener productos con alta resistencia mecánica. Con objeto de obtener esta resistencia se deberá someter a estos aceros a un tratamiento térmico posterior a la soldadura. Dicho tratamiento consiste en calentar el material a una temperatura lo suficientemente alta hasta que logre formarse una estructura totalmente austenítica. Se deberá tener especial cuidado en la forma de enfriar los materiales pues podrían presentarse ondulaciones, distorsiones, grietas, que se presentan por efecto de templado. Estos defectos se pueden minimizar si se lleva acabo un minucioso cuidado sobre el enfriamiento de la zona afectada por el calor (ZAC) con la finalidad de poder aprovechar adecuadamente las características mecánicas del material.

En la presente investigación se detalla un desarrollo experimental que consta en la elaboración de 4 procedimientos de soldadura por arco eléctrico sobre el acero martensítico tipo CA -15 y material de aporte (electrodo revestido) de la misma aleación, para evitar las grietas, las cuales este acero es propenso ha presentarla en la ZAC, en estos procedimientos se incluyen precalentamiento y tratamiento térmico posterior a la aplicación de la soldadura.

## **TEMA DE INVESTIGACIÓN:**

Efecto de diferentes procedimientos de soldadura en la zona afectada por el calor, en un acero inoxidable martensítico CA-15.

## **OBJETIVO:**

Caracterizar las propiedades mecánicas de resistencia a la tensión, dureza, y estructura del un acero CA-15 con diferentes procedimiento de soldadura por arco eléctrico con corriente continua y electrodo revestido.

## **HIPÓTESIS:**

Siendo el acero CA-15 un acero inoxidable Martensítico con alta respuesta térmica, esperamos que sus propiedades mecánicas y estructurales en la zona afectada por el calor sufran variaciones.



# CAPÍTULO I

**“ GENERALIDADES ”**

## **I.1.- CLASIFICACIÓN DE LOS ACEROS INOXIDABLES.**

Los aceros inoxidable básicamente, se pueden distinguir en tres tipos de acuerdo a la naturaleza física y composición química de las fases que tiene su estructura a diferentes temperaturas. Estos tres grupos de aceros se describen considerando principalmente a los elementos Hierro, Cromo y Níquel. De donde resulta que dos tipos de acero se relacionan con el sistema Hierro-Cromo, mientras que el tercer tipo se relaciona con el sistema Hierro-Cromo-Níquel; siendo estos los martensíticos, ferríticos y los austeníticos respectivamente.

Los Aceros Inoxidables son una gama de aleaciones que contienen un mínimo de 11% de Cromo. El Cromo forma en la superficie del acero una película pasivante, extremadamente delgada, continua y estable. Esta película deja la superficie inerte a las reacciones químicas. Esta es la característica principal de resistencia a la corrosión de los aceros inoxidables.

La selección de los aceros inoxidables puede realizarse de acuerdo con sus características:

- Resistencia a la corrosión y oxidación a temperaturas elevadas.
- Propiedades mecánicas.
- Características de los procesos de transformación a que será sometido.
- Costo total (reposición y mantenimiento).
- Disponibilidad del acero.

Los aceros inoxidable tienen una resistencia a la corrosión natural que se forma automáticamente, es decir no se adiciona. Tienen una gran resistencia mecánica, por lo menos dos veces la del acero al carbono, son resistentes a temperaturas elevadas y a temperaturas criogénicas. Son fáciles de transformar en gran variedad de productos y tiene una apariencia estética, que puede variarse sometiendo el acero a diferentes tratamientos superficiales para obtener acabado a espejo, satinado, coloreado, texturizado, etc.

En particular y para nuestra investigación analizaremos el CA-15 y su equivalente en composiciones el acero 410 ambos son aceros inoxidable martensíticos

Estos aceros son la primera rama de los aceros inoxidable, llamados simplemente al Cromo y fueron los primeros desarrollados industrialmente (aplicados en cuchillería). Tienen un contenido de Carbono relativamente alto de 0.2 a 1.2% y Cromo de 12 a 18%. Los tipos más comunes son el AISI 410, 420 y 431 Las propiedades básicas son: Elevada dureza (se puede incrementar por tratamiento térmico) y gran facilidad de maquinado, resistencia a la corrosión moderada. Principales aplicaciones: Ejes, flechas, instrumental quirúrgico y cuchillería.

## **Aceros inoxidables colados y forjados:**

Existen aceros inoxidables fabricados por fundición (colados) y conformados por forja o rolados siendo manejados por diferentes normativas

Los aceros forjados son normados por la AISI (American Iron and Steel Institute) quienes denominan a los aceros martensíticos por la serie 400 (para nuestro estudio el equivalente sería el 410)

La ACI (Alloy Casting Institut) norma la nomenclatura de los aceros inoxidables obtenidos por fundición ó colada siendo los C y H los que corresponden a los martensíticos, siendo “C” los que resisten la corrosión a temperaturas por debajo de los 650 °C, mientras que los H están por arriba de los 650 °C.

Para nuestro estudio trataremos con el acero obtenido por colada según la **ACI CA-15 (CA .15M 12Cr. 0.1C)** que corresponde a un acero inoxidable tipo martensítico, Fe, <0.15% C, 11.5-13.5% Cr, >0.75% Ni, <1.0% Mn, <1.0% Si, <0.04% P, <0.03% S.

## **I.2.- EL EFECTO DEL CROMO EN LOS ACEROS INOXIDABLES MARTENSITICOS.**

En el diagrama no.1 de equilibrio de las aleaciones fierro–Cromo. En la zona del diagrama que corresponde al estado sólido puede observarse tres regiones.

1.- Una porción limitada por una línea curva, a la que se conoce como Zona de Gamma, y en la cual la fase austenítica es estable con una estructura cristalina cúbica centrada en las caras.

2.- Una porción situada fuera del área curva que abarca la zona de gamma, en donde la fase ferrítica (que solidifica con una estructura cristalina cúbica centrada en el cuerpo) es estable desde la temperatura ambiente hasta el punto de fusión de estas aleaciones. A la Ferrita se le conoce también como fase alfa o fase delta. Se llama Ferrita delta a la que se forma directamente pos solidificación; y se denomina Ferrita alfa a la que se forma por la transformación de la Austenita durante el enfriamiento.

3.- El área ubicada entre las dos regiones, es donde la Ferrita y la Austenita pueden coexistir. Las proporciones respectivas de cada fase dependen de los diagramas de equilibrio las cuales no se tratarán aquí.

El diagrama no.1 de fases Hierro-Cromo se puede observar que un incremento en el contenido de Cromo da por resultado un decremento en el rango de temperatura sobre el cual la Austenita es estable. Solo hasta que el contenido de Cromo es de, aproximadamente, un 11% donde se presentan las transformaciones normales de Austenita a Ferrita (enfriamiento), y de Austenita a Ferrita (en calentamiento). Un contenido de Cromo por encima del 13% evita que ocurran estas transformaciones durante el enfriamiento o calentamiento y por esta razón, las aleaciones permanecen ferríticas a todas las temperaturas.

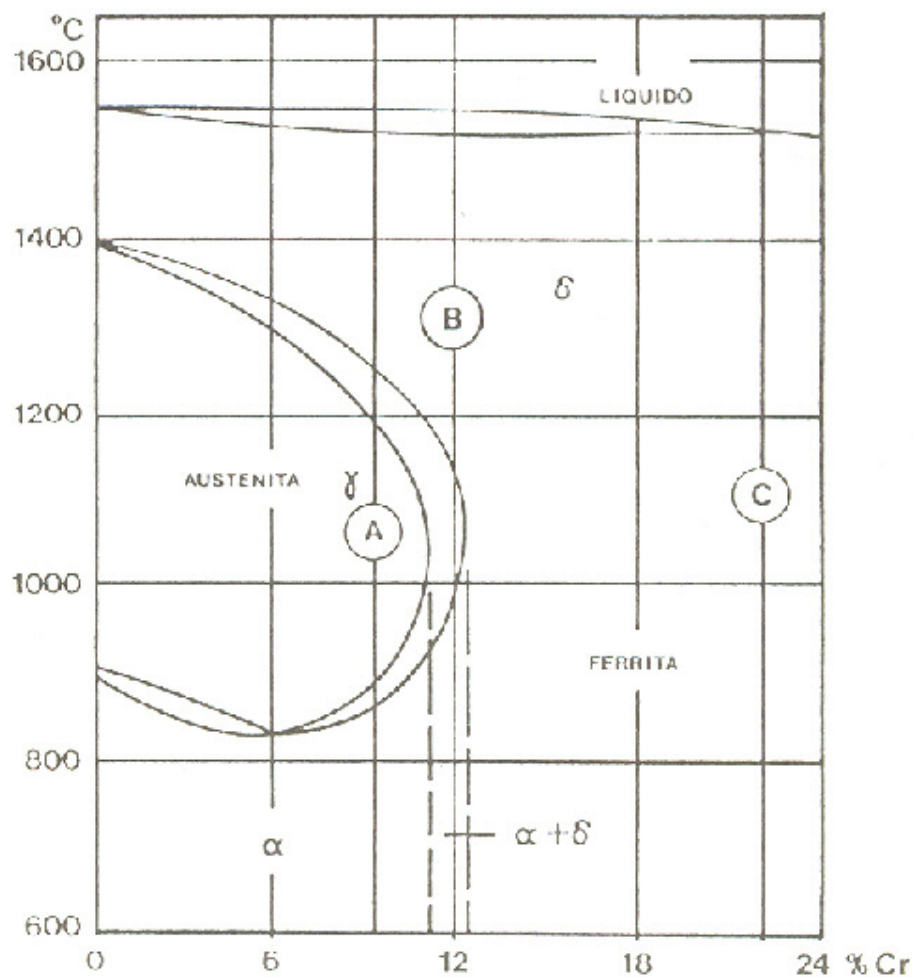


Diagrama no. 1 - Diagrama de equilibrio de aleaciones Hierro-Cromo

En el diagrama anterior se pueden identificar dos categorías de aceros inoxidables los martensíticos y ferríticos:

En los aceros inoxidables martensíticos sus características son similares a las de las aleaciones de Fierro-Cromo que contienen menos del 12% de Cromo. Estos aceros solidifican como Ferrita delta, aunque se transforman completamente en Austenita durante enfriamiento. Cuando el enfriamiento es suficientemente lento, la Austenita se puede transformar en Ferrita alfa. No obstante, si el enfriamiento es rápido, esta transformación no se realiza totalmente y la Austenita da origen a la Martensita, en forma similar a como sucede con los aceros ordinarios o de baja aleación.

Los aceros inoxidable ferríticos se comportan como aleaciones de Fierro-Cromo con un contenido suficiente de Cromo como para permanecer fuera de la zona gamma. Estos aceros son esencialmente ferríticos en todo el rango de temperaturas en estado sólido y en consecuencia, no se endurecen con el enfriamiento rápido (como es el caso de los aceros martensíticos). Entre las dos categorías mencionadas se encuentran una familia de aceros intermedios a los que se denomina como martensíticos/ferríticos o semi-ferríticos. Estas aleaciones de Fierro-Cromo se encuentran localizadas en la zona que se genera entre las tangentes verticales de las curvas de inicio y término de transformación del área donde coexisten la Ferrita y Austenita, esto es: entre los contenidos aproximados del 11 y el 13% de Cromo. Una parte de la Ferrita delta que constituye a los aceros martensíticos permanece sin cambio a todas las temperaturas en el estado

sólido mientras que la otra parte se transforma en Austenita. Esta, a su vez, se transforma en Ferrita alfa o Martensita, dependiendo de su velocidad de enfriamiento.

En este punto es necesario mencionar que el diagrama Fierro-Carbono debe considerarse como una base conveniente de ayuda con objeto de distinguir las diferentes categorías de estructuras de los aceros inoxidable. Ello se debe a que siempre existen elementos aleantes o residuales que actúan para formar otras fases que no se incluyen en el diagrama Fierro-Cromo y que también desplazan las fronteras de existencia de la Austenita y Ferrita. El efecto del Carbón como formador de carburos resulta importante en particular con el Cromo, además que amplía el rango en que la Austenita es estable hacia mayores contenidos de Cromo.

En la Práctica además de algunos otros elementos, los aceros inoxidable martensíticos normalmente contienen de 10 a 16% de Cromo, y hasta 1% de Carbón o más. Sin embargo, existen otros tipos de aceros martensíticos en los que se aprovecha la capacidad de desplazamiento que algunos elementos aleantes tienen sobre la fase gamma.

Los aceros inoxidable martensíticos se emplean normalmente en condiciones de temple y revenido, lo que les otorga una máxima resistencia y ductilidad, o bien se proveen en estado de recocido.



El Cromo es el elemento aleado que más influye en la resistencia a la oxidación y a la corrosión de los aceros. Un 12% de Cromo impide la corrosión por el aire ambiente húmedo mientras que para la oxidación en altas temperaturas es necesario hasta un 30 %.

El Níquel mejora la resistencia a la corrosión de los aceros al Cromo y el Molibdeno mejora la resistencia a la oxidación en altas temperaturas.

Aceros inoxidable son resistentes a la corrosión atmosférica, ácidos, álcalis y a la oxidación a temperaturas no muy elevadas.

Es el Cromo quien provoca una gran dureza cuando estos aceros martensíticos enfrían rápidamente una vez después de algún proceso de soldadura o una excesiva entrada y salida de energía calorífica sobre el material, por lo que tendrá que tenerse especial cuidado de manera particular en las zonas que sean afectadas por el calor, con el único fin de garantizar las propiedades mecánicas y estructurales que se desean que este material tenga para las aplicaciones por las que se hayan elegido este tipo de material el CA-15.

### **I.3.- SOLDADURA DE ACEROS INOXIDABLES MARTENSÍTICOS:**

Los aceros inoxidable martensíticos son los que presentan mayor número de dificultades para soldarse. Ello es debido a que sufren el cambio de fase de Austenita a Martensita (es decir, de una estructura cúbica centrada en las caras a una cúbica centrada en el cuerpo), el cual se presenta en la ZAC durante el enfriamiento de la soldadura.

Los aceros inoxidable martensíticos deben su resistencia a la corrosión al contenido de Cromo: de 11.5 al 18 %. El Cromo es un fuerte formador de Ferrita y, por ello, los aceros con mayor contenido de Cromo requieren de un incremento de Carbono, lo que ayudará a obtener la formación de Martensita durante el tratamiento térmico y soldadura. Debido al incremento en el contenido de C se promueven también problemas de fractura en la ZAC durante la operación de soldadura.

La forma más eficaz para aminorar la tendencia a fracturas consiste en el precalentamiento y control de temperatura del interpaso. El rango de temperaturas de precalentamiento más común para los aceros inoxidable martensíticos oscila entre 250° y 316°C (400° a 600°F). En estos aceros se utiliza el contenido C como criterio para determinar si se requiere o no el precalentamiento. Para contenidos de C menores de 0.10% no se emplea precalentamiento ni tratamiento térmico post-soldadura. Para contenidos de C entre 0.10 y 0.20 % se requieren precalentamientos hasta 260° C (500° F). Esta familia de aceros siempre se sueldan en

condiciones de recocido, ya que si se sueldan después del tratamiento térmico de templado se obtendrá una estructura martensítica, la cual es dura y frágil. La Martensita no tiene la ductilidad suficiente para soportar los esfuerzos generados por los cambios térmicos provocados por la operación de soldadura; por lo que, si se soldaran en estas condiciones (con la estructura martensítica), habrá una alta probabilidad de que se presentaran fracturas severas. Los aceros inoxidable martensíticos han sido diseñados para obtener productos con alta resistencia mecánica.

Con objeto de obtener esta resistencia se deberá someter a estos aceros a un tratamiento térmico posterior a la soldadura. Dicho tratamiento consiste en calentar el material a una temperatura lo suficientemente alta hasta que logre formarse una estructura totalmente austenítica. De esa temperatura se deberá enfriar rápidamente (templado) a temperatura ambiente. El medio de temple o enfriamiento rápido puede ser aire (en el caso de espesores delgados) o algún aceite (para espesores más gruesos). Se deberá tener cuidado con las ondulaciones o distorsiones que se presentan por efecto de templado. Estos defectos se pueden minimizar utilizando un sistema de sujeción o diseño de la pieza adecuada después del tratamiento de temple. Se deberá dar un revenido (relevado de esfuerzos) a la estructura con la finalidad de poder aprovechar adecuadamente las características mecánicas del material.

Adicionalmente, durante el tratamiento térmico de las piezas, éstas deberán protegerse de la oxidación (formación de escamas de óxidos de altas

temperaturas). Ello se logra por medio de una atmósfera inerte en el horno lograda a base de Helio o Argón (que son gases costosos). Pero si se desea abatir los costos se pueden usar gases exotérmicos o endotérmicos, los cuales proveen igualmente una buena protección.

# CAPÍTULO II

“ PROCEDIMIENTOS DE LA  
INVESTIGACIÓN ”

## **II.1.- DESCRIPCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN:**

Para la presente investigación se procede con el desarrollo experimental que consta en la elaboración de cuatro diferentes procesos de soldadura por arco eléctrico de corriente continua y material de aporte electrodo revestido de la misma aleación según la AWS (*electrodos en un diámetro de 5/16"*) depositado para unir el metal base tipo CA-15. Se incluyen solo en 3 de los 4 ensayos un proceso de precalentamiento y un tratamiento térmico de poscalentamiento a la soldadura.

Los datos obtenidos por los 4 procesos de soldadura serán materia de comparación y análisis con probetas de material base CA-15 sin ningún tipo de soldadura ni tratamiento térmico.

### **PROCEDIMIENTOS:**

Con la finalidad de soportar la repetitividad de los resultados obtenidos se deberán elaborar 3 probetas de cada procedimiento de soldadura por arco eléctrico, incluyendo un precalentamiento y tratamiento térmico post-soldadura respectivo.

Las probetas serán obtenidas después de haber unido por soldadura de arco eléctrico de corriente continua aplicando el material de aporte (Electrodo revestido 410) sobre 2 bloques de acero CA-15 con acabado biselado tipo K en sus extremos y deberá ser lo suficientemente grande para obtener de ahí 3 barras independientes para la fabricación de las probetas de prueba de acuerdo a la

norma ASTM E-8M-95<sup>a</sup> Standard Test Methods for Tensión Testing of Metallic Materials (Metric). Como lo muestra la figura no.1 y 2.

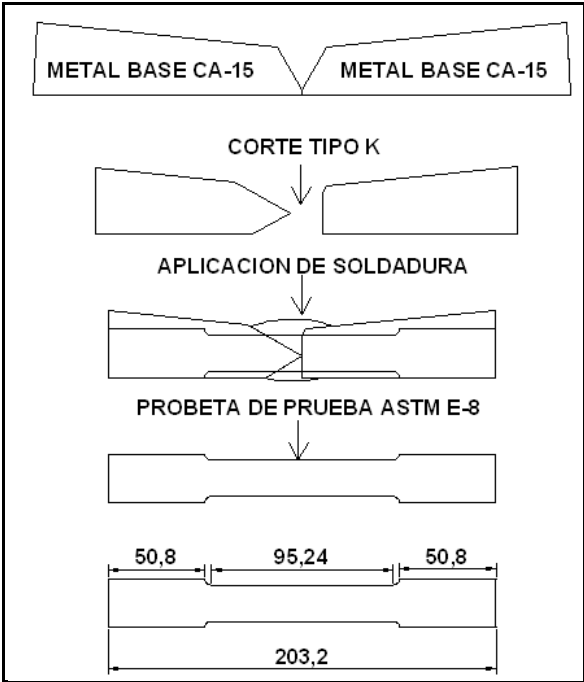


Fig. 1 - Procedimiento para la preparación de material y aplicación de soldadura.

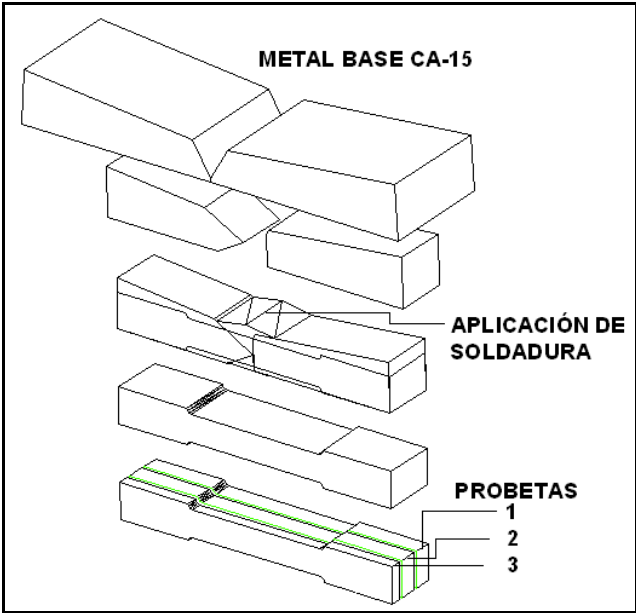


Fig. 2 -Procedimientos para la obtención de 3 probetas de prueba.

Una vez elaboradas las probetas será necesario realizarles un ataque químico que permitirá determinar la ubicación de la ZAC (Zona Afectada por el Calor), en donde se le realizarán entallas de cada lado para conducir la fractura por la ZAC y así obtener el esfuerzo de tracción en esta zona. También se le practicarán 40 ensayos de dureza con una distancia de 0.5 mm entre cada uno de ellos que atravesarán la ZAC desde la soldadura hasta el material base, así mismo, se realizara el análisis metalográfico para la comparación de la estructura granular que compone dicha zona.

Todos los datos obtenidos de los diferentes ensayos practicados a las probetas incluyendo la testigo, deberán ser comparados mediante fotografías, gráficas y tablas; marcando las variantes que se consideren más importantes y significativas. También será necesario establecer las conclusiones de la investigación.

Se llevaron a cabo 4 procesos diferentes de soldadura que incluyen el precalentamiento y tratamiento térmico post-soldadura como se indican a continuación estos son:

- 1.- Procedimiento de Soldadura + Temple al aire.
- 2.- Procedimiento de Soldadura + Temple escalonado y revenido.
- 3.- Procedimiento de Soldadura + Martémpering y revenido.
- 4.- Procedimiento de Soldadura + Recocido Isotérmico.



## II.2.- DESCRIPCIÓN DE LOS PROCESOS DE SOLDADURA

**1.- Enfriamiento al aire:** proceso de soldadura sin precalentamiento y enfriamiento al aire, con una temperatura de interpaso de 100°C. como se indica en la gráfica no.1 la cual se encuentra acoplada por el diagrama de Temperatura Tiempo Transformación correspondiente al acero inoxidable CA-15, que resulta útil para la determinación del tratamiento térmico post-soldadura.

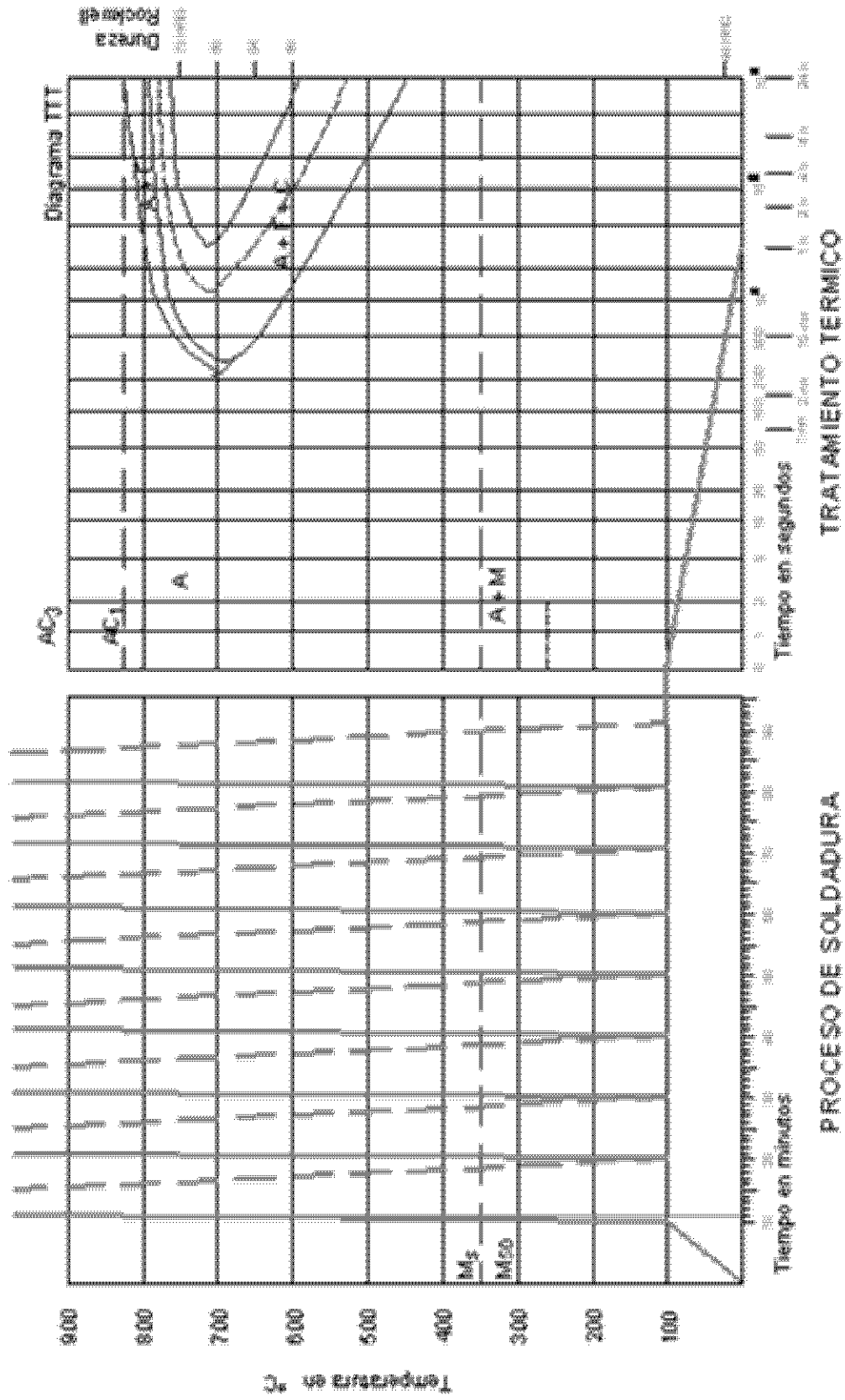
**2.- Enfriamiento escalonado:** proceso de soldadura con precalentamiento a 250°C y una temperatura de interpaso de 250°C, enfriamiento escalonado a 250°C durante 1 hr y 150°C durante 1 hr con revenido a 600 °C, por 1 hr con enfriamiento a temperatura ambiente dentro del horno como se indica en la gráfica no.2, la cual se encuentra acoplada por el diagrama de Temperatura Tiempo Transformación del acero inoxidable CA-15 que resulta útil para el tratamiento térmico post-soldadura.

**3.- Martépering:** proceso de soldadura con precalentamiento a 350°C y una temperatura de interpaso de 350°C, enfriamiento a 200 °C durante 1 hr con revenido a 650 °C, por 1 hr y enfriamiento a temperatura ambiente dentro del horno, como se indica en la gráfica no.3, que se encuentra acoplada al diagrama de Temperatura Tiempo Transformación que corresponde al acero inoxidable CA-15 que resulta útil para el tratamiento térmico post-soldadura.

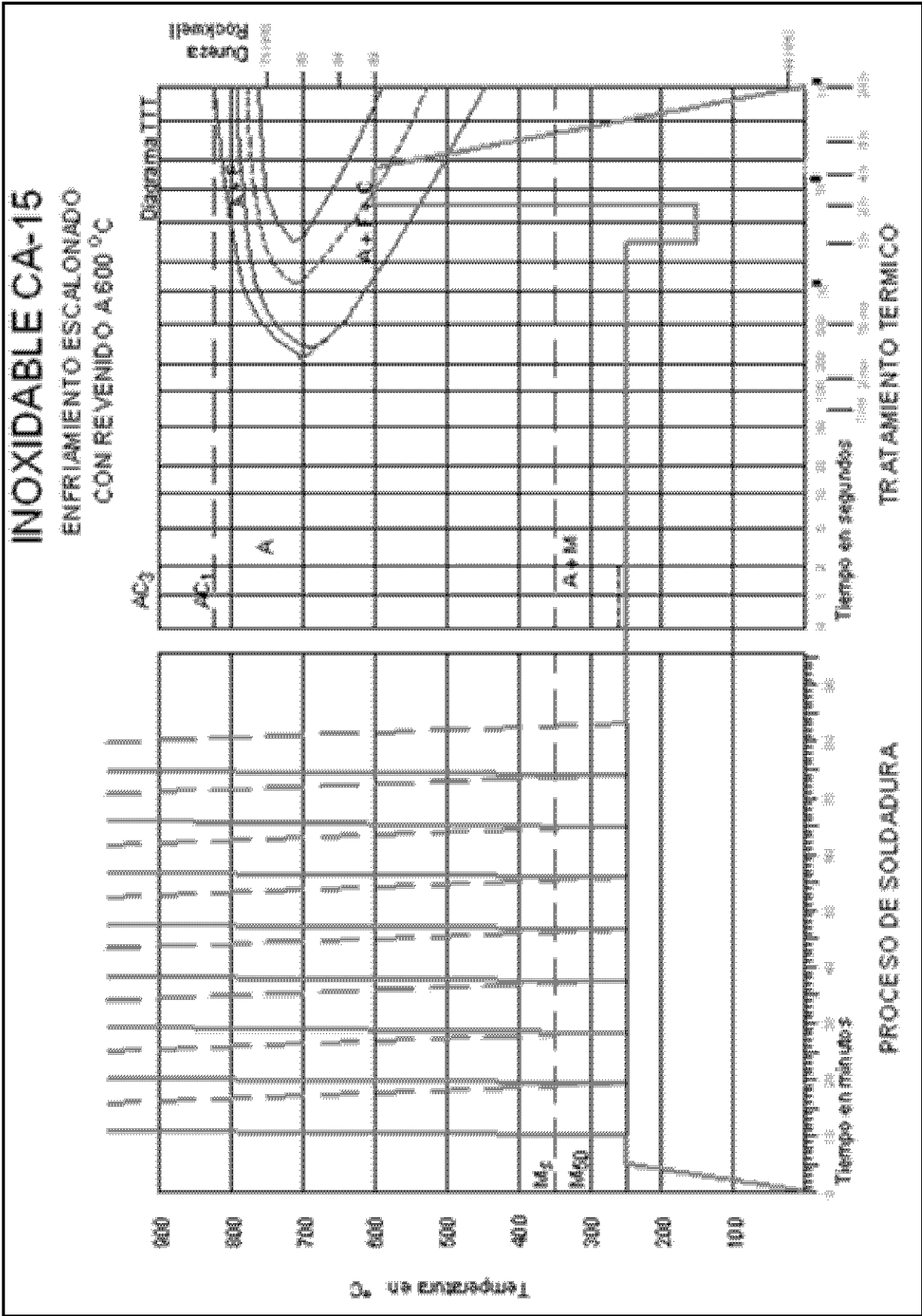
**4.- Recocido Isotérmico:** Proceso de soldadura con un precalentamiento a 350 °C con una temperatura de interpaso de 350 °C y enfriamiento a 700 °C durante 2 hr dejando enfriar a temperatura ambiente dentro del horno, como se indica en la gráfica no.4 que se encuentra acoplada al diagrama de Temperatura Tiempo Transformación correspondiente al acero inoxidable CA-15 que resulta útil para la determinación del tratamiento térmico post-soldadura.

# INOXIDABLE CA-15

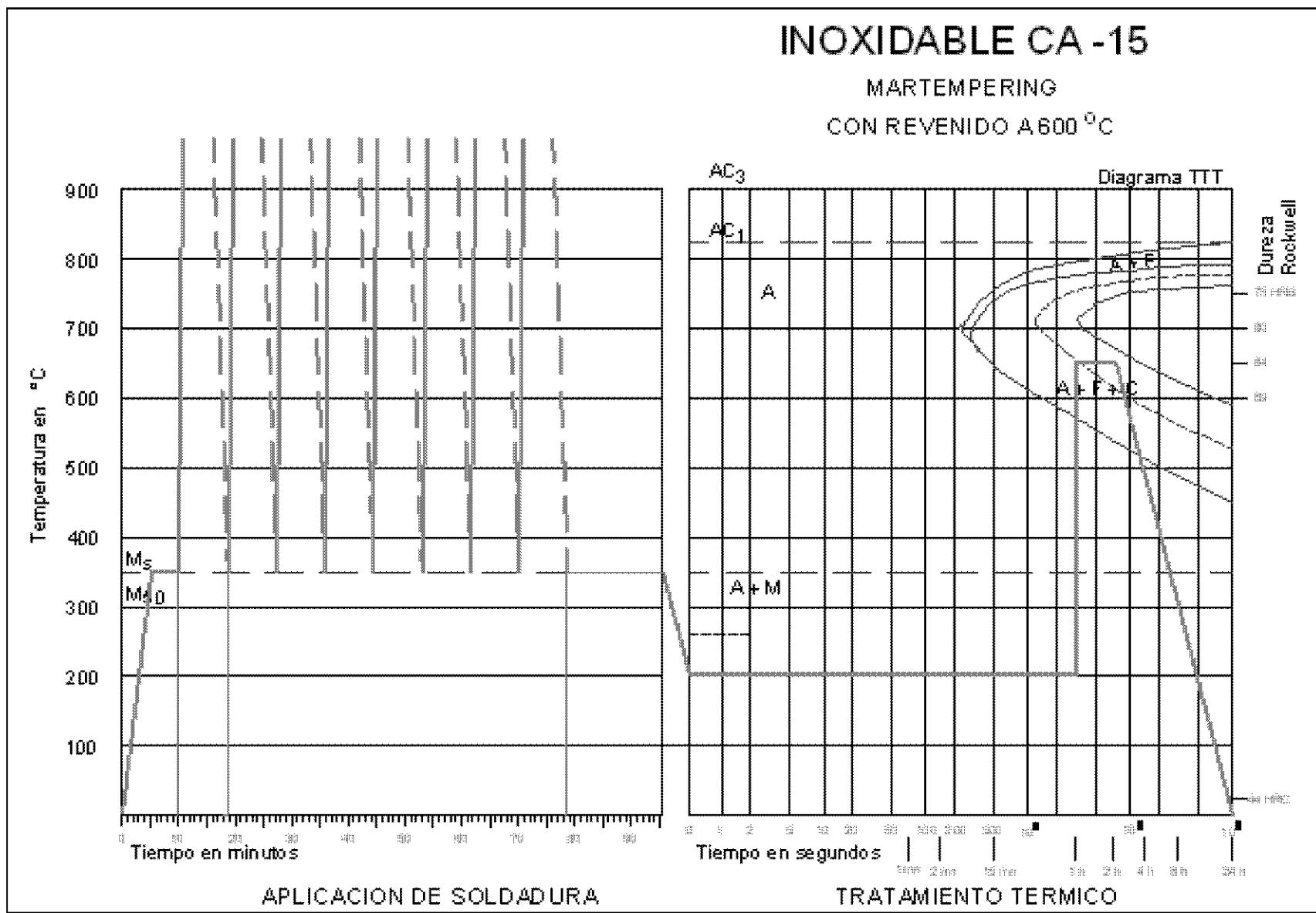
ENFRIAMIENTO AL AIRE



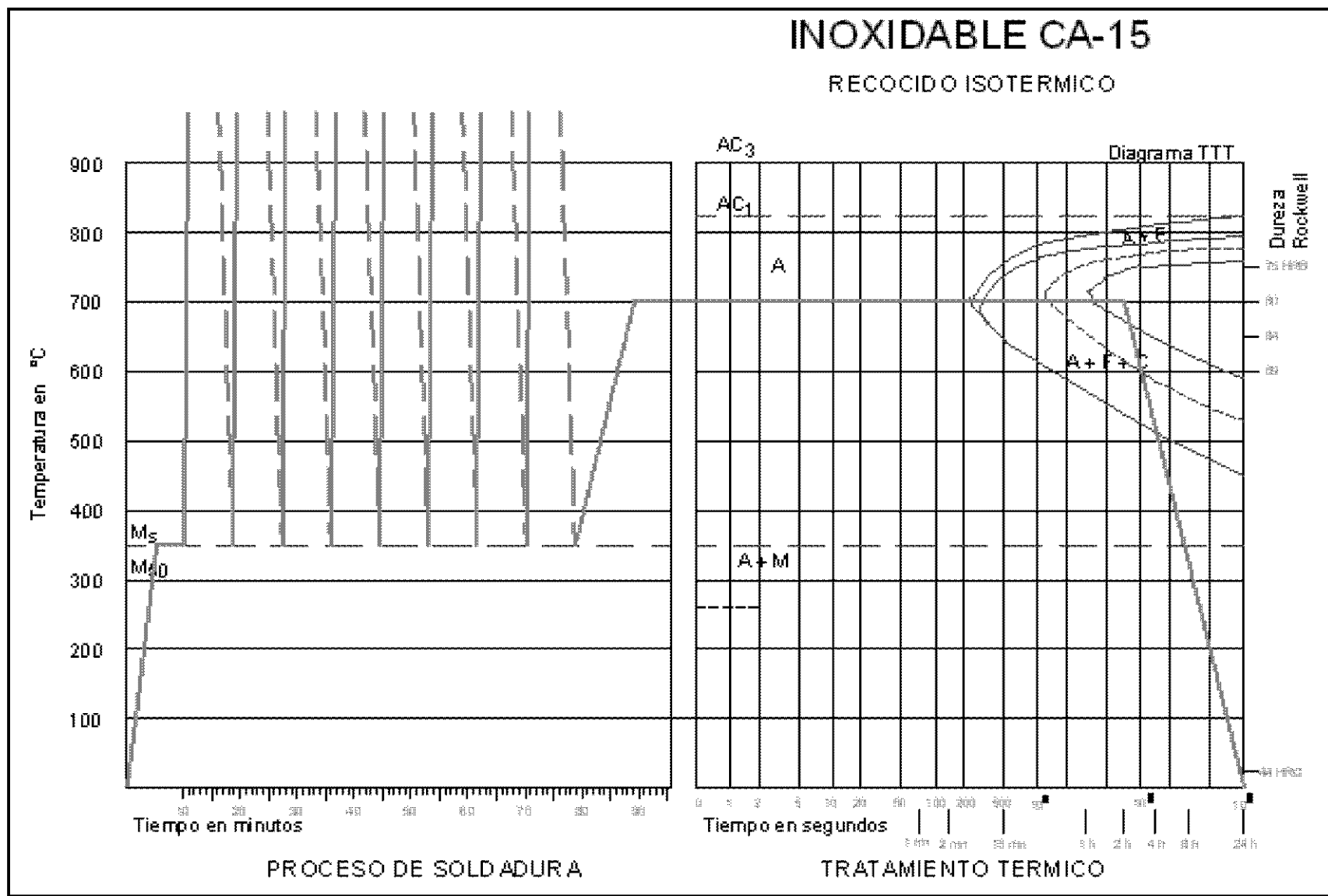
Grafica no.1: Proceso de soldadura + enfriamiento al aire.



Grafica no.2: Proceso de soldadura + enfriado escalonado



Grafica no.3: Proceso de soldadura + martémpering



Grafica no.4: Proceso de soldadura + recocido isotérmico

# CAPÍTULO

# III

“ DESARROLLO EXPERIMENTAL ”

### III.1.- CORTE DE MATERIALES Y PREPARACION DE MUESTRAS

Partiendo del lingote de fundición de un acero inoxidable martensítico denominado por la ACI (Alloy Casting Institut) CA-15 (fig.3), se realizó el maquinado (fig.4) sobre las piezas unidas para la obtención de los perfiles tipo K (fig. 5.).



Fig. 3 - Lingote material baese CA-15

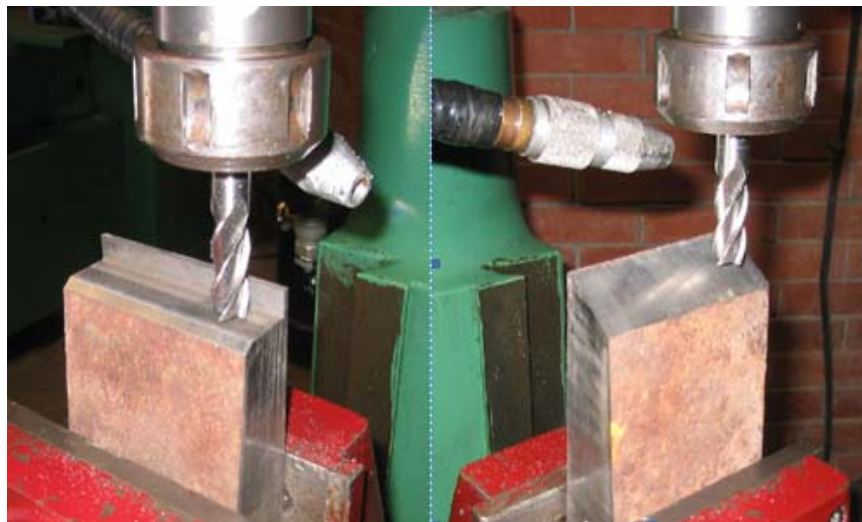


Fig. 4 - Maquinado del perfil tipo K





Fig. 5 - Montaje de piezas en perfil tipo K para ser unidas.

Se desarrollaron los procesos de soldadura como se establece cada una de las graficas no. (1 a la 4) antes mencionadas, aplicando los precalentamientos y tratamientos térmicos que indica cada procedimiento gráfico.



Fig. 6 – Aplicación de soldadura por arco eléctrico de c.c.



Fig. 7 – Soldadura aplicada a las piezas, listas para el tratamiento térmico



Fig. 8 – Cuatro procesos de soldadura terminados con tratamientos térmicos.

Se realizó el desbaste de los excedentes de soldadura con el uso de una rectificadora sobre las 4 barras de acero unidas (fig. 9).



Fig. 9 – Maquinado para desbaste de exesos de soldadura.

Obtener 3 probetas de prueba para la realización de los ensayos que determinarán las propiedades mecánicas de resistencia máxima a la tensión en la ZAC, dureza y análisis metalográfico.

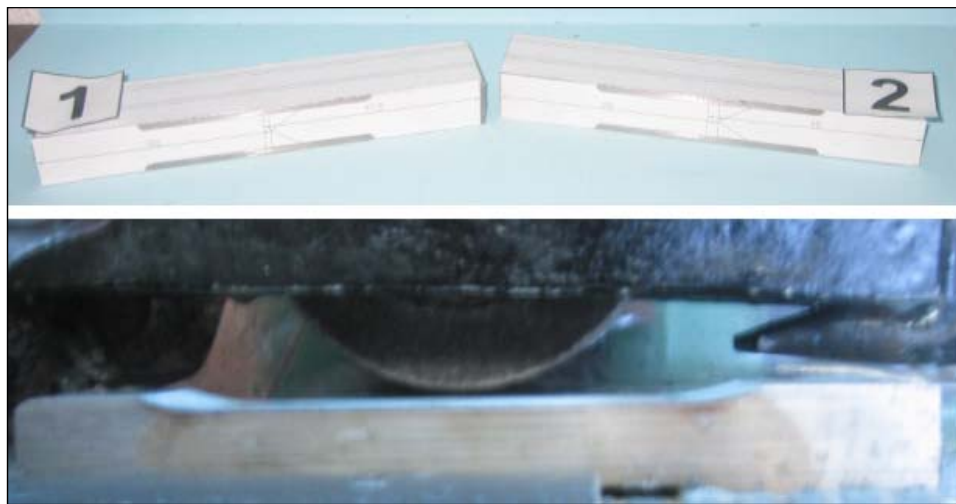


Fig.10.- Presentación y maquinado de barras unidas para obtención de probetas.

Para la determinación de la ZAC fue necesario pulir acabado espejo por lo menos una de las caras de los especímenes preformados de cada proceso (fig. 11) y atacar químicamente para revelar la ZAC aplicando sobre la superficie del metal un tiempo aproximado de 20 a 30 segundos una solución de cloruro férrico en agua en un 5% y 95% en peso respectivamente (fig.12).

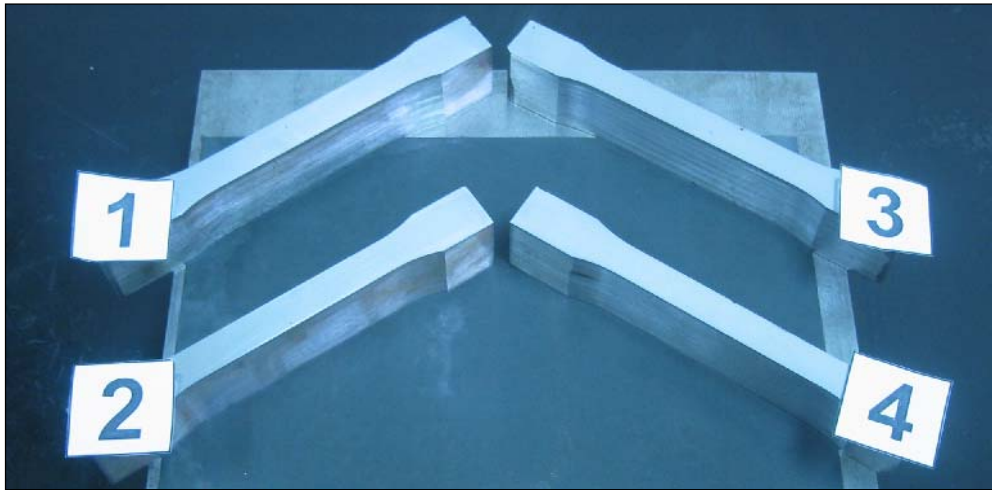


Fig. 11 - Pulido acabado espejo previo al ataque químico.

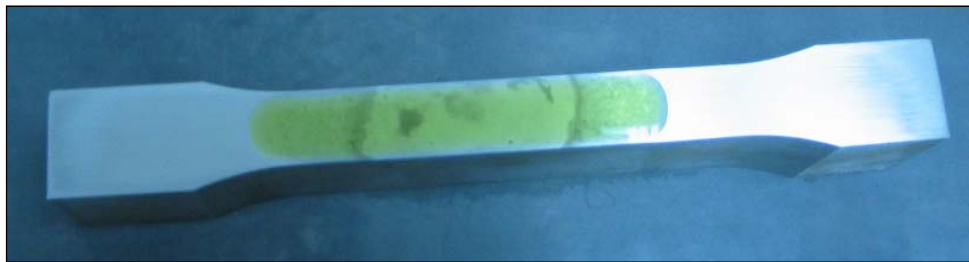


Fig. 12 – Ataque químico para determinación de la ZAC.



Posteriormente se realizó una entalla transversal que recorre la ZAC (fig.13) para el estudio de las propiedades mecánicas justo en esa Zona.



Fig. 13 – Maquinado de entalla en la ZAC.



Fig.14 obtención de 3 probetas de cada proceso y 2 probetas testigos.

Una vez obtenidas las probetas (fig.14), es necesario determinar el valor del área de la sección transversal en la ZAC para la determinación el valor de la carga máxima por unidad de área. (Fig. 15).

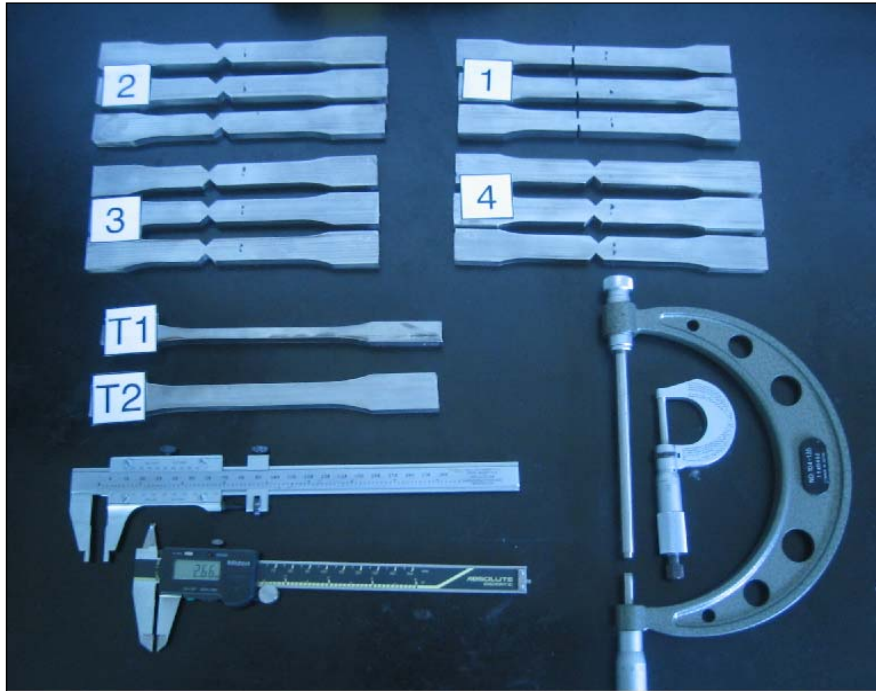


Fig. 15 - Determinación de la sección transversal en la ZAC de cada probeta.

Ya determinado el valor de la sección transversal se llevaron acabo los ensayos de tensión en una máquina de ensayos universales Instron mod. 8503 con capacidad de 100 toneladas a una velocidad de 350 Kg/seg usando un extensómetro con apertura de 25.4mm. y extensión de 37.5 mm.



Fig. 16 Máquina de ensayos universales Instron 8503 para 100 Tons.



Fig. 17 Montaje de probeta en mordazas y extensómetro

Después de haber realizado la rotura de las probetas por tensión se obtuvieron probetas mas pequeñas para continuar el estudio de la ZAC realizando un corte transversal (fig. 19) para posteriormente pulir la superficie acabado espejo y realizar dos ensayos más sobre la misma probeta siendo estos la metalografía y determinación de dureza.

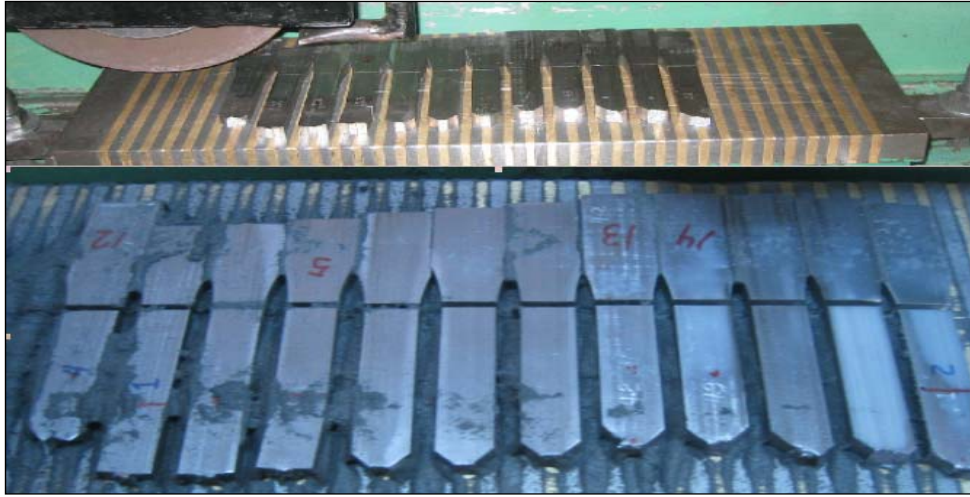


Fig. 19 – Corte de probetas para estudio de metalografía y dureza.

Los estudios de dureza fueron realizados en un durómetro marca Wolpert (fig.20) utilizando la escala de Vickers con una carga de 2 kg. Obteniendo así 40 lecturas con una distancia entre lecturas de 0.5 mm, que cruzan desde la zona de fusión pasando por la ZAC hasta llegar al metal base.



Fig. 20 – Durómetro marca Wolper



Para el pulido de las probetas metalográficas que se realizó se utilizó una pulidora marca Leco (fig.21) y para observar la micro estructura de las mismas un microscopio metalográfico marca Olympus (fig.22).



Fig. 21– Pulidora de muestras metalográficas marca Leco



Fig. 22 – Microscopio metalográfico marca Olympus.

# CAPÍTULO IV

**“ RESULTADOS OBTENIDOS ”**

## IV.1.- RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE TENSIÓN

Los ensayos para determinar las propiedades de resistencia a la tracción se realizaron en una máquina de tensión para ensayos universales Instron mod. 8503 con capacidad de 100 toneladas a una velocidad de 350 kg/seg empleando un extensómetro con una apertura de 25.4 mm y mediante los cuales se obtuvieron los siguientes resultados de Ingeniería mismos que derivan del cálculo de las condiciones iniciales de longitud y área transversal de la probeta en el momento del ensayo, (tabla de datos no.1)

PROPIEDADES	RESULTADO DE INGENIERÍA			ELONGACIÓN mm/mm $((L_f - L_0)/L_0)$	MODULO DE YOUNG N/m <sup>2</sup>	COEFICIENTE ENDURECIMIENTO
	LIMITE DE PROPORCIONALIDAD Mpa	LIMITE DE FLUENCIA .2% (M Pa)	RESISTENCIA TENSION M Pa = M N/m <sup>2</sup>			
NORMALIZADO TEMPLE AL AIRE	515	680	686	0.0027	244,868	1.0217
TEMPLE ESCALONADO C/REVENIDO	245	350	386	0.0089	109,325	1.1622
MARTEMPERING C/REVENIDO	500	760	775	0.0043	178,329	1.0341
RECOCIDO ISOTERMICO	300	425	509	0.0135	127,564	1.1604
SIN TRATAMIENTO TESTIGO CA-15	410	495	580	0.0057	177,358	1.1518

Tabla 1 - Resultados de ingeniería obtenidos en los ensayos de tensión.

Para la mayoría de las aplicaciones los resultados de ingeniería son suficientes, sin embargo la velocidad en el incremento de la tensión, aumenta la deformación y el límite de fluencia.

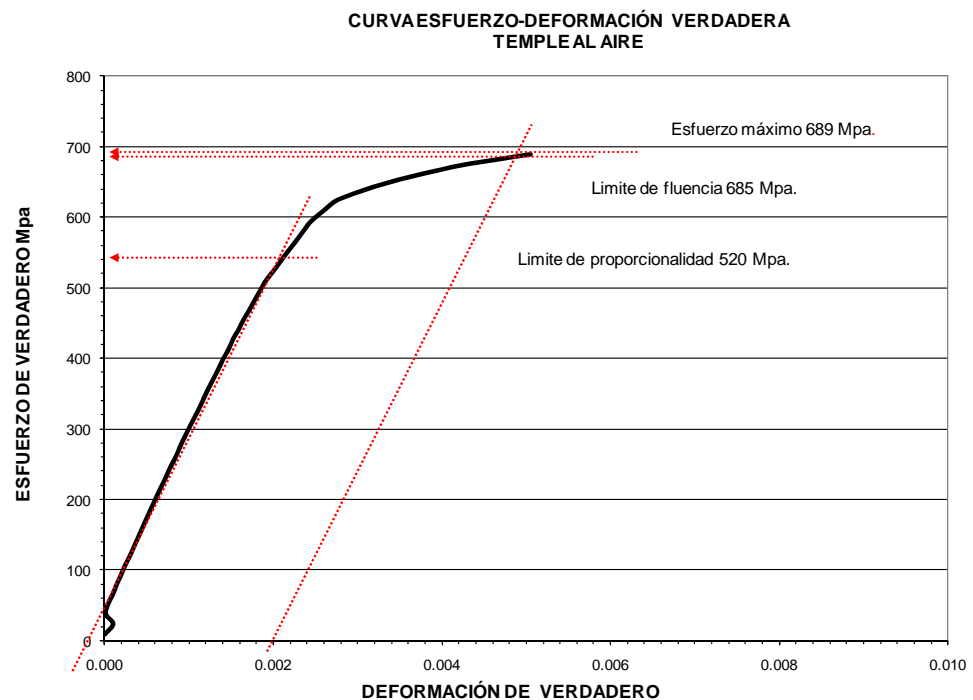
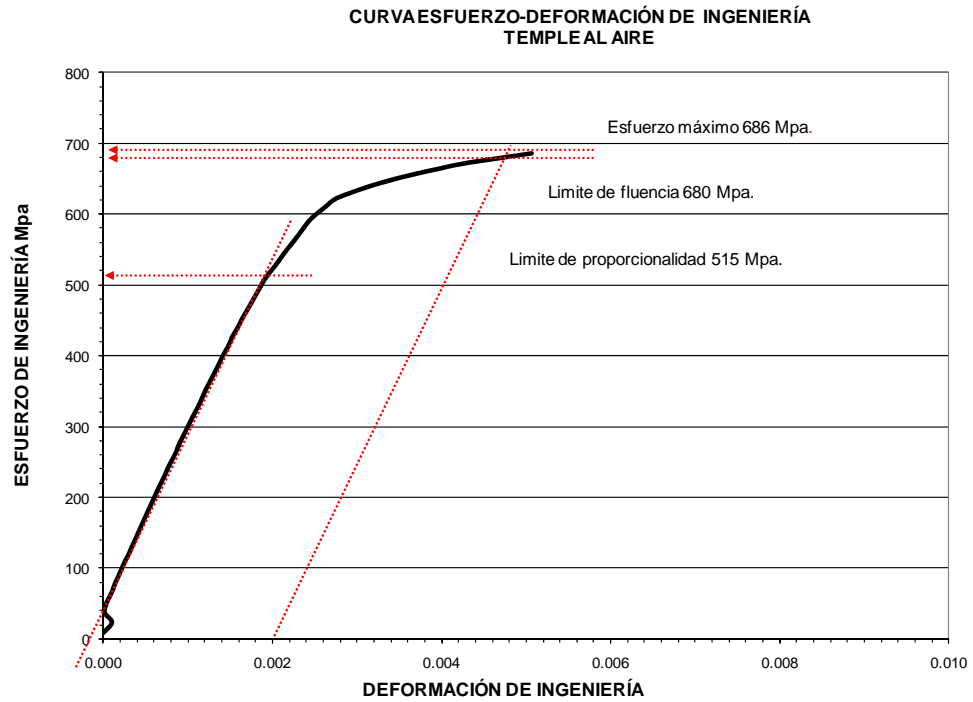
Para algunas aplicaciones esta propiedad, conocida como endurecimiento por deformación, es muy importante. Por lo que necesitaremos entonces calcular los valores de tensión a una deformación en particular independientemente de las dimensiones iniciales de la probeta. Esto se hace utilizando valores de tensión y deformación verdaderos, es decir el valor de la carga y deformación instantáneos durante la prueba (tabla de resultados no. 2).

RESULTADO VERDADEROS						
PROPIEDADES	LIMITE DE PROPORCIONALIDAD	LIMITE DE FLUENCIA	RESISTENCIA TENSION	ELONGACIÓN mm/mm	MODULO DE YOUNG	COEFICIENTE ENDURECIMIENTO
TRATAMIENTO	Mpa	.2% (M Pa)	M Pa = M N/m <sup>2</sup>	((L <sub>F</sub> -L <sub>0</sub> )/L <sub>0</sub> )	N/m <sup>2</sup>	
NORMALIZADO TEMPLE AL AIRE	520	685	689	0.0027	244,868	1.0217
TEMPLE ESCALONADO C/REVENIDO	275	355	390	0.0089	109,325	1.1622
MARTEMPERING C/REVENIDO	520	767	782	0.0043	178,329	1.0341
RECOCIDO ISOTERMICO	315	435	518	0.0135	127,564	1.1604
SIN TRATAMIENTO TESTIGO CA-15	440	495	580	0.0057	177,358	1.1518

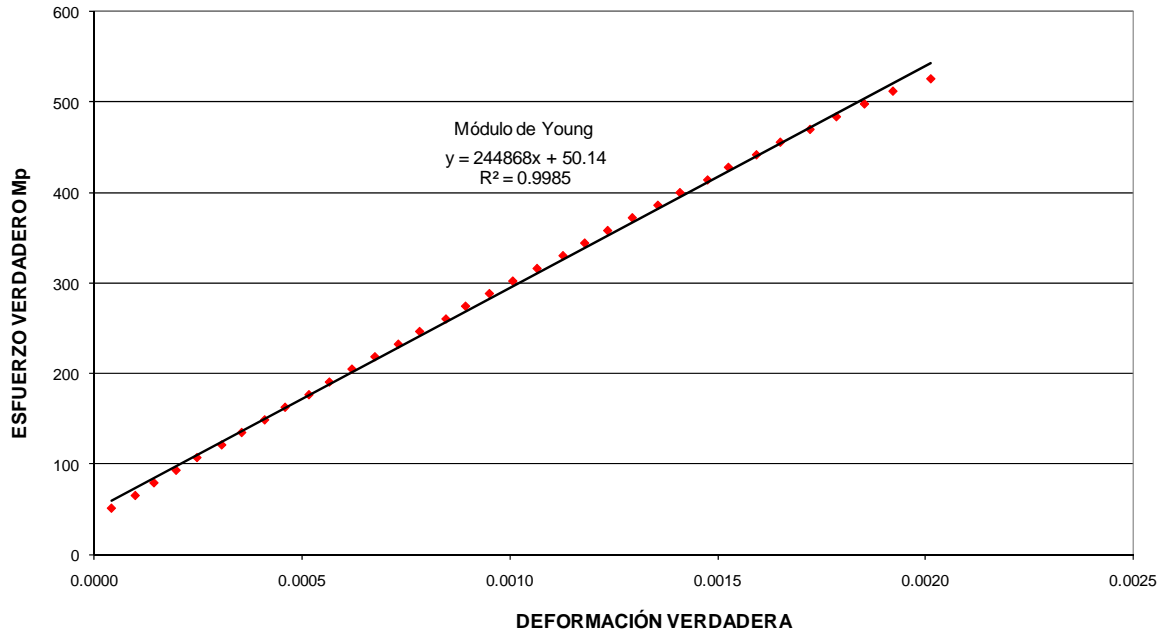
Tabla 2 – Resultados verdaderos obtenidos en base a los de ingeniería.

A continuación se presentan las graficas que indican los valores obtenidos correspondientes a cada uno de los procedimientos de soldadura:

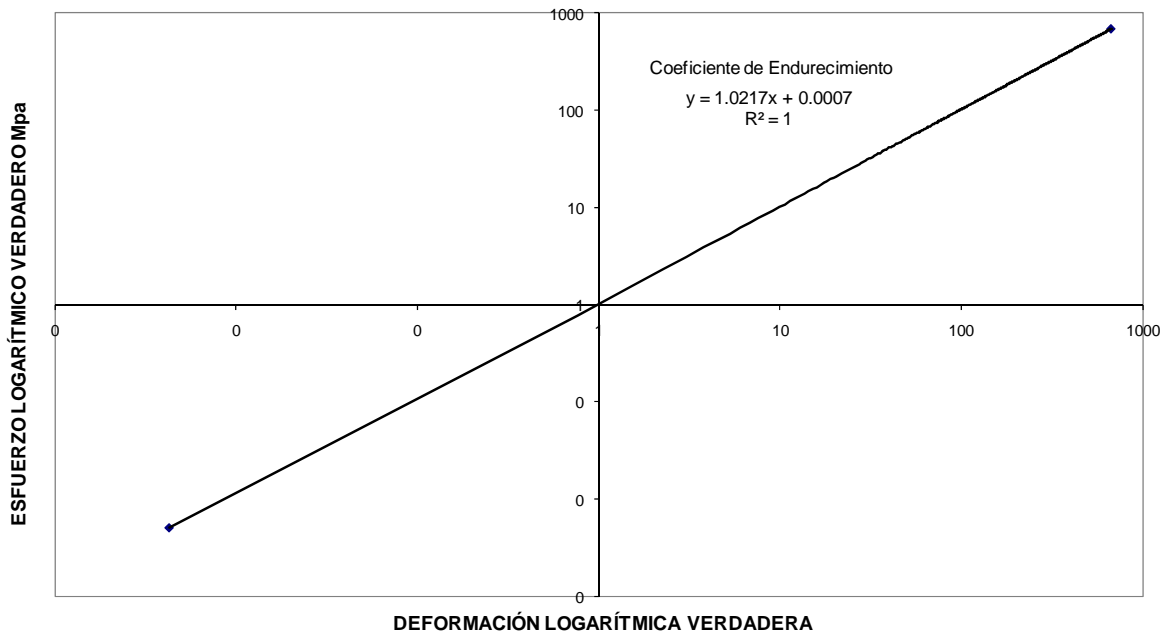
### Procedimientos de soldadura + temple al aire.



### MODULO DE YOUNG - TEMPLE AL AIRE

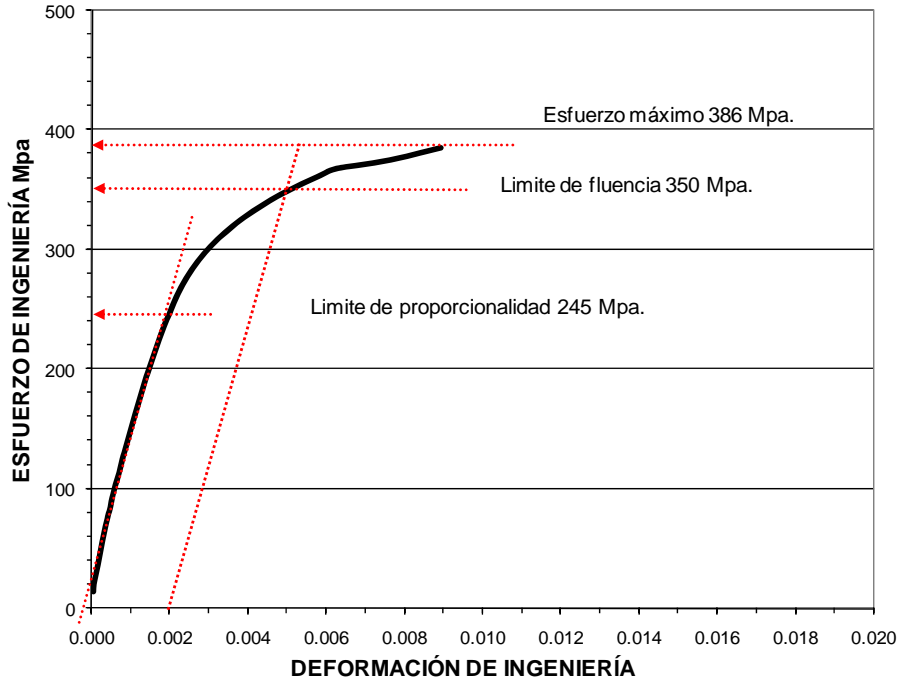


### COEFICIENTE DE ENDURECIMIENTO TEMPLE AL AIRE

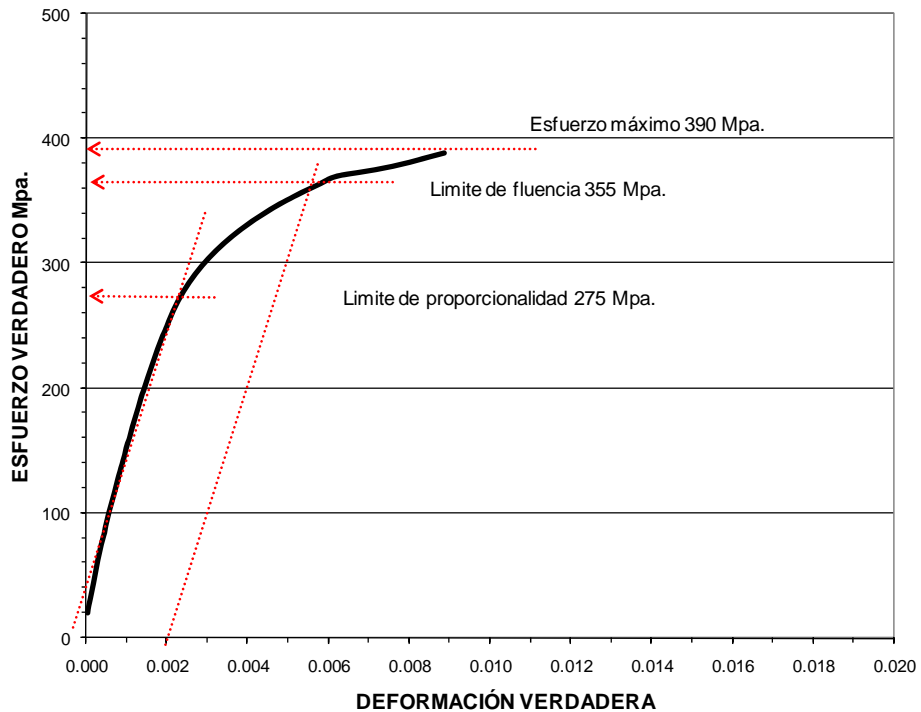


## Procedimiento de soldadura + Temple escalonado.

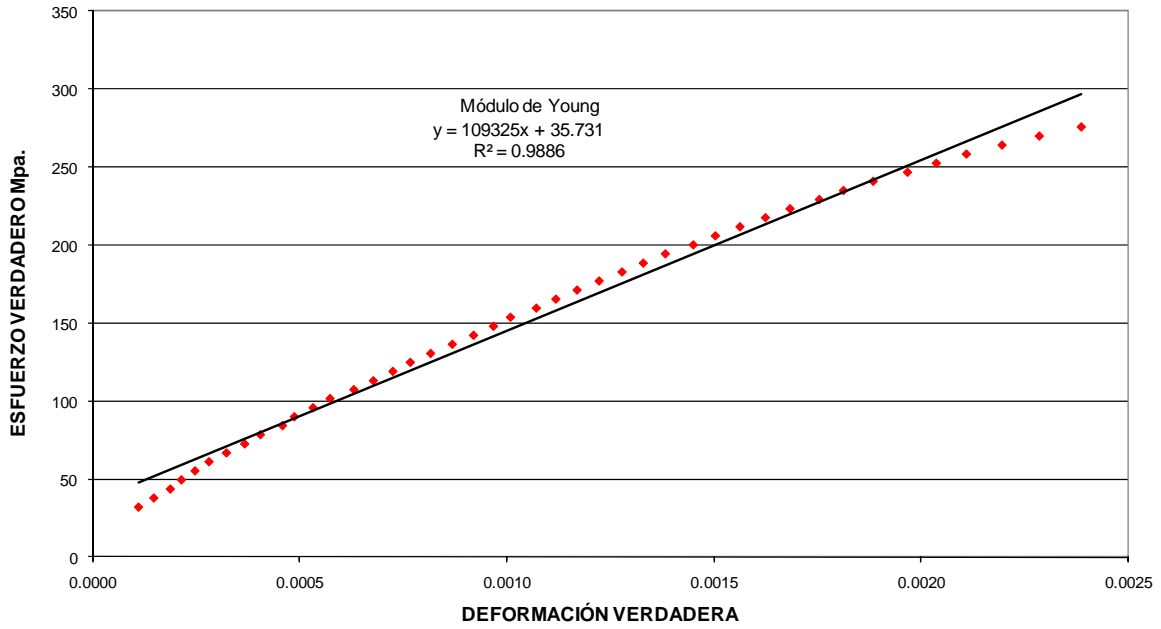
CURVA ESFUERZO - DEFORMACIÓN DE INGENIERÍA  
TEMPLE ESCALONADO



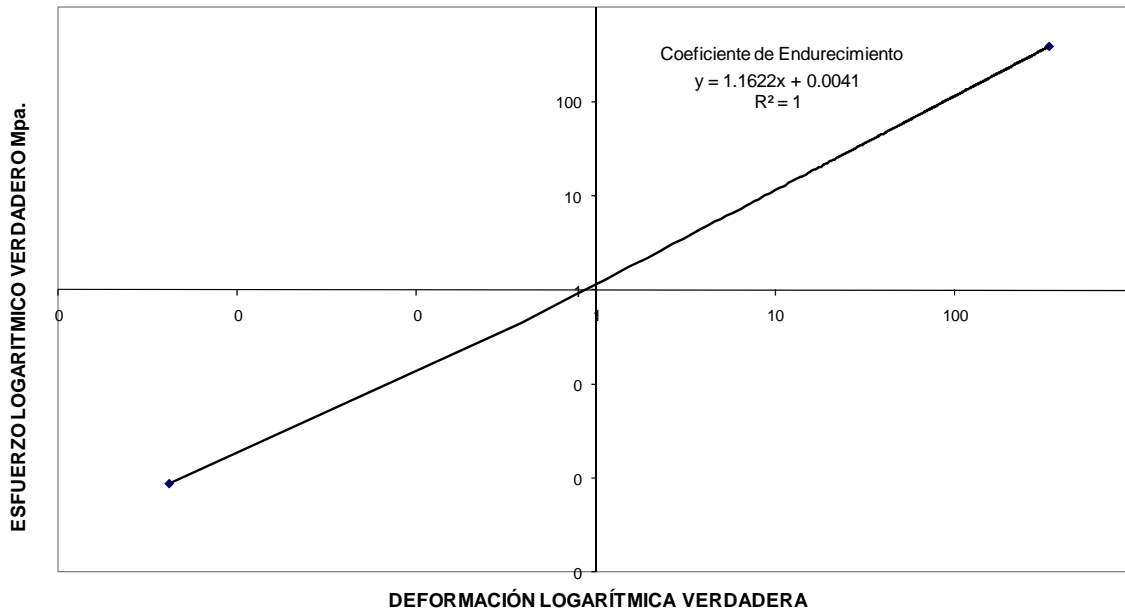
CURVA ESFUERZO - DEFORMACIÓN VERDADERA  
TEMPLE ESCALONADO



### MODULO DE YOUNG - TEMPLE ESCALONADO



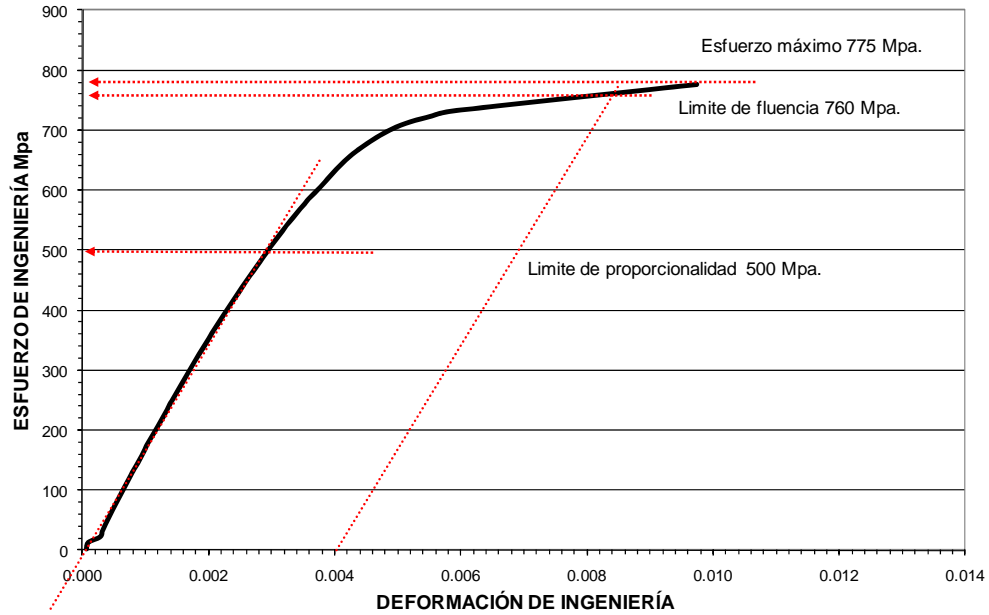
### COEFICIENTE DE ENDURECIMIENTO TEMPLE ESCALONADO



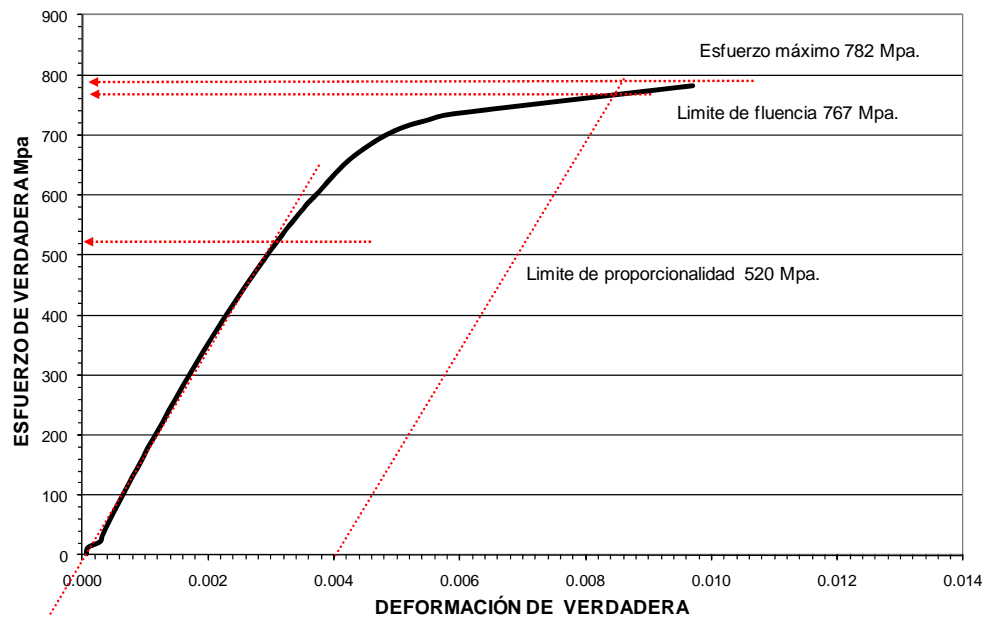


## Procedimiento de soldadura + Martépering

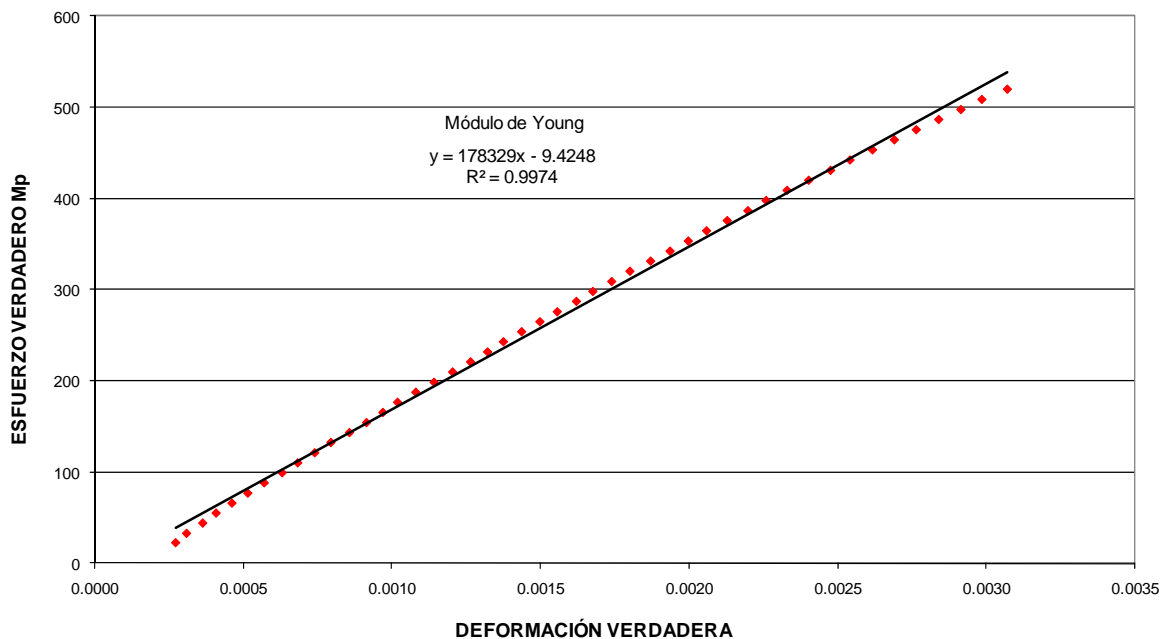
CURVA ESFUERZO-DEFORMACIÓN DE INGENIERÍA  
MARTÉMPERING



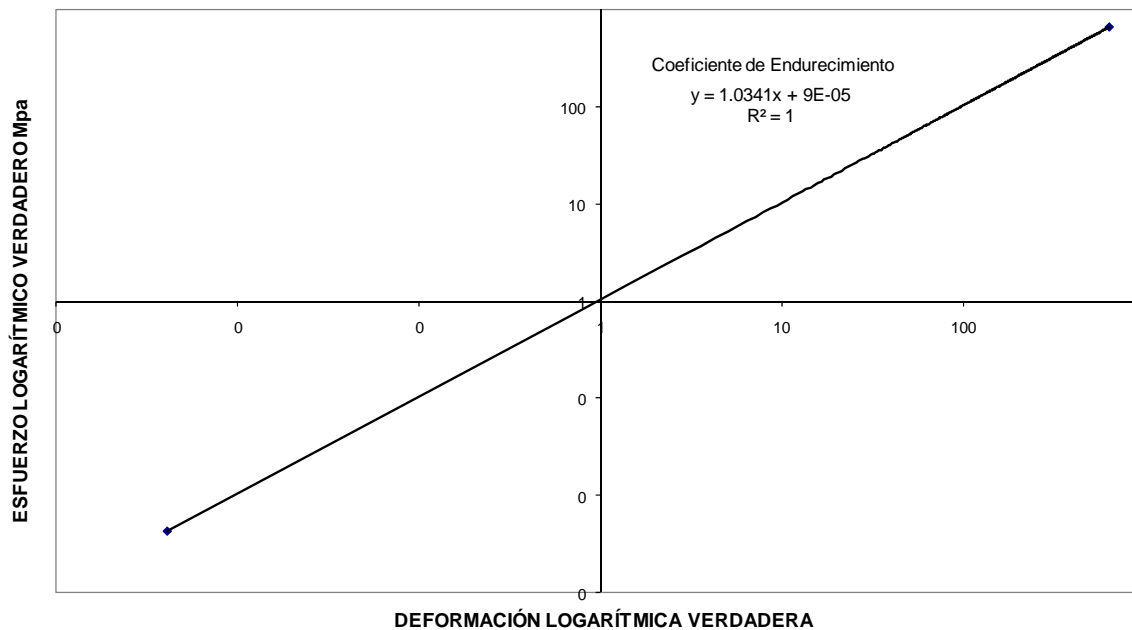
CURVA ESFUERZO-DEFORMACIÓN VERDADERA  
MARTÉMPERING



### MODULO DE YOUNG - MARTÉMPERING

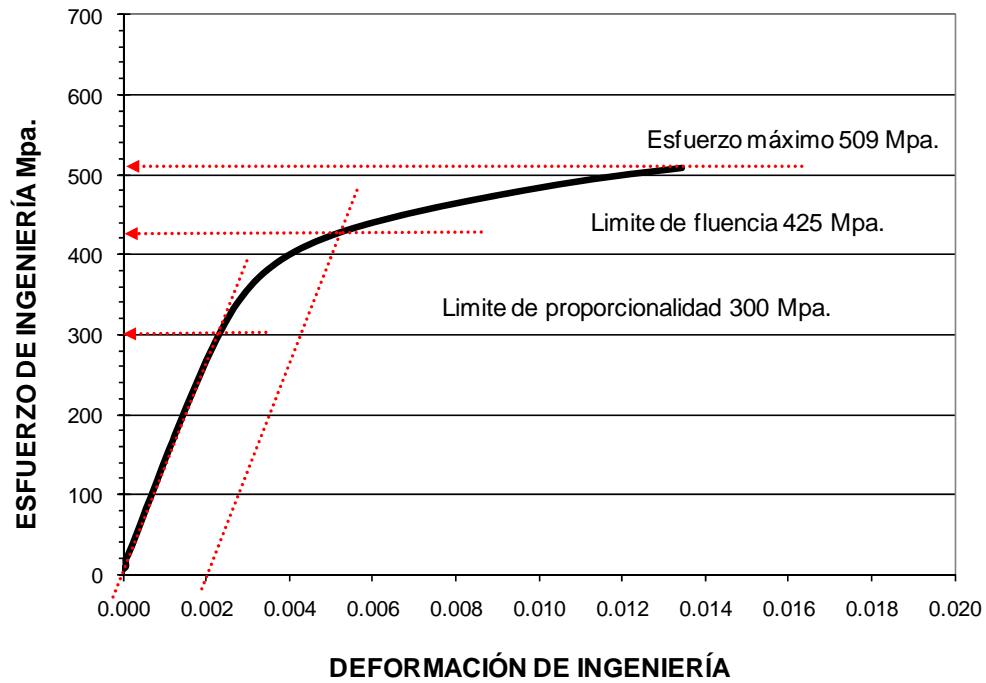


### COEFICIENTE DE ENDURECIMIENTO MARTÉMPERING

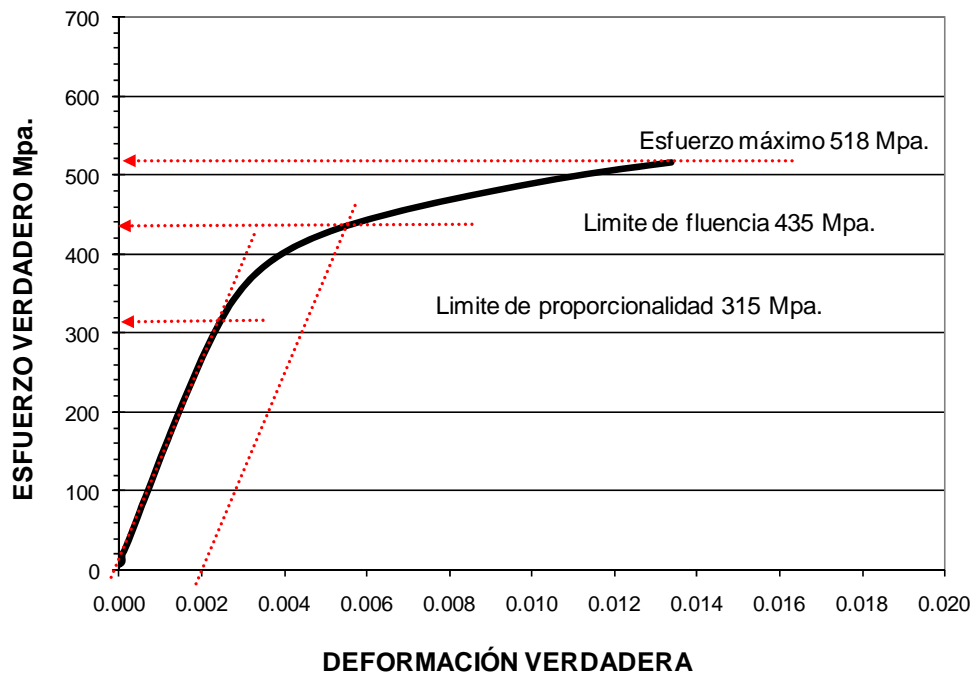


## Procedimiento de soldadura + Recocido Isotérmico.

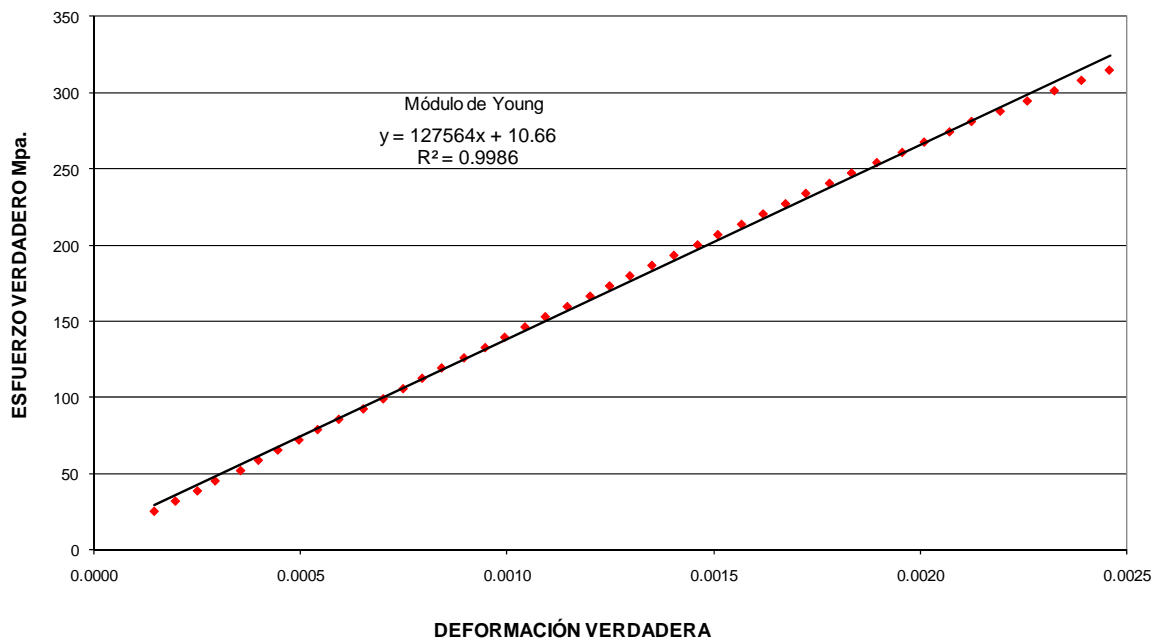
### CURVA ESFUERZO-DEFORMACION DE INGENIERÍA RECOCIDO ISOTÉRMICO



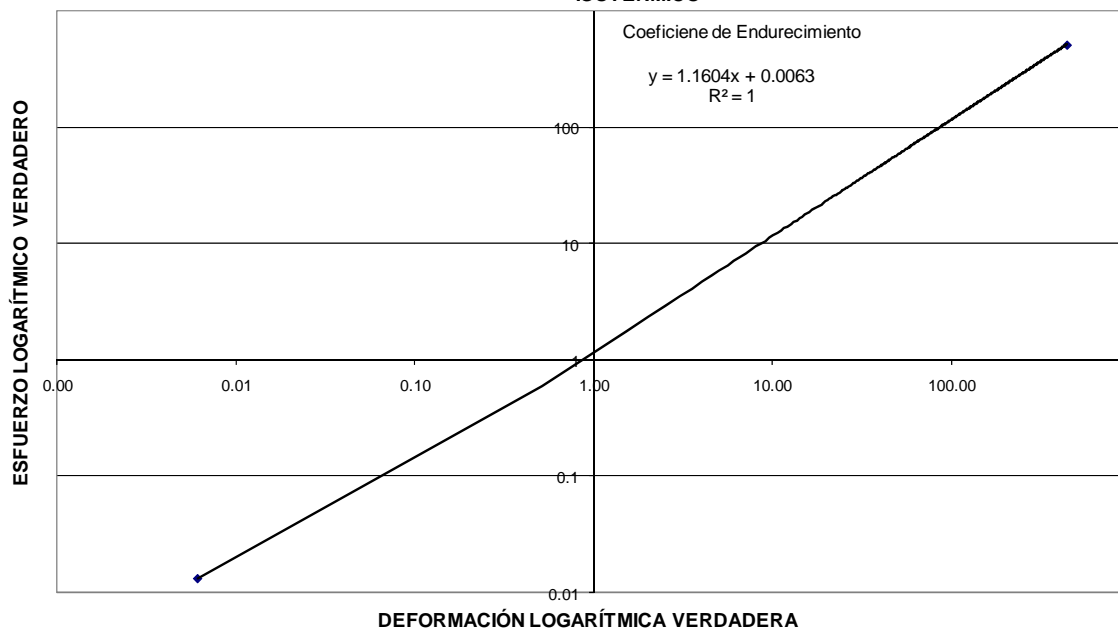
### CURVA ESFUERZO-DEFORMACION VERDADERA RECOCIDO ISOTÉRMICO



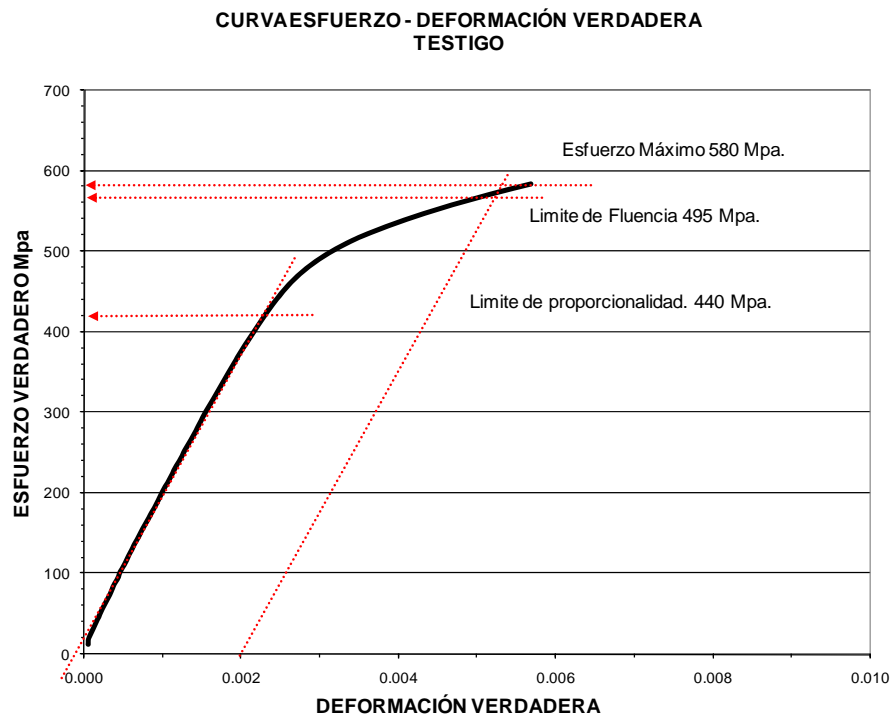
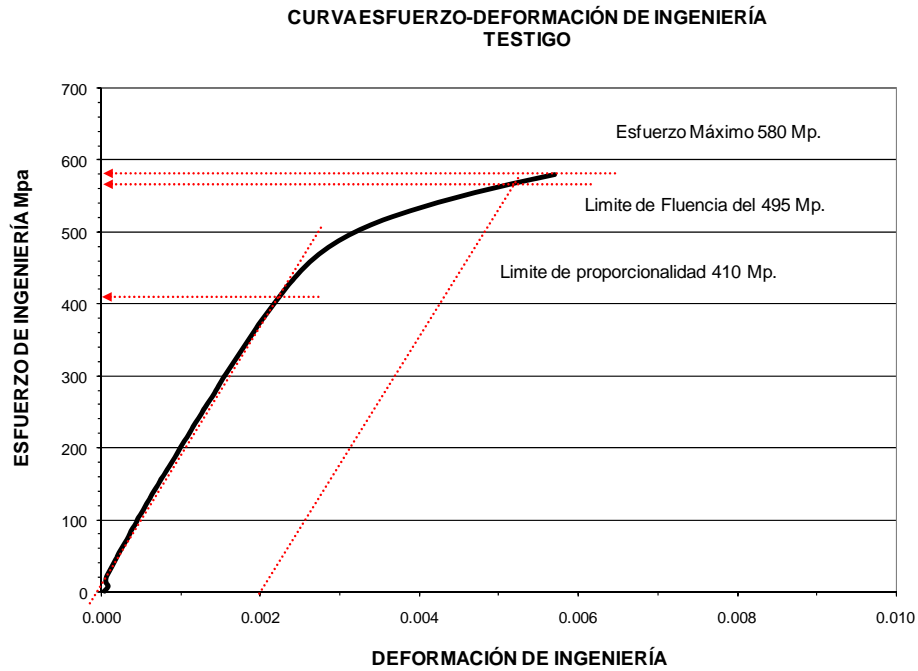
### MODULO DE YOUNG - RECOCIDO ISOTÉRMICO



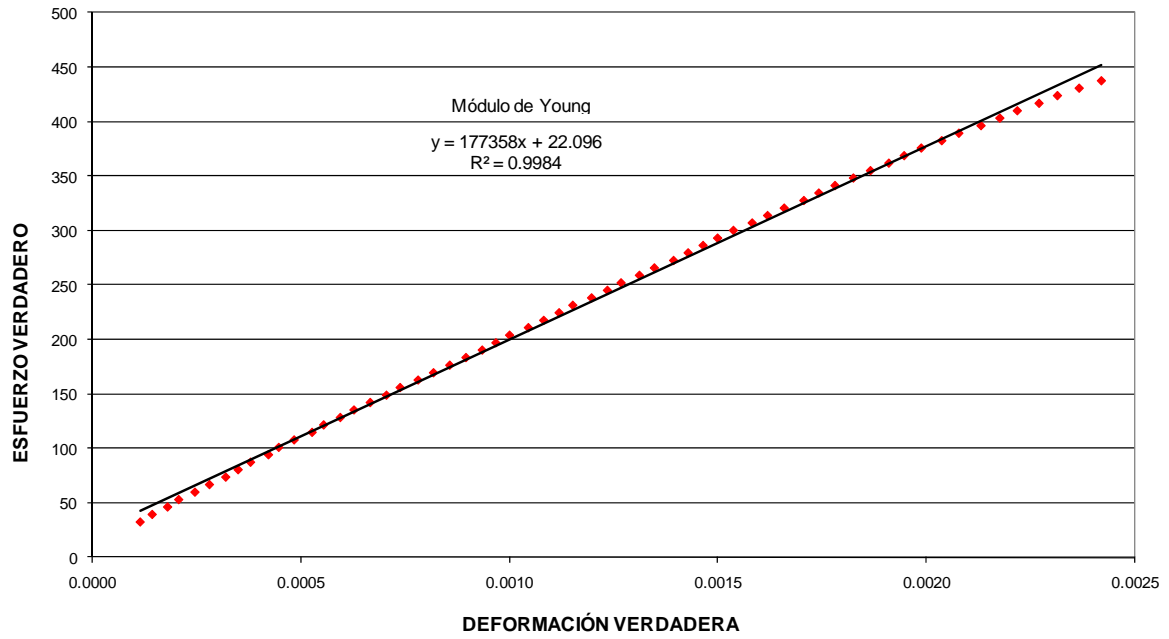
### COEFICIENTE DE ENDURECIMIENTO ISOTÉRMICO



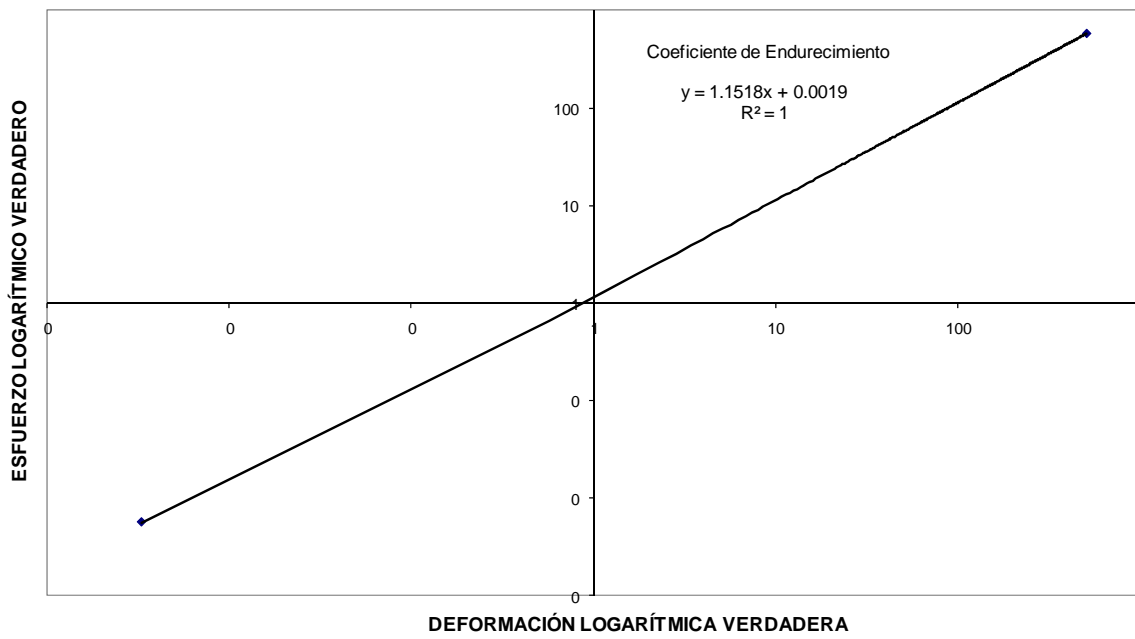
## Material original, probeta testigo sin tratamientos.



### MODULO DE YOUNG - TESTIGO



### COEFICIENTE DE ENDURECIMIENTO TESTIGO



## IV.2.- RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE DUREZA

Para la determinación de los ensayos de dureza se eligió una probeta de cada procedimiento de soldadura y se realizaron 40 mediciones con una separación de 0.5 mm una de otra comenzado en la zona de fusión (material de aporte) para cruzar la ZAC y finalmente llegar al metal base. (Tabla no.3).

DETERMINACION DE LA DUREZA VICKERS (HV) CON UNA CARGA DE 2 KGf																				
TRATAMIENTO TÉRMICO POST SOLDADURA EMPLEADO																				
TEMPLE AL AIRE (NORMALIZADO)				TEMPLE ESCALONADO CON REVENIDO				MARTEMPERING CON REVENIDO				RECOCIDO ISOTÉRMICO				PROBETA SIN TRATAMIENTO TESTIGO CA-15				
No.	DIAG H	DIAG V	PROM.	HV	DIAG H	DIAG V	PROM.	HV	DIAG H	DIAG V	PROM.	HV	DIAG H	DIAG V	PROM.	HV	DIAG H	DIAG V	PROM.	HV
1	0.0850	0.0900	0.0875	484	0.1000	0.1150	0.1075	321	0.0900	0.0900	0.0900	458	0.1300	0.1300	0.1300	219	0.1100	0.1100	0.1100	307
2	0.0850	0.0850	0.0850	513	0.1050	0.1050	0.1050	336	0.0900	0.0950	0.0925	433	0.1300	0.1300	0.1300	219	0.1150	0.1200	0.1175	269
3	0.0850	0.0850	0.0850	513	0.1000	0.1050	0.1025	353	0.0850	0.0850	0.0850	513	0.1300	0.1300	0.1300	219	0.1200	0.1150	0.1175	269
4	0.0850	0.0900	0.0875	484	0.1000	0.1100	0.1050	336	0.0750	0.0750	0.0750	659	0.1300	0.1300	0.1300	219	0.1200	0.1200	0.1200	258
5	0.0850	0.0850	0.0850	513	0.1000	0.1000	0.1000	371	0.0900	0.0900	0.0900	458	0.1250	0.1250	0.1250	237	0.1150	0.1100	0.1125	293
6	0.0850	0.0850	0.0850	513	0.1000	0.1100	0.1050	336	0.0900	0.0900	0.0900	458	0.1200	0.1300	0.1250	237	0.1200	0.1150	0.1175	269
7	0.0900	0.0850	0.0875	484	0.1100	0.1100	0.1100	307	0.0900	0.0900	0.0900	458	0.1200	0.1150	0.1175	269	0.1150	0.1150	0.1150	280
8	0.0850	0.0900	0.0875	484	0.1050	0.1100	0.1075	321	0.0900	0.0900	0.0900	458	0.1200	0.1300	0.1250	237	0.1100	0.1200	0.1150	280
9	0.0850	0.0900	0.0875	484	0.1100	0.1100	0.1100	307	0.0850	0.0900	0.0875	484	0.1300	0.1200	0.1250	237	0.1200	0.1200	0.1200	258
10	0.0800	0.0800	0.0800	580	0.1100	0.1100	0.1100	307	0.0900	0.0900	0.0900	458	0.1300	0.1300	0.1300	219	0.1100	0.1200	0.1150	280
11	0.0850	0.0900	0.0875	484	0.1100	0.1100	0.1100	307	0.0850	0.0850	0.0850	513	0.1350	0.1300	0.1325	211	0.1200	0.1200	0.1200	258
12	0.0850	0.0900	0.0875	484	0.1100	0.1000	0.1050	336	0.0850	0.0900	0.0875	484	0.1200	0.1200	0.1200	258	0.1100	0.1100	0.1100	307
13	0.0900	0.0900	0.0900	458	0.1100	0.1100	0.1100	307	0.0850	0.0900	0.0875	484	0.1100	0.1100	0.1100	307	0.1100	0.1100	0.1100	307
14	0.0800	0.0900	0.0850	513	0.1100	0.1100	0.1100	307	0.0850	0.0900	0.0875	484	0.1100	0.1000	0.1050	336	0.1100	0.1000	0.1050	336
15	0.0850	0.0900	0.0875	484	0.1000	0.1100	0.1050	336	0.0900	0.0900	0.0900	458	0.1100	0.1200	0.1150	280	0.1100	0.1200	0.1150	280
16	0.0850	0.0850	0.0850	513	0.1100	0.1100	0.1100	307	0.0850	0.0850	0.0850	513	0.1100	0.1100	0.1100	307	0.1200	0.1200	0.1200	258
17	0.0850	0.0900	0.0875	484	0.1000	0.1050	0.1025	353	0.0850	0.0850	0.0850	513	0.1200	0.1200	0.1200	258	0.1250	0.1200	0.1225	247
18	0.0850	0.0900	0.0875	484	0.1100	0.1100	0.1100	307	0.0900	0.0900	0.0900	458	0.1200	0.1200	0.1200	258	0.1100	0.1100	0.1100	307
19	0.0850	0.0900	0.0875	484	0.1000	0.1000	0.1000	371	0.0900	0.0900	0.0900	458	0.1100	0.1000	0.1050	336	0.1200	0.1200	0.1200	258
20	0.0900	0.0900	0.0900	458	0.1050	0.1100	0.1075	321	0.0900	0.0900	0.0900	458	0.1100	0.1000	0.1050	336	0.1200	0.1200	0.1200	258
21	0.0900	0.0900	0.0900	458	0.1100	0.1100	0.1100	307	0.0850	0.0850	0.0850	513	0.1200	0.1200	0.1200	258	0.1200	0.1200	0.1200	258
22	0.0850	0.0900	0.0875	484	0.1100	0.1100	0.1100	307	0.0850	0.0850	0.0850	513	0.1200	0.1200	0.1200	258	0.1200	0.1200	0.1200	258
23	0.0900	0.0900	0.0900	458	0.1100	0.1100	0.1100	307	0.0850	0.0950	0.0900	458	0.1250	0.1300	0.1275	228	0.1300	0.1300	0.1300	219
24	0.0800	0.0850	0.0825	545	0.1100	0.1100	0.1100	307	0.0900	0.0950	0.0925	433	0.1300	0.1300	0.1300	219	0.1200	0.1250	0.1225	247
25	0.0900	0.0900	0.0900	458	0.1100	0.1100	0.1100	307	0.0900	0.0900	0.0900	458	0.1200	0.1250	0.1225	247	0.1300	0.1300	0.1300	219
26	0.0950	0.0950	0.0950	411	0.1100	0.1100	0.1100	307	0.0900	0.0900	0.0900	458	0.1300	0.1300	0.1300	219	0.1300	0.1300	0.1300	219
27	0.0950	0.1000	0.0975	390	0.1100	0.1100	0.1100	307	0.0900	0.0900	0.0900	458	0.1300	0.1300	0.1300	219	0.1300	0.1350	0.1325	211
28	0.1100	0.1050	0.1075	321	0.1000	0.1000	0.1000	371	0.0950	0.1000	0.0975	390	0.1300	0.1350	0.1325	211	0.1400	0.1400	0.1400	189
29	0.1300	0.1300	0.1300	219	0.1100	0.1100	0.1100	307	0.1100	0.1050	0.1075	321	0.1400	0.1400	0.1400	189	0.1400	0.1400	0.1400	189
30	0.1300	0.1300	0.1300	219	0.1100	0.1100	0.1100	307	0.1000	0.1100	0.1050	336	0.1400	0.1300	0.1350	204	0.1300	0.1350	0.1325	211
31	0.1200	0.1250	0.1225	247	0.1100	0.1100	0.1100	307	0.0900	0.1000	0.0950	411	0.1300	0.1350	0.1325	211	0.1300	0.1400	0.1350	204
32	0.1300	0.1200	0.1250	237	0.1100	0.1100	0.1100	307	0.0950	0.1000	0.0975	390	0.1300	0.1400	0.1350	204	0.1400	0.1300	0.1350	204
33	0.1200	0.1300	0.1250	237	0.1100	0.1100	0.1100	307	0.1100	0.1100	0.1100	307	0.1400	0.1300	0.1350	204	0.1400	0.1450	0.1425	183
34	0.1200	0.1300	0.1250	237	0.1000	0.1000	0.1000	371	0.1000	0.1100	0.1050	336	0.1350	0.1400	0.1375	196	0.1350	0.1400	0.1375	196
35	0.1200	0.1300	0.1250	237	0.1100	0.1100	0.1100	307	0.1200	0.1150	0.1175	269	0.1350	0.1400	0.1375	196	0.1350	0.1400	0.1375	196
36	0.1200	0.1250	0.1225	247	0.1100	0.1100	0.1100	307	0.1100	0.1150	0.1125	293	0.1400	0.1400	0.1400	189	0.1400	0.1400	0.1400	189
37	0.1250	0.1250	0.1250	237	0.1100	0.1100	0.1100	307	0.1050	0.1100	0.1075	321	0.1400	0.1400	0.1400	189	0.1300	0.1400	0.1350	204
38	0.1250	0.1250	0.1250	237	0.1100	0.1100	0.1100	307	0.1200	0.1150	0.1175	269	0.1400	0.1400	0.1400	189	0.1400	0.1400	0.1400	189
39	0.1300	0.1300	0.1300	219	0.1150	0.1100	0.1125	293	0.1100	0.1100	0.1100	307	0.1400	0.1400	0.1400	189	0.1400	0.1400	0.1400	189
40	0.1250	0.1250	0.1250	237	0.1100	0.1100	0.1100	307	0.1200	0.1150	0.1175	269	0.1400	0.1400	0.1400	189				

Determinación de la Dureza Vickers

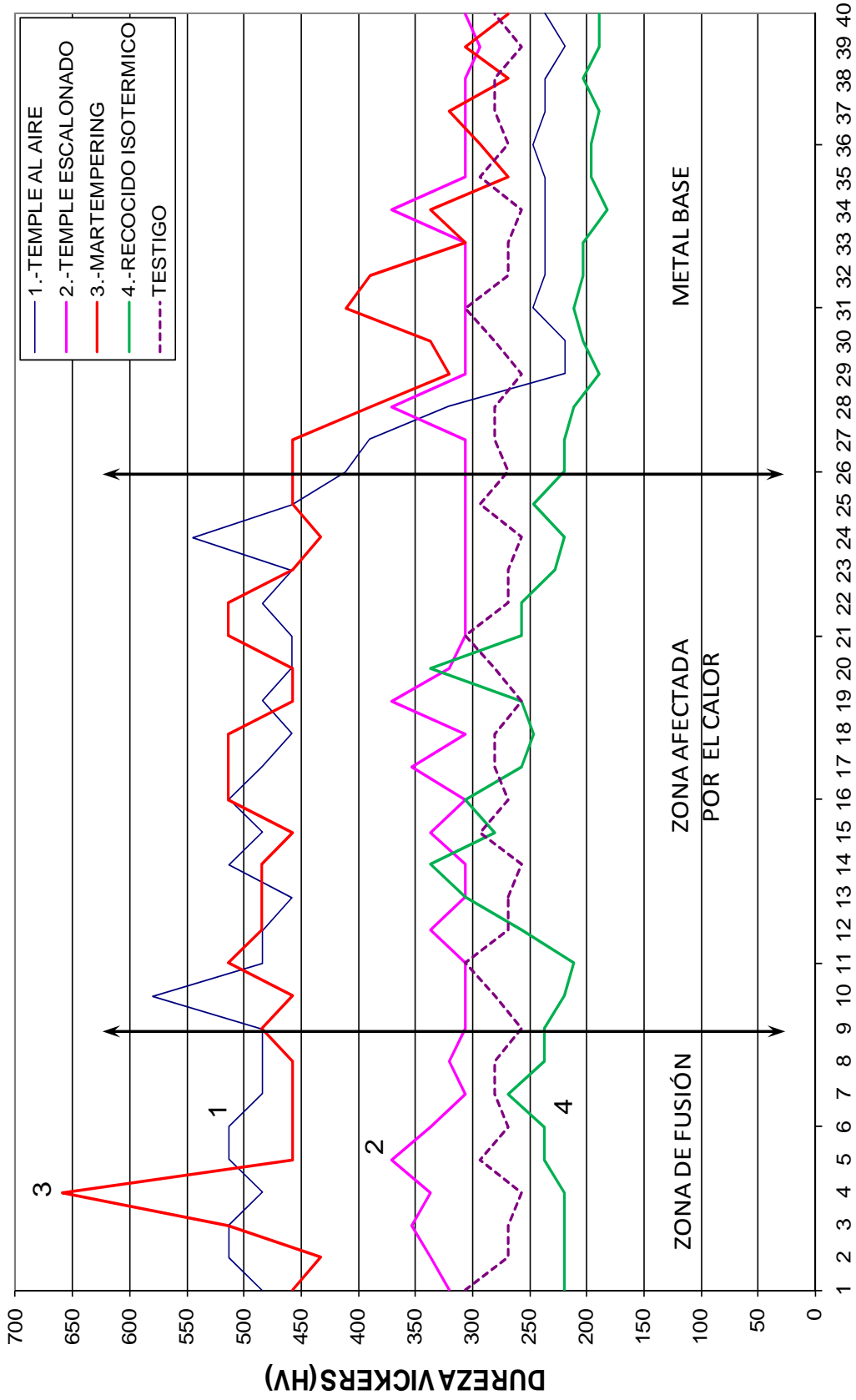
$$HV = 1.854 \frac{P}{(D)^2}$$

P = Carga = 2kg.  
D = Prom. de diagonales

	VALORES PROMEDIO POR ZONA		
	METAL DE APORTE	Z.A.C.	METAL BASE
NORMALIZADO (AL AIRE)	496.90	477.00	239.50
ESCALONADO C/REVENIDO	332.00	311.80	307.00
MARTEMPERING/REVENIDO	462.30	482.00	326.00
RECOCIDO ISOTERMICO	227.00	275.20	202.00
CA-15 MATERIAL OROGINAL	276.30	276.30	276.30

Tabla no. 3 – Resultados de los ensayos de dureza a 4 procesos de soldadura diferentes.

## COMPARACIÓN DE DUREZA VIKCKERS (HV)



### LECTURAS TOMADAS DE LA SOLDADURA AL MATERIAL BASE

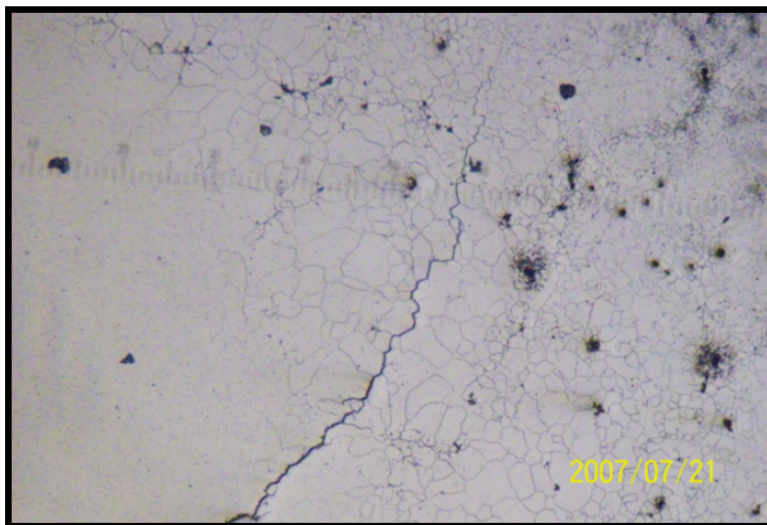
Grafica no.5: Resultados de durezas de los 4 procedimientos de soldadura y testigo.



### IV.3.- RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE METALOGRAFÍA:

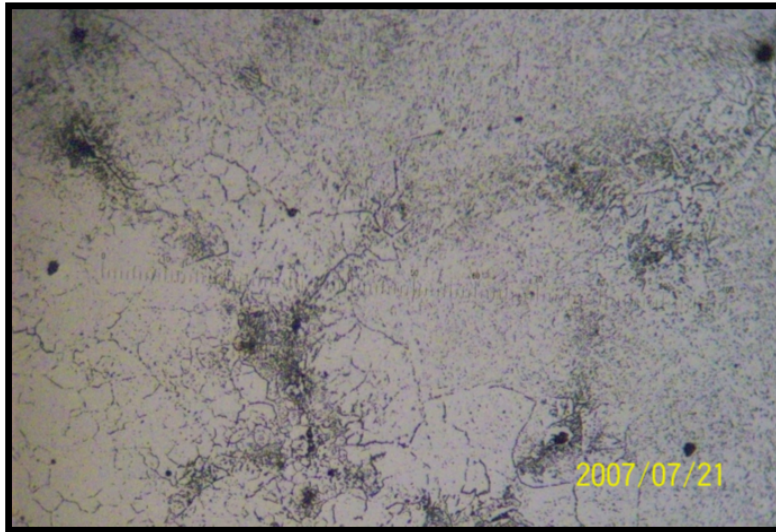
#### TEMPLE AL AIRE AL AIRE.

En el lado izquierdo de la fotografía no.1 se muestra el material de aporte (la soldadura) que queda delimitada por una gran fisura intercrystalina que corre de la línea de fusión hacia el material sólido y que llamamos como ZAC. (Zona Afecta por el Calor). Esta presenta un crecimiento de cristales que se encuentran localizados muy cercanos a la línea de fusión y con una extensión de aproximadamente .2 mm. de espesor y posteriormente se observan cristales de tamaño 7 ASTM, todos los cristales son de ferrita con núcleos de perlita.



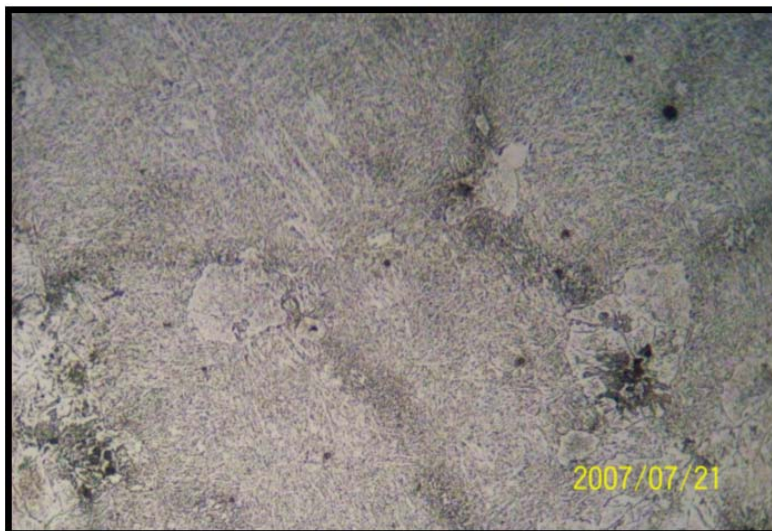
Fotografía no.1: a 100X Soldadura – Zona afectada:

En la fotografía no.2 se presenta una matriz de ferrita con una gran cantidad de carburos globulares de carburos de cromo y pequeñas islas de perlita; los carburos se localizan tanto intercristalinos como transcristalinos.



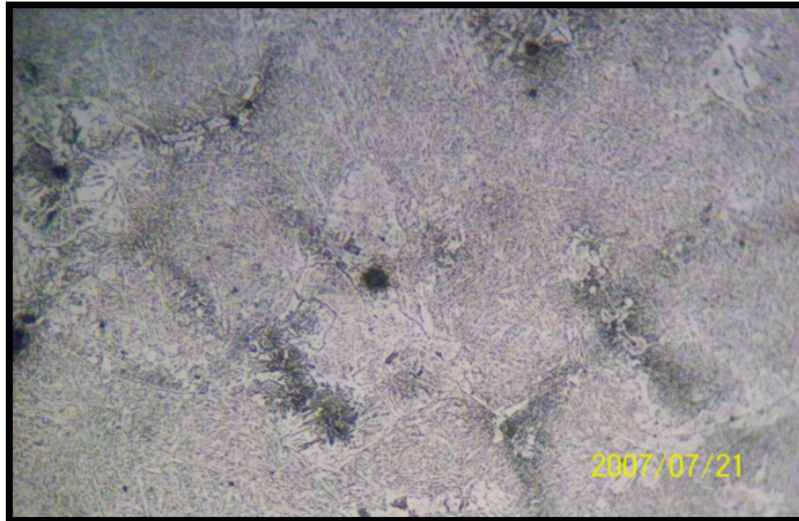
Fotografía no.2 a 200X - ZAC.

En la parte inferior izquierda de la fotografía no.3 se observan cristales de ferrita con carburos e islas de perlita, y el metal base presenta una estructura de Martensita con carburos de cromo en abundancia.



Fotografía no.3 a 200X – ZAC - Metal Base.

Se puede observar en la fotografía no.4 la estructura del metal base que es de Martensita revenida con una gran cantidad de carburos globulares de cromo y con islas de ferrita delta.

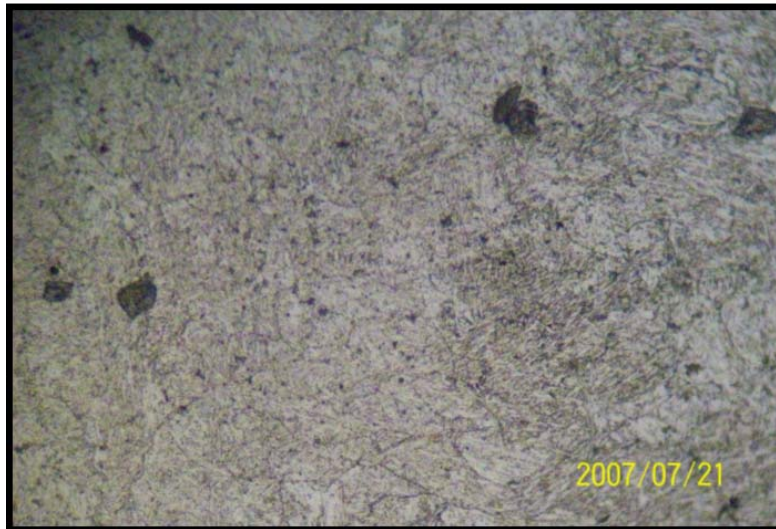


Fotografía no.4 a 200X Metal base.



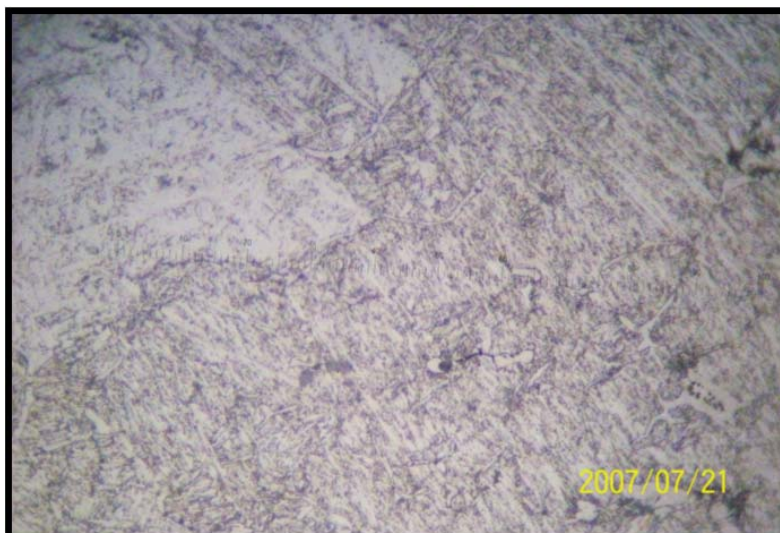
## TEMPLE ESCALONADO

Muestra el material de aporte que presenta una estructura martensítica revenida (lado izquierdo), así como parte de la Z.A.C. con una estructura de Martensita revenida fotografía no.5



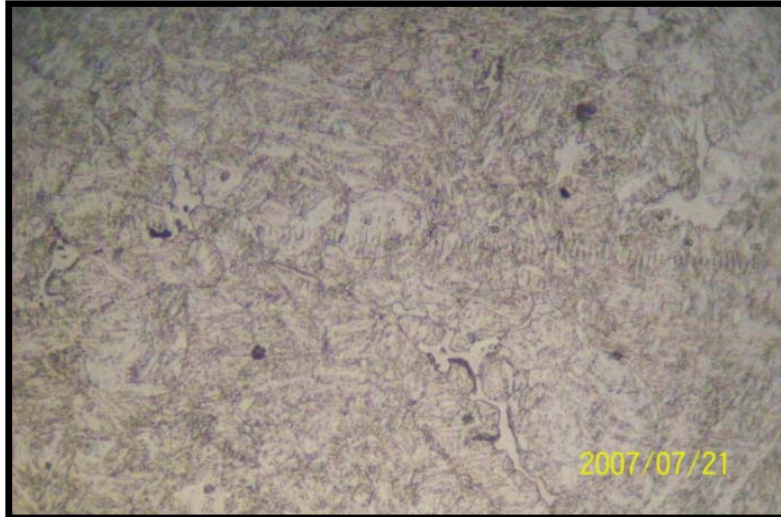
Fotografía no.5 a 200X – Soldadura – ZAC.

La fotografía no.6 Muestra la ZAC con una estructura de Martensita revenida que contiene islas de ferrita delta e impurezas de (MnS) sulfuro de manganeso.



Fotografía no.6 a 400 X – ZAC.

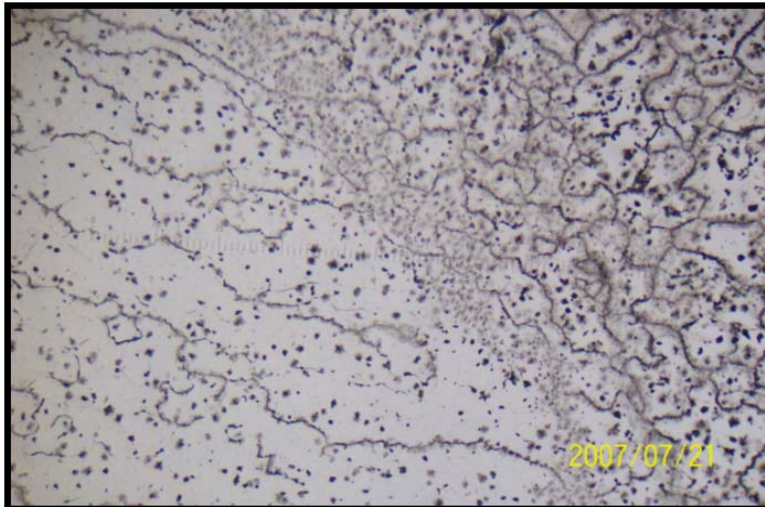
La figura no.7 muestra el metal base que presenta Martensita revenida y ferrita con pequeñas inclusiones de MnS.



Fotografía no.7 a 400X – Metal Base.

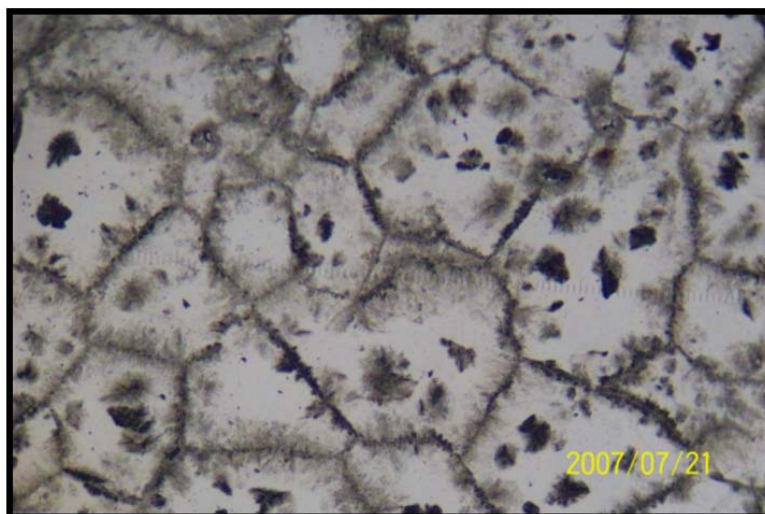
## MARTEMPERING

En la figura no.8 se muestra una estructura dendrítica del material de aporte, así como la parte de la ZAC con una estructura de cristales de ferrita NOM 3 ASTM rodeados con un precipitado de carburos ínter cristalinos y pequeñas islas de transcristalinas de Perlita muy fina.



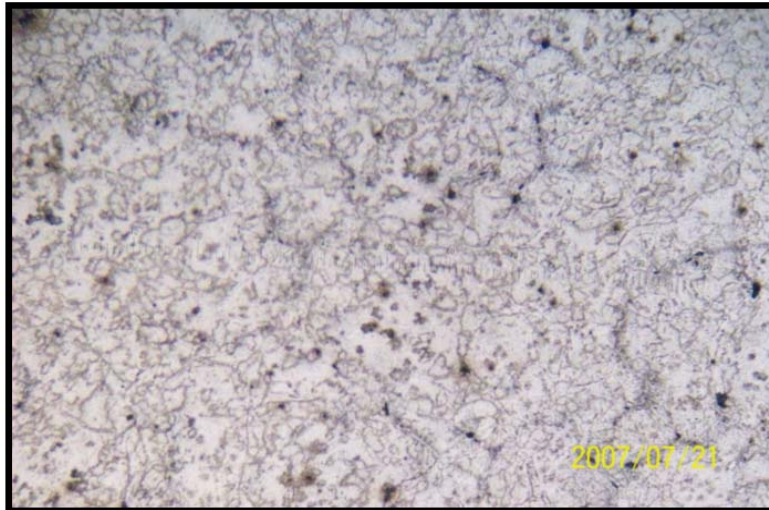
Fotografía no.8 50X – Soldadura – ZAC.

La figura no.9 muestra una estructura de Ferrita equiaxial rodeada de posibles carburos de cromo muy pequeños, así como una estructura de Sorbita transcristalina, con núcleos intercristalinos de Sorbita y Perlita muy fina.



Fotografía no.9 a 200X - ZAC.

En la fotografía no.10 se muestra la estructura del metal base de ferrita equiaxial con estructura perlítica muy pequeña intercrystalina con posibles carburos de cromo.

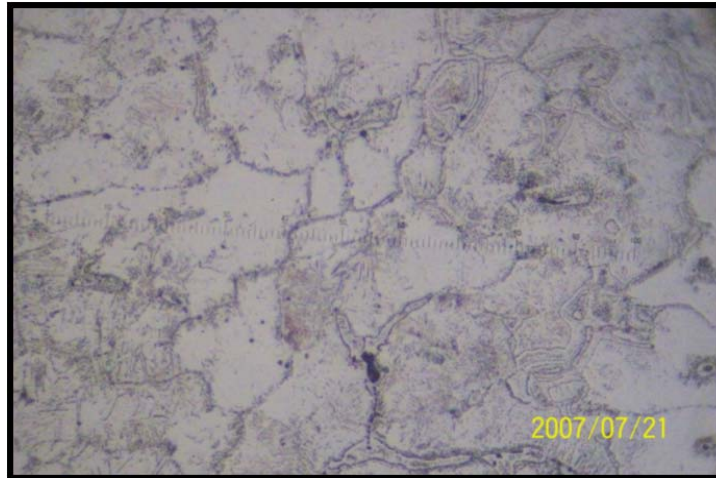


Fotografía no.10 100X – Metal Base.



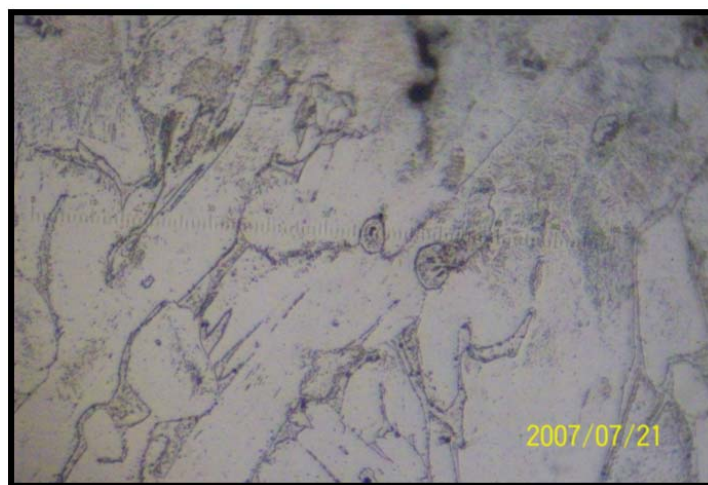
## RECOCIDO ISOTERMICO

La foto 11 muestra la línea de fusión del material de aporte y la ZAC.; La ZAC presenta una matriz de ferrita alfa con Martensita y rodeada con carburos de Cr, también presenta una estructura eutectoide de ferrita delta con carburos de Cr y rodeada también con carburos de Cr.



La fotografía no. 11 a 400X Soldadura- ZAC.

En la foto no.12 la ZAC tiene estructura de ferrita alfa rodeada de pequeños carburos de Cr, así como una estructura basáltica de ferritas delta con carburos de Cr y pequeños cristales de eutectoide de Fe alfa con nódulos de carburo de Cr.

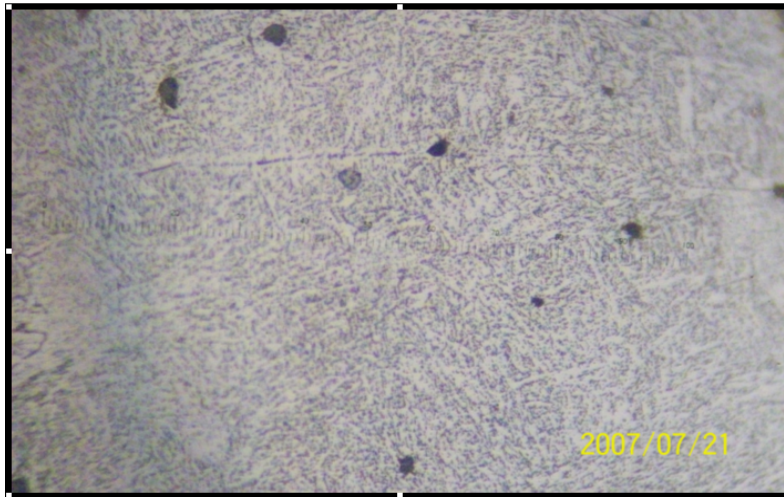


Fotografía no. 12 a 400X – ZAC.



## MATERIAL ORIGINAL

La fotografía no. 13 muestra una estructura de pequeñas placas de Martensita, así como una gran cantidad de carburos de cromo de forma esférica. Presenta también inclusiones de sulfuro de manganeso (MnS)



Fotografía no.13 a 400X Metal base testigo.

# CAPÍTULO V

“ DISCUSIÓN DE RESULTADOS ”

## **V.1.- DISCUSIÓN DE LOS ENSAYOS DE TENSIÓN**

El ensayo de tensión, muestra que los materiales que fueron sujetos a los tratamientos térmicos post-soldadura de enfriamiento escalonado y recocido isotérmico. Fueron menores al resultado obtenido en la muestra original, en un 32.7% y 10.6% respectivamente en la ZAC haciendo notar que el tratamiento de enfriamiento escalonado es el que obtuvo el más bajo de todos los resultados de los tratamientos térmicos post-soldadura realizados.

Los resultados obtenidos de los ensayos de tensión de los tratamientos térmicos de normalizado y enfriamiento martémpering, fueron superiores en un 18.8% y 34.8% respectivamente, hay que hacer notar, que el enfriamiento al aire o normalizado que el material presentó grietas en la ZAC y a pesar de esto, su resistencia fue superior al material original fundido sin soldar.

En el límite elástico presenta la condición que los tratamientos térmicos temple escalonado y recocido isotérmico fueron menores en un 38.7% y 25.2% respectivamente en su ZAC, con respecto al resultado obtenido en la muestra original. Estos resultados hacen que estas condiciones permitan que el material sea tenaz como el material original, ya que diferencia entre la resistencia máxima y el límite elástico es de 35 MPa y 83 MPa respectivamente y el material original obtuvo 85 MPa.

Los resultados del límite elástico de los ensayos de tensión en la región de la ZAC, de los tratamientos térmicos post-soldadura de temple al aire y martémpering fueron mayores en un 18.1% y 32.2% respectivamente, y sus diferencias entre sus resistencias máximas y límites elásticos fueron de 4 MPa y 15 MPa respectivamente, esto indica que su tenacidad es baja con respecto al material original fundido sin soldar con valor de 85 Mpa

La elongación mostró dos grupos de comportamiento, el primero que no tuvo deformación elevada que esta representado por los tratamientos de temple al aire y martémpering, así mismo la muestra original y el segundo grupo que está conformado por los tratamientos de recocido isotérmico y temple escalonado.

La deformación del primer grupo se podía considerar con una medida de 0.0112 mm/mm. El segundo grupo tendría una medida de deformación de .00423 mm/mm es decir, que el segundo grupo representa el 38% de la deformación máxima media del primer grupo.

## **V.2.- DISCUSIÓN DE LOS ENSAYOS DE DUREZA:**

Los métodos de enfriamiento post-soldadura que se aplicaron a las muestras soldadas de CA-15 fueron:

- \* Temple al Aire = (normalizado)
- \* Temple escalonado + revenido
- \* Martémpering + revenido
- \* Recocido Isotérmico

Sus resultados de dureza obtenidos muestran cambios significativos entre ellos y principalmente con la muestra original de CA-15.

Analizaremos cada una de las zonas representativas de donde fueron obtenidos los resultados durante los ensayos de dureza, mismos que comprendieron desde la zona de fusión o metal de aporte, la ZAC, y el metal base.

### **A).- Zona de fusión ó metal de porte.**

La zona que se consideró como material de aporte está comprendida entre las lecturas 1 a la 9; estas presentan diferencias significativas con respecto al material original CA-15, ya que sí presenta modificaciones por los tratamientos post-soldadura; las muestras enfriadas por normalizado, temple escalonado + revenido y martémpering + revenido presentaron un incremento en la dureza escala Vickers del 80% , 67% y 20% respectivamente al material original, no así la muestra tratada con recocido Isotérmico la cual dio un 18% menos en su dureza.

### **B).- Zona Afectada por el Calor (ZAC).**

La zona considerada como ZAC es la que se localizó entre las lecturas 10 y 26 las cuales presentan diferencias significativas con respecto al material original. Con estos resultados los tratamientos térmicos post-soldadura influyen directamente, ya que los tratamientos de temple al aire, temple escalonado/revenido y martémpering/revenido tuvieron incrementos en la dureza de 73%, 13% y 74%; mientras que el recocido isotérmico tuvo un decremento del 0.004%.

### **C).- Metal Base.**

La zona conocida como es la que se localizó entre las lecturas 27 y 40 las cuales presenta decrementos en la dureza en forma general con respecto a la muestra original, generando por los tratamiento térmicos post-soldadura ya que el tratamiento térmico de normalizado (temple al aire) y recocido Isotérmico presenta una disminución de 13% y 27% respectivamente; los tratamientos térmicos de temple escalonado/revenido y martémpering/revenido, presenta ligeros incrementos de dureza de 11% y 18% respectivamente.

### V.3.- DISCUSIÓN DEL ANÁLISIS METALOGRAFÍCO

**a).- Temple al Aire:** Estructura ferrítica con carburos globalizados y estructuras eutectoides intercristalinas y transcristalinas.

**b).- Enfriamiento Escalonado:** Estructura conformada por Martensita masiva o de placas con cristales de austenita retenida.

**c).- Temple Martémpering:** Matriz de ferrita y un componente eutectoide del tipo de Troostita (que consta de placas alternadas de ferrita y Cementita) las placas de ferrita y Cementita son extraordinariamente finas o pequeñas. La Troostita tiene la característica de nuclear y crecer a partir de los bordes de cristal. Presentándose en forma de nubes (plumboso) También existen islas oscuras transcristalinas de Troostita.

**d).- Recocido Isotérmico:** Es una matriz de ferrita con cierta morfología Ligeramente basáltica (con picos o agujas) presenta una estructura eutectoide (las que se forman por debajo de 723°C en el interior de los cristales de ferrita y en bordes de cristal se pueden apreciar cristales muy pequeños de la fase eutectoide.

**e).- Material original:** El CA-15 presenta originalmente una estructura de pequeñas placas de Martensita así como una gran cantidad de carburos de cromo de forma esférica. Presenta también inclusiones de MnS.

## CONCLUSIONES.

- El “**Recocido Isotérmico**”: es el procedimiento que se sugiere más indicado para unir por soldadura de arco eléctrico y electrodo revestido el material CA-15. La razón es porque los valores obtenidos de las propiedades mecánicas sobre la ZAC, son más cercanos al metal original es decir, la resistencia a la tensión en un 89% y dureza en 99.6%, además el material presentó una continuidad metalúrgica a niveles de micro y macro estructura es decir, que no se generaron ningún tipo de fracturas.
- El “**Temple escalonado**”: resulto ser el segundo mejor procedimiento por la cercanía de los datos registrados sin embargo los valores de resistencia a la tensión se asemeja en un 67% mientras que el valor de dureza sobrepasan en un 12% al original y aún con estas variaciones el material no presentó fracturas.
- EL “**Martempering**”: en este procedimiento de unión del CA-15 se obtuvieron en la ZAC valores en la resistencia a la tensión y dureza superiores en un 35% y un 74% respectivamente al original e igual que los anteriores no presentó fracturas debido al tratamiento térmico aplicado. Sin embargo no es recomendable puesto que la ZAC mantiene una gran diferencia en sus propiedades con respecto al metal base y el material de aporte.



- El **“Temple al aire”**: este procedimiento fue propuesto para confirmar que el CA-15 es un material con alta respuesta térmica no se le aplicó precalentamiento ni tratamiento térmico post-soldadura esperando que el material manifestara tal comportamiento, obtuvimos que la ZAC presento valores superiores de resistencia a la tensión del 19% y dureza en un 73% con la diferencia que esta si presento agrietamiento a niveles macro y micro estructurales. Por lo que no se recomienda este procedimiento de soldadura para unir al CA-15.

## BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA.

1. Vander Voort, George F., 1984, Metallography, principles and practice., McGraw-Hill series in materials science and engineering. pp (577).
2. Donald Peckner and I.M. Berstein. 1977, Handbook of Stainless Steels., McGraw-Hill, pp (11-1 a 11-19).
3. Donald Peckner and I.M. Berstein. 1977, Handbook of Stainless Steels., McGraw-Hill, pp (26-1 a 26-23).
4. Robert M. Brick, Alan W Pense, Robert B Gordon. 1977, Structure and Properties of Engineering Materials. pp (337-355).
5. George Krauss, 1990, Steels: Heat Treatment and Processing Principles, ASM-International. Materials Park, Ohio. pp (267).
6. American Welding Society. Welding Handbook, 7<sup>a</sup>.ed., vols.1 y 3 and from the 6<sup>a</sup>.ed., vol. 4
7. Dicaprio, Gabriele. Los aceros inoxidables, 1<sup>a</sup>. Ed. Española, Ebrisa, S.A., Barcelona 1987.
8. American Society for metals. Heat Treater's Guide: Standard Practices and Pcedures for Steel October, 1982.
9. American Society For Metals, 1985, Metals Handbook Ninth Edition vol. 3 Properties and Selection: Stainless Steels Tool Materials end especial Porpose Metals. pp(104-108).
10. Dr. Ignacio H. Gómez, Revista Técnica Vol.2 Mexinox, Soldadura de Aceros Inoxidables. Cracovia 54, San Angel, Mexico D.F.

11. Schoefer, E.A.: Appendix to paper, Mössbauer-effect Examination of Ferrite in Stainless Steel Welds and Casting, Weld. J., Vol. 39, p.10-s, January 1974.
12. Richardson, F. D., and W.E. Dennis: Effect of Chromium on the Thermodynamic Activity of carbon I Liquid Iron, Iron Steel Inst. London, vol. 175, pp 257-263, 1953.
13. Crafts, W., and H.P. Rassbach: Melting Low Carbon Stainless Steels, Electr. Furn. Conf. Proc., vol. 9 pp. 95-104, 1951.
14. Method and System for the Production on Stainless Steel, French Patent 1430516, Jan 24, 1966.
15. Bain, E. C., and R.H. Aborn: in "Metals Handbook," p. 1194, American Society for Metals, Metals Park Ohio, 1948.
16. Read, W. T.: "Dislocation in Crystals," McGraw-Hill, New York, 1953.
17. Schramm, R.E., and R.P. Reed: Metall. Trans., vol. 6A, p. 1345, 1975.
18. J. Z. Briggs and Parker.: The Super 12% Cr Steels., Climax Molybdenum Company of Michigan, second printing, 1982.
19. L. N. Belyakov and V .I. Kozlovskaya: Residual Austenite in Martensitic Stainless Steels. Metallovedeniye I termicheskaya obrabotka metallov (1965) vol.2 pp 52,54.
20. R. Brook and J.E. Rusell: Highly-alloyed martensitic steels. Metallurgical developments in high-alloy steels. ISI Special Report 86 (1964) pp. 19, 33.
21. F. A. Brandt, H. F. Bishop and W. S. Pellini: Notch Ductility of Type 410 (12% Cr) Stainless Steel. TASM 48 (1956) pp. 368, 390.
22. C. M. Wayman, Introduction to the Crystallography of Martensite Transformations, MacMillan, New York, 1964.

23. W. H. Harris and M. Cohen, Stabilization of the Austenite-Martensite, Transformation, Trans AIME, Vol. 180, 1949, pp. 447-470.
24. Atlas of Isothermal Transformation and Cooling Transformation Diagrams, American Society for Metals, Metals Park, OH, 1977.
25. Supplements to Atlas of Isothermal Transformation Diagrams, United States Steel Corp., Pittsburgh, 1953.
26. Transformation Diagrams of Steels Made in France, Vol 1-4, I.R.S.I.D., St Germaine-en-Laye, 1953-1960.
27. M. A. Grossmann and E.C. Bain, Principles of Heat Treatment, 5<sup>th</sup> ed., American Society for Metals, Metals Park, OH, 1964.
28. Cast Iron, in Metals Handbook, Vol 1 Properties and Selection: Irons and Steels, American Society for Metals, Metals Park, OH, 1978, P 1-106.
29. Eichelman, G. H., Jr., and F. C. Hull: The Effect of Composition on the Temperature of Spontaneous Transformation of Austenite to Martensite in 18-8 Type Stainless Steel, Trans. Am. Soc. Met., vol.45pp. 101-104, 1953.
30. René Castro and Roland Tricot: Study of the isothermal transformations in 17% Cr stainless steels. Nature and morphology of the transformation products (continued). Societe d'Electrochimie, d'Electrometallurgie et des Acieries électriques d'Ugine/Savoy. Communication to the Autumn Meeting of the Société française de Metallurgie, Paris, 1961. Memories Scientifiques, 59(9), 1962.
31. ASTM-E-8M-95 y 95a Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials and (Metric).
32. ASTM-E-95-92 Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials.
33. ASTM-E-384 Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials.

34. ASTM-E-3-01 Standar Practice for Preparation of Metallographic Specimens
35. ASTM-E-340-00 Standard Test Method for Macroetching Metals and Alloys
36. ASTM-E-407-99 Standard Practice for microetching Metals and Alloys
37. ASTM-E-1558-99 Standard Guide for Electrolytic Polishing of Metallographic Specimens.