

11161



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO**

---

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
CUAUTITLAN

“EFECTO DE LA DILUCION Y LA PRECIPITACION DE  
CARBUROS EN PROPIEDADES MECANICAS, EN LA  
SOLDADURA DE MATERIALES DISIMILES”

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRO EN INGENIERIA**

P R E S E N T A :

**MIGUEL ZAMORA CORDERO**

ASESOR DE TESIS: M. en I. HECTOR ENRIQUE CURIEL REYNA



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**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

Infinitas gracias a mi familia, a mi mamá M<sup>r</sup> del Socorro Cordero Aguas, mi papá Miguel A. Zamora, a mis dos hermanos Julieta Angelica (bubbie) y Angel (jnp-shred), por su amor, apoyo y bastante tolerancia. Gracias a Dios y mi Universidad Nacional Autónoma de México, mi alma mater. A todos los profesores y compañeros (Joaquín DP.V. y Félix G.). A toda aquella gente que me apoyo y ayudo en la realización del presente, en la FES-C. CAT, CU, y el IMT Ing. J. Contreras, M. en I. Ramos C., Ing. Osono (FES-C), Ing. Noé (CAT), Ing. Juan Terán (IMT), Biol. Germán A. e Ing. Armando (CU), al igual le agradezco de forma extra especial a mi asesor.

# Indice

|              |       |   |
|--------------|-------|---|
| Resumen      | ..... | 1 |
| Introducción | ..... | 3 |
| Objetivo     | ..... | 5 |
| Hipótesis    | ..... | 6 |

## Capítulo I Materiales Base Utilizados

|  |       |    |
|--|-------|----|
| I.1. Aceros al Carbono   | ..... | 7  |
| I.1.1. Consideraciones de Soldabilidad                                   | ..... | 9  |
| I.1.2. Acero Dulce   | ..... | 10 |
| I.2. Aceros Inoxidables  | ..... | 11 |
| I.2.1. Aceros Inoxidables Ferríticos                                     | ..... | 11 |
| I.2.2. Aceros Inoxidables Martensíticos                                  | ..... | 12 |
| I.2.3. Aceros Inoxidables Austeníticos                                   | ..... | 12 |
| I.2.3.1. Soldadura del Acero Inoxidable                                  | ..... | 13 |
| I.2.3.2. Soldadura del Acero Inoxidable Austenítico                      | ..... | 14 |
| I.2.3.3. Efecto de la ferrita  | ..... | 14 |
| I.3. Efecto de los elementos de aleación                                 | ..... | 18 |
| I.3.1. Generalidades   | ..... | 18 |
| I.3.2. Clasificación de los elementos de aleación                        | ..... | 18 |
| I.3.3. Influencia de los aleantes sobre el diagrama Fe-Fe <sub>3</sub> C | ..... | 19 |

## Capítulo II Parte Experimental

|                                       |       |    |
|---------------------------------------|-------|----|
| II.1. Planteamiento de problema       | ..... | 23 |
| II.2. Parámetros de la Investigación  | ..... | 23 |
| II.2.1. Condiciones Propuestas        | ..... | 24 |
| II.3. Metodología de la Investigación | ..... | 24 |
| II.3.1. Prueba de Dureza              | ..... | 24 |
| II.3.2. Microscopía óptica            | ..... | 25 |
| II.3.3. Difracción de rayos-X         | ..... | 25 |
| II.3.4. Prueba de Tensión             | ..... | 27 |

|   |    |
|---|----|
| II.3.4.1. Curva Esfuerzo-Deformación Ingenieril | 27 |
| II.3.4.2. Curva Esfuerzo-Deformación Verdadera  | 29 |
| II.3.5. Microscopía Electrónica (SEM)           | 31 |

**Capítulo III**

**Resultados de la Parte Experimental**

|                                      |    |
|--------------------------------------|----|
| III.1. Prueba de Dureza              | 32 |
| III.1.1. Condición No.1 (7018-A)     | 32 |
| III.1.2. Condición No.2 (7018-W)     | 33 |
| III.1.3. Condición No.3 (308-A)      | 34 |
| III.1.4. Condición No.4 (308-W)      | 35 |
| III.1.5. Condición No.5 (312-A)      | 36 |
| III.1.6. Condición No.6 (312-W)      | 37 |
| III.2. Microscopía óptica            | 38 |
| III.2.1. Condición No.1 (7018-A)     | 38 |
| III.2.2. Condición No.2 (7018-W)     | 39 |
| III.2.3. Condición No.3 (308-A)      | 40 |
| III.2.4. Condición No.4 (308-W)      | 42 |
| III.2.5. Condición No.5 (312-A)      | 44 |
| III.2.6. Condición No.6 (312-W)      | 46 |
| III.3. Difracción de rayos-X         | 48 |
| III.3.1. Condición No.1 (7018-A)     | 49 |
| III.3.2. Condición No.2 (7018-W)     | 50 |
| III.3.3. Condición No.3 (308-A)      | 53 |
| III.3.4. Condición No.4 (308-W)      | 54 |
| III.3.5. Condición No.5 (312-A)      | 57 |
| III.3.6. Condición No.6 (312-W)      | 58 |
| III.4. Prueba de Tensión             | 60 |
| III.4.1. Condición No.1 (7018-A)     | 60 |
| III.4.2. Condición No.2 (7018-W)     | 64 |
| III.4.3. Condición No.3 (308-A)      | 68 |
| III.4.4. Condición No.4 (308-W)      | 72 |
| III.4.5. Condición No.5 (312-A)      | 76 |
| III.4.6. Condición No.6 (312-W)      | 80 |
| III.5. Microscopía Electrónica (SEM) | 84 |

|   |       |     |
|---|-------|-----|
| III.5.1. Condición No.1 (7018-A)            | ..... | 84  |
| III.5.2. Condición No.2 (7018-W)            | ..... | 85  |
| III.5.3. Condición No.3 (308-A)             | ..... | 86  |
| III.5.4. Condición No.4 (308-W)             | ..... | 87  |
| III.5.5. Condición No.5 (312-A)             | ..... | 88  |
| III.5.6. Condición No.6 (312-W)             | ..... | 89  |
| <b>❖❖❖❖❖❖ Capítulo IV ❖❖❖❖❖❖</b>            |       |     |
| <b>Análisis y Discusiones de Resultados</b> |       |     |
| IV.1. Ensayo de Dureza                      | ..... | 91  |
| IV.2. Microscopía óptica                    | ..... | 91  |
| IV.3. Difracción de rayos-X                 | ..... | 93  |
| IV.4. Prueba de Tensión                     | ..... | 94  |
| IV.5. Microscopía electrónica (SEM)         | ..... | 95  |
| IV.6. Análisis y Discusiones Generales      | ..... | 96  |
| <b>❖❖❖❖❖❖ Capítulo V ❖❖❖❖❖❖</b>             |       |     |
| <b>Conclusiones</b>                         |       |     |
| V.1. Conclusiones Generales                 | ..... | 98  |
| V.2. Recomendaciones y Conclusiones Finales | ..... | 101 |
| V.3. Investigaciones Futuras                | ..... | 102 |
| Bibliografía                                | ..... | 104 |

## Resumen

La necesidad de la unión por procesos de soldadura de materiales disímiles, es una actividad común en la industria; la presente investigación está realizada en la soldadura entre metal base acero inoxidable tipo AISI 304 y un acero al carbono tipo ASTM A-36, usando materiales de aporte E-7018, E-308-16, y E-312-16.

La presencia de los elementos químicos en ambos aceros, asociados a los efectos de temperatura, tiempo y velocidad de enfriamiento, provocan cambios estructurales y metalúrgicos en la zona afectada por el calor y zona de dilución o de mezcla. Se observaron cambios físicos y mecánicos en cada una de las seis juntas fabricadas de metales disímiles, debido a la morfología que resulta de las estructuras presentes, así también por la precipitación de carburos. La unión de estos materiales disímiles, es hacer que ellos tengan propiedades físicas aceptables después de que se hayan unido, para determinar esto se ejecutaron varias pruebas, en cada una de las pruebas se tomaron en consideración la preparación de cada probeta, para cada prueba. Estas pruebas fueron: Dureza (ensayo Vickers), metalografía, difracción de rayos-X, Tensión cuasi-estáticas y microscopía electrónica de barrido (SEM).

La selección de materiales tiene que ser siempre un elemento importante en el planteamiento de cualquier toma de decisiones en ingeniería. Una consideración importante en el proyecto, fue seleccionar un tipo de acero que es comúnmente usado en la industria de la soldadura; para llevar a cabo la soldadura de los materiales por arco eléctrico protegido, se escogieron materiales de aporte diferentes, además se realizaron enfriamientos después de haberse ejecutado la soldadura, obteniendo así diferentes condiciones en el estudio del presente trabajo y así determinar el comportamiento más satisfactorio (el material de aporte o electrodo escogido y el procedimiento desarrollado).

En el primer capítulo como marco teórico se describen los materiales base, de tal manera que se pueda observar sus propiedades así como también su soldabilidad y enfatizar la diferencia que existe entre cada uno de ellos. En el segundo capítulo se explica el planteamiento del problema, además se describe la metodología de investigación con los parámetros que influyen en el desarrollo del mismo. En el tercer capítulo se exponen los resultados por partes, en donde se puede observar el comportamiento de las seis condiciones en cada una de las pruebas.

Posteriormente en el capítulo cuarto se realizan análisis de las seis condiciones en cada una de las pruebas, y por último en el capítulo quinto se dan conclusiones por prueba, conclusiones generales y en las recomendaciones dar a conocer la “ mejor condición de seis que se proponen, específicamente la mejor condición recomendada se hace en base a los resultados y al significado de Soldadura. Por último, solamente se dan algunas sugerencias para la continuación de futuras pruebas.



## Introducción

En la soldadura de aceros disímiles, el material de aporte se debe parecer en composición de aleación a los materiales base para producir una soldadura que tenga una fase matriz continua, y específicamente el material de aporte debe ser capaz de aceptar dilución por los metales base, sin producir una microestructura sensible al fisuramiento; la resistencia del metal soldado debería ser igual o equivalente o mejor que la de los metales base (al más débil). Si existieran grandes diferencias en temperaturas de fusión, se pueden presentar problemas complejos. Una diferencia en la temperatura de fusión de los materiales base o el metal soldado y un metal base, puede producir en ruptura del metal que tenga una temperatura de fusión más baja. (Irving 1992, Doody 1992, *Welding Handbook* 1976, *Welding Handbook*, 1984)

Muchos metales y aleaciones son relativamente buenos conductores de calor, pero algunos son mucho mejores que otros. La conducción rápida de calor desde el charco de metal fundido a un material adyacente, puede afectar la energía de entrada requerida para fusionar localmente el material base; a veces el calor de la soldadura debe ser dirigida al material que tenga la conductividad térmica más alta para obtener un balance. La conductividad térmica de un metal es una función de su temperatura; cuando se sueldan materiales disímiles, el calor perdido de los metales bases puede ser balanceado por un método de precalentamiento del metal que contenga la más alta conductividad térmica, la dilución es más uniforme con el balance de calentamiento. (Irving 1992, Doody 1992, Dullieu 1992, Horowitz 1990)

Las características de la expansión térmica de dos materiales base disímiles y el metal soldado son consideraciones importantes. Grandes diferencias en los coeficientes térmicos de expansión de metales adyacentes durante el enfriamiento, inducen a esfuerzos de tensión en un metal y esfuerzos de compresión en el otro.

La desigualdad en coeficientes en una soldadura de aceros disímiles produce esfuerzos en la junta, las propiedades del metal soldado dependerán de la composición del material de aporte y en parte por dilución y proceso de soldadura. Además hay dos diferentes zonas afectadas por el calor adyacentes al metal soldado; las propiedades mecánicas y físicas del metal soldado, así como de aquellas zonas afectadas por el calor deben ser consideradas. Las propiedades de las diferentes regiones metalúrgicas en la soldadura son particularmente importantes, tales propiedades incluyen

coeficiente de expansión térmica, módulo elástico y resistencia a la tensión. (Irving 1992, Doody 1992, Dulieu 1992, Horowitz 1990, Gerz&Timoshenko 1995, R. W. Hertzberg 1996)

## **Objetivo.**

Las propiedades mecánicas y físicas de los materiales son las que determinan la aplicación en el diseño de un producto. El estudio experimental fue conducido, para determinar: Los efectos de los parámetros en la soldadura y para optimizar esos parámetros que tienen más influencia en la formación de zonas duras, precipitación de carburos, dilución y fisuramientos, además de brindar el mejor desempeño en propiedades en la soldadura de aceros disímiles.

## **Objetivos Particulares**

- Analizar el efecto de la dilución en propiedades mecánicas, en la soldadura de los materiales disímiles.
- Analizar el efecto de la precipitación de carburos en las propiedades mecánicas, en la soldadura de los materiales disímiles.
- Analizar el efecto de un enfriamiento en agua, posterior a la soldadura.
- Encontrar el procedimiento y electrodo que nos brinde las mejores propiedades mecánicas en la soldadura de aceros disímiles.

Las características finales encontradas, pueden indicar el resultado final para cada condición, es decir la más satisfactoria tecnológicamente o la más aceptable para el estudio realizado.

## **Hipótesis**

El concepto básico de aleación, las características metalúrgicas de la aleación resultante, y sus propiedades físicas y mecánicas deben ser consideradas cuando se quiere soldar materiales disímiles. Por lo tanto, si hay fases complejas o componentes intermetálicos que son formados cuando los dos metales base son soldados, el éxito de la soldadura dependerá probablemente de la del material de aporte y el procedimiento de soldadura que prevenga tales componentes o fases y produzcan una soldadura con propiedades aceptables. Por lo que, el número, tipo, cantidad y arreglo metalúrgico de las fases presentes determinarán las propiedades y desenvolvimiento del metal soldado. La solidificación y los rangos de enfriamiento, tiene además un significativo efecto en las fases presentes y la estructura metalúrgica del metal.

## Capítulo I. Materiales Base Utilizados

### I.1. Aceros al Carbono.

Los aceros al carbono son aleaciones de Hierro y Carbono en donde el Carbono no excede del 1%, el porcentaje de Manganeso no excede del 1.65% y Cobre en cada uno de ellos no excede del 0.60%; otros elementos de aleación normalmente se presentan solamente en cantidades residuales. Las propiedades y soldabilidad de estos aceros depende principalmente del contenido de carbono, otros elementos tienen un efecto limitado, las variaciones en carbono tienen el efecto más grande o importante sobre las propiedades mecánicas, que con el incremento de contenido de Carbono se empieza a incrementar la dureza y resistencia. Los aceros al carbono generalmente se categorizan de acuerdo en su contenido de carbono como se indica en la tabla 1.1. Los estándares de la ASTM designan a los aceros al carbono sobre las bases de propiedades químicas y mecánicas, o ambas, en conjunción con la aplicación; éstos son listados en la tabla 1.2. (Harvey 1982, Lancaster 1980)

**Tabla 1.1.-** Clasificación y soldabilidad de los aceros al carbono

| Nombre común        | % de C.   | Típica Dureza | Típico uso   | Soldabilidad   |
|---------------------|-----------|---------------|--|--|
| Acero Bajo Carbono  | 0.15 máx. | 60 HRB        | Placa especial y formas, hojas, tiras, electrodos de soldadura | Excelente  |
| Acero Dulce         | 0.15-0.30 | 90HRB         | Formas estructurales, paca y barras                            | Buena  |
| Acero Medio Carbono | 0.30-0.50 | 25HRC         | Partes para máquina y herramienta                              | Razonable (pre y pos Calentamiento normalmente requeridos, procedimientos de soldadura de bajo hidrógeno son recomendados) |
| Acero Alto Carbono  | 0.50-1.00 | 40HRC         | Resortes, troqueles, y rieles de tren                          | Pobre (proceso de soldadura de bajo hidrógeno, pre y postcalentamiento requeridos)   |

**Tabla 1.2.- Composición y requerimientos de resistencia de aceros al carbono ASTM.**

| Aplicación   | ASTM Estándar | Tipo o Grado      | Típica composición (límites), porcentaje |              |           | Resistencia a la tensión, ksi | Min. límite elástico, ksi |
|--|---------------|-------------------|--|--------------|-----------|-------------------------------|---------------------------|
|  |               |                   | C%                                       | Mn%          | Si%       |                               |                           |
| <b>Aceros Estructurales</b>  |               |                   |  |              |           |                               |                           |
| Edificios soldados, puentes, y en general. Para propósitos estructurales | A36           |                   | 0.29                                     | 0.80-1.20    | 0.15-0.40 | 58-80                         | 36                        |
| Edificios soldados, y en general. Para propósitos estructurales          | A529          |                   | 0.27                                     | 1.20         | -         | 60-85                         | 42                        |
| Para propósitos generales en hojas y tiras                               | A570          | 30,33,36,40,45.50 | 0.25<br>0.25                             | 0.90<br>1.35 | -<br>-    | 49-55<br>60-65                | 30<br>45                  |
| Propósitos generales en placa (dureza mejorada)                          | A573          | 58                | 0.23                                     | 0.60-0.90    | 0.10-0.35 | 58-71                         | 32                        |
|  |               | 65                | 0.26                                     | 0.85-1.20    | 0.15-0.40 | 65-77                         | 35                        |
|  |               | 70                | 0.28                                     | 0.85-1.20    | 0.15-0.40 | 70-90                         | 42                        |
| <b>Aceros para recipientes a presión</b>                                 |               |                   |  |              |           |                               |                           |
| Placa, bajo y mediana resistencia a la tensión                           | A285          | A                 | 0.17                                     | 0.90         | -         | 45-65                         | 24                        |
|  |               | B                 | 0.22                                     | 0.90         | -         | 50-70                         | 27                        |
|  |               | C                 | 0.28                                     | 0.90         | -         | 55-75                         | 30                        |
| Placa, manganeso-silicón   | A299          |                   | 0.30                                     | 0.90-1.40    | 0.15-0.40 | 75-95                         | 40                        |
| Placa, aplicaciones a baja temperatura                                   | A442          | 55                | 0.24                                     | 0.60-0.90    | 0.15-0.40 | 55-75                         | 30                        |
|  |               | 60                | 0.27                                     | 0.60-0.90    | 0.15-0.40 | 60-80                         | 32                        |
| Placa, a mediana y alta temperatura de servicio                          | A515          | 55                | 0.28                                     | 0.90         | 0.15-0.40 | 55-75                         | 30                        |
|  |               | 60                | 0.31                                     | 0.90         | 0.15-0.40 | 60-80                         | 32                        |
|  |               | 65                | 0.33                                     | 0.90         | 0.15-0.40 | 65-85                         | 35                        |
|  |               | 70                | 0.35                                     | 1.20         | 0.15-0.40 | 70-90                         | 38                        |
| Placa, moderada y baja temperatura de servicio                           | A516          | 55                | 0.26                                     | 0.60-1.20    | 0.15-0.40 | 55-75                         | 30                        |
|  |               | 60                | 0.27                                     | 0.85-1.20    | 0.15-0.40 | 60-80                         | 32                        |
|  |               | 65                | 0.29                                     | 0.85-1.20    | 0.15-0.40 | 65-85                         | 35                        |
|  |               | 70                | 0.31                                     | 0.85-1.20    | 0.15-0.40 | 70-90                         | 38                        |
| Placa, carbono - Mn - silicón Tratamiento por calor                      | A537          | 1 (b)             | 0.24                                     | 0.70-1.60    | 0.15-0.50 | 65-90                         | 45                        |
|  |               | 2 (c)             |  |              |           | 75-100                        | 55                        |
| <b>Conductos y tuberías</b>  |               |                   |  |              |           |                               |                           |
| Soldadura y tubería sin costura, negra y galvanizada                     | A53           | A                 | 0.25                                     | 0.95-1.20    | -         | 48 min.                       | 30                        |
|  |               | B                 | 0.30                                     | 0.95-1.20    | -         | 60 min.                       | 35                        |
| Tubería sin costura para servicio a altas temperaturas                   | A106          | A                 | 0.25                                     | 0.27-0.93    | 0.10 min. | 48 min.                       | 30                        |
|  |               | B                 | 0.30                                     | 0.29-1.06    | 0.10 min. | 60 min.                       | 35                        |
|  |               | C                 | 0.35                                     | 0.29-1.06    | 0.10 min. | 70 min.                       | 40                        |
| Tubería estructural  | A501          |                   | 0.26                                     | -            | -         | 58 min.                       | 36                        |

Continúa en la siguiente hoja

**Tabla 1.2.- (Continuación)**

| Aceros de fundición                         |      |       |      |      |      |         |    |
|---|------|-------|------|------|------|---------|----|
| Uso general                                 | A27  | 60-30 | 0.30 | 0.60 | 0.80 | 60 min. | 30 |
| Válvulas para servicio a altas temperaturas | A216 | WCA   | 0.25 | 0.70 | 0.60 | 60-85   | 30 |
|   |      | WCB   | 0.30 | 1.00 | 0.60 | 70-95   | 36 |
|   |      | WCC   | 0.25 | 1.20 | 0.60 | 70-95   | 40 |
| Válvulas para servicio a bajas temperaturas | A352 | LCA   | 0.25 | 0.70 | 0.60 | 60-85   | 30 |
|   |      | LCB   | 0.30 | 1.00 | 0.60 | 65-90   | 35 |
|   |      | LCC   | 0.25 | 1.20 | 0.60 | 70-95   | 40 |

### I.1.1. Consideraciones de Soldabilidad

La microestructura y propiedades mecánicas de una porción del acero calentado (zona afectada por el calor, ZAC) serán cambiados como resultado de la soldadura, tales cambios dependerán de la composición del acero y el rango al cual el acero es calentado y enfriado. El ciclo térmico puede formar martensita en la zona del metal soldado y en la ZAC, la cantidad de martensita formada y dureza del acero dependen del contenido de carbono, así como también de los rangos de calentamiento y enfriamiento. La transformación martensítica y el resultado de alta dureza pueden acarrear fisuramiento en la soldadura o en la zona afectada por el calor, si el metal no puede someterse a un relevado de esfuerzos, el grado de endurecimiento en la zona afectada por el calor es una consideración importante en la soldabilidad de un acero al carbono, obviamente la soldabilidad generalmente decrece con el incremento de carbono o martensita en el metal soldado o en la ZAC, o en ambos.

El rango de enfriamiento y la equivalencia de carbono del acero, son el control de factores que determinan el grado de endurecimiento; el rango de enfriamiento depende primeramente de los siguientes factores:

- El espesor de la sección y geometría de la junta.
- La temperatura del metal base antes de que comience la soldadura.
- El rango de calor aplicado, en sí el uso de altas corrientes de soldadura, velocidad baja en la aplicación de la soldadura (alto calor aplicado) o precalentamiento del metal base reducirá el rango de enfriamiento de la zona soldada, el precalentamiento debería ser mantenido durante la soldadura de cordones sucesivos.

### **I.1.2. Acero Dulce**

Los aceros que contienen un porcentaje del 0.15 a 0.30 de Carbono, son comúnmente llamados aceros dulces, tales aceros pueden ser soldados sin precalentamiento, poscalentamiento o procedimientos especiales de soldadura y unir espesores de menos de 1 pulgada. Mientras los contenidos de Carbono y Manganeso se incrementen aproximadamente de 0.30 y 1.40% respectivamente, la soldabilidad de los aceros es buena, pero la soldadura es susceptible a fisuramiento en el reborde, debido al incremento de templeabilidad y resistencia. Algunos aceros dulces se les aplica el normalizado o templado, condición que provee buena dureza o propiedades de alta resistencia. El rango de la resistencia a la tensión puede ser desde 65 a 100 ksi, dependiendo del contenido de Carbono, Manganeso y tratamiento térmico.

Alto calor aplicado en la soldadura o alto precalentamiento, y da como resultado una lenta cedencia de enfriamiento, la cual tiende a incrementar el tamaño de grano y producir una perlita basta en la ZAC. Estas condiciones microestructurales determinan una buena resistencia y dureza. Si el proceso o procedimiento de soldadura somete a la ZAC a un calentamiento prolongado, alta temperatura y rápido enfriamiento, la soldadura probablemente requiera de postratamiento térmico, para restaurar la resistencia y dureza a esa zona; cuando el tratamiento por calor de la soldadura no es muy económica o impráctica, el rango de enfriamiento en la zona soldada debe ser suficientemente rápida para producir una microestructura de adecuada resistencia y dureza. En general, el calor que da un tratamiento a los aceros dulces es el arco de la soldadura. (Welding Handbook 1976 & 1984)

La dilución debe ser considerada a la hora de seleccionar un material de aporte (electrodo), para proveer propiedades mecánicas específicas a la unión en el material (metal) seleccionado. Las propiedades de la soldadura aplicada en la fabricación actual pudieran diferir de los valores reportados, debido a el efecto de la dilución. Para aceros dulces tratados por calor, un material de aporte de baja aleación podría ser requerido para reunir los requerimientos mecánicos apropiados, sin embargo, la resistencia del metal fundido no debe exceder la resistencia del metal base, la alta resistencia del metal fundido pudiera requerir una ZAC más blanda para sufrir una cantidad relativamente larga de deformación cuando la junta es sujeta a deformación cerca de la temperatura ambiente, bajo tales condiciones, una fractura pudiera ocurrir prematuramente en la ZAC, debido a la excesiva deformación localizada. En una junta “enmantequillada”, el material de aporte debe ser seleccionado para proveer metal fundido esencialmente con la misma resistencia que la del metal base; para soldaduras por filete, un material de aporte de más baja resistencia es a



veces usado para proveer suficiente ductilidad para acomodar las concentraciones de esfuerzo o tensión, sin embargo, un material de aporte de baja resistencia, no debería ser usado indiscriminadamente como un remedio para las dificultades de fisuras. (Welding Handbook 1984, Dulieu 1995, Harbey 1982, Lancaster 1980)

## **1.2. Aceros Inoxidables.**

Es una aleación compuesta por Fierro y Cromo, el Fierro es el elemento fundamental de todos los aceros inoxidables, sin embargo, para hacer que el Fierro sea "inoxidable", el Cromo debe estar presente por lo menos en un 11.5% en la aleación; además se agregan otros elementos para proporcionar ciertas propiedades. Mientras que se emplea nueve veces más Fierro que Cromo, debemos notar que el Cromo es el elemento agregado indispensable, tanto en los aceros inoxidables de la serie 200, 300 como en los de la 400, donde las propiedades de "resistencia a la corrosión", son de gran importancia.

Cuando se agrega el 11.5% o más de Cromo, se forma espontáneamente en las superficies expuestas al aire, una capa delgada, plateada y altamente adherente de óxido de Cromo, esta película fina actúa como una barrera para retardar futura oxidación o corrosión, el acero no puede oxidarse y por ello su nombre de Acero Inoxidable. Las importantes subcategorías de aceros inoxidables como, Ferríticos, Austeníticos, Martensíticos y grados de endurecidos por precipitación, están basados en factores tales como, composición, microestructura y factores cristalográficos.

### **1.2.1 Aceros Inoxidables Ferríticos**

Los aceros inoxidables ferríticos contienen del 17% al 27% de Cromo, no tienen Níquel y toleran sólo pequeñas cantidades de Carbono que estabiliza la austenita, si se aumenta el contenido de Carbono, debe aumentarse el contenido de Cromo con objeto de mantener el balance y una estructura ferrítica. En esta condición balanceada estos aceros pueden calentarse al punto de fusión sin transformar la austenita, por tanto, es imposible endurecerlos por enfriamiento rápido, algunas de las aplicaciones de estos aceros se presentan en elementos de hornos, tubos protectores de pirómetros, etcétera.

Los grados ferríticos consisten de una microestructura de ferrita alfa, la cual tiene una estructura cristalina bcc, con contenidos de Cromo, que varían desde 12% a 28% aproximadamente, es suave y dúctil, además se deben precalentar y postcalentar cuando se sueldan.

### **I.2.2 Aceros Inoxidables Martensíticos**

Los grados martensíticos fueron desarrollados para proveer un grupo de aceros inoxidables que tuvieran resistencia a la corrosión y endurecimiento por tratamiento térmico, sin embargo los aceros inoxidables ferríticos son más resistentes a la corrosión, que estos grados martensíticos, pero generalmente inferior a los grados austeníticos. Los aceros inoxidables martensíticos contienen del 4 al 10 % de Cromo, como su principal elemento de aleación y son endurecidos por el aire. Los aceros inoxidables martensíticos contienen cantidades balanceadas de Cromo (estabilizador de la ferrita), Carbono y Níquel (estos dos últimos estabilizadores de la austenita), de modo que bajo calentamiento el acero se vuelve austenítico, pero bajo el enfriamiento tiende a revertir a ferrita. Estas composiciones pueden calentarse cerca de temperatura austenítica y se transformarán en martensita al enfriarse a las velocidades adecuadas. Son normalmente duros y frágiles, además el contenido de carbono es suficiente para producir una dureza martensítica la cual es adecuada para cuchillería e instrumentos quirúrgicos y por último precalentamientos, así como poscalentamiento, son necesarios cuando se sueldan. (Horowitz 1990, Harvey 1982, Lefebvre 1993, Peckner 1977, Sautala 1979)

### **I.2.3 Aceros Inoxidables Austeníticos**

Los aceros inoxidables austeníticos, son formados por la adición de elementos fcc, tal como el Níquel y Manganeso. Todos los llamados aceros austeníticos tienen un contenido de Cromo y Níquel como los principales elementos de aleación. Los aceros inoxidables austeníticos se caracterizan por su resistencia a la corrosión y oxidación (escamación). La adición de Cromo es responsable de esas características, además que es un elemento estabilizador de ferrita.

La adición de Níquel, el cual es otro elemento en esta aleación, favorece la retención (estabilizador) de la estructura austenita, incrementa la resistencia a altas temperaturas así como resistencia a la corrosión en estas aleaciones. El aumento del contenido de níquel tiene la

propiedad de reducir la temperatura de transformación de la austenita, quiere decir que, mejora la retención de la austenita conforme se enfría el acero hasta temperatura ambiente; mientras que la presencia de cromo hace la transformación lenta, tiende a evitar la transformación del acero en austenita bajo calentamiento. De esta forma la estabilidad de la austenita aumenta al incrementar el contenido de níquel, además estas aleaciones contienen otros elementos para mejorar sus propiedades mecánicas. Es fuerte, dúctil y resistente al impacto, no magnético en la condición recocida, pero magnético cuando es trabajado en frío, no es necesario el precalentamiento ni postcalentamiento cuando se sueldan estos grados austeníticos.

El carburo más observado en este tipo de acero es el  $M_{23}C_6$ , que a veces es referido como  $Cr_{23}C_6$ , pero más propiamente es  $(Cr,Fe)_{23}C_6$  o  $(Cr,Fe,Mo)_{23}C_6$ , la precipitación de este carburo en los bordes de grano durante la soldadura produce corrosión intergranular, la precipitación del carburo  $M_{23}C_6$  ocurre como un resultado del calentamiento en solución - recocida a grados desde 500 a 950°C. La precipitación ocurre primero en los bordes de fase austenita/ $\delta$ -ferrita cuando se presenta, la aparición del  $M_{23}C_6$  varía con la temperatura de precipitación y tiempo. En temperaturas bajas de precipitación el  $M_{23}C_6$  tiene una morfología delgada y continua. Cuando la temperatura de precipitación es de 600 a 700°C, las partículas dendríticas plumosas se forman en las intersecciones del borde. con el tiempo esas partículas se vuelven toscas y bastas. Aún en altas temperaturas de precipitación, el  $M_{23}C_6$  se forma en bordes de grano, como partículas globulares discretas cuya forma es influenciada por la orientación del borde y temperatura. (Zhihui Wang 1998, W.B.Pearson 1972, Harvey 1982)

### **1.2.3.1 La soldadura del Acero Inoxidable.**

Existen más tipos de metales base de acero inoxidable que de electrodos inoxidables para soldar, por consiguiente, antes de escoger un electrodo para un trabajo específico, es muy importante conocer propiedades acerca del metal base que se va a soldar.

Los aceros inoxidables están agrupados dentro de tres clases básicas, de acuerdo con su microestructura: Martensíticos, Ferríticos y Austeníticos; dado que cada una de sus características metalúrgicas es diferente, cada uno de ellos requiere diferentes materiales y procedimientos de soldadura.

### **I.2.3.2 Soldadura para un Acero Inoxidable Austenítico.**

El acero inoxidable austenítico se distingue de los otros aceros en su respuesta a la alta temperatura y en que tiene mucha menor conductividad térmica que del acero al carbono, originando con esto que las áreas soldadas tarden más en enfriarse; además su expansión térmica es mucho mayor que la del acero al carbono, por lo que si esta diferencia no se toma en cuenta, el calor del arco puede deformar la pieza de acero inoxidable que se esté soldando. La resistencia eléctrica del acero austenítico es varias veces mayor que la del acero al carbono, por lo que deben utilizarse menores niveles de corriente de soldar con los electrodos de acero inoxidable, a fin de evitar el sobre calentamiento de los mismos. El calor del arco causa precipitación de carburos, esto se refiere cuando el acero inoxidable austenítico contiene más de 0.02% de Carbono y se calienta entre 430° y 815°C, el carbono en exceso de dicho 0.02%, emigra hacia los granos austeníticos de cromo y se combina con éste para formar carburos de cromo, los cuales ofrecen poca resistencia a la corrosión; por lo que se puede establecer que esta corrosión intergranular (resultado por la precipitación con carbono y la formación de carburos de cromo) es la causa de que se presenten fallas prematuras a lo largo del cordón de soldadura. (Zhihui Wang 1998, W.B.Pearson 1972, Harvey 1982, W.A.Beaslack 1979)

### **I.2.3.3 Efecto de la ferrita**

La mayoría de los depósitos de soldadura en los aceros inoxidables austeníticos contienen del 3% al 20% de ferrita, que inhibe las grietas por calor. El diagrama Schaeffler (figura 1.1) es una forma conveniente para estimar el contenido de ferrita en los depósitos de soldadura, si se conoce la composición. Los fabricantes lo usan como una guía para establecer el balance adecuado de los elementos de aleación y aumentar o controlar el contenido de ferrita en la soldadura, algunos de los elementos de la aleación son austenitizantes y otros ferritizantes, el diagrama es un trazo que compara uno con otro, dado que no todos los elementos tienen la misma influencia, se aplica un factor a cada uno y el trazo se convierte en el equivalente de níquel (austenitizante) contra el equivalente de cromo (ferritizante). Las técnicas de soldadura pueden jugar un papel importante en la obtención de un contenido uniforme de ferrita en un cordón, mientras el 10% de ferrita puede ser considerado normal para un cordón en particular, un arco demasiado largo al principio o al final del cordón puede resultar en 0% de ferrita en esos puntos haciéndolos vulnerables a las grietas; no obstante no sólo el Cromo y el Níquel influyen sino también el Carbono, Manganeso, Molibdeno y Silicio. (ASM Metals Handbook Vol.8, Lancaster 1980, Peckner 1977, Harvey 1982, Dulieu 1995)

Shaeffler tomó en cuenta las influencias ferrítica y austenítica de estos elementos y construyó el diagrama con su nombre (ver figura 1.1), en este diagrama en las ordenadas está el equivalente de Níquel y en la abscisas el equivalente de Cromo. Estos equivalentes se calculan por medio de las siguientes ecuaciones:

$$\text{Ec. Ni} = \% \text{ Ni} + 30 (\% \text{ C}) + 0.5 (\% \text{ Mn}) \quad \dots\dots (1.1)$$

$$\text{Ec. Cr} = \% \text{ Cr} + \% \text{ Mo} + 1.5 (\% \text{ Si}) + 0.5 (\% \text{ Cb}) \quad \dots\dots (1.2)$$

La composición del metal depositado de los equivalentes de éstos se llevan al diagrama, tomando como ejemplo los materiales de aporte, con la siguiente composición:

**Tabla 1.3.** – Cálculos en el Diagrama de Shaeffler

| Material                          | Cr.<br>Eq. | Ni.<br>Eq. | C %  | Cr % | Ni % | Fe % | Mo % | Mn % | Si % |
|-----------------------------------|------------|------------|------|------|------|------|------|------|------|
| Materiales de Aporte (electrodos) |            |            |      |      |      |      |      |      |      |
| <b>7018</b>                       | 0.8        | 3.5        | 0.10 |      |      | 97   |      | 1.00 | 0.5  |
| <b>308</b>                        | 20.45      | 10.68      | 0.03 | 19.1 | 9.7  | 65   | 0.75 | 1.6  | 0.40 |
| <b>312</b>                        | 30.5       | 13.95      | 0.12 | 29   | 9.5  | 59   | 0.75 | 1.7  | 0.40 |
| Materiales Base                   |            |            |      |      |      |      |      |      |      |
| <b>A36</b>                        | 0.6        | 9.3        | 0.29 |      |      | 97   |      | 1.00 | 0.30 |
| <b>304</b>                        | 19.405     | 11.705     | 0.8  | 19   | 10.0 | 66   |      | 2.0  |      |

*Procedimiento sugerido de soldadura para aceros inoxidable de la serie 300:*  
Ninguno de los aceros inoxidable de la serie 300 deben ser precalentados, ni permitir que la temperatura entre paso, suba más allá de los 600°C; el calor se puede evitar al soldar, siguiendo estos procedimientos conocidos desde hace tiempo: No se caliente el metal base del acero inoxidable de la serie 300, use electrodos de diámetro pequeño y bajo amperaje; para mantener al mínimo la generación de calor, mantenga un arco corto, los arcos largos oxidan el Cromo y reducen la resistencia a la corrosión y la resistencia a las grietas. Antes de extinguir el arco, llene los cráteres al extremo de los cordones, los cráteres que no se llenan, producen grietas. (Irving 1992, T.Doody 1992, W.A.Beaslack 1979, C.D.Lundin 1976, T.Ogawa 1987)

Tabla 1.4.- AISI Aceros Inoxidables Ferríticos

| <i>Cúbica centrado en el cuerpo, magnético</i>      |            |      |           |          |                   |
|---|------------|------|-----------|----------|-------------------|
| <b>Composición nominal %</b>                        |            |      |           |          |                   |
| AISI Tipo #   | C          | Mn   | Cr        |          | Otros             |
| 430   | 0.08 máx   | 1.0  | 16.0-18.0 |          |                   |
| 430F  | 0.12 máx   | 1.25 | 16.0-18.0 |          | 0.6 Mo máx.       |
| 430 Se  | 0.12 máx   | 1.25 | 16.0-18.0 |          | 0.15 Se mín.      |
| 446   | 0.20 máx   | 1.5  | 23.0-27.0 |          | 0.25 N máx.       |
| <b>AISI Aceros Inoxidables Martensíticos</b>        |            |      |           |          |                   |
| <i>Cúbica centrado en el cuerpo, magnético</i>      |            |      |           |          |                   |
| <b>Composición nominal %</b>                        |            |      |           |          |                   |
| AISI Tipo #   | C          | Mn   | Cr        | Ni       | Otros             |
| 403   | 0.15 máx.  | 1.0  | 11.5-13   |          |                   |
| 410   | 0.15 máx.  | 1.0  | 11.5-13   |          |                   |
| 416   | 0.15 máx.  | 1.2  | 12.-14    | .....    | 0.15 S mín.       |
| 420   | 0.15 máx.  | 1.0  | 12-14     |          |                   |
| 431   | 0.20 máx.. | 1.0  | 15-17     | 1.25-2.5 |                   |
| 440 A   | 0.60-0.75  | 1.0  | 16-18     | .....    | 0.75Mo máx.       |
| 440 B   | 0.75-0.95  | 1.0  | 16-18     | .....    | 0.75Mo máx.       |
| 440 C   | 0.95-1.20  | 1.0  | 16-18     | .....    | 0.75Mo máx.       |
| <b>Tabla - AISI Aceros Inoxidables Austeníticos</b> |            |      |           |          |                   |
| <i>Cúbica centrado en las caras, no magnético</i>   |            |      |           |          |                   |
| <b>Composición nominal %</b>                        |            |      |           |          |                   |
| AISI Tipo #   | C          | Mn   | Cr        | Ni       | Otros             |
| 301   | 0.15 máx.  | 2.0  | 06-18     | 6.0-8.0  |                   |
| 302   | 0.15 máx.  | 2.0  | 17-19     | 8.0-10   |                   |
| <b>304</b>  | 0.08 máx.  | 2.0  | 18-20     | 8.0-12   |                   |
| 304L  | 0.03 máx.  | 2.0  | 18-20     | 8.0-12   |                   |
| 309   | 0.20 máx.  | 2.0  | 22-24     | 12-15    |                   |
| 310   | 0.25 máx.  | 2.0  | 24-26     | 19-22    |                   |
| 316   | 0.08 máx.  | 2.0  | 16-18     | 10-14    | 2-3Mo             |
| 316L  | 0.03 máx.  | 2.0  | 16-18     | 10-14    | 2-3Mo             |
| 321   | 0.08 máx.  | 2.0  | 17-19     | 9-12     | (5x%C)Ti mín      |
| 347   | 0.08 máx.  | 2.0  | 17-19     | 9-13     | (10x%C)Cb-Ta mín. |
| <b>AISI Grados Austeníticos – Tipo 200</b>          |            |      |           |          |                   |
| <i>Cúbica centrado en las caras, no magnético</i>   |            |      |           |          |                   |
| <b>Composición nominal %</b>                        |            |      |           |          |                   |
| AISI Tipo #   | C          | Mn   | Cr        | Ni       | Otros             |
| 201   | 0.15 máx.  | 7.5  | 16-18     | 3.5-5.5  | 0.25 N máx        |
| 202   | 0.15 máx.  | 10.0 | 17-19     | 4.0-6.0  | 0.25 N máx        |

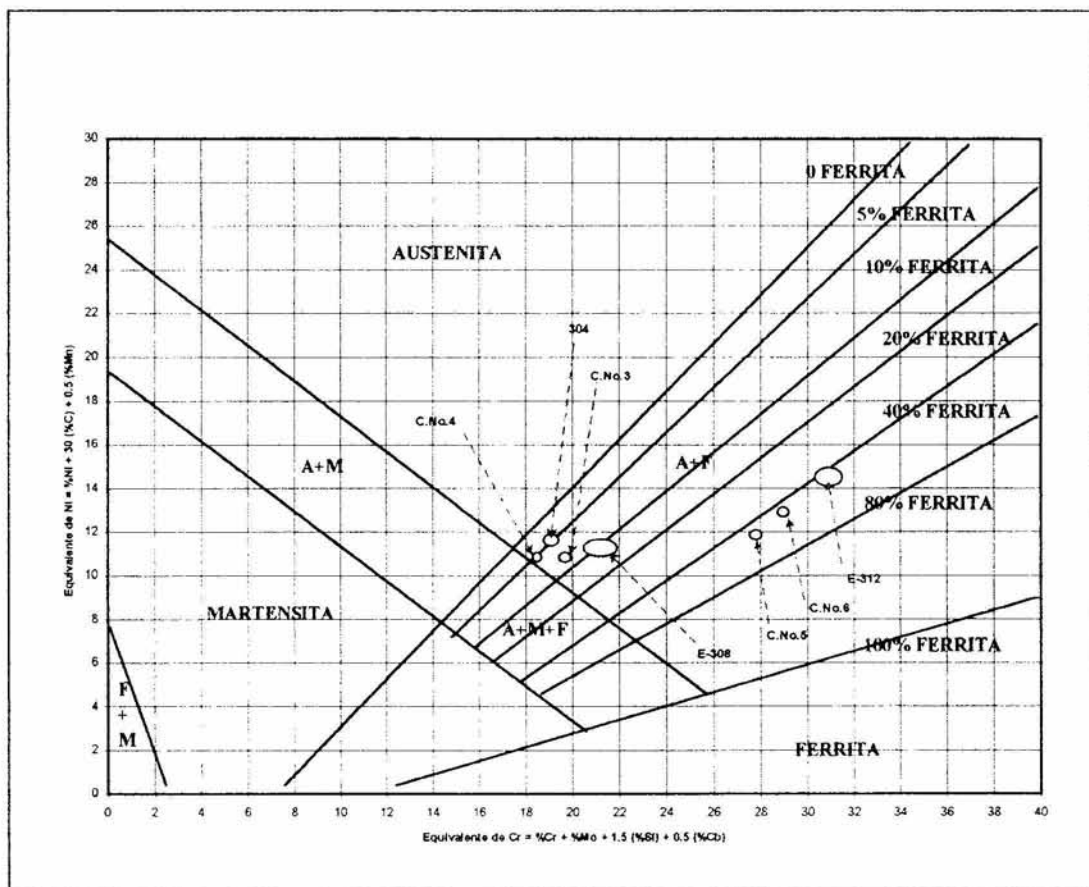


Figura 1.1.- Diagrama de Shaeffler.

Tabla 1.5.- Propiedades de los materiales.

| Material         | Rango o punto de fusión      | Conductividad térmica en 68°F(293°K)                       | Coefficiente de expansión térmica (68-572°F), (20-300°C) | Resistencia a la tensión (Nominal) |
|------------------|------------------------------|--|--|------------------------------------|
| Acero Dulce      | 2723-2777°F<br>(1495-1525°C) | 7.3 Btu/ft <sup>2</sup> /hr/°F<br>(12.6W/m <sup>2</sup> K) | 7.3 min/in/°F<br>(13.0 mm/m/°C)                          | 35 ksi<br>(240 Mpa)                |
| Acero Inoxidable | 2550-2650°F<br>(1400-1450°C) | 16.2 Btu/ft <sup>2</sup> /hr/°F<br>(9.4W/m <sup>2</sup> K) | 9.6 min/in/°F<br>(17.2 mm/m/°C)                          | 70 ksi<br>(480 Mpa)                |

### **I.3 Efecto de los elementos de aleación.**

#### **I.3.1 Generalidades**

Los elementos de aleación se añaden a los aceros para diversos propósitos, entre los cuales los más importantes son los siguientes:

1. Aumentar la templabilidad.
2. Mejorar la resistencia a temperaturas comunes.
3. Mejorar las propiedades mecánicas tanto a altas como a bajas temperaturas, al igual que mejorar la tenacidad a cualquier dureza o resistencia mínima.
4. Aumentar la resistencia al desgaste y aumentar la resistencia a la corrosión.
5. Disminuir la distorsión durante el proceso de endurecimiento.

Estas mejoras se logran principalmente por:

- a. Alteración de las características de endurecimiento de los aceros.
- b. Alteración de la naturaleza y cantidad de carburos formados en los aceros.
- c. Alteración de las características de revenido de los aceros.

#### **I.3.2. Clasificación de los elementos de aleación.**

Los elementos de aleación pueden clasificarse de acuerdo con la forma en que se distribuyen en los dos constituyentes principales de los aceros:

Grupo I.- Elementos que se disuelven en la ferrita (Níquel, Aluminio, Silicio, Cobre, Manganeso)

Grupo II.- Elementos que forman carburos simples o complejos (Cromo, Molibdeno, Vanadio, Wolframio, Titanio, Circonio, Tantalio)

Hay una solubilidad de todos los elementos en la ferrita, pero ciertos elementos no se encuentran extensivamente en la fase carburo. De esta manera, el Níquel, Aluminio, Silicio, Cobalto, Cobre y Manganeso, se hallan ampliamente disueltos en la ferrita. En ausencia de



Carbono, se encontrarán disueltas en ferrita grandes proporciones de elementos del grupo II, por lo que, la tendencia a formar carburos es obvia sólo cuando hay gran cantidad de Carbono.

### **1.3.3. Influencia de los aleantes sobre el diagrama Fe-Fe<sub>3</sub>C.**

En un sistema de múltiples componentes, es difícil entender la función exacta de cada elemento o predecir los resultados finales. Cuando un tercer elemento se añade al acero, el diagrama binario Hierro - carburo de Hierro ya no es una representación de condiciones en equilibrio, ya que las temperaturas críticas, la posición del eutectoide, el intervalo crítico y la localización y tamaños de los campos de ferrita y austenita se verán modificados, lo que nos obliga a utilizar los diagramas de fase ternarios, con los que podemos determinar la condición estructural de los aceros con diferentes aleantes, así como sus efectos. Por ejemplo, el Níquel y Manganeso tienden a disminuir la temperatura crítica en calentamiento, en tanto que el Molibdeno, Cromo, Silicio, Tungsteno y Vanadio tienden a aumentarla. El cambio en la temperatura crítica producida por la presencia de elementos de aleación es importante en el tratamiento térmico de aceros aleados, ya que aumentará o disminuirá la temperatura crítica de endurecimiento al ser comparada con la correspondiente a un acero al carbono. Todos los elementos de aleación tienden a reducir el contenido de Carbono del eutectoide, pero sólo el Níquel y el Manganeso reducen la temperatura eutectoide (figura 1.2). Al aumentar las cantidades de Níquel y Manganeso se puede disminuir lo suficiente la temperatura crítica para evitar la transformación de la austenita durante el enfriamiento lento, por lo que se les conoce como elementos estabilizadores de la austenita, la cual se retendrá a temperatura ambiente. El Molibdeno, Cromo, Silicio y Titanio, en grandes cantidades tienden a contraer la región de austenita y aumentar el campo de la ferrita (figura 1.3). (Welding Handbook

1976, W.Rostoker and J.R.Drovak 1977, J.Węgrzyn 1981)

El contenido de carbono del metal fundido tiene un efecto directo sobre su susceptibilidad al fisuramiento durante la solidificación. La reducción en carbono tendría que ser compensada por el incremento de cualquier contenido de aleación, el fisuramiento durante la solidificación es un problema inusual, pero puede ocurrir dilución. Incrementando el contenido de carbono, baja la temperatura de transformación del acero e incrementa la cantidad de martensita encontrada en la zona afectada por el calor (ZAC), esto tiene dos efectos : el riesgo de fisuramiento por hidrogeno y decrece la ductilidad.

Los contenidos de Manganeso son generalmente abajo del 1.6%, pero en aceros extra bajos de Carbono (0.02C%) el Manganeso puede irse hasta un porcentaje del 2%; el efecto que tiene sobre la ferrita: la endurece y reduce la plasticidad; además su capacidad en la formación de carburos es menor que la de Cromo y dentro de las influencias principales que tiene es que, contrarresta la fragilidad debida al azufre y aumenta a bajo costo la templabilidad del acero.

Los elementos clásicos de aleación en el acero son: Molibdeno, Níquel y Cromo, éstos actúan como desplazadores de la transformación austenita-ferrita para temperaturas más bajas y por eso promueven transformación que incrementa la dureza con el contenido de Carbono en amplios rangos de enfriamiento.

El efecto endurecedor sobre la ferrita que tiene el Molibdeno, es el de proporcionar un sistema de endurecido por envejecimiento en los aceros aleados con alto Molibdeno-Fierro; la influencia en la templabilidad es de aumentarla, la influencia en la formación de carburos es alta (mayor que la que tiene el Cromo) y dentro de las principales funciones: eleva la temperatura del inicio de crecimiento del grano de la austenita, aumenta la profundidad del endurecimiento, contrarresta la tendencia a la fragilidad de revenido, aumenta la resistencia mecánica a altas temperaturas, además mejora la resistencia a la corrosión en aceros inoxidable y forma carburos resistentes a la abrasión. (A.A.Omar 1998, ASM Handbook 1987&1992)

El efecto endurecedor que tiene el Níquel sobre la ferrita es que la hace resistente y tenaz por solución sólida. La influencia en la templabilidad, es el de aumentarla ligeramente, pero tiende a retener austenita con alto contenido de carbono. La influencia en la formación de carburos es negativa (grafitiza) y dentro de las principales funciones: hace los aceros perlíticos-ferríticos no templables o recocidos resistentes mecánicamente y austeniza las aleaciones de hierro a alto Cromo. (A.A.Omar 1998, ASM Handbook 1987&1992, Welding Handbook 1976&1984)

El Cromo endurece a la ferrita ligeramente, aumenta la resistencia a la corrosión, aumenta la templabilidad moderadamente y tiene una mayor influencia en la formación de carburos (mayor que el Manganeso y menor que Wolframio) y sus principales funciones: aumenta la resistencia a la corrosión y a la oxidación, a alta temperatura aumenta la templabilidad, resiste la abrasión y el desgaste (con alto contenido de Carbono). El Cromo combinado con Carbono forma tres carburos diferentes, los cuales son  $Cr_{23}C_6$ ,  $Cr_7C_3$  y  $Cr_3C_2$ . (A.A.Omar 1998, Harvey 1982)

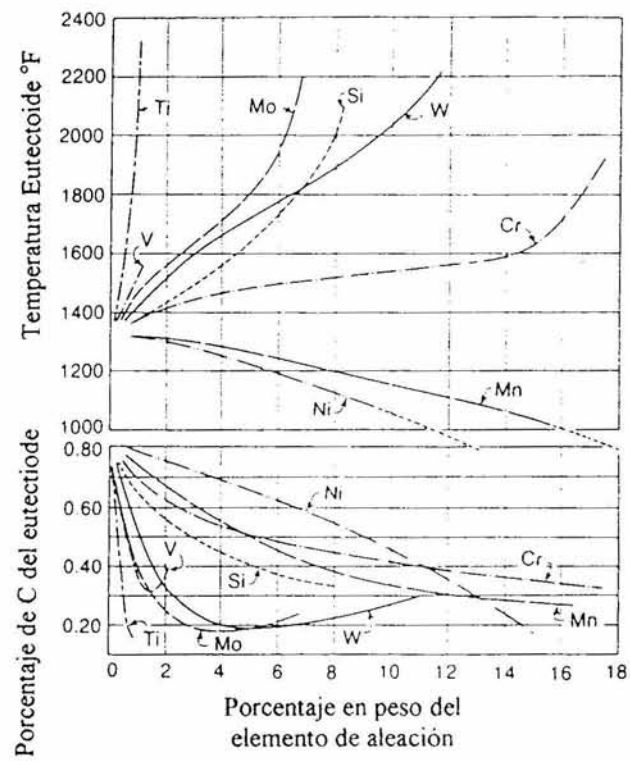
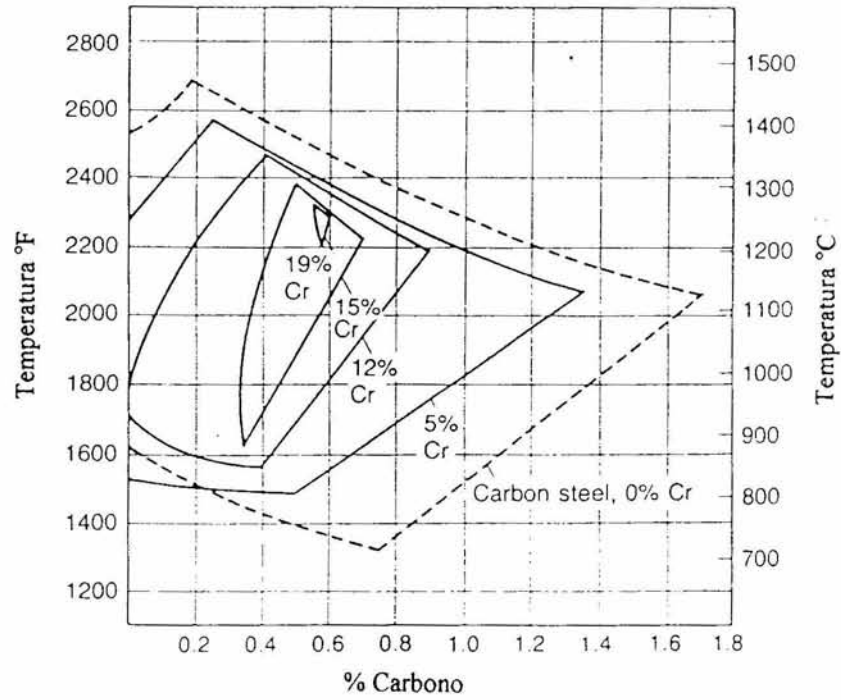


Figura 1.2.- Composición y temperatura eutectoides influidas por diversos elementos de aleación.



**Figura 1.3.-** Efecto del Cromo en la formación de austenita

## Capítulo II. Parte Experimental

### II.1. Planteamiento del Problema.

Las uniones de materiales disímiles en soldadura son comunes, ya que es una forma económica de construir una estructura, que solo usar un material de alto costo; la combinación puede ser entre dos o tres metales diferentes y uno de los cuales es de aporte. Considerando el gran número de posibilidades en la soldadura de diferentes materiales, se eligieron como materiales base el acero al carbono A36 y el acero inoxidable 304, y para soldarlos se eligieron los electrodos E-7018, éste se utiliza para soldar aceros al carbono, los otros dos electrodos son el E-308 y el E-312, éste último es recomendable para la soldadura de aceros disímiles.

La combinación de metales con diferencias químicas, en propiedades físicas, mecánicas, coeficientes de expansión térmica, punto de fusión, así como la conductividad térmica (tabla 1.5), pueden fácilmente presentar problemas durante y después de la soldadura. Desde luego sus componentes de aleación, difieren uno de otro, por lo que, toda esa combinación de propiedades en materiales base y materiales de aporte, nos dará resultados diferentes para cada uno de las condiciones, pero con el objetivo de buscar el caso más satisfactorio, el que presente resultados más aceptables, es decir, efecto de los materiales de aporte en la dilución y precipitación de carburos y el efecto de éstos para encontrar la mejor resistencia a la tensión, no fisuramientos y una soldadura con la mejor homogeneidad en durezas y en las fases presentes.

### II.2. Parámetros de la Parte Experimental.

Los parámetros generales que se toman en cuenta para el estudio del presente trabajo son:

---

Proceso de Soldadura : Soldadura por Arco Eléctrico (SMAW)

Posición: Plana

Perfil: En V

Tipo de Electrodos: E-7018, E-308 y E-312 (\*), diámetro en todos 3/16 pulg.

Voltaje del arco: 185 (inox.) y 230 (carbono)

Polaridad: CD (+)

Materiales base utilizados: Acero al carbono A-36 y acero inoxidable austenítico 304 (\*\*), espesor de la placa en ambos 3/8 pulg.

(\*) La composición química de aleantes de estos materiales de aporte está dada en la tabla 1.1., 1.2. y 1.3.

(\*\*) La composición química de aleantes de estos materiales base está dada en la tabla 1.3 además en la tabla 1.4.

### II.2.1. Condiciones Propuestas

Para el presente trabajo se proponen varias condiciones, en los cuales se soldaron los materiales base A36 y acero inoxidable 304, utilizando tres materiales de aporte, en cada electrodo se realizó diferente procedimiento de soldadura como a continuación se describen las 6 condiciones propuestas:

**Tabla 2.1** .- Relación de la Soldadura de un acero al carbono A-36 con un acero inoxidable 304.

| Procedimiento<br>Material de Aporte | Al terminar de soldar, se le dejó enfriar al aire tranquilo a temperatura ambiente. | Al terminar de soldar, se enfrió (sumergió) la junta inmediatamente en agua (09°C). |
|-------------------------------------|---|---|
| <b>Electrodo 7018</b>               | Condición 1   | Condición 2   |
| <b>Electrodo 308</b>                | Condición 3   | Condición 4   |
| <b>Electrodo 312</b>                | Condición 5   | Condición 6   |

### II.3. Metodología de la Investigación

Al finalizar las 6 juntas soldadas, se realizaron las siguientes pruebas de caracterización.

#### II.3.1. Prueba de Dureza.

La propiedad de dureza, es una medida de la resistencia de un material a la deformación plástica localizada (por ejemplo, una pequeña abolladura o ralladura). La prueba de dureza que se llevó a cabo fue el ensayo Vickers, ésta se puede considerar un ensayo de micro dureza debido a la magnitud de la carga y al tamaño del indentador. (D.Mc. Lean 1977, Callister 1997)

Como un primer paso en la parte experimental de esta investigación, el ensayo o prueba de dureza se llevó a cabo, para analizar las características del área transversal de las juntas soldadas.

Parámetros del ensayo:

- Carga aplicada en cada ensayo: 2 Kgs.
- Distancia entre cada indentación: 12.5 milésimas de pulgada
- Distancia total recorrida: 2 pulgadas, 1 pulgada en cada lado, a partir del centro del cordón de soldadura.
- Tamaño de la probeta: 3 pulg. de largo, 3/8 ancho y de 5/8 pulg. de profundidad
- Acabado: pulida en acabado espejo.

### **II.3.2. Microscopía Óptica.**

La segunda metodología utilizada fue la metalografía, que sirve revelar la microestructura, generalmente se preparan cuidadosamente las superficies, para esto primeramente se cortó una sección transversal de la soldadura. La superficie de las probetas fueron desbastadas y pulidas hasta que quedaron en acabado espejo, esta condición se logró utilizando papeles abrasivos y polvos cada vez más finos de  $Al_2O_3$ , se reveló la microestructura tratando la superficie con un reactivo químico. Sin embargo, en el presente estudio se llevó a cabo el ataque en materiales disímiles, lo que llevó a utilizar dos tipos de reactivos para cada tipo de material.

Las medidas finales de las probetas fueron de: 3 pulg. de largo, 3/8 ancho y de 5/8 pulg. de profundidad

Los reactivos utilizados fueron:

- Reactivo para los aceros al carbono (material base A-36 y material de aporte E-7018): Nital al 2%.
- Reactivo para aquellos aceros inoxidables austeníticos (material base 304 y materiales de aporte E-308 y E-312): Ácido oxálico al 10%.

### II.3.3. Difracción de rayos-X

La técnica de difracción de rayos-X se usa para identificar las fases presentes, esto es para dar información del estado físico en que se encuentra nuestra muestra o probeta, tal como es el tamaño, textura y perfección del cristal. El área examinada no excede más de 1 centímetro cuadrado (0.16 in<sup>2</sup>), la información deseada puede ser desde simplemente la cristanilidad o su composición de la probeta; para detallar la estructura cristalina o el estado de orientación de los cristales, estos mismos pueden tener defectos, una deformación debida a los esfuerzos, ya sean locales o externos aplicados. La intensidad de los rayos son referidos o relacionados a los tipos de átomos en su arreglo en el cristal.

El objetivo de la difracción de rayos-X es, caracterizar la celda unitaria, para así determinar su tamaño, forma, simetría y el arreglo de los átomos. Las figuras que se muestran, nos dan el espectro de difracción, un difractograma, en donde los picos de alta intensidad aparecen cuando algún conjunto de planos cristalográficos cumplen la condición de difracción de Bragg (la interferencia es de naturaleza no constructiva y el campo del haz difractado es de muy baja intensidad), estos picos corresponden a índices de planos y corresponden a la intensidad de los rayos difractados, la geometría del arreglo cristalino controla las direcciones de los rayos difractados, las intensidades de esos rayos dependen de los tipos de átomos en el cristal y de su arreglo en una celda unitaria, entonces la difracción de rayos-X sirve en la determinación de estructuras cristalinas. El tamaño y la geometría de la celdilla unidad se deducen de las posiciones angulares de los picos de difracción y de la posición de los átomos en la celdilla se deducen de la intensidad relativa de los picos, intensidad dada en conteos por segundo. Por lo tanto, se determinan a qué tipo de cristales corresponden cada uno de los picos que componen el difractograma. Además, las fórmulas utilizadas para determinar las distancias interplanares para los sistemas cristalinos, los cuales son el número de coordinación (número de átomos vecinos más próximos) y el factor de empaquetamiento atómico (la fracción de volumen de esfera rígida en la celdilla unitaria) se dan a continuación. Los planos y direcciones cristalográficas se especifican mediante índices ( $h, k, l$ , índices de Miller). La determinación de los índices se fundamenta en un sistema de ejes coordenados definidos por la celdilla unidad para la estructura cristalina particular y estos ejes de la celda unitaria son ( $a, b$  y  $c$ ). (Callister 1997, D.Mc.Lean 1977, ASM Handbook, "Vol 10" 1992)

$$\text{Ley de Bragg:} \quad n\lambda = 2d \sin\theta \quad \dots\dots (2.1)$$

donde:



$\lambda$  = es la longitud de onda (del haz de rayos-X)

$\theta$  = ángulo de difracción.

Fórmulas para el cálculo de las distancias interplanares:

En un sistema cristalino cúbico

$$d_{hkl} = a(h^2 + k^2 + l^2)^{-1/2} \quad \dots (2.2)$$

En un sistema cristalino ortorrómbico

$$d_{hkl} = [ (h^2/a^2) + (k^2/b^2) + (l^2/c^2) ]^{-1/2} \quad \dots (2.3)$$

Las medidas de las probetas fueron aproximadamente de: 1 pulgada de largo, 3/8 de ancho y una profundidad de 3/32 pulgadas.

#### II.3.4. Prueba de Tensión.

El ensayo de tensión (cuasi-estático), se emplea para obtener una información básica sobre la resistencia mecánica de los materiales. En la prueba de tensión, se somete la probeta a una carga que va aumentando de forma progresiva, con los datos de cargas y deformaciones obtenidas se construye una curva esfuerzo- deformación ( $\sigma$ - $\epsilon$ ), en que las tensiones se toman como ordenadas y las deformaciones como abscisas.

##### II.3.4.1 Curva Esfuerzo-Deformación Ingenieril

La prueba de tensión ingenieril se usa ampliamente para proporcionar información básica en la resistencia de materiales, en la prueba de tensión una probeta se sujeta a una fuerza continua tensil uniaxial que va creciendo mientras se observa simultáneamente el alargamiento o elongación de la probeta. Los parámetros que se usan para describir la curva esfuerzo-deformación de un metal, es la resistencia a la tensión, límite de fluencia, porcentaje de elongación y reducción de área. Los primeros dos parámetros indican la resistencia y los últimos dos indican la ductilidad.

Para el *esfuerzo ingenieril* la carga se divide entre el área inicial de la sección transversal.

$$\begin{aligned}\sigma_{\text{ingenieril}} &= \text{esfuerzo ingenieril} = \text{Carga /área inicial de la sección transversal} \\ &= P/A_0 \quad \dots\dots (2.4)\end{aligned}$$

La *deformación* usada para la curva  $\sigma$ - $\epsilon$  *ingenieril*, es el promedio lineal de la curva, la cual es obtenida de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}\epsilon_{\text{ingenieril}} &= \text{deformación ingenieril} = \text{cambio en longitud / longitud inicial} \\ &= l_f - l_0 / l_0 \quad \dots\dots (2.5)\end{aligned}$$

La región del esfuerzo elástico es linealmente proporcional a la deformación, cuando la carga excede un valor correspondiente al límite de fluencia, la probeta sufre deformación plástica pero la deformación es permanente si la carga se suelta a cero. La curva continúa creciendo hasta un nivel máximo de esfuerzo, reflejando un incremento en la resistencia en la parte del material hasta una mayor deformación plástica, esto es un proceso conocido como endurecimiento por deformación. La disminución en volumen de la probeta es debido a una deformación plástica constante  $A_f * L_f = A_0 * L_0$  y como la probeta se estira, ésta decrece uniformemente a lo largo de la longitud del escantillón en el área de la sección transversal de la probeta.

El endurecimiento por deformación es debido a la disminución del área y el esfuerzo ingenieril (proporcional a la carga) continúa creciendo, con incremento de esfuerzo. Eventualmente un punto es alcanzado donde la disminución del área de la sección transversal es más grande que el incremento en carga de deformación, de ahí el endurecimiento por deformación. Esta condición será alcanzada primero en algún punto en la probeta que es ligeramente más débil que el resto. Toda la demás deformación plástica se encuentra en esta región y la probeta se empieza a adelgazar o a tomar localmente forma de cuello.

La resistencia a la tracción, o última resistencia a la tracción (UTS, ultimate tensile strength), es la máxima carga dividida por el área original de la sección transversal de la probeta.

$$\sigma_{\text{ingenieril}} = P_{\text{máx}}/A_0 \quad \dots\dots (2.6)$$

El límite elástico, es el esfuerzo más grande, al cual el material puede resistir, sin una deformación permanente mensurable restante en la descarga completa de la carga. Con el

incremento de sensibilidad de deformación, el valor del límite elástico decrece hasta que el límite se iguala al verdadero límite elástico determinado por medidas de micro deformaciones.

En general las mediciones de ductilidad son para indicar la extensión al cual el material puede ser deformado, sin sufrir fractura en operaciones de trabajado del material, tal como en el rolado, además para indicar al diseñador, en general, la habilidad del material a presentar flujo plástico antes de fracturarse.

$$\%Elongación = (l_f - l_o / l_o) \times 100, \text{ dando } l_f, \text{ en fractura y } l_o, \text{ en inicial.} \quad \dots (2.7)$$

$$\%Reducción \text{ de área} = (A_o - A_f / A_o) \times 100 \quad \dots (2.8)$$

#### II.3.4.2. Curva esfuerzo-deformación verdadera

La curva esfuerzo-deformación ingenieril no es una verdadera indicación de la deformación de un metal, ya que ésta se basa enteramente sobre las dimensiones originales de la probeta y esas dimensiones cambian constantemente durante la prueba. Además, un metal dúctil el cual es halado en tensión se hace inestable, el área de la sección transversal de la probeta decrece rápidamente en esta parte de la prueba, la carga requerida para continuar la deformación decrece, el promedio de esfuerzo basado en el área original igualmente decrece y esto produce la caída en la curva  $\sigma$ - $\epsilon$  más allá del máximo punto de carga. Realmente, el metal continúa endureciéndose por deformación hasta la fractura, de manera que la tensión requerida para producir más deformación debería también aumentar. Si el esfuerzo verdadero, basado en el área de la sección transversal de la probeta, se usa, se encuentra que la curva esfuerzo-deformación se incrementa continuamente hasta la fractura. Si la medición de la deformación también se basa en medidas instantáneas, la curva, la cual es obtenida, se le conoce como una curva de esfuerzo-deformación verdadera. Para el *esfuerzo verdadero* la carga se divide entre el área instantánea de la sección transversal. (Gere&Tomishenko 1995, Callister 1997, M.G.Yan 1988, ASM Handbook "Mechanical Testing" 1992)

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{verdadero}} &= \text{esfuerzo verdadera} \\ &= \text{Carga /área instantánea de la sección transversal} = P/A, \quad \dots (2.9) \end{aligned}$$

Y para la *deformación verdadera*, es obtenida de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}\epsilon_{\text{verdadera}} &= \text{deformación ingenieril} \\ &= \text{cambio en longitud} / \text{longitud inicial} = \ln(\epsilon_{\text{verdadera}} + 1)\end{aligned}\quad \dots (2.10)$$

Además, la curva  $\sigma$ - $\epsilon$  verdadera usualmente queda a la izquierda de la curva ingenieril hasta que la máxima carga es alcanzada.

Para muchos materiales, el cuello empieza en la máxima carga, en un valor de deformación, donde el esfuerzo verdadero iguala la cuesta del flujo de la curva.

$$\sigma_{\text{verdadero}} = P_{\text{máx}}/A_i \quad \dots (2.11)$$

El flujo de la curva de muchos metales en la región uniforme de deformación plástica puede ser expresado por la siguiente relación hasta que empieza la estricción puede aproximarse mediante:

$$\sigma = K * \epsilon^n \quad \dots (2.12)$$

En esta expresión K y n son constantes, cuyos valores varían de una aleación a otra. El parámetro n es a menudo denominado exponente de endurecimiento por deformación y tiene un valor menor a la unidad.

La resiliencia es la capacidad de un material de absorber energía elástica cuando es deformado y de ceder esta energía cuando se deja de aplicar. La propiedad asociada se denomina módulo de resiliencia U, que es la energía de deformación por unidad de volumen que se requiere para deformar un material hasta el límite elástico. Matemáticamente, el módulo de resiliencia de una probeta sometida a una carga uniaxial, como la prueba de tensión que se realizó, es justamente el área debajo de la curva esfuerzo-deformación hasta la fluencia. Tanto pulgadas por libra fuerza como joules son unidades de energía, y por tanto el área bajo la curva representa absorción de energía por unidad de volumen (en pulgadas cúbicas o en metros cúbicos) de material. (Gere&Tomishenko

1995, Callister 1997, M.G.Yan 1988, ASM Handbook "Mechanical Testing" 1992)

$$U_r = \int_0^{\epsilon_y} \sigma d \epsilon \quad \dots (2.13)$$

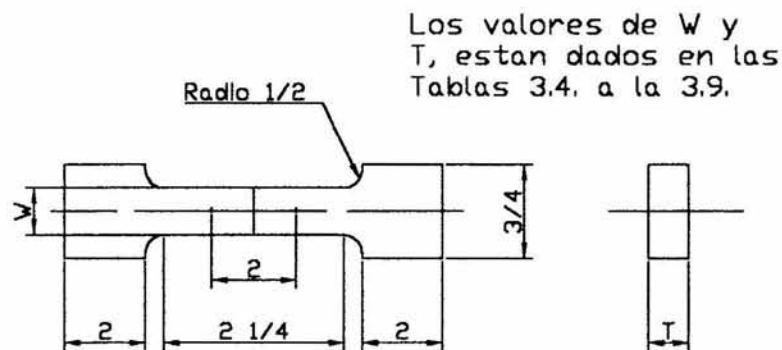


Figura 2.2.- Medida de las probetas de Tensión

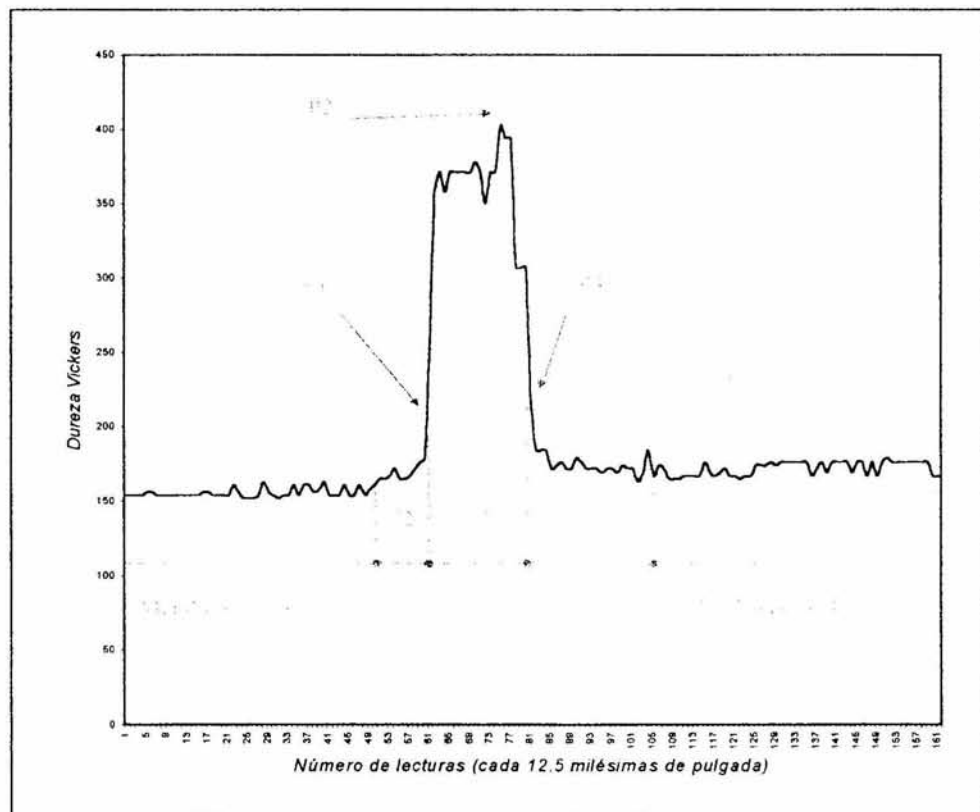
### II.3.5. Microscopía Electrónica (SEM).

El ensayo de tensión el cual físicamente da como resultado la fractura en cada probeta, en ella se analiza la forma de la fractura en la superficie de la misma, la imagen de la estructura investigada se genera utilizando haces de electrones en lugar de radiación lumínica, el microscopio electrónico de barrido (SEM) fue el utilizado. La superficie de la probeta a examinar se barre con un haz de electrones y el haz reflejado de electrones se recoge y se muestra con la misma velocidad de barrido en un tubo de rayos catódicos. La superficie debe ser eléctricamente conductora, independientemente de que esté o no pulida y atacada. Por lo que, del examen de la microestructura determina la fractura mecánica, así como se prevén la propiedades mecánicas de las aleaciones. (Callister 1997, ASM Handbook "Fractography" 1987, ASM Handbook "Mechanical Testing" 1992)

## Capítulo III. Resultados de las Pruebas.

### III.1. Prueba de Dureza

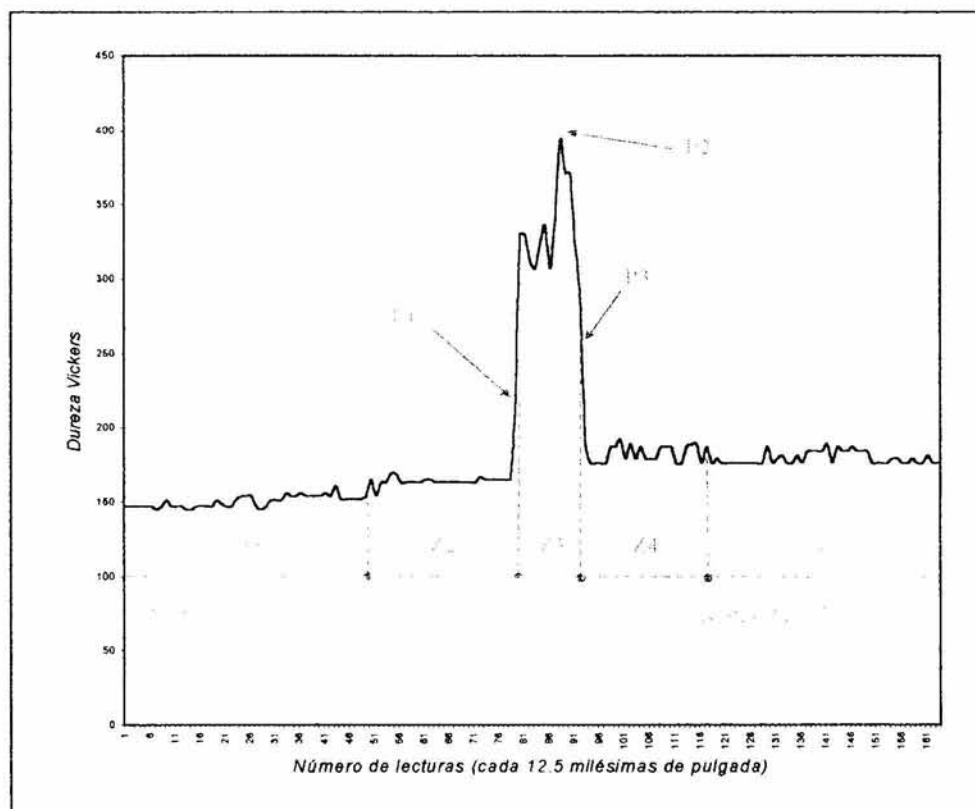
#### III.1.1. Condición No.1 (7018-A)



**Figura 3.1.-** Lectura de dureza en 2 pulgadas (una pulgada en cada lado a partir del cordón de soldadura), para la Condición No.1 (7018-A)

- Z1 Zona del Material Base A-36, rango de dureza en las lecturas 1 a la 49 = 154-163 HV.
- Z2 Zona afectada por el Calor (ZAC) en el material base A-36, rango de dureza en las lecturas 50 a la 60 = 154-162 HV.
- P1 Interfase del la soldadura A-36 y E-7018 encontrada en la lectura 61, con una dureza de 179 HV.
- P2 Máxima dureza encontrada en el centro del cordón de soldadura de 402 HV.
- Z3 Zona del Material de Aporte E-7018.
- P3 Interfase del la soldadura E-7018 y 304 encontrada en la lectura 81, con una dureza de 219 HV.
- Z4 Zona afectada por el Calor (ZAC) en el material base 304, rango de dureza en las lecturas 82 a la 104 = 184-162 HV.
- Z5 Zona del Material Base 304, rango de dureza en las lecturas 105 a la 161 = 167-176 HV.

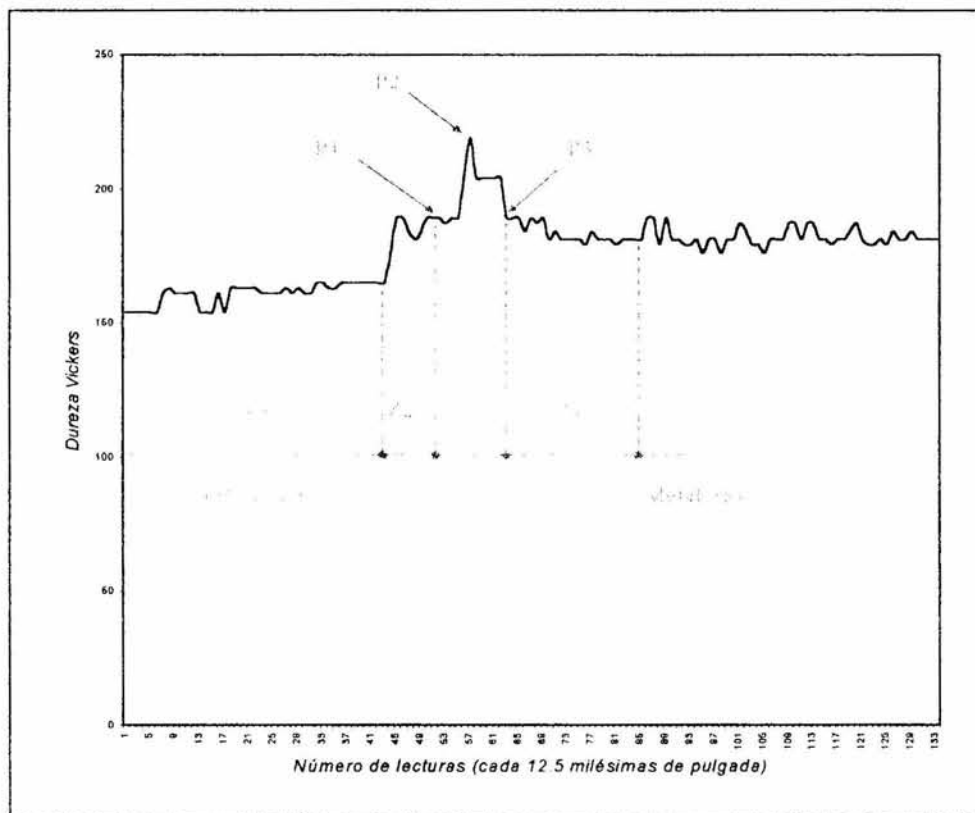
### III.1.2. Condición No.2 (7018-W)



**Figura 3.2.-** Lectura de dureza en 2 pulgadas (una pulgada en cada lado a partir del cordón de soldadura), para la Condición No.2 (7018-W)

- Z1 Zona del Material Base A-36, rango de dureza en las lecturas 1 a la 49 = 145-165 HV.
- Z2 Zona afectada por el Calor (ZAC) en el material base A-36, rango de dureza en las lecturas 50 a la 78 = 165-169 HV.
- P1 Interfase del la soldadura A-36 y E-7018 encontrada en la lectura 79, con una dureza de 213 HV.
- P2 Máxima dureza encontrada en el centro del cordón de soldadura de 394 HV.
- Z3 Zona del Material de Aporte E-7018.
- P3 Interfase del la soldadura E-7018 y 304 encontrada en la lectura 92, con una dureza de 285 HV.
- Z4 Zona afectada por el Calor (ZAC) en el material base 304, rango de dureza en las lecturas 93 a la 117 = 176-192 HV.
- Z5 Zona del Material Base 304, rango de dureza en las lecturas 118 a la 163 = 176-187 HV.

### III.1.3. Condición No.3 (308-A)

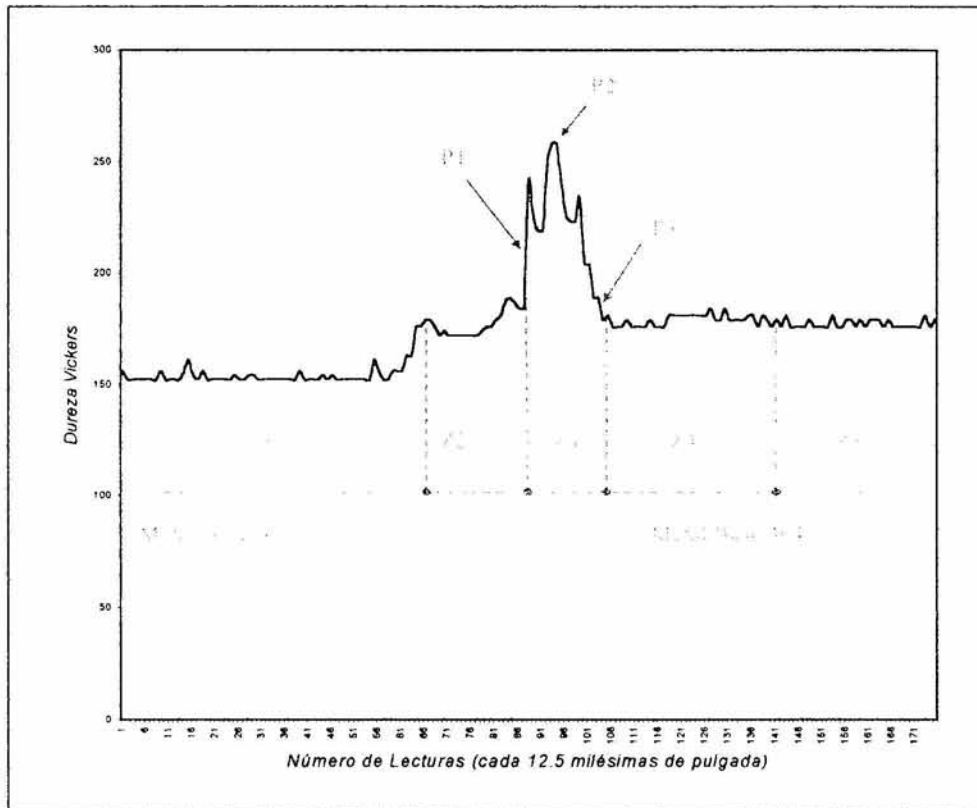


**Figura 3.3.-** Lectura de dureza en 2 pulgadas (una pulgada en cada lado a partir del cordón de soldadura), para la Condición No.3 (308-A)

- Z1 Zona del Material Base A-36, rango de dureza en las lecturas 1 a la 44 = 154-165 HV.
- Z2 Zona afectada por el Calor (ZAC) en el material base A-36, rango de dureza en las lecturas 45 a la 51 = 181-189 HV.
- P1 Interfase del la soldadura A-36 y E-308 encontrada en la lectura 52, con una dureza de 189 HV.
- P2 Máxima dureza encontrada en el centro del cordón de soldadura de 219 HV.
- Z3 Zona del Material de Aporte E-308.
- P3 Interfase del la soldadura E-308 y 304 encontrada en la lectura 63, con una dureza de 189 HV.
- Z4 Zona afectada por el Calor (ZAC) en el material base 304, rango de dureza en las lecturas 64 a la 85 = 179-189 HV.
- Z5 Zona del Material Base 304, rango de dureza en las lecturas 86 a la 134 = 176-187 HV.



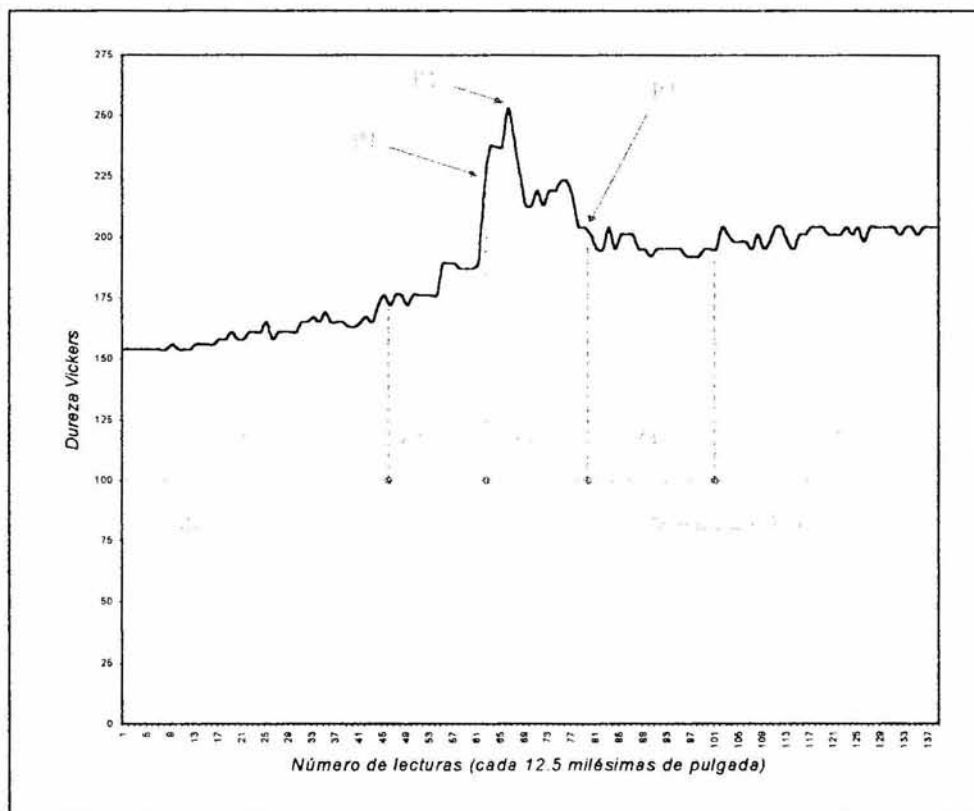
### III.1.4. Condición No.4 (308-W)



**Figura 3.4.-** Lectura de dureza en 2 pulgadas (una pulgada en cada lado a partir del cordón de soldadura), para la Condición No.3 (308-W)

- Z1 Zona del Material Base A-36, rango de dureza en las lecturas 1 a la 65 = 152-165 HV.
- Z2 Zona afectada por el Calor (ZAC) en el material base A-36, rango de dureza en las lecturas 66 a la 89 = 165-187 HV.
- P1 Interfase de la soldadura A-36 y E-308 encontrada en la lectura 90, con una dureza de 219 HV.
- P2 Máxima dureza encontrada en el centro del cordón de soldadura de 258 HV.
- Z3 Zona del Material de Aporte E-308.
- P3 Interfase de la soldadura E-308 y 304 encontrada en la lectura 104, con una dureza de 179 HV.
- Z4 Zona afectada por el Calor (ZAC) en el material base 304, rango de dureza en las lecturas 105 a la 141 = 179-181 HV.
- Z5 Zona del Material Base 304, rango de dureza en las lecturas 142 a la 175 = 175-179 HV.

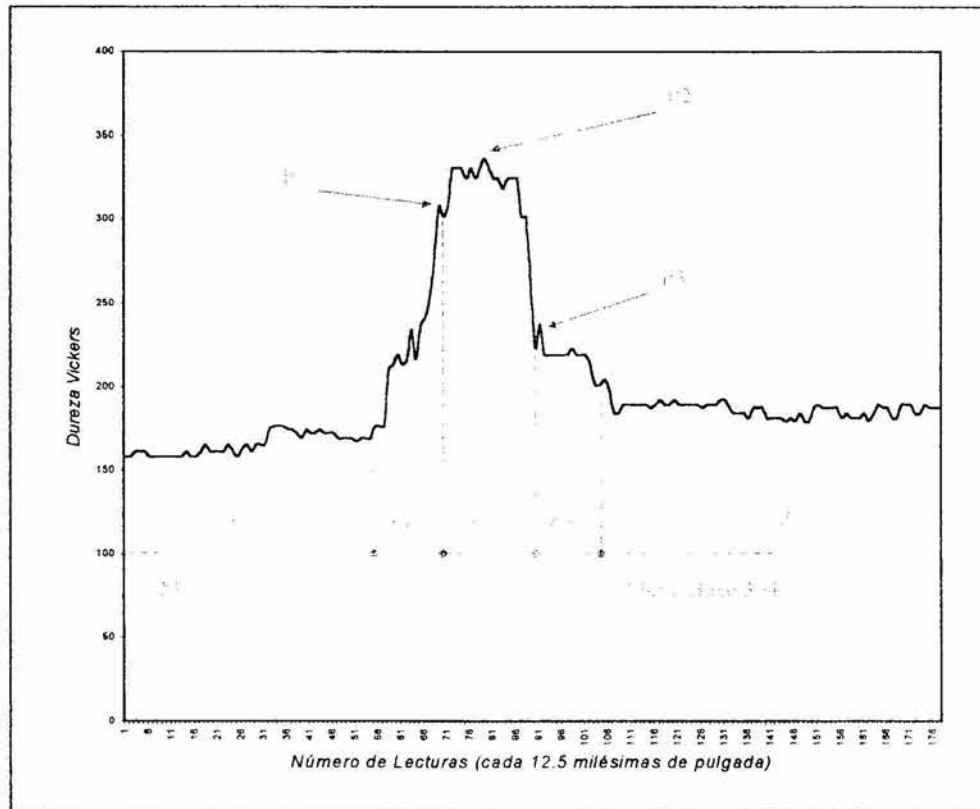
### III.1.5. Condición No.5 (312-A)



**Figura 3.5.-** Lectura de dureza en 2 pulgadas (una pulgada en cada lado a partir del cordón de soldadura), para la Condición No.5 (312-A)

- Z1 Zona del Material Base A-36, rango de dureza en las lecturas 1 a la 46 = 154-172 HV.
- Z2 Zona afectada por el Calor (ZAC) en el material base A-36, rango de dureza en las lecturas 47 a la 62 = 165-189 HV.
- P1 Interfase del la soldadura A-36 y E-312 encontrada en la lectura 63, con una dureza de 237 HV.
- P2 Máxima dureza encontrada en el centro del cordón de soldadura de 253 HV.
- Z3 Zona del Material de Aporte E-312.
- P3 Interfase del la soldadura E-312 y 304 encontrada en la lectura 80, con una dureza de 201 HV.
- Z4 Zona afectada por el Calor (ZAC) en el material base 304, rango de dureza en las lecturas 81 a la 101 = 192-204 HV.
- Z5 Zona del Material Base 304, rango de dureza en las lecturas 102 a la 138 = 195-204 HV.

### III.1.6. Condición No.6 (312-W)



**Figura 3.6.-** Lectura de dureza en 2 pulgadas (una pulgada en cada lado a partir del cordón de soldadura), para la Condición No.6 (312-W)

- Z1 Zona del Material Base A-36. rango de dureza en las lecturas 1 a la 55 = 158-176 HV.
- Z2 Zona afectada por el Calor (ZAC) en el material base A-36. rango de dureza en las lecturas 56 a la 70 = 176-301 HV.
- P1 Interfase del la soldadura A-36 y E-312 encontrada en la lectura 71, con una dureza de 307 HV.
- P2 Máxima dureza encontrada en el centro del cordón de soldadura de 336 HV.
- Z3 Zona del Material de Aporte E-312.
- P3 Interfase del la soldadura E-312 y 304 encontrada en la lectura 90, con una dureza de 223 HV.
- Z4 Zona afectada por el Calor (ZAC) en el material base 304. rango de dureza en las lecturas 91 a la 104 = 237-201 HV.
- Z5 Zona del Material Base 304. rango de dureza en las lecturas 105 a la 177 = 179-192 HV

## III.2. Microscopía Óptica.

### III.2.1. Condición No. 1 (7018-A)



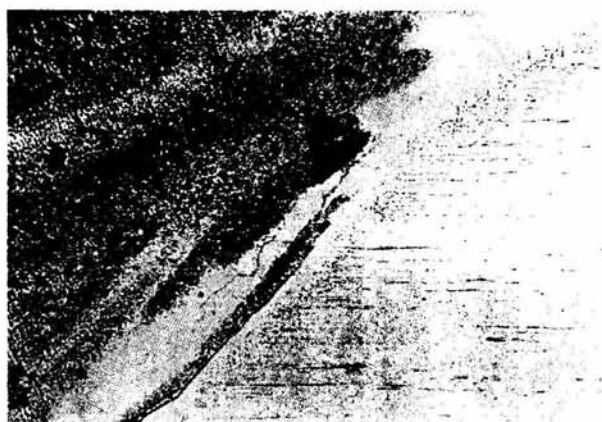
(a)



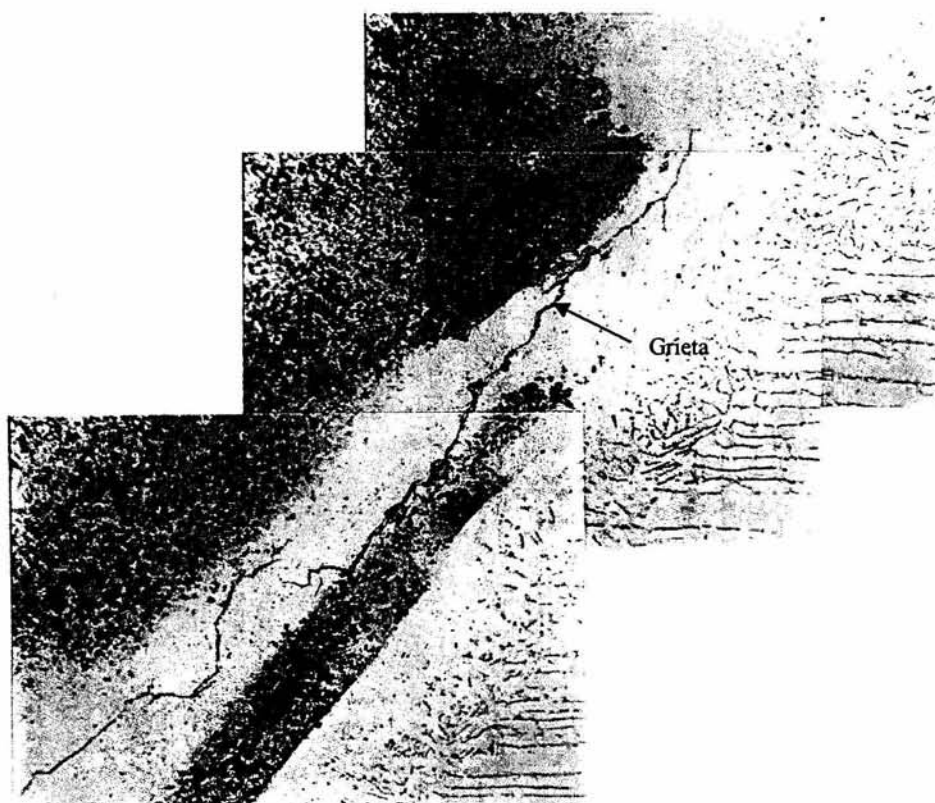
(b)

**Figuras 3.7 , (a) 100x y (b) 400x.** Se muestra del lado izquierdo de ambas fotografías el material de aporte 7018, y del lado derecho se observa el material base inoxidable austenítico 304. Es de notar que la ZAC en el metal base cambia de morfología, presentándose cristales pequeños de austenita con precipitación de ferrita delta intercrystalina y posible perlita, con placas de carburos inter y transcrystalinos; además se observa una zona de no mezcla. Ambas atacadas con ácido oxálico.

## III.2.2. Condición No.2 (7018-W)

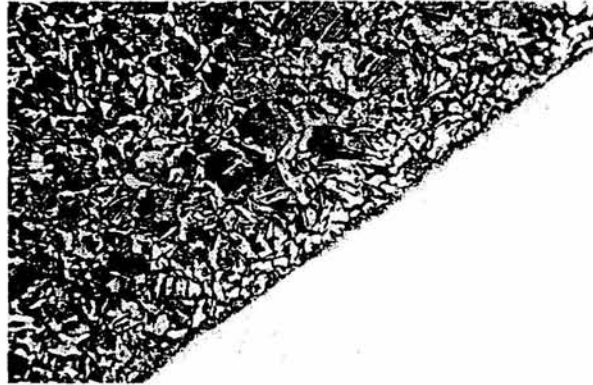


(a)

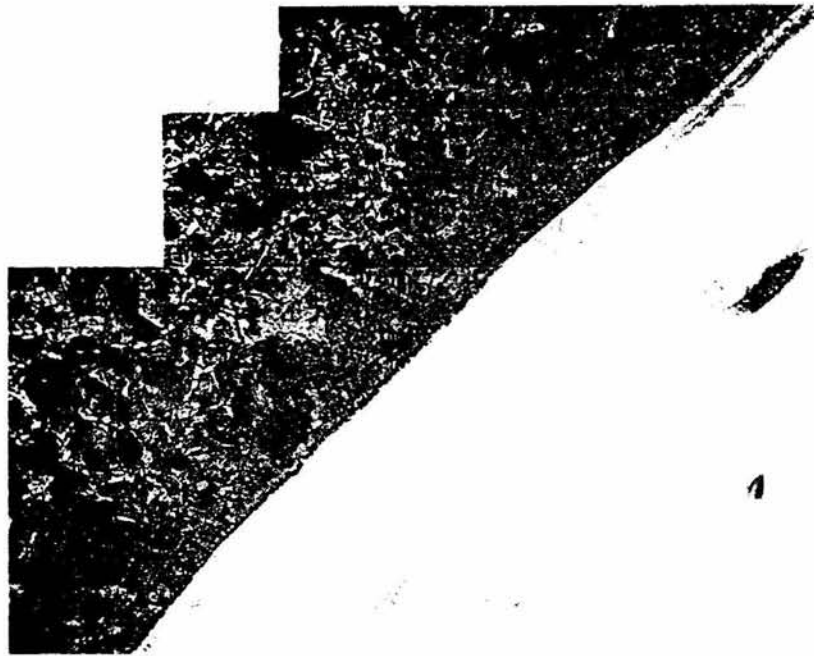


(b)

**Figuras 3.8** , (a) 100x y (b) 400x, "3 fotografías escalonadas". Se muestra del lado izquierdo de ambas fotografías el material de aporte 7018, y del lado derecho se observa el material base inoxidable austenítico 304. Atacadas ambas por ácido oxálico.

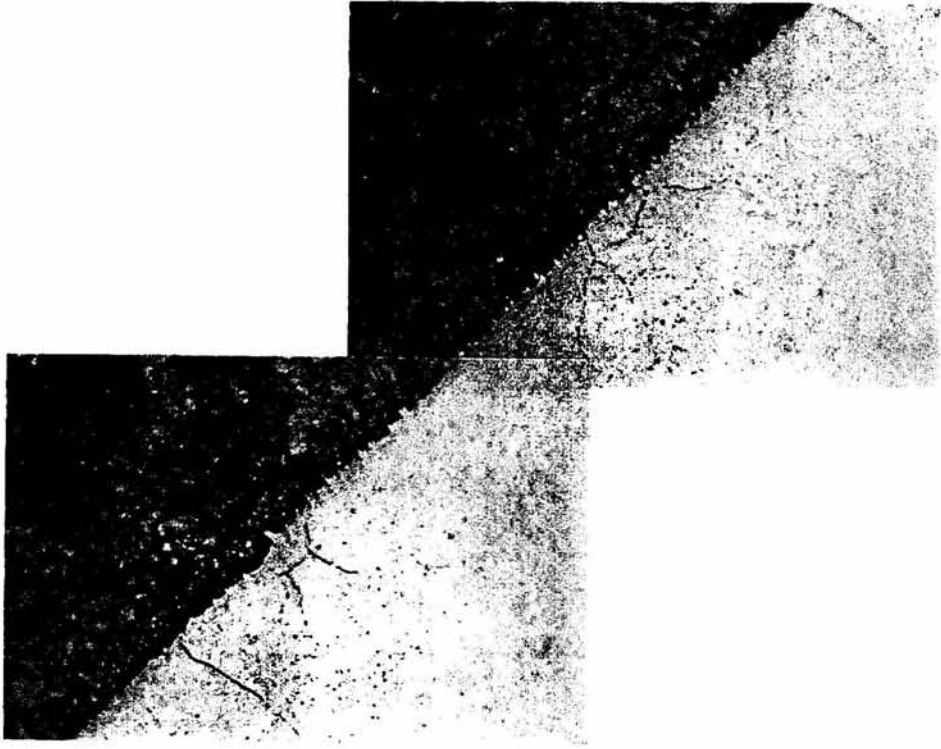


(a)



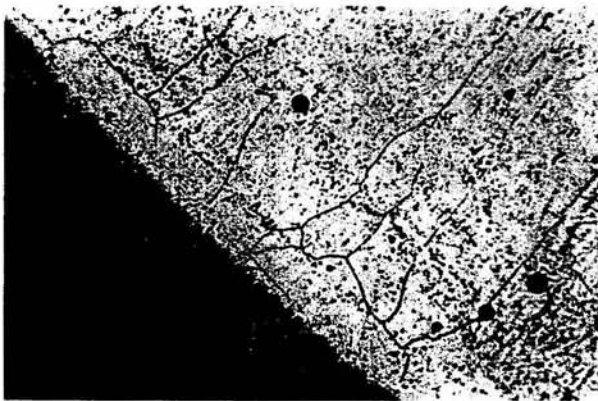
(b)

**Figuras 3.9 (a)**100x,**(c)** 400x atacadas con ácido oxálico "fotografías escalonada". Del lado derecho se encuentra el material base A36 sobreatacado y a la izquierda el 308 – Microestructura del material de aporte acero inoxidable austenítico 308 con charcos de ferrita delta, y en el metal base A36 se observan áreas blancas que son ferrita, y las áreas negras es perlita.**(b)** misma zona de la fotografía (a), pero fue atacada con Nital 2%, nótese que el material de aporte inoxidable no fue afectado.



(c)

## III.2.4. Condición No. 4 (308-W)



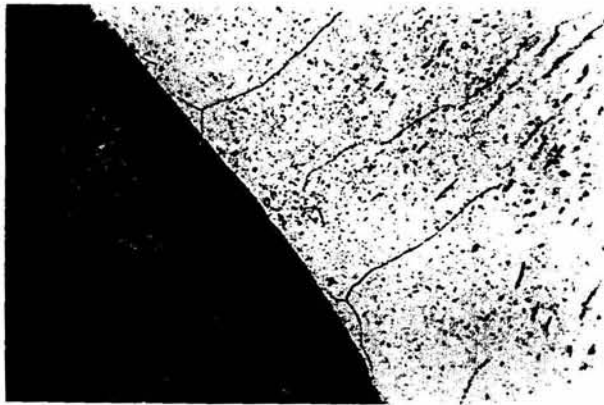
(a)



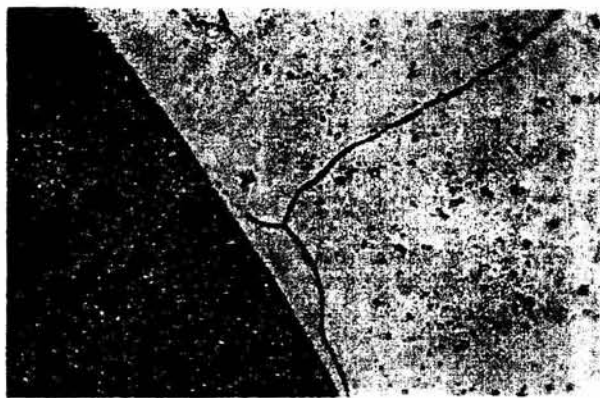
(b)

**Figuras 3.10. (a) 100x, (b) 400x, atacadas con ácido oxálico y en otra zona se muestran las figuras (c) 100x y (d) 400x, atacadas con ácido oxálico.. Del lado izquierdo inferior de las cuatro fotografías se encuentra el material base A36 sobreatacado, el lado más oscuro y a la derecha el 308 – Microestructura del material de aporte acero inoxidable austenítico 308 y en el metal base A36 se observan áreas blancas que son ferrita, y las áreas negras es perlita.**





(c)



(d)



(a)



(b)

**Figuras 3.11.** (a)100x,(b) 400x, atacadas con ácido oxálico y en otra zona se muestran las figuras (c) 100x y (d) 400x, atacadas con ácido oxálico. Del lado izquierdo de las cuatro fotografías se encuentra el material base A36 sobreatacado, el lado más oscuro y a la derecha el 312 – Microestructura del material de aporte acero inoxidable austenítico y en el metal base A36 se observan áreas blancas que son ferrita, y las áreas negras es perlita.



(c)

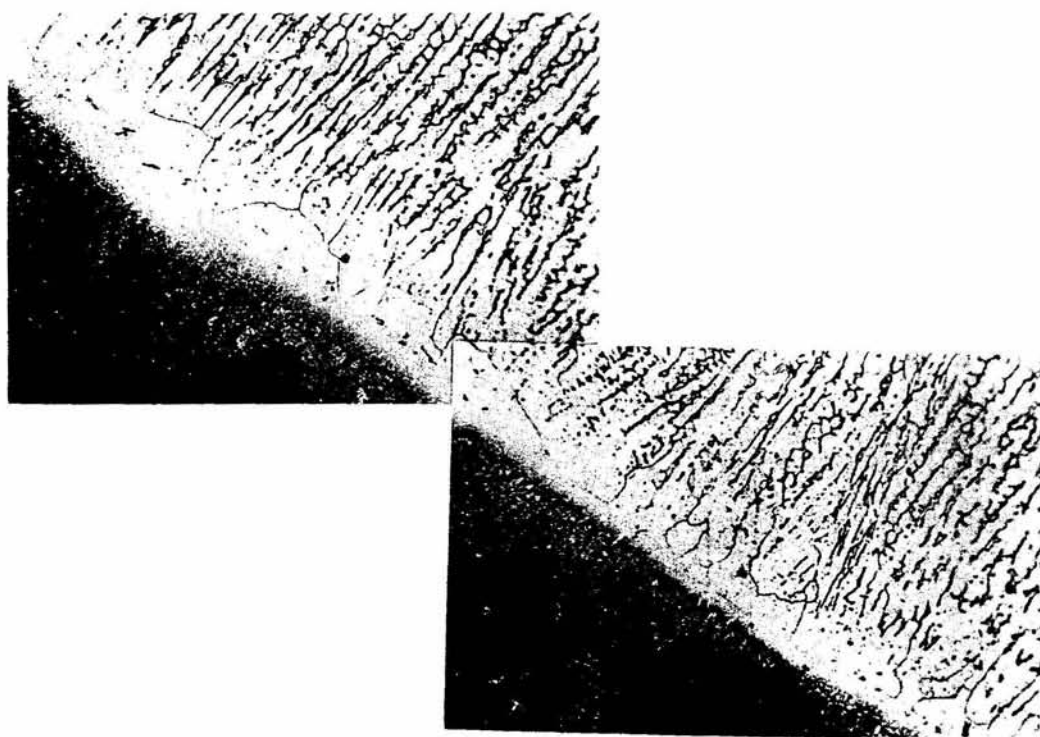


(d)

## III.2.6. Condición No.6 (312-W)

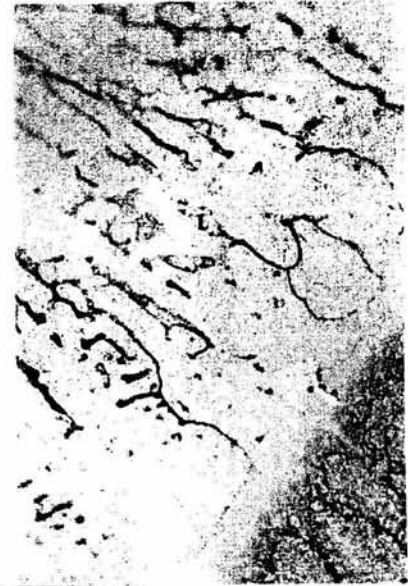


(a)



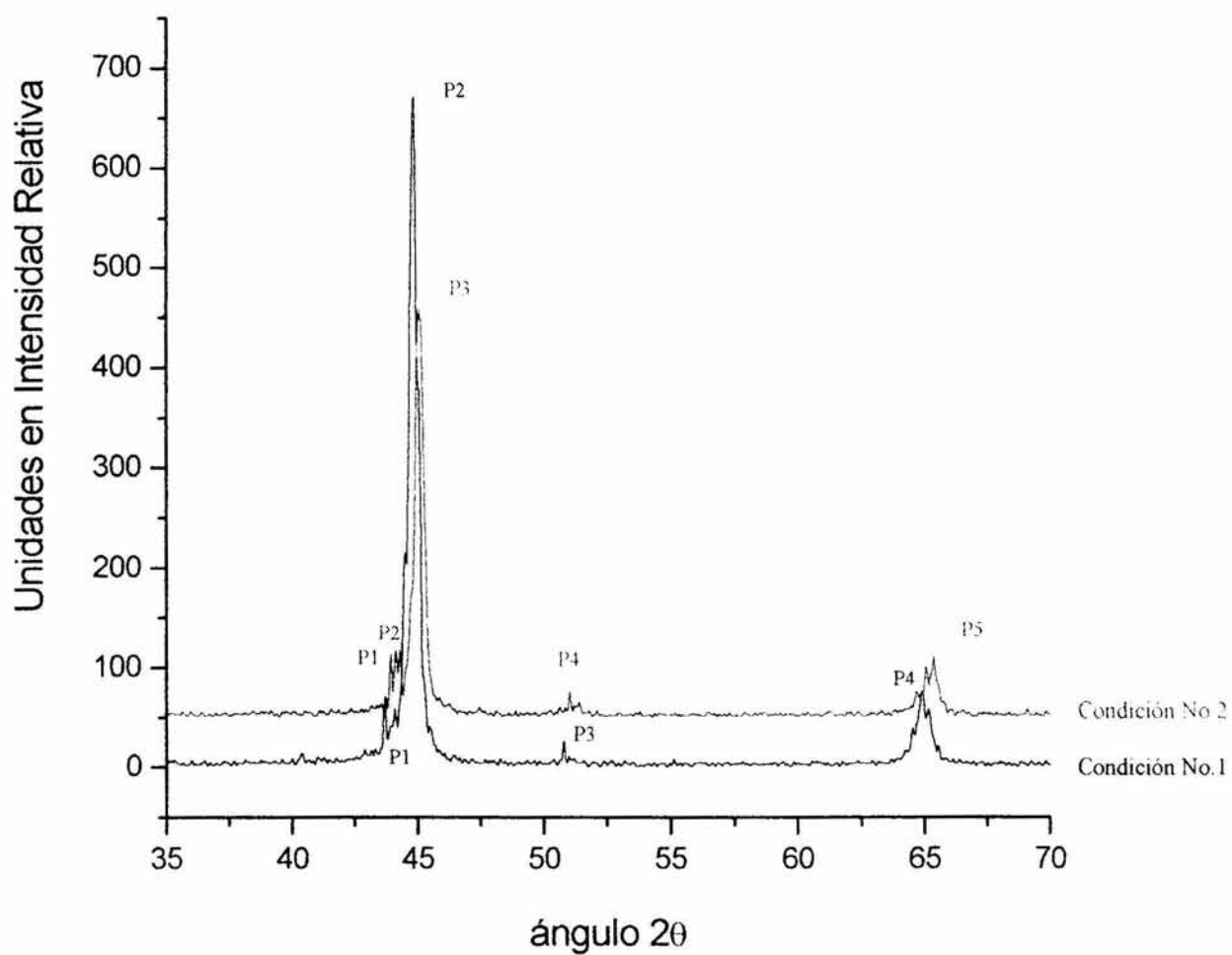
(b)

**Figuras 3.12. (a) 400x, (b) 100x y (c) 1000x, atacadas con ácido oxálico. Del lado izquierdo inferior de las tres fotografías se encuentra el material base A36 sobreatacado, el lado más oscuro y a la derecha el E-312, microestructura del material de aporte acero inoxidable ferrita en una matriz austenítica, y en el metal base A36 se observan áreas blancas que son ferrita y las áreas negras es perlita.**

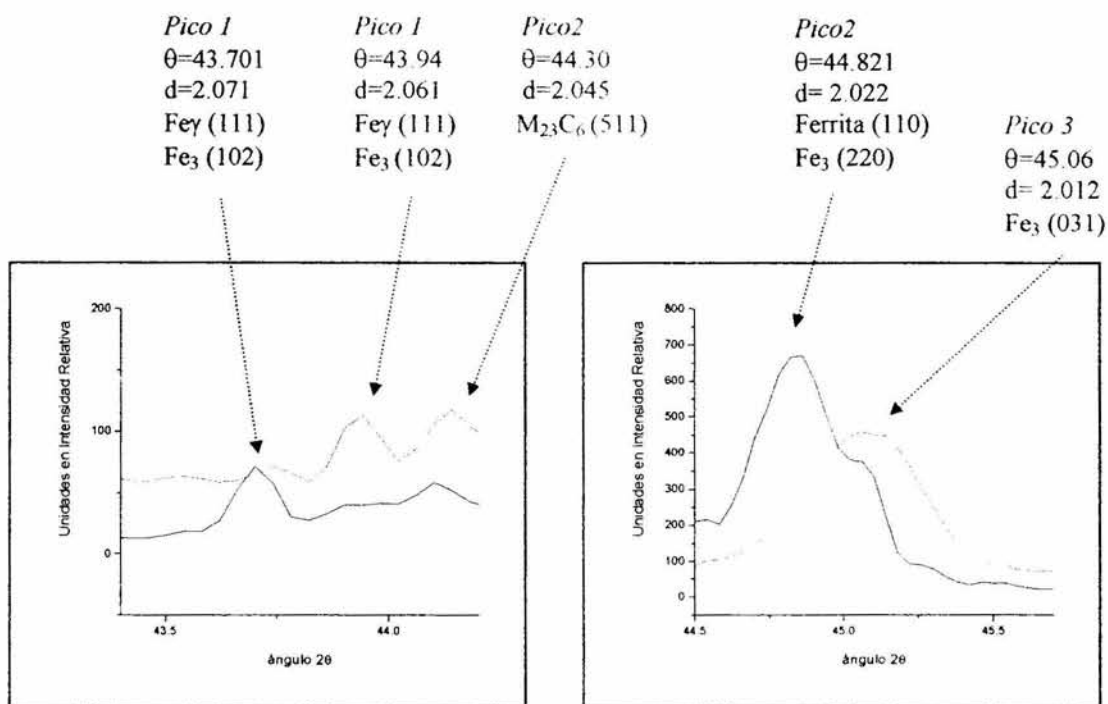


(c)

## III.3. Difracción de Rayos X



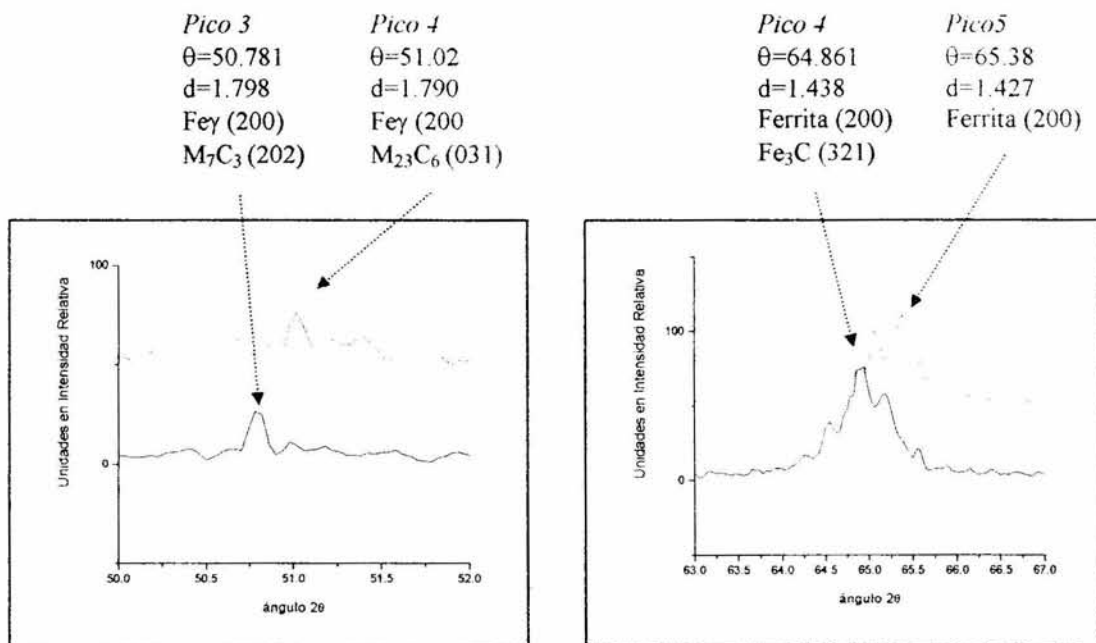
**Figura 3.13 (a)** .- Difractograma de la Condición No.1 (soldadura de un A-36 y 304 utilizando E-7018, enfriado al aire tranquilo a temperatura ambiente) y Condición No.2 (soldadura de un A-36 y 304 utilizando E-7018, enfriado en agua, 09°).

**Figura 3.13. (b)**

Pico 1 en color negro (Condición No.1)  
Picos 1 y 2 en color rojo (Condición No.2)

**Figura 3.13. (c)**

Pico 2 en color negro (Condición No.1)  
Pico 3 en color rojo (Condición No.2)

**Figura 3.13. (d)**

Pico 3 en color negro (Condición No.1)  
Pico 4 en color rojo (Condición No.2)

**Figura 3.13. (e)**

Pico 4 en color negro (Condición No.1)  
Pico 5 en color rojo (Condición No.2)

### III.3.1. Difracción de Rayos-X - Condición No.1

**Tabla 3.1. (a).**- Tabla de ángulos y distancias interplanares de los picos en el difractograma de la muestra en la Condición No. 1 (7018-A)

| Número del Pico. | Ángulo | Distancia $d$ (amstrongs.Å) |
|------------------|--------|-----------------------------|
| 1°               | 43.701 | 2.071                       |
| 2°               | 44.821 | 2.022                       |
| 3°               | 50.781 | 1.798                       |
| 4°               | 64.861 | 1.438                       |

**Tabla 3.1. (b).**- Tabla de las estructuras encontradas en cada uno de los picos del difractograma para la Condición No. 1

| Distancias Experimentales      | 2.071                    | 2.022                    | 1.798                    | 1.438                   |
|--------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|
| Estructura                     | Pico 1                   | Pico 2                   | Pico 3                   | Pico 4                  |
| Fe $\gamma$                    | 2.088<br>(111)<br>100%   | 2.088<br>(111)<br>100%   | 1.8086<br>(200)<br>80%   | 1.27887<br>(220)<br>50% |
| Ferrita                        | 2.02668<br>(110)<br>100% | 2.02668<br>(110)<br>100% | 2.02668<br>(110)<br>100% | 1.4332<br>(200)<br>20%  |
| M <sub>23</sub> C <sub>6</sub> | 2.037<br>(511)<br>100%   | 2.037<br>(511)<br>100%   | 1.789<br>(531)<br>20%    | 1.482<br>(551)<br>2%    |
| Fe <sub>3</sub> C              | 2.0678<br>(102)<br>67%   | 2.0313<br>(220)<br>56%   | 1.7630<br>(122)<br>19%   | 1.4372<br>(321)<br>1%   |
| M <sub>7</sub> C <sub>3</sub>  | 2.0301<br>(211)<br>43%   | 2.0301<br>(211)<br>43%   | 1.8116<br>(202)<br>83%   | 1.7321<br>(220)<br>53%  |



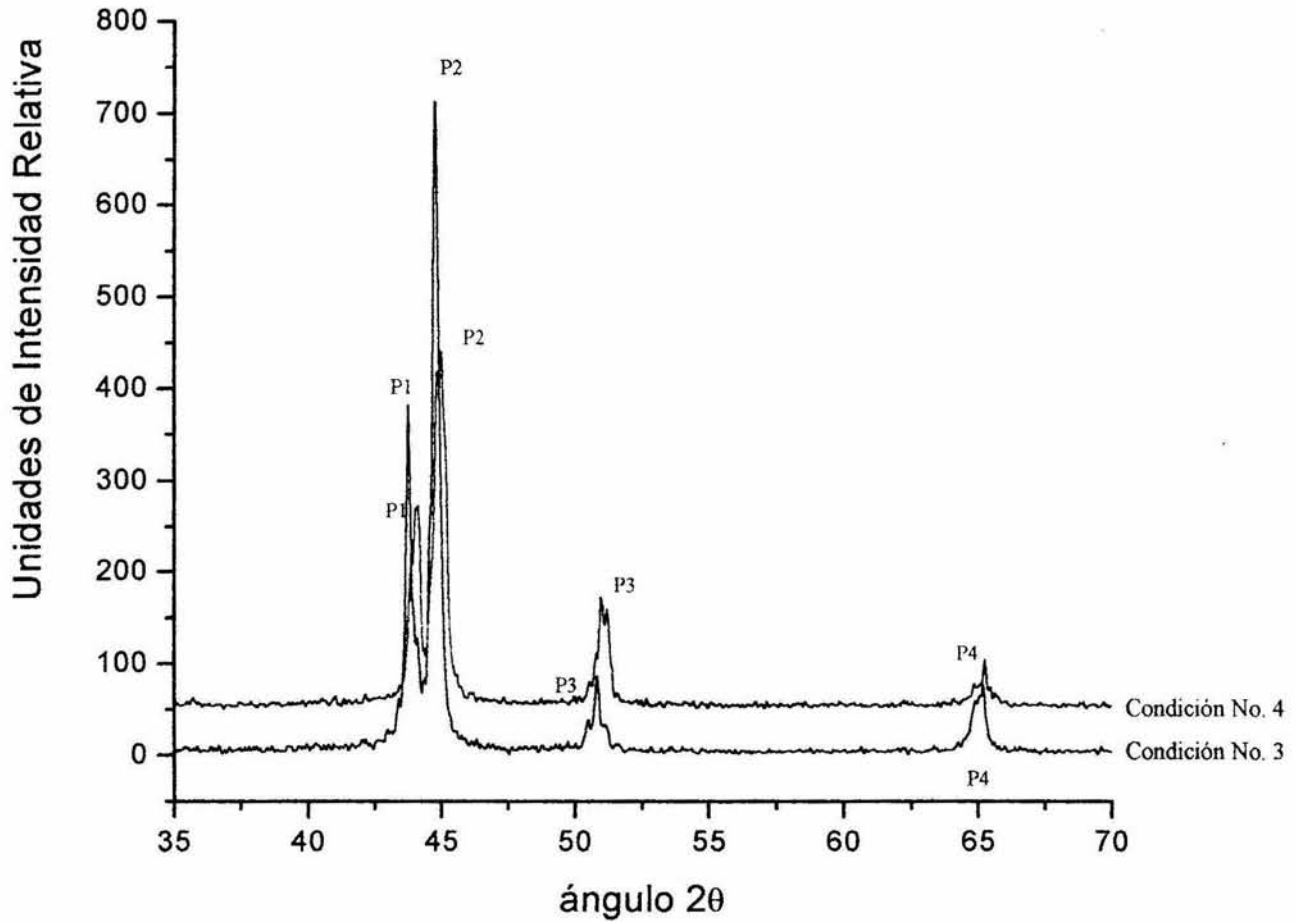
### III.3.2. Difracción de Rayos-X - Condición No.2

**Tabla 3.1. (c).**- Tabla de ángulos y distancias interplanares de los picos en el difractograma de la muestra en la Condición No. 2 (7018-W)

| Número del Pico. | Ángulo | Distancia $d$ (amstrongs,Å) |
|------------------|--------|-----------------------------|
| 1°               | 43.94  | 2.061                       |
| 2°               | 44.30  | 2.045                       |
| 3°               | 45.06  | 2.012                       |
| 4°               | 51.02  | 1.790                       |
| 5°               | 65.38  | 1.427                       |

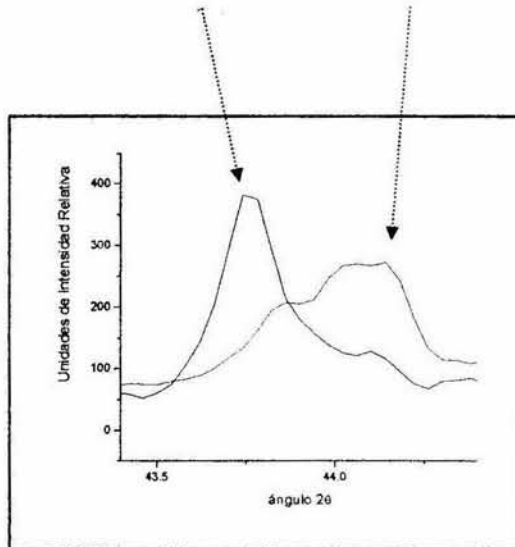
**Tabla 3.1. (d).**- Tabla de las estructuras encontradas en cada uno de los picos del difractograma para la Condición No. 2

| Distancias Experimentales      | 2.061                    | 2.045                    | 2.012                    | 1.790                   | 1.427                   |
|--------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Estructura                     | Pico 1                   | Pico 2                   | Pico 3                   | Pico 4                  | Pico 5                  |
| Fe $\gamma$                    | 2.08839<br>(111)<br>100% | 2.08839<br>(111)<br>100% | 2.08839<br>(111)<br>100% | 1.8086<br>(200)<br>80%  | 1.27887<br>(220)<br>50% |
| Ferrita                        | 2.0268<br>(110)<br>100%  | 2.0268<br>(110)<br>100%  | 2.0268<br>(110)<br>100%  | 2.0268<br>(110)<br>100% | 1.4332<br>(200)<br>20%  |
| M <sub>23</sub> C <sub>6</sub> | 2.037<br>(511)<br>100%   | 2.037<br>(511)<br>100%   | 2.037<br>(511)<br>100%   | 1.789<br>(531)<br>20%   | 1.482<br>(551)<br>2%    |
| Fe <sub>3</sub> C              | 2.0678<br>(102)<br>67%   | 2.0313<br>(220)<br>56%   | 2.0132<br>(031)<br>100%  | 1.7630<br>(122)<br>19%  | 1.4372<br>(321)<br>1%   |
| M <sub>7</sub> C <sub>3</sub>  | 2.0301<br>(211)<br>43%   | 2.0301<br>(211)<br>43%   | 2.0020<br>(300)<br>40%   | 1.8116<br>(202)<br>83%  | 1.7321<br>(220)<br>53%  |



**Figura 3.14. (a)**.- Difractograma de la Condición No.3 (soldadura de un A-36 y 304 utilizando E-308, enfriado al aire tranquilo a temperatura ambiente) y Condición No.4 (soldadura de un A-36 y 304 utilizando E-308, enfriado en agua, 09°).

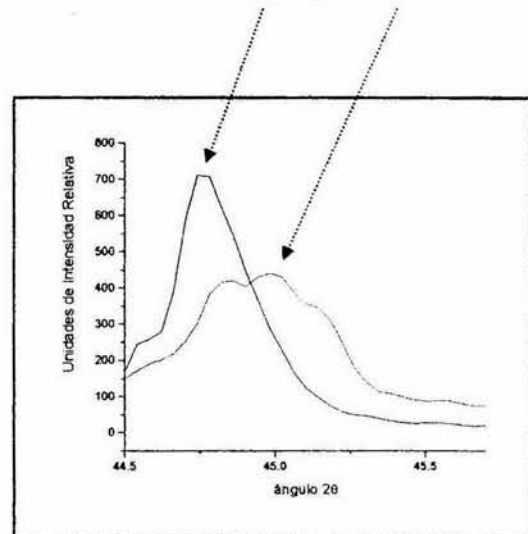
|                   |                   |
|-------------------|-------------------|
| <i>Pico 1</i>     | <i>Pico1</i>      |
| $\theta=44.18$    | $\theta=44.14$    |
| $d=2.050$         | $d=2.052$         |
| $M_{23}C_6$ (511) | $M_{23}C_6$ (511) |



**Figura 3.14 (b)**

Pico 1 en color negro (Condición No.3)  
Pico 1 en color rojo (Condición No.4)

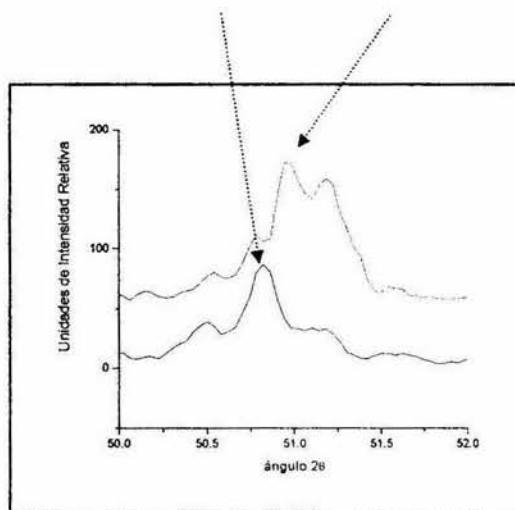
|                |                |
|----------------|----------------|
| <i>Pico 2</i>  | <i>Pico2</i>   |
| $\theta=45.02$ | $\theta=44.98$ |
| $d=2.014$      | $d=2.015$      |
| Ferrita (110)  | $Fe_3C$ (102)  |
| $Fe_3C$ (110)  |                |



**Figura 3.14 (c)**

Pico 2 en color negro (Condición No.3)  
Pico 2 en color rojo (Condición No.4)

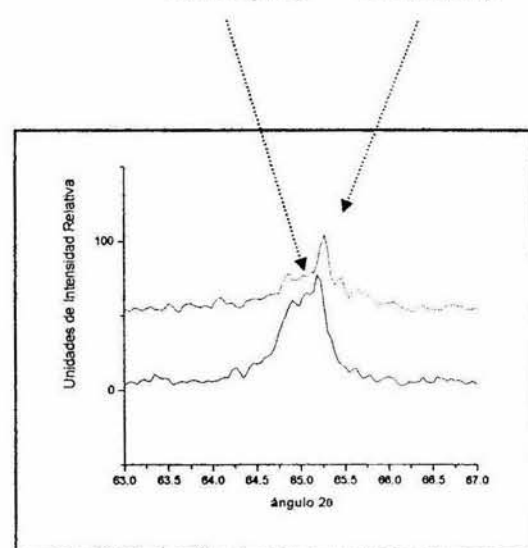
|                   |                   |
|-------------------|-------------------|
| <i>Pico3</i>      | <i>Pico3</i>      |
| $\theta=51.26$    | $\theta=50.94$    |
| $d=1.782$         | $d=1.793$         |
| $Fe_\gamma$ (200) | $Fe_\gamma$ (200) |
| $M_{23}C_6$ (531) | $M_{23}C_6$ (531) |



**Figura 3.14 (d)**

Pico 3 en color negro (Condición No.3)  
Pico 3 en color rojo (Condición No.4)

|                |                |
|----------------|----------------|
| <i>Pico 4</i>  | <i>Pico4</i>   |
| $\theta=65.26$ | $\theta=65.26$ |
| $d=1.430$      | $d=1.430$      |
| Ferrita (200)  | Ferrita (200)  |



**Figura 3.14 (e)**

Pico 4 en color negro (Condición No.3)  
Pico 4 en color rojo (Condición No.4)

### III.3.3. Difracción de Rayos-X – Condición No.3

**Tabla 3.2. (a).**- Tabla de los ángulos y distancias interplanares de los picos en el difractograma de la muestra en la Condición No. 3 (308-A)

| Número del Pico. | Ángulo | Distancia $d$ (amstrongs,Å) |
|------------------|--------|-----------------------------|
| 1°               | 44.18  | 2.050                       |
| 2°               | 45.02  | 2.014                       |
| 3°               | 51.26  | 1.782                       |
| 4°               | 65.26  | 1.430                       |

**Tabla 3.2. (b).**- Tabla de las estructuras encontradas en cada uno de los picos del difractograma para la Condición No. 3

| Distancias Experimentales      | 2.050                    | 2.014                    | 1.782                    | 1.430                   |
|--------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|
| Estructura                     | Pico 1                   | Pico 2                   | Pico 3                   | Pico 4                  |
| Fe $\gamma$                    | 2.088<br>(111)<br>100%   | 2.088<br>(111)<br>100%   | 1.8086<br>(200)<br>80%   | 1.27887<br>(220)<br>50% |
| Ferrita                        | 2.02668<br>(110)<br>100% | 2.02668<br>(110)<br>100% | 2.02668<br>(110)<br>100% | 1.4332<br>(200)<br>20%  |
| M <sub>23</sub> C <sub>6</sub> | 2.037<br>(511)<br>100%   | 2.037<br>(511)<br>100%   | 1.789<br>(531)<br>20%    | 1.482<br>(551)<br>2%    |
| Fe <sub>3</sub> C              | 2.0678<br>(102)<br>67%   | 2.0132<br>(031)<br>100%  | 1.7630<br>(122)<br>19%   | 1.4372<br>(321)<br>1%   |
| M <sub>7</sub> C <sub>3</sub>  | 2.0301<br>(211)<br>43%   | 2.0020<br>(300)<br>40%   | 1.8116<br>(202)<br>83%   | 1.7321<br>(220)<br>53%  |

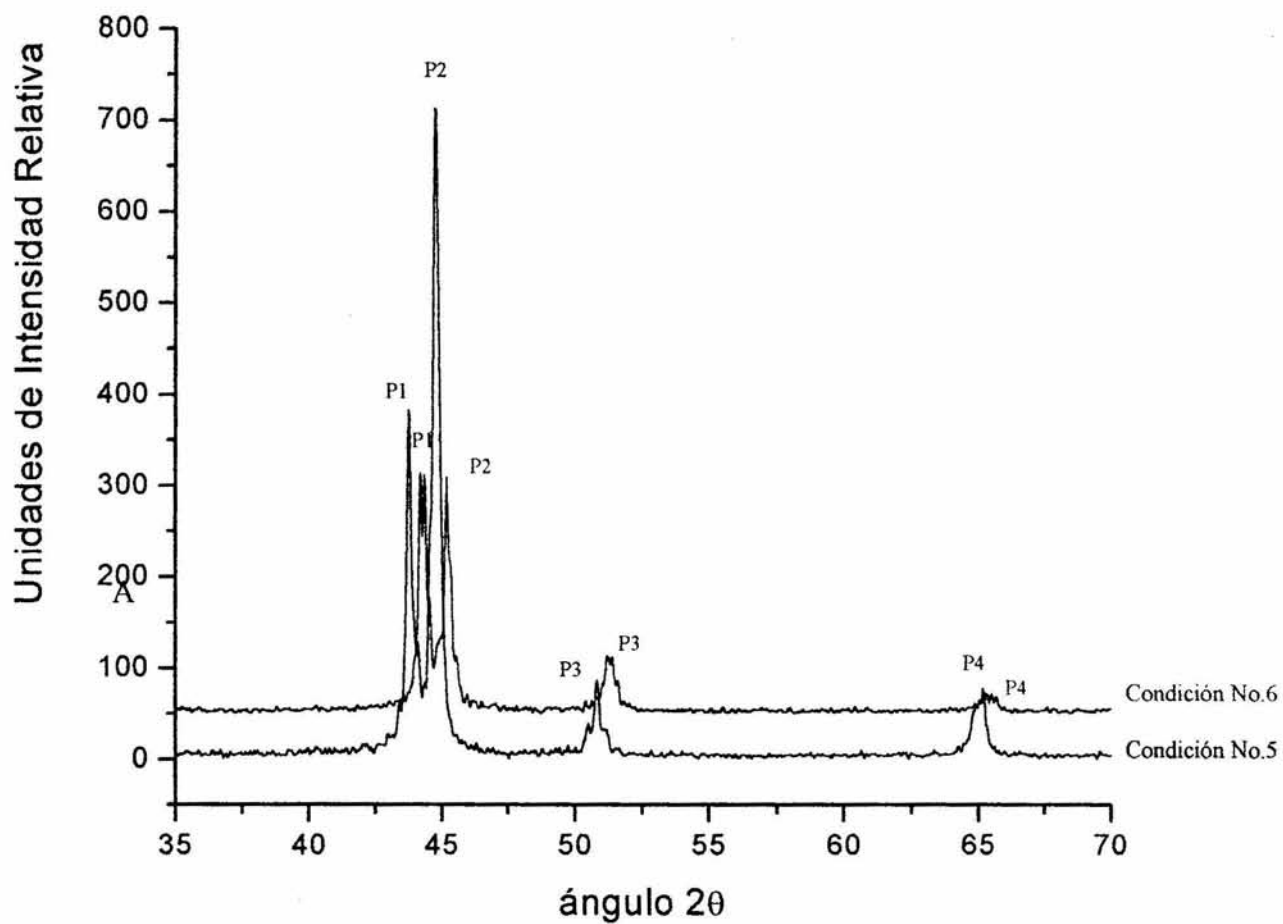
### III.3.4. Difracción de Rayos-X – Condición No.4

**Tabla 3.2. (c).**- Tabla de los ángulos y distancias interplanares de los picos en el difractograma de la muestra en la Condición No. 4 (308-W)

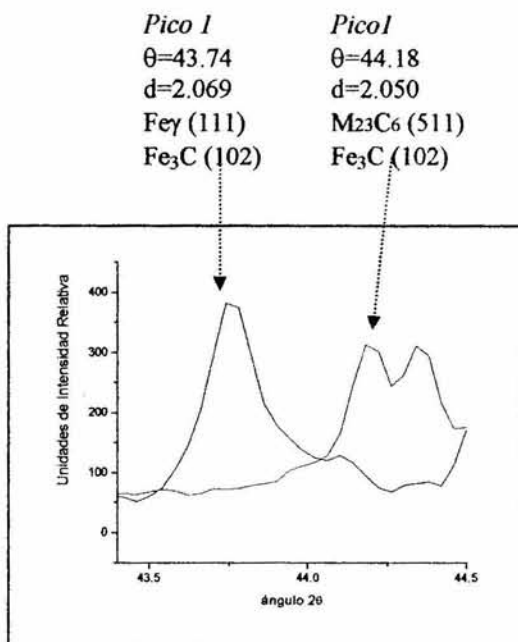
| Número del Pico. | Angulo | Distancia $d$ (amstrongs,Å) |
|------------------|--------|-----------------------------|
| 1°               | 44.14  | 2.052                       |
| 2°               | 44.98  | 2.015                       |
| 3°               | 50.94  | 1.793                       |
| 4°               | 65.26  | 1.430                       |

**Tabla 3.2. (d).**- Tabla de las estructuras encontradas en cada uno de los picos del difractograma para la Condición No.4

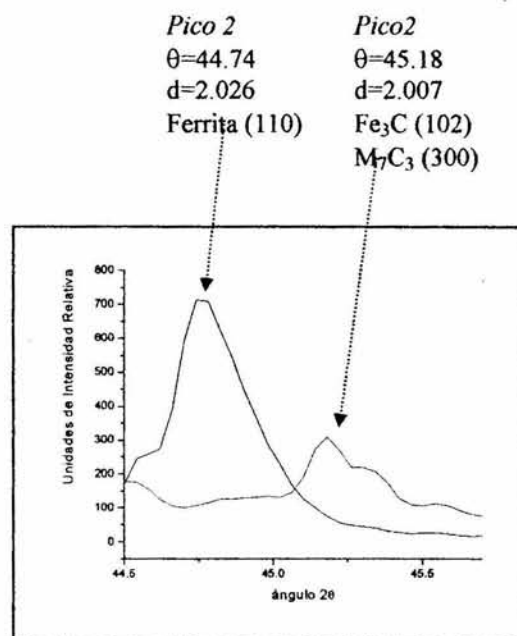
| Distancias Experimentales      | 2.052                    | 2.015                    | 1.793                    | 1.430                   |
|--------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|
| Estructura                     | Pico 1                   | Pico 2                   | Pico 3                   | Pico 4                  |
| Fe $\gamma$                    | 2.088<br>(111)<br>100%   | 2.088<br>(111)<br>100%   | 1.8086<br>(200)<br>80%   | 1.27887<br>(220)<br>50% |
| Ferrita                        | 2.02668<br>(110)<br>100% | 2.02668<br>(110)<br>100% | 2.02668<br>(110)<br>100% | 1.4332<br>(200)<br>20%  |
| M <sub>23</sub> C <sub>6</sub> | 2.037<br>(511)<br>100%   | 2.037<br>(511)<br>100%   | 1.789<br>(531)<br>20%    | 1.482<br>(551)<br>2%    |
| Fe <sub>3</sub> C              | 2.0678<br>(102)<br>67%   | 2.0132<br>(031)<br>100%  | 1.7630<br>(122)<br>19%   | 1.4372<br>(321)<br>1%   |
| M <sub>7</sub> C <sub>3</sub>  | 2.0301<br>(211)<br>43%   | 2.0020<br>(300)<br>40%   | 1.8116<br>(202)<br>83%   | 1.7321<br>(220)<br>53%  |



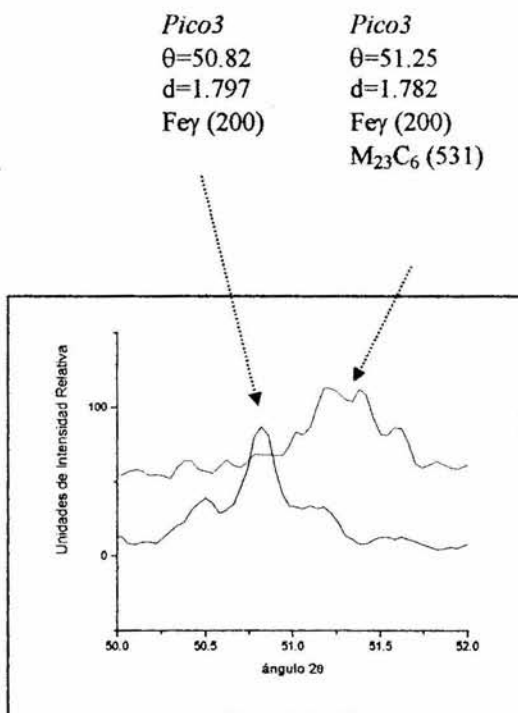
**Figura 3.15. (a).**.- Difractograma de la Condición No.5 (soldadura de un A-36 y 304 utilizando E-312, enfriado al aire tranquilo a temperatura ambiente) y Condición No.6 (soldadura de un A-36 y 304 utilizando E-312, enfriado en agua, 09°).



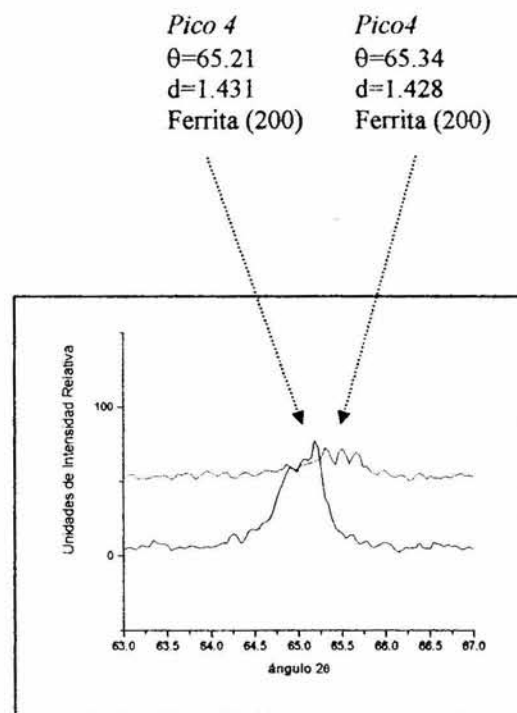
**Figura 3.15. (b)**  
 Pico 1 en color negro (Condición No.5)  
 Pico 1 en color rojo (Condición No.6)



**Figura 3.15. (c)**  
 Pico 2 en color negro (Condición No.5)  
 Pico 2 en color rojo (Condición No.6)



**Figura 3.15. (d)**  
 Pico 3 en color negro (Condición No.5)  
 Pico 3 en color rojo (Condición No.6)



**Figura 3.15. (e)**  
 Pico 4 en color negro (Condición No.5)  
 Pico 4 en color rojo (Condición No.6)

### III.3.5. Difracción de Rayos-X – Condición No.5

**Tabla 3.3. (a).**- Tabla de los ángulos y distancias interplanares de los picos en el difractograma de la muestra la Condición No.5 (312-A)

| Número del Pico. | Ángulo | Distancia $d$ (amstrongs, Å) |
|------------------|--------|------------------------------|
| 1°               | 43.74  | 2.069                        |
| 2°               | 44.74  | 2.026                        |
| 3°               | 50.82  | 1.797                        |
| 4°               | 65.21  | 1.431                        |

**Tabla 3.3. (b).**- Tabla de las estructuras encontradas en cada uno de los picos del difractograma para la Condición No. 5

| Distancias Experimentales      | 2.069                    | 2.026                    | 1.797                    | 1.431                   |
|--------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|
| Estructura                     | Pico 1                   | Pico 2                   | Pico 3                   | Pico 4                  |
| Fe $\gamma$                    | 2.088<br>(111)<br>100%   | 2.088<br>(111)<br>100%   | 1.8086<br>(200)<br>80%   | 1.27887<br>(220)<br>50% |
| Ferrita                        | 2.02668<br>(110)<br>100% | 2.02668<br>(110)<br>100% | 2.02668<br>(110)<br>100% | 1.4332<br>(200)<br>20%  |
| M <sub>23</sub> C <sub>6</sub> | 2.037<br>(511)<br>100%   | 2.037<br>(511)<br>100%   | 1.789<br>(531)<br>20%    | 1.482<br>(551)<br>2%    |
| Fe <sub>3</sub> C              | 2.0678<br>(102)<br>67%   | 2.0313<br>(220)<br>56%   | 1.7630<br>(122)<br>19%   | 1.4372<br>(321)<br>1%   |
| M <sub>7</sub> C <sub>3</sub>  | 2.0301<br>(211)<br>43%   | 2.0301<br>(211)<br>43%   | 1.8116<br>(202)<br>83%   | 1.7321<br>(220)<br>53%  |



### III.3.6. Difracción de Rayos-X – Condición No.6

**Tabla 3.3. (c).**- Tabla de los ángulos y distancias interplanares de los picos en el difractograma de la muestra en la Condición No.6 (312-W)

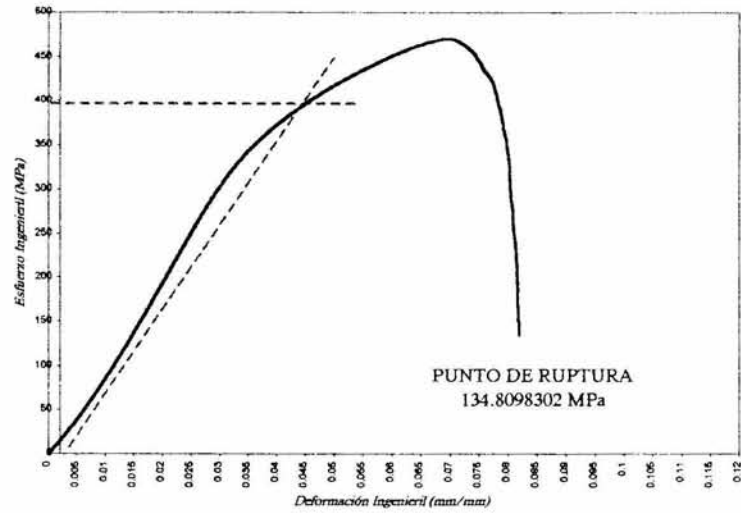
| Número del Pico. | Ángulo | Distancia $d$ (amstrongs, Å) |
|------------------|--------|------------------------------|
| 1°               | 44.18  | 2.050                        |
| 2°               | 45.18  | 2.007                        |
| 3°               | 51.25  | 1.782                        |
| 4°               | 65.34  | 1.428                        |

**Tabla 3.3. (d).**- Tabla de las estructuras encontradas en cada uno de los picos del difractograma para la Condición No.6

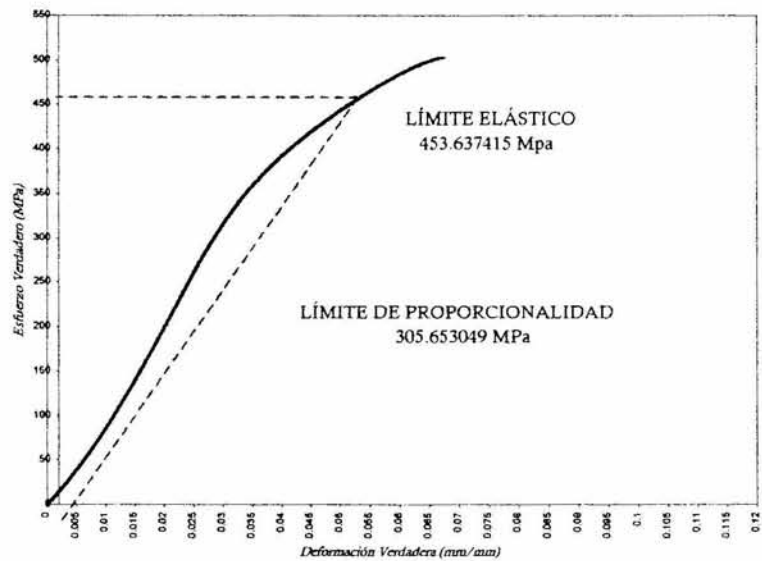
| Distancias Experimentales      | 2.050                    | 2.007                    | 1.782                    | 1.428                   |
|--------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|
| Estructura                     | Pico 1                   | Pico 2                   | Pico 3                   | Pico 4                  |
| Fe $\gamma$                    | 2.088<br>(111)<br>100%   | 2.088<br>(111)<br>100%   | 1.8086<br>(200)<br>80%   | 1.27887<br>(220)<br>50% |
| Ferrita                        | 2.02668<br>(110)<br>100% | 2.02668<br>(110)<br>100% | 2.02668<br>(110)<br>100% | 1.4332<br>(200)<br>20%  |
| M <sub>23</sub> C <sub>6</sub> | 2.037<br>(511)<br>100%   | 2.037<br>(511)<br>100%   | 1.789<br>(531)<br>20%    | 1.482<br>(551)<br>2%    |
| Fe <sub>3</sub> C              | 2.0678<br>(102)<br>67%   | 2.0132<br>(031)<br>100%  | 1.7630<br>(122)<br>19%   | 1.4372<br>(321)<br>1%   |
| M <sub>7</sub> C <sub>3</sub>  | 2.0301<br>(211)<br>43%   | 2.0020<br>(300)<br>40%   | 1.8116<br>(202)<br>83%   | 1.7321<br>(220)<br>53%  |

### III.4. Prueba de Tensión.

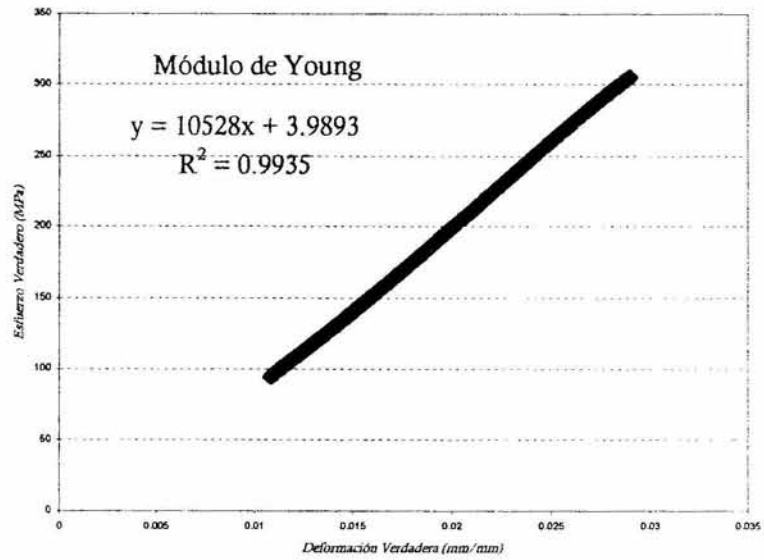
#### III.4.1. Condición No.1 (7018-A)



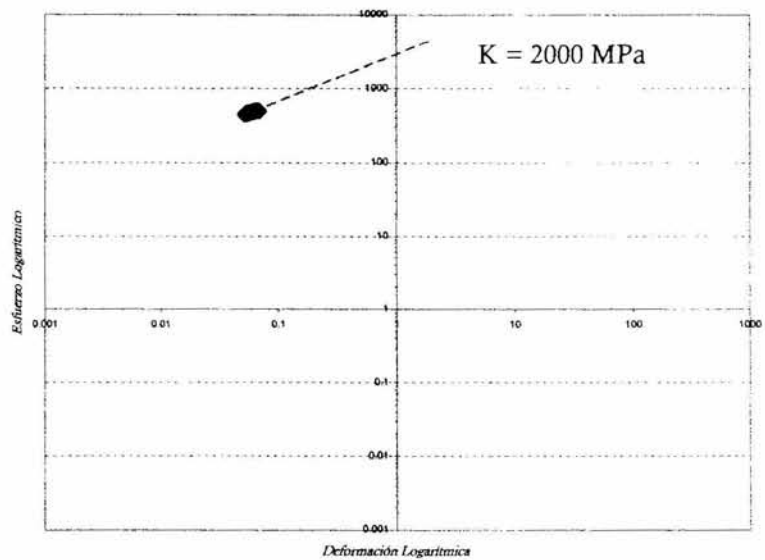
**Figura 3.16 (a).**- Curva Esfuerzo-Deformación Ingenieril (Condición No.1 "7018-A")



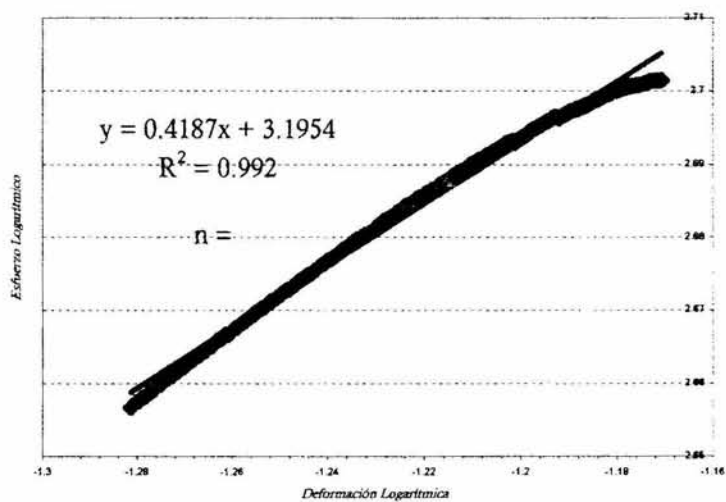
**Figura 3.16 (b).**- Curva Esfuerzo-Deformación Verdadera (Condición No.1 "7018-A")



**Figura 3.16 (c)** - Módulo de Young  
(Condición No.1 "7018-A")



**Figura 3.16 (d)** - Valor de K  
(Condición No.1 "7018-A")



**Figura 3.16 (e)** - Coeficiente de Endurecimiento  
(Condición No.1 "7018-A")

**Tabla 3.4.-** Valores calculados para la Curva  $\sigma - \epsilon$  Verdadera e Ingenieril (Condición No.1 "7018-A")

| Carga KN                      | Deformación mm.                        | Valores para la Curva $\sigma - \epsilon$ Ingenieril. |  | Longitud final                  | Área final                  | Valores para la Curva $\sigma - \epsilon$ Verdadera |   | Módulo de Young =<br>10,528MPa              |
|-------------------------------|--|---|--|---------------------------------|-----------------------------|---|---|---|
|                               |  | Deformación Ingenieril Mm.                            | Esfuerzo Ingenieril Mpa                  |                                 |                             | Deformación verdadera mm.                           | Esfuerzo verdadero Mpa                  |   |
| <b>Condición 1 (7018-A)</b>   |  |   |  |                                 |                             |   |   |   |
| Carga en 0.2% de deform. (KN) | Desplazamiento en 0.2% de deform. (mm) | Deformación Ing. En 0.2% de deform. (X100 = %)        | (esfuerzo ing. en 0.2% de deform.)       | Longitud en 0.2% de deformación | Área en 0.2% de deformación | Deformación verdadera en 0.2% de deform. (X100 = %) | (esfuerzo verd. En 0.2% de deformación) | Límite de Proporcionalidad<br>305.653049MPa |
| 19.80376015                   | 2.728214                               | 0.053705  | 430.5165249                              | 53.528214                       | 43.6554823                  | 0.05231252  | 453.637415                              |   |
| Máxima carga (KN)             | Máximo Desplazamiento (mm)             | Máxima Deformación Ingenieril (X100 = %)              | Esfuerzo Ingenieril, cuando carga máxima | Longitud en la máxima carga     | Área cuando máxima carga    | Máxima Deformación verdadera (X100 = %)             | Esfuerzo verdadero, cuando carga máxima |   |
| 21.62387405                   | 3.548126                               | 0.069845  | 470.0842185                              | 54.348126                       | 42.9968827                  | 0.06751378  | 502.917251                              |   |
| Carga de ruptura (KN)         | Desplazamiento o cuando ruptura        | Deformación Ingenieril en la ruptura                  | Esfuerzo Ingenieril, en la ruptura       | Longitud en la ruptura          | Área en la ruptura          |   |   |   |
| 6.201252187                   | 4.164076                               | 0.08197   | 134.8098302                              | 54.964076                       | 42.515042                   |   |   |   |

III.4.2. Condición No.2 (7018-W)

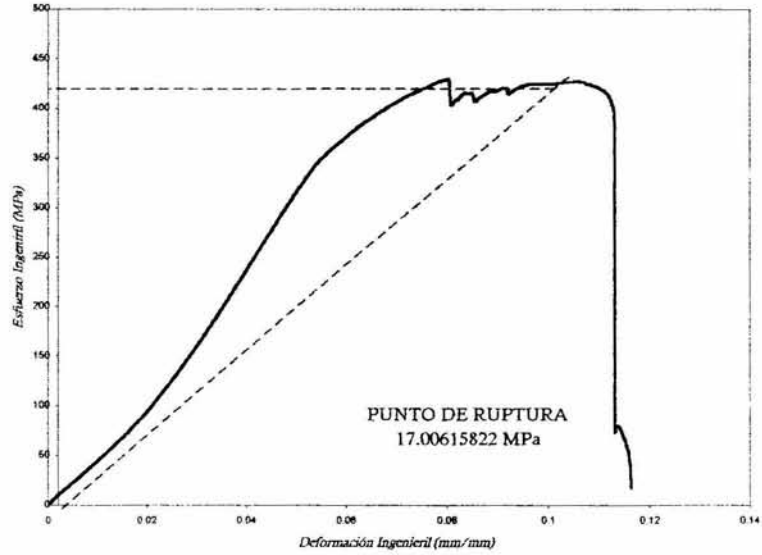


Figura 3.17 (a).- Curva Esfuerzo-Deformación Ingenieril (Condición No.2 "7018-W")

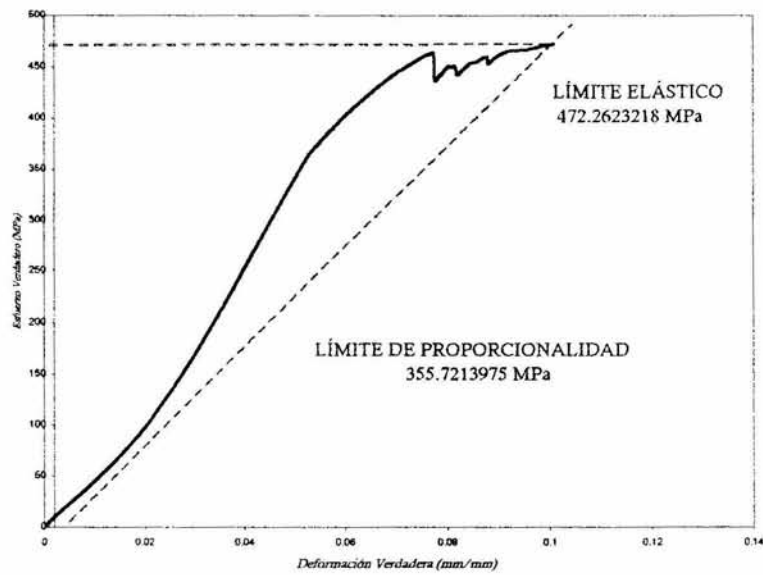
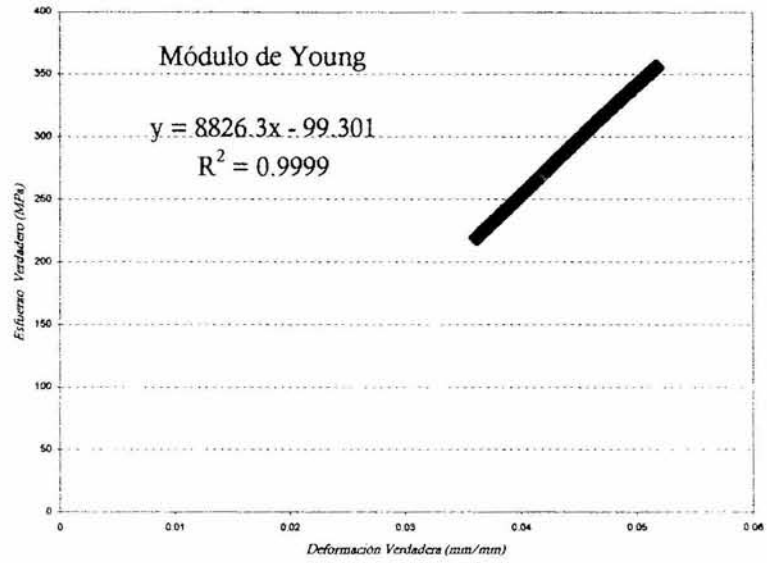
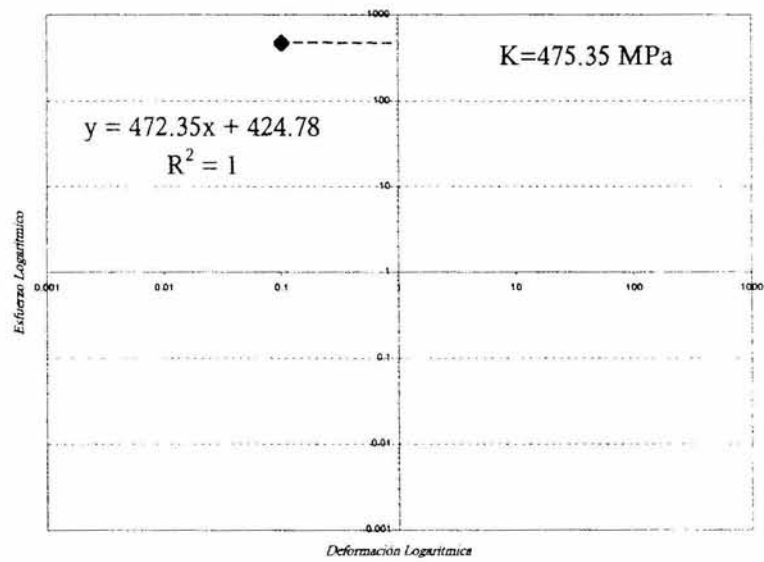


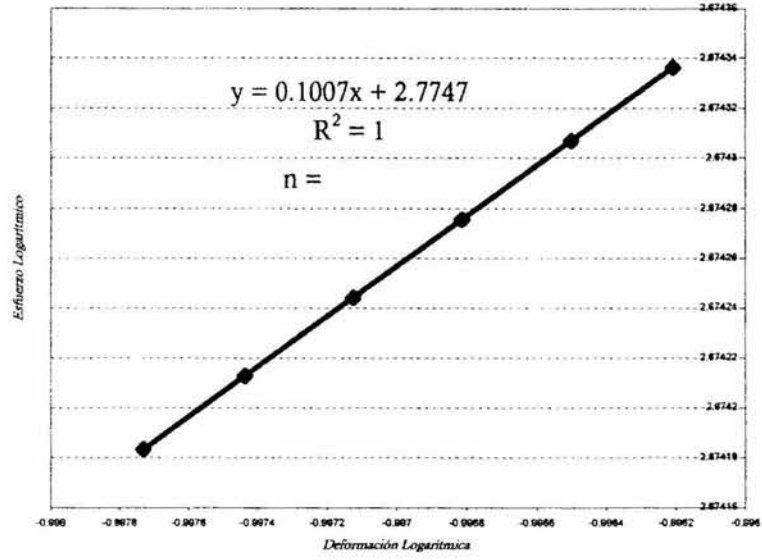
Figura 3.17 (b).- Curva Esfuerzo-Deformación Verdadera (Condición No.2 "7018-W")



**Figura 3.17 (c) -** Módulo de Young  
(Condición No.2 "7018-W")



**Figura 3.17 (d) -** Valor de K  
(Condición No.2 "7018-W")



**Figura 3.17 (e).** - Coeficiente de endurecimiento  
(Condición No.2 "7018-W")



**Tabla 3.5.-** Valores calculados para la Curva  $\sigma - \epsilon$  Verdadera e Ingenieril (Condición No.2 "7018-W")

| Carga KN                      | Deformación mm.                        | Valores para la Curva $\sigma - \epsilon$ Ingenieril. |  | Longitud final                  | Área final                  | Valores para la Curva $\sigma - \epsilon$ Verdadera |   | Módulo de Young =<br>8,826.3MPa              |
|-------------------------------|--|---|--|---------------------------------|-----------------------------|---|---|--|
|                               |  | Deformación Ingenieril Mm.                            | Esfuerzo Ingenieril MPa                  |                                 |                             | Deformación verdadera mm.                           | Esfuerzo verdadero Mpa                  |  |
| <b>Condición 2 (7018-W)</b>   |  |   |  |                                 |                             |   |   |  |
| Carga en 0.2% de deform. (KN) | Desplazamiento en 0.2% de deform. (mm) | Deformación Ing. En 0.2% de deform. (X100 = %)        | (esfuerzo ing. en 0.2% de deform.)       | Longitud en 0.2% de deformación | Área en 0.2% de deformación | Deformación verdadera en 0.2% de deform. (X100 = %) | (esfuerzo verd. En 0.2% de deformación) | Límite de Proporcionalidad<br>355.7213975Mpa |
| 22.1473625                    | 5.3721                                 | 0.10575   | 427.0968319                              | 56.1721                         | 46.8963147                  | 0.10052384  | 472.2623218                             |  |
| Máxima carga (KN)             | Máximo Desplazamiento (mm)             | Máxima Deformación Ingenieril (X100 = %)              | Esfuerzo Ingenieril, cuando carga máxima | Longitud en la máxima carga     | Área cuando máxima carga    | Máxima Deformación verdadera (X100 = %)             | Esfuerzo verdadero, cuando carga máxima |  |
| 22.1473625                    | 5.391912                               | 0.10614   | 427.0968319                              | 56.191912                       | 46.8797801                  | 0.10087648  | 472.4288896                             |  |
| Carga de ruptura (KN)         | Desplazamiento o cuando ruptura        | Deformación Ingenieril en la ruptura                  | Esfuerzo Ingenieril, en la ruptura       | Longitud en la ruptura          | Área en la ruptura          |   |   |  |
| 0.88186454                    | 5.907786                               | 0.116295  | 17.00615822                              | 56.707786                       | 46.4533121                  |   |   |  |

### III.4.3. Condición No.3 (308-A)

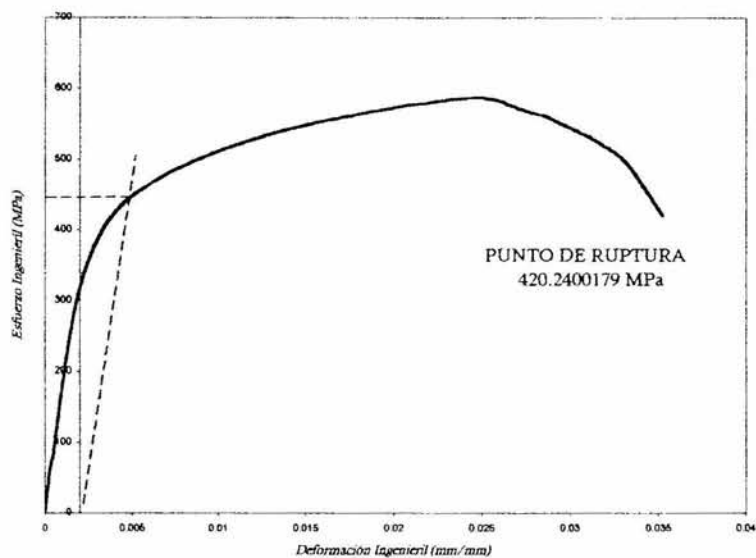


Figura 3.18 (a) - Curva Esfuerzo-Deformación Ingenieril (Condición No.3 "308-A")

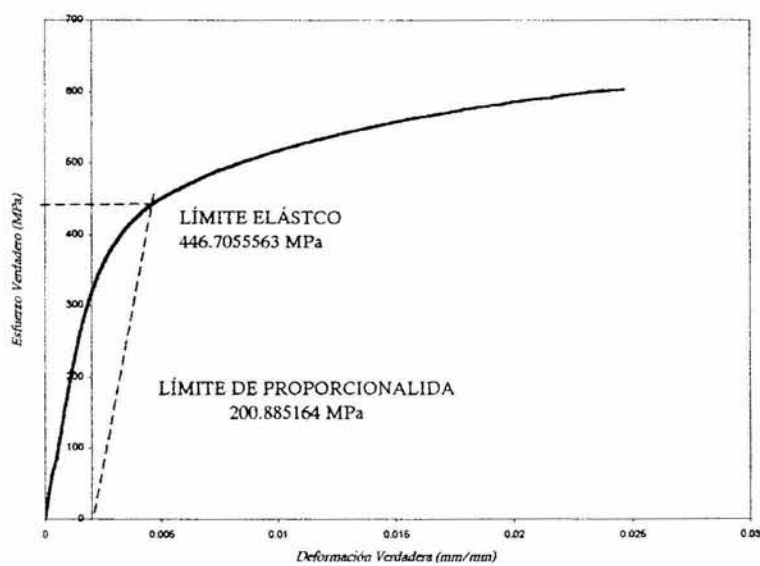
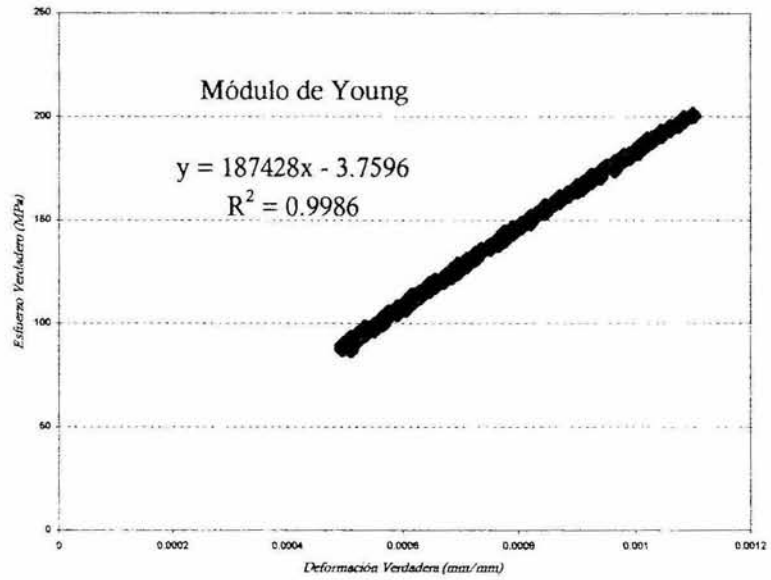
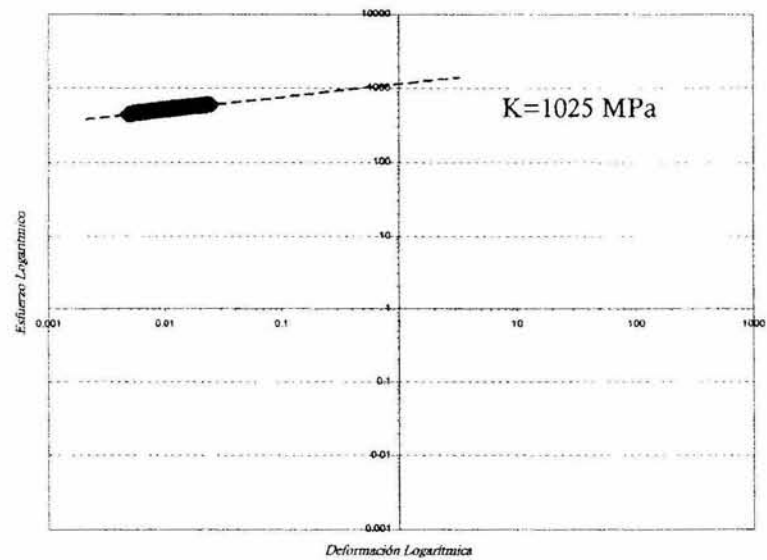


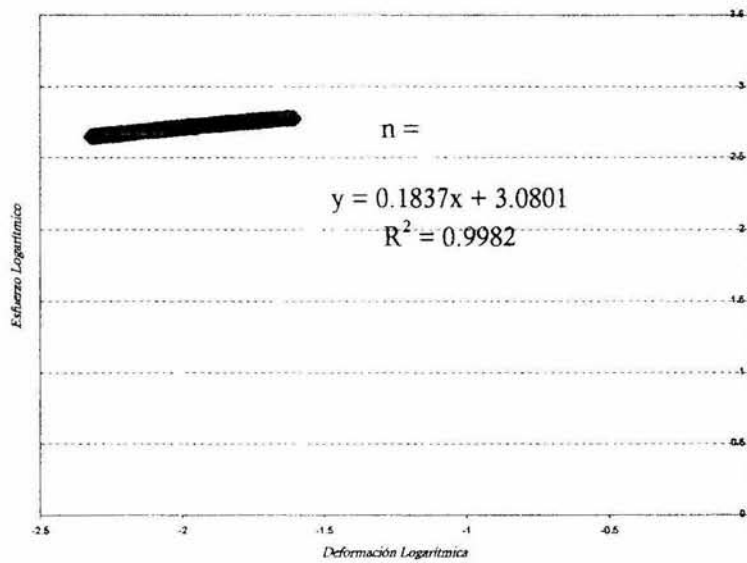
Figura 3.18 (b) - Curva Esfuerzo-Deformación Verdadera (Condición No.3 "308-A")



**Figura 3.18 (c).**- Módulo de Young  
(Condición No.3 "308-A")



**Figura 3.18 (d).**- Valor de K  
(Condición No.3 "308-A")



**Figura 3.18 (e).**- Coeficiente de endurecimiento  
(Condición No.3 "308-A")

**Tabla 3.6.-** Valores calculados para la Curva  $\sigma - \epsilon$  Verdadera e Ingenieril (Condición No.3 "308-A")

| Carga KN                      | Deformación mm.                        | Valores para la Curva $\sigma - \epsilon$ Ingenieril. |  | Longitud final                  | Área final                  | Valores para la Curva $\sigma - \epsilon$ Verdadera |   | Módulo de Young =<br>187,428Mpa             |
|-------------------------------|--|---|--|---------------------------------|-----------------------------|---|---|---|
|                               |  | Deformación Ingenieril Mm.                            | Esfuerzo Ingenieril MPa                  |                                 |                             | Deformación verdadera Mm.                           | Esfuerzo verdadero Mpa                  |   |
| <b>Condición 3 (308-A)</b>    |  |   |  |                                 |                             |   |   |   |
| Carga en 0.2% de deform. (KN) | Desplazamiento en 0.2% de deform. (mm) | Deformación Ing. En 0.2% de deform. (X100 = %)        | (esfuerzo ing. en 0.2% de deform.)       | Longitud en 0.2% de deformación | Área en 0.2% de deformación | Deformación verdadera en 0.2% de deform. (X100 = %) | (esfuerzo verd. En 0.2% de deformación) | Límite de Proporcionalidad<br>200.885164Mpa |
| 17.5125223                    | 0.244094                               | 0.004805  | 444.5694003                              | 51.044094                       | 39.2037261                  | 0.004793493   | 446.7055563                             |   |
| Máxima carga (KN)             | Máximo Desplazamiento (mm)             | Máxima Deformación Ingenieril (X100 = %)              | Esfuerzo Ingenieril, cuando carga máxima | Longitud en la máxima carga     | Área cuando máxima carga    | Máxima Deformación verdadera (X100 = %)             | Esfuerzo verdadero, cuando carga máxima |   |
| 23.1580777                    | 1.268222                               | 0.024965  | 587.8863453                              | 52.068222                       | 38.4326294                  | 0.024658466   | 602.5629279                             |   |
| Carga de ruptura (KN)         | Desplazamiento cuando ruptura          | Deformación Ingenieril en la ruptura                  | Esfuerzo Ingenieril, en la ruptura       | Longitud en la ruptura          | Área en la ruptura          |   |   |   |
| 16.5541368                    | 1.791208                               | 0.03526   | 420.2400179                              | 52.591208                       | 38.0504414                  |   |   |   |

### III.4.4. Condición No.4 (308-W)

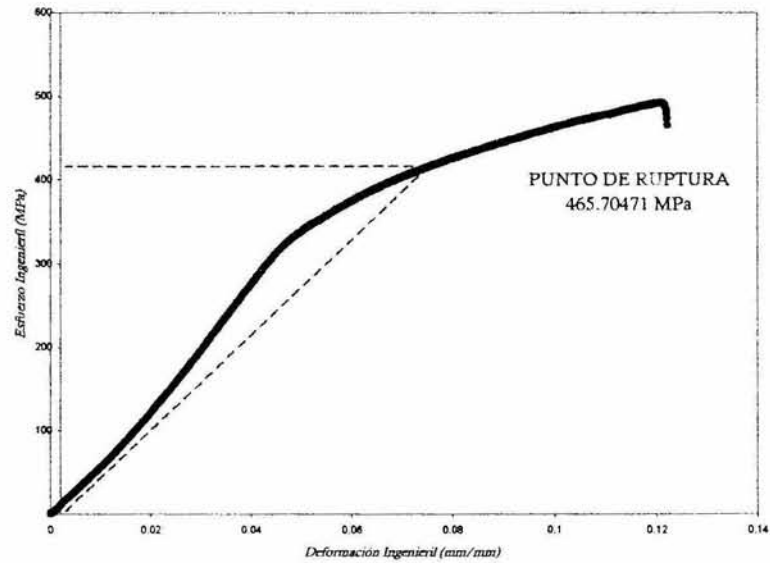


Figura 3.19 (a).- Curva Esfuerzo-Deformación Ingenieril (Condición No.4 "308-W")

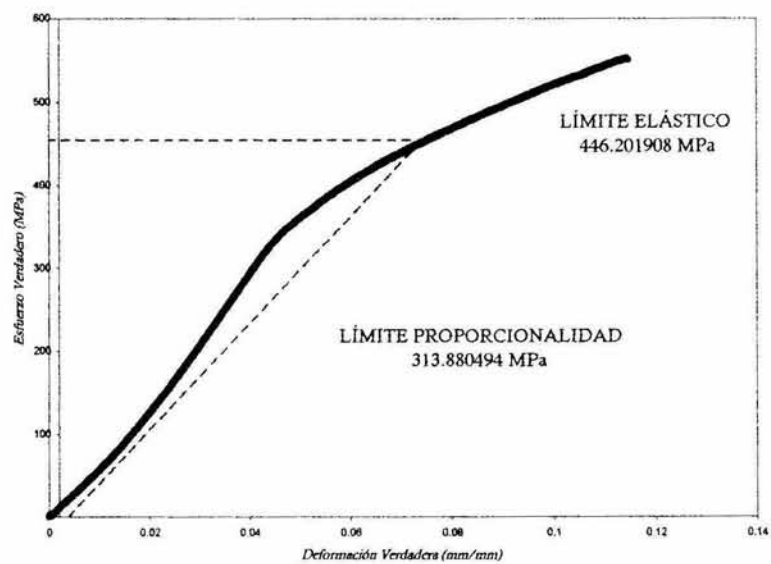
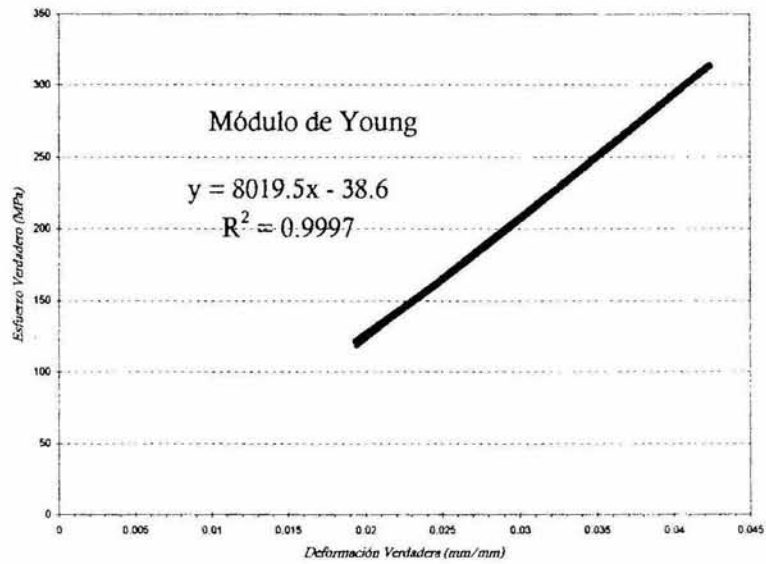
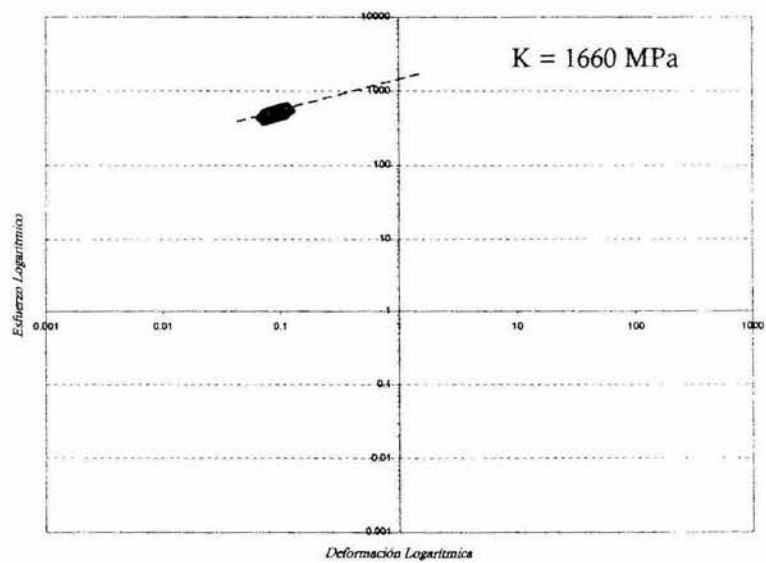


Figura 3.19 (b).- Curva Esfuerzo-Deformación Verdadera (Condición No.4 "308-W")



**Figura 3.19 (c).**- Módulo de Young  
(Condición No.4 "308-W")



**Figura 3.19 (d).**- Valor de K  
(Condición No.4 "308-W")

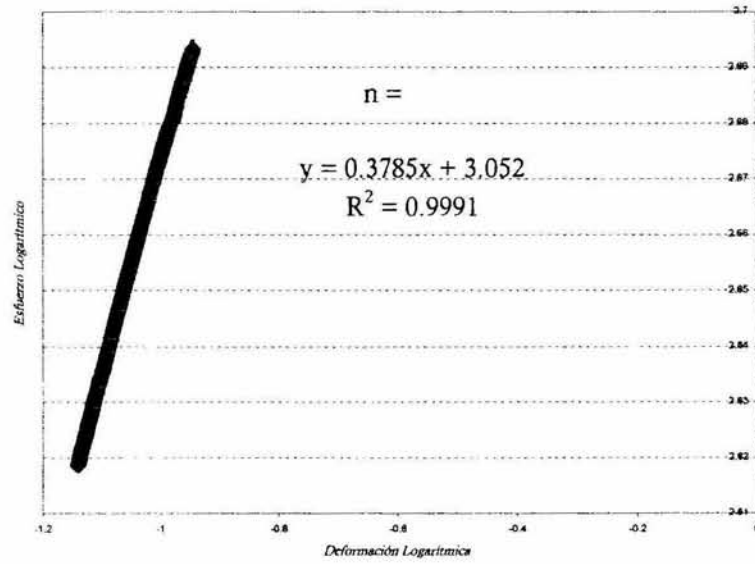


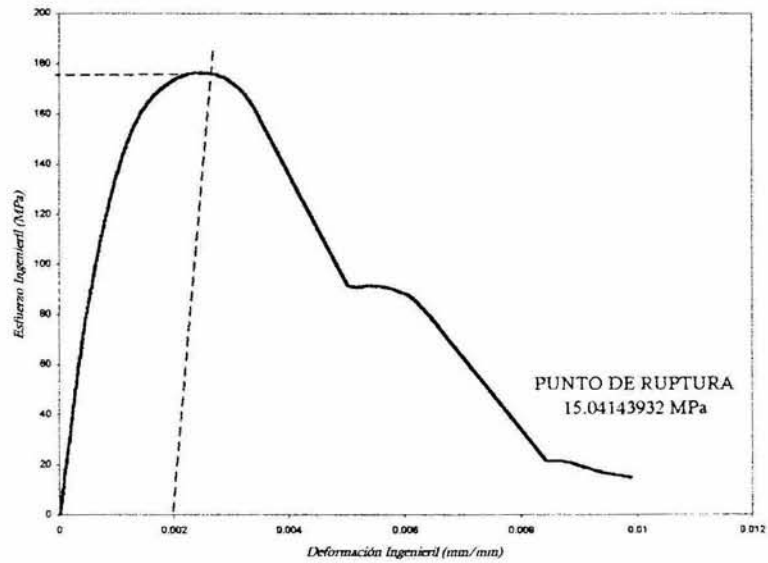
Figura 3.19 (e).- Coeficiente de endurecimiento  
(Condición No.4 "308-W")



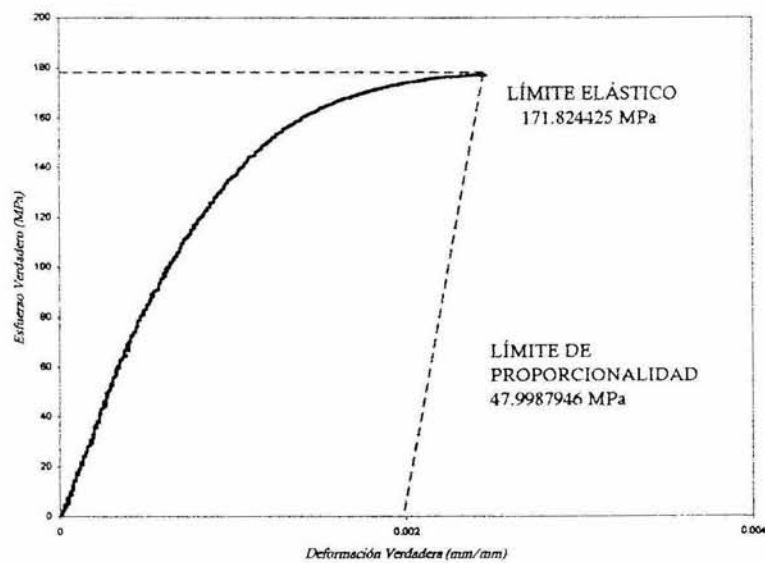
**Tabla 3.7.- Valores calculados para la Curva  $\sigma - \epsilon$  Verdadera e Ingenieril (Condición No.4 "308-W)**

| Carga KN                      | Deformación mm.                        | Valores para la Curva $\sigma - \epsilon$ Ingenieril. |  | Longitud final                  | Área final                  | Valores para la Curva $\sigma - \epsilon$ Verdadera |   | Módulo de Young =<br>8,019.5 MPa             |
|-------------------------------|--|---|--|---------------------------------|-----------------------------|---|---|--|
|                               |  | Deformación Ingenieril Mm.                            | Esfuerzo Ingenieril Mpa                  |                                 |                             | Deformación verdadera mm.                           | Esfuerzo verdadero Mpa                  |  |
| <b>Condición 4 (308-W)</b>    |  |   |  |                                 |                             |   |   |  |
| Carga en 0.2% de deform. (KN) | Desplazamiento en 0.2% de deform. (mm) | Deformación Ing. En 0.2% de deform. (X100 = %)        | (esfuerzo ing. en 0.2% de deform.)       | Longitud en 0.2% de deformación | Área en 0.2% de deformación | Deformación verdadera en 0.2% de deform. (X100 = %) | (esfuerzo verd. En 0.2% de deformación) | Límite de Proporcionalidad<br>313.880494 MPa |
| 22.00641731                   | 3.804158                               | 0.074885  | 415.11595                                | 54.604158                       | 49.3194156                  | 0.07221368  | 446.201908                              |  |
| Máxima carga (KN)             | Máximo Desplazamiento (mm)             | Máxima Deformación Ingenieril (X100 = %)              | Esfuerzo Ingenieril, cuando carga máxima | Longitud en la máxima carga     | Área cuando máxima carga    | Máxima Deformación verdadera (X100 = %)             | Esfuerzo verdadero, cuando carga máxima |  |
| 26.097649                     | 6.164326                               | 0.121345  | 492.290508                               | 56.964326                       | 47.2759945                  | 0.11452886  | 552.027499                              |  |
| Carga de ruptura (KN)         | Desplazamiento o cuando ruptura        | Deformación Ingenieril en la ruptura                  | Esfuerzo Ingenieril, en la ruptura       | Longitud en la ruptura          | Área en la ruptura          |   |   |  |
| 24.6882641                    | 6.208268                               | 0.12221   | 465.70471                                | 57.008268                       | 47.2395541                  |   |   |  |

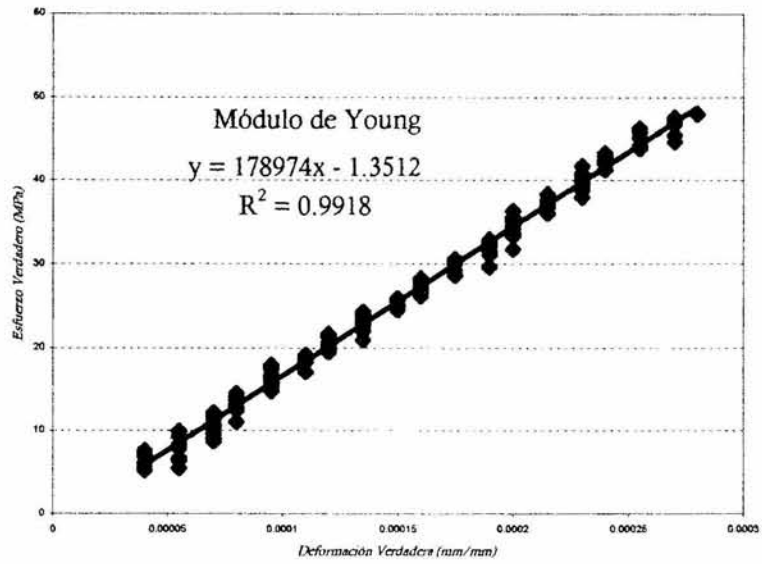
### III.4.5. Condición No.5 (312-A)



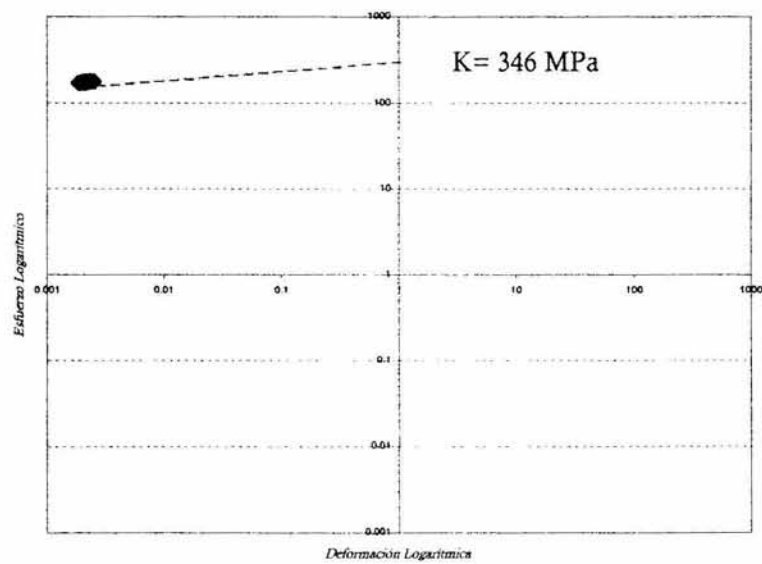
**Figura 3.20 (a).**- Curva Esfuerzo-Deformación Ingenieril (Condición No.5 "312-A")



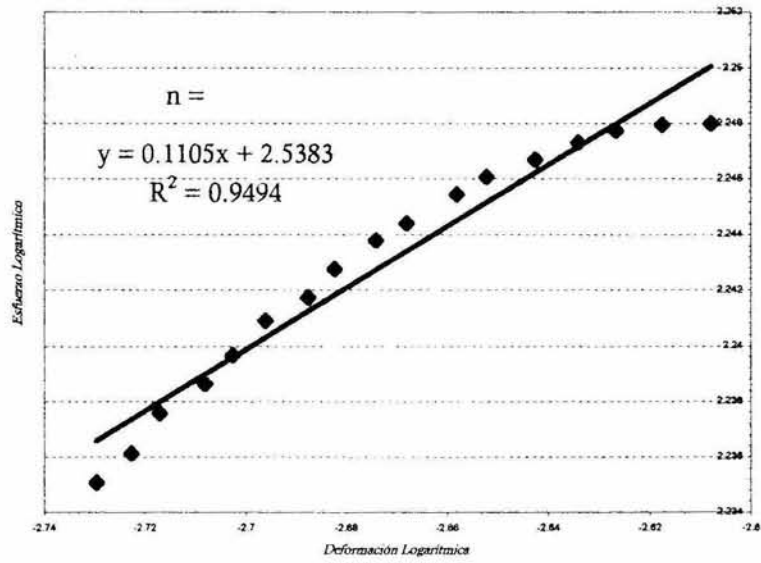
**Figura 3.20 (b).**- Curva Esfuerzo-Deformación Verdadera (Condición No.5 "312-A")



**Figura 3.20 (c).**- Módulo de Young  
 (Condición No.5 "312-A")



**Figura 3.20 (d).**- Valor de K  
 (Condición No.5 "312-A")



**Figura 3.20 (e).**- Coeficiente de endurecimiento  
(Condición No.5 "312-A")

**Tabla 3.8.-** Valores calculados para la Curva  $\sigma - \epsilon$  Verdadera e Ingenieril (Condición No.5 "312-A")

| Carga KN                      | Deformación mm.                        | Valores para la Curva $\sigma - \epsilon$ Ingenieril. |  | Longitud final                  | Área final                  | Valores para la Curva $\sigma - \epsilon$ Verdadera |   | Módulo de Young =<br>178,974Mpa             |
|-------------------------------|--|---|--|---------------------------------|-----------------------------|---|---|---|
|                               |  | Deformación Ingenieril Mm.                            | Esfuerzo Ingenieril Mpa                  |                                 |                             | Deformación verdadera mm.                           | Esfuerzo verdadero Mpa                  |   |
| <b>Condición 5 (312-A)</b>    |  |   |  |                                 |                             |   |   |   |
| Carga en 0.2% de deform. (KN) | Desplazamiento en 0.2% de deform. (mm) | Deformación Ing. En 0.2% de deform. (X100 = %)        | (esfuerzo ing. en 0.2% de deform.)       | Longitud en 0.2% de deformación | Área en 0.2% de deformación | Deformación verdadera en 0.2% de deform. (X100 = %) | (esfuerzo verd. En 0.2% de deformación) | Límite de Proporcionalidad<br>47.9987946Mpa |
| 8.44821216                    | 0.094742                               | 0.001865  | 171.5045689                              | 50.894742                       | 49.1677022                  | 0.00186326  | 171.824425                              |   |
| Máxima carga (KN)             | Máximo Desplazamiento (mm)             | Máxima Deformación Ingenieril (X100 = %)              | Esfuerzo Ingenieril, cuando carga máxima | Longitud en la máxima carga     | Área cuando máxima carga    | Máxima Deformación verdadera (X100 = %)             | Esfuerzo verdadero, cuando carga máxima |   |
| 8.69787725                    | 0.125476                               | 0.00247   | 176.5729434                              | 50.925476                       | 49.1380291                  | 0.00246695  | 177.009079                              |   |
| Carga de ruptura (KN)         | Desplazamiento cuando ruptura          | Deformación Ingenieril en la ruptura                  | Esfuerzo Ingenieril, en la ruptura       | Longitud en la ruptura          | Área en la ruptura          |   |   |   |
| 0.74093228                    | 0.502666                               | 0.009895  | 15.04143932                              | 51.302666                       | 48.776754                   |   |   |   |

INSTITUTO VENEZOLANO DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS  
 DIVISIÓN DE INVESTIGACIONES TECNOLÓGICAS  
 LABORATORIO NACIONAL DE MATERIALES

### III.4.6. Condición No.6 (312-W)

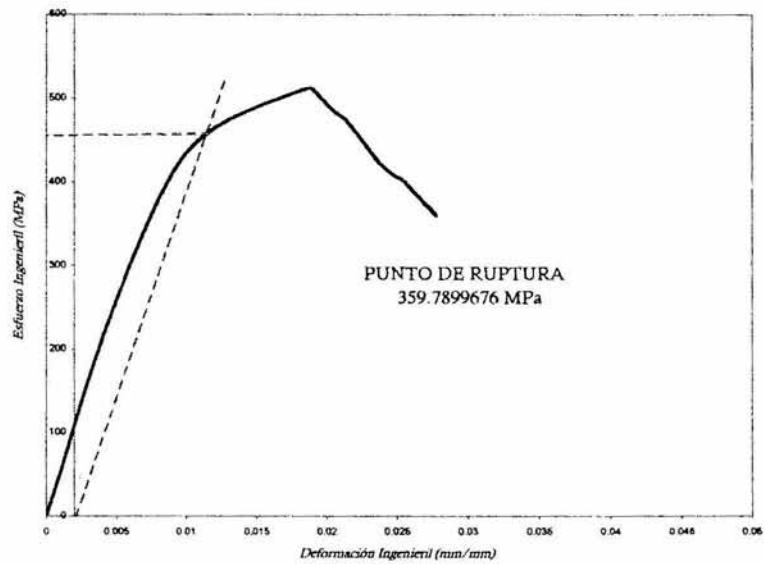


Figura 3.21 (a).- Curva Esfuerzo-Deformación Ingenieril (Condición No.6 "312-W")

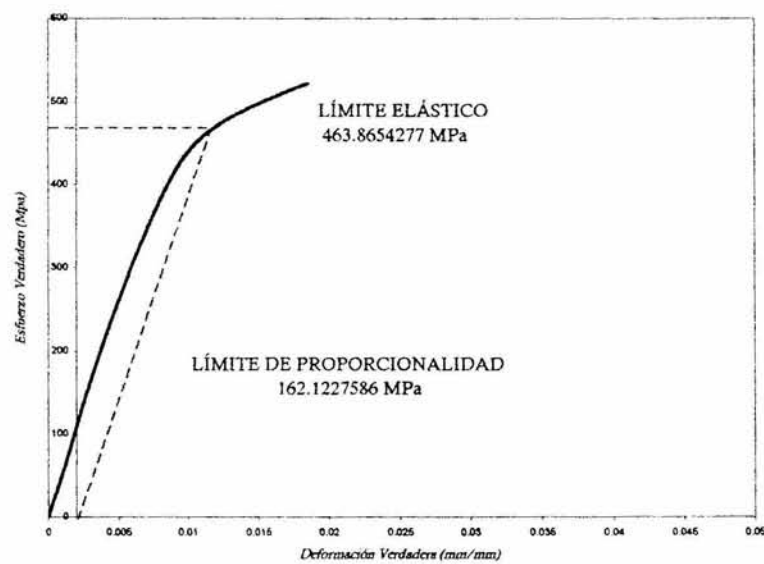


Figura 3.21 (b).- Curva Esfuerzo-Deformación Verdadera (Condición No.6 "312-W")

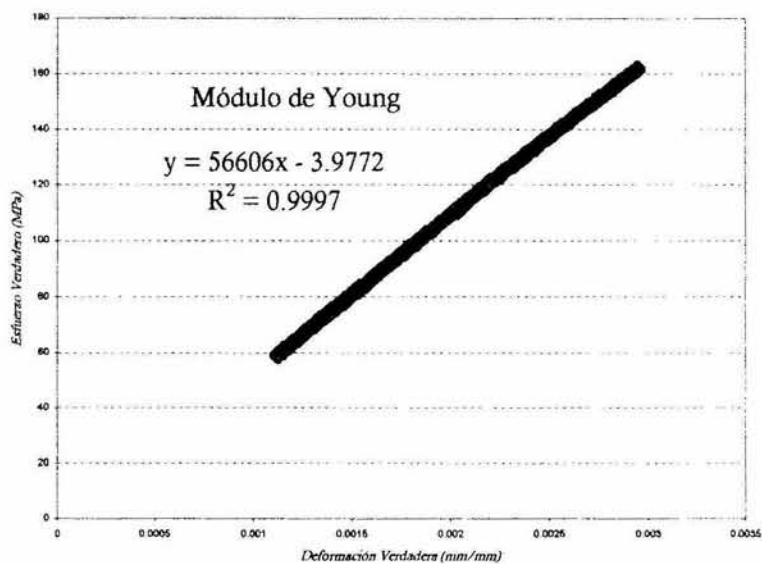


Figura 3.21 (c).- Módulo de Young  
(Condición No.6 "312-W")

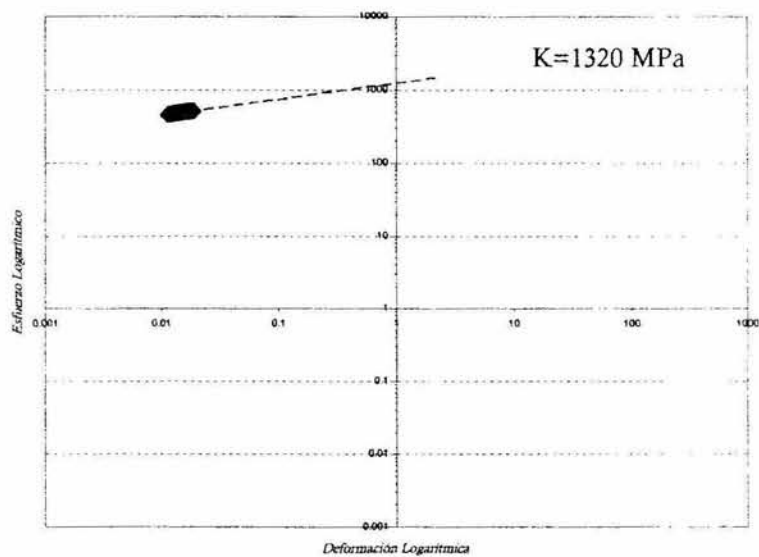
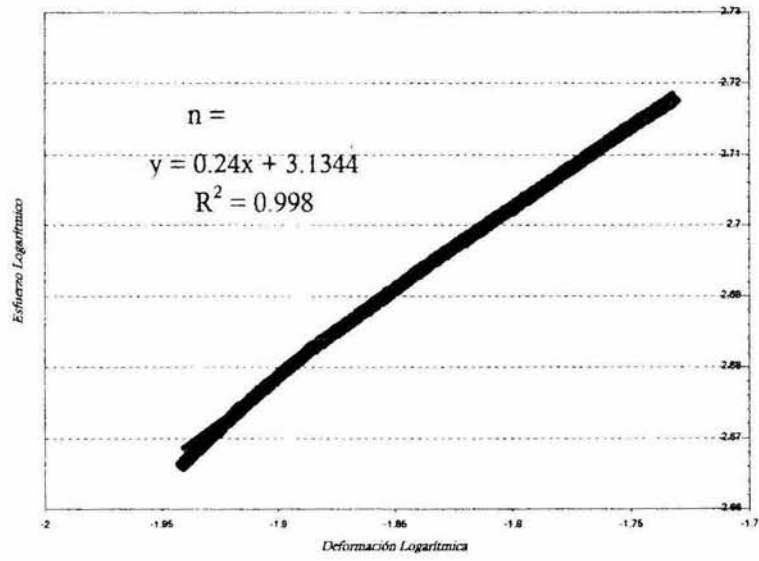


Figura 3.21 (d).- Valor de K  
(Condición No.6 "312-W")



**Figura 3.21 (e).**- Coeficiente de endurecimiento  
(Condición No.6 "312-W")

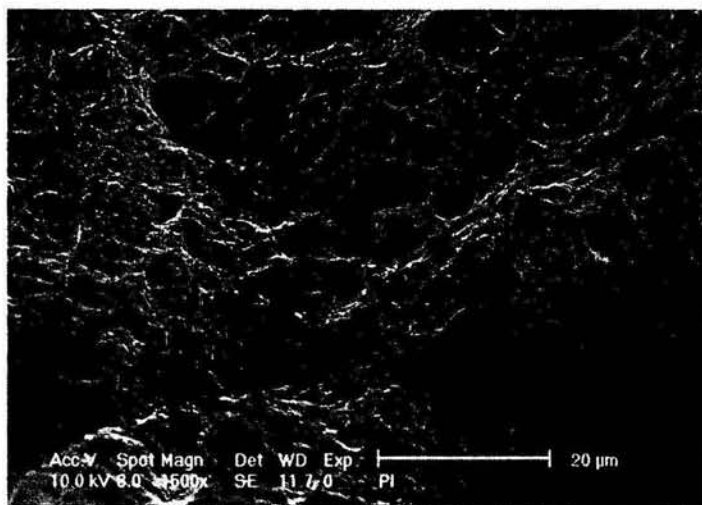


**Tabla 3.9.-** Valores calculados para la Curva  $\sigma - \epsilon$  Verdadera e Ingenieril (Condición No.6 "312-W")

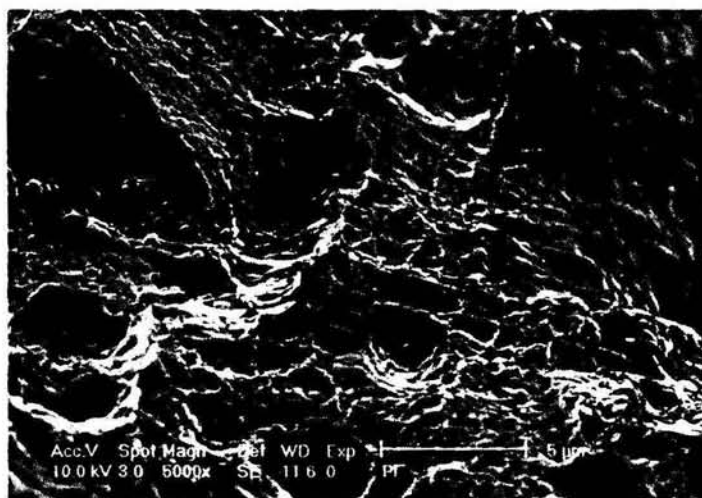
| Carga KN                      | Deformación mm.                        | Valores para la Curva $\sigma - \epsilon$ Ingenieril. |  | Longitud final                  | Área final                  | Valores para la Curva $\sigma - \epsilon$ Verdadera |   | Módulo de Young =<br>56,606Mpa               |
|-------------------------------|--|---|--|---------------------------------|-----------------------------|---|---|--|
|                               |  | Deformación Ingenieril Mm.                            | Esfuerzo Ingenieril Mpa                  |                                 |                             | Deformación verdadera mm.                           | Esfuerzo verdadero Mpa                  |  |
| <b>Condición 6 (312-W)</b>    |  |   |  |                                 |                             |   |   |  |
| Carga en 0.2% de deform. (KN) | Desplazamiento en 0.2% de deform. (mm) | Deformación Ing. En 0.2% de deform. (X100 = %)        | (esfuerzo ing. en 0.2% de deform.)       | Longitud en 0.2% de deformación | Área en 0.2% de deformación | Deformación verdadera en 0.2% de deform. (X100 = %) | (esfuerzo verd. En 0.2% de deformación) | Límite de Proporcionalidad<br>162.1227586Mpa |
| 22.7674817                    | 0.585724                               | 0.01153   | 458.5780231                              | 51.385724                       | 49.0820836                  | 0.01146404  | 463.8654277                             |  |
| Máxima carga (KN)             | Máximo Desplazamiento (mm)             | Máxima Deformación Ingenieril (X100 = %)              | Esfuerzo Ingenieril, cuando carga máxima | Longitud en la máxima carga     | Área cuando máxima carga    | Máxima Deformación verdadera (X100 = %)             | Esfuerzo verdadero, cuando carga máxima |  |
| 25.4412771                    | 0.949706                               | 0.018695  | 512.43307                                | 51.749706                       | 48.7368643                  | 0.0185224   | 522.0130062                             |  |
| Carga de ruptura (KN)         | Desplazamiento o cuando ruptura        | Deformación Ingenieril en la ruptura                  | Esfuerzo Ingenieril, en la ruptura       | Longitud en la ruptura          | Área en la ruptura          |   |   |  |
| 17.8628523                    | 1.408684                               | 0.02773   | 359.7899676                              | 52.208684                       | 48.3084079                  |   |   |  |

### III.5. Microscopía Electrónica (SEM).

#### III.5.1. Condición No.1 (7018-A)

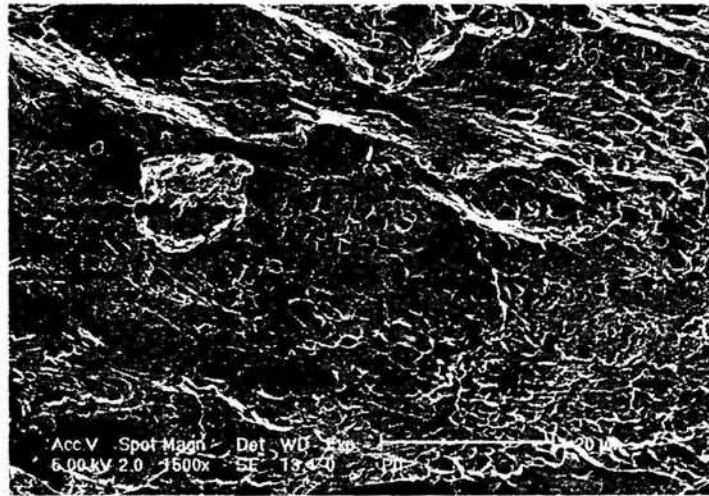


(a)

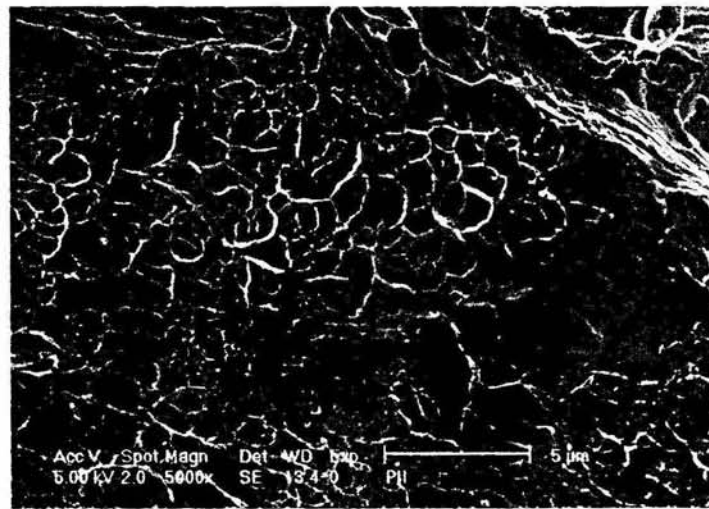


(b)

**Figuras 3.22.-** (a) 1500x y (b) 5000x. Superficie de la fractura en el acero base austenítico inoxidable 304 por medio de la prueba de tensión. En el perfil que se observa, se distinguen numerosas depresiones en forma de copa, éstas son referidas como dimple, y el modo de ruptura como dimple. (b) Se observa en mayor acercamiento las formaciones dimple y algunas formaciones de inclusiones.



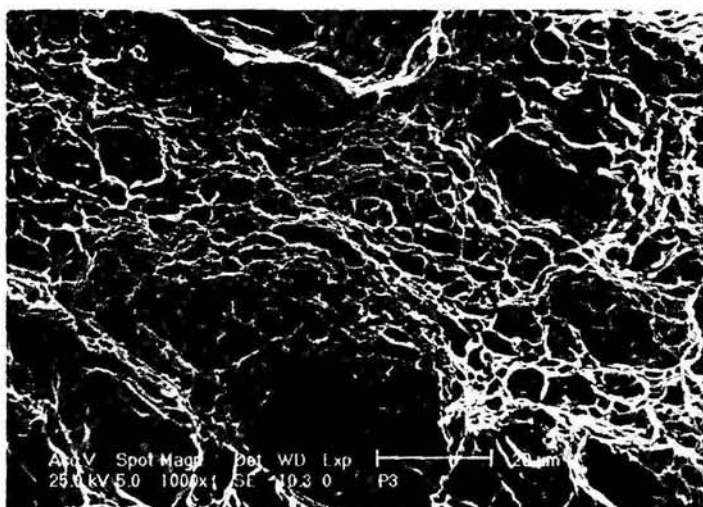
(a)



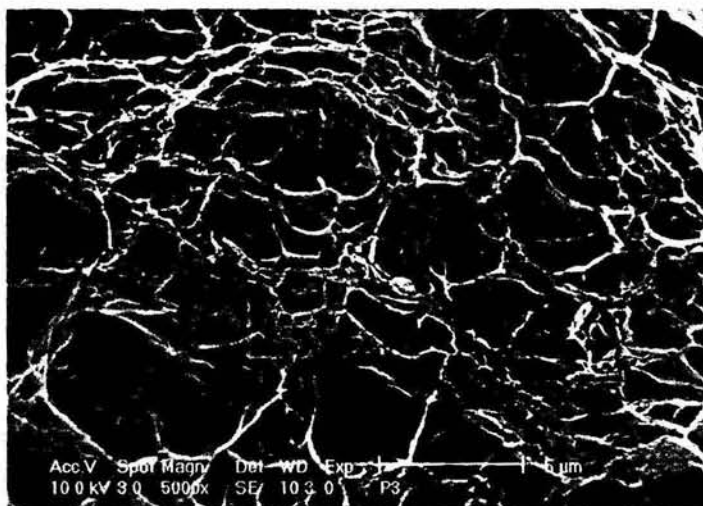
(b)

**Figura 3.23** .- (a) 1500x; (b)5000x. Las figuras muestra cavidades, las cuales exhiben una forma cónica superficial.

## III.5.3. Condición No.3 (308-A)

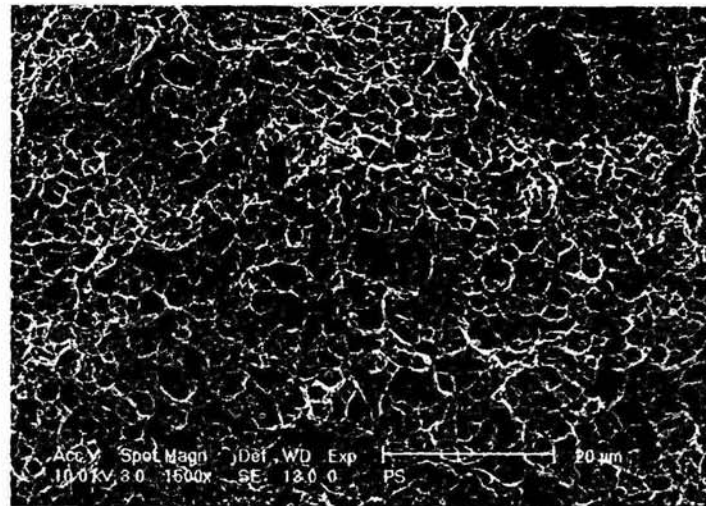


(a)

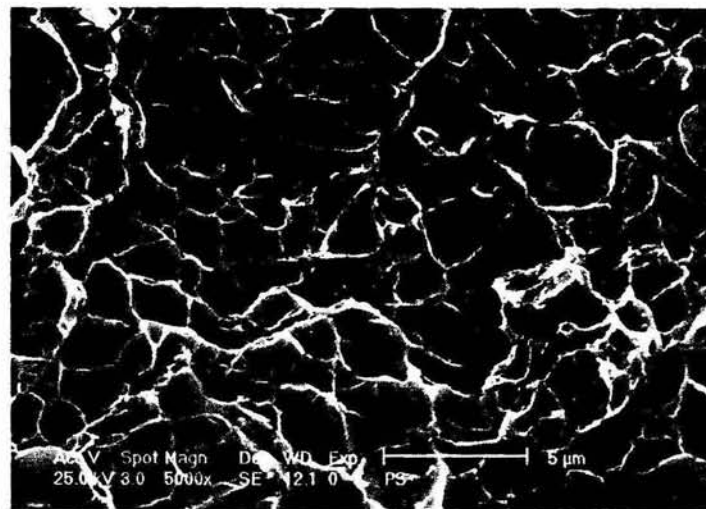


(b)

**Figuras 3.24.-** (a)1000; (b) 5000x. En esta figura se puede apreciar diferentes tipos de dimples formados, se muestran dimples equiaxiales en un espécimen de un acero.



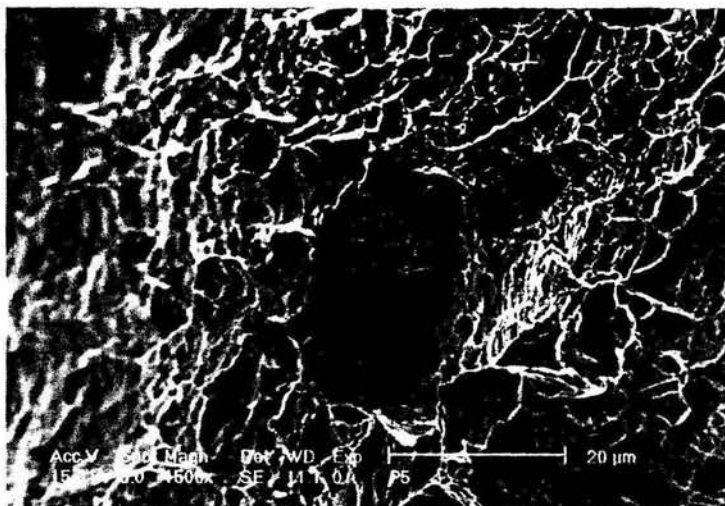
(a)



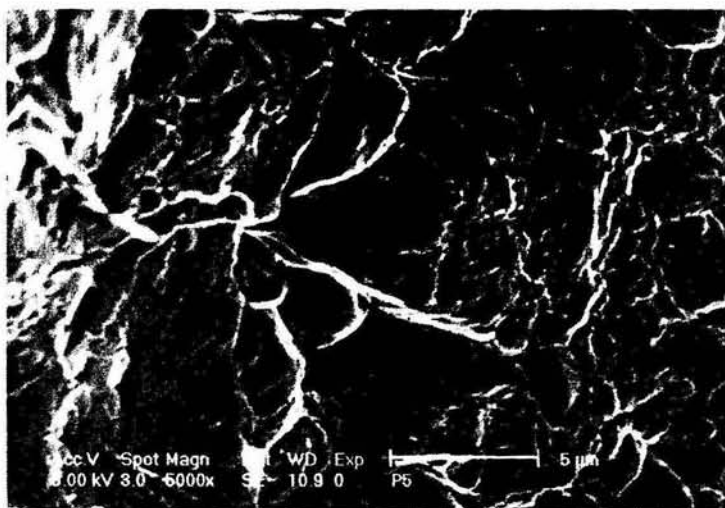
(b)

**Figura 3.25.** Vistas del Microscopio Electrónico de Barrido a dos magnificaciones. (a) 1500x y la (b) 5000x. Ilustran la definitiva apariencia de una superficie de una fractura dúctil. Lo dúctil o fibroso, en la fractura, tiene una apariencia arrancada, que resulta de las iniciaciones miríadas (myriad) locales de la extricción. El concepto del mecanismo de fractura dúctil envuelve la generación de huecos en la deformación plástica del material. El material se queda entre huecos adyacentes que tienen una geometría de extricción, cuales hacen que los huecos crezcan y el material se adelgace durante el régimen de la extensión de la fractura.

## III.5.5. Condición No.5 (312-A)



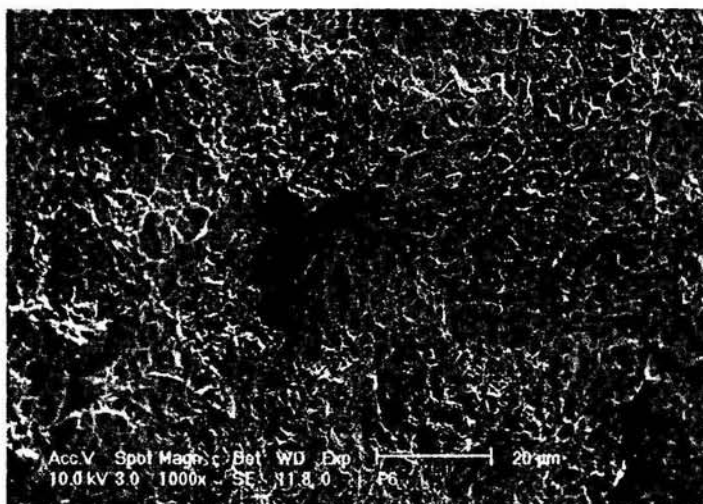
(a)



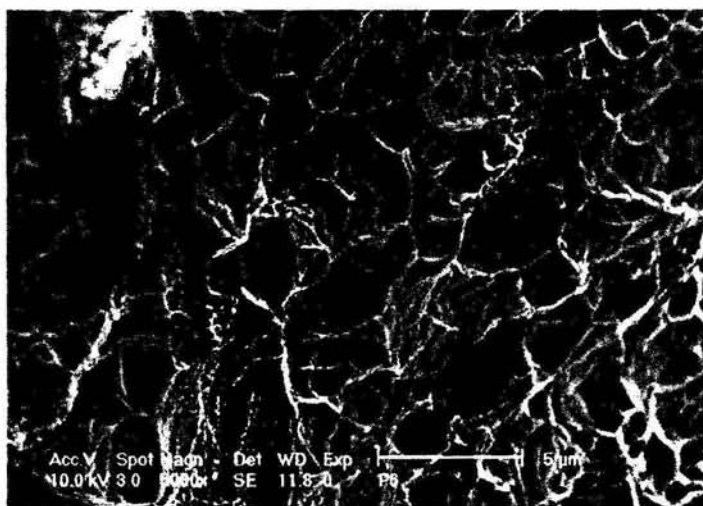
(b)

**Figura 3.26.-** Vistas del Microscopio Electrónico de Barrido a dos magnificaciones. (a)  $\times 1500$  y la (b)  $\times 5000$ . Ilustran la definitiva apariencia de una superficie de una fractura dúctil, quizá la superficie analizada se encuentra un poco inclinada, pero en sí muestra un fractura del modo de ruptura dimple.

## III.5.6. Condición No.6 (312-W)



(a)



(b)

**Figura 3.27.-** Vistas del Microscopio Electrónico de Barrido a dos magnificaciones. (a)  $\times 1000$  y la (b)  $\times 5000$ . Ilustran la definitiva apariencia de una superficie de una fractura dúctil. Muestra fractura del modo de ruptura dimple. Se observan largas y pequeñas inclusiones de sulfuro en el acero.

**Tabla 3.10.-** Porcentaje de elementos encontrados en el EDAX (SEM)

*Cálculos en el  
Diagrama de Shaeffler*

| Material                                 | Cr.<br>Eq. | Ni.<br>Eq. | C %  | Cr %  | Ni %   | Fe % | Mo % | Mn % | Si % |
|--|------------|------------|------|-------|--|------|------|------|------|
| <b>Materiales de Aporte (electrodos)</b> |            |            |      |       |  |      |      |      |      |
| 308<br>Condición<br>No.3<br>(308-A)      | 19.59      | 10.48      | 0.03 | 18.70 | 9.02   |      | 0.71 | 1.12 | 0.12 |
| 308<br>Condición<br>No.4<br>(308-W)      | 18.94      | 10.56      | 0.03 | 18.05 | 9.1  |      | 0.71 | 1.13 | 0.38 |
| 312<br>Condición<br>No.5<br>(312-A)      | 28.1       | 11.93      | 0.12 | 27.1  | 7.77   |      | 0.55 | 1.13 | 0.30 |
| 312<br>Condición<br>No.6<br>(312-W)      | 28.73      | 12.48      | 0.12 | 27.5  | 8.3  |      | 0.65 | 1.17 | 0.39 |
| <b>Porcentaje de Dilución</b>            |            |            |      |       |  |      |      |      |      |
| Para la Condición No.3 = 3.40%           |            |            |      |       | <i>En la Figura 1.1, página 17 se muestra el desempeño de la composición de los materiales y condiciones, debido la dilución de los elementos de aleación.</i> |      |      |      |      |
| Para la Condición No.4 = 5.23%           |            |            |      |       |  |      |      |      |      |
| Para la Condición No.5 = 9.93%           |            |            |      |       |  |      |      |      |      |
| Para la Condición No.6 = 7.26%           |            |            |      |       |  |      |      |      |      |



## Capítulo IV. Análisis y Discusión de Resultados.

### IV.1. Prueba de Dureza

Al comparar las gráficas obtenidas en dureza para cada una de las condiciones en los experimentos finales, se observa que, la variación en la dureza es más alta en condiciones (1 y 2) en los que se aplicó material de aporte E-7018, que en aquellas condiciones en las que sólo se utilizó aporte de inoxidable (condiciones 3,4,5 y 6). Sin embargo, se puede observar que en estos casos en que se aplicó un temple, las durezas a lo largo de las dos pulgadas medidas fueron menos homogéneas, comparándolas con aquellas condiciones 3 y 5.

### IV.2. Microscopía Óptica

En las figuras 3.7 a y b se observa la estructura del E-7018, ésta muestra una estructura ferrítica ramificada en dirección a la superficie del material disímil base inoxidable, que es característico del fundente, ya que la solidificación se lleva a cabo del exterior hacia el interior. En el acero base inoxidable 304 se observa los granos equiaxiales de austenita, además las alteraciones que ocurren en la estructura de la zona afectada por el calor en el material adyacente al metal fundido, se encuentra que, el metal base se calienta hasta una temperatura elevada y se forman granos gruesos, entonces el grano es más fino mientras más alejado esté de la zona de contacto entre los dos materiales, ya que el tiempo de calentamiento no es lo suficientemente largo para que se produzca entrecrecimiento entre los granos. La solidificación de la zona de no mezcla empieza epitaxialmente sobre áreas ferríticas en la zona de fusión parcial, se observa en la zona de mezcla los límites celulares dendríticos.

En las figuras 3.8 a y b, en donde se utilizó el mismo material de aporte y los mismos materiales base, hubo un enfriamiento inmediatamente después de haber realizado la soldadura, en donde podemos observar en el zona intermedia de mezcla; un fisuramiento en la ZAC ocurre en la zona de fusión, la cual experimenta temperaturas alcanzadas durante la soldadura (880°C), quizá no podríamos estar hablando de fisuramientos intergranulares en este caso, éstos ocurren en la presencia de películas líquidas a lo largo de los bordes de grano.

Los niveles de ferrita delta de al menos 3FN eliminan el fisuramiento en el metal fundido depositado, como del E-308. (ver figuras 3.9 a, b y c). En las figuras 3.10 a, b, c y d se observa que, en el lado más oscuro es el metal base A36, en todas las fotografías en este metal base se presenta ferrita y perlita; en los aumentos mayores se pudo observar que, junto a la línea de fusión se presentan carburos esféricos. Hay que hacer notar que la estructura que se obtuvo junto a la línea de fusión es del tipo Widmanstätten. En la soldadura, el metal base adyacente al metal fundido se calienta arriba de la temperatura crítica. El metal más cercano al charco de metal fundido llega al punto de fusión y se vuelve burdo, la estructura es más fina mientras más alejada esté del centro, más allá de la ZAC no cambia el metal base.

En las figuras 3.11 (a), (b), (c) y (d), se observa una franja o línea blanca adyacente a la interfase de la soldadura, esta línea representa un plano de crecimiento de grano. En las fotografías el, lado más oscuro es el metal base A36, en los aumentos mayores se pudo observar que junto a la línea de fusión se presentan carburos esféricos. La estructura del E-312 muestra una estructura austenítica ramificada, un crecimiento celular dendrítico en dirección a la superficie del material disímil base A36.

Durante la soldadura, la Zona afectada por el calor experimenta picos de temperatura entre el punto de fusión y las temperaturas del metal base, dependiendo en la distancia de la interfase. Una banda delgada puede ser suficientemente aprovechada para presentar precipitación intergranular, pequeñas regiones cerca de la línea de fusión muestran un crecimiento de grano (ver figuras 3.12 a, b y c). Un observación cuidadosa de la microestructura de la zona afectada por el calor (ZAC) revela una delgada región cerca de la zona de fusión, donde los bordes de grano hubieran aparentemente sido cubiertos con líquido.

### **IV.3. Difraccion de Rayos-X.**

Las Tablas (3.1. b y d), (3.2. b y d), así como de las tablas (3.3 b y d), son el resultado de la interpretación en base a los valores de las distancias interplanares y el ángulo formado por el haz de rayos-X, la superficie de un cristal que contiene una familia de planos de difracción calculados según la ley de Bragg, las fórmulas para el cálculo de las distancias interplanares de los sistemas cristalográficos cúbico (Fe  $\gamma$  y Ferrita) y ortorrómbico ( $M_7C_3$  y  $Cr_3C_2$ ). Cada uno de los difractogramas son un espectro de difracción; en donde se tomaron en cuenta los picos de más alta

intensidad. Los elementos que se toman en cuenta de acuerdo a la constitución de los materiales utilizados son: Ferrita, Fe  $\gamma$  (Austenita), el carburo  $M_{23}C_6$ ,  $M_7C_3$  y  $F_3C$ .

Gráficamente se obtuvieron los ángulos y distancias interplanares, seguido de cálculos con los cuales se toman las distancias más próximas a las obtenidas gráficamente, por ejemplo en la condición No.1 se encontraron los elementos de Fe  $\gamma$  en el primer pico donde sus índices son (111) a un porcentaje de difracción del 100% y en el mismo pico se encontró el carburo  $F_3C$  con índices (102) en un porcentaje de difracción del 67%. Para el segundo pico se encontraron los elementos de Ferrita, con índices (110) en un porcentaje de difracción del 100%, y el carburo  $F_3C$  en los índices (220) a un porcentaje de difracción del 56%. En el tercer pico las estructuras encontradas fueron la de Fe  $\gamma$  en los índices (200) en un porcentaje de difracción del 80% y el otro elemento fue el carburo  $M_7C_3$  en un porcentaje de difracción del 83%. Para el cuarto pico los elementos encontrados fueron la Ferrita en los índices (200) en un porcentaje de difracción del 20% y el otro elemento fue el carburo  $F_3C$  en los índices (321) en un porcentaje de difracción del 1%. En realidad los índices son los que especifican los planos y las direcciones cristalográficas, por lo cual cada uno de los picos encontrados corresponden a índices de planos.

Se acomodaron los difractogramas para cada material de aporte, en donde se pueden notar las diferencias en el espectro en cada condición, es decir se pueden observar las diferencias en la condición de aire y agua en cada material de aporte (la especificación A = aire y W = agua). Para resaltar las diferencias en condición en el mismo material de aporte, se dividieron los picos del espectro dando como resultado un marco en el cual se observa y analizan las diferencias que se encuentran en el momento de realizar una soldadura dejándola enfriar al aire tranquilo a temperatura ambiente y la otra condición en la cual se enfría la junta inmediatamente en agua, utilizando el mismo material de aporte (electrodo).

En todos los difractogramas se muestran los espectros de difracción en dos colores, el negro es para las condiciones (7018-A, 308-A y 312-A) y el color rojo es para las condiciones (7018-W, 308-W y 312-W). En ellas se observa que líneas con “anchura o tamaño” mayor con respecto al ángulo  $2\theta$  es debido a las microdeformaciones debidas a la formación de estructuras duras y esfuerzos residuales. (Cullity 1978)

#### **IV.4. Prueba de Tensión**

En las curvas  $\sigma$ - $\epsilon$  ingenieriles, el material tiene la capacidad para una deformación plástica – flujo irreversible. Aquí podemos observar la porción rectilínea inicial, en sí es la región elástica de la curva en la que se cumple la ley de Hooke, en donde la deformación es proporcional a la tensión en el eje de las ordenadas en función de la deformación en el eje de las abscisas y así se obtiene una relación lineal. La pendiente de este segmento lineal corresponde al módulo de elasticidad  $E$ , este módulo puede ser interpretado como la rigidez, o sea la resistencia de un material a la deformación elástica, en este caso se produjo un comportamiento no lineal, es decir en la zona de la deformación elástica, por lo cual se utilizó el módulo tangente. Además se observa una porción parabólica de la curva, la cual es asociada con procesos homogéneos de deformación plástica, tal como el movimiento irreversible de las dislocaciones. La curva continúa creciendo hasta un nivel máximo de esfuerzo, reflejando un incremento en la resistencia en la parte del material – un proceso conocido como endurecimiento por deformación. La porción de la curva puede ser descrita por la relación general atribuida aquí, como la magnitud del coeficiente de endurecimiento por deformación, es decir, la habilidad del material a resistir más deformación.

El límite elástico es definido como la tensión máxima que es capaz de resistir el metal sin experimentar deformación permanente, sin embargo, es posible para un metal exhibir un no lineal, pero si comportamiento elástico y el límite elástico, dicho anteriormente, se puede de igual manera definir, como la tensión que produce una deformación permanente del 0.2% de la distancia inicial entre dos puntos, por lo que suele llamarse abreviadamente límite elástico del 0.2%. La deformación plástica se inicia en cuanto se supera el límite elástico y al aumentar esta deformación el metal se va haciendo más resistente, la carga aumenta continuamente lo necesario para que siga aumentando la deformación. Esta carga llega a alcanzar finalmente un valor máximo, este valor dividido por el área de la sección transversal inicial de la probeta es la resistencia a la tracción. Además el diámetro de la probeta disminuye rápidamente cuando sobrepasa esta carga máxima, por lo que se hace menor la carga para que prosiga la deformación hasta producirse la rotura.

#### **IV.5. Microscopía Electrónica (SEM).**

Cuando la sobrecarga es la principal causa de fractura, la mayoría de las aleaciones estructurales comunes fallan por un proceso conocido como, incorporación de microestructuras.

Los microespacios forman núcleos en regiones localizadas de discontinuidad, tales como las asociadas con partículas de fase secundaria, inclusiones, bordes de grano y acumulación de dislocaciones. Al aumentar la deformación en el material, los microespacios crecen, se incorporan y eventualmente forman una superficie de fractura continua. Este tipo de fractura exhibe numerosas depresiones en forma de copa, que son el resultado de la incorporación de microespacios. Las depresiones en forma de copa son referidas como Dimple y el modo de fractura como ruptura por dimple, estas depresiones se pueden observar en las figuras 3.22 (a) y (b) hasta las figuras 3.27 (a) y (b).

El tamaño de las cavidades en una superficie de fractura es gobernado por el número y distribución de los microespacios nucleados. Cuando los sitios de nucleación son pocos y ampliamente espaciados, los microespacios crecen a gran tamaño antes de incorporarse y el resultado es una superficie de fractura que contiene grandes cavidades, es decir, dimples. Las cavidades extremadamente pequeñas son definidas normalmente por depresión de óxidos en los materiales sometidos a esfuerzo, así, la distribución de los sitios de nucleación de microespacios pueden influir significativamente en la apariencia de la superficie de fractura, en algunas aleaciones la distribución no uniforme de nucleación de partículas y crecimiento de microespacios aislados al inicio del ciclo de carga, producen una superficie de fractura que exhibe varios tamaños de cavidades, como se pueden observar en las fotografías.

Cuando los microespacios son nucleados en el borde de grano, resulta una ruptura por cavidad intergranular. La forma de una cavidad es gobernada por el estado de esfuerzo dentro del material, como por la forma y unión de los microespacios. La fractura bajo condiciones de carga a la tensión uniaxial, resulta en la formación esencialmente de cavidades equiaxiales limitadas por un pico o aro. Dependiendo de la microestructura y plasticidad del material, las cavidades pueden exhibir una profundidad de forma cónica o pueden ser superficiales. La formación de cavidades superficiales pueden involucrar la unión de microespacios por cizallamiento a lo largo de pequeñas bandas. Las superficies de fractura que resultan de tensión axial (Modo I) bajo condiciones de carga exhiben cavidades alargadas, sin embargo, en la prueba de tensión se muestra un rasgo dúctil, pero con una estrecha diferencia entre el límite de fluencia y cuando se llegó a la máxima carga, lo que hace notar que, una fractura es referida como una ruptura decohesiva cuando ésta exhibe una deformación plástica pequeña o no muy grande, pero no lo podemos tomar en cuenta, si entendemos que esta fractura no ocurre por dimple, clivaje o fatiga, ya que éste tipo sería resultado en un medio ambiente reactivo.

#### IV.6. Análisis y Discusiones Generales

El método de depósito de material de aporte inoxidable austenítico puede a veces alterar el contenido de ferrita, este contenido de ferrita es modificado por variaciones en los rangos de enfriamiento de la soldadura; varios pasos de soldadura, o el hacer varios cordones, significa alta dilución y que puede alterar el contenido de ferrita.

Los aceros 18-8 pueden retener un máximo del 0.02% Carbono en solución sólida bajo todas las condiciones. Mientras el contenido de Carbono del acero se incrementa, la cantidad de precipitación se incrementa también, altos contenidos de Carbono incrementan la precipitación de carburos. En el metal fundido la precipitación de carburos ocurre uniformemente a través de la estructura en la interfase preferentemente a los bordes de grano, de ahí que, el grado de decremento del Cromo a lo largo de los bordes de grano es más baja que en la ZAC.

Para niveles de ferrita más grandes de 20 vol-% (condiciones 5 y 6, el E-312 en sí produce una región compuesta totalmente austenítica y 30 vol-% ferrita) la estructura vermicular duplex se desenvuelve en una estructura consistente de bloque de granos, los cuales exhiben una mezcla de austenita y ferrita, ellas son rodeadas por una red continua de austenita. Mientras la cantidad de estabilizadores de ferrita se incrementan, la aleación se enfría a temperatura ambiente a través de una doble fase de austenita + ferrita. Como resultado, mucha de la ferrita se transforma en austenita en una reacción de precipitación Widmanstätten, la cual es nucleada por una austenita eutéctica en el grano y los bordes de los subgranos.

Incrementando la cantidad de elementos estabilizadores de austenita y los elementos estabilizadores de ferrita en la región compuesta, promueven la solidificación como austenita primaria y el resultado es menos ferrita retenida en la microestructura. Mientras que en la región compuesta se solidifica como ferrita primaria, la solidificación en no equilibrio asociada con la soldadura puede permitir la formación de una mezcla de austenita-ferrita eutéctica

Las áreas de la región de fusión parcial, adyacentes a la interfase de la soldadura experimentan crecimiento del grano austenítico. Mientras los granos de austenita crecen, sus bordes chocan en las regiones licuadas y son “mojadas” por el líquido, esto previene más migración a los bordes de grano. Si las regiones licuadas son suficientemente altas en ferritizadores o bajas en austenitizadores, subsecuentemente la solidificación ocurre como ferrita

primaria y resulta en austenita en los bordes de grano durante el enfriamiento de la soldadura. El enriquecimiento de ferritizadores y los rápidos rangos de enfriamiento (condiciones 4 y 6) presentes en la región de fusión parcial, previene esa transformación entera de ferrita en austenita en enfriamiento y resultando en la retención de alguna ferrita a temperatura ambiente.

Durante la soldadura, las regiones del metal base adyacentes a la interfase de la soldadura experimentan rápidos rangos de calentamiento, ese rápido calentamiento puede resultar en una disolución de carburos de cromo presentes en los límites de grano de la austenita y proveen subsecuentemente un enriquecimiento de Carbono y Cromo en la austenita, la cual originalmente limitaba las partículas de carburo. La ferrita se forma en la ZAC durante la soldadura, la base austenítica del metal que rodea a las regiones de fusión y de fusión parcial es calentada rápidamente a temperaturas en la región de la doble fase austenita + ferrita, donde una transformación en estado sólido desde austenita a ferrita puede ocurrir. Las regiones que se transforman a ferrita en el calentamiento, son usualmente bandas (paralelamente orientadas a la dirección del rolado o a la placa), donde los elementos estabilizadores de ferrita son altamente concentrados o donde los elementos estabilizadores de la austenita se encuentran en baja concentración.

Los rápidos rangos de enfriamiento presentes en la ZAC, acompañados con elementos de aleación, previenen áreas ferríticas que se transformen enteramente en austenita al enfriarse, eso resulta en una retención de alguna ferrita a temperatura ambiente.

Por otro lado, puesto que en todas las pruebas se presentó deformación plástica, en donde la tensión deja de ser proporcional a la deformación y ocurre una deformación plástica, la cual es permanente, es decir, no recuperable, es cuando empieza el nivel de tensiones en donde empieza la deformación plástica o sea, cuando empieza el fenómeno de fluencia; la magnitud de los límites elásticos mostrados, son una medida de su resistencia a la deformación plástica.

## Capítulo V. Conclusiones

### V.1. Conclusiones Generales.

- 1) El fisuramiento ocurre cuando la combinación de material base y material de aporte producen una aleación frágil en la zona de fusión. Esto pasa porque el material base o el de aporte presenta dilución o enriquecimiento en un cierto elemento, y esto además ocurre cuando las reacciones en la zona de fusión se forman estructuras duras. En la soldadura de aceros disímiles se tienen problemas cuando se presentan fisuramientos, o cuando el material base y/o el material de aporte difieren.

Bajo el calor que genera el arco en la soldadura, un material que fusiona primero causa un flujo desigual de calor y una dilución no uniforme en la zona de la soldadura. Cuando la soldadura se solidifica, el material base con punto de fusión más alto solidifica y al mismo tiempo el material cuyo punto de fusión es más bajo, éste está parcialmente líquido o en estado pastoso, por lo menos muy débil. El resultado es que el material con punto de fusión más bajo es propenso a un fisuramiento en la zona de la soldadura o en las cercanías de la zona afectada por el calor (ZAC).

Las diferencias en conductividad térmica entre dos materiales base, producen rangos de calentamiento y enfriamiento en los dos lados de la soldadura durante y después de lo que se haya realizado el ciclo de la soldadura. El metal con la más alta conductividad, tenderá a sacar lejos el calor de la zona fundida y si la diferencia en conductividad de los dos materiales base es bastante grande, el flujo desigual de calor puede impedir completa fusión de el metal de baja conductividad. Un flujo desigual de calor puede además afectar la solidificación del metal soldado y puede llevar a distorsión en el ensamble final.

Cuando hay grandes diferencias en coeficiente de expansión térmica entre dos materiales base y material de aporte, grandes esfuerzos pueden generarse durante, después de la soldadura y durante servicio. Los esfuerzos pueden ser muy altos para causar un fisuramiento. En el enfriamiento del proceso de soldadura, el metal con el más alto coeficiente de expansión térmica se contraerá más (ver tabla 1.5, pág. 17), que el metal con el más bajo coeficiente de expansión térmica. Esa diferencia de contracción, genera esfuerzos de tensión



en el metal con mayor coeficiente de expansión térmica y esfuerzos de compresión en el otro; los esfuerzos de tensión son más dañinos que los esfuerzos compresivos, debido a que, esfuerzos de tensión llevan al fisuramiento. La magnitud de los esfuerzos térmicos es determinada por la geometría de la unión y por la diferencia en coeficientes de expansión térmicos de los metales disímiles. Una alta diferencia en coeficientes da como resultado grandes esfuerzos. Es posible que estos esfuerzos térmicos excedan la resistencia tensil de uno de los materiales involucrados, incluyendo los materiales de aporte y causar fisuramiento.

En las aleaciones austeníticas, la estructura austenítica es estable después de un enfriamiento. Aunque el metal base sea totalmente austenítico, la microestructura de la ZAC puede contener una delgada banda cerca de la zona de fusión, donde la precipitación de ferrita ocurre a lo largo de los bordes de grano.

La formación pronunciada de carburos ricos localizados en bandas a lo largo de la interfase del material ferrítico son debido a la difusión de carbono. Se muestra una precipitación en el E-312, la interfase entre el E-312 y el A36 muestra una emigración de carbono proveniente del material base A36 aporte hacia el material de aporte E-312. La precipitación de Carburos ocurre al presentarse un calentamiento y un enfriamiento lento y con un rango de temperaturas de 800 a 1600°F, el Carbono como lo habíamos mencionado se precipita desde solución sólida principalmente en los bordes de grano donde este se combina con Cromo, para así formar carburo rico en Cromo ( $M_{23}C_6$ ), se muestra una precipitación en el E-312, la interfase entre el E-312 y el A36 muestra una emigración de carbono proveniente del material base A36 hacia el E-312.

- 2) Al notar que el valor de  $n$  es mayor o igual que 1, esto quiere decir, que el modelo matemático para representar este tipo de curva no es el adecuado, es decir, que el modelo que se está usando es para materiales dúctiles, por lo tanto no se necesita determinar el coeficiente de endurecimiento porque está diciendo que el material tiene una deformación permanente despreciable y no se endurece por deformación y que el material es frágil, lo que quiere decir que su tenacidad es bastante baja.
- 3) El ensayo de tracción se utilizó para determinar varias propiedades de los materiales que son importantes para el diseño. Cuanto mayor es el módulo, más rígido es el material, o sea, menor es la deformación que se origina cuando se aplica un determinado esfuerzo. El módulo es un

parámetro de diseño importante utilizado en el cálculo de las deformaciones. A escala atómica, la deformación elástica macroscópica se manifiesta como pequeños cambios en el espaciado interatómico y en los enlaces interatómicos son estirados. Por consiguiente, la magnitud del módulo de elasticidad es una medida de la resistencia a la separación de los átomos contiguos, es decir, de las fuerzas de enlace interatómicas. La magnitud de los límites elásticos mostrados, son una medida de su resistencia a la deformación plástica. Así la transición elastoplástica de forma gradual, es decir, el punto de fluencia, se determinó como la desviación inicial de la linealidad de la curva esfuerzo-deformación, es decir, límite de proporcionalidad. La transición elastoplástica está muy bien definida y ocurre de forma abrupta y se denomina fenómeno de discontinuidad del punto de fluencia.

La tenacidad de un material es un término mecánico que se utiliza en varios contextos; en sentido amplio, es una medida de la capacidad de un material de absorber energía antes de la fractura. En el caso de una situación estática (baja velocidad de deformación), como la que fue ensayada en cada prueba (las 6 condiciones), es el área bajo la curva esfuerzo-deformación hasta la fractura. Entonces, para que un material sea tenaz, debe poseer tanto alta resistencia como ductilidad, en este estudio se encontró que en las 6 condiciones propuestas, hubo una respuesta a la tensión en cierta manera dúctil, donde los materiales dúctiles son más tenaces que los frágiles, y se puede mencionar también lo siguiente: aún cuando los materiales frágiles tienen mayor límite elástico y mayor resistencia a la tracción, tienen menor tenacidad que los dúctiles a causa de la falta de ductilidad. Esto puede quedar representado en las figuras de las curvas  $\sigma$ - $\epsilon$  ingenieriles, de una condición a otra, y los materiales resilientes son aquellos que tienen un límite elástico muy alto y un módulo de elasticidad muy bajo.

- 4) La fractura bajo condiciones de carga a la tensión uniaxial resulta en la formación esencialmente de cavidades equiaxiales limitadas por un pico o aro. Dependiendo de la microestructura y plasticidad del material, las cavidades pueden exhibir una profunda forma cónica, o pueden ser superficiales.

Las fracturas son divididas en dos principales categorías, dúctil y frágil. Para secciones relativamente delgadas, las fracturas dúctiles son asociadas con la medición de la contracción lateral o extricción. Además que, parte de la fractura empieza en y cerca de la superficie seguida de un plano inclinado con respecto a la dirección del esfuerzo tensil dominante, mientras la fractura empieza en el interior siguiendo un plano perpendicular generalmente al

principal esfuerzo tensil, la configuración familiar es la copa-cono. La superficie de la fractura será predominante plana con pequeñas componentes inclinadas en y cerca de la superficie. Entonces, la fina estructura de la superficie de la fractura en este caso, tiene un típico aspecto fibroso que hace la identificación del modo dúctil. Al haber realizado las pruebas de tensión en las probetas en la fractura creada o provocada, las cavidades elongadas sobre ambas caras de la fractura están orientadas en la misma dirección y las últimas están cerradas en el punto de origen de la fractura.

## **V.2. Recomendaciones y Conclusiones Finales.**

Al haber finalizado el presente trabajo fueron alcanzados los objetivos particulares, los cuales a continuación se da una conclusión para cada uno de ellos:

- 1) El calentamiento y el enfriamiento causan expansión y contracción en varios lugares diferentes conforme se hace la soldadura a lo largo de la junta. El metal de la unión es más caliente y tiende a contraerse más al enfriarse que el resto de las piezas en ambos lados. Sin embargo, a lo largo de la contracción se ve restringido por el metal adyacente a la junta que puede exceder el punto de rendimiento del material. Esto hace que algunas fibras paralelas del metal base se compriman ligeramente. Si las piezas, que se sueldan están sujetas por un accesorio (lo cual fue hecho), la contracción del metal cuando se enfría en la zona de soldadura induce tensiones en cualquier dirección, causando en ello agrietamiento. El rango de enfriamiento debe ser lo bastante lento para prevenir la formación de estructuras duras y lo bastante rápido para prevenir precipitación de fases intermetálicas duras.
  
- 2) Al tener el comportamiento en las 6 condiciones, sabemos sus características mecánicas y físicas, además sabemos que, una soldadura debe tener un comportamiento lo más homogéneo que se pueda tener en toda la junta, se debe tener la mayor resistencia mecánica pero también ductilidad, es decir, la soldabilidad es el hecho de conseguir soldaduras sin defectos de continuidad, con características metalúrgicas y mecánicas similares a las del metal base, que nos garantice que la pieza soldada no tenderá a fallar en la ZAC durante el transcurso de su vida útil. En otras palabras, lo que se pretende es controlar de una manera eficaz las transformaciones que suceden en la ZAC. La técnica propuesta en la condición No. 3, es la que resultó con la descripción de la soldadura, la más satisfactoria en propiedades. La dilución o el

porcentaje de acuerdo a los valores de la dilución, es mostrada en la Tabla 3.10, en ella se puede observar, el desempeño en la condición No.3, esta fue la que alcanzó menor dilución, por lo que el efecto que tiene la dilución sobre las propiedades mecánicas de la soldadura queda demostrado en sus homogeneidad en durezas (una diferencia no tan abrupta), mejores propiedades a la tensión.

- 3) La naturaleza de los aceros austeníticos, cuando se calientan y se enfrían lentamente se experimenta una migración de Cromo, lo que baja su resistencia a la corrosión. Ésta se debe a la precipitación en los bordes de los granos, de películas muy finas de carburos ricos en Cromo, que tienen hasta 90% de este metal. Como el Cromo procede de la capa del metal inmediatamente adyacente al contorno de los granos, el metal puede sufrir ahí una seria baja en su resistencia a la corrosión y fragilidad. Si bien, se muestra una precipitación en el material base inoxidable 304, la interfase entre el 304 y el E-7018 muestra una emigración de carbono proveniente del material de aporte (E-7018) hacia el acero base 304. La diferencia en durezas de materiales base y material de aporte significa una heterogeneidad en propiedades, sin embargo en la condición 3 se presentaron una similitud en durezas en ambas interfases, la dilución es mejor equilibrada bajo estas condiciones de soldadura y uso del electrodo 308.

#### **V.8. Investigaciones Futuras.**

A pesar de que se dieron a considerar seis condiciones en la soldadura de aceros disímiles, es necesario continuar los trabajos sobre este tema, ya que aún quedan pendientes numerosas líneas de investigación por seguir, como son:

- 1) Determinar la influencia en un precalentamiento, así como de un postcalentamiento de la soldadura.
- 2) Determinar el comportamiento de toda la junta soldada utilizando los mismos materiales de aporte y el mismo material base inoxidable austenítico, pero utilizando diferente material base al carbono, como lo es el A-515.

- 3) De igual manera, soldar los mismos materiales base que se utilizan en esta investigación, pero utilizando otros materiales de aporte inoxidables, esto es para crear un marco más amplio del comportamiento de ciertos electrodos de la misma familia.
- 4) Determinar los efectos de corrosión cuando esté expuesta la soldadura de materiales disímiles a un medio corrosivo.

## Bibliografia

- 1.- Bob Irving. "*Dissimilar Metal Welding Paves the Way to New Ventures*". Welding Journal: 27-33. May, 1992.
- 2.- Thomas Doody. "*Intermediate Mixed Zones in Dissimilar Metal Welds for Sour Service*". Welding Journal: 55- 60. March 1992.
- 3.- A.A. Omar. "*Effects of Welding Parameters on Hard Zone Formation at Dissimilar Metal Welds*". Welding Research Supplement: 86-s to 93-s. February, 1998.
- 4.- W.A. Baeslack, III, J.C. Lippold and W. F. Savage. "*Unimixed Zone Formation in Austenitic Stainless Steel Weldments*". Welding Research Supplement: 168-s to 176-s. June, 1979.
- 5.- V.P. Kujanpää, S.A. David and C.L. White. "*Characterization of Heat-Affected Zone Cracking in Austenitic Stainless Steel Welds*". Welding Research Supplement: 221-s to 228-s. August, 1987.
- 6.- Zhihui Wang, Biyu Xu, and Ciqi Ye. "*Study of the Martensite Structure at the Weld Interface and the Fracture Toughness of Dissimilar Metal Joints*". Welding Research Supplement: 397-s to 402-s. August, 1998.
- 7.- J.F. King, M.D. Sullivan and G.M.Slaughter. "*Development of an Improved Stainless Steel to Ferritic Steel Transition Joint*". Welding Research Supplement: 354-s to 358-s. May, 1976.
- 8.- C.D. Lundin and D.F. Spond. "*The Nature and Morphology of Fissures in Austenitic Stainless Steel Weld Metals*". Welding Research Supplement: 356-s to 367-s. November, 1976.
- 9.- G. Metzger and R. Lison. "*Electron Beam Welding of Dissimilar Metals*". Welding Research Supplement: 230-s to 240-s. August, 1976.
- 10.- J.E. Spruiell, W.E. Fett and C.D. Lundin. "*Technical Note: Ferrite Stability at Elevated Temperature in Austenitic Stainless Steel Weld Metal*". Welding Research Supplement: 289-s to 290-s.
- 11.- T.G. Gooch and J. Honeycombe. "*Welding Variables and Microfissuring in Austenitic Stainless Steel Weld Metal*". Welding Research Supplement: 233-s to 241-s. August, 1980.
- 12.- G.M. Goodwin. "*The Effects of Heat Input and Weld Process on Hot Cracking in Stainless Steel*". Welding Research Supplement: 88-s to 94-s. April, 1988.
- 13.- T. Ogawa and T. Koseki. "*Weldability of Newly Developed Austenitic Alloys for Cryogenic Service: Part I- Up-to-date Overview of Welding Technology*". Welding Research Supplement: 332-s to 341-s. November, 1987.
- 14.- J. Wegrzyn and A. Klimpel. "*The effect of Alloying Elements on Sigma Phase Formation in 18-8 Weld Metals*". Welding Research Supplement: 146-s to 154-s. August, 1981.

- 15.- T. Yoshida and H. Ohmura. "*Dissolution and Deposit of Base Metal in Dissimilar Carbon Steel Brazing*". Welding Research Supplement: 278-s to 282-s. October, 1980.
- 16.- S.A. David, G.M. Goodwin and D.N. Braski. "*Solidification Behavior of Austenitic Stainless Steel Filler Metals*". Welding Research Supplement: 330-s to 336-s. November, 1979.
- 17.- C.E. Lyman. "*Analytical Electron Microscopy of Stainless Steel Weld Metal*". Welding Research Supplement: 189-s to 194-s. July, 1979.
- 18.- J.K. Lai and J.R. Haigh. "*Delta-Ferrite Transformations in a Type 316 Weld Metal*". Welding Research Supplement: 1-s to 6-s. January, 1979.
- 19.- Welding Handbook. "*Fundamentals of Welding*". 7<sup>th</sup> edition, Volume 1. AWS. USA., 1976.
- 20.- Welding Handbook. "*Metals and their Weldability*". 7<sup>th</sup> edition, Volume 4. AWS. USA., 1984.
- 21.- W.B.Pearson, "*The Crystal Chemistry and Physics of Metals and Alloys*"., by John Wiley & Sons, Inc, 1972.
- 22.- ASM Handbook, Volume 8 "*Mechanical Testing*", Metals Handbook, 1992.
- 23.- ASM Handbook, Volume 10 "*Materials Characterization*", Metals Handbook, 1992.
- 24.- ASM Handbook, Volume 12 "*Fractography*" 9<sup>th</sup> Edition, Metals Handbook, 1987
- 25.- "*Cr-Fe-Ni (Chromium-Iron-Nickel)*." ASM Metals Handbook, 8<sup>th</sup> ed. Vol. 8.
- 26.- Dulieu, D. "*Practical Aspects of Welding Stainless Steels*." *Welding & Metal Fabrication* (Jul 1995): 2-4.
- 27.- Goodwin, G.M., N.C. Cole, and G.M. Slaughter. "*A study of Ferritic Morphology in Austenitic Stainless Steel Weldments*." Supplement to *The Welding Journal* (Sept. 1972): 425-429.
- 28.- Horowitz, H., "*Soldadura, Aplicaciones y Práctica*", Alfaomega, 1990.
- 29.- Harvey, Philip D., ed. *Engineering Properties of Steel*. Ohio: American Society for Metals, 1982.
- 30.- Lancaster, J.F. *Metallurgy of Welding*. London: Alden Press Ltd., 1980.
- 31.- Lefebvre, Joseph. "*Guidance on Specifications of Ferrite in Stainless Steel Weld*." *Welding in the World* 13:6 (1993): 21-31.
- 32.- Peckner, D., and I.M. Bernstein. *Handbook of Stainless Steels*. New York: McGraw-Hill, Inc., 1977.
- 33.- D.Mc.Lean, D.Sc., "*Mechanical Properties of Metals*", 1977.
- 34.- Kåren Hellan, "*Introduction to Fracture Mechanics*", McGraw-Hill, 1984.
- 35.- Porter, D.A., and K.E. Easterling. *Phase Transformations in Metals and Alloys*. London: Chapman & Hall, 1992.

- 36.- Suutala, N., T.Takalo, and T. Moisiö. "The Relationship Between Solidification and Microstructure in Austenitic and Austenitic-Ferritic Stainless Steel Welds." *Metallurgical Transactions* 10A (April 1979): 512-514.
- 37.- Vander Voort, George, F., and Hughston M. James. "Wrought Stainless Steels." *Metals Handbook*. 9<sup>th</sup> ed., Vol. 9.
- 38.- Woollin, P. "Developments in Fusion Welding of Stainless Steels." *Welding & Metal Fabrication* (Jan 1994):34-38.
- 39.- C.W.Ott and D.J.Snyder, "A comprehensive preheating guide for steels is Suggested Arc Welding Procedures for Steels Meeting Standard Specifications"., Welding Research Council Bulletin No. 191, January 1974.
- 40.- M.G.Yan,S.H.Zhang and Z.M.Zheng, "Mechanical Behavior of Materials – V", Volume 1, Pergamon Press, First edition,1988.
- 41.- M.G.Yan,S.H.Zhang and Z.M.Zheng, "Mechanical Behavior of Materials – V", Volume 2, Pergamon Press, First Edition,1988.
- 42.- Marc André Meyers and Krishan Chawla, "Mechanical Behavior of Materials", Prentice-Hall,Inc. 1999.
- 43.- Gere & Timoshenko, "Mechanics of Materials", 4<sup>th</sup> edition,1995.
- 44.- Cullity, B.D. "Elements of X-Ray Diffraction", 2<sup>nd</sup> Edition, 1978.
- 45.- A.C.Davies "The science and practice of Welding", Volume 1, Eighth edition 1984.
- 46.- R.W.Cahn and P.Haasen, "Physical Metallurgy", 3th Edition,1983
- 47.- William Rostoker and James R.Drovak, "Interpretation of Metallographic Structures", 2<sup>nd</sup> Edition, 1977.
- 48.- Richard W.Hertzberg, "Deformation and Fracture,Mechanics of Engineering Materials", 4<sup>th</sup> edition,1996.
- 49.- George A.Roberts & Robert A.Cary,"Tool Steels", ASM 1992.
- 50.- Callister, W.D. "Materials Science and Engineering,An Introduction" 3<sup>rd</sup>. Edition 1997.