



UNIVERSIDAD DE CARABOBO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



**DETERMINACIÓN DE LA MICRODUREZA Y LA METALURGIA DE  
UNIONES SOLDADAS A TOPE EN FUNCIÓN DEL TIPO DE  
REVESTIMIENTO DEL ELECTRODO EN ACERO ASTM A-36 Y  
ASTM A-569**

Prof. Tutor: Oswaldo Urbano

Autores:

Jonathan López B.

Julio C. Vitriago A.

Naguanagua, Noviembre de 2011



UNIVERSIDAD DE CARABOBO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



**DETERMINACIÓN DE LA MICRODUREZA Y LA METALURGIA DE  
UNIONES SOLDADAS A TOPE EN FUNCIÓN DEL TIPO DE  
REVESTIMIENTO DEL ELECTRODO EN ACERO ASTM A-36 Y  
ASTM A-569**

*Trabajo especial de grado presentado ante la Ilustre Universidad de Carabobo para  
optar al título de Ingeniero Mecánico*

Prof. Tutor: Oswaldo Urbano

Autores:

Jonathan López B.

Julio C. Vitriago A.

Naguanagua, Noviembre de 2011

# *Agradecimientos*

---

Queremos agradecer en primer lugar a Dios por permitirnos culminar esta etapa de nuestras vidas. En segundo lugar, a nuestras familias por tanto apoyo que nos brindaron. A nuestro tutor Oswaldo Urbano por su paciencia, dedicación y orientación destinada a la realización de este trabajo. Aprovechamos la oportunidad brindada para agradecer también a la técnico del laboratorio de materiales Yosmari Pérez, por sus asesorías, consejos, sugerencias y favores prestados para poder llevar a cabo el presente trabajo de investigación así como a los técnicos del laboratorio de procesos y manufactura, Néstor y Rene.

A todos nuestros compañeros que nos apoyaron en toda nuestra carrera, especialmente aquellos con los que formamos una gran familia.

## *Resumen*

---

---

El estudio fue realizado sobre un Acero ASTM A-36 y ASTM A-569 soldado cada uno con electrodos con revestimientos celulósico, rutilico y bajo hidrogeno, tomando como parámetros constantes la velocidad de pasada y el amperaje. Se realizaron ensayos de tracción, doblado, metalografía óptica y microdureza Vickers, sobre las muestras soldadas con electrodos E-6011 (electrodo con revestimiento de celulosa con potasio), electrodos E-6013 (electrodos con revestimiento de rutilo con potasio) y E-7018 (electrodo bajo hidrogeno con polvo de hierro). Se utilizaron veinticuatro (24) probetas de tracción, veinticuatro (24) probetas de doblado, seis (6) probetas de microscopia óptica y seis (6) probetas microdureza Vickers, con la finalidad de evaluar las propiedades mecánicas en las uniones soldadas a tope, con los diferentes tipos de revestimiento de electrodos.

Se realizó una correlación de la dureza con las propiedades mecánicas logrando valores muy similares a los obtenidos mediante los ensayos de tracción, también se estudió la microestructura presente en fase de perlita, ferrita y ferrita Widmanstatten.

Se obtuvieron los valores de dureza para cada caso de estudio, donde se determinó que los mayores valores se obtuvieron en las soldaduras realizadas con electrodos bajo hidrogeno (E-7018), debido al porcentaje de Manganeseo (Mn) y silicio aportado al cordón de soldadura.

# *Simbología*

A	Área
AWS	Sociedad Americana de Soldadores
e	Deformación
$e_f$	Deformación de Ingeniería
$Fe_2O_3$	Oxido férrico
HV	Dureza Vickers
S	Esfuerzo
MB	Metal base
Mn	Manganeso
SMAW	Soldadura por arco de escudo de metal
$S_{max}$	Esfuerzo máximo
$S_y$	Esfuerzo de fluencia
$Ti O_2$	Oxido de titanio
ZAC	Zona afectada por el calor
ZF	Zona fundida
$\sigma_e$	Límite elástico
$\sigma_u$	Resistencia a la tracción
$\sigma_r$	Esfuerzo de ruptura
%RA	Porcentaje de reducción de área

# *Índice general*

<b>Agradecimientos.</b>	<b>i</b>
<b>Resumen.</b>	<b>ii</b>
<b>Simbología.</b>	<b>iii</b>
<b>Índice general.</b>	<b>iv</b>
<b>Índice de figuras.</b>	<b>viii</b>
<b>Índice de tablas.</b>	<b>xii</b>
<b>Introducción.</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO 1</b>	
<b>Situación problemática.</b>	<b>2</b>
1.1 Situación problemática.	2
1.2 Objetivos.	3
1.2.1 <i>Objetivo General.</i>	3
1.2.2 <i>Objetivos Específicos.</i>	3
1.3 Justificación.	4
1.4 Alcance.	4
1.5 Limitaciones.	5
1.6 Antecedentes preliminares.	5
<b>CAPÍTULO 2</b>	
<b>Bases teóricas.</b>	<b>8</b>
2.1 Soldadura.	8

2.1.1	<i>Concepto de soldadura.</i>	8
2.1.2	<i>Clasificación de los procesos de soldaduras.</i>	9
2.1.3	<i>Tipos de soldaduras por arco.</i>	10
2.1.4	<i>Soldaduras por arco con electrodos revestidos.</i>	10
2.2	Electrodos.	11
2.2.1	<i>Alma.</i>	12
2.2.2	<i>Revestimiento.</i>	12
2.2.3	<i>Electrodo celulósico.</i>	13
2.2.4	<i>Electrodo bajo hidrogeno.</i>	16
2.2.5	<i>Electrodo rutilico.</i>	17
2.3	Ensayos mecánicos.	19
2.3.1	<i>Ensayo microdureza Vickers.</i>	19
2.3.2	<i>Ensayo de dobléz.</i>	20
2.3.3	<i>Macroscopía.</i>	21
2.3.4	<i>Microscopia óptica.</i>	21
2.3.5	<i>Ensayo de tracción.</i>	22
2.4	Acero.	24
2.4.1	<i>Concepto de acero.</i>	24
2.4.2	<i>Acero ASTM A-36.</i>	24
2.5	Metalurgia de la soldadura.	25
2.5.1	<i>Cordón de soldadura.</i>	25
2.5.2	<i>Dilución.</i>	26
2.5.3	<i>Zona afectada por el calor (ZAC).</i>	26
2.5.4	<i>Metal base.</i>	26
2.5.5	<i>Uniones a tope.</i>	27
2.5.6	<i>Penetración.</i>	27

3.1	Nivel de investigación.	28
3.2	Diseño de la investigación.	28
3.2.1	<i>Descripción del material base.</i>	29
3.2.2	<i>Descripción del material de aporte.</i>	30
3.3	Cortes de láminas y preparación de probetas.	31
3.3.1	<i>Realización de cortes de láminas.</i>	31
3.3.2	<i>Realización de soldadura de las láminas.</i>	33
3.3.3	<i>Preparación de probetas.</i>	35
3.3.4	<i>Probetas para microscopía óptica y ensayo de microdureza Vickers.</i>	36
3.3.5	<i>Probeta para el ensayo de tracción.</i>	37
3.3.6	<i>Probeta para ensayo de doblado.</i>	37
3.3.7	<i>Equipos e instrumentos.</i>	38
3.3.8	<i>Procedimiento experimental para ensayo de tracción.</i>	41
3.3.9	<i>Preparación y examen metalográfico de la superficie de las muestras.</i>	43
3.3.10	<i>Procedimiento experimental para ensayo de microdureza Vickers.</i>	44
3.3.11	<i>Procedimiento experimental para ensayo de doblado.</i>	45
<b>CAPÍTULO 4</b>	<b>Resultados y análisis de resultados.</b>	<b>46</b>
4.1	Evaluación metalográfica.	47
4.2	Ensayo de microdureza Vickers.	54
4.3	Ensayo de doblado.	58
4.4	Ensayo de tracción.	64
4.5	Correlación de dureza con la resistencia a la tracción.	75
4.5.1	<i>Coincidencia Vickers – Brinell.</i>	75



4.6	Análisis.	77
4.6.1	<i>Microscopia óptica.</i>	77
4.6.2	<i>Ensayo de dureza.</i>	78
4.6.3	<i>Ensayo de doblado.</i>	79
4.6.4	<i>Ensayo de tracción.</i>	80
4.6.5	<i>Correlación de la dureza con las propiedades mecánicas.</i>	81
<b>CAPÍTULO 5</b>	<b>Conclusiones y recomendaciones.</b>	<b>82</b>
5.1	Conclusiones.	82
5.2	Recomendaciones.	83
	<b>Referencias bibliográficas.</b>	<b>85</b>
	<b>Anexos.</b>	<b>86</b>

# *Índice de figuras*

<b>Figura</b>		<b>Pág.</b>
2.1	Clasificación de la soldadura según AWS sociedad americana de soldadores.	9
2.2	Soldadura por arco con electrodo revestido (SMAW).	11
2.3	Características de la probeta de tracción	24
3.1	Corte inicial de las láminas de acero ASTM A-36.	32
3.2	Corte inicial de las láminas de acero ASTM A-569.	32
3.3	Láminas de acero ASTM A-36 (100x400x5) mm.	33
3.4	Láminas de acero ASTM A-569 (100x400x4) mm.	33
3.5	Realización de las soldaduras de las láminas.	34
3.6	Láminas de acero ASTM A-36 y ASTM A-569 soldadas con electrodos con revestimiento rutilico (E-6013).	34
3.7	Láminas de acero ASTM A-36 y ASTM A-569 soldadas con electrodos con revestimiento celulósico (E-6011).	35
3.8	Láminas de acero ASTM A-36 y ASTM A-569 soldadas con electrodos con revestimiento bajo hidrogeno (E-7018).	35
3.9	Cortes realizados a las láminas ASTM A-36 y ASTM A-569 soldadas con los diferentes tipos de electrodos.	36
3.10	Dimensiones de la probetas para ensayo de microdureza Vickers	

	y microscopia óptica.	36
3.11	Dimensiones de la probeta para ensayo de tracción según norma ASTM A-370.	37
3.12	Dimensión de la probeta para ensayo de doblado según norma ASTM E-190.	38
3.13	Vernier.	38
3.14	Máquina universal de ensayos.	39
3.15	Cortadora metalográfica.	40
3.16	Banco de pulido.	40
3.17	Microscopio óptico.	41
3.18	Microdurómetro Vickers.	41
4.1	Indentaciones realizadas en las probetas.	54
4.2	Dureza Vickers en el cordón de soldadura para el acero ASTM A-569.	57
4.3	Dureza Vickers en el cordón de soldadura para el acero ASTM A-36.	58
4.4	Probetas listas para ensayo de doblado soldadas con los diferentes tipos de electrodos.	59
4.5	Probetas ensayadas, soldadas con electrodos rutilícos E-6013.	62
4.6	Probetas ensayadas, soldadas con electrodos bajo hidrogeno E-7018.	63
4.7	Probetas ensayadas, soldadas con electrodos celulósicos E-6011.	63
4.8	Probetas después del ensayo de doblado.	64
4.9	Probetas soldadas con electrodos rutilícos E-6013, para ensayo de tracción.	64
4.10	Probetas soldadas con electrodos celulósico E-6011, para ensayo de tracción.	65
4.11	Probetas soldadas con electrodos bajo hidrogeno E-7018,	

	para ensayo de tracción.	65
4.12	Probetas de ASTM A-36, después del ensayo de tracción.	66
4.13	Probetas de ASTM A-569, después del ensayo de tracción.	66
4.14	Curva esfuerzo Vs deformación probeta N° 3 de ASTM A-569 soldado con electrodo celulósico E-6011.	67
4.15	Curva esfuerzo Vs deformación probeta N° 6 de ASTM A-569 soldado con electrodo bajo hidrogeno E-7018.	67
4.16	Curva esfuerzo Vs deformación probeta N° 5 de ASTM A-569 soldado con electrodo rutilico E-6013.	68
4.17	Curva esfuerzo Vs deformación probeta N° 2 de ASTM A-36. soldado con electrodo bajo hidrogeno E-7018.	68
4.18	Curva esfuerzo Vs deformación probeta N° 7 de ASTM A-36 soldado con electrodo rutilico E-6013.	69
4.19	Curva esfuerzo Vs deformación probeta N° 4 de ASTM A-36 soldado con electrodo celulósico E-6011.	69
4.20	Curva esfuerzo Vs deformación probeta N° 5 de ASTM A-569 soldado con electrodo celulósico E-6011.	70
4.21	Curva esfuerzo Vs deformación probeta N° 2 de ASTM A-569 soldado con electrodo rutilico E-6013.	70
4.22	Curva esfuerzo Vs deformación probeta N° 2 de ASTM A-569 soldado con electrodo bajo hidrogeno E-7018.	71
4.23	Curva esfuerzo Vs deformación de ASTM A-569, comparación entre los tipos de electrodos utilizados.	71
4.24	Curva esfuerzo Vs deformación probeta N° 4 de ASTM A-36 soldado con electrodo bajo hidrogeno E-7018.	72
4.25	Curva esfuerzo Vs deformación probeta N° 2 de ASTM A-36 soldado con electrodo celulósico E-6011.	72
4.26	Curva esfuerzo Vs deformación de ASTM A-36, comparación	

entre los tipos de electrodos utilizados.

73

# *Índice de tablas*

<b>Tabla</b>		<b>Pág.</b>
2.1	Características de resistencia en el ensayo de tracción.	23
2.2	Composición química (%) ASTM A-36.	25
3.1	Composición química teórica de los aceros A-36 y A-569 según la norma ASTM A-1011.	29
3.2	Característica de los electrodos con revestimiento celulósico con potasio (E-6011).	30
3.3	Característica de los electrodos con revestimiento rutilico con potasio (E-6013).	30
3.4	Característica de los electrodos con revestimiento bajo hidrogeno con polvo de hierro (E-7018).	31
3.5	Parámetros constantes en la realización de la soldadura.	33
4.1	Composición química real de los aceros A-36 y A-569 mediante análisis químico por chispa.	47
4.2	Evaluación metalográfica para el acero ASTM A-36 soldado con electrodo con revestimiento celulósico E-6011.	48
4.3	Evaluación metalográfica para el acero ASTM A-569 soldado con electrodo con revestimiento celulósico E-6011.	49
4.4	Evaluación metalográfica para el acero ASTM A-36 soldado con	

electrodo con revestimiento rutilico E-6013.	50
4.5 Evaluación metalográfica para el acero ASTM A-569 soldado con electrodo con revestimiento rutilico E-6013.	51
4.6 Evaluación metalográfica para el acero ASTM A-36 soldado con electrodo con revestimiento bajo hidrogeno E-7018.	52
4.7 Evaluación metalográfica para el acero ASTM A-569 soldado con electrodo con revestimiento bajo hidrogeno E-7018.	53
4.8 Indentaciones realizadas a las muestras de ASTM 569 soldadas con electrodos con revestimiento celulósico E-6011.	54
4.9 Indentaciones realizadas a las muestras de ASTM 36 soldadas con electrodos con revestimiento celulósico E-6011.	55
4.10 Indentaciones realizadas a las muestras de ASTM 569 soldadas con electrodos con revestimiento rutilico E-6013.	55
4.11 Indentaciones realizadas a las muestras de ASTM 36 soldadas con electrodos con revestimiento rutilico E-6013.	56
4.12 Indentaciones realizadas a las muestras de ASTM 569 soldadas con electrodos con revestimiento bajo hidrogeno E-7018.	56
4.13 Indentaciones realizadas a las muestras de ASTM 36 soldadas con electrodos con revestimiento bajo hidrogeno E-7018.	57
4.14 Parámetros y observaciones del ensayo de doblado para el ASTM A-569, soldada con electrodos celulósicos E-6011.	59
4.15 Parámetros y observaciones del ensayo de doblado para el ASTM A-36, soldada con electrodos celulósicos E-6011.	60
4.16 Parámetros y observaciones del ensayo de doblado para el ASTM A-569, soldada con electrodos rutilícos E-6013.	60
4.17 Parámetros y observaciones del ensayo de doblado para el ASTM A-36, soldada con electrodos rutilícos E-6013.	61
4.18 Parámetros y observaciones del ensayo de doblado para el ASTM	

	A-569, soldada con electrodos bajo hidrogeno E-7018.	61
4.19	Parámetros y observaciones del ensayo de doblado para el ASTM A-36, soldada con electrodos bajo hidrogeno E-7018.	62
4.20	Parámetros obtenidos del ensayo de tracción para el ASTM A-36 soldado con los diferentes tipos de electrodos.	73
4.21	Parámetros obtenidos del ensayo de tracción para el ASTM A-569 soldado con los diferentes tipos de electrodos.	74
4.22	Correlación de dureza con las propiedades mecánicas soldadas con los diferentes tipos de revestimientos para el ASTM A-569.	76
4.23	Correlación de dureza con las propiedades mecánicas soldadas con los diferentes tipos de revestimientos para el ASTM A-36.	77





# *Introducción*

---

En la actualidad los procesos de soldaduras son de gran utilidad a nivel empresarial, ya que permite la facilidad de poder obtener uniones entre dos superficies que pueden ser utilizadas de una manera rápida y a bajo costo.

En nuestros días de acelerado crecimiento industrial, uno de los métodos más utilizados es la soldadura por arco eléctrico con electrodos revestido (SMAW), este proceso se realiza cuando se introduce una diferencia de potencial entre el electrodo y la pieza a ser soldada, cuando se ioniza el aire entre ellos pasa a ser un conductor lo que permite que el circuito se cierre y se crea el arco eléctrico, el calor generado funde parcialmente el material base y el material de aporte el cual se deposita y crea el cordón de soldadura, para que la soldadura tenga buenas propiedades mecánicas se ha desarrollado diferentes tipos de electrodos que ofrecen diferentes características dependiendo de su composición. Para esto se ha buscado optimizar estos materiales a través de aleaciones con otros elementos que eleven su rendimiento, dando origen a una diversidad de materiales novedosos que van tomando mayor auge en diversos sectores de la industria gracias a su alto desempeño.

Los electrodos celulósico, rutilico y bajo hidrogeno, E-6011, E-6013 y E-7018, respectivamente, son los más utilizados por ofrecer una buena penetración, y una escoria de fácil desprendimiento, sin embargo esto va asociado a las características del material base, y los parámetros utilizados en el proceso de soldadura.



# CAPÍTULO 1

## *Situación problemática*

---

### **1.1 Situación problemática**

Los procedimientos de soldaduras por arco con electrodo revestido, son de gran aplicación, tanto a nivel industrial como a nivel comercial, por ser procesos sencillos, rápidos y de bajo costo, aunado a la importancia y ventajas que pueden ofrecer a los fabricantes y clientes, sin embargo, estos procesos dejan la preocupación por la calidad del producto obtenido, debido a los factores que actúan en los diferentes procesos de soldaduras.

Una de las características que se desea estudiar es la microestructura la cual es sometida a cambios considerables debido al tiempo de enfriamiento y el calor en la zona de soldadura, esto va relacionado directamente al proceso de soldadura utilizado y a las técnicas aplicadas, a pesar que en la actualidad estas técnicas han avanzado considerablemente, todavía hay elementos como, la separación entre el electrodo y el material base, y el espesor del material, que afectan dichos resultados.

El propósito fundamental de esta investigación es realizar un estudio del efecto que tiene el tipo de revestimiento de electrodo (celulósico, rutilico, bajo hidrógeno), en cada uno de los aceros ASTM A-36 y ASTM A-569, sobre la metalurgia y la microdureza.

El estudio de las propiedades mecánicas se obtendrán mediante la aplicación de ensayos destructivos de tracción y ensayo de doblado, al igual que ensayo de microdureza Vickers, y la influencia de las características de la metalurgia, de la zona

afectada por el calor (ZAC), de la zona fundida (ZF) y de la zona del metal base (MB), en función del tipo de revestimiento del electrodo (celulósico, rutilíco, y bajo hidrógeno), para así optimizar el tamaño de la zona afectada por el calor y poder saber cómo influye la composición química de cada revestimiento de los electrodos utilizados en el beneficio o no de dichas propiedades, para poder obtener una mejor calidad en uniones soldadas a tope en acero ASTM A-36 y ASTM A-569. Y poder establecer correlaciones en cada caso estudiado, que nos permite tener un conocimiento claro sobre el tipo de revestimiento del electrodo y las ventajas que ofrece en cada uno de los aceros utilizados.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo General**

Determinar la microdureza y la metalurgia de uniones soldadas a tope en función del tipo de revestimiento del electrodo en acero ASTM A36 y ASTM A569.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- ❖ Caracterizar las propiedades mecánicas mediante ensayo de tracción, ensayo de doblez y la composición química de los aceros ASTM A36 y ASTM A569.
- ❖ Determinar la microdureza Vickers y la metalurgia en las juntas soldadas en los aceros ASTM A36 y ASTM A569 utilizando electrodos (celulósicos, rutilícos, bajo Hidrógeno).
- ❖ Determinar las correlaciones de la microdureza y la propiedad mecánica para los diferentes casos de estudio.

### 1.3 Justificación

El siguiente trabajo de investigación está enfocado en el tipo de revestimiento del electrodo, para propiciar una adecuada utilización de los mismos a la hora de ser utilizados en cualquier proceso a nivel industrial y en futuras investigaciones.

Es importante resaltar que este trabajo ayuda al afianzamiento de los conocimientos adquiridos durante la carrera.

### 1.4 Alcance

- ❖ Se fijaron parámetros constantes para la soldadura como. Intensidad de corriente, voltaje y velocidad de pasada de la soldadura. Para obtener la metalurgia y microdureza referido a las uniones soldadas a tope de los aceros ASTM A-36 y ASTM A-569 para espesor de 5mm y 4mm respectivamente, en función del tipo de revestimiento del electrodo, (rutilico, celulósico, bajo hidrógeno).
- ❖ El proceso de soldadura utilizado fue por arco eléctrico con electrodo revestido (SMAW).
- ❖ Se realizaron un total de 120 probetas, 60 probetas para el acero ASTM A-36 y 60 probetas para el acero ASTM A-569, las cuales se utilizaron de la siguiente manera, 24 probetas para ensayo de tracción, 24 probetas para ensayo de dobléz, 6 probetas para ensayos de microdureza Vickers y 6 probetas para estudios metalográficos, por cada tipo de acero.

## 1.5 Limitaciones

Al realizar esta investigación, se encontraron una serie de limitaciones, entre estas podemos mencionar:

- ❖ Adquisición de los materiales.
- ❖ Costos de cortes y mecanizado de las probetas.
- ❖ Limitado apoyo logístico de los equipos de laboratorio para la realización de los ensayos.
- ❖ Soldador calificado por la AWS.

## 1.6 Antecedentes preliminares

Bloem et al. (2000) llevaron a cabo una investigación sobre la microdureza y la resistencia en uniones soldadas de la aleación AW7020, la evaluación de la microdureza como indicador de resistencia es ampliamente utilizado, pero no hay acuerdos sobre el efecto de la preparación de bordes previos a la soldadura y es por ello que el objetivo estudiar la influencia de la preparación de dichos bordes sobre el perfil de la microdureza y microestructura de unión soldada de la aleación de aluminio, se realizaron estudios metalográficos mediante microscopía óptica y electrónica de barrido, con el fin de evaluar posibles diferencias micro estructurales entre las dos condiciones de soldeo con y sin bisel, también realizaron análisis mediante micro sonda de RX, realizando barridos a lo largo de la sección transversal de las probetas soldadas en el cordón y a lo largo de la zona afectada por el calor (ZAC), para determinar la microdureza utilizaron un indentador del tipo Vickers, aplicándole una carga de 100 g durante 15 segundos, llegando a concluir que este estudio es una gran herramienta para evaluar el comportamiento de la unión soldada, no se aprecia vitalización de elementos químicos en la ZAC que puedan justificar la disminución de la microdureza, así como la morfología del cordón de las probetas soldadas sin bisel es más simétrica que las soldadas con bisel, se puede decir que la

mayor facilidad y economía de la ejecución de uniones sin preparación de bordes ya que no se vio que en muestras de 5mm de espesor las propiedades mejoraran.

Zuno y Saavedra. (2001) realizaron un trabajo de investigación donde estudian las propiedades mecánicas de un acero al carbono microaleado con titanio, tratado térmicamente y analizan su soldabilidad en las zonas afectadas por el calor (ZAC), y en el metal base, realizaron un proceso de deformación plástica de los lingotes para eso utilizaron una laminadora de 50 toneladas de capacidad para una reducción promedio de alrededor de un 80% el espesor, a una temperatura de 1150 °C y de terminación de 880 °C en promedio, fueron hechos ensayos de tensión con valores promedio de  $R_t = 480$  Mpa y  $R_c = 360$  Mpa con 24% de elongación, los resultados de la microdureza fueron alrededor de 88 Rockwell "B", luego de realizarle el estudio metalográfico de la unión soldada en la ZAC, y el metal base llegaron a la conclusión que por los procesos de fundición y tratamientos termo mecánicos se pueden fabricar aceros al carbono microaleado con titanio con propiedades mecánicas mejores que las de un acero estructural al carbono como el A-36 y que además pueden ser soldados por los procesos de soldadura de arco eléctrico en condiciones de laminado y sin precalentamiento.

Aparicio et al. (2006) llevaron a cabo una investigación que consistía en estudiar la influencia de los tratamientos térmicos y el trabajo en frío en el comportamiento de las propiedades mecánicas del acero ASTM A-569, tomando en cuenta la dirección de laminación, la respuesta del acero a las condiciones de trabajo fue medida mediante ensayos de tracción y estudios de microscopia óptica. Se encontró que el material en su condición original posee mayor resistencia y ductilidad en comparación con el material tratado térmicamente. Por otra parte, el material tanto tratado térmicamente como en estado de entrega presentó mayor resistencia en sentido perpendicular a la dirección de laminación, debido al cambio de dirección del movimiento de dislocaciones asociado al efecto Bauschinger. Para el material



trabajado en frío, la diferencia de las propiedades mecánicas, relacionada con la orientación de la laminación, disminuye con el incremento del trabajo en frío. La comparación de microestructura del material, en función del tratamiento térmico aplicado partiendo del material en condición de entrega. Se pudo observar que el material recosido tuvo una estructura de granos gruesos debido a la baja velocidad de enfriamiento y equiaxial lo cual le confiere baja resistencia mecánica y alta ductilidad, mientras que el material normalizado presentó granos más finos. En contraste, el material en estado de entrega granos finos pero no equiaxial, con una forma alargada, lo cual evidencia deformación plástica previa. El material en condiciones de entrega presenta mejores condiciones mecánicas, tanto como en resistencia como en ductilidad, lo evidencia su utilidad en procesos de conformados. Hay que tener en consideración el sentido de laminación de los aceros a la hora de unirlos mediante soldadura si queremos optimizar las propiedades de dicha unión.

# CAPÍTULO 2

## *Bases teóricas*

---

### **2.1 Soldadura**

Etimológicamente, *soldar* significa consolidar, idealmente un proceso de soldadura sería aquel que originará una continuidad absoluta entre las partes unidas, de forma tal que fuera imperceptible la frontera entre ellas. Lo más simple sería aproximar en vacío dos superficies pulidas con precisión atómica, de forma que los electrodos de ambas caras se intercambiaran generando nuevos enlaces.

A escala microscópica se aprecia mejor lo que define la continuidad, ya que los átomos de las partes se agrupan, mediante la soldadura, en una estructura cristalina continua, a escala macroscópica, dicha continuidad implica la ausencia de toda materia interpuesta entre los elementos unidos. Esto no implica la homogeneidad en composición ya que, en ocasiones el material base es diferente al material de aporte.

Todos los metales son soldable mientras se aplique los procedimientos y técnicas adecuadas, para ello se debe comprender las propiedades y estructura del metal y su soldabilidad, es decir la habilidad para dejarse soldar.

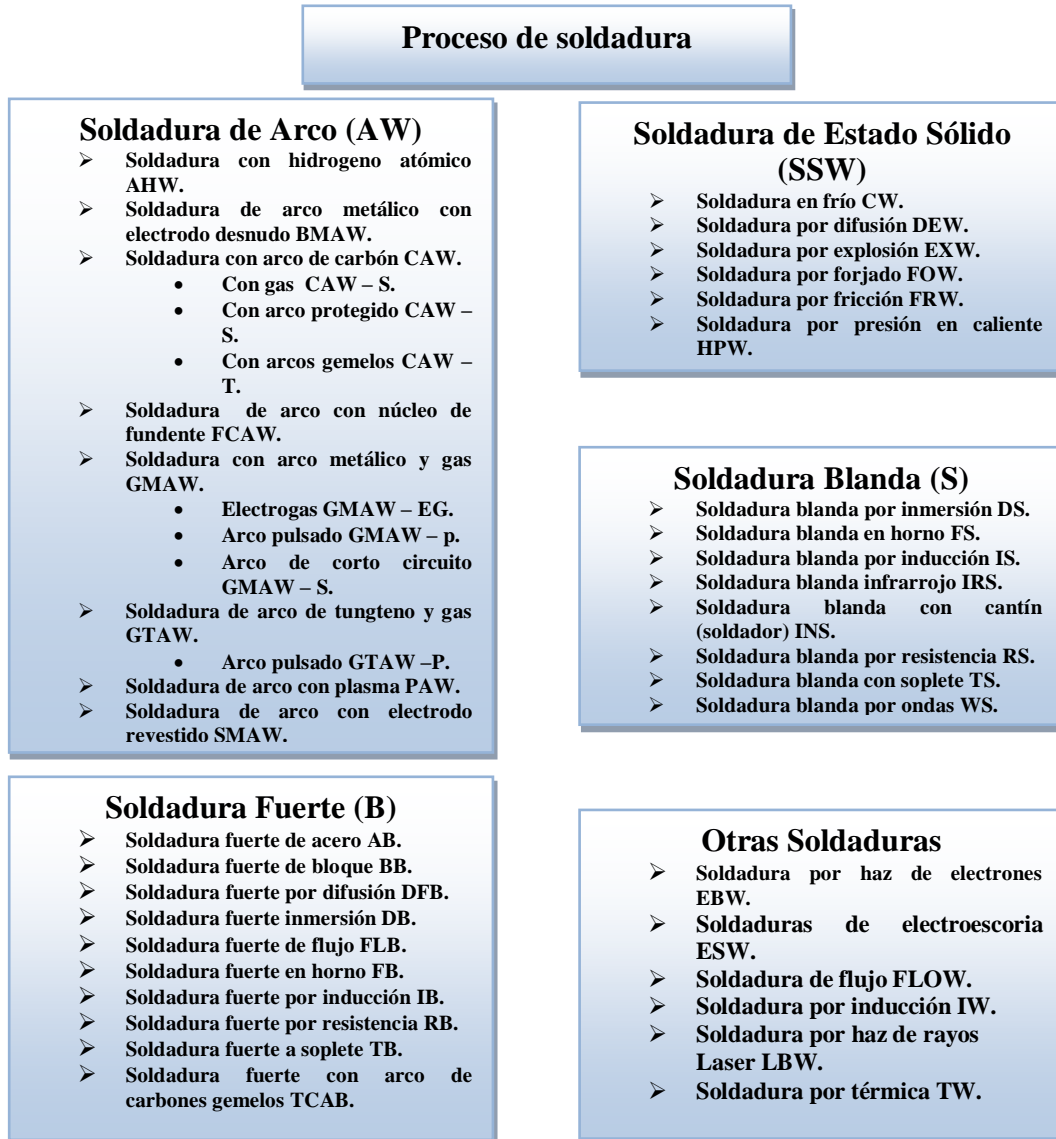
#### **2.1.1 Concepto de soldadura**

Se define soldadura como la operación que permite unir partes en una sola pieza, asegurando la continuidad entre ellas mediante calentamiento y/o presión con o sin el empleo de un material de aportación que disponga de características físicas comparables con el procedimiento especificado utilizado.

La soldadura se considera realizada cuando se verifica la interpenetración granular entre partes directamente o mediante el material de aportación.

### 2.1.2 Clasificación de los procesos de soldadura

Los procesos de soldaduras se clasifican según la figura 2.1.



**Figura 2.1** Clasificación de la soldadura según la AWS sociedad americana de soldadores. Fuente: metalurgia de la soldadura, Daniel Seférian.

### 2.1.3 Tipos de soldaduras por arco

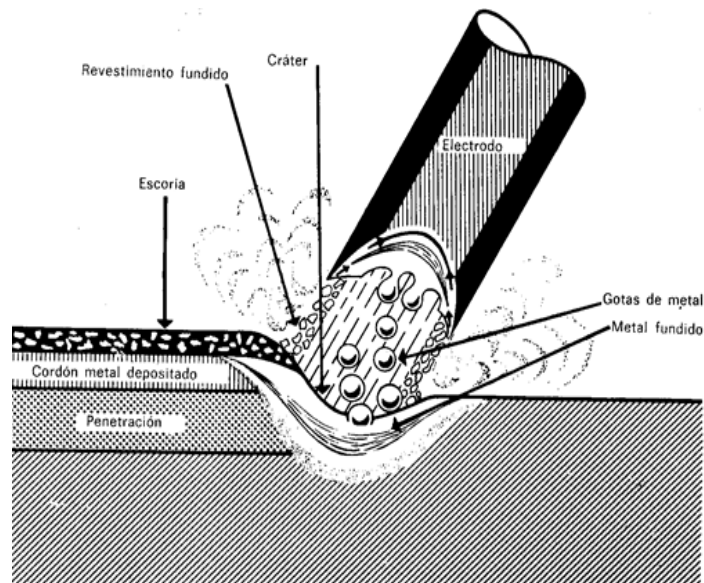
En la actualidad, el soldeo por arco eléctrico es el proceso industrial más extendido para la unión de los aceros y de la mayoría de los metales no ferrosos y sus aleaciones. Se subdivide en varios procedimientos, según la naturaleza del electrodo y de la atmosfera que rodea el metal fundido que ha de constituir el condón de soldadura.

- ❖ Soldadura por arco con electrodos revestidos.
- ❖ Soldadura por arco con electrodos de grafito.
- ❖ Soldadura por arco medio gaseoso reductor, procedimiento de soldeo por hidrógeno atómico.
- ❖ Soldadura por arco en medio gaseosos inertes: heliarco o argonarco con electrodos refractarios y electrodos fusiles, o bajo anhídrido carbónico.
- ❖ Soldadura por arco bajo un flujo conductor, Unionmelt.
- ❖ Soldadura por arco con presión: soldeo de espárragos con pistola.

### 2.1.4 Soldadura por arco con electrodos revestidos

En este procedimiento se establece un arco entre el electrodo y la pieza que se ha de soldar. El electrodo está constituido por una alma metálica, generalmente de forma cilíndrica, y un recubrimiento llamado *revestimiento*, y cumple a la vez los dos papeles de conductor de energía eléctrica y de metal de aporte (figura 2.2).

Durante la fusión del electrodo el revestimiento se funde y da una *escoria* que protege el metal fundido como lo hacen las escorias metalúrgicas. Además, el revestimiento ha de favorecer el cebado y la estabilidad del arco, y desempeñar, gracias a sus reacciones metalúrgicas, los dos papeles de agente desoxidante y de aportador de elementos útiles a la zona fundida. Por lo tanto, el electrodo cumple una función muy importante en el proceso de soldeo por arco.



**Figura 2.2** soldadura por arco con electrodo revestido (SMAW)

## 2.2 Electrodo

La soldadura manual por arco eléctrico es uno de los métodos más utilizados en la actualidad. Por esta razón existe una gran variedad de electrodos con fundentes que pueden producir soldaduras con propiedades físicas superiores a la de los metales base. El electrodo revestido está formado por un núcleo metálico el cual puede tener cualquier composición, por ejemplo, la de un acero de bajo carbono hasta la de un acero altamente aleado, como un acero inoxidable austenítico y también puede ser constituido por materiales no ferrosos, dependiendo del tipo de metal que se desee soldar. Protegiendo la varilla metálica se encuentra el recubrimiento de fundente, el cual proporciona las características exigidas en el arco y además origina la fuente de escoria necesaria normalmente para cualquier fusión de metales. Los electrodos celulósicos o rutílicos, requieren mayor precalentamiento, que un electrodo con

revestimiento de bajo hidrógeno en su revestimiento, y se calienta para eliminar el hidrógeno en la soldadura.

### **2.2.1 *El alma***

Está formada por un núcleo metálico conductor que tiene como función principal el aporte de material a la pieza, este aporte de material depende del material base a soldar, puede tener diferentes composiciones, se trata de mezclas de materias orgánicas y minerales. Durante la soldadura el alma funde un poco antes que el revestimiento.

### **2.2.2 *Revestimiento***

La composición del revestimiento suele ser muy compleja. Se trata generalmente de una serie de sustancias orgánicas y minerales. En la fabricación de la pasta para el revestimiento suelen intervenir:

- ❖ Óxidos naturales: óxido de hierro, ilimita (50% óxido férrico y 50 % óxido de titanio), rutilo (óxido de titanio), sílice (óxido de silicio).
- ❖ Silicatos naturales: caolín, talco, mica, feldepasto, etc.
- ❖ Productos volátiles: celulosa, serrín, entre otros.
- ❖ Ferroaleaciones: de Mn, Si, Ti, etc.
- ❖ Aglomeraciones: silicato sódico, silicato potásico.

Sin embargo, la naturaleza, dosificación y origen de los componentes permanece en secreto por parte del fabricante que en la práctica se limita a garantizar la composición química del metal depositado y sus características mecánicas: carga de rotura, límite elástico, alargamiento y resiliencia (tenacidad).

Tiene diferentes papeles:

❖ Papel eléctrico:

Se sabe que la existencia de un arco depende del estado de ionización de los gases comprendidos entre el ánodo y el cátodo. Los arcos metálicos son inestables por efecto de su característica negativa, debida al hecho de que la resistencia disminuye cuando la intensidad del arco aumenta. Para conseguir estabilidad en el funcionamiento es preciso introducir en el circuito del arco una resistencia, o mejor una autoinducción con una resistencia, que se oponen a la variaciones rápidas de la corriente, los factores que influyen en la estabilidad del arco son numerosos (tensión de cebado en vacío, potencial de ionización de los metales, poder termoiónico, conductividad térmica), de manera general, los cuerpos que se descomponen dando gases fácilmente disociables exigen tensiones de cebado más elevados debido a las calorías absorbidas por la disociación endotérmica.

❖ Papel físico.

Debe facilitar el soldeo en las diversas posiciones operatorias vertical, horizontal, de techo y proporcionar, según sea su naturaleza, un cordón reforzado o aligerado, en esta función hay dos factores que intervienen (la naturaleza del revestimiento que determina la viscosidad de la escoria líquida, y el espesor del revestimiento).

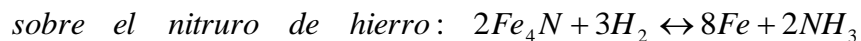
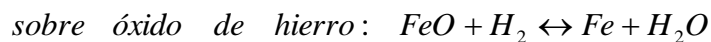
La viscosidad de las escorias en la soldadura ejerce una clara influencia, no sólo en la obtención fácil de depósitos en todas las posiciones, sino también en la protección total del metal fundido, por una parte, una escoria fluida facilita la velocidad de las reacciones y los intercambios entre escoria y metal. Por estas razones es necesario buscar, para la fijación del manganeso o de elementos especiales en el baño fundido, así como para la desulfuración y la desfosforación de la soldadura, escoria poco viscosas, como las producidas por los revestimientos básicos.

❖ Papel metalúrgico.

Los revestimientos no solamente contienen elementos estabilizadores y productos químicos que forman escorias metalúrgicas, sino asimismo elementos reductores y ciertos elementos útiles, que se fijan en el metal fundido con el objeto de mejorar las características mecánicas del depósito metálico.

### 2.2.3 *Electrodos celulósicos*

Constituidos a base de productos volátiles (celulosa de madera o de algodón) contienen también silicatos naturales y ferroaleaciones reductoras. Estos electrodos producen una escoria poco voluminosa, y con ellos las reacciones de reducción se llevan a cabo en una atmosfera de hidrogeno que rodea el metal fundido, tales reacciones son de dos tipos, según que la acción del hidrogeno se ejerza.



El metal depositado por estos electrodos carece prácticamente de oxígeno ( $O_2 \leq 0,02\%$ ). En cambio, contiene una gran cantidad de hidrógeno ( $15 - 25 \text{ cm}^3$  por cada 100 gramos de metal depositado). La superficie del cordón es rugosa y este se enfría rápidamente, para el rendimiento gravimétrico, el arco produce fuerte chisporroteo, con abundantes pérdidas por salpicaduras, y suele ser inferior al 90%.

Estos electrodos producen una gran cantidad de humos. Por ellos, es recomendable no usarlos en recintos cerrados, como el interior de calderas, cisternas, recipientes, etc. Por otra parte, lo enérgico del arco aconseja empleare con más rigor los materiales de protección, como son gorras, guantes, polainas, etc.

Estos electrodos son adecuados para soldar en todas las posiciones, pero en la mayoría de las veces es utilizado exclusivamente para soldar tuberías en vertical descendientes, ya que produce poca escoria y se consigue buena penetración en el cordón de raíz en esa posición, su uso se está generalizando en oleoductos y



gasoductos donde resulta ventajoso soldar en todas las posiciones sin modificar los parámetros de soldeo, y muy utilizados donde se requiere una buena penetración.

*Escoria.*

Es poca voluminosa ya que, recordemos, la protección del baño es esencialmente gaseoso. Se desprende con facilidad.

*Arco.*

Producen una gran penetración gracias al hidrógeno procedente de la celulosa que el calor del arco libera. La velocidad de soldeo es moderada. Se producen, sin embargo, abundantes pérdidas por salpicaduras.

*Metal depositado.*

El metal depositado por estos electrodos carece prácticamente de oxígeno ( $O_2 \leq 0.02\%$ ). En cambio, contiene una gran cantidad de hidrógeno ( $15 - 25 \text{ cm}^3$  por cada 100 gramos de metal depositado). La superficie del cordón es rugosa y éste se enfría rápidamente.

*Rendimiento gravimétrico.*

El arco produce un fuerte chisporroteo, con abundantes pérdidas por salpicaduras. El rendimiento estándar suele ser inferior al 90%.

*Seguridad de uso.*

Los electrodos celulósicos producen una gran cantidad de humos. Por ello, es recomendable no usarlos en recintos cerrados, como el interior de calderas, cisternas, recipientes, etc. Por otra parte, lo enérgico del arco aconseja emplear con más rigor los materiales de protección, tales como gorras, guantes, mandiles, polainas, etc. Los electrodos celulósicos no deben resecarse nunca.

*Aplicaciones.*

Aunque son adecuados para soldar en todas las posiciones, se suelen emplear exclusivamente para soldar tuberías en vertical descendiente, porque:

- ❖ Producen muy poca escoria.
- ❖ Se manejan con facilidad.
- ❖ Consiguen una buena penetración en el cordón de raíz, en esta posición.

Su uso se está generalizado en oleoductos, y gasoductos en donde resulta ventajoso soldar en todas las posiciones, sin cambiar los parámetros de soldeo. También son adecuados en aplicación en donde se pretenda conseguir una buena penetración.

#### **2.2.4 Electrodo bajo hidrógeno**

Este tipo de electrodo produce las soldaduras de más alta calidad ya que estos electrodos son producidos con un mínimo en el tenor de hidrógeno y carbono en la mezcla que recubre la varilla metálica, de allí es que recibe el nombre de “bajo hidrógeno”. Como elementos componentes del revestimiento se tienen carbonato de calcio, que proporciona una reacción básica a la escoria absorbe y neutraliza impurezas del azufre, la fluorita, que neutraliza las impurezas del fósforo de tipo ácido que son perjudiciales, y el manganeso, liga el azufre evitando los sulfuros y proporciona elasticidad a los depósitos.

Este electrodo se utiliza cuando las grietas y porosidades son motivos de preocupación en el cordón de la soldadura y la fragilidad producida por el hidrógeno, la resistencia al impacto, la ductilidad y la resistencia mecánica son excelentes en el cordón depositado. Por lo general son utilizados en construcciones rígidas aceros efervescentes y aceros con alto contenido de carbono 0,25%.

Estos electrodos son clasificados según las normas de AWS, American Welding Society (Sociedad Americana de Soldadores) en la cual se establece un sistema de 4 ó 5 dígitos de la siguiente manera: Antes de los dígitos encontramos la letra E (soldadura manual) la cual identifica al electrodo para ese tipo de proceso. Las dos o tres primeras cifras expresan la resistencia a la rotura mínima expresada en miles de libras / pulg<sup>2</sup>, la cifra siguiente define la posición en la cual se puede trabajar con el electrodo.

1. Aptos para soldar en cualquier posición.
2. Aptos únicamente para soldadura en posición plana u horizontal.

### 3. Aptos únicamente para soldaduras en posición plana.

El término de “electrodos de bajo hidrógeno” ha sido desarrollado debido a que estos electrodos son producidos con un mínimo en el tenor del hidrógeno en la mezcla que recubre la varilla metálica. Este electrodo se utiliza cuando son motivos de preocupación las grietas y porosidades en el cordón de la soldadura y la fragilidad producida por el hidrógeno. La resistencia mecánica, la ductilidad y la resistencia al impacto son excelentes en el cordón depositado.

#### **2.2.5 Electrodo rutilicos**

Son electrodos donde su principal componente es el rutilo, mineral obtenido a partir de menas que en su estado natural contienen de un 88 – 93% de  $TiO_2$  (óxido de titanio). Puede extraerse de la ilemita, mineral compuesta por un 45 – 55% de  $TiO_2$  y el resto de  $Fe_2O_3$  (óxido férrico) la protección la proporciona la escoria.

Dicha escoria tiene aspecto globular o semiglobular, tiene la viscosidad adecuada para permitir la soldadura de elementos con ajustes deficientes o cuando entre los bordes a ser unidos existe una distancia excesiva, resultando ideal los electrodos de rutilo en la soldadura con defectuosa preparación de juntas, la escoria se elimina con facilidad.

El metal depositado contiene un buen número de inclusiones, se puede decir que las impurezas son intermedias, y el contenido de hidrógeno puede fragilizar la soldadura, son de fácil encendido y reencendidos incluso cuando hay elevadas tensiones de vacío en la fuente de corriente la pequeña proporción de celulosa del revestimiento permite una elevada intensidad de corriente, y debido a la cantidad de elementos refractarios del recubrimiento origina un arco tranquilo y una penetración mediana.

La tensión de cebado se encuentra entre 40 y 50 Volt. Se pueden emplear con corrientes alternas o continua en ambas polaridades, posee un rendimiento

gravimétrico estándar, comprendido entre el 90% y el 100%, y resulta de fácil manejo en cualquier clase de montaje, la escasa influencia de las condiciones ambientales y por ser adecuados para emplearse en todas las posiciones, idóneos para todo tipo de soldadura siempre que no se requiera una elevada tenacidad, son utilizados en construcciones navales, y construcciones de calderas.

#### *Escoria.*

La escoria, de aspecto globular o semiglobular, tiene la viscosidad adecuada para permitir la soldadura de elementos con ajustes deficientes o cuando entre los bordes a unir existe una distancia excesiva, resultando los electrodos de rutilo idóneos en la soldadura con defectuosa preparación de juntas. La escoria se elimina con facilidad.

#### *Metal depositado.*

Contiene un buen número de inclusiones. El nivel de impurezas es intermedio. El contenido de hidrógeno puede fragilizar la soldadura.

#### *Arco.*

Fácil encendido y reencendido, incluso con elevadas tensiones de vacío en la fuente de corriente la pequeña proporción de celulosa del revestimiento permite una elevada intensidad de corriente. La cantidad de elementos refractarios del recubrimiento origina un arco tranquilo, de mediana penetración.

#### *Parámetros de uso.*

Tensión de cebado entre 40 y 50 V.

Se emplean con corriente alterna o con corriente continua, en ambas polaridades.

*Rendimiento gravimétrico.*

El rendimiento gravimétrico estándar, está comprendida entre el 90 y el 100 %.

*Aplicaciones.*

Estos electrodos, fáciles de encender y reencender poco sensibles a la humedad, escasa salpicaduras y favorable eliminación de escoria, que permite una razonable velocidad de soldeo constituyen una gama de consumibles muy apreciada.

Resultan por su fácil manejo en cualquier clase de montaje, la escasa influencia de las condiciones ambientales y por ser adecuados para emplearse en todas las posiciones, idóneos para todo tipo de soldadura siempre que no se requiera una elevada tenacidad. Los principales campos de aplicación son las estructuras metálicas, en construcciones de calderas, y construcciones navales.

## **2.3 Ensayos mecánicos**

### **2.3.1 *Ensayo de microdureza Vickers***

En esta prueba, el instrumento utiliza un indentador piramidal de diamante de base cuadrada con un ángulo incluido de  $136^\circ$  entre las cargas opuestas. El intervalo de carga está generalmente entre 1 y 1000 gr, los números de microdureza Vickers expresan en términos de cargas y área de la impresión.

Como resultado de la forma del marcador, la impresión sobre la superficie de la muestra será un cuadrado. La longitud de la diagonal del cuadrado es medida por medio de un microscopio equipado con un micrómetro ocular que contiene filamentos móviles, la diferencia entre los filamentos se indica en un contador calibrado en milésimas de milímetros. Por lo general, hay tablas para convertir la diagonal medida al número de dureza piramidal Vickers. El número de dureza se puede determinar por la

ecuación 2.1, donde P es la carga utilizada en el ensayo y  $d_1$  es la diagonal al cuadrado de la marca generada.

$$VHN = \frac{1.8544 * P}{d_1^2} \quad \text{Ec. (2.1)}$$

### 2.3.2 *Ensayo de doblez*

Este ensayo se realiza según la norma ASTM E – 190, se utiliza para medir la capacidad de deformación de la soldadura en una probeta al ser flexionada alrededor de un punzón, se toma el alargamiento de la fibra exterior para evaluar la capacidad de deformación.

Para el ángulo de doblez dependerá de la forma y la fabricación de la probeta, se refiere a la forma y dimensiones de la probeta y estado de la superficie, el ángulo del chaflán en V, para la realización del ensayo la distancia entre apoyos, diámetro del punzón, velocidad de deformación en el ensayo.

Con conocimientos obtenidos se puede deducir parámetros como la forma de probeta tiene que ser lo más sencilla posible, el ángulo de chaflán de 60° parecen ser más favorable que el de 90°, al aumentar la distancia entre los apoyos en el dispositivo de doblado se puede lograr que la probeta soporte un ángulo de doblez de 180°, al considerar diámetros de punzón menor, se puede estimar la zona del lado que se encuentra sometido a tracción en la probeta y por consiguiente puede apreciarse grietas a menores ángulos de doblez.

Este ensayo se utiliza para medir la capacidad de deformación de la soldadura de una probeta al flexionarla alrededor de un punzón. Ocasionalmente se toma el alargamiento de la fibra exterior para evaluar la capacidad de deformación.

El ángulo de doblez depende de los siguientes factores:

- ✓ Forma y fabricación de la probeta: a la forma y dimensiones de la probeta, estado de la superficie (sin considerar el cordón), ángulo del chaflán en V o X.
- ✓ Realización del ensayo: posición de la costura de la raíz en el ensayo, distancia entre apoyos, diámetros del punzón, velocidad de deformación en el ensayo.

De los conocimientos que hay hasta ahora se pueden deducir los siguientes parámetros.

- ✓ La forma de la probeta tiene que ser lo más sencilla posible.
- ✓ La relación entre el ancho y espesor de la probeta, se elige entre 1:6 y 1:1.
- ✓ Pequeños ángulos de chaflán ( $60^\circ$ ) parecen ser más favorables que los grandes ( $90^\circ$ ).
- ✓ Aumentado la distancia entre apoyos en el dispositivo de doblado, se puede lograr que todas las probetas soporten un ángulo de doblez de  $180^\circ$ .
- ✓ Con un diámetro de punzón menor, se estira más la zona del lado que se encuentra sometido a tracción en la probeta, y con ello, naturalmente aparece la primera grieta a menores ángulos de doblez.

### **2.3.3 Macroscopía.**

El objeto fundamental del ensayo de Macroscopía, es el de detectar defectos superficiales a simple vista, lo cual nos permite dar conclusiones de las características mecánicas y del proceso de soldadura utilizados para la unión soldada.

### **2.3.4 Microscopía óptica.**

El objeto del ensayo de microscopía óptica, es el de observar la microestructura resultante que conforma el material, lo cual nos permite dar conclusiones de las

características mecánicas y del proceso de soldadura utilizados para la unión soldada. Este ensayo se realiza con la ayuda de un microscopía óptico.

### **2.3.5 Ensayo de tracción**

Este ensayo se realiza según la norma ASTM A-370, para la fabricación de las probetas, es uno de los ensayos de resistencia comúnmente usado, se emplea con el propósito de clasificar el material base y el material de aporte en uniones soldadas, también se emplea para evaluar la resistencia de dichas uniones.

Consiste en aplicar esfuerzos de tensión a un material hasta su ruptura. Las cargas en la probeta y en el alargamiento de ésta, se miden continuamente a medida que se aumenta la carga, el esfuerzo al cual se somete la probeta se determina dividiendo la fuerza aplicada por el área transversal nominal de la misma, y la deformación se obtiene dividiendo el alargamiento total por una longitud inicial de referencia. Como resultado se obtiene de este ensayo un diagrama esfuerzo – deformación.

El ensayo de tracción es el procedimiento de ensayo de resistencia más usado, y se emplea para la clasificación de materiales de base y aporte (electrodo), para evaluar la resistencia de las uniones soldadas y en parte, para control de la habilidad de los soldadores. En el ensayo de tracción se estira una probeta despacio y constantemente hasta la ruptura, midiéndose la fuerza necesaria para ello y se obtiene el diagrama de tensión Vs alargamiento.

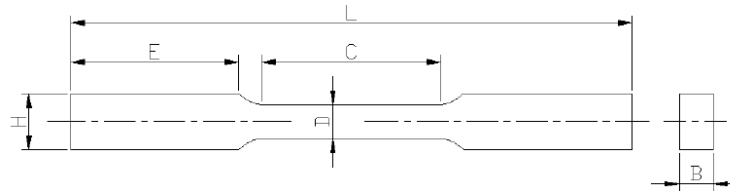
La tabla 2.1, contiene las características de resistencia más usadas que pueden sacarse del diagrama, mientras que en la figura 2.3 se observa una probeta con las principales características.



**Tabla 2.1.** Características de resistencia en el ensayo de tracción.

<b>Designación</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Definición</b>
<b>Resistencia a la tracción</b>	$\sigma_u$	Mayor esfuerzo aplicado durante el ensayo.
<b>Límite elástico</b>	$\sigma_E$	Máximo esfuerzo que al dejar de actuar no produce deformaciones permanentes en el cuerpo. Divide la curva en zona elástica y plástica.
<b>Esfuerzo de fluencia</b>	$\sigma_y$	Esfuerzo superior al límite elástico donde ocurren deformaciones permanentes sin incrementos de esfuerzos aplicados. Es visible en los materiales dúctiles pero en frágiles y duros no.
<b>Esfuerzo de ruptura</b>	$\sigma_R$	Máxima carga que soporta el material justo antes de romperse.
<b>Ductilidad</b>	Se expresa como porcentaje de la elongación	Es la cantidad de deformación plástica que puede tener un material hasta que el material se rompa.
<b>Resiliencia</b>		Cantidad de deformación que pueda absorber una unidad de volumen del material en la zona elástica. Viene dada por el área bajo la curva en la zona elástica.
<b>Tenacidad</b>		Cantidad de energía requerida para romper el material. Viene dada por el área bajo la curva.

Fuente: Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales. William F. Smith.



**Figura 2.3:** Características de probeta de tracción, C = sección reducida, E = sección de agarre, L = longitud total, H = ancho de la sección de agarre, D = ancho de la sección reducida, B = espesor de la probeta. Fuente Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales. William F. Smith.

## 2.4 Acero

### 2.4.1 Concepto de acero

El acero es básicamente una aleación o combinación de hierro y carbono en alrededor de 0,05% hasta menos de un 2%, sin embargo la mayoría de los aceros contienen menos de un 0,5% de carbono. El acero es hierro altamente refinado, su fabricación comienza con la reducción de hierro (producción de arrabio) el cual se convierte más tarde en acero. Algunas veces otros elementos de aleación específicos tales como el Cr o Ni se agregan con propósitos determinados.

### 2.4.2 Acero ASTM A36.

Acero al carbono estructural utilizado en la industria de la construcción. Puede ser tratado térmicamente según su aplicación. Posee buena ductilidad y soldabilidad. Debido a su gran ductilidad se conforman piezas complejas. Se usa en la fabricación de barras, láminas, chapas y piezas de formas complejas. Tiene aplicaciones generales en la industria de la construcción, tanques, industrias petrolera, soldadura, barras, lámina, chapas. Posee una dureza teórica de 110 – 150 HB. Acero

equivalentes ASTM A131, DIN 1.0583, STAS 8324. En la tabla 2.2 se muestra la composición química según la ASTM.

**Tabla 2.2.** Composición Química (%) ASTM A36.

C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni
(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
0,26	0,06	0,48	0,008	0,026	0,04	0,02	0,01

Fuente: norma ASTM A 1011/A 1011M – 01, especificaciones de la norma para el acero.

## ***2.5 Metalurgia de la soldadura.***

Una junta soldada está constituida por diferentes zonas el cordón de soldadura, la zona afectada por el calor (ZAC) y el metal base no afectado térmicamente por el calor. Las características metalúrgicas de cada una de estas zonas está íntimamente ligada con el metal base, el metal de aporte y el procedimiento de soldadura utilizado.

### ***2.5.1 Cordón de soldadura.***

Es la región que ha sido fundida durante el proceso de soldadura y se compone de metal base y material de aporte, aunque algunas soldaduras se producen sin material de aporte, como es el caso de aquellas realizadas mediante el proceso de soldadura por resistencia eléctrica.

### **2.5.2 Dilución.**

Es la relación que existe entre la cantidad de material base fundida e incorporada en la soldadura, es decir el peso con el metal de base contribuye a la composición del cordón de soldadura.

### **2.5.3 Zona afectada por el calor (ZAC).**

Es aquella zona del material base, que por estar adyacente al metal fundido, es afectada por el calor generado durante el proceso de soldadura. Esta zona se define en función de su destreza (determinado perfiles de dureza), o de su microestructura. Los fenómenos metalúrgicos que ocurren en zona son determinados por los ciclos térmicos que sufre el material. Estos ciclos dependen de la cantidad de calor suministrada durante el proceso de soldadura, espesor de la geometría de la junta a soldar. Mediante el control de los dos primeros factores se puede modificar, en cierta forma las características de la zona afectada por el calor. Entre los efectos que se produce en el metal base como consecuencia de los ciclos térmicos están los cambios micro estructurales (disolución o precipitación de fase, crecimiento de grano), disminución de la resistencia a la corrosión, variación de las propiedades mecánicas (resistencia a la cadencia, resistencia a la tracción, tenacidad, dureza) y generación de esfuerzos residuales.

### **2.5.4 Metal base.**

La tercera zona que compone la unión soldar, es el metal base propiamente dicho. La mayoría de materiales que se utilizan hoy en día son soldables. La selección de un material para su aplicación que involucra soldadura requiere, que se considere su soldabilidad, entendiéndose por soldabilidad la capacidad de un metal o comportarse satisfactoriamente en el servicio requerido.

### 2.5.5 Uniones a tope.

En las uniones a tope la soldadura se realiza entre los bordes de las piezas a enlazar, la preparación de los bordes se hará acuerdo con el espesor de la pieza a soldar. Para caso de un espesor de material de 12 mm, se recomienda un tope plano con separación de 1/8 de pulgada.

### 2.5.6 Penetración.

La penetración de una soldadura es la profundidad de la zona de fusión debajo de la superficie original del material base, según el manual del soldador, editorial cesol, de German Hernández.

$$Pt = \frac{3.432 * 10^{-4} * (V^{0.56}) * (I^{1.33})}{(v^{0.333})} \text{ Ec. (2.2)}$$

Pt (mm) = penetración, V (voltios) = voltaje, I (Amp) = intensidad de corriente, v (m/min) = velocidad de pasada.

# CAPÍTULO 3

## *Metodología*

---

A continuación, se especificarán los procedimientos que permitieron analizar e interpretar los resultados obtenidos en los procesos experimentales y que constituyen la médula de la presente investigación.

### **3.1 Nivel de investigación**

En este capítulo se describirá los pasos y las etapas a seguir de acuerdo al problema planteado referido a la metalurgia en uniones soldadas a tope, en función del tipo de revestimiento del electrodo (celuloso, rutilico, bajo hidrogeno), para lograr los objetivos preestablecidos, es por ello que se asume que el nivel de esta investigación es experimental y exploratoria, ya que es necesario realizar varios ensayos, dado que se busca la determinación de la microdureza en uniones soldadas a tope de los aceros ASTM A36 y ASTM 569.

### **3.2 Diseño de la investigación**

En el marco de la investigación planteada, cuyo objetivo está referido a evaluar la microdureza y la metalurgia en uniones soldadas de los aceros ASTM A36 y ASTM 569, en función del tipo de revestimiento del electrodo (celulósico, rutilíco, bajo hidrógeno), se aplicará un metodología que permite manipular las variables independientes, en una situación controlada por el experimentador, con la finalidad de

revelar sus efectos sobre las variables dependientes (supuestos efectos) y determinar relaciones causales.

En miras de alcanzar los objetivos planteados es necesario establecer una serie de fases metodológicas que describen los pasos a realizar y se indican a continuación:

### 3.2.1 Descripción del material base

El material ASTM A-36 y ASTM A-569, fue suministrado en láminas de 1,20 x 2,40 metros, la composición química teórica se muestra en la tabla 3.1 y para la composición química real se realizó un análisis químico por chispa usando un espectrómetro de emisión óptica modelo Thermo Scientific ARL 3460 Advantage para análisis de metales en la empresa Sermamet. C.A. Los resultados se muestran en la tabla 4.1.

**Tabla 3.1** Composición química teórica de los aceros ASTM A-36 y ASTM A-569 según la norma ASTM A-1011.

ASTM A-36		ASTM A-569	
Valor teórico		Valor teórico	
C (%)	0,26	C (%)	0,15
Mn (%)	0,48	Mn (%)	0,60
P (%)	0,008	P (%)	0,035
S (%)	0,026	S (%)	0,035
Si (%)	0,06	Si (%)	-
Cu (%)	0,04	Cu (%)	0,20
Cr (%)	0,02	Cr (%)	-
N (%)	0,01	Ni (%)	-

Fuente: norma ASTM A 1011/A 1011M – 01, especificaciones de la norma para el acero.

### 3.2.2 Descripción del material de aporte

Los electrodos utilizados fueron suministrados en varillas de 1/8" X 14" de la marca Lincoln Electric. Las siguientes características como: la composición química, las propiedades mecánicas se muestran de la siguiente manera:

- Electrodos con revestimiento celulósico (E-6011) tabla 3.2.
- Electrodos con revestimiento rutilico (E-6013) tabla 3.3.
- Electrodos con revestimiento bajo hidrogeno (E7018) tabla 3.4.

**Tabla 3.2** Características electrodo con revestimiento celulósico con potasio.

<b>Composición química</b>	C: 0,10%	Mn: 0,60%	Si: 0,30%
<b>Resistencia a la tracción</b>	(510 - 580) N/mm <sup>2</sup>		(72,86 – 84,36) Ksi
<b>Limite elástico</b>	(430 – 490) N/mm <sup>2</sup>		(60 – 70) Ksi
<b>Alargamiento (L=5d)</b>	(24 – 28) %		
<b>Resistencia al impacto</b>	(40 – 60) N*m a -30°C		
<b>Intensidad de corriente</b>	(75 – 120) Ampere		

Fuente: Lincoln Electric.

**Tabla 3.3** Características electrodo con revestimiento rutilico con potasio.

<b>Composición química</b>	C: 0,10%		Mn: (0,50 - 0,60) %	Si: 0,30%
<b>Resistencia a la tracción</b>	(510 - 560) N/mm <sup>2</sup>		(72,86 – 81,45) Ksi	
<b>Limite elástico</b>	(420 – 480) N/mm <sup>2</sup>		(58,60 – 66,98) Ksi	
<b>Alargamiento (L=5d)</b>	(23 – 27) %			
<b>Resistencia al impacto</b>	No suministrada por AWS			
<b>Intensidad de corriente</b>	(90 – 130) Ampere			

Fuente: Lincoln Electric.



**Tabla 3.4** Características de los electrodos con revestimiento bajo hidrogeno con polvo de hierro.

<b>Composición química</b>	C: 0,08 % Mn: (1,0 - 1,40) % Si: (0,30 - 0,60) %	
<b>Resistencia a la tracción</b>	(540 - 610) N/mm <sup>2</sup>	(77,14 - 88,73) Ksi
<b>Limite elástico</b>	(450 - 510) N/mm <sup>2</sup>	(62,79 - 72,86) Ksi
<b>Alargamiento (L=5d)</b>	(25 - 29) %	
<b>Resistencia al impacto</b>	(120 - 160) N*m a -30°C	
<b>Intensidad de corriente</b>	(90 - 140) Ampere	

Fuente: Lincoln Electric.

### 3.3 Cortes de las láminas y preparación de las probetas

#### 3.3.1 Realización de los cortes de las láminas:

Se realizaron mediante corte por cizalla en la empresa Oxicorte de Venezuela, C.A., allí se obtuvieron 12 láminas de 100 x 400 mm para el acero ASTM A-36 (figura 3.1), acero ASTM A-569 (figura 3.2), estas dimensión fueron tomadas según la distribución que se utilizó para la realización de las probetas a ser ensayadas, como se muestra en la figura 3.9.

Las figuras 3.3 y 3.4, se muestran las láminas cortadas de los aceros ASTM A-36 y ASTM A-569 respectivamente, listas para ser soldadas, con las dimensiones de 100 x 400 mm, según la distribución para ahorrar material.





**Figura 3.3** láminas de acero ASTM A-36, dimensiones 100 x 400 x 5 mm.



**Figura 3.4** láminas de acero ASTM A-569, dimensiones 100 x 400 x 4 mm.

### 3.3.2 Realización de las soldaduras de las láminas

Se realizó la soldadura tomando constante los siguientes parámetros voltaje, intensidad de corriente, así como la velocidad de pasada que es un factor que fue asociado a la experiencia del soldador estos datos se muestran en la (tabla 3.5).

**Tabla 3.5** Parámetros constantes en la realización de la soldadura.

Tipo de electrodos	Corriente(Amp)	Voltaje(volt)	Velocidad(mm/s)
Rutilico	110	35	2,666
Celulósico	97,5	31	2,222
Bajo hidrogeno	115	36,6	1,904

Fuente: propia.

Los parámetros de la tabla 3.6, fueron seleccionados después de realizar varias pruebas para lograr obtener los valores más adecuados para realizar la soldadura, ya que tanto el voltaje, la intensidad de corriente y la velocidad de pasada, en este trabajo son parámetros constantes.

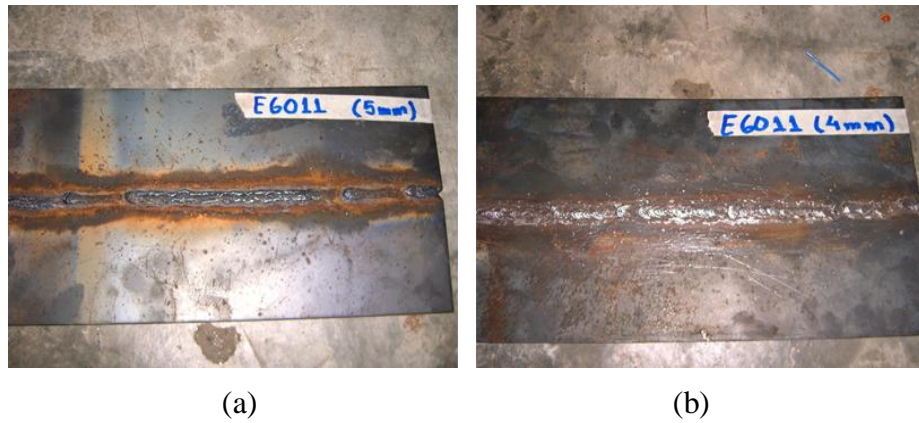
Se realizaron las soldaduras de las láminas de acero ASTM A-569, acero ASTM A-36, con electrodos de revestimientos: celulósico, rutilico y bajo hidrogeno, como se muestra en las (figuras 3.5, 3.6, 3.7, 3.8).



**Figura 3.5** Realización de las soldaduras en las láminas.



**Figura 3.6** láminas de acero ASTM A-36(a) y ASTM A-569(b), soldadas con electrodos con revestimientos rutilico (E-6013).



**Figura 3.7** láminas de acero ASTM A-36(a) y ASTM A-569(b), soldadas con electrodos con revestimientos celulósico (E-6011).

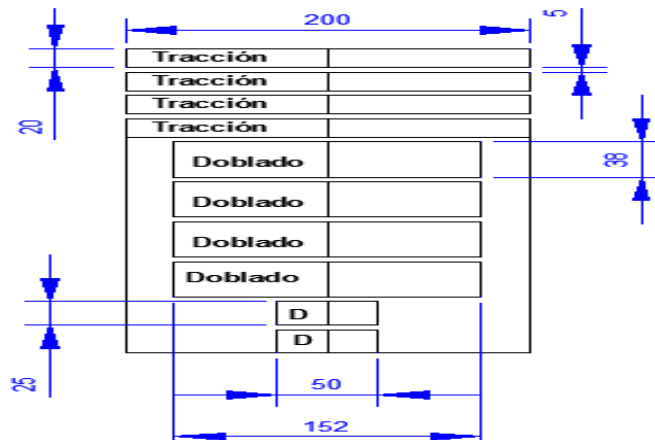


**Figura 3.8** láminas de acero ASTM A-36(b) y ASTM A-569(a), soldadas con electrodos con revestimientos bajo hidrogeno (E-7018).

### 3.3.3 Preparación de las probetas

Para la realización de las probetas de los ensayos de tracción, doblado, microdureza y microscopia se realizaron los siguientes cortes de las láminas soldadas a tope por ambas caras, con las dimensiones seleccionadas para lograr sacar por cada par de láminas soldadas de 200 x 400 mm, 4 probetas de tracción 4 probetas de

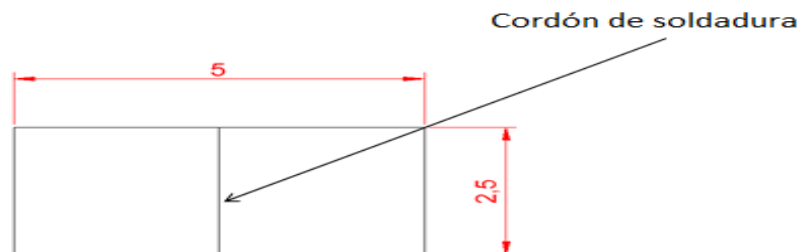
doblado, 1 probeta de dureza y 1 probeta de metalografía, logrando con esta distribución un comodidad para mecanizar las probetas, como se muestra en la (figura 3.9).



**Figura 3.9** cortes realizados a las láminas de ASTM A-36 y ASTM A-569 soldadas con los diferentes tipos de electrodos, medidas en mm.

### 3.3.4 Probetas para microscopia óptica y ensayo de microdureza Vickers.

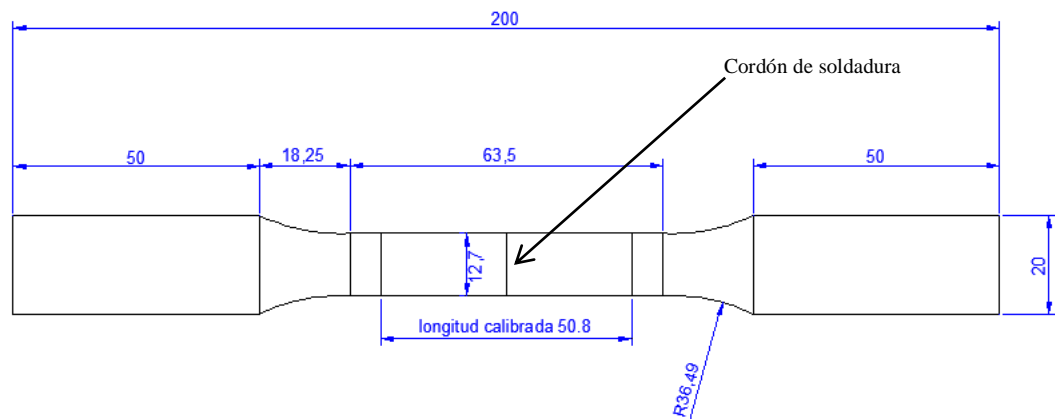
Para las probetas de estudio metalográficos y ensayo de microdureza Vickers se obtuvieron un total de 12 probetas para el ASTM A-36 y 12 probetas para el ASTM A-569, con las dimensiones como se muestra la (figura 3.10). Las cuales son 6 para ensayo de microdureza Vickers y 6 para microscopia óptica respectivamente.



**Figura 3.10** dimensiones de las probetas para ensayo de microdureza y microscopia óptica, medidas en cm.

### 3.3.5 Probetas para el ensayo de tracción.

En este ensayo se utilizaron 24 probetas para el ASTM A-36 y 24 para el ASTM A-569, las cuales se dividen de la siguiente manera 8 probetas soldadas con electrodos con revestimiento celulósico (6011), 8 probetas soldadas con electrodos con revestimiento rutilico (6013) y 8 probetas soldadas con electrodos con revestimiento bajo hidrogeno (7018), para un total de 24 probetas por cada tipo de acero, se utilizaron esa cantidad de probetas ya que son suficiente para lograr obtener una tendencia del comportamiento, las dimensiones de las probetas se realizaron según la norma ASTM A-370 para ensayos a tracción (figura 3.11).



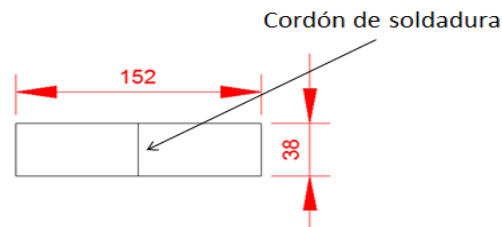
**Figura 3.11** dimensión de la probeta para ensayo de tracción según la norma ASTM A-370, medidas en mm.

### 3.3.6 Probetas para el ensayo de doblado.

En este ensayo se utilizaron 24 probetas para el ASTM A-36 y 24 para el ASTM A-569, las cuales se dividen de la siguiente manera 8 probetas soldadas con



electrodos con revestimiento celulósico (6011), 8 probetas soldadas con electrodos con revestimiento rutilico (6013) y 8 probetas soldadas con electrodos con revestimiento bajo hidrogeno (7018), para un total de 24 probetas por cada tipo de acero, se utilizaron esa cantidad de probetas ya que son suficiente para lograr obtener una tendencia del comportamiento, las dimensiones de las probetas se realizaron según la norma ASTM E-190 para ensayos de doblado (figura 3.12).



**Figura 3.12** dimensión de la probeta para ensayo de doblado según la norma ASTM E-190, medidas en mm.

### 3.3.7 Equipos e Instrumentos

La selección de los equipos e instrumentos fue realizada teniendo en cuenta la disponibilidad de los mismos, así como sus características, para obtener los resultados más exactos posibles. En esta sección se describe las características de los equipos, así como el lugar donde están situados.

- Vernier: Marca Mitutoyo. Rango de 150 mm y 6 in, con una precisión de 0,05mm y 1/128in. Para verificar las dimensiones de las probetas de doblado, microdureza y de tracción. (Figura 3.13)



**Figura 3.13** Vernier.



- Cepillo. Para limpieza de las probetas luego de la soldadura para desprender la escoria.
- Indumentaria de seguridad (guantes, bata protectora, gafas de seguridad y mascarilla de respiración).
- Máquina universal de ensayos: Marca Galdabini, Capacidad de 20TM, incluye software para ensayos de tracción de plataforma operativa MS-DOS. Ubicada en el Laboratorio de Materiales de la Facultad de Ingeniería UC. (Figura 3.14)



**Figura 3.14** Máquina universal de ensayos.

- Cortadora metalográfica: Marca Buehler Ltf, Modelo Samplmet con entrada refrigerante y bomba Buehler Ltd. Para el Corte de las probetas. (Figura 3.15)



**Figura 3.15** Cortadora metalográfica.

- Banco de lijado y papeles de lija de numeración 120, 240, 320, 600. Para la preparación de las probetas para el análisis metalográfico.
- Banco de pulido grueso y fino: Marca Buehler Ltd. Ubicado en el Laboratorio de Materiales de la Facultad de Ingeniería UC. Para la preparación de las muestras para el análisis metalográfico. (Figura 3.16)



**Figura 3.16** Banco de pulido.

- Microscopio óptico: Marca Unión. Modelo MC-86267, con lentes de visualización 100x, 200x, 400x y 1000x. Cámara digital Panasonic integrada modelo WV-CP230 y captura de imágenes en entorno Windows XP. Ubicado en el Laboratorio de Materiales de la Facultad de Ingeniería UC. Para el análisis metalográfico. (Figura 3.17)



**Figura 3.17** Microscopio óptico.

- Microdurómetro: Marca Buehler, con lentes de inspección 100x y 400x, Capacidad máxima de 1kgf, con indentador de punta de diamante. Ubicado en el Laboratorio de Materiales de la Facultad de Ingeniería UC. Para el ensayo de microdureza. (Figura 3.18)



**Figura 3.18** Microdurómetro Vickers.

### **3.3.8 Procedimiento experimental para ensayo de tracción**

El ensayo de tracción se realizó con las probetas que fueron soldadas con los electrodos de revestimiento celulósico rutilico y bajo hidrogeno. Además, este ensayo se realizó siguiendo los pasos descritos por la norma ASTM A-370:

1. Se determinó el área de la sección transversal de la probeta en la sección reducida, considerando para ello al menos tres (3) lecturas en la sección

reducida con una dispersión igual o inferior al 1% y de apreciación igual o superior a 0,02mm.

2. Se marcó la sección calibrada de las probetas, la longitud entre marcas (25mm), con una apreciación igual o superior a 0,05mm.
3. Se calibró el cero (0) de la máquina de ensayo.
4. Se sujetó la probeta en la máquina de ensayo, se ajustaron los soportes o mordazas.
5. Se estableció y registró la velocidad del ensayo, la cual según la norma ASTM E8M-04, se estimó como 0,05 mm de la sección de área reducida/min. De esta manera se fijó en la máquina una velocidad de 1,5 mm/min, que corresponde a una probeta "Subsize".
6. Se obtuvo el comportamiento Esfuerzo-Deformación del ensayo.
7. Se determinó el esfuerzo de fluencia por el método Offset al 0,002 ó 0,2% de la deformación según las características de la curva.
8. Se calculó la resistencia a la tracción de la probeta como la división entre la máxima fuerza registrada sobre la probeta durante el ensayo y el área original de la sección transversal.
9. Se unieron las partes fracturadas de la probeta y se midió la longitud final entre marcas después del ensayo con una apreciación igual o superior a 0,05mm y se reportó el porcentaje de deformación a fractura con apreciación de  $\pm 0,2\%$ .
10. Se unieron las partes fracturadas de la probeta se determinó el área final en la sección reducida como el producto del menor espesor y ancho en la menor sección transversal de la probeta fracturada. Se registró el porcentaje de reducción de área.
11. Se redondearon los resultados obtenidos para esfuerzo de fluencia y resistencia a la tracción a una apreciación de 5Mpa, ya que los valores se encontraron en el intervalo entre 500 y 1000Mpa.

12. Se reportaron los resultados obtenidos, mostrando el número de probeta, tiempo de exposición, esfuerzo de fluencia, deformación en el punto de fluencia, esfuerzo máximo.
13. Se calculó y reportó además los valores de deformación ingenieril como la división de la longitud final menos la longitud inicial, entre la longitud inicial entre marcas de la probeta. Y el porcentaje de reducción de área como la división del área inicial menos el área final, entre el área inicial de la sección transversal de la probeta.
14. Se promedió y reportó los resultados obtenidos para cada tipo de revestimiento.

### **3.3.9 Preparación y examen metalográfico de la superficie de las muestras.**

De acuerdo a la norma ASTM E3-01, se especifica que las muestras no deben tener deformaciones, rayas, arranque de material, elementos extraños, aplastamientos, bordes redondeados, y otros defectos.

Para realizar esta preparación se seleccionó probetas soldadas con electrodos con revestimiento celulósico, rutilico y bajo hidrogeno, respectivamente. Luego se obtuvo de ella tres muestras por cada tipo de electrodo utilizado y para cada tipo de acero. Las muestras se cortaron, se lijaron con papeles abrasivos de numeración 120 hasta 600, alternando perpendicularmente el sentido de desbaste para eliminar las rayas anteriores. Se pulieron las muestras con un paño de pulido con alúmina gruesa y luego con alúmina fina.

El procedimiento para realizar el ataque metalográfico fue el descrito en las normas ASTM E407-07 práctica estándar para metales y aleaciones micrograbado:

- La solución de ataque metalográfico, fue el Nital al 2% (2 ml de ácido nítrico y 98 ml de etanol), ya que es el reactivo utilizado para acero al carbono.
- Se encendió la campana de extracción de gases.

- Se expuso la superficie de la muestra en el reactivo por un periodo de tiempo de 5 segundos. este tiempo es el adecuado para aceros al carbono.
- Se enjuagaron las muestras con abundante agua.
- Se rociaron con etanol sobre las muestras y se secaron con un flujo de aire caliente.

Luego se observaron las muestras en un microscopio óptico con lentes de aumento de 400X, 200X y 100X, para detallar la microestructura del material, granos y bordes de grano, y la posible formación de precipitados.

### **3.3.10 Procedimiento experimental para ensayos de microdureza Vickers**

En este ensayo se realizaron penetraciones con un indentador piramidal de diamante de base cuadrada y con ángulos de caras de  $136^\circ$ . Se hicieron tres (3) indentaciones en la zona afectada por el calor, tres (3) indentaciones en el cordón de soldadura y tres (3) en el metal base de manera lineal y separada, obteniéndose un total de nueve (9) Indentaciones por cada probeta ensayada, se tomaron tres (3) indentaciones en cada zona ya que con tres se puede obtener una tendencia, logrando ensayar un total de 3 probetas por cada tipo electrodo utilizado para cada acero en estudio, con una carga de aplicación de 300gf por un tiempo de 5 segundos. estos valores son los más adecuados para este tipo de muestras, el ensayo se realizó según los pasos de la norma ASTM E92-82:

1. Las muestras se prepararon igual que en un proceso de inspección metalográfica.
2. Se colocaron las muestras en la máquina de microdureza y se realizó la penetración.
3. Se apuntaron los resultados obtenidos para tipo de acero soldado con cada uno de los electrodos utilizados y acero respectivamente.

4. Se promedió a registrar los datos en tablas y se realizó graficas por cada zona de estudio (ZAC, ZF, MB).

### **3.3.11 Procedimiento experimental para ensayos de doblado**

En este ensayo de realizaron según la norma ASTM E-190, se prepararon 48 probetas, ya que son suficientes para obtener una tendencia de características estudiadas, estas probetas se ensayaron con la máquina universal de ensayos Galdabini, con el dispositivo de tres apoyos, el ensayo se realizó con una velocidad promedio de 5 mm/min, esta velocidad adecuada para realizar el ensayo, y la carga máxima se registró cuando la probeta tomaba la forma del punzón, la carga fue aplicada sobre el cordón de soldadura, se realizaron los siguientes pasos para la realización del ensayo de doblado.

- 1 Se mecanizaron las probetas según la norma ASTM E-190.
- 2 Se apuntaron los valores de fuerza máxima obtenida por cada una de las probetas ensayadas y se registró en una tabla para luego sacar el promedio para cada caso de estudio.
- 3 Se repitió el procedimiento hasta ensayar todas.
- 4 Se gráfica los datos suministrados por el programa para realizar las gráficas comparativas por cada caso de estudio.

# CAPÍTULO 4

## *Resultados y análisis de resultados*

---

---

A continuación se muestran los resultados obtenidos en las diferentes pruebas realizadas (ensayo de tracción, ensayo de doblado, ensayo de microdureza Vickers y microscopia óptica). Primero se presentara la tabla 4.1 donde se muestra los resultados de la composición química real mediante análisis químico por chispa, y observaciones vistas después de la realización de la soldadura con relación a la escoria, luego se realizó la evaluación metalográfica y el ensayo de microdureza Vickers, luego los ensayos de doblado y por último los ensayos de tracción.



**Tabla 4.1** Composición química real de los aceros ASTM A-36 y ASTM A-569 mediante un análisis químico por chispa.

ASTM A-36		ASTM A-569	
Valor real		Valor real	
C (%)	0,18	C (%)	0.0982
Mn (%)	0,30	Mn (%)	0,5218
P (%)	0,038	P (%)	0,0062
S (%)	0,035	S (%)	0,0042
Si (%)	0,35	Si (%)	-
Cu (%)	0,050	Cu (%)	0,023

Fuente: propia.

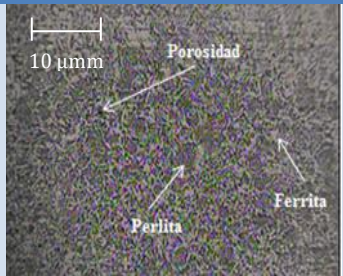
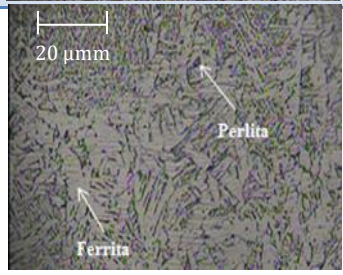
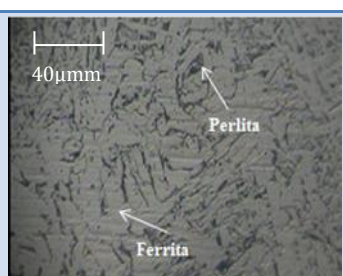

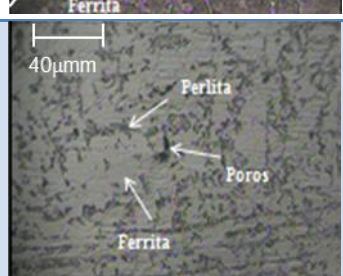
Se observó diferentes características en la escoria en cada tipo de revestimiento utilizado tales como:

En el cordón de soldadura realizado con el electrodo de revestimiento celulósico, se observó una buena penetración así como depósitos libres de inclusiones de escoria y fácil de remover, el cordón de soldadura realizado con el electrodo de revestimiento rutilico, se observó poca salpicadura, una penetración media, y una escoria auto desprendible y en el cordón de soldadura realizado con el electrodo de revestimiento bajo hidrogeno, se observó un cordón de soldadura con una buena apariencia (uniforme), poca inclusiones de escoria al igual que salpicaduras y escoria de fácil remoción.

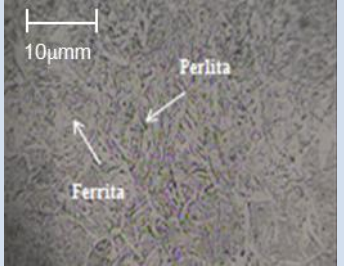
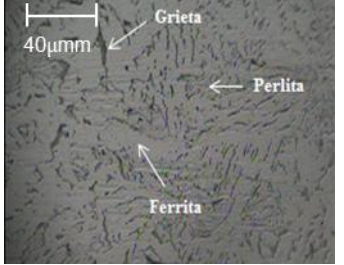
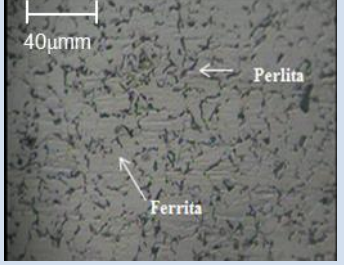
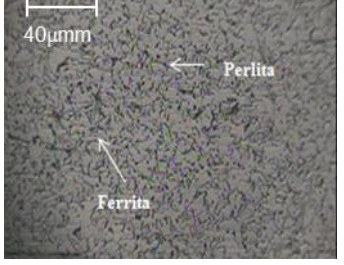
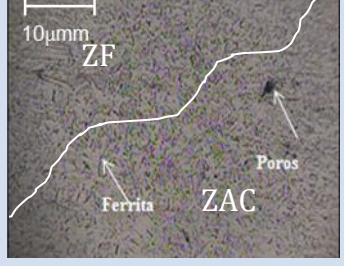
#### 4.1 Evaluación metalográfica

En este punto del presente trabajo de investigación y tal como fue descrito en el aparte 3.2.10, se le realizó la evaluación metalográfica a las probetas que fueron soldadas con los diferentes tipos de revestimiento. Los resultados de esta evaluación se muestran en las tablas siguientes: 4.2 a la 4.7

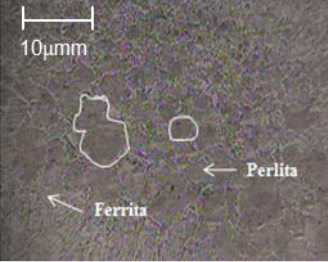
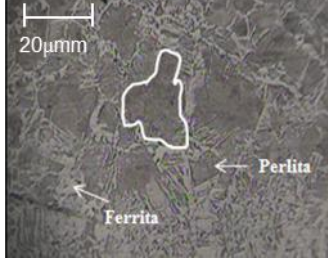
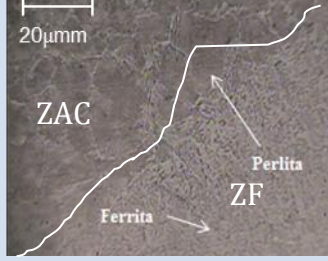
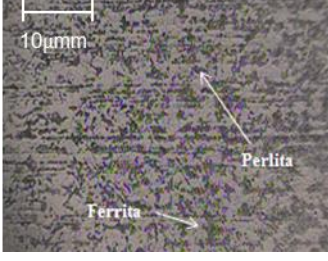

**Tabla 4.2** Evaluación metalográfica para el acero ASTM A-36, soldado con electrodo con revestimiento celulósico (E-6011).

	<b>Imágenes</b>	<b>Descripción</b>	<b>Observación</b>
<b>1</b>		Muestra del cordón de soldadura del acero ASTM A-36, soldada con electrodo Celulósico E-6011, a 100x.	Se observa la perlita y ferrita y poros los cuales puede ser por húmeda de los electrodos.
<b>2</b>		Muestra del cordón de soldadura del acero ASTM A-36, soldada con electrodo Celulósico E-6011, a 200x.	Se observa la perlita y ferrita y un tamaño de grano irregular.
<b>3</b>		Muestra del cordón de soldadura del acero ASTM A-36, soldada con electrodo Celulósico E-6011, a 400x.	Se observa la presencia de ferrita y uno granos de perlita con granos alargados.
<b>4</b>		Muestra del cordón y zona afectada del acero ASTM A-36, soldada con electrodo Celulósico E-6011, a 100x.	Se observa la presencia de perlita y unas fronteras de ferrita.
<b>5</b>		Muestra del metal base del acero ASTM A-36, soldada con electrodo Celulósico E-6011, a 400x.	Se observa poros así como ferrita y unos granos de perlita.

**Tabla 4.3** Evaluación metalográfica para el acero ASTM A-569, soldado con electrodo con revestimiento celulósico (E-6011).

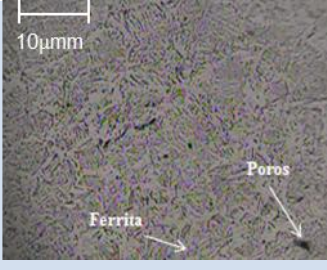
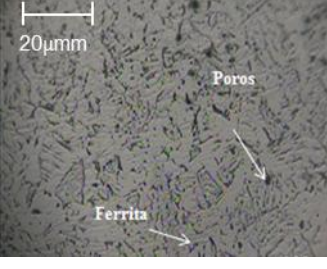
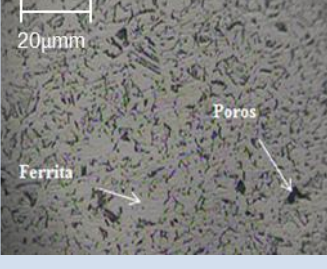
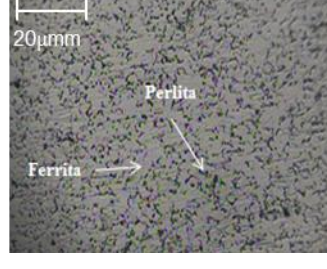

	Imágenes	Descripción	Observación
1		<p>Muestra del cordón de soldadura del acero ASTM A-569, soldada con electrodo Celulósico E-6011, a 100x.</p>	<p>Se puede ver la fase de perlita y ferrita con un tamaño irregular del grano.</p>
2		<p>Muestra del cordón de soldadura del acero ASTM A-569, soldada con electrodo Celulósico E-6011, a 400x.</p>	<p>Se observa la perlita y ferrita y un tamaño de grano irregular así como grietas en la unión.</p>
3		<p>Muestra de la zona afectada del acero ASTM A-569, soldada con electrodo Celulósico E-6011, a 400x.</p>	<p>Se observa la presencia de ferrita y uno granos de perlita con granos alargados.</p>
4		<p>Muestra del metal base del acero ASTM A-569, soldada con electrodo Celulósico E-6011, a 400x.</p>	<p>Se observa una matriz de ferrita con presencia de perlita en forma de granos alargados.</p>
5		<p>Muestra del cordón y la zona afectada del acero ASTM A-569, soldada con electrodo Celulósico E-6011, a 100x.</p>	<p>Se observa poros así como perlita en una matriz de ferrita.</p>

**Tabla 4.4** Evaluación metalográfica para el acero ASTM A-36, soldado con electrodo con revestimiento Rutilico (E-6013).

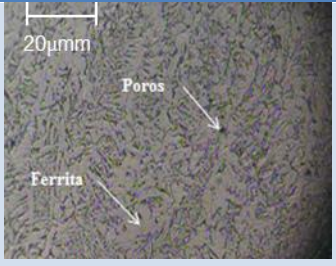
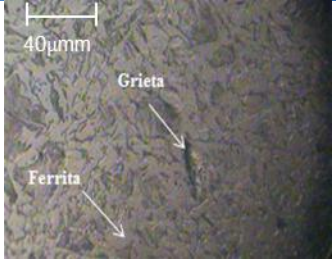
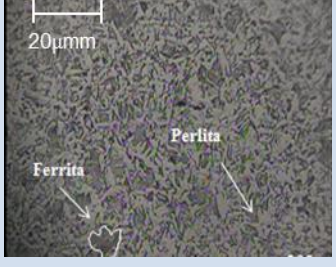
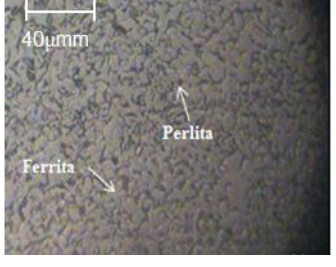

	Imágenes	Descripción	Observación
1		Muestra del cordón de soldadura del acero ASTM A-36, soldada con electrodo Rutilico E-6013, a 100x.	Se puede ver la fase de perlita y ferrita acicular.
2		Muestra del cordón de soldadura del acero ASTM A-36, soldada con electrodo Rutilico E-6013, a 200x.	Se observa la perlita y ferrita Widmanstatten nucleada
3		Muestra del cordón y zona afectada del acero ASTM A-36, soldada con electrodo Rutilico E-6013, a 200x.	Se observa la presencia de perlita y uno granos de ferrita con granos alargados.
4		Muestra del metal base del acero ASTM A-36, soldada con electrodo Rutilico E-6013, a 100x.	Se observa una matriz de ferrita con presencia de perlita en forma de granos alargados.
5		Muestra del metal base del acero ASTM A-36, soldada con electrodo Rutilico E-6013, a 200x.	Se observa poros así como perlita en una matriz de ferrita.



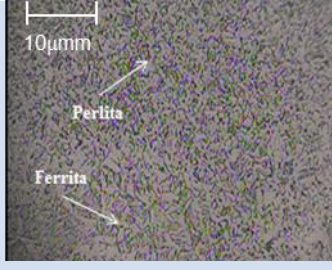
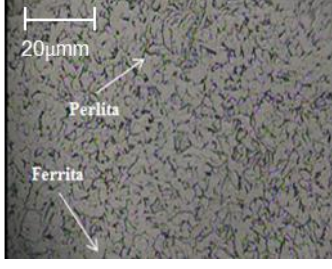
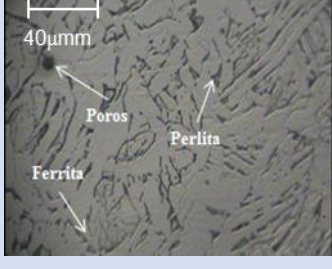
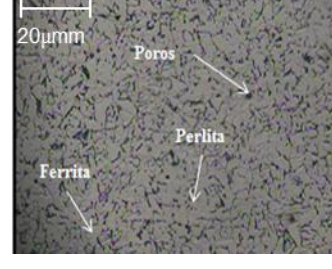
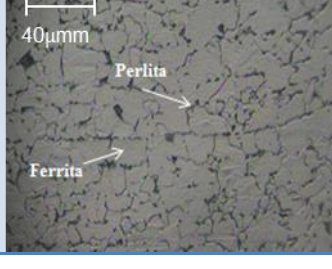
**Tabla 4.5** Evaluación metalográfica para el acero ASTM A-569, soldado con electrodo con revestimiento Rutilico (E-6013).

	Imágenes	Descripción	Observación
1		<p>Muestra del cordón de soldadura del acero ASTM A-569, soldada con electrodo Rutilico E-6013, a 100x.</p>	<p>Se puede ver la ferrita con granos de perlita y algunos poros que son por humedad de los electrodos.</p>
2		<p>Muestra del cordón de soldadura del acero ASTM A-569, soldada con electrodo Rutilico E-6013, a 200x.</p>	<p>Se observa la ferrita, con granos de perlita en forma de láminas y algunos poros.</p>
3		<p>Muestra del cordón y zona afectada del acero ASTM A-569, soldada con electrodo Rutilico E-6013, a 200x.</p>	<p>Se observa la presencia de ferrita y uno granos de perlita con granos alargados y algunos poros.</p>
4		<p>Muestra del metal base del acero ASTM A-569, soldada con electrodo Rutilico E-6013, a 200x.</p>	<p>Se observa una matriz de ferrita con presencia de perlita en forma de granos alargados.</p>
5		<p>Muestra del metal base del acero ASTM A-569, soldada con electrodo Rutilico E-6013, a 400x.</p>	<p>Se observa una matriz ferrítico con presencia de granos de perlita de forma irregular.</p>

**Tabla 4.6** Evaluación metalográfica para el acero ASTM A-36, soldado con electrodo con revestimiento bajo hidrogeno (E-7018).

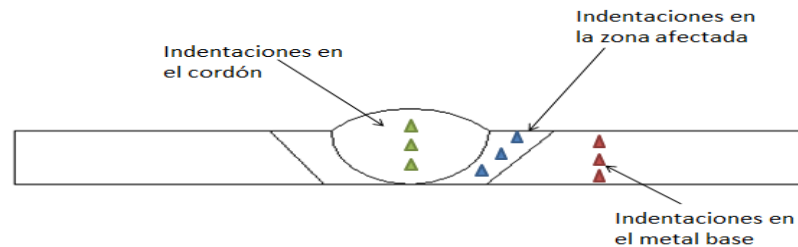
	Imágenes	Descripción	Observación
1		Muestra del cordón de soldadura del acero ASTM A-36, soldada con electrodo Bajo Hidrogeno E-7018, a 200x.	Se puede ver la ferrita con granos de perlita, poros que son por la humedad de los electrodos.
2		Muestra del cordón de soldadura del acero ASTM A-36, soldada con electrodo Bajo Hidrogeno E-7018, a 400x.	Se observa la ferrita, con granos de perlita en forma de láminas y algunas grietas.
3		Muestra de la zona afectada del acero ASTM A-36, soldada con electrodo Bajo Hidrogeno E-7018, a 200x.	Se observa una gran presencia de ferrita y uno granos de perlita con granos y granos no uniformes.
4		Muestra del metal base del acero ASTM A-36, soldada con electrodo Bajo Hidrogeno E-7018, a 400x.	Se observa una matriz de ferrita con presencia de perlita en forma de granos alargados y uniformes.
5		Muestra del cordón y zona afectada del acero ASTM A-36, soldada con electrodo Bajo Hidrogeno E-7018, a 200x.	Se observa granos de ferrita y perlita, como ferrita Widmanstatten.

**Tabla 4.7** Evaluación metalográfica para el acero ASTM A-569, soldado con electrodo con revestimiento bajo hidrogeno (E-7018).

	Imágenes	Descripción	Observación
1		<p>Muestra del cordón de soldadura del acero ASTM A-569, soldada con electrodo Bajo Hidrogeno E-7018, a 100x.</p>	<p>Se puede ver la fase de ferrita y perlita uniforme en el tamaño de grano.</p>
2		<p>Muestra del cordón de soldadura del acero ASTM A-569, soldada con electrodo Bajo Hidrogeno E-7018, a 200x.</p>	<p>Se puede ver la fase de ferrita y perlita uniforme en el tamaño de grano.</p>
3		<p>Muestra del cordón de soldadura del acero ASTM A-569, soldada con electrodo Bajo Hidrogeno E-7018, a 400x.</p>	<p>Se observa la presencia de ferrita y uno granos de perlita con granos y poros.</p>
4		<p>Muestra de la zona afectada ASTM A-569, soldada con electrodo Bajo Hidrogeno E-7018, a 200x.</p>	<p>Se observa una matriz de ferrita con presencia de perlita en forma de granos alargados y poros.</p>
5		<p>Muestra del metal base acero ASTM A-569, soldada con electrodo Bajo Hidrogeno E-7018, a 400x.</p>	<p>Se observa granos de ferrita y perlita, así como granos no uniformes.</p>

## 4.2 Ensayo de microdureza Vickers

Para la preparación de las muestras se llevó a cabo la metalografía con Nital como fue descrito en el aparte 3.311, se llevó a cabo un ensayo de microdureza Vickers de la probeta realizando tres (3) indentaciones tanto en el cordón de soldadura como en la zona afectada y metal base para cada tipo de revestimiento y cada acero utilizado como se muestra en la figura 4.1.



**Figura 4.1** indentaciones realizadas en la probetas

Se obtuvieron los siguientes resultados los cuales fueron tabulados en tablas 4.8 a 4.13 y luego se realizaron las gráficas en cada zona de estudio en las figuras 4.2 y 4.3

**Tabla 4.8** Indentaciones realizadas a las muestras de ASTM A-569, soldadas con electrodos celulósico E-6011.

Muestras A-569 con electrodo celulósico 6011	Indentaciones	Cordón dureza (HV)	Zona afectada dureza (HV)	Metal base dureza (HV)
<b>1</b>	1	201,8	175,5	162,7
	2	202,6	180,0	163,1
	3	209,8	188,7	174,3
	<b>Promedio</b>	<b>204,7</b>	<b>181,4</b>	<b>166,7</b>
<b>2</b>	1	188,0	168,3	158,7
	2	194,4	168,3	161,1
	3	194,4	183,2	166,5
	<b>Promedio</b>	<b>192,3</b>	<b>173,3</b>	<b>162,1</b>
<b>3</b>	1	187,2	167,3	153,1
	2	190,2	167,3	156,5
	3	192,1	183,0	158,7
	<b>Promedio</b>	<b>189,9</b>	<b>172,5</b>	<b>156,1</b>

Fuente: propia



**Tabla 4.9** Indentaciones realizadas a las muestras ASTM A-36 soldadas con electrodos celulósico E-6011.

Muestras A-36 con electrodo celulósico 6011	Indentaciones	Cordón dureza (HV)	Zona afectada dureza (HV)	Metal base dureza (HV)
1	1	179,3	164,8	111,0
	2	179,3	169,4	127,7
	3	182,6	170,3	130,5
	<b>Promedio</b>	<b>180,4</b>	<b>168,2</b>	<b>123,1</b>
2	1	185,3	171,2	154,5
	2	185,3	173,0	159,8
	3	191,8	176,8	163,1
	<b>Promedio</b>	<b>187,5</b>	<b>173,7</b>	<b>159,1</b>
3	1	192,9	177,4	163,7
	2	196,6	180,0	163,7
	3	205,7	190,8	171,2
	<b>Promedio</b>	<b>198,4</b>	<b>182,7</b>	<b>166,2</b>

Fuente: propia

**Tabla 4.10** Indentaciones realizadas a las muestras ASTM A-569 soldadas con electrodos rutilico E-6013.

Muestras A-569 con electrodo rutilico 6013	Indentaciones	Cordón dureza (HV)	Zona afectada dureza (HV)	Metal base dureza (HV)
1	1	192,2	168,3	135,0
	2	193,6	172,4	156,1
	3	195,0	172,4	156,1
	<b>Promedio</b>	<b>193,6</b>	<b>171,0</b>	<b>149,1</b>
2	1	198,0	175,5	158,2
	2	198,0	175,5	161,5
	3	199,6	175,5	161,5
	<b>Promedio</b>	<b>198,5</b>	<b>175,5</b>	<b>160,4</b>
3	1	200,3	175,5	162,5
	2	201,1	176,8	164,8
	3	208,1	178,7	170,6
	<b>Promedio</b>	<b>203,2</b>	<b>177,0</b>	<b>166,0</b>

Fuente: propia

**Tabla 4.11** Indentaciones realizadas a las muestras ASTM A-36 soldadas con electrodos rutilico E-6013.

Muestras A-36 con electrodo rutilico 6013	Indentaciones	Cordón dureza (HV)	Zona afectada dureza (HV)	Metal base dureza (HV)
1	1	183,2	170,0	152,0
	2	207,3	171,2	154,5
	3	213,9	173,7	156,6
	<b>Promedio</b>	<b>201,5</b>	<b>171,6</b>	<b>154,4</b>
2	1	215,6	180,0	158,7
	2	215,6	180,6	159,8
	3	216,4	181,3	160,4
	<b>Promedio</b>	<b>215,9</b>	<b>180,6</b>	<b>159,6</b>
3	1	218,1	181,9	161,5
	2	220,8	182,6	164,8
	3	220,8	183,9	166,5
	<b>Promedio</b>	<b>219,9</b>	<b>182,9</b>	<b>164,3</b>

Fuente: propia

**Tabla 4.12** Indentaciones realizadas a las muestras ASTM A-569 soldadas con electrodos bajo hidrogeno E-7018.

Muestras A-569 con electrodo celulósico 7018	Indentaciones	Cordón dureza (HV)	Zona afectada dureza (HV)	Metal base dureza (HV)
1	1	185,3	170,0	149,5
	2	186,6	170,6	159,3
	3	202,6	177,4	160,4
	<b>Promedio</b>	<b>191,5</b>	<b>172,7</b>	<b>156,4</b>
2	1	205,0	174,3	162,0
	2	217,3	177,4	163,5
	3	222,5	180,6	163,7
	<b>Promedio</b>	<b>214,9</b>	<b>177,4</b>	<b>163,1</b>
3	1	222,5	183,9	165,4
	2	223,1	192,2	165,4
	3	232,0	192,2	167,7
	<b>Promedio</b>	<b>225,9</b>	<b>189,4</b>	<b>166,2</b>

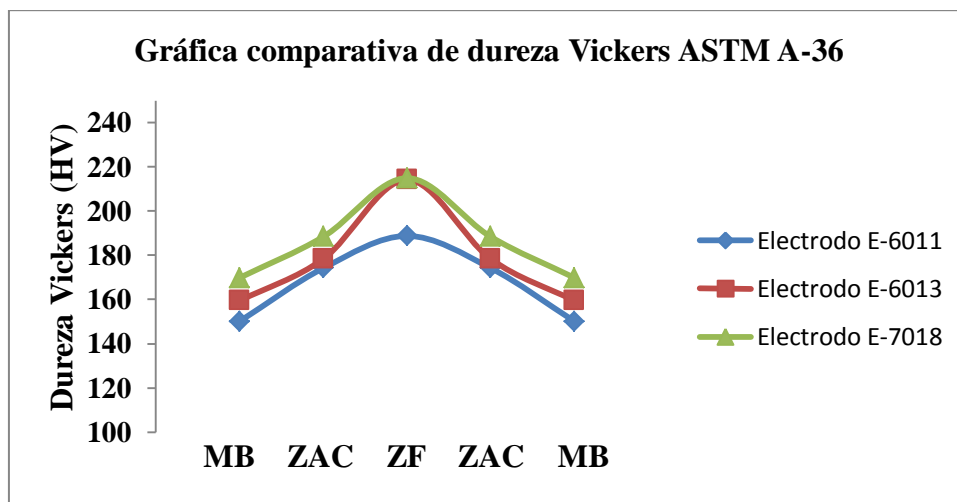
Fuente: propia

**Tabla 4.13** Indentaciones realizadas a las muestras ASTM A-36 soldadas con electrodos bajo hidrogeno E-7018.

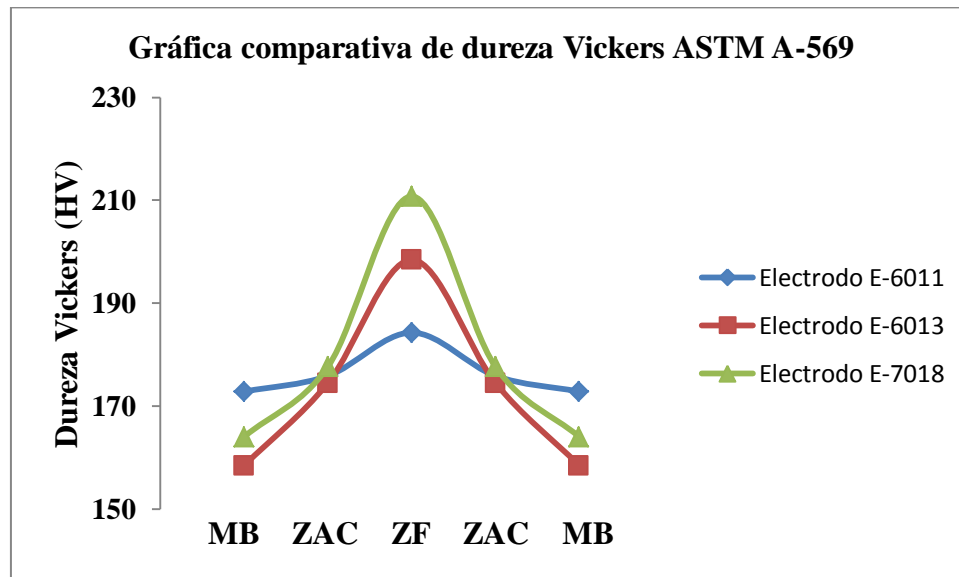
Muestras A-36 con electrodo celulósico 7018	Indentaciones	Cordón dureza (HV)	Zona afectada dureza (HV)	Metal base dureza (HV)
1	1	207,3	178,7	133,7
	2	209,8	183,9	158,2
	3	209,8	186,6	169,4
	<b>Promedio</b>	<b>209,0</b>	<b>183,1</b>	<b>153,8</b>
2	4	213,9	188,7	174,3
	5	213,9	189,4	176,1
	6	217,3	189,4	176,7
	<b>Promedio</b>	<b>215,0</b>	<b>189,2</b>	<b>175,7</b>
3	7	218,1	191,5	176,8
	8	219,9	192,9	178,7
	9	224,3	194,4	184,6
	<b>Promedio</b>	<b>220,8</b>	<b>192,9</b>	<b>180,0</b>

Fuente: propia

Después de obtener estos resultados en el ensayo de microdureza se realizaron las gráficas por zonas de estudio comparando los tres tipos de electrodos utilizados para cada tipo de acero como se muestra en la figura 4.2 y 4.3.



**Figura 4.2** Dureza Vickers para el acero ASTM A-36, en las diferentes zonas de estudio.

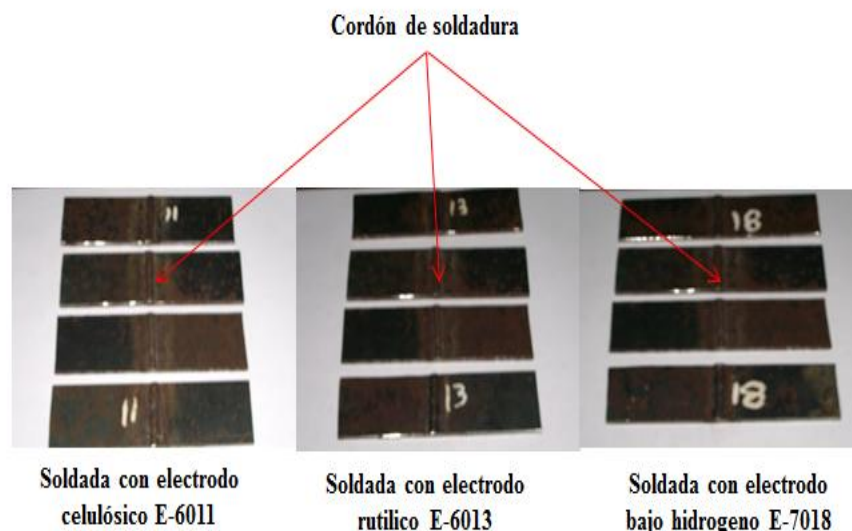


**Figura 4.3** Dureza Vickers para el acero ASTM A-569, en las diferentes zonas de estudio.

### 4.3 Ensayo de doblado

El ensayo de las probetas se realizó según las especificaciones de la norma ASTM E-190, se ensayaron un total de 48 probetas.

En la figura 4.4, se muestran las probetas soldadas con electrodo de revestimiento celulósico, rutilico y bajo hidrogeno listas para ser utilizadas en el ensayo de doblado.



**Figura 4.4** probetas listas para ensayo de doblado soldadas con los diferentes tipos de electrodos.

**Tabla 4.14** Parámetros y observaciones del ensayo de doblado para el ASTM A-569, soldada con electrodos celulósico E-6011

<b>Parámetros de las probetas ASTM A-569 soldadas con electrodos de revestimiento celulósico E-6011 para el ensayo de doblado.</b>				
<b>Probetas</b>	<b>Fuerza máxima aplicada (N)</b>	<b>Velocidad del punzón (mm/min)</b>	<b>Aplicación de la carga</b>	<b>Observaciones</b>
<b>1</b>	3900	5	cara	No fracturó
<b>2</b>	3673	5	raíz	No fracturó
<b>3</b>	3348	5	cara	No fracturó
<b>4</b>	3780	5	raíz	No fracturó
<b>5</b>	3680	5	cara	No fracturó
<b>6</b>	3359	5	raíz	No fracturó
<b>7</b>	3870	5	cara	No fracturó
<b>8</b>	3625	5	raíz	No fracturó
<b>Promedio</b>	<b>3654,38</b>	<b>5</b>	-	-

Fuente: propia

**Tabla 4.15** Parámetros y observaciones del ensayo de doblado para el ASTM A-36, soldada con electrodos celulósico E-6011

<b>Parámetros de las probetas ASTM A-36 soldadas con electrodos de revestimiento celulósico E-6011 para el ensayo de doblado.</b>				
<b>Probetas</b>	<b>Fuerza máxima aplicada (N)</b>	<b>Velocidad del punzón (mm/min)</b>	<b>Aplicación de la carga</b>	<b>Observaciones</b>
<b>1</b>	6896	5	cara	No fracturó
<b>2</b>	7224	5	raíz	No fracturó
<b>3</b>	5279	5	cara	No fracturó
<b>4</b>	5894	5	raíz	No fracturó
<b>5</b>	5963	5	cara	No fracturó
<b>6</b>	6215	5	raíz	No fracturó
<b>7</b>	6500	5	cara	No fracturó
<b>8</b>	7125	5	raíz	No fracturó
Promedio	<b>6387</b>	<b>5</b>	-	-

Fuente: propia

**Tabla 4.16** Parámetros y observaciones del ensayo de doblado para el ASTM A-569, soldada con electrodos rutilico E-6013

<b>Parámetros de las probetas ASTM A-569 soldadas con electrodos de revestimiento rutilico E-6013 para el ensayo de doblado.</b>				
<b>Probetas</b>	<b>Fuerza máxima aplicada (N)</b>	<b>Velocidad del punzón (mm/min)</b>	<b>Aplicación de la carga</b>	<b>Observaciones</b>
<b>1</b>	2660	5	cara	No fracturó
<b>2</b>	3013	5	raíz	No fracturó
<b>3</b>	3784	5	cara	No fracturó
<b>4</b>	2865	5	raíz	No fracturó
<b>5</b>	2945	5	cara	No fracturó
<b>6</b>	3120	5	raíz	No fracturó
<b>7</b>	2760	5	cara	No fracturó
<b>8</b>	3005	5	raíz	No fracturó
Promedio	<b>3019</b>	<b>5</b>	-	-

Fuente: propia

**Tabla 4.17** Parámetros y observaciones del ensayo de doblado para el ASTM A-36, soldada con electrodos rutilico E-6013

<b>Parámetros de las probetas ASTM A-36 soldadas con electrodos de revestimiento rutilico E-6013 para el ensayo de doblado.</b>				
<b>Probetas</b>	<b>Fuerza máxima aplicada (N)</b>	<b>Velocidad del punzón (mm/min)</b>	<b>Aplicación de la carga</b>	<b>Observaciones</b>
<b>1</b>	6896	5	cara	No fracturó
<b>2</b>	7085	5	raíz	No fracturó
<b>3</b>	7010	5	cara	No fracturó
<b>4</b>	6950	5	raíz	No fracturó
<b>5</b>	7050	5	cara	No fracturó
<b>6</b>	6520	5	raíz	No fracturó
<b>7</b>	6320	5	cara	No fracturó
<b>8</b>	6540	5	raíz	No fracturó
Promedio	<b>6796,38</b>	<b>5</b>	-	-

Fuente: propia

**Tabla 4.18** Parámetros y observaciones del ensayo de doblado para el ASTM A-569, soldada con electrodos bajo hidrogeno E-7018

<b>Parámetros de las probetas ASTM A-569 soldadas con electrodos de revestimiento bajo hidrogeno E-7018 para el ensayo de doblado.</b>				
<b>Probetas</b>	<b>Fuerza máxima aplicada (N)</b>	<b>Velocidad del punzón (mm/min)</b>	<b>Aplicación de la carga</b>	<b>Observaciones</b>
<b>1</b>	3871	5	cara	No fracturó
<b>2</b>	4035	5	raíz	No fracturó
<b>3</b>	3972	5	cara	No fracturó
<b>4</b>	4500	5	raíz	No fracturó
<b>5</b>	4350	5	cara	No fracturó
<b>6</b>	4230	5	raíz	No fracturó
<b>7</b>	3981	5	cara	No fracturó
<b>8</b>	3956	5	raíz	No fracturó
Promedio	<b>4111,88</b>	<b>5</b>	-	-

Fuente: propia

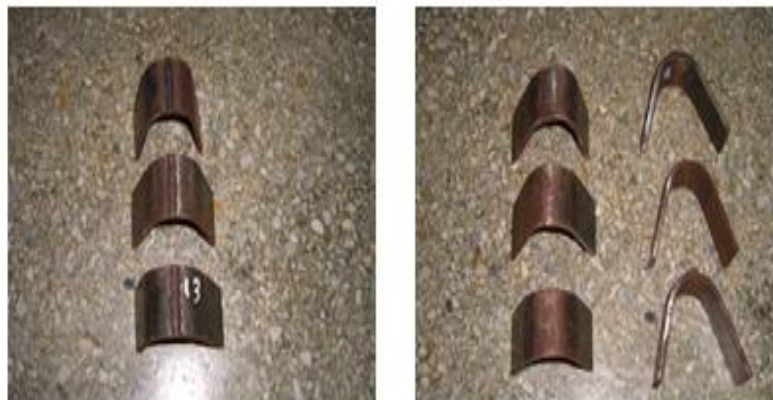
**Tabla 4.19** Parámetros y observaciones del ensayo de doblado para el ASTM A-36, soldada con electrodos bajo hidrogeno E-7018

<b>Parámetros de las probetas ASTM A-36 soldadas con electrodos de revestimiento bajo hidrogeno E-7018 para el ensayo de doblado.</b>				
<b>Probetas</b>	<b>Fuerza máxima aplicada (N)</b>	<b>Velocidad del punzón (mm/min)</b>	<b>Aplicación de la carga</b>	<b>Observaciones</b>
<b>1</b>	7472	5	cara	No fracturó
<b>2</b>	5845	5	raíz	No fracturó
<b>3</b>	5725	5	cara	No fracturó
<b>4</b>	6980	5	raíz	No fracturó
<b>5</b>	7205	5	cara	No fracturó
<b>6</b>	7145	5	raíz	No fracturó
<b>7</b>	6890	5	cara	No fracturó
<b>8</b>	6784	5	raíz	No fracturó
Promedio	<b>6755,75</b>	<b>5</b>	-	-

Fuente: propia

A continuación se muestran en las figuras 4.5 a 4.8, las probetas luego de ser ensayadas.

### Soldada con E-6013

**Figura 4.5** Probetas ensayadas, soldadas con electrodo rutilico E-6013.



### Soldada con E-7018



**Figura 4.6** Probetas ensayadas, soldadas con electrodo bajo hidrogeno E-7018

### Soldada con E-6011



**Figura 4.7** Probetas ensayadas, soldadas con electrodo celulósico E-6011

### Probetas ensayadas



**Figura 4.8** Probetas después del ensayo de doblado.

#### 4.4 Ensayo de tracción

Siguiendo con la evaluación de las propiedades mecánicas del material, se procede a realizar el ensayo de tracción. De la figura 4.13 a la figura 4.25 se observa el comportamiento obtenido de las curvas de Esfuerzo-Deformación de las probetas ensayadas, los parámetros obtenidos durante el ensayo de tracción se muestran en las tablas 4.20 y 4.21.



**Figura 4.9** Probetas soldadas con electrodo rutilico E-6013 para ensayo de tracción



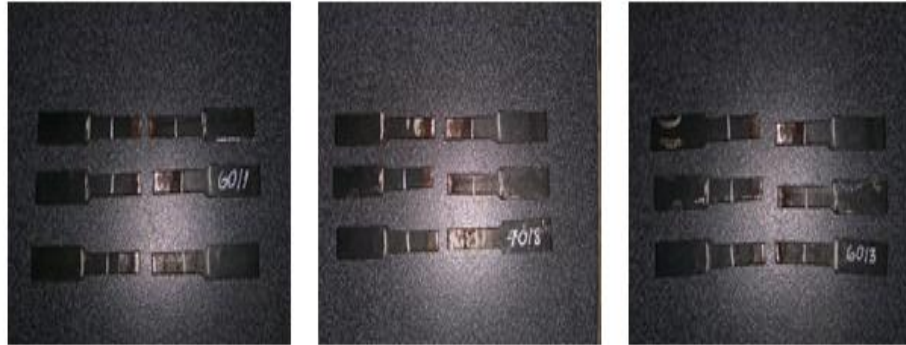
**Figura 4.10** Probetas soldadas con electrodo celulósico E-6011 para ensayo de tracción



**Figura 4.11** Probetas soldadas con electrodo bajo hidrogeno E-7018 para ensayo de tracción

A continuación se muestran las probetas después de ser ensayadas, se puede apreciar que las probetas de ASTM A-36 de la figura 4.12, fracturo en el cordón de soldadura, cuando lo lógico es que fracturen en el metal base, sin embargo se puede decir que esto se debe a que los parámetros utilizados no fueron los más adecuados para lograr una buena penetración, así como la preparación de las juntas con un biselado previo a la soldadura para lograr una buena penetración.

Las probetas de ASTM A-569 si fracturo dentro de la zona calibrada y en el metal base lo que indica que fue buena la soldadura, como se ve en la figura 4.13.

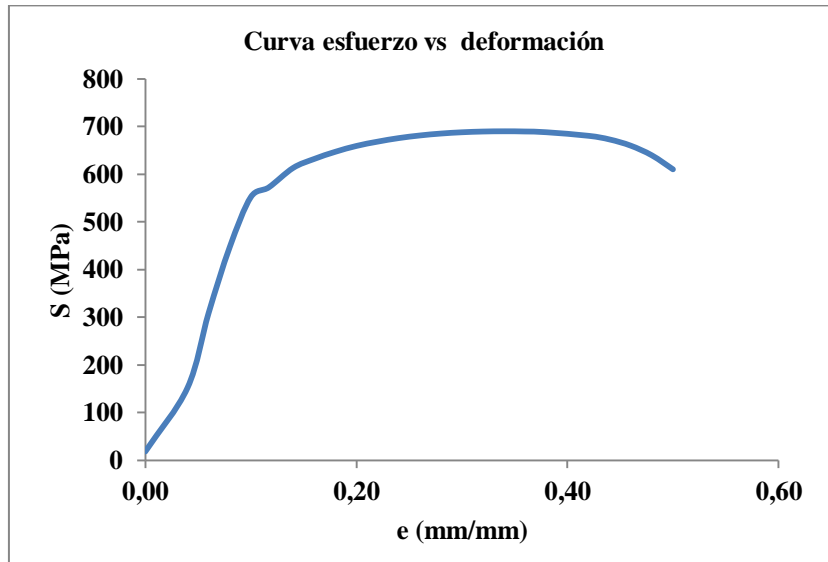


**Figura 4.12** Probetas de ASTM A-36, después del ensayo de tracción

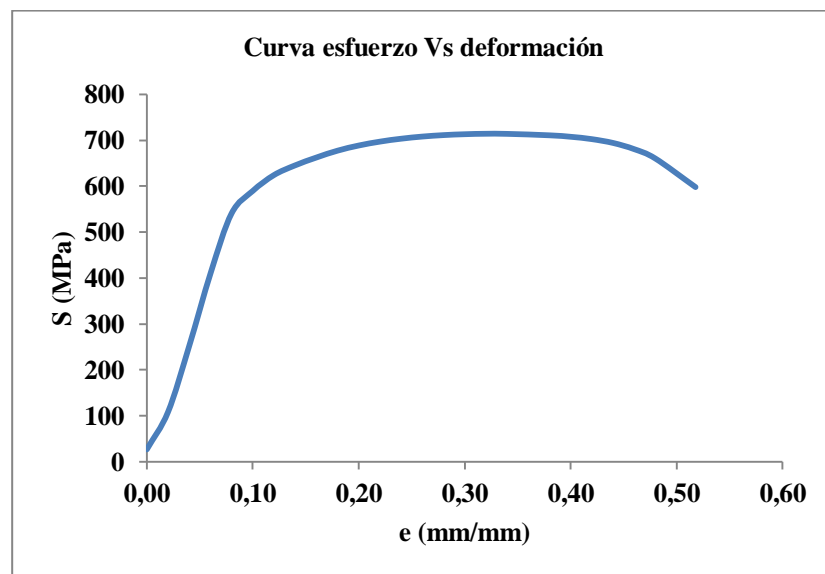


**Figura 4.13** Probetas de ASTM A-569, después del ensayo de tracción

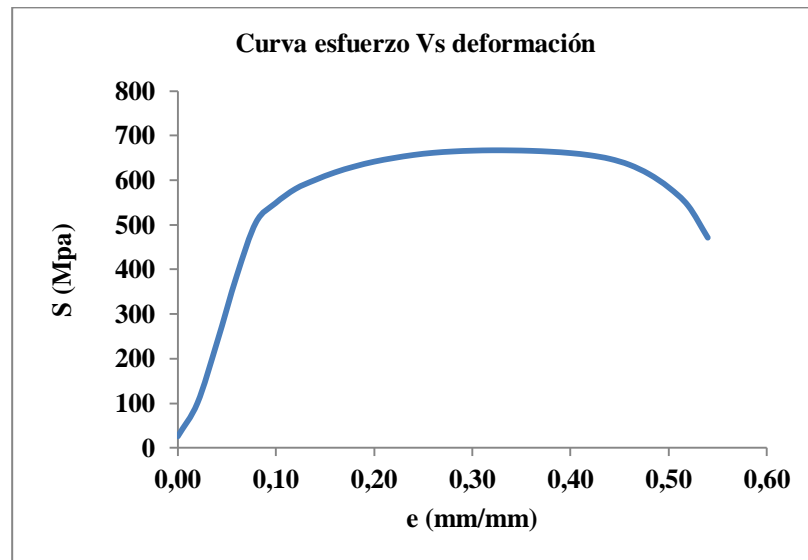
En las figuras 4.14 a 4.26 se muestran las curvas esfuerzo deformación de las diferentes probetas de acero ASTM A-36 y ASTM A-569, soldadas con los electrodos de revestimiento celulósico E-6011, electrodos con revestimiento rutilico E-6013 y electrodos con revestimiento bajo hidrogeno E-7018.



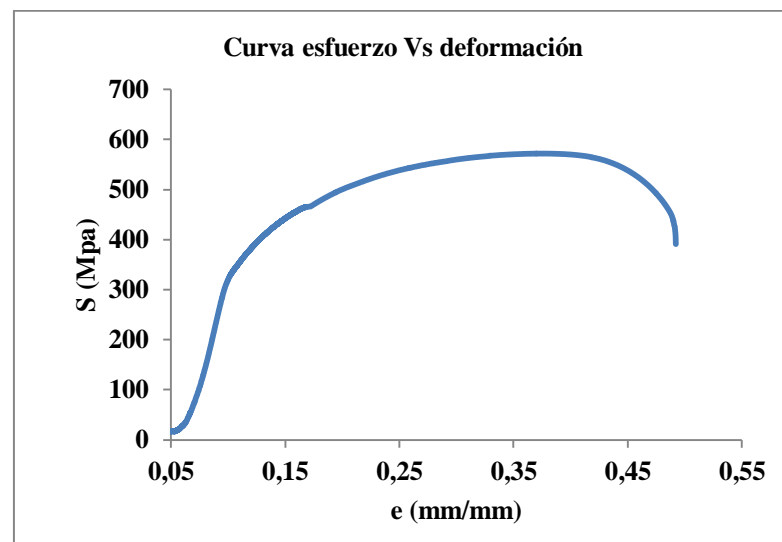
**Figura 4.14** Curva esfuerzo Vs deformación, probeta N° 3 de ASTM A-569 Soldada con electrodo celulósico E-6011.



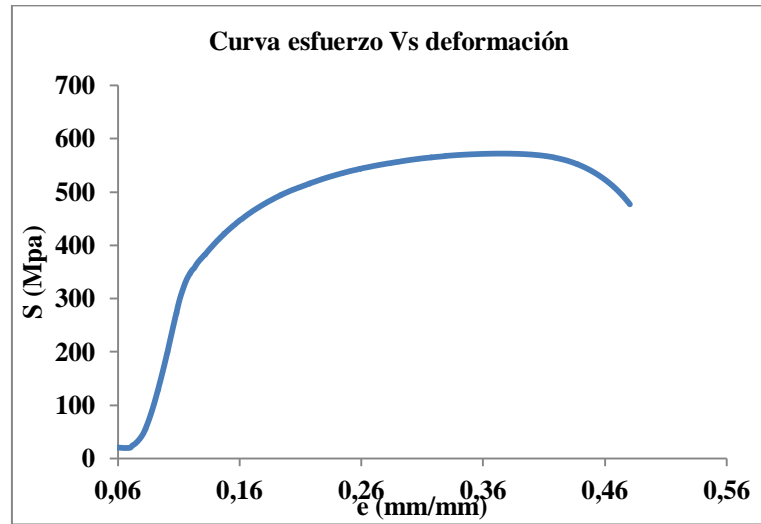
**Figura 4.15** Curva esfuerzo Vs deformación, probeta N° 6 de ASTM A-569 Soldada con electrodo bajo hidrogeno E-7018.



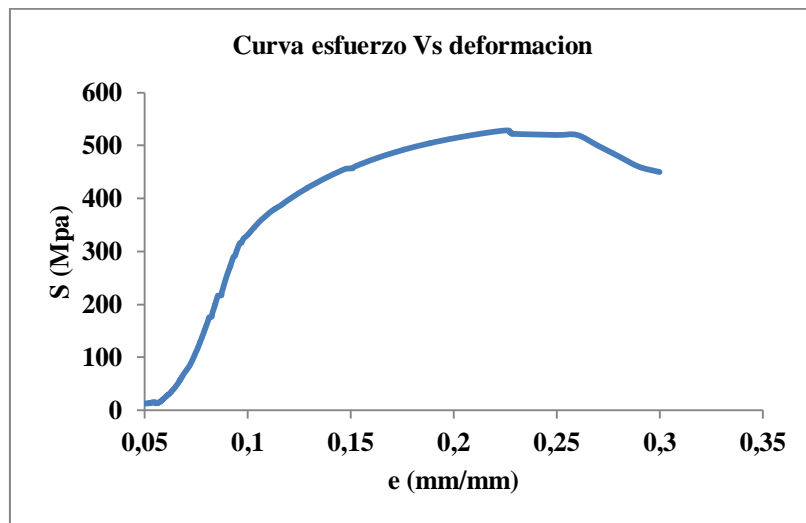
**Figura 4.16** Curva esfuerzo Vs deformación, probeta N° 5 de ASTM A-569 Soldada con electrodo Rutilico E-6013.



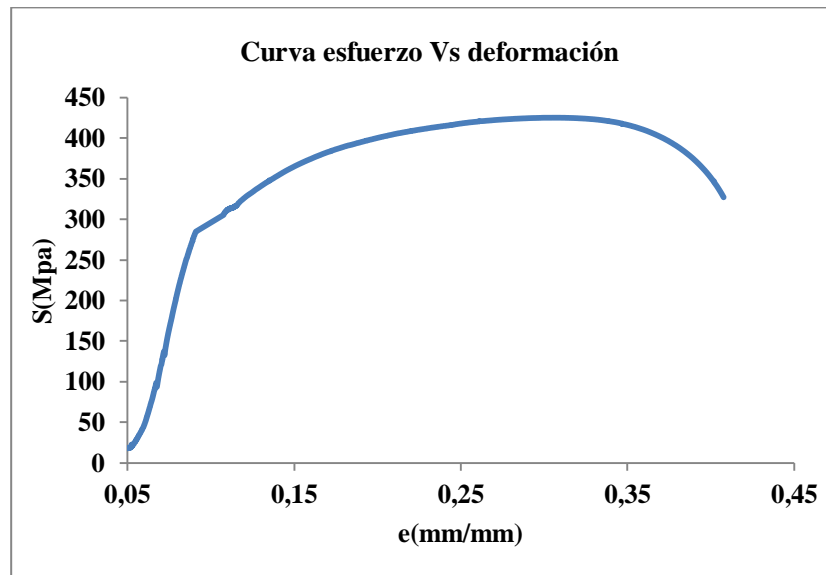
**Figura 4.17** Curva esfuerzo Vs deformación, probeta N° 2 de ASTM A-36 Soldada con electrodo Bajo hidrogeno E-7018.



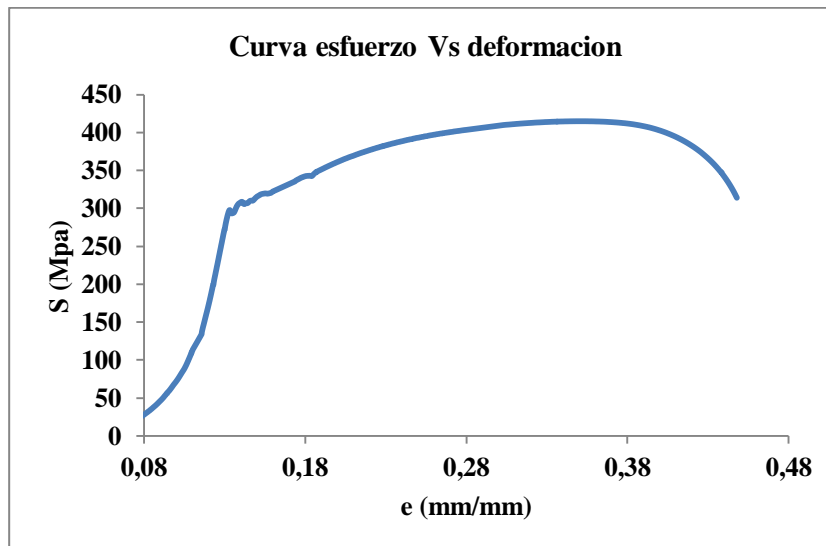
**Figura 4.18** Curva esfuerzo Vs deformación, probeta N° 7 de ASTM A-36 Soldada con electrodo rutilico E-6013.



**Figura 4.19** Curva esfuerzo Vs deformación, probeta N° 4 de ASTM A-36 Soldada con electrodo Celulósico E-6011.

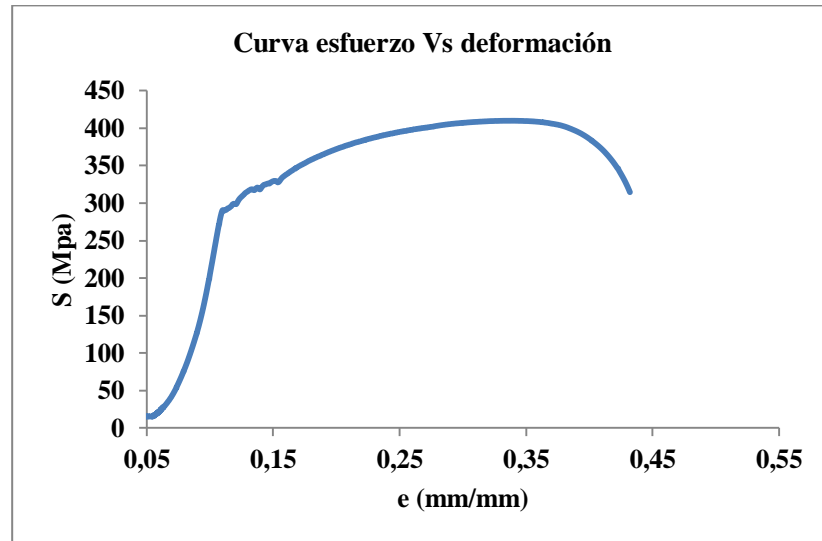


**Figura 4.20** Curva esfuerzo Vs deformación, probeta N° 5 de ASTM A-569 Soldada con electrodo Celulósico E-6011.

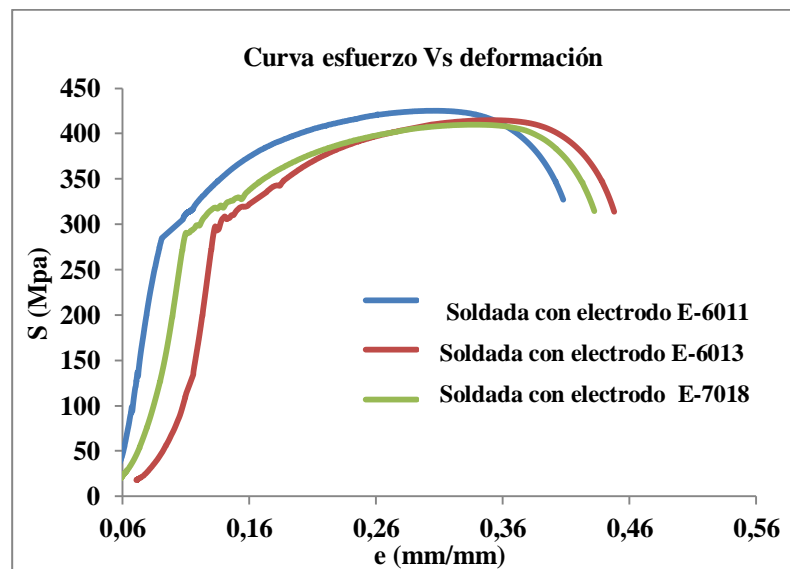


**Figura 4.21** Curva esfuerzo Vs deformación, probeta N° 2 de ASTM A-569 Soldada con electrodo rutilico E-6013.

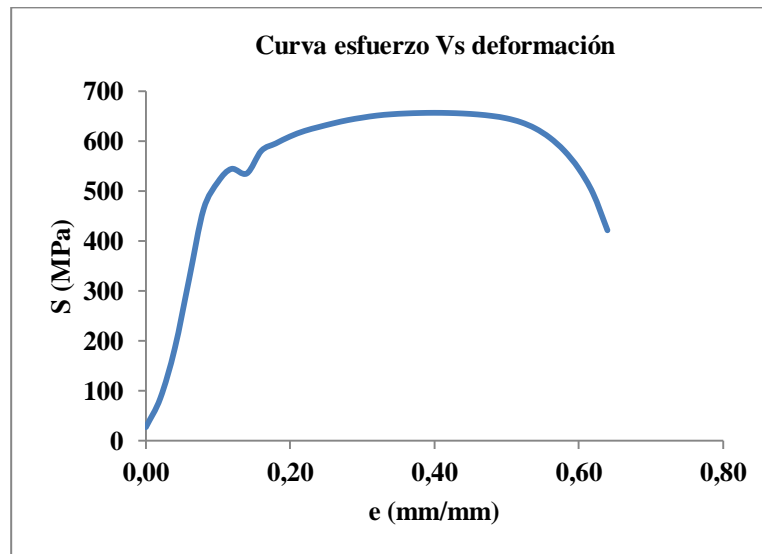




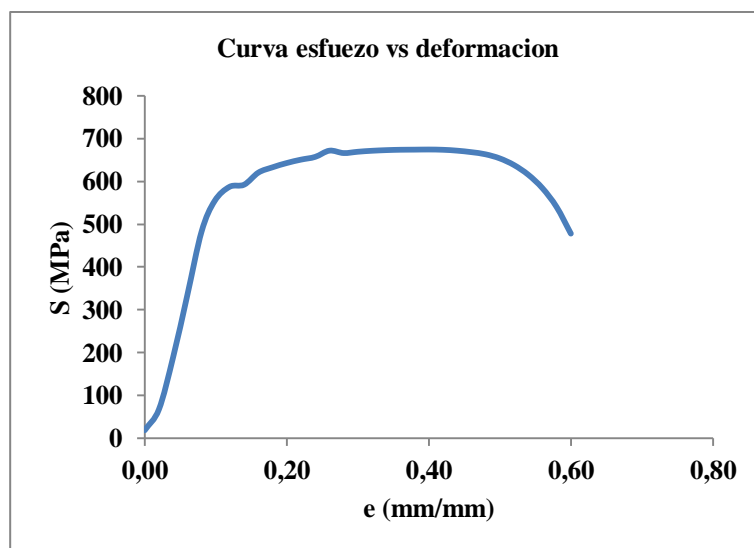
**Figura 4.22** Curva esfuerzo Vs deformación, probeta N° 2 de ASTM A-569 Soldada con electrodo bajo hidrogeno E-7018.



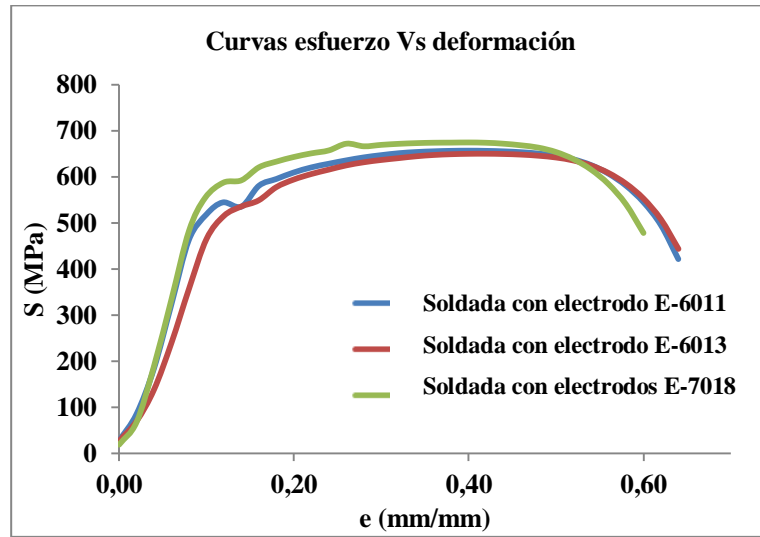
**Figura 4.23** Curva esfuerzo Vs deformación, ASTM A-569 comparación entre los tipos de electrodos utilizados.



**Figura 4.24** Curva esfuerzo Vs deformación, probeta N° 4 de ASTM A-36 Soldada con electrodo bajo hidrogeno E-7018.



**Figura 4.25** Curva esfuerzo Vs deformación, probeta N° 2 de ASTM A-36 Soldada con electrodo celulósico E-6011.



**Figura 4.26** Curva esfuerzo Vs deformación, ASTM A-36 comparación entre los tipos de electrodos utilizados.

En las tablas 4.20 y 4.21 se presentan los parámetros obtenidos en el ensayo de tracción.

**Tabla 4.20** Parámetros obtenidos del ensayo de tracción para el ASTM A-36, soldada con los diferentes tipos de electrodos.

ASTM A-36	Parámetros ensayo de tracción para electrodo celulósico E-6011				Parámetros ensayo de tracción para electrodo Rutílico E-6013			
	Probetas	S <sub>Y</sub> (Mpa)	S <sub>Max</sub> (Mpa)	RA%	ef%	S <sub>Y</sub> (Mpa)	S <sub>Max</sub> (Mpa)	RA%
1	456	564	59,3	43,9	459	526	57,3	47,9
2	550	650	58,7	43,5	456	524	58,0	43,5
3	360	482	49,4	45,8	389	486	49,6	49,8
4	303	540	55,7	43,5	360	475	56,4	46,5
5	560	674	61,5	39,4	468	518	55,3	41,4
6	520	620	56,8	42,5	482	535	60,0	46,5
7	523	623	57,3	45,9	314	568	59,1	46,9
8	543	635	56,0	43,8	467	676	58,7	42,8
<b>Promedio</b>	<b>476,9</b>	<b>598,5</b>	<b>56,5</b>	<b>43,5</b>	<b>424,4</b>	<b>538,5</b>	<b>56,8</b>	<b>45,7</b>

Fuente: propia

**Continuación Tabla 4.20** Parámetros obtenidos del ensayo de tracción para el ASTM A-36, soldada con los diferentes tipos de electrodos.

<b>ASTM A-36</b>	<b>Parámetros ensayo de tracción para electrodo bajo hidrogeno E-7018</b>			
<b>Probetas</b>	$S_Y$ (Mpa)	$S_{Max}$ (Mpa)	RA%	ef%
<b>1</b>	548	580	56,3	42,0
<b>2</b>	328	570	55,0	43,5
<b>3</b>	540	670	48,6	41,3
<b>4</b>	463	656	56,4	39,0
<b>5</b>	578	680	54,3	39,8
<b>6</b>	535	686	62,0	45,1
<b>7</b>	556	679	56,1	48,9
<b>8</b>	586	686	59,7	45,0
<b>Promedio</b>	<b>516,8</b>	<b>650,9</b>	<b>56,1</b>	<b>43,1</b>

Fuente: propia

**Tabla 4.21** Parámetros obtenidos del ensayo de tracción para el ASTM A-569, soldada con los diferentes tipos de electrodos.

<b>ASTM A-569</b>	<b>Parámetros ensayo de tracción para electrodo celulósico E-6011</b>				<b>Parámetros ensayo de tracción para electrodo Rutilico E-6013</b>			
<b>Probetas</b>	$S_Y$ (Mpa)	$S_{Max}$ (Mpa)	RA%	ef%	$S_Y$ (Mpa)	$S_{Max}$ (Mpa)	RA%	ef%
<b>1</b>	500	696,3	64,5	40,0	299	412,0	67,3	37,6
<b>2</b>	290	426,0	58,4	40,0	279	409,0	67,6	37,5
<b>3</b>	552	690,0	60,2	38,6	540	690,2	68,6	43,5
<b>4</b>	480	567,3	63,8	37,9	570	697,9	56,9	39,4
<b>5</b>	280	425,0	62,5	37,6	540	689,8	58,6	42,5
<b>6</b>	560	656,6	68,5	37,5	570	713,0	60,7	45,9
<b>7</b>	550	649,8	56,8	37,8	550	715,0	61,9	43,8
<b>8</b>	580	674,5	58,6	38,0	570	728,5	62,2	42,5
<b>Promedio</b>	<b>474,0</b>	<b>598,2</b>	<b>61,7</b>	<b>38,4</b>	<b>489,8</b>	<b>631,9</b>	<b>63,0</b>	<b>41,6</b>

Fuente: propia

**Continuación Tabla 4.21** Parámetros obtenidos del ensayo de tracción para el ASTM A-569, soldada con los diferentes tipos de electrodos.

<b>ASTM A-569</b>	<b>Parámetros ensayo de tracción para electrodo bajo hidrogeno E-7018</b>			
<b>Probetas</b>	$S_Y$ (Mpa)	$S_{Max}$ (Mpa)	RA%	ef%
<b>1</b>	299	412	57,3	38,0
<b>2</b>	379	409	58	37,8
<b>3</b>	500	715	58,7	37,8
<b>4</b>	480	729	49,4	37,8
<b>5</b>	540	696	55,7	37,9
<b>6</b>	540	713	55	40,0
<b>7</b>	500	714	48,6	38,6
<b>8</b>	580	709	56,4	37,9
<b>Promedio</b>	<b>477,3</b>	<b>637,1</b>	<b>54,9</b>	<b>38,2</b>

Fuente: propia

#### 4.5 Correlación de la dureza con la resistencia a la tracción

De acuerdo a la norma UNE 36.080 las características resistentes de cada acero ensayado para el estado normalizado, se recogen. Las funciones de correlación analíticas investigadas, y los coeficientes de correlación obtenidos, son los siguientes:

$$HB = -20,81 + 0,47 S_Y \text{ (Mpa)} \quad \text{Ec. 4.1}$$

$$HB = -364,27 - 9,09 \text{ RA\%} \quad \text{Ec. 4.2}$$

##### 4.5.1 Coincidencia Vickers - Brinell

El ángulo del penetrador Vickers, se adoptó de tal manera que los números Vickers coincidan con los Brinell. Para relacionar el método Vickers con el Brinell es

necesario considerar, la condición de semejanza y los límites a partir de los cuales la bolilla no experimenta deformaciones y se obtienen impresiones nítidas.

De esta manera resulta una impronta en el que las tangentes a la bola forman un ángulo de  $136^\circ$ , que resulta el ángulo adoptado para la construcción del penetrador piramidal. Sin embargo la coincidencia entre los valores de dureza que arrojan ambos métodos sólo se cumple hasta aproximadamente 350 unidades, teniendo en cuenta que se genera un error que es despreciable para valores por debajo de las 350 unidades, como se puede observar en la tabla 9 que se encuentra en los anexos. Esto se debe a que para valores mayores la deformación que sufre la bolilla utilizada en el ensayo Brinell modifica en parte el valor de dureza obtenido. De aquí se desprende que el ensayo Vickers es más exacto, debido a la menor deformación del penetrador, para durezas que sobrepasan los 500 Brinell.

A continuación se muestra los resultados obtenidos de la correlación de dureza con las propiedades mecánicas y los valores del ensayo de tracción, la tabla 4.22 y 4.23.

**Tabla 4.22** Correlación de dureza con las propiedades mecánicas soldadas con los diferentes tipos de revestimiento para el ASTM A-569

Tipo de electrodo	S <sub>Y</sub> (Mpa) ensayo de tracción promedio	RA% ensayo de tracción promedio	Dureza Vickers promedio	Dureza Brinell	S <sub>Y</sub> (Mpa) obtenida de Ec. 4.1	RA% obtenida de Ec.4.2
<b>E-6011</b>	474	63,0	176,3	176,3	419,4	59,5
<b>E-6013</b>	489,8	61,7	172,9	172,9	412,1	59,1
<b>E-7018</b>	477,3	54.9	178,8	178,8	424,7	59,7

Fuente: propia

**Tabla 4.23** Correlación de dureza con las propiedades mecánicas soldadas con los diferentes tipos de revestimiento para el ASTM A-36

Tipo de electrodo	S <sub>Y</sub> (Mpa) ensayo de tracción promedio	RA% ensayo de tracción promedio	Dureza Vickers promedio	Dureza Brinell	S <sub>Y</sub> (Mpa) obtenida de Ec. 4.1	RA% obtenida de Ec.4.2
<b>E-6011</b>	476,9	56,8	167,5	167,5	400,7	58,5
<b>E-6013</b>	424,4	56,5	177,9	177,9	422,8	59,6
<b>E-7018</b>	516,8	56,1	186,3	186,3	440,7	60,6

Fuente: propia

## 4.6 Análisis de resultados

### 4.6.1 Microscopia óptica

**Electrodo de revestimiento celulósico E-6011:** En las tabla 4.1 y 4.2 para el acero ASTM A-36 y ASTM A-569 respectivamente, se puede observar, en el cordón de soldadura una formación uniforme de grano con presencia de perlita y ferrita en la zona afectada por calor (ZAC), se observa un crecimiento mayor de grano que se va afinando en la zona de fundida, debido a la composición química del material de aporte, con los elementos aleantes. En imagen 5 de dichas tablas se observa algunos poros debido a partículas de oxígeno atrapadas, causado por húmeda del electrodo.

**Electrodo de revestimiento rutilico E-6013:** En las tablas 4.3 y 4.4 para el acero ASTM A-36 y ASTM A-569 respectivamente, se observa fase de perlita y

ferrita con una formación de grano uniforme en la zona fundida (ZF) y un grano más grueso en la zona afectada de calor (ZAC), en el cordón de soldadura se puede observar una estructura mixta, formada en el borde de grano conocida como ferrita Widmanstätten, esta estructura que se observa en la zona fundida, y se genera por las bajas concentraciones de carbono y por la composición química del acero y por la velocidad de enfriamiento.

**Electrodo de revestimiento bajo hidrogeno E-7018:** En las tablas 4.5 y 4.6 para el acero ASTM A-36 y ASTM A-569 respectivamente, se observa la fase de perlita y ferrita al igual que la ferrita Widmanstätten, también puede influir en ciertas propiedades mecánicas y dureza debido a elementos aleantes como el manganeso (Mn) y el níquel (Ni), la aparición de esta estructura se ve en el borde de grano con láminas en diferentes direcciones y se asocia a la descomposición de Austenita causado por la velocidad de enfriamiento.

#### 4.6.2 Ensayo de dureza Vickers

**Electrodo de revestimiento celulósico E-6011:** Se puede observar que todas las probetas ensayadas tanto para el ASTM A-36 como para el ASTM A-569, se ve que la mayor dureza se produce en la zona fundida (ZF) y va decreciendo hacia el metal base (MB), como se muestra en las tablas 4.8 y 4.7 respectivamente.

**Electrodos de revestimiento rutilico E-6013:** los valores observados en las tablas 4.9 y 4.10, tanto para el ASTM A-569 como para el ASTM A-36 respectivamente, se ve que dichos valores al igual que el caso anterior se tiene la mayor dureza en la zona fundida (ZF) y va disminuyendo hasta llegar al metal base (MB), estos valores son afectados por la composición química del material de aporte como del material base, esto se debe a que en el cordón de soldadura al haber aporte de material se está agregando elementos aleantes, generando así un aumento de



dureza debido al manganeso y silicio que aporta los diferentes tipos de electrodos en diferentes proporciones.

**Electrodos de revestimiento bajo hidrogeno E-7018:** Se observa en la tabla 4.11 y 4.12 que la dureza es mayor en la zona fundida (ZF), como en los casos anteriores, y va disminuyendo en la zona afectada por calor (ZAC) y el metal base (MB), esto también se relaciona directamente en la estructura de grano fino que se formó en la zona fundida (ZF), producto de la velocidad de enfriamiento, lo que permitió una formación de estructuras dendríticas las cuales poseen mayor grado de dureza que el resto de las zonas estudiadas.

Comparando la dureza entre los tipos de revestimiento en las figuras 4.2 y 4.3 del ASTM A-36 y ASTM A-569 respectivamente, se observa en ambas graficas que la dureza para la soldadura con electrodos de revestimiento bajo hidrogeno, posee la mayor dureza debido a los elementos aleantes del material de aporte, como es el manganeso (Mn), que está alrededor del 1 a 1,4 %, este elemento es utilizado para eliminar el azufre del hierro y al mismo tiempo ayuda a la fluidez mejorando la resistencia, el silicio (Si), es un endurecedor es por esa razón que la dureza es mayor que para los otros electrodos que aunque poseen los mismos elemento son presentes en pequeñas proporciones.

#### 4.6.3 Ensayo de doblado

**Electrodos de revestimiento celulósico E-6011:** En la tabla 4.14 y 4.15 para los acero ASTM A-569 y ASTM A-36 respectivamente, podemos observar que la carga máximas en promedio fueron 3654,38 (N) y 6387 (N) tanto para el A-569 y A-36, al observar la figura 4.11 podemos ver que las probetas tomaron la forma del punzón y no se observó ni grietas ni fisuras, con relación a la ductilidad se puede decir que las probetas se deformaron en su totalidad, llegando a zona plástica si llegar

a fracturar, lo que da un indicio de poseer buena ductilidad, por la cantidad de manganeso suministrado por el material de aporte lo que ayuda a obtener una mejor fluidez.

**Electrodos de revestimiento rutilico E-6013:** En las tablas 4.16 y 4.17 para los ASTM A-569 y ASTM A-36 respectivamente, se obtuvieron las cargas máximas fueron 3019 (N) y 6796,38 (N), al igual que el caso anterior no se observó fisuras ni grietas como se ve en la figura 4.9, esto puede demostrar la buena soldabilidad para el proceso y los parámetros utilizados en la tabla 3.6.

**Electrodos de revestimiento bajo hidrogeno E-7018:** En las tablas 4.18 y 4.19 para los aceros ASTM A-569 y ASTM A-36 las fuerzas máximas en promedio fue de 411,88 (N) y 6755,75 (N), respectivamente, en la figura 4.10, se puede observar que en el cordón no hubo grietas, fisuras, ni fracturas, y se pudo observar algunas deformaciones en la zona soldada demostrando la buena soldabilidad y el hecho de no haber fractura en es debido a que se obtuvo una buena penetración.

#### 4.6.4 Ensayo de tracción:

**Electrodos de revestimiento celulósico E-6011:** Para las probetas soldadas de ASTM A-36 se obtuvo una fractura en el cordón de soldadura, lo que puede dar un indicio que no hubo una buena penetración como se deseaba, sin embargo para el ASTM A-569 la fractura se obtuvo en la longitud calibrada en la zona afectada por calor (ZAC), con valores de  $S_Y$  y  $S_{Max}$ , promedio de 476,9 Mpa y 598,5 Mpa con una reducción de área y una deformación ingenieril de 61,7 % y 38,4 % respectivamente, es debido a la composición química del acero y el material de aporte.

**Electrodos de revestimiento rutilico E-6013:** se observó al igual que el caso anterior que las probetas de ASTM A-36, fallaron por el cordón de soldadura, con

relación a la dureza en estas probetas, se puede decir que se obtuvieron valores normales, sin embargo el que fallara está asociado a la poca penetración obtenida, mientras que para el ASTM A-569 fallaron por la zona afectada por calor (ZAC) y dentro de la longitud calibrada, se obtuvieron valores de  $S_Y$  y  $S_{Max}$ , promedio de 424,4 Mpa y 538,5 Mpa con una reducción de área y una deformación ingenieril de 63,0 % y 41,6 % respectivamente, lo que representa que con este electrodo se logró un material más dúctil o con mayor capacidad de fluir.

**Electrodos de revestimiento bajo hidrogeno E-7018:** con estas probetas se observó lo mismo que en los casos anteriores sin embargo se obtuvieron mayores valores de  $S_Y$  y  $S_{Max}$ , promedio de 477,3 Mpa y 637,1 Mpa con una reducción de área y una deformación ingenieril de 54,9 % y 38,2 % respectivamente, cabe destacar que en este caso tanto la reducción de área como la deformación ingenieril fueron menores lo que nos indica que tiende a ser más frágil que con los anteriores electrodos y se puede comprobar con las gráficas de las figuras 4.22 y 4.25 tanto para el A-569 como para el A-36.

Con respecto a las probetas que tuvieron una fractura frágil, en la zona fundida (ZF), una de las causas está relacionada a que la intensidad de corriente, no fue la más adecuada, y no se realizó un biselado, porque se realizó un cordón de refuerzo que no fue suficiente para lograr buenas características mecánicas

#### **4.6.5 Correlación de la dureza con las propiedades mecánicas**

Se puede observar que al aplicar las ecuaciones 4.1 y 4.2 para determinar la correlación de la dureza y obtener los valores promedio de  $S_Y$  y RA, mediante el ensayo de dureza, podemos observar en las tablas 4.22 y 4.23, para el A-569 y A-36 respectivamente que los valores obtenidos son muy similares, lo que nos permite decir que mediante esta correlación podemos obtener valores de propiedades mecánicas sin la necesidad de realizar ensayos destructivos.





# CAPÍTULO 5

## Conclusiones y recomendaciones

---

---

### 5.1 Conclusiones

- Los valores promedio de  $S_Y$  y RA, mediante la correlación, fueron valores muy cercanos a los obtenidos por ensayos de tracción, con un error que esta alrededor del 10%.
- La correlación se realizó utilizan ecuación que asocian dureza Brinell, y a pesar que la comparación entre la dureza Vickers y dureza Brinell, existe un error para los valores obtenidos este error es despreciable.
- Las propiedades mecánicas, para los diferentes casos de estudio, se vieron afectadas directamente por la composición química de los materiales de aporte, logrando mejorar las propiedades en la mayoría de los casos.

- En el electrodo de revestimiento de bajo hidrogeno (E-7018), la dureza obtenida fue mayor que para los electrodos E-6011 y E-6013, debido a los porcentajes de Manganeseo (Mn) y Silicio (Si), que fueron suministrados por el material de aporte.
- Las probetas que fallaron en la zona fundida, fue consecuencia de la poca penetración obtenida con los parámetros de corriente seleccionados.

## 5.2 Recomendaciones

- Se puede realizar un estudio de microscopia de barrido, para logra un mejor estudio de microestructuras presentes como la ferrita Widmanstatten y ferrita acicular.
- Se recomienda realizar el estudio variando los parámetros de soldadura como voltaje, amperaje, y realizando un biselada a las juntas, para lograr óptimos resultados en cuanto a propiedades mecánicas y metalurgia que garanticen que las muestras rompan fuera de la zona fundida.
- Se recomienda realizar el estudio comparándolo con otro método de soldadura que puede ser MIG, Oxiacetilénica, etc.





# *Referencias bibliográficas*

---

1. Aparicio Gennifer, D Armas Heber. (2006). *Influencia del tratamiento térmico y del trabajo en frío en el comportamiento mecánico de láminas de acero ASTM A-569*. Revista de ingeniería UC, abril, año/vol. 13, número 001. Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela, pp. 43 - 52.
2. Zuno J, Saavedra M. (2001). *Tratamiento termomecánico y soldabilidad de un acero al carbono microaliado con Ti para aplicaciones estructurales*. Jornadas SAM – CONAMET AAS 2001, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México, pp. 33 - 40.
3. Bloem Carlos, Salvador María. (2000). *Estudio microestructural y de resistencia de uniones soldadas de la aleación AW7020 por procedimiento MIG en función de la preparación de bordes*. Revista de metalurgia Madrid 36, pp. 33 – 39.
4. Franco Fernando, Sánchez Hugo, (2006). *Soldadura por fricción agitación de aleaciones ligeras una alternativa a nuestro alcance*. Suplemento de la revista latinoamericana de metalurgia y materiales 2009, pp. 1369 – 1375.
5. Lincoln Electric, Co. *Lecciones de soldadura por arco*, Armco Int, Co, Middletown, Ohio, pp. 174.
6. Seférian Daniel, *Metalurgia de la soldadura*, editorial Tecnos S. A Madrid 1962.
7. Lincoln Electric, Co. *Catálogo de electrodos*, Armco Int, Co, Middletown, Ohio, pp. 94.
8. Sídney H. Avner, *introducción a la metalurgia física*, editorial McGraw Hill 1988, segunda edición, pp. 687.



# **ANEXOS**

**Anexo A1:** Formatos de composiciones químicas de los electrodos celulósicos E-6011, electrodos rutilícos E-6013 y Electrodo bajo hidrogeno E-7018, según el fabricante Lincoln Electric, tabla y norma ASTM E-190.