



UNIVERSIDAD DE CARABOBO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



Influencia de la proporción de la mezcla de gases de protección sobre la microestructura y las propiedades mecánicas en juntas soldadas de acero inoxidable austenítico AISI 304 mediante soldadura GMAW.

López Franklin.  
Pinto Amilcar

Naguanagua, 09 de octubre de 2009



UNIVERSIDAD DE CARABOBO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



# Influencia de la proporción de la mezcla de gases de protección sobre la microestructura y las propiedades mecánicas en juntas soldadas de acero inoxidable austenítico AISI 304 mediante soldadura GMAW.

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

**Tutor académico:**  
Carmelo Torres. *Ing.*

**Autores:**  
López Franklin.  
Pinto Amilcar

Naguanagua, 09 de Octubre de 2009



UNIVERSIDAD DE CARABOBO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



# Influencia de la proporción de la mezcla de gases de protección sobre la microestructura y las propiedades mecánicas en juntas soldadas de acero inoxidable austenítico AISI 304 mediante soldadura GMAW.

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

López Franklin.  
Pinto Amilcar

Naguanagua, 09 de Octubre de 2009



UNIVERSIDAD DE CARABOBO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



## CERTIFICADO DE APROBACIÓN

Quienes suscriben, Miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Mecánica para examinar la Tesis de Pregrado titulada ***“Influencia de la proporción de la mezcla de gases de protección sobre la microestructura y las propiedades mecánicas en juntas soldadas de acero inoxidable austenítico AISI 304 mediante soldadura GMAW”***, presentada por los bachilleres: **Lopez Franklin** y **Amilcar Pinto**, portadores de la Cédula de Identidad N°: **17.517.453** y **17.398.466**, respectivamente; hacemos constar que hemos revisado y aprobado el mencionado trabajo.

---

Prof. Carmelo Torres, *Ing.*  
*Presidente del jurado*

---

Prof. Juan C. Pereira, *Ing.*  
*Miembro del jurado*

---

Prof. Angel Porrello, *Ing.*  
*Miembro del jurado*

En Naguanagua a los \_\_\_\_ días del mes de \_\_\_\_ de 2009

# Agradecimientos

---

---

*Son muchas las personas a las cuales agradezco, pero primeramente le agradezco a dios por darme la oportunidad de vivir, por darme la dicha de tener los mejor padres que un hijo pueda pedir, por tener una familia muy unida y que siempre logra vencer las adversidades, por estar siempre conmigo y no abandonarme en los momentos más difíciles de mi vida.*

*A mi padre que si no es el mejor es uno de los mejores padres del mundo, las palabras no bastan para describir lo que es mi padre para mí, esta más allá de lo imaginable, un padre que siempre estuvo cuando lo necesite, un padre que me inundo de su sabiduría y inteligencia, es un verdadero padre, gracias dios no tengo como pagarte por él.*

*A mi madre que ha sido la mejor madre que uno pueda pedir, siempre al pendiente de mi, de que no me faltara nada, de que si estaba enfermo se desvelaba cuidándome, que se levanta todas las mañana a cocinarme, que daba la vida por mí, gracias madre por todo lo que has hecho de mi.*

*A mi compañero de tesis, porque ha sido un buen amigo en toda la carrera con el cual pude confiar y contar ya que sabe valorar lo que es la amistad, estuvo en los momentos difíciles que se me presentaron, gracias dios por colocarlo en mi camino, no sé que hubiese sido de mi sin él.*

*A las empresas Oxicar, Ininca y la cooperativa de producción de moldes, por la ayuda prestada en la realización de la tesis, ya que fueron un parte muy fundamental en la misma.*

# *Dedicatoria*

---

*A mis abuelos, Pedro Luis López y Ana Susana Álvarez que no  
pudieron estar presentes en vida, pero que desde el cielo me están  
escuchando y viendo.*

*A mis padres por estar siempre conmigo y confiar en mí.*

# Agradecimientos

---

---

*Desde muy pequeño los eventos y circunstancias en mi vida han sido un milagro, mi nacimiento, mi niñez y aún mi adolescencia son producto de la intervención divina en mi vida, por ello más que "Gracias", quiero decirle a mi Dios, las siguientes palabras:*

*¿Quién soy yo para que te acuerdes de mí? Siempre has estado allí y la mayoría de las veces yo te fallé cometiendo pecado, siempre me has alimentado y yo no he sabido valorar eso, en mis soledades tu haz estado allí y yo aún no lo entiendo, en mis problemas me has ayudado y yo no he podido darte algo a cambio, y la gran pregunta es ¿Por qué me amas tanto?, te doy gracias con lágrimas en mis ojos mi Dios porque sin yo amarte tú me has amado y has dado a Jesucristo para que pague el precio de mis pecados, nunca podré entender tu amor por mí, mas de mis labios siempre obtendrás esta palabra, Gracias.*

*En esta historia de mi vida hay una persona que ha estado allí esperando siempre algo de amor, es mi deseo que las siguientes palabras puedan expresarte ese amor y gratitud mamá:*

*No te importó, gastar tu tiempo y tu vida en mí, no te importó dejar de comer para alimentarme a mí, cuando los doctores dijeron que debían cortarme el brazo tu no les creíste, tuviste Fe y fui sanado, cuando te dijeron que tenía leucemia tampoco lo creíste y seguiste adelante teniendo Fe, eres una mujer increíble, desgastaste todo tu cuerpo para que yo creciera, soportaste humillaciones hasta botar lagrimas solo para que pudiéramos comer, mamá si el mundo supiera lo que tú has hecho por mí las cosas serían distintas, pero hoy con esta tesis el mundo sabe y los ángeles tocan trompeta porque has vencido, como siempre mamá lo has logrado, te felicito mamá, me pude graduar, lo lograste, hoy mis gracias las he dado siendo un reflejo de tu amor por mí, tratando de dejarte en alto, y que la gente pueda decir de ti, ERES UNA GRAN MUJER.*

*Ahora Quiero agradecer a personas que Dios ha puesto en mi vida y que forman parte vital de mi historia, entre las cuales hay una persona muy especial a la cual quiero agradecer con estas palabras y es a Leydi García*

*No sé como agradecerle, es tanto lo que usted ha hecho por mi mamá y por mí que en estas páginas me quedaría corto, usted se ha convertido en nuestra familia, mi hermano mayor es Marvin y mi hermano menor es Kevin , no hay palabra que me quepa en el corazón para expresar mi gratitud, pero quiero decirle algo, su vida en esta tierra nos hace felices a los que estamos con usted, mire a su alrededor, tiene a dos excelentes hijos y en su casa tiene a un maravilloso esposo usted es sin duda un ejemplo para mí porque con constancia y Fe no se deja vencer siempre sigue allí hasta el final, y mire lo que ha hecho usted en mi, sin darse cuenta ha contribuido en que yo pueda ser llamado ingeniero mecánico, y créame Dios ha visto su corazón y cuando esté en el ocaso de su vida y nos vea a nosotros tres a marvin a kevin y a mí ese día escuchará una voz del cielo que le dirá: Lo has hecho muy bien leydi, míralos lo lograste. Gracias de nuevo y por siempre.*

*Dios me dio un excelente compañero de tesis para trabajar, es increíble lo responsable que es, aún más que yo, diligente, eficiente y trabajador, la calidad humana que posee deja ver el gran trabajo que la Sra. Irangelis Buenopane y el Sr. Franklin López han hecho, franklin es un reflejo de su familia y quiero agradecerle en esta tesis por su compromiso y por lo ameno y alegre que fue hacer la tesis junto a él.*

*La colaboración de empresas en la realización de esta tesis ha sido de gran ayuda, agradecemos a **OXICAR C.A.** por su apoyo así como también **ININCA C.A.** y a la **Cooperativa de Producción de Moldes S.R.L.***

# *Dedicatoria*

---

*A Dios y a mi madre por ayudarme a ser lo que soy.*

*A mi Futura esposa e hijos, cuando lean esto quiero que sepan que desde muy joven he estado pensado en ustedes y que me he esforzado por preparar el camino para nuestra felicidad aquí en la tierra, los estoy esperando, me estoy esforzando por ustedes y por ello les dedico este trabajo.*

# Resumen

---

Los aceros inoxidable austeníticos son muy versátiles y por esta causa su uso en procesos de soldadura es cada vez mayor; entre estos procesos está el GMAW, en el cual un flujo de gas protege el arco de soldadura, este gas o mezcla de gases puede influir en el comportamiento de las propiedades mecánicas y metalúrgicas de una junta soldada, es entonces cuando surge la necesidad de estudiar el comportamiento o la influencia de la variación en la proporción de una mezcla de gases de protección sobre dichas propiedades, seleccionando los gases Argón y dióxido de carbono para la misma. Las propiedades mecánicas se estudiaron mediante la realización de ensayos de tracción, doblado y microdureza y las microestructurales mediante ensayos de microscopía, macroscopía y espectroscopía por chispa. Obteniendo un incremento en las propiedades mecánicas concernientes al ensayo de tracción hasta llegar a la proporción  $Ar: 90\% + CO_2: 10\%$  ya que al agregar más  $CO_2$  por encima de este valor a la proporción de gases, las propiedades comienzan a disminuir, a su vez, la ductilidad del material se ve afectada a medida que se incrementa la cantidad de  $CO_2$  en la mezcla de gases y la inoxidable de la junta queda sumamente afectada para valores altos de  $CO_2$  en la proporción de gases de protección, también se hace notoria la precipitación de carburos a medida que disminuye el gas argón en la proporción de gases y un incremento en la cantidad de carbono en la composición química del cordón de soldadura, se recomienda afinar las proporciones de gases de protección entre los valores iniciales hasta 10% para ampliar esta investigación.

Palabras claves: GMAW, soldadura, acero inoxidable, argón,  $CO_2$ .

# Índice general

---

---

Índice general	i
Índice de figuras	v
Índice de tablas	vii
Introducción	1
<b>CAPÍTULO 1</b> <b>El Problema</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	3
1.4 Alcance	4
1.5 Limitaciones	5
1.6 Antecedentes	6
<b>CAPÍTULO 2</b> <b>Marco teórico</b>	<b>9</b>
2.1 Bases Teóricas	9
2.2 Aceros	9
2.3 Tipos de aceros	10
2.3.1 <i>Aceros aleados</i>	10
2.3.1.1 <i>Estructurales</i>	10
2.3.1.2 <i>Para herramienta</i>	10
2.3.1.3 <i>Especiales</i>	10

ii *Influencia de la proporción de la mezcla de gases de protección sobre la microestructura y las propiedades mecánicas en juntas soldadas de acero inoxidable austenítico AISI 304 mediante soldadura GMAW.*

2.3.2	<i>Aceros de baja aleación ultraresistentes</i>	10
2.3.3	<i>Aceros inoxidables</i>	11
2.4	<i>Influencia de los elementos de aleación en las propiedades de los aceros</i>	12
2.4.1	<i>Níquel</i>	12
2.4.2	<i>Cromo</i>	12
2.4.3	<i>Molibdeno</i>	13
2.4.4	<i>Vanadio</i>	13
2.4.5	<i>Manganeso</i>	13
2.4.6	<i>Silicio</i>	14
2.4.7	<i>Azufre</i>	15
2.4.8	<i>Fosforo</i>	15
2.5	<i>Aceros inoxidables</i>	16
2.5.1	<i>Clasificación de los aceros inoxidables</i>	18
2.5.1.1	<i>Aceros inoxidables ferríticos</i>	18
2.5.1.2	<i>Aceros inoxidables Martensíticos</i>	18
2.5.1.3	<i>Aceros inoxidables dúplex</i>	19
2.5.1.4	<i>Aceros inoxidables austenítico</i>	20
2.6	<i>Soldabilidad de los aceros inoxidables austeníticos</i>	23
2.6.1	<i>Tendencia al agrietamiento</i>	23
2.6.2	<i>Precipitación de carburos de cromo</i>	24
2.6.3	<i>Formación de la fase intermetálica sigma</i>	26
2.7	<i>Principios del proceso GMAW</i>	26
2.7.1	<i>Descripción y denominaciones</i>	26
2.7.2	<i>Ventajas y limitaciones</i>	27
2.7.3	<i>Modos de transferencia en el proceso GMAW para la mezcla de gases Ar-CO<sub>2</sub></i>	28
2.8	<i>Gases de protección</i>	31
2.8.1	<i>Propiedades de los gases de protección y su influencia en la soldadura</i>	32
2.8.2	<i>Propiedades de los gases de protección argón y dióxido de carbono</i>	36
2.9	<i>Espectroscopia de emisión</i>	41
<b>CAPÍTULO 3</b>	<b>Marco metodológico</b>	<b>43</b>
3.1	<i>Nivel de la investigación</i>	43
3.2	<i>Diseño de la investigación</i>	43
3.2.1	<i>Fase I. Caracterización del material base y el material de aporte</i>	44
3.2.2	<i>Fase II. Obtención de las proporciones de la mezcla de gas de protección</i>	44
3.2.3	<i>Fase III. Preparación de las probetas</i>	44

3.2.4 Fase IV. Realización de estudios y ensayos metalográficos	45
3.2.5 Fase V. Evaluaciones de las propiedades mecánicas y metalurgia de la soldadura	45
3.3 Población y muestra	46
3.4 Tipo de muestreo	46
3.5 Técnicas e instrumentos de recolección de datos	46
3.6 Técnicas de procesamiento y análisis de datos	47
3.7 Materiales y equipos a utilizar	47
3.8 Herramientas a utilizar	48
3.9 Desarrollo de las fases metodológicas	48
3.9.1 Caracterización del material base y material de aporte	48
3.9.2 Preparación de probetas	51
3.9.3 Realización de ensayos mecánicos y estudio metalográficos	55
3.9.3.1 Ensayo de tracción	55
3.9.3.2 Ensayo de dobléz	57
3.9.3.3 Estudio metalográfico	58
3.9.3.4 Ensayo de microdureza Vickers	60
3.9.3.5 Ensayo de espectrometría	62
<b>CAPÍTULO 4            Resultados y análisis</b>	<b>63</b>
4.1 Caracterización del material base	63
4.1.1 Composición química	63
4.1.2 Propiedades mecánicas	64
4.2 Parámetros de soldadura a utilizar	65
4.3 Resultados del ensayo de tracción para las probetas soldadas a diferentes proporciones de la mezcla de gases de protección Ar – CO <sub>2</sub>	66
4.4 Análisis del ensayo de tracción	74
4.5 Resultados del ensayo de doblado	77
4.6 Análisis del estudio de doblado	84
4.7 Resultados del ensayo metalografico	86
4.8 Análisis del ensayo de Macroscopía	89
4.9 Microscopía	90
4.10 Análisis del ensayo de microscopía	102
4.11 Resultados del ensayo de microdureza Vickers	102
4.12 Análisis del ensayo de microdureza Vickers	106
4.13 Resultados del ensayo de espectroscopia por chispa	109
4.14 Análisis de los resultados del ensayo de espectroscopia por chispa	112

iv *Influencia de la proporción de la mezcla de gases de protección sobre la microestructura y las propiedades mecánicas en juntas soldadas de acero inoxidable austenítico AISI 304 mediante soldadura GMAW.*

<b>Conclusiones</b>	<b>119</b>
<b>Recomendaciones</b>	<b>120</b>
<b>Referencias bibliográficas</b>	<b>127</b>
<b>Anexos</b>	<b>129</b>
Anexo 1 Certificado de Calidad AUSTINOX acero AISI 304	
Anexo 2 Composición química del electrodo LINCOLN.	
Anexo 3 Certificado de calidad OXICAR, Proporción Ar: 100%.	
Anexo 4 Certificado de calidad OXICAR, Proporción Ar: 95% + CO <sub>2</sub> : 5%	
Anexo 5 Certificado de calidad OXICAR, Proporción Ar: 90% + CO <sub>2</sub> : 10%	
Anexo 6 Certificado de calidad OXICAR, Proporción Ar: 85% + CO <sub>2</sub> : 15%	
Anexo 7 Certificado de calidad OXICAR, Proporción Ar: 80% + CO <sub>2</sub> : 20%	
Anexo 8 Certificado de calidad OXICAR, Proporción Ar: 75% + CO <sub>2</sub> : 25%	
Anexo 9. Resultados de la espectroscopía por emisión.	
Anexo 10. Resultados de la espectroscopía por emisión.	
Anexo 11. Resultados de la espectroscopía por emisión.	

# Índice de figuras

---

---

2.1 Influencia del Níquel en la fase $\gamma$ (austenita) de un acero con 18% Cr.	21
2.2 Diagrama de Shaeffler para estimar los contenidos de ferrita de depósitos soldados de los aceros inoxidables.	24
2.3 Diagrama representativo del límite de grano sensibilizado de un acero inoxidable tipo 304.	25
2.4 Soldeo por arco con gas.	27
2.5 Campo de existencia de los distintos modos de transferencia MAG, mezcla Ar-CO <sub>2</sub> .	28
2.6 El arco corto (cortocircuito KLB).	29
2.7 El arco globular (ÚLB).	29
2.8 Arco Spray	30
2.9 Arco rotativo (HL).	30
2.10 Arco pulsado (ILB).	31
2.11 Conductividad térmica de varios gases de protección vs temperatura.	34
2.12 Forma de la columna de plasma en función del gas de protección (soldeo MIG o MAG).	40
2.13 Forma del cordón en función del gas de protección soldeo (MIG o MAG).	40
3.1 Diseño de la junta.	52
3.2 Proceso de soldadura por arco metálico con protección gaseosa (GMAW).	53
3.3 Representación del orden de remoción de piezas para probetas sobre el cupón.	54
3.4 Dimensiones de la probeta de tracción según norma ASTM E8M-04.	56
3.5 Máquina GALDABINI de ensayos mecánicos.	56
3.6 Dimensiones de la probeta de doblado según norma ASTM E-190.	57
3.7 Equipo para ataques electrolíticos marca Electromet.	59
3.8 Microscopio Optico.	60
3.9 Microdurómetro de huella de base piramidal marca BUEHLER.	61
3.10 Representación de las impresiones por barrido realizadas sobre las probetas.	61
4.1 Curva característica de Esfuerzo vs. Deformación de las probetas soldadas con la proporción Ar: 100%.	66

4.2 Curva característica de Esfuerzo vs. Deformación de las probetas soldadas con la proporción Ar: 95% - CO <sub>2</sub> : 5%.	67
4.3 Curva característica de Esfuerzo vs. Deformación de las probetas soldadas con la proporción Ar: 90% - CO <sub>2</sub> : 10%.	67
4.4 Curva característica de Esfuerzo vs. Deformación de las probetas soldadas con la proporción Ar: 85% - CO <sub>2</sub> : 15%.	68
4.5 Curva característica de Esfuerzo vs. Deformación de las probetas soldadas con la proporción Ar: 80% - CO <sub>2</sub> : 20%.	68
4.6 Curva característica de Esfuerzo vs. Deformación de las probetas soldadas con la proporción Ar: 75% - CO <sub>2</sub> : 25%.	69
4.7 Curva característica de Esfuerzo vs. Deformación de las probetas soldadas con la proporción CO <sub>2</sub> : 100%.	69
4.8 Curvas de Esfuerzo de fluencia vs. Proporciones de la mezcla de gases de protección, cada punto de las curvas representan los valores promedios de las probetas ensayadas por cada proporción a su vez está representada la línea de tendencia de dicho esfuerzo.	70
4.9 Curvas de Esfuerzo de Máximo vs. Proporciones de la mezcla de gases de protección, cada punto de las curvas representan los valores promedios de las probetas ensayadas por cada proporción a su vez está representada la línea de tendencia de dicho esfuerzo.	71
4.10 Comparación del comportamiento entre el Esfuerzo de Fluencia y el Esfuerzo Máximo.	72
4.11 Curvas de Deformación máxima vs. Proporciones de la mezcla de gases de protección, cada punto de las curvas representan los valores promedios de las probetas ensayadas por cada proporción.	73
4.12 Microestructura de la probeta soldada con la proporción de gases de protección Ar: 100%.	86
4.13 Microestructura de la probeta soldada con la proporción de gases de protección Ar: 95% - CO <sub>2</sub> : 5%.	87
4.14 Microestructura de la probeta soldada con la proporción de gases de protección Ar: 90% - CO <sub>2</sub> : 10%.	87
4.15 Microestructura de la probeta soldada con la proporción de gases de protección Ar: 85% - CO <sub>2</sub> : 15%	88
4.16 Microestructura de la probeta soldada con la proporción de gases de protección Ar: 80% - CO <sub>2</sub> : 20%.	88
4.17 Microestructura de la probeta soldada con la proporción de gases de protección Ar: 75% - CO <sub>2</sub> : 25%.	88
4.18 Microestructura de la probeta soldada con la proporción de gases de protección CO <sub>2</sub> : 100%.	89
4.19 Diagrama de Shaeffler correspondiente a los porcentajes de dilución de las proporciones de Ar: 100% y Ar: 95% - CO <sub>2</sub> : 5% y en base a la composición química del acero AISI 304 y el alambre de	92

aporte ER 308.	
4.20 Diagrama de Shaeffler correspondiente a los porcentajes de dilución de las proporciones de Ar: 90% - CO <sub>2</sub> : 10% y Ar: 85% - CO <sub>2</sub> : 15% y en base a la composición química del acero AISI 304 y el alambre de aporte ER 308.	93
4.21 Diagrama de Shaeffler correspondiente a los porcentajes de dilución de las proporciones de Ar: 75% - CO <sub>2</sub> : 25% y Ar: 80% - CO <sub>2</sub> : 20% y en base a la composición química del acero AISI 304 y el alambre de aporte ER 308.	93
4.22 Diagrama de Shaeffler correspondiente al porcentaje de dilución de la proporciones de CO <sub>2</sub> : 100% en base a la composición química del acero AISI 304 y el alambre de aporte ER 308.	94
4.23 Microestructura de la probeta soldada con la proporción de gases de protección Ar: 100%.	95
4.24 Microestructura de la probeta soldada con la proporción de gases de protección Ar: 95% - CO <sub>2</sub> : 5%.	96
4.25 Microestructura de la probeta soldada con la proporción de gases de protección Ar: 90% - CO <sub>2</sub> : 10%.	97
4.26 Microestructura de la probeta soldada con la proporción de gases de protección Ar: 85% - CO <sub>2</sub> : 15%.	98
4.27 Microestructura de la probeta soldada con la proporción de gases de protección Ar: 80% - CO <sub>2</sub> : 20%.	99
4.28 Microestructura de la probeta soldada con la proporción de gases de protección Ar: 75% - CO <sub>2</sub> : 25%.	100
4.29 Microestructura de la probeta soldada con la proporción de gases de protección CO <sub>2</sub> : 100%.	101
4.30 Gráfica Microdureza Vickers vs. Zonas características de la soldadura de la proporción Ar: 100%.	103
4.31 Gráfica Microdureza Vickers vs. Zonas características de la soldadura de la proporción Ar: 95% - CO <sub>2</sub> : 5%.	103
4.32 Gráfica Microdureza Vickers vs. Zonas características de la soldadura de la proporción Ar: 90% - CO <sub>2</sub> : 10%.	104
4.33 Gráfica Microdureza Vickers vs. Zonas características de la soldadura de la proporción Ar: 85% - CO <sub>2</sub> : 15%.	104
4.34 Gráfica Microdureza Vickers vs. Zonas características de la soldadura de la proporción Ar: 80% - CO <sub>2</sub> : 20%.	105
4.35 Gráfica Microdureza Vickers vs. Zonas características de la soldadura de la proporción Ar: 75% - CO <sub>2</sub> : 25%.	105
4.36 Gráfica Microdureza Vickers vs. Zonas características de la soldadura de la proporción CO <sub>2</sub> : 100%.	106
4.37 Microdureza Vickers vs. Proporciones de la mezcla Ar - CO <sub>2</sub> evaluadas en la zona de fusión y zona afectada por el calor.	106
4.38 Comportamiento del azufre, fósforo, silicio y molibdeno en el metal de aporte para diferentes proporciones de la mezcla Ar - CO <sub>2</sub> .	113
4.39 Comportamiento del azufre, fósforo, silicio y molibdeno en el metal	114

Viii *Influencia de la proporción de la mezcla de gases de protección sobre la microestructura y las propiedades mecánicas en juntas soldadas de acero inoxidable austenítico AISI 304 mediante soldadura GMAW.*

de aporte para diferentes proporciones de la mezcla Ar - CO<sub>2</sub>.

# Índice de tablas

---

---

2.1 Influencia de los elementos aleantes en las propiedades del acero.	16
2.2 Tipos de espectroscopia de emisión.	42
3.1 Composición química del acero inoxidable AISI 304.	49
3.2 Composición química del acero inoxidable AISI 304.	49
3.3 Propiedades mecánicas del acero inoxidable AISI 304.	50
3.4 Composición química del metal depositado.	51
3.5 Características de la lámina inicial.	51
3.6 Especificación del procedimiento de soldadura.	52
4.1 Porcentaje de los elementos químicos presentes en las muestras ensayadas.	63
4.2 Porcentaje de los elementos químicos presentes en las muestras ensayadas.	64
4.3 Promedio de los valores correspondientes a las propiedades mecánicas de las probetas ensayadas para el material base.	64
4.4 Parámetros de soldadura a utilizar por cada proporción de gases de protección.	65
4.5 Resultados del ensayo de tracción.	74
4.6 Observaciones del ensayo de doblado para probetas soldadas a distintas proporciones de la mezcla de gases de protección Ar - CO <sub>2</sub> .	78
4.7 Observaciones del ensayo de doblado para probetas soldadas a distintas proporciones de la mezcla de gases de protección Ar - CO <sub>2</sub> .	79
4.8 Observaciones del ensayo de doblado para probetas soldadas a distintas proporciones de la mezcla de gases de protección Ar - CO <sub>2</sub> .	80
4.9 Observaciones del ensayo de doblado para probetas soldadas a	81

distintas proporciones de la mezcla de gases de protección Ar - CO <sub>2</sub> .	
4.10 Observaciones del ensayo de doblado para probetas soldadas a distintas proporciones de la mezcla de gases de protección Ar - CO <sub>2</sub> .	82
4.11 Observaciones del ensayo de doblado para probetas soldadas a distintas proporciones de la mezcla de gases de protección Ar - CO <sub>2</sub> .	83
4.12 Observaciones del ensayo de doblado para probetas soldadas a distintas proporciones de la mezcla de gases de protección Ar - CO <sub>2</sub> .	84
4.13 Porcentajes de Niquel equivalente y Cromo equivalente para el metal base y para el metal de aporte.	91
4.14 Porcentajes de dilución según las proporciones de la mezcla de gases de protección.	91
4.15 Energía de Disociación y de ionización para los gases utilizados en la mezcla de gas de protección.	108
4.16 Cantidad en % del elemento químico presente en las juntas soldadas de acero inoxidable para las proporciones de gases de protección Ar: 100% y Ar:95% - CO <sub>2</sub> : 5%.	109
4.17 Cantidad en % del elemento químico presente en las juntas soldadas de acero inoxidable para las proporciones de gases de protección Ar: 90% - CO <sub>2</sub> :10% y Ar:85% - CO <sub>2</sub> :15%.	110
4.18 Cantidad en % del elemento químico presente en las juntas soldadas de acero inoxidable para las proporciones de gases de protección Ar: 80% - CO <sub>2</sub> :20% y Ar:75% - CO <sub>2</sub> :25%.	111
4.19 Cantidad en % de elemento químico presente en la junta soldadas de aceros de aceros inoxidables para la proporción de gases de protección CO <sub>2</sub> :100%.	111

# *Introducción*

---

Las propiedades mecánicas y metalúrgicas han sido siempre un tema de interés a la hora de la selección de un material para aplicaciones ingenieriles. Los aceros inoxidable austeníticos cumplen con las propiedades mecánicas y metalúrgicas que exigen las aplicaciones ingenieriles de diversa índole, sin embargo al someter estos aceros a procesos de fabricación dichas propiedades pueden variar considerablemente, en este sentido uno de los procesos de fabricación más utilizados en la industria actual es el de soldadura, siendo el proceso de arco metálico con protección gaseosa uno de los procesos con más relevancia para la soldadura de aceros inoxidable debido a sus características únicas como lo son la participación de la atmosfera protectora durante el proceso.

En este sentido, es necesario estudiar el comportamiento de las propiedades mecánicas y metalúrgicas de juntas soldadas de acero inoxidable austeníticos mediante el proceso GMAW, cuando la composición de la atmosfera protectora varía. Para ello se utilizó una mezcla de dos gases, el Argón y el dióxido de Carbono en las siguientes proporciones: Ar: 100%, CO<sub>2</sub>: 100%, Ar: 95% + CO<sub>2</sub>: 5%, Ar: 90% + CO<sub>2</sub>: 10%, Ar: 85% + CO<sub>2</sub>: 15%, Ar: 80% + CO<sub>2</sub>: 20%, Ar: 75% + CO<sub>2</sub>: 25%. Para determinar el comportamiento de las propiedades mecánicas se ejecutaron ensayos de tracción, doblado y microdureza. Así como también para determinar el comportamiento microestructural de las juntas se realizaron ensayos de microscopía, macroscopía y espectroscopía por chispa, acompañando estos ensayos con análisis estadísticos y gráficos representativos de dichas propiedades y la influencia en las mismas por la variación en las proporciones de la mezcla de los gases de protección.

# CAPÍTULO 1

## *El Problema*

---

### **1.1 Situación problemática**

El acero inoxidable austenítico es el más común y el más utilizado de todos los aceros inoxidables, dado que posee características resaltantes como resistencia a la corrosión, propiedades higiénicas, resistencia a temperaturas elevadas, resistencia a temperaturas criogénicas así como también una buena soldabilidad.

En este sentido la utilización de aceros inoxidables austeníticos en procesos de soldadura es cada vez más amplia; siendo comúnmente usado el proceso de arco metálico con protección gaseosa (GMAW). Esto se debe, entre otras cosas, a su elevada productividad y que es de fácil automatización.

Ahora bien, durante el proceso de soldadura GMAW en juntas de aceros inoxidables austeníticos se presentan problemas como la oxidación, precipitación de carburos, termofraccionamiento y la aparición de concentradores de esfuerzos tales como discontinuidades internas y esfuerzos residuales que afectan las propiedades mecánicas y sobre la microestructura de la unión soldada.

De esta manera, surgió la necesidad de estudiar la influencia de la proporción de los gases de protección en juntas soldadas de aceros inoxidables austeníticos con el fin de determinar el comportamiento de la microestructura y las propiedades mecánicas de dichas uniones, a fin de proveer una base experimental sólida que permita la selección adecuada de

los parámetros de soldadura para con ello mejorar los resultados del proceso.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo General**

Determinar la influencia de la proporción de la mezcla de gases de protección sobre la microestructura y las propiedades mecánicas en juntas soldadas de acero inoxidable austenítico AISI 304 mediante soldadura GMAW.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- Evaluar la microestructura y determinar las propiedades mecánicas de metal base en su estado inicial.
- Establecer los parámetros de soldadura a utilizar.
- Evaluar la microestructura y determinar las propiedades mecánicas de la junta soldada para un aporte del 100% argón como gas de protección.
- Evaluar la microestructura y determinar las propiedades mecánicas de la junta soldada para un aporte del 100% Dióxido de carbono como gas de protección.
- Evaluar la microestructura y determinar las propiedades mecánicas de la junta soldada con distintas proporciones de mezcla Ar – CO<sub>2</sub>.

## **1.3 Justificación**

Durante el proceso de soldadura GMAW en aceros inoxidables austeníticos se pueden presentar diversos problemas relacionados con las propiedades mecánicas y con la microestructura de las juntas soldadas, causados por la tendencia a la deformación y a la retención de esfuerzos residuales y a la posible precipitación de carburos, resultando esto en una

pérdida de la resistencia a la corrosión y una disminución considerable en las propiedades del material depositado y del material base.

Uno de los parámetros más importantes en el proceso de soldadura GMAW es la atmósfera protectora, en este sentido se estudió la influencia de la proporción de los gases de una mezcla Ar – CO<sub>2</sub> en el comportamiento de las propiedades mecánicas y en la microestructura de una junta soldada de acero inoxidable austenítico.

El conocimiento del efecto de la proporción de los gases Argón y dióxido de carbono como gases de protección sobre las propiedades mecánicas y sobre la microestructura de una junta soldada de acero inoxidable austenítico mediante el proceso GMAW trae como beneficio un ahorro de tiempo y de dinero al evitar el uso de ensayos destructivos para la determinación de dichas propiedades y la posible eliminación de los defectos microestructurales que posea la junta ocasionados por una inadecuada selección de la proporción de los gases de protección.

Se establecieron las bases experimentales y teóricas para futuras investigaciones en esta área.

## **1.4 Alcance**

Con esta investigación se creó una base de datos de fácil acceso para la realización del proceso de soldadura GMAW por el método de metal protegido por gas activo (MAG) mediante la determinación del comportamiento de las propiedades mecánicas a través de la realización de ensayos de: tracción, doblado y dureza. Incluyendo además un análisis de la microestructura mediante un ensayo de microscopía y un análisis químico.

Se utilizó como metal base un acero austenítico AISI 304 con 6 mm de espesor y los gases de protección serán Argón y Dióxido de carbono, en proporciones de: Ar: 100%, CO<sub>2</sub>: 100%, Ar: 95% + CO<sub>2</sub>: 5%,

Ar: 90% + CO<sub>2</sub>: 10%, Ar: 85% + CO<sub>2</sub>: 15%, Ar: 80% + CO<sub>2</sub>: 20%, Ar: 75% + CO<sub>2</sub>: 25%.

Se utilizaron cinco probetas para caracterizar la condición inicial del metal base, a las cuales se le aplicó el ensayo de tracción y cinco para los ensayos de dureza y microscopía de éstas se utilizó una a la cual se le aplicará un análisis químico y tres probetas para un ensayo de doblado.

Se utilizó por cada una de las proporciones de la mezcla Ar - CO<sub>2</sub>, cinco probetas para la realización de los ensayos de tracción y cinco para los ensayos de dureza y microscopía de estas se tomó una probeta por cada proporción de los gases de la mezcla para aplicarles un análisis químico, en la zona afecta por el calor y en el cordón de soldadura de la junta. También se realizó el ensayo de doblado a tres probetas por cada una de las proporciones de la mezcla Ar - CO<sub>2</sub>.

## 1.5 Limitaciones

El déficit de los materiales a utilizar en el mercado nacional además de la carencia del equipo de soldadura y del soldador que debe estar calificado por la sociedad americana de soldadura (AWS), para realizar las uniones soldadas. Para el cumplimiento de los objetivos se deben realizar ensayos y elaborar probetas que son de alto costo de esta manera la disponibilidad de los recursos económicos forma parte de los inconvenientes que pueden ocasionar retrasos a la hora de llevar a cabo la investigación.

En lo que respecta al tiempo, es limitado debido a la cantidad de actividades a cumplir, como lo son la investigación bibliográfica, los ensayos a efectuar y la búsqueda de los equipos y el personal calificado así como también la elaboración de las probetas para los mismos.

## **1.6 Antecedentes**

Stenbacka, N. y Persson, K. (1989). En el trabajo de investigación se analizan los efectos sobre la productividad y propiedades microestructurales de los gases protectores utilizados en el proceso GMAW. En el estudio se uso argón, oxígeno, dióxido de carbono y mezcla de los anteriores para evaluar las propiedades microestructurales de los aceros y los tipos de transferencia metálica que pueden utilizarse. Muy específicamente se hace referencia al potencial de oxidación al utilizar oxígeno como gas protector, resultando esto en que el contenido de oxígeno en la soldadura se ve afectado por el tipo de material base y de aporte utilizado, con todo esto también se obtuvo que al aumentar la intensidad de corriente o al disminuir el voltaje del arco, se reduce el contenido de oxígeno además de ello la polaridad utilizada influye de manera directa en el contenido de oxígeno del proceso [1].

J. Lozano, et al (2000). La investigación establece el gas de protección en soldadura GMAW como elemento vital y tercer miembro del trípode que conforma el proceso: fuente de poder – material – gas de protección. Aunque es reconocido que el gas representa sólo un pequeño porcentaje en el costo total de producción, su correcta elección puede producir ahorros significativos debido a un aumento en la productividad, calidad y una disminución de costos, a través de obtener cordones bien conformados y libres de defectos. En este trabajo se evalúa la influencia de diferentes gases de protección, sobre las características de fusión de soldaduras GMAW de aceros inoxidables austeníticos. Se emplean placas de acero AISI 304 sobre las cuales se depositan cordones “bead on plate”, utilizando un aporte del tipo ER 308LSi, según AWS A5.9, y los siguientes gases de protección: Ar, Ar – O<sub>2</sub>, Ar – CO<sub>2</sub>, He - Ar - CO<sub>2</sub>, Ar – He – CO<sub>2</sub>, Ar – CO<sub>2</sub> - NO, Ar - NO, Ar – He – H<sub>2</sub>, Ar - He. Para cada gas de protección se evalúa la operatividad del

proceso y se determinan ancho de cordón, sobremonta, penetración, ángulo de mojado y de fusión, área de sobremonta, área de penetración y dilución; realizándose un análisis comparativo de los mismos, concluyendo que el mayor ancho de cordón y la mayor penetración son alcanzados con la mezcla Ar: 95% + He: 5% [2].

Porta, C. y Quintero, A. (2001). Llevaron a cabo la soldadura de arco con protección gaseosa en modo de arco pulsado para un acero inoxidable dúplex 2205 (UNS 31803), para una mezcla de gases constituida por argón como gas mayoritario con 2% de nitrógeno y 2% de oxígeno, ahora bien la investigación permite concluir que estos aceros deben ser soldados con aportes calóricos bajos ya que altos aportes de energía dan lugar a la energía libre mínima requerida para permitir la nucleación de fases perjudiciales en uniones soldadas, además de esto que se debe trabajar a una velocidad mayor a los  $4\text{ m/min}$  de velocidad de alimentación del alambre para conseguir transferencia rociada en arco pulsado, con respecto a la corriente se concluyó que los valores de la misma deben mantenerse superiores a 146,2 A para garantizar la estabilidad del arco y la buena calidad de la soldadura, de esta misma manera el calor aportado es bajo y en consecuencia esto permite que el acero tenga un daño microestructural menor al que se puede obtener por otros procesos de soldadura y también que sus propiedades mecánicas no sean tan heterogéneas en la junta soldada.

Shanping LU, et al (2005). Desarrollaron un estudio acerca de la influencia de los parámetros de soldadura y de la composición de los gases de protección en uniones soldadas de acero inoxidable SUS304, para ello se seleccionaron dos tipos de mezcla de gases de protección Ar: 99,9% + CO<sub>2</sub>: 0,1% y Ar: 99,7 + CO<sub>2</sub>: 0,3%, de esta manera mediante la realización de ensayos experimentales concluyen que la cantidad de oxígeno presente en la

piscina de soldadura puede disminuirse mediante la adición de pequeñas cantidades de dióxido de carbono al gas base argón en procesos de soldadura GTA, esto es de suma importancia porque el oxígeno juega un papel importante como elemento activo en la superficie ya que el mismo influye de manera determinante en el coeficiente de temperatura y tensión superficial en la piscina de soldadura para aceros inoxidables. Por debajo de la composición Ar: 99,7 + CO<sub>2</sub>: 0,3% el radio de profundidad y ancho sustancialmente depende de los parámetros de soldadura mientras que el ancho y la profundidad del cordón para una mezcla por debajo de Ar: 99,9% + CO<sub>2</sub>: 0,1% no es sensible a variaciones en los parámetros de soldadura [3].

E. S. Puchi-Cabrera, et al (2007). Se plantean determinar el efecto, tanto del modo de transferencia metálica (arco pulsado o cortocircuito) como del contenido de O<sub>2</sub> en la mezcla de gases protectores Ar – O<sub>2</sub>, del proceso de soldadura a tope mediante arco metálico con protección gaseosa (GMAW), sobre la vida a la fatiga en condiciones uniaxiales de juntas soldadas del acero inoxidable AISI 316L. Dicho trabajo ha permitido concluir que la composición de la mezcla de gases protectores del proceso GMAW pudiera tener una influencia importante en la vida a la fatiga de las juntas soldadas de dicho material, a través de dos formas distintas: primero, mediante la modificación del radio de curvatura entre la raíz del cordón de soldadura y el metal base y, en segundo lugar, a través del mayor grado de oxidación de los elementos de aleación. En cuanto al modo de transferencia metálica, se determinó que las juntas soldadas mediante arco pulsado presentan una mayor vida a la fatiga en comparación con las juntas obtenidas por cortocircuito para ambas mezclas gaseosas [4].

# CAPÍTULO 2

## *Marco Teórico*

---

### **2.1 Bases teóricas**

En este capítulo se muestran los fundamentos para el análisis de los resultados obtenidos a través de la realización de los ensayos experimentales, tomando en cuenta investigaciones previas y documentación teórica básica acerca de las características y propiedades de las variables involucradas en el proceso [5].

### **2.2 Aceros**

El acero es básicamente una aleación o combinación de hierro y carbono (alrededor de 0,05% hasta menos de un 2%).

Algunas veces otros elementos de aleación específicos tales como el Cr (Cromo) o Ni (Níquel) se agregan con propósitos determinados. Ya que el acero es básicamente hierro altamente refinado (más de un 98%), su fabricación comienza con la reducción de hierro (producción de arrabio) el cual se convierte más tarde en acero.

El hierro puro es uno de los elementos del acero, por lo tanto consiste solamente de un tipo de átomos. No se encuentra libre en la naturaleza ya que químicamente reacciona con facilidad con el oxígeno del aire para formar óxido de hierro - herrumbre.

El óxido se encuentra en cantidades significativas en el mineral de hierro, el cual es una concentración de óxido de hierro con impurezas y materiales térreos [5].

## **2.3 Tipos de Aceros**

### **2.3.1 Aceros aleados**

Estos aceros contienen una proporción determinada de vanadio, molibdeno y otros elementos, además de cantidades mayores de manganeso, silicio y cobre que los aceros al carbono normales. Estos aceros de aleación se pueden subclasificar en:

#### **2.3.1.1 Estructurales**

Son aquellos aceros que se emplean para diversas partes de máquinas, tales como engranajes, ejes y palancas. Además se utilizan en las estructuras de edificios, construcción de chasis de automóviles, puentes, barcos y semejantes. El contenido de la aleación varía desde 0,25% a un 6% [5].

#### **2.3.1.2 Para Herramientas**

Aceros de alta calidad que se emplean en herramientas para cortar y modelar metales y no-metales. Por lo tanto, son materiales empleados para cortar y construir herramientas tales como taladros, escariadores, fresas, terrajas y machos de roscar [5].

#### **2.3.1.3 Especiales**

Los Aceros de Aleación especiales son los aceros inoxidables y aquellos con un contenido de cromo generalmente superior al 12%. Estos aceros de gran dureza y alta resistencia a las altas temperaturas y a la corrosión, se emplean en turbinas de vapor, engranajes, ejes y rodamientos [5].

### **2.3.2 Aceros de baja aleación ultraresistentes**

Esta familia es la más reciente de las cuatro grandes clases de acero. Los aceros de baja aleación son más baratos que los aceros aleados convencionales ya que contienen cantidades menores de los costosos elementos de aleación [5].

Sin embargo, reciben un tratamiento especial que les da una resistencia mucho mayor que la del acero al carbono. Por ejemplo, los vagones de mercancías fabricados con aceros de baja aleación pueden transportar cargas más grandes porque sus paredes son más delgadas que lo que sería necesario en caso de emplear acero al carbono.

Además, como los vagones de acero de baja aleación pesan menos, las cargas pueden ser más pesadas.

En la actualidad se construyen muchos edificios con estructuras de aceros de baja aleación. Las vigas pueden ser más delgadas sin disminuir su resistencia, logrando un mayor espacio interior en los edificios [5].

### 2.3.3 Aceros inoxidables

Los aceros inoxidables contienen cromo, níquel y otros elementos de aleación, que los mantienen brillantes y resistentes a la herrumbre y oxidación a pesar de la acción de la humedad o de ácidos y gases corrosivos. Algunos aceros inoxidables son muy duros; otros son muy resistentes y mantienen esa resistencia durante largos periodos a temperaturas extremas.

Debido a sus superficies brillantes, en arquitectura se emplean muchas veces con fines decorativos. El acero inoxidable se utiliza para las tuberías y tanques de refinerías de petróleo o plantas químicas, para los fuselajes de los aviones o para cápsulas espaciales.

También se usa para fabricar instrumentos y equipos quirúrgicos, o para fijar o sustituir huesos rotos, ya que resiste a la acción de los fluidos corporales.

En cocinas y zonas de preparación de alimentos los utensilios son a menudo de acero inoxidable, ya que no oscurece los alimentos y pueden limpiarse con facilidad [5].

## **2.4 Influencia de los elementos de aleación en las propiedades de los aceros**

### **2.4.1 Níquel**

Una de las ventajas más grandes que reporta el empleo del níquel, es evitar el crecimiento del grano en los tratamientos térmicos, lo que sirve para producir en ellos gran tenacidad. El níquel además hace descender los puntos críticos y por ello los tratamientos pueden hacerse a temperaturas ligeramente más bajas que la que corresponde a los aceros ordinarios.

Experimentalmente se observa que con los aceros aleados con níquel se obtiene para una misma dureza, un límite de elasticidad ligeramente más elevado y mayores alargamientos y resistencias que con los aceros al carbono o de baja aleación.

En la actualidad se ha restringido mucho su empleo, pero sigue siendo un elemento de aleación indiscutible para los aceros de construcción empleados en la fabricación de piezas para maquinas y motores de gran responsabilidad, se destacan sobre todo en los aceros cromo-níquel y cromo-níquel-molibdeno. El níquel es un elemento de extraordinaria importancia en la fabricación de aceros inoxidables y resistentes a altas temperaturas, en los que además de cromo se emplean porcentajes de níquel variables de 8 a 20% [6].

### **2.4.2 Cromo**

Es uno de los elementos especiales más empleados para la fabricación de aceros aleados, usándose indistintamente en los aceros de construcción, en los de herramientas, en los inoxidables y los de resistencia en caliente.

Se emplea en cantidades diversas desde 0,30 a 30%, según los casos y sirve para aumentar la dureza y la resistencia a la tracción de los aceros, mejora la templabilidad, impide las deformaciones en el temple, aumenta la resistencia al desgaste, la inoxidabilidad, etc. El cromo se disuelve en la

ferrita y muestra una fuerte tendencia a formar carburos de cromo y carburos complejos [6].

#### 2.4.3 Molibdeno

Mejora notablemente la resistencia a la tracción, la templabilidad y la resistencia al creep de los aceros. Añadiendo solo pequeñas cantidades de molibdeno a los aceros cromo-níqueles, se disminuye o elimina casi completamente la fragilidad Krupp, que se presenta cuando estos aceros son revenidos en la zona de 450° a 550°. El molibdeno aumenta también la resistencia de los aceros en caliente y reemplaza al wolframio en la fabricación de los aceros rápidos, pudiéndose emplear para las mismas aplicaciones aproximadamente una parte de molibdeno por cada dos de wolframio.

El molibdeno se disuelve en la ferrita, pero tiene una fuerte tendencia a formar carburos. Es un potente estabilizador de los carburos complejos y tiende a retardar el ablandamiento de los aceros, durante el revenido [6].

#### 2.4.4 Vanadio

Se emplea principalmente para la fabricación de aceros de herramientas, tiende a afinar el grano y a disminuir la templabilidad. Es un elemento desoxidante muy fuerte y tiene una gran tendencia a formar carburos. El vanadio tiene una gran tendencia muy fuerte a formar carburos, por esta razón, basta con añadir pequeñas cantidades, y pocos aceros, excepto los de herramientas, contienen más de 0.02% de vanadio.

Una característica de los aceros con vanadio, es su gran resistencia al ablandamiento por revenido [6].

#### 2.4.5 Manganeso

Aparece prácticamente en todos los aceros, debido, principalmente, a que se añade como elemento de adición para neutralizar la perniciosa

influencia del azufre y del oxígeno, que siempre suelen contener los aceros cuando se encuentran en estado líquido en los hornos durante los procesos de fabricación. El manganeso actúa también como desoxidante y evita, en parte, que en la solidificación del acero que se desprendan gases que den lugar a porosidades perjudiciales en el material.

Si los aceros no tuvieran manganeso, no se podrían laminar ni forjar, porque el azufre que suele encontrarse en mayor o menor cantidad en los aceros, formarían sulfuros de hierro, que son cuerpos de muy bajo punto de fusión (981 °C aprox.) que a las temperaturas de trabajo en caliente (forja o laminación) funden, y al encontrarse contorneando los granos de acero crean zonas de debilidad y las piezas y barras se abren en esas operaciones de transformación.

Los aceros ordinarios y los aceros aleados en los que el manganeso no es elemento fundamental, suelen contener generalmente porcentajes de manganeso variables de 0,30 a 0,80% [6].

#### 2.4.6 Silicio

Este elemento aparece en todos los aceros, lo mismo que el manganeso, porque se añade intencionadamente durante el proceso de fabricación. Se emplea como elemento desoxidante complementario del manganeso con objeto de evitar que aparezcan en el acero los poros y otros defectos internos. Los aceros pueden tener porcentajes variables de 0,20 a 0,34% de *Si*.

Se emplean aceros de 1 a 4,5% de *Si* y bajo porcentaje de carbono para la fabricación de chapas magnéticas, ya que esos aceros, en presencia de campos magnéticos variables, dan lugar solo a pérdidas magnéticas muy pequeñas, debido a que el silicio aumenta mucho su resistividad. Mejora ligeramente la templabilidad y la resistencia de los aceros a disminuir la

tenacidad, y en ciertos casos mejora también su resistencia a la oxidación [6].

#### 2.4.7 Azufre

Junto con el fósforo, el azufre es el elemento más problemático, ya que prácticamente es insoluble en el hierro y se presenta fundamentalmente en forma de sulfuro de hierro ( $FeS$ ). El eutéctico que se forma es:  $L \rightarrow Fe (0,01\% S) + FeS$  a  $988\text{ }^{\circ}C$ . Este eutéctico se forma fundamentalmente en los límites de grano del acero. Al ser la temperatura tan baja, en procesos de laminación o forja se funde el eutéctico, volviéndose más frágil el acero en los límites de grano, propiedad conocida como fragilidad en caliente.

Para evitarlo se utiliza manganeso, favoreciendo la formación de  $MnS$  en lugar de  $FeS$  [6].

#### 2.4.8 Fósforo

Normalmente, el fósforo se disuelve en la ferrita hasta un 1%, pero por encima de este valor, aparece en forma de  $Fe_3P$ . El fósforo aumenta la fragilidad de los aceros, y al igual que el azufre, tiene una gran tendencia a la segregación, produciendo el fenómeno de la segregación complementaria del acero (zonas de distinta concentración).

En las zonas donde el contenido de carbono es mayor, hay más perlita y menos ferrita. Por el contrario, en las zonas con menor contenido en carbono, el porcentaje de perlita es menor y el de ferrita mayor. Esto provoca la aparición de bandas alternas de ferrita y cementita, conocidas como bandas fantasmas. El contenido de fósforo en el acero no debería ser superior a 0,05%. En la tabla 2.1 se muestra un resumen de Influencia de los elementos aleantes en las propiedades del acero [6].

Tabla 2.1 Influencia de los elementos aleantes en las propiedades del acero

Influencia de los elementos aleantes en las propiedades del acero															
Elemento de aleación	Propiedades mecánicas								Velocidad de enfriamiento	Formación de carburos	Resistencia al desgaste	Forjabilidad	Machucabilidad	Escamación (oxidación) a alta temperatura	Resistencia a la corrosión
	Dureza	Resistencia	Límite de elasticidad	Alargamiento	Reducción de área	Valor de impacto	Elasticidad	Estabilidad a alta temperatura							
Silicio	↑	↑	↑↑	↓	~	↓	↑↑↑	↑	↓	↓	↓↓↓	↓	↓	↓	—
Manganeso en aceros perliticos	↑	↑	↑	~	~	~	↑	~	↓	~	↓↓↓	↑	↓	~	—
Manganeso en aceros austeniticos	↓↓↓	↑	↓	↑↑↑	~	—	—	—	↓↓↓	—	—	↓↓↓	↓↓↓	↓↓↓	—
Cromo	↑↑	↑↑	↑↑	↓	↓	↓	↑	↑	↓↓↓	↑↑	↑	↓	—	↓↓↓	↑↑↑
Níquel en aceros perliticos	↑	↑	↑	~	~	~	—	↑	↓↓	—	↓↓	↓	↓	↓	—
Níquel en aceros austeniticos	↓↓	↑	↓	↑↑↑	↑↑	↑↑↑	—	↑↑↑	↓↓	—	—	↓↓↓	↓↓↓	↓↓↓	↑↑
Aluminio	—	—	—	—	↓	↓	—	—	—	—	—	↓↓	—	↓↓	—
Vanadio	↑	↑	↑	↓	↓	~	—	↑↑↑	↓↓	↑↑↑	↑↑	↑	—	↓	↑
Cobalto	↑	↑	↑	↓	↓	↓	—	↑↑	↑↑	—	↑↑↑	↓	~	↓	—
Molibdeno	↑	↑	↑	↓	↓	↑	—	↑↑	↓↓	↑↑↑	↑↑	↓	↓	↑↑	—
Cobre	↑	↑	↑↑	~	~	~	—	↑	—	—	—	↓↓↓	~	~	—
Azufre	—	—	—	↓	↓	↓	—	—	—	—	—	↓↓↓	↑↑↑	—	↓
Niobio	↑	↑	↑	↓	↓	↓↓↓	—	—	—	—	—	↓	↑↑	—	—

↑ Incremento      ↓ Reducción      ~ Constante      — sin características o desconocida      varias flechas efecto más intenso

Fuente: UTP <http://www.bsmex.com.mx/utp-welding/> [7]

## 2.5 Aceros inoxidables

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

El extenso rango de propiedades y características secundarias, presentes en los aceros inoxidables hacen de ellos un grupo de aceros muy versátiles. La selección de los aceros inoxidables puede realizarse de acuerdo con sus características:

Resistencia a la corrosión y a la oxidación a temperaturas elevadas, propiedades mecánicas del acero, características de los procesos de transformación a que será sometido, costo total (reposición y mantenimiento), disponibilidad del acero.

Los aceros inoxidable tienen una resistencia a la corrosión natural que se forma automáticamente, es decir no se adiciona. Tienen una gran resistencia mecánica, de al menos dos veces la del acero al carbono, son resistentes a temperaturas elevadas y a temperaturas criogénicas.

Son fáciles de transformar en gran variedad de productos y tiene una apariencia estética, que puede variarse sometiendo el acero a diferentes tratamientos superficiales para obtener acabado a espejo, satinado, coloreado, texturizado, etc.

Estos aceros ofrecen resistencia a la corrosión, una adecuada relación resistencia mecánica - peso, propiedades higiénicas, resistencia a temperaturas elevadas y criogénicas y valor a largo plazo. Son totalmente reciclables y amigables con el medio ambiente.

En este sentido los aceros inoxidable son ampliamente utilizados en varios sectores, desde la más sofisticada aplicación industrial hasta los utensilios domésticos. Contribuyen, de manera indirecta, a satisfacer las necesidades humanas básicas tales como alimentación, salud, construcción, medio ambiente, transporte y energía.

Algunos ejemplos de productos fabricados con aceros inoxidable son los equipos de procesos químicos y petroquímicos, equipos de proceso de alimentos y bebidas, equipos farmacéuticos, cámaras de combustión, sistemas de escape y filtros automotrices, vagones de ferrocarril, aplicaciones arquitectónicas y estructurales, mobiliario urbano, paneles de aislamiento térmico, intercambiadores de calor, tanques y recipientes,

barriles de cerveza, instrumentos quirúrgicos, agujas hipodérmicas, monedas, tarjas, ollas y sartenes, cubiertos, lavadoras, lavavajillas y utensilios de cocina.

En la industria química y petroquímica, los aceros inoxidables ofrecen elevada resistencia a la corrosión y excelentes propiedades mecánicas así como un bajo costo de mantenimiento. En la industria de alimentos y bebidas y en la industria farmacéutica, proveen excelentes condiciones de higiene además de su resistencia a la corrosión y duración a largo plazo [7].

### 2.5.1 Clasificación de los aceros inoxidables

Los aceros inoxidables se dividen de acuerdo con su microestructura en cinco grupos: ferríticos, martensíticos, austeníticos, dúplex, endurecidos por precipitación \_.

#### 2.5.1.1 Aceros inoxidables ferríticos

El %  $Cr$  de los aceros inoxidables ferríticos se extiende desde el 10,5%  $Cr$  hasta el 30%  $Cr$ . Los aceros con 10-13%  $Cr$  y bajo %  $C$ , por estar cerca del bñucle gamma, a veces debido a la segregación del  $Cr$  durante la solidificación, que se concentra en el centro del grano de ferrita delta, pueden entrar en la zona bifásica de este, y de esta manera tener una estructura dúplex de ferrita con austenita en borde de grano, la que al templarse produce martensita, disminuyendo la resistencia a la corrosión, la plasticidad, y la tenacidad. Por encima de 30% de  $Cr$  se forma una fase intermetálica compuesta por 46% de  $Cr$  y 54% de  $Fe$  llamada fase sigma de composición nominal  $Fe - Cr$ , que disminuye la plasticidad de la aleación. Por esta razón se evitan contenidos de  $Cr$  superiores a 30% [7].

#### 2.5.1.2 Aceros inoxidables martensíticos

Aceros de este grupo en general no contienen más de 14% de  $Cr$  excepto los tipos 440 A, B, y C que contienen 16-18%  $Cr$  y una cantidad de

Carbono suficiente para producir el endurecimiento. Estos tres aceros son solo resistentes a la corrosión en estado de temple pues al tener mucho Carbono si este se encontrase formando carburos (de Cromo) disminuiría la cantidad de  $Cr$  disuelta en el Hierro hasta valores inferiores al 10%, límite inferior del %  $Cr$  para que un acero sea Inoxidable.

Estos aceros pueden ser templados y revenidos de la misma manera que los aceros aleados. Tienen una excelente resistencia mecánica y son magnéticos. Los aceros inoxidables Martensíticos se templean cuando son enfriados directamente al aire luego del proceso de laminación en caliente, por lo tanto deben ser recocidos entre 650°C y 760°C por alrededor de 4 horas luego de la laminación.

Este recocido del proceso difiere del recocido total, que se realiza a 815-870°C con un enfriamiento dentro del horno a velocidades de 40 a 55°C por hora hasta los 540°C y luego enfriados en aire hasta temperatura ambiente.

Ocasionalmente, los aceros martensíticos son comercializados en la condición de revenido, o sea enfriándolos directamente desde la temperatura de laminado al aire, con el objeto de templear al acero y luego reviniéndolos a 540 – 650 °C o también recalentándolos hasta 1010 – 1065 °C, enfriándolo al aire para templearlos y luego reviniéndolos a 540 - 650 °C [7].

### 2.5.1.3 Aceros inoxidables dúplex

La serie de aceros dúplex 312, 315, 318 325 y 329. Son aleaciones base Hierro con  $Cr$  y  $Mo$ , con suficiente cantidad de estabilizadores de la austenita,  $Ni$  y  $N$  para lograr el balance entre ferrita y austenita.

El resultado es una adecuada combinación de estas dos fases, la austenita confiere ductilidad y la ferrita resistencia a SCC. El  $Mo$  hace más resistente a la capa pasivante.

Los carburos de  $Cr$  tienden a precipitar en la interface ferrita-austenita pero obteniendo el  $Cr$  de la Ferrita en donde la difusión es más rápida y la homogeneización del  $Cr$  en la misma es mayor que si fuese austenita y por lo tanto la disminución de la concentración de  $Cr$  en el borde de grano no es tan pronunciada impidiendo la corrosión intergranular.

Nótese que los aceros Inoxidables totalmente ferríticos generalmente resisten la SCC mejor que los austeníticos. Pequeñas adiciones de  $Ni$  aumentan la susceptibilidad a SCC.

Los aceros inoxidables dúplex son aceros con más  $Cr$  para mantener la resistencia a la corrosión de los aceros austeníticos y menos  $Ni$  para aumentar el contenido de ferrita con el objeto de aumentar la resistencia a SCC en medios con cloruros a alta temperatura.

Por lo tanto los aceros dúplex son más resistentes a SCC que los austeníticos pero no totalmente inmunes. Los aceros inoxidables dúplex son aceros con una resistencia a SCC intermedia entre los austeníticos y los ferríticos, la que disminuye con el trabajado en frío. Estos aceros tienen más tenacidad que los ferríticos, debido a ello se los consigue en forma de chapa que se suelen usar para fabricar la placa-tubo de los intercambiadores de calor [7].

#### 2.5.1.4 Aceros inoxidables austeníticos

La adición como mínimo de 8% de níquel a un acero con 18% de cromo lo transforma en austeníticos manteniendo sus características de inoxidabilidad. Esta y otras modificaciones, constituyen la serie 300 de la familia de aceros inoxidables austeníticos o también llamados al cromo - níquel.

La Figura 2.1 muestra una serie de diagramas de equilibrio  $Fe - C$  (hierro - carbono) con 18%  $Cr$  (cromo). Puede observarse como el contenido

creciente de níquel muestra la influencia del mismo para expandir el campo  $\gamma$  (austenita) y disminuir hasta casi un 100% el campo  $\alpha$ .

Se puede observar del diagrama que a temperatura ambiente solo se encuentra austenita y carburos, de hierro y de cromo, dependiendo de la cantidad de carbono de la aleación.

La inherente plasticidad de la estructura cúbica centrada en las caras (FCC) de la austenita provee de tenacidad, reducción en área y excelente resistencia al impacto aun a temperaturas criogénicas a estos aceros.

Para aplicaciones con corrosión es necesario el control del contenido de carbono por debajo de 0,08% (304 y 316). Cuando estos aceros se sueldan se deben tomar precauciones adicionales y frecuentemente se especifican valores de carbono inferiores a 0,03% (304L y 316L).

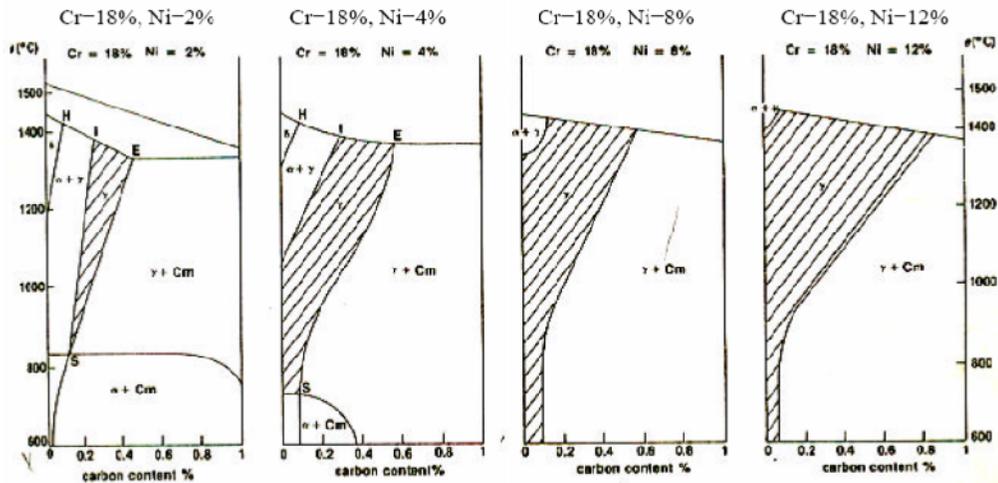


Figura 2.1 Influencia del Níquel en la fase  $\gamma$  de un acero con 18%  $Cr$ .

A veces se adicionan elementos de aleación estabilizantes del carbono, como el titanio o niobio como medio de impedir la formación de carburos de cromo durante el servicio o el procesamiento a altas temperaturas. El carbono se combinará preferiblemente con él  $Ti$  o con el  $Nb$ , permitiendo al

Cr seguir en solución sólida en el hierro para impartir resistencia a la corrosión.

Los aceros inoxidables austeníticos no pueden ser templados para obtener Martensita, ya que el níquel estabiliza a la austenita a temperatura ambiente y aun por debajo de ella. A pesar de la ductilidad inherente de estos aceros es necesario controlar algunos factores para obtener resultados óptimos, sobre todo si se habla de soldadura u otros procesos que utilicen altas temperaturas.

Como familia, la serie 300 de aceros Inoxidables puede identificarse por qué no son magnéticos. Los aceros inoxidables austeníticos son los más usados por su ductilidad lo que los hace ideales para ser soldados, un proceso muy utilizado en la construcción de recipientes y cañerías de la industria química y petroquímica en donde la corrosión es una condición de servicio determinante.

En la soldadura de los aceros inoxidables austeníticos es práctica generalizada mantener la temperatura del material base (y la ZAC) lo más baja posible, esto se logra usando bajas intensidades de corriente (compatibles con una adecuada penetración y fusión), arco corto, secuencia de paso peregrino, cordones cortos, o simplemente esperando que la pieza se enfríe entre cordón y cordón.

Es una práctica corriente limitar la temperatura a valores donde el material pueda tocarse con la mano (70°C). En general no se obtienen beneficios con el precalentamiento (PC) de la soldadura de estos aceros sino más bien un deterioro de la resistencia a la corrosión intergranular como consecuencia de la precipitación de carburos de cromo en borde de grano.

Además el PC aumenta el riesgo de fisuración en caliente y a la distorsión por su mayor coeficiente de dilatación con respecto a un acero ferrítico.

Estos aceros tienen también tres problemas asociados a las altas temperaturas ya sea de servicio o durante la fabricación (soldadura) [7].

## 2.6 Soldabilidad de los aceros inoxidables austeníticos

### 2.6.1 Tendencia al agrietamiento

La tendencia al agrietamiento de la zona fundida y de la zona de influencia térmica en los aceros inoxidables austeníticos al cromo-níquel, ha sido objeto de estudio por varios investigadores, quienes plantean que la razón de las grietas en caliente se debe a la formación de una película de silicatos alrededor de los granos de austenita.

Se ha comprobado que la presencia de una pequeña cantidad de delta ferrita ( $\delta$ ) en la estructura del metal, capaz de precipitar alrededor del grano de austenita, evita la presencia de los silicatos, es decir, que con una estructura compuesta por austenita mas ferrita, se evita la tendencia al agrietamiento de estos aceros.

Se plantea que con 2 a 5% de delta ferrita ( $\delta$ ) es suficiente para evitar el agrietamiento, por lo tanto el metal de aporte debe garantizar un metal depositado con estas características, para esto es necesario el empleo del diagrama de Shaeffler, como se muestra en la figura 2.2.

Este diagrama permite determinar la estructura de un metal conociendo su composición química empleando las siguientes expresiones:

$$\text{Níquel equivalente} = \% \text{ Ni} + 0,5 \% \text{ Mn} + 30\% \text{ C} \quad (2.1)$$

$$\text{Cromo equivalente} = \% \text{ Cr} + \% \text{ Mo} + 1.5\% \text{ Si} + 0.5\% \text{ Nb} + 2\% \text{ Ti} \quad (2.2)$$

Sustituyendo en las expresiones anteriores los porcentajes existentes en cada uno de los elementos y posteriormente trasladando los valores obtenidos al diagrama, se puede establecer la estructura del material. Este diagrama es válido únicamente cuando los elementos se encuentran en proporciones no mayores a: Carbono máx. 0.2%, Manganeso máx. 1.0%, Silicio máx. 1.0%, Molibdeno máx. 3.0%, Niobio máx. 1.5%.

Adicionalmente este diagrama indica problemas que presentan determinadas estructuras al soldar dependiendo de su ubicación en el diagrama, que pueden evitarse al seleccionar adecuadamente el metal de aporte y el procedimiento de soldadura [8].

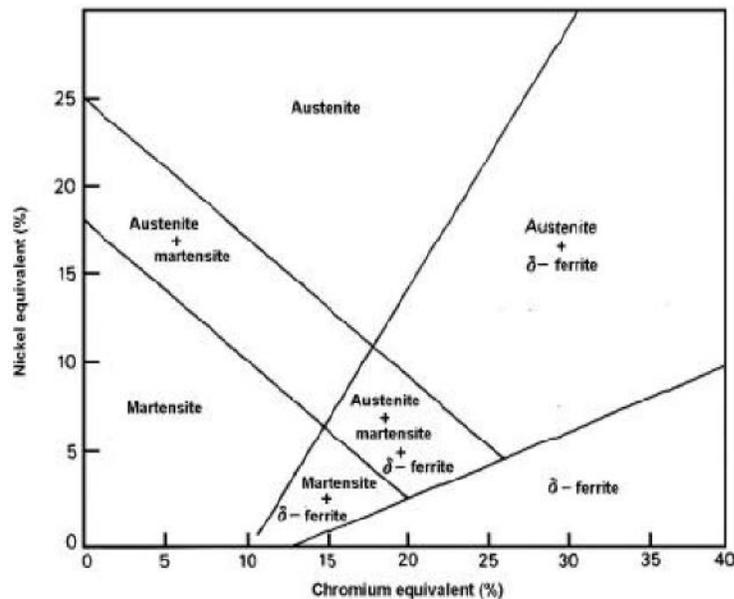


Figura 2.2 Diagrama de Shaeffler para estimar los contenidos de ferrita de depósitos soldados de los aceros inoxidables.

### 2.6.2 Precipitación de carburos de cromo

La corrosión intergranular de los aceros inoxidables austeníticos se basa en la precipitación de carburos de cromo en los bordes de grano de la austenita, cuando son calentados entre 420 – 870°C ó enfriados lentamente

a través de este rango como se muestra en la figura 2.3. El carbono absorbe el cromo en las proximidades del borde del grano de austenita, formando un carburo rico en cromo y ocasiona una descromización local adyacente a estos carburos.

Si el contenido de cromo disminuye a valores menores del 12%, el cual es el límite mínimo de inoxidableidad para estos aceros, esta zona pobre en cromo se encuentra propensa a la corrosión.

El carbono es el elemento fundamental para la formación de los carburos de cromo, por tal razón la solución es reducir su contenido por debajo del límite de solubilidad del carbono en la austenita.

La dificultad de reducir el contenido de carbono por debajo de 0.02% ha conducido a añadir a los aceros inoxidable austeníticos elementos con mayor afinidad por el carbono que el cromo, lo cual conduce a estabilizar el contenido de cromo en la estructura, estos elementos son el titanio, el niobio y el tantalio. La formación del carburo de titanio y de niobio, evitan la formación del carburo de cromo. Los aceros inoxidable austeníticos calentados a temperaturas de 950-1000°C disuelven los carburos de cromo y luego con enfriamientos rápidos al aire impiden dicha precipitación [8].



Figura 2.3 Diagrama representativo del límite de grano sensibilizado de un acero inoxidable tipo 304.

### 2.6.3 Formación de la fase intermetálica sigma

En el diagrama hierro-cromo aparece una fase intermetálica sigma ( $\sigma$ ) para concentraciones elevadas de cromo a temperatura entre 650 - 900°C. Esta fase se obtiene cuando los aceros con alto contenido de cromo se calientan a temperaturas en el rango antes mencionado durante un largo período de tiempo y se debe a una transformación de la fase ferrita a fase sigma.

La fase sigma ocasiona la pérdida de la resistencia al impacto, ductilidad y resistencia a la corrosión. Para evitar la formación de esta fase se recomienda aumentar el contenido de níquel, debido a que el contenido de cromo no se puede disminuir porque se compromete la resistencia a la corrosión de los aceros; también mediante un tratamiento a temperaturas superiores a 1040°C [8].

## 2.7 Principios del proceso GMAW

### 2.7.1 Descripción y denominaciones

El soldeo por arco eléctrico con protección de gas, es un proceso de soldeo en el cual el calor generado por un arco que se establece entre un electrodo consumible y el material que se va a soldar. El electrodo es un alambre macizo, desnudo, que se alimenta de forma continua automáticamente y se convierte en el metal depositado según se consume. El electrodo, arco, metal fundido y zonas adyacentes del metal base, quedan protegidas de la contaminación de los gases atmosféricos mediante un corriente de gas que se aporta por la tobera de la pistola, con céntricamente al alambre/electrodo. El proceso está esquematizado en la figura 2.4.

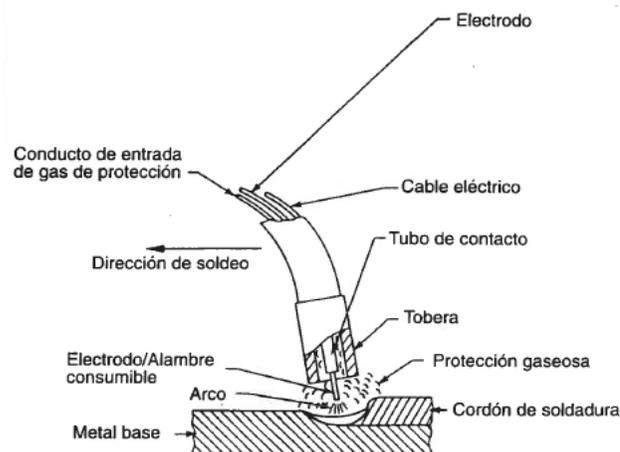


Figura 2.4 Soldeo por arco con gas.

El proceso de soldeo por arco con gas se denomina también: GMAW, gas metal arc welding (ANSI/AWS A3.0) ó soldeo por arco con gas (EN 24063). Si se emplea un gas inerte como protección el proceso se denomina: MIG, metal inert gas (ANSI/AWS A3.0) ó soldeo por arco con gas inerte (EN 24063).

Si se utiliza un gas activo como protección el proceso se denomina: MAG, metal active gas (ANSI/AWS A3.0) ó soldeo por arco con gas activo (EN 24063).

Este proceso de soldeo puede ser automático o manual, al proceso manual se le denomina también semiautomático [9].

### 2.7.2 Ventajas y limitaciones

#### Ventajas

- Puede utilizarse para el soldeo de cualquier tipo de material.
- El electrodo es continuo, con lo que se aumenta la productividad por no tener que cambiar el electrodo y la tasa de deposición es elevada. Se pueden conseguir velocidades de soldeo mucho más elevadas que son SMAW.
- Se puede realizar el soldeo en cualquier posición.

- Se pueden realizar soldaduras largas sin que existan empalmes entre cordones, zona de peligros de imperfecciones.
- No se requiere eliminar la escoria, puesto que no existe [9].

#### Limitaciones

- El equipo de soldeo es más costoso, complejo y menos transportable que el de SMAW.
- Es difícil de utilizar en espacios restringidos, requiere conducciones de gas y agua de refrigeración, tuberías, botellas de gas de protección, por lo que no puede emplearse en lugares relativamente alejados de la fuente de energía.
- Es sensible al viento y a las corrientes de aire, por lo que su aplicación al aire libre es limitada [9].

#### 2.7.3 Modos de transferencia en el proceso GMAW para la mezcla de gases $Ar - CO_2$ .

En el soldeo por arco con electrodo metálico y gas de protección, se pueden utilizar distintos modos de transferencia. Los parámetros de soldadura que determinan qué tipo de transferencia se debe elegir son entre otros, el gas de protección, el espesor de la chapa a unir y la posición de soldeo. La existencia de los distintos modos de transferencia se puede observar en la figura 2.5. Para el proceso MAG con la mezcla de gases de protección  $Ar - CO_2$  [10].

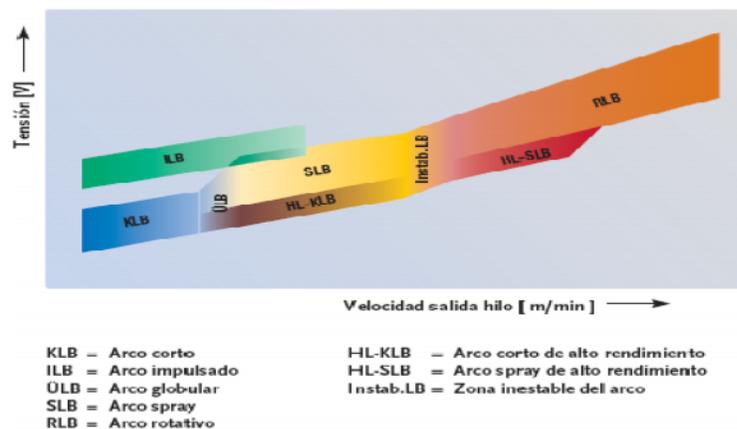


Figura 2.5 Campo de existencia de los distintos modos de transferencia MAG, mezcla  $Ar - CO_2$ .

El arco corto (cortocircuito KLB), se utiliza para el soldeo de chapa fina, en posiciones difíciles y en el soldeo de raíces. La transferencia de material se produce en forma de gotas no más grandes que el diámetro del electrodo en cada cortocircuito, ver figura 2.6 [10].



Figura 2.6 El arco corto (cortocircuito KLB).

El arco globular (ÜLB), con mayor tasa de deposición se utiliza en el soldeo de espesores medianos, con mezclas de argón y  $\text{CO}_2$ . La transferencia se produce en forma de gotas mayores que el diámetro del electrodo que caen por gravedad, ver figura 2.7 [10].



Figura 2.7 El arco globular (ÜLB).

El arco largo (ILB), con alta tasa de deposición, no permite el soldeo de grandes espesores con  $\text{CO}_2$ . La transferencia se produce en forma de gota gruesa y con salpicaduras.

Arco spray (SLB), Se caracteriza por altas tasas de deposición, mayor velocidad de soldeo y mayor penetración, utilizando mezclas con base argón. La transferencia del material se produce en forma de gotas finas, sin cortocircuitos y con pocas salpicaduras, ver figura 2.8 [10].



Figura 2.8 Arco Spray.

Arco rotativo (HL), Soldero de alto rendimiento de piezas de gran espesor, con mezclas especiales de base argón, en las que participa el helio. La composición de estas mezclas condicionan el tipo de arco y modo de transferencia del metal de aporte, así con distintas mezclas se obtienen el arco corto de alto rendimiento (HL-KLB), arco spray (HL-SLB) o arco rotativo (RLB) [10].



Figura 2.9 Arco rotativo (HL).

Arco pulsado (ILB), Se utiliza en los procesos MIG/MAG, con mezclas ricas en argón. La transferencia del metal de aporte se produce de forma controlada con cada uno de los impulsos de la corriente de soldeo, sin que se produzcan cortocircuitos. De entre todos los modos de transferencia, éste es el que produce menor cantidad de salpicaduras. El arco pulsado no se puede utilizar con  $\text{CO}_2$ , como gas de protección, ver figura 2.10 [10].

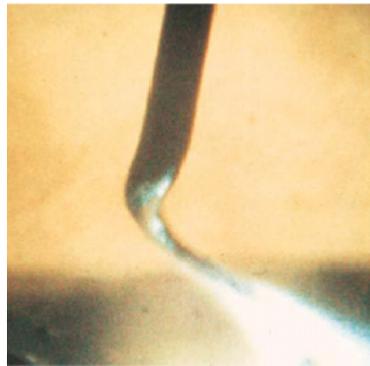


Figura 2.10 Arco pulsado (ILB).

## 2.8 Gases de Protección

El objetivo fundamental del gas de protección es la de proteger al metal fundido de la contaminación por la atmósfera circundante. Muchos otros factores afectan a la elección del gas de protección.

Algunos de estos son: material a soldar, modo de transferencia de metal de aportación deseado, penetración y forma del cordón, velocidad de soldeo y precio del gas.

Los gases utilizados en el soldeo MIG/MAG son:

- Dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ )
- Argón, helio ó argón + helio
- Argón +  $\text{CO}_2$  ó helio +  $\text{CO}_2$
- Argón + oxígeno (1-10% de oxígeno, siendo muy utilizada la mezcla con 5% de oxígeno)
- Argón + oxígeno +  $\text{CO}_2$

- Argón + helio + CO<sub>2</sub>
- Argón + helio + CO<sub>2</sub> + oxígeno

El soldeo se denominara MAG cuando se utilicen gases activos y MIG cuando se utilicen los inertes.

En general, se utilizan los gases inertes para el soldeo de los materiales no féreos y aceros inoxidable, utilizándose el CO<sub>2</sub> puro solamente con los aceros al carbono; las mezclas de argón + CO<sub>2</sub> y argón + oxígeno se aplican también al soldeo de aceros y en muchos casos para aceros inoxidable. Cuando se utiliza CO<sub>2</sub>, no se puede obtener una transferencia en spray.

Una de las mezclas más utilizadas en el soldeo MAG es argón + 8-10% de CO<sub>2</sub>, utilizándose generalmente con transferencia spray. Las mezclas argón + CO<sub>2</sub> con un porcentaje de este ultimo mayor o igual al 25%, se utilizan para transferencia en cortocircuito en el soldeo de aceros al carbono y de baja aleación.

Con arco pulsado se utilizan mezclas de argón y dióxido de carbono (generalmente con un 5% de CO<sub>2</sub>), ó mezclas de argón, helio y CO<sub>2</sub>.

Con un caudal de gas muy bajo la cantidad de gas de protección es insuficiente. Con un caudal de gas muy alto puede haber turbulencias y formación de remolinos en el gas. El caudal de gas dependerá en gran medida del tipo de material base.

Para obtener una buena protección el ángulo de trabajo no debe ser mayor de 10 a 20°. El tubo de contacto debe estar centrado en la boquilla y las proyecciones depositadas en la tobera de gas y en la boquilla de contacto deben retirarse regularmente [11].

### 2.8.1 Propiedades de los gases de protección y su influencia en la soldadura.

La función principal del gas protector es proteger el baño fundido de la contaminación o efectos perjudiciales que puede provocar el contacto con la

atmósfera. Con este objetivo, se pueden utilizar distintos gases. Los más utilizados son: el argón ( $Ar$ ), el helio ( $He$ ), hidrógeno ( $H_2$ ), nitrógeno ( $N_2$ ), oxígeno ( $O_2$ ) y dióxido de carbono ( $CO_2$ ), en estado puro o mezclados. Las propiedades particulares del gas o mezcla de gases utilizados influirán de manera determinante en las características de la soldadura obtenida y en el proceso de realización de la misma.

En el proceso de realización de la soldadura, el gas protector afecta al cebado y estabilidad del arco, a la velocidad de soldadura, al calor aportado a la pieza de trabajo, al transporte del metal de aportación y a la generación de gases. Además afecta a la penetración, a las propiedades mecánicas, a la forma y al aspecto de la soldadura obtenida [11].

### 1. Potencial de ionización

El potencial de ionización indica la energía que hay que aportar a un determinado gas para hacerlo conductor. El objetivo es que los átomos de gas cedan electrones y se conviertan en partículas de gas eléctricamente cargadas. Esta propiedad está relacionada con el cebado y la estabilidad del arco. Cuanto menor sea el potencial de ionización, más fácilmente aportará el gas los electrones tanto para el inicio como para el mantenimiento del arco. Por otro lado, el calor desprendido en el arco es función de la corriente, la longitud y el potencial del arco.

Para igualdad de corriente y longitud de un arco, un gas con mayor potencial de ionización tendrá un mayor potencial de arco, lo que producirá un mayor desprendimiento de calor [11].

### 2. Conductividad térmica

La conductividad térmica del gas determina la transmisión de calor que se produce desde el arco hacia la periferia. Esto influirá en cómo se reparta el calor sobre la zona a soldar, y por lo tanto en la penetración que pueda

lograrse en la soldadura, en la figura 2.11 se muestra la variación de la conductividad térmica en función de la temperatura [11].

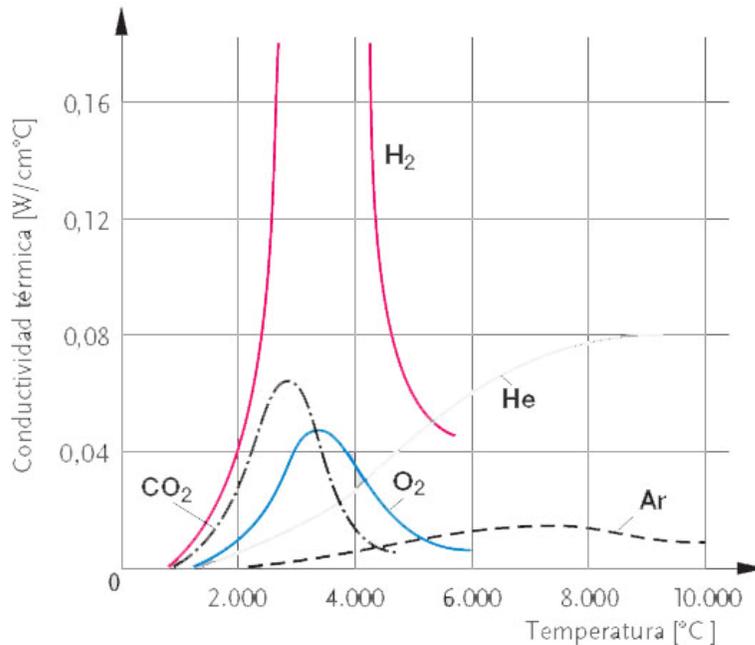


Figura 2.11 Conductividad térmica de varios gases de protección vs temperatura. Fuente: [http://www.linde.com/international/web/ig/es/like35lges.nsf/repositorybyalias/10958\\_gases%20de%20protecci%C3%B3n%20para%20soldadura/\\$file/Gases%20de%20protecci%C3%B3n%20para%20la%20Soldadura%2010958-0410.PDF](http://www.linde.com/international/web/ig/es/like35lges.nsf/repositorybyalias/10958_gases%20de%20protecci%C3%B3n%20para%20soldadura/$file/Gases%20de%20protecci%C3%B3n%20para%20la%20Soldadura%2010958-0410.PDF).

### 3. Capacidad de disociación y recombinación

Los gases con moléculas no monoatómicas, al calentarse a las temperaturas del arco se disocian. Los átomos que los componen se separan, en forma de iones, mejorando el flujo de corriente.

Al entrar en contacto con la superficie del metal base, que estará a una temperatura mucho menor, se recombinan, cediendo calor al metal base [11].

### 4. Reactividad

Esta propiedad indica la tendencia del gas a reaccionar con elementos del baño de fusión a la temperatura del arco eléctrico. Los gases nobles, y

$He$  son inertes. El  $N_2$ , que a temperaturas inferiores es inerte, reacciona produciendo efectos indeseados en la soldadura. El  $CO_2$  y el  $O_2$  son gases oxidantes, que reaccionan con el metal formando óxidos y normalmente producen gases en la soldadura.

El  $H_2$  que es reductor, evita la oxidación, pero también puede producir efectos indeseados en la soldadura [11].

### **5. Tensión superficial**

La tensión superficial indica la tendencia de los átomos del fluido a mantenerse juntos y no fluir en un determinado medio. La tensión superficial del baño variará según la atmósfera que lo rodee, e influirá de forma importante en la forma del cordón. Por ejemplo, el baño de fusión de acero dulce, suele tener una elevada tensión superficial en atmósfera de argón. Las mezclas de argón con pequeñas proporciones de oxígeno o dióxido de carbono consiguen tensiones superficiales inferiores. En el caso del acero se suelen utilizar gases diferentes del argón [11].

### **6. Pureza**

Las impurezas contenidas en el gas de protección pueden causar efectos tanto en el proceso de realización de la soldadura como en las características finales de las mismas. Los efectos de las impurezas serán más o menos dañinos, según la naturaleza del metal base. Algunos metales, como los aceros al carbono, no se ven muy afectados por las impurezas; otros sin embargo, como el aluminio y el magnesio, son muy sensibles a la presencia de impurezas [11].

### **7. Densidad**

Es un factor importante en el efecto protector del gas. Si es más pesado que el aire se podrán utilizar caudales inferiores [11].

## 2.8.2 Propiedades de los gases de protección argón y dióxido de carbono.

### 1. Argón (Ar)

Está presente en la atmósfera, en concentraciones inferiores al 1%. Se obtiene por destilación fraccionada del aire líquido. Sus características como gas de protección son:

- Es inerte, no reacciona con los elementos del baño de fusión.
- Es aproximadamente 1.4 veces más pesado que el aire.
- Potencial de ionización bajo: favorece el cebado y la estabilidad del arco.
- Conductividad térmica baja: concentra el calor del arco, aumentando la penetración.

Al ser más pesado que el aire que proporciona una buena protección. Su peso atómico es alto, por lo que consigue una acción de limpieza más enérgica al chocar iones de mayor tamaño contra la capa de óxido. Esto justifica su aplicación en la soldadura de aluminio o magnesio.

Tiene un bajo potencial de ionización, es decir, se vuelve conductor con relativa facilidad. Se facilita el cebado y el arco es más estable. Su conductividad térmica es baja, por lo que el calor se concentra en un arco estrecho y las soldaduras que se producen son estrechas y con gran penetración. La zona afectada por el calor es pequeña. Las dos propiedades anteriores, bajos potenciales de ionización y conductividad térmica, hacen que el calor liberado en el arco sea poco sensible a la longitud del arco, y no se altere la forma del cordón.

Esto lo hace especialmente interesante para la soldadura manual. El calor liberado por el arco es bajo, debido a que también lo es el potencial de ionización, por eso su aplicación resulta interesante para la soldadura de

materiales de pequeños espesores, porque se corren menos riesgos de desfondar el baño [11].

## 2. Dióxido de carbono ( $CO_2$ )

Al dióxido de carbono se le denomina comúnmente anhídrido carbónico. Es un gas incoloro, no tóxico, inerte, inodoro y de sabor picante. Su peso específico es de  $1,97 \text{ Kg/m}^3$ , 1,5 veces más pesado que el aire. Para su uso en la soldadura debe tener una pureza del 99,7% mínimo y estar exento de humedad. Se obtiene industrialmente por la combustión del carbón o compuestos del carbono en presencia de oxígeno o aire (su concentración en la atmósfera varía entre un 0,03% y un 0,06% en volumen).

Se trata de un gas de carácter oxidante que a elevada temperatura del arco tiende a disociarse de acuerdo con la siguiente reacción:

- En el arco:  $2 CO_2 = 2CO + O_2$  (absorción de calor)

Y, en la recomposición:

- En la base:  $2 CO + O_2 = 2 CO_2$  (cesión de calor)

El oxígeno resultante de la disociación es particularmente activo. Se combina con el carbono del acero para dar de nuevo  $CO$ , con lo que se produce un empobrecimiento en carbono si no se utiliza un hilo con suficiente contenido en elementos desoxidantes como el silicio y el manganeso y la cantidad adecuada de carbono.

El monóxido de carbono liberado es un gas tóxico; no obstante, las cantidades desprendidas durante ocho horas de trabajo no llegan a los mínimos de peligrosidad.

Si la densidad de corriente es elevada, provoca una mayor disociación del oxígeno convirtiéndole en más activo todavía. El carácter oxidante de la

atmósfera de dióxido de carbono obliga a utilizar hilos de aporte ricos en elementos desoxidantes.

No se debe utilizar en la soldadura de aceros al cromo-molibdeno por el riesgo de oxidación del cromo tanto del metal base como del aportado en el hilo (pérdida de dureza), ni en la de los aceros inoxidables austeníticos, pues favorecería la formación de carburos de cromo con la consiguiente pérdida de resistencia a la corrosión.

Con cantidades de dióxido de carbono inferiores al 99 %, es inevitable la porosidad. Las soldaduras solo estarán exentas de poros si la pureza del dióxido de carbono es superior al 99,85% y el nitrógeno y el hidrógeno son inferiores cada uno a 0,05%.

Es un gas mucho más barato que el argón, capaz de conseguir penetraciones mucho más profundas y anchas en el fondo del cordón, lo que mejora su contorno. Además reduce el riesgo de mordeduras y faltas de fusión.

El dióxido de carbono no puede ser mencionado realmente más que como gas de arco corto, puesto que incluso para mayores intensidades, por ejemplo, 450 A para diámetro 1,6, se obtiene solamente una frecuencia disminuida de cortocircuito. El mismo proceso del arco voltaico es con este gas muy poco estable.

Su principal inconveniente estriba en que produce arcos relativamente enérgicos y que, por tanto, provocan un gran número de proyecciones que, inevitablemente, influye en la productividad del proceso, pues deben limpiarse buzas, electrodos y piezas con más frecuencia que con mezcla de gases.

Es el único gas que puede utilizarse individualmente como atmósfera protectora en la soldadura de acero al carbono. Su elevada conductividad

térmica en relación con el argón producirá en sus mezclas con éste un incremento en la penetración.

El tamaño de las gotas es igual al diámetro del hilo-electrodo; solo después de haber estallado de forma violenta y explosiva, se transporta el material al baño de fusión.

Debe mencionarse también que el dióxido de carbono, al ser un gas frío, precisa un calentador junto al manorreductor para evitar congelaciones, obstrucciones y averías sobre éste [11].

### **3. Mezclas de argón y dióxido de carbono $Ar - CO_2$**

Se suelen utilizar estas mezclas con cantidades de dióxido de carbono que van del 2,5 al 18%. Al soldar con arco corto con este tipo de mezclas, el transporte del material (del alambre de soldadura al baño de fusión) se realiza también en cortocircuito, produciéndose gotas muy finas, inferiores al diámetro del hilo.

La separación se realiza a consecuencia del efecto amortiguador del impulso de corriente de los gases de la mezcla, en forma más suave que con dióxido de carbono. La oxidación es menor y el transporte está dirigido axialmente.

Aumenta la visibilidad del baño, disminuyen las turbulencias, el baño de fusión adquiere menor temperatura y disminuyen notablemente las proyecciones, obteniendo un mejor aspecto del cordón. Esta mezcla está homologada en toda Europa por las normas DIN 5859-SG2 y 5859-SG3 para un determinado tipo de electrodos con materiales base. Se emplea principalmente como gas de protección en la soldadura MAG de aceros de construcción, aleados y sin alear, como pueden ser tuberías de acero, construcción naval, mecánica, entre otros.

Al ser una mezcla seca, no precisa calentador de gas. El único inconveniente de la mezcla es de tipo económico. Sin embargo, hay que comparar la incidencia del valor del gas en el coste final de la soldadura y, por otra parte, la mejora del factor de marcha y la obtención de mejores características mecánicas en la unión soldada.

En la figura 2.12 a se representan las formas de las columnas de plasma obtenidas en función del gas de protección en soldeo MIG ó MAG y la figura 2.13 representa la forma de los cordones que se pueden obtener con los gases  $Ar$  y  $CO_2$  en el soldeo MIG ó MAG, para observar esta figura se debe tener en cuenta que no es una indicación de la penetración sino solo de la forma del cordón [11].

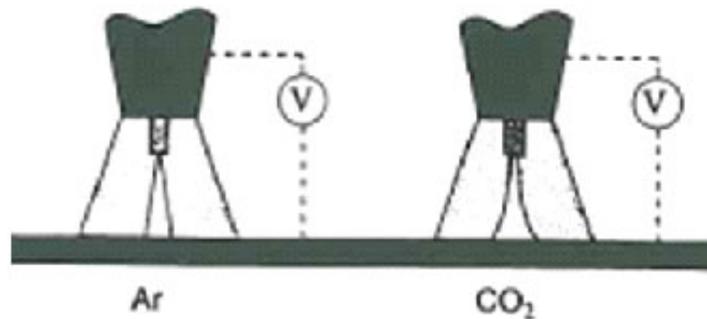


Figura 2.12 Forma de la columna de plasma en función del gas de protección (soldeo MIG o MAG).

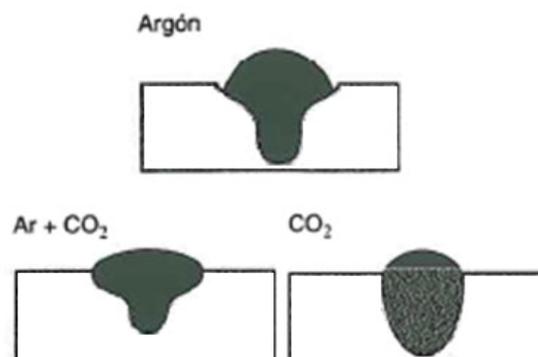


Figura 2.13 Forma del cordón en función del gas de protección soldeo (MIG o MAG).

## 2.9 Espectroscopía de emisión

Espectroscopía es la medición e interpretación de la radiación electromagnética absorbida, dispersada o emitida por átomos, moléculas u otras especies químicas.

Estos fenómenos están asociados con cambios en los estados de energía de las diferentes especies. Por consiguiente, dado que cada especie posee estados energéticos característicos, la espectroscopía puede utilizarse para identificarlas. La espectroscopía constituye la base del análisis espectroquímico, en el que la interacción de la radiación electromagnética con la materia se utiliza para obtener información cualitativa y cuantitativa acerca de la composición de una muestra. Dentro del análisis espectroquímico, la espectroscopía atómica estudia la absorción y emisión de la radiación por especies atómicas, iónicas y moleculares libres.

Estas especies son generadas y examinadas en un medio gaseoso de alta energía, que constituye una fuente de vaporización-atomización-ionización-excitación.

El término espectroscopía de emisión normalmente se aplica a los métodos en los que se aplica un estímulo térmico o eléctrico.

La energía radiante emitida cuando el analito regresa a su estado basal puede dar información sobre la naturaleza del mismo y de su concentración.

Los resultados de este análisis suelen representarse en forma de un espectro, es decir, un gráfico de la radiación emitida en función de la frecuencia o longitud de onda.

Cuando la muestra se estimula con una fuente de radiación electromagnética externa, pueden tener lugar varios procesos.

Por ejemplo, la radiación puede ser dispersada o reflejada. Para obtener información sobre el analito, se mide la radiación electromagnética emitida cuando este regrese a su estado basal, o puede medirse la cantidad de radiación absorbida como consecuencia de la excitación. Los tipos de espectroscopía de emisión se muestran en la tabla 2.2 [12].

Tabla 2.2 Tipos de espectroscopia de emisión:

<i>Tipo de espectroscopía</i>	<i>Método de atomización</i>	<i>Fuentes de radiación</i>
Arco	Mediante calentamiento de la muestra por arco eléctrico	muestra
<b>Chispa</b>	Muestra excitada por chispa eléctrica de alto voltaje	muestra
Plasma de argón	Muestra calentada por plasma de argón	muestra

Fuente: Skoog, D. A. y otros. (2004).

# CAPÍTULO 3

## *Marco Metodológico*

---

### **3.1 Nivel de la investigación**

De acuerdo al problema planteado referido a la influencia de la proporción de la mezcla de gases de protección sobre la microestructura y las propiedades mecánicas en juntas soldadas, y en función de sus objetivos se asume que el nivel de esta investigación es de carácter descriptivo, la cual consiste en: "... la caracterización de un hecho, fenómeno o grupo con el fin de establecer su estructura o comportamiento" [13], dado que se busca caracterizar las uniones soldadas de acero inoxidable austenítico AISI 304 a diferentes condiciones de ensayos con el fin de establecer su comportamiento ante la variación de la proporción de la mezcla  $Ar - CO_2$ .

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

En el marco de la investigación planteada, cuyo objetivo central se basa en el efecto de diferentes proporciones de una mezcla de gases de protección  $Ar - CO_2$  sobre una junta soldada de acero inoxidable austenítico AISI 304, se aplicó un diseño experimental.

Este tipo de diseño permite manipular las variables independientes (supuestas causas), 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 vías 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 Fase I. Caracterización del material base y material de aporte

1. Se registró la composición química, propiedades mecánicas y demás características del acero AISI 304 proporcionado por el proveedor y luego se realizaron los ensayos correspondientes para su verificación.
2. Se seleccionó e identificó el electrodo que se empleará en la ejecución de la soldadura.
3. Se registró la composición química, propiedades mecánicas y características más sobresalientes de los electrodos además de las recomendaciones para su uso.

### 3.2.2 Fase II. Obtención de las proporciones de la mezcla de gas de protección

1. Se obtuvieron las siguientes proporciones de la mezcla  $Ar - CO_2$ .  
 $Ar: 100\%$ ,  $CO_2: 100\%$ ,  $Ar: 95\% - CO_2: 5\%$ ,  $Ar: 90\% - CO_2: 10\%$ ,  $Ar: 85\% - CO_2: 15\%$ ,  $Ar: 80\% - CO_2: 20\%$ ,  $Ar: 75\% - CO_2: 25\%$ , con el certificado de calidad por parte del proveedor véase anexos 3,4,5,6,7,8.

### 3.2.3 Fase III. Preparación de las probetas

1. Se realizó el corte de las láminas a soldar a partir de una inicial.
2. Se diseñó y se preparó las juntas para soldar.
3. Se determinaron los parámetros de soldadura a utilizar por cada mezcla de gases de protección.
4. Se realizaron las soldaduras de láminas según proporción de la mezcla de los gases de protección  $Ar - CO_2$  con el proceso GMAW a tope con bisel a  $60^\circ$ .
5. Se realizaron los cortes de las probetas según norma ASME sección 9 QW 463.1 (a) para láminas de menos de  $\frac{3}{4}$ " de espesor.

6. Se mecanizaron las probetas según la norma ASME sección 9 QW-462.1(a) para el ensayo a tracción.
7. Se mecanizaron las probetas según la norma ASME sección 9 QW-462.3(a) para el ensayo de dobles.
8. Se mecanizaron las probetas para el estudio metalográfico y el ensayo de microdureza Vickers.
9. Se mecanizaron las probetas para la espectroscopia.

#### 3.2.4 Fase IV. Realización de ensayos y estudios metalográficos

1. Se realizaron los ensayos destructivos de tracción y doblado a un total de 56 probetas, distribuidos de la siguiente manera: 35 probetas para ensayo de tracción y 21 probetas para ensayo de dobles.
2. Se prepararon un total de 7 probetas para el estudio de microscopía óptica, las cuales serán también utilizadas en el ensayo de microdureza Vickers
3. Se prepararon un total de 7 probetas para la espectroscopía.
4. Se realizaron los ensayos de microscopía óptica, y de microdureza Vickers utilizando una carga de 100 gr.
5. Se realizó la espectroscopía.

#### 3.2.5 Fase V. Evaluación de las propiedades mecánicas y metalurgia de la soldadura

1. Se registraron los datos, y las observaciones realizadas de los ensayos y estudios establecidos, se realizaron gráficos comparativos y algunos cálculos que permitieron un mejor enfoque del comportamiento de la

soldadura a diferentes condiciones de ensayos, luego se realizó el análisis de los resultados obtenidos.

2. Se establecieron conclusiones y recomendaciones.

### **3.3 Población y muestra**

En el presente trabajo especial de grado la población se encuentra representada por el acero inoxidable austenítico AISI 304. Las muestras están constituidas por 70 probetas en total; de las cuales 35 estuvieron destinadas para el ensayo de tracción, 21 probetas para ensayo de dobles y 7 probetas para el estudio metalográfico y para ensayo de microdureza, además de 7 probetas para la espectroscopia.

De esta manera por cada proporción de la mezcla de gases de protección  $Ar - CO_2$ , se tienen 5 probetas para el ensayo de tracción, 3 probetas para el ensayo de dobles, 1 probeta para el estudio de microscopía óptica y para el ensayo de microdureza Vickers y 1 probeta para la espectroscopia.

### **3.4 Tipo de muestreo**

El tipo de muestreo es probabilístico, ya que se conoce la probabilidad que tiene cada elemento de integrar la muestra.

### **3.5 Técnicas e instrumentos de recolección de datos**

Las técnicas que se emplearon para la recolección de datos son: la observación directa en la ejecución de la soldadura, la aplicación de ensayos destructivos de tracción y dobles, estudios de microscopía óptica, ensayo de microdureza Vickers, espectroscopía y el análisis documental proveniente de la bibliografía recopilada. Los instrumentos que se emplearon para la recolección de datos son: Fichas para anotar los parámetros de soldadura utilizados, un control computarizado acoplado al equipo universal de ensayos de materiales

(GALDABINI de 20 Ton), el cual permitió registrar los datos obtenidos del ensayo a tracción, tabla de observaciones del ensayo de dobles, fotografías para recolectar información de los estudios macroscópicos y un computador para recopilar la información bibliográfica.

### **3.6 Técnicas de procesamiento y análisis de datos**

Una vez organizados los datos obtenidos de cada ensayo, se procedió a aplicar técnicas de procesamiento de datos tales como tablas y gráficos, a fin de determinar las tendencias de la información registrada, se realizaron comparaciones y de esta manera se establecieron causales entre las variables estudiadas.

### **3.7 Materiales y equipos a utilizar**

1. Lámina de acero inoxidable AISI 304 de de dimensiones 1400 mm x 340 mm x 6 mm.
2. Electrodo AWS – ER308 de 0,9 mm de diámetro
3. Máquina para soldadura por arco metálico con protección gaseosa GMAW.
4. Esmeril angular.
5. Guillotina.
6. Equipo universal de ensayo de materiales.
7. Mandril macho y hembra para el ensayo de doblado.
8. Pulidora metalográfica.
9. Microscopios ópticos
10. Microdurómetro Vickers.
11. Equipo para ataque electrolítico marca ElectroMet.

12. Cámara digital.

### **3.8 Herramientas a utilizar**

1. Papeles de esmeril de finura de grano creciente: 120, 240, 280, 320, 400, 600, 1200.
2. Etanol.
3. Acido Oxálico al 10%.
4. Alúmina en polvo fina y gruesa.
5. Secador de probetas.
6. Vernier, cinta métrica, escuadra, rayador de metal, lentes protectores, entre otros.

### **3.9 Desarrollo de las fases metodológicas**

#### **3.9.1 Caracterización del material base y material de aporte**

##### **Material base**

El material que se empleó para realizar los ensayos es un acero inoxidable AISI 304, comúnmente llamado el acero inoxidable “todo propósito”, tiene propiedades adecuadas para gran cantidad de aplicaciones.

Se recomienda para construcciones ligeras soldadas en las que el recocido no es práctico o posible, pero que requieren buena resistencia a la corrosión por ejemplo: equipos químicos de proceso, equipos de proceso y manejo de alimentos, intercambiadores de calor, equipo para hospitales, entre otras aplicaciones. Otras propiedades del tipo 304 son su servicio satisfactorio a altas temperaturas (800° a 900°C) y buenas propiedades mecánicas. El tipo 304 contiene bajo carbono con lo que se evita la precipitación de carburos durante periodos prolongados de alta temperatura; tiene un contenido de carbono de

0.08% máximo por lo que se le considera un material satisfactorio para la mayoría de las aplicaciones con soldadura. Por estas razones se eligió este tipo de acero cuya composición química se refleja en la tabla 3.1

Tabla 3.1 Composición Química del acero inoxidable AISI 304

<i>Composición química</i>					
%C	0,041	%Mo	0,068	%Co	0,111
%Mn	1,16	%Ni	8,14	%Ti	0,0038
%P	0,029	%Cr	18,03	%Si	0,470
%S	0,004	%Cu	0,0620		

Fuente: Certificado de calidad del acero inoxidable AISI 304, proporcionado por el distribuidor, véase anexo 1

Ahora bien, se procede a comparar la composición química del material de entrega según lo muestra el certificado de calidad del proveedor con la composición química que debería poseer un acero AISI 304 tal como lo muestra la tabla 3.2

Tabla 3.2 Composición Química del acero inoxidable AISI 304

AISI	DIN	UNS	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni
	W.N. 17007	design.	%	%	%	%	%	%	%
304	1.4301	S30400	0,08	2	0,045	0,03	0,75	18-20	8-10,5
304L	1.4306	S30403	0,03	2	0,045	0,03	0,75	18-20	8-12
304H	-	S30409	0,04-0,1	2	0,045	0,03	0,75	18-20	8-10,5

Fuente: Norma ASTM A-240 96a.

Según el certificado de calidad el material base coincide con las características químicas de un acero AISI 304, posteriormente se realizó un ensayo de espectroscopía para comprobar dicha composición.

El material base fue sometido a un ensayo de tracción por parte del distribuidor para determinar sus propiedades mecánicas, esfuerzo máximo ( $\sigma_{max}$ ), esfuerzo de fluencia ( $\sigma_f$ ) cuyos resultados se registran en la tabla siguiente:

Tabla 3.3 Propiedades mecánicas del acero inoxidable AISI 304

<i>Material</i>	$\sigma_{max}$ (MPa)	$\sigma_f$ (MPa)	% <i>Elongación</i>
Acero inoxidable AISI 304	703	389	53

Fuente: Certificado de calidad del acero inoxidable AISI 304, proporcionado por el distribuidor, véase anexo 1

Posteriormente se realizó el ensayo de tracción correspondiente para verificar el producto con el cual se trabajó.

#### Material de aporte (electrodos consumibles)

Se seleccionó el electrodo de acero inoxidable cuya especificación viene dada por la AWS A 5.9, el cual es: ER 308, la composición química se muestra en la tabla 3.4.

#### Lincoln ER 308

Químicamente balanceados y manufacturados para ser usados con el apropiado acero inoxidable a ser soldado.

#### Aplicaciones típicas

Soldadura de aceros inoxidables, mediante procesos de GMAW (MIG), GTAW (TIG). Este alambre puede ser utilizado en todas las aplicaciones del tipo de 308.

La gama más alta restringida del carbón asegura la fuerza del arrastramiento del metal de la autógena está en el alto extremo de la gama 308. El electrodo se utiliza específicamente para el tipo acero inoxidable de la soldadura de 304H.

Tabla 3.4 Composición química del metal depositado

<i>Composición química</i>									
Clasificación AWS	%C	%Mn	%P	%S	%Si	%Cr	%Cu	%Ni	%Mo
ER 308	0,03	1-2,5	0,03	0,03	0,3 – 0,65	19,5 - 22	0,75	9 - 11	0,75

Fuente: Catálogos de electrodos Lincoln Electric, proporcionado por el distribuidor, véase anexo 2

### 3.9.2 Preparación de probetas

#### Corte de lámina

Inicialmente se tomó una lámina con las siguientes características:

Tabla 3.5 Características de la lámina inicial

<i>Tipo de material</i>	<i>Dimensiones (mm)</i>		
	<i>Largo</i>	<i>Ancho</i>	<i>Espesor</i>
AISI 304	1400	340	6

De la lámina inicial, se extrajeron 14 secciones de 340 x 100 x 6 mm, para ello se utilizó una guillotina marca PEARSON.

#### Soldadura de las láminas

Se realizó la soldadura de 7 cupones, cada uno constituido por pares de láminas de 340 x 100 x 6 mm. El método utilizado fue el proceso por arco metálico con protección gaseosa (GMAW), la soldadura se hizo a tope, con bisel a 60° tal como se muestra en la figura 3.1.

52 *Influencia de la proporción de la mezcla de gases de protección sobre la microestructura y las propiedades mecánicas en juntas soldadas de acero inoxidable austenítico AISI 304 mediante soldadura GMAW.*

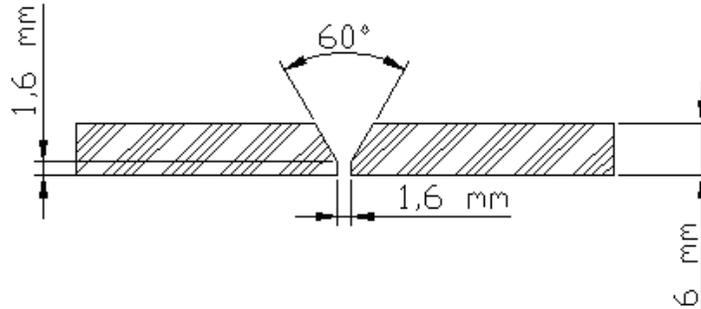


Figura 3.1 Diseño de la junta.

Para la ejecución del trabajo por parte del soldador se elaboraron las especificaciones del procedimiento de soldadura tal como se muestra en la tabla 3.6 y 3.7 según QW – 200.1 Sección IX, Código ASME.

Tabla 3.6 Especificación del procedimiento de soldadura.

<p><b>Nombre de la Compañía:</b> ININCA C.A.</p> <p><b>Especificación del Procedimiento de Soldadura No. 001 Fecha:</b> Mayo 2009</p> <p><b>Proceso de Soldadura:</b> Proceso de arco metálico con protección gaseosa – GMAW</p> <p><b>Tipo:</b> Semiautomático</p>	
<p><b>Junta</b> QW – 402</p> <p><b>Diseño de la Junta:</b> A Tope–Bisel en V</p> <p><b>Respaldo:</b> (Si) <input type="checkbox"/> (No) X</p> <p><b>Metal base</b> QW – 403</p> <p><b>Especificación, Tipo y Grado:</b> AISI 304</p> <p><b>Tipo:</b> Chapa <b>Espesor:</b> 6 mm</p> <p><b>Rango de espesor de metal base</b> QW 451.1</p>	<p><b>Detalles</b></p>
<p><b>Metal de relleno</b> QW – 404</p> <p><b>Clase AWS No.</b> ER - 308</p> <p><b>Diámetro:</b> 0,9 mm</p>	<p><b>Pre calentamiento</b> QW – 406</p> <p><b>Temperatura Pre calentamiento:</b> N/A</p> <p><b>Temperatura entre Pasadas Máxima:</b> N/A</p> <p><b>Mantenimiento del Pre calentamiento:</b> N/A</p>

Tabla 3.6 Especificación del procedimiento de soldadura.

<p><b>Características eléctricas</b> QW – 409                  Para electrodo ER 308  <b>Corriente:</b> continua Polaridad: inversa / positiva  <b>Intensidad:</b> 105 - 110 <b>Tensión</b> 18V – 24V</p>	<p><b>Técnica</b> QW – 410                  Cordoneado y oscilación máxima de 2.5 veces el diámetro del electrodo                  Limpieza inicial y entre pasadas con cepillado manual.</p>
---	---

Tabla 3.6 Especificación del procedimiento de soldadura.

Pases de Soldadura	Proceso	Metal de aporte		Corriente		Rango de Tensión (V)	Rango de Velocidad de Avance (wfs)
		Clase	Diámetro (mm)	Tipo de Polaridad	Rango de Intensidad (A)		
1	GMAW	ER308	0,9	CD-PI	105 - 110	18 – 24	220 - 250
2	GMAW	ER308	0,9	CD-PI	105 - 110	18 – 24	220 - 250

En la Figura 3.2 se muestra al soldador calificado durante el proceso de soldadura.



Figura 3.2 Proceso de soldadura por arco metálico con protección gaseosa (GMAW).

### Corte de piezas para probetas

Cada cupón se examinó visualmente y se removieron las piezas de los mismo según la norma ASME sección 9 QW – 463.1 (a) para láminas de menos de 3/4” de espesor.

Luego, a cada pieza se le realizó una pequeña identificación con la proporción de gases a la que fue sometido, a fin de poder diferenciarlas y evitar confusiones posteriores.

En la Figura 3.3 se muestra una representación del orden de remoción de piezas para las probetas sobre el cupón con sus respectivas dimensiones en mm.

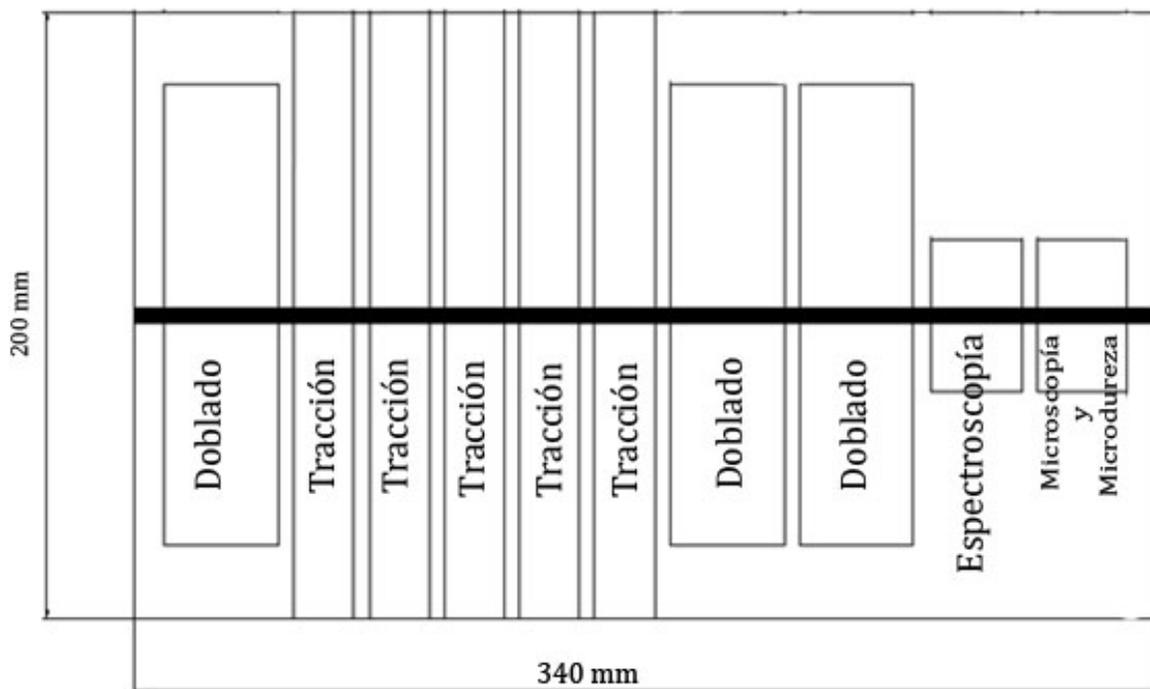


Figura 3.3 Representación del orden de remoción de piezas para probetas sobre el cupón.

Fuente: Norma ASME sección 9 QW - 463.1 (a).

## Mecanizado de probetas

Una vez removidas las piezas de los cupones, se mecanizaron con la finalidad de obtener un total de 35 probetas para ensayos de tracción y 21 probetas para ensayo de dobles, también fueron producidas 7 probetas con el objeto de realizar estudios metalográfico y de microdureza, según las normas respectivas de realización de cada ensayo.

### 3.9.3 Realización de ensayos mecánicos y estudio metalograficos

Existe una variedad de ensayos a través de los cuales se pueden obtener distintas propiedades mecánicas de los materiales, en este caso de uniones soldadas, estas propiedades permiten la adecuada selección del material para una aplicación determinada.

Con el fin de determinar los efectos de la variación de la proporción de gases de protección en juntas soldadas de acero inoxidable austenítico AISI 304 mediante el proceso de soldadura GMAW se seleccionaron diferentes tipos de ensayos que servirán para evaluar dichos efectos.

#### 3.9.3.1 Ensayo de Tracción

Las probetas para el ensayo de tracción se diseñaron según la norma ASME sección 9 QW- 462.1(a) (figura 3.4), utilizando la máquina GALDABINI de ensayos mecánicos (figura 3.5), dicho ensayo consiste en someter a una probeta normalizada, a un esfuerzo axial de tracción creciente hasta que se produce la ruptura de la probeta.

56 *Influencia de la proporción de la mezcla de gases de protección sobre la microestructura y las propiedades mecánicas en juntas soldadas de acero inoxidable austenítico AISI 304 mediante soldadura GMAW.*

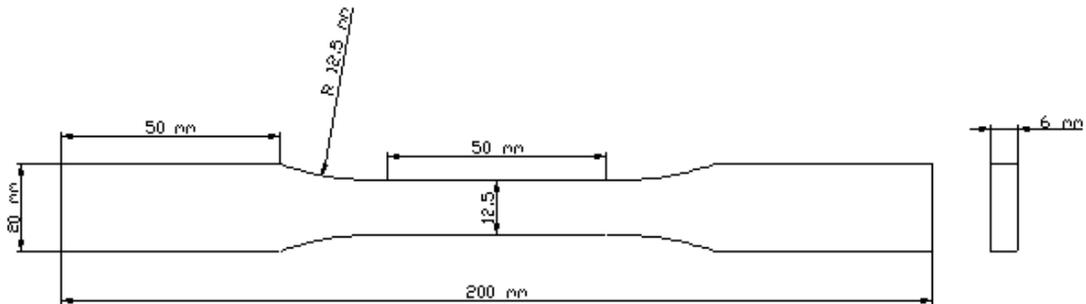


Figura 3.4 Dimensiones de la probeta de tracción según norma ASTM E8M-04. Todas las medidas están en mm. Fuente: Norma ASME sección 9 QW- 462.1(a)



Figura 3.5 Máquina GALDABINI de ensayos mecánicos

La fuerza y la elongación son registradas digitalmente por un controlador automatizado conectado a la máquina de tracción. Los datos obtenidos de fuerza y elongación pueden convertirse a fin de obtener la curva ingenieril de la siguiente manera:

- Se divide la fuerza medida entre el área transversal de la sección original de la probeta para obtener el esfuerzo.

- Se divide la elongación entre la longitud original de la probeta para obtener la deformación.

Con estos datos se construye la curva esfuerzo vs. Deformación para cada probeta ensayada. Esta curva proveerá información sobre el punto de fluencia, esfuerzo máximo, esfuerzo de ruptura para cada condición establecida.

### 3.9.3.2 Ensayo de doblez

La prueba de doblez es un método para medir la ductilidad de los materiales metálicos (de él no se obtiene ningún valor específico), las probetas se realizaron según la norma ASME sección 9 QW- 462.3(a) (ver figura 3.6).

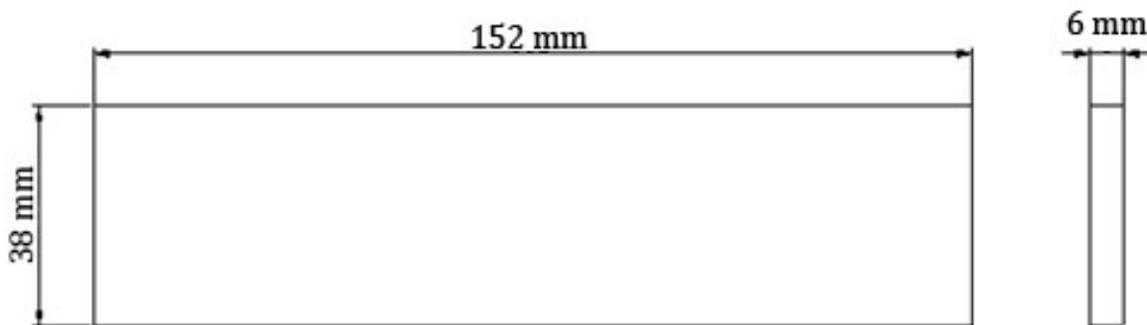


Figura 3.6 Dimensiones de la probeta de doblado según norma ASTM E-190. Todas las medidas están en mm. Fuente: Norma ASME sección 9 QW- 462.3(a).

Para esta prueba se colocó la probeta horizontalmente entre los soportes de un mandril hembra cuya distancia entre dichos soportes es de 50 mm, con la costura a la mitad del claro.

El punzón macho de 37 mm de diámetro, se fuerza hacia abajo para deformar la probeta hasta darle forma de U, tal fuerza es ejercida por el equipo universal de ensayos GALDABINI.

Si después del doblado la superficie convexa no muestra grietas u otros defectos evidentes con longitud mayor a 1/8 de pulgada, se considera que la probeta (soldadura) ha pasado la prueba..

### 3.9.3.3 Estudio metalográfico

Se realizó un estudio macroscópico a fin de observar la geometría del cordón de soldadura en las probetas, y un estudio de microscopía óptica para visualizar el cambio de microestructura en la soldadura, igualmente inclusiones no metálicas, grietas, entre otros ambos estudios se realizaron con el mismo ataque químico ya que el mismo revela el cordón y la microestructura.

Por cada condición de las proporciones de la mezcla de gases  $Ar - CO_2$  se tomó una probeta para este ensayo, obteniéndose un total de 7 probetas.

#### Macroscopía

Para la preparación de las probetas se procedió a desbastar con papel de lija 120, 240, 280, 320, 400, 600, 1200. Luego se realizó el ataque químico a la cara en estudio con ácido oxálico mediante un proceso electrolítico y posteriormente se lavó con agua corriente y se le aplicó etanol para evitar la oxidación y finalmente se secó con aire caliente, lo anterior se realizó a fin de observar macroscópicamente el cordón de soldadura.

#### Microscopía óptica

El proceso de desbaste se realizó nuevamente con el papel de lija, para eliminar, la capa atacada, seguidamente se pulieron con dos paños y diferentes granulometría de alúmina como sigue: Lona (con alúmina de 1 micrón) y paño verde (con alúmina de 0,05 micrones).

Una vez preparada la probeta se atacó mediante un proceso electrolítico con ácido oxálico al 10%, durante 50 segundos para revelar la microestructura,

utilizando el equipo para ataques electrolíticos marca Electromet (figura 3.7), una vez atacada se lava con agua corriente y se le aplica etanol para luego secarla con aire caliente.

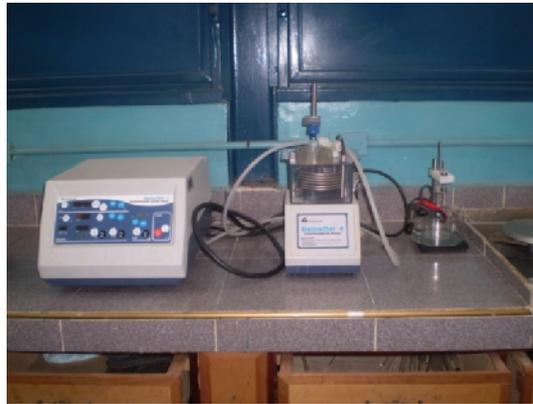


Figura 3.7 Equipo para ataques electrolíticos marca Electromet.

Una vez atacadas fueron llevadas a un analizador de imágenes (microscopio óptico ver figura 3.8) en el cual fueron observadas a 100X, 200X y 400X. Las imágenes seleccionadas revelan la microestructura de la soldadura y defectos diversos; es decir, la metalurgia de la soldadura, según norma **ASM Metals Handbook volumen 9 año 2004**.

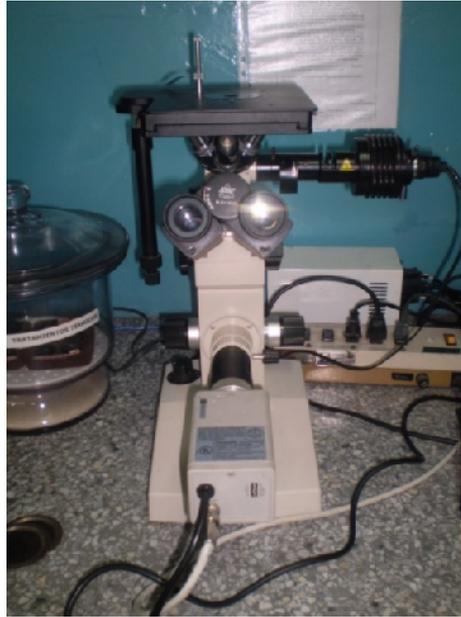


Figura 3.8 Microscopio óptico.

#### 3.9.3.4 Ensayos de microdureza Vickers

Este método es muy difundido ya que permite medir microdureza en prácticamente todos los materiales metálicos independientemente del estado en que se encuentren y de su espesor.

Para determinar la microdureza Vickers se utilizaron las mismas probetas que para metalografía, llevándose a cabo en un microdurómetro de huella de base piramidal marca BUEHLER (figura 3.9) con una carga de **100 gr**, para este ensayo se requiere que las muestras sean pulidas y atacadas químicamente para así visualizar las zonas características de la soldadura, según norma ASTM **E 384 - 99**.



Figura 3.9 Microdurómetro de huella de base piramidal marca BUEHLER.

El ensayo consiste en realizar un barrido lineal perpendicular al cordón de soldadura, el barrido estaba constituido de 3 impresiones por cada zona, obteniéndose un total de 9 impresiones por barrido, tal como se muestra en la figura 3.10.

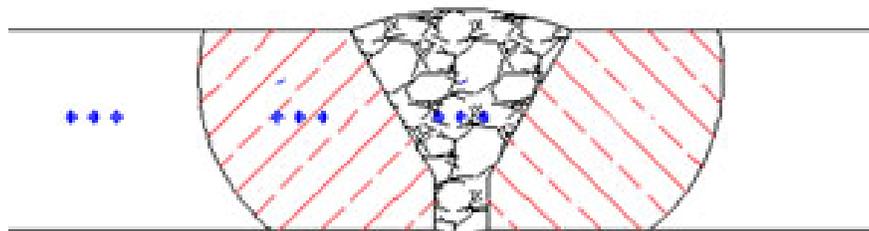


Figura 3.10 Representación de las impresiones por barrido realizadas sobre las probetas.

La impresión sobre la superficie de la probeta es un cuadrado y la distancia entre entalles lo indica un contador calibrado en milésimas de milímetros se observaron detalladamente los valores de las diagonales obtenidas, y con la ayuda del microdurómetro se determinó el número de dureza correspondiente,

luego de tener los valores se procedió a realizar un promedio entre ellos y posteriormente con el resultado obtenido se construyó un perfil de dureza en cada una de las probetas soldadas con los diferentes tipos de proporciones de gases de protección para cada una de las zonas presentes en la junta soldada.

#### 3.9.3.5 Ensayo de Espectrometría

Las probetas se entregaron a la empresa Laboratorio de producción de moldes con una superficie lisa, ya que una superficie irregular afectaría la integridad estructural de la máquina ( spectro ), para ello se mecanizó el refuerzo del cordón a fin de proveer esta condición.

La empresa se encargó de realizar el procedimiento, el cual era con una chispa de 13000 voltios en una cámara de vacío la cual contenía 18 fototubos y un prisma, el cual le otorgaba un color a cada componente. También se encargó de proveer los resultados para las 7 muestras suministradas, una por cada proporción de la mezcla Ar-CO<sub>2</sub>, realizando dicho análisis en el metal base y en el cordón de soldadura de las mismas.

# CAPÍTULO 4

## *Resultados y Análisis*

---

---

### 4.1 Caracterización del metal base

#### 4.1.1 Composición química

El certificado de calidad proporcionado por el distribuidor del material indica la composición química que se muestra en la tabla 3.1, en este sentido para comprobar que la composición del mismo corresponde a la indicada por el certificado se realizó un análisis químico para el metal base de 7 muestras correspondientes a cada una de las juntas soldadas por cada proporción de gases de protección, arrojando los resultados mostrados en la tabla 4.1 Y 4.2.

Tabla 4.1 Porcentaje de los elementos químicos presentes en las muestras ensayadas.

<i>Elemento</i>	<i>Ar: 100%</i>	<i>Ar: 95%</i> <i>– CO2: 5%</i>	<i>Ar: 90%</i> <i>– CO2: 10%</i>	<i>Ar: 85%</i> <i>– CO2: 15%</i>
<i>Cr</i>	19,42%	19,429%	19,377%	19,325%
<i>Ni</i>	7,32%	7,322%	7,4355%	7,549%
<i>Mn</i>	1,23%	1,224%	1,229%	1,234%
<i>P</i>	0,14%	0,187%	0,1695%	0,152%
<i>S</i>	0,10%	0,099%	0,1005%	0,102%
<i>C</i>	0,08%	0,075%	0,0745%	0,074%
<i>Si</i>	0,60%	0,609%	0,6165%	0,624%
<i>Mo</i>	0,51%	0,582%	0,5405%	0,499%
<i>v</i>	0,04%	0,095%	0,0955%	0,096%

Tabla 4.2 Porcentaje de los elementos químicos presentes en las muestras ensayadas.

<i>Elemento</i>	<i>Ar: 80% – CO2: 20%</i>	<i>Ar: 75% – CO2: 25%</i>	<i>CO2: 100%</i>
<i>Cr</i>	19,607%	19,753%	18,64%
<i>Ni</i>	7,45%	7,405%	7,581%
<i>Mn</i>	1,244%	1,247%	1,274%
<i>P</i>	0,138%	0,14%	0,36%
<i>S</i>	0,102%	0,101%	0,131%
<i>C</i>	0,042%	0,077%	0,081%
<i>Si</i>	0,615%	0,641%	0,48%
<i>Mo</i>	0,498%	0,52%	1,336%
<i>v</i>	0,096%	0,102%	0,11%

Al comparar los datos con los del certificado de calidad se obtuvieron diferencias en las cantidades de cada uno de los componentes, sin embargo están bajo los límites permisibles que catalogan a esta aleación como AISI 304 tal como se muestra en la tabla 3.2.

#### 4.1.2 Propiedades mecánicas

Para verificar las propiedades mecánicas suministradas por el proveedor del material y las cuales se muestran en la tabla 3.3 se realizó un ensayo de tracción a 5 probetas, al promediar los valores obtenidos de todas las probetas se obtienen las propiedades mecánicas mostradas en la tabla 4.3.

Tabla 4.3 Promedio de los valores correspondientes a las propiedades mecánicas de las probetas ensayadas para el material base.

<i>Esfuerzo de Fluencia (MPa)</i>	<i>Esfuerzo Máximo (MPa)</i>	<i>Alargamiento (%)</i>
380	698	30

Se observó cierta diferencia con respecto al suministrado por el certificado de calidad, sin embargo las propiedades registradas están dentro del límite de valores admisibles para esta aleación.

## 4.2 Parámetros de soldadura a utilizar

Con la finalidad de establecer los parámetros que se utilizarán para la soldadura de las probetas con las distintas proporciones de la mezcla de gases de protección y sin que los mismos afecten el análisis del experimento, se procedió a realizar una serie de pruebas basadas en el aspecto del cordón, en cupones de material base pero usando la proporción de *Ar*: 100%, luego de obtener los parámetros para esta proporción se fijaron y se mantuvieron constantes para la soldadura de las probetas con las distintas proporciones.

Los parámetros de soldadura pueden afectar radicalmente las propiedades mecánicas y metalúrgicas de la junta soldada, el objetivo de la investigación es determinar la influencia de los gases de protección en las mismas, así que deben mantenerse constantes las magnitudes de estos parámetros a fin de llevar a cabo el experimento de manera satisfactoria tal como lo muestra la tabla 4.4.

Tabla 4.4 Parámetros de soldadura a utilizar por cada proporción de gases de protección.

Proporciones de la mezcla <i>Ar</i> – <i>CO2</i>	Intensidad de corriente (amp)	Voltaje (volts)	Velocidad (wfs)
<i>Ar</i> : 100%	108	21	251
<i>Ar</i> : 95% – <i>CO2</i> : 5%	110	21	251
<i>Ar</i> : 90% – <i>CO2</i> : 10%	107	21	251

Tabla 4.4 Parámetros de soldadura a utilizar por cada proporción de gases de protección.

Proporciones de la mezcla Ar – CO <sub>2</sub>	Intensidad de corriente (amp)	Voltaje (volts)	Velocidad (wfs)
Ar: 85% – CO <sub>2</sub> : 15%	110	21	251
Ar: 80% – CO <sub>2</sub> : 20%	110	21	251
Ar: 75% – CO <sub>2</sub> : 25%	110	21	251
CO <sub>2</sub> : 100%	110	21	251

### 4.3 Resultados del ensayo de tracción para las probetas soldadas a diferentes proporciones de la mezcla de gases de protección Ar – CO<sub>2</sub>.

En base a la curva característica de cada ensayo se determinaron las propiedades siguientes: esfuerzo de fluencia, esfuerzo máximo y deformación elástica.

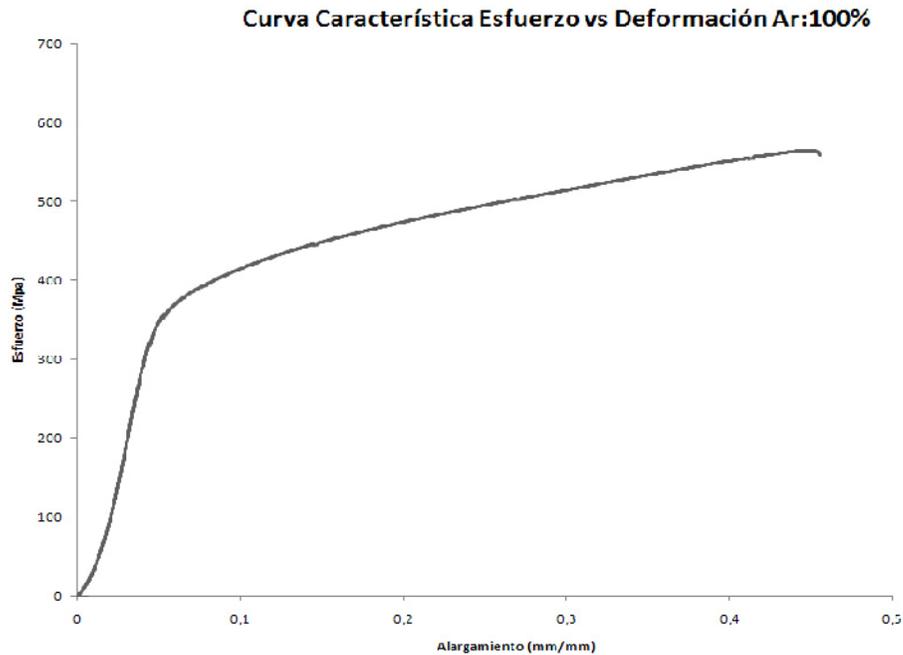


Figura 4.1 Curva característica de Esfuerzo vs. Deformación de las probetas soldadas con la proporción Ar: 100%.

**Curva característica de Esfuerzo vs. Deformación de las probetas soldadas con la proporción Ar:95% - CO2:5%**

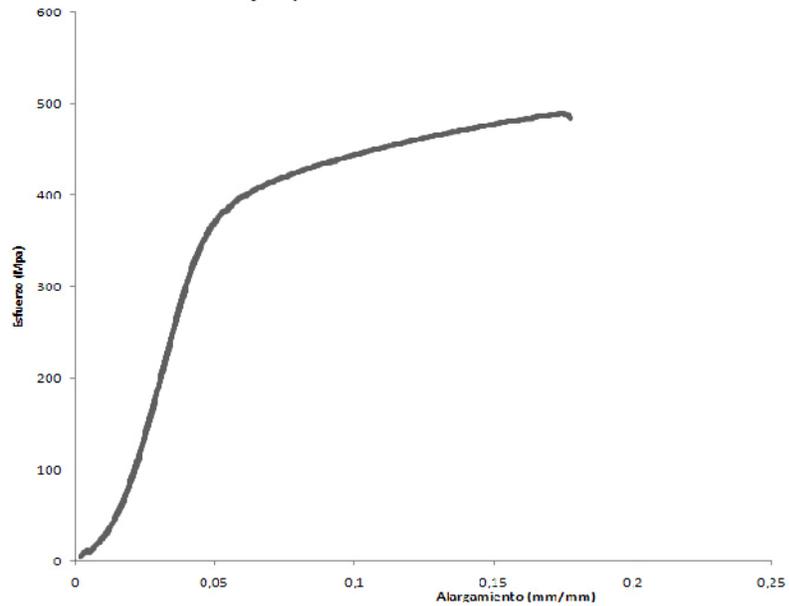


Figura 4.2 Curva característica de Esfuerzo vs. Deformación de las probetas soldadas con la proporción Ar: 95% – CO2: 5%.

**Curva característica de Esfuerzo vs. Deformación de las probetas soldadas con la proporción Ar:90%-CO2:10%**

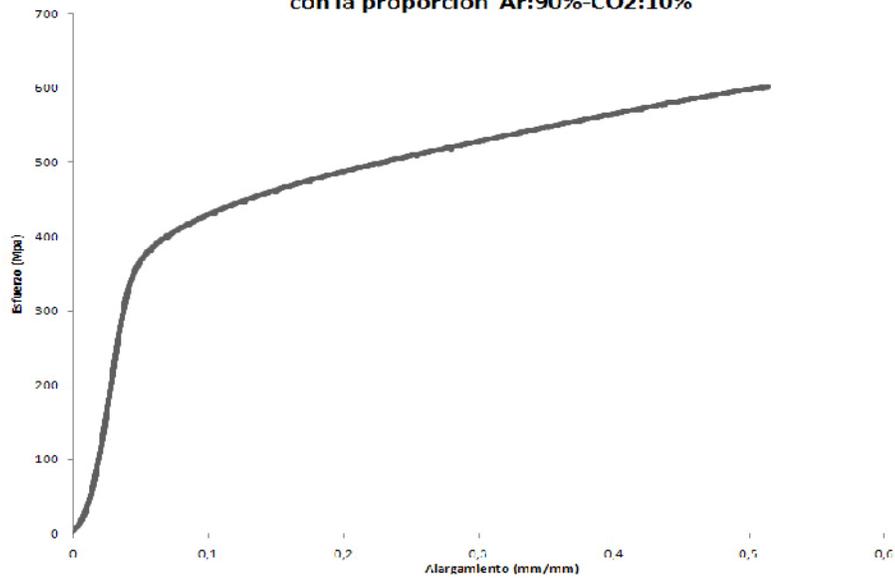


Figura 4.3 Curva característica de Esfuerzo vs. Deformación de las probetas soldadas con la proporción Ar: 90% – CO2: 10%.

68 *Influencia de la proporción de la mezcla de gases de protección sobre la microestructura y las propiedades mecánicas en juntas soldadas de acero inoxidable austenítico AISI 304 mediante soldadura GMAW.*

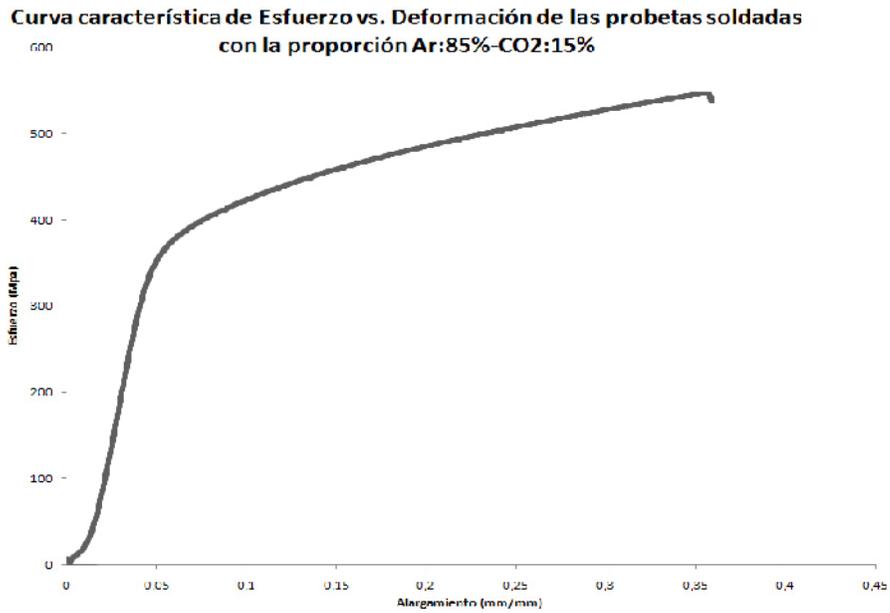


Figura 4.4 Curva característica de Esfuerzo vs. Deformación de las probetas soldadas con la proporción Ar: 85% – CO2: 15%.

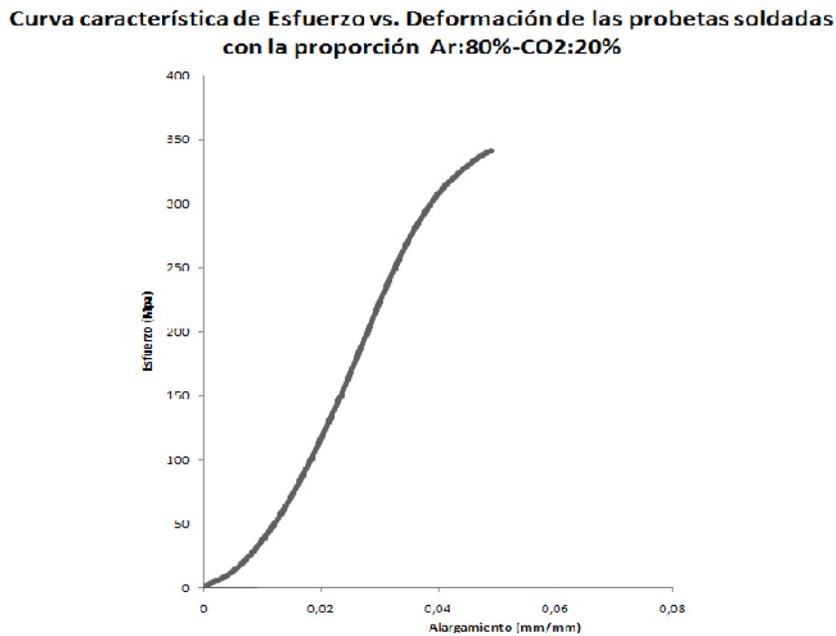


Figura 4.5 Curva característica de Esfuerzo vs. Deformación de las probetas soldadas con la proporción Ar: 80% – CO2: 20%.

**Curva característica de Esfuerzo vs. Deformación de las probetas soldadas con la proporción Ar:75%-CO2:25%**

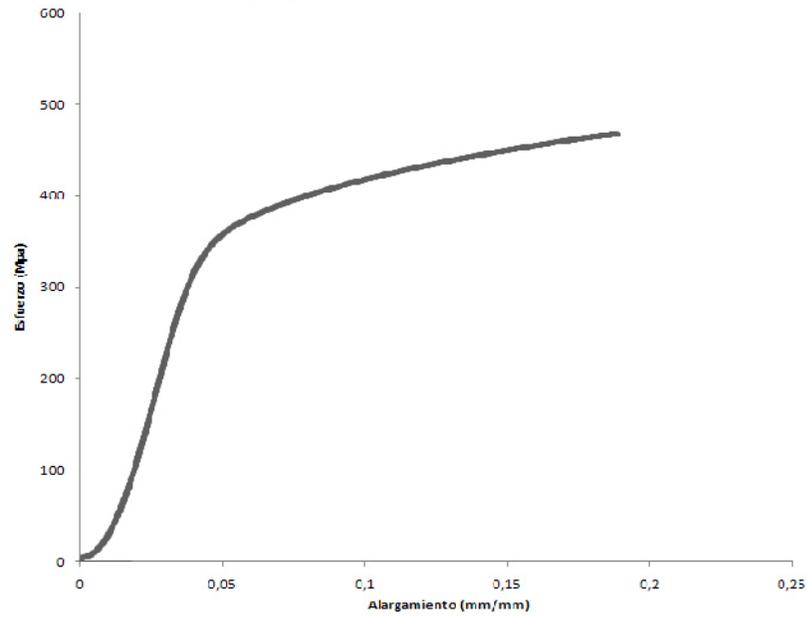


Figura 4.6 Curva característica de Esfuerzo vs. Deformación de las probetas soldadas con la proporción Ar: 75% – CO2: 25%.

**Curva característica de Esfuerzo vs. Deformación de las probetas soldadas con la proporción CO2:100%**

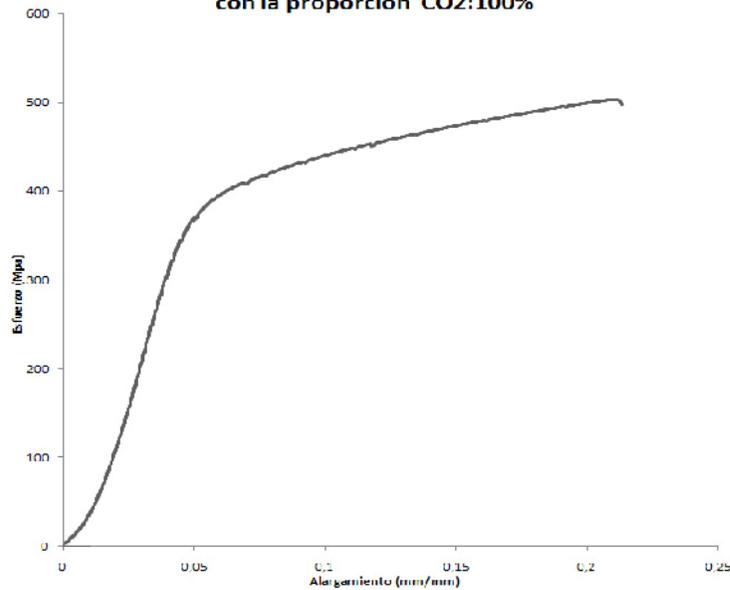


Figura 4.7 Curva característica de Esfuerzo vs. Deformación de las probetas soldadas con la proporción CO2: 100%.

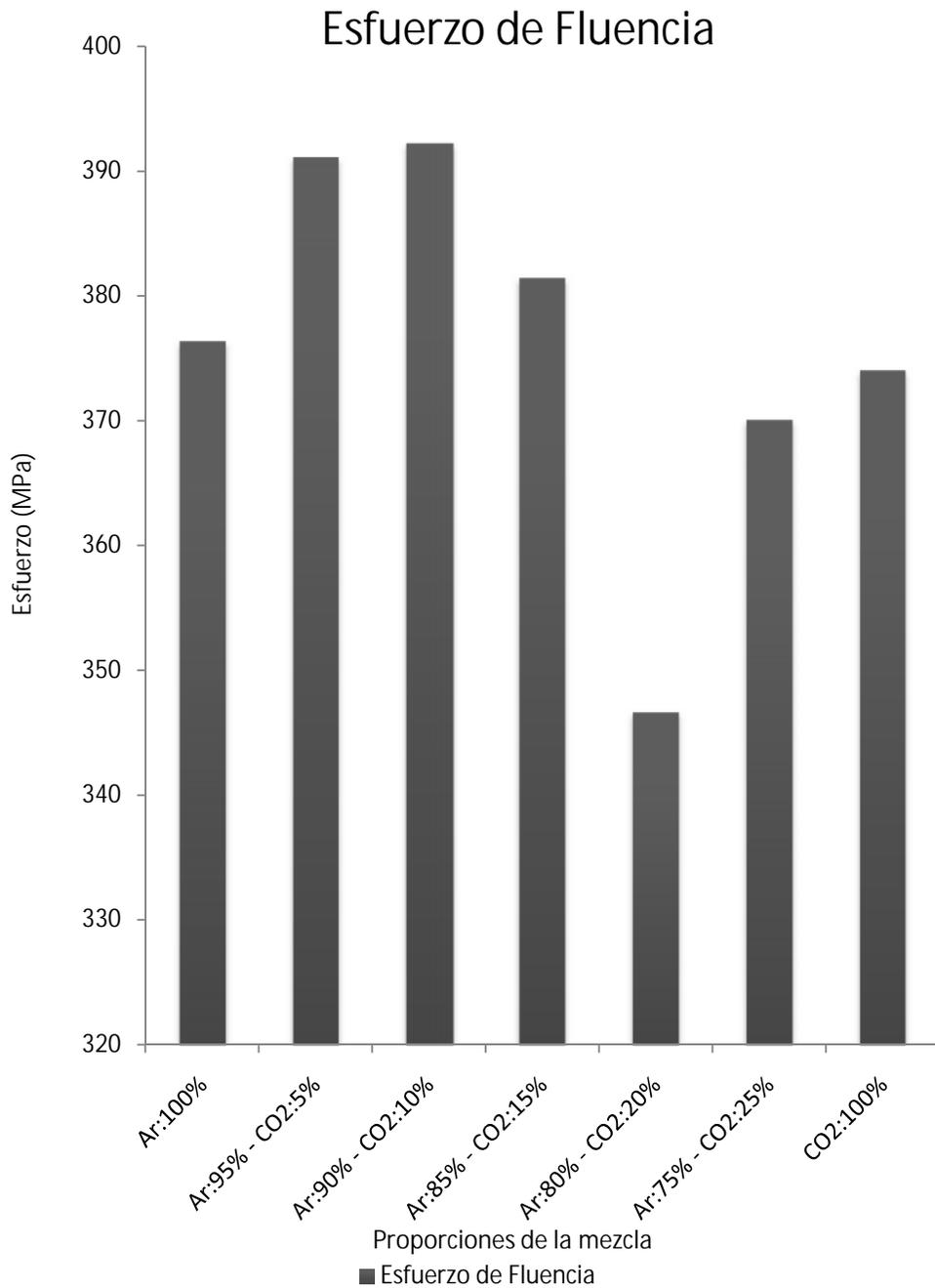


Figura 4.8 Curvas de Esfuerzo de fluencia vs. Proporciones de la mezcla de gases de protección, cada punto de las curvas representan los valores promedio de las probetas ensayadas por cada proporción a su vez está representada la línea de tendencia de dicho esfuerzo.

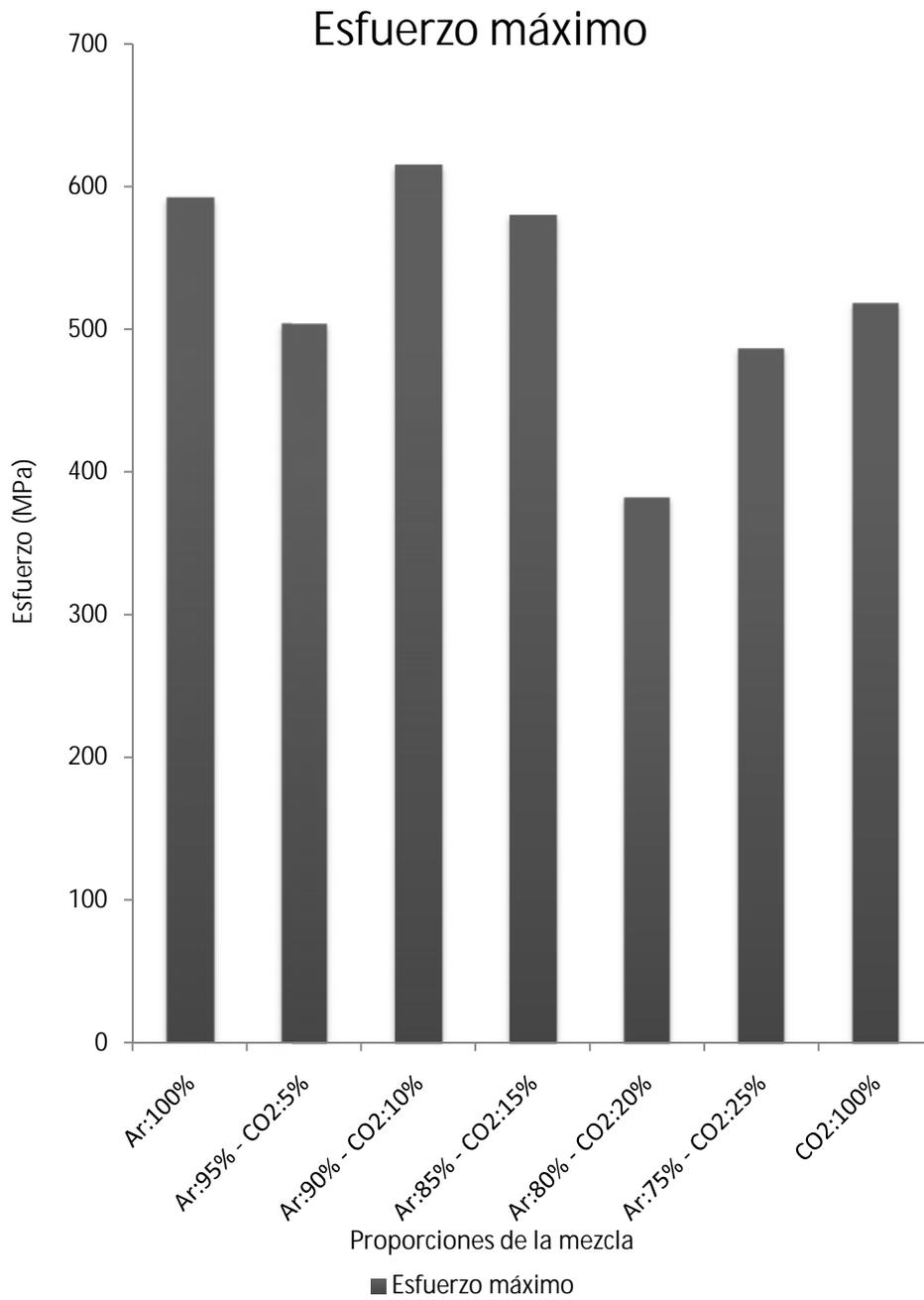


Figura 4.9 Curvas de Esfuerzo de Máximo vs. Proporciones de la mezcla de gases de protección, cada punto de las curvas representan los valores promedios de las probetas ensayadas por cada proporción a su vez está representada la línea de tendencia de dicho esfuerzo.

### Comparación del comportamiento entre el Esfuerzo de Fluencia y el Esfuerzo Máximo

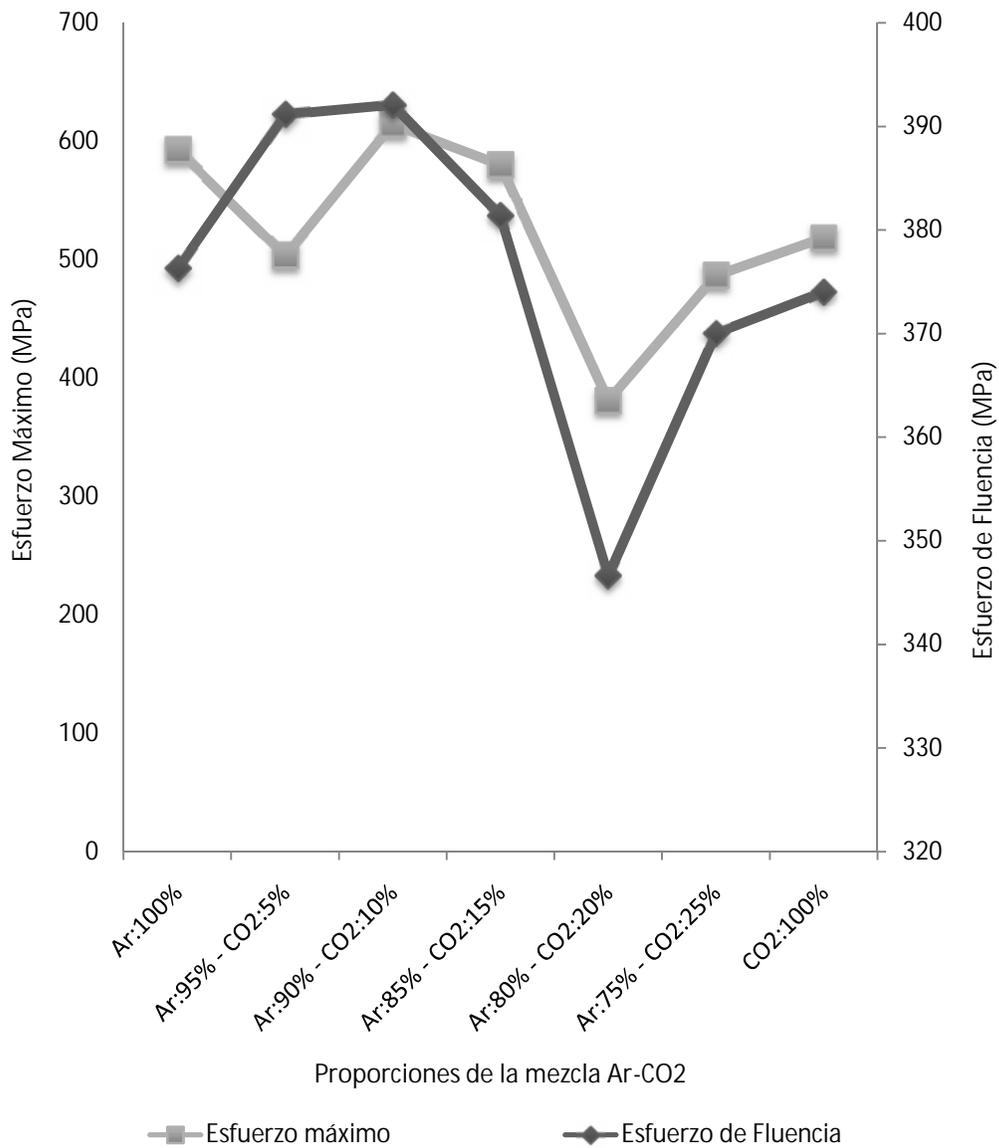


Figura 4.10 Comparación del comportamiento entre el Esfuerzo de Fluencia y el Esfuerzo Máximo.

### %Alargamiento y Deformación Elástica

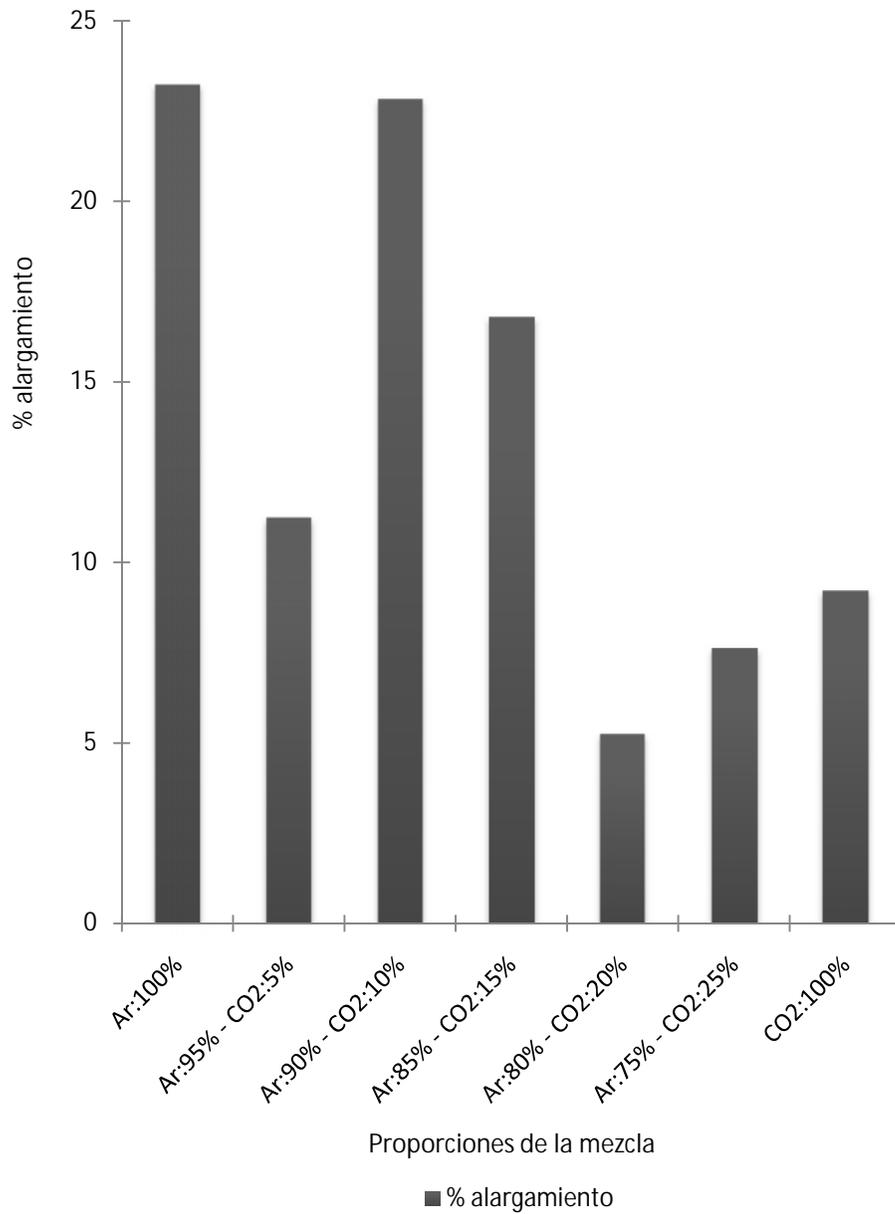


Figura 4.11 Curvas de Deformación máxima vs. Proporciones de la mezcla de gases de protección, cada punto de las curvas representan los valores promedio de las probetas ensayadas por cada proporción.

Tabla 4.5 Resultados del ensayo de tracción

<i>Proporciones De la mezcla Ar – CO2</i>	<i>Esfuerzo de Fluencia</i>	<i>Esfuerzo máximo</i>	<i>% alargamiento</i>
Ar: 100%	376,24262	592,0013	23,2
Ar: 95% – CO2: 5%	391,11994	503,048	11,2
Ar: 90% – CO2: 10%	392,07462	614,14246	22,8
Ar: 85% – CO2: 15%	381,40118	579,89844	16,8
Ar: 80% – CO2: 20%	346,6204	380,97132	5,2
Ar: 75% – CO2: 25%	370,04532	486,66124	7,6
CO2: 100%	374,032	518,47706	9,2

#### **4.4 Análisis del ensayo de tracción**

En la figura 4.8 se observa como el esfuerzo de fluencia va en aumento hasta alcanzar su valor máximo en la proporción Ar: 90% + CO2: 10%, el cual es 392,07462 MPa esto se traduce en un incremento del 4,20% con respecto a la proporción Ar: 100% y en un incremento del 47,71% con respecto al esfuerzo del metal base.

Cabe destacar que la proporción de Ar: 95% + CO2: 5% también registra un valor cercano al valor máximo registrado, el cual es 391,11994 MPa, representando esto un incremento del 3,95% con respecto a la proporción Ar: 100% y en un incremento del 47,58% con respecto al esfuerzo del metal base.

En este orden de ideas, la proporción Ar: 85% + CO2: 15% registra un incremento del valor de fluencia de 1,37% y de 1,97% con respecto a la proporción Ar: 100% y CO2: 100% respectivamente. Las proporciones Ar: 80% + CO2: 20% y Ar: 75% + CO2: 25%, registran valores por debajo

de las proporciones  $Ar: 100\%$  y  $CO_2: 100\%$ , siendo la disminución del valor de esfuerzo de fluencia con respecto a la proporción de  $Ar: 90\% + CO_2: 10\%$ , 11,59% y de 5,61% respectivamente.

En este sentido, la diferencia entre los esfuerzos de fluencia de la proporción  $Ar: 100\%$  y  $CO_2: 100\%$  es de 2,21 MPa, ahora bien en base a esto y con la ayuda de la línea de tendencia representada en la figura 4.8, se observa que para las cantidades de  $CO_2$  de 5% y 10% se produce un incremento en el esfuerzo de fluencia pero al pasar del 10% se produce un descenso en dicha propiedad hasta que retoma el valor cercano a la proporción  $Ar: 100\%$  en la proporción  $CO_2: 100\%$ .

Para el esfuerzo máximo se tiene un comportamiento similar al encontrado en el esfuerzo de fluencia tal como se muestra en la figura 4.9, registrándose un valor máximo en la proporción  $Ar: 90\% + CO_2: 10\%$  siendo superior a los valores de las proporciones  $Ar: 100\%$  y  $CO_2: 100\%$  en 3,74% y 18,45% respectivamente.

A su vez esta proporción de  $Ar: 90\% + CO_2: 10\%$  posee el mayor incremento porcentual del esfuerzo máximo con respecto al metal base siendo este de 16,14%.

Las magnitudes más elevadas de esfuerzo máximo se encuentran entre las primeras 4 proporciones observándose una caída de las mismas en las proporciones  $Ar: 80\% - CO_2: 20\%$  y  $Ar: 75\% - CO_2: 25\%$  siendo la diferencia entre estas y la proporción con mayor valor de esfuerzo máximo ( $Ar: 90\% + CO_2: 10\%$ ) de 233,1711 MPa y 127,48 MPa.

En la proporción  $Ar: 80\% - CO_2: 20\%$  se tiene un descenso del 37,96% en el valor del esfuerzo máximo con respecto la magnitud máxima registrada en la proporción  $Ar: 90\% + CO_2: 10\%$ . A su vez en la proporción  $Ar: 75\% - CO_2: 25\%$  se tiene un descenso un poco menor del 20,75%.

Por lo cual, se observa que el incremento de la cantidad de  $CO_2$  en la proporción de la mezcla de gases de protección produce un incremento de los valores de esfuerzo de fluencia y esfuerzo máximo hasta alcanzar su mayor valor en la proporción  $Ar: 90\% + CO_2: 10\%$ , al comenzar a aumentar la cantidad de este gas por encima del 10% comienzan a disminuir los mismos produciéndose una caída en el esfuerzo de fluencia y del esfuerzo máximo en la proporción  $Ar: 85\% + CO_2: 15\%$  del 2,72% y del 5,57%, respectivamente, siendo esto con respecto a su predecesora, ahora bien, a pesar de este descenso en la proporción con 15% de  $CO_2$  los valores de esta última siguen estando por encima de los de la proporción de  $CO_2: 100\%$  en un 1,9% para el esfuerzo de fluencia y en un 10,5% para el esfuerzo máximo.

Si bien es cierto que en la proporción  $Ar: 85\% + CO_2: 15\%$ , los esfuerzos de fluencia y máximo, aún no comienzan a disminuir con respecto a la proporción  $CO_2: 100\%$ , y que el esfuerzo de fluencia aun está por encima del valor correspondiente a la proporción  $Ar: 100\%$  en un 1,37%, comienzan a notarse los efectos de la disminución en el valor del esfuerzo máximo estando este por debajo de la magnitud correspondiente a la proporción  $Ar: 100\%$  en un 2,04%.

En este sentido, se observa que incrementando la cantidad de  $CO_2$  en la proporción de la mezcla de gases de protección en un 20% y en un 25% produce descensos aun por debajo de los valores correspondientes a los de las proporciones  $Ar: 100\%$  y  $CO_2: 100\%$ .

En la figura 4.10 se observa el comportamiento del esfuerzo de fluencia y el esfuerzo máximo, existiendo gran similitud en el mismo para la mayoría de las proporciones con la excepción de la proporción  $Ar: 95\% + CO_2: 5\%$ , en la cual disminuye el esfuerzo máximo en un 15,02% con

respecto a la proporción de  $Ar$ : 100% y a su vez disminuye el % de alargamiento en un 51,72% esto debido a errores experimentales.

Para el análisis del comportamiento del porcentaje de alargamiento se utiliza la figura 4.11 en la cual se observa una disminución progresiva del mismo, representando esto una reducción de la ductilidad de la junta soldada, cabe destacar que la única mezcla que evade este comportamiento es la proporción de  $Ar$ : 95% +  $CO_2$ : 5%, registrando un valor de 11,2%, siendo la diferencia de esta con respecto a las proporciones de  $Ar$ : 100% y  $Ar$ : 90% +  $CO_2$ : 10%, de 12% y 11,6%, respectivamente, es por ello que podría existir algún tipo de error experimental relacionado con el proceso de soldadura ya que inclusive la proporción de  $Ar$ : 95% +  $CO_2$ : 5% posee un valor de 16,8%.

De esta manera se puede apreciar un aumento progresivo del porcentaje de alargamiento hasta alcanzar su valor máximo en la proporción con  $CO_2$ : 10%, a partir de la cual comienza a disminuir el mismo, registrando su valor mínimo en la proporción  $Ar$ : 80% +  $CO_2$ : 20% siendo este de 5,2%.

La proporción  $CO_2$ : 100% a pesar de registrar valores de esfuerzo de fluencia y esfuerzo máximo similares a los de  $Ar$ : 100% difiere de este último al tener un % de alargamiento de 9,2%, es decir a pesar de poseer resistencias mecánicas similares, la ductilidad de la junta soldada con  $CO_2$ : 100%, disminuye considerablemente.

En la tabla 4.5 se presentan los resultados con todos los datos obtenidos para los ensayos de tracción por cada proporción.

#### **4.5 Resultados del ensayo de doblado**

A continuación se muestran las tablas 4.6, 4.7, 4.8, 4.9, 4.10, 4.11, 4.12 en donde se presentan las observaciones obtenidas del ensayo de

78 *Influencia de la proporción de la mezcla de gases de protección sobre la microestructura y las propiedades mecánicas en juntas soldadas de acero inoxidable austenítico AISI 304 mediante soldadura GMAW.*

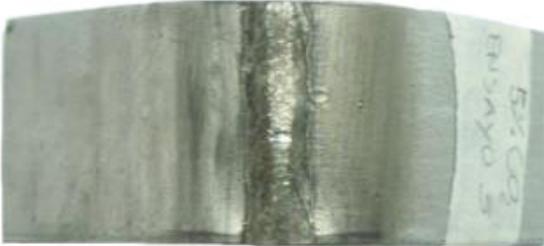
doblado y las imágenes de las probetas una vez ensayadas por cada proporción de gases de protección

Tabla 4.6 Observaciones del ensayo de doblado para probetas soldadas a distintas proporciones de la mezcla de gases de protección  $Ar - CO_2$ .

<i>Observaciones de probetas soldadas con la proporción</i>	<i>Imágenes de las probetas ensayadas</i>	<i>Angulo Final</i>
Ar: 100%		
P1 Cordón de soldadura Centrado, sin agrietamiento visible.		74°
P2 Cordón de soldadura Centrado, sin agrietamiento visible.		81°
P3 cordón de soldadura centrado, sin agrietamiento visible.		83°

Observaciones: Cabe destacar que este cordón carece de continuidad, a pesar de no poseer salpicaduras se presenta un solape repetitivo en el mismo. En las tres probetas el cordón presentó una buena ductilidad y ello se manifiesta por la ausencia de grietas en este ensayo.

Tabla 4.7 Observaciones del ensayo de doblado para probetas soldadas a distintas proporciones de la mezcla de gases de protección Ar – CO<sub>2</sub>.

Observaciones de probetas soldadas con la proporción	Imágenes de las probetas ensayadas	Angulo Final
Ar: 95% + CO <sub>2</sub> : 5%		
P1 Cordón de soldadura Centrado, sin agrietamiento visible.		86°
P2 Cordón de soldadura centrado, presencia de socavamiento en el centro del cordón.		86°
P3 Cordón de soldadura Centrado, sin agrietamiento visible.		82°

Observaciones: Se puede notar que este cordón presenta una forma continuidad a lo largo de su trayectoria. En las tres probetas el cordón presentó una buena ductilidad y ello se manifiesta por la ausencia de grietas mayores de 3,175 mm en este ensayo.

Tabla 4.8 Observaciones del ensayo de doblado para probetas soldadas a distintas proporciones de la mezcla de gases de protección Ar – CO<sub>2</sub>.

<i>Observaciones de probetas soldadas con la proporción</i>	<i>Imágenes de las probetas ensayadas</i>	<i>Angulo Final</i>
Ar: 90% + CO <sub>2</sub> : 10%		
P1 cordón de soldadura centrado, sin agrietamiento visible.		81°
P2 Cordón de soldadura Centrado, sin agrietamiento visible.		80°
P3 Cordón de soldadura centrado, presencia de socavamiento y grieta en la zona afectada por el calor.		83°

Observaciones: La forma del cordón se presenta una continua y uniforme a lo largo de su trayectoria. Así como también la ligera presencia de salpicaduras, y a su vez una oxidación superficial moderada. En las tres probetas el cordón presentó una buena ductilidad y ello se manifiesta por la ausencia de grietas mayores de 3,175 mm en este ensayo.

Tabla 4.9 Observaciones del ensayo de doblado para probetas soldadas a distintas proporciones de la mezcla de gases de protección  $Ar - CO_2$ .

<p><i>Observaciones de probetas soldadas con la proporción</i></p> <p><i>Ar: 85% + CO2: 15%</i></p>	<p><i>Imágenes de las probetas ensayadas</i></p>	<p><i>Angulo Final</i></p>
<p>P1 Cordón de soldadura Centrado, con socavamiento.</p>		<p>81°</p>
<p>P2 Cordón de soldadura Centrado, sin agrietamiento visible.</p>		<p>83°</p>
<p>P3 Cordón de soldadura Centrado, sin agrietamiento visible.</p>		<p>81°</p>



Observaciones: Este cordón presenta una continuidad a lo largo de su trayectoria, hay una ligera presencia de falta de fusión en los bordes. Así como también la presencia moderada de salpicaduras, y a su vez una oxidación superficial evidente. En las tres probetas el cordón presentó una buena ductilidad y ello se manifiesta por la ausencia de grietas mayores de 3,175 mm en este ensayo.

Tabla 4.10 Observaciones del ensayo de doblado para probetas soldadas a distintas proporciones de la mezcla de gases de protección Ar – CO<sub>2</sub>.

<i>Observaciones de probetas soldadas con la proporción</i>	<i>Imágenes de las probetas ensayadas</i>	<i>Angulo Final</i>
Ar: 80% + CO <sub>2</sub> : 20%		
P1 Cordón de soldadura centrado, presencia de socavamiento y grieta en el cordón.		80°
P2 Cordón de soldadura centrado, presencia de socavamiento y grieta en la zona afectada por el calor.		82°
P3 Cordón de soldadura centrado, presencia de socavamiento y grieta en el cordón.		81°

Observaciones: Este cordón presenta una forma un poco irregular ya que la continuidad se ve afectada, hay una ligera presencia de falta de fusión en los bordes. Así como también la presencia moderada de salpicaduras, y a su vez una oxidación superficial evidente. En las tres probetas el cordón presentó una ductilidad deficiente y ello se manifiesta por la presencia de grietas y socavamientos en las tres muestras.

Tabla 4.11 Observaciones del ensayo de doblado para probetas soldadas a distintas proporciones de la mezcla de gases de protección Ar – CO<sub>2</sub>.

Observaciones de probetas soldadas con la proporción	Imágenes de las probetas ensayadas	Angulo Final
Ar: 75% + CO <sub>2</sub> : 25%		
P1 Cordón de soldadura centrado, presencia de socavamiento y grieta en el cordón.		80°
P2 Cordón de soldadura centrado, presencia de socavamiento y grieta en el cordón y en la zona afectada por el calor.		82°
P3 Cordón de soldadura centrado, presencia de socavamiento sin agrietamiento visible		79°

Observaciones: Este cordón presenta una forma un poco irregular ya que la continuidad se ve afectada, hay una ligera presencia de falta de fusión en los bordes. Así como también la presencia moderada de salpicaduras, y a su vez una oxidación superficial evidente. En las tres probetas el cordón presentó una ductilidad deficiente y ello se manifiesta por la presencia de grietas y socavamientos en las tres muestras.

Tabla 4.12 Observaciones del ensayo de doblado para probetas soldadas a distintas proporciones de la mezcla de gases de protección *Ar – CO<sub>2</sub>*.

<i>Observaciones de probetas soldadas con la proporción</i>	<i>Imágenes de las probetas ensayadas</i>	<i>Angulo Final</i>
<i>CO<sub>2</sub>: 100%</i>		
P1 Cordón de soldadura centrado, presencia de socavamiento y grieta en la zona afectada por el calor.		90°
P2 Cordón de soldadura desviado a la izquierda, presencia de socavamiento y grieta en la zona afectada por el calor.		120°
P3 Cordón de soldadura centrado, presencia de socavamiento y grieta en el cordón.		100°

Observaciones: Este cordón presenta una forma irregular, no hay una continuidad a lo largo de la trayectoria del cordón, hay presencia excesiva de salpicaduras, y a su vez una oxidación superficial que afecta inclusive la zona afectada por el calor.

En las tres probetas el cordón presentó una ductilidad pobre y ello se manifiesta por la presencia de grietas y socavamientos en las tres muestras.

#### 4.6 Análisis del ensayo de doblado

Como se puede observar en la tabla 4.6 para el caso de las probetas soldadas con la proporción *Ar: 100%* se obtuvieron resultados satisfactorios,

presentando un buena ductilidad en las mismas, en el caso de la proporción  $Ar: 95\% + CO_2: 5\%$  se obtuvieron resultados favorables tal como se muestra en la tabla 4.7 con la excepción de un socavamiento en uno de los cordones producto de la reducción en el % de alargamiento en esta proporción.

La proporción de  $Ar: 90\% + CO_2: 10\%$  presentó resultados satisfactorios a pesar de tener un pequeño agrietamiento en la zona afectada por el calor como se muestra en la tabla 4.8 posiblemente debido al incremento de la temperatura de fusión a causa del efecto de disociación del  $CO_2$  en el proceso de soldadura.

Se puede observar en la tabla 4.9 que para la proporción  $Ar: 85\% + CO_2: 15\%$  que a pesar de presentar una disminución en la ductilidad de acuerdo a los resultados obtenidos del % de elongación, los resultados del ensayo de doblado fueron satisfactorios con apenas la presencia de un socavamiento cerca del cordón en una de las muestras. Ahora bien, para la proporción  $Ar: 80\% + CO_2: 20\%$  hay presencia de socavamiento y grieta en el cordón y en la zona afectada por el calor en las tres muestras tal como lo muestra la tabla 4.10, lo que confirma lo resultados obtenidos en cuanto a la ductilidad de las mismas en el ensayo de tracción, la ductilidad es deficiente en esta proporción.

Las muestras correspondientes a la proporción  $Ar: 75\% + CO_2: 25\%$  presentan fragilidad que se ve expresada por medio de socavamientos y grietas en el cordón y la zona afectada por el calor, hay una reducción considerable de la ductilidad en estas muestras tal como se muestra en la tabla 4.11. En la tabla 4.12 se observa que una de las muestras correspondientes a la proporción de la mezcla de gases de protección  $CO_2: 100\%$  presenta defectos mayores a 1/8 de pulgada, la ductilidad de la

misma es mala, además de presentar socavamientos y grietas en todas las muestras, la fragilidad de este cordón es evidente.

La disminución de la cantidad de Ar en la proporción de gases de protección trae como consecuencia una disminución en la ductilidad de la junta soldada, y eso puede observarse en la disminución del ángulo de dobles de las muestras ensayadas.

A medida que la cantidad de  $CO_2$  aumenta en la proporción de la mezcla de los gases de protección se observa el incremento de socavamientos y depresiones expresadas por medio de grietas en la unión soldada tanto en la zona afectada por el calor como en el cordón de soldadura, esto está directamente relacionado con el incremento en la temperatura de fusión del metal de aporte como consecuencia de la disociación y recomposición de los componentes del  $CO_2$ .

#### **4.7 Resultados del estudio metalográfico**

Las figuras 4.12 a la 4.18 muestran los resultados del estudio macroscópico y en las figuras 4.20 hasta la figura 4.26 se muestran los resultados del estudio de microscopía óptica, cuyas imágenes muestran la microestructura de las soldaduras, observándose los cambios en el orden de los granos, su crecimiento, formación de precipitación de carburos, porosidades, entre otros.

##### **Macroscopía**



Figura 4.12 Macroscopía de la probeta soldada con la proporción de gases de protección Ar: 100%.

Observaciones: Esta muestra presenta el menor ancho de entre todas las probetas, a pesar de tener buena penetración, y coincide con el comportamiento presentado para juntas soldadas con  $Ar$ : 100% tal como lo muestra la figura 2.13.

No hay presencia de porosidades ni de imperfecciones, presenta una cristalización del metal de aporte uniforme.



Figura 4.13 Macroscopía de la probeta soldada con la proporción de gases de protección  $Ar$ : 95% –  $CO_2$ : 5%.

Observaciones: Mejora la penetración con respecto a la proporción anterior y la forma del cordón comienza a variar incrementándose el ancho del mismo y describiendo un comportamiento similar al expresado por la figura 2.13 para la proporción  $Ar/CO_2$ , la cristalización del metal de aporte está orientada hacia el centro y hacia arriba. Hay mayor uniformidad del cordón con respecto a su predecesora, ausencia de porosidades, no hay presencia de grietas.



Figura 4.14 Macroscopía de la probeta soldada con la proporción de gases de protección  $Ar$ : 90% –  $CO_2$ : 10%.

Observaciones: Pistola de soldadura fuera de centro, ligeramente inclinada, excelente penetración, se incrementa el ancho de presencia de

óxido superficial a lo largo del cordón de soldadura, ligera presencia de salpicaduras en los bordes del cordón, ausencia de porosidades y grietas.



Figura 4.15 Microestructura de la probeta soldada con la proporción de gases de protección Ar: 85% – CO2: 15%

Observaciones: Presenta buen ancho y se reduce un poco la penetración, se incrementa la presencia de salpicaduras, la oxidación se incrementa con respecto a la proporción anterior, presencia de porosidades en la parte superior del cordón.



Figura 4.16 Microestructura de la probeta soldada con la proporción de gases de protección Ar: 80% – CO2: 20%.

Observaciones: Presencia de solape, se presentan inclusiones globulares de gas, hay pequeñas grietas en la zona afectada por el calor, presencia de porosidad y la oxidación, las salpicaduras se hacen evidente a lo largo del cordón de soldadura, presencia de grietas en la sección longitudinal del cordón.



Figura 4.17 Microestructura de la probeta soldada con la proporción de gases de protección Ar: 75% – CO2: 25%.

Observaciones: borde longitudinal con presencia de falta de fusión, cristalización hacia arriba y deja de estar hacia el centro del cordón lo cual es indeseable, presencia de solape, penetración buena, se incrementa las salpicaduras aún por encima de las observadas en la muestra Ar: 80% - 20%, oxidación acentuada en el cordón y en la zona afectada por el calor, inclusiones globulares de gas, presencia de porosidades.



Figura 4.18 Microestructura de la probeta soldada con la proporción de gases de protección  $CO_2$ : 100%

Observaciones: Porosidad acentuada distribuida en la superficie del cordón, borde longitudinal con presencia de falta de fusión, inclusiones globulares de gas, oxidación crítica desprendimiento de partículas en el cordón, y zona afectada por el calor, agrietamiento pronunciado a lo largo del cordón.

#### **4.8 Análisis del ensayo de Macroscopía**

Al aumentar la cantidad de  $CO_2$  en la proporción de la mezcla de gases de protección varía la geometría del cordón de ser estrecho y profundo a ancho y profundo tal como se muestra en la figura 2.13.

A su vez a medida que se incrementa la cantidad de  $CO_2$  en la proporción de la mezcla, ascienden las cantidades de porosidades presentes en el cordón y las inclusiones globulares del gas, esto puede deberse a varias razones entre las cuales existe la posibilidad de que como se observa en análisis posteriores el incremento de la temperatura, aumenta consigo la fluidez del metal de aporte pero a su vez la solidificación del mismo puede

ser repentina lo que ocasiona que las burbujas del gas que estén intentando salir del charco de soldadura queden atrapadas en el superficie del mismo, o en el caso de las inclusiones globulares en el centro del cordón.

También se observa que a medida que se incrementa el  $CO_2$  en la mezcla, las salpicaduras tienen a aumentar, lo cual trae consigo la pérdida de uniformidad del cordón y el incremento de concentradores de esfuerzos en la junta soldada.

El incremento en la oxidación puede ser ocasionado por la interacción química del  $CO_2$  con el metal de aporte y la zona afectada por el calor durante el momento de fusión lo cual traería consigo un incremento de la cantidad de carbono en el charco de soldadura pero esto se analizará posteriormente.

#### **4.9 Microscopía**

El diagrama de Shaeffler es utilizado comúnmente para predecir el comportamiento microestructural de la unión de dos metales de distinta composición química y para evitar cometer errores de selección del metal de aporte, ya que una elección errónea traería consigo agrietamiento en frío, agrietamiento en caliente y fragilidad por la presencia de fase sigma.

En esta investigación se utilizó este diagrama para mostrar teóricamente cual sería el comportamiento metalúrgico de la junta. El diagrama exige el cálculo de dos porcentajes, el Níquel equivalente y el Cromo equivalente.

Para el cálculo del porcentaje de Níquel equivalente y del porcentaje de Cromo equivalente del material base y material de aporte se utilizaron las ecuaciones 2.1 y 2.2 respectivamente.

Ahora bien, con la composición química correspondiente de cada uno según se muestran en las tablas 3.1 y 3.4. Los resultados se muestran en la tabla 4.13.

Tabla 4.13 Porcentajes de Niquel equivalente y Cromo equivalente para el metal base y para el metal de aporte

<i>Materiales</i>	<i>% Ni</i>	<i>% Cr</i>
Metal Base	9,95	18,803
Metal de Aporte	11,42	22,45

Una vez obtenidos los porcentajes se procedió a calcular el porcentaje de dilución del material de aporte en la soldadura mediante la ecuación 4.1

$$\%Dilución = \frac{A}{A+a} \tag{4.1}$$

A: área del metal base fundida por el material de aporte.

a: área total del charco de soldadura.

Los resultados de los porcentajes de dilución para cada proporción de la mezcla de gases de protección se muestran en la tabla 4.14 y fueron calculados en base a las áreas de las muestras de macroscopía presentadas en la sección 4.6.

Tabla 4.14 Porcentajes de dilución según las proporciones de la mezcla de gases de protección.

<i>Proporciones de la mezcla Ar – CO2</i>	<i>% de Dilución</i>
Ar: 100%	43,96
Ar: 95% – CO2: 5%	40,51
Ar: 90% – CO2: 10%	45,18
Ar: 85% – CO2: 15%	43,47

Tabla 4.14 Porcentajes de dilución según las proporciones de la mezcla de gases de protección.

<i>Proporciones de la mezcla Ar – CO2</i>	<i>% de Dilución</i>
Ar: 80% – CO2: 20%	45,88
Ar: 75% – CO2: 25%	42,34
CO2: 100%	43,60

Finalmente se procede a graficar los puntos correspondientes al metal base y al metal de aporte por medio de los porcentajes de Cromo y Níquel equivalente y se identifica el punto correspondiente a cada proporción por medio del porcentaje de dilución tal como se muestra en las figuras 4.19, 4.20, 4.21, 4.22.

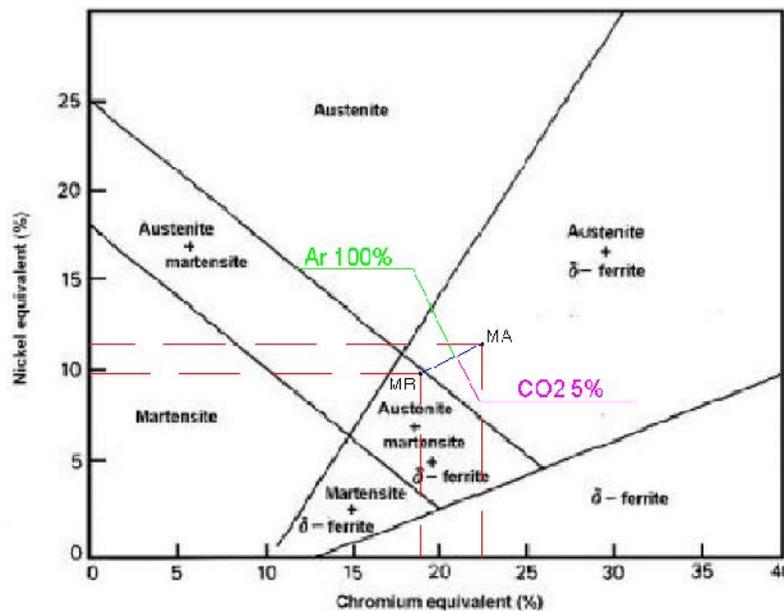


Figura 4.19 Diagrama de Shaeffler correspondiente a los porcentajes de dilución de las proporciones de Ar: 100% y Ar: 95% + CO2: 5% y en base a la composición química del acero AISI 304 y el alambre de aporte ER 308.

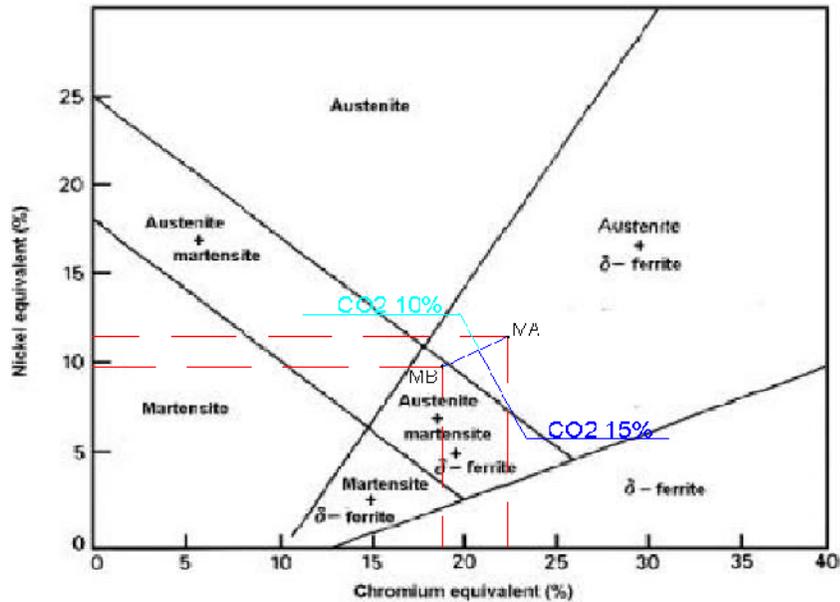


Figura 4.20 Diagrama de Shaeffler correspondiente a los porcentajes de dilución de las proporciones de Ar: 90% + CO2: 10% y Ar: 85% + CO2: 15% y en base a la composición química del acero AISI 304 y el alambre de aporte ER 308.

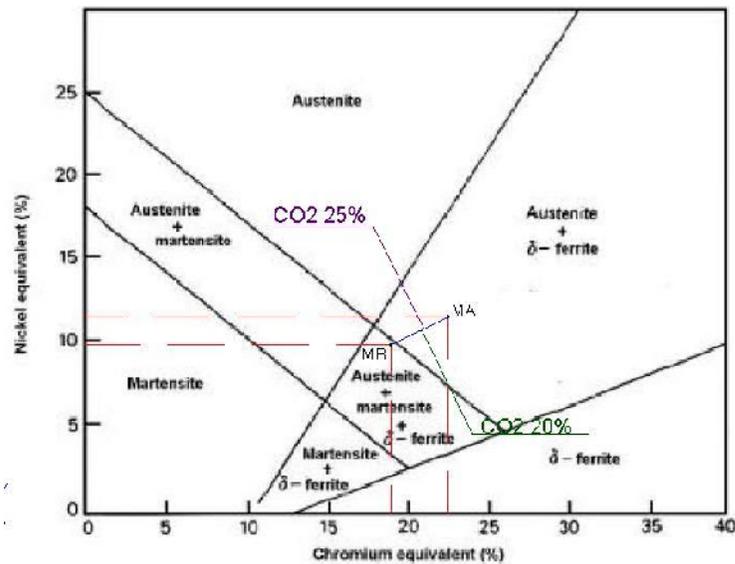


Figura 4.21 Diagrama de Shaeffler correspondiente a los porcentajes de dilución de las proporciones de Ar: 80% + CO2: 20% y Ar: 75% + CO2: 25% y en base a la composición química del acero AISI 304 y el alambre de aporte ER 308.

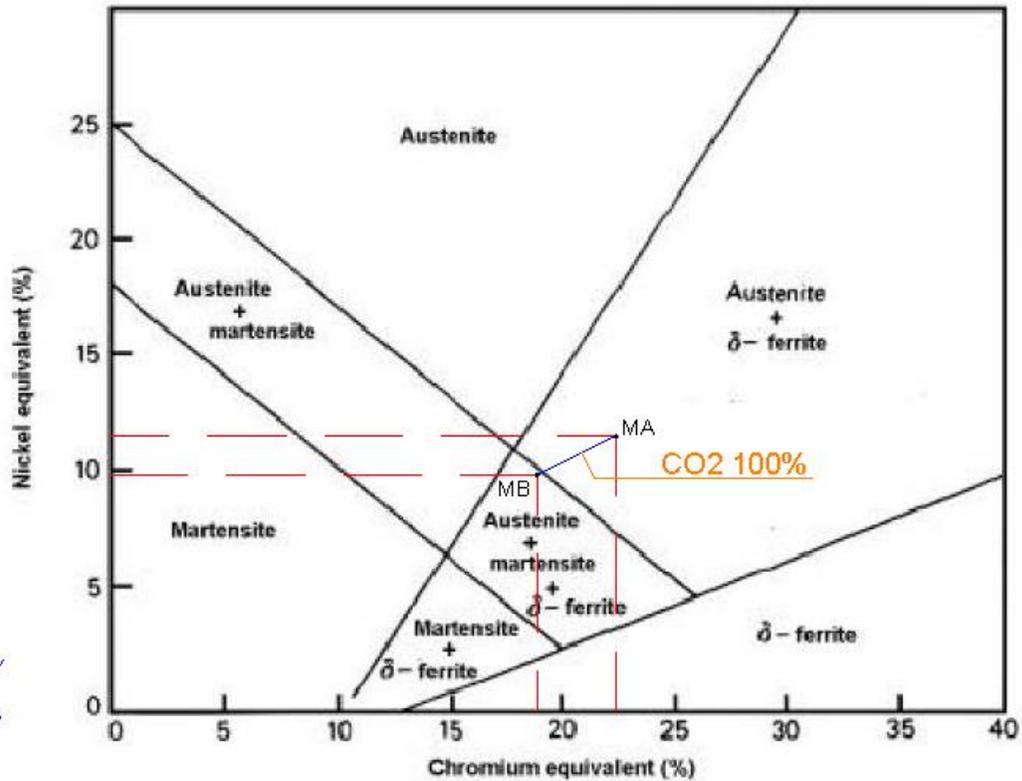


Figura 4.22 Diagrama de Shaeffler correspondiente al porcentajes de dilución de la proporción de  $CO_2$ : 100% en base a la composición química del acero AISI 304 y el alambre de aporte ER 308.

. El diagrama provee acerca de la microestructura que se origina de esta unión siendo la misma una combinación entre austenita y delta ferrita.

A continuación en las figuras 4.23, 4.24, 4.25, 4.26, 4.27, 4.28 y 4.29, se muestran las microestructuras correspondientes a cada una de las zonas de la junta soldada por cada proporción de la mezcla de gases de protección.

Para comparar las microestructuras observadas con un patrón se utilizaron las siguientes referencias [14] y [15].

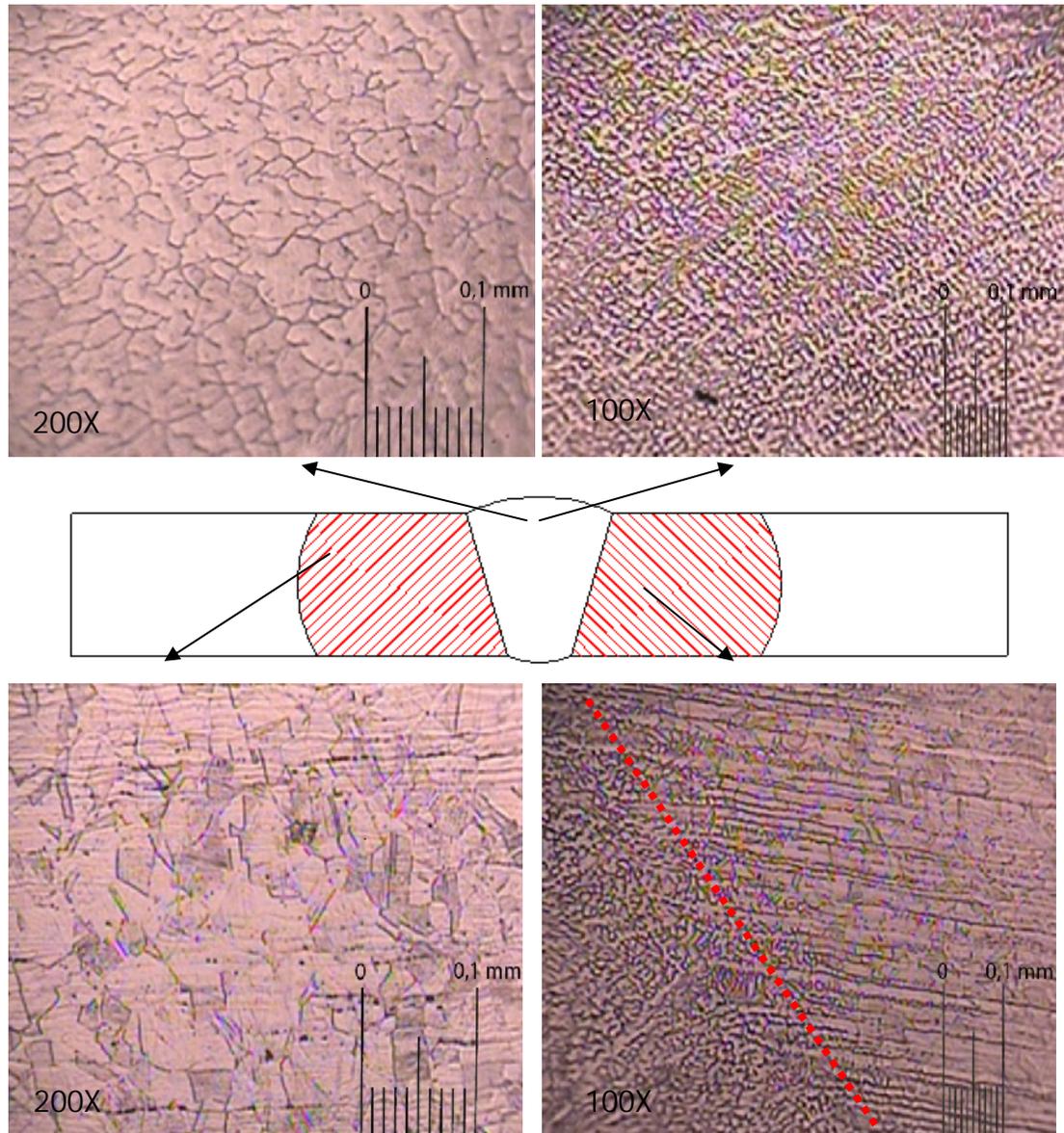


Figura 4.23 Microestructura de la probeta soldada con la proporción de gases de protección Ar: 100 %

Observaciones: El metal base muestra una microestructura austenítica, y en la ZAC se observa claramente la formación de las estructuras dendríticas columnares hasta llegar a una estructura completamente dendrítica, la tendencia de las estructuras columnares es hacia la superficie, la distribución de las mismas es uniforme a lo largo del charco de soldadura de manera ascendente.

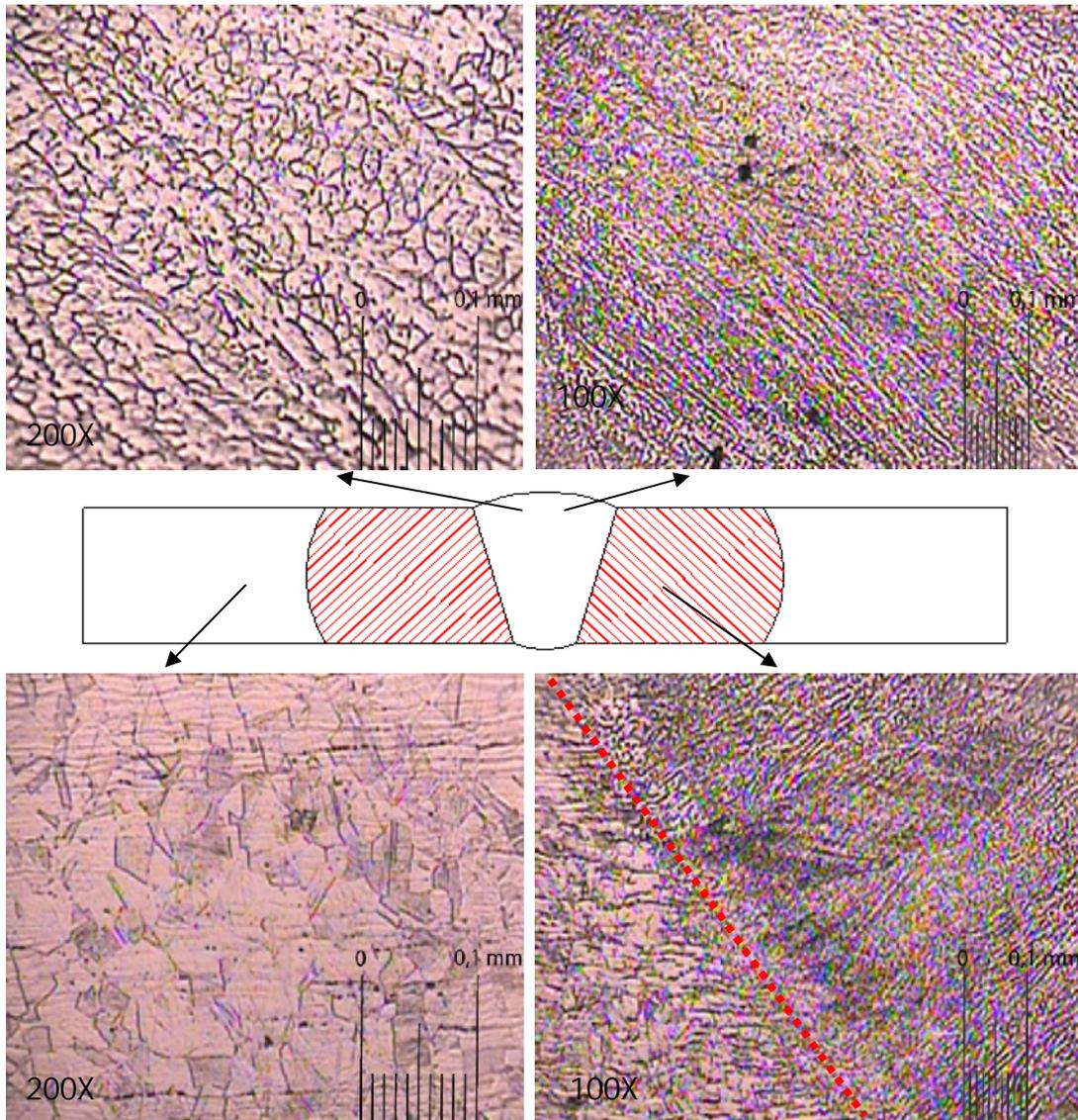


Figura 4.24 Microestructura de la probeta soldada con la proporción de gases de protección  $Ar: 95\% - CO_2: 5\%$

**Observaciones:** El metal base presenta su estructura austenítica característica, la zona afectada es un poco más reducida y las formaciones columnares de dendritas están más definidas que en la proporción  $Ar: 100\%$ , con una tendencia ascendente hacia el centro del cordón, se observan también que las estructuras dendríticas columnares presentes en el charco de soldadura están separadas una de otra de manera uniforme, hay presencia de porosidades y se puede apreciar la presencia de delta ferrita en el cordón de soldadura.

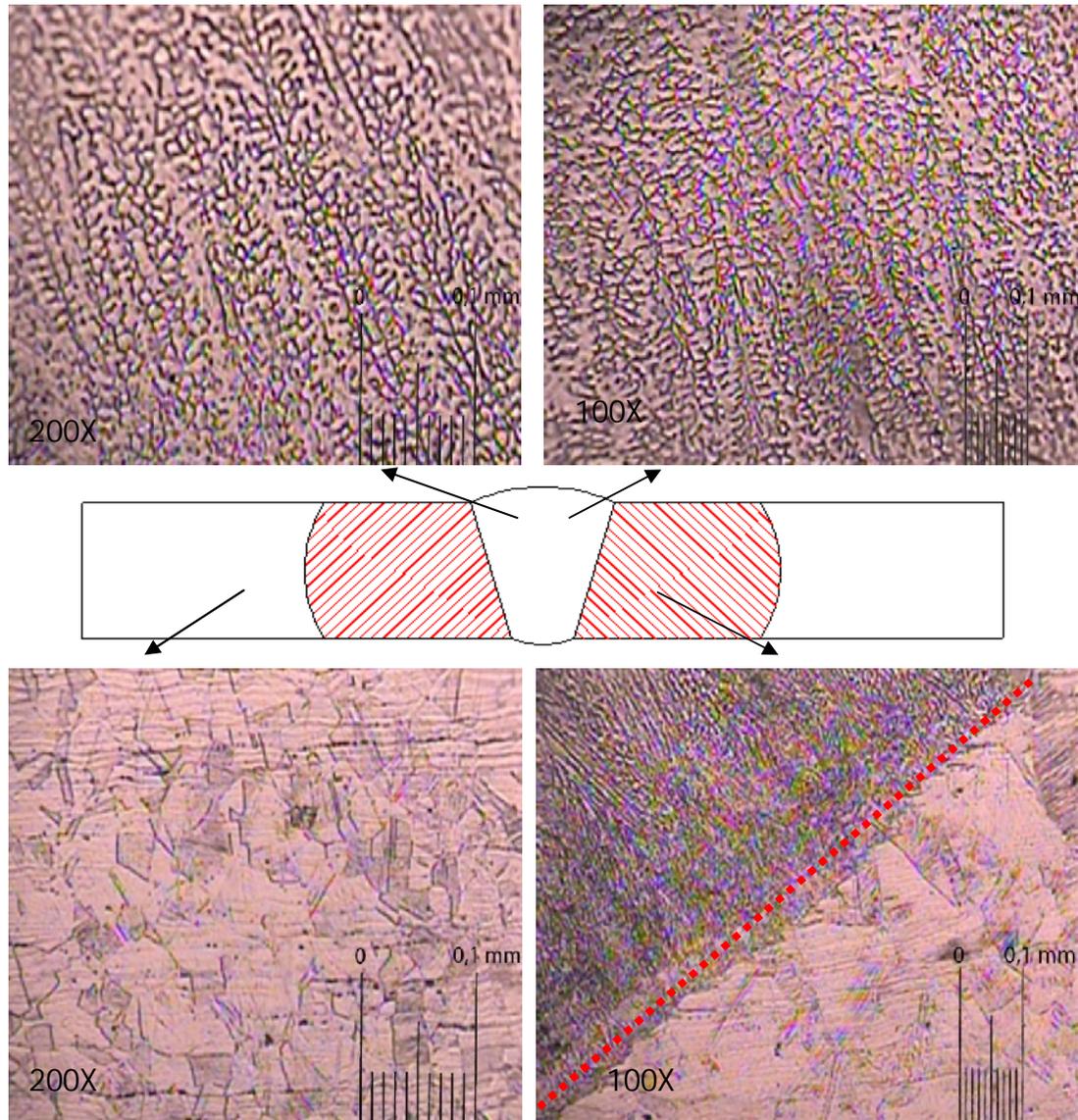


Figura 4.25 Microestructura de la probeta soldada con la proporción de gases de protección  $Ar: 90\% - CO_2: 10\%$

Observaciones: El metal base presenta una microestructura austenítica característica y además si se compara el tamaño de la zona de transición con la de la proporción  $Ar: 95\% - CO_2: 5\%$ , podrá notarse que la presente es mucho menor lo cual indica que el proceso de solidificación fue más rápido para esta proporción, se observa la presencia en el cordón de una estructura columnar dendrítica con un distanciamiento entre las mismas uniforme, al igual que en la anterior proporción se observa la presencia de delta ferrita en el cordón de soldadura.

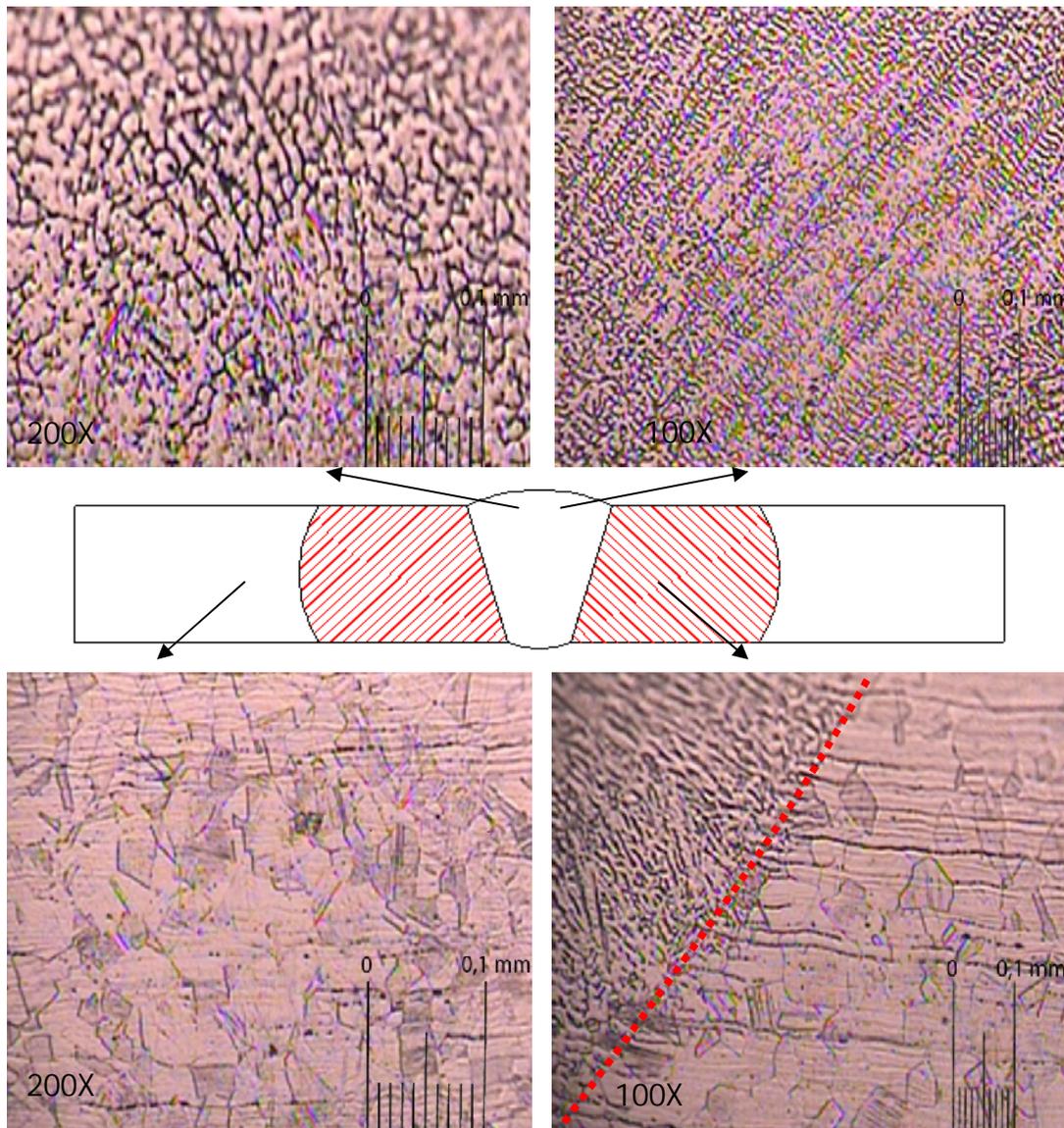


Figura 4.26 Microestructura de la probeta soldada con la proporción de gases de protección  $Ar: 85\% - CO_2: 15\%$ .

Observaciones: la zona de transición es de menor tamaño que su predecesora y pueden notarse las estructuras columnares dendríticas a diferencia de las anteriores existen oscilaciones a lo largo del cordón y no mantienen un mismo sentido de solidificación, la delta ferrita se puede observar en el cordón de soldadura, aunque en la zona afectada por el calor no se distingue con claridad.

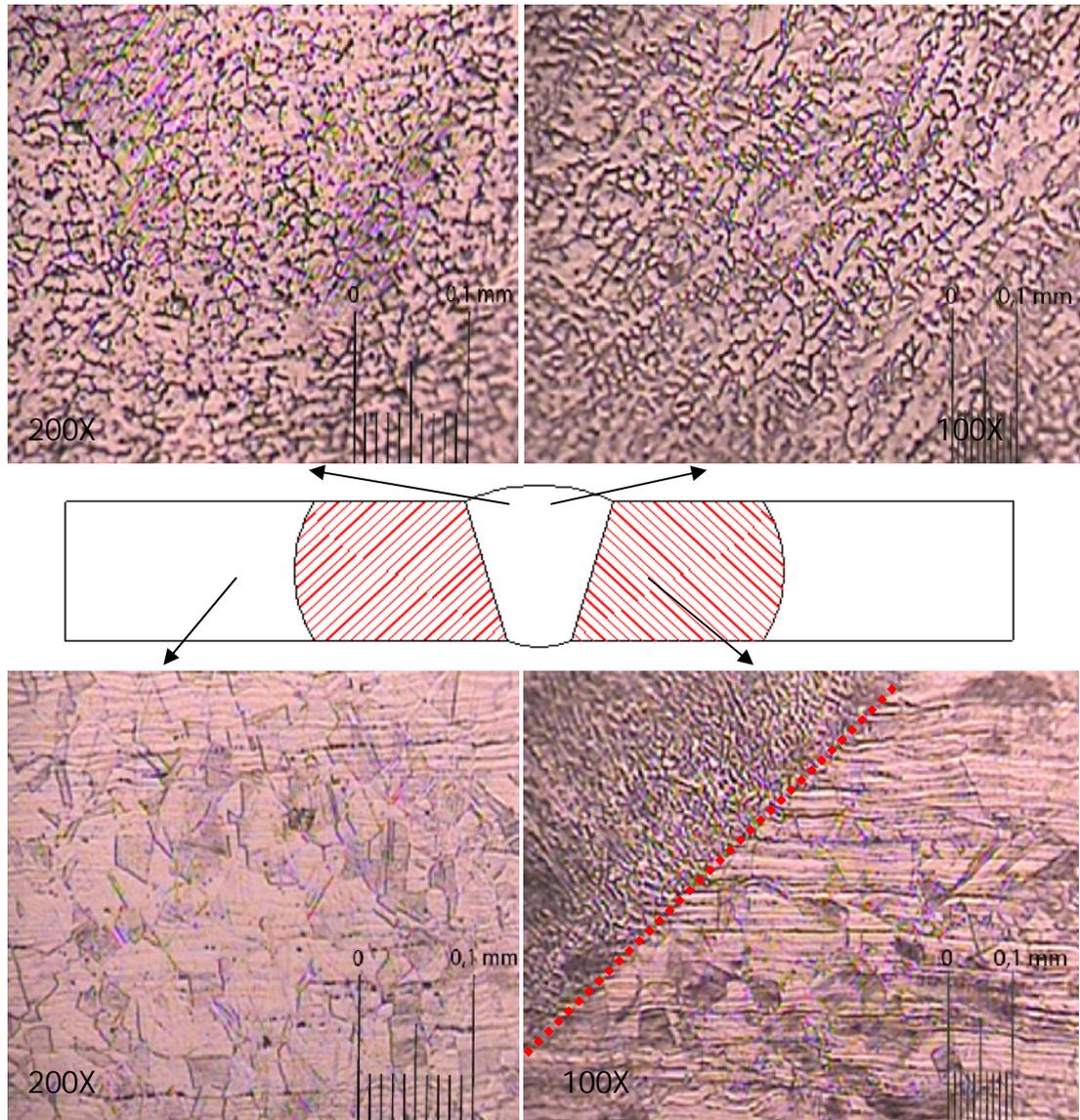


Figura 4.27 Microestructura de la probeta soldada con la proporción de gases de protección  $Ar: 80\% - CO_2: 20\%$

Observaciones: La zona de transición entre un metal y otro es reducida las estructuras columnares dendríticas no presentan un patrón uniforme, se evidencian. Aquí la delta ferrita es evidente en el cordón de soldadura.

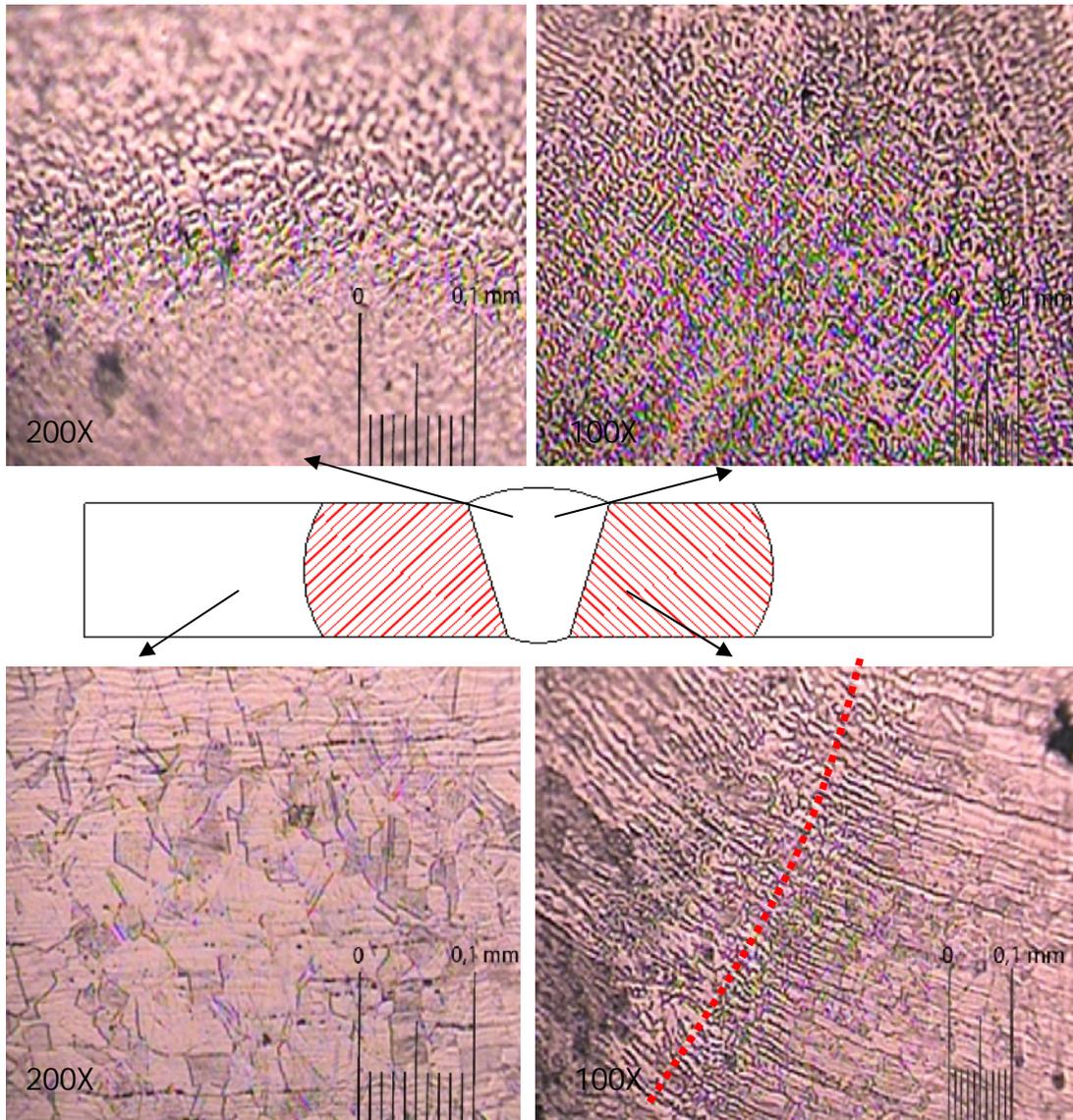


Figura 4.28 Microestructura de la probeta soldada con la proporción de gases de protección  $Ar: 75\% - CO_2: 25\%$ .

Observaciones: Las estructuras columnares dendríticas se encuentran con cambios de dirección en sentido ascendente a lo largo del charco, la zona de transición es reducida y el cambio de microestructura de metal base a columnar dendrítica es más rápido que en su proporción predecesora. Presencia de delta ferrita.

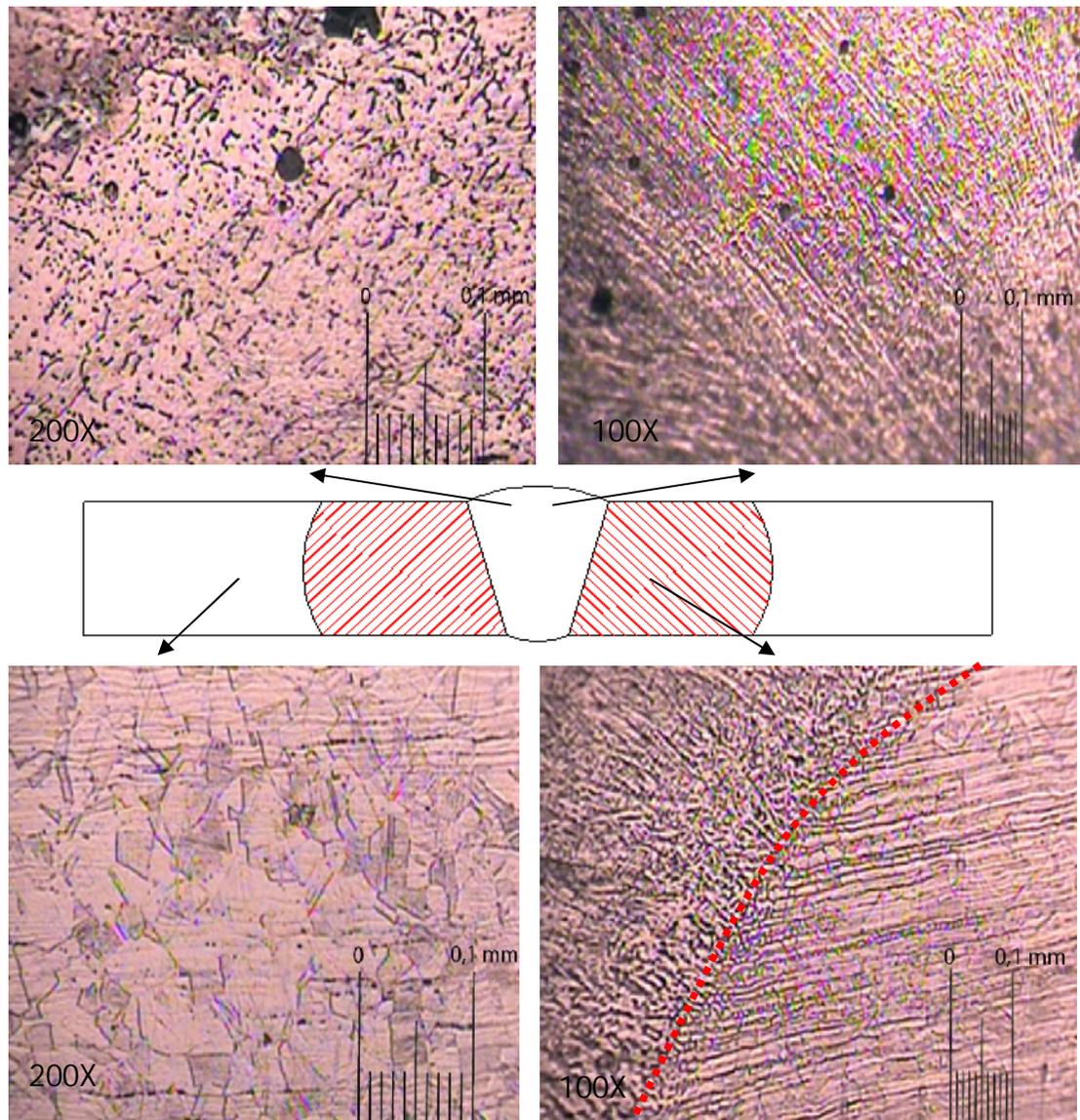


Figura 4.29 Microestructura de la probeta soldada con la proporción de gases de protección  $CO_2$ : 100%.

Observaciones: Las estructuras dendríticas se encuentran dispersas y desordenadas a lo largo del cordón de soldadura, la transición entre metal base y metal depositado es inmediato y además poco uniforme. Delta ferrita presente en el cordón de soldadura.

#### **4.10 Análisis del ensayo de microscopía**

A medida que aumenta la cantidad de  $CO_2$  presente en la proporción de gases de protección ocurre una disminución en el tamaño de la zona de transición entre el metal base y metal de soldadura, lo cual puede ocasionar una fractura prematura del cordón ya que la unión entre los mismos es escasa.

La presencia de Argón en la mezcla de gases de protección homogeneiza la solidificación del charco de soldadura ya que al disminuir la cantidad del mismo en la mezcla de gases de protección se observa una distribución poco uniforme de las estructuras columnares dendríticas, la solidificación del metal de aporte ocurre de manera desordenada.

A medida que aumenta la cantidad de  $CO_2$  en la mezcla de gases de protección hay un incremento en las porosidades y en la cantidad de irregularidades en la solidificación del charco.

La presencia de delta ferrita en la junta soldada evita la tendencia al agrietamiento. Además de esto se comprueba experimentalmente que las microestructuras obtenidas en las juntas soldadas corresponden a las esperadas según el diagrama de Shaeffler.

#### **4.11 Resultados del ensayo de microdureza Vickers**

A continuación se muestran las figuras 4.30, hasta la figura 4.37 con los resultados obtenidos del ensayo realizado mediante el método Vickers (HV) utilizando una carga de 100 gr. Los valores de microdureza se obtuvieron en las zonas características de la soldadura tanto a la derecha (D) como a la izquierda (I) de las probetas soldadas a diferentes condiciones de ensayo.

Finalmente en la gráfica 4.37 se muestra la microdureza Vickers respecto a las proporciones de la mezcla de gases de protección evaluadas en la zona de fusión y zona afectada por el calor.

Microdureza Vickers (HV) Ar: 100%

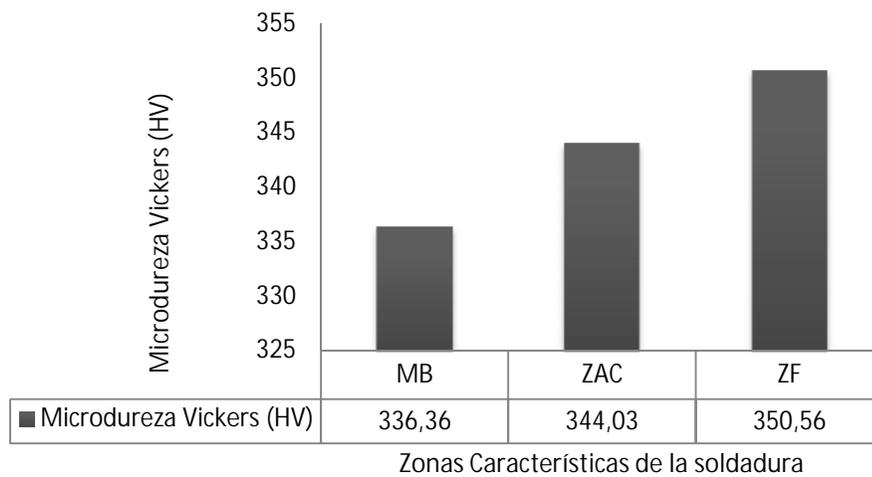


Figura 4.30 Gráfica Microdureza Vickers vs. Zonas características de la soldadura de la proporción

Microdureza Vickers (HV) Ar: 95% - CO2:5%

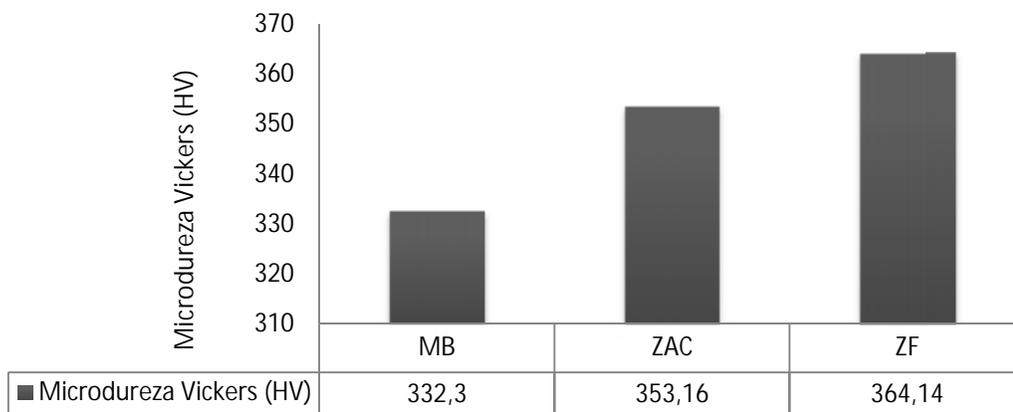


Figura 4.31 Gráfica Microdureza Vickers vs. Zonas características de la soldadura de la proporción

### Microdureza Vickers (HV) Ar: 90% - CO2:10%

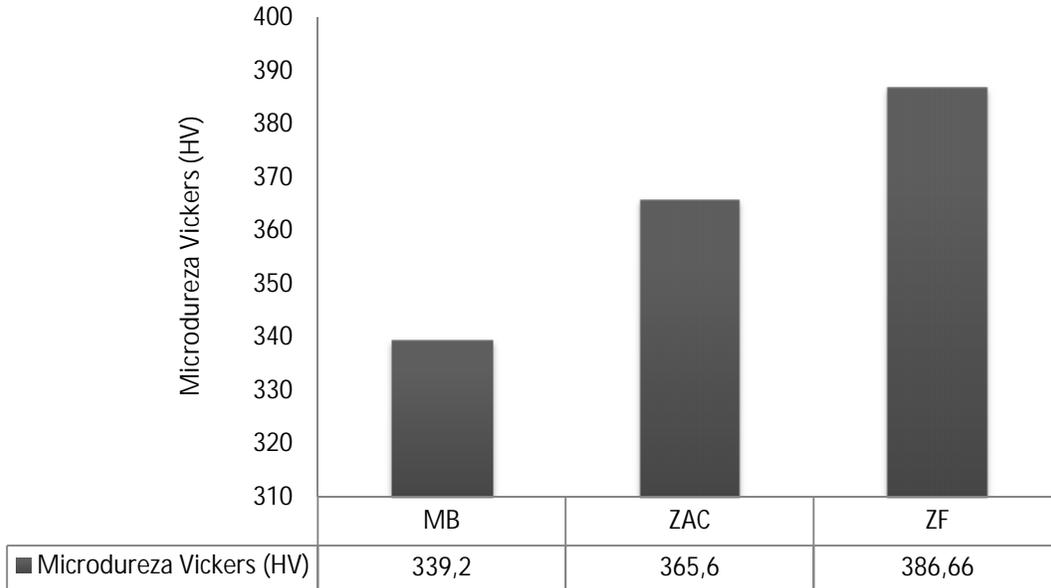


Figura 4.32 Gráfica Microdureza Vickers vs. Zonas características de la soldadura de la proporción ..

### Microdureza Vickers (HV) Ar: 85% - CO2:15%

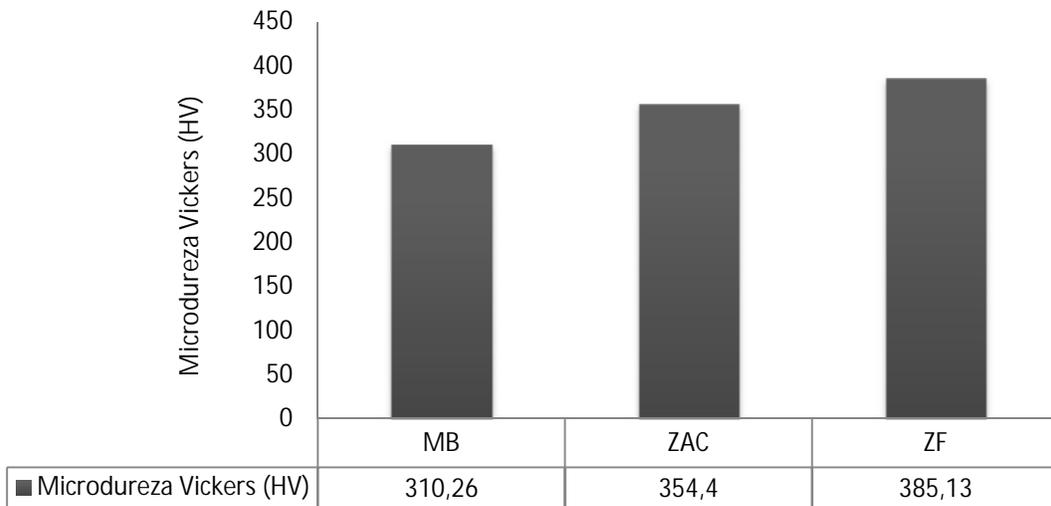


Figura 4.33 Gráfica Microdureza Vickers vs. Zonas características de la soldadura de la proporción ..

Microdureza Vickers (HV) Ar: 80% - CO2: 20%

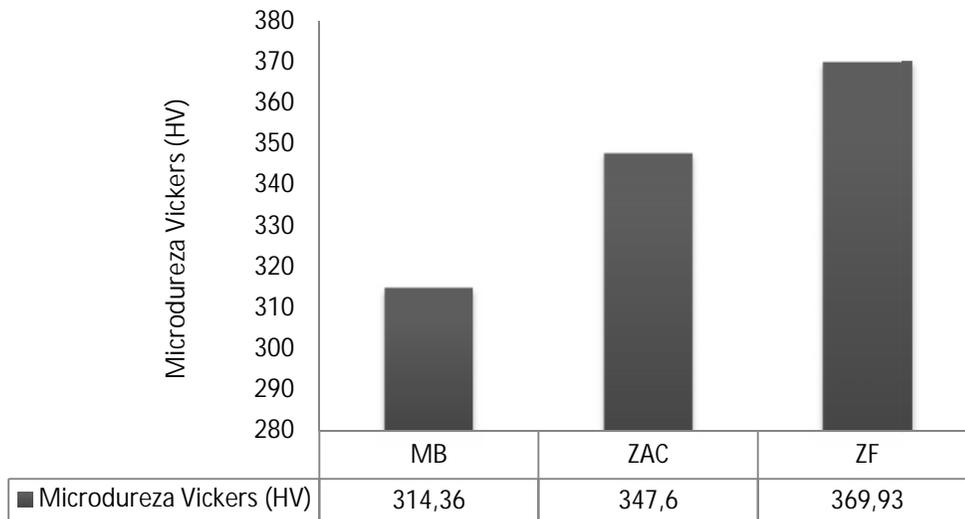


Figura 4.34 Gráfica Microdureza Vickers vs. Zonas características de la soldadura de la proporción ..

Microdureza Vickers (HV) Ar: 75% - CO2: 25%

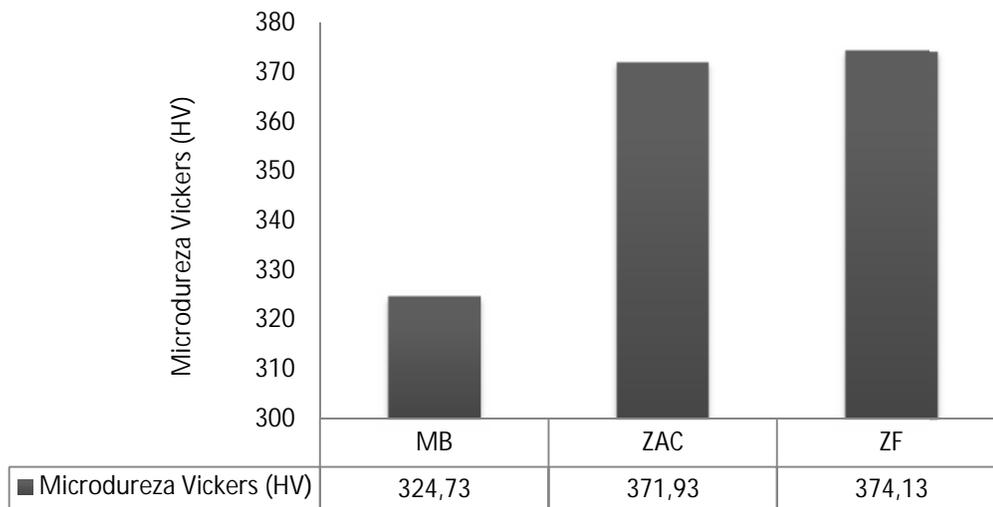


Figura 4.35 Gráfica Microdureza Vickers vs. Zonas características de la soldadura de la proporción .

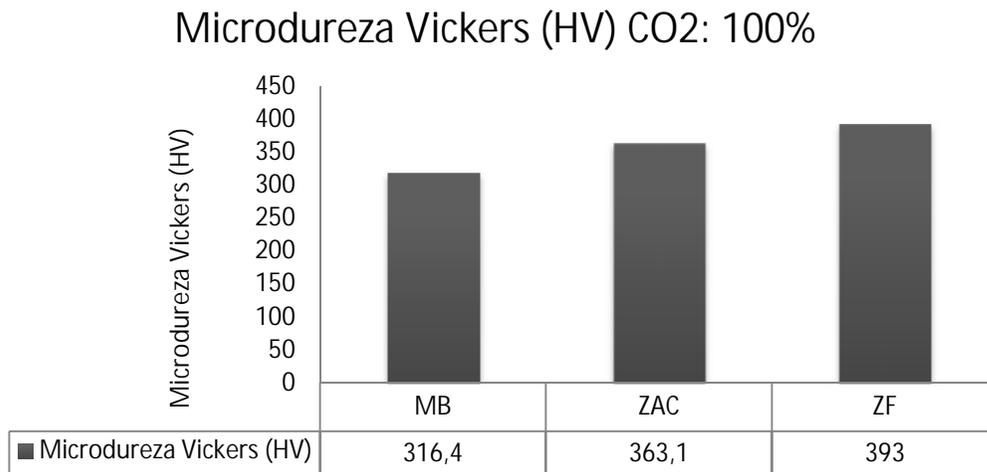


Figura 4.36 Gráfica Microdureza Vickers vs. Zonas características de la soldadura de la proporción

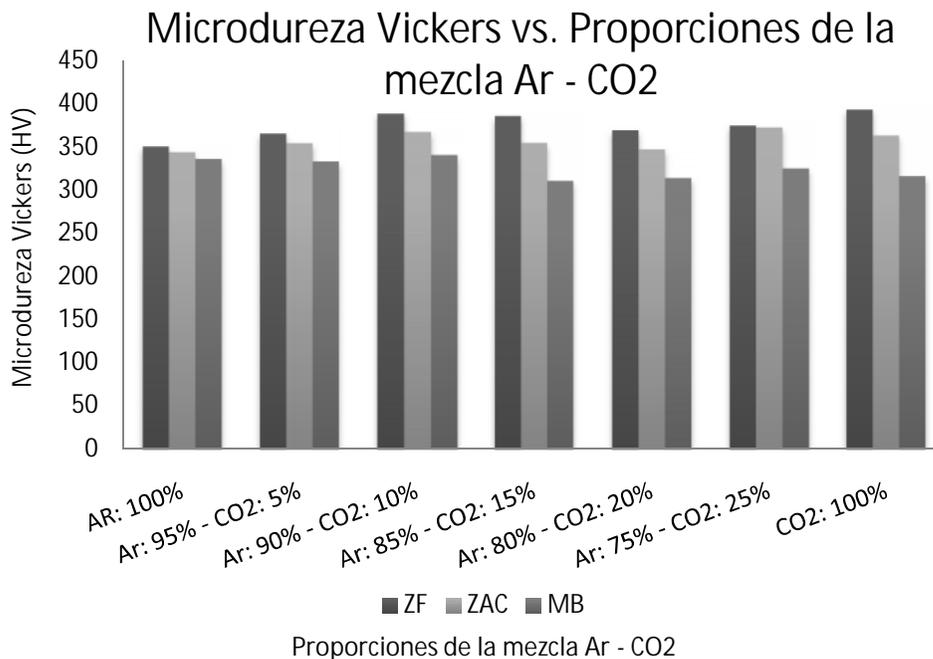


Figura 4.37 Microdureza Vickers vs. Proporciones de la mezcla evaluadas en la zona de fusión y zona afectada por el calor.

#### 4.12 Análisis del ensayo de microdureza Vickers

Los menores valores de microdureza en la zona afectada por el calor y en el cordón de soldadura los registra la proporción tal como se

observa en la figura 4.37, aumentando los mismos hasta alcanzar su valor máximo en la zona afectada por el calor para la proporción  $Ar: 75\% - CO_2: 25\%$ , siendo este de 371,93 HV, cabe destacar que el valor de microdureza para la zona afectada por el calor de la proporción  $CO_2: 100\%$  es 363,1 lo cual representa una diferencia con el máximo valor registrado de 8,83 HV.

El máximo valor de microdureza para el cordón lo tiene la proporción  $CO_2: 100\%$ . Si se observa la figura 4.37 se puede notar que la diferencia de los valores de microdureza entre el metal base y el cordón en la proporción  $Ar: 100\%$  es de 14,2 HV mientras que para  $CO_2: 100\%$  la diferencia es de 76,6 HV, lo cual se puede traducir en que la microdureza de la microestructura en las uniones soldadas con mayor cantidad de argón es más uniforme mientras que al aumentar el  $CO_2$  está uniformidad en la microdureza de las fases se pierde, tal como se observa en la figura 4.31 y 4.32 para la proporción  $Ar: 80\% - CO_2: 20\%$  y  $Ar: 75\% - CO_2: 25\%$  respectivamente y además en la figura 4.33 para la proporción  $CO_2: 100\%$ .

A pesar de que la proporción  $Ar: 90\% - CO_2: 10\%$  posee una elevada microdureza en el cordón ubicándose en la tercera posición de las más elevadas de entre las proporciones, aun posee un porcentaje de alargamiento elevado y una ductilidad buena. Por lo general, en la zona de fusión la dureza es superior al del metal base debido a la elevada temperatura que esta zona alcanza, lo que lleva la masa de metal a un estado líquido y produciéndose un enfriamiento relativamente rápido. En la zona afectada por el calor los valores de dureza están comprendidos entre los valores de zona de fusión y los de metal base no afectado debido a los cambios microestructurales que producen los ciclos térmicos del proceso.

En este sentido, se observa en la figura 4.37 un incremento progresivo de la microdureza tanto en la zona afectada por el calor como en el cordón, en base a lo dicho anteriormente un incremento en la temperatura ocasionó este comportamiento. Al analizar las variables que pueden ocasionar el incremento de temperatura en el proceso, se tiene que el calor desprendido es función de la corriente y del potencial del arco, al revisar en la tabla 4.1 los valores de estos parámetros se puede notar que se mantuvieron constantes para todas las muestras.

Ahora bien, por parte del soldador no hubo variación en la intensidad de corriente y potencial de arco, el análisis ahora se enfoca en los gases, los cuales poseen una propiedad llamada potencial de ionización que para igualdad de corriente y longitud de arco, el gas con mayor potencial de ionización tendrá un mayor potencial de arco, lo que producirá un mayor desprendimiento de calor. Si se observa la tabla 4.15 puede notarse que la energía total producida por el  $CO_2$  sumando disociación mas ionización es 18,7 eV y la del Ar es 15,8 eV. La razón por la cual se suma la energía de disociación es porque el dióxido de carbono es un gas poliatómico y la energía que utilizan en su disociación la comunican a la pieza tras su recombinación.

Tabla 4.15 Energía de Disociación y de ionización para los gases utilizados en la mezcla de gas de protección.

Gas	Energía de Disociación (eV)	Energía de ionización (eV)
$CO_2$	4,3	14,4
Ar		15,8

Otra de las propiedades de los gases que ocasionó un incremento de la temperatura en el charco de soldadura y en la zona afectada por el calor fue la conductividad térmica de los gases, ya que la misma determina la

transmisión de calor que se produce desde el arco hacia la periferia. Esto influirá en cómo se repartirá el calor sobre la zona a soldar.

En la figura 2.11 se puede notar como la conductividad térmica del  $CO_2$  es mayor y que aumenta significativamente conforme se eleva la temperatura.

Por lo cual se encuentra congruencia entre el incremento de la microdureza en cada fase a medida que va aumentando el  $CO_2$  en la proporción de la mezcla de gases de protección.

Dicho incremento es el causante del ascenso en la temperatura por el aumento en la energía del arco por causa de la disociación e ionización del mismo y por su capacidad para transferir esta energía al metal soldado.

### 4.13 Resultados del ensayo de espectroscopia por chispa

Los elementos químicos que componen una aleación son los que determinan en un alto porcentaje el comportamiento mecánico de la misma, en este sentido se realizó un análisis para determinar la composición química de cada una de las juntas soldadas con las proporciones de la mezcla  $Ar - CO_2$ , revisar los anexos 9,10,11.

Tabla 4.16 Cantidad en % del elemento químico presente en las juntas soldadas de acero inoxidable para las proporciones de gases de protección  $Ar: 100\%$  y  $Ar: 95\% - CO_2: 5\%$ .

<i>Elemento</i>	<i>Ar: 100%</i>		<i>Ar: 95% - CO2: 5%</i>	
	<i>Metal Base</i>	<i>Cordón de soldadura</i>	<i>Metal Base</i>	<i>Cordón de soldadura</i>
Cr	19,42%	21,20%	19,429	19,878
Ni	7,32%	8,67%	7,322	7,718
Mn	1,23%	1,90%	1,224	1,414

Tabla 4.16 Cantidad en % del elemento químico presente en las juntas soldadas de acero inoxidable para las proporciones de gases de protección Ar: 100% y Ar: 95% – CO<sub>2</sub>: 5%.

<i>Elemento</i>	<i>Ar: 100%</i>		<i>Ar: 95% – CO<sub>2</sub>: 5%</i>	
	<i>Metal Base</i>	<i>Cordón de soldadura</i>	<i>Metal Base</i>	<i>Cordón de soldadura</i>
P	0,14%	0,14%	0,187	0,203
S	0,10%	0,10%	0,099	0,1
C	0,08%	0,06%	0,075	0,071
Si	0,60%	0,49%	0,609	0,554
Mo	0,51%	0,52%	0,582	0,601
v	0,04%	0,16%	0,095	0,12

Tabla 4.17 Cantidad en % del elemento químico presente en las juntas soldadas de acero inoxidable para las proporciones de gases de protección Ar: 90% – CO<sub>2</sub>: 10% y Ar: 85% – CO<sub>2</sub>: 15%.

<i>Elemento</i>	<i>Ar: 90% – CO<sub>2</sub>: 10%</i>		<i>Ar: 85% – CO<sub>2</sub>: 15%</i>	
	<i>Metal Base</i>	<i>Cordón de soldadura</i>	<i>Metal Base</i>	<i>Cordón de soldadura</i>
Cr	19,377	20,7595	19,325	21,641
Ni	7,4355	8,3425	7,549	8,967
Mn	1,229	1,569	1,234	1,724
P	0,1695	0,1225	0,152	0,042
S	0,1005	0,101	0,102	0,102
C	0,0745	0,0695	0,074	0,068
Si	0,6165	0,496	0,624	0,438
Mo	0,5405	0,5735	0,499	0,546

v	0,0955	0,149	0,096	0,178
---	--------	-------	-------	-------

Tabla 4.18 Cantidad en % del elemento químico presente en las juntas soldadas de acero inoxidable para las proporciones de gases de protección Ar: 80% – CO2: 20% y Ar: 75% – CO2: 25%.

Elemento	Ar: 80% – CO2: 20%		Ar: 75% – CO2: 25%	
	Metal Base	Cordón de soldadura	Metal Base	Cordón de soldadura
Cr	19,607	21,345	19,753	20,937
Ni	7,45	8,906	7,405	8,267
Mn	1,244	1,749	1,247	1,919
P	0,138	0,133	0,14	0,307
S	0,102	0,049	0,101	0,127
C	0,042	0,075	0,077	0,107
Si	0,615	0,42	0,641	0,838
Mo	0,498	0,506	0,52	0,702
v	0,096	0,023	0,102	0,152

Tabla 4.19 Cantidad en % del elemento químico presente en las juntas soldadas de acero inoxidable para la proporción de gases de protección CO2: 100%.

CO2: 100%		
Elemento	Metal Base	Cordón de soldadura
Cr	18,64	17,287
Ni	7,581	7,365

Tabla 4.19 Cantidad en % del elemento químico presente en las juntas soldadas de acero inoxidable para la proporción de gases de protección  $CO_2$ : 100%.

Mn	1,274	1,582
P	0,36	0,361

Tabla 4.19 Cantidad en % del elemento químico presente en las juntas soldadas de acero inoxidable para la proporción de gases de protección  $CO_2$ : 100%.

$CO_2$ : 100%		
S	0,131	0,228
C	0,081	0,15
Si	0,48	0,435
Mo	1,336	3,621
v	0,11	0,152

#### 4.14 Análisis de los resultados del ensayo de espectroscopia por chispa

Para verificar la composición química del metal base, se debe observar la tabla 3.2 en la cual aparecen los límites de las cantidades de cada uno de los elementos químicos que componen la aleación AISI 304, al comparar estos límites con los resultados arrojados por cada una de las muestras ensayadas, se tiene que la composición de las muestras corresponde con la composición estándar para este tipo de aleación.

Para el material de aporte se debe observar la tabla 3.4 en la cual se muestran los valores de las cantidades de cada uno de los elementos químicos constituyentes de este electrodo ER-308, el cual es utilizado según la norma AWS A5.4 para la soldadura de juntas de acero AISI 304.

En este caso la composición del material de aporte corresponde a la de un electrodo ER-308. Para el material de aporte la composición varía sustancialmente como lo indican las figuras 4.38, 4.39.

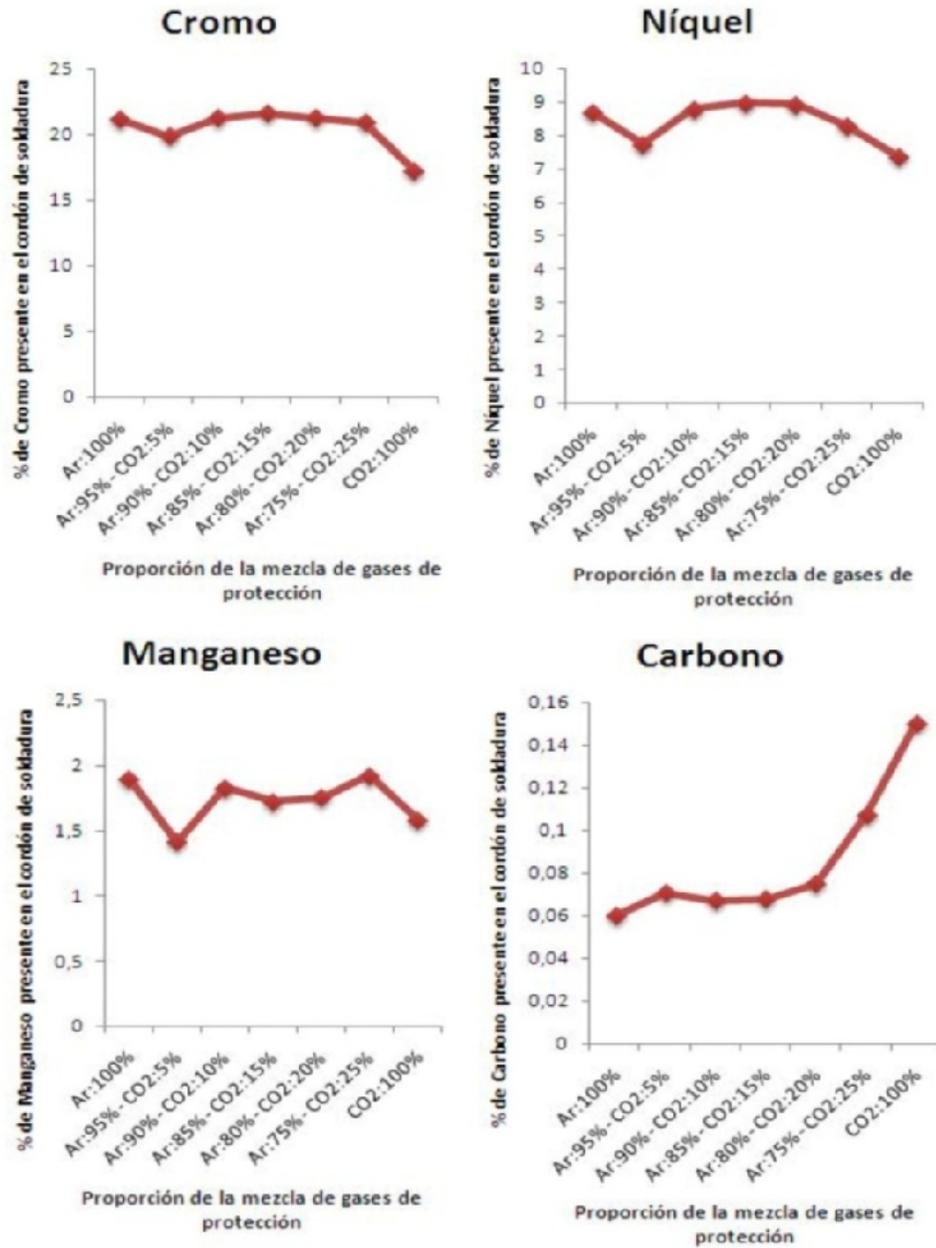


Figura 4.38 Comportamiento del cromo, níquel manganeso y carbono en el metal de aporte para diferentes proporciones de la mezcla Ar – CO2.

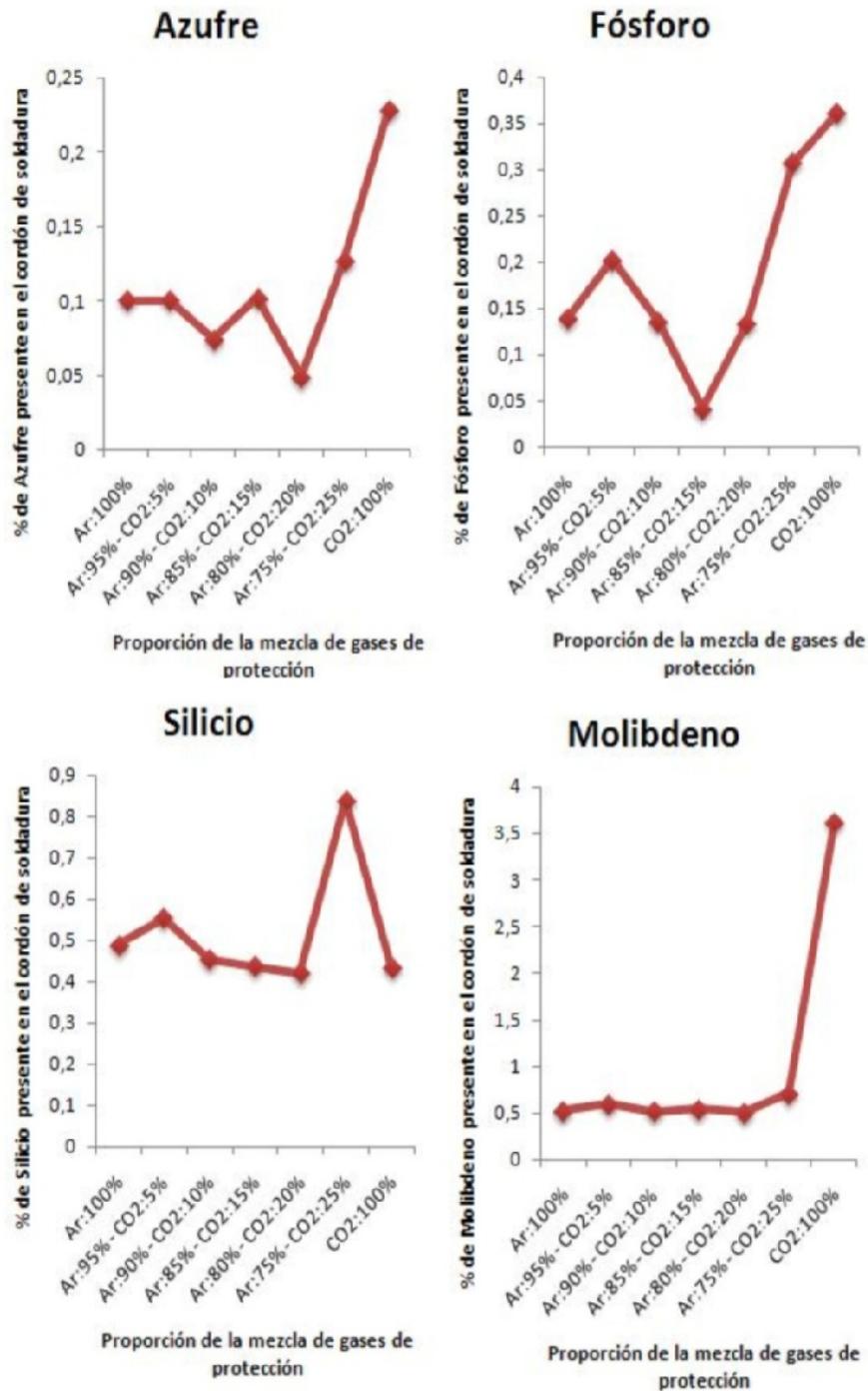


Figura 4.39 Comportamiento del azufre, fósforo, silicio y molibdeno en el metal de aporte para diferentes proporciones de la mezcla Ar - CO2.

Esta variación en cada uno de los componentes químicos presentes en la junta soldada, específicamente en el charco de soldadura puede atribuirse a múltiples variables, la primera es el incremento en la temperatura por parte de la exposición al arco eléctrico y a los efectos exotérmicos de disociación del dióxido de carbono, que van en aumento conforme aumenta la cantidad de  $CO_2$  presente en la proporción de la mezcla, la segunda es la reacción del  $CO_2$  con los componentes químicos presentes en el cordón de soldadura.

Al incrementar la temperatura por encima de  $420\text{ }^{\circ}C$  el carbono presente en el material de aporte absorbe el cromo perteneciente a las proximidades del grano de austenita, formando un carburo de cromo y provocando la descromización local, ahora bien, esto ocurre porque se incrementa la cantidad de cromo que el carbono a temperatura ambiente puede absorber como consecuencia del incremento de temperatura, esto sería la causa principal de la pérdida de homogeneidad en la cantidad de cromo que posee el grano en su totalidad, [16].

Por causa del incremento de temperatura se pudiera obtener la formación de carburos de cromo, pero a su vez la participación del dióxido de carbono en el proceso de soldadura añade una singularidad y es que parte del carbono del gas se mezcla con el carbono perteneciente al cordón de soldadura, en donde los niveles de carbono van en ascenso hasta alcanzar su valor máximo en la proporción  $CO_2 : 100\%$ , cabe destacar que la cantidad de carbono se mantiene relativamente constante en las proporciones  $Ar: 100\%$ ,  $Ar: 95\% - CO_2 5\%$ ,  $Ar: 90\% - CO_2 10\%$ ,  $Ar: 85\% - CO_2 15\%$ .

A partir de la proporción  $Ar: 80\% - CO_2: 20\%$  comienza un ascenso en la cantidad de carbono presente en el charco que va desde  $0,075\%$  hasta

0,15%. Lo cual indica que para las proporciones con 20%, 25% y 100% de  $CO_2$  existe una mayor probabilidad de que la adición de este elemento a la composición química del material depositado se lleve a cabo, cabe destacar que a partir de la proporción con 20% de  $CO_2$  ocurre un incremento en la cantidad de carbono que es añadido al material depositado conforme aumenta la cantidad de  $CO_2$  presente en la proporción de la mezcla de gases de protección. Este incremento de carbono conlleva a un descenso en la resistencia a la corrosión del metal depositado.

La cantidad mínima de cromo para que estos aceros posean su inoxidableidad es de 12%, el valor más bajo reportado por los resultados del análisis químico fue 17,287% presente en la proporción de  $CO_2$ : 100%. A pesar de esto superficialmente el acero perdió completamente su capacidad de resistir la oxidación para las proporciones  $Ar$ : 85% –  $CO_2$ : 15%,  $Ar$ : 80% –  $CO_2$ : 20%,  $Ar$ : 75% –  $CO_2$ : 25%,  $CO_2$ : 100%, esto como consecuencia de la reacción de los átomos de oxígeno con el hierro presente en el cordón de soldadura durante la recombinación, además de esto debido a las condiciones del ensayo químico la detección de la cantidad de cromo por debajo de la superficie es la que se visualiza en los resultados ya que para el análisis químico se realizó un desbaste de la zona de refuerzo del cordón de soldadura para que el indentador que realiza el examen pudiera apoyar en una superficie uniforme, de lo contrario la máquina podía salir perjudicada, así que esto introduce un cierto porcentaje de error experimental al ensayo, lo ideal sería haber realizado el examen con el cordón de soldadura sin mecanizar.

El níquel presenta un comportamiento similar al cromo, ya que mantiene valores relativamente constantes, sin embargo presenta un descenso en la proporciones  $Ar$ : 95% –  $CO_2$ : 5%,  $CO_2$ : 100%, con un valor de 7,718% y 7,365% respectivamente, según lo recomendado la mínima

cantidad de níquel que puede poseer este tipo de aleación es 8% por debajo de este valor comienzan a notarse ciertos efectos en las propiedades mecánicas.

Las consecuencias de añadir níquel a una aleación de acero inoxidable lo muestra la tabla 2.1, para las pequeñas variaciones que se presentan en la proporciones antes mencionadas, solo se tomarán en cuenta los efectos con tres flechas o más que muestra la tabla ya que los otros son casi imperceptibles, en este sentido la disminución de la cantidad de níquel podría conllevar a una disminución del % de alargamiento y esto se verifica en la figura 4.11 en donde los valores del % de alargamiento para estas dos juntas soldadas con las proporciones  $Ar: 95\% - CO_2: 5\%$  y  $CO_2: 100\%$  poseen valores por debajo de sus proporciones predecesoras.

En el caso del manganeso el cordón de soldadura mantiene variaciones en su composición que están en un rango de 1,414% a 1,919%, tal como lo indica la figura 4.38. No hay una tendencia en el comportamiento del manganeso con respecto al incremento de  $CO_2$  en la proporción de gases de protección.

Según la figura 4.38 para el azufre se registran valores constantes hasta las proporciones de  $Ar: 75\% - CO_2: 25\%$  y  $CO_2: 100\%$ , en donde los valores obtenidos son 0,127% y 0,228% los efectos de estas variaciones según la tabla 2.1 son básicamente para la forjabilidad y maquinabilidad del material en cuyo caso disminuye la primera característica y aumenta la segunda.

Para el fósforo se tiene un incremento en la cantidad que posee el charco de soldadura para las proporciones  $Ar: 75\% - CO_2: 25\%$  y  $CO_2: 100\%$ , siendo el valor máximo 0,361%, las proporciones con cantidades

menores a 25% de  $CO_2$  registran valores que van desde 0,042% a 0,203% promediando 0,1309%.

La figura 4.38 muestra el caso del silicio en donde la tendencia de los valores a medida de aumenta la cantidad de  $CO_2$  es mantenerse constante, sin embargo se registra un pico en la proporción  $Ar: 75\% - CO_2: 25\%$ , que posiblemente se deba a un error experimental. Un caso similar se observa en el molibdeno en el cual los valores son constantes para cada proporción pero al llegar a  $CO_2: 100\%$  se obtiene un valor de 3,621% que puede ser producto de un error experimental.

El vanadio se comporta de manera irregular ya que este elemento tiene una fuerte tendencia a formar carburos, según lo muestra la tabla 2.1, el valor mínimo lo reporta la proporción  $Ar: 80\% - CO_2: 20\%$  siendo el mismo de 0,023% y el valor máximo 0,16% lo posee la proporción de  $Ar: 100\%$ .

# Conclusiones y Recomendaciones

## **Conclusiones**

- A medida que se incrementa la cantidad de  $CO_2$  en la proporción de la mezcla de gases de protección aumenta el valor de esfuerzo máximo de la junta soldada, sin embargo este efecto es observado solo para proporciones con una cantidad de  $CO_2$  menor al 10%, al aumentar la cantidad del mismo por encima de este valor, el esfuerzo máximo comienza a disminuir.
- El descenso de la cantidad de Argón presente en la proporción de gases de protección trae como consecuencia una disminución en el % de alargamiento de la junta soldada de acero inoxidable.
- El descenso en la cantidad de Argón trae consigo un aumento en el valor de la microdureza en la zona afectada por el calor y en el charco de soldadura.
- El incremento de  $CO_2$  en la proporción de gases de protección por encima del 10% produce un aumento en la cantidad de, salpicaduras, grietas, socavamientos, porosidades e inclusiones globulares presentes en la junta soldada.
- A medida que aumenta la cantidad de  $CO_2$  presente en la proporción de gases de protección, ocurre una disminución en el tamaño de la zona de transición entre el metal base y la microestructura correspondiente al cordón de soldadura.
- Con el incremento del  $CO_2$  por encima del 10% aumenta la cantidad de Carbono presente en la junta soldada.
- Un incremento de la cantidad de  $CO_2$  por encima del 5% en la proporción de gases, oxidación superficial en la junta soldada.

## **Recomendaciones**

Al agregar pequeñas cantidades de  $CO_2$  a la proporción de la mezcla de gases de protección se producen efectos significativos en las propiedades mecánicas y metalúrgicas tal como lo indican los antecedentes presentados en esta investigación, razón por la cual se debería estudiar la variación de la proporción de gases de protección, incrementando la cantidad de  $CO_2$  en intervalos de 1% hasta llegar a 10 %, más allá de 10% el contenido de carbono en el metal de aporte comienza a incrementarse ocasionando una pérdida en la resistencia a la corrosión, condición desfavorable para las juntas soldadas de aceros inoxidables austeníticos.

Estudiar la influencia de la proporción de la mezcla de gases de protección  $Ar - CO_2$  sobre la resistencia a la corrosión en juntas soldadas de acero inoxidable austeníticos AISI 304 mediante soldadura GMAW.

Es muy importante que el soldador sea calificado y tenga experiencia previa en el proceso de soldadura GMAW, y es recomendable la utilización de cupones de prueba para la determinación de los parámetros de soldadura a utilizar.

Antes de utilizar el  $CO_2$  para el proceso de soldadura GMAW, se debe comprobar que la pureza de  $CO_2$  no sea menor al 99,97 %, de lo contrario esto ocasionaría porosidades en el cordón de soldadura.

Para que no se vea afectado el análisis químico como consecuencia de la oxidación de la junta soldada, es necesario almacenar en un envase a prueba de humedad las probetas a utilizar en el ensayo antes mencionado.

Se recomienda estudiar el comportamiento de los carburos de Cromo bajo la influencia de la mezcla de los gases de protección  $Ar - CO_2$

# Referencias bibliográficas

---

- [1] Stenbacka, N. y Persson, K. A. (1989). *Gases de protección para soldadura de arco metálico*. Revista de soldadura.
- [2] J. Lozano, P. Moreda, C.L. Llorente y P.D. Bilmes. (2000). *Características de fusión de soldaduras GMAW de aceros inoxidables austeníticos*. Jornadas SAM 2000-IV Coloquio Latinoamericano de Fractura y Fatiga.
- [3] Lu Shanping, Fujii Hidetoshi y Nogi Kiyoshi (2005). *Influencia de los parámetros de soldadura y la composición de gas de protección en la soldadura de GTA en la forma del cordón*. Revista del instituto de hierro y acero de Japón, vol. 45, No 1.
- [4] Puchi-Cabrera, E.S. Puchi, R. A Saya-Gamboa, J. G. La Barbera-Sosa, Mariana H. Staia, V. Ignoto-Cardinale, J. A. Berríos-Ortiz, G. Mesmacque. (2007). *Vida a la fatiga de juntas soldadas del acero inoxidable AISI 316L obtenidas mediante el proceso GMAW*. Revista de metalurgia, vol 43, No 3.
- [5] InfoAcero. (2000). [On-line] Disponible en: [http://www.infoacero.cl/acero/que\\_es.htm](http://www.infoacero.cl/acero/que_es.htm)
- [6] Barreiro, J. (2001). Aceros especiales. Dossat.
- [7] UTP. (2009). [On-line]. Disponible en: <http://www.bsmex.com.mx/utp-welding/>
- [8] TERMO SOLDEX. (2009). [On-line]. Disponible en: <http://materias.fi.uba.ar/6750/ACEROS%20INOXIDABLES.pdf>

[9] Hernández, G. (2009). *Manual del soldador*. (19ª ed.). CESOL.

[10] Grupo Linde. (2009). [On-line]. Disponible en: [http://www.linde.com/international/web/lq/es/like35lges.nsf/repositorybyalias/10958\\_gases%20de%20protecci%C3%B3n%20para%20soldadura/\\$file/Gases%20de%20protecci%C3%B3n%20para%20la%20Soldadura%2010958-0410.PDF](http://www.linde.com/international/web/lq/es/like35lges.nsf/repositorybyalias/10958_gases%20de%20protecci%C3%B3n%20para%20soldadura/$file/Gases%20de%20protecci%C3%B3n%20para%20la%20Soldadura%2010958-0410.PDF).

[11] Álvarez, L. (2000). *Soldadura MIG/MAG*. (2ª ed.). Grafinsa.

[12] Skoog, D. A. (2004). *Química Analítica*. (7ª ed.). Mc Graw Hill.

[13] Torres, C. (2002). *Programación del seminario y normas para la elaboración y presentación del trabajo especial de grado escuela de ingeniería mecánica*. Valencia.

[14] T. Murakami, "La estructura de las aleaciones hierro-carbono-cromo", Sci. Rep. Tohoku Imperial Univ. Vol 7 (part I), 1918, p 217.

[15] T. Murakami, "La estructura de las aleaciones hierro-carbono-cromo", J. institute de acero y hierro Jpn. Vol 100 (No.2), 1919, p 445.

[16] P.D. Bilmes; M.J. Solari; "Metalurgia de la Soldadura y Guías de la Soldabilidad de los Aceros Inoxidables Austeníticos", Anais III Congreso Iberoamericano de Soldagem, 1992.