

CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**EFFECTO DEL ÁNGULO DEL BISEL EN UNIONES SOLDADAS POR
GMAW EN ACERO ESTRUCTURAL**

POR

YAIR VENTURA RAMÍREZ

MONOGRAFÍA

**EN OPCIÓN COMO ESPECIALISTA
EN TECNOLOGÍA DE LA SOLDADURA INDUSTRIAL**

SALTILLO, COAHUILA, MÉXICO A 20 DE ENERO DE 2017

CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**EFFECTO DEL ÁNGULO DEL BISEL EN UNIONES SOLDADAS POR
GMAW EN ACERO ESTRUCTURAL**

POR

YAIR VENTURA RAMÍREZ

MONOGRAFÍA

**EN OPCIÓN COMO ESPECIALISTA
EN TECNOLOGÍA DE LA SOLDADURA INDUSTRIAL**

SALTILLO, COAHUILA, MÉXICO A 20 DE ENERO DE 2017

AGRADECIMIENTOS

Agradezco primero que nada a Dios por darme la vida, protección y capacidad para realizar esta etapa en mi vida.

A CONACYT por el apoyo brindado para la realización de este proyecto, así como a COMIMSA por la oportunidad que me brindo para cursar la especialización.

A los profesores que participaron en la formación académica durante la especialización.

A mi tutor académico Dra. Argelia Fabiola Miranda Pérez por su apoyo y recomendaciones proporcionadas durante el desarrollo de la monografía, así como la confianza brindada para aceptarme como su estudiante.

A los trabajadores de COMIMSA que sin ellos esto no hubiera sido posible, por su enseñanza y ayuda en los trabajos relacionados al desarrollo del proyecto.

Agradezco profundamente a mi familia por el apoyo incondicional y comprensión para la para lograr mis objetivos.

A mis compañeros que me apoyaron, orientaron, corrigieron y me brindaron su tiempo.

DEDICATORIA

A mis hijos Anthony y Zoé para que se sientan orgullosos y para su bienestar es que tengo que seguir preparándome.

A mi esposa Diana que siempre está a mi lado apoyándome y la confianza que deposita en mí es invaluable.

A mis padres Francisca y Miguel, mis hermanos Jonathan, Yareli, Miguel y Sahid, que son los que siempre están allí para darme ánimos.

En especial a mi abuela Bonfilia que fue un gran ejemplo en mi vida, me enseñó a luchar para salir adelante y nunca rendirse, siempre la llevare en mí corazón.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS.....	i
DEDICATORIA	ii
ÍNDICE GENERAL.....	iii
SÍNTESIS	1
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN	3
1.1 Antecedentes	3
1.2 Objetivos	6
1.2.1 Objetivo general	6
1.2.2 Objetivos específicos	6
1.3 Justificación.....	7
1.4 Planteamiento del problema.....	7
1.5 Aportación científica y tecnológica	8
1.6 Alcance y delimitaciones	8
CAPÍTULO 2 ESTADO DEL ARTE.....	9
2.1 Acero Estructural.....	9
2.1.1 Clasificación	10
2.1.2 Acero AISI 1018	12

2.1.3 Propiedades relevantes.....	14
2.2 Soldadura GMAW.....	20
2.2.1 Generalidades.....	20
2.2.2 Soldabilidad.....	21
2.2.3 Tipos de proceso.....	23
2.2.4 Modos de transferencia.....	25
2.2.5 Parámetros.....	26
2.2.6 Proceso robotizado	37
2.3 Diseño de unión	41
2.3.1 Generalidades.....	41
2.3.2 Tipos de uniones.....	43
2.3.3 Requerimientos para el diseño.....	46
2.3.4 Preparación de unión a tope	48
2.3.5 Diseño actual	56
CAPÍTULO 3 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE BIBLIOGRAFÍA	59
CAPÍTULO 4 CASO DE ESTUDIO	63
4.1 Metodología.....	63
4.2 Material.....	64

4.3 Soldadura MIG (GMAW)	66
4.4 Pruebas de calidad.....	70
4.4.1 Inspección visual.....	70
4.4.2 Líquidos penetrantes	73
4.4.3 Técnicas de caracterización.....	76
4.4.4 Resultados.....	78
4.4.5 Ensayo de tensión.....	91
CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES	93
CAPÍTULO 6 RECOMENDACIONES.....	95
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	97
ÍNDICE DE TABLAS	104
ÍNDICE DE FIGURAS.....	106

SÍNTESIS

Para realizar un procedimiento de soldadura existen muchos factores a considerar, el principal es el diseño de unión que requiere un análisis previo del servicio del producto y la calidad de la soldabilidad del material. La preparación de la unión es otro de los puntos importantes, esta es la que proporciona la calidad de la soldadura, por lo tanto, si es adecuada, disminuyen las discontinuidades.

La preparación para espesores gruesos se realiza en doble bisel o bisel completo, si se utiliza un bisel con raíz lo primordial sería que fuera con gran ángulo de abertura, pero ocasiona incremento de costo, desde el consumible hasta la potencia requerida y las propiedades del material disminuyen por la zona afectada por el calor. También existen procesos de desbaste por electroerosionado, por jet de agua, por plasma, pero son más caros.

En cuanto al equipo que se debe usar para realizar una preparación de bisel, el adecuado es el mecanizado, porque se puede controlar la precisión y es de mayor calidad en comparación con la térmica o el conformado.

En el presente estudio se llevó a cabo una experimentación con el proceso de soldadura GMAW robotizado en acero estructural AISI 1018 con el fin de analizar el efecto que tiene variar el ángulo de abertura de la unión. Se establecieron 4 ángulos de abertura 30, 40, 50 y 60°, manteniendo los parámetros de soldadura para las distintas preparaciones. Una vez soldadas se evaluó la unión mediante ensayos no destructivos, y posteriormente análisis microestructural por medio de las técnicas de caracterización; microscopía óptica y estereoscopía, se obtuvo como resultado que la probeta que presentó mejores características fue la de preparación de 30°. Además, se realizó evaluación de las propiedades mecánicas, microdureza y un ensayo de tensión para la preparación de 30° y 40° obteniendo como tensión máxima 294 y 303 MPa respectivamente en una penetración parcial del 53% del espesor. La microdureza que presentaron estas preparaciones son de 196 y 215 Hv respectivamente. En la sección transversal se observa mayor calidad en la preparación de 30° y la microestructura que predomina en todas las muestras es ferrítico perlítica que varía la formación de ferrita de acuerdo a la velocidad de enfriamiento que se presentó en cada una por influencia de la geometría del bisel.

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

El acero se ha utilizado por casi 150 años en una gran cantidad de estructuras sufriendo cambios significativos durante ese periodo. Los primeros grados de acero eran carbono-manganeso, con baja resistencia y alta deformabilidad [1].

Aproximadamente en el año de 1900, el acero estructural en los Estados Unidos y en otras partes tenía un límite elástico 220 a 250 MPa., adoptando el nombre de acero estructural “suave”, con el carbono y manganeso como elementos principales en su composición química [2; 3; 4]. El contenido de carbono en esos aceros es mucho más alto que el empleado para los aceros estructurales en la actualidad, así como el contenido de los elementos como

el azufre y el fósforo. Esto explica por qué las estructuras antiguas que requieren rehabilitación son difíciles de soldar con los procesos actuales de soldadura.

A mediados del siglo XX estos materiales tenían menos contenido de carbono (bajo carbono) y, por lo tanto, mejor soldabilidad que los aceros más antiguos [1]. En los últimos treinta años, los avances más notables se han hecho en la tecnología de las operaciones de procesamiento de acero [5].

La producción, fabricación, construcción y prácticas de diseño para estructuras de acero han tenido cambios importantes en los últimos diez a quince años, debido a la evolución en la producción de los aceros y su utilidad en las industrias para manufactura de componentes [6].

El acero estructural es materia prima en las industrias de manufactura en componentes automotrices, mejorando continuamente el proceso de producción incluyendo procesos de soldaduras eficientes, rentables y de calidad.

Existen muchos procesos de soldadura, uno de los más flexibles y adaptables a cualquier tipo de producción es Soldadura por Arco de Metal y Gas (GMAW, por sus siglas en inglés), que surge en la década de 1920, con disponibilidad industrial en 1948, en un principio se consideraba básicamente un proceso de electrodo de metal descubierto de diámetro pequeño con alta densidad de corriente que empleaba un gas inerte para proteger al arco donde la primera aplicación de este proceso fue para soldar aluminio. Entre los avances del proceso están las operaciones a bajas densidades de corriente y con corriente continua pulsada, la aplicación a diversos materiales y el empleo de gases y mezclas de gases activos sobre todo CO₂, por este último avance aceptó formalmente el término GMAW [7].

El proceso GMAW puede operar en modalidades mecanizadas, semiautomáticas o automáticas. Todos los metales de importancia comercial como el acero al carbono, pueden ser soldados en cualquier posición variando el gas protector, electrodo y diseño de unión [7].

Hoy en día las industrias desarrolladas buscan mejorar la productividad de soldadura y mecanización de producción, por lo que se inclinan por usar GMAW robotizado por la alta eficiencia de deposición y bajo costo de operación, considerándose como uno de los procesos más populares en la industria automotriz [8].

Los sistemas robotizados se utilizan para soldadura automática, por lo que un sistema de este tipo es considerado de bajo costo con estrategia de control adecuada conservando eficazmente la estabilidad del arco, transferencia de material de aporte, calor uniforme y baja salpicadura [9].

Las industrias que cuentan con procesos automatizados de soldadura fabrican componentes con manufactura precisa y compleja, donde el diseño de éstos se convierte en uno de los aspectos más relevantes junto con la buena selección de parámetros principalmente por la influencia en el producto final.

El diseño de juntas o uniones se ha estudiado desde 1930 por el profesor Wilson de la Universidad de Illinois en EE. UU, en el Reino Unido por el Instituto de los Ingenieros Civiles, después del final de la Segunda Guerra Mundial por el Dr. T. R. Gurney [7].

Algunos autores que estudian los diseños de juntas, proporcionan recomendaciones acerca de diseñar estructuras soldadas: metodología de cálculo y colocación de refuerzos de apoyo para brindar más rigidez, entre otras recomendaciones.

Por el avance en los procesos de soldadura, el diseño de unión ha ido evolucionando a la par inicialmente porque la geometría impacta en los costos y la calidad de la unión efectuada. La industria automotriz ha tenido una gran influencia en la evolución del diseño de unión por la complejidad que presenta al hacer un ensamble.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Realizar una investigación bibliográfica del estado del arte sobre el efecto que causa el ángulo del bisel en uniones soldadas con el proceso GMAW robotizado en acero estructural AISI 1018 de 16mm de espesor.

1.2.2 Objetivos específicos

Definir los diferentes ángulos de bisel empleados en la actualidad de acuerdo a la revisión bibliográfica.

Describir el impacto de la calidad y el volumen de fusión en uniones de aceros estructurales variando el ángulo del bisel consultado en la literatura.

Aplicar los parámetros establecidos en proyecto alterno para el acero estructural por el proceso GMAW robotizado.

Realizar un caso de estudio en acero estructural AISI 1018 por el proceso de soldadura GMAW robotizado, variando el ángulo del bisel del diseño de unión.

Evaluar la calidad de unión por medio de la inspección visual y líquidos penetrantes sobre el cordón.

Aplicar técnicas de caracterización como Microscopía óptica y Estereoscopia, para evaluar la sección transversal del cordón determinando las fases presentes en las zonas de la unión, y medición del área de la deposición, las discontinuidades y la penetración.

Relacionar las fases presentes con las propiedades mecánicas de la unión soldada.

1.3 Justificación

La elaboración del siguiente trabajo monográfico permitirá recabar información de los diferentes ángulos del bisel empleados en unión a tope y describir su efecto al ser unidos con el proceso GMAW robotizado empleando acero estructural. El estudio sobre el efecto del diseño puede informar sobre los factores principales que influyen en el aumento de producción en componentes automotrices, aumento de la calidad de unión y el ahorro en consumibles, influyendo en una variable importante del proceso de soldadura y manufactura que puede brindar resultados factibles en uniones de elementos automotrices.

1.4 Planteamiento del problema

En la industria metalmecánica el acero estructural es el más utilizado para la fabricación de componentes de automotrices, estos elementos están unidos entre sí por medio de soldadura para soportar esfuerzos generados en servicio.

La innovación de los procesos de soldadura y la demanda de productos, ha llevado a implementar sistemas robotizados para agilizar los ensambles y aumentar la producción. Por lo anterior, se necesita una unión que cumpla con cierta calidad lo cual es difícil si se trabaja con espesores de gran tamaño y procesos nuevos, se requiere de una investigación sobre las variables que se pueden modificar para obtener una unión factible.

Existen componentes automotrices que presentan discontinuidades al ser soldados esto puede ser por los parámetros del proceso de soldadura, por la manufactura del componente como puede ser la geometría de la unión, ya que en la unión a tope la penetración completa y la coalescencia entre los elementos es el objetivo principal, para esto se necesita un volumen de fusión factible que está en función del ángulo del bisel empleado en la preparación, para una soldabilidad que cumpla con las especificaciones de calidad.

1.5 Aportación científica y tecnológica

Documentar el efecto del ángulo del bisel de uniones soldadas en acero estructural por el proceso GMAW robotizado, realizando mediciones con la geometría del cordón, volumen de fusión, zona afectada por el calor, profundidad de penetración y cuantificando las discontinuidades, esto como referencia sustentada para aumentar la producción y mejorar la calidad de uniones donde cuenten con este sistema de soldadura permitiéndole al consultor tomar una decisión sobre el ángulo de bisel que le sea factible en este diseño de unión.

1.6 Alcance y delimitaciones

El problema se limita al proceso GMAW robotizado y al acero estructural AISI 1018 de 16 mm de espesor, variando el ángulo del bisel en el tipo de unión a tope para analizar el efecto de esa variable, los parámetros del proceso de soldadura están establecidos por un proyecto alterno y para la evaluación de calidad se usarán ensayos no destructivos como inspección visual, líquidos penetrantes, y ensayos destructivos como la prueba de tensión y caracterización microestructural mediante microscopía óptica y estereoscopía.

CAPÍTULO 2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Acero Estructural

Hay que tener conocimiento de las propiedades de los aceros y la relación con sus microestructuras, como el arreglo de átomos, fracción volumétrica y tamaño en una sección microscópica, y a la vez la morfología de las diversas fases presentes en una sección macroscópica del material, que tiene una composición dada en una condición de procesamiento determinado. Las fases que se presentan en los aceros son microestructuras constituidas por varios cristales (se pueden apreciar en la micrografía), a veces hasta tres o cuatro tipos diferentes fases de estado sólido, la deformación ya sea en caliente o en frío y tratamiento térmico. Por lo anterior, cuando se produce un acero se hace para obtener propiedades deseadas como la dureza, por medio de pasos controlados del procesamiento generando un tipo de microestructura. Las

tecnologías de procesamiento no solo dependerán de la microestructura ya que también se suelen utilizar para crear microestructuras finales deseadas [5].

2.1.1 Clasificación

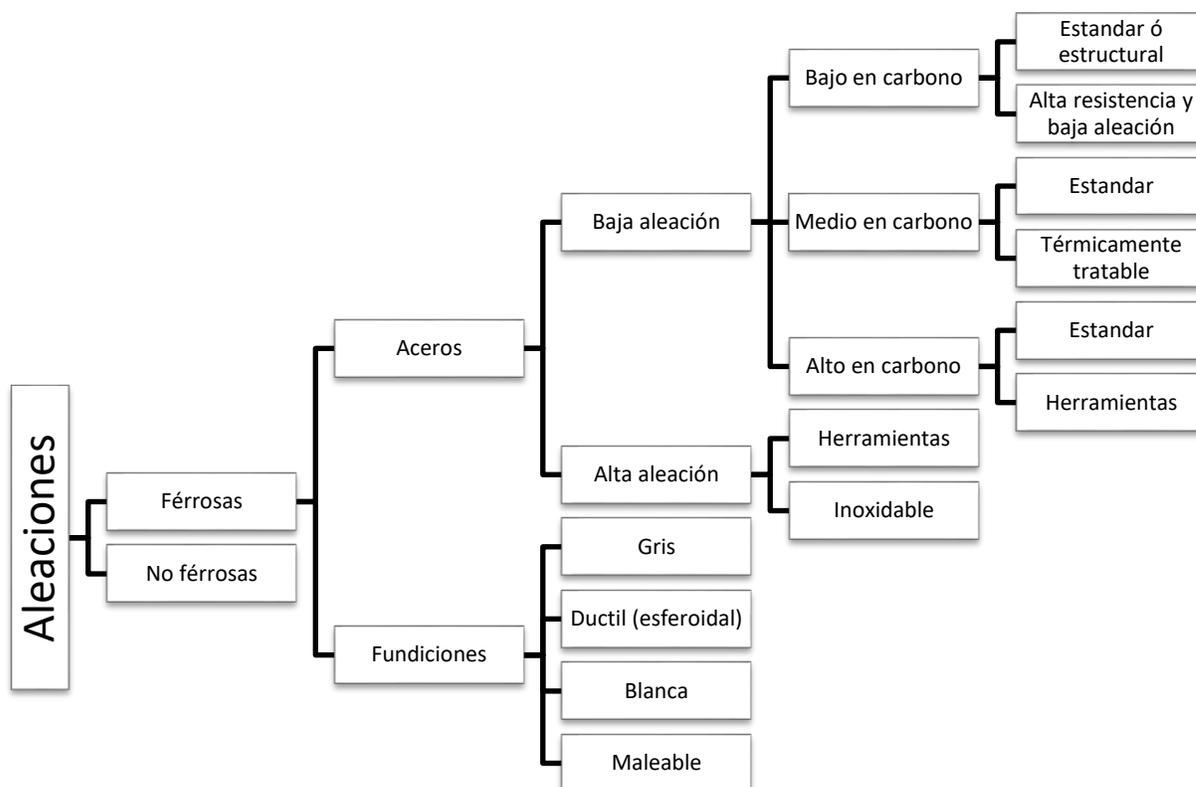


Figura 2. 1 Esquema de la clasificación aleaciones industriales [10].

Como se observa en el esquema de la Figura 2. 1 existe una clasificación de acuerdo a la cantidad de carbono y las cantidades en peso de los elementos de aleación. Las aleaciones ferrosas, tienen como base hierro-carbono y en estas aleaciones se encuentran los aceros de bajo carbono, los aceros aleados y de grado herramienta, los aceros inoxidables y los hierros fundidos, que son los materiales más utilizados en el mundo [11].

A continuación, se describe la clasificación de los aceros de baja aleación:

Los aceros de baja aleación: estos son los seleccionados cuando el régimen ingenieril no es muy exigente y su costo es más bajo, los elementos aleantes no superan el 5% en peso [12].

1. *Bajo carbono*: también son conocidos como aceros suaves y contienen de 0.07 a 0.30% en peso de carbono, se caracterizan por su baja resistencia a la tracción y alta ductilidad. No son endurecidos por tratamiento térmico, excepto los procesos de endurecimiento superficial [10]. Y los aceros de baja aleación y alta resistencia como elementos aleantes principales tienen carbono, manganeso, niobio, vanadio, silicio, cromo, cobre, níquel [12].
2. *Medio carbono*: tienen entre 0.31% en peso y 0.55% de C, proporcionando un equilibrio entre resistencia y ductilidad. Su característica es que son endurecen por tratamiento térmico, limitándose la templabilidad a las secciones delgadas o al endurecimiento de la superficie de espesores gruesos [10].
3. *Alto carbono*: tienen entre 0.56% - 1% de C, son endurecidos y adecuados para la resistencia al desgaste y/o de alta resistencia en partes o herramientas [10].

Como todo producto, el acero debe cumplir con ciertos estándares. La norma que clasifica y regula el acero es el Instituto Americano del Hierro y el Acero (AISI, por sus siglas en inglés), y se apoya de la norma establecida por la Sociedad de Ingenieros Automotrices (SAE, por sus siglas en inglés). Existe una identificación específica de cada grado, clase o tipo de acero dado por un número de letras, símbolos, nombre o combinación, la clasificación se realiza en base a la composición química, de acuerdo al uso o calidad [13] [10].

La nomenclatura consta de 4 dígitos, donde el primer dígito indica la aleación principal, el segundo dígito indica la modificación del primer dígito y los dos últimos indican el contenido de carbono en centésimas (ver Tabla 2. 1 y Tabla 2. 2) [12].

Tabla 2. 1 Designación y descripción del tipo de acero [12].

Designación	Tipo
10XX	Aceros ordinarios al carbono
11XX	Aceros al carbono re-sulfurados de fácil maquinado
13XX	Aceros con 1.75% de Mn (1.5-2%)
15XX	Aceros al manganeso (1.0-1.65%)

Tabla 2. 2 Significado del número del segundo número de la designación [12].

Identificador	Aleante
1	Manganeso
2	Níquel
3	Níquel-Cromo (principal aleante el cromo)
4	Molibdeno
5	Cromo
6	Cromo Vanadio (principal aleante el cromo)
7	Níquel-Cromo-Molibdeno (principal aleante el molibdeno)
8	Níquel –Cromo-Molibdeno (principal aleante el níquel)

2.1.2 Acero AISI 1018

El acero AISI 1018 es una aleación de hierro que tiene como elementos aleantes principales al silicio, manganeso con un intervalo de 0.6-0.9% en peso, el contenido de carbono es de 0.18%, sus propiedades principales son la ductilidad, resistencia a altas temperaturas y dureza en laminado. Este acero por el contenido de carbono se puede ubicar en el diagrama hierro-carbono (ver Figura 2. 2) como un acero de baja aleación hipo-eutectoide con una microestructura perlita más ferrita, pero debido al contenido de manganeso que excede el 1% modifica los puntos críticos y por lo tanto las temperaturas de transformación haciéndolas descender y disminuyendo el contenido de carbono

del punto eutectoide. El manganeso es un elemento económico y se encuentra en todos los aceros ya que sirve como desoxidante, aumenta la resistencia y dureza. Como ejemplo se nota la Figura 2. 3 el incremento de la zona austenítica por el efecto del Mn [7] [14] [15].

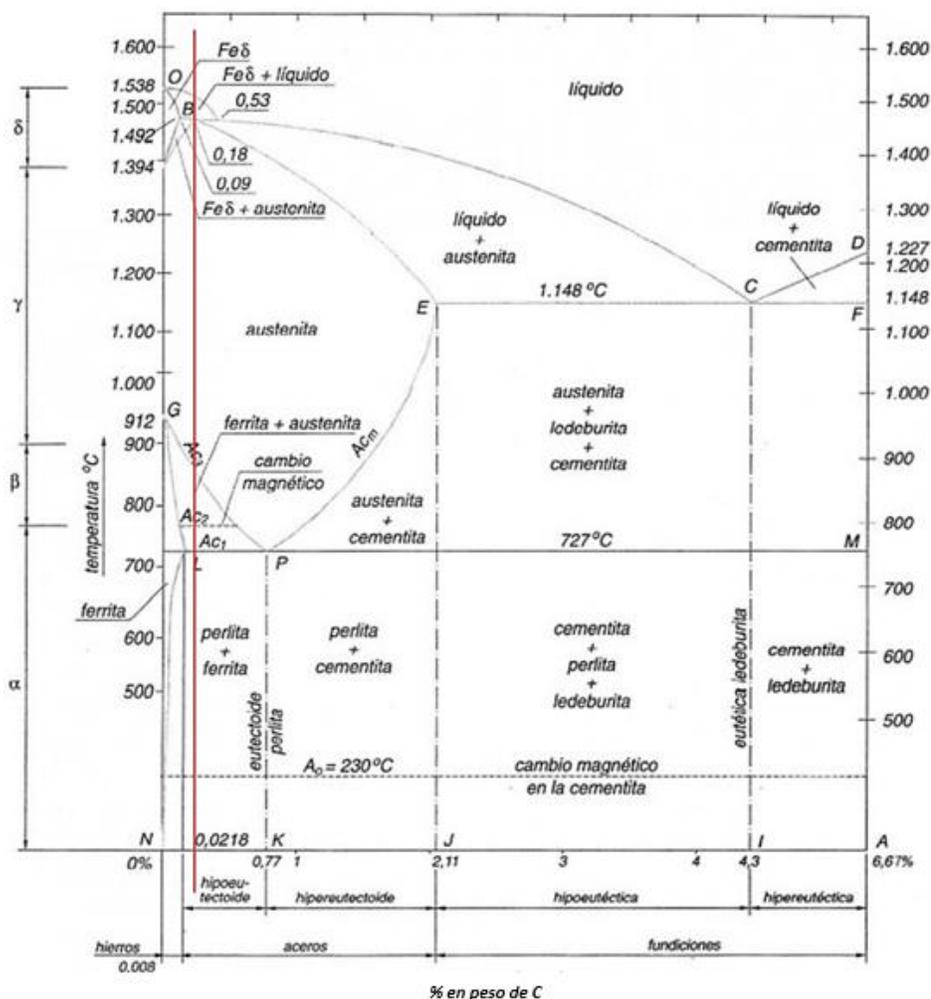


Figura 2. 2 Diagrama hierro-carbono [15].

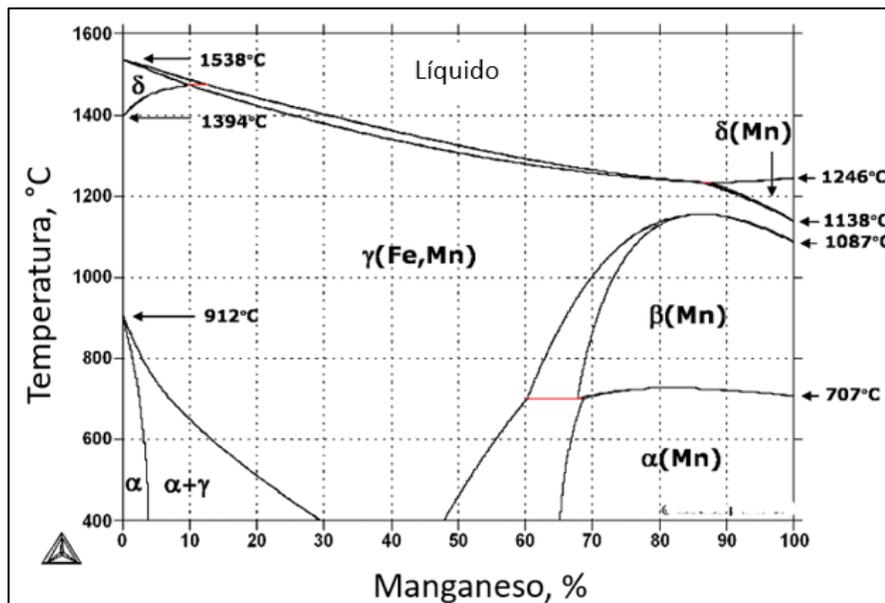


Figura 2. 3 Diagrama binario Fe-Mn [14].

2.1.3 Propiedades relevantes

La selección de un acero se determina por las propiedades mecánicas, y estas se obtienen directamente del proceso de laminación, tratamiento térmico, velocidad de enfriamiento, composición química, temperatura de servicio y deformación en frío. Es importante el análisis de cada factor del proceso de fabricación que cumpla con las características deseadas para una aplicación específica [11] [16].

2.1.3.1 Resistencia

El acero estructural tiene la característica de soportar grandes esfuerzos, sin importar que el espesor sea pequeño en comparación con otras de sus dimensiones, siendo esta una de las principales propiedades. Se puede evaluar la resistencia de un material, realizando pruebas de tensión, para calcular el esfuerzo de fluencia (F_y) y la resistencia última de tensión (F_u), para mayor

comprensión ver la Figura 2. 4. Esta propiedad en la manufactura automotriz se busca mantenerla o mejorarla en el procesamiento, como *Jha y colaboradores en el 2013* [17], mencionan como los precipitados ayudan a mantener esta propiedad en el acero, mejorando el conformado con la incorporación de elementos aleantes.

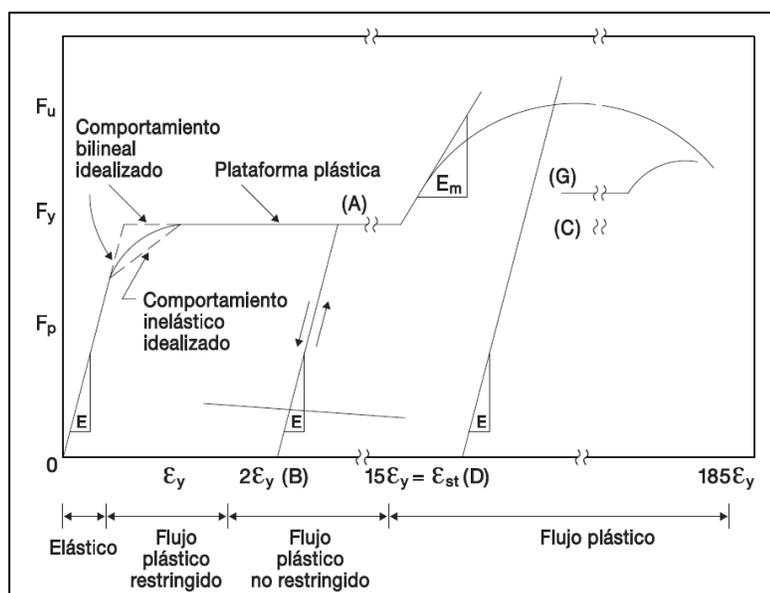


Figura 2. 4 Gráfica esfuerzo-deformación del acero, intervalos de comportamiento [18].

Dónde: F_u es el esfuerzo último de tensión del material (esfuerzo último), F_y es el esfuerzo en el que material cambia de estado elástico a plástico, F_p (límite de proporcionalidad) es el esfuerzo mayor donde la línea deja de ser directamente proporcional a la deformación, ϵ_y deformación plástica, E módulo de Young, E_m es el módulo de cizallamiento. **Flujo plástico no restringido** es el rango en el cual el material no sigue la dirección de deformación, **flujo plástico** es el rango que el material no regresa a su forma original, **plataforma plástica** es la meseta que mantiene el material en la zona plástica, **comportamiento bilineal idealizado** es cuando el material puede regresar a

su longitud original, **comportamiento inelástico idealizado** es cuando el material se deforma por esfuerzos multiaxial.

2.1.3.2 Ductilidad

Propiedad que es capaz de absorber sobrecargas, esta es medida por el porcentaje de alargamiento del material antes de la ruptura [19]. La ductilidad depende principalmente de la composición química del acero, microestructura, tamaño y distribución de las inclusiones no metálicas y de segregaciones [15]. Si un material tiene menos del 5% de alargamiento éste se considera frágil. *Shen y colaboradores en el 2015* [20], mencionan que la fracción volumétrica de austenita, morfología y contenido de carbono son quienes causan esta propiedad, si se obtiene ferrita y bainita en el procesamiento su deformación es de 50%.

2.1.3.3 Tenacidad

Propiedad que permite absorber energía en la zona plástica [13], siendo la medida de energía por unidad de volumen necesaria para deformar un cuerpo hasta la fractura [19].

2.1.3.4 Influencia de los elementos aleantes en las propiedades del acero

Los elementos aleantes aportan propiedades específicas en el acero estructural. A continuación, se analizan los elementos principales para este material:

- a) Hierro (Fe): el hierro es el elemento químico principal del acero de aproximadamente un 95% de su composición en el acero estructural estándar [11].

b) *Carbono (C)*: la cantidad de carbono limita al tipo de acero, este elemento proporciona resistencia a la tracción (ver Figura 2. 5), reduce su ductilidad (ver Figura 2. 6) y soldabilidad a medida que crece su proporción, el acero estructural tiene un contenido de 0.05% a 0.25% en peso. Es muy importante conocer el porcentaje de carbono ya que es el elemento de mayor segregación y modificación de microestructural [5] [12].

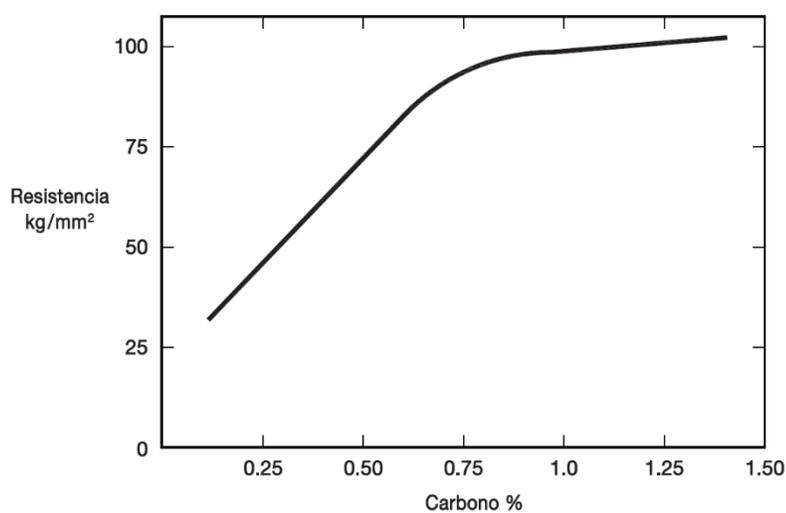


Figura 2. 5 Efecto del contenido del carbono en la resistencia de los aceros estructurales [18].

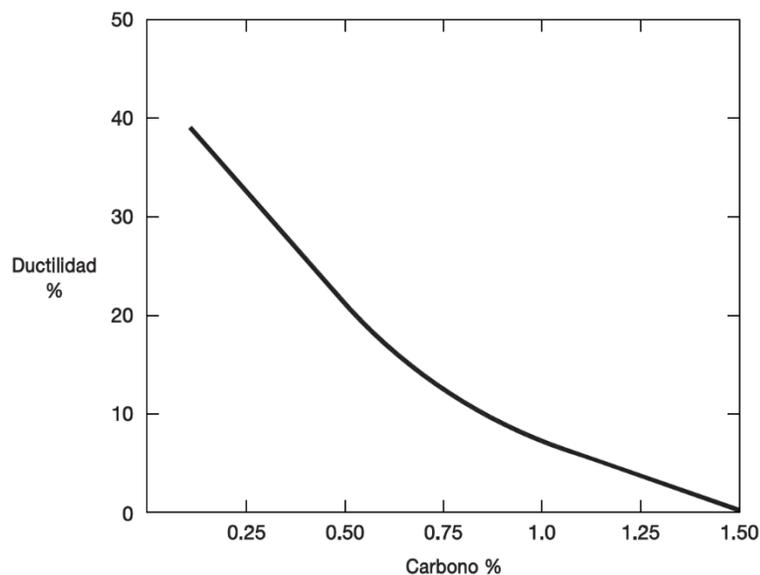


Figura 2. 6 Efecto del contenido del carbono en la ductilidad de los aceros estructurales [18].

- c) *Manganeso (Mn)*: este elemento mejora la resistencia y dureza, es desoxidante y neutraliza el azufre [11]. En un tratamiento térmico mejora la templabilidad y forma carburos para la resistencia al desgaste.
- d) *Fósforo (P)*: se caracteriza por su solubilidad en el acero segregado en un grado menor que el carbono y azufre, entre más cantidad de fósforo aumenta la resistencia y la dureza, disminuye la ductilidad y la tenacidad al impacto en el proceso de laminación [21].
- e) *Azufre (S)*: este elemento en grandes cantidades disminuye la ductilidad transversal y la tenacidad al impacto de laminación, al igual que el C la soldabilidad disminuye al aumentar su contenido, es muy perjudicial en la calidad de la superficie promoviendo la segregación, por lo que se limita a la cantidad de 0.04 a 0.05% en peso al igual que el P [21].

- f) *Silicio (Si)*: es utilizado como desoxidante variando su contenido de acuerdo al tipo de acero, aumenta la resistencia y dureza en el laminado, en los aceros de bajo carbono es perjudicial para la calidad superficial [12]. El contenido del silicio en el acero estructural es de 0.1% a 0.4% en peso.
- g) *Cobre (Cu)*: beneficia en la resistencia a la corrosión atmosférica cuando está presente en cantidades que superen a 0.20% en peso [11][12].
- h) *Plomo (Pb)*: mejora las características de mecanizado del acero estructural, estas adiciones se presentan en el rango de 0.15% a 0.35% en peso [16].
- i) *Boro (B)*: este elemento se agrega al acero para mejorar la templabilidad [5].

2.1.3.5 Factores que influyen en la resistencia del acero

En el proceso de producción del acero estructural existen deformaciones por la laminación generando esfuerzos internos que son consecuencia del enfriamiento irregular del acero.

Estos esfuerzos internos de tensión y compresión son conocidos como esfuerzos residuales, donde la magnitud y distribución depende de la geometría de la sección transversal del elemento, proceso de laminación, proceso de soldadura, condiciones de enfriamiento y tratamiento térmico posterior [15]. En servicio está expuesto a cargas que si son cíclicas puede ocasionar una fractura por fatiga.

El trabajo en frío como el alargamiento y el doblado, influye en las propiedades mecánicas del acero afectando el esfuerzo de fluencia y la resistencia a la fractura ya que la ductilidad disminuye. Pero si es sometida a

cambios extremos de temperatura su comportamiento es muy sensible, cuando la temperatura desciende la falla que se puede presentar ya no es dúctil si no frágil esto por la temperatura de transición, pero si la temperatura es alta la curva esfuerzo deformación deja de ser lineal y como efecto reduce las propiedades mecánicas [7].

La corrosión es otro factor influyente en la resistencia se da por las condiciones ambientales, es muy fácil de distinguir el óxido presente en el material, este puede producir óxido por el efecto del agua en el metal o durante el proceso de laminación [5].

2.2 Soldadura GMAW

2.2.1 Generalidades

Hay distintas formas de hacer una unión de elementos en la industria como son:

1. Unión mecánica.
2. Unión adhesiva.
3. Soldadura fuerte y blanda.
4. Soldadura.

Según la AWS una soldadura, es la unión, fusión o crecimiento conjunto de la estructura del grano de los materiales soldados, ya sean metales o no metales, efectuadas por el calentamiento de los materiales a temperaturas requeridas por la soldadura, con o sin la aplicación de presión, solo aplicando presión y con o sin el uso de material de aporte [22].

La soldadura por arco se refiere a un grupo amplio de procesos de soldadura que emplea un arco eléctrico como fuente de calor para fundir y unir metales [23].

Soldadura por Arco de Metal y Gas (GMAW) es un proceso de soldadura por fusión que utiliza un arco entre un electrodo consumible y el charco de soldadura con un blindaje de gas suministrado externamente sin ninguna aplicación de presión. También llamado Metal Gas Inerte (MIG, por sus siglas en inglés) o Metal Gas Activo (MAG, por sus siglas en inglés) [23].

MIG es el proceso que utiliza solo gases inertes (argón, dióxido de carbono o mezcla de ambos gases, helio) para protección, utiliza un electrodo de metal que sirve como material de relleno para la soldadura y se consume durante la soldadura, este proceso fue desarrollado para metales no ferrosos, pero se puede utilizar en aceros [24].

MAG es el proceso que utiliza solo gases activos (oxígeno, dióxido de carbono e hidrógeno) para protección, utiliza un electrodo como material de aporte para el cordón, este proceso se desarrolló para metales ferrosos [24].

2.2.2 Soldabilidad

Las propiedades que posee el acero estructural hace posible las uniones soldadas, presentando características específicas de acuerdo a sus elementos aleantes y las características metalúrgicas son definidas por el proceso de soldadura empleado (ver Figura 2. 7) [11] [16].

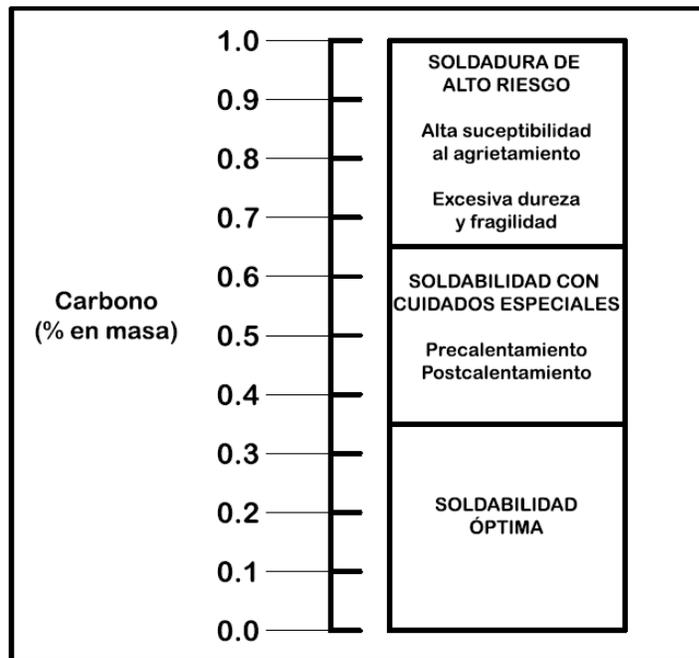


Figura 2. 7 Efecto del carbono en la soldabilidad del acero [18].

Es importante determinar la soldabilidad en el acero, debido que al contenido de carbono equivalente se determina si se realiza un precalentamiento para reducir el riesgo de agrietamiento disminuyendo la velocidad de enfriamiento de soldadura o un postcalentamiento como tratamiento térmico para un normalizado en la soldadura y homogeneizar las zonas del cordón y propiedades mecánicas con el material base, a continuación, se muestran 3 ecuaciones que sirven para el cálculo del carbono equivalente [7], la Ec.2 propuesta por Instituto Internacional de Soldadura (IIW, por sus siglas en inglés) es la más utilizada para los aceros estructurales por los elementos aleantes que tiene como variables:

$$CE = \%C + \frac{\%Mn + \%Si}{6} + \frac{\%Cr + \%Mo + \%Cb + \%V}{5} + \frac{\%Ni + \%Cu}{15} \quad (Ec.1)$$

$$CE = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5} + \frac{\%Ni + \%Cu}{15} \quad (\text{Ec.2})$$

$$CE = \%C + \frac{\%Si}{30} + \frac{\%Mn + \%Cu + \%Cr}{20} + \frac{\%Ni}{60} + \frac{\%Mo}{15} + \frac{\%V}{10} + (5\%B) \quad (\text{Ec.3})$$

Tabla 2. 3 Soldabilidad del acero en función del carbono equivalente [18].

Carbono equivalente (CE)	Soldabilidad
$CE < 0.40$	Excelente
$0.41 < CE \leq 0.45$	Buena
$0.46 < CE \leq 0.52$	Regular
$CE > 0.52$	Pobre

2.2.3 Tipos de proceso

Los componentes básicos del equipo de soldadura GMAW son: una pistola o antorcha, unidad de alimentación de electrodo, fuente de poder, carrete de electrodo, regulador de gas, taque de gas, cables y mangueras (ver Figura 2. 8) [24].

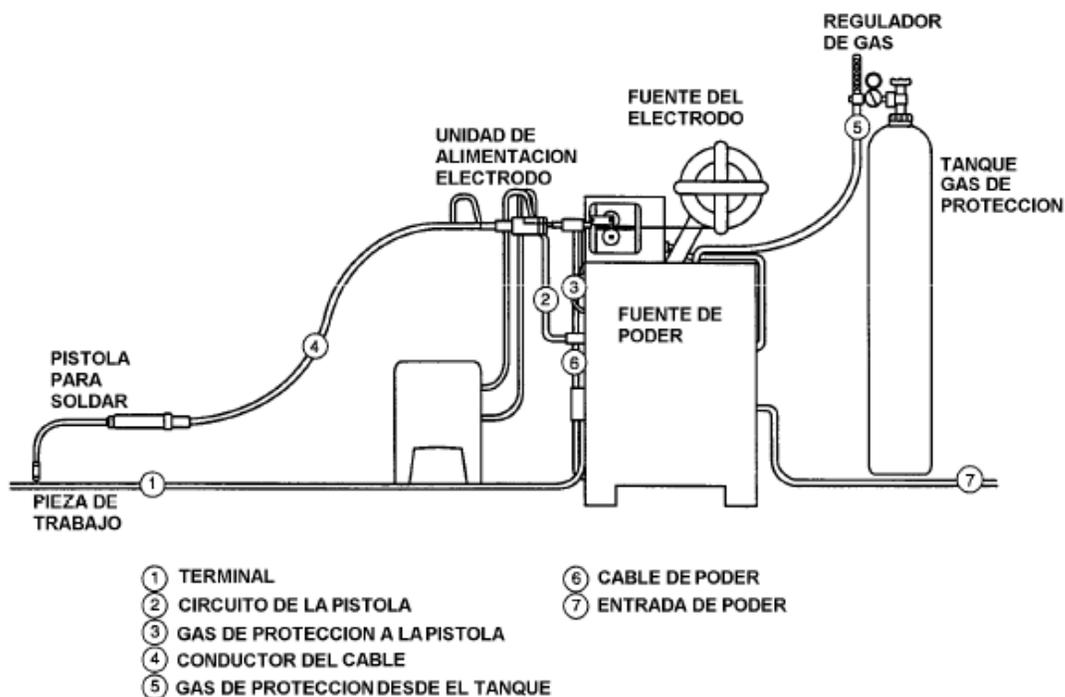


Figura 2. 8 Equipo de soldadura por arco de metal y gas [25].

El proceso GMAW se divide en tres tipos de equipos, que son [24]:

1. Manual
2. Semiautomático
3. Automático (robotizado)

1. Manual

Es el equipo básico, un operador es quien aplica la soldadura y ajusta los parámetros previamente, excepto el voltaje y amperaje ya que la maquina lo hace automáticamente, también realiza la trayectoria manualmente. Es muy importante el efecto de las variables del proceso ya que se debe mantener el

voltaje constante para la estabilidad del arco y evitar movimientos bruscos para no perder la distancia sobre la pieza de trabajo de ± 7 mm.

2. Semiautomático

Para este equipo, se ajustan previamente el voltaje y amperaje a los parámetros requeridos para cada trabajo y el equipo los regula automáticamente, la antorcha es automática permitiendo la alimentación del electrodo. El operador interviene muy poco en el proceso, por ejemplo, solo para corregir o reajustar parámetros, mover la pieza o cambiarla de posición.

3. Automático o robotizado

Se utiliza a escala industrial, apoyado de una unidad CNC para programar los parámetros y coordenadas que se van a efectuar en la unión. El equipo manual es apoyado por un brazo mecánico que realiza el proceso automáticamente en la pieza sin intervención humana.

2.2.4 Modos de transferencia

El electrodo consumible del arco en el proceso de soldadura se refiere al metal de relleno que se deposita, este es uno de los procesos más eficiente en tasa de deposición. Para que sea posible la eficiencia, el metal de relleno o material de aporte, tiene que ser transferido desde el electrodo al charco de soldadura con una pérdida mínima por salpicaduras [23].

Los modos de transferencia del metal para el proceso GMAW, son los siguientes.

1. Spray
2. Globular
3. Cortocircuito

4. Pulsada

Tabla 2. 4 Modo de transferencia del proceso de soldadura GMAW [7].

Transferencia	Voltaje y amperaje	Observación
Spray	Bajo	Plano y horizontal
Globular	Bajo	Salpicadura
Cortocircuito	Corriente continua	Electrodo en contacto con pieza de trabajo
Pulsado	Bajo	Voltaje y amperaje alto por los pulsos

2.2.5 Parámetros

Las variables para proporcionar los parámetros de soldadura en el proceso GMAW se clasifican en tres tipos [23]:

1. Variables que se pueden variar en línea durante el proceso.
2. Las variables que se establecen antes del inicio del proceso.
3. Las variables que no se pueden modificar.

Para el proceso GMAW, las variables claves de la primera categoría son el voltaje de entrada y polaridad, la velocidad de alimentación del electrodo y la corriente resultante y la velocidad de desplazamiento de la antorcha. Las variables clave que se establecen antes del inicio del proceso son el blindaje de flujo de gas y la mezcla, el ángulo de la antorcha, la distancia de contacto de tubo a la pieza de trabajo y el material y el diámetro del electrodo. Las variables

clave que permanecen a la tercera categoría son el espesor de la pieza (placa), la geometría de la unión y las propiedades físicas del metal base.

La penetración de la soldadura, la geometría del cordón y la calidad de la soldadura se ven afectados por [23]:

1. La corriente de soldadura (alimentación de velocidad de electrodo).
2. La polaridad de la fuente de alimentación.
3. Voltaje del arco (longitud del arco).
4. La velocidad de desplazamiento de la antorcha de soldadura.
5. Extensión del electrodo (stick out, en inglés).
6. Diámetro del electrodo.
7. Orientación del electrodo
8. Atmósfera (composición del gas y la velocidad de flujo).

En el trabajo de *Xiong y colaboradores* en el 2014 [26], se estudian los efectos de los parámetros para predecir un cordón de soldadura, estudiando los efectos críticos sobre el espesor de la capa, calidad de la superficie y la precisión dimensional en el proceso de deposición de metal, empleando un proceso de soldadura GMAW robotizado (ver la Figura 2. 9). Las variables de entrada del proceso fueron la velocidad de alimentación del alambre (F), velocidad de desplazamiento de la antorcha (S), voltaje de arco (V) y la extensión del electrodo (D), las variables de respuestas fueron la anchura del cordón (W) y la altura del cordón (H) (ver la Figura 2. 10). La velocidad de desplazamiento de la antorcha y la alimentación del alambre son las variables principales para el ancho y altura del cordón.

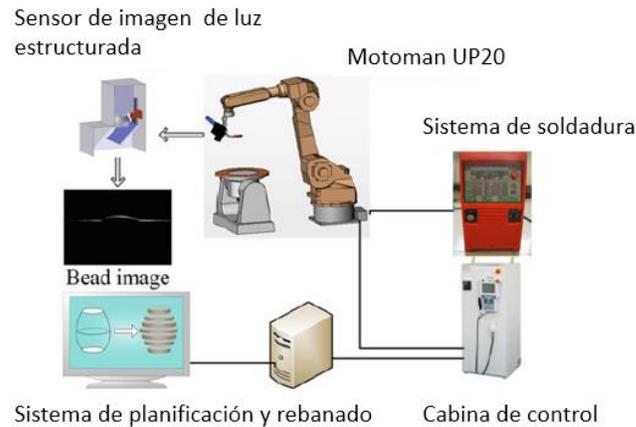


Figura 2. 9 Diagrama esquemático de la preparación experimental [26].

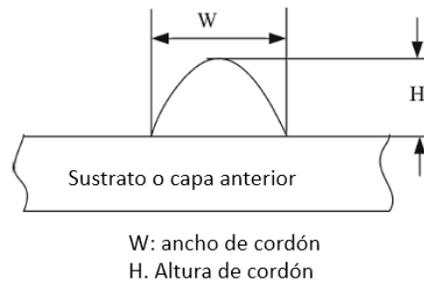


Figura 2. 10 Geometría del cordón de soldadura [26].

Otro de los trabajos que menciona algunos parámetros del proceso GMAW robotizado y que analiza la correlación entre la entrada de calor y la geometría del cordón es el de *Tham y colaboradores* en el 2012 [8], en donde el estudio realizado es analizando una unión en "T" para soldadura de filete con geometría 3F en la posición de descenso. El electrodo empleado es ER70S-6, protegido con CO_2 con flujo de 15 l/min, el material un acero al carbono con espesor de 6mm. Los parámetros de soldadura (ver la Tabla 2. 5) usados son el voltaje del arco y la velocidad de desplazamiento de la antorcha, la extensión del electrodo se mantiene fija a 13mm., con un robot OTC DAIHEN modelo DP-400 P30026. Para la penetración en estas pruebas, la velocidad de desplazamiento es la

variable principal y debido a esto aumenta la corriente manteniendo constante el voltaje, stick out y la alimentación del electrodo (ver la Figura 2. 11).

Tabla 2. 5 Parámetros de experimentación [8].

Parámetros	Unidades	Rango
Corriente de soldadura	Amps	100~250
Voltaje de arco	Volts	18~30
Velocidad de desplazamiento de la antorcha	cm/min	15~72
Extensión del electrodo	mm	13

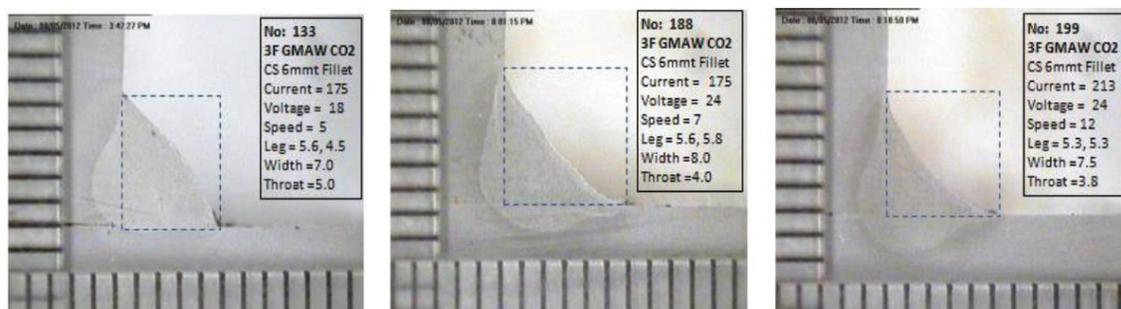


Figura 2. 11 Macrografías de la geometría del cordón en pruebas con posición 3F [8].

Adak y colaboradores en el 2015 [27], realizan un trabajo experimental en acero de bajo carbono con 9 mm de espesor con el proceso GMAW robotizado, donde correlacionan los efectos de los parámetros del proceso GMAW; tales como la velocidad de alimentación del electrodo, voltaje y la extensión del electrodo. Analizando el índice de la convexidad, la profundidad de penetración, área de refuerzo, la tasa de deposición, la anchura de la zona afectada por el calor, el tamaño del grano del metal de soldadura y el tamaño del grano de la ZAC. El análisis se enfoca a la geometría del cordón, también sugiere una metodología de la técnica de caracterización como la macrografía para medir el tamaño del cordón (ver Figura 2. 12), el análisis de la microestructura del metal soldado (ver Figura 2. 13) y el análisis de la microestructura de la ZAC. Se observa que el índice de convexidad (altura entre ancho del cordón) se ve

afectada por la entrada de calor, si esta es muy alta disminuye la convexidad, si la velocidad de alimentación del electrodo es alta aumenta la convexidad, el ángulo del cordón aumenta si es alto y disminuye si es ancho. La profundidad de penetración, el área de refuerzo y la tasa de deposición, son afectados por la alta velocidad de alimentación del electrodo y la convexidad. La anchura de la ZAC (zona afectada por el calor) es afectada por la velocidad de alimentación del electrodo, del stick out, voltaje, área de refuerzo y calor de entrada, el stick out y el calor de entrada tienen un impacto positivo mientras que las otras variables un impacto negativo. El grano y la ZAC son afectados por la entrada de calor, formando ferrita en el límite de grano (GBF) con ferrita alineada (FS(A)) y pocas colonias de ferrita acicular gruesa, que aumenta con la entrada de calor. *Kursun* en el 2011 [28] menciona que, si la entrada de calor es alta, reduce la resistencia al impacto y aumenta la dureza, así como el tamaño de grano.

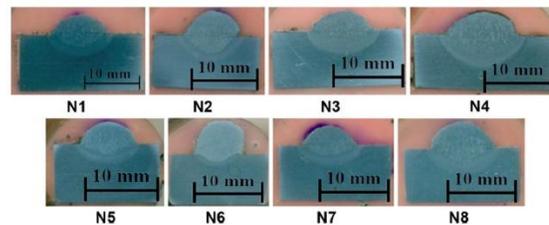


Figura 2. 12 Macrografía de la sección transversal con diferentes condiciones durante el proceso [27].

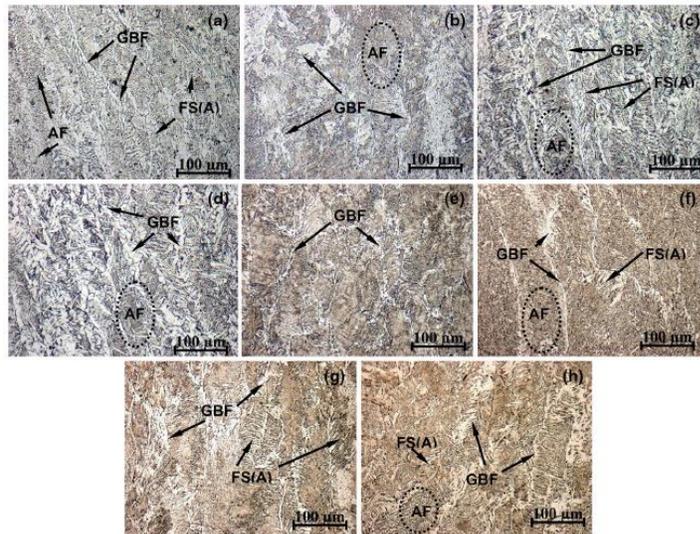


Figura 2. 13 Microestructura del metal soldado a) N1, b) N2, c) N3, d) N4, e) N5, f) N6, g) N7 y h) N8 [27].

2.2.5.1 Corriente de soldadura

El impacto que tiene esta variable es directamente con la velocidad de alimentación de electrodo o la velocidad de fusión, y se puede calcular con la siguiente ecuación [23]:

$$WFS = aI + bl_{so}I^2 \quad (4)$$

Donde WFS es la velocidad de alimentación de electrodo, a es una constante de proporcionalidad para ánodo o cátodo de calentamiento que su magnitud depende de la polaridad, la composición, entre otros factores, b es otra constante de proporcionalidad para el calentamiento por resistencia eléctrica, l_{so} es la extensión del electrodo o alambre de salida e I es la corriente de soldadura.

Como nota de esta variable, al aumento del diámetro de electrodo se requiere una mayor corriente de soldadura y mayor corriente de soldadura da como resultado:

1. Las tasas de deposición más altas.
2. Aumento de la profundidad y la anchura de penetración de la soldadura.
3. Aumento del tamaño del cordón de soldadura.

Cabe mencionar que la suposición es que solo esta variable se modifique y las otras se mantengan constantes, así para la descripción de cada variable.

2.2.5.2 Polaridad

El término se aplica al tipo de conexión eléctrica de la antorcha de soldadura con la fuente de alimentación eléctrica. Cuando la antorcha se encuentra conectada a la terminal positiva de la fuente se llama corriente directa positiva de electrodo (DCEP, por sus siglas en inglés) o polaridad directa, esta conexión proporciona arco estable, transferencia de fluida de metal, pocas salpicaduras, buen cordón de soldadura y buena penetración. La conexión corriente directa negativa de electrodo (DCEN, por sus siglas en inglés) no es muy usual ya que el tamaño de gota es grande y el arco es inestable [23].

2.2.5.3 Voltaje de arco (longitud del arco)

Longitud del arco y el voltaje del arco se usan indistintamente, pero tienen una relación estrecha, la longitud del arco es una variable que solo depende de la tensión del arco y el voltaje de arco depende de la longitud del arco y otras variables. La tensión de arco a menudo incluye la caída de tensión a través de la extensión del electrodo [23].

2.2.5.4 Velocidad de desplazamiento

La velocidad de desplazamiento es la velocidad a la que la antorcha de soldadura se mueve en dirección del cordón o a lo largo de la unión. Con bajas velocidades de desplazamiento la deposición de metal de aporte es alta y a velocidades muy bajas el arco incide en el volumen de fusión en lugar de la pieza de trabajo. Con el aumento de la velocidad, la duración de la energía térmica por unidad de longitud de soldadura transmitida primero aumenta y luego disminuye, por último, la penetración de la soldadura es máxima en algunas velocidades moderadas de la antorcha de soldadura [23].

2.2.5.5 Extensión del electrodo

La extensión del electrodo es la distancia entre la punta del tubo de contacto y el extremo del electrodo. A mayor extensión de electrodo aumenta la resistencia eléctrica del circuito que a su vez aumenta el calentamiento y por lo tanto la temperatura hace que aumente la velocidad de fusión, este aumento de resistencia absorbe un voltaje más alto y origina la disminución de corriente de soldadura, en este caso la disminución de corriente reduce la velocidad de fusión que resulta en un arco de longitud corto pero estable. La extensión del electrodo es de orden $\frac{1}{4}$ a $\frac{1}{2}$ pulgada [23].

2.2.5.6 Orientación del electrodo

La orientación del electrodo debe ser con respecto a la geometría de unión de soldadura, afecta la forma del cordón y la penetración en un grado mayor que la tensión del arco o de la velocidad de desplazamiento.

2.2.5.7 Tamaño de electrodo

Un electrodo de gran tamaño (diámetro) requiere una corriente más alta para la fusión. Las corrientes altas producen un volumen de fusión más alto, lo que lleva a mayores velocidades de deposición.

2.2.5.8 Gases de protección

Los gases de protección tienen como objetivo proteger el metal de soldadura que es fundido por contacto de la atmósfera, evitando la formación de óxidos de metal. Es muy importante la selección del gas de protección y las velocidades de flujo ya que tiene gran efecto sobre las características de arco, modo de transferencia de metal, la penetración, el perfil de cordón de soldadura y la velocidad de soldadura [23].

Los principales gases utilizados en el proceso GMAW son gases inertes (argón y helio) y pequeñas cantidades de oxígeno o dióxido de carbono. El argón es más pesado (1.4 veces) que el aire, es más eficaz en la protección del arco y en cubrir el charco de soldadura, en cambio el helio es más ligero (0.14 veces) que el aire y requiere velocidades de flujo de 2 a 3 veces mayor que las velocidades de flujo necesarios para el argón, pero posee una mayor conductividad térmica produciendo un plasma de arco uniformemente distribuido. Normalmente se utiliza una mezcla de Ar y He de (50 a 75%), con una adición de 1 a 5% de oxígeno o de 3 a 5% de CO₂ con Ar mejorando la estabilidad del arco y apariencia de la soldadura [23].

Los gases de protección tienen como función mantener fuera a los gases atmosféricos nocivos como lo es el oxígeno, nitrógeno, hidrógeno y la humedad, que puede producir la oxidación y otros defectos como porosidad, agujeros de alfiler y fragilidad de la soldadura.

En el trabajo de *Díaz y colaboradores* en el 2010 [29], informa sobre los efectos de los gases de protección para el proceso GMAW como es el dióxido (O_2) y el dióxido de carbono (CO_2) y la corriente del proceso en una unión cuadrada de ranura, en material acero de bajo carbono. La mezcla de estos gases es potencial para la unión de aceros al carbono de baja aleación, logrando un alto nivel de penetración si necesidad de aumentar el suministro de calor del arco eléctrico, esta mezcla promueve el aumento de las dimensiones del grano ya que reacciona el silicio y manganeso, oxidándose. Las variables como mezcla de gases entre 0 y 30% de O_2 , la corriente entre 120 y 250 A, para un espesor de 10 mm.

2.2.5.9 Clasificación de parámetros de proceso

Las variables del proceso GMAW se clasifican (Figura 2. 14), por los parámetros de soldadura directos (DWP, por sus siglas en inglés) o los parámetros de soldadura indirectos (IWP, por sus siglas en inglés). DWP son las relativas al refuerzo de la soldadura, geometría de la zona de fusión, propiedades mecánicas de la soldadura terminada, cordón de soldadura y discontinuidades. IWP son aquellas variables de entrada que controlan colectivamente a DWP.

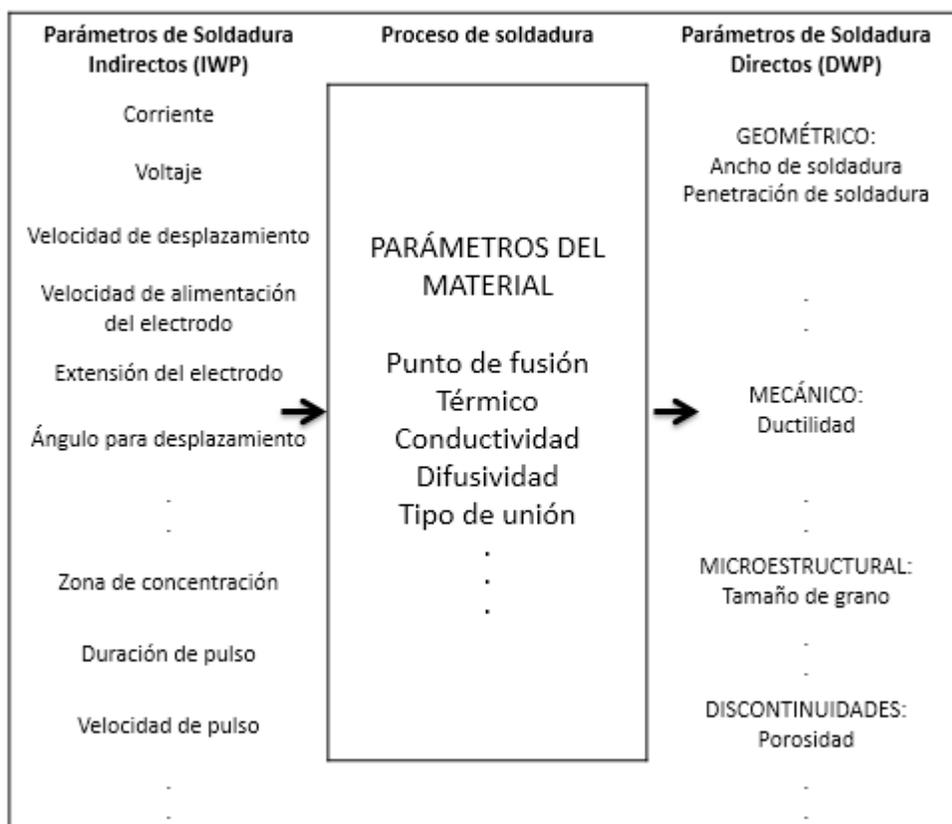


Figura 2. 14 Variables de entrada y salida del proceso de soldadura [23].

El soldador debe determinar los IWP para tener los DWP deseados, relacionando las variables de entrada y salida, esto se puede observar en el esquema de la Figura 2. 15.

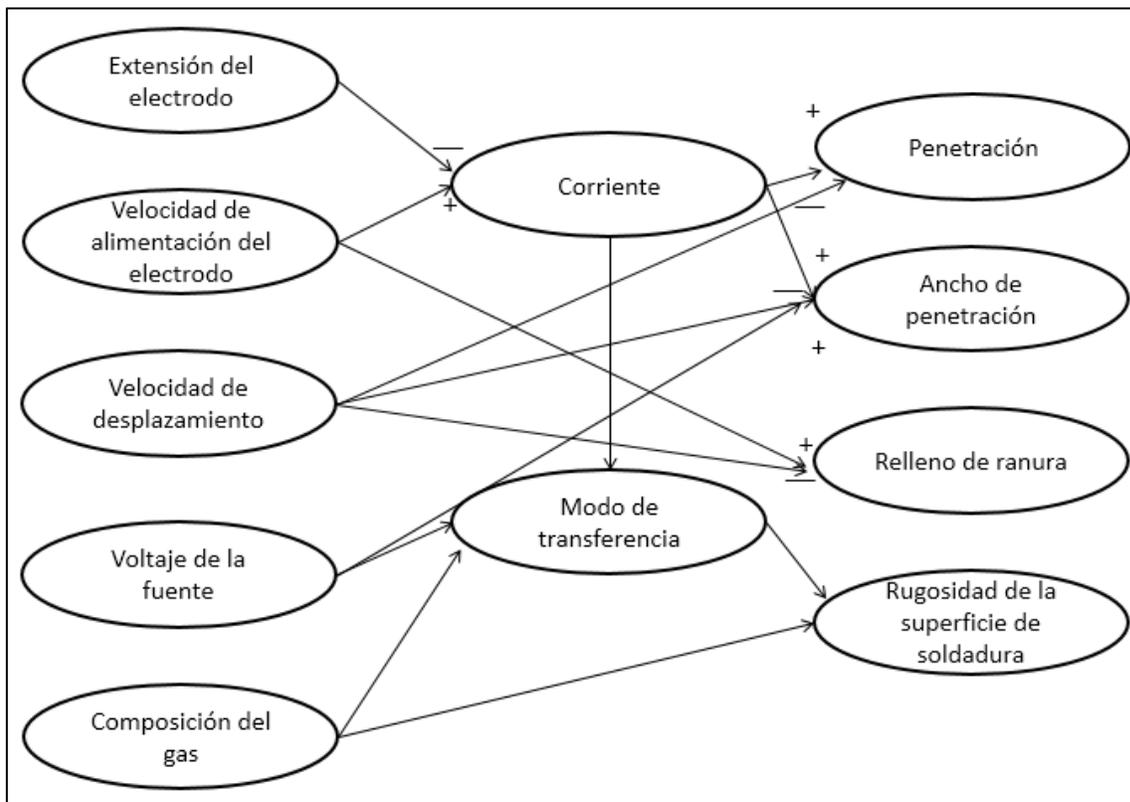


Figura 2. 15 Relación entre parámetros de soldadura en el proceso GMAW [23].

2.2.6 Proceso robotizado

Un brazo robótico basa su diseño en cadenas cinemáticas que cumplen con una región determinada, cuentan con un sistema de control de alta precisión con motores independientes en las articulaciones al igual que los sensores y pueden emplear sistemas electrónicos, hidráulicos o neumáticos en sus transmisiones [30] [31]. Es común encontrar en una planta automotriz robots de soldadura con proceso de resistencia por puntos y soldadura MIG, que son los procesos más flexibles para realizar la automatización.

En el trabajo de *Kah y colaboradores* en el 2013 [32], analizaron la evolución del proceso de soldadura por arco, en particular el efecto de la configuración de

los parámetros del proceso de soldadura con respecto a la forma de la onda. El regular la fuente de alimentación permite una buena soldabilidad con mejores propiedades mecánicas y gran eficiencia en el proceso, esto para placas delgadas, especialmente con cortocircuito, polaridad controlada y el movimiento del alambre de electrodo. El proceso de soldadura por arco se ha innovado considerablemente con nuevas técnicas y aplicaciones, teniendo como objetivo disminuir la entrada de calor, disminuir la salpicadura del proceso y aumentar la flexibilidad del proceso. Analizado el proceso de arco corto modificado se encuentra que el material con espesor de 0.6-5 mm. demanda de gran habilidad porque se puede perforar por el exceso de potencia; recomendado para placas delgadas, para punteado de ranuras, pasada de raíz, acero inoxidable y materiales disímiles.

2.2.6.1 Elementos del brazo robótico

Todo equipo está constituido por elementos o componentes que trabajan en conjunto para realizar un trabajo específico, en este caso aplicar un proceso de soldadura, cada uno de estos elementos tiene su analogía con el cuerpo humano (ver la Tabla 2. 6), a continuación, se describen las partes:

Tabla 2. 6 Analogía del cuerpo humano con los componentes estructurales de un robot industrial [33].

Robot	Cuerpo humano
Estructura mecánica	Estructura ósea
Sistema de transmisión	Tendones
Sistema de accionamiento	Músculos
Sistema sensorial	Sentidos
Sistema de control	Sistema nervioso
Elementos terminales	Manos

- **Estructura mecánica**

Es la responsable de dar la rigidez, permitir el movimiento relativo entre elementos y soportar los componentes, siendo semejante a un brazo humano (ver, Figura 2. 16). Cada uno de los movimientos se llama grado de libertad (GDL) que son los que permitan acceder a posiciones y orientaciones de su extremo [30].



Figura 2. 16 Partes de brazo robótico industrial KUKA KR16 [33].

- **Sistema de transmisión**

Son compuestas de elementos mecánicos y electrónicos, transmitiendo el movimiento de las articulaciones de la estructura mecánica.

- **Sistema de accionamiento**

Este sistema se compone de actuadores que son los encargados de producir el movimiento.

- **Sistema sensorial**

Es la parte inteligente del robot ya que le permite ser autónomo, este sistema le informa el estado en el que se encuentra al igual que el de su entorno y así puede tomar una decisión racional.

- **Sistema de control**

Este sistema analiza los datos dados por el sistema sensorial y envía las órdenes de movimiento acción a los actuadores y a los elementos terminales.

- **Elementos terminales**

Son elementos físicos a través de los cuales el robot interactúa con su entorno y pueden ser mecanismos de sujeción o herramientas de trabajo.

2.2.6.2 Celda de soldadura

Se denomina celda de soldadura al área determinada para operar un proceso de soldadura la cual cuenta con cierto nivel de seguridad y acondicionamientos especiales (ver Figura 2. 17).

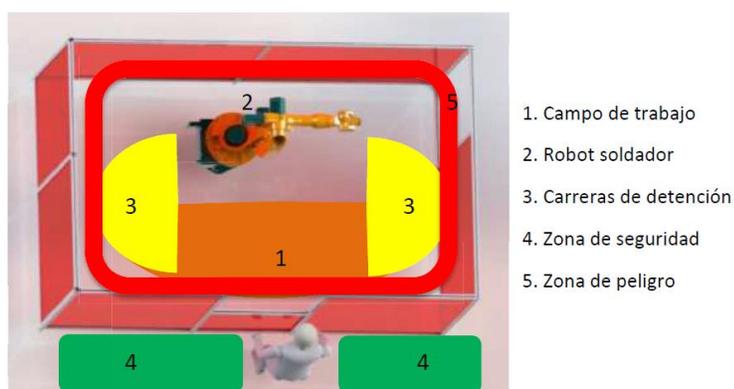


Figura 2. 17 Campos y zonas de trabajo, protección y peligro de celda de soldadura robotizada [33].

2.3 Diseño de unión

2.3.1 Generalidades

Antes de pensar en el tipo de soldadura, es necesario examinar el tipo de unión que se va a utilizar.

La unión se define como el acto o proceso de poner o juntar cosas para que sean continuas o formar una unidad [22]. Definido para la industria, la unión es el proceso de acoplamiento de un componente, elemento estructural, detalle, o para crear un ensamble, donde se requiere que un conjunto de partes o elementos formen un componente para una función específica que por sí solo no se puede lograr [34].

La terminología utilizada en el área de diseño cambia entre países y los términos utilizados por compañías del mismo país para definir lo mismo pueden ser diferentes, lo que ha llevado a estandarizar la terminología ofreciendo equivalencia entre varios idiomas, la Sociedad Americana de Soldadura (AWS, por sus siglas en inglés) publica AWS A-2.4 que lleva por nombre “Símbolos estándar para la soldadura, la soldadura fuerte y los ensayos no destructivos”, donde se encuentra la nomenclatura que se utiliza en el continente Americano [35].

En términos de ingeniería las instrucciones son plasmadas en dibujos simplificando estos por medio de símbolos en lugar de textos, ayudando a evitar confusiones o problemas entre socios al traducir el texto. El símbolo principal de soldadura es una flecha (ver Figura 2. 17) que señala la ubicación de la soldadura además de contener toda la información referente a la unión como el tipo de soldadura, su tamaño y el procedimiento que será utilizado [35].

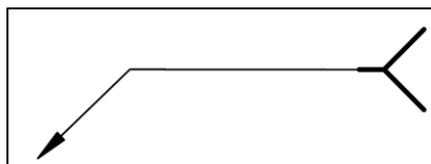


Figura 2. 18 Flecha indicando unión soldada [36].

Para establecer el diseño de unión soldada se toman las siguientes consideraciones (ver Tabla 2. 7):

Tabla 2. 7 Consideraciones en el diseño de una unión soldada [35].

Características	Ejemplos de elementos de consideración
Rendimiento de servicio	Resistencia estática Ductilidad Vida de fatiga Resistencia a la corrosión
Soldabilidad de materiales	Soldadura para resistencia Soldadura para ductilidad Soldadura para tenacidad Composición química Susceptibilidad al agrietamiento
Consumibles de soldadura	Busca propiedades del metal base
Proceso de soldadura	Tipo de soldadura Acceso Material Tamaño de componente Costo Taller o lugar de trabajo
Distorsión	Preparación de la soldadura Soldadura en una o dos caras Entrada de calor Secuencia de ejecución de la soldadura
Aplicación de soldadura	Posición Configuración Alcance Obstrucción Taller o lugar de trabajo
Inspección y ensayos no destructivos	Para soldadura
Costo	Cargos de construcciones y equipo. Intereses sobre capital, depreciación, Cargos de arrendamientos, mantenimiento Consumibles, materiales, energía Costos de nómina Gastos generales Impuestos

Métodos de ensayos no destructivos para estándar de calidad de la soldadura	Configuración de la junta y soldadura
Posición de la unión en fabricación	Carga de servicio Tamaño de componente Taller o lugar de trabajo Transporte Tener acceso para soldadura/inspección

2.3.2 Tipos de uniones

Para seleccionar el proceso de soldadura se requiere un análisis del diseño de unión que va a utilizarse, un ejemplo son las cargas que se transfieren de un elemento a otro a través de la soldadura situada en la unión, sin embargo, el diseño puede impactar en los costos [36] [35] [25].

Existen 4 tipos de unión más comunes (ver Figura 2. 19): unión a tope, unión traslapada, unión en "T" y unión en esquina [35].

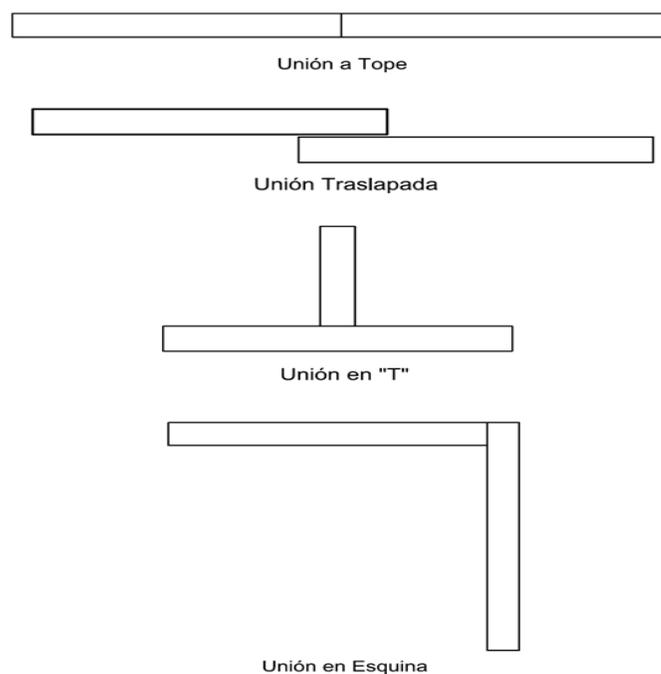


Figura 2. 19 Diseños de uniones soldadas más comunes [35].

Para minimizar costos se consideran los siguientes puntos:

1. Se debe seleccionar el diseño de unión que requiere menor cantidad de metal de aporte.
2. De lo contrario, utilizar ranura cuadrada y ranura con penetración parcial cuando éstas satisfagan los requisitos de resistencia y facilidad de mantenimiento.
3. Utilizar uniones de traslape o en filete en lugar de ranura, pero si la resistencia a la fatiga es menor y no satisfacen los requerimientos de servicio hay que usar ranura.
4. Utilizar soldadura en doble "V" o "U" en lugar de "V" o "U" simple en espesores gruesos de placas que minimicen la cantidad de material de aporte depositado y la distorsión resultante.
5. Biselar los elementos sujetos a contracción lineal a través de la soldadura, también la unión en esquina de espesores gruesos para reducir el desgarre laminar.
6. El diseño de unión debe permitir la aplicación de soldadura en el ensamble.

Cada tipo de unión cuenta con diversas configuraciones geométricas, de acuerdo a la AWS (2001) la unión a tope cuenta con las configuraciones de preparación de la unión que se muestran en la Figura 2. 20, consiste en un conjunto en el que dos o más partes se unen de extremo a extremo o borde a borde fusionando toda la sección transversal dentro del contorno del componente final [36].

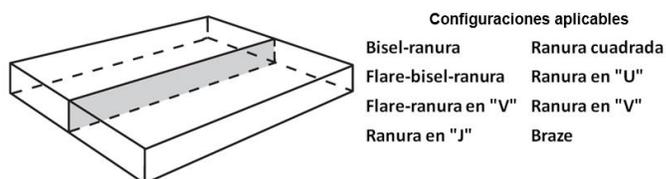


Figura 2. 20 Unión a tope y configuraciones aplicables [25].

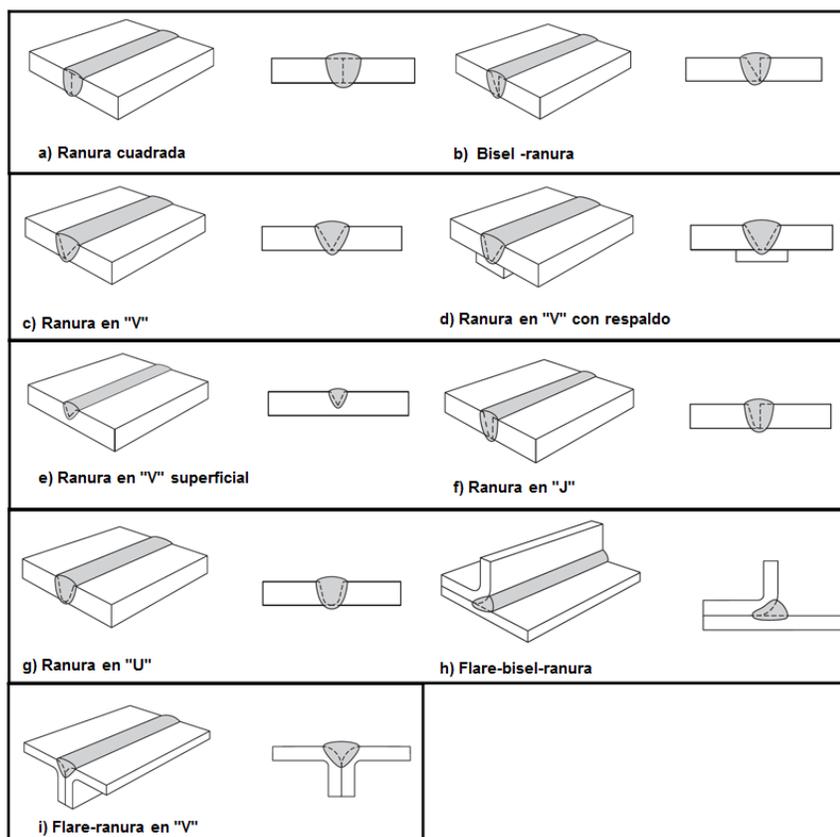


Figura 2. 21 Representación de unión a tope con distintas configuraciones [25].

En la Figura 2. 21 se observa las diferentes configuraciones simples que se pueden utilizar en la unión a tope establecidas por AWS [25]. La configuración que se analizará a lo largo de la monografía es la de Ranura en "V" superficial o bisel en ambos elementos con la misma geometría.

2.3.3 Requerimientos para el diseño

Los requerimientos para el diseño son en base a fabricación y armado de estructuras soldadas, se debe cumplir con estándares o modelos de comparación según el caso. El código AWS D1.1 (2010) publicado por la Sociedad Americana de Soldadura especifica que el código es aplicable en aceros al carbono o de baja aleación con un espesor mayor que 1/8 de pulgada (3.175 mm) con una resistencia a la fluencia mínima especificada de 100 ksi (690 MPa) o menor [37]. La Tabla 2. 8 enlista los requerimientos comunes para el diseño de uniones soldadas, para componentes tubulares y no tubulares de acuerdo con AWS D1.1 (2010) y de acuerdo a estos requerimientos cumplidos se puede decir que la unión es confiable.

Tabla 2. 8 Requerimientos comunes para el diseño de uniones soldadas (tubulares y no tubulares) de acuerdo al tipo de unión [37].

Soldadura de ranura	Soldadura de filete	Soldadura en "T" inclinada	Soldaduras en filete en orificios y ranuras	Soldaduras de tapón y muesca
Longitud efectiva.	Longitud efectiva (recta).	Soldadura en ángulos agudos entre 80° y 60° y en ángulos obtusos más grandes que 100°.	Limitaciones de diámetro y ancho.	Limitaciones de espesor y ancho.
Tamaño efectivo de CJP.	Longitud efectiva (ranura).	Soldaduras en ángulos agudos entre 60° y 30°.	Finales de ranura.	Longitud de ranura y pendiente.
Tamaño mínimo de PJP.	Longitud mínima.	Soldaduras en ángulos menores que 30°.	Longitud efectiva.	Área efectiva.
Tamaño de soldadura efectivo (ranura en proyección). Área efectiva.	Soldaduras de filete intermitentes (longitud mínima). Longitud efectiva máxima. Cálculo de la garganta efectiva. Refuerzo. Tamaño mínimo. Tamaño de soldadura de máximo en uniones de traslape. Área efectiva.	Longitud efectiva. Tamaño de soldadura mínimo. Garganta efectiva. Área efectiva.	Área efectiva.	

CJP- Unión con penetración completa.

PJP- Unión con penetración parcial.

2.3.3.1 Costos de diseño de unión

Los costos deben de estimarse en el diseño de algún componente, la integración de ingeniería permite realizar esta fase del diseño gracias al avance tecnológico. La fabricación de un componente que lleva uniones soldadas, debe ir acompañada de una evaluación de costos.

Los costos pueden estimarse con dos tipos de información [38]:

1. La información de tipo económico que define la relación entre los parámetros de la función y costos de fabricación.
2. La información técnica relacionada con el proceso de fabricación de la característica de preparación de unión.

La metodología se basa en la descomposición de la estructura que se va a soldar en varios ensambles. Se divide en dos operaciones [38]:

- a) Operaciones de preparación
- b) Operaciones de soldadura

Para las operaciones de preparación de la unión se basa en las características geométricas, dimensionales, y tecnológicas. A continuación, se describe el modelo de cálculo [38]:

- Descomposición de la estructura en sub ensambles para analizar el montaje de cada pieza.
- Establecer el inventario de las características de preparación para cada pieza.
- Selección de las características de preparación.
- Calcular el tiempo de fabricación y el costo para cada proceso de preparación.

- Seleccionar el proceso con el costo más bajo.
- Calcular el costo mínimo del ensamble.
- Calcular el costo mínimo de la estructura.

2.3.4 Preparación de unión a tope

Algunos procesos de soldadura (electrodos básicos de bajo hidrógeno) no cuentan con la capacidad de realizar una penetración completa, lo cual ha originado que la soldadura a tope requiera un bisel para poder depositar el material de aporte en la unión y existe la fusión con el metal base, aunque los procesos MAG y soldadura por arco sumergido (SAW, por sus siglas en inglés) logran hacer una penetración completa de la soldadura a tope cuando la corriente es lo suficientemente alta y existe un bisel de un solo lado [35].

Si no se llega a hacer una preparación de unión contemplando la corriente y el bisel, ocasionará defectos por falta de penetración o la unión no estará totalmente fundida dando origen al cizallamiento, por este tipo de problemas surge la exigencia de especificación [35].

La preparación de la unión se basa en la configuración geométrica de la articulación, el acceso para la soldadura, la inspección y el costo. La preparación más común y sencilla es la de la Figura 2. 22 donde es bisel en ambos elementos.

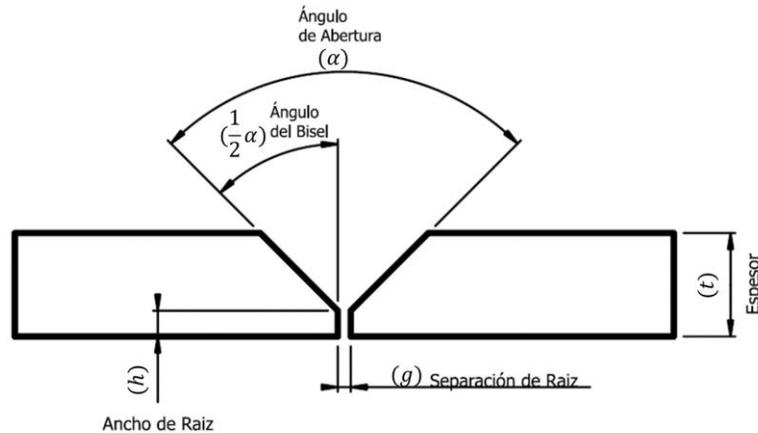


Figura 2. 22 Nomenclatura para la unión en "V" [35].

Para la soldadura a tope la cara de la base debe mantenerse a mínima profundidad para ahorrar consumibles, pero se introduce una gran cantidad de calor y el riesgo de distorsión es excesivo [35]. Para manufacturar un bisel de este tipo el equipo más común es el soplete, pero tiene una gran variación por lo que se sugiere una biseladora o una fresadora.

Para espesores gruesos es recomendable hacer doble biselado en lugar de un solo bisel como se muestra en la Figura 2. 23. Existen dos razones muy importantes:

1. El volumen del metal de aporte en la soldadura crea reducción de costos.
2. La entrada de calor y el historial térmico es más equilibrado a través del espesor llevando a niveles más bajo de distorsión.

Para minimizar la distorsión con este tipo de preparación no se hace simétrico el tamaño del biselado, el primer lado es menor que el segundo lado a soldar o se pueden variar los ángulos, esto porque la cara de la base sirve como si la preparación es un solo bisel [35].

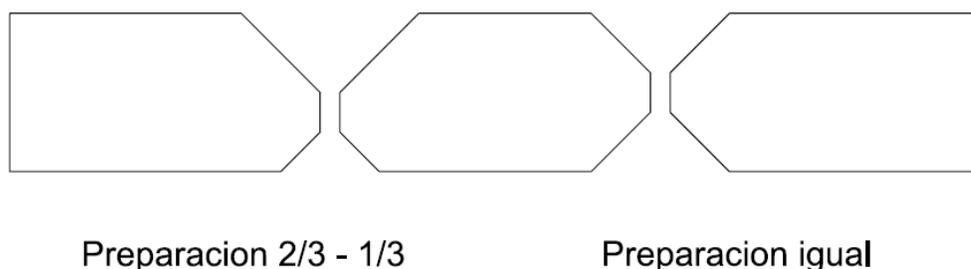


Figura 2. 23 Preparación de doble bisel [35].

Los investigadores Gong y Gillies en el 2008 [39], mencionan que tiene mejores propiedades la soldadura de ranura en espesores gruesos que la de filete, pero se necesita una preparación de unión de doble bisel (ranura X).

Describiendo las demás preparaciones de unión a tope donde su principal ventaja es reducir el volumen de metal de aporte y la distorsión, se encuentra la preparación en “U” con la característica de que el borde es maquinado con una curva como en la Figura 2. 21 “g)” en ambos elementos. Forma una “U” que puede ser simétrica o con variación de ángulo y base en línea. Cuando esta preparación es en una sola placa se llama preparación en “J” como en la Figura 2. 21 “f)”. Estas preparaciones necesitan de manufactura especial añadiendo otro costo y el acceso para la soldadura se vuelve más complicado [35].

La preparación de las piezas a soldar depende de los parámetros del proceso de soldadura, es necesario conocer el proceso de soldadura, los parámetros relacionados como las propiedades mecánicas y la metalurgia de los materiales soldados. El perfil geométrico de la unión (ver Tabla 2. 9) de soldadura depende del espesor de las piezas soldadas, la intensidad de corriente y el diámetro del electrodo [38].

Tabla 2. 9 Relación entre el espesor y los parámetros del proceso GMAW [38].

Espesor (mm)	Intensidad eléctrica (A)	Diámetro del electrodo (mm)	Perfil de preparación
1.0-5.0	100-130	0.8-1.2	
3.0-6.0	115-130	1.0-1.2	
6.0-12.0	100-115	0.8-1.2	
10.0-40.0	130-160	1.2-1.6	

La preparación de la unión consiste en dos operaciones [38]:

- Preparación de los bordes (para dar un contorno geométrico adecuado).
- Posicionar los dos bordes (para tener una alineación y respetar el espacio entre las partes a soldar que depende del espesor).

La preparación es el conjunto de especificaciones que tienen relación con la forma geométrica y el proceso de fabricación, éstas especificaciones se muestran en la siguiente tabla (Tabla 2. 10) [38].

Tabla 2. 10 Datos relacionados para la preparación de unión [38].

Especificaciones de geométricas y tecnológicas	
Material	Tipo de material
Espesor	t (mm)
Forma de perfil	I, X, V, U, 1/2 V, K, J
Ángulo de ranura	α (°)
Ancho de la cara de raíz	h (mm)
Longitud de la característica	L (mm)
Separación	g (mm)
Radio (perfil U o J)	r (mm)
Volumen de remoción de material	V (mm)
Topologías	Simétrica, asimétrica, igual, desigual
Proceso de manufactura	
Modo de manufactura	Oxicorte, mecanizado, pulido, conformado.

2.3.4.1 Métodos de preparación de unión

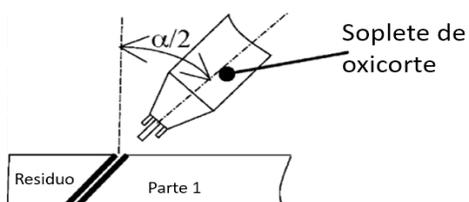
Existen dos tipos de preparación: métodos mecánicos (mecanizado, corte con sierra, conformado) y el método térmico (oxicorte, plasma, láser) (ver Tabla 2. 11) [38].

Tabla 2. 11 Procesos para preparación de las características en ranura V [38].

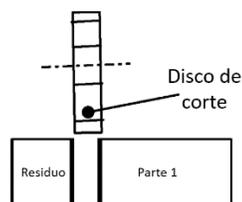
Proceso 1: Oxicorte y rectificado

Proceso 2: Mecanizado

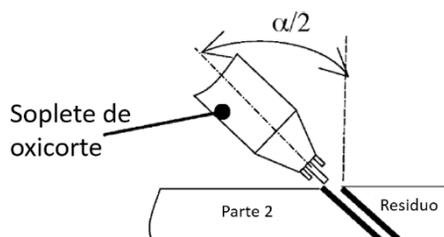
Paso 1: Biselado de la parte 1 en el ángulo de $\alpha/2$ por corte térmico usando soplete de oxicorte.



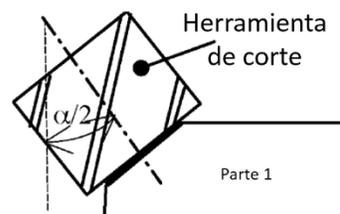
Paso 1: Corte perpendicular de la parte 1 y 2 con una piña para fresadora o usando una herramienta como disco de corte.



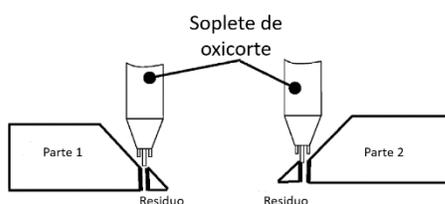
Paso 2: Biselado de la parte 2 en el ángulo de $\alpha/2$ por corte térmico usando soplete de oxicorte.



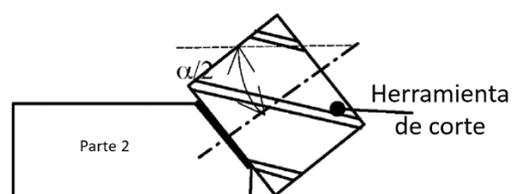
Paso 2: Rectificar parte 1 con una maquina fresadora, la inclinación del plano para el bisel es el ángulo $\alpha/2$ de la parte 1 usando la herramienta de corte



Paso 3: Corte perpendicular de parte 1 y 2 por corte térmico usando soplete de oxiacorte.



Paso 3: bisel de parte 2 con la fresadora, la inclinación del plano para el bisel es el ángulo $\alpha/2$ de la parte 2 usando la herramienta de corte



Paso 4: Alinear y rectificar



Paso 4: Alineación



Rectificar los bordes y alinear la posición de las dos partes

Alinear y posicionar las dos partes

El método de mejor calidad es el mecanizado, se recomienda usar las siguientes velocidades; 750, 500, 375 y 300 mm/min, respectivamente para los espesores de; 10, 20, 30 y 40 mm, según *Klansek y Karavanja* en el 2007 [40] [38].

2.3.4.2 Cálculo de la sección de área transversal de la soldadura

Para realizar el cálculo de la sección transversal de la soldadura se utiliza la siguiente ecuación [41] [42]:

$$F_w = F_{pm} + F_{dm} \quad (6)$$

Donde: F_w es el área de la sección transversal de la unión soldada, F_{pm} es el metal base fundido y F_{dm} es el metal depositado. En el diseño de unión con ranura en V, el cálculo del área del metal se basa en el esquema de la Figura 2. 24.

Uno de los métodos para calcular el área es utilizando la siguiente ecuación y la Figura 2. 24.

$$F_d = F_{12} + 2F_2 + F_3 \quad (7)$$

$$F_1 = 0.75 \cdot e \cdot g; F_2 = \frac{1}{2} (S - c)^2 \tan \alpha; F_3 = S \cdot b$$

Sustituyendo y simplificando:

$$F_d = 0.75 \cdot e \cdot g + (S - c)^2 \tan \alpha + S \cdot b \quad (8)$$

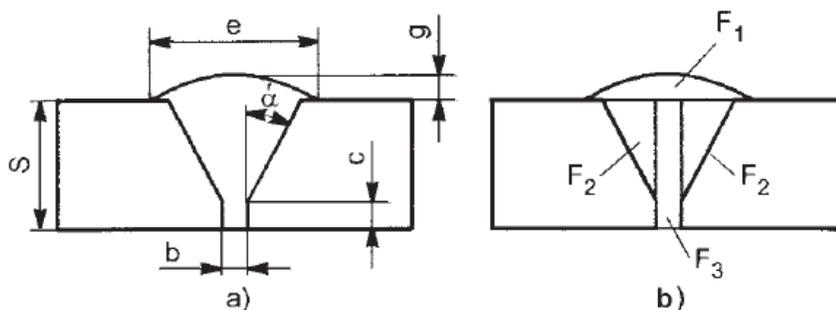


Figura 2. 24 La sección transversal de una unión soldada: a) elementos de diseño de la unión y las dimensiones de la unión soldada, b) la separación de la zona de metal depositado en figuras elementales [42].

Estos cálculos pueden venir establecidos en un manual o norma, en contraste, el cálculo del área de sección transversal de metal depositado no es complejo, lo que es complicado es cálculo del área del metal base fundido y toda la zona de la unión soldada [42].

Para realizar los cálculos del área transversal de la unión, se utilizan las ecuaciones derivadas por medio de procesamiento estadístico de los datos, obteniendo ecuaciones de segundo grado:

$$F_w = a_0 + a_1S + a_2S^2 \quad (9)$$

Donde: a_0, a_1, a_2 son los coeficientes de la ecuación, S es el espesor del metal. Los coeficientes de la ecuación son diferentes para cada diseño de unión con el objetivo de calcular el área requerida con solo sustituir el espesor de la placa.

De acuerdo a la norma *Estándar del Estado* "GOST" (Gosudarstvenny Standart, en ruso), se realiza una investigación sobre el diseño de unión y todas las variables, obteniendo como resultado una recopilación de seis tablas de ecuaciones con respecto al área de sección transversal de la unión soldada y el área de metal depositado; son procesos de soldadura por arco metálico como GMAW y SAW, se muestra la Tabla 2. 12 con los coeficientes para el proceso GMAW y algunos diseños de uniones [42].

En el trabajo de *Miguel y colaboradores* en el 2012 [43], mencionan que el objetivo de la soldadura por arco eléctrico es maximizar la penetración, minimizar el ancho, ángulo y sobre espesor del cordón. Los factores determinantes, para la penetración es la separación y la velocidad de alimentación del electrodo, para el ancho del cordón es la velocidad de soldadura (entre más velocidad el cordón es más delgado), para el sobre espesor es la separación de la unión y la velocidad de desplazamiento (para minimizar el sobre espesor se necesita mayor separación y velocidad), para el ángulo del cordón los factores importante son la corriente y la separación de unión (entre mayor tensión y separación, se minimiza el ángulo).

Tabla 2. 12 Coeficientes de ecuaciones para algunos diseños de unión a tope [42].

Tipo y característica de la unión soldada	Coeficientes de ecuación					
	F_w			F_d		
	a_0	a_1	a_2	a_0	a_1	a_2
C4- Sin preparación	18.4	7.91	0.72	8.11	2.8	0.327
C17- Preparación en V	-22.5	4.77	0.46	-3.85	1.87	0.355
C22- Preparación en U	-24.9	7.57	0.36	-13.0	3.04	0.383
C25- Preparación en X	-14.7	7.31	0.50	-14.7	3.26	0.177

2.3.5 Diseño actual

El impacto actual de la selección del diseño de unión se refleja en el ciclo de vida de los componentes. *Aliya (2008) [44]*, *Tham et al. (2012) [8]*, entre otros autores, mencionan que se puede predecir el tiempo de vida útil de algún componente, analizando la unión soldada y la sección propensa a generar algún tipo de discontinuidad por el tipo de carga aplicada.

Lidam y colaboradores en el 2013 [45], realizan una unión combinada a “tope” y en “T” con espesor de 9 mm (ver Figura 2. 25), utilizando un acero de bajo carbono (ver Tabla 2. 13) con proceso de soldadura robotizada GMAW de pasadas múltiples, con fuente de alimentación blindada, la mezcla del gas de Ar (80%) y CO₂ (20%), sujetando con prensa los cupones para disminuir la deformación. La preparación del diseño de unión es para una soldadura de ranura en “V” con un ángulo de bisel de 30° y la unión en “T” se colocaron las placas a 90 °. El equipo que se utilizó para la unión fue un sistema robótico ABB IRB 2400/16 y fuente de energía Evolution MXE Pro Kemppi y el electrodo ER70S-6 (∅ 1.2 mm).

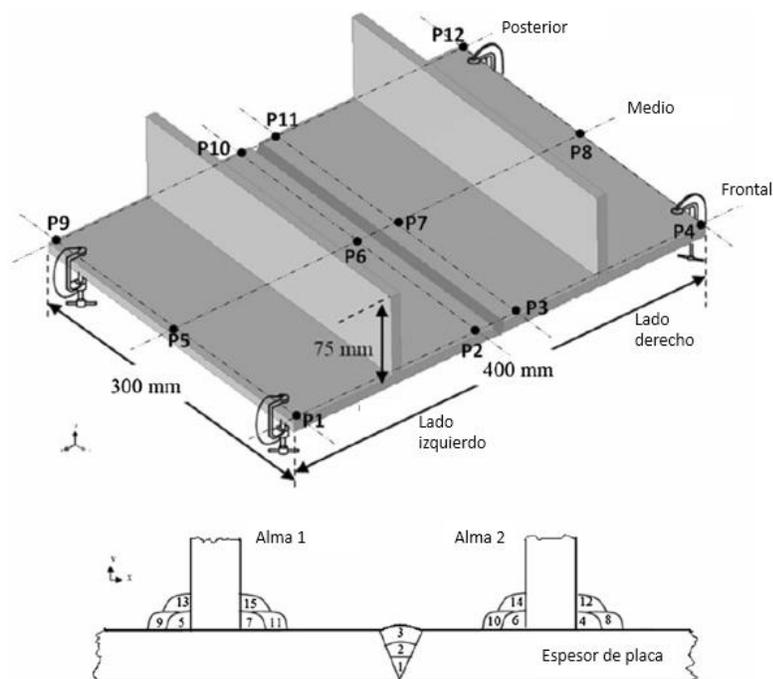


Figura 2. 25 Geometría combinada de unión a tope y en T con la secuencia de soldadura [45].

Tabla 2. 13 Composición química %e.p. de acero bajo carbono [45].

Elementos		C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni
Composición química (e.p%)	Acero bajo carbono	0.186	0.146	0.011	0.001	0.001	0.035	0.032

Tabla 2. 14 Propiedades mecánicas y térmicas de acero bajo carbono [45].

Propiedades	Valores
Módulo de Young (GPa)	210 (a 20°C)
Limite elástico míni. (MPa)	355
Coefficiente de Poisson, ν	0.33
Temperatura de solidus, TS (°C)	1404
Temperatura de liquidus, TL (°C)	1505

Tabla 2. 15 Parámetros de soldadura para la experimentación [45].

		Corriente (A)	Voltaje (V)	Velocidad de viaje (mm/s)
Unión a tope	1 ^a pasada	115-157	20	6
	2 ^{da} pasada	115-155	20	4
	3 ^{ra} pasada	115-162	20	2
Unión en T	1 ^a pasada	115-152	20	6
	2 ^{da} pasada	115-151	20	5
	3 ^{ra} pasada	115-155	20	4

La geometría del cordón de soldadura tiene efectos críticos en el espesor de la capa, calidad de la superficie, y la precisión dimensional de las piezas metálicas en proceso de deposición en capas.

CAPÍTULO 3 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE BIBLIOGRAFÍA

En esta sección se encuentra la información para brindar orientación sobre el efecto del ángulo de bisel en una unión a tope en acero estructural AISI 1018 mediante el proceso GMAW robotizado que es utilizado en la industria automotriz para la manufactura de componentes estructurales.

El proceso utilizado de soldadura es por arco metálico donde la coalescencia se logra por el calentamiento que existe entre el arco, electrodo y la pieza de trabajo, el material llega a su punto de fusión y esto ocasiona la soldabilidad entre el metal de aporte y los dos elementos a unir. Para hacer posible una unión entre dos elementos de espesores grandes se requiere de un equipo de alto amperaje o una preparación de probetas biseladas con ciertas

consideraciones del diseño de unión (ver la Tabla 2. 7). Para establecer el tipo de configuración de unión a tope, la configuración geométrica de ranura en V (Figura 2. 21) y las variables que tiene el diseño (Figura 2. 22), se tiene que cumplir con ciertas especificaciones de acuerdo a los requerimientos (Tabla 2. 9) previamente establecidos lo cual es de suma importancia para la determinación del resultado final que es de interés para este proyecto.

La preparación de la unión es uno de los pasos omitidos en muchos de los procesos de manufactura, debido a que el proceso de soldadura por arco es muy eficiente cuando se cuenta con la potencia necesaria. Existen varios métodos de preparación, pero el más efectivo es el mecanizado (empleando una fresadora) debido a la manipulación precisa de procesamiento. Cabe mencionar que si se quiere una unión factible la preparación es más importante que cualquier otra cosa.

El enfocarse en los efectos que resultan en el cambio del ángulo del bisel resulta óptimo para mejorar, observar e incluso tener control sobre los resultados finales de la unión, lo anterior trae consigo un adecuado volumen de fusión, una distribución uniforme de la ZAC, penetración efectiva, fusión completa, así como las dimensiones factibles del cordón.

En los trabajos de algunos autores como: *Sun y colaboradores* [46], *Objois y colaboradores* [47], *Watters y colaboradores* [48] y *McClure* [49], se obtiene la Tabla 3. 1 que es un análisis de las variables que afecta el cambio de dimensión del ángulo de bisel (éste análisis está fundamentado por la experimentación que realizaron en sus trabajos).

Tabla 3. 1 Efectos de las dimensiones del bisel con las consideraciones más importantes, sin modificación de los parámetros de soldadura.

Ángulo de bisel	Volumen de fusión	ZAC	Distorsión	Penetración	Dimensiones del cordón	Defectos
0-22°	↓	↓	↑	↓	↑	↓
22-45°	↑	↑	↓	↑	↓	↑

↑: Mayor

↓: Menor

En cuanto a los efectos en la evolución microestructural, se observa que a mayor ángulo la microestructura es similar a la del metal base porque el enfriamiento es más lento, y la entrada de calor es menor pero la ZAC es más ancha [27]. En un ángulo menor las zonas de la soldadura son más marcadas debido a que la intensidad de corriente se eleva para realizar una penetración más efectiva y el cordón tiene un enfriamiento más rápido, así mismo la ZAC es menor, ocasionando que la microestructura tenga fases más duras en la zona térmica y el metal de aporte [26] [43].

Las propiedades mecánicas son similares al metal base en el ángulo de bisel de menor tamaño ya que existe mejor fusión debido a que es alta la intensidad de corriente por lo que el metal base llega a una temperatura más alta que la de fusión y, por lo tanto, el enfriamiento rápido la dureza es mayor [39] [8]. En el ángulo de mayor tamaño la fusión es menor debido a que el proceso de soldadura actúa para depositar el material de aporte y no para hacer una mejor

soldabilidad esto es generado por falta de intensidad de corriente para fundir el metal base, por lo que las propiedades como resistencia a la tracción aumenta debido a la penetración más efectiva pero la dureza disminuye [28].

El conjunto de estas características y la investigación del efecto del cambio de dimensión del bisel en el material que se está empleando, mejora el entendimiento de la evolución microestructural, sus propiedades y defectos presentes en el área del cordón sin considerar los parámetros de soldadura.

CAPÍTULO 4 CASO DE ESTUDIO

En este trabajo monográfico el caso de estudio se enfoca en el análisis del efecto que causa el ángulo del bisel en una unión a tope con ranura en V, realizado en un acero estructural AISI 1018. El proceso de soldadura seleccionado es el GMAW (MIG) con sistema robotizado.

4.1 Metodología

Las actividades realizadas en este caso de estudio se encuentran en la Figura 4. 1, se inicia con el planteamiento de un set de experimentos que propone la cantidad de probetas a trabajar y posteriormente se recibe el material de trabajo que es el acero AISI 1018. De acuerdo a la revisión bibliográfica se proponen 4 ángulos de bisel para pruebas, por lo que el material

pasa a ser manufacturado realizando los cortes con las dimensiones establecidas al igual que el maquinado de los biseles de acuerdo a los planos de cada probeta.

Se continúa con el proceso de soldadura MIG robotizado, los parámetros son establecidos por un proyecto alterno. Una vez realizadas las uniones del acero AISI 1018, se preparan las probetas para realizar las pruebas de calidad (inspección visual, líquidos penetrantes, caracterización y prueba de tensión).

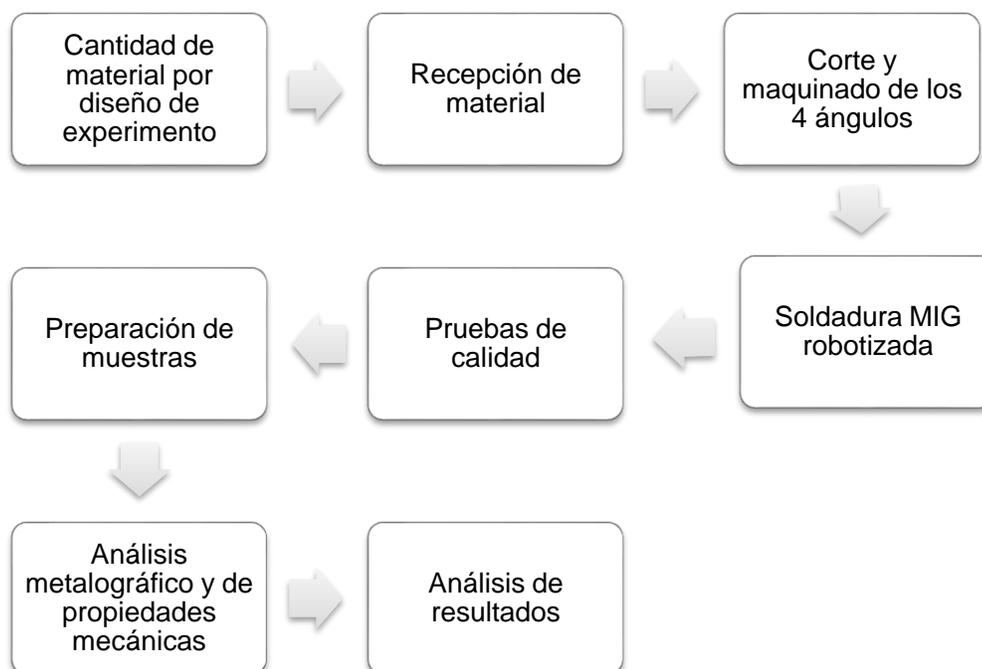


Figura 4. 1 Diagrama de flujo de la metodología para el caso de estudio.

4.2 Material

Como material de estudio se emplea el acero AISI 1018, la composición química de este material se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen**

de la referencia.Tabla 4. 1. Las dimensiones generales de la placa para manufacturar son de 150 X 100 X 16 mm.

Tabla 4. 1 Composición química (%e.p.) real del AISI 1018 de las probetas.

	C	S	Mn	P	Si	Fe
AISI 1018	0.16	0.019	0.72	0.017	0.18	Balance

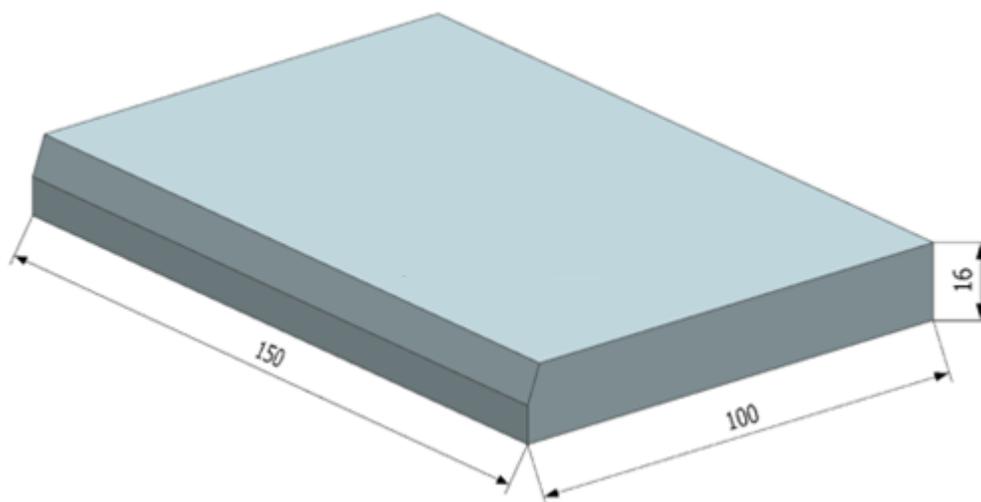


Figura 4. 2 CAD del diseño de unión con las dimensiones generales.

La soldabilidad que presenta de acuerdo a su composición química se calcula con la ecuación 1:

$$CE = \%0.16 + \frac{\%0.72 + \%0.18}{6} + \frac{\%0 + \%0 + \%0 + \%0}{5} + \frac{\%0 + \%0}{15} = 0.31$$

Por lo que posee una excelente soldabilidad y por su contenido de carbono una soldabilidad óptima.

4.3 Soldadura MIG (GMAW)

Las placas de acero AISI 1018 se prepararon con el proceso mecanizado (Figura 2. 26) para disminuir las variaciones de la geometría, el diseño de unión que se utilizó es a tope como se muestra en la Figura 4. 3, con el proceso GMAW robotizado, realizado en la celda de manufactura avanzada en la Corporación Mexicana de Investigación en Materiales (COMIMSA) como se observa en la Figura 4. 4.

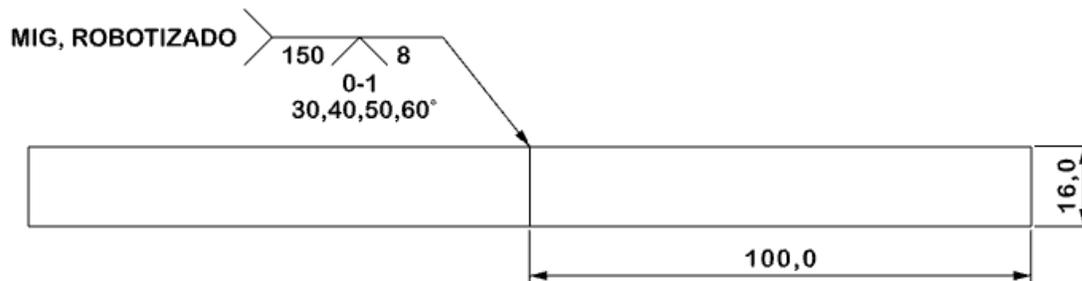


Figura 4. 3 Diseño de unión para soldadura de placa AISI 1018 con GMAW robotizado.



Figura 2. 26 Manufactura de probeta con apoyo de un sistema de sujeción con manipulación para variar el ángulo de bisel y centro de maquinado CNC HASS V4.



Figura 4. 4 Celda de soldadura GMAW robotizada, con brazo robótico KUKA KR16.

En este caso de estudio, se utilizó un electrodo ER70S-6, una fuente Lincoln Electric Power Wave 455, una mezcla de gas 85-15% Ar-CO₂, una mesa de trabajo y un brazo robótico KUKA KR16.

Así mismo, los parámetros empleados para estas uniones se obtuvieron de un proyecto paralelo analizando la soldabilidad con ángulo de abertura de 40°, están indicados en la Tabla 4. 2. Variando solo el ángulo de abertura de bisel. La configuración empleada es de ranura en V con posición horizontal (1G). Los parámetros utilizados son los siguientes; Corriente 485-500 A, Polaridad DCEP, Voltaje 31 V, Velocidad de desplazamiento 53.5 cm/min, Alimentación del electrodo 900 cm/min, Extensión de electrodo 12.7-19.05 mm, Orientación de electrodo 90°, Tamaño de electrodo $\varnothing 1.6$ mm, Flujo de gas 55-60 CFH.

Tabla 4. 2 Identificación de ángulo de abertura de probeta AISI 1018.

Probeta	A	B	C	D
Ángulo de abertura	30°	40°	50°	60°

Para el voltaje de soldadura se establece el de 31 V, pero la máquina realiza una compensación elevándolo a 36 V para todas las probetas, se descarta la variación y el estudio solo se enfoca al ángulo de abertura de la unión (ver la Figura 4. 5).

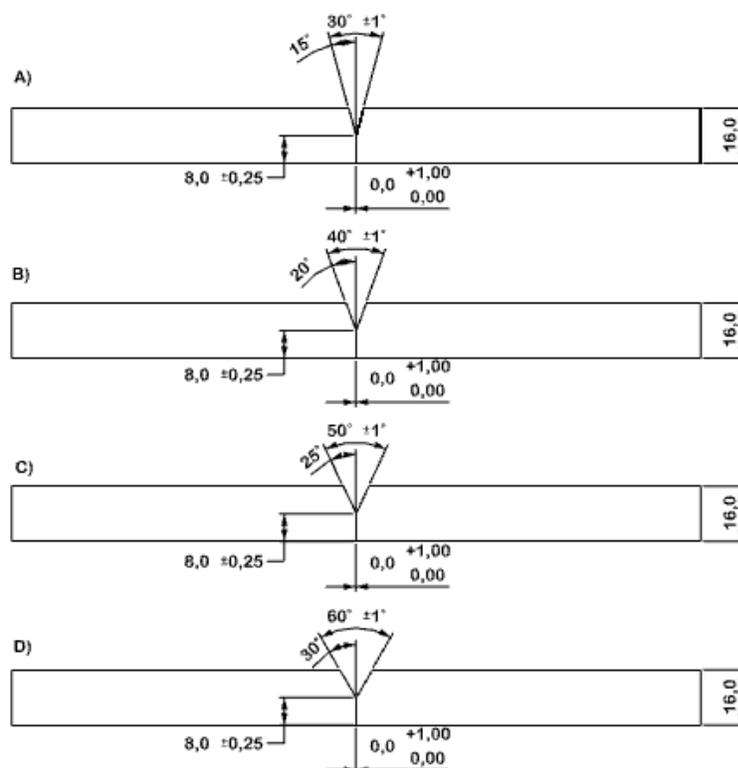


Figura 4. 5 Planos para preparación de uniones con tolerancias permisibles. A) preparación para ángulo de abertura de 30°, B) ángulo de abertura de 40°, C) ángulo de abertura de 50° y D) ángulo de abertura de 60°.

Para la sujeción de las placas a soldar se utilizaron prensas de tornillo, manteniendo las dimensiones de colocación durante el proceso (ver la Figura 4. 6).

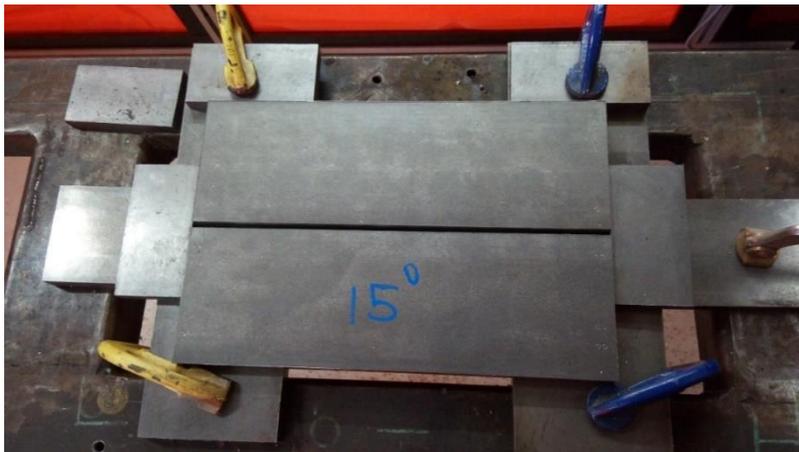


Figura 4. 6 Sujeción de probetas AISI 1018 para el proceso de soldadura.

4.4 Pruebas de calidad

4.4.1 Inspección visual

El método de inspección visual (VI, por sus siglas en inglés) se realiza a las 4 probetas (Figura 4. 9) utilizando un kit de VI que se muestra en la Figura 4. 7. Los criterios que emplean son del código de la AWS D1.1/1M2010 sección 6.1 “Criterios de aceptación visual”.



Figura 4. 7 Kit para inspección visual.

Para la probeta A (ángulo de abertura de 30°), de acuerdo a los criterios de aceptación la corona es de 2.5 mm cumpliendo con el criterio ya que no excede los 3 mm. Para la probeta B (ángulo de abertura de 40°) cuenta con una corona de 1.75 mm y sin discontinuidad. La probeta C (ángulo de abertura de 50°) tiene socavado a lo largo del cordón con un promedio de 0.4 mm en las secciones de menor tamaño, a 19.05 mm del borde hay una muesca en ambos lados de 0.8 mm de socavado con una longitud de 19.05 mm, por lo tanto, es rechazada. La probeta D (ángulo de abertura de 60°) tiene socavado debido a la alimentación del electrodo ocasionando este defecto a lo largo del cordón en ambos lados con una profundidad de 0.8 mm en promedio, por lo tanto, es rechazada.



Figura 4. 8 Dimensiones de las probetas de inspección.

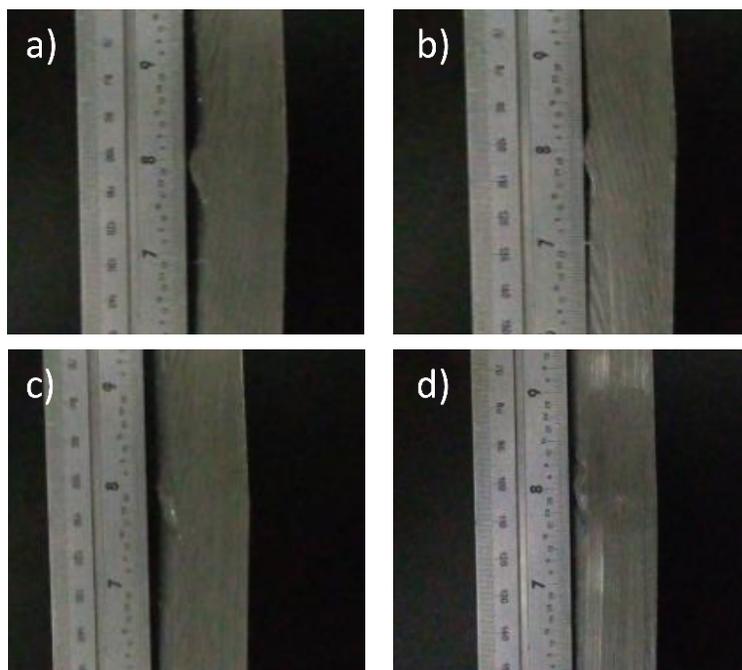


Figura 4. 9 Sección transversal de cordón con fin de inspección visual, a) probeta con ángulo de abertura de 30°, b) probeta con ángulo de abertura de 40°, c) probeta con ángulo de abertura de 50° y d) probeta con ángulo de abertura de 60°.

También se observa distorsión angular (Figura 4. 10), mencionando que una vez realizado el proceso de soldadura se mantuvieron las prensas por 10 minutos para reducir la distorsión. Por la entrada de calor se observa más distorsión en las probetas que tienen cerca de 500 amperes como corriente, donde la probeta A es la más estable, la probeta B es la más afectada, la probeta C tiene distorsión similar que la B y por último la probeta D tiene una mejor vista debido a la distribución de calor y el enfriamiento más lento.

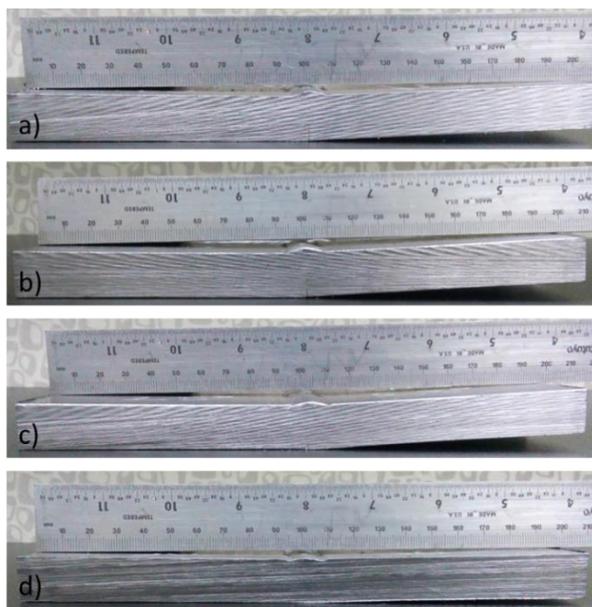


Figura 4. 10 Sección transversal para comparación de distorsión entre probetas a) probeta A, b) probeta B, c) probeta C y d) probeta D.

4.4.2 Líquidos penetrantes

La evaluación de líquidos penetrantes (LP, por sus siglas en inglés) permite examinar la calidad de la unión soldada y material base. El procedimiento de inspección está fundamentado con el código de soldadura estructural AWS D1.1 en la sección 6, que cita la norma ASTM E165 [50] para procedimiento y criterio de aceptación, así como la ASTM E433 [51] como referencia de las discontinuidades.

En la Figura 4. 11 se muestra el material usado durante el procedimiento. En la Figura 4. 12 se muestran las etapas del procedimiento que a continuación se describen:

- a) Se aprecia la pre-limpieza que consistió en remover las impurezas con un pulidor con disco de lija, se limpia los residuos con el cepillo de alambre,

se aplica un solvente que es retirado con el paño para concluir con esta etapa.

- b) Se aplica el penetrante con brocha sobre el cordón y el tiempo de exposición es de 5 minutos.
- c) Se aprecia la remoción del penetrante con el paño de limpieza.
- d) Para finalizar se aplica el revelador en aerosol, se deja un tiempo de exposición de 10 minutos para realizar la inspección.

En la Figura 4. 13 se muestran las imágenes de las 4 probetas inspeccionadas. La probeta A y B muestran ausencia de indicaciones, la probeta C muestra indicaciones menores a 1.58 mm por lo que no se considera relevante (3 indicaciones en 150 mm) y la probeta D muestra indicaciones lineales paralelas al cordón sobre el metal base y sobre el cordón muestra socavado, adicionalmente estas últimas no son significativas. El material base de las probetas C y D presenta laminación debido al aumento de la ZAC refundiendo la zona afectada térmicamente con las indicaciones lineales paralelas longitudinalmente en al cordón.



Figura 4. 11 Material para procedimiento de inspección por líquidos penetrantes.

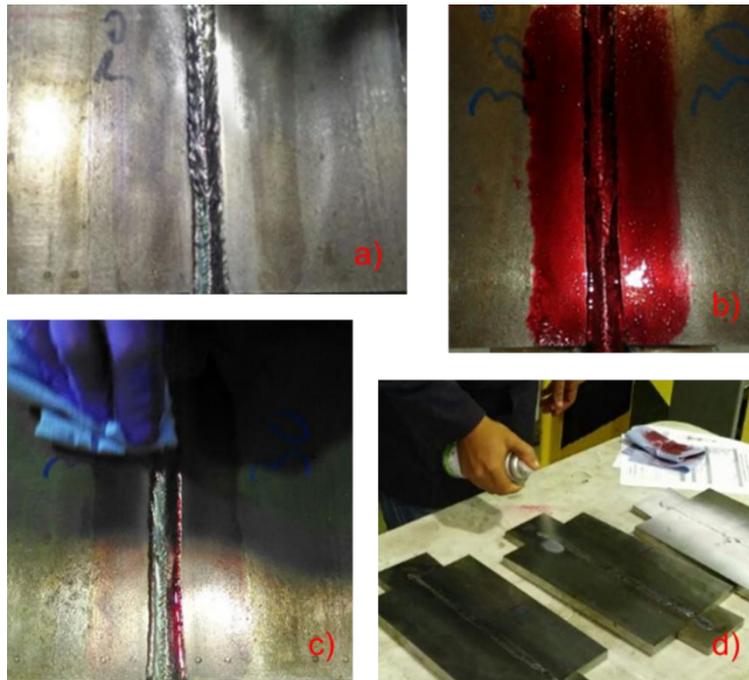


Figura 4. 12 Etapas de procedimiento; a) pre-limpieza, b). aplicación de penetrante, c) remoción de penetrante y d) aplicación de revelador.

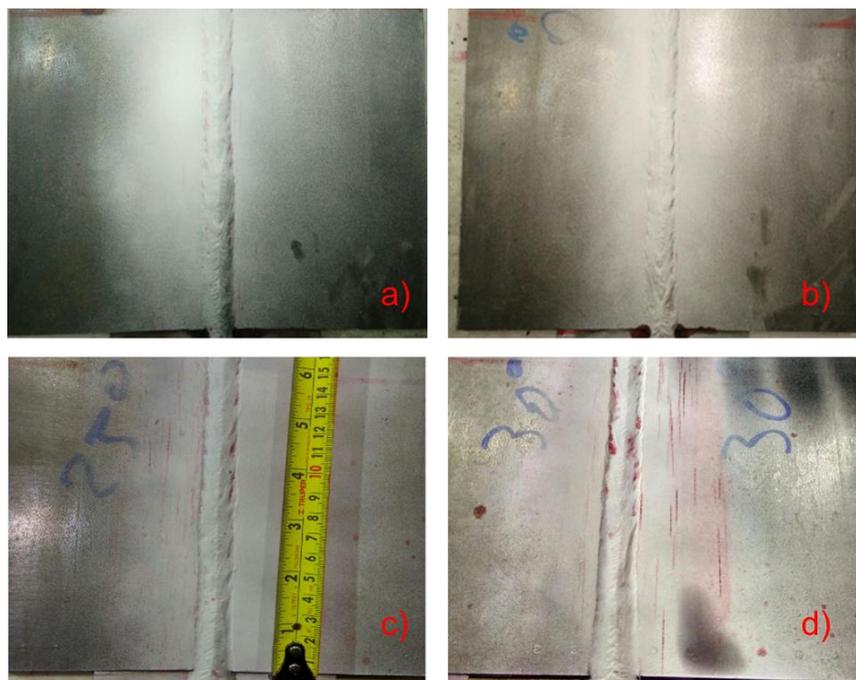


Figura 4. 13 Probetas para realizar la evaluación; a) probeta A, b) probeta B, c) probeta C y d) probeta D.

Cabe mencionar que para finalizar el procedimiento de inspección de líquidos penetrantes se realiza una post-limpieza con solvente y paño. Para la inspección visual y de líquidos penetrantes se apoyó del trabajo realizado por *Pérez y colaboradores* en el 2011 [52].

4.4.3 Técnicas de caracterización

Se inicia con la preparación metalográfica, cortando 2 muestras por cada probeta con un equipo Discotom-10 Strues, se descartó una pulgada de cada extremo. Se marcaron las muestras (ver la Tabla 4. 3) para continuar con el desbaste con papel abrasivo de SiC con granulometrías de 120, 240, 400 y 600 por centímetro cuadrado, se aplicó presión durante 5 minutos para eliminar irregularidades, para cada cambio de desbaste se gira 90° con duración de 2 minutos, la desbastadora con rotación automática y flujo de agua Knuth-Rotor-2

Struers. Posteriormente se pulieron en paño de pelo corto con alcohol para eliminar impurezas y por último con sílica coloidal de 0.04 μm y alúmina (Al_2O_3). El procedimiento de ataque químico consistió en lavar con agua y secar con aire caliente, después aplicar la solución Nital 5% durante 8 segundos, se lava con agua, se aplica alcohol y se seca con aire frío.

Tabla 4. 3 Identificación de muestras.

Probeta	Muestra para macrografía	Muestra para micrografía
A	A1	A2
B	B1	B2
C	C1	C2
D	D1	D2

Tabla 4. 4 Composición química de Nital 5% [53].

Solución	
Ácido nítrico	5 cm^3 - 5%
Alcohol etílico	100 cm^3 – 95%

Para este trabajo se utiliza la microscopía óptica (MO) como una técnica de caracterización [54], empleando un microscopio Nikon Eclipse MA 200 para analizar las muestras A2, B2, C2 y D2, a diferentes magnificaciones obteniendo

las macrografías con un estereoscopio Nikon SMZ 7457 de las muestras A1, B1, C1 y D1. Además, se realizó un perfil de dureza para cada muestra con 20 indentaciones de 1.2 mm de distancia con un microdurómetro de Vickers-Knoop Tukon 2500-5 Wilson Hardness 50X/0.55.

4.4.4 Resultados

4.4.4.1 Estereoscopía

En esta sección se observan las macrografías con la intención de identificar las zonas a una magnificación amplia, identificación de defectos y medición de la sección transversal del cordón. La sección transversal se determina de acuerdo a lo consultado en la literatura [42], dividiendo el cordón como lo propone *Lazarson* calculando el metal base fundido y el metal depositado para calcular esta área con la ecuación (6).

En la Figura 4. 14 se observa la macrografía de la sección transversal del cordón de la probeta A, siendo la que presenta menos discontinuidades y de menor tamaño, se aprecia una penetración de 53.6% y la ZAC de 1.5 mm siendo inferior a las otras probetas. En todas las probetas existe la discontinuidad de fusión incompleta en la probeta A el área de esta es de $39686.59 \mu\text{m}^2$ y la una longitud de $711.14 \mu\text{m}$, este defecto se debe a la falta de calor o falta de acceso a la unión, se puede corregir aumentando la extensión de electrodo o la entrada de calor. La distorsión presente es de tipo angular y es apreciada con la separación de la raíz de 0.15 mm que de igual manera es menor que en las otras probetas.

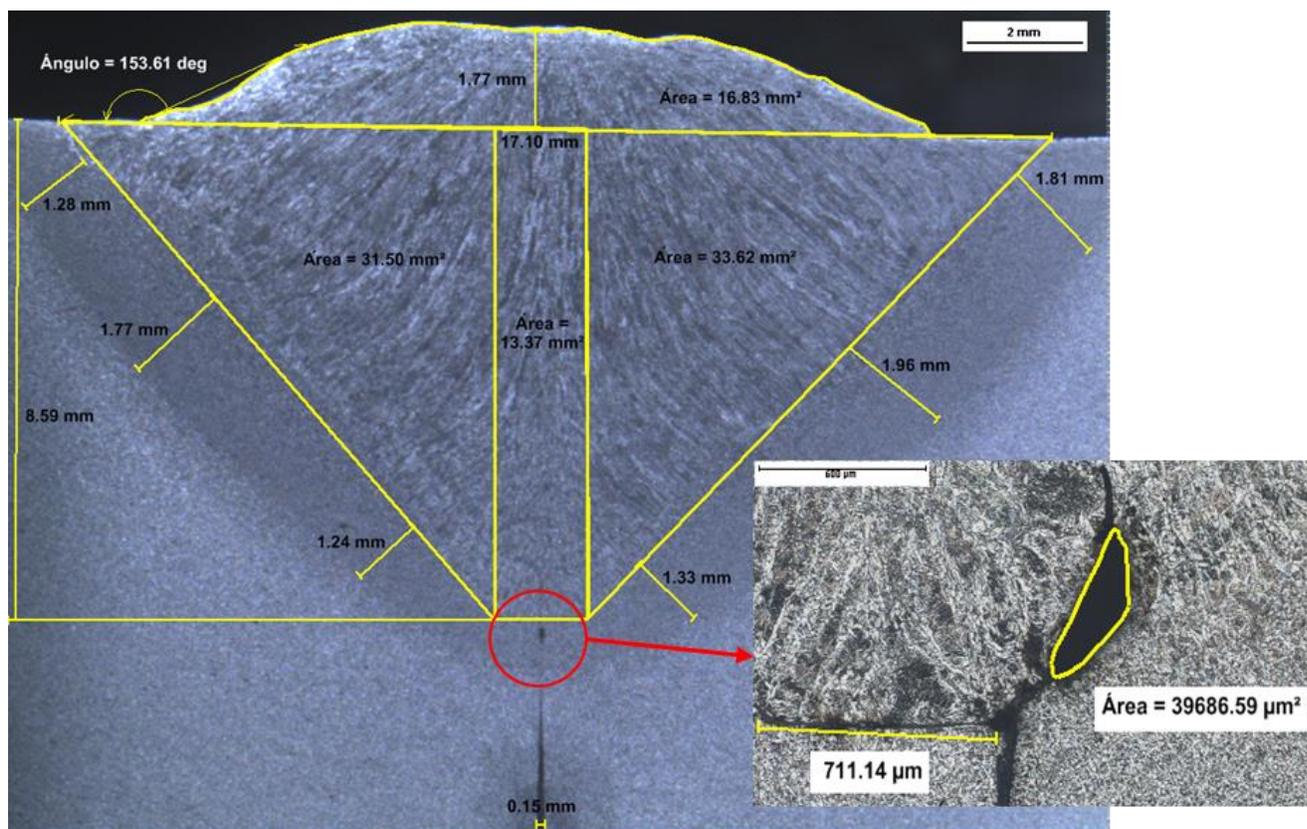


Figura 4. 14 Sección transversal del cordón de la muestra A1.

La probeta B que se observa en la Figura 4. 15, ubicando socavado del lado izquierdo del cordón debido a la falta de alimentación de material de aporte, la falta de fusión que se presenta de 3.86 mm y la distorsión angular que se aprecia en la raíz de la unión es de 0.26 mm siendo la más grande.

La probeta C que se observa en la Figura 4. 16, se ubica socavado en ambos extremos del cordón con un promedio de 0.32 mm.

La probeta D se observa en la Figura 4. 17 donde se ubica un socavado en ambos extremos del cordón con un promedio de 0.86 mm y la distorsión angular igual que la probeta A debido a la distribución del calor uniforme.

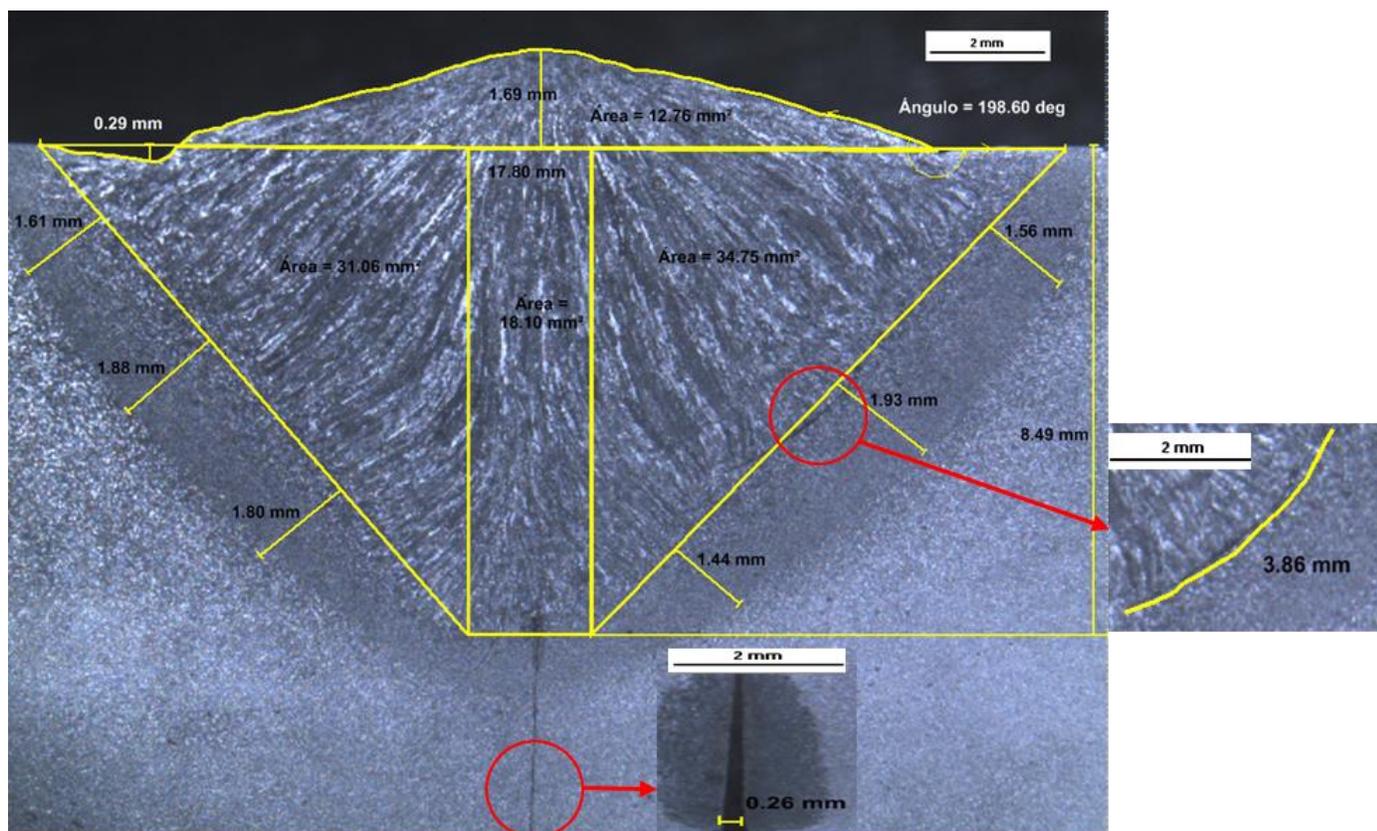


Figura 4. 15 Sección transversal del cordón de la muestra B1.

En la Figura 4. 18 se observa el área de garganta de la preparación de la unión, con áreas de acuerdo al ángulo de abertura en la imagen a) la preparación es de 30° con un área de 17.14 mm², b) preparación de 40° con un área de 23.29 mm², c) preparación de 50° con un área de 29.84 m² y d) preparación de 60° con un área de 36.95 mm². Comparando con el área de metal depositado que es mucho mayor debido a la fusión que se realiza con el metal base.

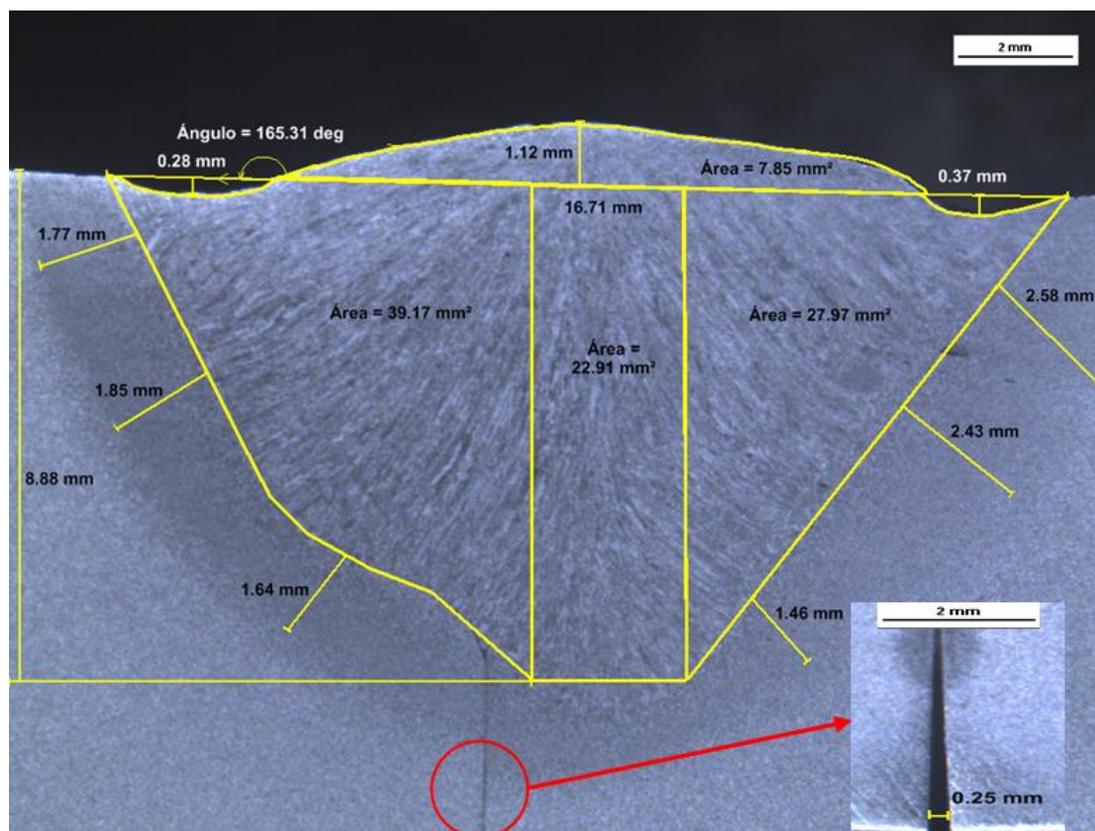


Figura 4. 16 Sección transversal del cordón de la muestra C1.

En la Tabla 4. 5 condensan los datos de las muestras donde se aprecia que la probeta A tiene mejores características, como son: buena área de metal depositado, menor ZAC, la dimensión de la corona cumple con los criterios de aceptación, el ángulo de cordón es aceptable ya que no excede los 45° en sentido de las manecillas del reloj, la penetración está dentro de las que se dieron en la probeta B y C, la distorsión es mínima, la discontinuidad que se presenta es menor a 2 mm y cumple ese criterio de aceptación.

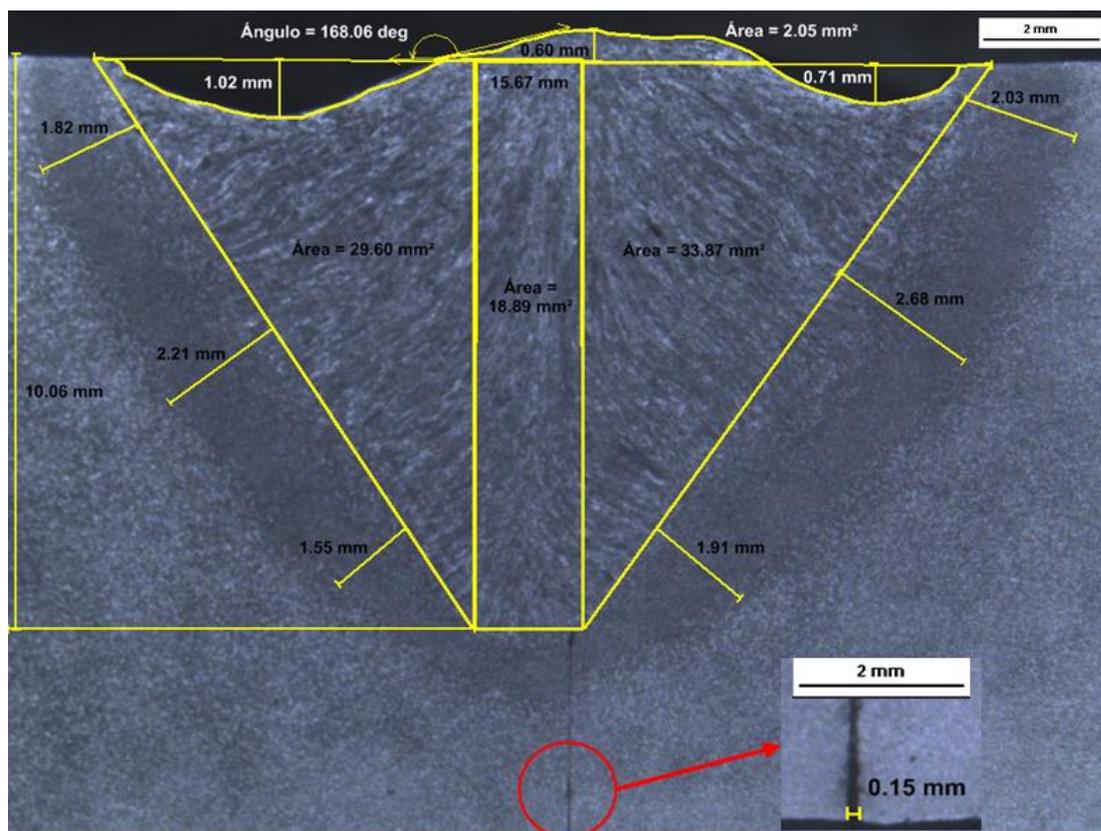


Figura 4. 17 Sección transversal del cordón de la muestra D1.

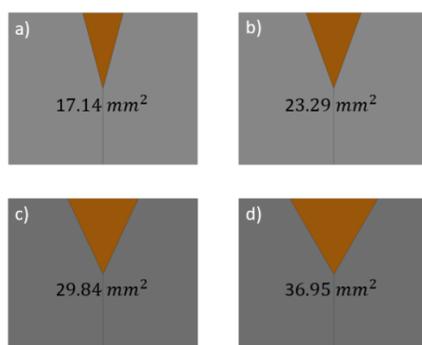


Figura 4. 18 Área de sección transversal de cordón antes del proceso.

Tabla 4. 5 Resultados de la medición de sección transversal del cordón.

Probeta	A	B	C	D
Volumen de fusión (mm^3)	14298	14500.5	14685	12661.5
Área de metal depositado (mm^2)	95.32	96.67	97.90	84.41
Promedio de ZAC (mm)	1.57	1.70	1.96	2.03
Corona (mm)	1.77	1.69	1.12	0.60
Angulo ($^\circ$)	153.60	161.40	165.30	168.06
Penetración (mm)	8.59	8.49	8.88	10.06
Distorsión en raíz (mm)	0.15	0.26	0.25	0.15
Defecto fusión incompleta (mm)	0.71	3.86		
Defecto socavado (mm)		0.29	0.33	0.87

4.4.4.2 Microscopía óptica

Para el análisis microestructural, en la Figura 4. 19 se observa la microestructura del material base que es la típica en acero estructural una microestructura Ferrito Perlítica. En la Figura 4. 20 se aprecian las zonas del cordón.

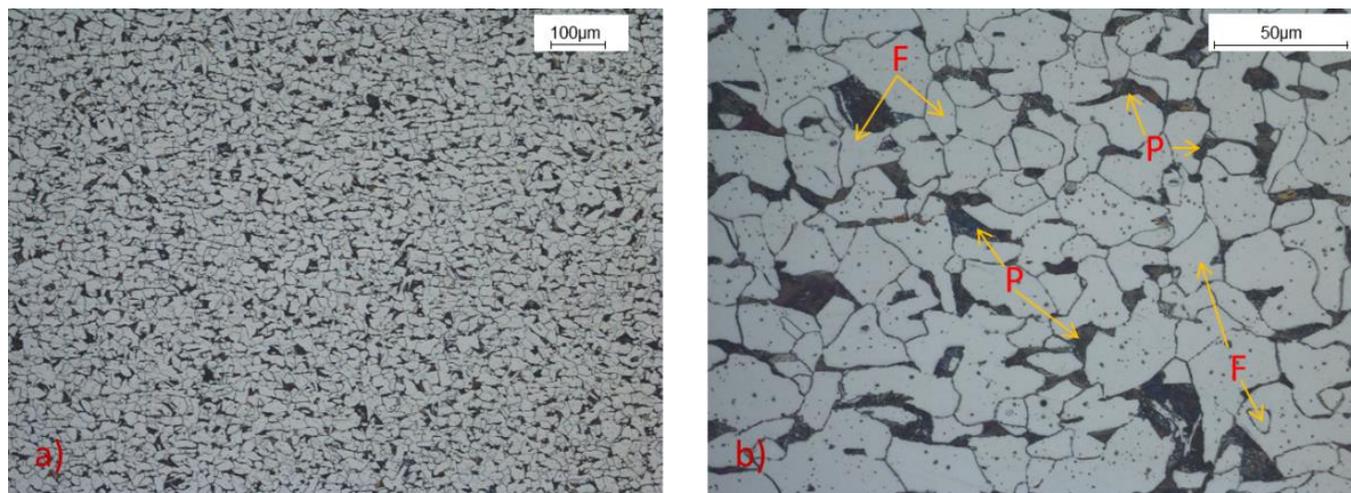


Figura 4. 19 Microestructura de MB a diferentes aumentos a) 100X y b)500X.

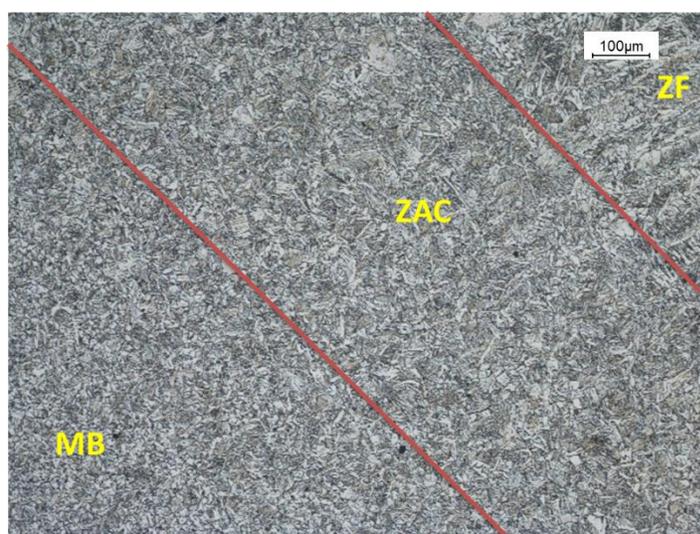


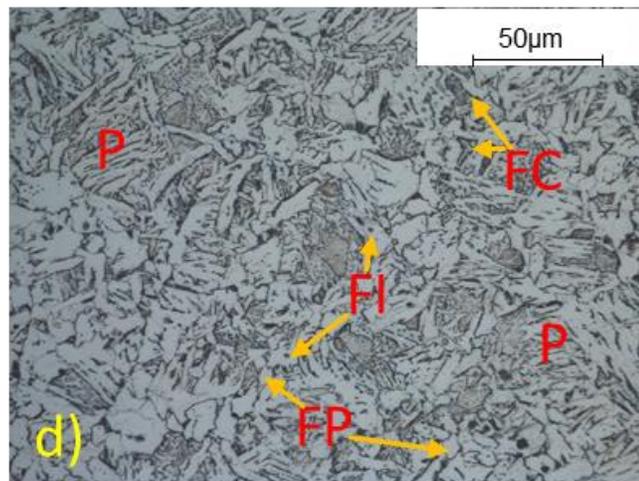
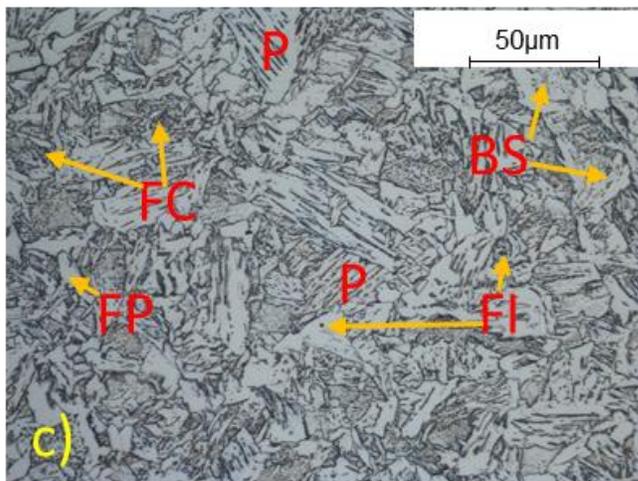
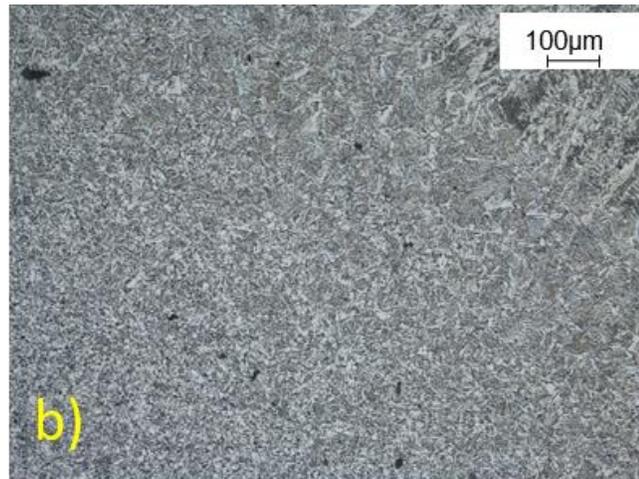
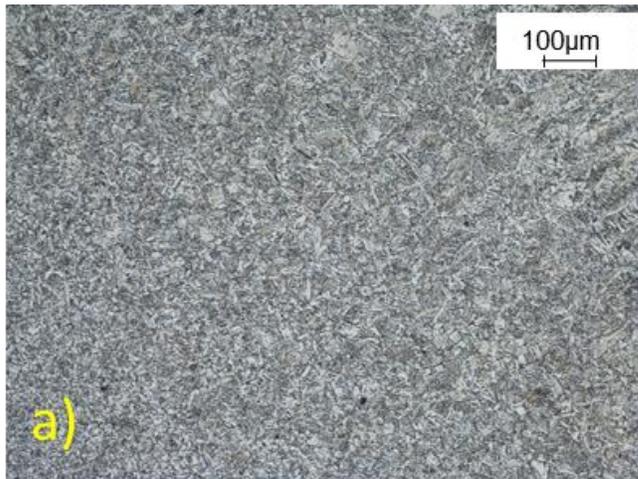
Figura 4. 20 Referencia de las zonas del cordón a 100X.

En la Figura 4. 20 se identifican las tres zonas del cordón, para mayor comprensión del análisis.

En la Figura 4. 21 se observan las micrografías de la ZAC, en la probeta A se observa Ferrita con Carburos alineados (FC), Ferrita Poligonal (FP), Perlita (P),

Bainita Superior (BS) y Ferrita Idiomórfica (FI), debido a una transformación reconstructiva y a la velocidad de enfriamiento que se originó. La entrada de calor en esta probeta se relaciona con las fases encontradas, ya que fue alta y la ZAC fue concentrada por lo que el enfriamiento fue más lento. En la probeta B las fases encontradas son debido a la velocidad de enfriamiento más lenta que en la probeta A por lo que no se forma la BS pero si las otras fases. En la probeta C se observa Ferrita Widmanstätten Primaria (FWP) debido a la disminución brusca de la temperatura dando origen a la distorsión presente. La probeta D muestra fases similares a la probeta C debido a que el enfriamiento en estas fue similar.

La Figura 4. 22 las micrografías de la zona de fusión, en la probeta A se observa FI, Ferrita Acicular (FAC), Austenita Retenida (AR), Ferrita Widmanstätten Secundaria (FWS) y P, estas fases son típicas en el volumen de fusión y como el enfriamiento es más lento que en las otras zonas e inclusiones, la solidificación se da a diferentes temperaturas originando por los tiempos fases que eliminan a otras como la FSW que elimina a la Ferrita Alotriomórfica (FA) ya que para su formación se necesita de granos pequeños y la velocidad de enfriamiento más lenta. En la probeta B se observa una microestructura perlítica ya que es la que predomina, FWS en menor cantidad que la probeta A. La probeta C es una mezcla de FAC, FWS, FI, F y P, lo que muestra una velocidad de enfriamiento más lenta que la probeta B. La probeta D tiene una microestructura Ferrito Perlítica y predomina la formación de FWS y FWP.



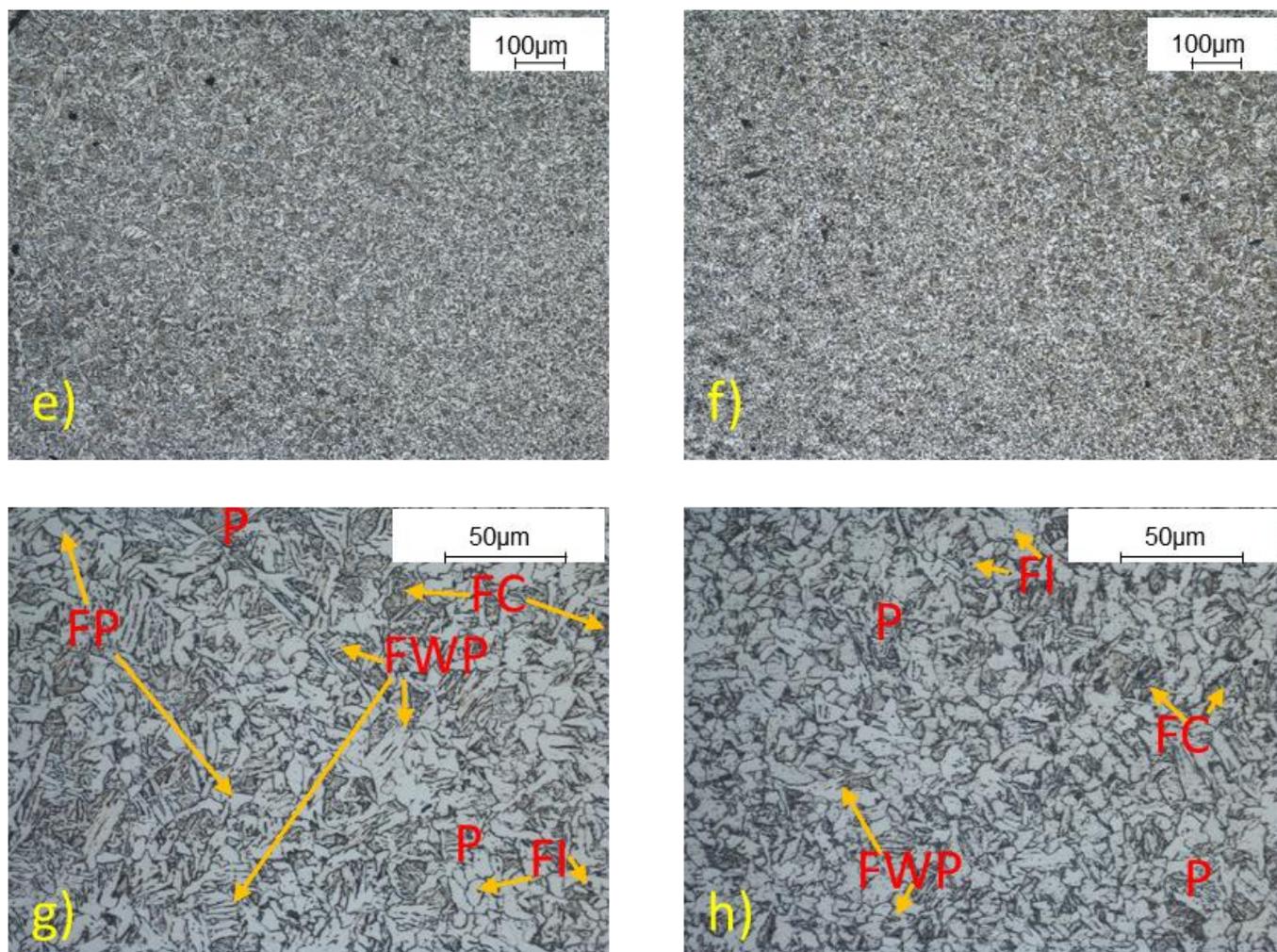
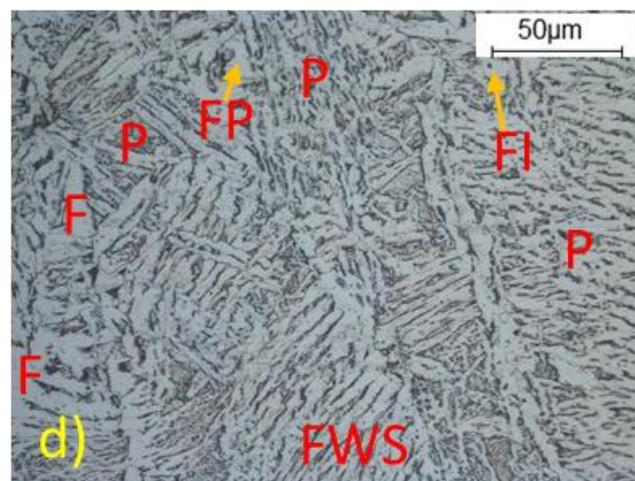
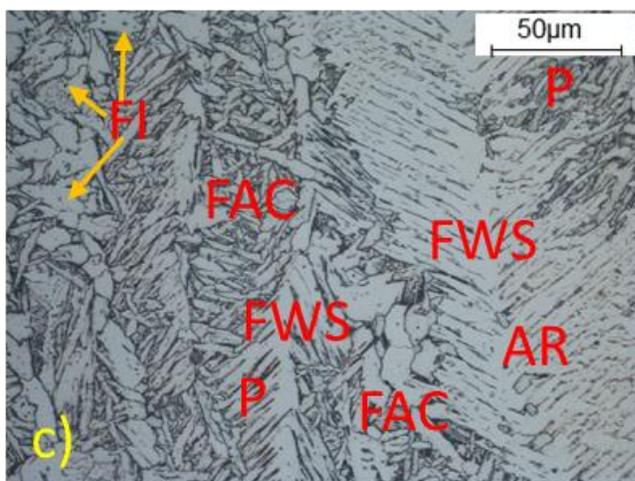
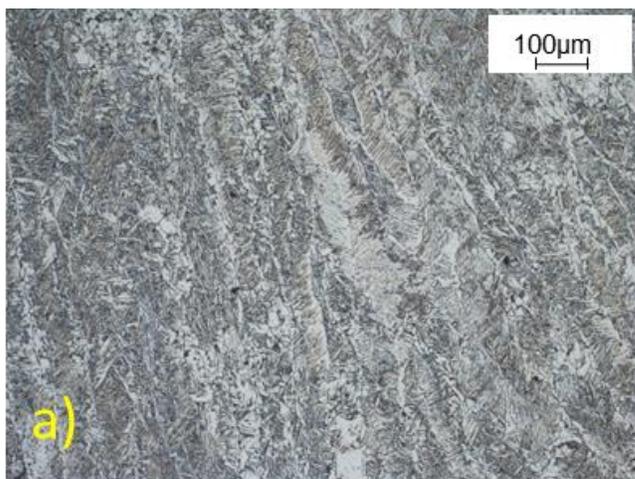


Figura 4. 21 Micrografías de las probetas de la ZAC, a) probeta A a 100X, b) probeta B a 100X, c) probeta A a 500X, d) probeta B a 500X, e) probeta C a 100X, f) probeta D a 100X, g) probeta C a 500X y h) probeta D a 500X.



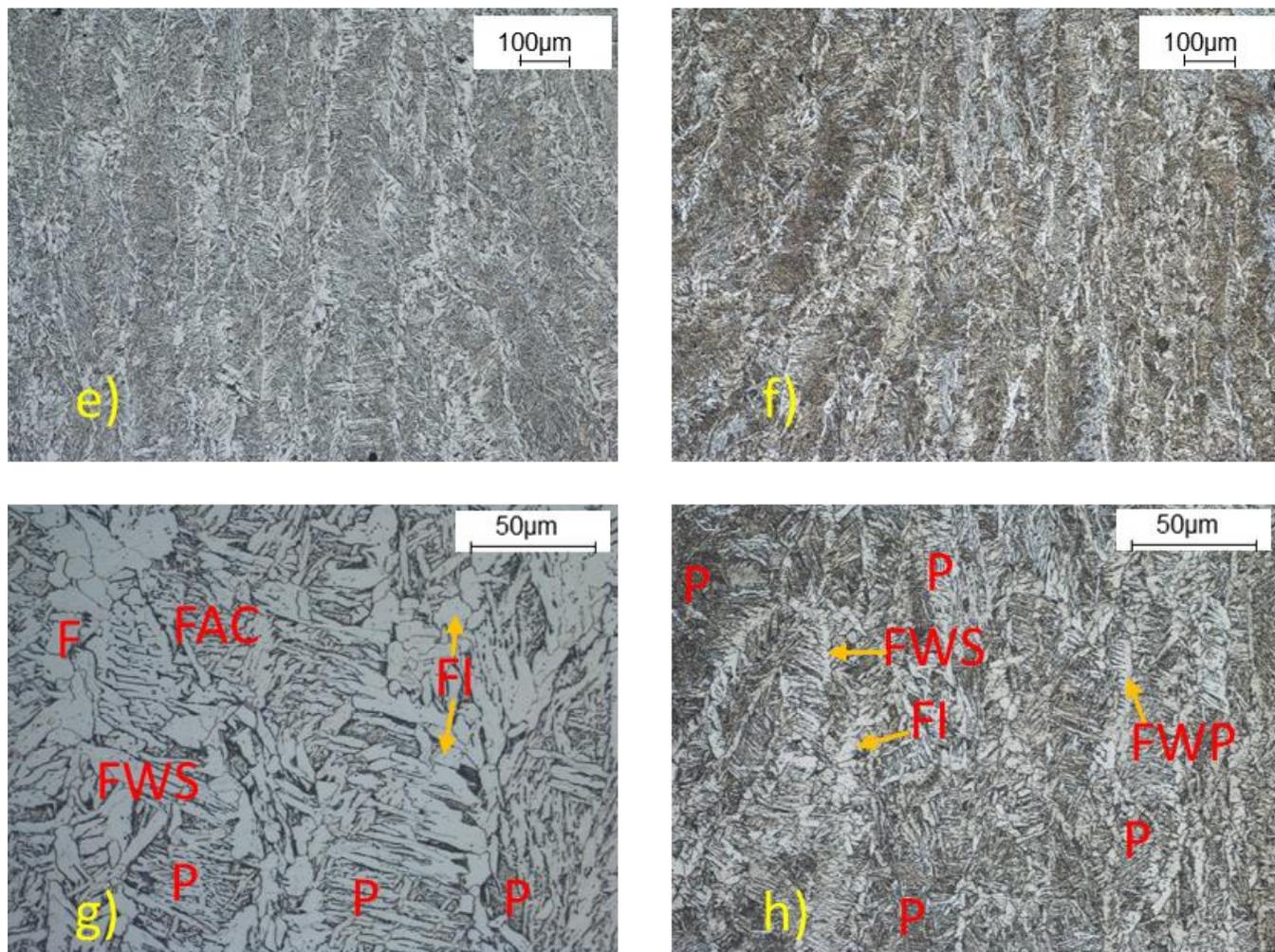


Figura 4. 22 Micrografías de las probetas de la zona de fusión, a) probeta A a 100X, b) probeta B a 100X, c) probeta A a 500X, d) probeta B a 500X, e) probeta C a 100X, f) probeta D a 100X, g) probeta C a 500X y h) probeta D a 500X.

4.4.4.3 Microdureza Vickers

El perfil de microdurezas Vickers realizado a cada muestra, con diferente ángulo de abertura de la preparación de unión, se obtiene una gráfica que se observa en Figura 4. 23, mostrando que la dureza más alta es del MB, la desviación estándar es de 16 Hv, que no es de gran relevancia en entre las zonas, por lo que se interpreta como una unión factible de acuerdo a la microdureza presente, resaltando que la dureza depende de una microestructura similar a la del MB y por lo tanto mejores propiedades de la unión. Se puede apreciar que la probeta B es la que tiene mayor dureza en todas las zonas esto por la distribución de calor más uniforme y un enfriamiento más homogéneo, además de que la microestructura presente es perlítica con FWS y FWP siendo más duras que la F.

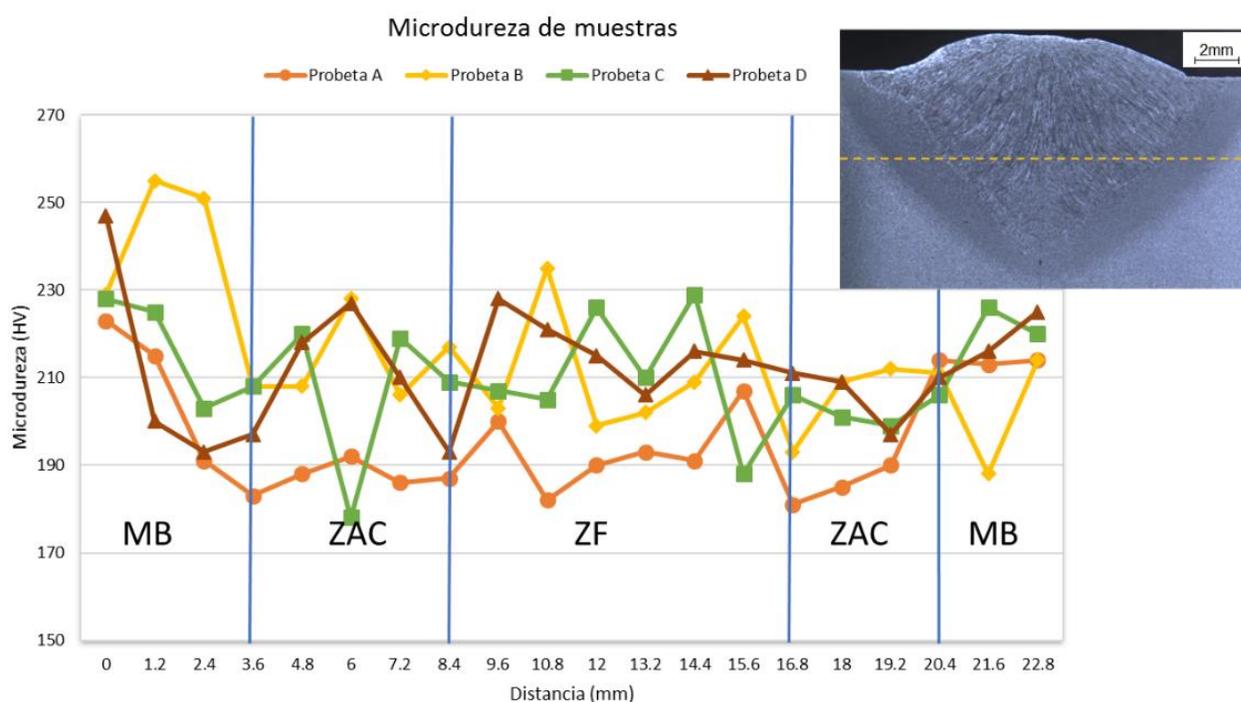


Figura 4. 23 Gráfica de dureza presente en las diferentes zonas.

4.4.5 Ensayo de tensión

Finalmente, para evaluar la resistencia obtenida en las uniones, se llevó a cabo un ensayo de tensión a las probetas A y B, porque cumplieron con los criterios de aceptación en las inspecciones END. Los resultados se muestran en la Tabla 4. 6. Las propiedades mecánicas del MB en la Tabla 4. 7. Para el análisis de estos resultados hay que considerar que la penetración es parcial y no completa, por lo que la fractura es en la ZAC ya que es donde presenta menor dureza, pero si se considera que la penetración es del 53 % en ambas probetas obteniendo una tensión máxima de 440 MPa del MB, por ello, se considera que tiene buena resistencia.

El tipo de fractura que se presenta en la probeta A analizando la imagen a) de la Figura 4. 24 y la Figura 4. 25, se interpreta una fractura frágil corroborado por el corte a 45° que es indicio de este tipo de rotura, en la imagen b) se encuentra el mismo tipo de fractura y además fractura dúctil focalizada en los puntos señalados.

Tabla 4. 6 Resultados de la prueba de tensión.

Probeta	Espesor (mm)	Ancho (mm)	Carga máxima (N)	Tensión máxima (MPa)	Zona de fractura
A	15.72	6.36	29419.95	294	ZAC
B	15.65	6.37	30204.482	303	ZAC

Tabla 4. 7 Propiedades mecánicas del AISI 1018.

Material	Dureza (Hv)	Esfuerzo de fluencia (MPa)	Tensión máxima (MPa)	Elongación máxima (%)	Módulo (GPa)
AISI 1018	130	370	440	15	205

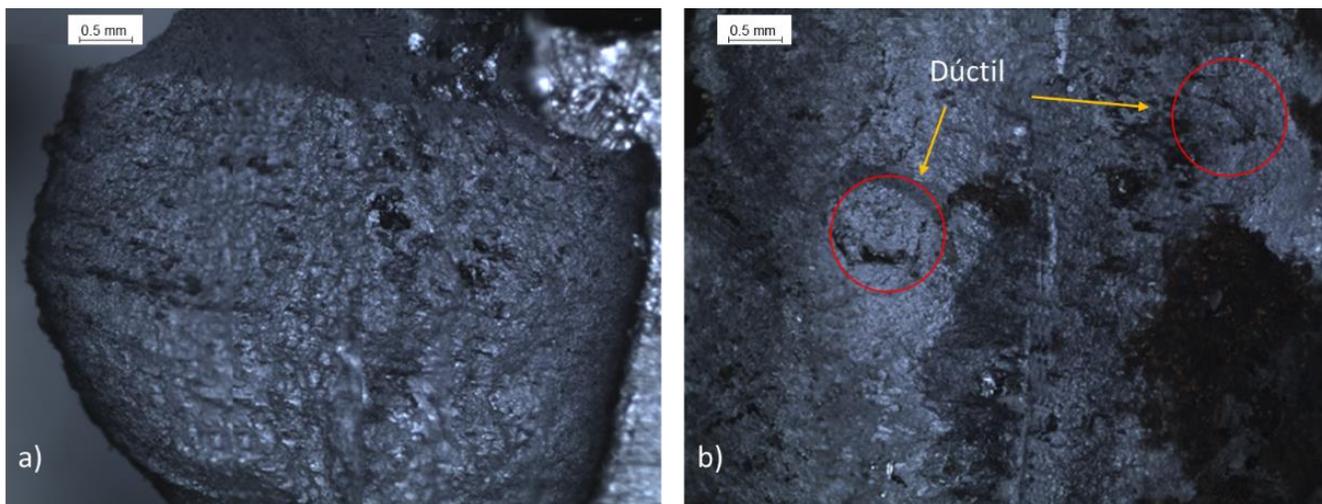


Figura 4. 24 Macrografía de la ruptura, a) probeta A y b) probeta B.

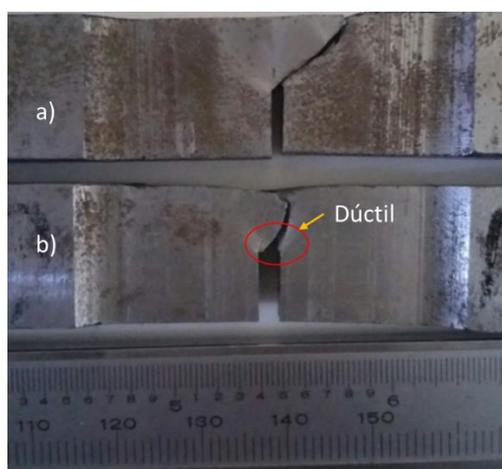


Figura 4. 25 Ruptura de ensayo de tensión, a) probeta A y b) probeta B.

CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES

Considerado el estudio a partir de los objetivos que se plantearon al inicio del trabajo, se concluye con los siguientes puntos:

- De acuerdo a la bibliografía consultada no todos los autores le dan el nivel de importancia a la preparación de unión y los resultados de las pruebas que hacen, los sustentan debido a los parámetros. Por lo que se volvió complicado establecer los efectos en los distintos ángulos que se emplean en la actualidad, ya que no especifican por que el uso de ellos. El acero estructural de 16 mm no es típico en estos estudios, ya que la mayoría usa espesores máximos de 12.7 mm para el proceso GMAW robotizado.
- Con respecto a la calidad de la unión de las probetas, la que cumple con mejores características es la probeta A con un volumen de fusión

de 14298 mm³, en los 150 mm de longitud. En teoría la preparación de 30° de abertura debería ser la de menor volumen, pero por la fusión que se presenta, la deposición del material es la más adecuada en comparación de las otras probetas.

- El ángulo de bisel que se emplee se tiene que analizar de acuerdo al espesor del material, en la unión a tope el tipo de configuración es de gran influencia en el ángulo, ya que si se realiza una preparación con raíz se necesita de gran potencia para realizar una penetración completa. El ángulo impacta directamente a la deposición del material, fusión, entrada de calor, ZAC y penetración. No muchas veces es mejor una preparación con ángulos grandes, esto depende del material.
- En cuanto al caso de estudio, se concluye que para realizar uniones con este material se debe tomar en cuenta el diseño de unión con respecto al espesor porque para este tipo de espesor es mejor biselar completamente el espesor para tener una penetración completa, solo que la deposición del metal sería mayor. Por lo que para mejor penetración en la probeta A se puede reducir la raíz y esto lleva a incrementar la alimentación del electrodo. Para la preparación de la unión es más efectiva la mecanizada.
- De los 4 ángulos seleccionados el que cumple con todas las pruebas de calidad es el de 30° de abertura. Al igual en la prueba de tensión se muestra similar resistencia que la probeta B.

CAPÍTULO 6 RECOMENDACIONES

Como recomendaciones de acuerdo al caso de estudio y la revisión bibliográfica, se enlistan los siguientes puntos:

- La velocidad de alimentación del electrodo que se utiliza (900 cm/min), muestra deficiencias en el relleno de las uniones con ángulo de abertura mayor a 40°. Por lo que se recomienda aumentar la alimentación del electrodo.
- Dado que en uniones con ángulo de abertura menores a 40° tienen mejores resultados. Se plantea que el aumento en la extensión del electrodo o en el amperaje permita una mayor penetración y entrada de calor para que desaparezca la discontinuidad de falta de fusión.

- Una línea de trabajo futuro se podría derivar en la deducción del ángulo de abertura a 20° y biselar completamente la preparación de este ángulo y el de 30° , para evaluar los efectos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. **Bjorhovde, R.** *Performance and Design Issues for High Strength*. Arizona : s.n., 2010. págs. 403-412. Vol. 13.
2. **Harvey, P.D.** *Engineering Properties of Steel*. OH : ASM International, 1982. 13:978-0-87170-144-2.
3. **Fruehan, R.J.** *The Making, Shaping and Treating of Steel: Steelmaking and Refining Volume*. 11. PA : The AISE Steel Foundation, Pittsburgh, 1998.
4. **Lay, M.G.** *Structural Steel Fundamentals*. Victoria : Australian Road Research Board, Vermont South, 1982.
5. **Guthrie, R. I. L. y Jonas, J. J.** *ASM Handbook Properties and Selection Irons, Steels, and High Performance Alloys*. s.l. : ASM International, 2005. pág. 181. Vol. 01. 0-87170-377-7.
6. **Cházaro, C. y Alvarez, O.** *Elección del tipo de acero para estructuras*. 2014. págs. 4,26.
7. **Holliday, D. B.** *Welding, Brazing, and Soldering*. s.l. : ASM International Handbook Committee, 1993. págs. 569-581. Vol. 6. 0-87170-377-7.
8. **Thama, G., y otros, y otros.** *Predicting the GMAW 3F T-Fillet Geometry and Its Welding Parameter*. Shah Alam, Malaysia : Procedia Engineering, 2012. págs. 1794 – 1799.
9. **Bhattacharya, A.. y Bera, T.** *Development of automatic GMAW setup for process improvements: Experimental and modelling approach*. s.l. : Taylor & Francis, 2014. págs. 988-995. Vol. 29. 1532-2475.

10. **Cardarelli, F.** *Materials Handbook A Concise Desktop Reference*. 2. Verlag, London : Springer, 2008. 9781846286681.
11. **Askeland, D., Fulay, P. y Wright, W.** *Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. Stamford,CT, USA : CENGAGE Learning, 2011. 978-0-495-29602-7.
12. **Smith, W. y Hashemi, J.** *Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales*. D.F., México : McGraw-Hill Interamericana, 2006. 970-10-5638-8.
13. **Mott, Robert L.** *Diseño de Elementos de Máquinas*. México : Pearson Educación, 2006. 970-26-0812-0.
14. **Zhang, Y., y otros, y otros.** *Phase Diagram Calculation And Experiment For Fe-Mn-Al System At Different Temperature*. Shenyang, China : American Institute of Physics, 2008. Vol. 54. 9780735405059.
15. **Bhadeshia, H. y Honeycombe, R.** *Steels Microstructure and Properties*. Massachusetts, USA : Elsevier Ltd, 2006. 978-0-750-68084-4.
16. **Callister, W. D.** *Materials Science and Engineering An Introduction*. 8. Utah, USA : Wiley, 2009. 978-0470419977.
17. **Jha, G., y otros, y otros.** *Design and development of precipitate strengthened advanced high strength steel for automotive application*. Jamshedpur, India : Elsevier, 2013. págs. 394-402. Vol. 561. 0921-5093.
18. **Soto, H., Maldonado, Ma. y Maldonado, I.** *Manual de diseño para construcción con acero*. Morelia, Michoacan : AHMSA, 2013.
19. **San, J., y otros, y otros.** *Diseño de Elementos de Máquinas I*. Piura : Universidad Nacional de Piura, 2013. 978-84-15774-53-2.

20. **Shen, Y. F., y otros, y otros.** *Effects of retained austenite volume fraction, morphology, and carbon content on strength and ductility of nanostructured TRIP-assisted steels.* Jamshedpur, India : Elsevier, 2015. págs. 551-564. Vol. 636. 0921-5093.
21. **Morral, F., Jimeno, E. y Molera, P.** *Metalurgia general.* s.l. : Reverte, 1985. pág. 764. Vol. 2 de Metalurgia especial. 8429160736.
22. **O'Brien, R. L.** *Jefferson's Welding Encyclopedia.* 18. Florida, USA : American Welding Society (AWS), 1997. 0-87171-506-6.
23. **Subbaram, D., Ozelik, S. y Moore, K.** *Modeling, Sensing and Control of Gas Metal Arc Welding.* Kidlington, Oxford : ELSEVIER , 2003. 0080440665.
24. **Rowe, R. y Jeffus, L.** *Manual de soldadura GMAW (MIG-MAG).* Madrid, España. : Paraninfo, 2008. 978-0-8273-7608-3.
25. **Chair, R. S., y otros, y otros.** *Welding Handbook, Welding science and technology.* 9. Miami, Florida, USA : American Welding Society (AWS), 2001. págs. 157-237. Vol. 1, Chapter 5. 0-87171-657-7.
26. **Xiong, J., y otros, y otros.** *Bead geometry prediction for robotic GMAW-based rapid manufacturing through a neural network and a second-order regression analysis.* USA : Springer Science+Business Media, 2014. págs. 157-163. Vol. 25. 1572-8145.
27. **Adak, D., Mukherjee, M. y Pal, T.** *Development of a Direct Correlation of Bead Geometry, Grain Size and HAZ Width with the GMAW Process Parameters on Bead-on-plate Welds of Mild Steel.* India : Springer India, 2015. págs. 839–849. Vol. 68. 0975-1645.

28. **Kursun, T.** *Effect of the GMAW and the GMAW-P welding processes on microstructure, hardness, tensile and impact strength of AISI 1030 steel joints fabricated by ASP316L austenitic stainless steel filler metal.* 2011. Vol. 56. 10172-011-0105.

29. **Díaz, E., y otros, y otros.** *Effect of the O₂/CO₂ ratio and welding current on the geometry of square groove weld joints in low carbon steels obtained with GMAW.* Santa Clara, Villa Clara, Cuba : Taylor & Francis, 2010. págs. 499–508. Vol. 24. 1754-2138.

30. **Barrientos, A., y otros, y otros.** *Fundamentos de robótica.* Madrid, España : McGraw Hill, 1997. 8448108159.

31. **Antonini, J., y otros, y otros.** *Design, Construction, and Characterization of a Novel Robotic Welding Fume Generator and Inhalation Exposure System for Laboratory Animals.* Abingdon : Taylor & Francis, 2007. págs. 194-203. Vol. 3. 1545-9632.

32. **Kah, P., Suoranta, R. y Martikainen, J.** *Advanced gas metal arc welding processes.* London : Springer-Verlag, 2013. págs. 655-674. Vol. 67. 1433-3015.

33. **Rodríguez, L., Carrasco, L. y López, V.** *Curso de Robótica Básico "Manejo del Robot KUKA KR16".* Saltillo, Coahuila, México : COMIMSA, 2016. 102211542401-01.

34. **Messler, R. W. Jr.** *Joining of Materials and Structures.* Oxford, USA : ELSEVIER , 2004. 0750677570.

35. **Hicks, J.** *Welded design-theory and practice.* England : Cambridge cb 1 6ah, Ambington publishing, 2000. págs. 36-42. 54-57, 59-65, 68-72, 90-95. 1855735377.

36. —. *Welded Joint Design*. 3. s.l. : Woodhead Publishing, 1999. págs. 52-76.
37. **Chair, J. J., y otros, y otros.** *AWS D1.1/D1.1M-Structural Welding Code-Steel*. 22. Florida, USA : American Welding Society (AWS), 2010. págs. 5-57. Vol. 19. 978-0-87171-772-6.
38. **Chayoukhi, S., Bouaziz, Z. y Zhal, A.** *Cost estimation of joints preparation for GMAW welding process using feature model*. Lausanne, Switzerland : ELSEVIER Science Sa, 2008. págs. 402-411. Vol. 199. 0924-0136.
39. **Gong, Y. y Gillies, A.** *Double-angle shear connections with short outstanding legs*. [ed.] Canadian Science Publishing. Thunder Bay, Canada : NRC Research Press, 2008. págs. 786–795. Vol. 35.
40. **Klanšek, U. y Kravanja, S.** *Cost estimation, optimization and competitiveness of different composite floor systems—Part 1: Self-manufacturing cost estimation of composite and steel structures*. Maribor, Slovenia : Elsevier Ltd, 2007. págs. 434–448. Vol. 62. 0143-974X.
41. **Rykalin, N.** *Calculations of thermal processes in welding*. Mashgiz, Moscow : s.n., 1951.
42. **Lazarson, E.** *Calculation of the cross-sectional area of the welded joint in arc welding*. s.l. : Tylor & Francis Group, 2007. Vol. 21. 1754-2138.
43. **Miguel, V., y otros, y otros.** *Optimización del proceso de soldadura GMAW de uniones a tope de la aleación AA 6063-T5 basada en la metodología de superficie de respuesta y en la geometría del cordón de soldadura*. Cartagena, España : s.n., 2012. págs. 333-350. Vol. 48. 988-4222.

44. **Aliya, D. y Raphael, J.** *Cracking Tendencies in Fillet Welds*. USA : Springer US, 2008. págs. 207–212. Vol. 8. 1864-1245.

45. **Lidam, R., y otros, y otros.** *Angular distortion analysis of the multipass welding process on combined joint types using thermo-elastic-plastic FEM with experimental validation*. London : Springer-Verlag London, 2013. págs. 2373–2386. Vol. 69. 1433-3015.

46. **Sun, J., Yan, Q. y Huang, J.** *Effect of bevel angle on microstructure and mechanical property of Al/steel butt joint using laser welding-brazing method*. Shanghai, China : Elsevier, 2016. págs. 468–477. Vol. 90. 0264-1275.

47. **Objois, A., Fargette, B. y Gilibert, Y.** *The influence of the bevel angle on the micromechanical behaviour of bonded scarf joints*. Reims Champagne Ardenne, France : Taylor & Francis, 2012. págs. 1057-1070. Vol. 14. 0169-4243.

48. **Watters, J., y otros, y otros.** *Investigation of double bevel full penetration groove welds for the repair of historic structural wrought iron*. B.S., University of Southern California : UMI Dissertation Publishing, 2013. 1549587.

49. **McClure, M.** *Effects of joint preparation angle of single-vee butt welds on the tensile strength of ASTM A36 carbon steel*. Terre Haute, Indiana : UMI Dissertation Publishing, 2011. 1492013.

50. **ASTM.** *ASTM E165-09 Standard Practice for Liquid Penetrant Examination for General Industry*. West Conshohocken, PA : ASTM International, 2009.

51. —. *ASTM E433-71, Standard Reference Photographs for Liquid Penetrant Inspection*. West Conshohocken, PA. : ASTM International, 2013.

52. **Peréz, D., y otros, y otros.** *Non Destructive Evaluation of the Quality of the Coating (Cladding) with Stainless steel duplex SAF 2283LSI of Fan Blades of Turbines Made by Applying the Process of Welding GMAW-Pulsed and the GMAW Process-Pulsed with Thermal Pulsation.* Cancun, Mexico : Pan American Conference, 2011. Vol. 5. 978-968-9288-10-7.

53. **ASTM.** *ASTM E407-07 Standard Practice for Microetching Metals and Alloys.* West Conshohocken, PA : ASTM International, 2015.

54. **Ling, Kuo-Hsia, y otros, y otros.** *Effect of welding sequence of a multi-pass temper bead in gas-shielded flux-cored arc welding process: hardness, microstructure, and impact toughness analysis.* London : Springer-Verlag, 2015. págs. 1033–1046. Vol. 81. 1433-3015.

55. **Blodgett, O. W.** *Desing of waldments.* Cleveland, Ohio, USA : The James f. Lincoln arc welding foundation, 1963. págs. 3.1-3.7.

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2. 1 Designación y descripción del tipo de acero [12].	12
Tabla 2. 2 Significado del número del segundo número de la designación [12].	12
Tabla 2. 3 Soldabilidad del acero en función del carbono equivalente [18]. ..	23
Tabla 2. 4 Modo de transferencia del proceso de soldadura GMAW [7].	26
Tabla 2. 5 Parámetros de experimentación [8].	29
Tabla 2. 6 Analogía del cuerpo humano con los componentes estructurales de un robot industrial [33].	38
Tabla 2. 7 Consideraciones en el diseño de una unión soldada [35].	42
Tabla 2. 8 Requerimientos comunes para el diseño de uniones soldadas (tubulares y no tubulares) de acuerdo al tipo de unión [37].	46
Tabla 2. 9 Relación entre el espesor y los parámetros del proceso GMAW [38].	51
Tabla 2. 10 Datos relacionados para la preparación de unión [38].	51
Tabla 2. 11 Procesos para preparación de las características en ranura V [38].	52
Tabla 2. 12 Coeficientes de ecuaciones para algunos diseños de unión a tope [42].	56
Tabla 2. 13 Composición química %e.p. de acero bajo carbono [45].	57

Tabla 2. 14 Propiedades mecánicas y térmicas de acero bajo carbono [45].	57
Tabla 2. 15 Parámetros de soldadura para la experimentación [45].	58
Tabla 3. 1 Efectos de las dimensiones del bisel con las consideraciones más importantes, sin modificación de los parámetros de soldadura.	61
Tabla 4. 1 Composición química (%e.p.) real del AISI 1018 de las probetas.	65
Tabla 4. 2 Identificación de ángulo de abertura de probeta AISI 1018.	68
Tabla 4. 3 Identificación de muestras.	77
Tabla 4. 4 Composición química de Nital 5% [53].	77
Tabla 4. 5 Resultados de la medición de sección transversal del cordón.	83
Tabla 4. 6 Resultados de la prueba de tensión.	91
Tabla 4. 7 Propiedades mecánicas del AISI 1018.	92

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2. 1 Esquema de la clasificación aleaciones industriales [10].	10
Figura 2. 2 Diagrama hierro-carbono [15].	13
Figura 2. 3 Diagrama binario Fe-Mn [14].	14
Figura 2. 4 Gráfica esfuerzo-deformación del acero, intervalos de comportamiento [18].	15
Figura 2. 5 Efecto del contenido del carbono en la resistencia de los aceros estructurales [18].	17
Figura 2. 6 Efecto del contenido del carbono en la ductilidad de los aceros estructurales [18].	18
Figura 2. 7 Efecto del carbono en la soldabilidad del acero [18].	22
Figura 2. 8 Equipo de soldadura por arco de metal y gas [25].	24
Figura 2. 9 Diagrama esquemático de la preparación experimental [26].	28
Figura 2. 10 Geometría del cordón de soldadura [26].	28
Figura 2. 11 Macrografías de la geometría del cordón en pruebas con posición 3F [8].	29
Figura 2. 12 Macrografía de la sección transversal con diferentes condiciones durante el proceso [27].	30
Figura 2. 13 Microestructura del metal soldado a) N1, b) N2, c) N3, d) N4, e) N5, f) N6, g) N7 y h) N8 [27].	31

Figura 2. 14 Variables de entrada y salida del proceso de soldadura [23]. ...	36
Figura 2. 15 Relación entre parámetros de soldadura en el proceso GMAW [23].	37
Figura 2. 16 Partes de brazo robótico industrial KUKA KR16 [33].	39
Figura 2. 17 Campos y zonas de trabajo, protección y peligro de celda de soldadura robotizada [33].	40
Figura 2. 18 Flecha indicando unión soldada [36].	42
Figura 2. 19 Diseños de uniones soldadas más comunes [35].	43
Figura 2. 20 Unión a tope y configuraciones aplicables [25].	45
Figura 2. 21 Representación de unión a tope con distintas configuraciones [25].	45
Figura 2. 22 Nomenclatura para la unión en "V" [35].	49
Figura 2. 23 Preparación de doble bisel [35].	50
Figura 2. 24 La sección transversal de una unión soldada: a) elementos de diseño de la unión y las dimensiones de la unión soldada, b) la separación de la zona de metal depositado en figuras elementales [42].	54
Figura 2. 25 Geometría combinada de unión a tope y en T con la secuencia de soldadura [45].	57
Figura 2. 26 Manufactura de probeta con apoyo de un sistema de sujeción con manipulación para variar el ángulo de bisel y centro de maquinado CNC HASS V4.	67

Figura 4. 1 Diagrama de flujo de la metodología para el caso de estudio.	64
Figura 4. 2 CAD del diseño de unión con las dimensiones generales.....	65
Figura 4. 3 Diseño de unión para soldadura de placa AISI 1018 con GMAW robotizado.....	66
Figura 4. 4 Celda de soldadura GMAW robotizada, con brazo robótico KUKA KR16.	67
Figura 4. 5 Planos para preparación de uniones con tolerancias permisibles. A) preparación para ángulo de abertura de 30°, B) ángulo de abertura de 40°, C) ángulo de abertura de 50° y D) ángulo de abertura de 60°.	69
Figura 4. 6 Sujeción de probetas AISI 1018 para el proceso de soldadura...	70
Figura 4. 7 Kit para inspección visual.....	70
Figura 4. 8 Dimensiones de las probetas de inspección.	71
Figura 4. 9 Sección transversal de cordón con fin de inspección visual, a) probeta con ángulo de abertura de 30°, b) probeta con ángulo de abertura de 40°, c) probeta con ángulo de abertura de 50° y d) probeta con ángulo de abertura de 60°.....	72
Figura 4. 10 Sección transversal para comparación de distorsión entre probetas a) probeta A, b) probeta B, c) probeta C y d) probeta D.	73
Figura 4. 11 Material para procedimiento de inspección por líquidos penetrantes.....	74

Figura 4. 12 Etapas de procedimiento; a) pre-limpieza, b). aplicación de penetrante, c) remoción de penetrante y d) aplicación de revelador.	75
Figura 4. 13 Probetas para realizar la evaluación; a) probeta A, b) probeta B, c) probeta C y d) probeta D.	76
Figura 4. 14 Sección transversal del cordón de la muestra A1.	79
Figura 4. 15 Sección transversal del cordón de la muestra B1.	80
Figura 4. 16 Sección transversal del cordón de la muestra C1.	81
Figura 4. 17 Sección transversal del cordón de la muestra D1.	82
Figura 4. 18 Área de sección transversal de cordón antes del proceso.	82
Figura 4. 19 Microestructura de MB a diferentes aumentos a) 100X y b)500X.	84
Figura 4. 20 Referencia de las zonas del cordón a 100X.	84
Figura 4. 21 Micrografías de las probetas de la ZAC, a) probeta A a 100X, b) probeta B a 100X, c) probeta A a 500X, d) probeta B a 500X, e) probeta C a 100X, f) probeta D a 100X, g) probeta C a 500X y h) probeta D a 500X.	87
Figura 4. 22 Micrografías de las probetas de la zona de fusión, a) probeta A a 100X, b) probeta B a 100X, c) probeta A a 500X, d) probeta B a 500X, e) probeta C a 100X, f) probeta D a 100X, g) probeta C a 500X y h) probeta D a 500X.	89
Figura 4. 23 Gráfica de dureza presente en las diferentes zonas.	90
Figura 4. 24 Macrografía de la ruptura, a) probeta A y b) probeta B.	92

Figura 4. 25 Ruptura de ensayo de tensión, a) probeta A y b) probeta B.92