

**CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**ESTUDIO DE LOS CAMBIOS DE GEOMETRÍA DEL CORDÓN DE
SOLDADURA GMAW EN PLACAS DE ACERO CON TRASLAPE Y
ROTACIÓN DEL PLANO BASE**

POR

DENISSE MORENO QUIJADA

MONOGRAFÍA

EN OPCIÓN COMO ESPECIALISTA

EN TECNOLOGÍA DE LA SOLDADURA INDUSTRIAL

SALTILLO, COAHUILA A 21 DE DICIEMBRE DE 2017.

CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**ESTUDIO DE LOS CAMBIOS DE GEOMETRÍA DEL CORDÓN DE
SOLDADURA GMAW EN PLACAS DE ACERO CON TRASLAPE Y
ROTACIÓN DEL PLANO BASE**

POR

DENISSE MORENO QUIJADA

MONOGRAFÍA

EN OPCIÓN COMO ESPECIALISTA

EN TECNOLOGÍA DE LA SOLDADURA INDUSTRIAL

SALTILLO, COAHUILA A 21 DE DICIEMBRE DE 2017.

Corporación Mexicana de Investigación en Materiales

Gerencia de Desarrollo Humano

División de Estudios de Posgrado

Los miembros del Comité Tutorial recomendamos que el reporte de proyecto "**ESTUDIO DE LOS CAMBIOS DE GEOMETRÍA DEL CORDÓN DE SOLDADURA GMAW EN PLACAS DE ACERO CON TRASLAPE Y ROTACIÓN DEL PLANO BASE**", realizada por el alumno **Denisse Moreno Quijada**, con número de matrícula **17ES-225** sea aceptado para su defensa como Especialista en Tecnología de la Soldadura Industrial.

El Comité Tutorial

Dr. Eduardo Hurtado Delgado

Tutor Académico

Dra. Pamela Chiñas Sánchez

Tutor en Planta

Dra. Gladys Yerania Pérez Medina

Asesor

Dra. Argelia Fabiola Miranda Pérez

Asesor

Vo.Bo.

Dr. Pedro Pérez Villanueva

Coordinador de Posgrado

Corporación Mexicana de Investigación en Materiales

Gerencia de Desarrollo Humano

División de Estudios de Posgrado

Los abajo firmantes, miembros del Jurado del Examen de especialización del alumno **Denisse Moreno Quijada**, una vez leída y revisado el reporte de proyecto titulado **“ESTUDIO DE LOS CAMBIOS DE GEOMETRÍA DEL CORDÓN DE SOLDADURA GMAW EN PLACAS DE ACERO CON TRASLAPE Y ROTACIÓN DEL PLANO BASE”**, aceptamos que el referido reporte de proyecto revisado y corregido, sea presentado por el alumno para aspirar al grado de Especialista en Tecnología de la Soldadura Industrial durante la defensa del reporte de proyecto correspondiente.

Y para que así conste firmamos la presente a los 21 de diciembre de 2017.

Dr. Carlos Alberto Guevara

Chávez

Presidente

Dra. Rocío Saldaña

Garcés

Secretario

Dr. Eduardo Hurtado Delgado

Vocal

AGRADECIMIENTOS

A CONACyT, por apoyarme con la beca de especialidad, que me fue de gran apoyo para la culminación de esta meta.

A la Corporación Mexicana de Investigación en Materiales S.A. de C.V. (COMIMSA), por confiar en mi capacidades para ser aceptada en la especialidad. Por el apoyo brindado para la realización del presente trabajo.

Al personal de Posgrado de COMIMSA, a los doctores que fungieron como comité académico por su apoyo y orientación; al equipo académico que al impartir clases comparten su conocimiento y experiencia, también a mi tutor académico el Dr. Eduardo Hurtado Delgado por el tiempo dedicado y por su orientación.

A Innovación Tecnológica en Soldadura y Superficies, S.A. de C.V. (SOLDATECH) por el apoyo brindado durante la estancia industrial.

A mi familia y mis familiares que me han apoyado. Especialmente a mi padre Jesús Isabel Moreno Ruíz que me impulsa siempre a seguir preparandome académicamente.

A las personas que conocí en mí llegada a la ciudad de Saltillo, Coahuila.

Sobre todo agradezco a Dios porque en las adversidades siempre manifiesta su existencia y su amor, reconozco que las bendiciones emanan de él.

DEDICATORIA

A mi familia porque en la distancia siempre está conmigo:

A mi padre que le agradezco todo su esfuerzo en dedicar su vida a sus hijas, eres mi persona favorita.

A mi madre porque a pesar de las adversidades y de las dificultades que le fueron impuestas nos ama.

A mis hermanas, que aunque no lo exprese siempre, las quiero mucho y las aprecio.

Contenido

SÍNTESIS	1
CAPÍTULO 1	2
INTRODUCCIÓN	2
1.1 Antecedentes.....	2
1.2 Objetivos.....	4
1 Objetivo general.....	4
2 Objetivos específicos	4
1.3 Planteamiento del problema	4
1.4 Justificación	6
1.5 Hipótesis.....	6
1.6 Aportación tecnológica.....	7
1.7 Alcance y delimitaciones.....	7
CAPÍTULO 2.....	9
MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE.....	9
2.1 Acero 1018	9
2.2 Soldadura GMAW.....	15
2.2.1 Proceso	15
2.2.2 Modos de transferencia.....	16
2.2.2.1 Transferencia en corto circuito.....	17
2.2.2.2 Transferencia globular	18
2.2.2.3 Transferencia por aspersion	19
2.2.3 Variables	20
2.2.3.1 Corriente de soldadura.....	21
2.2.3.2 Polaridad.....	21
2.2.3.3 Voltaje de arco	22
2.2.3.4 Extensión del electrodo.....	23
2.2.3.5 Orientación del electrodo	24

2.2.3.6	Posición	25
2.2.3.7	Tamaño del electrodo	25
2.2.4	Equipo	26
2.2.5	Ventajas y desventajas	27
2.3	Soldadura GMAW robótica	28
2.4	Normas de referencia	31
CAPÍTULO 3	.....	34
DISCUSION Y ANÁLISIS DE BIBLIOGRAFÍA	.....	34
3.1	Estado del arte.....	34
3.2	Discusión y análisis de bibliografía	38
CAPITULO 4	.....	40
CASO DE ESTUDIO	.....	40
4.1	Metodología	40
CAPITULO 5	.....	48
Resultados	.....	48
5.1	Resultados.....	48
3	Geometría de la unión	57
4	Rotación del plano base a 0°	60
5	Rotación del plano base de 30° y 60°	61
6	Rotación del plano base a 90°	61
7	Rotación del plano base a 120°, 150° y 180°	62
CAPITULO 6	.....	63
Conclusión	.....	63
6.1	Conclusión	63
BIBLIOGRAFÍA	.....	64
ÍNDICE DE FIGURAS	.....	67
ÍNDICE DE TABLAS	.....	69

SÍNTESIS

El presente trabajo monográfico es una recopilación de información referente al estudio de los cambios de geometría del cordón de soldadura cuando se rota el plano base. Incluyendo, como estado del arte, estudios e investigaciones realizadas con el proceso GMAW robotizado, así como trabajos que aportan información referente al efecto de la gravedad en uniones soldadas.

El estudio del efecto de la gravedad es importante cuando se requiera realizar soldaduras en inclinaciones que incluyen ángulos entre las posiciones 1f, 2f y 4f, conociendo las variaciones que se van a obtener por efecto de la gravedad. También puede aplicarse a la simulación de uniones soldadas en programas que no incluyan el análisis computacional de fluidos.

Como parte complementaria del estudio del estado del arte se realizó un caso de estudio, de donde se obtuvieron los cambios de geometrías a 0°, 30°, 60°, 90°, 120°, 150° y 180° de inclinación del plano base. La experimentación se realizó con proceso GMAW robotizado manteniendo los parámetros de soldadura constantes. El estudio de los cambios de geometría se presenta en los resultados.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

El desarrollo que ha tenido la construcción con estructura metálica es el resultado del crecimiento en la industrialización, esto es válido tanto para edificaciones urbanas como para edificaciones industriales. Dicho desarrollo es propiciado por las ventajas que ofrecen las estructuras metálicas como: reducción de tiempos en construcción y montaje, prefabricación, posibilidad de reformas o ampliaciones, entre otras (1).

Aproximadamente hasta 1930, en la industria de la construcción, las uniones se realizaban con tornillos y remaches exclusivamente, esto cambió con la generalización de la soldadura eléctrica generando profundas modificaciones en los proyectos de construcción (1).

En edificaciones con estructuras metálicas, las uniones son de gran importancia y deben transmitir los esfuerzos según corresponda con el diseño, de manera que no se comprometa la funcionalidad y seguridad de la obra (2).

La soldadura por arco de metal y gas (GMAW, por sus siglas en inglés), es ampliamente utilizado por su fácil automatización, por la amplia gama de materiales que permite soldar, entre los que destacan: aceros al carbono, aceros inoxidables, aluminio, cobre. Este proceso de soldadura permite utilizar todas las posiciones, en espesores desde 0.5 mm (3).

El proceso GMAW se ha robotizado a escala industrial, en este caso, los parámetros y coordenadas de las uniones a soldar las ejecuta un robot mediante una programación previa en unidades específicas, que pueden ser de control numérico por computadora (3).

Dentro de las aplicaciones se pueden considerar las siguientes (3):

- Soldadura de grandes piezas.
- Soldadura de depósitos a presión.
- Soldadura de elementos automotrices.
- Soldadura de tuberías.
- Soldaduras de elementos de construcciones metálicas.

Para el desarrollo del estudio de los cambios de geometría en el cordón cuando se rota el plano base, se considera como antecedente el proyecto realizado por Mario Spin (4) que se enfoca al estudio de la distorsión de uniones de acero soldadas siguiendo trayectorias con cambio de pendiente ya que dicho

proyecto incluye el estudio de la gravedad en acero AISI 1018 con proceso GMAW, en el caso particular del presente proyecto se ha investigado el efecto que tiene la rotación del plano base en las características geométricas del cordón de soldadura.

1.2 Objetivos

1 Objetivo general

Identificar los efectos en la geometría del cordón de soldadura en placas de acero AISI 1018, unidas a traslape por el proceso GMAW cuando se mantiene la trayectoria horizontal y se rota el plano base.

2 Objetivos específicos

- Describir la geometría del cordón entendida como las dimensiones de pierna vertical, horizontal, penetración, concavidad y convexidad en las diferentes posiciones del plano base.
- Identificar las variaciones en los perfiles de soldadura con respecto a la rotación del plano base, por efecto de la gravedad.

1.3 Planteamiento del problema

Cuando la soldadura de una unión se lleva a cabo mediante un proceso de arco eléctrico, la unión de los metales ocurre por la coalescencia de ambos, por lo que durante el proceso de la unión los metales se funden formando el charco de soldadura y si la unión se realiza con una rotación del plano base, es en ese estado y hasta que solidifica el cordón de soldadura, que la fuerza de gravedad actúa dependiendo de la posición y generando cambios en su geometría.

Dentro de los cambios que se generan por la rotación del plano base, pueden incluirse discontinuidades, concentradores de esfuerzos de la unión, socavados y falta de penetración.

Las uniones de estructuras metálicas empleadas en la construcción de edificaciones, son diseñadas considerando la sección transversal del cordón de soldadura semejante a un triángulo isósceles, con una superficie uniforme, continua y libre de defectos perjudiciales (5), **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**



Figura 1. 1 Sección de soldadura: a) perfil considerado para diseño; b) Perfil real (5).

Entre los factores a considerar para que el procedimiento constructivo se apegue a los requerimientos de diseño para las uniones soldadas, se encuentran el proceso de soldadura y sus parámetros (6).

En el proceso GMAW la unión se realiza mediante fusión de los metales, esto quiere decir que el acero a soldar se calienta hasta el punto de fusión (en estado líquido), formando el charco de soldadura que posteriormente se solidifica (6).

Cuando se realizan soldaduras con rotación del plano base, desde que se forma el charco de soldadura, este es afectado por la fuerza de gravedad hasta que se solidifica, presentando así variaciones en la geometría del cordón que dependen del ángulo de rotación del plano base (7).

1.4 Justificación

Con la presente investigación se pretende conocer los efectos que se generan en la geometría del cordón de soldadura al rotar el plano base, entendiendo que la geometría del cordón se modifica por la acción de la gravedad sobre el mismo durante el tiempo de enfriamiento de la soldadura, generando cambios dimensionales que varían de una posición a otra.

El acero 1018 de las placas a soldar, tiene diferentes aplicaciones en diversas industrias, por lo que los resultados obtenidos podrían ser importantes en las industrias en que es utilizado dicho material, principalmente en la industria de la construcción, naval y automotriz para procesos automatizados. De manera que considerando la configuración de la celda y uso de accesorios o posicionadores, se pueda aplicar la soldadura en diferentes posiciones si es conveniente.

Con las geometrías obtenidas y mediante su estudio, se podrá concluir cuales son los cambios que se presentan al soldar en diferentes posiciones y una vez conociendo los cambios inferir en posibles características como la variación entre refuerzos máximos, penetración, longitud de piernas; identificar si los cordones son de configuración convexa o cóncava; además de observar si hay cambios e identificar a partir de que rotación se presentan.

Los resultados obtenidos demostrarán cómo se comporta la geometría del cordón con diferentes inclinaciones del plano base, condición que en programas de simulación de soldadura no es posible simular a menos que el programa considere la dinámica computacional de fluidos.

1.5 Hipótesis

La rotación del plano base genera una variación en la geometría del cordón de soldadura en uniones con traslape de placas de acero AISI 1018, que puede ser cuantificable con una secuencia simple de experimentos.

1.6 Aportación tecnológica

Mediante la presente investigación se pretende conocer y analizar los cambios geométricos que se presentarán en el cordón de soldadura. Para aplicar los resultados obtenidos en uniones con diferentes aplicaciones industriales.

1.7 Alcance y delimitaciones

El estudio consiste en medir las dimensiones del cordón de soldadura e identificar los cambios geométricos del cordón de soldadura para cada ángulo de

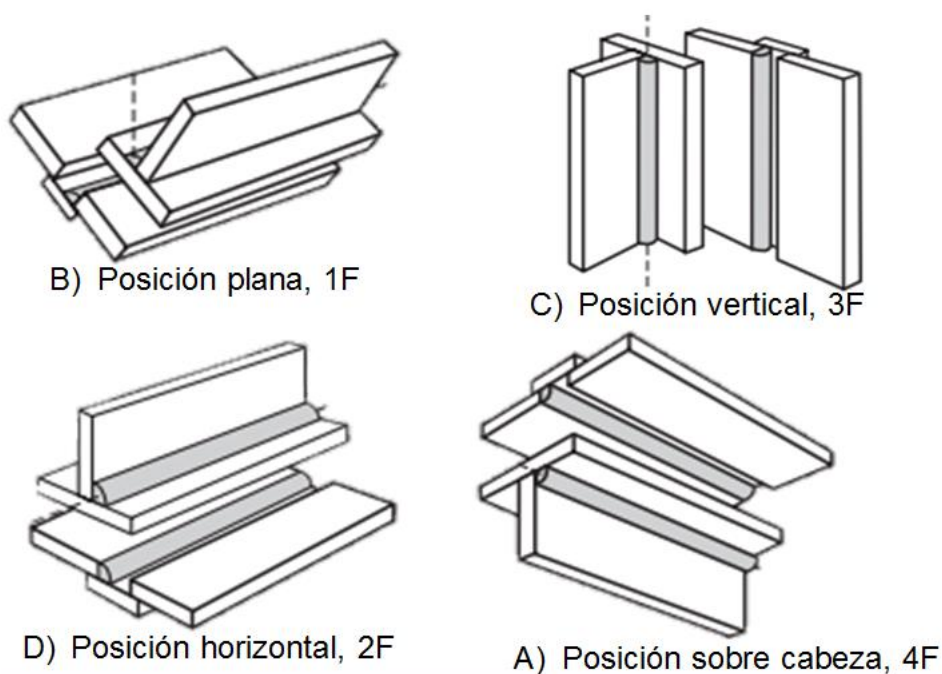


Figura 1. 2 Posiciones de soldadura (21).

estudio. Los ángulos a trabajar incluyen las posiciones 1F, 2F, 4F (Figura 1. 2) y ángulos intermedios entre estas sin trabajar en la posición 3F.

Las placas de acero AISI 1018 fueron de 12.7 mm de espesor con geometría rectangular de 100mm por 200 mm. Unidas con traslape y por proceso GMAW robotizado. Los parámetros considerados para el proceso de soldadura son:

- Velocidad de avance= 0.55 m/min.
- Voltaje= 25 V.
- Corriente= 350 A.
- Alimentación de hilo= 647.7 mm/min.
- Gas de protección= 85% Argón y 15% CO₂.
- Flujo de gas= 12.271 L/min.
- Longitud del alambre= 10 -12 mm.
- Modo de transferencia de metal de aporte= Transferencia por aspersion.

El electrodo a utilizar es ER70S-6 con 1.6 mm de diámetro.

Manteniendo constantes los parámetros de soldadura en todas las inclinaciones a trabajar, de manera que solo variará la posición de soldadura. Esto se logra con el proceso GMAW robótico y es importante para un mejor control de la experimentación y los resultados a obtener.

Queda fuera del alcance relacionar las geometrías de los cordones con los parámetros de soldadura, así como la predicción de la geometría de las uniones y los cambios micro estructurales que se generen en el material base por el proceso de soldadura.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

2.1 Acero 1018

Los aceros industriales se clasifican de acuerdo a su composición química y a su aplicación, como se observa en la Figura 2. 1.

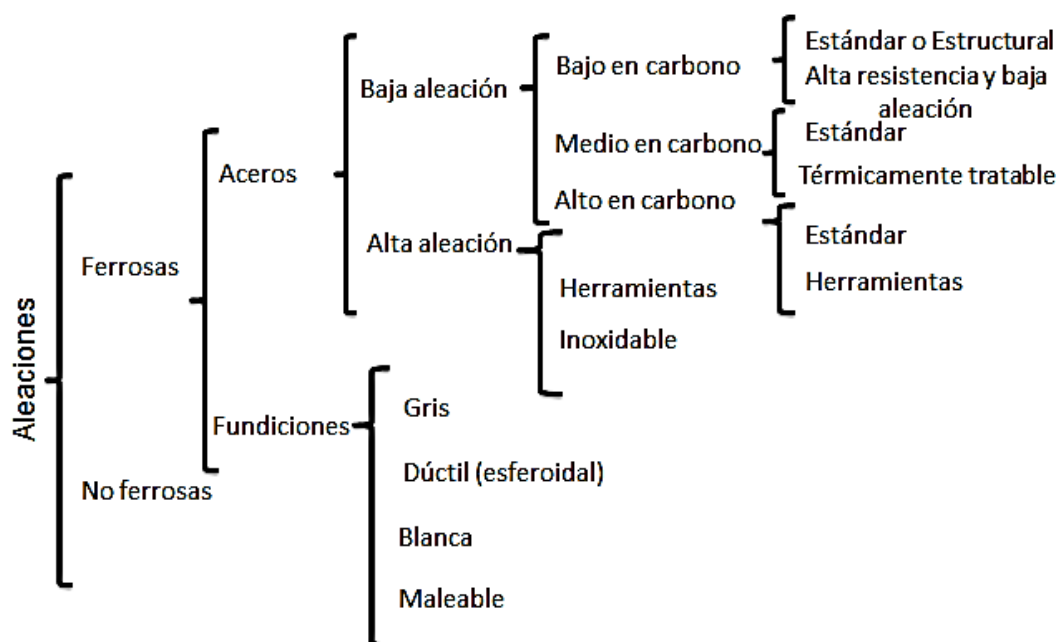


Figura 2. 1 Esquema de clasificación de aleaciones industriales (8).

El Instituto Americano del Hierro y el Acero (AISI por sus siglas en inglés), clasifica los aceros en base a su composición química. La nomenclatura está compuesta de 4 dígitos, con los que se indica la aleación principal, así como el contenido de carbono, como se indica en la Tabla 2. 1 y Tabla 2. 2.

Tabla 2. 1 Primeros dos dígitos de la nomenclatura AISI para aceros (9).

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 Tercer dígito de la nomenclatura AISI para aceros (9).

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)

El acero AISI-SAE 1018, es un acero de bajo carbono con un contenido que va del 0.15% al 0.20% de C, el cual además tiene buena soldabilidad. En la Tabla 2. 3 y Tabla 2. 4 se presenta su composición química en porcentajes en peso y sus propiedades mecánicas respectivamente (10).

Tabla 2. 3 Composición química del acero 1018 (% e. p.) (10).

Elemento	Porcentaje en peso
% C	0.15-0.20
%Mn	0.60-0.90
%Si	0.10-0.20
% P máx.	0.040
% S máx.	0.050

Tabla 2. 4 Propiedades mecánicas del acero 1018 (11).

Dureza	126 HB; 71 HRb
Esfuerzo de fluencia	370 MPa; 53700 psi
Esfuerzo máximo	440 MPa; 63800 psi
Elongación máxima	15% (en 50 mm)
Reducción de área	40%
Módulo de elasticidad	205 GPa; 29700 ksi
Maquinabilidad	76%

De acuerdo al contenido de carbono mencionado en su composición química, es un acero de baja aleación hipo-eutectodide, con perlita y ferrita como componentes en su microestructura (12), como se observa en la Figura 2. 2 y Figura 2. 3.

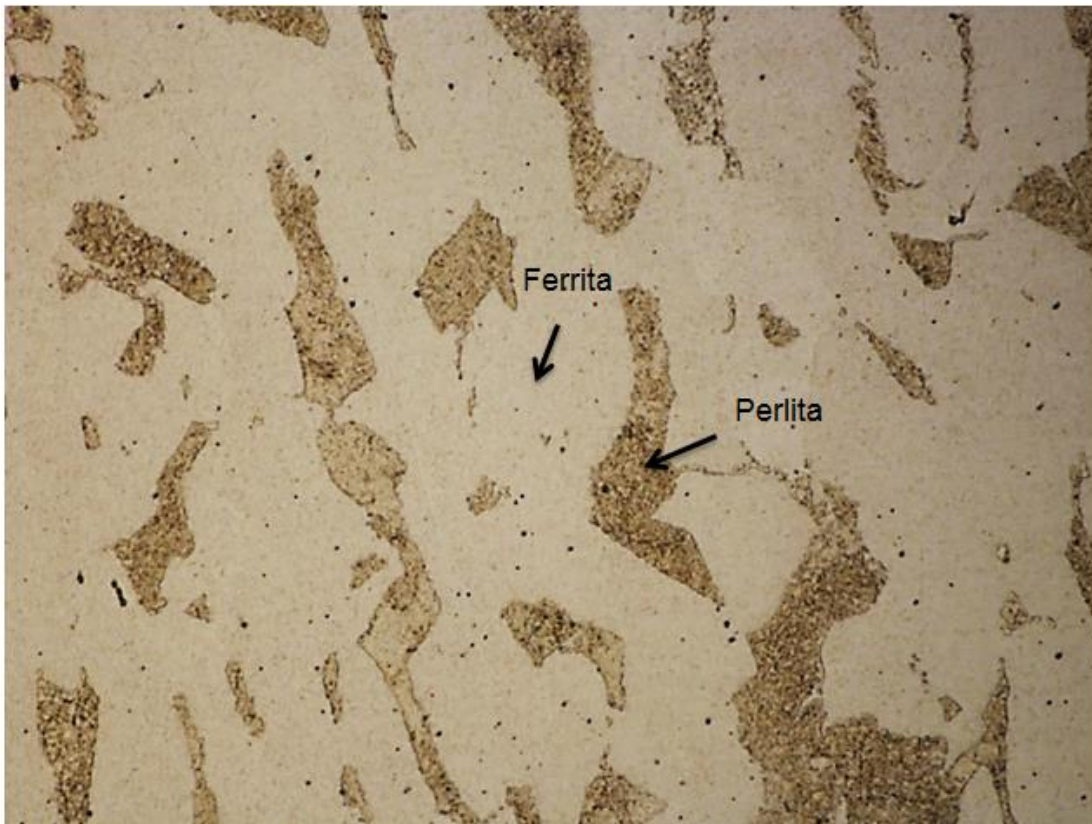


Figura 2. 2 Microestructura de un acero AISI 1018 a 1000X; elaboración propia.

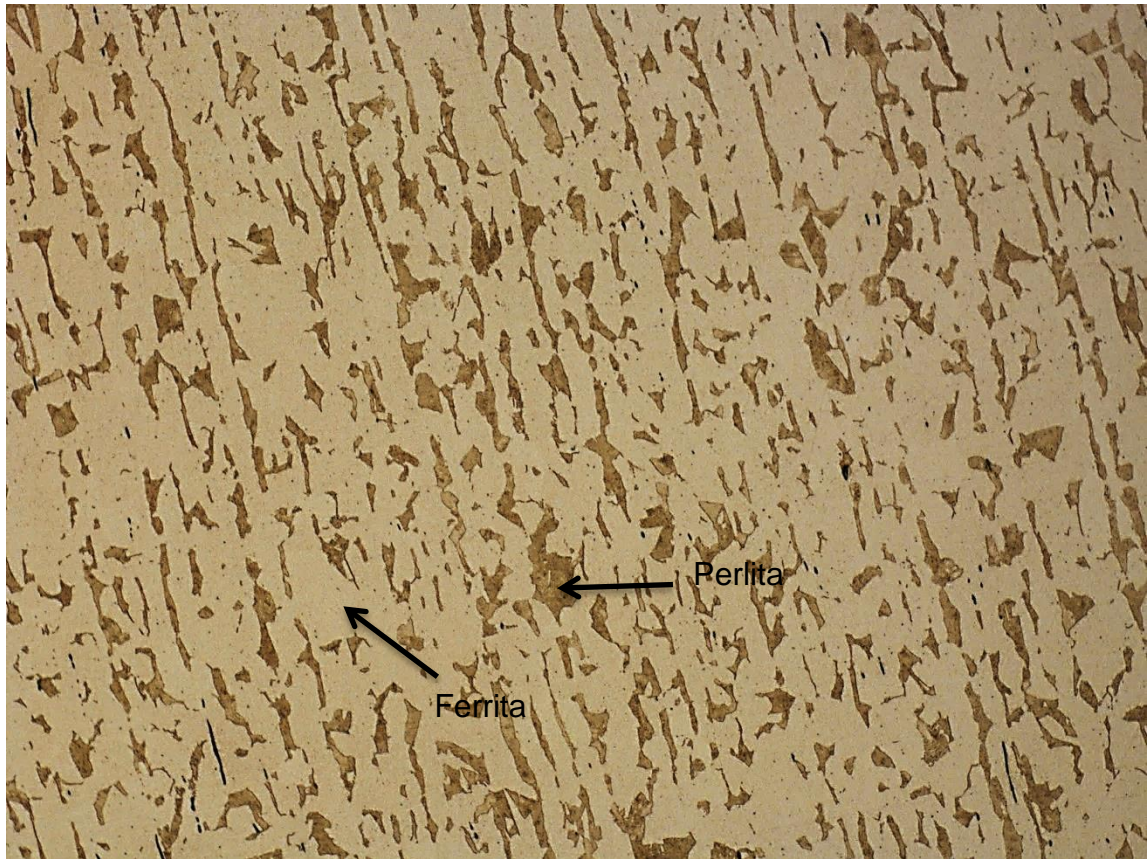


Figura 2. 3 Metalografía de AISI 1018 a 200X; elaboración propia.

Como lo indica el tercer dígito de su nomenclatura, el principal aleante es el manganeso con un porcentaje de 0.60 a 0.90 (12).

El acero 1018 se presenta en formas y acabados en barra redonda, cuadrada, hexagonal y solera, laminadas o forjadas en caliente. Es utilizado para estructura, tubería soldada, para partes mecánicas para las industrias metalmeccánica, automotriz, construcción (tensores para estructuras).

En cuanto al acero AISI 1018 se han investigado los defectos que se producen al soldarlo con proceso GMAW a altas velocidades de avance (13), el efecto del ángulo de bisel (14), la determinación de esfuerzos residuales generados por la soldadura (15); el que se realicen diferentes estudios sobre el

mismo material se debe a la aplicación del acero AISI 1018 en diferentes industrias.

2.2 Soldadura GMAW

Debido a que se estudia la geometría del cordón de soldadura cuando se rota el plano base por soldadura GMAW en placas de acero con traslape, es importante conocer el proceso de soldadura GMAW, describiendo como se realiza la soldadura y los parámetros que intervienen.

2.2.1 Proceso

El proceso GMAW o de arco metálico con gas utiliza un arco entre un alambre macizo conocido como electrodo, el cual es un consumible continuo y el material de aporte para la soldadura, y el charco de soldadura. El proceso se realiza con protección de gas suministrado externamente (16).

En GMAW el arco generado entre el electrodo consumible y la pieza a ser soldada aporta calor que es utilizado para fundir las superficies del metal base y el extremo del electrodo. El metal fundido del electrodo es depositado hacia la pieza a través del arco, donde se convierte en metal de soldadura. La protección es obtenida por una cubierta de gas que envuelve el área del arco para ser protegida de los contaminantes de la atmósfera (16).

La soldadura GMAW se refiere a la soldadura de arco metálico que utiliza gas de protección, dicho gas puede ser inerte o activo, por esto se clasifica en:

- Soldadura MIG, cuando el gas de protección es inerte.
- Soldadura MAG, cuando el gas de protección es activo.

La soldadura con protección de gases inertes es comúnmente realizada con argón (Ar), helio (He), una combinación entre ellos o con gases activos como oxígeno (O) o dióxido de carbono (CO₂) (17).

Soldadura semiautomática, se refiere al proceso de soldadura manual con equipo que controla automáticamente una o más de las condiciones de soldadura (18).

La soldadura automática es aquella que se realiza con equipo que requiere ocasionalmente o no la observación de la soldadura y los ajustes de los controles del equipo no se realizan manualmente (18).

El proceso robotizado es más aplicado a escala industrial, a través de una unidad de control numérico por computadora (CNC) se programan todos los parámetros y coordenadas de localización de la unión a soldar (16). La soldadura con robot es aquella que es desarrollada y controlada por un equipo de robot (18).

2.2.2 Modos de transferencia

El modo de transferencia se refiere a la forma en que es depositado el metal de aporte, desde que forma parte de la estructura del electrodo hasta que forma el cordón de soldadura.

Existen tres mecanismos básicos de modo de transferencia (19):

- Transferencia en corto circuito
- Transferencia globular
- Transferencia por aspersion

2.2.2.1 Transferencia en corto circuito

Este modo de transferencia incluye los intervalos más bajos de corriente de soldadura y de diámetro de electrodos para GMAW.

Durante la transferencia de metal por corto circuito se produce un charco de soldadura pequeño de rápida solidificación, que es apropiado para unir secciones delgadas, soldar fuera de posición y cubrir aberturas de raíz anchas (16). Cuando el electrodo está en contacto con el charco de soldadura se realiza la transferencia del metal de aporte (16).

La transferencia de metal por corto circuito se lleva a cabo como se representa en la Figura 2. 4, donde en A,B,C yD la corriente aumenta cuando el electrodo hace contacto con la pieza a soldar; en D y E el metal de la punta del electrodo se estrangula; se inicia el arco como se representa en E y F; en H la punta del electrodo se funde (16).

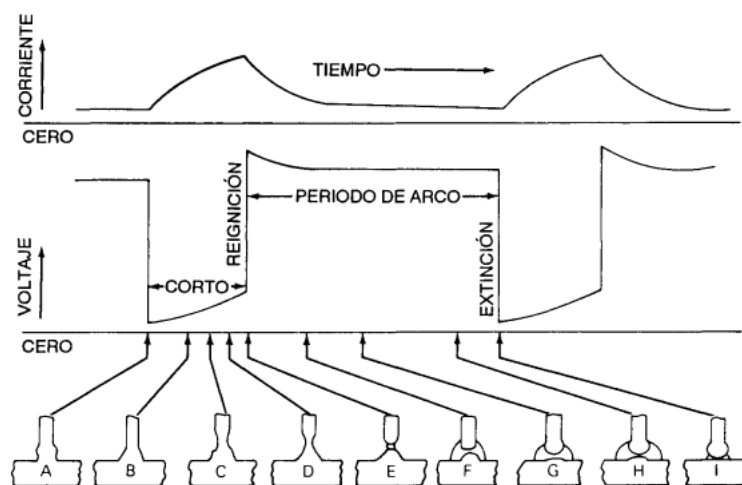


Figura 2. 4 Modo de transferencia por corto circuito (16).

El voltaje de circuito abierto de la fuente de potencia debe ser tan bajo que la gota de metal no se transfiera hasta que toque el metal base. Aunque solo hay

transferencia de metal durante el corto circuito, el gas de protección afecta la tensión superficial del metal fundido (16).

El gas de protección puede afectar el tamaño de la gota del metal de aporte y la duración del corto circuito, así como las características de operación del arco y la penetración en el metal base (16).

2.2.2.2 Transferencia globular

Con un electrodo positivo se realiza la transferencia del metal de aporte por transferencia globular cuando la corriente es relativamente baja, sin importar el gas de protección empleado. Sin embargo cuando el gas utilizado es dióxido de carbono y helio ocurre este tipo de transferencia con todas las corrientes útiles para soldadura (16).

En este tipo de transferencia el diámetro de la gota de metal fundido es mayor al diámetro del electrodo y la gravedad actúa fácilmente sobre la gota de metal. La longitud del arco debe ser suficiente para permitir que la gota se suelte antes de que tenga contacto con el charco de soldadura (16).

Para que la separación de la gota del electrodo se pueda llevar a cabo hay fuerzas electromagnéticas que actúan sobre la gota, las más importantes a considerar son (16):

- (P) Fuerza de estrangulamiento magnético.
- (R) Fuerza de reacción del ánodo.

La magnitud de la fuerza de estrangulamiento es función directa de la corriente de soldadura y del diámetro del alambre y por lo regular es la que causa la separación de la gota. Se ilustra en la Figura 2. 5 la transferencia globular (16).

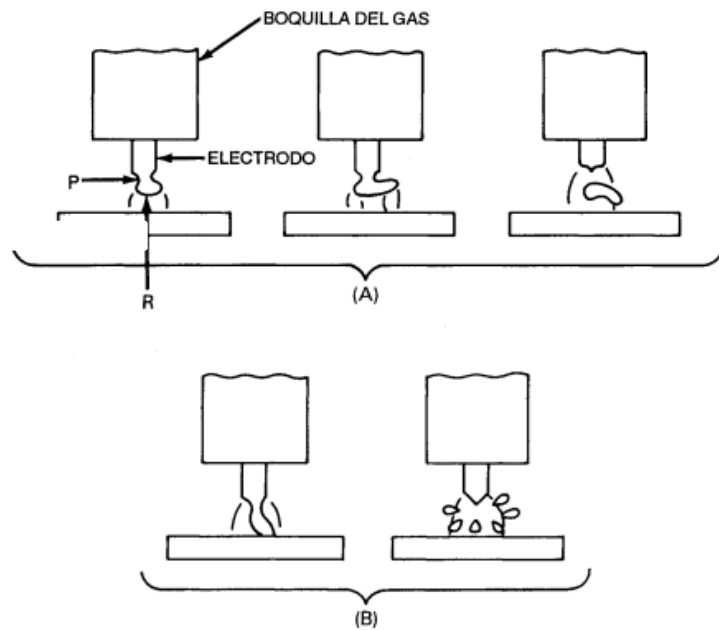


Figura 2. 5 Esquema de la transferencia globular (16).

2.2.2.3 Transferencia por aspersion

Conocida también como transferencia por rocío axial, es muy estable y libre de salpicaduras, se lleva acabo como se ilustra en la Figura 2. 6.

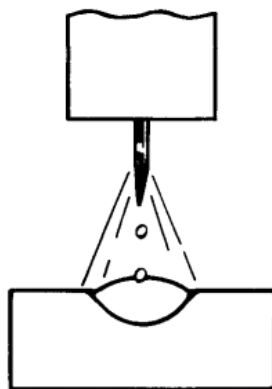


Figura 2. 6 Esquema de transferencia por aspersion (16).

Este modo de transferencia debe usarse corriente directa con electrodo positivo (CCEP) y el nivel de corriente debe estar encima de la corriente de transición (valor crítico). La transferencia de metal se lleva a cabo en forma de gotas muy pequeñas, que se forman y suelta a razón de centenares por segundo, acelerándose a través del arco de soldadura (16).

La corriente de transición depende de la tensión superficial del metal líquido, es inversamente proporcional al diámetro del electrodo, varía con el punto de fusión del metal de aporte y la composición del gas de protección (16).

2.2.3 Variables

Los parámetros de soldadura, son los factores que pueden ser ajustados para controlar una unión. El conocimiento y la buena aplicación de estas variables del procedimiento de soldadura permiten llegar a los más altos niveles de calidad en los cordones:

- 1.- Corriente de soldadura (velocidad de alimentación del electrodo).
- 2.- Polaridad.
- 3.- Voltaje de arco (longitud del arco).

- 4.- Velocidad de avance.
- 5.- Extensión del electrodo.
- 6.- Orientación del electrodo (ángulo respecto a la dirección del desplazamiento).
- 7.- Posición de la unión que se va a soldar.
- 8.- Diámetro del electrodo.
- 9.- Composición y de flujo del gas de protección.

2.2.3.1 Corriente de soldadura

La corriente (intensidad) está relacionada con la velocidad de alimentación del alambre, de manera que cuando la velocidad de alimentación es mayor, mayor será la corriente. El índice de deposición también está relacionada con la corriente ya que cuando la intensidad aumente la fusión se producirá más rápidamente y por ende la deposición será mayor (17).

Cuando todas las variables de soldadura permanezcan constantes, un aumento en la corriente producirá (16):

- Aumento en la profundidad y anchura en la penetración de la soldadura.
- Un incremento en el índice de deposición.
- Un aumento en la franja de la soldadura.

2.2.3.2 Polaridad

La polaridad se refiere a la conexión eléctrica de la antorcha en relación a las terminales de una fuente de potencia de corriente continua (19):

- CCEP, corriente continua con electrodo positivo: Es cuando el cable de potencia de la antorcha se conecta a la terminal positiva, conocida como polaridad inversa.
- CCEN, corriente continua con electrodo negativo: Es cuando el cable de potencia de la antorcha se conecta a la terminal negativa, conocida como polaridad directa. En este caso el electrodo es cargado negativamente con electrones, que fluye a un cuerpo cargado positivamente.

La mayoría de las soldaduras GMAW se realizan con CCEP, ya que esta modalidad genera un arco estable, transferencia de metal uniforme, relativamente pocas salpicaduras, buenas características de la franja de soldadura y profundidad máxima de penetración para una amplia gama de corrientes de soldadura (19).

2.2.3.3 Voltaje de arco

El voltaje de arco depende de la longitud del arco, que es una variable independiente de la composición y dimensiones del electrodo, el gas protector y la técnica de soldadura, entre otras (17). El voltaje del arco expresa una aproximación de la longitud física del arco (ambas se presentan en la Figura 2.7), aunque, también incluye la caída de voltaje en la extensión del electrodo que sobresale del tubo de contacto (16).

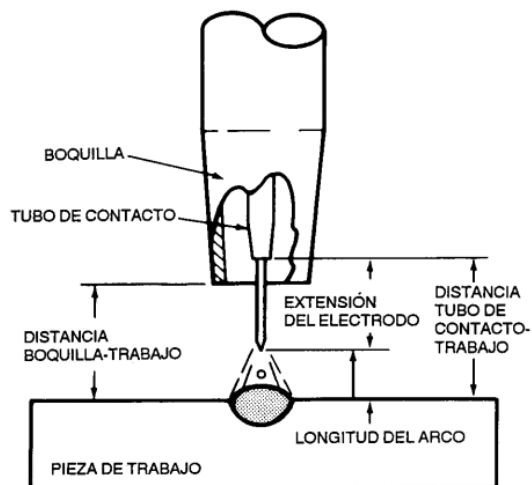


Figura 2. 7 Terminología de GMAW (16).

Al mantener todas las variables de soldadura constantes, el voltaje del arco se relaciona directamente con la longitud del arco; aunque lo que debe controlarse es la longitud del arco, es más fácil vigilar el voltaje. Los niveles establecidos de voltaje de arco varían dependiendo del material a soldar, del gas de protección y la modalidad de transferencia (16).

2.2.3.4 Extensión del electrodo

La extensión del electrodo (Figura 2. 7) es la distancia entre el extremo del tubo de contacto y la punta del electrodo (16). Un aumento en la extensión del electrodo produce un aumento en su resistencia eléctrica, el calentamiento por resistencia hace que se eleve la temperatura del electrodo y esto a su vez que aumente ligeramente la deposición de fusión del electrodo. En consecuencia si no hay un incremento de voltaje, el metal de soldadura se depositará en un cordón de soldadura angosto y de corona alta (17).

2.2.3.5 Orientación del electrodo

La orientación del electrodo es la relación entre el eje del electrodo y la dirección de desplazamiento (al ángulo de desplazamiento), con respecto a la pieza de trabajo y afecta la forma y la penetración del cordón de soldadura (17).

Dependiendo de la dirección del electrodo, la técnica de soldadura es (16):

- Soldadura de revés con ángulo de arrastre: Cuando el electrodo apunta en dirección opuesta a la dirección de desplazamiento.
- Soldadura de derecha con ángulo de ataque: Cuando el electrodo apunta en la dirección de desplazamiento.

En la Figura 2. 8 se ilustra el ángulo de desplazamiento y su efecto en la geometría del cordón de soldadura.

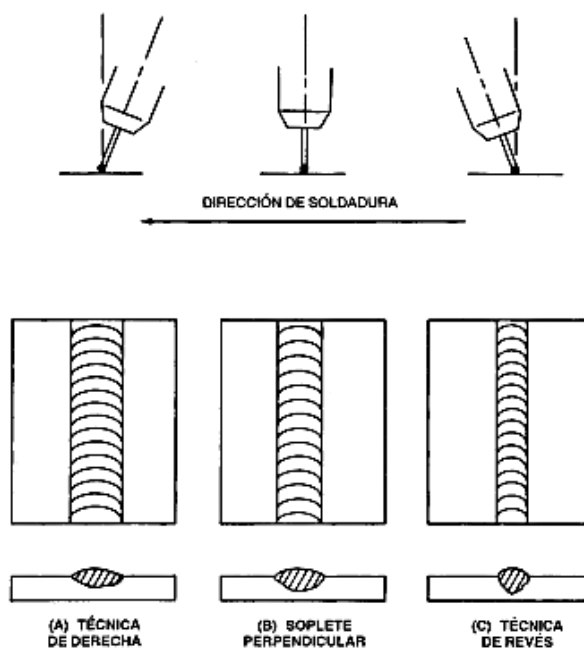


Figura 2. 8 Efecto de la posición del electrodo y de la técnica de soldadura (16).

2.2.3.6 Posición

En procesos GMAW, cuando el nivel de energía es bajo, los modos a pulso y corto circuito se pueden utilizar en todas las posiciones.

En la posición vertical y sobre cabeza se usan diámetros pequeños de electrodo, para vencer la atracción de la gravedad sobre el metal, con transferencia de metal de corto circuito o de aspersion con corriente continua a pulsos (16).

Cuando se suelda en posición plana, la inclinación del eje de soldadura respecto a la horizontal influirá en la geometría del cordón de soldadura, en la penetración y en la velocidad de avance (16).

En la Figura 2. 9 se presenta la geometría del cordón de soldadura con una inclinación de 15° con respecto al eje horizontal, donde en A es soldadura cuesta abajo y en B cuesta arriba (16).

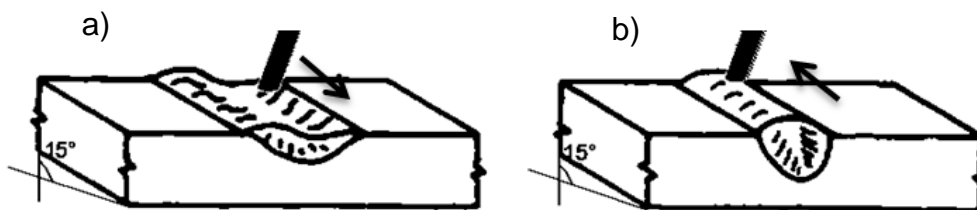


Figura 2. 9 Efecto de la inclinación de trabajo sobre la geometría del cordón en a) cuesta abajo y b) cuesta arriba (16).

2.2.3.7 Tamaño del electrodo

El tamaño del electrodo influye en la geometría del cordón de la soldadura, con un electrodo de mayor tamaño se requiere una corriente mínima más alta que con un electrodo pequeño con las mismas condiciones (19).

2.2.4 Equipo

En la Figura 2. 10 se presenta el equipo de soldadura para el proceso GMAW, cilindro de gas de protección, carrete de material de aporte, alimentador del alambre, antorcha (pistola y cable) y la fuente de poder (17).

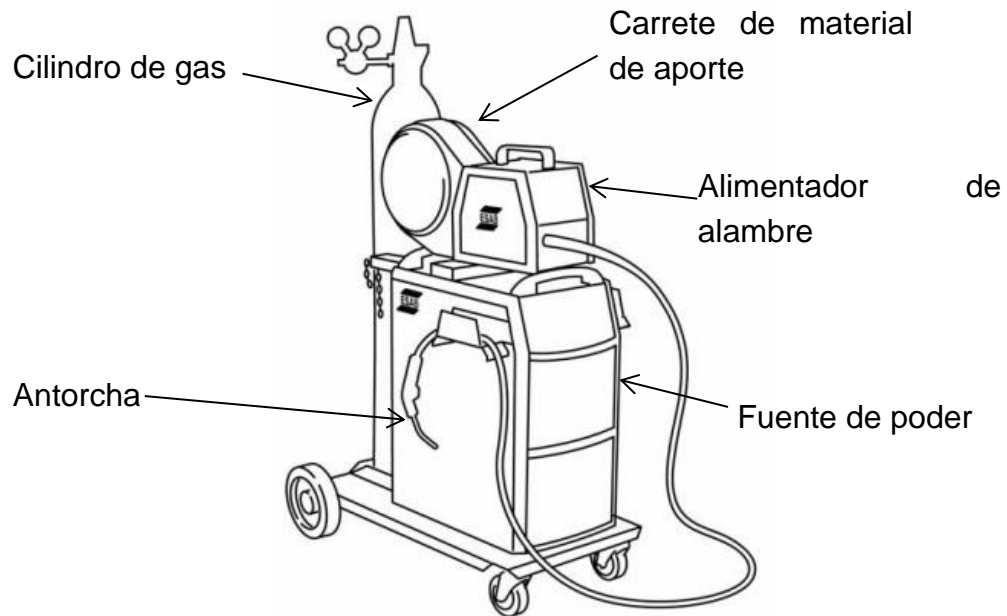


Figura 2. 10 Equipo para soldadura MIG y MAG (16).

En la Figura 2. 11 se presentan los principales componentes para el proceso GMAW automatizado.

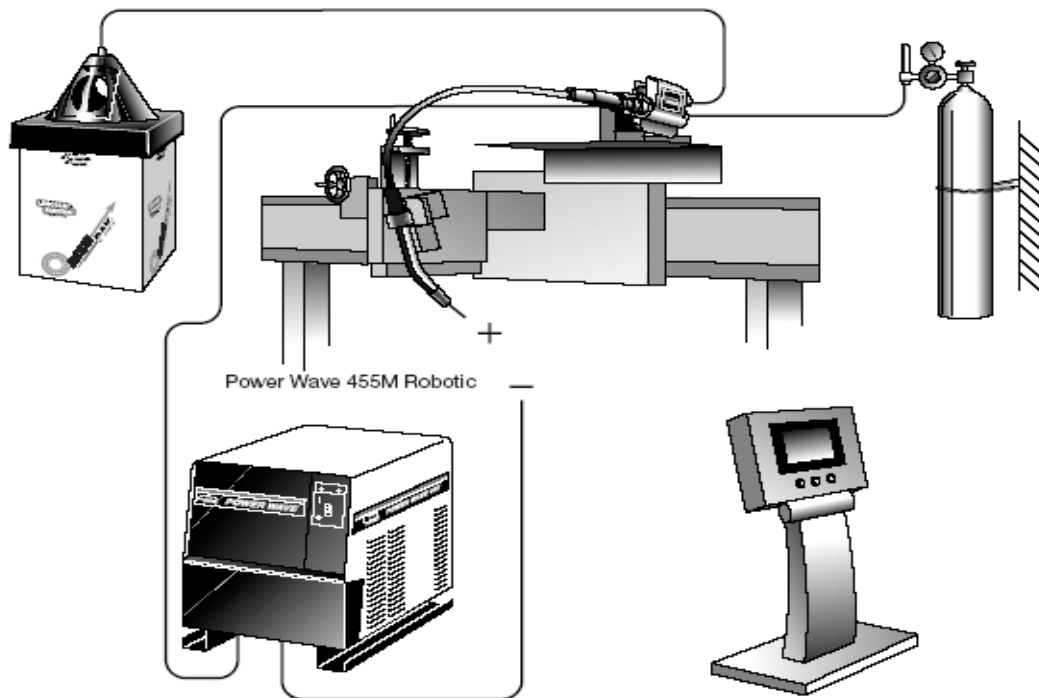


Figura 2. 11 Principales componentes del equipo de soldadura GMAW automatizado (16).

2.2.5 Ventajas y desventajas

Como beneficios de utilizar el proceso GMAW para soldadura se encuentran (16):

- Puede soldar todos los metales y las aleaciones comerciales.
- No tiene restricción de tamaño de electrodo limitado.
- Puede soldar todas las posiciones.
- Realizar soldaduras largas y continuas.
- Limpieza en el cordón depositado

Y como desventajas de utilizar el proceso de soldadura GMAW se mencionan (16):

- Equipo más complejo y costoso

- El arco debe estar protegido de las corrientes de aire.
- El tamaño de la pistola soldadora es mayor que el de un porta electrodo.

2.3 Soldadura GMAW robótica

La soldadura robótica se define como soldadura realizada y controlada por robots y no implica la intervención del operador de soldadura en la realización de la soldadura, debido a que las operaciones son llevadas a cabo y controladas por robots de soldadura (18).

En la soldadura robótica, un robot es programado para mover la antorcha de soldadura a los puntos y a lo largo del recorrido con un patrón y velocidad dado (19).

Un sistema de soldadura por arco robótico incluye un manipulador de robot articulado, fuente de energía de soldadura, antorcha de soldadura, alimentador de alambre, posicionador, extracción de humos y valla de seguridad; el sistema de soldadura robótica se conoce como celda (19).

Los robots de soldadura son articulados para obtener los grados de libertad que permitan situar la antorcha de soldadura como sea necesario, de acuerdo a la configuración de la junta, parte del brazo del robot consiste en un ducto hueco en donde pasa el cable de soldadura y la alimentación del alambre, maximizando la maniobrabilidad y el espacio de trabajo (19).

La configuración de las celdas de soldadura, dependen tanto de la pieza de trabajo como del entorno que configura la celda robótica. Y pueden ser:

- Robot estacionario y pieza de trabajo fija.
- Robot en movimiento y/o pieza de trabajo.
 - Robot montado sobre oruga.
 - Robot montado en grúa pórtico.
 - Robot montado en columna.

2.3.1 Robot estacionario y pieza de trabajo fija:

Este tipo de celda contiene un robot soportado por una base y un posicionador o mesa de trabajo para colocar la pieza a soldar. Los componentes de la celda se confinan dentro de un perímetro y tanto el robot como el posicionador se mantiene fijos sin desplazarse entre sí mismos (19).

2.3.2 Robot en movimiento y/o pieza de trabajo

Dependiendo de la geometría y dimensiones de la pieza a soldar, el robot o la pieza pueden montarse en una grúa o columna que permita que el sistema aumente su campo de acción y flexibilidad (19).

Dicha configuración es común en la producción de volúmenes de piezas de trabajo grandes, como las líneas de ensamblaje automotriz donde los robots son estacionarios y los ensamblajes de automóviles son movidos por transportadores (19).

2.3.3 Robot montado sobre oruga

Este sistema de robot y pieza de trabajo ofrece un amplio rango de acción a lo largo del eje de la pista, además de la capacidad de soldar piezas grandes. Las aplicaciones más comunes son la soldadura de paneles de automóviles, marcos de tractores, marcos de edificios y vigas estructurales (19).

2.3.4 Robot montado en grúa pórtico

La grúa pórtico suspende el robot sobre la pieza de trabajo y llega a los puntos de soldadura desde un ángulo diferente de los robots montados en el piso. Dicha configuración permite que el robot se mueva a través de la longitud de la pieza de trabajo, para poder soldar piezas más anchas y altas. Este

sistema de pórtico es utilizado en la soldadura naval para paneles y construcción de cascos de barcos (19).

2.3.5 Robot montado en columna

El robot puede desplazarse verticalmente sobre una columna para alcanzar piezas de mayor altura. Este sistema puede ocupar menos espacio en el piso de producción, debido a que solo tiene que fijarse la placa base de la columna con los cables de soldadura colocados en un ducto interno en la columna. Esta configuración incluye columnas estacionarias, viajeras, rotativas y giratorias. Si el robot es montado en una columna, aunque es capaz de soldar a alturas mayores se restringe su movilidad sobre el eje horizontal (19).

2.3.6 Sistema de manejo de la pieza de trabajo

Las piezas de trabajo pueden moverse o fijarse durante o entre los trabajos de soldadura, piezas de trabajo o ensamblajes grandes como estructuras o vigas se colocan en un sistema de fijación para que el robot acceda a las juntas a soldar. Una pieza de trabajo más pequeña puede sujetarse en un posicionador para ser orientada y proporcionar el mejor ángulo para la antorcha de soldadura (19).

2.3.7 Accesorios

Los accesorios de sujeción, son dispositivos que sujetan constantemente la pieza de trabajo durante la soldadura: Por lo general se fija en un posicionador que orienta y mueve la pieza de trabajo según las necesidades, el accesorio se diseña de acuerdo a las necesidades de tamaño, configuración de la pieza, ubicación de las juntas a soldar y el proceso de soldadura (19). Los accesorios de montaje mantienen todos los componentes sueltos de la pieza de trabajo juntos para formar las juntas (19).

2.3.8 Dispositivos de sujeción y localización

La sujeción manual simple, como las abrazaderas oscilantes y de émbolo, generalmente se aplica para operaciones de carga y descarga manual en operaciones de volúmenes bajos. Las abrazaderas de accionamiento neumático o eléctrico permiten que la pieza de trabajo sujete automáticamente los accesorios. Los sensores más sofisticados, como los sensores de rango, detectan la precisión de la posición de la pieza de trabajo (19).

2.3.9 Posicionadores

Son equipos diseñados para mover u orientar la pieza de trabajo, dependiendo de las aplicaciones pueden consistir en un plato giratorio, un posicionador giratorio e incluso un robot. Las consideraciones clave para el diseño del posicionador son la configuración mecánica, los grados de libertad, tipos de control, capacidad de carga y el entorno de trabajo (19).

Los aspectos principales a considerar para la configuración de celdas robóticas de soldadura son las características de articulación del robot de soldadura, las características geométricas y la ubicación espacial de la unión a soldar, además de considerar la resistencia que debe cumplir la unión soldada, la productividad impuesta, el grado de automatización, el grado requerido de flexibilidad del sistema de la calda y los criterios para el tipo de robot y posicionador (20).

2.4 Normas de referencia

El código D1.1 para uso estructural señala la nomenclatura para definir las posiciones de soldadura de filete, las cuales se presentan en la Figura 2. 12 (21).

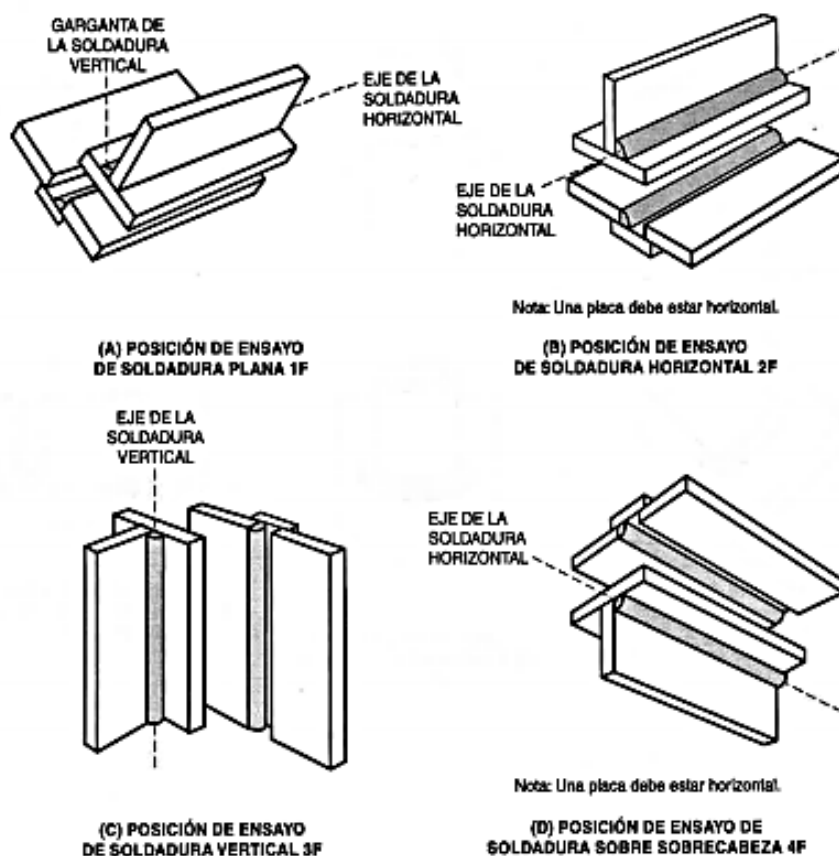


Figura 2. 12 Posiciones de soldadura de filete: a) Posición plana 1F, b) Posición horizontal 2F, c) Posición vertical 3 F y d) Posición sobre cabeza 4F (21).

El manual del proceso GMAW, también menciona que la posición de la unión por soldar tiene un efecto sobre la geometría del cordón de soldadura en (16):

- Posición plana: Las soldaduras de filete en esta posición con transferencia por aspersion son más uniformes, menos propensas a tener un perfil asimétrico o convexo y menos susceptibles al socavamiento que soldaduras de filete hechas en posición horizontal.
- Posiciones vertical y sobre cabeza: En estas posiciones es recomendable soldar con electrodos de diámetro pequeño, transferencia

en corto circuito o por aspersion con corriente a pulsos, para que el aporte de calor sea poco y el charco de soldadura se solidifique más rápido y se afecte menos por la fuerza de gravedad.

CAPÍTULO 3

DISCUSION Y ANÁLISIS DE BIBLIOGRAFÍA

3.1 Estado del arte

El proceso GMAW robótico permite controlar los parámetros como se requiera y desarrollar diversas investigaciones, entre las que destacan las siguientes, por su relación con la geometría del cordón de soldadura:

La investigación realizada por Avilés, Ríos y López para predecir la geometría del cordón de soldadura cuando se cambian los parámetros en tiempo real, donde se predice con redes neuronales la geometría a obtener y

esta a su vez es observada por una cámara, se consideró como geometría del cordón el ancho y el alto (22).

El desarrollo de un procedimiento, por Kolahan y Heidari, que permite modelar y optimizar la geometría del cordón de soldadura en el proceso GMAW utilizando el análisis de regresión estadística llevado a cabo sobre los datos recopilados según un diseño de experimentos Taguchi (DOE), considerando el ancho y alto del cordón para definir su geometría (23).

La predicción y control de la geometría del cordón de soldadura por proceso GMAW robótico utilizando un algoritmo alineado de simulación, para cordones de recubrimiento realizado por Sreeraj, Kannan y Maji (24).

Afrane, Kah, Wu Appiah modelaron un sistema de inteligencia artificial para predecir la integridad estructural, de acuerdo a ISO 5817 (Welding. Fusion-welded joints in steel, nickel, titanium and their alloys (beam welding excluded). Quality levels for imperfections) con soldadura GMAW robótica en uniones de filete con aceros de ultra alta resistencia (25).

Modelado de la sección transversal de cordones de recubrimiento sin traslape y traslapados, realizados con GMAW robótico, mediante el uso del modelo de arco, de parábola y de seno que desarrollaron Xiong, Zhang, Gao y Wu (26).

Ramos, López y Pérez discriminaron dentro de los parámetros del proceso GMAW, la velocidad de avance, velocidad de alimentación del alambre y el voltaje influyen en el área del cordón que resulta de soldadura tipo recubrimiento (27).

Aunque los trabajos anteriores tienen como objetivo predecir o modelar las diferentes geometrías, nos ubican en investigaciones del proceso GMAW robótico relacionado a geometrías del cordón en diferentes condiciones, cada estudio nos señala tanto las condiciones de experimentación como las variables

que se consideran, dejando de manifiesto el avance y dedicación con el que cuenta el proceso GMAW robótico en el campo de la investigación.

Las investigaciones realizadas con el proceso GMAW robotizado nos indican que existe la necesidad de investigación con este proceso, porque es ampliamente utilizado en diversas industrias y porque además como dejan de manifiesto los trabajos presentados, dicho proceso permite controlar los parámetros de soldadura para asegurar la repetitividad de la experimentación que se realiza; también es importante destacar que en las investigaciones mencionadas se relaciona la simulación de soldadura con resultados reales y esto se puede realizar con GMAW robotizado.

El estudio de la geometría del cordón cuando se rota el plano base, se realiza con el propósito de estudiar las variaciones que se van a presentar cuando la fuerza de gravedad afecte a la soldadura desde diferentes direcciones por lo que es relevante la recopilación de trabajos que aporten resultados en cordones soldados en diferentes posiciones.

En un estudio con proceso GMAW para ranuras en V, desarrollado por Cho y colaboradores, que incluye las posiciones: plana, sobre cabeza y vertical ascendente, se realizó una simulación incluyendo dinámica computacional de fluidos para incluir la simulación del charco de soldadura en la ecuación de la continuidad, trabajando en el programa FLOW-3D con el objetivo de predecir la geometría del cordón de soldadura (28).

La simulación incluyó el flujo de calor del arco de soldadura, la fuerza electromagnética y la presión del arco para describir con precisión el comportamiento de cada charco de soldadura (28). De la geometría presentada en dicho trabajo se obtiene la Tabla 3. 1.

Tabla 3. 1 Tabla de Geometrías de experimentación (28).

Experimento		
	Refuerzo máximo (mm)	Superficie de cordón (mm)
Plana	0.86	5.53
Sobre cabeza	0.97	5.13

Con los datos obtenidos se considera que en posición plana el cordón generado tiene una superficie mayor y menos refuerzo que el resultante en la posición sobre cabeza, siendo la razón de la superficie de soldadura (plana): superficie de soldadura (sobre cabeza) igual a 1.08 y el refuerzo máximo plana: sobre cabeza igual a 0.88 .

Tham y colaboradores desarrollaron en uniones en T con soldadura de filete en posición vertical ascendente variando los parámetros de soldadura se obtuvo una geometría convexa de piernas de 5.6 mm y 4.5 mm, garganta de 5.0 mm con corriente de 175 A, voltaje de 18V y velocidad de avance de 5; cuando se aumenta el voltaje a 24 V y la velocidad de avance a 7 se obtiene una geometría cóncava con piernas de 5.6 mm y 5.8 mm, con garganta de 4.0 mm; si de los parámetros anteriores se eleva la corriente a 213 A y la velocidad a 12, se obtiene una geometría con mayor concavidad de pierna de 5.3 mm y garganta de 3.8 mm (29).

De manera que cuando se presenta el mayor calor de entrada la geometría del cordón es convexa y al reducir el calor de entrada la geometría que se presenta es cóncava, aumentando la concavidad si se disminuye aún más el calor de entrada (29).

Cao, Yang y L. trabajaron en uniones en T con soldadura de filete, para predecir la geometría del cordón de soldadura, en posiciones: horizontal y horizontal con 45° de rotación del plano base, concluyendo con respecto a las geometrías obtenidas que se produce penetración con geometría similar a un

dedo, debido al flujo de gotas de alta velocidad que además aumenta la penetración, que se forman dos bucles de flujo desde el centro de la soldadura hacia los extremos de las piernas (30).

El patrón de flujo en soldadura GMAW se puede predecir considerando las fuerzas que actúan sobre la gota del metal, siendo estas el gradiente de tensión superficial, fuerza electromagnética, presión del arco y gravedad. Aclarando que la fuerza de gravedad no impacta en la penetración a obtener, concluyendo además que el modelo de superficie libre 3-D utilizado es capaz de simular en calor transferido y el flujo del fluido en varios tipos de soldadura (30).

En otro trabajo realizado por Román y colaboradores con el proceso GMAW para estudiar la influencia de diferentes gases de protección sobre la superficie del cordón y de los parámetros eléctricos del proceso con soldadura en posición plana, horizontal y sobre cabeza; se concluyó que la posición sobre cabeza es la que necesita un mayor consumo de energía para realizar la soldadura, seguida de la posición horizontal y finalmente la posición plana, esto explica que requieren más energía las posiciones por la influencia de la fuerza de gravedad sobre el charco de soldadura (31).

Con el uso de la dinámica computacional de fluidos para uniones de filete en soldaduras horizontales con GMAW, Wu y colaboradores obtuvieron que la longitud de las piernas, la penetración y la garganta real disminuyen cuando se aumenta la velocidad de avance; con una mayor velocidad de alimentación del alambre se mejora la estabilidad del arco y genera una penetración más profunda (32).

3.2 Discusión y análisis de bibliografía

Todas las posiciones: plana, horizontal y sobre cabeza son afectadas por la dirección sobre la que actúa la fuerza de gravedad al rotar el plano base de la soldadura.

La gravedad es la fuerza de tracción que la tierra ejerce sobre los cuerpos, aunque la gravedad siempre va a atraer a los cuerpos hacia el centro de la tierra, la configuración del plano base de soldadura genera que el comportamiento del charco de soldadura cambie.

Como se presentó con la literatura consultada, al rotar el plano base se van a presentar las variaciones en la geometría del cordón. En posición plana se va a generar un cordón con mayor superficie y menos refuerzo que el obtenido sobre cabeza; Además, cuando se aumente la velocidad de avance las dimensiones correspondientes a las piernas del cordón, la garganta real y la penetración disminuirán.

Los artículos presentados fueron desarrollados con configuraciones diferentes a la unión que corresponde a este proyecto, sin embargo, marcan tendencias y pautas a seguir para esta investigación y confirman que al rotar el plano base, la geometría de la soldadura es afectada. La bibliografía señala que a mayor coincidencia de la superficie de soldadura con la dirección de acción de la gravedad, la corona o refuerzo máximo de la soldadura va a ser mayor.

Es importante destacar que el presente estudio se enfoca al cambio de geometría cuando se rota el plano base y el estado del arte presentado aunque incluye información relevante, no tiene como objetivo el estudio de la geometría ni sus cambios, además las inclinaciones que se han estudiado incluyen la posición plana, sobre cabeza, vertical y plana a 45°, en este estudio se amplía el rango de ángulos a trabajar.

CAPITULO 4

CASO DE ESTUDIO

4.1 Metodología

La presente investigación consiste en estudiar la unión de placas de acero 1018 unidas con traslape y una soldadura de filete mediante el proceso GMAW robotizado. Para conocer el comportamiento de la geometría del cordón de soldadura con respecto a la posición del plano base.

La metodología se desarrolló como se representa en el esquema de la Figura 4. 1.

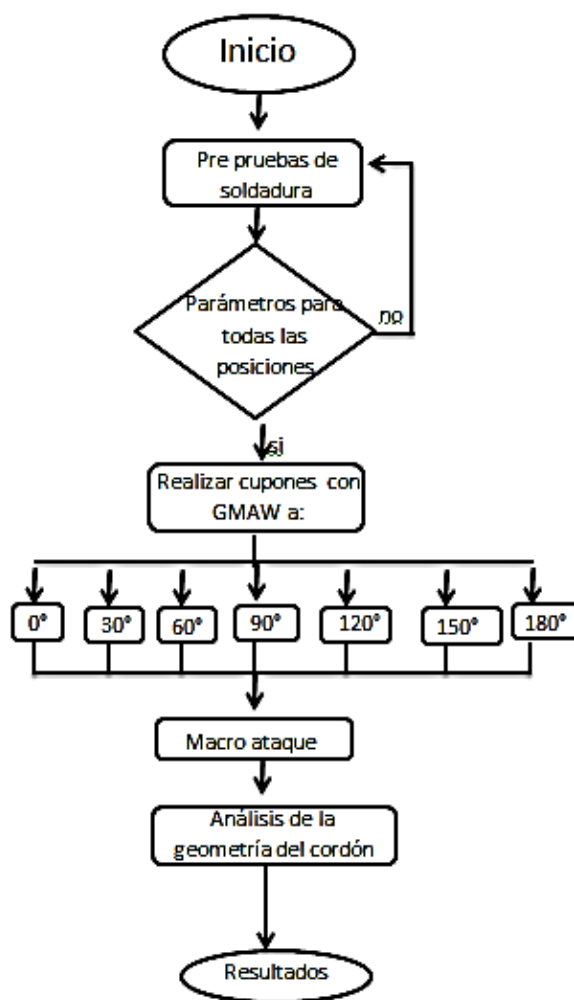


Figura 4. 1 Metodología de investigación.

La configuración de la unión de las placas a traslape soldadas mediante cordón de soldadura de filete fue como se presenta en la Figura 4. 2. Durante la soldadura, el electrodo se ubicó a 45° de los ejes de las placas, de manera que cuando se roto el plano base el electrodo se siguió ubicando a 45° de las placas, como se muestra en la Figura 4. 3 para la posición 1 (a 0° de inclinación del plano base).

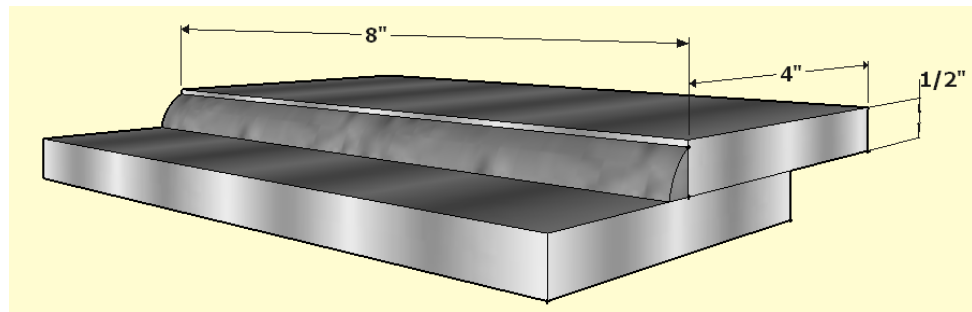


Figura 4. 2 Placas traslapadas unidas mediante soldadura de filete.

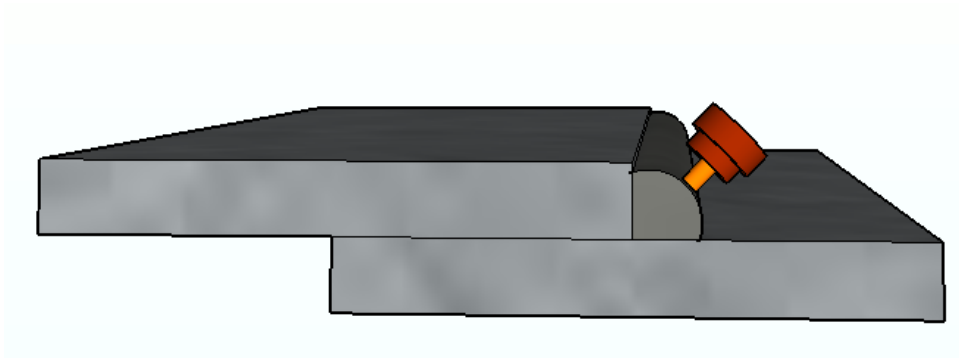


Figura 4. 3 Posición 1 (0°) con ubicación del electrodo.

La rotación del plano de soldadura fue como se representa en la Figura 4. 4, variando entre cada posición 30° de inclinación; la Figura 4. 4 también indica cómo se identificaron los cupones, se elaboraron 2 cupones (A y B) de cada ángulo.

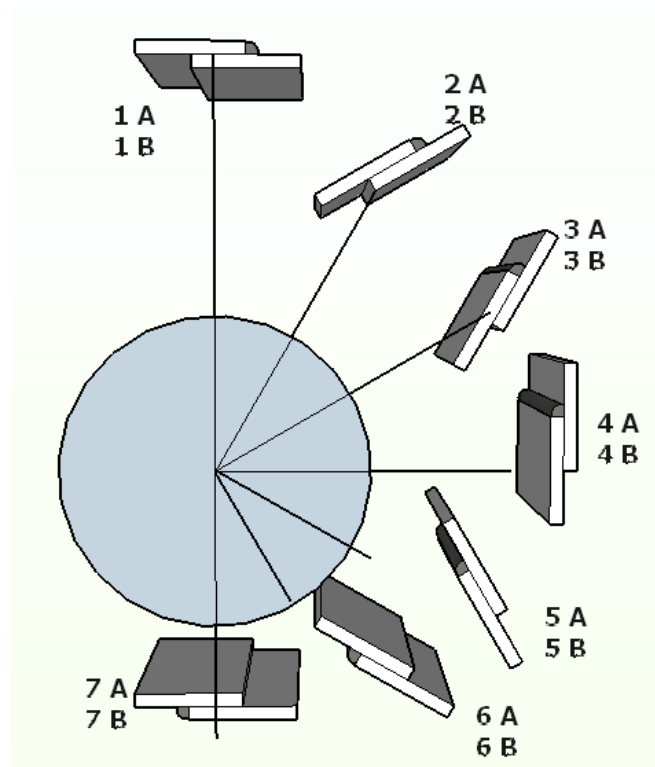


Figura 4. 4 Nomenclatura de cupones.

El proceso de soldadura GMAW, se realizó con el robot KUKA modelo KR16 (Figura 4. 6 y Figura 4. 7) en conjunto con la máquina de soldar LINCOLN ELECTRIC POWER FEED 10 R (Figura 4. 8), la antorcha para proceso MIG ABICOR BINZEL ABIROB W500 (Figura 4. 6 y Figura 4. 7), que se encuentran en las instalaciones de COMIMSA Saltillo.

Los ángulos del plano base para cada cupón de soldadura se lograron utilizando una mesa giratoria (Figura 4. 9) que opera con el robot ya mencionado, la mesa es manejada con el mismo equipo que controla el robot. Además de la mesa giratoria, las placas se fijaron con abrazaderas.

La celda de manufactura ubicada en COMIMSA, está configurada con un robot fijo que es soportado por una base y que no se desplaza; la mesa giratoria se encuentra soportada y su ubicación también es fija.

La altura de la mesa giratoria es fija y no permite el acceso al robot para las posiciones 5, 6 y 7; por lo que se utilizó un accesorio, dicho accesorio tiene una configuración de caja de metal. El accesorio (Figura 4. 5) para las posiciones 5, 6 y 7 aporta una superficie paralela a la mesa, adoptando el mismo ángulo de rotación que la mesa pero de mayor altura, de manera que permite el acceso del robot a la junta a soldar.



Figura 4. 5 Accesorio utilizado para las posiciones de soldadura (33).

Los parámetros de soldadura a emplear son:

- Velocidad de avance= 0.55 m/min.
- Voltaje= 25 V.
- Corriente= 350 A.
- Alimentación de hilo= 647.7 mm/min.
- Gas de protección= 85% Argón y 15% CO₂.
- Flujo de gas= 12.271 L/min.
- Longitud del alambre= 10 -12 mm
- Modo de transferencia de metal de aporte= Transferencia por aspersion.

El electrodo a utilizar es ER70S-6 con 1.6 mm de diámetro.

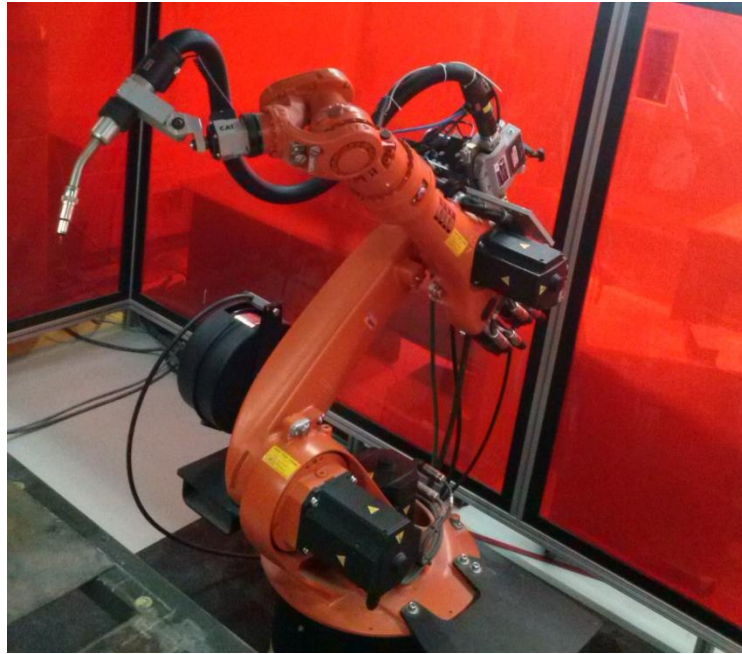


Figura 4. 6 Robot KUKA KR16, cortesía de COMIMSA.

Como ya se mencionó con anterioridad para todas las inclinaciones se mantienen constantes los parámetros, siendo el calor de entrada de 15,909.

El macro ataque debe realizarse conforme lo marca la norma ASTM E340, sin embargo, se realizó con Nital al 5%, que consiste en una solución de alcohol y ácido nítrico; se realizó de esta manera debido a que es suficiente para observar la geometría de la unión.



Figura 4. 7 Robot KUKA KR16, cortesía de COMIMSA.



Figura 4. 8 Máquina de soldar Linconl electric, cortesía de COMIMSA.

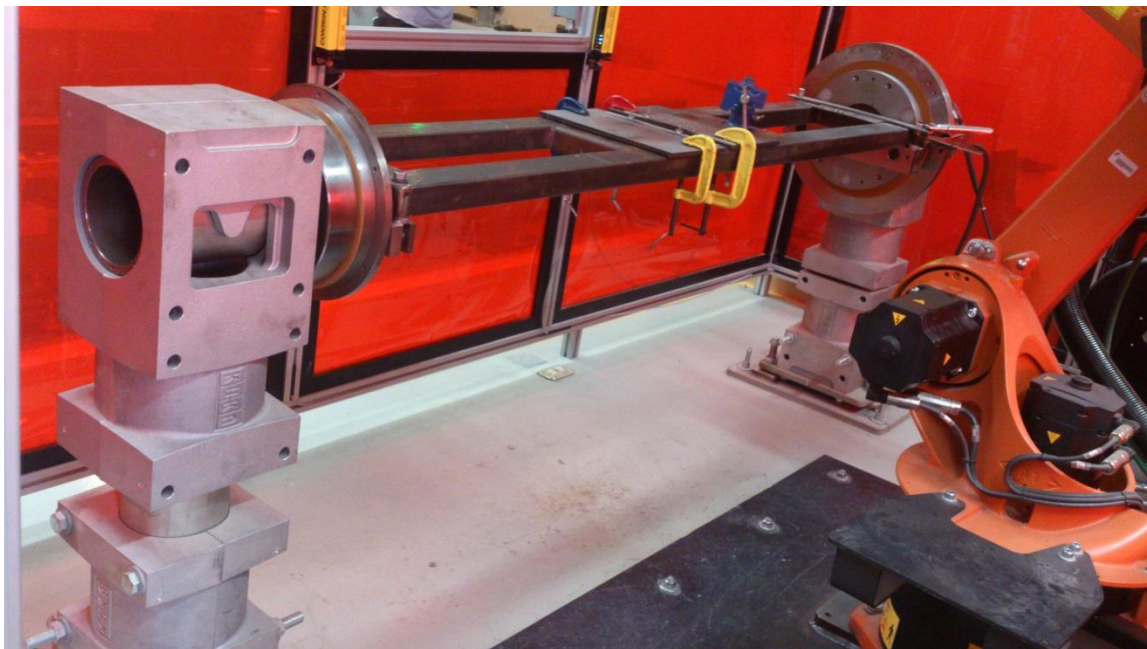


Figura 4. 9 Mesa giratoria, cortesía de COMIMSA.

CAPITULO 5

Resultados

5.1 Resultados

Después de la experimentación se obtuvieron las secciones transversales de los cordones de soldadura, los cuales fueron montados en baquelita y preparados para ser atacados con nital al 5%, como macro ataque. Los perfiles obtenidos se presentan en Tabla 5. 1.

Tabla 5. 1 Tabla de referencia de imágenes de geometrías obtenidas.

Inclinación de plano base/ Cupón	Geometría obtenida
0° / 1A y 1B	Figura 5. 1 y Figura 5. 2
30° / 2A y 2B	Figura 5. 3 y Figura 5. 4
60°/ 3A y 3B	Figura 5. 5 y Figura 5. 6
90°/ 4A y 4B	Figura 5. 7 y Figura 5. 8
120°/ 5A y 5B	Figura 5. 9 y Figura 5. 10
150°/ 6A y 6B	Figura 5. 11 y Figura 5. 12
180°/ 7A y 7B	Figura 5. 13 y Figura 5. 14

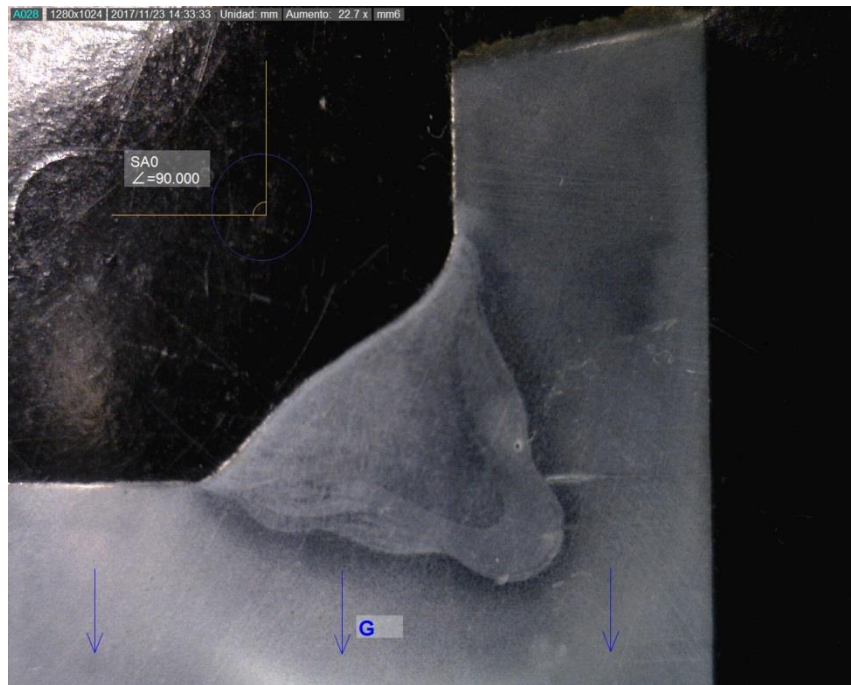


Figura 5. 1 Perfil obtenido en cupón de soldadura 1 A.

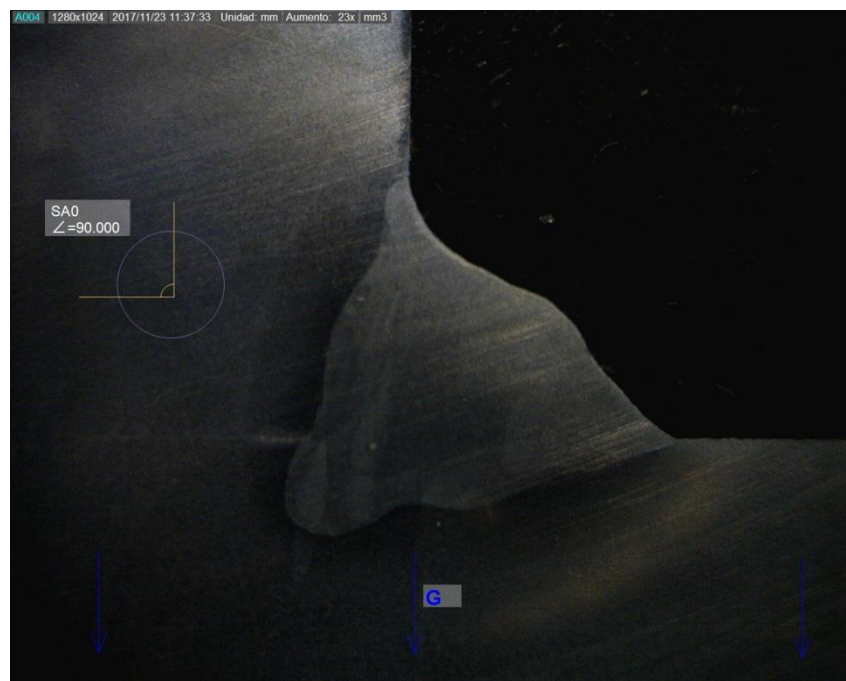


Figura 5. 2 Perfil obtenido en cupón de soldadura 1B.

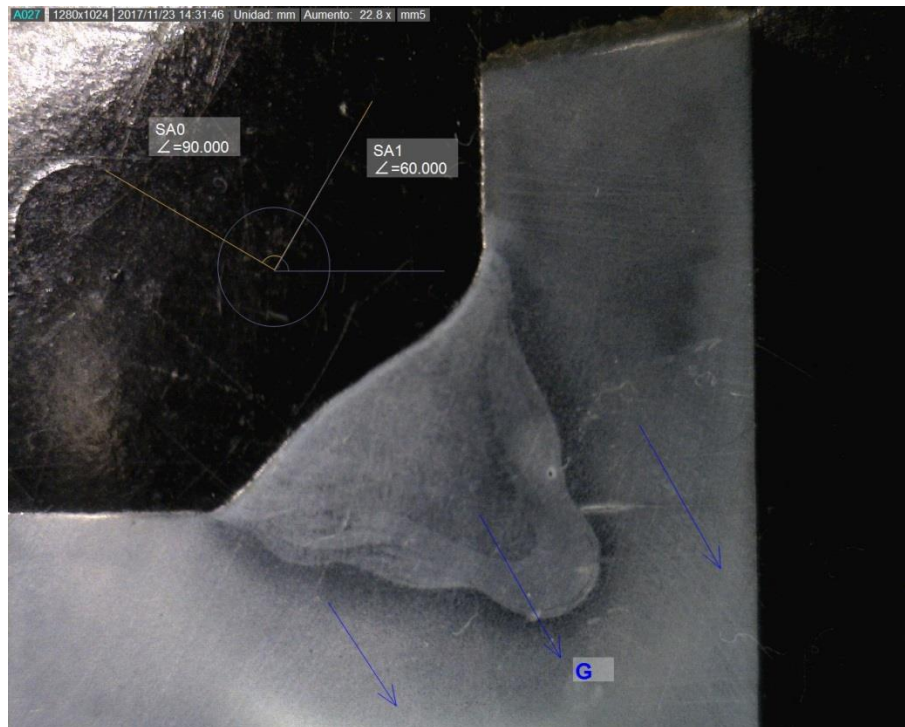


Figura 5. 3 Perfil obtenido en cupón de soldadura 2A.

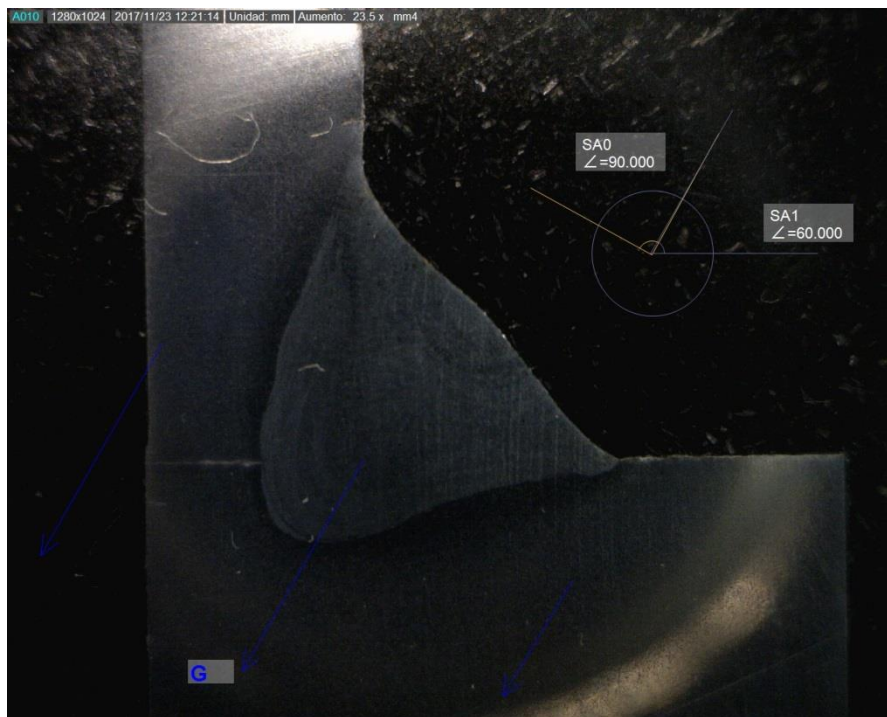


Figura 5. 4 Perfil obtenido en cupón de soldadura 2B.

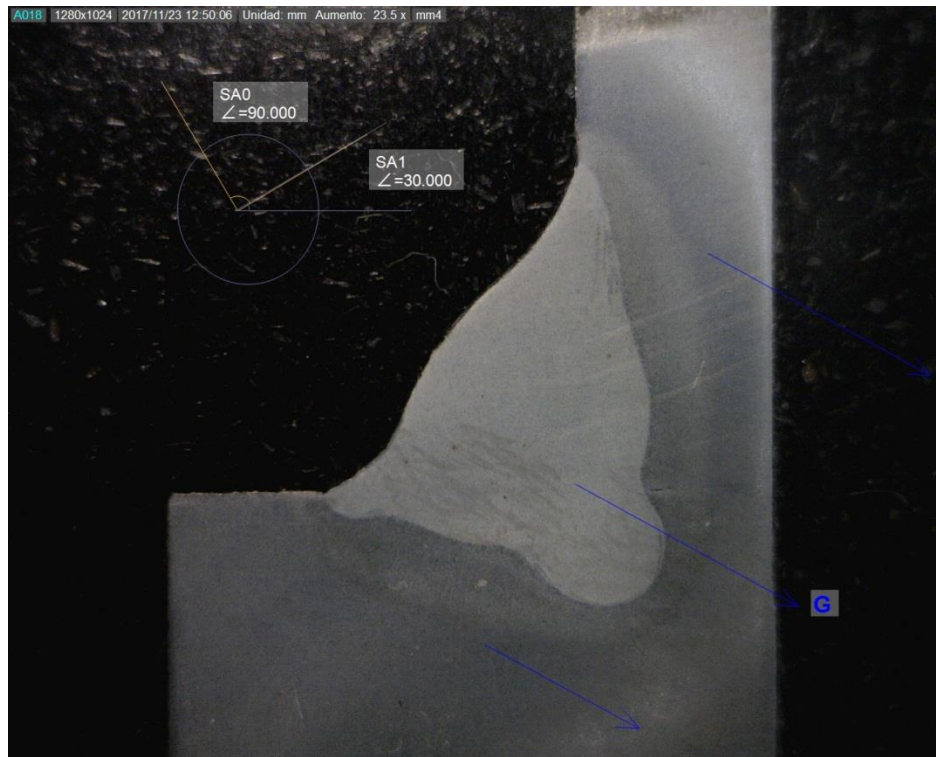


Figura 5. 5 Perfil obtenido en cupón de soldadura 3A.

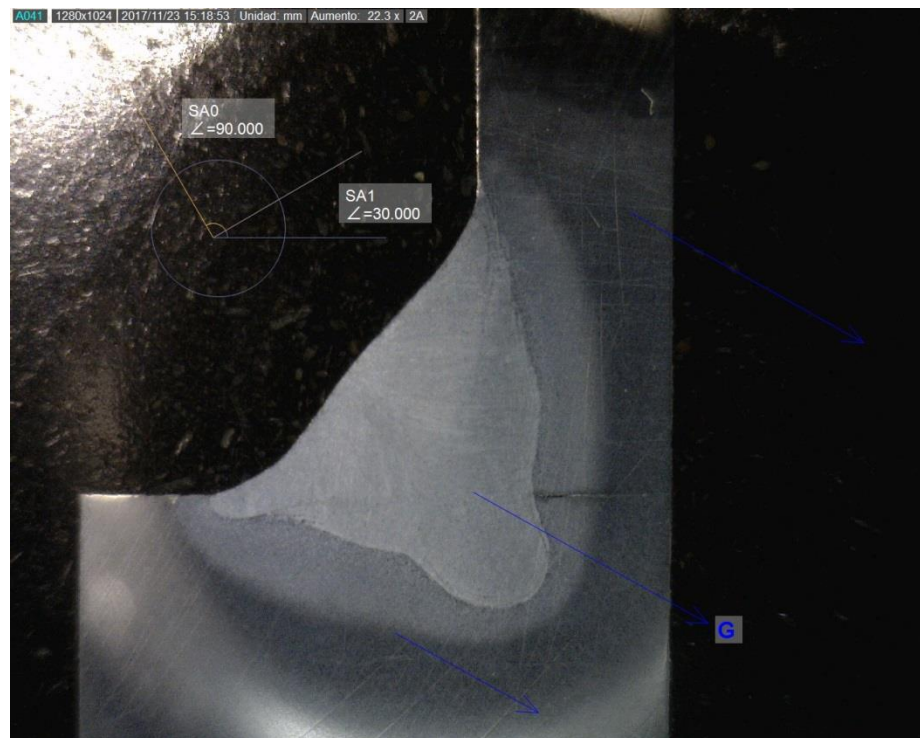


Figura 5. 6 Perfil obtenido en cupón de soldadura 3B.

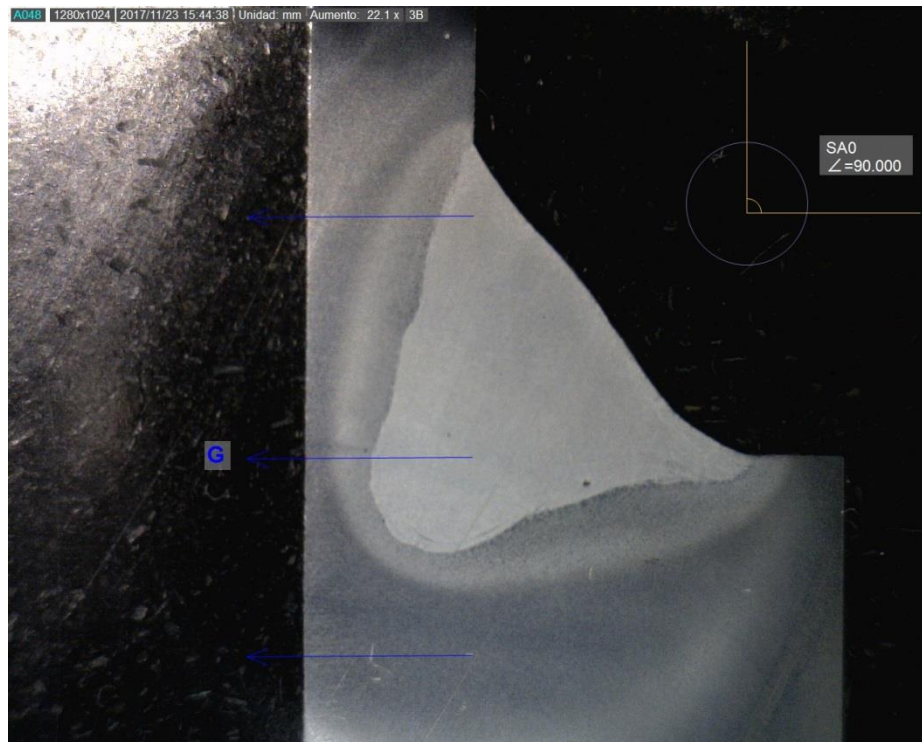


Figura 5. 7 Perfil obtenido en cupón de soldadura 4A.

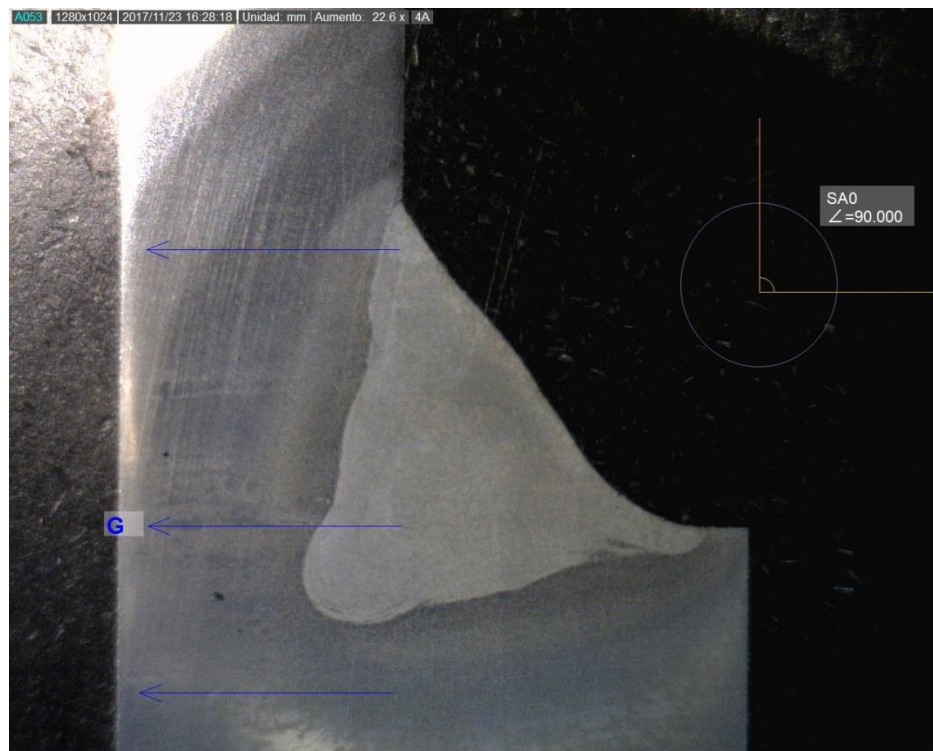


Figura 5. 8 Perfil obtenido en cupón de soldadura 4B.

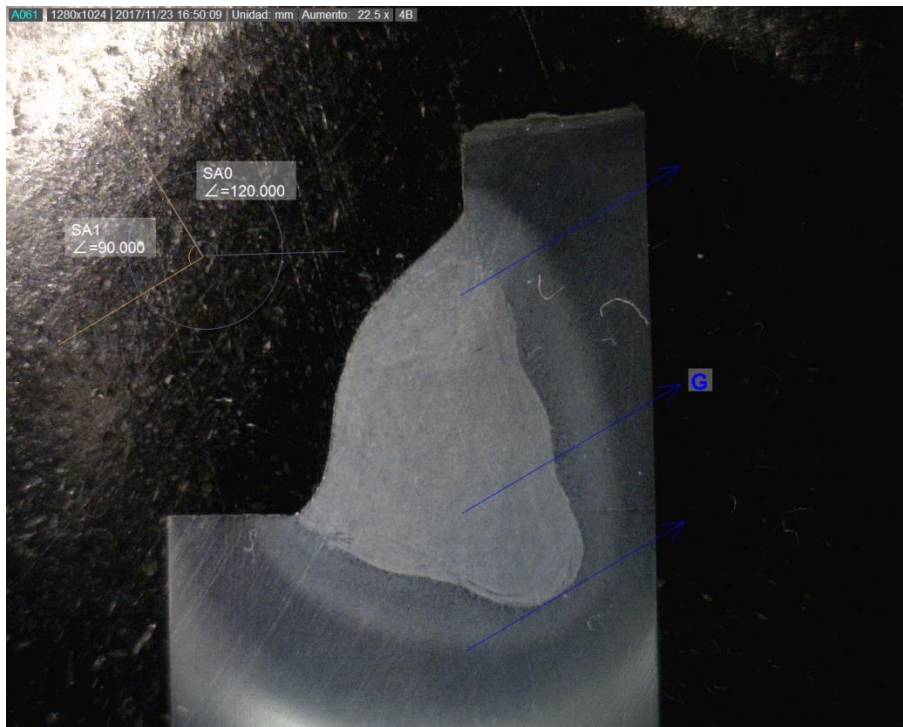


Figura 5. 9 Perfil obtenido en cupón de soldadura 5A.

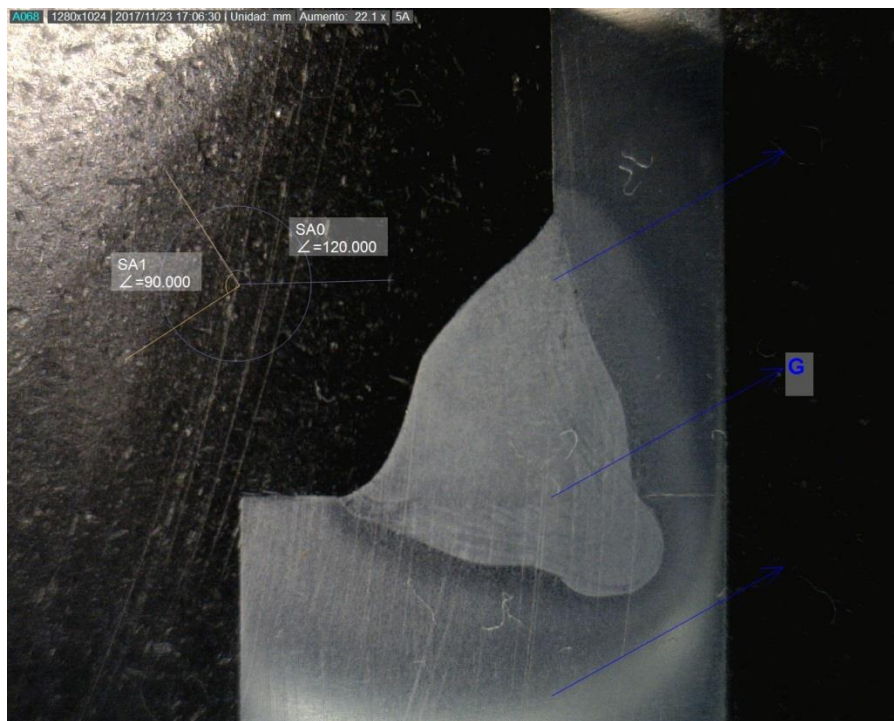


Figura 5. 10 Perfil obtenido en cupón de soldadura 5B.

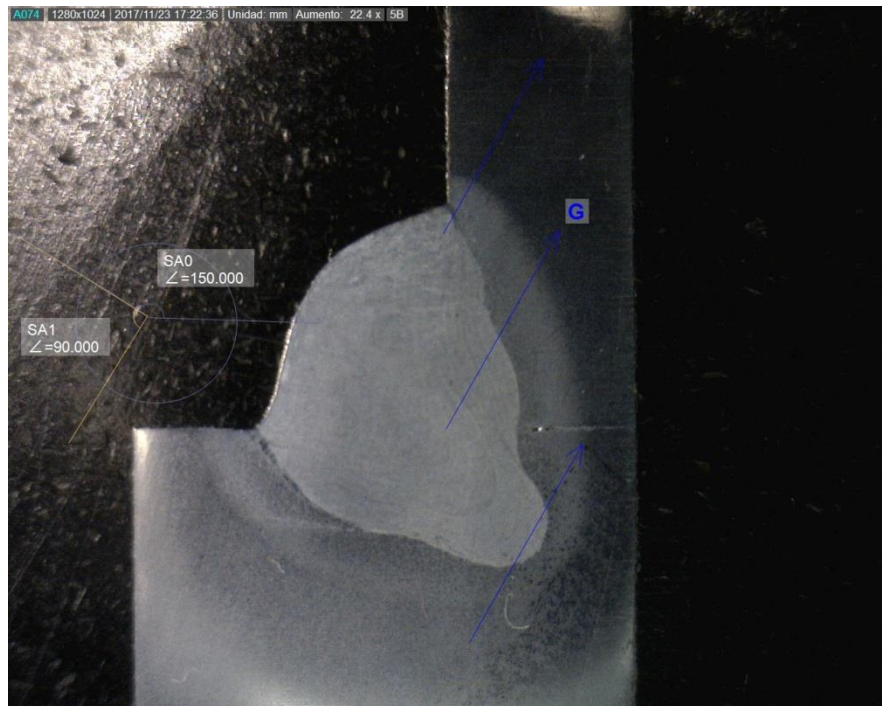


Figura 5. 11 Perfil obtenido en cupón de soldadura 6A.

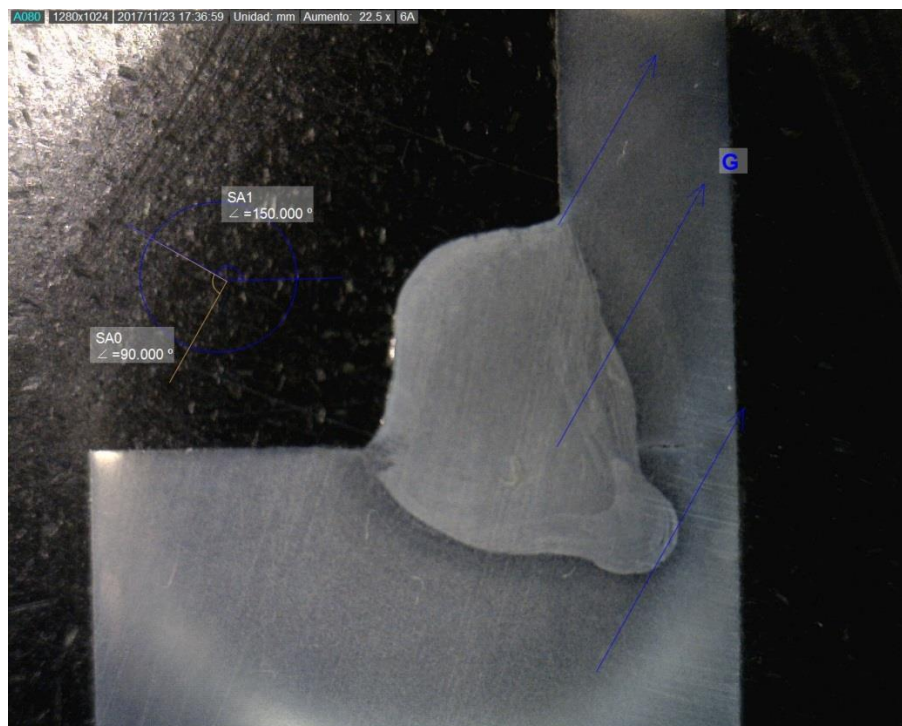


Figura 5. 12 Perfil obtenido en cupón de soldadura 6B.

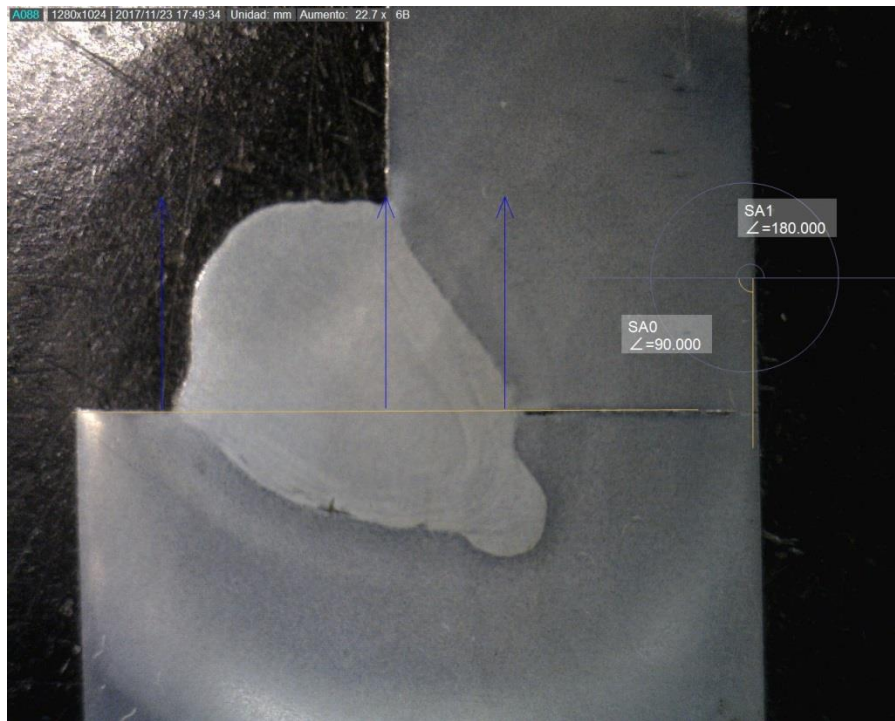


Figura 5. 13 Perfil obtenido en cupón de soldadura 7A.

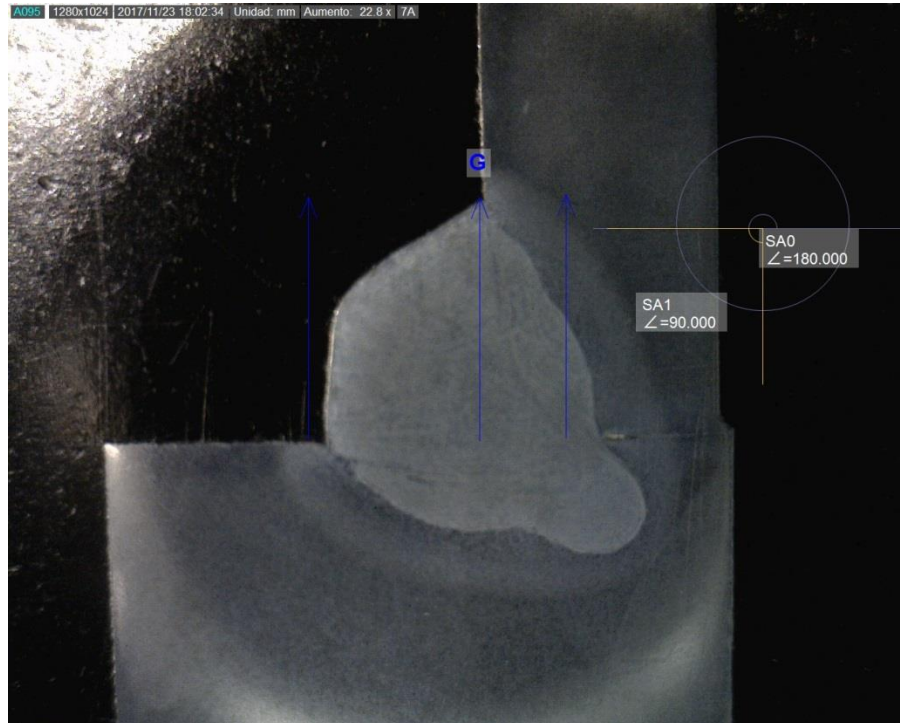


Figura 5. 14 Perfil obtenido en cupón de soldadura 7 B.

De las geometrías observadas se realizaron las mediciones correspondientes a la geometría característica para cordones de soldadura de filete, considerando la pierna vertical (que para efectos de análisis se nombra pierna superior), la pierna horizontal (que se nombra como pierna inferior), garganta teórica, garganta efectiva, garganta real, penetración, concavidad o convexidad según corresponda y el tamaño de la soldadura (también nombrado superior e inferior al vertical y horizontal correspondientemente).

El dimensionamiento de las geometrías obtenidas se realizó como se presenta en la Figura 5. 15 y Figura 5. 16.

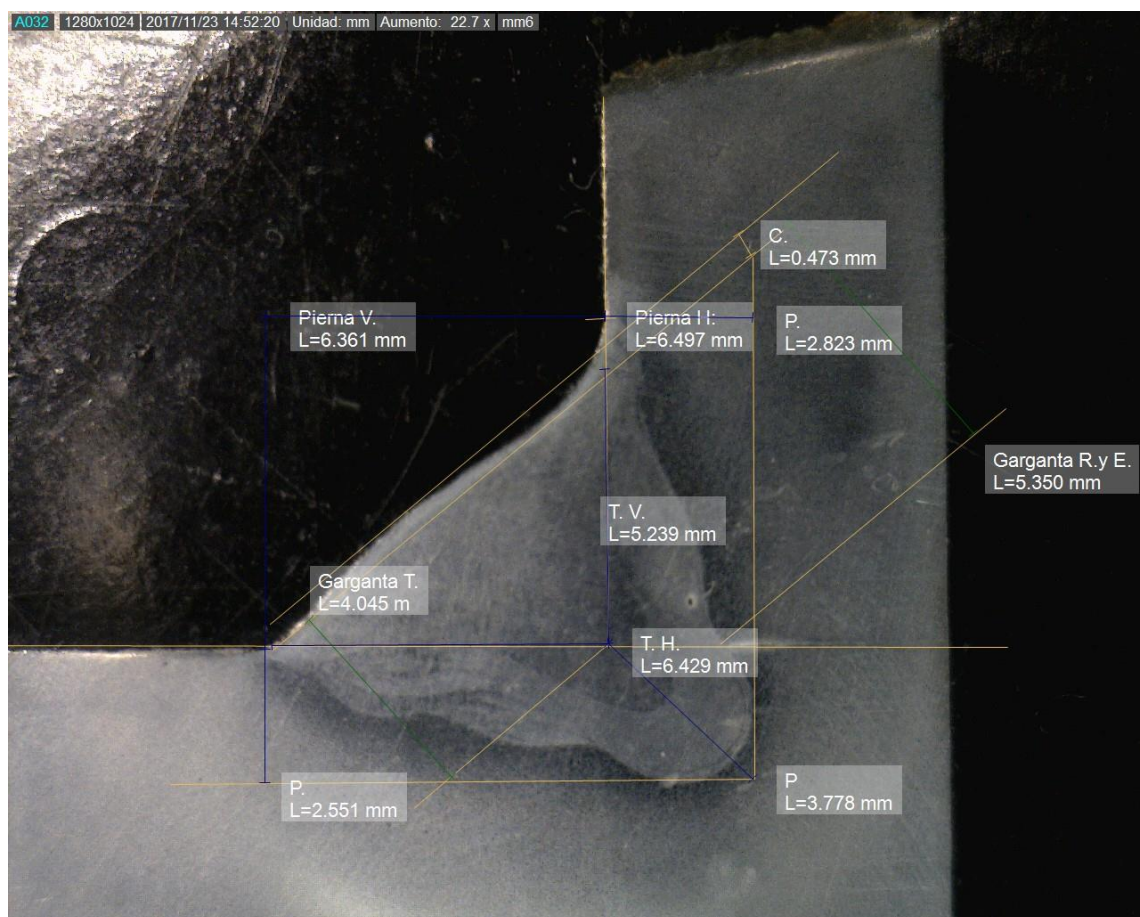


Figura 5. 15 Dimensionamiento realizado en de soldadura 1 A (33).

Las mediciones de las características geométricas de los cupones se realizaron con un microscopio Dino-Lite AM413ZT y el software Dinocapture 2.0.

Una vez realizado el dimensionamiento de todos los cupones obtenidos se llevó a cabo el análisis de la información. Los datos obtenidos se resumen en la Tabla 5. 2 y también se representan las variaciones identificadas en las diferentes inclinaciones en la Gráfica 5. 1, Gráfica 5. 2 y Gráfica 5. 3, de donde se define:

3 Geometría de la unión

De la información contenida en la Tabla 3.1, se puede inferir que hasta la inclinación del plano a 90° , que corresponde a las posiciones de soldadura 1 a 4, la geometría característica es como la que se muestra en la Figura 5.16; en las posiciones incluidas en las probetas 5 a 7, que corresponden de 120° a 180° la geometría tiende a ser completamente convexa, por lo que solo se descarta la dimensión del tamaño de soldadura.

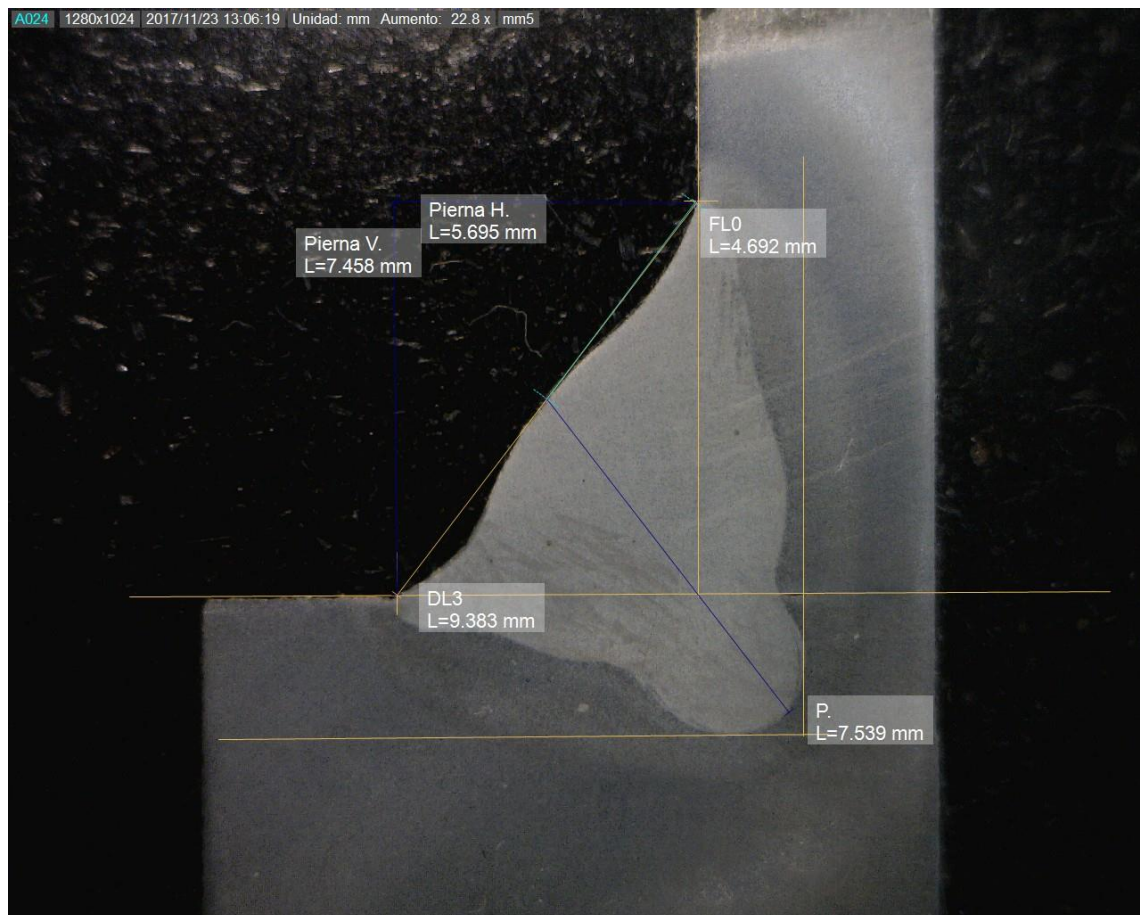
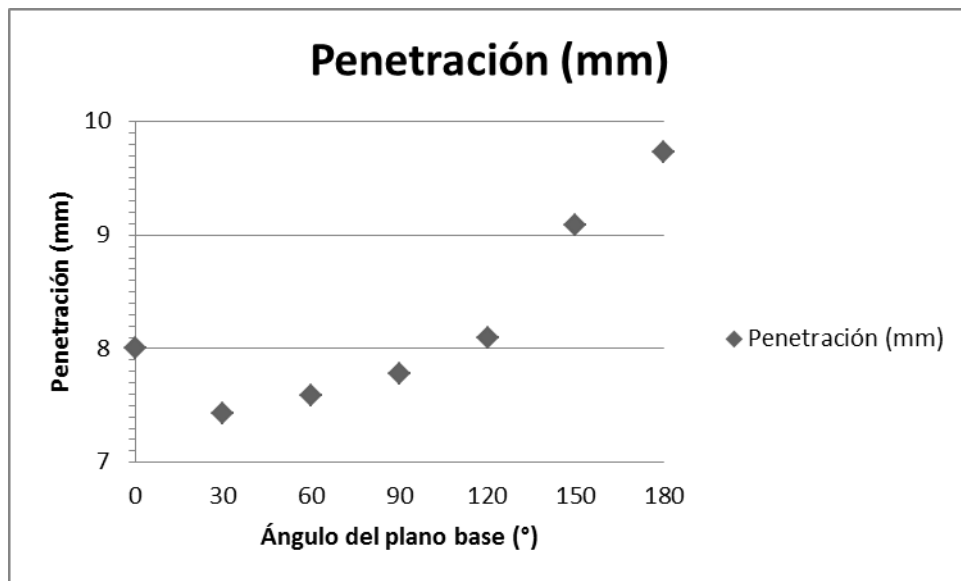


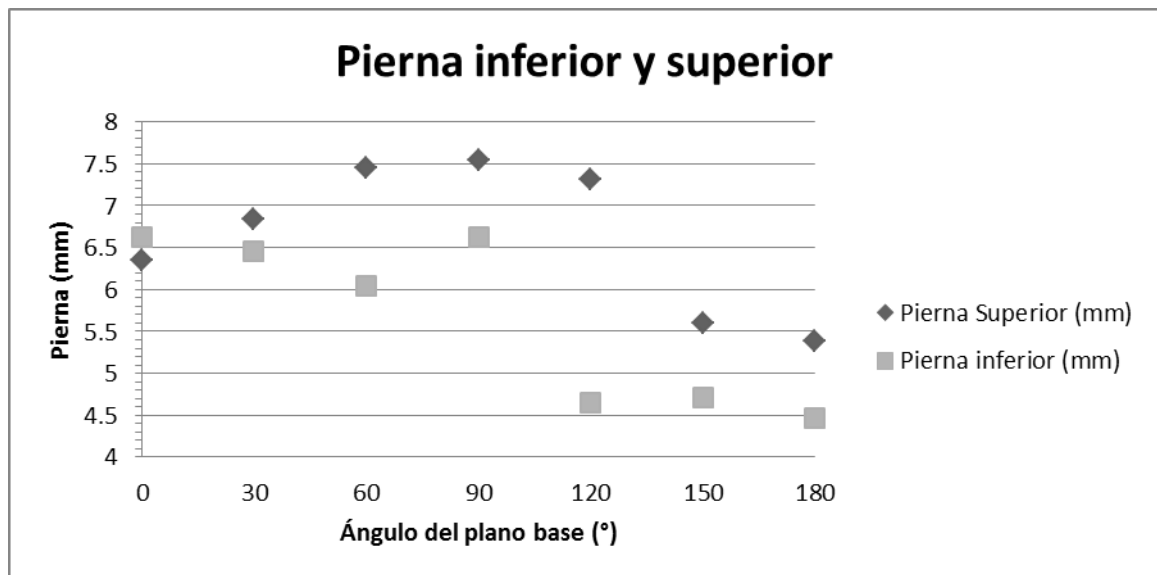
Figura 5. 16 Dimensionamiento para la penetración considerada para los resultados (1A).

Tabla 5. 2 Resultados obtenidos de las geometrías con diferente inclinación del plano base.

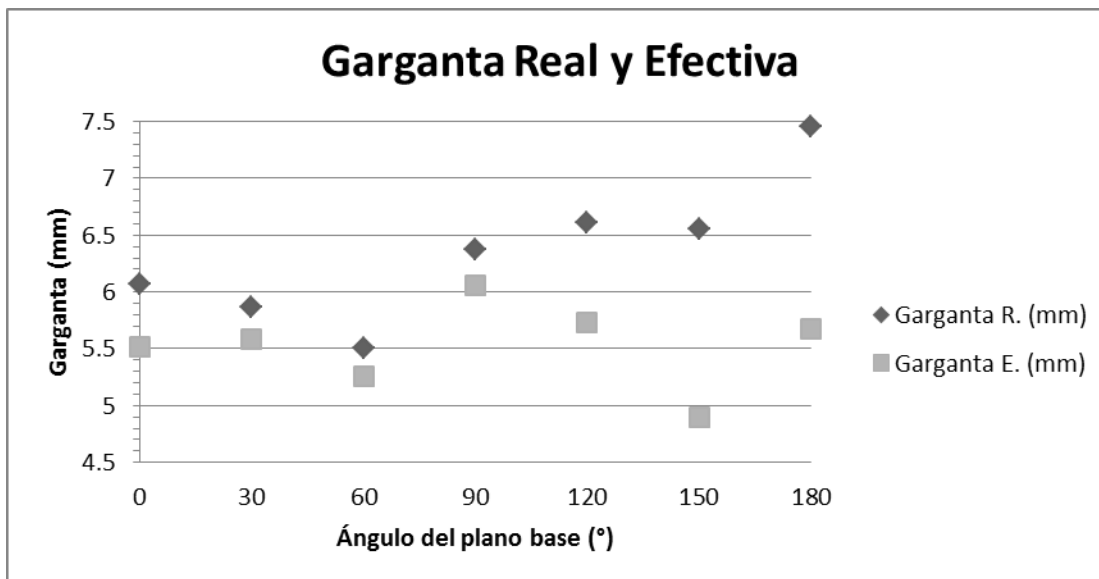
Grados de rotación del p.b.	Probeta	Penetración (mm)	Pierna Superior (mm)	Tamaño superior (mm)	Pierna inferior (mm)	Tamaño inferior (mm)	Garganta R. (mm)	Garganta E. (mm)	Concavidad max. (mm)	Convexidad max. (mm)
0	1	8.0065	6.355	5.3495	6.6205	6.5865	6.0655	5.5115	0.534	0.534
30	2	7.428	6.845	5.828	6.452	6.062	5.869	5.5815	0.318	0.318
60	3	7.587	7.4515	6.64	6.0455	5.303	5.5075	5.2565	0.351	0.351
90	4	7.7815	7.539	7.109	6.627	5.594	6.375	6.0635	0.2345	0.2345
120	5	8.098	7.3105	7.1015	4.6485	4.32	6.6085	5.728	0	0.909
150	6	9.083	5.6065	5.6065	4.7185	4.7185	6.55515	4.9005	0	1.5955
180	7	9.7285	5.3795	5.3795	4.468	4.468	7.4545	5.6785	0	1.498



Gráfica 5. 1 Penetraciones obtenidas a diferentes grados de inclinación del plano base.



Gráfica 5. 2 Dimensiones obtenidas en las piernas del cordón de soldadura en diferentes grados de inclinación del plano base.



Gráfica 5. 3 Dimensiones obtenidas en la garganta real y efectiva con diferentes grados de inclinación del plano base.

La primera geometría característica (Figura 5.2) tiene un refuerzo máximo en el centro de la superficie de soldadura y concavidades en sus extremos, que podría ser formado, según indica el estado del arte, por un bucle de charco de soldadura que se extiende desde el centro de la soldadura hacia los extremos; por lo que además dicha geometría es simétrica con respecto al eje central de la soldadura. La penetración se presenta con una geometría de dedo, como también indica el estado del arte.

De las posiciones 5 a 7 se obtuvo una geometría completamente convexa, que se atribuye al efecto de la gravedad sobre la superficie del charco de soldadura. La penetración también se presenta con geometría de dedo.

4 Rotación del plano base a 0°

Describiendo más a detalle cada caso observado, cabe señalar que la inclinación de 0° del plano base de soldadura, que es ampliamente utilizada en

diferentes industrias, presenta una de las mayores penetraciones, con los tamaños de piernas más simétricos de todas posiciones y la mayor concavidad con un valor de 0.534 mm, todo esto generado por la dirección de la gravedad que en este caso también genera que la pierna inferior sea mayor que la superior.

5 Rotación del plano base de 30° y 60°

Las probetas 2 y 3 resultaron con las penetraciones más bajas, con las menores gargantas reales. En estas posiciones se aprecia mediante las dimensiones obtenidas que la concavidad-convexidad presentada por las geometrías obtenidas va disminuyendo conforme se rota el plano base hasta 90°.

6 Rotación del plano base a 90°

En esta posición la identificada como pierna superior de la unión se ubicó en el eje horizontal, por lo que la dimensión obtenida como pierna superior es mayor que la pierna inferior, esto se debe a que la fuerza de gravedad generó que el charco de soldadura se apoyara sobre esa dirección. El tamaño obtenido de ambas piernas a 90° fue mayor que en las demás inclinaciones.

Aunque el cordón es de mayor superficie, en este caso la concavidad fue menor y la penetración es la tercera menor. Por lo que se define el cordón obtenido de mayor superficie pero de menor altura y profundidad, considerando que el efecto de la gravedad no permitió una mayor penetración o mayor concavidad.

7 Rotación del plano base a 120°, 150° y 180°

En las posiciones 5, 6 y 7 se obtuvieron cordones de tamaños más pequeños, con mayor concavidad y penetración, también se observa que una mayor concavidad genera una garganta real mayor; lo anterior se explica porque estas posiciones son las que una mayor superficie de soldadura coincidió con la dirección de acción de la gravedad. Cabe destacar que estas inclinaciones tuvieron las menores gargantas teóricas.

La inclinación del plano a 180° generó la mayor penetración y la mayor garganta real, debido a que se obtuvieron en esta posición las piernas más pequeñas con 4.468 mm y 5.3795 mm de longitud.

CAPITULO 6

Conclusión

6.1 Conclusión

La fuerza de gravedad, ejerce una variación en la geometría de los cordones de soldadura en uniones de filete a traslape, aumentando la dimensión del cordón que quede expuesta a la dirección hacia donde actúa la fuerza de gravedad. De manera que de 0° a 90° si una pierna del cordón corresponde al eje horizontal del espacio, esta misma pierna será la mayor por ser donde se asienta el cordón de soldadura; y para posiciones de 120° a 180° se obtienen cordones de menor superficie, pero de mayor penetración y refuerzo, el refuerzo es mayor porque para estos casos queda más expuesta la superficie del cordón al efecto de la gravedad sin tener un apoyo que limite la variación.

BIBLIOGRAFÍA

1. **Gustin, Ernest y Diehl, J.** *Estructuras metalicas*. 1. s.l. : Editores tecnicos asociados S.A., 1980. págs. 3,281. 87-7146-199-4.
2. **Vera, Roberto.** *Temas de construcción 1*. 2. s.l. : Editorial club universitario, 2001. págs. 8,152. Vol. 1. 84-8454-053-7.
3. **Lopez Gálvez, Cristóbal y Orozco Roldán, Francisco Ramón.** *Soldadura en atmósfera protegida*. 1. s.l. : Paraninfo, 2013. págs. 66,67-193. 978-84-9732-444-1.
4. **Espín Pérez, Mario Jesús.** *Análisis de la sitorción en placas de acero soldadas siguiendo trayectorias con cambio de pendiente*. Saltillo : COMIMSA, 2017. 36.
5. **Rodriguez, Mariano, y otros, y otros.** *Elasticidad y resistencia de materiales I*. Madrid : Universidad nacional de educación a distancia, 2012. pág. 622. 978-84-362-6518-7.
6. **Giachino, Joseph W. y Weeks, William.** *Técnica y práctica de la soldadura*. Chicago : American Technical Society, 2007. págs. 21,22,23-463. 978-84-291-6053-6.
7. **Sarkar Subir, K. y Saraswati, Subhajit.** *Construction Technology*. Oxford : Oxford University, 2008. págs. 378,379.
8. **Cardarelli, Francois.** *Materials handbook: a concise desktop reference*. 2. Verlag : Springer, 2008. pág. 1340. 978-1846286681.
9. **Smith, William F. y Hashemi, Javad.** *Fundamentos De La Ciencia E Ingenieria De Materiales*. D.F. : McGraw-Hill Interamericana, 2006. pág. 300. 970-10-5638-8.
10. **American Society for Testing and Materials.** *Designation: A 108-13 Standar specification for steel bars, carbon, cold-finished, standar quality*. 2013.

11. **Smith F., William.** *Structure and properties of engineering alloys*. 2nd ed. Orlando : Mc.Graw-Hill, 1993. págs. 93,94,100. 0-07-059172-5.
12. **Bhadeshia, Harry y Honeycombe, Robert.** *Steels: Microstructure and properties*. 4. Massachusetts : Elsevier Ltd, 2017. pág. 488. 9780081002704.
13. **Nguyen, Tam C.** *Weld defects in high-speed gas metal arc welding*. [ed.] Heritage Branch. Ontario : s.n., 2005. pág. 224. 0-494-02990-0.
14. **Ventura Ramirez, Yair.** *Efecto del ángulo de bisel en uniones soldadas por GMAW en acero estructural*. Saltillo, 2017. pág. 117.
15. **Alvarez Cárdenas, Aldo Jesús.** *Determinación de esfuerzos residuales generados por la soldadura GMAW en placas de acero 1018*. Nuevo Laredo : Revista Iberoamericana para la investigación y el desarrollo educativo, 2017. 2007-7467.
16. **Weman, Klas.** *Welding Processes Handbook*. Second Edition. Cambridge : Woodhead Publishing, 2012. 978-0-85709-510-7.
17. **American Welding Society.** *Welding Inspection Technology*. 4a. Miami : AWS American Welding Society, 2000. págs. 3-9 a 3-13 de 10-31. 0-87171-467-1.
18. —. *Standard welding terms and definitions AWS A3.0:2001*. [ed.] AWS. 2. Miami : s.n., 2001. pág. 142. 0-87171-624-0.
19. **Pires, J. Norberto, Loureiro, Altino y Bolmsjö, Gunnar.** *Welding robots: Technology, system issues and applications*. 3a. Londres : Springer, 2009. págs. 36-43;179. 9781848008564.
20. **Popa, Razvan, y otros, y otros.** *Robotic Welding Cells Configuration*. Bucharest : Trans Tech Publications, 2012. págs. 445-454 de 613. En memoria de congreso: Mechanisms, Mechanical Transmissions and Robotics. 1662-7490.
21. **American Welding Society.** *Structural welding code-steel AWS D1.1/D1.1M:2010*. 22da. LeJeune Road : American Welding Society, 2010. 978-0-87171-772-6.

22. **Aviles Viñas, Jaime F., Rios Cabrera, Reyes y Lopez Juarez, Ismael.** *On-line learning of welding bead geomtry in industrial robots.* Londres : Springer-Verlag London , 2015. págs. 217-231. 10.1007/s00170-015-7422-6.
23. **Kolahan, Farhad y Heidari, Mehdi.** *A New Approach for Predicting and Optimizing Weld Bead Geometry in GMAW.* s.l. : World Academy of Science, Engineering and Technology, 2009. págs. 1391-1394. Vols. Vol:3, No:11, 2009 , Revista.
24. **Sreeraj, P, Kannan, T. y Maji, Subhasis.** *Prediction and Control of Weld Bead Geometry in Gas Metal Arc Welding Process Using Simulated Annealing Algorithm.* s.l. : International Journal Of Computational Engineering Research (ijceronline.com), 2013. Vol. Vol. 3 Issue. 1, Revista.
25. **Afrane Gyasi, Emmanuel , y otros, y otros.** *Modeling of an artificial intelligence system to predict structural integrity in robotic GMAW of UHSS fillet welded joints.* Londres : Springer-Verlag London, 2017. págs. 1139-1155. Vols. (2017) 93:1139–1155. 10.1007/s00170-017-0554-0.
26. **Xiong, Jun, y otros, y otros.** *Modeling of bead section profile and overlapping beads with experimental validation for robotic GMAW-based rapid manufacturing.* s.l. : Elsevier Ltd., 2012. págs. 417-423. 29 (2013) 417–423.
27. **Ramos Jaime, Daniel, López Juárez, Ismael y Perez, Pedro.** *Effect of process parameters on robotic GMAW bead area estimation.* Saltillo : Elsevier Ltd., 2013. pág. 8. 2212-0173.
28. **Cho, D.W., y otros, y otros.** *A study on V-groove GMAW for various welding positions.* s.l. : Elsevier B.V. , 2013. 0924-0136.
29. **Tham, Ghalib, y otros, y otros.** *Predicting the GMAW 3F T-Fillet Geometry and Its Welding.* s.l. : Elsevier Ltd, 2012. 1877-7058.
30. **Cao, Z., Yang, Z. y L. Chen, X.** *Three-Dimensional Simulation of Transient GMA weld pool with free surface.* s.l. : Welding journal, 2004.
31. **Roman, Gerardo, Meseguer-Valdenebro, Jose L. y Portolés, Antonio.** *Experimental Research on the Electrical Parameters of GMAW.* s.l. : Springer, 2016. DOI 10.1007/s12666-016-0872-1.

32. **Wu, Ligang, y otros, y otros.** *CFD simulations of GMA welding of horizontal fillet joints based on coordinate rotation of arc models.* s.l. : Elsevier B.V., 2015. págs. 221-238. Vols. 231 (2016) 221–238.

33. **Moreno Quijada, Denisse.** *Imagen de autoría propia.* Saltillo, Coahuila : s.n., 2017.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. 1 Sección de soldadura: a) perfil considerado para diseño; b) Perfil real (5).	5
Figura 1. 2 Posiciones de soldadura (21).	7
Figura 2. 1 Esquema de clasificación de aleaciones industriales (8).	10
Figura 2. 2 Microestructura de un acero AISI 1018 a 1000X; elaboración propia.	13
Figura 2. 3 Metalografía de AISI 1018 a 200X; elaboración propia.....	14
Figura 2. 4 Modo de transferencia por corto circuito (16).	17
Figura 2. 5 Esquema de la transferencia globular (16).	19
Figura 2. 6 Esquema de transferencia por aspersion (16).	20
Figura 2. 7 Terminología de GMAW (16).	23
Figura 2. 8 Efecto de la posición del electrodo y de la técnica de soldadura (16).	24
Figura 2. 9 Efecto de la inclinación de trabajo sobre la geometría del cordón en a) cuesta abajo y b) cuesta arriba (16).	25
Figura 2. 10 Equipo para soldadura MIG y MAG (16).....	26
Figura 2. 11 Principales componentes del equipo de soldadura GMAW automatizado (16).	27
Figura 2. 12 Posiciones de soldadura de filete: a) Posición plana 1F, b) Posición horizontal 2F, c) Posición vertical 3 F y d) Posición sobre cabeza 4F (21).....	32
Figura 4. 1 Metodología de investigación.	41
Figura 4. 2 Placas traslapadas unidas mediante soldadura de filete.	42
Figura 4. 3 Posición 1 (0°) con ubicación del electrodo.	42

Figura 4. 4 Nomenclatura de cupones.....	43
Figura 4. 5 Accesorio utilizado para las posiciones de soldadura (33).	44
Figura 4. 6 Robot KUKA KR16, cortesía de COMIMSA.....	45
Figura 4. 7 Robot KUKA KR16, cortesía de COMIMSA.....	46
Figura 4. 8 Máquina de soldar Linconl electric, cortesía de COMIMSA.....	46
Figura 4. 9 Mesa giratoria, cortesía de COMIMSA.	47
Figura 5. 1 Perfil obtenido en cupón de soldadura 1 A.....	49
Figura 5. 2 Perfil obtenido en cupón de soldadura 1B.	49
Figura 5. 3 Perfil obtenido en cupón de soldadura 2A.....	50
Figura 5. 4 Perfil obtenido en cupón de soldadura 2B.	50
Figura 5. 5 Perfil obtenido en cupón de soldadura 3A.....	51
Figura 5. 6 Perfil obtenido en cupón de soldadura 3B.	51
Figura 5. 7 Perfil obtenido en cupón de soldadura 4A.....	52
Figura 5. 8 Perfil obtenido en cupón de soldadura 4B.	52
Figura 5. 9 Perfil obtenido en cupón de soldadura 5A.....	53
Figura 5. 10 Perfil obtenido en cupón de soldadura 5B.....	53
Figura 5. 11 Perfil obtenido en cupón de soldadura 6A.....	54
Figura 5. 12 Perfil obtenido en cupón de soldadura 6B.....	54
Figura 5. 13 Perfil obtenido en cupón de soldadura 7A.....	55
Figura 5. 14 Perfil obtenido en cupón de soldadura 7 B.....	55
Figura 5. 15 Dimensionamiento realizado en de soldadura 1 A (33).	56
Figura 5. 16 Dimensionamiento para la penetración considerada para los resultados (1A).....	58
Gráfica 5. 1 Penetraciones obtenidas a diferentes grados de inclinación del plano base.....	59
Gráfica 5. 2 Dimensiones obtenidas en las piernas del cordón de soldadura en diferentes grados de inclinación del plano base.....	59
Gráfica 5. 3 Dimensiones obtenidas en la garganta real y efectiva con diferentes grados de inclinación del plano base.....	60

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2. 1 Primeros dos dígitos de la nomenclatura AISI para aceros (9).	10
Tabla 2. 2 Tercer dígito de la nomenclatura AISI para aceros (9).....	11
Tabla 2. 3 Composición química del acero 1018 (% e. p.) (10).	11
Tabla 2. 4 Propiedades mecánicas del acero 1018 (11).....	12
Tabla 3. 1 Tabla de Geometrías de experimentación (28).....	37
Tabla 5. 1 Tabla de referencia de imágenes de geometrías obtenidas.	48
Tabla 5. 2 Resultados obtenidos de las geometrías con diferente inclinación del plano base.	58