



PONTIFICIA **UNIVERSIDAD CATÓLICA** DEL PERÚ

Esta obra ha sido publicada bajo la licencia Creative Commons
Reconocimiento-No comercial-Compartir bajo la misma licencia 2.5 Perú.

Para ver una copia de dicha licencia, visite
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.5/pe/>



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
**UNIVERSIDAD
CATÓLICA**
DEL PERÚ

EVALUACIÓN DE LOS PROCESOS DE SOLDADURA TIG CON Y SIN MATERIAL DE APORTE EN PLANCHAS DE ACERO ESTRUCTURAL

Tesis para optar el Título de Ingeniero Mecánico, que presenta el bachiller:

Jorge Elías Pajuelo Céspedes

ASESOR: Dr. Paul Pedro Lean Sifuentes

Lima, noviembre del 2009



© 2009, Jorge Elías Pajuelo Céspedes

Se autoriza la reproducción total o parcial,
con fines académicos a través de cualquier
medio o procedimiento, incluyendo la cita
bibliográfica del documento.

Resumen

El presente trabajo muestra el estudio comparativo del proceso de soldadura GTAW, más conocido como TIG, empleado en la unión de planchas de dos milímetros de espesor, de acero estructural ASTM A36. El objetivo principal de esta tesis es el de comparar las características y propiedades de las uniones soldadas con y sin material de aporte utilizando el proceso GTAW.

Para el estudio se hicieron cuatro cupones, dos sin material de aporte con una y dos pasadas, y los otros dos cupones empleando el aporte ER70S6 con una y dos pasadas.

El estudio de las características y propiedades de los cupones soldados se realizó a través de ensayos de tracción, ensayos de microdureza Vickers, ensayos de doblado y por último metalografía y caracterización microestructural a las probetas obtenidas de los cupones soldados y del material base utilizado.

En los ensayos de tracción los resultados de las probetas soldadas sin material de aporte con una pasada alcanzaron ligeramente mayores valores en esfuerzo máximo, en esfuerzo de fluencia y en elongación. En los ensayos de microdureza Vickers las probetas sin material de aporte alcanzaron durezas en el centro de la soldadura similares las probetas soldadas con material de aporte. En los ensayos de doblado, tanto de cara como de raíz, todas las probetas pasaron las pruebas.

Sobre la base de los resultados obtenidos se concluyó que para este caso de unión de planchas de acero ASTM A36 de 2 milímetros de espesor mediante soldadura GTAW, se puede utilizar cualquiera de los dos métodos, con material de aporte o sin material de aporte. El proceso sin material de aporte con una sola pasada resulta más ventajoso, pues cumple con las propiedades mecánicas requeridas alcanzando excelentes valores y es beneficioso porque disminuye costos al no utilizar material de aporte y al aumentar la velocidad de soldeo.

A Elías, María, José y Martha, mi familia,

por su eterno apoyo, confianza y guía .

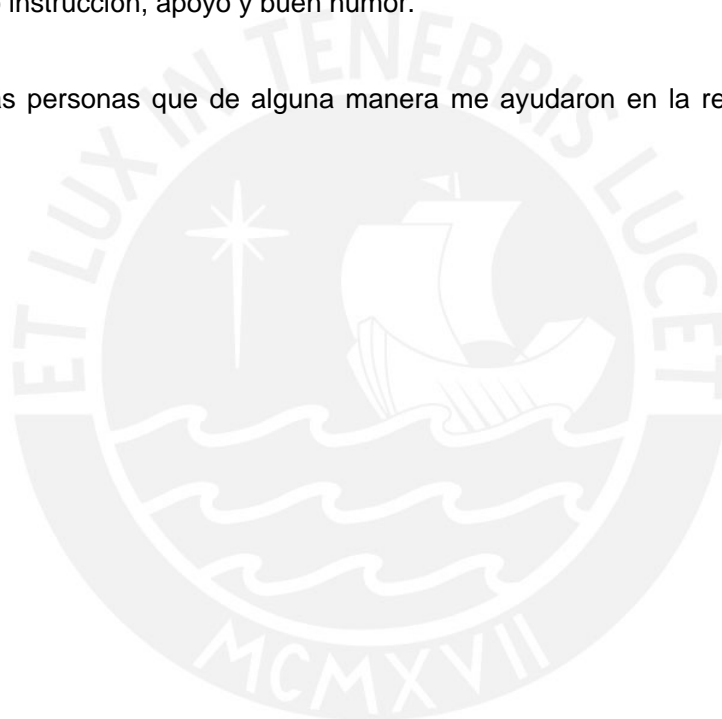


AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Paul Lean Sifuentes, por guiarme a lo largo de esta investigación para lograr la culminación exitosa de la tesis.

Al Laboratorio de Materiales en especial al Ing. Sócrates Cutipa Castelo, a quien agradezco instrucción, apoyo y buen humor.

A todas las personas que de alguna manera me ayudaron en la realización de esta tesis.



ÍNDICE

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	3
CAPÍTULO II: EL ESTADO DEL ARTE	5
2.1. PROCESOS DE SOLDADURA EN ACEROS DE BAJO CARBONO	5
2.1.1. Proceso OFW (Oxygen Fuel Gas Welding)	5
2.1.1.1. Tipo de llama.....	5
2.1.1.2. Ventajas del proceso OFW	6
2.1.1.3. Desventajas del proceso OFW.....	6
2.1.2. Proceso SMAW (Shield Metal Arc Welding)	7
2.1.2.1. Ventajas del proceso SMAW.....	7
2.1.2.1. Desventajas del proceso SMAW.....	7
2.1.3. Proceso GMAW (Gas Metal Arc Welding)	8
2.1.3.1. Electrodo	8
2.1.3.2. Tipo de transferencia del material de aporte.....	8
2.1.3.3. El gas protector	9
2.1.3.4. Ventajas del proceso GMAW	9
2.1.3.5. Desventajas del proceso GMAW	10
2.1.4. Proceso GTAW (Gas Tungsten Arc Welding)	10
2.1.4.1. El gas de protección.....	11
2.1.4.2. Los electrodos.....	11
2.1.4.3. Material de aporte	11
2.1.4.4. Ventajas del proceso GTAW	12
2.1.4.5. Desventajas del proceso GTAW	12
2.1.5. Proceso SAW (Sumerged Arc Welding).....	13
2.1.5.1. Fundente	13
2.1.5.2. Ventajas del proceso SAW.....	13
2.1.5.3. Desventajas del proceso SAW.....	14
2.1.6. Conclusiones.....	14
2.2. ACEROS AL CARBONO Y DE BAJA ALEACIÓN	15
2.2.1. Microconstituyentes de los aceros al carbono	16
2.2.1.1. Ferrita (α)	16
2.2.1.2. Cementita (Fe_3C)	17
2.2.1.3. Perlita (P)	17
2.2.1.4. Austenita (γ)	18
2.2.1.5. Bainita	19
2.2.1.6. Martensita.....	20
2.2.2. Clasificación de los aceros de bajo carbono	20
2.2.2.1. Uso del acero según su contenido en carbono	21
2.2.2.2. Designación de los aceros	21
2.2.3. Propiedades mecánicas.....	23
2.2.3.1. Resistencia.....	23
2.2.3.2. Ductilidad.....	24
2.2.3.3. Dureza.....	25
2.2.4. Tratamientos térmicos de los aceros de bajo carbono.....	26
2.2.4.1. Recocido	26
2.2.4.2. Normalizado	27
2.2.4.3. Templado	28
2.2.4.4. Revenido	28
2.2.4.5. Proceso de soldadura y tratamiento térmico.....	28
2.3. SOLDABILIDAD DE LOS ACEROS DE BAJO Y MEDIO CARBONO	29

	2
2.3.1. Soldabilidad de los aceros de bajo carbono.....	29
2.3.2. Soldabilidad de los aceros de medio carbono.....	29
CAPÍTULO III: PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....	30
3.1. Preparación de cupones.....	30
3.1.1 Características nominales del material base.....	30
3.1.2. Equipamiento de soldadura.....	31
3.1.2.1 Máquina de soldadura GTAW.....	31
3.1.3. Consumibles.....	32
3.1.3.1. Material de aporte.....	32
3.1.3.2. Gas de protección.....	33
3.1.4. Ejecución de uniones.....	33
3.1.4.1. Elaboración de juntas.....	33
3.1.4.2. Procedimiento de soldeo.....	35
3.2. Técnicas de caracterización de las uniones.....	37
3.2.1. Caracterización mecánica.....	37
3.2.1.1. Ensayo de tracción.....	37
3.2.1.2. Ensayo de microdureza Vickers.....	41
3.2.1.3. Ensayo de doblado.....	44
3.2.2. Caracterización microestructural.....	45
3.2.2.1. Metalografía.....	45
CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	47
4.1. Ensayo de tracción.....	47
4.1.1. Material base.....	47
4.1.2. Uniones sin material de aporte – 1 pasada.....	47
4.1.3. Uniones sin material de aporte – 2 pasadas.....	48
4.1.4. Uniones con material de aporte – 1 pasada.....	49
4.1.5. Uniones con material de aporte – 2 pasadas.....	50
4.1.6. Discusión de resultados de los ensayos de tracción de las uniones soldadas.....	51
4.2. Ensayo de microdureza Vickers.....	53
4.2.1. Uniones sin material de aporte – 1 pasada (Probeta 1).....	53
4.2.2. Uniones sin material de aporte – 2 pasadas (Probeta 2).....	54
4.2.3. Uniones con material de aporte – 1 pasada (Probeta 3).....	56
4.2.4. Uniones con material de aporte – 2 pasadas (Probeta 4).....	57
4.3. Ensayo de doblado.....	60
4.4. Metalografía.....	61
4.4.1. Probeta sin material de aporte – 1 pasada.....	62
4.4.2. Probeta sin material de aporte – 2 pasadas.....	66
4.4.3. Probeta con material de aporte – 1 pasada.....	70
4.4.4. Probeta con material de aporte – 2 pasadas.....	74
CONCLUSIONES.....	78
BIBLIOGRAFÍA.....	79

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

En la actualidad los procesos de soldadura son imprescindibles para el hombre, estos intervienen en muchas de las construcciones modernas que exigen buena resistencia y economía en su diseño.

Normalmente cuando se habla de soldadura se relaciona con el empleo de material de aporte; pero se sabe que hay procesos en los que bajo determinadas circunstancias, no se emplea material de aporte, básicamente debido a que los materiales base presentan espesores delgados. Hay muchos ejemplos en los cuales, aceros de espesores delgados son soldados con aporte, como la unión que se presenta en la figura 1.



Figura 1. Unión soldada del pasamanos del segundo piso de la sección Ingeniería Mecánica.

El proceso de soldadura GTAW (Gas Tungsten Arc Welding), también conocido como TIG, es muy utilizado en la actualidad para uniones de planchas delgadas. Este proceso puede realizarse de dos formas, la primera utilizando material de aporte, y la

otra sin utilizar material de aporte. En la actualidad el proceso GTAW más utilizado es el que emplea material de aporte, pero el proceso de soldadura GTAW sin material de aporte, que cumpla con las propiedades mecánicas requeridas, sería ideal por la ventaja económica que representa.

El trabajo que se presenta a continuación se realizó para obtener información de las características y propiedades de las uniones soldadas empleando el proceso GTAW, con y sin material de aporte, con la finalidad de obtener resultados que lleven a una elección del método de soldeo GTAW óptimo para planchas delgadas de acero estructural.



CAPÍTULO II: EL ESTADO DEL ARTE

2.1. PROCESOS DE SOLDADURA EN ACEROS DE BAJO CARBONO

En la actualidad hay diversos procesos de soldeo con los que se consigue unir los aceros al carbono, cada uno de ellos tienen sus propias ventajas y desventajas como se muestra a continuación:

2.1.1. Proceso OFW (Oxygen Fuel Gas Welding)

En este proceso de soldadura se eleva la temperatura del metal base hasta permitir que el metal de fusión, que proviene del material de aporte, fluya fácilmente sobre la superficie. El proceso se aprecia en la figura 2.1. La combustión del acetileno en presencia del oxígeno es la que permite que la temperatura alcance aproximadamente 3200°C.

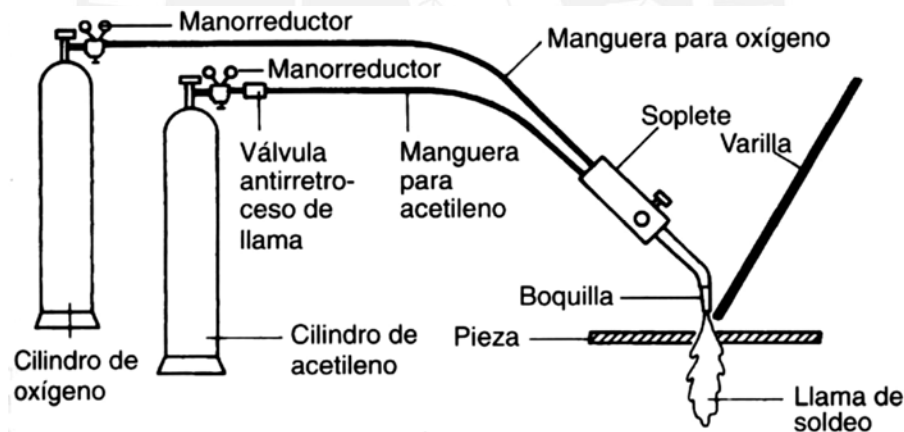


Figura 2.1. Proceso de soldadura OFW [1]

2.1.1.1. Tipo de llama

Para soldar planchas delgadas de acero de bajo carbono se utiliza una llama neutra, ésta es cuando se alimenta con iguales volúmenes de oxígeno y acetileno a baja presión. Las zonas que presenta la llama se muestra en la figura 2.2, apreciándose la zona de trabajo donde alcanza 3200°C.

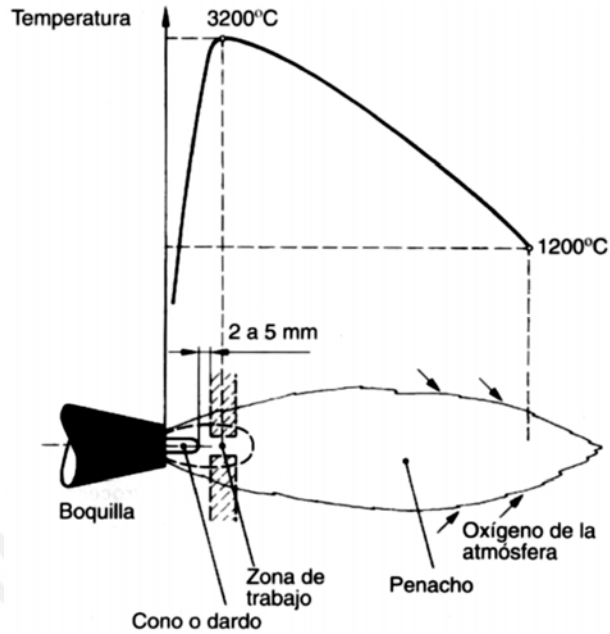


Figura 2.2. Llama del proceso de soldadura OFW [1]

2.1.1.2. Ventajas del proceso OFW

- Es un proceso versátil utilizado para soldar y cortar.
- El equipo es de bajo costo y es económicamente aceptable para láminas delgadas y piezas pequeñas.
- Este proceso de soldadura puede ser con o sin metal de aporte.
- No se tiene que remover escoria, sólo se requiere una pequeña limpieza con escobilla.

2.1.1.3. Desventajas del proceso OFW

- Con este proceso no se protege al cordón de soldadura de la presencia de hidrógeno, oxígeno y nitrógeno.
- Deforma la plancha por la gran cantidad de calor aportado.
- El metal base puede perder características metalúrgicas por el aporte de calor y la permanencia de éste
- Es un proceso de soldadura lento en cuanto a su velocidad de deposición.

2.1.2. Proceso SMAW (Shield Metal Arc Welding)

En este proceso de soldadura, el arco eléctrico se produce entre el metal base y un electrodo revestido alcanzando temperaturas cercanas a 4000°C. Al fundirse el extremo del electrodo, se quema el recubrimiento obteniéndose una atmósfera adecuada para la soldadura. Las gotas de metal fundido caen recubiertas de escoria fundida, ésta flota en la superficie formando una capa protectora. El proceso se muestra en la figura 2.3.

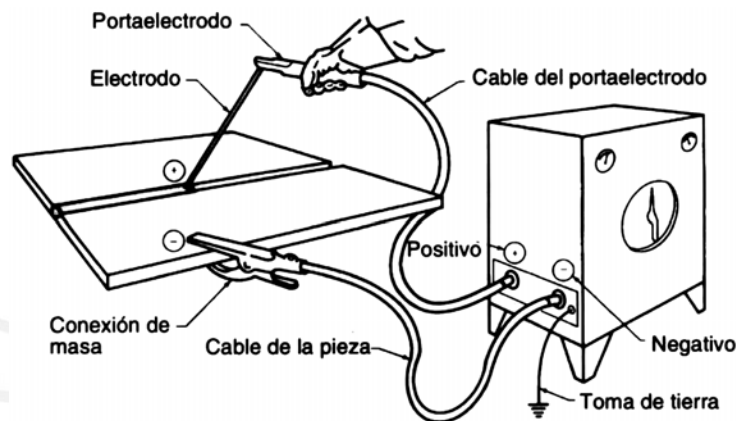


Figura 2.3. Proceso de soldadura SMAW [1]

2.1.2.1. Ventajas del proceso SMAW

- Fuente de poder económica y portátil.
- Este método es útil por su simplicidad y bajo precio.
- Permite la soldadura en todas las posiciones.
- Es aplicable a la mayoría de metales y aleaciones de uso industrial.
- Protege el material de aporte del medio ambiente y es menos sensible al viento.

2.1.2.1. Desventajas del proceso SMAW

- El proceso es no automatizable.
- Tasa de deposición baja, por tener que retirar escoria y cambio de electrodos.
- No es aplicable a metales de bajo punto de fusión ni a los metales sensibles a la oxidación.
- Este procedimiento no es adecuado para espesores menores a 3,0 mm.

2.1.3. Proceso GMAW (Gas Metal Arc Welding)

En este proceso, también conocido como MIG/MAG, la fusión es producida por un arco entre el extremo del electrodo consumible aportado continuamente y el metal base. La protección se obtiene por los gases suministrados junto con el metal de aporte. El proceso se aprecia en la figura 2.4.

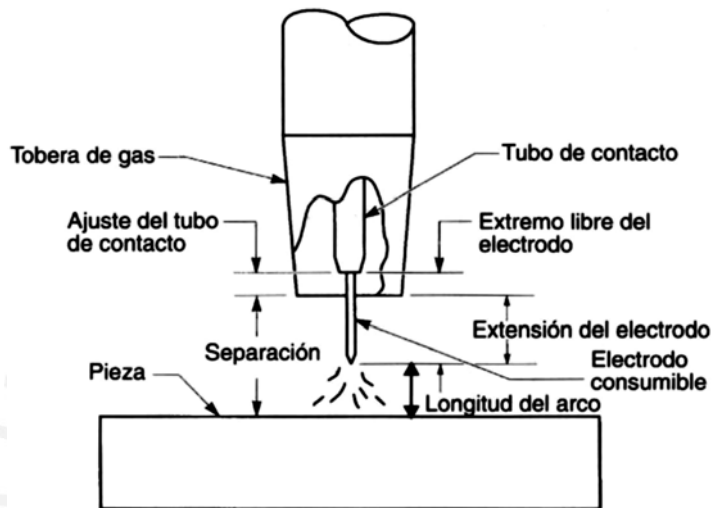


Figura 2.4 Proceso GMAW [1]

Para la soldadura aceros de bajo espesor se puede usar el proceso **MAG (Metal Active Gas)**. Se emplea CO_2 como gas protector, éste participa de forma activa en la soldadura. Se utiliza para metales ferrosos.

2.1.3.1. Electrodo

Se emplea un electrodo consumible en forma de alambre. Éste llega hasta la zona de aplicación por el mismo camino que el gas protector.

2.1.3.2. Tipo de transferencia del material de aporte

Para bajos espesores es apropiado usar corto circuito pues usa los amperajes más bajos. Para mayores espesores se puede emplear transferencia spray o pulsada. La transferencia globular no se emplea. Los diferentes tipos de transferencia se aprecian en la figura 2.5.

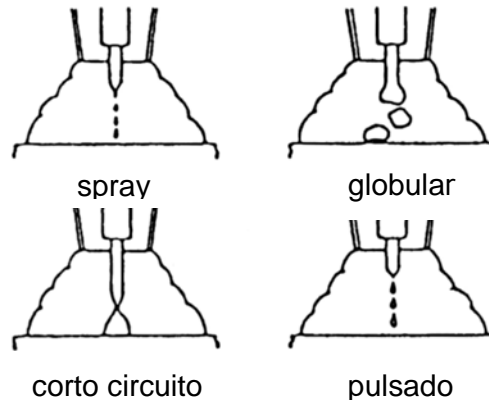


Figura 2.5. Tipo de transferencia de material de aporte GMAW [1]

2.1.3.3 El gas protector

Para el caso de soldar planchas de espesores delgados de acero estructural se recomienda emplear CO_2 o una mezcla de CO_2 con argón.

Cambiando la composición del gas de protección se puede actuar sobre la forma del cordón, como se aprecia en la figura 2.6.

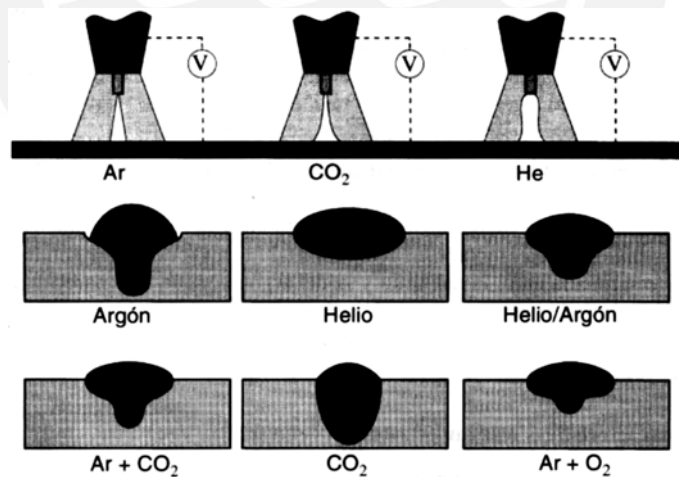


Figura 2.6. Soldadura GMAW con diferente gas protector [1]

2.1.3.4 Ventajas del proceso GMAW

- Alto tasa de deposición de soldadura.
- Mínima limpieza después de soldar (no presenta escoria).

- Arco y baño fundido claramente visibles para el soldador.
- El proceso es automatizable, alcanzando altas velocidades de trabajo.
- Es un método limpio y compatible con las medidas de protección para el medio ambiente.

2.1.3.5. Desventajas del proceso GMAW

- Su mayor problema es la necesidad de aporte tanto de gas como de electrodo, lo que multiplica las posibilidades de fallo del aparato, además del lógico encarecimiento del proceso.
- Equipo complejo, costoso y no portable.
- Sensible a vientos o corrientes de aire.
- Sus discontinuidades principales son porosidades y fusión incompleta.

2.1.4. Proceso GTAW (Gas Tungsten Arc Welding)

En este proceso, también conocido como TIG (Tungsten Inert Gas), la fusión es producida por el calor de un arco que se establece entre un electrodo de tungsteno no consumible y el metal base como se aprecia en la figura 2.7. La protección se obtiene de un gas inerte, como el argón o el helio. El baño de fusión está completamente aislado de la atmósfera durante toda la operación de soldeo, de no ser así, tanto el oxígeno como el nitrógeno del aire serían absorbidos por el metal en estado de fusión y la soldadura quedaría porosa y frágil.

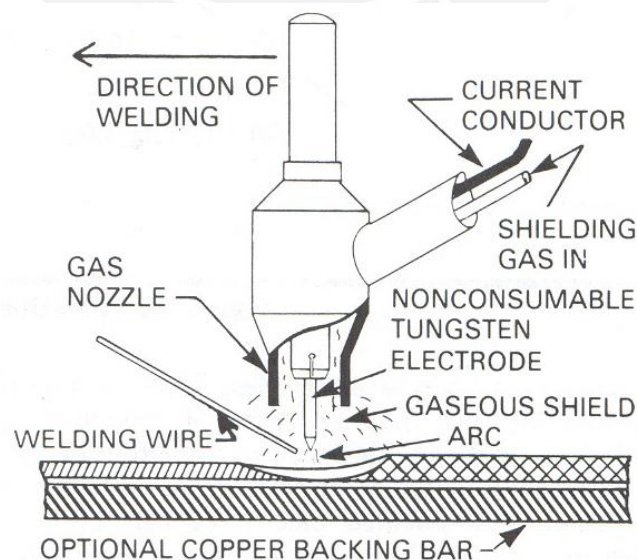


Figura 2.7. Proceso GTAW [2]

2.1.4.1. El gas de protección

Se utiliza un gas inerte sea argón, helio o una mezcla de ambos para proteger el arco de los gases perjudiciales de la atmósfera. El argón es más usado pues al ser más pesado que el helio proporciona una mejor protección a la soldadura y además su costo es menor.

2.1.4.2. Los electrodos

Los electrodos que se emplean son de tungsteno y aleaciones de tungsteno. Tienen un punto de fusión muy elevado de 3400°C y un punto de evaporación de 5900°C, pudiendo mantener su dureza a altas temperaturas. Prácticamente no se consumen. El electrodo no debe tocar el baño fundido.

Hay diferentes clases de electrodos, hay de tungsteno puro (los menos costosos), tungsteno con 1 a 2% de torio (de larga vida, se emplean para aceros) o tungsteno aleado con circonio (menor contaminación, mejor calidad, se emplea para aluminio).

2.1.4.3. Material de aporte

Su selección depende del metal a ser soldado teniendo en cuenta su composición química y propiedades mecánicas, espesor y diseño de junta.

Su clasificación para materiales de aportes para acero según AWS A5.18 se muestra en la figura 2.8.:

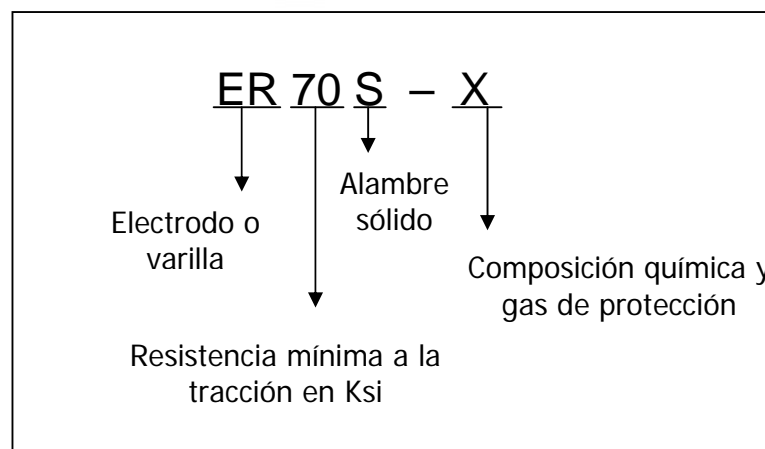


Figura 2.8. Designación del material de aporte para GTAW según AWS A5.18

2.1.4.4. Ventajas del proceso GTAW

- Se obtienen soldaduras de alta calidad, cordones más resistentes, más dúctiles y menos sensibles a la corrosión que en el resto de procedimientos, ya que el gas protector impide el contacto entre la atmósfera y el baño de fusión.
- Sirve para soldar casi todo tipo de metales como aluminio, magnesio, acero inoxidable, bronce, plata, cobre, níquel y aleaciones, hierro fundido, aceros de bajo carbono, aceros aleados e incluso uniones de metales disímiles.
- Se requiere poca o ninguna limpieza posterior.
- No se produce escoria que podría quedarse atrapada en la soldadura.
- No hay metal de aporte que atraviese el arco, de modo que no se producen salpicaduras.
- Proceso poco sensible a la presencia de fisuras, porosidades y salpicaduras.
- La soldadura es posible en todas las posiciones.
- El cordón obtenido es de buen acabado superficial, que puede mejorarse con sencillas operaciones de acabado, lo que incide favorablemente en los costes de producción.
- Puede emplearse con o sin material de aporte.
- Muy baja emisión de humos.

2.1.4.5. Desventajas del proceso GTAW

- No resulta económico para secciones de más de 10 mm de espesor.
- Puede haber inclusiones de tungsteno si se permite que el electrodo haga contacto con el baño fundido.
- Velocidades de deposición de metal de aporte bajas.
- La protección gaseosa puede ser removida por corrientes de aire (AWS D1.1-2000: $V_{aire} < 8 \text{ km/h}$)
- Este método de soldadura requiere de un soldador especializado.

2.1.5. Proceso SAW (Sumerged Arc Welding)

Este proceso de soldadura utiliza un flujo de material protector granulado llamado flux, éste protege el arco y el baño de fusión de la atmósfera. Parte del flux funde protegiendo y estabilizando el arco, genera escoria que aísla el cordón, e incluso puede contribuir a la aleación. El resto del flux, no fundido, se puede reutilizar. El proceso se aprecia en la figura 2.9.

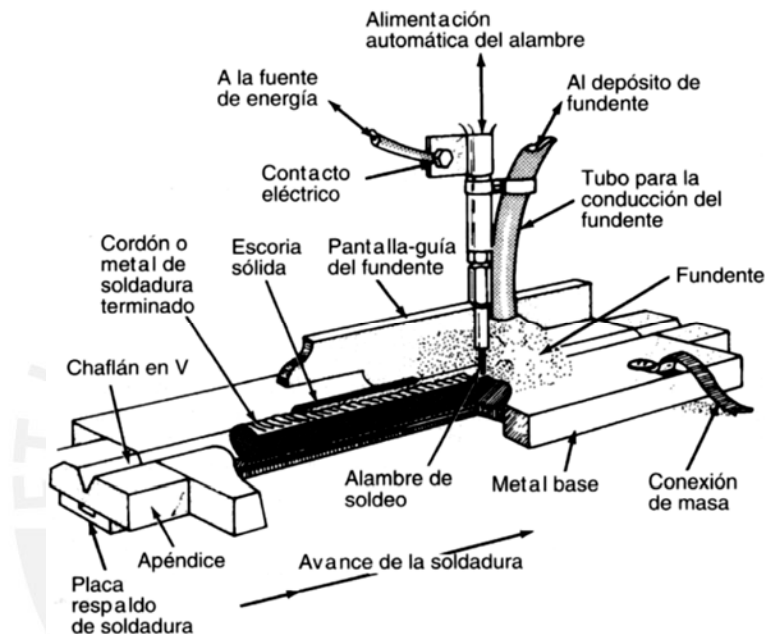


Figura 2.9. Proceso de soldadura SAW [1]

2.1.5.1. Fundente

Son minerales fusibles granulares con óxidos de manganeso, silicio, titanio, aluminio, calcio, circonio, magnesio y otros compuestos como el fluoruro de calcio, con determinadas características de escorificación, viscosidad, etc.

2.1.5.2. Ventajas del proceso SAW

- Excelente calidad de la unión soldada.
- El fundente que sobra puede reusarse, pero hasta un máximo de 2 veces.
- Este proceso es automatizado y puede aplicarse a gran velocidad.
- Requiere poca habilidad del operario.

2.1.5.3. Desventajas del proceso SAW

- El proceso no es adecuado para unir espesores delgados.
- Sólo puede aplicarse en posición plana, y para piezas planas o casi planas.
- Es un proceso costoso.
- El flux debe ser continuamente aportado, lo cual encarece el procedimiento y aumenta sus probabilidades de fallo.
- El fundente está sujeto a contaminaciones que pueden producir defectos en la soldadura.
- La principal discontinuidad es la presencia de inclusiones de escoria, también puede presentar fusión incompleta y porosidades.
- No es recomendable para unir espesores menores de 5 milímetros.

2.1.6. Conclusiones

Para el caso de planchas de acero estructural de bajo espesor, los procesos SMAW (Shield Metal Arc Welding) y SAW (Sumerged Arc Welding) quedan descartados por las desventajas que presentan para este caso específico de soldadura de acero de bajo espesor. El proceso de soldadura OFW (Oxygen Fuel Gas Welding) en la actualidad se ha eliminado casi por completo, quedando los procesos GTAW y GMAW.

Con el proceso de soldadura GTAW se consiguen cordones de soldadura resistentes, dúctiles y poco sensibles a la corrosión, y además poco sensibles a la presencia de fisuras, porosidades y salpicaduras, es decir obtenemos una muy buena soldadura. Además se tiene la opción de soldar sin material de aporte, teniendo la ventaja de poder disminuir costos al no tener que usar el material de aporte y al acelerar el proceso, opción que no es posible con el proceso GMAW.

En el presente trabajo se estudiará específicamente el proceso GTAW debido a las ventajas que presenta sobre los demás procesos para la soldadura de acero estructural de bajo espesor.

2.2. ACEROS AL CARBONO Y DE BAJA ALEACIÓN

El acero al carbono es el material metálico más importante para la industria. Éste es básicamente una aleación de hierro y carbono. El aumento del contenido de carbono en el acero eleva su resistencia a la tracción, incrementa el índice de fragilidad en frío y hace que disminuya la tenacidad y la ductilidad. Dependiendo de la temperatura y del porcentaje de carbono en el acero, éste presentará diferentes fases y con ello diferentes propiedades como se aprecia en la figura 2.10.

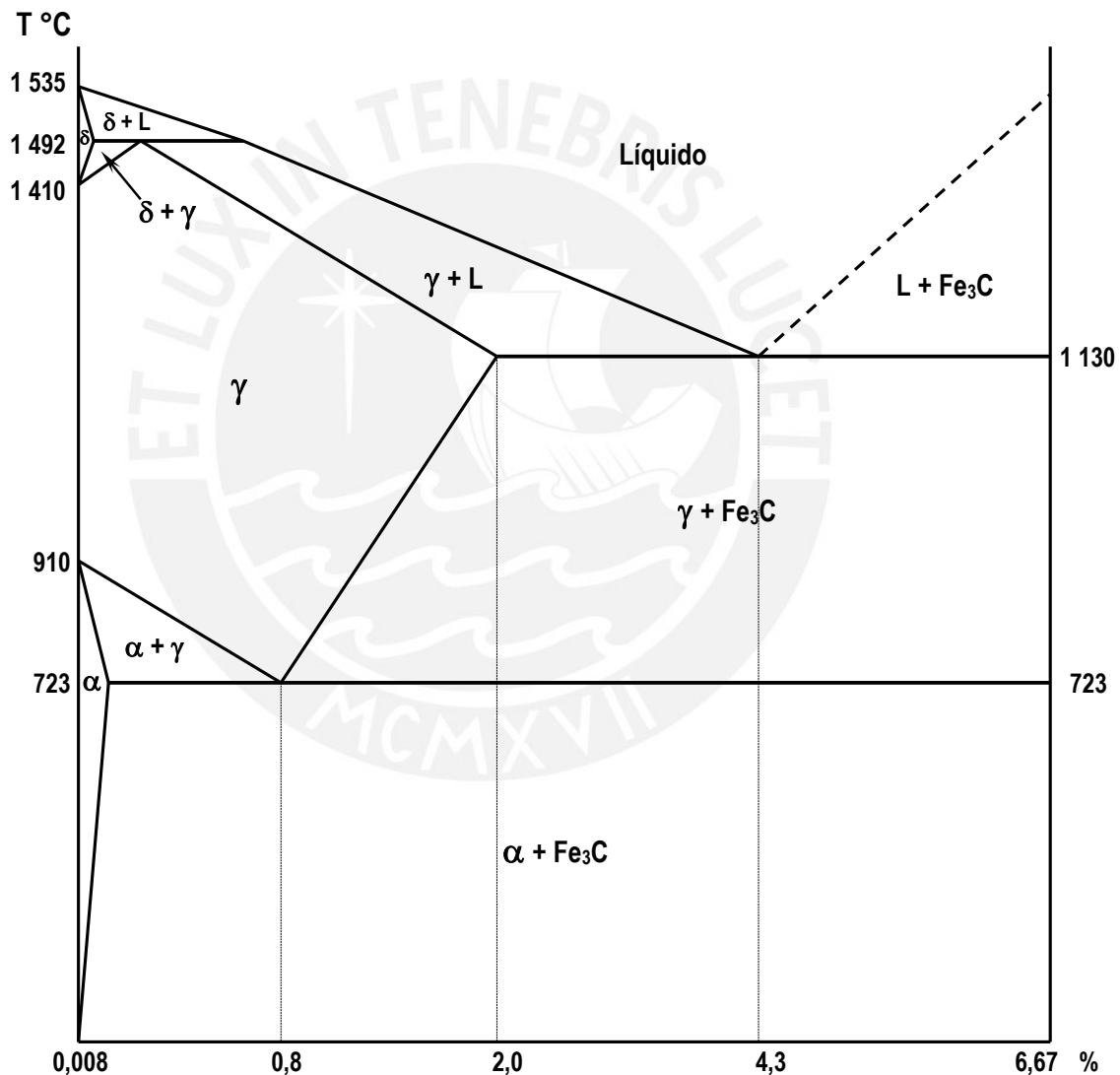


Figura 2.10. Diagrama Fe-Fe₃C mostrando las fases que se presentan conforme varía la temperatura y el contenido de carbono a presión atmosférica. [3]

2.2.1. Microconstituyentes de los aceros al carbono

En los aceros al carbono se pueden presentar, dependiendo de la temperatura y su composición química, microconstituyentes como ferrita, austenita, cementita, perlita y martensita. A continuación se presentarán algunas características y propiedades de los constituyentes antes mencionados.

2.2.1.1. Ferrita (α)

La ferrita es hierro casi puro y es el constituyente más blando y dúctil del diagrama Fe-Fe₃C. Es una solución sólida intersticial de carbono en hierro alfa cúbica centrada en el cuerpo (CCCu) y a temperatura ambiente disuelve 0,008 % de carbono intersticialmente. Este microconstituyente se muestra en la figura 2.11.

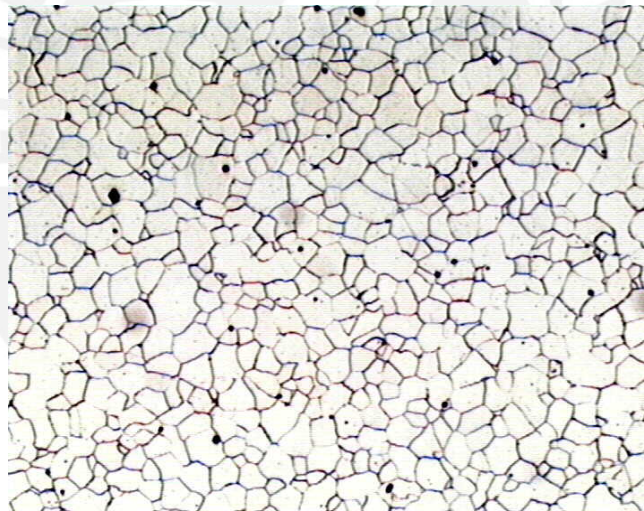


Figura 2.11. Microestructura del acero con 100% de Ferrita X100

La ferrita presenta una dureza de 90 Brinell, una resistencia máxima a la tracción de 270 MPa y una elongación de 40%. La ferrita es estable hasta aproximadamente 910°C, a mayores temperaturas se transforma en austenita. Cuando el acero tiene menos de 0,8%C, la ferrita está presente en la microestructura como una fase libre. A mayores contenidos de carbono, la ferrita se encuentra formando parte de un constituyente llamado "Perlita", que son colonias (agrupaciones) de láminas de ferrita y cementita.

2.2.1.2. Cementita (Fe_3C)

Es el microconstituyente más duro y frágil de los aceros al carbono, presentan una alta temperatura de fusión. Alcanza una dureza de alrededor de 800 HB, tiene una reducida resistencia a la tracción (35 MPa), una ductilidad nula ($\% \varepsilon = 0$) y alta resistencia a la compresión. Su estructura cristalina es ortorrómbica. Es magnética a temperatura ambiente, perdiendo su magnetismo a 218°C . Este microconstituyente se muestra en la figura 2.12.

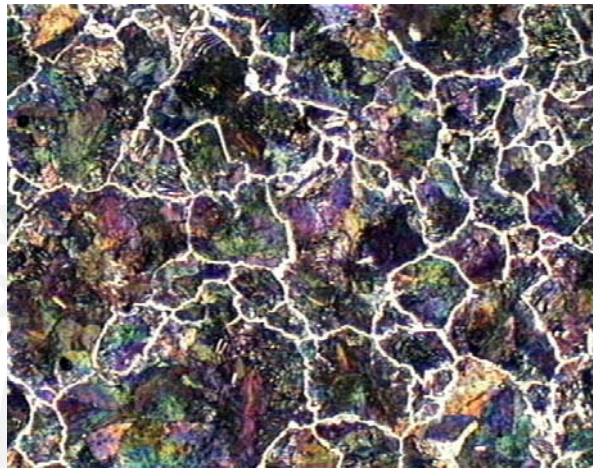


Figura 2.12. Microestructura del acero 1%C, red blanca de cementita

La cementita es una fase que aparece libre a partir de 0.8% de carbono, en forma de red, rodeando a las colonias de perlita.

2.2.1.3. Perlita (P)

La Perlita no es una fase, sino un agregado laminar de ferrita y cementita. Está constituida por láminas de ferrita (88%) y cementita (12%) y se forma a temperatura constante a partir del enfriamiento de la austenita a 723°C . Su elongación promedio es de 20 % aproximadamente. Es un microconstituyente eutectoide, la microestructura de un acero que contiene el 0,8 %C es 100% perlita. Tiene una dureza de 200 HB a 250 HB, una resistencia a la tracción que varía entre 600 MPa y 850 MPa. Ambas dependen de la distancia entre las láminas de cementita. Esta microestructura se muestra en la figura 2.13.



Figura 2.13. Microestructura del acero con 100% Perlita x400

La velocidad de enfriamiento desde la temperatura de austenización determina la distancia media entre láminas de la perlita. A enfriamientos más lentos, la separación entre láminas es mayor, del orden de 400 nm, a este tipo de constitución se le llama “Perlita gruesa”. “Perlita media” se obtiene mediante enfriamientos menos lentos, con una separación entre láminas de unos 350 nm. “Perlita fina” se obtiene con enfriamientos más rápidos, con una separación entre láminas del orden de los 250 nm. En la tabla 2.1 se muestran la resistencia a la tracción y la dureza de la perlita gruesa y la perlita fina.

Tabla 2.1. Propiedades mecánicas de la perlita [4]

Estructura	Resistencia a la tracción (kg/mm²)	Dureza Brinell (HB)
Perlita gruesa	60	200
Perlita fina	85	250

2.2.1.4. Austenita (γ)

Es una solución sólida intersticial de carbono en hierro cúbico centrado en las caras (CCCa). Es un constituyente de composición química variable (%C < 2,0). La austenita se encuentra en estado de equilibrio en los aceros a temperaturas

superiores a A1 (>723°C). La austenita tiene una resistencia a la tracción que varía entre 800 MPa y 1050 MPa, una dureza promedio de 300 HB y una elongación de 30% a 60%. Una característica de la austenita es que no es magnética. Es el constituyente más denso de los aceros. En la figura 2.14 se aprecia las microestructuras de un acero de bajo carbono a diferentes temperaturas.

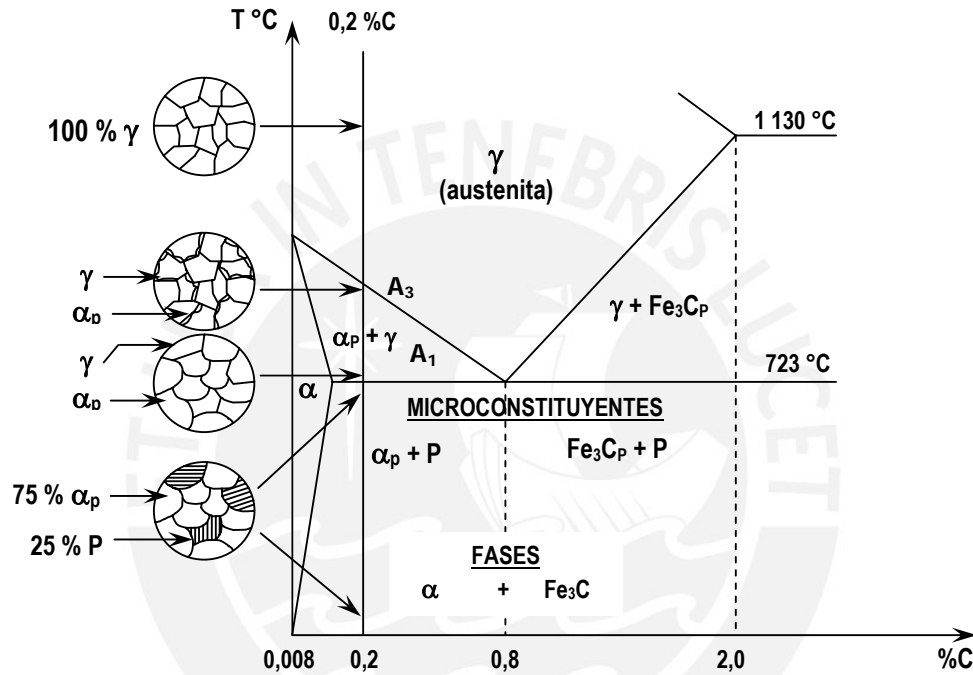


Figura 2.14. Microestructuras de un acero de 0,2% de carbono enfriado lentamente [3]

2.2.1.5. Bainita

Este microconstituyente del acero se obtiene por transformación isotérmica de la austenita. Mientras más baja su temperatura de formación, las partículas de carburos son más finas. La bainita superior, que tiene forma como de plumas de ave, se forma a temperaturas entre 500°C y 450°C. La bainita inferior, con una morfología acicular compuesta por agregados finos de carburos y ferrita, se forma a temperaturas entre 400°C y 250°C. Esta estructura bainítica provee al acero de elevados valores de dureza y de tenacidad.

2.2.1.6. Martensita

Este microconstituyente se obtiene de la austenita, al aumentar la velocidad de enfriamiento. Es una solución sólida sobresaturada de carbono de estructura tetragonal.

Es muy frágil, tiene una dureza de 50 a 68 Rockwell C, una resistencia a la tracción de 1650 MPa a 1450 MPa y un alargamiento del 0.5% al 2.5%. Presenta un aspecto acicular, como se aprecia en la figura 2.15.



Figura 2.15. Microestructura de la martensita X400

Las propiedades mecánicas de los aceros en estado de equilibrio dependen de las fases presentes en su microestructura. La ferrita es blanda, de baja resistencia mecánica y fácilmente deformable; la cementita es dura y muy frágil; y la perlita combina las propiedades de la ferrita con la cementita, es decir tiene buena resistencia mecánica y dureza, y deformabilidad aceptable.

2.2.2. Clasificación de los aceros de bajo carbono

El grupo de aleaciones más importantes de ingeniería son los aceros al carbono, debido a su costo relativamente bajo y a que cuentan con un amplio rango de propiedades mecánicas.

Los aceros al carbono y de baja aleación se clasifican teniendo como referencia sus elementos aleantes. Éstos influyen en propiedades como, resistencia mecánica, dureza, maquinabilidad, resistencia a cargas de impacto, resistencia al desgaste, etc.

2.2.2.1. Uso del acero según su contenido en carbono

Según el uso o aplicación final que se le dará al acero, se le clasifica como: acero estructural, acero para elementos de máquinas y acero para herramientas. En el caso del presente trabajo se hará referencia a los aceros estructurales.

- **Acero estructural: $0,1 < \%C < 0,3$**

Los aceros estructurales se emplean para la fabricación de piezas, elementos de máquinas y de construcción de instalaciones. En ellos son importantes ciertas propiedades mecánicas, como la resistencia a la tracción, tenacidad, resistencia a la fatiga y alargamiento.

Los aceros de hasta 0,1% de carbono se utilizan para láminas, tubos, mallas, alambres, tornillos, clavos, cadenas, remaches, etc.

Los aceros que tienen más de 0,1% y menos de 0,3% de carbono se utilizan para fabricar planchas, barras corrugadas, perfiles en “I”, “C”, “L”, etc., calderas, tanques, tornillos, etc.

2.2.2.2. Designación de los aceros

a) Norma AISI (American Iron and Steel Institute - EEUU)

- **Aceros al carbono de baja y mediana aleación**

La mayoría de las aleaciones ferrosas son aceros al carbono y aceros de baja aleación (elementos aleantes $< 5\%$), debido a que estas aleaciones tienen un precio relativamente moderado por la ausencia de grandes cantidades de elementos aleantes.

Los aceros se designan con 4 números ($\% C < 1,0$) ó 5 ($\%C \geq 1,0$). Además de los números, las especificaciones AISI pueden incluir un prefijo literal para indicar el proceso de manufactura. Las especificaciones SAE emplean las mismas designaciones numéricas que las AISI, pero eliminando todos los prefijos literales.

AISI ZYXX(X) ó SAE ZYXX(X)

XX(X) : Indica el $\% C \times 100$

Y : En el caso de aceros de baja aleación, indica el porcentaje aproximado del elemento de aleación.

Z : Tipo de acero o aleación.

La composición química de algunos aceros al carbono se muestra en la Tabla 2.2, en donde se aprecia que la composición de los elementos no es exacta, sino que se encuentra dentro de un rango.

Tabla 2.2. Aceros al carbono [3]

AISI	% C	% Mn	% Si	% P _{máx}	% S
1010	0,08 - 0,13	0,30 - 0,60	0,20 - 0,35	0,04	0,05
1020	0,18 - 0,23	0,30 - 0,60	0,20 - 0,35	0,04	0,05
1040	0,37 - 0,44	0,60 - 0,90	0,20 - 0,35	0,04	0,05
1060	0,55 - 0,65	0,60 - 0,90	0,20 - 0,35	0,04	0,05

Para el caso específico del presente estudio se utilizará acero estructural equivalente a un acero AISI 1020.

b) Norma DIN (Deutsche Industrie Normen - Alemania)

- **Aceros ordinarios**

No apropiado para tratamientos térmicos: aceros para construcción.

Ejemplos: St 34, St 37, St 42, St 50, St 52.

Ejemplo: DIN St 42

Acero al carbono con valor mínimo de resistencia a la tracción de 42 kg/mm^2 . De tablas el valor puede oscilar entre 42 kg/mm^2 y 50 kg/mm^2 y su dureza entre 120 HB y 140 HB.

Apropiado para tratamientos térmicos

Un ejemplo de este tipo de acero es el caso del DIN C35 (AISI 1035), que presenta un contenido de carbono promedio de 0,35 %C. A este tipo de acero con bajo contenido en fósforo y azufre se les añade la letra K.

Ejemplo DIN CK35, en donde el P < 0,025% y S < 0,035%.

2.2.3. Propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas del acero indican su comportamiento bajo diferentes condiciones de carga. Algunas de las propiedades importantes del acero son las siguientes:

2.2.3.1. Resistencia

Es la capacidad de un material de soportar una carga aplicada sin fallar. Dependiendo del tipo de carga aplicada encontramos:

- a) **Resistencia a la tracción:** Para la resistencia a la tracción, se someten probetas a tracción axial de incremento constante. Con este ensayo se determina el límite elástico, la resistencia máxima a la tensión y la ductilidad. En la figura 2.16 se aprecia que en los aceros al carbono enfriados lentamente, a mayor contenido de carbono, mayor será su resistencia máxima a la tracción.

En un acero AISI 1020 en estado de recocido (enfriado lentamente) presentará menor resistencia a la tracción que el mismo en estado de normalizado (enfriado en aire quieto), debido a que en el primer caso se formó perlita gruesa y en el segundo perlita fina.

- b) **Resistencia a la fatiga:** Las probetas se someten a cargas cíclicas de esfuerzo. Con el número de ciclos antes de la falla podemos determinar el esfuerzo máximo al que el acero puede ser sometido antes de que falle por las cargas cíclicas.

- c) **Resistencia al impacto:** Con esta prueba se mide cuánta energía puede absorber durante la rotura, a una carga aplicada súbitamente.

2.2.3.2. Ductilidad

Es la capacidad del material para deformarse plásticamente bajo carga sin romperse. En la figura 2.16 se observa la variación del alargamiento de rotura con relación al contenido de carbono para aceros ordinarios. En la tabla 2.3 se observan valores de estricción con relación al porcentaje de carbono para aceros recocidos y normalizados. La ductilidad de un metal normalmente se determina con ensayos de tracción.

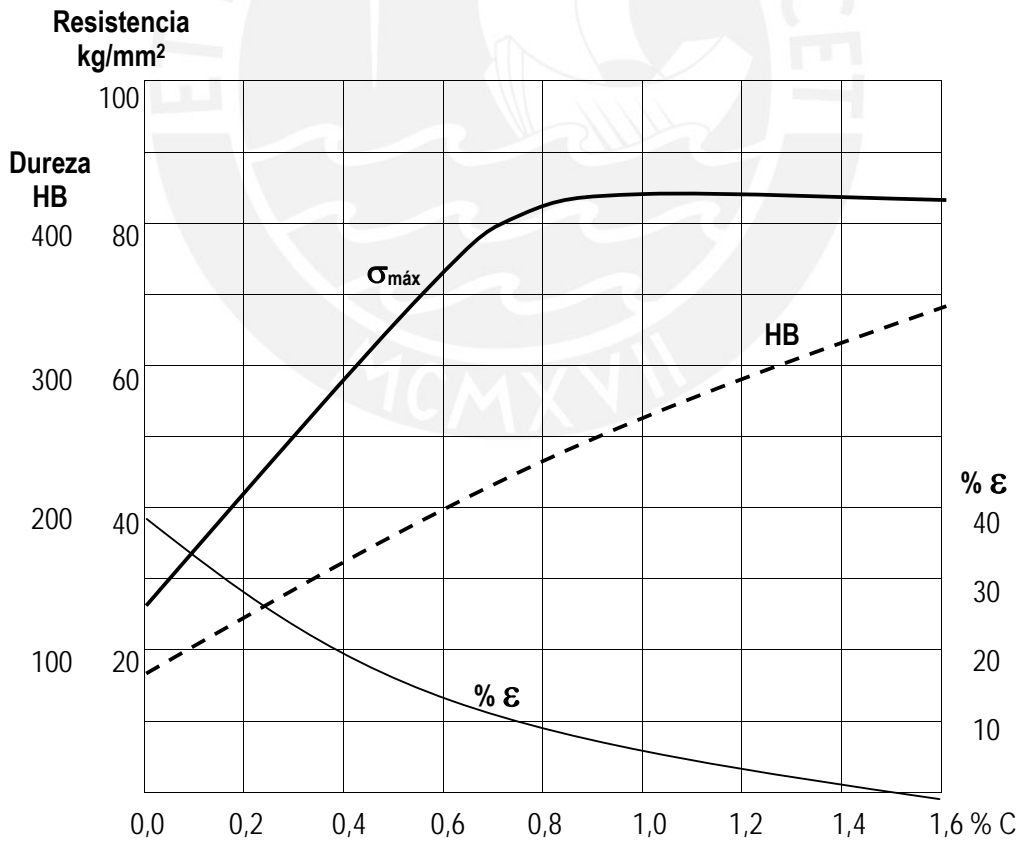


Figura 2.16. Variación de las propiedades mecánicas de los aceros ordinarios, enfriados lentamente, con el % en peso de carbono [3]

2.2.3.3. Dureza

Es la capacidad del material para resistir la penetración por otro elemento más duro. La dureza aumenta con la resistencia y viceversa, por consiguiente si se conoce la dureza es posible conocer su resistencia a la tracción aproximada sin tener que hacer un ensayo de tracción. En la figura 2.16 se observa la variación de la dureza Brinell con relación al contenido de carbono en aceros ordinarios recocidos (enfriados lentamente) o aceros normalizados (enfriados al aire); se aprecia que a medida que aumenta el contenido de carbono, aumenta la dureza. En la tabla 2.3 se observan valores de dureza Brinell con relación al porcentaje de carbono para aceros recocidos y normalizados.

Tabla 2.3 Propiedades mecánicas de los aceros al carbono recocidos y normalizados en función del porcentaje de carbono [4]

Porcentaje de Carbono	Resistencia a la tracción (kg/ mm ²)	Límite de fluencia	Porcentaje de alargamiento en 2 pulgadas	Estricción (%)	Dureza Brinell
Recocidos					
0.01	29	13	47	71	90
0.20	41	25	37	64	115
0.40	53	31	30	48	145
0.60	67	35	23	33	190
0.80	81	37	15	22	220
1.00	76	37	22	26	195
1.20	72	36	24	39	200
1.40	72	35	19	25	215
Normalizados					
0.01	32	18	45	71	90
0.20	45	32	35	60	120
0.40	60	36	27	43	165
0.60	77	42	19	28	220
0.80	94	49	13	18	260
1.00	107	70	7	11	295
1.20	108	70	3	6	315
1.40	70	67	1	3	300

2.2.4. Tratamientos térmicos de los aceros de bajo carbono

Los tratamientos térmicos en los aceros se realizan para modificar sus propiedades mecánicas, esta modificación se debe a los cambios microestructurales que los aceros pueden alcanzar en condiciones fuera de equilibrio. Para realizar un tratamiento térmico se tiene que seguir la secuencia de calentamiento, permanencia del material a la temperatura del tratamiento y un enfriamiento hasta la temperatura ambiente.

En la mayoría de tratamientos térmicos aplicados en los aceros, se calienta el material hasta la región austenítica, luego dependiendo de las características deseadas se enfriará lentamente, en aire quieto, en agua, etc. En la figura 2.18 se muestra el esquema de un tratamiento térmico.

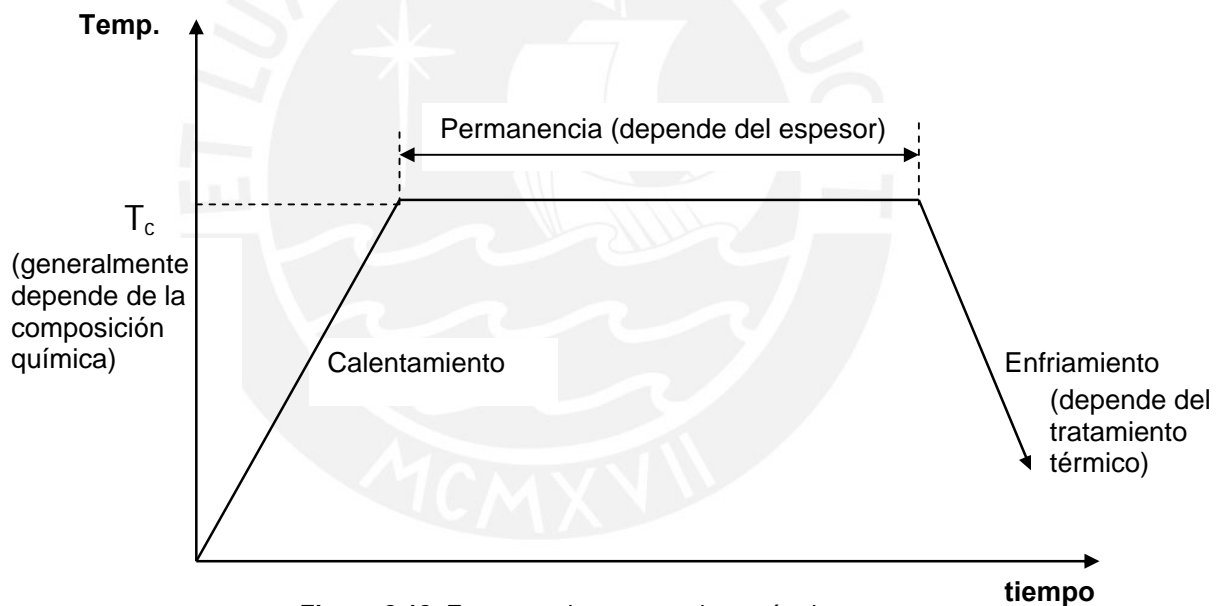


Figura 2.18. Esquema de un tratamiento térmico

2.2.4.1. Recocido

El objeto de este tratamiento es ablandar el acero, homogenizar su estructura y composición química y aumentar su ductilidad. Se presentan cuatro formas:

- a) **Recocido total o de regeneración:** Este tratamiento térmico se utiliza cuando se trata de ablandar el acero y regenerar su estructura después de la forja o laminación, para mecanizar en las mejores condiciones posibles, aceros de

entre 0.35 a 0.60 %C. Se calienta el acero por encima de su temperatura A_3 y después de permanecer en el horno el tiempo suficiente se enfría lentamente. Su microestructura estará formada por perlita gruesa y ferrita.

- b) **Recocido de alivio de tensiones:** Este tratamiento se le da a los aceros después de un mecanizado fuerte, deformación en frío localizada o proceso de soldadura para disminuir las tensiones residuales. La temperatura que debe alcanzar la pieza es menor a la temperatura de recristalización, por lo tanto no hay modificación microestructural. Éste es un tratamiento térmico que generalmente se utiliza para uniones soldadas de más de 0.35% de carbono.
- c) **Recocidos contra acritud:** Se emplea para aceros de bajo contenido en carbono (inferior a 0.30%) con tensiones residuales por fuertes maquinados o que han sufrido un fuerte trabajo en frío por laminado o estirado y en los que la dureza ha aumentado, habiéndose disminuido al mismo tiempo la ductilidad hasta límites muy bajos. Este tratamiento consiste en calentar el acero a temperaturas por debajo de la crítica inferior A_1 (540 a 650°C) y enfriamiento al aire. Este tratamiento térmico se utiliza en las industrias de láminas y de alambres.
- d) **Recocido globular:** Este tratamiento tiene por objetivo mejorar la maquinabilidad y ductilidad de aceros de alto porcentaje de carbono. Este tratamiento consiste en calentar durante un largo tiempo el acero a temperaturas entre 700 a 740 °C y luego enfriar lentamente en horno hasta llegar a los 500°C, a partir de la cual podrá enfriarse en el aire. De esta forma el material tiene un aumento significativo de ductilidad.

2.2.4.2. Normalizado

Este tratamiento tiene por objetivo mejorar la tenacidad del acero. Este tratamiento consiste en calentar el acero a unos 50°C por encima de la temperatura crítica superior (A_3 o A_{cm}) y enfriarlo luego en aire. El normalizado produce una microestructura de perlita más fina y más abundante que la obtenida por recocido total, lo cual resulta en un acero más resistente y más tenaz. Se suele emplear como tratamiento previo al temple y revenido.

2.2.4.3. Templado

Este tratamiento tiene por objetivo endurecer y aumentar la resistencia de los aceros. Este tratamiento consiste en calentar 50°C sobre la temperatura crítica superior para aceros hipoeutectoides (A_3) y a 50°C de la temperatura crítica inferior para aceros hipereutectoides ($A_{3,1}$), luego enfriarlo rápidamente de tal manera que la austenita se transforme en martensita.

Templabilidad: Es una propiedad que determina la profundidad y distribución de la dureza obtenida a través del temple.

2.2.4.4. Revenido

Este tratamiento tiene como objetivo disminuir la fragilidad y eliminar las tensiones creadas en el temple. Este tratamiento consiste en calentar el acero a una temperatura menor a la crítica inferior (200 a 450°C), empleando generalmente dos veces el tiempo de calentamiento para el templado de la misma pieza y luego enfriamiento al aire.

Al dar a los aceros al carbono un temple y revenido (bonificado) se consiguen muy buena tenacidad en los mismos.

2.2.4.5. Proceso de soldadura y tratamiento térmico

En un proceso de soldadura se busca unir dos piezas fundiéndolas, aportando calor localmente a la zona que será unida. El calor se transmite a través del metal base aumentando su temperatura y luego se enfría hasta temperatura ambiente como en un tratamiento térmico. Este calentamiento y enfriamiento del metal no se realiza para cambiar intencionalmente las propiedades mecánicas del acero, sino que es consecuencia del proceso de soldadura.

La zona afectada por el calor (ZAC) es la zona del material soldado que no llegó a fusionarse; pero, que alcanzó temperaturas suficientes como para provocar cambios microestructurales como los que ocurren en los tratamientos térmicos, cambiando así sus propiedades mecánicas.

2.3. SOLDABILIDAD DE LOS ACEROS DE BAJO Y MEDIO CARBONO

La soldabilidad de los aceros depende en alto grado del porcentaje de carbono que contengan. A mayor cantidad de carbono presente en la aleación se dificulta su soldeo, y a menor carbono aumenta la soldabilidad del material.

2.3.1. Soldabilidad de los aceros de bajo carbono

Estos aceros presentan menos del 0,3% de carbono, tienen baja templabilidad, entonces son de fácil soldabilidad y pueden soldarse con cualquiera de los procesos conocidos, cuya elección está determinada principalmente por la clase de unión, posición de soldadura y costo.

2.3.2. Soldabilidad de los aceros de medio carbono

Los aceros de mediano carbono son aquellos que contienen 0.30 a 0.55% de carbono. Son aceros de mediana soldabilidad, así que tienden a formar martensita en la ZAC, entonces estos aceros primero tienen que ser precalentados en función del espesor de la unión, de su carbono equivalente y del proceso de soldadura utilizado, para evitar problemas de fisuración o endurecimiento.

Es recomendable también hacerle un tratamiento de alivio de tensiones después del proceso de soldadura, más aún cuando se sueldan piezas de espesores gruesos, seguido de un enfriamiento lento.

CAPÍTULO III: PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En el presente capítulo se muestra el procedimiento empleado para la realización de los cupones y probetas, así como los métodos que se siguieron para la caracterización y determinación de las propiedades de las uniones soldadas y el material base, acero ASTM A36.

3.1. Preparación de cupones

3.1.1 Características nominales del material base

Para el presente trabajo, se utilizaron planchas de acero ASTM A36 de 2 milímetros de espesor. Las características físicas y mecánicas, y la composición química del acero A36 se muestran en las tablas 3.1 y 3.2 respectivamente. Al acero ASTM A36 empleado se le hizo un análisis químico, cuyos valores obtenidos se aprecian en la tabla 3.3.

Tabla 3.1. Propiedades físicas y mecánicas del acero estructural ASTM A36 [5]

Propiedades Físicas	
Densidad	7850 kg/m ³
Propiedades Mecánicas	
Esfuerzo máximo a la tracción	400 - 550 MPa
Esfuerzo de fluencia, min	250 MPa
Alargamiento en 200 mm, mín	20 %
Alargamiento en 50 mm, min	23 %
Módulo elástico	200 GPa
Coefficiente de Poisson	0,26

Tabla 3.2. Composición química nominal del acero ASTM A36 [5]

Elementos Aleantes	Porcentaje máximo
Carbono	0,26
Manganeso	No requerido
Fósforo	Máx 0,04
Azufre	Máx 0,05
Silicio	0,4
Cobre	0,2

Tabla 3.3. Composición química del acero ASTM A36 empleado

Elementos Aleantes	Porcentaje
Carbono	0,19
Manganeso	0,28
Silicio	0,06
Fósforo	0,014
Azufre	0,002
Níquel	0,01
Cromo	0,03
Molibdeno	0,00
Cobre	0,05

3.1.2. Equipamiento de soldadura

3.1.2.1 Máquina de soldadura GTAW

Para el proceso de soldadura GTAW utilizado en el presente trabajo, para soldar los cupones del acero ASTM A36, se utilizó el equipo portátil MinarcTIG 180 que se muestra en la figura 3.1. Los datos técnicos de este equipo se muestran en la tabla 3.4.



Figura 3.1. Equipo de soldeo GTAW MinarcTIG 180

Tabla 3.4. Datos técnicos del equipo MinarcTIG 180

MinarcTIG 180	
Voltaje de suministro	1 ~ 230V \pm 15%, 50 / 60 Hz
Fusible	16 A
Cable de conexión	3x2,5 mm ² – 3 m
Peso (con cables de suministro)	7.8 kg (8,4 kg)
Rango de soldadura	5A / 10,2V – 180A / 17,2V
Eficiencia a máxima corriente	0,75
Corriente nominal 35%	180A / 17,2V
Corriente nominal 100%	120A / 14,8V
Clase de protección	IP 23C
Dimensiones externas (L x W x H)	400 x 180 x 340 mm

3.1.3. Consumibles

3.1.3.1. Material de aporte

Para los cupones soldados con material de aporte se utilizó el ER70 S-6, que son varillas recubiertas de cobre que tienen un alto contenido de manganeso y silicio. El ER70 S-6 es especial para soldar aceros al carbono utilizando el proceso GTAW. Los gases recomendados para soldar con este material de aporte son el Argón puro y el

Helio. La composición química del material de aporte depositado se muestra en la tabla 3.5.

Tabla 3.5. Composición química del material de aporte depositado

Elementos Aleantes	Porcentaje
Carbono	0,06 – 0,12
Manganeso	1,3 – 1,6
Silicio	0,7 – 1,0
Fósforo	< 0,025
Azufre	< 0,025

3.1.3.2. Gas de protección

Para el soldeo de los cupones para los ensayos, se utilizó 100% argón empleando un caudal de 9 litros/min en la realización de todos los cordones de soldadura.

El argón es el más abundante de los gases raros del aire (0.9% en volumen). Es incoloro, inodoro y sin sabor. Es un gas no tóxico, no inflamable y un 30% más pesado que el aire. Es inerte, caracterizado por una perfecta estabilidad física y química a cualquier temperatura y presión. El argón es un excelente conductor de electricidad y no es corrosivo.

3.1.4. Ejecución de uniones

3.1.4.1. Elaboración de juntas

Para la realización de los cupones de soldadura, se utilizaron planchas de acero ASTM A36 de 150 x 200 mm y de 2 mm de espesor como muestra la figura 3.2.

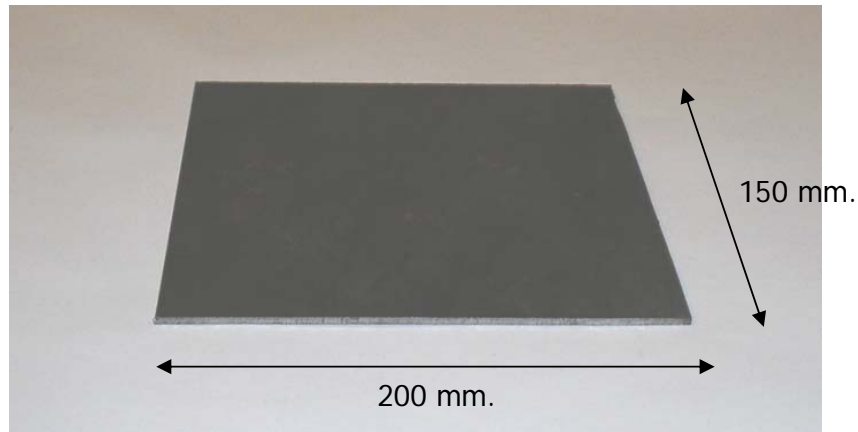


Figura 3.2. Planchas de acero ASTM A36 para la fabricación de cupones

3.1.4.1.1 Tipo de junta

Por el espesor del material, el tipo de junta que se utilizó fue la junta a tope de bordes rectos como se aprecia en la figura 3.3.

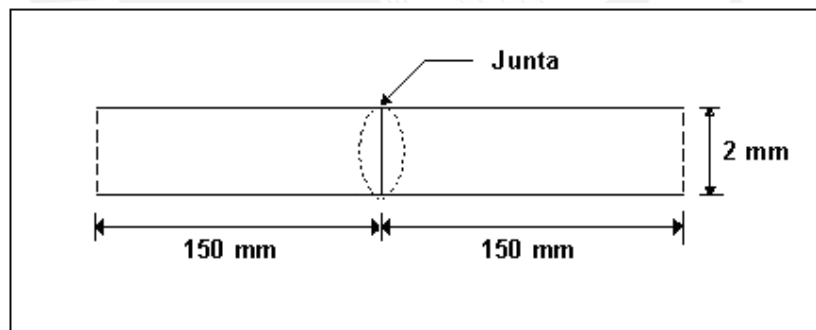


Figura 3.3. Junta a tope

3.1.4.1.2 Limpieza de bordes

Para obtener una superficie adecuada para realizar el proceso de soldeo en las planchas de acero ASTM A36, se limpiaron las probetas con una amoladora para quitar todo óxido e impurezas superficiales. La distancia limpiada fue como mínimo 20 milímetros desde el borde como se aprecia en la figura 3.4.

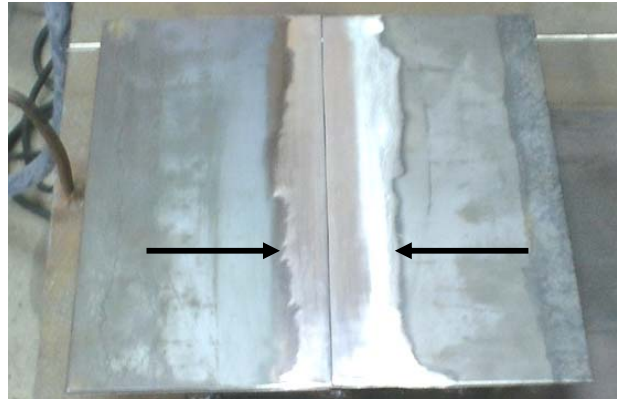


Figura 3.4. Bordes limpiados para su soldeo

3.1.4.2. Procedimiento de soldeo

Para los ensayos experimentales se realizaron cuatro cupones soldados con el proceso GTAW. Dos de los cupones realizados fueron soldados sin material de aporte, con una (cupón #1) y dos pasadas (cupón #2), y los otros dos cupones fueron soldados usando el material de aporte ER70 S6 con una (cupón #3) y dos pasadas (cupón #4). Los parámetros y condiciones de soldadura se muestran en la tabla 3.6. En la figura 3.5 se visualiza el soldeo de una de las probetas sin la utilización de material de aporte, en la figura 3.6 se observa el cupón soldado con material de aporte con dos pasadas y en la figura 3.7 se observa el cupón soldado sin material de aporte con dos pasadas.

Tabla 3.6. Parámetros de soldadura de los cupones

Número de Cupón	Pasadas	Intensidad (A)	Voltaje (V)	Electrodo		Material de aporte	Gas de protección	
				Tipo	Diámetro (pulg)		Tipo	Caudal (litros/min)
1	Única pasada	60	11	EWTh-1	3/32	Sin aporte	Argón	9
2	Primera pasada	54	11	EWTh-1	3/32	Sin aporte	Argón	9
	Segunda pasada	60	11	EWTh-1	3/32	Sin aporte	Argón	9
3	Única pasada	54	11	EWTh-1	3/32	ER 70 S6 Ø3/32"	Argón	9
4	Primera pasada	54	11	EWTh-1	3/32	ER 70 S6 Ø3/32"	Argón	9
	Segunda pasada	60	11	EWTh-1	3/32	ER 70 S6 Ø3/32"	Argón	9



Figura 3.5. Soldeo sin material de aporte de cupones

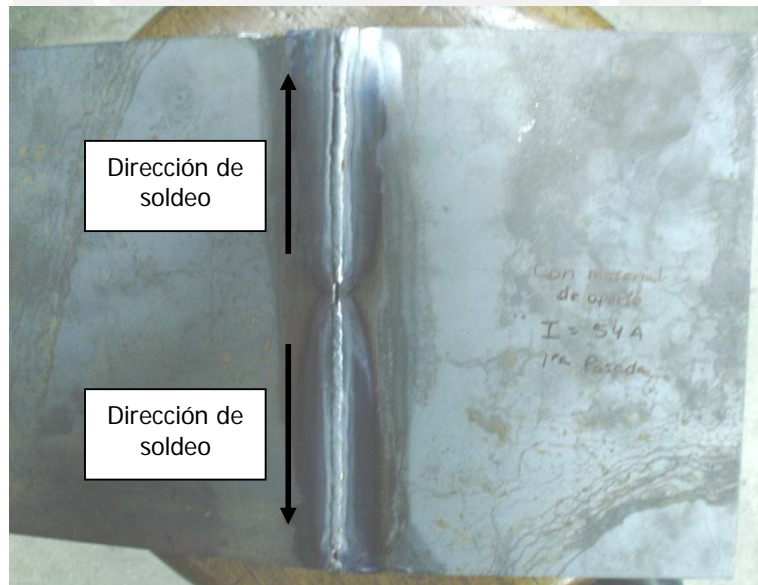


Figura 3.6. Cupón soldado con material de aporte

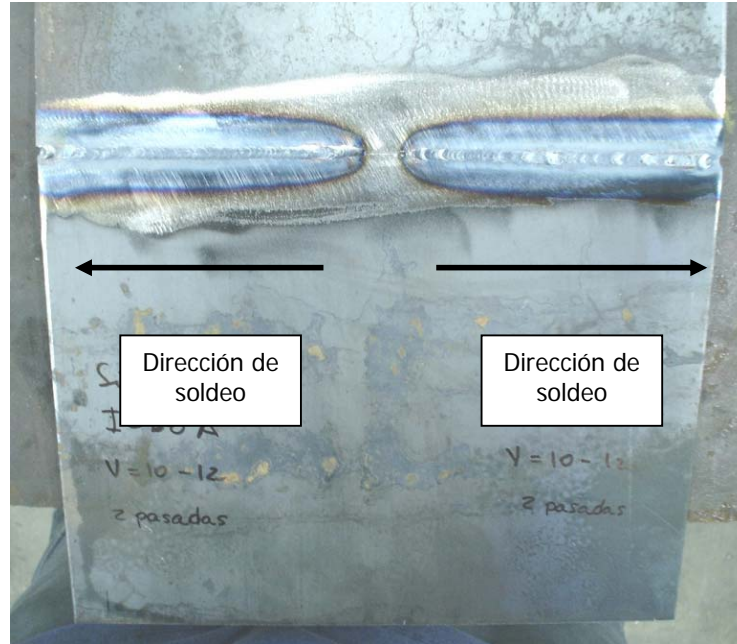


Figura 3.7. Cupón soldado sin material de aporte

3.2. Técnicas de caracterización de las uniones

Una vez obtenidos los cuatro cupones, se procedió a realizar la inspección visual para localizar defectos. Luego se procedió a realizar el corte de los mismos con el fin de obtener las probetas que luego fueron ensayadas.

3.2.1. Caracterización mecánica

3.2.1.1. Ensayo de tracción

a) Equipos y materiales utilizados

- **Máquina de tracción:** Para el ensayo de tracción se utilizó la máquina de tracción universal marca Zwick Roell modelo Special Metal Testing Machina SP que tiene una capacidad de hasta 60 kN en tracción. Este equipo se encuentra en el Laboratorio de Materiales, sección Ingeniería Mecánica, de la Pontificia Universidad Católica del Perú. La máquina de ensayo se muestra en la figura 3.8.



Figura 3.8. Máquina de tracción Zwick Roell Special Metal Testing Machina SP

- **Material base:** Se confeccionaron 3 probetas para realizar el ensayo de tracción en el material base, de acuerdo con la norma ASTM A370. En la figura 3.9 se muestra una de las probetas empleadas.



Figura 3.9. Probeta para el ensayo de tracción del material base

La tabla 3.7 recoge las dimensiones que presentaron las probetas hechas con el material base.

Tabla 3.7. Probetas del material base para el ensayo de tracción

Probetas para ensayo de tracción – Material Base			
Probeta	Sección transversal		
	Medidas (mm)		Área (mm ²)
	Ancho	Espesor	
MB1	12.45	1.91	23.78
MB2	12.53	1.91	23.93
MB3	12.30	1.94	23.86

- Probetas soldadas:** Para conocer las características mecánicas de los cupones soldados con diferentes parámetros, se fabricaron tres probetas a partir de cada uno de los cupones, con el objeto de realizar los ensayos de tracción. Estas probetas se muestran en la figura 3.10. Las probetas fueron fabricadas tomando como referencia la norma de ensayo ASTM A370-05 cuyas dimensiones transversales se muestran en las tablas 3.8, 3.9, 3.10 y 3.11.


Figura 3.10. Probetas soldadas para el ensayo de tracción

Tabla 3.8. Probetas soldadas con una pasada, sin material de aporte para ensayo de tracción

Probetas para ensayo de tracción – Sin aporte – 1 pasada					
Probeta	Pasadas de soldadura	Material de aporte	Sección transversal		
			Medidas (mm)		Área (mm ²)
			Ancho	Espesor	
1.1	1	Sin aporte	12.49	1.92	23.98
1.2	1	Sin aporte	12.56	1.90	23.86
1.3	1	Sin aporte	12.55	1.94	24.35

Tabla 3.9. Probetas soldadas con dos pasadas, sin material de aporte para ensayo de tracción

Probetas para ensayo de tracción – Sin aporte – 2 pasadas					
Probeta	Pasadas de soldadura	Material de aporte	Sección transversal		
			Medidas (mm)		Área (mm ²)
			Ancho	Espesor	
2.1	2	Sin aporte	12.48	1.98	24.71
2.2	2	Sin aporte	12.46	1.95	24.30
2.3	2	Sin aporte	12.41	1.92	23.83

Tabla 3.10 Probetas soldadas con una pasada de material de aporte para ensayo de tracción

Probetas para ensayo de tracción – Con aporte – 1 pasada					
Probeta	Pasadas de soldadura	Material de aporte	Sección transversal		
			Medidas (mm)		Área (mm ²)
			Ancho	Espesor	
3.1	1	ER70 S-6	12.48	1.99	24.84
3.2	1	ER70 S-6	12.45	1.97	24.53
3.3	1	ER70 S-6	12.46	1.96	24.42

Tabla 3.11 Probetas soldadas con dos pasadas de material de aporte para ensayo de tracción

Probetas para ensayo de tracción – Con aporte – 2 pasadas					
Probeta	Pasadas de soldadura	Material de aporte	Sección transversal		
			Medidas (mm)		Área (mm ²)
			Ancho	Espesor	
4.1	2	ER70 S-6	12.56	1.96	24.62
4.2	2	ER70 S-6	12.52	1.95	24.41
4.3	2	ER70 S-6	12.54	1.98	24.83

b) Metodología de ensayo

Para este ensayo, se coloca una probeta de sección transversal rectangular en una máquina de tracción sujetándola entre dos mordazas, una fija y la otra móvil. La probeta es sometida a tracción axial incrementando constantemente la carga, ésta se consigue al desplazar la mordaza móvil hasta alcanzar la rotura de la probeta. Una de las probetas colocadas en las mordazas para el ensayo de tracción se muestra en la figura 3.11.

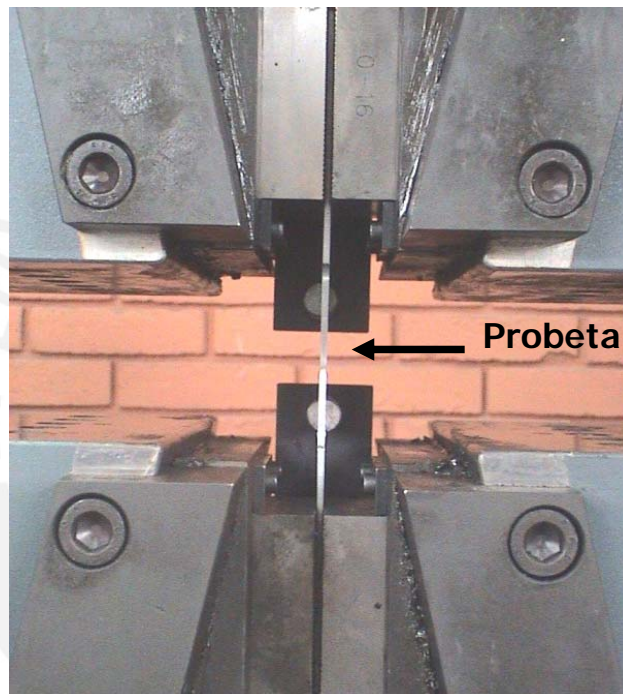


Figura 3.11. Probeta en las mordazas de la máquina de tracción listas para ensayar

3.2.1.2. Ensayo de microdureza Vickers

a) Equipos y materiales utilizados

- **Equipo de microdureza Vickers:** Para la realización del ensayo de microdureza en las probetas hechas de los cupones soldados, se utilizó el equipo para medir microdureza Leiz del Laboratorio de Materiales, sección Ingeniería Mecánica, de la Pontificia Universidad Católica del Perú. El equipo mencionado se aprecia en la figura 3.12.



Figura 3.12. Equipo Leiz para medición de microdureza Vickers

- **Probetas:** Para conocer las durezas alcanzadas en las zonas de fusión y en las zonas afectadas por el calor, en los cupones soldados con el proceso GTAW en las planchas de acero ASTM A36 con diferentes parámetros, se hicieron probetas tomadas transversalmente a las uniones soldadas de cada uno de los cupones para realizar el ensayo de dureza. Las dimensiones de las probetas se muestran en la figura 3.13.

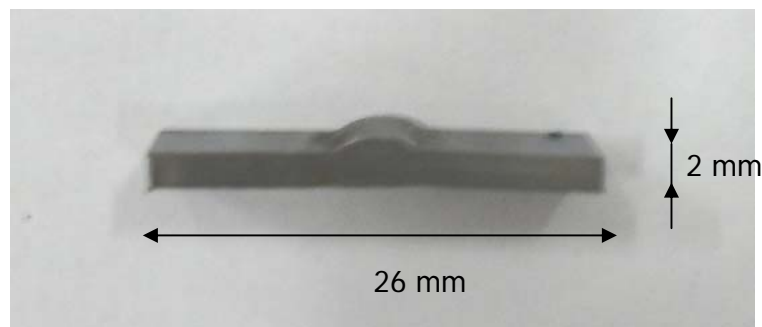


Figura 3.13. Probeta con material de aporte para la medición de microdureza Vickers

Para realizar el ensayo de dureza, se necesita que el indentador penetre perpendicularmente sobre la cara que será sometida a este ensayo. Para esto se hicieron briquetas para cada probeta con lo que se consigue que la cara que será sometida al ensayo de dureza sea totalmente horizontal. Una de las probetas empleadas se muestra en la figura 3.14.

b) Metodología de ensayo

Este procedimiento emplea un penetrador de diamante en forma de pirámide de base cuadrada. Tal penetrador es aplicado perpendicularmente a la superficie cuya dureza se desea medir, bajo la acción de una carga. Esta carga es mantenida durante un cierto tiempo, después del cual es retirada y luego se mide la diagonal de la impresión que el indentador dejó sobre la superficie de la muestra. Con este valor se obtiene la dureza Vickers, que es caracterizada por HV. Para este ensayo se utilizó una carga de 200 gramos. La dureza Vickers se obtiene a partir de la siguiente fórmula según ASTM E 92-82:

$$HV = 1,8544 F/d^2$$

Donde:

F = Carga en kilogramos.

d = Promedio de las dos diagonales medidas en milímetros.

Las indentaciones se realizaron desde el centro de la probeta (zona de fusión), hasta llegar al material base a la derecha como se muestra en la figura 3.14. La distancia entre indentación e indentación fue de 0,5 milímetros en la zona afectada por el calor; cuando se llegó al material base, la distancia entre indentaciones fue de 2 milímetros.

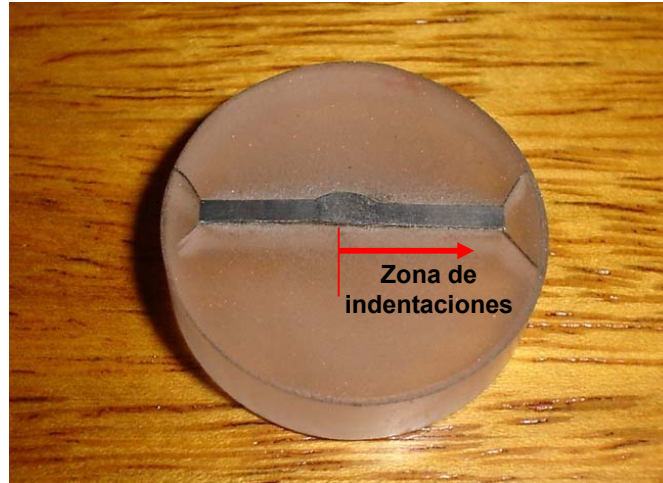


Figura 3.14. Probeta con material de aporte en una briqueta para la medición de microdureza Vickers y caracterización microestructural

3.2.1.3. Ensayo de doblado

a) Equipos y materiales utilizados

- **Probetas:** Para comprobar que el proceso de soldeo realizado en las planchas de acero ASTM A36 no haya sufrido fragilización y cambio de propiedades mecánicas severas como una pérdida de ductilidad, se hicieron probetas tomadas transversalmente a las uniones soldadas de cada uno de los cupones para realizar el ensayo de doblado. Las dimensiones de las probetas se muestran en la figura 3.15.

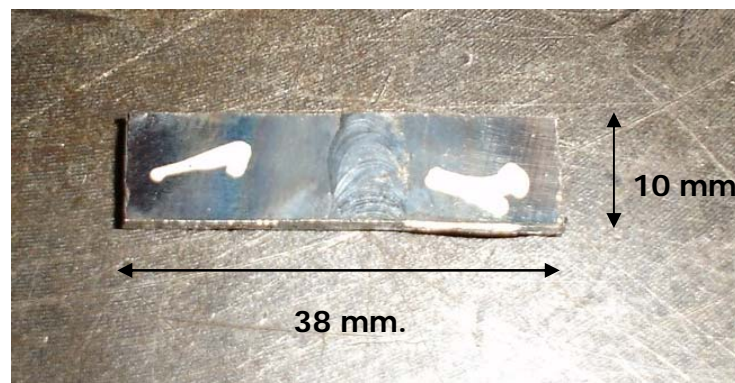


Figura 3.15. Probeta con material de aporte para el ensayo de doblado.

- **Punzón:** Para el presente caso, con un espesor de plancha de acero de 2 milímetros, se utilizó un punzón para el doblado de 8 milímetros de diámetro.

$$d_p = 4t$$

Donde:

d_p = Diámetro del punzón.

t = Espesor de la plancha.

b) Metodología de ensayo

Para este procedimiento se sometieron las probetas a una deformación plástica por medio de un doblado utilizando un punzón de 8 milímetros de diámetro. Este doblado se realiza en una sola dirección para que una de las caras de la unión soldada esté sometida a esfuerzos de tracción. Se realizaron doblados de cara y de raíz en las probetas.

3.2.2. Caracterización microestructural

3.2.2.1. Metalografía

a) Equipos y materiales utilizados

- **Microscopio con cámara fotográfica:** Para la caracterización microestructural se utilizó el microscopio Leiz, que incorpora una cámara fotográfica como se aprecia en la figura 3.16. Este microscopio permite realizar estudios a través de varios aumentos, 50, 100, 200, 500 y 1000.



Figura 3.16. Microscopio con cámara Leiz para la caracterización microestructural.

- **Probetas:** La fabricación de las probetas utilizadas para la metalografía fue realizada de la misma manera que para el ensayo de dureza como se aprecia en la figura 3.14. La preparación de las probetas empleadas fue mediante desbaste y pulido mecánico según la norma ASTM E3 – 95. El ataque químico utilizado fue con Nital al 3% según ASTM 407 – 70.

CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. Ensayo de tracción

En las siguientes tablas y gráficos se muestran los resultados de los ensayos de tracción realizados en las probetas fabricadas de material base, acero ASTM A36, así como las fabricadas a partir de los cupones soldados con diferentes parámetros de soldadura.

4.1.1. Material base

En la tabla 4.1 se muestran los resultados del ensayo de tracción realizado en las probetas hechas del material base, acero ASTM A36. Se observa que estas probetas alcanzaron un esfuerzo de fluencia promedio de 373 MPa, un esfuerzo máximo promedio de 512 MPa y una elongación promedio de 32 %. Los valores obtenidos aquí servirán para compararse con los valores que se obtengan en los ensayos de tracción en las demás probetas soldadas con diferentes parámetros de soldadura.

Tabla 4.1. Ensayo de tracción del material base

Ensayo de tracción en el material base								
Probeta	Sección transversal	Cargas (kN)		Esfuerzos (MPa)		Ductilidad		
	Área (mm ²)	Fuerza de fluencia	Fuerza máxima	Esfuerzo de fluencia ($\sigma_{0,2}$)	Esfuerzo máximo (σ_{\max})	Longitud entre marcas (mm)	Longitud final entre marcas (mm)	Elongación (%)
MB1	23.78	9.0	12.5	378.5	525.7	50	66.8	33.6
MB2	23.93	8.9	12.2	371.9	507.7	50	66.5	33.1
MB3	23.86	8.8	12.0	368.8	502.9	50	65.2	30.4
Promedio				373.1	512.1			32.4

4.1.2. Uniones sin material de aporte – 1 pasada

En la tabla 4.2 se muestran los resultados del ensayo de tracción para las probetas soldadas sin material de aporte y con una sola pasada. Se observa que estas probetas alcanzaron valores de esfuerzo de fluencia promedio de 351 MPa, esfuerzo máximo promedio de 491 MPa y elongación promedio de 22 %. Los valores de esfuerzos de fluencia y esfuerzos máximos así como los valores de elongación,

hallados en estas probetas soldadas sin material de aporte con una sola pasada, disminuyeron en relación a los valores alcanzados por el material base (tabla 4.1). En el ensayo de la probeta 1.3, se hallaron valores muy bajos de esfuerzo máximo y de elongación pues la probeta presentaba un poro, así que para el promedio no se tomó en cuenta.

Tabla 4.2. Ensayo de tracción de probetas sin material de aporte – 1 pasada

Ensayo de tracción de probetas sin material de aporte – 1 pasada										
Probeta	Pasadas de sold.	Sección transversal	Cargas (kN)		Esfuerzos (MPa)		Ductilidad			Zona de rotura (medida desde el centro del cordón en mm)
		Área (mm ²)	Fuerza de fluencia	Fuerza máx.	Esfuerzo de fluencia ($\sigma_{0.2}$)	Esfuerzo máximo ($\sigma_{máx}$)	Longitud entre marcas (mm)	Longitud final entre marcas (mm)	Elongación (%)	
1.1	1	23.98	8.4	11.8	349.5	493.3	50	62.3	24.6	28
1.2	1	23.86	8.4	11.7	352.8	488.6	50	60.1	20.2	28
*1.3	1	24.35	8.5	10.0	349.9	412.4	50	55.2	10.5	Centro de la unión MA
Promedio					351.1	491.0			22	28

MA = Material de aporte.

(*) Probeta descartada para calcular el promedio

4.1.3. Uniones sin material de aporte – 2 pasadas

En la tabla 4.3 se muestran los resultados del ensayo de tracción para las probetas soldadas sin material de aporte y con dos pasadas. Se observa que estas probetas alcanzaron valores de esfuerzo de fluencia promedio de 345 MPa, esfuerzo máximo promedio de 470 MPa y elongación promedio de 17 %. Los valores de esfuerzos de fluencia y esfuerzos máximos así como los valores de elongación, hallados en estas probetas soldadas sin material de aporte con dos pasadas, disminuyeron en relación a los valores alcanzados por el material base (tabla 4.1), así como en relación a las probetas soldadas sin material de aporte con una sola pasada (tabla 4.2). Se observa que la zona de rotura en estas probetas están más alejadas del centro de la unión que

las zonas de rotura de las probetas soldadas sin material de aporte con una sola pasada.

Tabla 4.3. Ensayo de tracción de probetas sin material de aporte – 2 pasadas

Ensayo de tracción de probetas sin material de aporte – 2 pasadas										
Probeta	Pasadas de soldadura	Sección transversal	Cargas (kN)		Esfuerzos (MPa)		Ductilidad			Zona de rotura (medida desde el centro del cordón en mm)
		Área (mm ²)	Fuerza de fluencia	Fuerza máx.	Esfuerzo de fluencia ($\sigma_{0.2}$)	Esfuerzo máximo ($\sigma_{máx}$)	Longitud entre marcas (mm)	Longitud final entre marcas (mm)	Elongación (%)	
2.1	2	24.71	8.5	11.5	342.0	465.0	50	58.5	17.0	36
2.2	2	24.30	8.4	11.3	344.0	466.3	50	57.8	15.7	36
2.3	2	23.83	8.3	11.4	348.3	478.0	50	58.6	17.2	40
Promedio					344.8	469.8			17	37

4.1.4. Uniones con material de aporte – 1 pasada

En la tabla 4.4 se muestran los resultados del ensayo de tracción para las probetas soldadas con material de aporte y con una sola pasada. Se observa que estas probetas alcanzaron valores de esfuerzo de fluencia promedio de 352 MPa, esfuerzo máximo promedio de 477 MPa y una elongación promedio de 12%. Los valores de esfuerzos de fluencia y esfuerzos máximos hallados en estas probetas soldadas con material de aporte con una sola pasada, aumentaron con relación a los valores alcanzados por las probetas hechas sin material de aporte con dos pasadas (tabla 4.3). Los resultados para estas probetas se acercan a los valores obtenidos de las probetas soldadas sin material de aporte y una sola pasada (tabla 4.2). En el caso de la elongación, ésta disminuyó con relación a los valores de elongación obtenidos de las probetas soldadas sin material de aporte. Se observa que la zona de rotura en estas probetas están más alejadas del centro que en los dos ensayos para las probetas anteriores.

Tabla 4.4. Ensayo de tracción de probetas con material de aporte – 1 pasada

Ensayo de tracción de probetas con material de aporte – 1 pasada										
Probeta	Pasadas de soldadura	Sección transversal	Cargas (kN)		Esfuerzos (MPa)		Ductilidad			
		Área (mm ²)	Fuerza de fluencia	Fuerza máxima	Esfuerzo de fluencia ($\sigma_{0.2}$)	Esfuerzo máximo ($\sigma_{m\acute{a}x}$)	Longitud entre marcas (mm)	Longitud final entre marcas (mm)	Elongación (%)	Zona de rotura (medida desde el centro del cordón en mm)
3.1	1	24.84	8.6	11.7	346.7	471.1	50	56.5	13.0	45
3.2	1	24.53	8.7	11.8	352.7	479.5	50	55.8	11.6	42
3.3	1	24.42	8.7	11.8	355.8	481.1	50	55.7	11.4	50
Promedio					351.7	477.2			12	46

4.1.5. Uniones con material de aporte – 2 pasadas

En la tabla 4.5 se muestran los resultados del ensayo de tracción para las probetas soldadas con material de aporte y con dos pasadas. Se observa que estas probetas alcanzaron valores de esfuerzo de fluencia promedio de 342 MPa, un esfuerzo máximo promedio de 470 MPa y una elongación promedio de 11 %. Los valores de esfuerzos de fluencia y esfuerzos máximos hallados en estas probetas soldadas con material de aporte con dos pasadas fueron los menores valores obtenidos de todos los ensayos de tracción realizados. En el caso de la elongación, ésta disminuyó con relación a todos los valores de elongación, siendo estos los más bajos entre todos los valores de elongación obtenidos. En el ensayo de la probeta 4.3, la rotura se presentó en el material base, muy lejos de la zona soldada; además se aprecia la presencia de una discontinuidad en la zona de rotura. Es por esto que no se tomó en cuenta para el promedio.

Tabla 4.5. Ensayo de tracción de probetas con material de aporte – 2 pasadas

Ensayo de tracción de probetas con material de aporte – 2 pasadas										
Probeta	Pasadas de soldadura	Sección transversal	Cargas (kN)		Esfuerzos (MPa)		Ductilidad			
		Área (mm ²)	Fuerza de fluencia	Fuerza máxima	Esfuerzo de fluencia ($\sigma_{0.2}$)	Esfuerzo máximo ($\sigma_{m\acute{a}x}$)	Longitud entre marcas (mm)	Longitud final entre marcas (mm)	Elongación (%)	Zona de rotura (medida desde el centro del cordón en mm)
4.1	2	24.62	8.4	11.5	340.8	468.4	50	55.7	11.5	109
4.2	2	24.41	8.4	11.5	344.1	470.6	50	55.9	11.9	45
*4.3	2	24.83	8.3	11.3	332.3	454.3	50	52.5	5.0	110
Promedio					342.4	469.5			11	77

(*) Probeta descartada para calcular el promedio.

4.1.6. Discusión de resultados de los ensayos de tracción de las uniones soldadas

- **Esfuerzo de fluencia ($\sigma_{0.2}$):** En la figura 4.1 se muestra en un diagrama de barras, la comparación entre los esfuerzos de fluencia promedio entre las probetas soldadas y el material base del acero ASTM A36 utilizado. Se observa que los esfuerzos de fluencia disminuyen al soldar el material cualquiera sean los parámetros utilizados, obteniéndose valores muy similares entre las probetas soldadas con sólo una pasada y con dos pasadas, con y sin material de aporte.

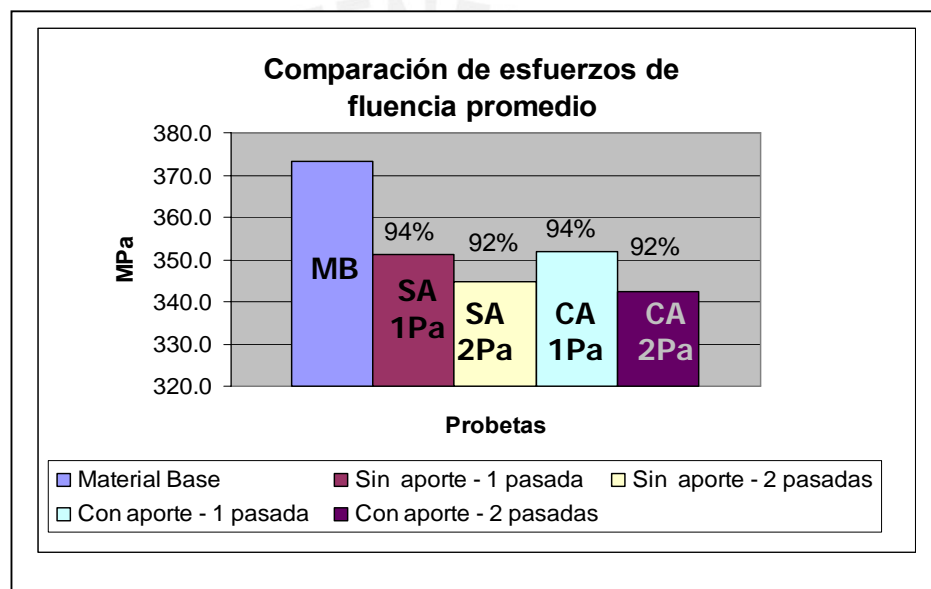


Figura 4.1. Comparación de esfuerzos de fluencia promedio en probetas soldadas.

- **Esfuerzo máximo ($\sigma_{m\acute{a}x}$):** En la figura 4.2 se muestra en un diagrama de barras, la comparación entre los esfuerzos máximos promedio entre las probetas soldadas y el material base del acero ASTM A36 utilizado. Se observa un comportamiento similar respecto a los esfuerzos de fluencia, pues los esfuerzos máximos a la tracción disminuyen al soldar el material, cualquiera sean los parámetros utilizados. Se aprecia que los valores de las probetas soldadas con dos pasadas alcanzaron valores muy similares. Los mayores valores los alcanzaron las probetas soldadas con una sola pasada, siendo las probetas soldadas sin material de aporte las que alcanzaron mayores valores de esfuerzos máximos a la tracción.

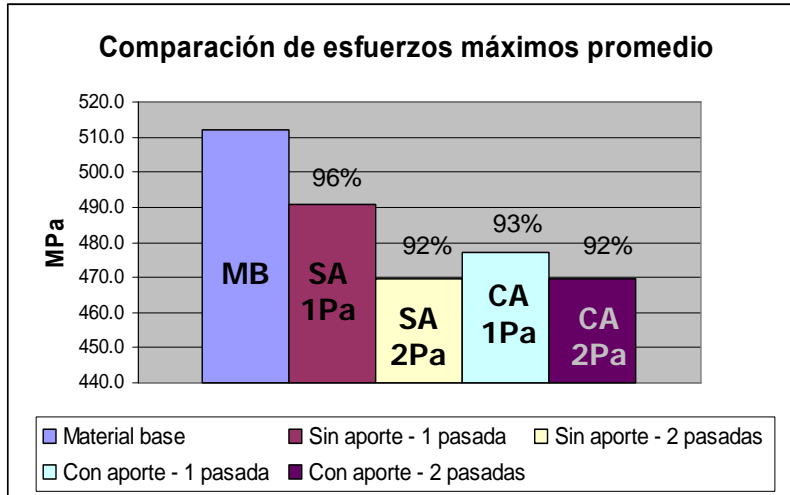


Figura 4.2. Comparación de esfuerzos máximos promedio en probetas soldadas.

- Ductilidad (%ε):** En la figura 4.3 se muestra en un diagrama de barras, la comparación entre los porcentajes de elongación promedio entre las probetas soldadas y el material base del acero ASTM A36 utilizado. Se observa que los valores de elongación disminuyen al soldar el material, cualquiera sean los parámetros utilizados. Se aprecia que los mayores valores de porcentaje de elongación lo presentan las probetas soldadas sin material de aporte con una sola pasada, seguidas por las probetas soldadas sin material de aporte con dos pasadas. Los valores más bajos de porcentajes de elongación para este ensayo de tracción, los alcanzaron las probetas soldadas con material de aporte con una y dos pasadas.

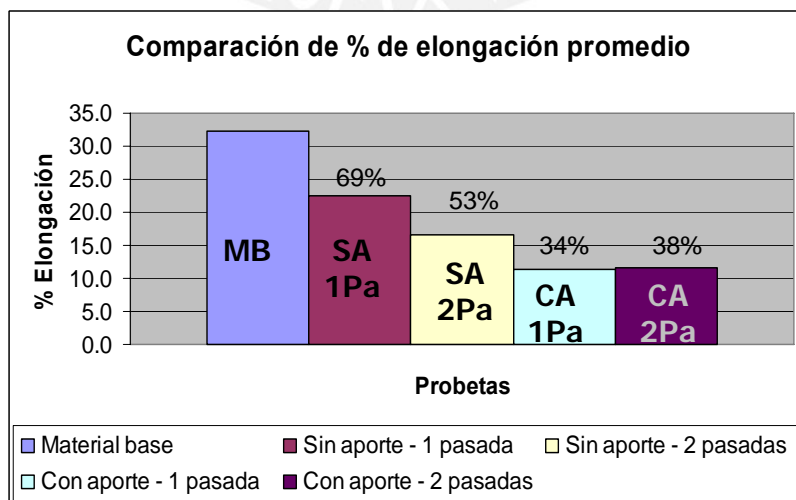


Figura 4.3. Comparación de porcentaje de elongación promedio en probetas soldadas.

4.2. Ensayo de microdureza Vickers

En las siguientes tablas y gráficos se muestran los resultados de los ensayos de microdureza realizados en las probetas hechas de los cupones soldados con diferentes parámetros de soldadura. Las indentaciones se realizaron desde el centro de la probeta (zona de fusión), hasta llegar al material base a la derecha. La distancia entre indentación e indentación fue de 0,5 milímetros en la zona afectada por el calor; cuando se llegó al material base, la distancia entre indentaciones fue de 2 milímetros.

4.2.1. Uniones sin material de aporte – 1 pasada (Probeta 1)

En la tabla 4.6 se muestran los valores de dureza obtenidos mediante el ensayo de microdureza Vickers realizado en la probeta soldada sin material de aporte con una sola pasada. Se realizaron trece indentaciones partiendo el centro de la probeta (zona de fusión), hasta 9.5 milímetros a la derecha, es decir hasta estar en el material base.

Tabla 4.6. Ensayo de dureza de probeta sin material de aporte – 1 pasada

PROBETA 1: Sin material de aporte - 1 pasada					
Número de huella	Distancia del centro a la huella (mm)	Diagonal 1 (μm)	Diagonal 2 (μm)	Diagonal promedio (μm)	HV
1	0.5	52.5	48.0	50.25	146.9
2	1.0	53.5	49.5	51.50	139.8
3	1.5	52.5	50.0	51.25	141.2
4	2.0	53.0	51.5	52.25	135.9
5	2.5	52.0	51.0	51.50	139.8
6	3.0	55.0	50.5	52.75	133.3
7	3.5	54.5	51.5	53.00	132.0
8	4.0	53.0	52.0	52.50	134.6
9	4.5	53.5	53.0	53.25	130.8
10	5.0	53.0	52.5	52.75	133.3
11	5.5	54.0	53.5	53.75	128.4
12	7.5	55.5	52.0	53.75	128.4
13	9.5	54.5	53.0	53.75	128.4

En la figura 4.4 se muestra la curva de dureza obtenida con todos los valores de dureza. Se observa que los mayores valores de dureza obtenidos se encuentran en el centro de la probeta, es decir, la zona de fusión. Esta zona alcanzó la más alta temperatura y también la mayor velocidad de enfriamiento, por ello su dureza

aumenta, a diferencia de las zonas alejadas. A medida que las indentaciones se van alejando de la zona fundida, los valores de dureza disminuyen hasta llegar a la dureza del material base. Para esta probeta no se alcanzaron dureza muy elevadas en el centro de la probeta; la mayor dureza alcanzada en esta probeta fue de 147 HV en la zona de fusión. Asimismo en la figura 4.4 se muestra la tendencia de la curva de dureza que va desde el centro de la unión soldada hasta llegar al material base. Los valores de dureza alcanzados por esta probeta soldada sin material de aporte con una sola pasada, obtenidos en el centro de la unión soldada (zona de fusión) fueron los menores valores alcanzados en comparación a las demás probetas. Es por esta razón que la curva de tendencia es la más suave entre las cuatro probetas. Se aprecia también que la zona afectada por el calor presenta un valor de 5,5 milímetros desde el centro de la probeta.

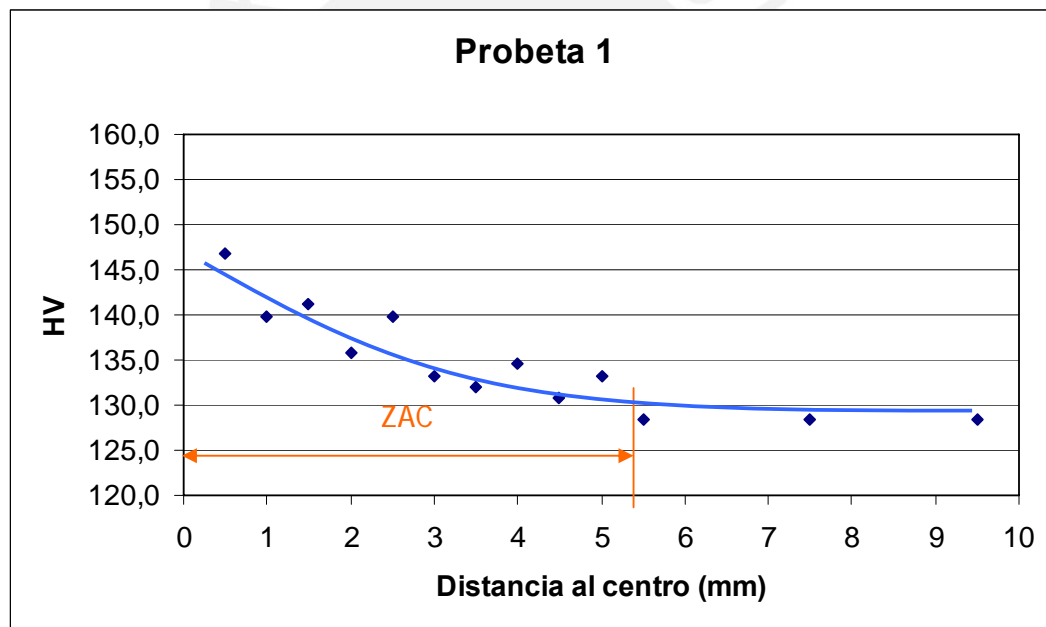


Figura 4.4. Curva de dureza HV para la probeta sin material de aporte – 1 pasada

4.2.2. Uniones sin material de aporte – 2 pasadas (Probeta 2)

En la tabla 4.7 se muestran todos los valores de dureza obtenidos mediante el ensayo de microdureza Vickers realizado en la probeta soldada sin material de aporte con dos pasadas. Se realizaron trece indentaciones partiendo el centro de la probeta (zona de fusión), hasta 10,5 milímetros a la derecha, es decir hasta estar en el material base.

Tabla 4.7. Ensayo de dureza de probeta sin material de aporte – 2 pasadas

PROBETA 2: Sin material de aporte - 2 pasadas					
Número de huella	Distancia del centro a la huella (mm)	Diagonal 1 (μm)	Diagonal 2 (μm)	Diagonal promedio (μm)	HV
1	0.5	47.0	46.0	46.50	171.5
2	1.0	48.0	47.0	47.50	164.4
3	1.5	50.0	47.0	48.50	157.7
4	2.0	50.0	46.0	48.00	161.0
5	2.5	51.0	48.0	49.50	151.4
6	3.0	48.0	48.0	48.00	161.0
7	3.5	52.5	50.0	51.25	141.2
8	4.0	54.0	52.0	53.00	132.0
9	4.5	54.5	54.0	54.25	126.0
10	5.5	54.0	53.0	53.50	129.6
11	6.5	54.0	54.5	54.25	126.0
12	8.5	55.0	54.0	54.50	124.9
13	10.5	55.5	53.5	54.50	124.9

En la figura 4.5 se muestra la curva de dureza realizada con todos los valores de dureza obtenidos con este ensayo para la probeta. Se observa, que al igual que la muestra anterior, los mayores valores de dureza obtenidos se encuentran en el centro de la probeta, es decir, la zona de fusión. Esta probeta alcanzó durezas de 171 HV, mayores que en las obtenidas con la probeta 1. A medida que las indentaciones se iban haciendo hacia la derecha, los valores de dureza iban disminuyendo hasta llegar a la dureza del material base. Asimismo en la figura 4.5 se muestra la tendencia de la curva de dureza que va desde el centro de la unión soldada hasta llegar al material base. En esta curva de tendencia se observa claramente el aumento de la dureza en el centro de la unión soldada con respecto a la probeta 1. Se aprecia también que la zona afectada por el calor llega hasta 6.5 milímetros hacia la derecha del centro de la probeta (zona de fusión).

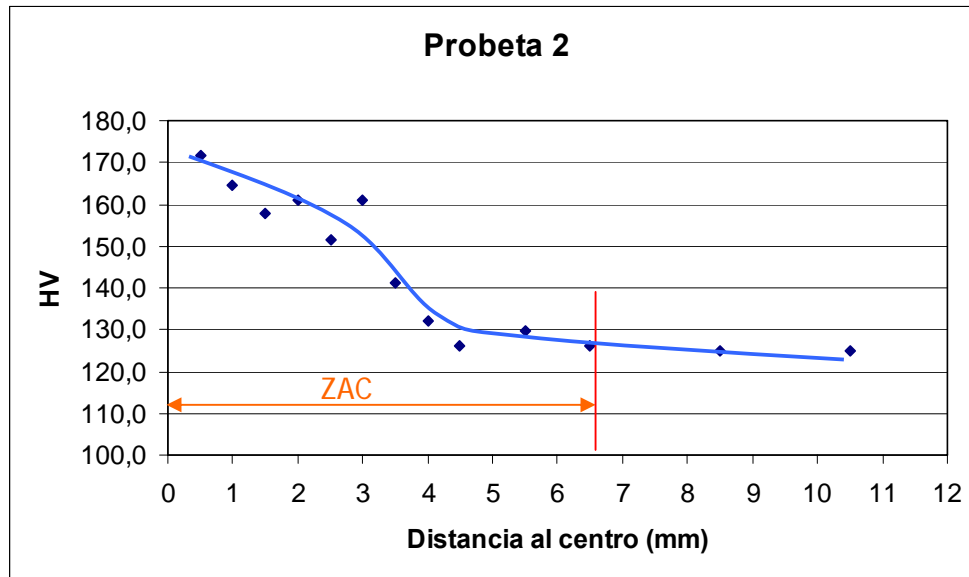


Figura 4.5. Curva de dureza HV para la probeta sin material de aporte – 2 pasadas

4.2.3. Uniones con material de aporte – 1 pasada (Probeta 3)

En la tabla 4.8 se muestran los valores de dureza obtenidos mediante el ensayo de microdureza Vickers realizado en la probeta soldada con material de aporte con una pasada. Se realizaron catorce indentaciones partiendo el centro de la probeta (zona de fusión), hasta 7.5 milímetros a la derecha, es decir hasta estar en el material base.

Tabla 4.8. Ensayo de dureza de probeta con material de aporte – 1 pasada

PROBETA 3: Con material de aporte - 1 pasadas					
Número de huella	Distancia del centro a la huella (mm)	Diagonal 1 (µm)	Diagonal 2 (µm)	Diagonal promedio (µm)	HV
1	0.5	50.0	50.0	50.00	148.4
2	1.0	50.0	50.0	50.00	148.4
3	1.5	50.0	50.0	50.00	148.4
4	2.0	53.5	51.0	52.25	135.9
5	2.5	53.5	52.0	52.75	133.3
6	3.0	52.5	52.5	52.50	134.6
7	3.5	53.0	53.0	53.00	132.0
8	4.0	54.0	53.0	53.50	129.6
9	4.5	56.0	51.5	53.75	128.4
10	5.0	56.5	54.0	55.00	122.6
11	5.5	56.0	56.0	55.00	122.6
12	6.0	56.5	54.5	55.50	120.4
13	6.5	56.5	55.5	56.00	118.3
14	7.5	56.5	56.0	56.25	117.2

En la figura 4.6 se muestra la curva de dureza realizada con todos los valores de dureza obtenidos con este ensayo para la probeta soldada con material de aporte con una pasada (probeta 3). Se observa que los mayores valores de dureza obtenidos se encuentran en el centro de la probeta, es decir, la zona de fusión. Esta probeta alcanzó durezas de 148 HV, similares a las obtenidas por la probeta soldada sin material de aporte con una pasada (probeta 1). A medida que las indentaciones se iban haciendo hacia la derecha, los valores de dureza iban disminuyendo hasta llegar a la dureza del material base. Asimismo se muestra la tendencia de la curva de dureza que va desde el centro de la unión soldada hasta llegar al material base. En esta curva de tendencia se observa, como en la probeta 1, que la variación de durezas entre el centro de la unión soldada y el material base, no es tan alta como en el caso de la probeta 2. Se aprecia también que la zona afectada por el calor llega hasta 6 milímetros desde el centro de la probeta.

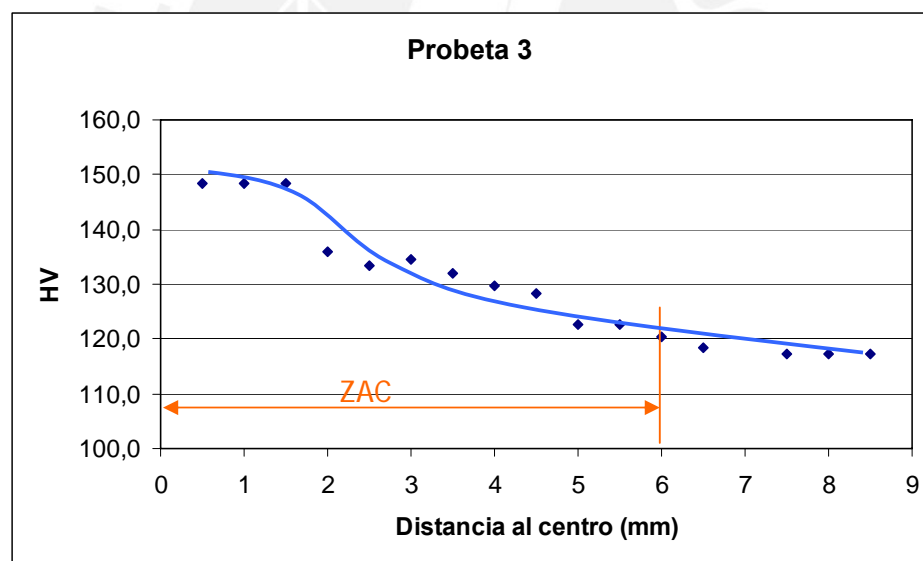


Figura 4.6. Curva de dureza HV para la probeta con material de aporte – 1 pasada

4.2.4. Uniones con material de aporte – 2 pasadas (Probeta 4)

En la tabla 4.9 se muestran los valores de dureza obtenidos mediante el ensayo de microdureza Vickers realizado en la probeta soldada con material de aporte con dos pasadas. Se realizaron catorce indentaciones partiendo el centro de la probeta (zona de fusión), hasta llegar al material base.

Tabla 4.9. Ensayo de dureza de probeta con material de aporte – 2 pasadas

PROBETA 4: Con material de aporte - 2 pasadas					
Número de huella	Distancia del centro a la huella (mm)	Diagonal 1 (μm)	Diagonal 2 (μm)	Diagonal promedio (μm)	HV
1	0.5	43.0	44.0	43.50	196.0
2	1.0	43.5	45.0	44.25	189.4
3	1.5	44.0	45.0	44.50	187.3
4	2.0	44.0	44.5	44.25	189.4
5	2.5	45.0	45.0	45.00	183.2
6	3.0	45.0	46.5	45.75	177.2
7	3.5	45.0	46.5	45.75	177.2
8	4.0	49.0	49.0	49.00	154.5
9	4.5	50.5	51.5	51.00	142.6
10	5.5	51.5	51.5	51.50	139.8
11	6.5	55.0	53.0	54.00	127.2
12	7.5	54.0	51.5	52.75	133.3
13	8.5	56.5	54.0	55.25	121.5
14	9.5	57.0	55.0	56.00	118.3

En la figura 4.7 se muestra la curva de dureza obtenida. Se observa que los mayores valores de dureza obtenidos se encuentran en el centro de la probeta, es decir, la zona de fusión. Esta probeta alcanzó durezas de 196 HV, mayores que en las obtenidas con las probeta 3. A medida que las indentaciones se iban haciendo hacia la derecha, los valores de dureza iban disminuyendo hasta llegar a la dureza del material base. Asimismo se muestra la tendencia de la curva de dureza que va desde el centro de la unión soldada hasta llegar al material base. En esta curva de tendencia se observa la gran variación de dureza entre el centro de la unión soldada y el material base; la variación es superior a los ensayos anteriores. Se aprecia también que la zona afectada por el calor llega hasta 8.5 milímetros desde el centro de la probeta.

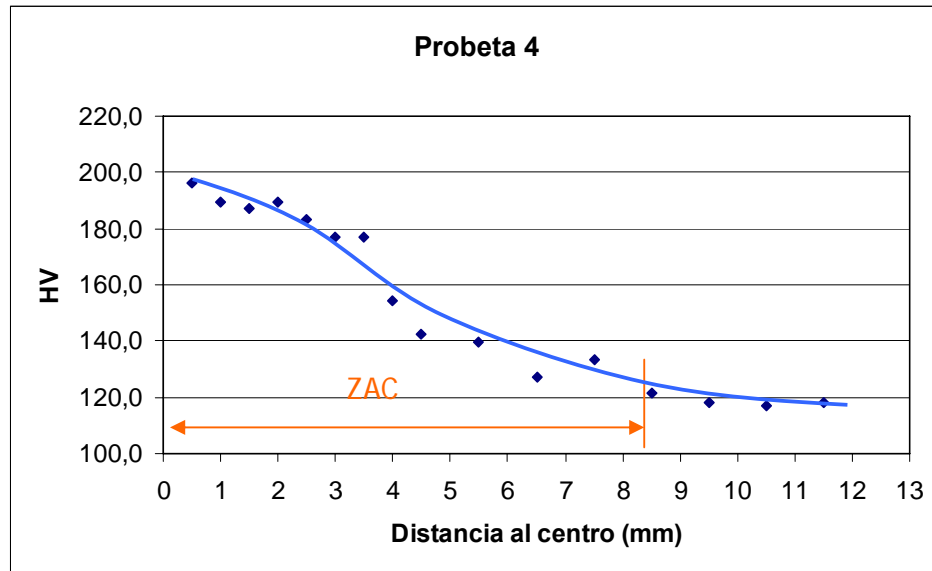


Figura 4.7. Curva de dureza HV para la probeta con material de aporte – 2 pasadas

- **Zona de rotura:** En la tabla 4.10 se muestran las longitudes de las ZAC de las cuatro probetas soldadas con sus diferentes parámetros, indicando la zona y lugar de rotura.

Tabla 4.10. Longitudes de ZAC de las probetas soldadas

Probeta	Material de aporte	Número de pasadas	Ancho total de ZAC (mm)	Zona de rotura medida desde el centro (mm)
1	Sin material de aporte	1 pasada	11	28 (Material base)
2	Sin material de aporte	2 pasadas	13	37 (Material base)
3	Con material de aporte	1 pasada	12	77 (Material base)
4	Con material de aporte	2 pasadas	17	46 (Material base)

Se aprecia que la rotura en todas las muestras se ubicó en el material base, en una zona alejada de la ZAC, indicando que los valores de las propiedades mecánicas obtenidas en el ensayo de tracción fueron los del material base y no del metal de soldadura ni de la zona afectada por el calor.

4.3. Ensayo de doblado

En las siguientes figuras se muestran los resultados de los ensayos de doblado, de cara y de raíz, realizados en las probetas hechas de los cupones soldados con diferentes parámetros de soldadura.

En las figuras 4.12 y 4.13 se muestran las probetas soldadas sin material de aporte con una sola pasada, con doblado de cara y de raíz respectivamente. Se aprecia que en ninguno de los dos casos se presentan fisuras ni agrietamientos.



Figura 4.12. Doblado de cara en la probeta 1



Figura 4.13. Doblado de raíz en la probeta 1

En las figuras 4.14 y 4.15 se muestran las probetas soldadas sin material de aporte con dos pasadas, con doblado de cara y de raíz respectivamente. Se aprecia que en ninguno de los dos casos se presentan fisuras ni agrietamientos.



Figura 4.14. Doblado de cara en la probeta 2



Figura 4.15. Doblado de raíz en la probeta 2

En las figuras 4.16 y 4.17 se muestran las probetas soldadas con material de aporte con una sola pasada, con doblado de cara y de raíz respectivamente.

Se aprecia que en ninguno de los dos casos se presentan fisuras ni agrietamientos.



Figura 4.16. Doblado de cara en la probeta 3 **Figura 4.17.** Doblado de raíz en la probeta 3

En las figuras 4.18 y 4.19 se muestran las probetas soldadas con material de aporte con doblado de cara y de raíz respectivamente. Se aprecia que en ninguno de los dos casos se presentan fisuras ni agrietamientos.



Figura 4.18. Doblado de cara en la probeta 4 **Figura 4.19.** Doblado de raíz en la probeta 4

4.4. Metalografía

En las siguientes figuras se muestran los resultados de la metalografía y la caracterización microestructural de las secciones transversales de las cuatro probetas soldadas mediante el proceso GTAW con diferentes parámetros. Se caracterizaron las tres zonas de las probetas soldadas, es decir, el material base, la zona afectada térmicamente (ZAT) y la zona fusión para las probetas soldadas sin material de aporte y el metal de soldadura para las probetas soldadas con material de aporte. Para las fotomicrografías se utilizaron aumentos de 200X y 500X.

4.4.1. Probeta sin material de aporte – 1 pasada

Figura 4.20. Material base izquierda (x200)

Figura 4.21. ZAT izquierda (x200)

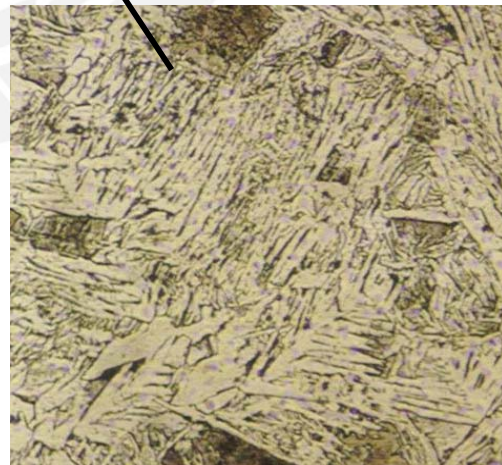
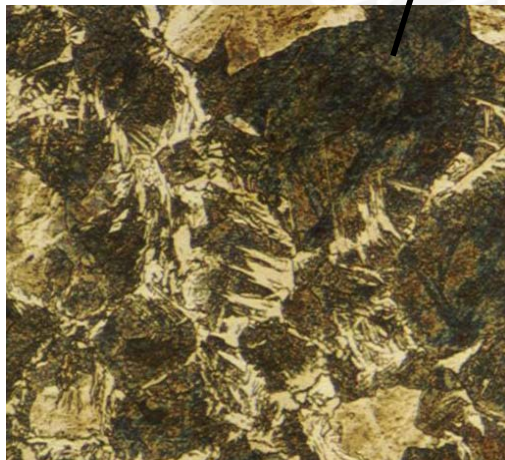
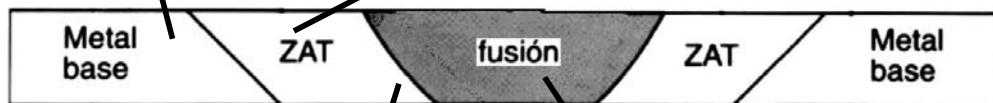
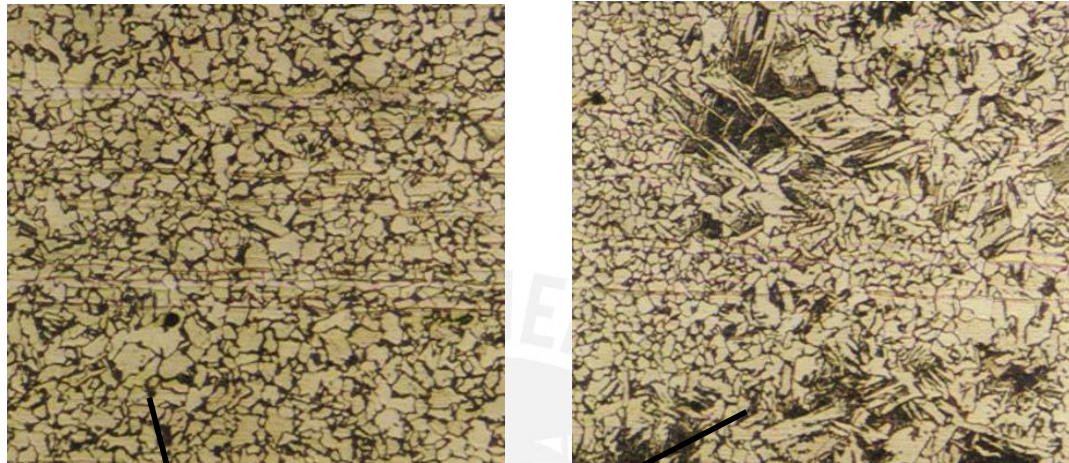


Figura 4.22. ZAT izquierda (x200)

Figura 4.23. Zona de fusión (x200)

a) **Material base:** En la figura 4.20 se muestra el material base de la sección izquierda de la probeta sin material de aporte con una pasada, a 200 aumentos.

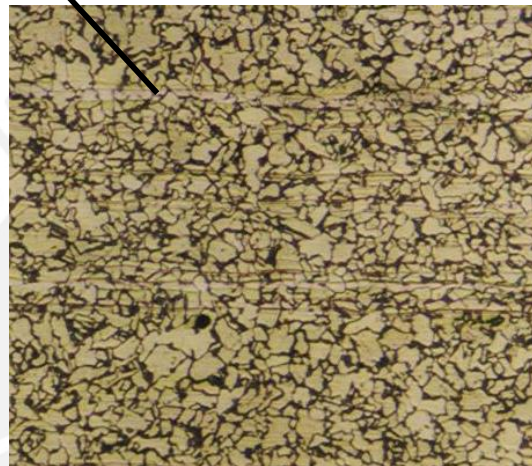
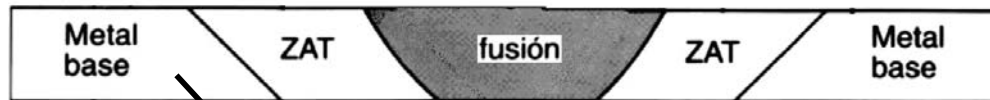


Figura 4.20. Material base izquierda (x200)

Microestructura:

Matriz	: Ferrita equiaxial.
Otros	: Perlita laminar fina 10% y carburo globular fino.
Tamaño de grano	: N° 8 - ASTM E112-97.
Inclusiones	: Del tipo sulfuro serie fina N°2 - ASTM E45 – 96.

Caracterización:

Material	: Microestructura compatible con acero de bajo carbono.
Estado del material	: Compatible con estado de normalizado.
Material de aporte	: Sin material de aporte.
Tipo de discontinuidad	: Perlita ligeramente deformada.

b) Zona afectada térmicamente: En las figuras 4.21 y 4.22 se muestra la zona afectada térmicamente de la sección izquierda de la probeta sin material de aporte con una pasada, a 200 aumentos.

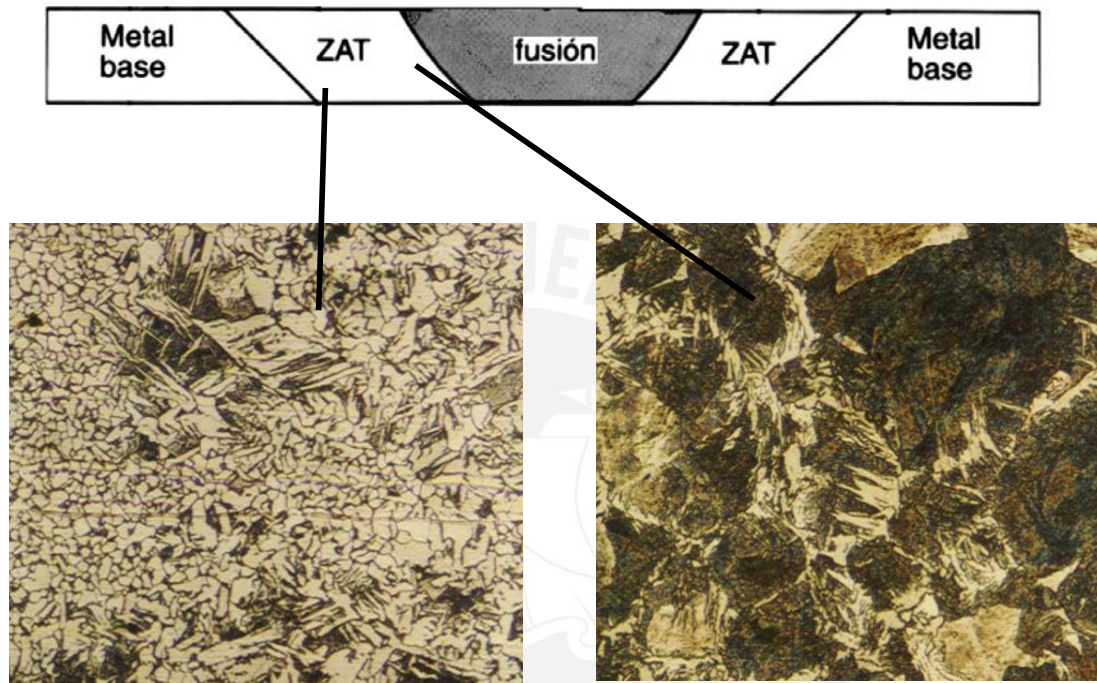


Figura 4.21. ZAT izquierda (x200)

Figura 4.22. ZAT izquierda (x200)

Microestructura:

- Matriz : Ferrita acicular, reticular y equiaxial.
- Otros : Perlita fina globulizada y carburo globular fino.
- Tamaño de grano : ASTM E112 - 97.
- Inclusiones : Del tipo sulfuro. ASTM E45 – 96.

Caracterización:

- Material : Microestructura compatible con acero de bajo carbono.
- Estado : Microestructura compatible con zona afectada térmicamente.
- Material de aporte : Sin material de aporte.
- Tipo de discontinuidad : Microestructura distorsionada.

c) **Zona de fusión:** En la figura 4.23 se muestra la zona de fusión de la probeta sin material de aporte con una pasada, a 200 aumentos.

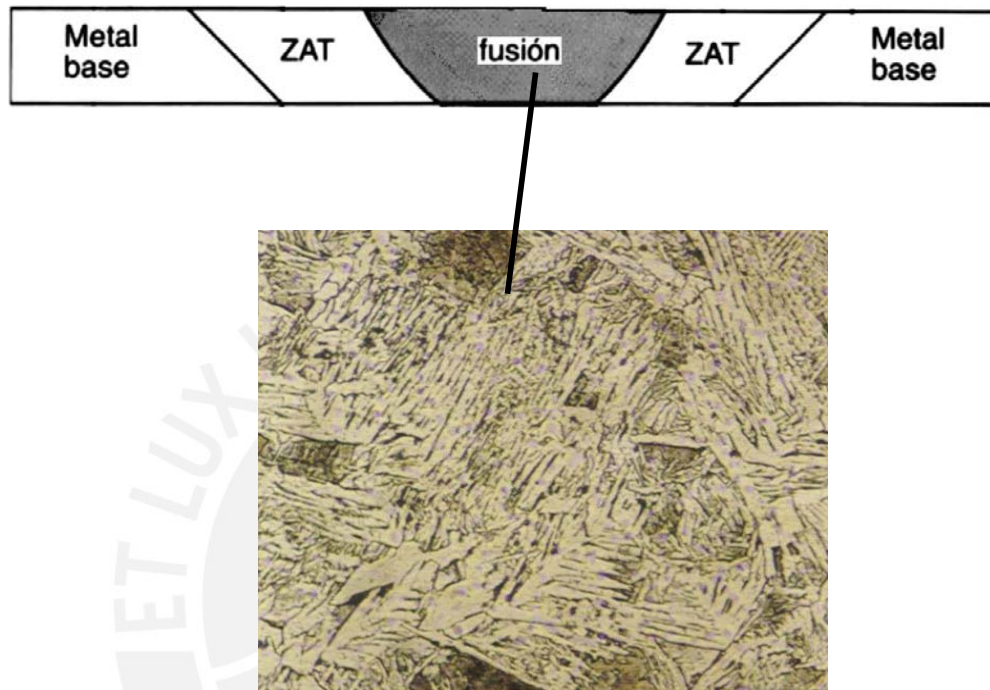


Figura 4.23. Zona de fusión (x200)

Microestructura:

Matriz	: Ferrita acicular y reticular.
Otros	: Carburo globular fino.
Tamaño de grano	: N° 8 - ASTM E112 – 97.
Inclusiones	: Del tipo no metálico. ASTM E45 – 96.

Caracterización:

Material	: Microestructura compatible con acero de bajo carbono.
Estado	: Microestructura compatible con estado de colada.
Material de aporte	: Sin material de aporte.
Tipo de discontinuidad	: Microestructura ferrítica acicular.

4.4.2. Probeta sin material de aporte – 2 pasadas

Figura 4.24. Material base (x200)

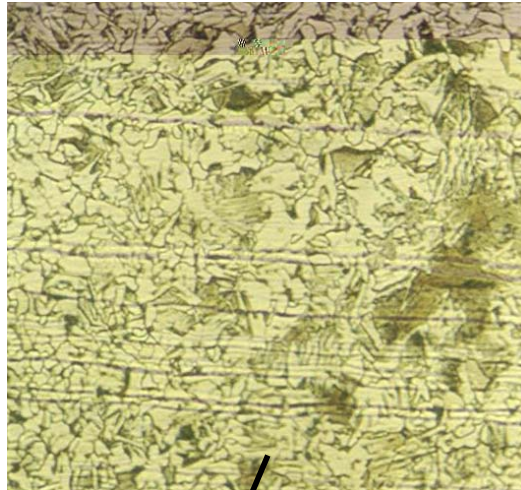


Figura 4.25. ZAT izquierda (x200)

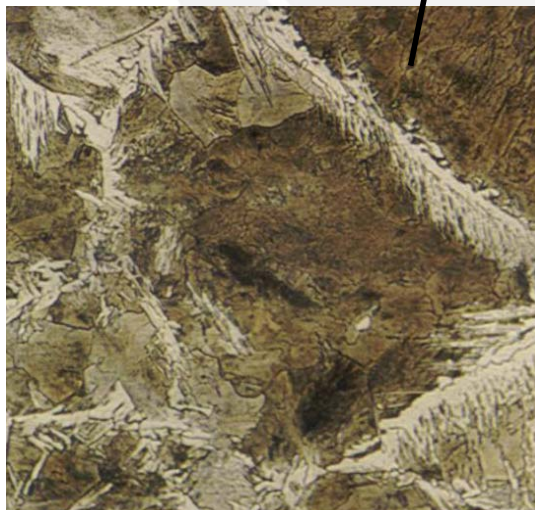
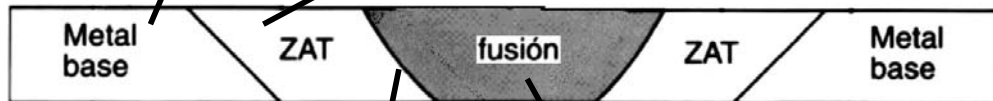


Figura 4.26. ZAT izquierda (x200)



Figura 4.27. Zona de fusión (x200)

a) **Material base:** En la figura 4.28 se muestra el material base de la sección izquierda de la probeta sin material de aporte con dos pasadas, a 500 aumentos.

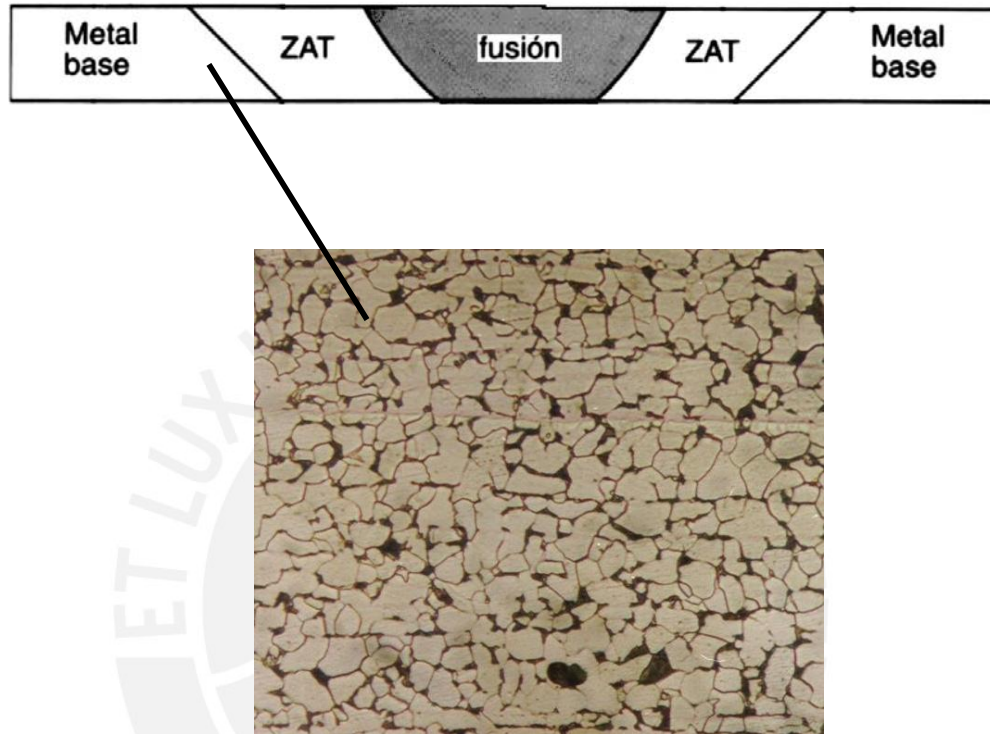


Figura 4.28. Material base (x500)

Microestructura:

Matriz	: Ferrita equiaxial.
Otros	: Perlita laminar fina 10% y carburo globular fino.
Tamaño de grano	: N° 8 - ASTM E112 – 97.
Inclusiones	: Del tipo sulfuro serie fina N°2 - ASTM E45 – 96.

Caracterización:

Material	: Microestructura compatible con acero de bajo carbono.
Estado	: Microestructura compatible con estado de normalizado.
Material de aporte	: Sin material de aporte.
Tipo de discontinuidad	: Microestructura perlita bandeada y ferrita equiaxial deformada.

b) Zona afectada térmicamente: En las figuras 4.29 y 4.30 se muestran la zona afectada térmicamente de la sección izquierda de la probeta sin material de aporte con dos pasadas, a 500 aumentos.

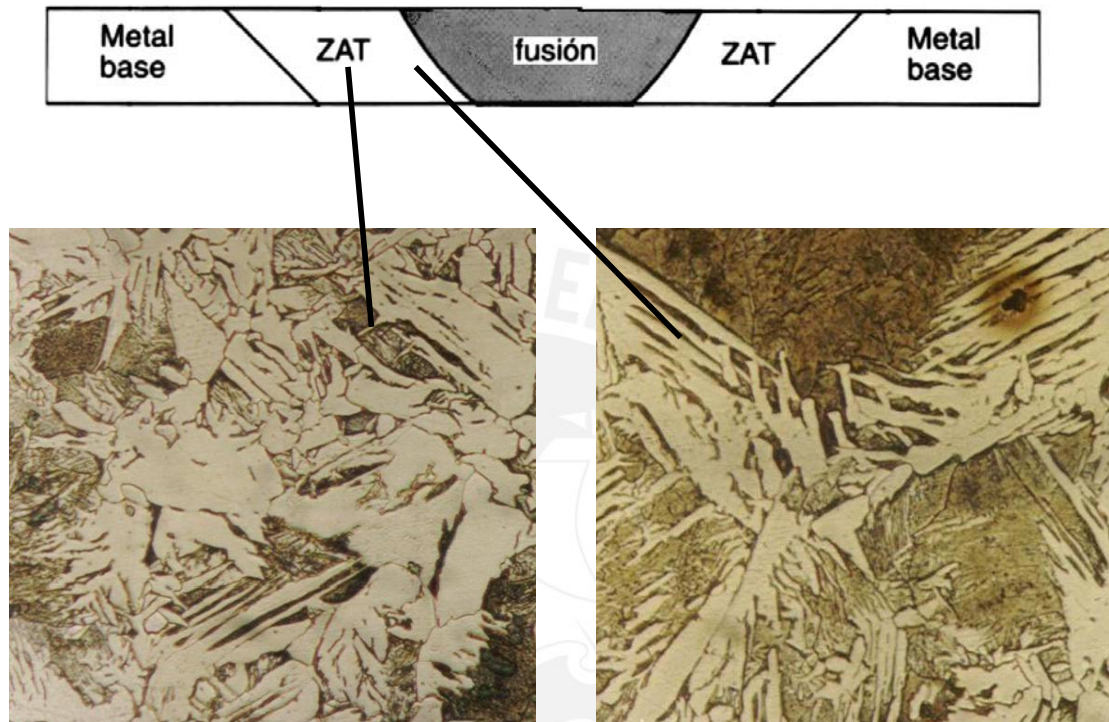


Figura 4.29. ZAT izquierda (x500)

Figura 4.30. ZAT izquierda (x500)

Microestructura:

Matriz	: Ferrita acicular y reticular.
Otros	: Perlita fina esferoidal en colonias y carburo globular fino.
Tamaño de grano	: ASTM E112 – 97.
Inclusiones	: Del tipo sulfuro. ASTM E45 – 96.

Caracterización:

Material	: Microestructura compatible con acero de bajo carbono.
Estado	: Microestructura compatible con zona afectada térmicamente.
Material de aporte	: Sin material de aporte.
Tipo de discontinuidad	: Microestructura distorsionada.

c) **Zona de fusión:** En la figura 4.31 se muestra la zona de fusión de la probeta sin material de aporte con dos pasadas, a 500 aumentos.

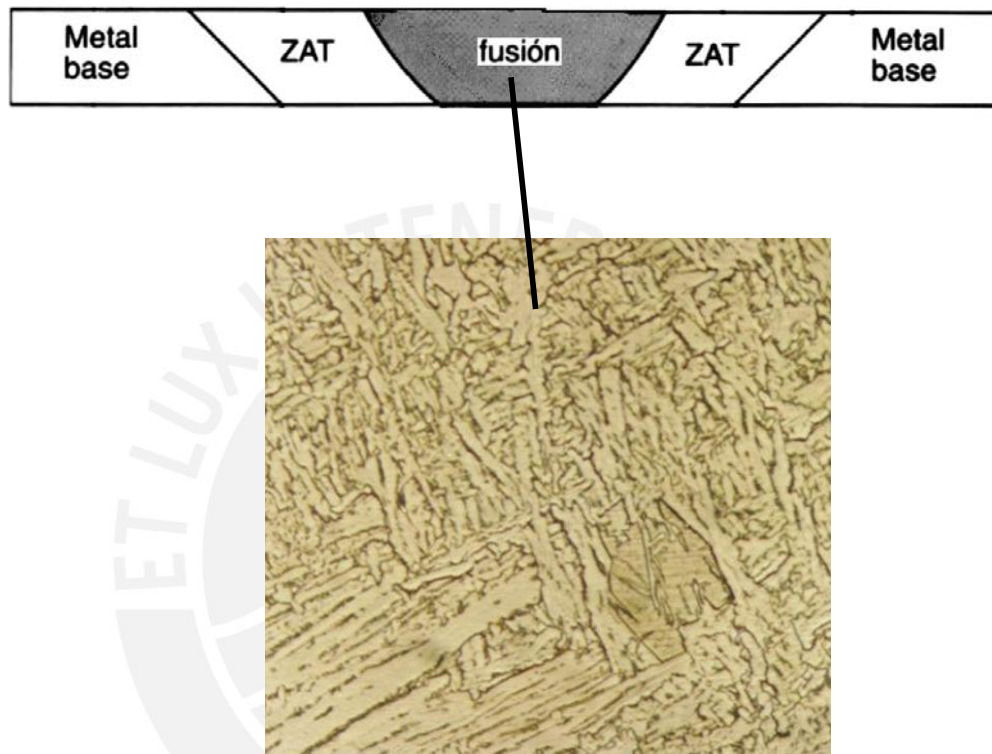


Figura 4.31. Zona de fusión (x500)

Microestructura:

Matriz	: Ferrita acicular y reticular.
Otros	: Carburo globular fino.
Tamaño de grano	: N° 8 - ASTM E112 – 97.
Inclusiones	: Del tipo no metálico. ASTM E45 – 96.

Caracterización:

Material	: Microestructura compatible con acero de bajo carbono.
Estado	: Microestructura compatible con estado de colada.
Material de aporte	: Sin material de aporte.
Tipo de discontinuidad	: Microestructura ferrítica acicular.

4.4.3. Probeta con material de aporte – 1 pasada

Figura 4.32. Material base Izquierda (x200)

Figura 4.33. ZAT izquierda (x200)

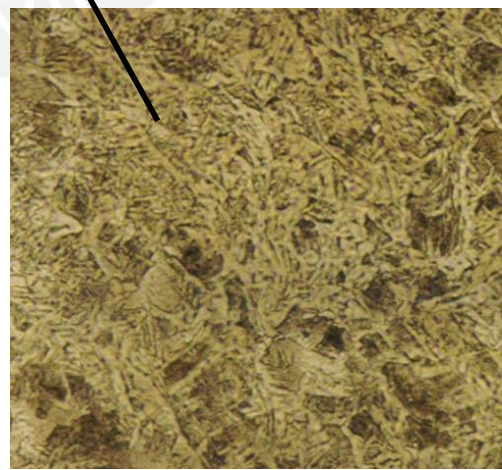
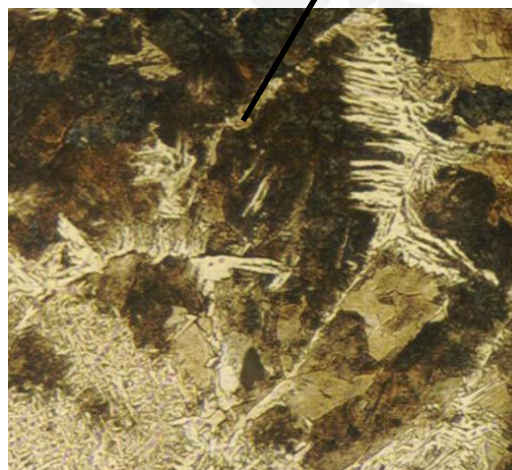
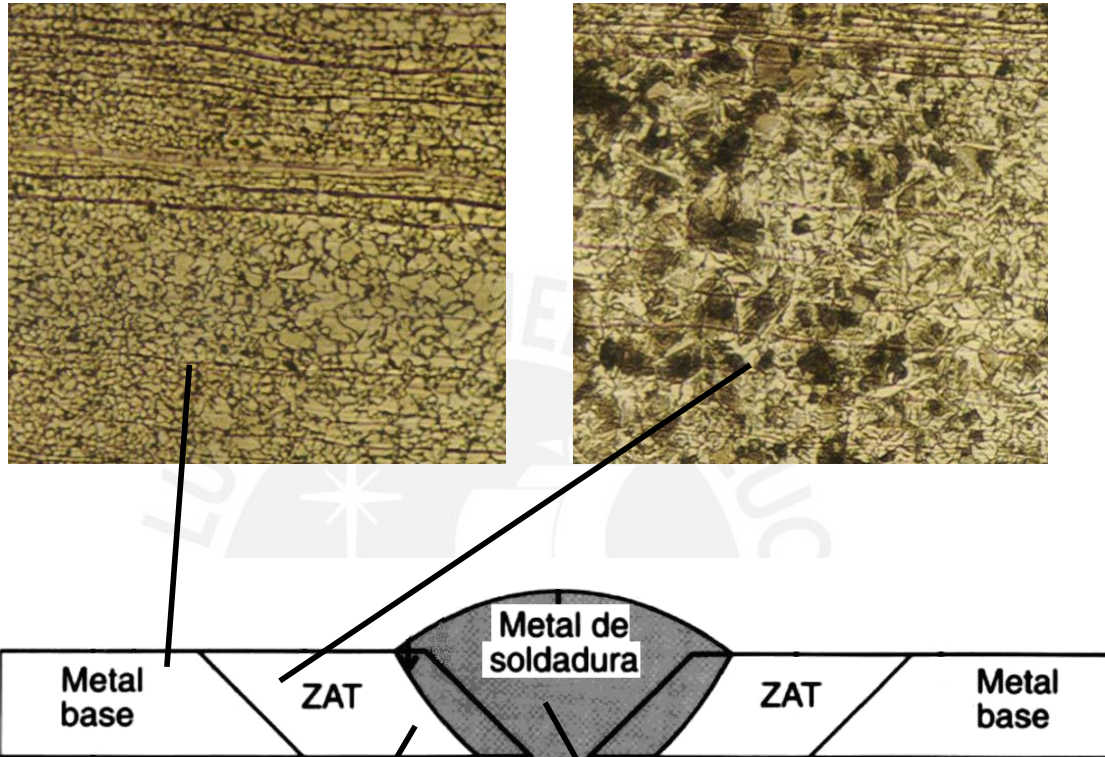


Figura 4.34. ZAT izquierda (x200)

Figura 4.35. Material de aporte (x200)

a) **Material base:** En la figura 4.36 se muestra el material base de la sección izquierda de la probeta con material de aporte con una pasada, a 500 aumentos.

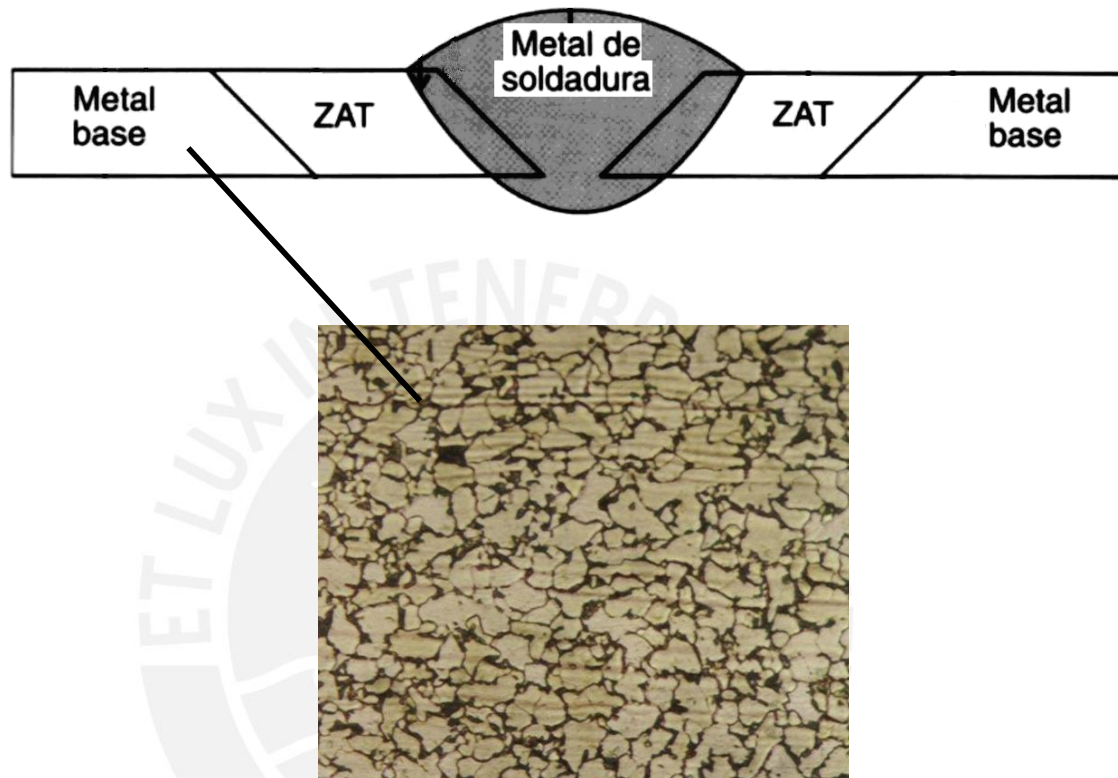


Figura 4.36. Material base izquierda (x500)

Microestructura:

Matriz	: Ferrita equiaxial
Otros	: Perlita laminar fina 7% y carburo globular fino
Tamaño de grano	: N° 8 - ASTM E112 – 97.
Inclusiones	: Del tipo sulfuro serie fina N°2 - ASTM E45 - 96

Caracterización:

Material	: Microestructura compatible con acero de bajo carbono.
Estado	: Microestructura compatible con estado de normalizado.
Material de aporte	: Electrodo ER70 - S6.
Tipo de discontinuidad	: Microestructura perlita ligeramente bandeada.

b) Zona afectada térmicamente: En las figuras 4.37 y 4.38 se muestran la zona afectada térmicamente de la sección izquierda de la probeta con material de aporte con una pasada, a 500 aumentos.

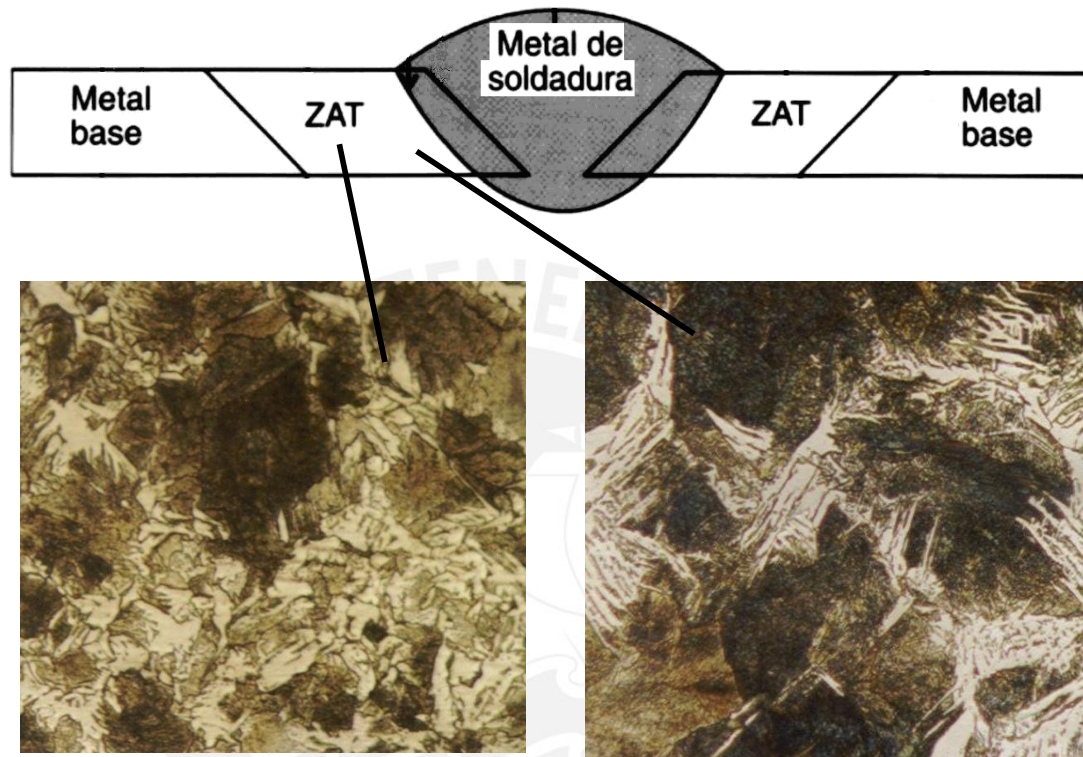


Figura 4.37. ZAT izquierda (x500)

Figura 4.38. ZAT izquierda (x500)

Microestructura:

- Matriz : Ferrita acicular y reticular.
- Otros : Perlita fina esférica y carburo globular fino
- Tamaño de grano : ASTM E112 – 97.
- Inclusiones : Del tipo sulfuro. ASTM E45 – 96.

Caracterización:

- Material : Microestructura compatible con acero de bajo carbono.
- Estado : Microestructura compatible con zona afectada térmicamente.
- Material de aporte : Electrodo ER70 - S6.
- Tipo de discontinuidad : Microestructura distorsionada.

c) **Zona de fusión:** En la figura 4.39 se muestra la zona de fusión de la probeta con material de aporte con una pasada, a 500 aumentos.

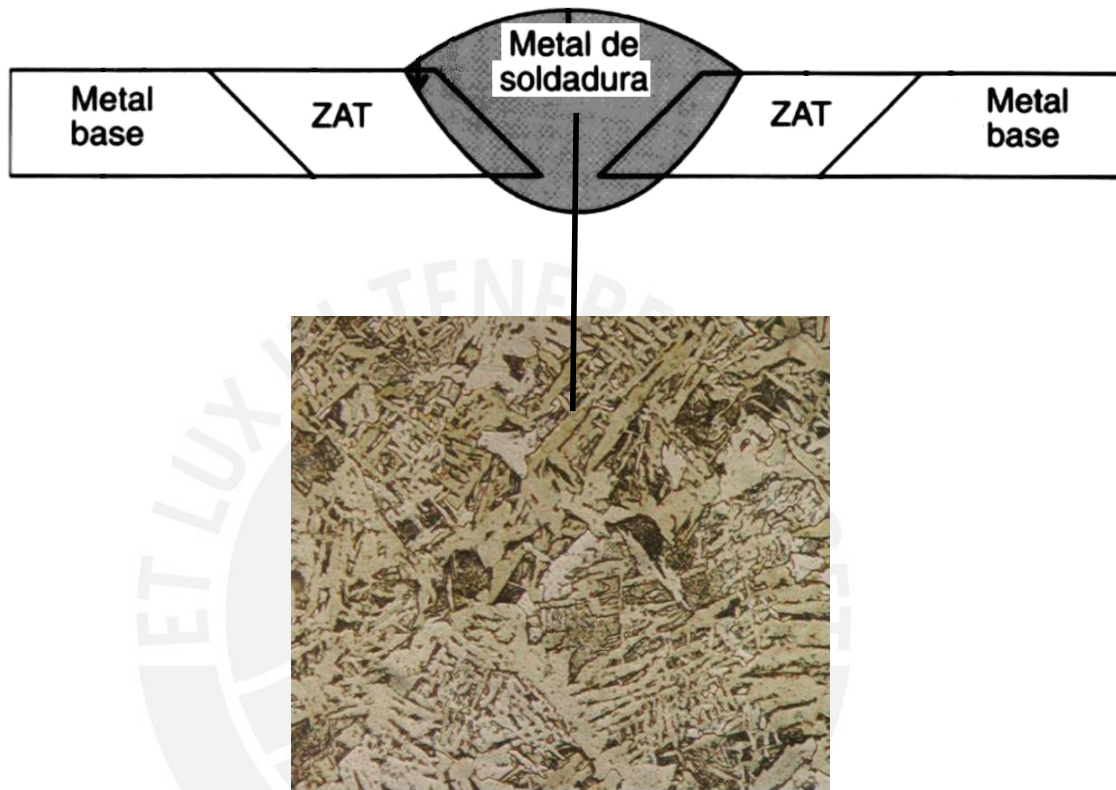


Figura 4.39 Material de aporte (x500)

Microestructura:

Matriz	: Ferrita acicular y reticular.
Otros	: Carburo globular fino y perlita globular.
Tamaño de grano	: ASTM E112 – 97.
Inclusiones	: Del tipo no metálico. ASTM E45 – 96.

Caracterización:

Material	: Microestructura compatible con acero de bajo carbono.
Estado	: Microestructura compatible con estado de colada.
Material de aporte	: Electrodo ER70 - S6.
Tipo de discontinuidad	: Microestructura ferrítica acicular.

4.4.4. Probeta con material de aporte – 2 pasadas

Figura 4.40. Material base (x200)

Figura 4.41. Material base – ZAT (x200)

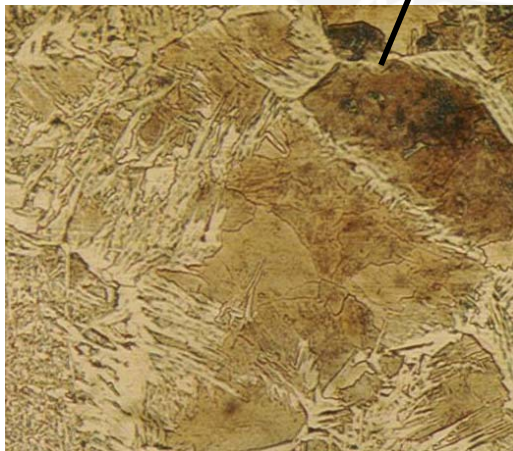
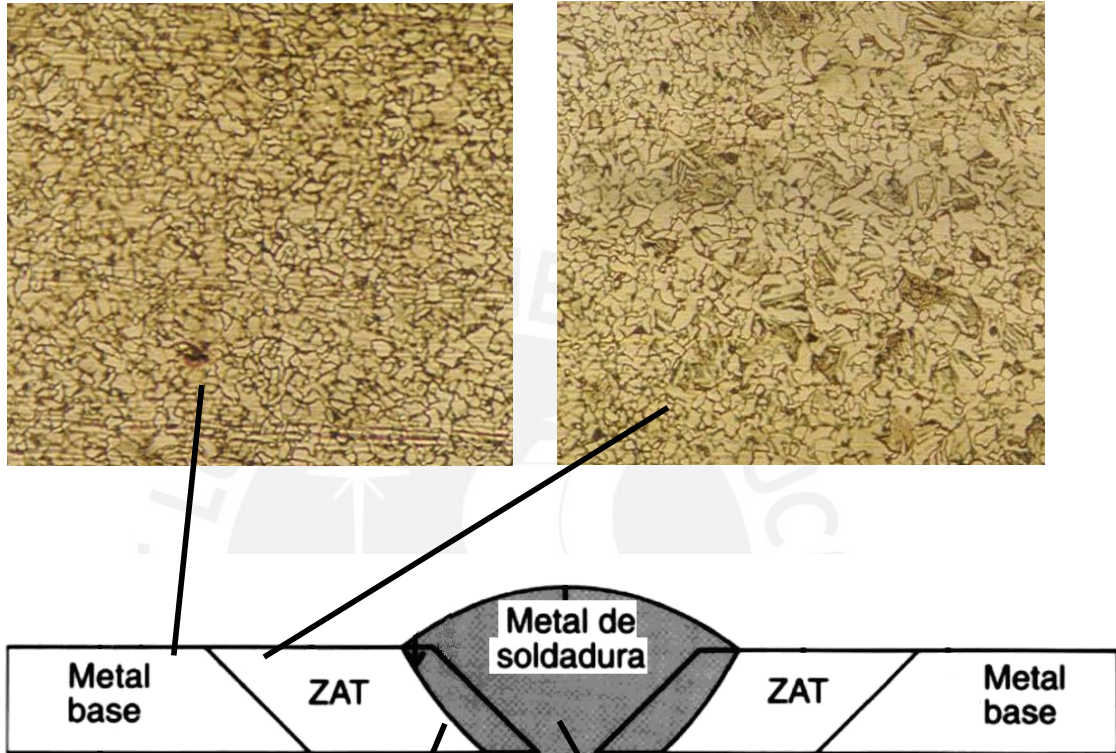


Figura 4.42. ZAT – Material de aporte (x200)

Figura 4.43. Material de aporte (x200)

a) **Material base:** En la figura 4.44 se muestra el material base de la sección izquierda de la probeta con material de aporte con dos pasadas, a 500 aumentos.

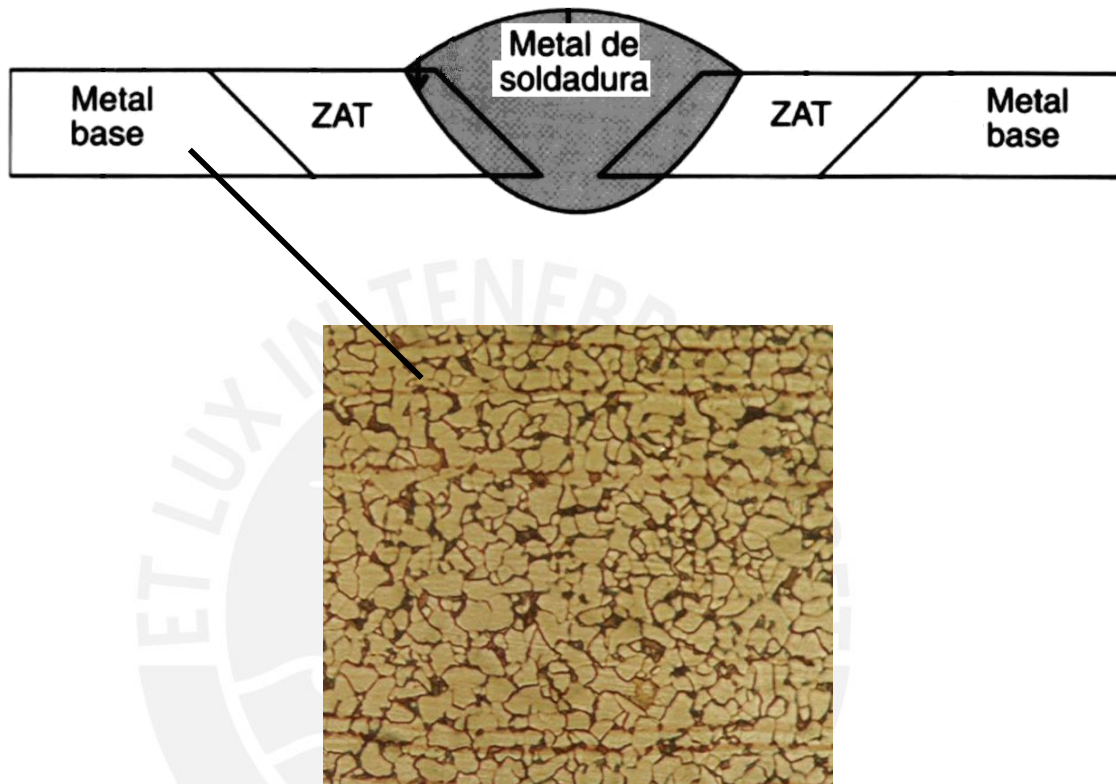


Figura 4.44. Material base izquierda (x500)

Microestructura:

- Matriz : Ferrita equiaxial.
- Otros : Perlita laminar fina 10% y carburo globular fino.
- Tamaño de grano : N° 8 - ASTM E112 – 97.
- Inclusiones : Del tipo sulfuro serie fina N°2 - ASTM E45 – 96.

Caracterización:

- Material : Microestructura compatible con acero de bajo carbono.
- Estado : Microestructura compatible con estado de normalizado.
- Material de aporte : Electrodo ER70 - S6.
- Tipo de discontinuidad : Microestructura perlita bandeada ligeramente.

b) **Zona afectada térmicamente:** En las figuras 4.45 y 4.46 se muestran la zona afectada térmicamente de la sección izquierda de la probeta con material de aporte con una pasada, a 500 aumentos.

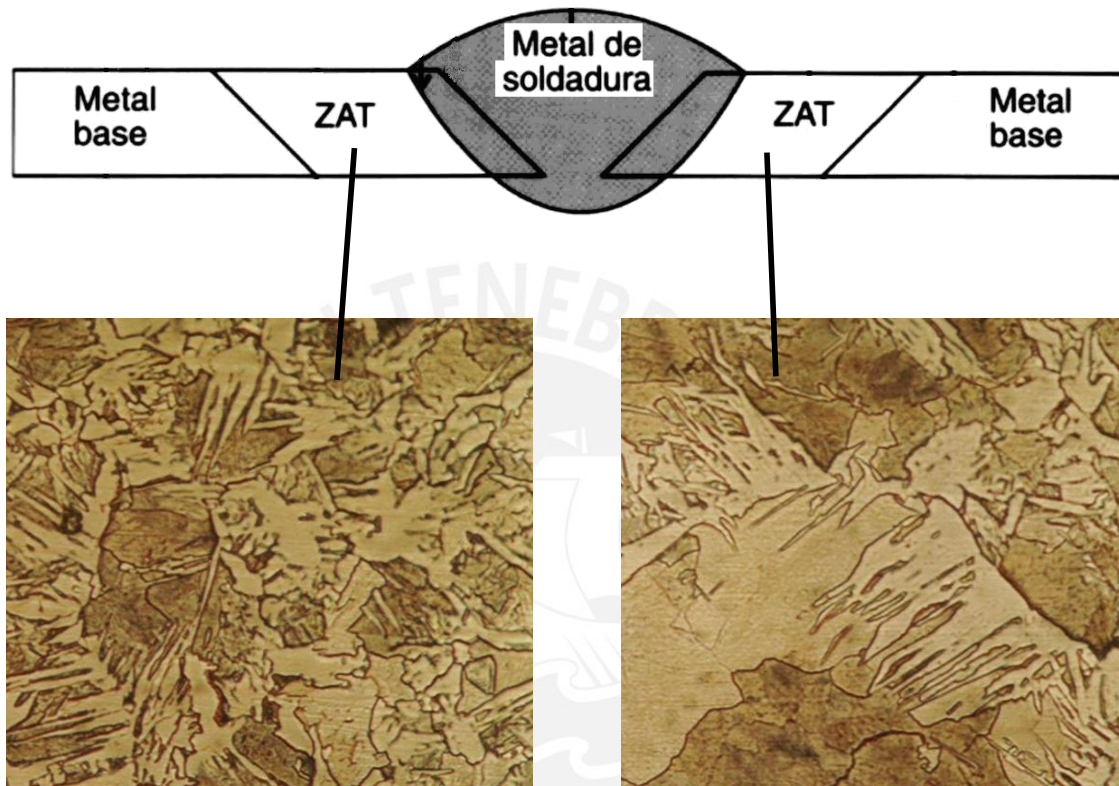


Figura 4.45. ZAC izquierda (x500)

Figura 4.46. ZAC derecha (x500)

Microestructura:

- Matriz : Ferrita acicular y reticular.
- Otros : Carburo globular fino.
- Tamaño de grano : ASTM E112 – 97.
- Inclusiones : Del tipo no metálico. ASTM E45 – 96.

Caracterización:

- Material : Microestructura compatible con acero de bajo carbono.
- Estado : Microestructura compatible con estado de colada.
- Material de aporte : Electrodo ER70 - S6.
- Tipo de discontinuidad : Microestructura ferrítica acicular

c) **Zona de fusión:** En la figura 4.47 se muestra la zona de fusión de la probeta con material de aporte con dos pasadas, a 500 aumentos.

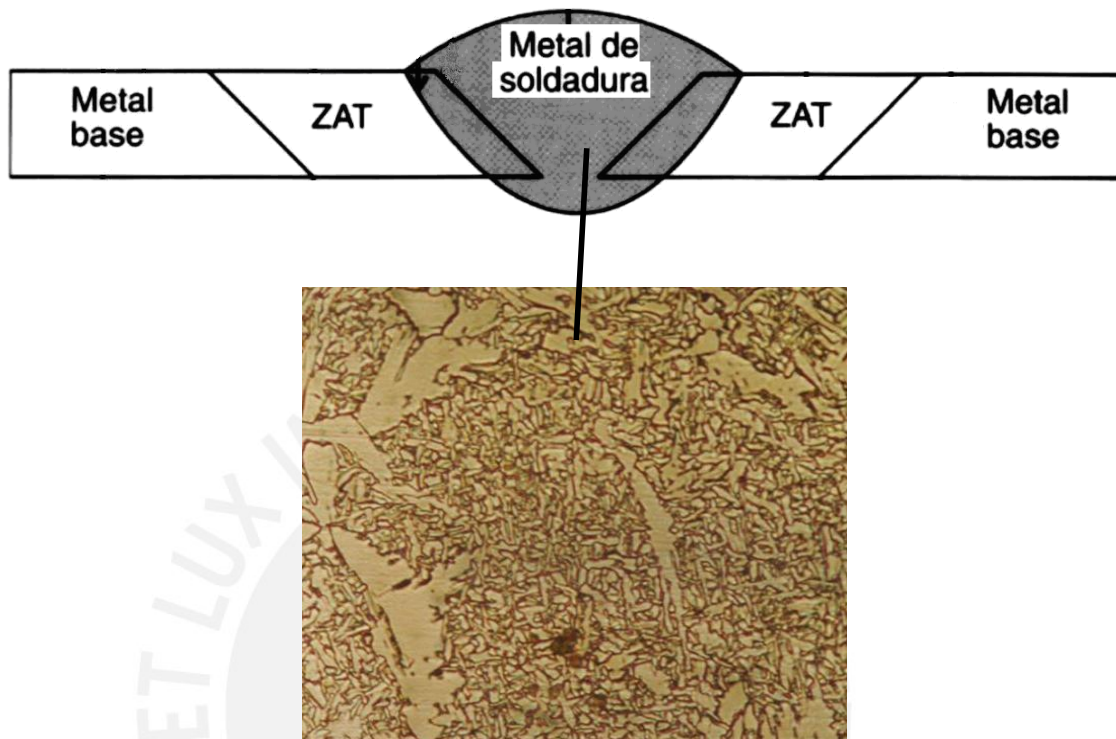


Figura 4.47. Material de aporte (x500)

Microestructura:

Matriz	: Ferrita acicular y reticular.
Otros	: Carburo globular fino.
Tamaño de grano	: ASTM E112 – 97.
Inclusiones	: Del tipo no metálico. ASTM E45 – 96.

Caracterización:

Material	: Microestructura compatible con acero de bajo carbono.
Estado	: Microestructura compatible con estado de colada.
Material de aporte	: Electrodo ER70 - S6.
Tipo de discontinuidad	: Microestructura ferrítica acicular.

Es normal que por el proceso de soldeo se presenten los cambios microestructurales mostrados en las fotomicrografías. En este caso concreto, se tiene un acero de bajo carbono por lo que estos cambios no influyen de manera significativa en las propiedades mecánicas como lo demuestran los ensayos mecánicos.

CONCLUSIONES

Las resistencias obtenidas en las uniones soldadas con y sin material de aporte corresponden a los del material base, debido a que en los ensayos de tracción rompen en el material base, alejados de la ZAC. Por lo tanto respecto a la resistencia mecánica se puede decir que satisfacen los cuatro casos estudiados pues cumplen con los requerimientos del material base que se muestra en la tabla 3.1.

Las uniones que presentaron mayores valores de elongación fueron las muestras soldadas sin material de aporte con una pasada, alcanzando el 69% de la elongación del material base.

Las durezas obtenidas en la zona fundida y en la ZAC son mayores respecto al material base, dado que estas zonas alcanzaron las más altas temperaturas y velocidades de enfriamiento, por ello sus durezas aumentaron con respecto al material base. Esto explica por qué las uniones no rompen en esta zona cuando son ensayadas a tracción. Lo que además explica por qué hay un decremento en el alargamiento como en la probeta 4 (soldadura con material de aporte con 2 pasadas), que es la que alcanzó los más altos valores de dureza (196 HV) y a su vez los menores alargamientos (11% en promedio).

Los ensayos de tracción indican que si bien es cierto que hay una pérdida de ductilidad, ésta no es significativa pues no presentan fisuras ni agrietamiento después del ensayo de doblado.

El proceso de soldadura GTAW sin material de aporte alcanza y hasta supera las características de las uniones soldadas con material de aporte por los resultados de los ensayos en las probetas realizadas, por lo tanto el uso de este proceso sin material de aporte es beneficioso porque abarata costos al no utilizar material de aporte y aumenta la velocidad de producción.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Hernández, Germán, Manual del soldador, Madrid CESOL, decimoquinta edición, 2006.
- [2] American Welding Society, Welding Handbook, eight edition, 1987.
- [3] Lean, Paul, Introducción a la Ingeniería de Materiales, Lima PUCP, 2008.
- [4] Fosca, Carlos, Introducción a la metalurgia de la soldadura, Lima PUCP, cuarta edición, 2003.
- [5] American Society for Testing and Materials, 1998 Annual Book of ASTM Standards – Iron and Steel Products, Vol. 01.04, 1998.
- [6] Cary, Howard, Modern Welding Technology, fourth edition, NJ Prentice-Hall, 1998.
- [7] Gerken, John, Gas Tungsten Arc Welding, OH James F. Lincoln Arc Welding Foundation, 1991.
- [8] Horwitz, Henry, Enciclopedia de la soldadura, Mexico Ediciones PC, 1990.
- [9] Jefferson, T.B. Metals and how to weld them, OH James F. Lincoln Arc Welding Foundation, second edition, 1990.
- [10] Jellison, Roger, Welding Fundamentals, NJ Prentice Hall, 1996.
- [11] O'Brien, R. L. Manual de soldadura, México: Prentice-Hall, octava edición, 1996.
- [12] Zavaleta Nilthon, Metalografía de aceros y fundiciones.