

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**PUCP**

**Elaboración y calificación de un procedimiento de soldadura preliminar y**

**calificación de soldador para el soldeo de aletas de acero ASTM A 36 a**

**ejes de acero AISI 4340**

**Trabajo de suficiencia profesional para obtener el título profesional de**

**INGENIERO MECÁNICO**

**AUTOR**

Gerson Arroyo Páez

**ASESOR:**

**Paul Lean Sifuentes**

Lima, marzo, 2021

## RESUMEN

A lo largo de los años, los avances de la soldadura en la industria han ido creciendo a pasos agigantados. El crecimiento de la soldadura en el país no ha sido una excepción en comparación con el resto del mundo; por ello, las nuevas tecnologías han ido adaptándose a la realidad peruana para mejorar aún más los procesos operativos en todos los rubros más importantes del Perú. Actualmente, los estándares de calidad relacionados con la soldadura son usados ampliamente y requeridos por los fabricantes. Sin embargo, hay procesos de soldadura específicos que no han sido desarrollados y dados a conocer a la comunidad científica; por ello, este trabajo académico tiene como fin dar a conocer la metodología de la elaboración de un procedimiento de soldadura de acuerdo con la norma AWS D1.1 – Ed. 2020 tomando como referencia la soldadura de dos materiales disímiles en la construcción de un eje destinado a la aplicación en minería. Además, se ha realizado una secuencia que muestra claramente las referencias al código y lo que es necesario contemplar con la finalidad de que se reduzcan notablemente las interpretaciones incorrectas del código. El objetivo principal es la elaboración y calificación de un procedimiento de soldadura y de soldador preliminares de un eje AISI 4340 y unas aletas ASTM A36. Debido a que la soldadura en materiales disímiles es uno de los temas más complicados en cuanto a soldadura se refiere, se han estudiado los materiales y sustentados los criterios para la correcta elaboración de la soldadura.

## ÍNDICE

<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>1 ESTADO DEL ARTE</b>	<b>2</b>
1.1 TIPOS DE COMPRESORES Y MATERIALES PARA LA FABRICACIÓN DE EJES	2
1.2. PROCESOS DE SOLDADURA	4
1.3. SOLDABILIDAD DE LOS ACEROS	7
1.4. MATERIALES	8
<b>2. ELABORACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA PRELIMINAR</b>	<b>15</b>
2.1. JUSTIFICACIÓN DE NORMAS	15
2.2. PROCESO DE SOLDADURA	15
2.3. MATERIAL DE APORTE	18
2.4. PARÁMETROS DE SOLDEO	19
2.5. POSICIONES DE SOLDADURA	20
2.6. CÁLCULO DE TEMPERATURAS DE PRECALENTAMIENTO, INTERPASE, POST-CALENTAMIENTO Y ENFRIAMIENTO	21
2.7. PROCEDIMIENTOS PROPUESTOS PARA LA PLACA BASE Y EJE DEL ROTOR	26
<b>3. CALIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA</b>	<b>27</b>
3.1. POSICIÓN DE SOLDADURA	27
3.2. TIPOS DE PROBETAS PARA CALIFICACIÓN, MÉTODOS DE ENSAYO Y CRITERIOS DE ACEPTACIÓN PARA LA CALIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA	29
<b>4. CALIFICACIÓN DE SOLDADORES</b>	<b>32</b>
4.1. POSICIÓN DE SOLDADURA PARA LA CALIFICACIÓN DE SOLDADORES	32
4.2. TIPOS DE PROBETAS PARA CALIFICACIÓN Y MÉTODOS DE ENSAYO PARA LA CALIFICACIÓN DE SOLDADORES	32
4.3. CRITERIOS DE ACEPTACIÓN PARA LA CALIFICACIÓN DE SOLDADORES	32
<b>6. CONCLUSIONES</b>	<b>35</b>
<b>7. BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>36</b>

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 EJE DE ROTOR PARA EL ACCIONAMIENTO DE UNA PALA MECÁNICA	3
FIGURA 2 EJE DE TRANSMISIÓN DE POTENCIA PARA LA TURBINA DE UN INGENIO AZUCARERO	3
FIGURA 3 ELEMENTOS NECESARIOS PARA PROCESO GMAW [1]	5
FIGURA 4 MODOS DE TRANSFERENCIA DE ACUERDO CON ESPESORES A SOLDAR	6
FIGURA 5 DIAGRAMA DE GRAVILLE [2]	8
FIGURA 6 CURVA TIEMPO - TRANSFORMACIÓN - TEMPERATURA DEL ACERO AISI 4340	11
FIGURA 7 DIAGRAMA DE GRAVILLE	12
FIGURA 8 CURVAS DE ENFRIAMIENTO CONTINUO DEL ACERO AISI 4340	13
FIGURA 9 MÁQUINA DE SOLDAR ESAB SMASHWELD 300i PARA PROCESO SMAW Y GMAW	17
FIGURA 10 CARRO PARA SOLDADURA GULLCO MODELO MOGGY SIN OSCILADOR	17
FIGURA 11 ROBOT KUKA CON IMPLEMENTACIÓN ESAB PARA SOLDADURA AUTOMATIZADA	17
FIGURA 12 ESQUEMA DE ARMADO PROPUESTO DE ROTOR CON ALETAS Y PLACA BASE	18
FIGURA 13 POSICIÓN DE PRUEBA PARA SOLDADURA EN 2FR	20
FIGURA 14 POSICIÓN DE PRUEBA PARA SOLDADURA DE PLANCHAS 1F	21
FIGURA 15 CURVA DE REVENIDO PARA EL ACERO AISI 4340 [5]	25
FIGURA 16 POSICIÓN DE PRUEBA 2FR SEGÚN AWS D1.1- ED. 2020	27
FIGURA 17 DIAGRAMA DE ARMADO DE PROBETA PARA CALIFICACIÓN DE PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA SEGÚN AWS D1.1 - ED. 2020	29
FIGURA 18 ESPÉCIMEN PARA MACROGRAFÍA SEGÚN AWS D1.1-Ed.2020	30

## LISTA DE TABLAS

TABLA 1 COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL ACERO AISI 4340 [5]	10
TABLA 2 COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL ACERO ASTM A36 [4]	13
TABLA 3 PARÁMETROS ELÉCTRICOS DEL SOLDAMIG ER70S-6	20
TABLA 4 AGRUPACIÓN DEL ÍNDICE DE SUSCEPTIBILIDAD SEGÚN AWS D1.1 - Ed. 2020	23
TABLA 5 TEMPERATURA DE PRECALENTAMIENTO MÍNIMO Y TEMPERATURA DE INTERPASE SEGÚN AWS D1.1 - Ed. 2020	24
TABLA 6 ESPECIFICACIÓN DE PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA DEL CASO	26
TABLA 7 POSICIONES CALIFICADAS PARA PROCEDIMIENTOS DE SOLDADURA SEGÚN AWS D1.1 - Ed. 2020	28
TABLA 8 NÚMEROS Y TIPOS DE ESPECÍMENES Y TAMAÑOS PARA CALIFICACIÓN DE PROCEDIMIENTOS DE FILETES	29
TABLA 9 DIÁMETROS Y ESPESORES CALIFICADOS SEGÚN TAMAÑO DE PROBETA DE ACUERDO CON AWS D1.1-Ed.2020	30
TABLA 10 POSICIÓN DE CALIFICACIÓN DE SOLDADORES Y OPERARIOS DE SOLDADURA - PLANCHA Y TUBERÍA	33
TABLA 11 DIMENSIONES CALIFICADAS DE ESPECÍMENES PARA LA CALIFICACIÓN DE LOS SOLDADORES	34

## INTRODUCCIÓN

A lo largo de los años, se han ido mejorando los métodos para el soldeo de los aceros en general. Estos avances tecnológicos se han desarrollado en el estudio del comportamiento de los aceros y la mejora consecutiva de estos. Por otro lado, los procesos de soldadura también han ido mejorando, tomando en cuenta los costos que involucran y la mejora de la producción en las industrias.

En la actualidad, la soldadura y el maquinado de ejes bonificados para la fabricación de motores a combustión interna, chancadoras, tambores de minería, etc. ha requerido un cuidado especial debido a los altos estándares de calidad y manufactura de estos. De esta manera, la soldadura de los ejes bonificados en serie conlleva a tomar una serie de consideraciones para su exitosa ejecución.

Debido a que no hay documentación referenciada acerca de la soldadura de ejes bonificados en serie, se elaborará un procedimiento propuesto según el código AWS D1.1 – Ed. 2020 [3] tomando en cuenta la soldabilidad del eje 4340. Este trabajo académico tiene como objetivo principal establecer los parámetros necesarios para la soldadura de aletas ASTM A36 y ejes AISI 4340, así como los ensayos necesarios para calificar al procedimiento de soldadura teniendo en cuenta las posiciones de soldeo y rango de espesores a soldar.

El objetivo general de este trabajo académico es elaborar y calificar un procedimiento preliminar de soldadura y también elaborar la calificación de soldador de un eje AISI 4340 y unas aletas ASTM A36. Para lograr el objetivo planteado, en este trabajo académico se estudiarán las propiedades, características y aplicaciones de los aceros al carbono y aceros de baja aleación.

Se seleccionarán el material de aporte y proceso de soldadura adecuado tomando en cuenta la soldadura en serie. Además, se evaluarán las condiciones de pre o post calentamiento aplicados a los aceros estudiados ASTM A36 y AISI 4340.

Finalmente, se presentarán los ensayos y probetas necesarias para las calificaciones del procedimiento de soldadura y soldador propuestos teniendo en cuenta los lineamientos del código AWS D1.1 – Ed. 2020.

## 1 ESTADO DEL ARTE

A continuación, se realizará una breve descripción de los tipos de compresores que se encuentran en la industria, asimismo se explica brevemente en qué consisten ciertos procesos de soldadura que se consideran en el caso propuesto, con el objetivo de justificar su elección en el capítulo posterior.

En primer lugar, los compresores son máquinas construidas para incrementar la presión de los fluidos, principalmente los que pueden ser comprimidos, como los gases. Uno de los gases más utilizados es el aire ya que permite realizar muchas funciones como: manipulación de actuadores neumáticos, soplado de botellas y bolsas, en herramientas neumáticas, para inflar objetos, etcétera.

### 1.1 TIPOS DE COMPRESORES Y MATERIALES PARA LA FABRICACIÓN DE EJES

#### 1.1.1. Clasificación de compresores

Estas máquinas se clasifican por su forma de funcionamiento y podemos encontrar dos categorías cada una con sus tipos de compresores diferentes.

##### *1.1.1.1 De desplazamiento positivo*

Este tipo de motor se caracteriza por tener una cámara de compresión en la cual se va disminuyendo el volumen del gas, cuando este alcanza el valor máximo de compresión dado por el diseño, lo expulsa hacia el sistema.

Dentro de esta categoría podemos encontrar las siguientes dos subclasificaciones:

- Compresores alternativos o de émbolo oscilante
- Compresores rotativos

##### *1.1.1.2 Dinámicos o turbocompresores*

Los compresores dinámicos se caracterizan por que utilizan como principio de funcionamiento la aceleración molecular para comprimir el gas, este es aspirado por un impulsor que lo acelera, para después mandarlo a un anillo difusor que detiene el gas y genera una presión en el gas para después ser liberado hacia el exterior.

Los compresores de esta categoría se utilizan para grandes caudales y podemos encontrar los siguientes dos tipos de compresores:

- Compresor centrífugo axial
- Compresor centrífugo radial

### 1.1.2. Materiales para la fabricación de ejes

En la actualidad, muchos ejes están hechos de aceros de bajo carbono, conformado en frío o laminados en caliente, debido a que cumplen con la resistencia mecánica de diseño y soporta los esfuerzos cíclicos a los que pueden estar sometidos. El acero más utilizado dentro de los aceros al carbono es el AISI 1045 debido a su combinación de ductilidad y resistencia mecánica.

A menudo, como primer paso en los cálculos de diseño, se usan valores de resistencia comunes a aceros de bajo o medio carbono; sin embargo, si los valores de resistencia superan a estos, es necesario empezar a seleccionar un material de baja aleación o superiores. Por esto, en las aplicaciones que están sometidas a temperaturas medias, altas sollicitudes mecánicas o ambientes agresivos, se emplean materiales aleados, debido a que sus elementos aleantes mejoran las propiedades mecánicas. Algunos aceros aleados utilizados en la industria son AISI 4320, 4820, 5140, 4340, etc.

En la figura 1 se muestra el eje de un rotor utilizado para accionar una pala mecánica y que está en proceso de recuperación. Este eje es de acero bonificado y tiene soldadas las aletas de sujeción de acero de bajo carbono. Por otro lado, en la industria azucarera se usan turbinas para la generación de vapor en un sistema íntegro de cogeneración. Estas turbinas requieren ejes que puedan soportar los esfuerzos y sollicitaciones mecánicas para su correcto funcionamiento (ver figura 2).

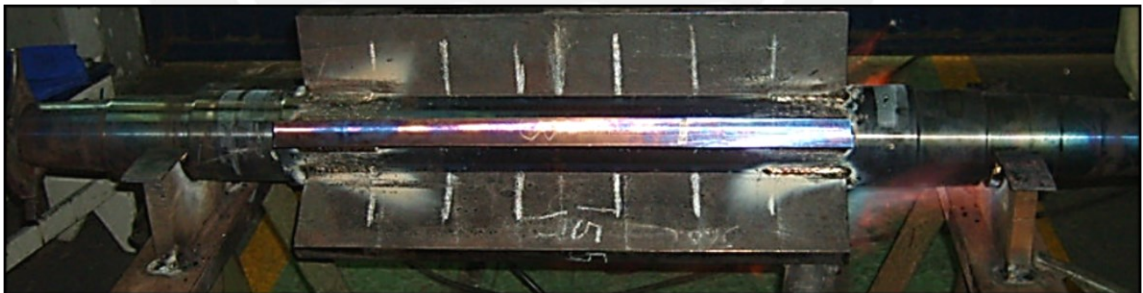


Figura 1 Eje de rotor para el accionamiento de una pala mecánica



Figura 2 Eje de transmisión de potencia para la turbina de un ingenio azucarero



## 1.2. PROCESOS DE SOLDADURA

Actualmente, los procesos de soldadura han evolucionado a pasos agigantados desde el siglo XIX en el cual se descubre el arco eléctrico y empieza su mejora constante hasta el día de hoy, en donde se pueden encontrar procesos de última generación como soldadura por láser o plasma que mejoran constantemente. Sin embargo, procesos con muchos años en el mercado y aplicados en robóticas se han abierto camino y su uso sigue aumentando en la realidad peruana y continúa siendo el preferido en industrias como las navales, automovilísticas, metalmecánicas, etc.

En la industria peruana, el electrodo revestido sigue siendo el proceso preferido por los soldadores y que lo practican por tener una inversión inicial y consumibles económicos. Sin embargo, actualmente las empresas están migrando poco a poco a procesos semiautomáticos, mecanizados y automáticos para poder mejorar aún más sus producciones y respondiendo a las demandas del mercado. Por esto, los procesos GMAW y FCAW son los siguientes pasos hacia el avance tecnológico de la industria peruana y que se pueden realizar manual o automatizadamente. Por otro lado, la producción de industrias de las potencias mundiales está automatizadas casi en su totalidad y se basan en procesos como GMAW y FCAW. Por consiguiente, se elegirá el proceso GMAW para la fabricación soldada de aletas ASTM A36 y ejes AISI 4340 pensado en la aplicación robótica.

### 1.2.1. Proceso de Gas por Arco Metálico de Soldadura (GMAW)

El proceso GMAW es por definición un proceso de gas por arco eléctrico de soldadura que produce la coalescencia del metal base calentándolo y usando el arco eléctrico entre el metal base y material de aporte continuamente suministrado.

Los materiales que comúnmente se pueden soldar con el proceso GMAW son: aceros al carbono, aceros inoxidable, aluminio, magnesio, cobre, níquel, silicio y bronce. El proceso GMAW puede ser semiautomático o automático.

### 1.2.2. Ventajas del proceso GMAW

La principal ventaja es la alta calidad de la soldadura que provee y los bajos precios del material de aporte. Por otro lado, otras son las ventajas del proceso y se enlistan a continuación:

- Los componentes son encontrados fácilmente en el mercado y de diferentes precios
- Se pueden soldar distintos tipos de materiales y espesores
- Cuenta con alta eficiencias de soldeo, usualmente entre 85 – 95%
- Soldadura en todas posiciones

- Bajos aportes de calor
- Poca producción de escoria y salpicaduras.

### 1.2.3. Limitaciones

- El bajo aporte de calor en la transferencia cortocircuito es restringido a materiales delgados.
- La transferencia en spray se restringe al uso para materiales gruesos.
- La transferencia en spray es usada en posiciones horizontal y plana.
- La transferencia en spray solo es alcanzada con una mezcla de argón y lo hace más caro que el uso de 100%CO<sub>2</sub>.

### 1.2.4. Esquema del proceso

El esquema general del proceso GMAW se puede apreciar en la figura 3 y consisten en los siguientes componentes:

- Regulador de gas
- Cilindro con gas de protección
- Carrete de soldadura
- Alambre solido
- Fuente de soldar
- Alimentador de alambre
- Antorcha de soldar

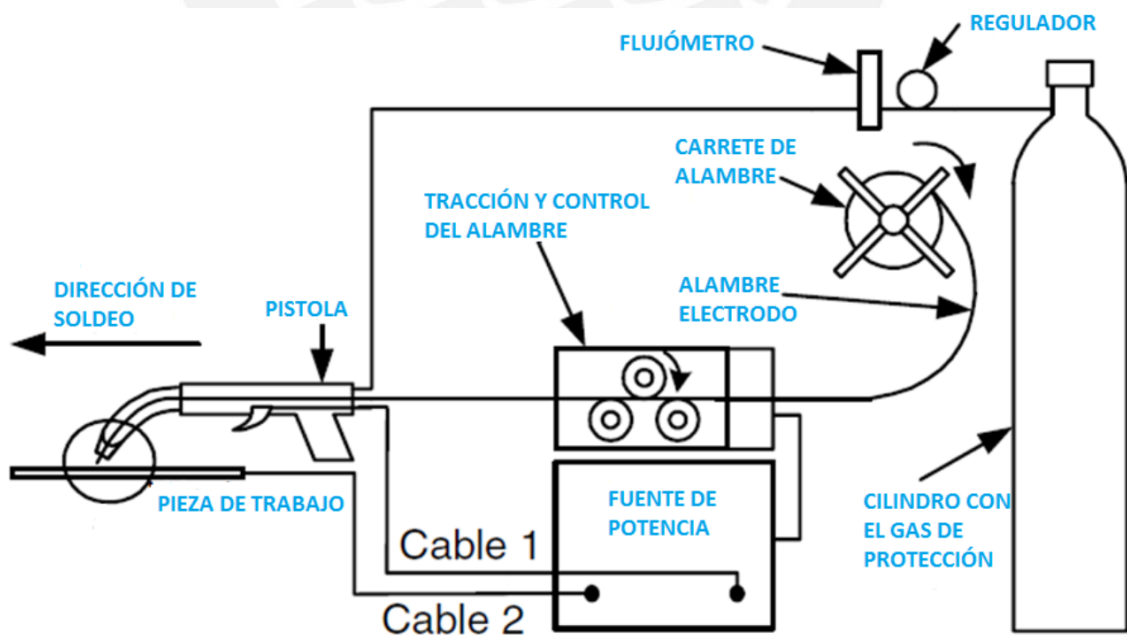


Figura 3 Elementos necesarios para proceso GMAW [1]

### 1.2.5. Modo de transferencia del metal de aporte

El proceso GMAW permite poder elegir, dependiendo de los parámetros eléctricos y gas de protección a utilizar, la transferencia eléctrica que más se ajuste a los trabajos que se realizarán y considerando sus ventajas y limitaciones, esto se puede apreciar en la figura 4.

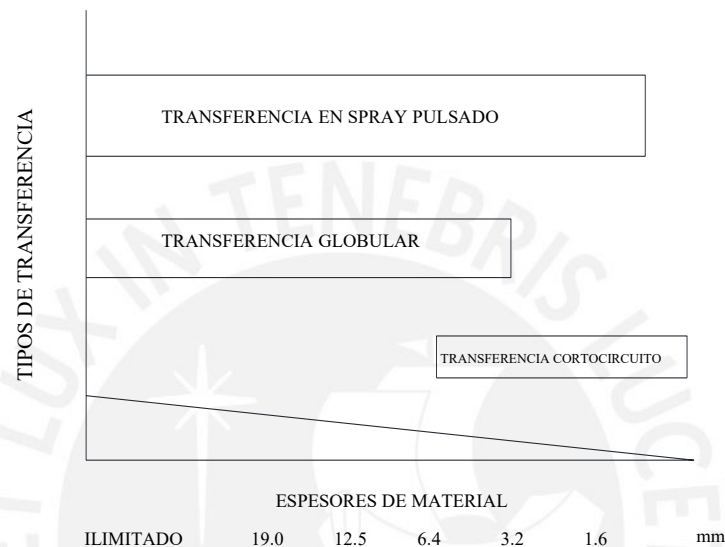


Figura 4 Modos de transferencia de acuerdo con espesores a soldar

### 1.2.6. Transferencia de cortocircuito

Esta transferencia se efectúa cuando el alambre es depositado durante un repetido cortocircuito eléctrico. Esta transferencia se caracteriza por los bajos aportes de calor, por lo que es ideal para materiales de espesores pequeños.

#### 1.2.6.1. Transferencia globular

En esta transferencia, el alambre sólido es depositado en combinación con la transferencia cortocircuito y gravedad asistida de las gotas grandes de metal de aporte. Esta transferencia se caracteriza por un difícil control y significativa cantidad de salpicaduras.

#### 1.2.6.2. Transferencia spray

La transferencia axial en spray es una transferencia de alto nivel energético y que se alcanza utilizando  $\text{Ar} + 1-5\% \text{O}_2$  o  $\text{Ar} + \text{CO}_2$ , en donde el  $\text{CO}_2$  tiene un porcentaje de 20% o menos. La elección de la transferencia spray depende del espesor del material base y la posición de soldadura, la cual está restringida a horizontal o plana.

### 1.3. SOLDABILIDAD DE LOS ACEROS

La soldabilidad de los aceros se define como la factibilidad de conseguir una soldadura resistente y sana. Asimismo, también puede definirse como la capacidad de un material para ser soldado bajo condiciones normales de manera que pueda cumplir satisfactoriamente con las exigencias de servicio.

La soldabilidad es una propiedad tecnológica y se expresa de manera cualitativa utilizando ciertos parámetros de la composición química de los aceros al carbono y se establecen ciertos límites para definir si los aceros son fácilmente soldables, medianamente soldables o de difícil soldabilidad. Por esto, en los aceros al carbono, se toma en consideración el porcentaje de carbono en el material y se establece referencialmente que los aceros menores a 0,3%C son fácilmente soldables, de 0,3%C a 0,45%C son medianamente soldables y se recomiendan precalentamientos y enfriamientos lentos, y, finalmente, aceros mayores a 0,45%C son de difícil soldabilidad que requieren soldarse con electrodos de bajo hidrogeno, temperaturas mayores de precalentamiento y prácticas para evitar fisuraciones.

En el caso de los aceros aleados, la influencia de los elementos aleantes influyen en la soldabilidad de los aceros al carbono y se tiene un nuevo parámetro para poder evaluar la soldabilidad de estos aceros. Hay varias fórmulas para definir el carbono equivalente y se ha escogido, para el análisis del trabajo académico, la siguiente fórmula del instituto internacional de soldadura (IIW):

$$CE=C+\frac{Mn}{6}+\frac{Cr+Mo+V}{5}+\frac{Ni+Cu}{15} \%$$

Una forma de visualizar la soldabilidad de los aceros es utilizando el denominado Diagrama de Graville (ver figura 5). Este diagrama clasifica a los aceros en base a su soldabilidad asociada a problemas de fisuración en frío, en función del porcentaje de carbono y de elementos de aleación medidos a través del carbono equivalente del Instituto Internacional de soldadura. En la figura 5, se distinguen tres zonas: I, II y III. La zona I es la zona de bajo carbono y que aun cuando las condiciones sean exigentes, los aceros no serían muy susceptibles a fisuración. En la zona II, se ubican los aceros de altos contenidos de carbono y bajos elementos aleantes. En esta zona, se deberá tener precauciones de disminución de velocidad de enfriamiento y uso de precalentamiento al conjunto soldado. Finalmente, en la zona III, los aceros poseen elevado contenido de carbono y elementos aleantes y que tienen como característica su fácil templabilidad, por lo que se deberá evitar la fisuración en frio asistida por hidrogeno.

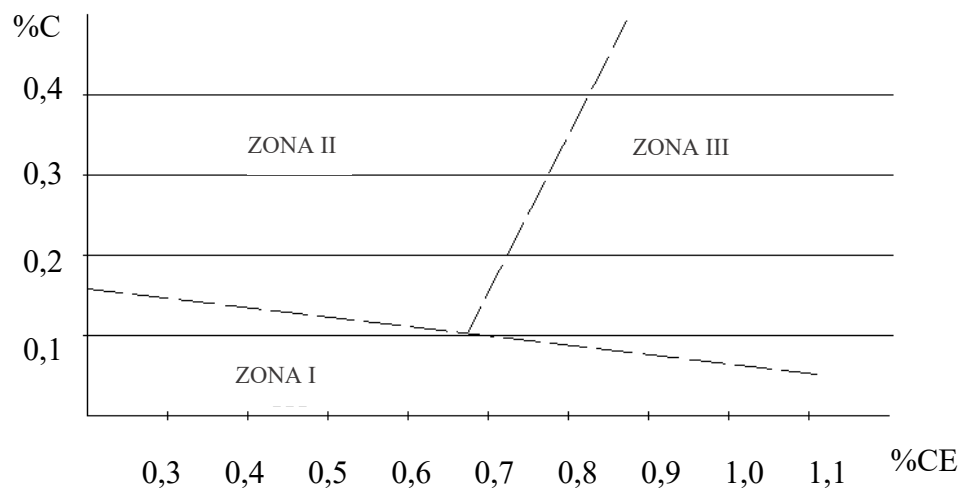


Figura 5 Diagrama de Graville [2]

## 1.4. MATERIALES

### 1.4.1. Principales elementos aleantes

Los aceros contienen elementos de aleación que mejoran algunas de sus características fundamentales. Los aceros al carbono, como norma general, contienen: carbono, silicio, manganeso, fósforo y azufre. Por ello reciben el nombre de aceros aleados, a los aceros que además de los cinco elementos anteriores, contienen aleantes como: níquel, manganeso, cromo, vanadio, wolframio, molibdeno, cobalto, silicio, cobre, titanio, zirconio, plomo, selenio, niobio, aluminio y boro.

Dado el caso expuesto, desarrolla una breve explicación los siguientes:

- Cromo

Es el aleante más empleado en aceros aleados, se usa indistintamente en los aceros de construcción, en los de herramientas, en los inoxidables y los de resistencia en caliente. Su uso en los aceros le otorga propiedades como el incremento de la dureza y resistencia a la tracción, mejora la templeabilidad, impide deformaciones en el temple, incrementa la resistencia al desgaste, y a la abrasión, aumenta la resistencia en altas temperaturas, proporciona resistencia a la corrosión, etc.

El cromo se disuelve en la ferrita y muestra una fuerte tendencia a formar carburos de cromo y carburos complejos.

- Níquel

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

El níquel se disuelve en la ferrita y no es un gran formador de carburos, incrementa la tenacidad y la resistencia de los aceros recocidos, debido a que tiende a retener austenita en los aceros altos en cromo.

El níquel es imprescindible en la fabricación de aceros inoxidable y/o resistentes a altas temperaturas, en los que además de cromo se emplean porcentajes de níquel de entre un 8% al 20%.

El níquel evita el crecimiento del grano en los tratamientos térmicos, lo que sirve para producir en ellos gran tenacidad. El níquel además hace descender el punto crítico Ac y por ello los tratamientos pueden hacerse a temperaturas ligeramente más bajas que la que corresponde a los aceros ordinarios.

- Molibdeno

Este aleante proporciona una gran resistencia a la tracción, aumenta la templabilidad, así como la resistencia a la fluencia mecánica, o deformación por desplazamiento del grano de acero debido al trabajo prolongado en altas temperaturas (creep de los aceros).

El molibdeno en los aceros cromo-níquel, elimina la fragilidad de revenido, o fragilidad.

El molibdeno aumenta también la resistencia de los aceros en caliente y reemplaza al tungsteno en la fabricación de los aceros rápidos, pudiéndose emplear para las mismas aplicaciones aproximadamente una parte de molibdeno por cada dos de tungsteno.

El molibdeno se disuelve en la ferrita, es un gran formador de carburos, pero también los estabiliza en gran medida.

Retarda el ablandamiento de los aceros, durante el revenido, apareciendo la dureza secundaria.

#### 1.4.2. AISI/SAE 4340

Es un acero de baja aleación al Cromo-Níquel-Molibdeno. La tabla 1 muestra la composición química del acero AISI 4340 en donde se aprecian los contenidos de los elementos aleantes. Posee gran templabilidad, tenacidad y resistencia a la fatiga. Su composición química, principalmente el alto contenido de níquel, y el tratamiento térmico de bonificado le otorga propiedades como gran rendimiento en piezas y/o herramientas

sometidas a tracción, torsión, flexión y además expuestas a altos esfuerzos dinámicos y mecánicos. A continuación, se presentan más características propias de este acero:

- No presenta fragilidad de revenido.
- Es un acero que recibe bien los procesos de nitruración líquida previo alivio de tensiones, sin embargo, se recomienda endurecer el material sobre 45 HRC para obtener un mejor comportamiento frente a fenómenos de fatiga.

Ofrece excelentes características de resistencia mecánica cuando se trata térmicamente al tiempo y también mantiene sus propiedades de ductilidad, dureza y resistencia a la fatiga. Normalmente no requiere un tratamiento térmico adicional, sin embargo, se puede temprar a durezas mayores para incrementar su resistencia.

Tabla 1 Composición química del acero AISI 4340 [5]

<b>Composición Química</b>							
%C	%Mn	%Si	%Cr	%Ni	%Mo	%P	%S
0,38-0,43	0,6-0,8	0,15-0,35	0,7-0,9	1,65-2,00	0,2-0,30	≤0,035	≤0,04

#### 1.4.2.1. Aplicaciones

Se utiliza en la fabricación y reparación de partes y repuestos que están sometidos a muy altos esfuerzos dinámicos tales como cigüeñales, ejes de levas, árboles de transmisión, barras de torsión, ejes, vástagos, componentes oleo hidráulicos, poleas, barras de parrillas para harnero, componentes de barras de perforación, discos de freno, piñones, pernos y tuercas sometidos a grandes esfuerzos. En general, es recomendado en aplicaciones de piezas de gran sección con elevadas exigencias mecánicas.

#### 1.4.2.2. Soldabilidad

No se recomienda soldar el acero 4340T (Templado y Revenido) y de ser posible, se debe evitar ya que las propiedades mecánicas son alteradas en las zonas afectadas por el calor del proceso de la soldadura.

Es preferible aplicar soldadura al acero 4340R (Recocido) y cuando la pieza se enfríe a aproximadamente 50°C, esta sea inmediatamente relevada de esfuerzos de 595°C a 620°C antes del templado y revenido. La figura 6 muestra la curva TTT utilizada para predecir la microestructura resultante de acuerdo con las temperaturas y tiempos a los que se expone el acero AISI 4340 durante el tratamiento térmico.

Dureza en estado bonificado: 28–34 HRC.

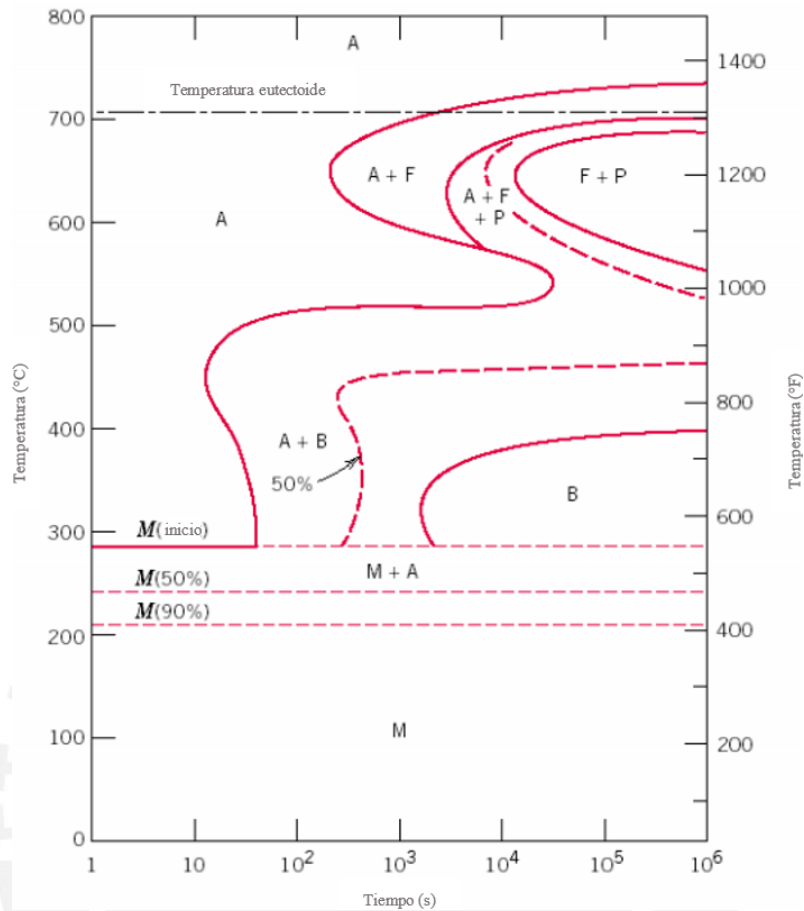


Figura 6 Curva Tiempo - Transformación - Temperatura del acero AISI 4340

Se recomienda la utilización de electrodos inoxidables austeníticos y se prefiere un proceso de soldadura con bajo riesgo de fisuración por hidrógeno. Asimismo, posterior a la soldadura, se deberá hacer el alivio de tensiones o, si es posible, nuevamente el templeado y revenido.

Para evaluar la soldabilidad de los aceros AISI 4340, se deberá considerar la composición química del material base para ubicar el acero en el diagrama de Graville (ver figura 7) y se puedan tomar las consideraciones necesarias para evitar posibles fisuraciones por formación de martensita en la ZAC, presencia de hidrógeno, etc. De esta manera, los controles necesarios para lograr una soldadura sana son los siguientes:

- Temperatura de precalentamiento
- Temperatura de interpase
- Temperatura de post-calentamiento
- Velocidad de enfriamiento
- Entrada de calor



A continuación, se definirá en qué zona está ubicado el acero AISI 4340 dentro del diagrama de Graville:

Se calcula el porcentaje de carbono equivalente “CE”

$$CE=C+\frac{Mn+Si}{6}+\frac{Cr+Mo+V}{5}+\frac{Ni+Cu}{15} \%$$

Con los valores de composición química del AISI 4340 son:

CE : 0,795%

C : 0,38 %

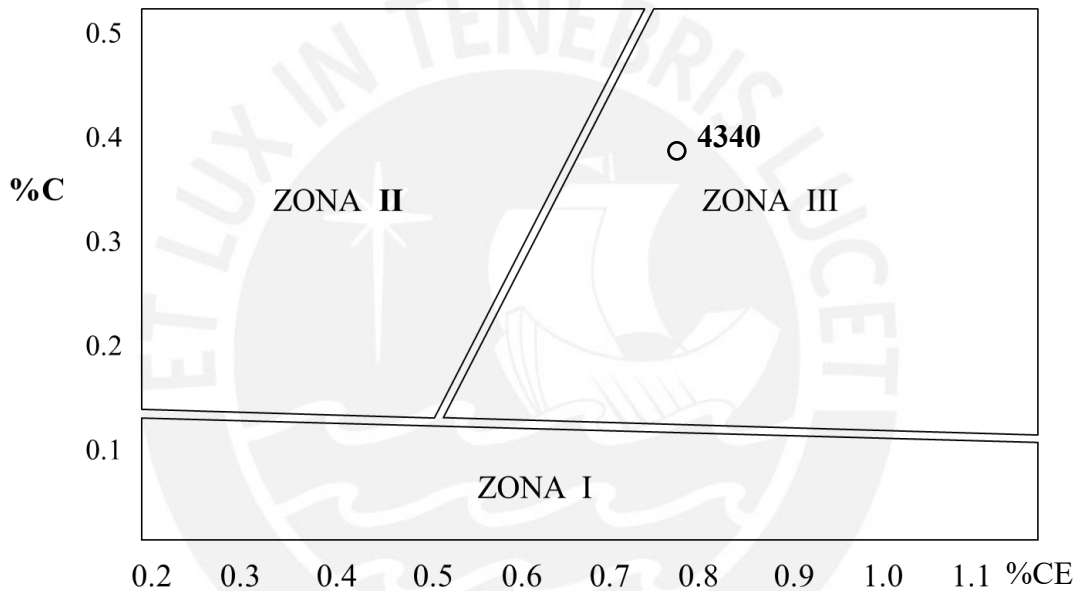


Figura 7 Diagrama de Graville

El acero AISI 4340 es un acero de difícil soldabilidad, debido a que se ubica en la zona III del diagrama de Graville, la cual es una zona cuya microestructura resultante por el efecto del calor es susceptible de fisuración bajo cualquier condición. Por este motivo, se procederá a calcular las temperaturas de precalentamiento, temperatura de interfase, temperatura de post-calentamiento (ver 2.6).

La velocidad de enfriamiento se medirá para predecir la microestructura resultante tomando en cuenta el diagrama de enfriamiento continuo del acero AISI 4340 (ver figura 8) y reducir los posibles compuestos que perjudican el comportamiento mecánico de la junta soldada. Por otro lado, la entrada de calor se reajustará considerando los parámetros eléctricos y velocidad de avance, en caso sea necesario, para minimizar las deformaciones dimensionales y obtención de microestructuras duras.

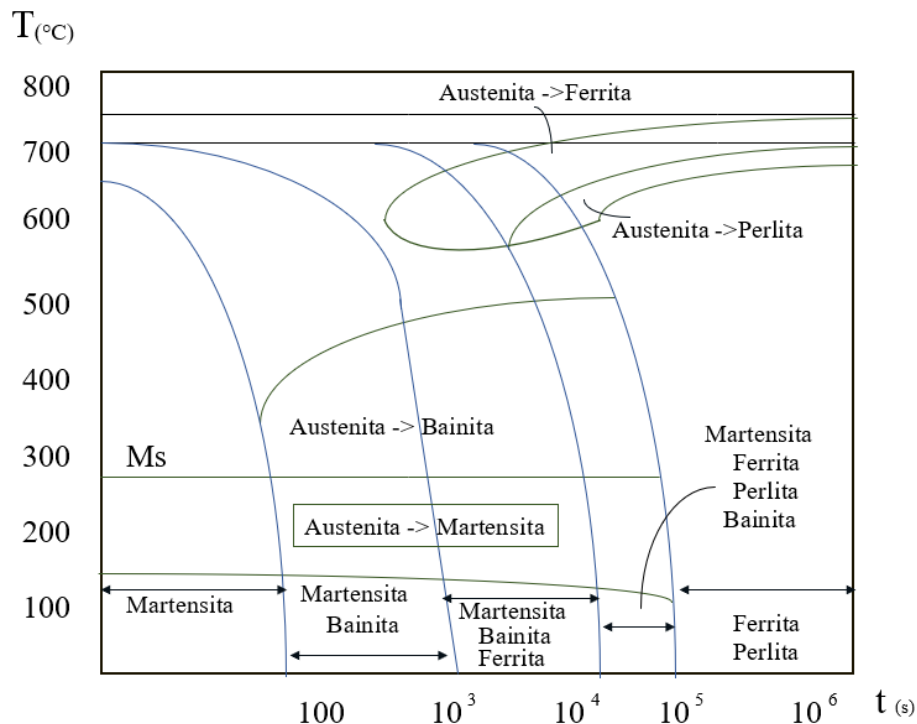


Figura 8 Curvas de enfriamiento continuo del acero AISI 4340

### 1.4.3. ASTM A36

El A36 es un acero de bajo carbono que no posee elementos aleantes, en la tabla 2 se aprecia la composición química del acero ASTM A36. El acero A36 a menudo se compara con AISI 1018 debido a su composición química similar, el acero al carbono A36 es comúnmente laminado en caliente, mientras que el acero 1018 es comúnmente laminado en frío.

Tabla 2 Composición química del acero ASTM A36 [4]

Composición Química				
%C	%Mn	%Si	%P	%S
≤0,26	0,80-1,20	≤0,04	≤0,04	≤0,05

El manganeso le da al acero la resistencia y la dureza característica, mientras que los rastros de fósforo y azufre son impurezas que se mantienen al mínimo posible, ya que pueden hacer que el acero tenga comportamiento frágil si su porcentaje es demasiado alto.

#### 1.4.2.3. Aplicaciones

Debido a que el acero A36 es relativamente barato y cuenta con una resistencia mecánica relativamente alta, a menudo se utiliza como material de construcción estructural. Las vigas, placas y láminas de A36 se utilizan tanto para construir la

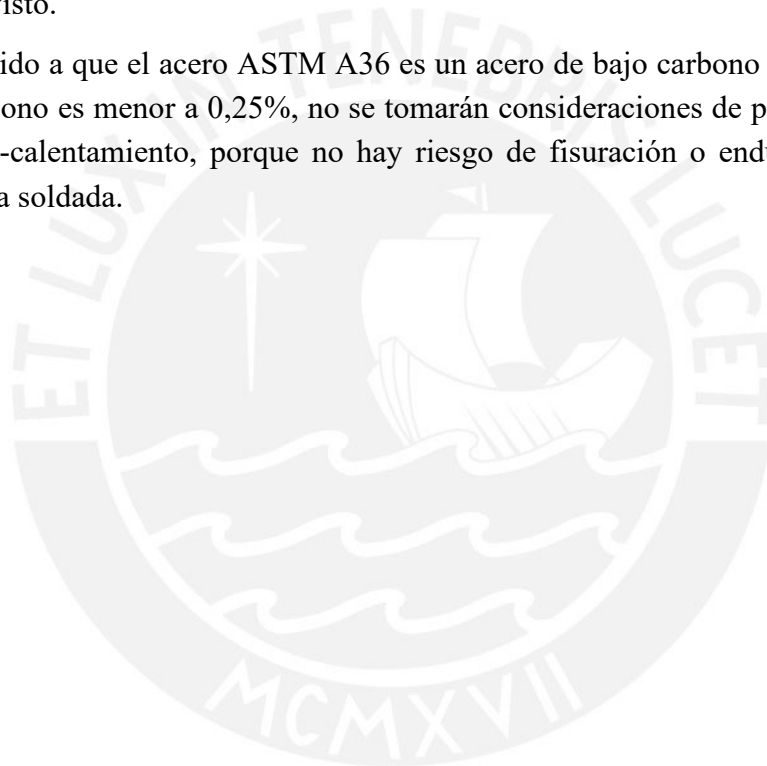
estructura final de un edificio como para construir estructurales temporales, como soportes y cubiertas.

#### 1.4.2.4. Soldabilidad

Acero estructural de buena soldabilidad, adecuado para la fabricación de vigas soldadas para edificios, estructuras remachadas, y atornilladas, bases de columnas, piezas para puentes y depósitos de combustibles.

Según la norma ASTM A36/A36M-8, cuando el acero vaya a ser soldado, tiene que ser utilizado un procedimiento de soldado adecuado y según el uso o servicio previsto.

Debido a que el acero ASTM A36 es un acero de bajo carbono y su contenido de carbono es menor a 0,25%, no se tomarán consideraciones de precalentamiento o post-calentamiento, porque no hay riesgo de fisuración o endurecimiento en la junta soldada.



## **2. ELABORACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA PRELIMINAR**

En primera instancia, se elaborará un procedimiento de soldadura propuesto para la soldadura de las aletas y la placa base al eje del rotor. Estas aletas serán soldadas longitudinal y paralelamente al eje del rotor y la base será soldada al extremo y perpendicular al eje. La figura 12 muestra el armado del eje con las dimensiones establecidas de acuerdo con las medidas estándares en la industria de la fabricación de motores para transporte minero.

A continuación, se procederá a explicar secuencialmente los pasos necesarios para definir el procedimiento de soldadura preliminar.

### **2.1. JUSTIFICACIÓN DE NORMAS**

Debido a que actualmente no existen normas específicas para la soldadura de ejes o componentes de minería a base de aceros especiales como el AISI 4340, se elegirá como código de referencia el AWS D1.1 – Ed. 2020, debido a que está dirigido a la soldadura de elementos estructurales y el eje de un rotor con aletas está comprendido dentro de esta clasificación. Asimismo, el eje se estudiará como un miembro tubular debido su pequeño diámetro y a la geometría circular en todo su eje, ya que según el código AWS D1.1 – Ed. 2020, la clasificación de miembros tubulares según la cláusula N°10 es a partir de diámetros DN20 (NPS  $\frac{3}{4}$ ).

Otra razón de importancia para que se califique con el código AWS D1.1 – Ed. 2020 es el esfuerzo crítico mínimo que se necesita para lograr una junta de aceros disimiles ASTM A36 y AISI 4340. Por esto, el esfuerzo mínimo necesario para lograr una junta soldada resistente es el esfuerzo mínimo de diseño de los dos aceros involucrados; es decir, el esfuerzo de diseño del acero ASTM A36. El acero ASTM A36 está listado dentro de los materiales bases aceptados por el código para calificación de procedimientos de soldadura y se tomará como requisito mínimo para las consideraciones de diseño básicas que puedan presentarse en el estudio. Por otro lado, con respecto al material AISI 4340, la calificación con este acero especial no está considerada en la lista de materiales del código; sin embargo, puede calificarse siempre y cuando se tenga la aprobación del dueño de la obra y en concordancia con las cláusulas 6 y 10 de la AWS D1.1- Ed. 2020.

### **2.2. PROCESO DE SOLDADURA**

Uno de los grandes problemas que enfrentan los fabricantes de componentes mecánicos y que utilizan soldadura durante su proceso de producción es cómo elegir o mejorar los procesos de soldeo que utilizan. Esta elección depende de muchos factores y puede influenciar en la decisión final y los resultados deseados. Para elegir el proceso que mejor se adapte a los requerimientos y aplicación de la soldadura estudiada, se deberán tener en cuenta los siguientes aspectos:

- ¿La velocidad de producción es primordial para el funcionamiento y cumplir con el suministro de componentes?
- ¿La inversión en maquinaria justifica el costo de fabricación y la rentabilidad de la operación en la línea de producción?
- ¿Se necesitan operadores de gran habilidad para realizar las juntas soldadas diseñadas por ingeniería?
- ¿Qué tipos de material base se estarán utilizando en producción?
- ¿La inversión puede reducirse tomando en cuenta procesos mecanizados?

La fabricación de los ejes con aletas está proyectada a realizarse en serie debido a la demanda de suministro de los distintos clientes en el mercado. Por esto, se deberá elegir un proceso que sea lo más flexible posible tomando en cuenta que pueda ser realizado por soldadores que se encuentren disponibles y requieran una habilidad básica para la ejecución de la soldadura. De acuerdo con los requerimientos del cliente, se propone elegir un proceso que pueda realizarse de manera manual, mecanizada y automatizada. La ventaja de tener un proceso flexible es la de elegir la inversión inicial y mejora que se adapte al presupuesto del cliente. De esta manera, una inversión en maquinaria (ver figura 9) para la soldadura con el proceso GMAW puede empezar con un monto de 1500 USD + IGV aproximadamente. Asimismo, si se requiere aumentar la producción, disminuir reprocesos y mejorar la calidad de la soldadura, se podrá mecanizar el proceso con la compra de carros portadores de antorcha (ver figura 10) cuya inversión aproximada está bordeando los 7000 USD + IGV. Finalmente, si la producción en serie lo requiere, la soldadura con el proceso GMAW se podría automatizar con la compra de un robot (ver figura 11) que permita el trabajo en dos o más estaciones para reducir los tiempos de manipulación y mejorar aún más la productividad, ya que los tiempos muertos son muy costosos cuando la demanda es grande. El precio en el mercado de un robot de soldadura con la solución GMAW implementada y considerando un suministro de accesorios para 3 meses aproximadamente está alrededor de 217 000 USD + IGV.



Figura 9 Máquina de soldar ESAB Smashweld 300i para proceso SMAW y GMAW



Figura 10 Carro para soldadura Gullco modelo Moggy sin oscilador



Figura 11 Robot KUKA con implementación ESAB para soldadura automatizada

Por los motivos mencionados líneas arriba y por la decisión final del cliente, se procederá a realizar el procedimiento de soldadura con el proceso GMAW de tipo semiautomático para que en un futuro pueda elegirse entre la solución mecanizada o robótica.

Esquema propuesto de armado:

Las dimensiones del eje propuestas para el caso de estudio son las siguientes:

- Longitud: 1500 mm
- Diámetro mayor: 130 mm
- Diámetro menor (extremos): 65 mm

Las dimensiones de las aletas propuestas para el caso de estudio son las siguientes:

- Longitud: 650 mm
- Altura: 110 mm
- Espesor: 37 mm
- Numero de aletas: 5 aletas.

Las dimensiones de la placa base propuestas para el caso de estudio son las siguientes:

- Lado x ancho: 250 x 250 mm
- Espesor: 25 mm

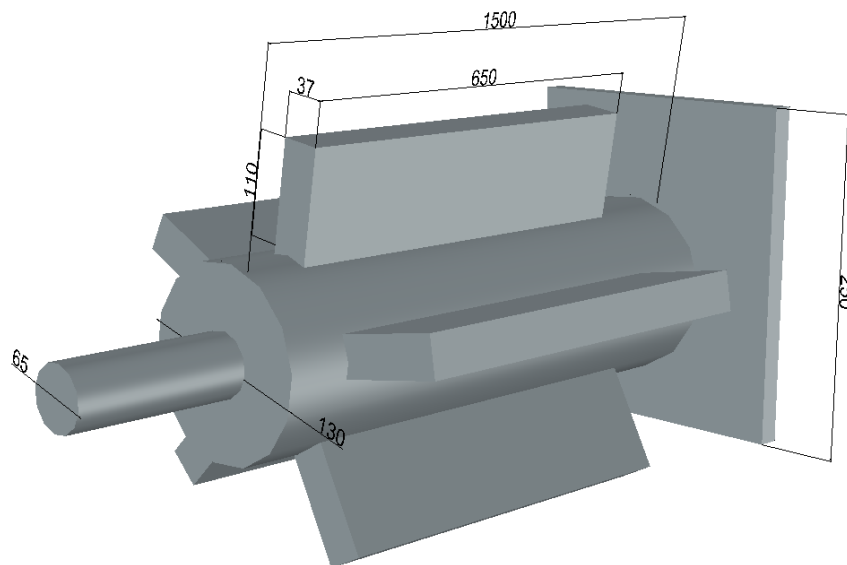


Figura 12 Esquema de armado propuesto de rotor con aletas y placa base

### 2.3. MATERIAL DE APORTE

Al momento de soldar un acero AISI 4340, el cual es un acero tratable térmicamente, se tienen dos aspectos en cuenta, estos son:

Si el material base se somete a un tratamiento térmico posterior a la soldadura para alcanzar propiedades deseadas, se debe seleccionar un material de aporte con similares características mecánicas posteriores al tratamiento térmico realizado al material base.

Por otro lado, si el material base no se encuentra sometido a ningún tratamiento térmico que cambie su microestructura, se podrá escoger un material de aporte de bajo hidrogeno con una resistencia mínima de aproximadamente a 745 MPa, debido a que es la resistencia a la tracción del metal base debe ser menor a la del material de aporte para asegurar la sanidad estructural calculada en el diseño.

Por los motivos descritos líneas arriba, se considera que la unión se realizará con un metal de aporte con la mínima resistencia a la tensión del ASTM A36, ya que es la resistencia mínima de diseño requerida para asegurar que el componente soldado resista mecánicamente.

Finalmente, se propone el uso de un aporte ER70S-6. Esta elección se basa en que su resistencia mecánica es superior a la del material base ASTM A36, es un aporte comercial y barato, con los debidos cuidados de temperatura de precalentamiento no debería presentarse fisuraciones. Para asegurar la sanidad de la junta soldada, el acero AISI 4340 debe ser suministrado con el tratamiento térmico final.

- Clasificación: ER70S-6
- Diámetro: 1,2 mm
- Gas: Mezcla

#### **2.4. PARÁMETROS DE SOLDEO**

Los parámetros eléctricos de soldeo varían de acuerdo con el material de aporte a utilizar y también a la posición de soldadura. Para tener una idea más cercana a los parámetros correctos de soldadura, se utilizará como referencia los parámetros de la hoja técnica del producto SOLDAMIG ER70S-6 (ver tabla 3), el cual se fabrica en la medida elegida anteriormente.

Parámetros eléctricos de referencia:

- Intensidad de corriente: 150 - 330 A
- Voltaje: 21 - 31V
- Velocidad de avance: 30 - 35 cm/min



Tabla 3 Parámetros eléctricos del SOLDAMIG ER70S-6

Diámetro [mm (pulg.)]	0,80 (0,030)		1,00 (0,040)		1,20 (0,047)	
Polaridad	Corriente continua electrodo al positivo (DCEP)					
Gas protector	100%CO <sub>2</sub> ó Mezcla Ar+CO <sub>2</sub> (80%/20% - 75%/25%)					
Posición de soldadura	Amp. [A]	Volt. [V]	Amp. [A]	Volt. [V]	Amp. [A]	Volt. [V]
Plana, Filete Horizontal	80 - 160	18 - 21	90 - 190	19 - 24	150 - 330	21 - 31
Horizontal	85 - 120	18 - 19	120 - 170	19 - 22	130 - 170	21 - 25
Vertical Ascendente	120 - 150	17 - 19	135 - 170	19 - 20	135 - 180	19 - 21
Sobrecabeza	85 - 140	18 - 19	125 - 170	18 - 19	105 - 170	19 - 20

## 2.5. POSICIONES DE SOLDADURA

Para la realización del esquema de fabricación propuesto, se pueden elegir varias posiciones de soldadura y estará en función de la facilidad de ejecución de soldadura que se adapte mejor al cliente. Por esto, se deberá elegir una posición de prueba que abarque la mayor cantidad de posiciones calificadas para reducir la cantidad de calificación de procedimientos. De esta manera, se propone realizar la soldadura de las aletas en la posición 1F, debido a que la ejecución de la soldadura se realizará en posición plana. Asimismo, la soldadura de las aletas deberá ser realizada en posición 2FR (figura 13) ya que se adapta mejor a la forma del componente y adicionalmente califica a la posición 1F, la cual es necesaria para la fabricación de las aletas ASTM A36.

Un punto de especial cuidado al momento de elegir la posición de soldadura para las aletas es la disposición de los miembros estructurales. La soldadura de las aletas es longitudinal al eje AISI 4340 y también se debe considerar la dirección de la garganta de soldadura, la cual es vertical (figura 14). Por esto, el procedimiento de soldadura calificado con la posición 2FR tubular, deberá calificar la posición plana para planchas.

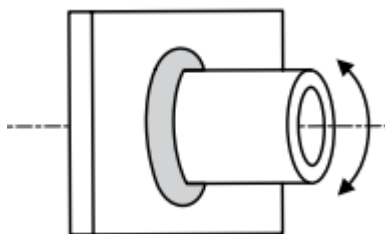


Figura 13 Posición de prueba para soldadura en 2FR

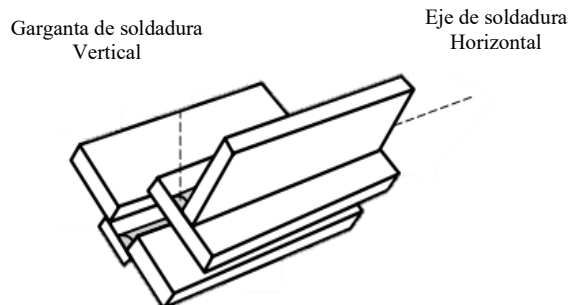


Figura 14 Posición de prueba para soldadura de planchas 1F

## 2.6. CÁLCULO DE TEMPERATURAS DE PRECALENTAMIENTO, INTERPASE, POST-CALENTAMIENTO Y ENFRIAMIENTO

### 1.4.4. Temperatura de precalentamiento

#### a) Método de Ito-Bessyo

Los japoneses Ito, Y. and Bessyo, K. desarrollaron un método para calcular la temperatura de precalentamiento para aceros con contenidos de carbono entre 0,07 y 0,22%, para objetivo de comparación, se desarrollará este método y se comparará con otros resultados.

Considerando los factores que condicionan la fisuración, Ito, Y. and Bessyo, K. proponen la siguiente expresión:

$$P_w = P_{cn} + \frac{H}{60} + \frac{t}{600}$$

De esta manera, se tiene lo siguiente:

$$P_{cm} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Cr+Mn+Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B \%$$

$$H = 5 \text{ cc/100g}$$

$$t = 37$$

- $P_{cm}$  = Parámetro de fisuración
- $H$  = Hidrógeno difusible en el metal de soldadura, cc/100g
- $t$  = espesor de la chapa en soldadura a tope (mm)

$$P_{cm} = 0,526$$

$$T_p = 1440 * P_{cm} - 392 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Por tanto, la temperatura de precalentamiento según el método de Ito-Bessyo sería:  
 $T = 365,2^\circ\text{C}$

b) Método de Seferian

Se calcula la temperatura de precalentamiento con el método de Seferian se tiene:

$$C_t = C_q + C_e$$
$$C_q = C + \frac{Mn + Cr}{9} + \frac{Ni}{18} + Mo \%$$
$$C_e = 0,005 * e * C_q$$

De la tabla 1 se tiene la composición química del acero AISI 4340 y de los cálculos se tiene:

Temperatura de precalentamiento: 273,18°C

c) Temperatura de precalentamiento según el método de la AWS

El cálculo de la temperatura de precalentamiento según la AWS propone dos métodos:

- Control de la dureza de la ZAC
- Control de Hidrógeno

Con el carbono y el carbono equivalente del acero se selecciona el método a emplear. Utilizando el diagrama de Graville (figura 5), el acero AISI 4340 pertenece a la zona número 3, lo cual corresponde a la utilización del método 2.

d) Método del control de Hidrógeno

Este método toma como supuesto el que no puede ocurrir fisura si la cantidad promedio de hidrógeno remanente en la junta, luego de enfriado por debajo de 50°C, no excede un cierto valor crítico.

El parámetro Pcm evalúa el efecto de la composición química del acero.

$$P_{cm} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Cr + Mn + Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B \%$$

El nivel de hidrogeno que corresponde para el cálculo es el nivel H1, nivel extra bajo de hidrógeno, debido a que se está utilizando un alambre solido ER70S-6 y que posee un contenido de hidrógeno difusible menor que 5ml/100gr de metal depositado.

Para el cálculo de índice de susceptibilidad se tiene la siguiente formula:

$$\text{Índice de susceptibilidad} = 12 * P_{cm} + \text{Log}_{10} H$$

$$\text{Índice de susceptibilidad} = 7,41$$

Por tanto, según la tabla 4 (basada en la tabla B.1 de la AWS D1.1-Ed. 2020), se tiene que el índice de susceptibilidad correspondiente sería la letra G

Tabla 4 Agrupación del índice de susceptibilidad según AWS D1.1 - Ed. 2020

Agrupación del índice de susceptibilidad como función del nivel de hidrógeno "H" y Composición Pcm

Nivel de Hidrógeno, H	Agrupación por índice de susceptibilidad				
	Carbono equivalente = Pcm				
	<0,18	<0,23	<0,28	<0,33	<0,38
H1	A	B	C	D	E
H2	B	C	D	E	F
H3	C	D	E	F	G

Finalmente, se elige el máximo nivel de restricción para el peor de los casos, y la temperatura de precalentamiento según la tabla 5 (basada en la tabla B.2 según la AWS D1.1 – Ed. 2020) es 160 °C.

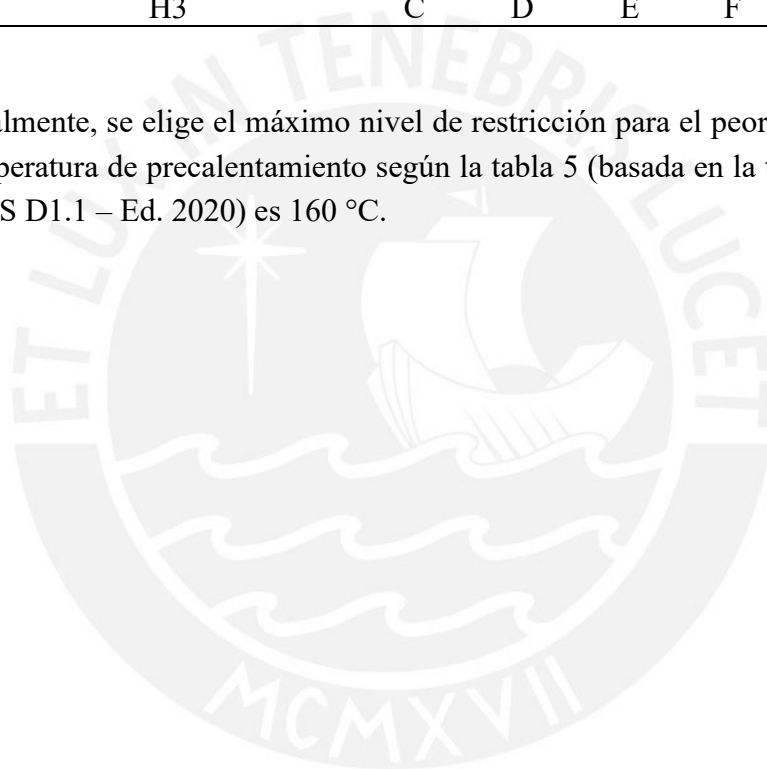


Tabla 5 Temperatura de precalentamiento mínimo y temperatura de interpase según AWS D1.1 - Ed. 2020

Precalentamiento mínimo y temperatura de interpase para tres niveles de restricción de junta (ver B6.2.4)		Precalentamiento mínimo y temperatura de interpase (°C)						
Nivel	Espesor (mm)	Agrupación de susceptibilidad						
		A	B	C	D	E	F	G
Bajo	<10	<20	<20	<20	<20	60	140	150
	10-20 incl.	<20	<20	20	60	100	140	150
	>20-38 incl.	<20	<20	20	80	110	140	150
	>38-75 incl.	20	20	40	95	120	140	150
	>75	20	20	40	95	120	140	150
Medio	<10	<20	<20	<20	<20	70	140	160
	10-20 incl.	<20	<20	20	80	115	145	160
	>20-38 incl.	20	20	75	110	140	150	160
	>38-75 incl.	20	80	110	130	150	150	160
	>75	95	120	140	150	160	160	160
Alto	<10	<20	<20	20	40	110	150	160
	10-20 incl.	<20	20	65	105	140	160	160
	>20-38 incl.	20	85	115	140	150	160	160
	>38-75 incl.	115	130	150	150	160	160	160
	>75	115	130	150	150	160	160	160

La temperatura de precalentamiento que se elegirá para realizar la soldadura del A36 con el AISI 4340 será la recomendada por Ito-Bessyo para asegurar un bajo gradiente de temperatura y reducir al mínimo las posibilidades de fragilización. Asimismo, se procurará obtener una velocidad de enfriamiento lenta teniendo en cuenta el precalentamiento y la temperatura de interpase elegidas.

#### 1.4.5. Temperatura de interpase

La temperatura de interpase es la temperatura que hay entre cada pase de soldadura realizado y el objetivo de controlar la temperatura de interpase es el de reducir el riesgo de fisuración por hidrogeno, prevenir la reducción de las propiedades mecánicas de los aceros, etc.

La temperatura de interpase puede ser especificada como un mínimo, un máximo o ambos dependiendo del material a ser soldado. La temperatura de interpase mínima es generalmente la temperatura de precalentamiento y el objetivo principal es reducir o eliminar el riesgo de fisuración en frío.

Para evitar crecimiento del tamaño de grano y afectar las propiedades del acero AISI 4340, se propone una temperatura de interfase igual a la temperatura de precalentamiento utilizada: 365,2 °C.

#### 1.4.6. Temperatura de Post-calentamiento

Debido a que el acero AISI 4340 está templado y revenido, se deberá tener especial cuidado en la estimación del tratamiento térmico post-soldadura debido a que este acero reduce su dureza conforme aumenta la temperatura de revenido luego del templado (ver figura 15).

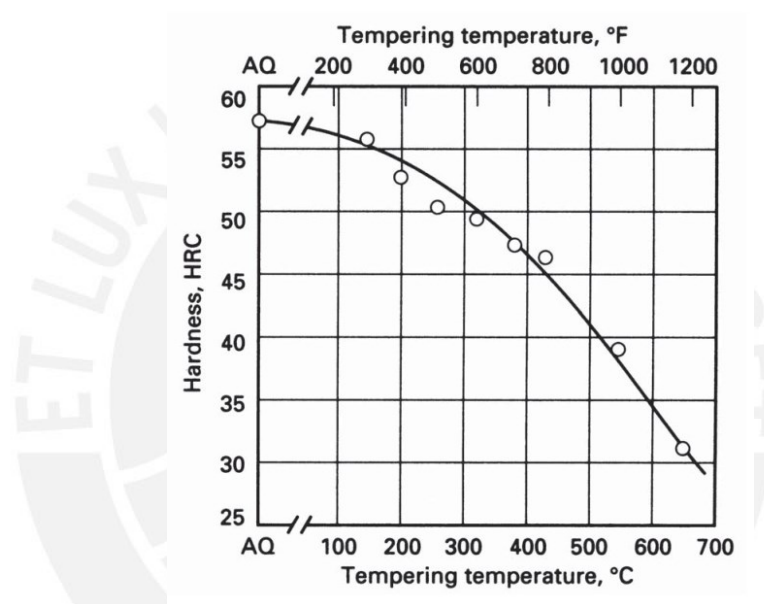


Figura 15 Curva de revenido para el acero AISI 4340 [5]

Luego de la soldadura, se deberá hacer un distensionado debido a las tensiones residuales que se presentan luego de la soldadura y debido a que el acero AISI 4340 es altamente templable. Por esto, se deberá conocer la temperatura de revenido a la cual fue sometido el eje y reducir la temperatura en 25° para no afectar las propiedades mecánicas y dureza del material. En ninguna circunstancia, el distensionado de soldadura puede sobrepasar la temperatura de revenido.

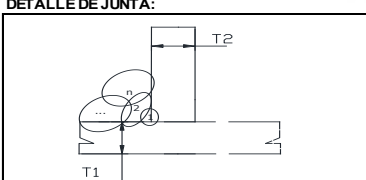
#### 1.4.7. Velocidad de enfriamiento

El enfriamiento se debe realizar en cal. El enfriamiento deber ser lento y controlado para evitar problemas metalúrgicos.

## 2.7. PROCEDIMIENTOS PROPUESTOS PARA LA PLACA BASE Y EJE DEL ROTOR

La siguiente tabla 6 muestra el procedimiento propuesto de acuerdo con las variables elegidas

Tabla 6 Especificación de procedimiento de soldadura del caso

GAP INGENIEROS		ESPECIFICACION DE PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS) AWS D1.1 - Ed. 2020				WPS N°: WPS-GAP-TSS1 Pág. 1 de 1	
CALIFICADA <b>X</b>					REGISTRO DE CALIFICACIÓN DE PROCEDIMIENTO (PQR): <b>PQR-GAP-TSS1</b>		
Empresa: <b>GAP INGENIEROS</b> Proceso de Soldadura (s): <b>GMAW</b> Soporte - PQR No. (s): <b>PQR-GAP-TSS1</b>		Revisión: <b>0</b> Fecha: <b>30.08.2020</b> Por: <b>Gerson Arroyo Páez</b>					
<b>DISEÑO DE JUNTA USADO:</b> Tipo: Filete Simple: - Doble: - Plancha de respaldo: Sí - No - Material de plancha respaldo: - Separación de raíz (R): 0mm - 1mm Cara de la raíz (F): - Ángulo de bisel (α): - Radio(J-U): - Back Gouging: Sí - No <b>X</b> Método: -				Fecha: <b>30.08.2020</b> Tipo: Manual: - Mecanizado: - Semi-Automát.: <b>x</b> Automático: -		<b>POSICIÓN:</b> Posición en bisel: - Posición en filete: <b>2GR</b> Progresión Ascendente: - Vertical: Descendente: -	
<b>METALES BASE:</b> Especificaciones de Materiales: <b>ASTMA36 - AISI 4340</b> Tipo o Grado: - Espesor: Bisel: Ver detalle Filete: 17.5 mm. Mínimo Ver detalle Diámetro (Pipe): <b>130mm - 200mm</b>				<b>CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS:</b> Modo de transferencia: - (GMAW) Corto circuito: - Globular: - Spray: <b>x</b> Corriente: AC - DCEN - DCEP <b>x</b> Pulsado - Otro: - Electrodo de tungsteno: (GTAW) Diámetro: - Tipo: -			
<b>METALES DE APORTE:</b> Especificación AWS: <b>A 5.18</b> Clasificación AWS: <b>ER 70S-6</b> Nombre Comercial: -				<b>TÉCNICA:</b> Cordón rectilíneo u oscilante: <b>Oscilante</b> Pase múltiple o único (x lado): <b>Multiple</b> Número de electrodos: - Espaciamiento Longitudinal: - Lateral: - Ángulo: - Distancia tubo de contacto/piez: <b>10 - 20 mm</b> Martilleo: - Limpieza interpase: <b>Escobillado</b>			
<b>PROTECCIÓN:</b> Fundente: - Gas: <b>Ar / CO2</b> Composición: <b>80 % / 20 %</b> Caudal: <b>15 - 20 Lt / Min.</b> Diam. Tobera <b>16 mm</b>				<b>TRATAMIENTO TÉRMICO POST-SOLDADURA:</b> Temperatura: - Tiempo: -			
<b>PRECALENTAMIENTO:</b> Temperatura Mínima: <b>365.2</b> Temp. entre pases Mínima: <b>365.2</b> Máxima: -							
<b>DETALLE DE JUNTA:</b>  T1: 25mm - Ilimitado T2: 32.5mm - Ilimitado							
PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA							
Número de Pases	Proceso	Material de aporte		Corriente		Voltaje (V)	Velocidad de Avance (cm/min)
		Nombre	Diámetro (mm)	Tipo y Polaridad	Amperaje o Vel de alambre (A)		
1	GMAW	ER 70S-6	1.2	DCEP	250-275	29.5-30.5	30-35
2	GMAW	ER 70S-6	1.2	DCEP	260-280	30.5-31.5	48-52
n	GMAW	ER 70S-6	1.2	DCEP	260-280	30.5-31.5	48-52
GAP INGENIEROS				INSPECTOR			

### 3. CALIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA

Para empezar a realizar la calificación del procedimiento, se debe establecer el rango calificado de las variables de soldadura descritas en el procedimiento propuesto. A continuación, se procederá a mostrar los rangos calificados, probetas y ensayos necesarios para la calificación del procedimiento de soldadura.

#### 3.1. POSICIÓN DE SOLDADURA

En la figura 16, se muestra la posición de prueba a utilizar (2FR) definida en el capítulo anterior.

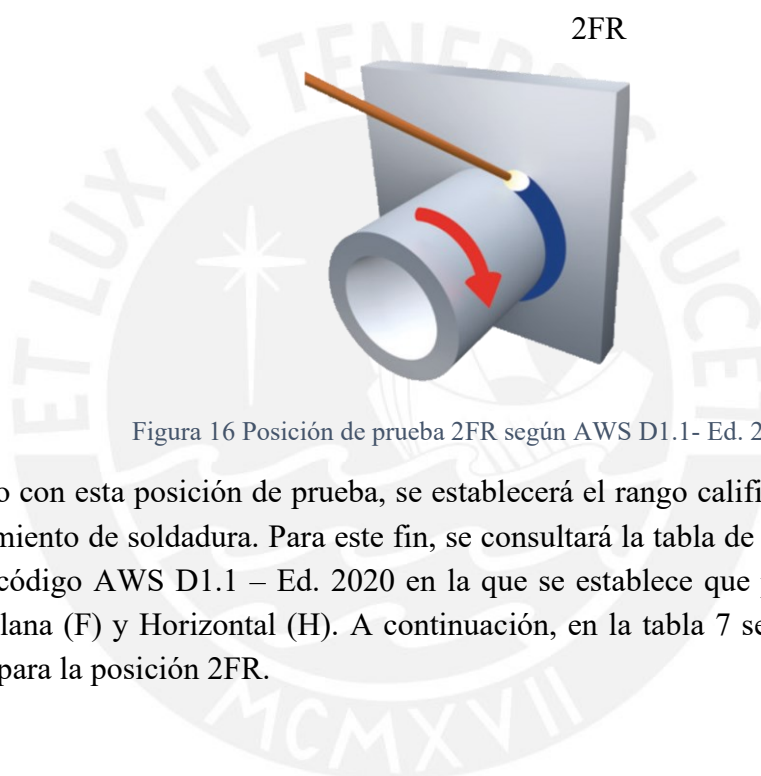


Figura 16 Posición de prueba 2FR según AWS D1.1- Ed. 2020

De acuerdo con esta posición de prueba, se establecerá el rango calificado que abarcará el procedimiento de soldadura. Para este fin, se consultará la tabla de rangos calificados 10.18 del código AWS D1.1 – Ed. 2020 en la que se establece que podrá utilizarse la posición Plana (F) y Horizontal (H). A continuación, en la tabla 7 se muestra el rango calificado para la posición 2FR.



Tabla 7 Posiciones calificadas para procedimientos de soldadura según AWS D1.1 - Ed. 2020

Prueba de calificación		Calificación de soldadura para planchas			Calificación para soldadura de tubería					Calificación para soldadura de sección rectangular				
Tipo de soldadura	Posiciones de prueba	Junta a Tope - Penetración completa	Junta a tope - Penetración parcial	Filete	Junta a Tope - Penetración completa	Junta a tope - Penetración parcial	Conexión "T,Y,K"- Penetración completa	Conexión "T,Y,K"- Penetración parcial	Filete	Junta a Tope - Penetración completa	Junta a tope - Penetración parcial	Conexión "T,Y,K"- Penetración completa	Conexión "T,Y,K"- Penetración parcial	Filete
TUBULAR	Canal (tubería o sección cuadrada)	1G Rotada 2G 5G (2G + 5G) 6G 6GR	F F, H F, V, OH All All All	F F, H F, V, OH All All All	F F, H F, V, OH All All All	Fa (F, H) (F, V, OH) All All All	F F, H F, V, OH All All All	All All All	F F, H F, V, OH All All All	F (F, H) (F, V, OH) Alla Alla Allb	F F, H F, V, OH All All All	All All All	F F, H F, V, OH All All All	F F, H F, V, OH All All All
	Filete de tubería	1F Rotada 2F 2F Rotada 4F 5F			F F, H F, H F, H, OH All					F F, H F, H F, H, OH All				F F, H F, H F, H, OH All

### 3.2. TIPOS DE PROBETAS PARA CALIFICACIÓN, MÉTODOS DE ENSAYO Y CRITERIOS DE ACEPTACIÓN PARA LA CALIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA

#### 3.2.1. Tipos de probeta y métodos de ensayo

Para poder definir los rangos calificados de diámetro y espesores a utilizar en producción, se deben conocer los tipos y números de probetas para calificar el procedimiento de soldadura en filete. De acuerdo con la tabla 10.11 del código AWS D1.1 – Ed. 2020, para múltiples pases usados en la construcción, se debe hacer un armado por cada posición a calificar, y los números de especímenes requeridos son 3 caras de macrografía.

Los espesores para calificar son ilimitados y el mínimo tamaño de filete es el realizado en la prueba. Esto se puede apreciar en la siguiente tabla 8:

Tabla 8 Números y tipos de especímenes y tamaños para calificación de procedimientos de filetes

Especimen de prueba	Tamaño de Filete	Número de soldaduras por Procedimiento	Requerimientos de especímenes de prueba			Tamaños calificados	
			Macrografía	Tracción de todo el metal de soldadura	Doblez de Lado	Espesor de tubería	Tamaño de Filete
Prueba - T de tubería	Pase simple, Máx. tamaño a ser usado en la construcción	1 en cada posición a ser usada	3 caras	—	—	Ilimitado	Máximo de prueba y menores
	Pase múltiple, Mín. tamaño a ser usado en la construcción	1 en cada posición a ser usada	3 caras	—	—	Ilimitado	Mínimo de prueba y mayores

Según la figura 10.16 del código AWS D1.1 – Ed. 2020, se tiene que la figura 17 de armado para ensayo de macrografía en filete es la siguiente

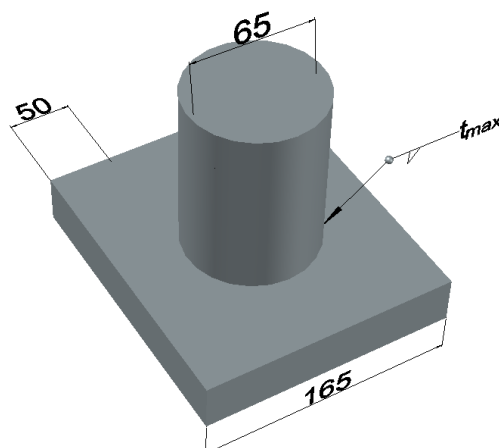


Figura 17 Diagrama de armado de probeta para calificación de procedimiento de soldadura según AWS D1.1 - Ed. 2020

La figura 18, muestra la seccion transversal de la probeta “T” para ensayos de macrografia en filete.

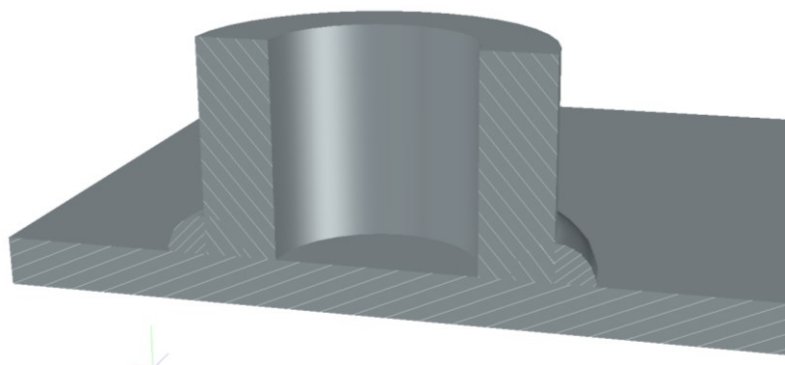


Figura 18 Espécimen para macrografía según AWS D1.1-Ed.2020

Cabe resaltar, que de acuerdo con la tabla 10.9 del código AWS D1.1-Ed. 2020, el rango de diámetro calificado es desde el diámetro utilizado en la prueba hasta ilimitado. Esto se puede apreciar en la tabla 9.

Tabla 9 Diámetros y espesores calificados según tamaño de probeta de acuerdo con AWS D1.1-Ed.2020

	Diámetro nominal (mm)	Espesor nominal (mm)	Diámetro nominal de tubería o tamaño de tubo calificado (mm)
Tamaño de probeta	<600	T>20	Diámetro de prueba y más

### 3.2.2. Criterios de aceptación

Los especímenes de las probetas deben ser cortadas como se muestra en la figura 18. Métodos de ensayo y aceptación deben estar de acuerdo con 6.10 con las siguientes excepciones:

- Para conexiones “T -”, “Y -” y “K-” que no limiten la fusión del metal base por la raíz.
- Para ensambles tubulares, la circunferencia completa de la soldadura debe ser radiografiado o con ultrasonido en concordancia con el apartado 8 parte C o apartado 10 parte F, si fuera aplicable.

De acuerdo con la tabla 10.11 del código AWS D1.1 – Ed.2020, todos los ensambles de prueba deben ser inspeccionados visualmente. De acuerdo con el código AWS D1.1 – Ed. 2020, la inspección visual de soldaduras en filete debe cumplir los siguientes requisitos:

- Ninguna fisura debe ser aceptada, sin importar su tamaño
- Los cráteres deben ser rellenados al final de la soldadura en toda la sección transversal.
- La pierna de soldadura debe ser del tamaño definido
- Para la inspección de este procedimiento, la convexidad máxima permitida debe ser 3mm.

- Las socavaciones no deben exceder 1mm

Debido a que la única prueba a realizar para calificar el procedimiento es la prueba de macrografía, no es necesario realizar un ensayo no destructivo, porque estos ensayos se hacen antes de las pruebas mecánicas.

Para realizar la prueba de macrografía, se deberá preparar con un acabado superficial que permita su examinación. Una solución de nital al 2% podría usarse para atacar la superficie a examinar y revelar los pasos y penetración de la soldadura.

#### 3.2.2.1. Criterios de aceptación para macrografías.

Para una aceptable calificación, la probeta debe ser inspeccionada de la siguiente manera:

- No debe haber falta de fusión en la raíz.
- La pierna mínima de filete debe ser respetada.



## **4. CALIFICACIÓN DE SOLDADORES**

Una vez realizada la calificación de procedimientos de soldadura, la calificación de los soldadores se realizará de acuerdo con la parte D del Capítulo 10 del código AWS D1.1 – Ed. 2020.

### **4.1. POSICIÓN DE SOLDADURA PARA LA CALIFICACIÓN DE SOLDADORES**

La calificación de las posiciones de soldadura para los soldadores debe ser conforme a la tabla 10, basada en la tabla 10.12 del código AWS D1.1-2020.

Para asegurar una habilidad que permita realizar una soldadura lo más similar a la junta soldada en producción, se requerirá que el soldador suelde en posición 2F Rotada (ver figura 16).

Cabe resaltar que cuando se requiere calificar soldadura de planchas paralelas al eje de la tubería o soldadura de tuberías longitudinales, no se requiere calificar utilizando el apartado 10 del código AWS D1.1 – Ed. 2020, ya que puede realizarse usando el apartado 6 que corresponde a la soldadura de planchas.

### **4.2. TIPOS DE PROBETAS PARA CALIFICACIÓN Y MÉTODOS DE ENSAYO PARA LA CALIFICACIÓN DE SOLDADORES**

Los números y tipos de especímenes con su rango calificado deben estar de acuerdo con la tabla 10.13 del código AWS D1.1 – Ed. 2020. De acuerdo con esta tabla (ver tabla 11), se elegirá la opción de armado para soldadura en filete número 3 (ver figura 17).

Debido a que el armado se realizará de acuerdo con la figura 17, el único ensayo necesario para la calificación del soldador es la macrografía según la figura 18.

### **4.3. CRITERIOS DE ACEPTACIÓN PARA LA CALIFICACIÓN DE SOLDADORES**

De acuerdo con la cláusula 10.21 del código AWS D1.1 – Ed. 2020, los criterios de aceptación para calificación de soldadores usando macrografía son los siguientes:

- No debe presentar fisuras.
- Debe existir fusión completa entre pases de soldadura y entre el material base y la soldadura
- La convexidad máxima permitida será de 3mm.
- Las socavaciones no deben exceder 1mm.
- Las porosidades no deben ser mayores a 1 mm, Las porosidades acumuladas no deben exceder 6mm.
- No debe existir acumulación de escoria, la suma de las más grandes no debe exceder 4mm.

Tabla 10 Posición de calificación de soldadores y operarios de soldadura - Plancha y tubería

Prueba de calificación		Calificación de soldadura para planchas			Calificación para soldadura de tubería					Calificación para soldadura de sección rectangular				
Tipo de soldadura	Posiciones de prueba	Junta a Tope - Penetración completa	Junta a tope - Penetración parcial	Filete	Junta a Tope - Penetración completa	Junta a tope - Penetración parcial	Conexión "T,Y,K"- Penetración completa	Conexión "T,Y,K"- Penetración parcial	Filete	Junta a Tope - Penetración completa	Junta a tope - Penetración parcial	Conexión "T,Y,K"- Penetración completa	Conexión "T,Y,K"- Penetración parcial	Filete
TUBULAR	Canal (tubería o sección cuadrada)	1G Rotada 2G 5G (2G + 5G) 6G 6GR	F F, H F, V, OH All All All	F F, H F, V, OH All All All	F F, H F, V, OH All All All	Fa (F, H) (F, V, OH) Alla Alla Allb	F F, H F, V, OH All All All	F F, H F, V, OH All All All	F F, H F, V, OH All All All	Fa (F, H) (F, V, OH) Alla Alla Allb	F F, H F, V, OH All All All	All	F F, H F, V, OH All All All	All All
	Filete de tubería	1F Rotada 2F 2F Rotada 4F 5F			F F, H F, H F, H OH All					F F, H F, H F, H OH All				F F, H F, H F, H, OH All

Tabla 11 Dimensiones calificadas de especímenes para la calificación de los soldadores

Producción T-, Y-, o K-conexión de soldadura de filete			Numero de especímenes				Dimensiones calificadas					
Tipos de soldadura de prueba	Tamaño nominal de tubería, Diam. (mm)	Tamaño nominal de espesores, mm	Rotura de soldadura a filete	Macrografía	Doblez de raíz	Doblez de cara	Tamaño nominal de tubería o sección cuadrada, Diam. (mm)		Espesor nominal de tubería o plancha calificada, mm		Ángulos diédricos calificados	
							Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
Posición 5G (Canal)	Ilimitado	$\geq 3$	—	—	2	2	Note e	Ilimitado	3d	Ilimitado	30°	Ilimitado
Opción 1— Filete (Fig. 4.25)	—	$\geq 12$	1	1	—	—	600	Ilimitado	3	Ilimitado	60°	Ilimitado
Opción 2— Filete (Fig. 4.22)	—	10	—	—	2	—	600	Ilimitado	3	Ilimitado	60°	Ilimitado
Opción 3— Filete (Fig. 9.21)	Ilimitado	$\geq 3$	—	1	—	—	D	Ilimitado	3	Ilimitado	30°	Ilimitado

## 6. CONCLUSIONES

- a) Se establecieron los parámetros de soldadura de aletas ASTM A36 y ejes AISI 4340, así como también se definieron los ensayos necesarios para la calificación del procedimiento de soldadura. Esto se logró siguiendo los lineamientos de soldeo y rangos de espesores a soldar.
- b) Se llegaron a estudiar completamente las propiedades, características y aplicaciones de los aceros al carbono y aceros de baja aleación, en especial los aceros AISI 4340 y ASTM A36.
- c) Se elaboró y calificó el procedimiento de soldadura preliminar de soldadura estudiando las propiedades, características y aplicaciones de los aceros de bajo carbono y aceros de baja aleación.
- d) Se elaboró la calificación del soldador de acuerdo con el código AWS D1.1 y teniendo en cuenta las necesidades en ejecución de la soldadura en campo.
- e) Se ha sustentado la selección del material de aporte y proceso de soldadura desde el punto de vista tecnológico y aterrizado en la situación actual de la industria peruana, así como desde el punto de vista económico tomando en cuenta equipos usados ampliamente en la industria peruana. Finalmente, se han evaluado y verificado las condiciones de pre y post calentamiento de acuerdo a los materiales base AISI 4340 y ASTM A36.
- f) Se lograron establecer los ensayos y probetas necesarios para calificar el procedimiento de soldadura y soldador propuestos teniendo en cuenta los lineamientos del código AWS D1.1 – Ed. 2020.



## 7. BIBLIOGRAFÍA

[1] ESAB

Proceso de Soldadura FCAW - Alambre Tubular Relleno de Fundente. Consulta: 18 de febrero del 2020.

<https://www.esab.com.ar/ar/sp/education/blog/proceso-soldadura-fcaw-alambre-tubular-relleno-de-fundente-definiciones-del-proceso.cfm>

[2]ASM HANDBOOK COMMITTEE

2019 Welding, Brazing, and Soldering. EEUU:ASM

[3]Comité D1 de Soldadura Estructural de la Sociedad Americana de Soldadura (AWS)

2020 AWS D1.1/D1.1M: Structural Welding Code – Steel. EEUU: AWS

[4]ASTM

2008 A36/A36M-08. EEUU: ASTM

[5]ASM HANDBOOK COMMITTEE

2019 Heat Treating. EEUU:ASM

