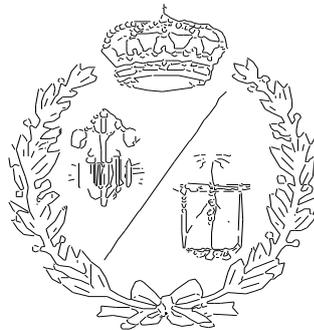


**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS  
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN**

**UNIVERSIDAD DE CANTABRIA**



***Proyecto Fin de Grado***

**ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DEL  
TRATAMIENTO TÉRMICO DE ALIVIO DE  
TENSIONES EN LAS PROPIEDADES  
MECÁNICAS DE UNIONES SOLDADAS**

**(Study of the influence of stress relieving heat  
treatment on the mechanical properties of  
welded joints)**

Para acceder al Título de

**GRADUADA EN INGENIERÍA MECÁNICA**

**Autor: Sonia García Gil  
Julio – 2024**

## RESUMEN

De la necesidad de cualificar un proceso de soldadura en una empresa especializada en recargues y soldaduras automáticas, surge este proyecto cuyo objetivo principal es el estudio de cómo varían las propiedades mecánicas de una unión soldada a tope mediante soldadura GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) en función del tratamiento térmico aplicado. Debido a las características del cupón de soldadura empleado para realizar dicho estudio, también se ha permitido diferenciar entre el proceso de soldadura manual y el automático.

Para poder alcanzar dicho objetivo primero se ha fabricado el cupón atendiendo a la normativa necesaria para verificar que es apto y que representa adecuadamente el proceso de soldadura que se quiere cualificar. Este paso conlleva un proceso de recargue, la aplicación de los tratamientos térmicos y la realización de la soldadura a tope.

Posteriormente se realizan los ensayos no destructivos de inspección visual, líquidos penetrantes y ensayo radiográfico para asegurar que la unión soldada está libre de defectos superficiales e imperfecciones como poros o discontinuidades.

Tras la aprobación de los ensayos no destructivos, se extraen probetas del cupón para realizar los ensayos destructivos de tracción, dureza, impacto y doblado, a partir de los cuales se obtienen las propiedades mecánicas de la unión soldada.

## **ABSTRACT**

From the need to qualify a welding process in a company specialized in automatic welding and surfacing, arises this project whose main objective is the study of how the mechanical properties of a butt weld joint by GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) welding change according to the heat treatment applied. Due to the characteristics of the welded coupon used to carry out this study, it has also been possible to differentiate between the manual and the automatic welding process.

In order to achieve this objective, the coupon was first manufactured according to the necessary standards to verify that it is suitable and adequately represents the welding process to be qualified. This step involves an overload process, the application of heat treatments and butt welding.

Subsequently, non-destructive test as visual inspection, liquid penetrant and radiographic tests are performed to ensure that the welded joint is free of surface defects and imperfections such as pores or discontinuities.

After approval of the non-destructive tests, specimens are extracted from the coupon for destructive tensile, hardness, impact and bending test, from which the mechanical properties of the welded joint are obtained.

## **ÍNDICE GENERAL**

**DOCUMENTO N°1: MEMORIA**

**DOCUMENTO N°2: ANEXOS**

**DOCUMENTO N°3: PLANOS**

**DOCUMENTO N°4: PLIEGO DE CONDICIONES**

**DOCUMENTO N°5: PRESUPUESTO**

---

# **DOCUMENTO N°1: MEMORIA**

---

# ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS.....	8
ÍNDICE DE TABLAS .....	11
1 INTRODUCCIÓN.....	12
2 OBJETIVOS.....	14
3 MARCO TEÓRICO .....	15
3.1 PROCESO DE SOLDADURA .....	15
3.2 TIPOS DE SOLDADURAS .....	15
3.3 POSICIONES DE SOLDADURAS.....	20
3.4 RECARGUES .....	21
3.5 TENSIONES RESIDUALES .....	21
3.6 TRATAMIENTOS TÉRMICOS .....	23
3.7 CUPONES DE SOLDADURA .....	26
3.8 ENSAYOS .....	27
3.9 DOCUMENTOS DE CALIDAD EN SOLDADURA.....	35
4 UBICACIÓN DE LA UNIÓN SOLDADA .....	36
5 PREPARACIÓN DEL CUPÓN DE SOLDADURA .....	40
5.1 GEOMETRÍA DEL CUPÓN .....	40
5.2 MATERIALES.....	41
5.2 PROCESO DE RECARGUE .....	42
5.3 TRATAMIENTO TÉRMICO.....	44
5.3.1 Preparación para el tratamiento térmico.....	45
5.3.2 Horno de calentamiento.....	45
5.3.3 Termopares y registrador .....	45
5.3.5 Aplicación de los tratamientos térmicos.....	46
5.3.7 Procedimiento de fijación y eliminación de los termopares temporales.....	47
5.4 PROCESO DE SOLDADURA .....	48
5.5 OBTENCIÓN DE LAS PROBETAS .....	51
5.5.1 Ensayo de tracción .....	52
5.5.2 Ensayo de dureza.....	54
5.5.3 Ensayo de impacto.....	55
5.5.4 Ensayo de doblado .....	56
6 ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS.....	57
6.1 INSPECCIÓN VISUAL .....	57
6.1.1 Procedimiento y especificaciones .....	57
6.1.2 Criterios de aceptación.....	58

<b>6.2 EXÁMEN RADIOGRÁFICO</b> .....	58
<b>6.2.1 Procedimiento y especificaciones</b> .....	58
<b>6.2.2 Criterios de aceptación</b> .....	60
<b>6.3 LÍQUIDOS PENETRANTES</b> .....	64
<b>6.3.1 Procedimiento y especificaciones</b> .....	64
<b>6.3.2 Criterios de aceptación</b> .....	65
<b>7 ENSAYOS DESTRUCTIVOS</b> .....	<b>67</b>
<b>7.1 ENSAYO DE TRACCIÓN TRANSVERSAL</b> .....	67
<b>7.1.1 Procedimiento y especificaciones</b> .....	67
<b>7.1.2 Criterios de aceptación</b> .....	68
<b>7.2 ENSAYO DE DUREZA (VICKERS)</b> .....	68
<b>7.2.1 Procedimiento y especificaciones</b> .....	68
<b>7.2.2 Criterios de aceptación</b> .....	70
<b>7.3 ENSAYO DE TENACIDAD AL IMPACTO (CHARPY)</b> .....	71
<b>7.3.1 Procedimiento y especificaciones</b> .....	71
<b>7.3.2 Criterios de aceptación</b> .....	72
<b>7.4 ENSAYO DE DOBLADO</b> .....	73
<b>7.4.1 Procedimiento y especificaciones</b> .....	73
<b>7.4.2 Criterios de aceptación</b> .....	73
<b>8 RESULTADOS</b> .....	<b>75</b>
<b>8.1 ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS</b> .....	75
<b>8.1.1 Inspección visual</b> .....	75
<b>8.1.2 Examen radiográfico</b> .....	75
<b>8.1.3 Líquidos penetrantes</b> .....	76
<b>8.2 ENSAYOS DESTRUCTIVOS</b> .....	76
<b>8.2.1 Ensayo de tracción transversal</b> .....	76
<b>8.2.2 Ensayo de dureza (Vickers)</b> .....	78
<b>8.2.3 Ensayo de tenacidad al impacto (Charpy)</b> .....	79
<b>8.2.4 Ensayo de doblado</b> .....	80
<b>9 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS E INFLUENCIA DE LOS TRATAMIENTOS TÉRMICOS</b> .....	<b>81</b>
<b>9.1 RESISTENCIA A LA TRACCIÓN</b> .....	81
<b>9.2 DUREZA</b> .....	83
<b>9.3 ENERGÍA ABSORBIDA</b> .....	85
<b>10 CONCLUSIONES</b> .....	<b>87</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. a) Unión a tope b) Unión de esquina c) Unión a solapo d) Unión en T e) Unión de borde [2].	16
Figura 2. Soldeo por resistencia [3].	16
Figura 3. Soldeo por fricción (FSW) [4].	17
Figura 4. Soldeo por explosión [3].	17
Figura 5. Soldadura por oxigás [5].	18
Figura 6. Esquema Soldadura SMAW [6].	18
Figura 7. Soldadura SAW [8].	19
Figura 8. Esquema Soldadura GTAW [9].	19
Figura 9. Esquema Soldadura GMAW [9].	20
Figura 10. Esquema distinción de las zonas en la soldadura [13].	22
Figura 11. Diagrama TTT [15].	24
Figura 12. VT Inspección Visual [17].	27
Figura 13. PT Líquidos penetrantes [18].	28
Figura 14. MT Partículas Magnéticas [19].	29
Figura 15. UT Ultrasonidos [20].	29
Figura 16. Esquema RT Radiografías [21].	30
Figura 17. Ensayo de tracción [19].	31
Figura 18. Ensayo de doblado [22].	31
Figura 19. Ensayo de dureza [23].	32
Figura 20. Ensayo de dureza Rockwell [24].	32
Figura 21. Ensayo de dureza Vickers [24].	32
Figura 22. Ensayo de dureza Brinell [24].	33
Figura 23. Esquema Ensayo Péndulo de Charpy [25].	34
Figura 24. Ensayo macrográfico en soldadura [26].	34
Figura 25. Reactor HDS.	36
Figura 26. Localización de los spools de salida del catalizador.	37
Figura 27. Spool de salida del catalizador.	38
Figura 28. Sección interior del spool de salida del catalizador.	38
Figura 29. Localización del anillo de acero inoxidable soldado a la brida.	39
Figura 30. Esquema cupón de soldadura.	41
Figura 31. Proceso de recargue ASME IX.	42
Figura 32. Esquema placa de acero aleado recargada.	44

Figura 33. Placas de acero aleado recargadas. ....	44
Figura 34. Espesor de la placa recargada. ....	44
Figura 35. Gráfica tratamiento térmico con condición máxima realizado. ....	46
Figura 36. Gráfica tratamiento térmico con condición mínima realizado. ....	47
Figura 37. Esquema de la unión de un termopar. ....	47
Figura 38. Penetración del termopar en el material base. ....	48
Figura 39. Esquema soldadura a tope con bisel doble. ....	48
Figura 40. Preparación del borde de la placa de acero inoxidable. ....	49
Figura 41. Elementos antes del proceso de soldadura. ....	49
Figura 42. Cupón soldado por ambas caras. ....	49
Figura 43. Esquema secuencia de soldadura. ....	50
Figura 44. Esquema división del cupón para la obtención de las probetas. ....	51
Figura 45. Marcado del cupón para extraer las probetas. ....	52
Figura 46. Extracción de las probetas. ....	52
Figura 47. Esquema obtención de las probetas para el ensayo de tracción. ....	53
Figura 48. Cuatro probetas con la condición de tratamiento térmico máximo (imagen de la izquierda) y cuatro con el mínimo (imagen de la derecha). ....	53
Figura 49. Probetas obtenidas para el ensayo de dureza de cada tratamiento térmico, la de la derecha con la condición máxima y la de la izquierda con la condición mínima. ....	55
Figura 50. Probetas obtenidas para el ensayo de Charpy del tratamiento térmico de mínima condición, las tres de la izquierda pertenecientes a la soldadura manual y las tres de la derecha a la automática. ....	55
Figura 51. Obtención de 4 probetas con la condición de tratamiento térmico máximo. ....	56
Figura 52. Disposición para el ensayo de soldaduras planas con la fuente de radiación en un lado y la película en el lado opuesto. ....	59
Figura 53. Sistema de referencia aplicado. ....	60
Figura 54. Indicaciones redondeadas aleatorias. a) t entre 3 y 6 mm b) t entre 6 y 10 mm c) t entre 10 y 19 mm d) t entre 19 y 50 mm e) t entre 50 y 100 mm f) t mayor de 100 mm. ....	61
Figura 55. Indicación aislada. ....	61
Figura 56. Grupo de indicaciones o "racimo". ....	62
Figura 57. Indicaciones redondeadas alineadas. ....	63
Figura 58. Grupos de indicaciones redondeadas alineadas. ....	63
Figura 59. Puntos de aplicación de la carga. ....	69
Figura 60. Distancias mínimas recomendadas para el ensayo de dureza Vickers. ....	69
Figura 61. Pinzas de autocentrado según ASTM E23-23 [40]. ....	71
Figura 62. Dimensiones del ensayo de doblado ASME Sec. IX [11]. ....	73

Figura 63. Probetas ensayadas a tracción. ....	77
Figura 64. Probetas ensayadas por impacto. ....	80
Figura 65. Probetas ensayadas por doblado. ....	80
Figura 66. Gráfica de la resistencia a la tracción de las probetas. ....	82
Figura 67. Puntos por zonas donde se ha medido la dureza de las probetas.....	83
Figura 68. Gráfico de dureza Vickers. ....	83
Figura 69. Gráfico de la energía absorbida en el ensayo Charpy. ....	86

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros del proceso de recargue. ....	43
Tabla 2. Parámetros empleados en la soldadura.....	50
Tabla 3. Medidas de las probetas para el ensayo de tracción.....	54
Tabla 4. Ejemplos de indicaciones redondeadas aceptables según ASME Sec. VIII-División 2 [38].....	62
Tabla 5. Materiales para el ensayo de líquidos penetrantes. ....	64
Tabla 6. Escalas de dureza y fuerzas de prueba de la normativa ASTM E92 [39]. ....	70
Tabla 7. Dimensiones de las pinzas de autocentrado según ASTM E23-23 [40]. ....	72
Tabla 8. Resultados del ensayo visual. ....	75
Tabla 9. Resultados del ensayo radiográfico. ....	75
Tabla 10. Resultados del ensayo de líquidos penetrantes.....	76
Tabla 11. Resultado del ensayo de tracción. ....	76
Tabla 12. Valores mínimos requeridos de la resistencia a la tracción.....	77
Tabla 13. Valores de dureza con el tratamiento térmico de máxima condición. ....	78
Tabla 14. Valores de dureza con el tratamiento térmico de mínima condición.....	79
Tabla 15. Resultados del ensayo Charpy.....	79
Tabla 16. Resistencia media obtenida del ensayo de tracción. ....	81

# 1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad tanto la industria metalúrgica como la industria manufacturera ocupan puestos muy importantes en la economía a nivel mundial. Desempeñan un papel fundamental en el desarrollo de infraestructuras, maquinaria y equipos de diversos sectores como automóviles, electrodomésticos, energías renovables...

Estas industrias impulsan la investigación científica y la innovación tecnológica para mejorar los procesos de producción y el desarrollo de nuevos materiales con el fin de que tengan mejores propiedades.

A nivel económico han tenido un gran impacto con la generación de empleo e impulso al crecimiento de diferentes sectores industriales, ya que los productos metálicos son utilizados como insumos en muchas otras industrias. Además, la creación de productos más competitivos en el mercado global favorece el desarrollo económico de los países.

La industria metalúrgica se encarga desde la extracción y refinado hasta el procesado de los metales, transformándolos en productos útiles y necesarios en diversas actividades industriales.

Cada metal tiene sus características y por ello es importante conocer los diferentes tipos que existen. En los productos manufacturados sobresale el empleo de metales ferrosos como el hierro y el acero y no ferrosos como son el aluminio, el cobre y la plata. En función de las aplicaciones y condiciones de trabajo a las que serán sometidas las piezas deberán seleccionarse los tipos de metales de forma apropiada.

La producción y fabricación de productos metálicos requieren diversos procesos como pueden ser la fundición, forja, corte, plegado, soldado o mecanizado entre otros. En este caso nos centraremos únicamente en la soldadura, actividad que tiene gran importancia a la hora de fabricar componentes metálicos. Dicha importancia se debe a su capacidad de modificar, reparar o unir elementos metálicos de forma permanente, con un bajo coste y una seguridad y fiabilidad considerables. Además de ser esenciales en la reparación y mantenimiento de máquinas y equipos.

Para que las soldaduras se implementen en los proyectos industriales de forma segura y eficaz, es necesario un estudio previo del proceso y una formación adecuada de los soldadores mediante el desarrollo de cupones de soldadura. Dichos cupones se someten a tratamientos térmicos y ensayos para determinar las propiedades mecánicas y las características que tendrán los materiales tras los procesos realizados.

Aprovechando el desarrollo de diversos procedimientos de soldadura necesarios para la fabricación y ensamblado de un reactor de hidrosulfuración, se estudia uno de ellos

mediante un cupón representativo de una soldadura a tope, el cual se ha dividido en dos secciones para aplicar dos tratamientos térmicos diferentes, permitiendo realizar un estudio y comparación de las propiedades mecánicas que adquieren los materiales tras la soldadura final.

## 2 OBJETIVOS

El objetivo principal del presente trabajo es el análisis de la variación de las propiedades mecánicas de los diferentes materiales que componen una soldadura a tope, formada por dos placas metálicas cuyo material base es el acero aleado al cromo-molibdeno, recubiertas de dos metales inoxidables (ER309L y ER347) y posteriormente soldadas a una tercera placa de acero inoxidable, en función del tiempo de aplicación del tratamiento térmico.

De este objetivo general se derivan una serie de objetivos específicos:

- Fabricación del cupón de soldadura, lo que implica el aprendizaje del uso de diferentes normativas UNE y del código ASME, que aseguran que desde los materiales empleados hasta su geometría simulan la soldadura real del proyecto final.
- Aplicación de diferentes tipos de ensayos, tanto destructivos como no destructivos, para la inspección de las soldaduras y obtención de las propiedades mecánicas de los materiales, además de la comprobación de los criterios de aceptación y requisitos para validar dichos ensayos.
- Desarrollo de documentación de calidad como PQR, pWPS y WPS necesaria para implementar y cualificar un proceso de soldadura.
- Realización de una comparativa de las propiedades mecánicas de los materiales de la soldadura estudiada a través de los resultados obtenidos de dichos ensayos.

Por último, de forma global se pretende profundizar y aprender cómo es la realización de un proceso de soldadura en un proyecto industrial real, y el largo y minucioso proceso que ello conlleva para asegurar su correcto desarrollo, desde la compra del material hasta la entrega del elemento final al cliente.

## 3 MARCO TEÓRICO

### 3.1 PROCESO DE SOLDADURA

La soldadura es un proceso de unión mediante fusión y moldeado de piezas metálicas el cual requiere la aplicación controlada de calor y/o presión para fundir las superficies de los elementos a consolidar. La zona de fusión se denomina baño de soldadura.

En algunos casos se emplea material de aporte, un metal de relleno que facilita la unión y debe ser compatible con el metal a soldar. Su composición suele ser similar a la del metal base. Al enfriarse el material se forma la unión fija, denominada cordón de soldadura [1].

El proceso de soldadura puede realizarse manualmente o mediante máquinas automatizadas. Gracias al avance tecnológico la automatización permite un proceso de soldadura más preciso y exacto, además de provocar mayores niveles de productividad y reducir los riesgos laborales.

### 3.2 TIPOS DE SOLDADURAS

Existen diversos procesos y tipos de soldaduras, en función de las necesidades estructurales, geométricas y condiciones de los componentes a unir se elegirán unos u otros.

Geométricamente se pueden clasificar en:

**Unión a tope**, las piezas deben colocarse en el mismo plano, sin superposición y enfrentadas por sus bordes. Suele requerir una previa preparación de los bordes de los componentes para asegurar una buena penetración y calidad en la soldadura. La penetración puede ser completa o parcial.

**Unión de esquina**, este método se emplea cuando se necesita unir dos piezas en un ángulo recto y puede ser de esquina abierta, en el caso de que se suelde con un pequeño espacio entre los elementos, o esquina cerrada, cuando están en contacto directo sin espacio.

**Unión a solapo**, en este caso los materiales a unir se superponen parcialmente y se sueldan en los puntos de contacto.

**Unión en T**, uno de los elementos se une perpendicularmente al otro formando una "T".

**Unión de borde**, se colocan las piezas metálicas de forma que se alineen sus bordes y se suelda en el punto donde convergen. Este tipo de unión se suele emplear cuando se necesita sellar bordes o los componentes son delgados.

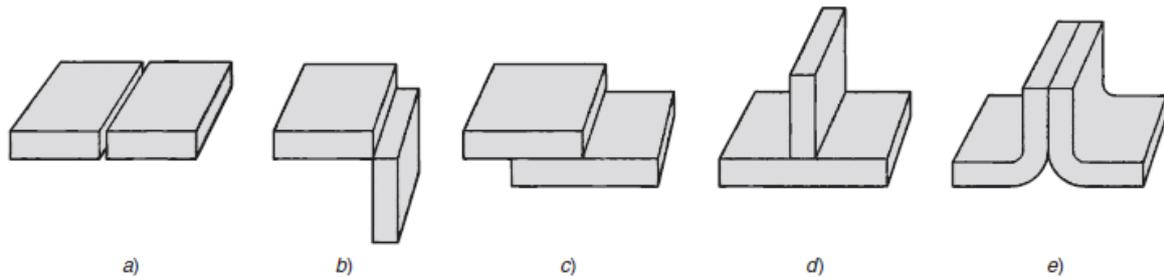


Figura 1. a) Unión a tope b) Unión de esquina c) Unión a solapo d) Unión en T e) Unión de borde [2].

Otra clasificación es en función del proceso empleado para la ejecución de la soldadura:

**Soldadura por resistencia**, la unión se logra mediante la aplicación de presión durante el paso de una corriente eléctrica de elevada intensidad a través de las superficies a unir, con ayuda de dos electrodos. El material que se desea soldar ofrece una resistencia al paso de la corriente provocando su calentamiento.

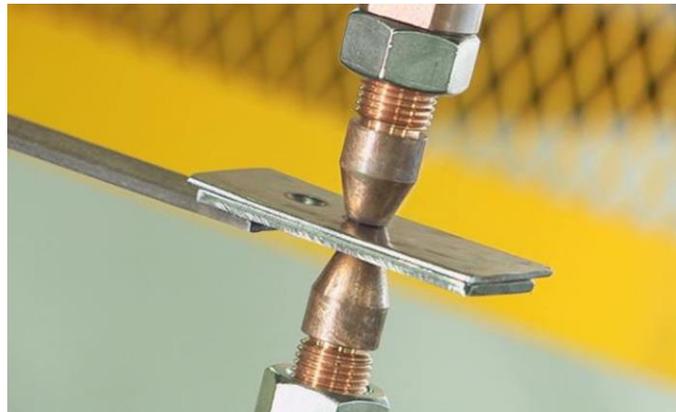


Figura 2. Soldeo por resistencia [3].

**Soldadura por fricción**, este proceso tiene dos variantes, FRW (Friction Welding) donde la unión se forma con el giro o movimiento relativo de una de las piezas con respecto a la otra mientras está bajo una presión, creando fricción y generando calor entre las dos superficies adyacentes. Y FSW (Friction Stir Welding), en este caso se emplea una herramienta giratoria formada por el pin y el hombro, se introduce aplicando una fuerza axial entre la zona de unión de las dos piezas hasta que el hombro hace contacto con las superficies a soldar. Debido a la fricción se genera calor y mediante la rotación y el avance de la herramienta se conforma un flujo plástico de material que es agitado y mezclado, dando lugar a la unión de los materiales en fase sólida.

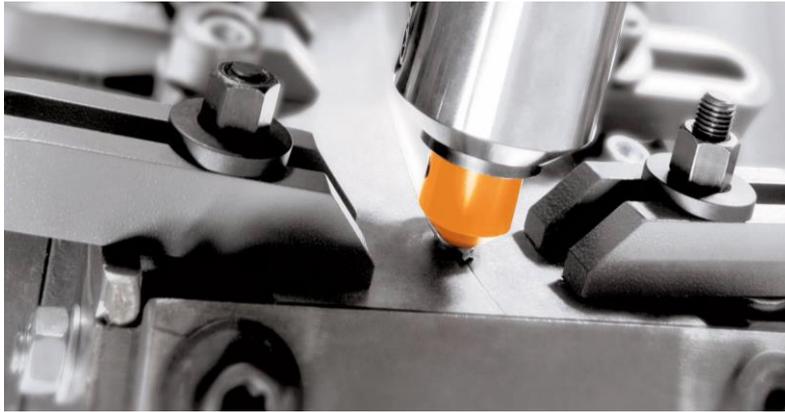


Figura 3. Soldeo por fricción (FSW) [4].

**Soldadura explosiva**, se trata de otro tipo de soldadura en estado sólido, en este caso se produce la unión por el impacto a alta velocidad de una de las piezas a unir sobre la otra, como resultado de una detonación controlada. Este método se caracteriza por ser muy rápido y permitir la unión de diferentes materiales metálicos con una alta calidad.

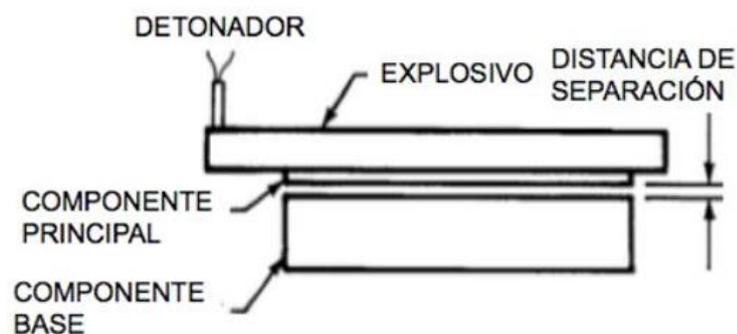


Figura 4. Soldeo por explosión [3].

**Soldadura por oxigás**, en este tipo de soldeo se emplea calor, producido por una llama obtenida de la combustión de un gas con oxígeno, para fundir el material base y en el caso de utilizarlo también el de aportación. Para este proceso es necesario un gas combustible, como puede ser el acetileno, el propano, el butano o el gas natural, y un gas comburente que es el oxígeno. El empleo de acetileno como gas combustible es el más preferible, denominándose en este caso concreto soldadura oxiacetilénica.



Figura 5. Soldadura por oxigás [5].

**Soldadura por arco eléctrico**, emplea una descarga continua entre dos conductores que se encuentran separados ligeramente, el aire o el gas comprendido entre ellos hace de conductor. Algunos de los procesos de soldadura por arco eléctrico que más se emplean en la industria son:

**Soldadura por arco metálico protegido** o SMAW (Shielded Metal Arc Welding), mediante una diferencia de potencial se genera un arco eléctrico entre el electrodo y el material base a soldar. El electrodo, en este caso consumible es una varilla metálica recubierta de fundente que protege el área de soldadura de la oxidación y de la contaminación al producir dióxido de carbono durante el proceso.

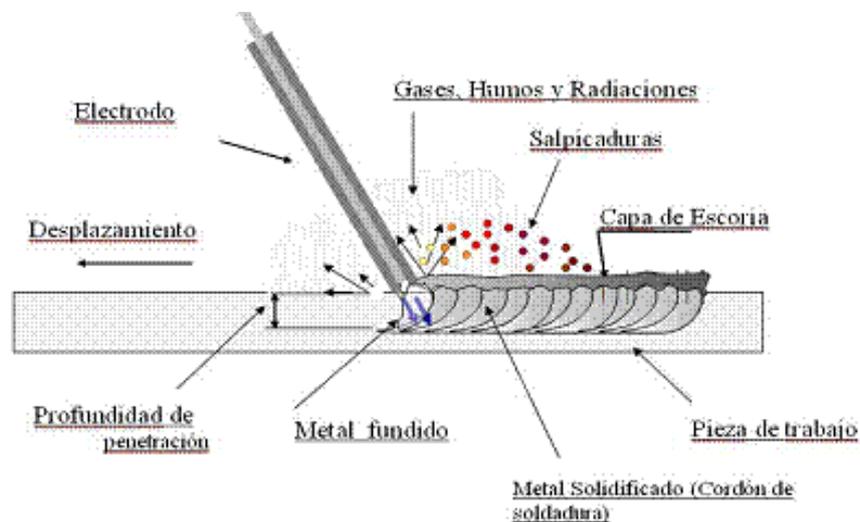


Figura 6. Esquema Soldadura SMAW [6].

**Soldadura por arco sumergido** o SAW (Submerged Arc Welding), se utiliza un electrodo descubierto y junto con el material base se establece un arco eléctrico bajo un compuesto de material fundente, el cual estabiliza el arco durante la soldadura y protege el baño de fusión. El arco queda completamente cubierto, lo que permite emplear intensidades de corriente extremadamente elevadas, produciendo una profunda penetración de soldadura.

Dicho proceso se limita a posiciones planas u horizontales debido al fundente, que es granular y a la fluidez de la soldadura [7].



Figura 7. Soldadura SAW [8].

**Soldadura con gas inerte de tungsteno**, GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) o TIG (Tungsten Inert Gas), en este caso se emplea un electrodo de tungsteno no consumible para establecer el arco eléctrico con el material base y mediante gas inerte, como argón o helio, se protege el baño de soldadura. Cuando se desea aportar material, se realiza con una varilla o alambre independiente al electrodo.

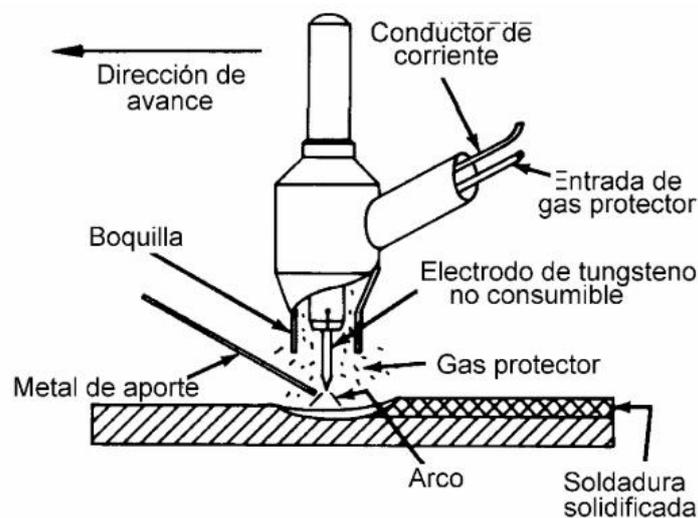


Figura 8. Esquema Soldadura GTAW [9].

**Soldadura con gas activo o protegido**, GMAW (Gas Metal Arc Welding) o MIG/MAG (Metal Inert Gas/Metal Active Gas), en este proceso también se establece un arco eléctrico entre la pieza de trabajo y el electrodo, en este caso consumible. El arco se mantiene bajo una atmósfera de gas de protección, en el caso del proceso MIG con un gas inerte, como

pueden ser el argón o el helio, y en el MAG mediante un gas activo o mezcla de gases como pueden ser el dióxido de carbono y el argón [10].

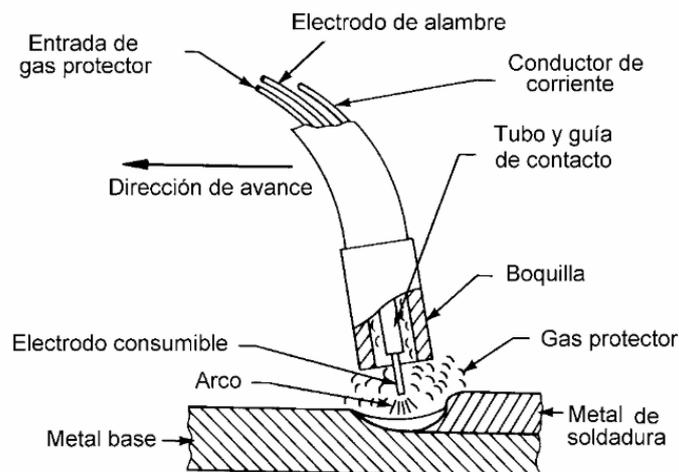


Figura 9. Esquema Soldadura GMAW [9].

### 3.3 POSICIONES DE SOLDADURAS

Además de haber una gran variedad de procesos, hay distintas formas en las que se pueden sujetar y orientar los elementos a unir, su designación depende del tipo de soldadura que se lleva a cabo y de la normativa que se aplique. Se emplean letras y números para describir la soldadura y su posición.

Aplicando la normativa americana, American Welding Society (AWS), podemos distinguir la posición plana (1), horizontal (2), vertical (3) y sobre cabeza (4). Si se trata de una soldadura en ángulo se designa con la letra "F" mientras que si se trata de una soldadura con ranura o a tope se emplea la "G" y en el caso de la soldadura de pernos se aplica la letra "S".

La normativa ASME Sec. IX [11] permite una desviación angular de  $\pm 15$  grados con respecto a los planos horizontal y vertical especificados, y una desviación angular de  $\pm 5$  grados con respecto al plano inclinado especificado. Podemos ver esquemas representativos de las posiciones de soldadura según la normativa ASME en el Anexo I.

Si tomamos como referencia la Norma Española UNE-EN ISO 6947:2019 [12] las posiciones principales de soldeo se designan por PA, PB, PC, PD, PE, PF, PG, PH, PJ o PK.

Dichas posiciones quedan definidas en función de la pendiente, ángulo del eje de la soldadura con respecto a la posición principal de soldeo, de la rotación, que se trata del ángulo de la cara de la soldadura con respecto a la posición principal de soldeo, y el ángulo de inclinación del eje en el caso de tuberías.

En este caso los márgenes de tolerancia que admite la normativa española son de  $\pm 5$  grados en pendiente y  $\pm 10$  grados en rotación respecto de la posición principal de soldeo. En el Anexo I se ilustran las posiciones de acuerdo con dicha normativa UNE.

De esta forma se estandarizan las posiciones de soldadura, contribuyendo a la eficiencia, calidad y seguridad del proceso.

### **3.4 RECARGUES**

Un proceso específico de soldadura es el recargue, en el cual se deposita una capa de metal sobre la superficie o borde de la pieza, consiguiendo aumentar su resistencia al desgaste, a la corrosión y por lo tanto su durabilidad. También permite restaurar y reconstruir piezas que han sufrido algún tipo de desgaste o deterioro.

En las aplicaciones de reparación, el material de aportación suele ser similar al material base, mientras que en los recargues cuyo objetivo es proteger o modificar la superficie del material base, son diferentes.

Otra finalidad particular de los recargues es facilitar la unión por soldadura de dos piezas compuestas de materiales disimilares, recargando una de ellas de un material intermedio denominado "material colchón" que sea compatible con ambos materiales base. Pueden llegar a emplearse varios materiales, los necesarios para permitir las posteriores uniones entre ellos.

Los recargues se realizan mediante procesos de soldadura como los anteriormente comentados, arco eléctrico, arco sumergido o soldadura con gas entre otros.

Esta técnica tiene gran importancia en el sector metalúrgico de la industria ya que permite prolongar la vida útil de los componentes, obtener recubrimientos de materiales con propiedades deseadas y ahorrar costes.

### **3.5 TENSIONES RESIDUALES**

En la zona de las piezas metálicas donde se efectúan los procesos de soldadura ocurren una serie de transformaciones y fenómenos físicos que son cruciales para la unión o recargue de los materiales, en dicha zona se pueden distinguir varias regiones, entre las que cabe destacar dos:

**Zona de fusión o línea de fusión**, donde los materiales se funden y se mezclan formando su unión. En esta región la composición química y las propiedades mecánicas pueden variar.

**Zona afectada térmicamente (ZAT)**, región adyacente a la zona de fusión donde la temperatura no es lo suficientemente alta como para provocar la fusión total del material, pero sí para alterar sus propiedades.

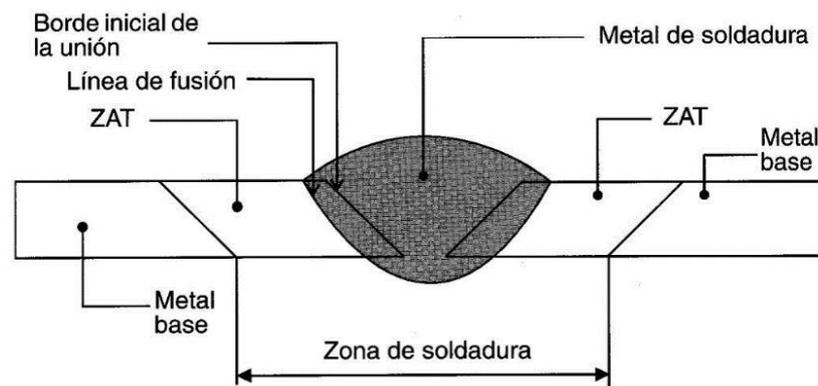


Figura 10. Esquema distinción de las zonas en la soldadura [13].

El tamaño del área afectada térmicamente, aparte de por el calor aplicado y su tiempo de aplicación, depende de diferentes factores como del nivel de difusividad térmica, que a su vez esta influenciada por la conductividad térmica, la densidad y el calor específico del material [14].

Debido al calentamiento experimentado, la microestructura y las propiedades de las regiones afectadas térmicamente se modifican de modo que difieren de las del material base.

Los cambios significativos de temperatura provocan en el material una expansión y contracción térmica desigual, llegando a alcanzar el límite elástico y provocando una deformación plástica en las zonas locales, esto da lugar a tensiones residuales, fuerzas internas que permanecen dentro del material después de que haya finalizado el proceso de soldadura.

Otro efecto ocasionado durante los procesos de soldadura en el material es la absorción de hidrógeno debido a factores ambientales o la aportación de material en condiciones inadecuadas, lo que favorece la aparición de corrosión.

Tanto las tensiones generadas como los cambios provocados en el material generalmente son indeseables y por ello dichas zonas son objeto de estudio ante su mayor probabilidad de fallo.

### 3.6 TRATAMIENTOS TÉRMICOS

Para aliviar las tensiones residuales, mitigar los efectos negativos que provocan los cambios de temperatura y mejorar las propiedades mecánicas y estructurales de la soldadura, se llevan a cabo tratamientos térmicos ya sean aplicados en piezas completas o en zonas determinadas.

Dichos tratamientos consisten en el calentamiento y enfriamiento controlado del metal y se pueden distinguir varios tipos. En función de la temperatura alcanzada, distinguimos los tratamientos subcríticos e hipercríticos.

Un **tratamiento térmico subcrítico** se basa en el calentamiento del material por debajo de su temperatura crítica, es decir no alcanza la temperatura por encima de la cual su estructura interna cambia significativamente. Cuando se aplica este tipo de proceso se busca la modificación de las propiedades mecánicas del material, pero sin cambiar drásticamente su estructura interna.

En contraste, en un **tratamiento térmico hipercrítico** se supera la temperatura crítica, lo que implica en la estructura interna del material cambios significativos. La elección entre estos tratamientos depende de los objetivos específicos de la soldadura y las propiedades mecánicas deseadas del material.

Si clasificamos los tratamientos atendiendo a su momento de aplicación podemos distinguir el precalentamiento, el horneado, y los tratamientos térmicos posteriores a la soldadura entre otros.

El **precalentamiento**, implica el aporte de calor al metal para que este tenga la temperatura específica requerida durante el proceso de soldadura denominada temperatura de precalentamiento. En el caso del acero, al calentar el material se disminuye el desnivel térmico desde la temperatura de fusión, favoreciendo la formación de estructuras metalúrgicas menos frágiles y propensas a la fisuración. Se debe procurar que la temperatura de precalentamiento sea superior a la temperatura de inicio de transformación martensítica, evitando así la formación de martensita, en caso de no poder eludirlo es conveniente que se forme muy lentamente para impedir la formación de microestructuras muy duras.

A su vez se pretende disminuir la velocidad de enfriamiento de la soldadura, lo que genera una estructura más dúctil con mayor resistencia al agrietamiento, reduce las tensiones de contracción y favorece al hidrogeno presente en la soldadura a difundirse.

Cuando se especifica la **temperatura entre pasadas**, se eleva la temperatura del material en la zona de soldadura inmediatamente antes de dar la segunda capa y posteriores. Por lo general esta temperatura suele ser menor que la requerida para una simple pasada. Algunas

propiedades como los límites de elasticidad y la rotura por tracción del metal de soldadura dependen de dicha temperatura entre pasadas.

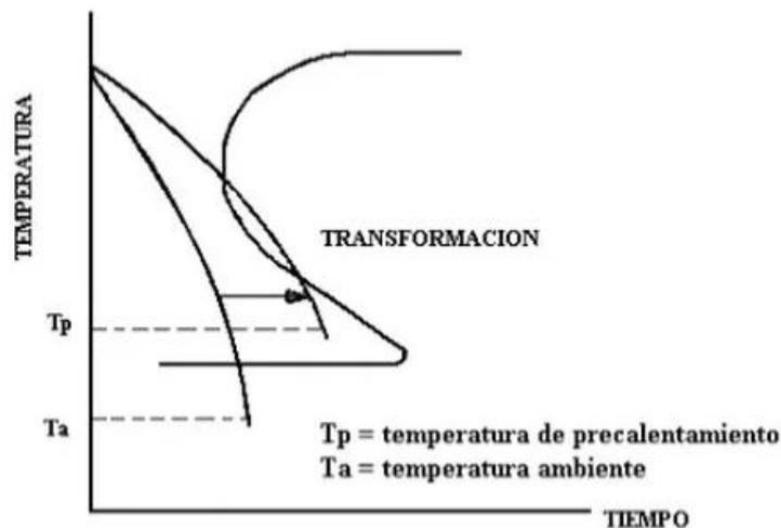


Figura 11. Diagrama TTT [15].

Como se puede visualizar en el diagrama de la Figura 11, la temperatura de precalentamiento desplaza la curva de enfriamiento hacia la derecha del diagrama TTT, favoreciendo así la formación de estructuras metalúrgicas menos frágiles y con tendencia a la fisuración [15].

El **horneado** o también denominado tratamiento térmico de deshidrogenado, desgasificado o "Bake-out" se realiza con la finalidad de eliminar el hidrógeno presente en la pieza, por lo regular se aplica antes de realizar una soldadura de reparación o un mecanizado. Este tratamiento se fundamenta en la elevación de la temperatura del material para que el hidrógeno en estado molecular que se encuentra atrapado en huecos, inclusiones y defectos de la soldadura sea capaz de disociarse en hidrógeno atómico y migrar al exterior del componente.

Algunos de los tratamientos térmicos que se llevan a cabo tras la soldadura (**PWHT**) son el distensionado, el revenido y la solubilización de carburos entre otros. Del tiempo y la temperatura depende la reducción de las tensiones residuales, siendo la temperatura el componente que mayor efecto tiene. Cada metal de soldadura tiene una temperatura determinada por debajo de la cual apenas existe reducción de tensiones, pero una vez superado dicho valor los niveles residuales de estrés disminuyen rápidamente con el aumento de temperatura. Si se mantiene dicha temperatura límite, sólo se reduce considerablemente las tensiones residuales durante los primeros 20 minutos, tras este tiempo la tasa de relajación del material es muy lenta.

El **distensionado** es un tratamiento subcrítico que tiene como objeto aliviar las tensiones residuales creadas en la soldadura, en este tratamiento no se suele superar los 650 °C.

Por otro lado, tenemos el **revenido**, también se trata de un tratamiento subcrítico que elimina la dureza de las zonas afectadas térmicamente, además de aliviar las tensiones residuales, en este caso la temperatura máxima no acostumbra a elevarse por encima de los 750 °C.

El **normalizado** seguido de un revenido es otro método de tratamiento térmico cuya finalidad es restaurar las propiedades del material. El normalizado es hipercrítico y por ello no todos los materiales toleran adecuadamente este tipo de tratamiento.

Alcanzando temperaturas de entre 900 y 1050 °C y enfriamiento rápido, se obtiene la **solubilización de carburos** en aceros inoxidables.

Los tratamientos térmicos posteriores a la soldadura mejoran la ductilidad del metal y con su correcta aplicación se logra prevenir fallas prematuras asociadas con la soldadura [16].

Por lo general se emplean hornos como equipos de calentamiento en los tratamientos térmicos y deben realizarse de acuerdo con normativas y estándares internacionales o según las especificaciones del cliente, donde se determinan todos los parámetros como la temperatura, velocidad de calentamiento y enfriamiento, tiempos de mantenimiento una vez alcanzadas determinadas temperaturas, equipos necesarios, puntos de medición... Dichos factores variarán y dependerán tanto de la composición y forma de la pieza como de las propiedades mecánicas y físicas requeridas.

En el caso del tratamiento aplicado al cupón que se estudiará en los próximos apartados se emplea un horno eléctrico. En este tipo de hornos se combinan los fenómenos de radiación y convección para calentar la pieza metálica de manera uniforme.

La **radiación** se genera mediante resistencias eléctricas ubicadas en el interior del horno, que generan calor mediante el paso de corriente eléctrica a través de ellas. El calor generado se emite en forma de radiación electromagnética, que se transfiere directamente a la superficie de la pieza metálica.

Por otro lado, la **convección** tiene como objetivo distribuir el calor de manera uniforme en el horno, generando movimiento del aire alrededor de la pieza mediante ventiladores o sistemas de circulación de aire que lo impulsan desde la fuente de calor hacia la pieza y posteriormente lo hacen circular alrededor del horno para mantener la temperatura uniforme.

Una vez alcanzada y mantenida la temperatura deseada durante el tiempo requerido, comienza el proceso de enfriamiento controlado. Normalmente se consigue regulando las resistencias eléctricas y permitiendo la entrada de aire que reduzca la temperatura en el interior del horno.

Para medir y controlar la temperatura de los cupones sometidos al tratamiento térmico se emplean termopares, dispositivos que consisten en dos conductores metálicos diferentes,

unidos en un extremo a la pieza, denominada “unión de medición o unión caliente”, y el otro extremo conectado a un instrumento medidor.

Su principio de funcionamiento se basa en que, al aplicar calor al extremo del termopar conectado a la pieza calentada, se genera una diferencia de temperatura entre ambos extremos, como consecuencia se genera una pequeña corriente eléctrica que es proporcional al diferencial de temperatura y puede ser medida por el instrumento de medición al que está conectado el termopar.

Existen diferentes tipos de termopares, cada uno tiene diferentes características y su elección dependerá del proceso que se aplique ya que cada uno de ellos está diseñado para unas aplicaciones específicas.

El termopar K, que es el más común y el empleado en este caso, está compuesto por un conductor de cromel, una aleación de níquel y cromo, y otro de alumel, una aleación de níquel y aluminio. Tiene un rango de temperaturas elevado, desde  $-200^{\circ}\text{C}$  a  $1260^{\circ}\text{C}$  y una amplia variedad de aplicaciones en la industria.

Otros termopares son el tipo J, formado por un conductor de hierro y otro de constatán, una aleación de cobre y níquel, y el de tipo T, de cobre y constatán, entre otros.

### **3.7 CUPONES DE SOLDADURA**

Es muy importante el control y verificación de los procesos de soldadura para garantizar su calidad y evitar defectos como porosidad, inclusiones, falta de fusión o penetración, deformaciones o retracciones, además de garantizar las propiedades mecánicas y estructurales requeridas de los elementos sometidos al proceso de soldadura.

Para estudiar la validez de los procesos antes de implementarlos definitivamente se realizan cupones de soldadura, muestras de material que se sueldan y se tratan de manera similar a cómo se realizaría en la pieza real.

A través de los cupones de soldadura se pueden realizar pruebas del procedimiento desarrollado, certificar el trabajo de los soldadores y realizar estudios de calidad mediante ensayos destructivos y no destructivos para evaluar las soldaduras y determinar si es válido o no antes de implementarlo en el proyecto final. Además, son fundamentales para el desarrollo de documentos de calidad exigidos como la WPS, el PQR y el WPQR.

Para la fabricación de dichos cupones se debe seguir un proceso específico pautado por normativas que garantice que son muestras representativas y válidas para el proceso que representan.

### 3.8 ENSAYOS

Los exámenes para analizar los procesos de soldadura realizados se pueden dividir en ensayos no destructivos y ensayos destructivos.

Mediante los ensayos no destructivos se pueden determinar la integridad y características de las soldaduras sin afectar a las propiedades físicas ni modificar las piezas examinadas.

Este tipo de ensayos permiten detectar grietas, poros, penetraciones incompletas, inclusiones, discontinuidades, defectos y deformidades que puedan comprometer la resistencia de los elementos soldados.

Algunos de estos ensayos son:

**Inspección visual (VT)**, permite la detección de imperfecciones y discontinuidades superficiales visualmente accesibles. Es esencial como ensayo previo y preliminar a la ejecución de cualquier otro.

Pueden distinguirse dos modalidades, la inspección visual directa donde se realiza a una distancia corta del elemento a inspeccionar, pueden emplearse lentes de aumento, microscopios e instrumentos de medición. Por otro lado, está la inspección visual remota, se emplea en aquellos casos en los que no se tiene un acceso directo o completo al componente y por consiguiente es necesario utilizar endoscopios, videoscopios o fibroscopios con los que se accede mejor a las cavidades internas y los lugares que resultan inaccesibles para el inspector.

También está el examen visual de traslúcidos, en este caso se trata de un suplemento al examen visual directo, se emplea luz artificial con una intensidad tal que iluminará y se difuminará a través de toda el área bajo examen. Es importante que la luz natural no produzca sombras ni reflejos en la superficie bajo ensayo y que sea menor que la luz aplicada a la superficie.



Figura 12. VT Inspección Visual [17].

**Líquidos penetrantes (PT)**, se basa en la capilaridad de las imperfecciones que pueden tener las soldaduras, consiste en la aplicación de un líquido que se caracteriza por su capacidad de penetración, se elimina el exceso de penetrante y después mediante un líquido absorbente, revelador, de diferente color se marcan las aberturas, imperfecciones, poros y fisuras.

Antes de realizar este tipo de ensayo es importante que la superficie de la pieza esté libre de cualquier tipo de contaminante como grasa, pintura o restos de óxido.

La aplicación del líquido penetrante puede llevarse a cabo por inmersión de la pieza, mediante una brocha o cepillo, pulverización o vertiendo directamente el líquido sobre el elemento. Una vez aplicado el penetrador deberá esperarse un tiempo de entre 5 y 15 minutos como general para que el líquido entre correctamente en las discontinuidades. Trascurrido el tiempo de penetración se limpia la superficie del exceso, se aplica el revelador y transcurridos unos minutos se pueden interpretar las indicaciones sobre la pieza ensayada.



*Figura 13. PT Líquidos penetrantes [18].*

**Partículas magnéticas (MT)**, en este tipo de ensayo se emplea el magnetismo de los materiales ferrosos. Una vez magnetizado el elemento a examinar, se aplican partículas magnéticas y si este presenta algún tipo de discontinuidad superficial o subsuperficial se forma un polo magnético atrayéndolas a las zonas con imperfecciones. Esta peculiaridad hace que este tipo de ensayo pueda realizarse en piezas pintadas o con imprimación, el grado de limpieza del componente no es tan crítico como ocurre en el ensayo de líquidos penetrantes.



Figura 14. MT Partículas Magnéticas [19].

**Ultrasonidos** (UT), dicho ensayo permite la detección de discontinuidades internas ya sea en materiales metálicos como no metálicos. Mediante un transductor se propaga un haz o un conjunto de ondas sonoras de alta frecuencia a través del material. Cuando se localiza una interfase de dos materiales diferentes, discontinuidades o defectos en el material, se producen fenómenos de reflexión, atenuación y difracción, quedando registradas por un equipo que es capaz de generar, emitir y captar ondas.

Los instrumentos de inspección ultrasónica monitorizan las imperfecciones existentes a consecuencia de la reflexión del sonido al captar interfases en los límites del material o imperfecciones, mediante el tiempo que tarda la onda ultrasónica en propagarse por el interior del material o debido a la atenuación de las ondas por su propagación en el material, debido a los fenómenos de absorción y dispersión ocasionados en el interior del elemento ensayado.

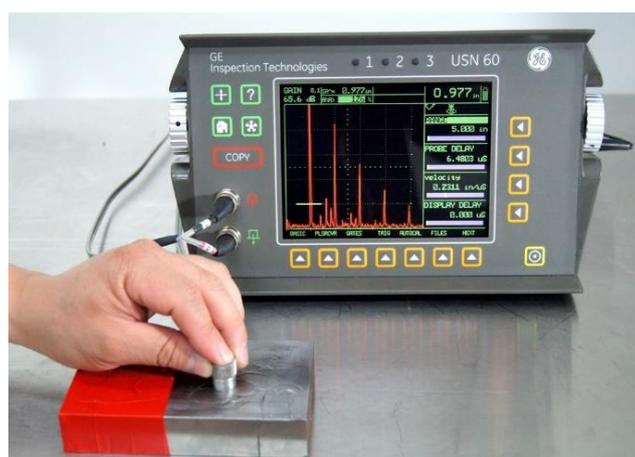


Figura 15. UT Ultrasonidos [20].

**Radiografías** (RT), en un método de ensayo volumétrico donde una fuente de radiación emite rayos X o rayos gamma a través de la pieza inspeccionada, la diferencia de radiación absorbida indica la existencia de heterogeneidades, defectos o variaciones en el

material. A un lado del componente a examinar se sitúa la fuente de radiación y al otro lado un detector de radiación, la película radiográfica, de esta forma se obtiene una imagen bidimensional representativa de la pieza donde se interpretan los defectos y discontinuidades presentes.

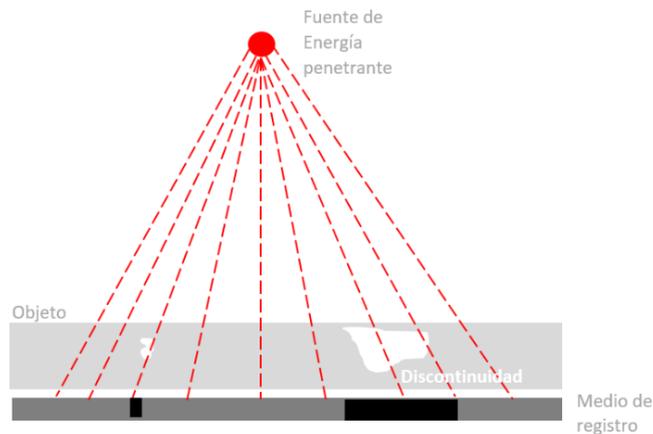


Figura 16. Esquema RT Radiografías [21].

Por otro lado, los ensayos destructivos son métodos de evaluación que proporcionan información detallada sobre las propiedades mecánicas, físicas o químicas del material pero que implican la destrucción o alteración permanente de la pieza que está siendo analizada. Por esta razón para este tipo de ensayos se suelen emplear muestras extraídas de cupones de soldadura.

Algunos de los ensayos destructivos más empleados son:

**Ensayo de tracción**, con este tipo de ensayo se puede determinar la resistencia mecánica de la soldadura, incluyendo la resistencia a la tracción, el límite elástico y la ductilidad. Consiste en la aplicación gradual de una fuerza axial sobre la probeta hasta que se produce la rotura de esta.



Figura 17. Ensayo de tracción [19].

**Ensayo de doblado**, este método nos permite determinar la capacidad de deformación del material al ser doblado para prevenir grietas y roturas al aplicar cargas. Los extremos de la probeta se colocan sobre un yunque y se aplica lentamente una fuerza en el centro, se dobla hasta alcanzar un cierto ángulo y se inspeccionan los defectos surgidos en la superficie del material del área doblada. Existen varios tipos, el de raíz, de cara, el lateral y el transversal entre otros en función de la forma de doblado de la probeta.



Figura 18. Ensayo de doblado [22].

**Ensayo de dureza**, permite la determinación de la resistencia de un material a la deformación permanente mediante la penetración de otro material más duro. Hay varios métodos como el de Brinell, Rockwell o Vickers. La medición de la dureza proporciona información sobre la resistencia al desgaste y la capacidad de la soldadura para resistir cargas externas.



Figura 19. Ensayo de dureza [23].

En el ensayo de dureza Rockwell (HR) se mide la profundidad de penetración tras haber aplicado al material una carga concreta mediante un cono de diamante o una bola de tungsteno.

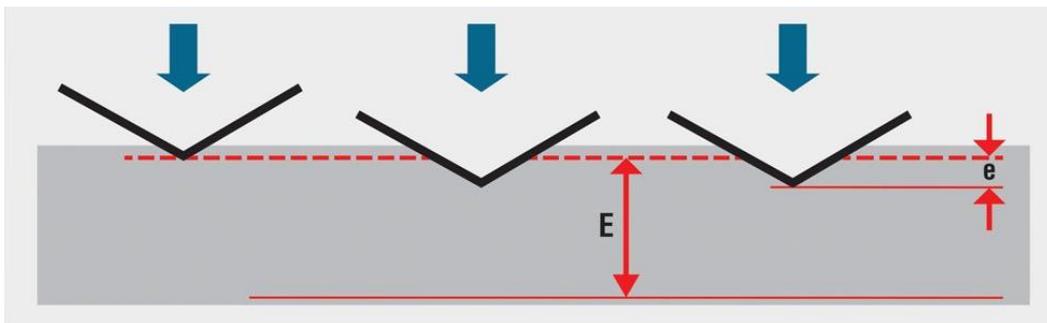


Figura 20. Ensayo de dureza Rockwell [24].

En el caso del ensayo de dureza Vickers (HV) se emplea un penetrador con forma piramidal y se miden ópticamente las longitudes diagonales de la impresión dejada sobre el material.

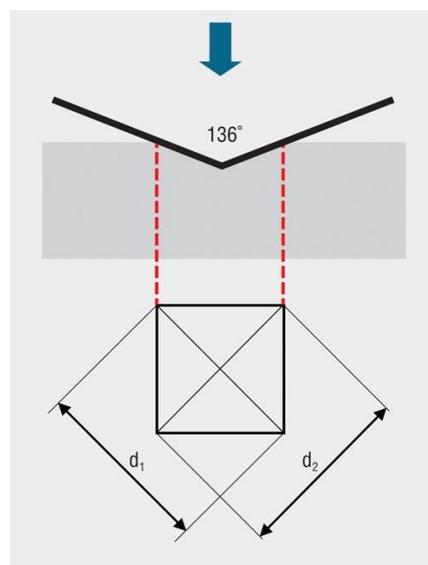


Figura 21. Ensayo de dureza Vickers [24].

Por otro lado, el ensayo de dureza Brinell se aplica en probetas de mayor tamaño, de materiales con una estructura de grano grande o irregular. Se utiliza una bola de carburo de tungsteno que deja una impresión sobre la superficie relativamente mayor en la que se miden los diámetros de la circunferencia marcada.

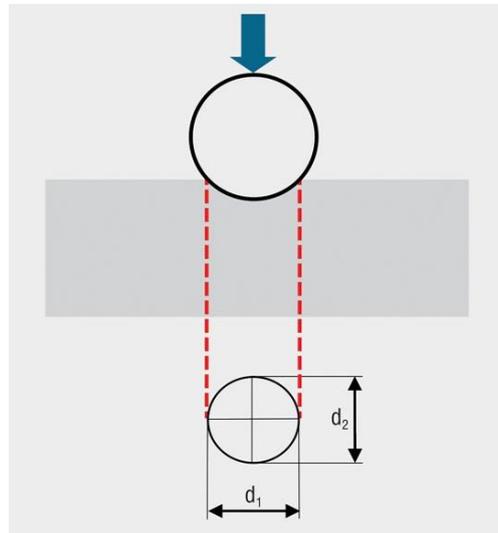


Figura 22. Ensayo de dureza Brinell [24].

**Ensayo de impacto**, mediante este ensayo dinámico se evalúa la tenacidad de la soldadura midiendo la capacidad que tienen los cupones de absorber energía antes de fracturarse ante una carga de impacto.

El ensayo consiste en dejar caer una masa desde una altura específica y obtener la cantidad de energía que es absorbida por el material, denominada resiliencia, antes de producirse la fractura.

Uno de los ensayos de impacto más común es el del péndulo de Charpy, que consta de un brazo giratorio con una maza en su extremo, inicialmente la maza se encuentra a una altura determinada por lo que tiene una energía potencial, al liberar el péndulo se golpea la probeta, produciendo su fractura y alcanzando una altura final. La diferencia de energías potenciales determina la energía absorbida por el material. Los valores de ensayo medidos pueden ser la energía absorbida, el porcentaje de fractura por cizallamiento, la expansión lateral opuesta a la muesca o una combinación de estas.

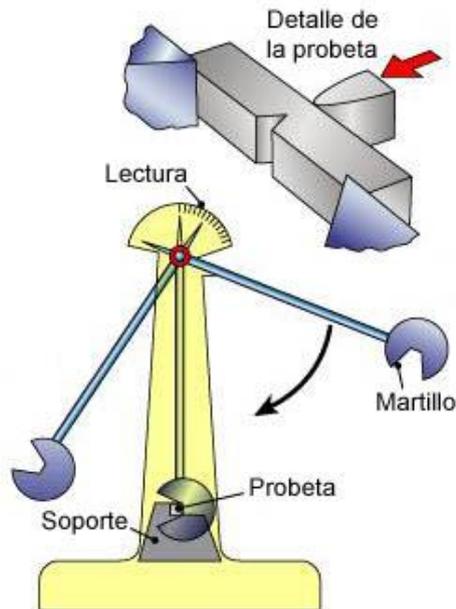


Figura 23. Esquema Ensayo Péndulo de Charpy [25].

**Ensayo de fatiga**, se evalúa la resistencia que tiene el cordón de soldadura bajo cargas cíclicas. Se aplican ciclos repetidos de carga y descarga, y se registra el número de ciclos que soporta la pieza antes de llegar a la rotura. Este ensayo se emplea para determinar la vida útil de las soldaduras bajo condiciones de carga variables en el tiempo.

**Ensayo macrográfico**, mediante este método se revela la macroestructura y heterogeneidad de los metales ferrosos y no ferrosos a través de un ataque químico en la sección transversal de la probeta, además en el caso específico de las soldaduras se puede determinar la geometría del cordón y mostrar su grado de penetración en el material base. Es necesario el mecanizado previo de la superficie con el fin de minimizar su rugosidad [19].

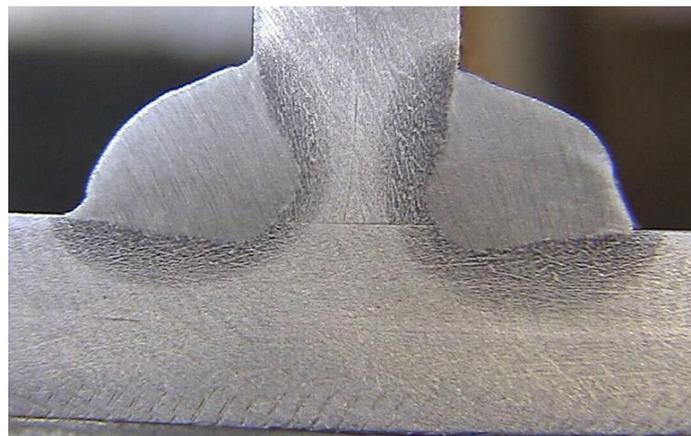


Figura 24. Ensayo macrográfico en soldadura [26].

Es fundamental aplicar y seguir las normativas y estándares tanto en los ensayos destructivos como en los no destructivos para asegurar que se han realizado de manera adecuada y garantizar la seguridad y la calidad de las soldaduras.

### 3.9 DOCUMENTOS DE CALIDAD EN SOLDADURA

Para llevar a cabo procesos de soldadura de manera eficiente y segura es importante la creación y aplicación de documentos como la WPS (Welding Procedure Specification), el PQR (Procedure Qualification Record) y el WPQR (Welder Performance Qualification Record).

La **WPS** es una especificación de procedimiento de soldadura. Este documento sirve como guía para la creación efectiva de un proceso de soldadura de forma que cumpla con todos los requisitos y estándares aplicables. Aporta información sobre los materiales base y de aporte, sobre la composición del gas protector, el tratamiento térmico y los parámetros de soldadura como el amperaje, temperatura, posición y velocidad entre otros.

En función de la normativa aplicada en el proceso de soldadura, la WPS será calificada o precalificada por ensayos y en este caso es necesario realizar con anterioridad un PQR. Además, es un documento imprescindible para cualificar y homologar a los soldadores en los procesos.

El **PQR** o registro de calificación de procedimientos, establece un conjunto preliminar de procedimientos y materiales para crear las soldaduras. En él se determinan las variables registradas durante la soldadura de los cupones de prueba. Tras ensayar dichas soldaduras si se garantiza que cumplen con todos los requisitos establecidos se aprueba el PQR y se utiliza como base para la creación de las WPS.

Otro tipo de documento es el **WPQR**, es el registro de calificación del rendimiento del soldador, en este documento se establece que un soldador está homologado para realizar correctamente un determinado proceso de soldadura. Para obtener esta homologación o calificación el soldador ha debido de aplicar satisfactoriamente una determinada WPS [27].

## 4 UBICACIÓN DE LA UNIÓN SOLDADA

El proyecto sobre el que se fundamenta este trabajo se basa en la fabricación de un equipo reactor HDS o de hidrodesulfuración para una refinería. El proceso de hidrodesulfuración está destinado a la eliminación del azufre en los productos derivados del petróleo como el diésel y la gasolina.

Es un proceso químico en el cual se hace reaccionar el compuesto orgánico sulfurado presente en los hidrocarburos con hidrógeno a alta presión y temperatura, generalmente mediante el empleo de un catalizador. De esta forma se logra romper los enlaces de carbono-azufre y saturar con hidrógeno las valencias libres resultantes o los dobles enlaces olefínicos formados como consecuencia de dicho proceso, convirtiendo el azufre en compuestos más simples y menos contaminantes como el sulfuro de hidrógeno [28].

El equipo reactor es un recipiente tubular de más de 30 metros de longitud y aproximadamente 3,4 metros de diámetro, para su fabricación se requiere un revestimiento interno de acero inoxidable y la realización de diversos procesos de soldadura, para los cuales el cliente ha recurrido a una empresa especializada en procesos de recargue y soldaduras.

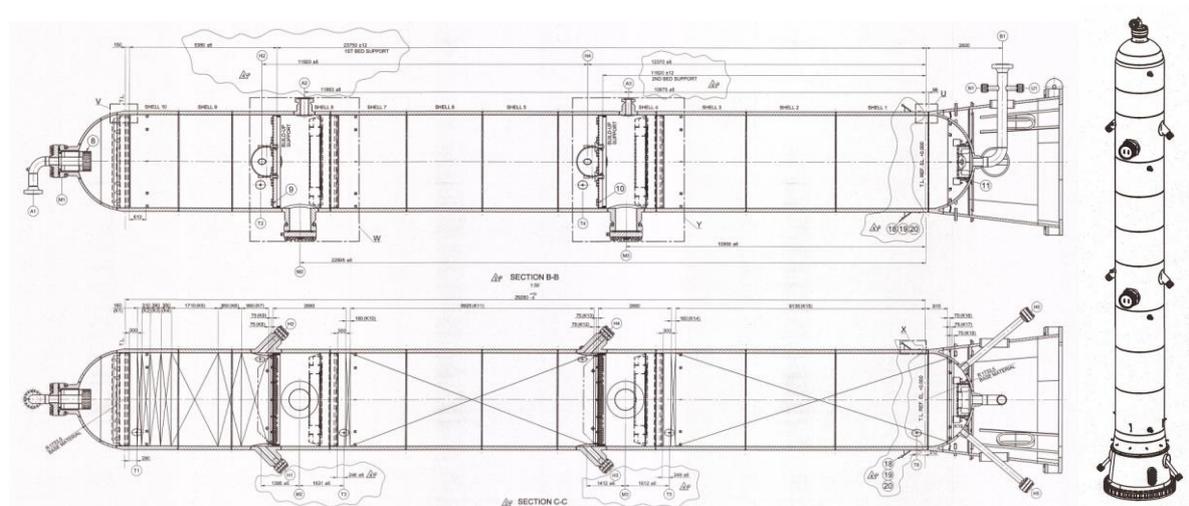


Figura 25. Reactor HDS.

Debido al tamaño del reactor, su fabricación y ensamblado consta de diferentes componentes y por lo tanto de varios spools. Con el término “spool” se hace referencia a cada tramo prefabricado de tubería y accesorios soldados conjuntamente dando lugar a una configuración específica. Los spools pueden estar formados por diversos componentes como codos, válvulas, bridas y tramos de tubería rectos.

La soldadura en la que se fundamenta el estudio se sitúa en concreto en los spools de salida del catalizador, situados en la parte inferior del reactor. El catalizador en este tipo de reactores es fundamental y tiene varias funciones como la aceleración de la reacción química. Reduce

la energía de activación necesaria para que ocurra la reacción, permitiendo el empleo de temperaturas y presiones más bajas, añadiendo eficiencia y seguridad al proceso, también ayuda a dirigir la reacción hacia la formación de productos deseados, optimizando el proceso y proporcionando calidad al producto final.

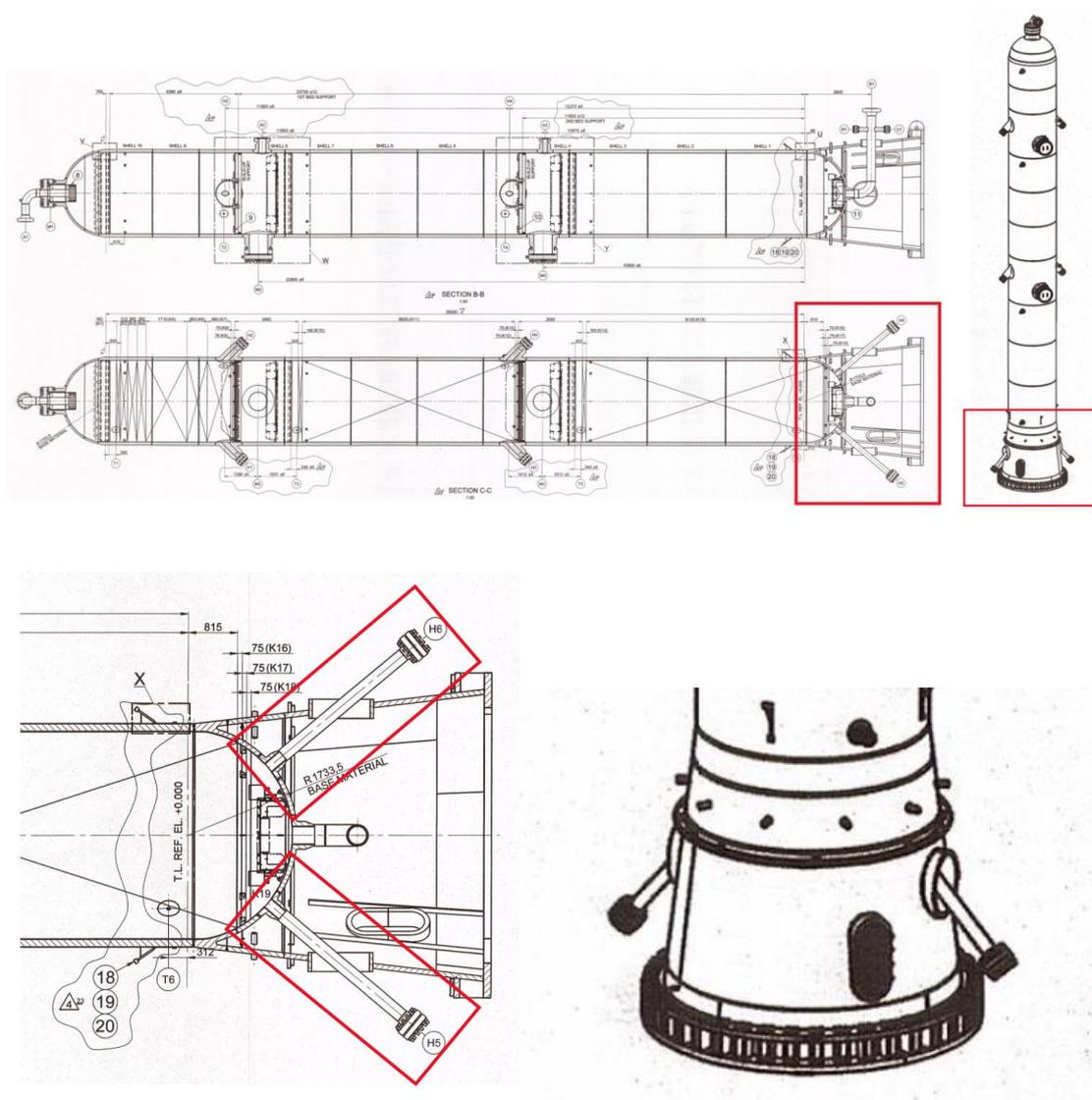


Figura 26. Localización de los spools de salida del catalizador.

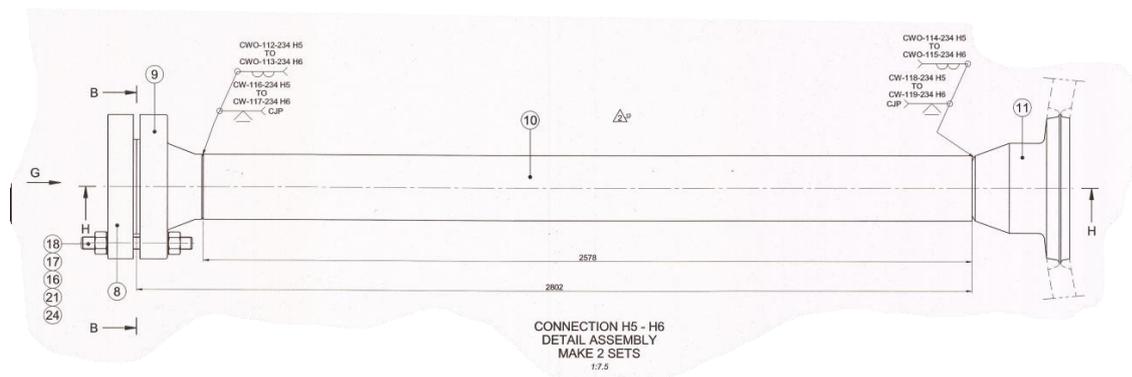


Figura 27. Spool de salida del catalizador.

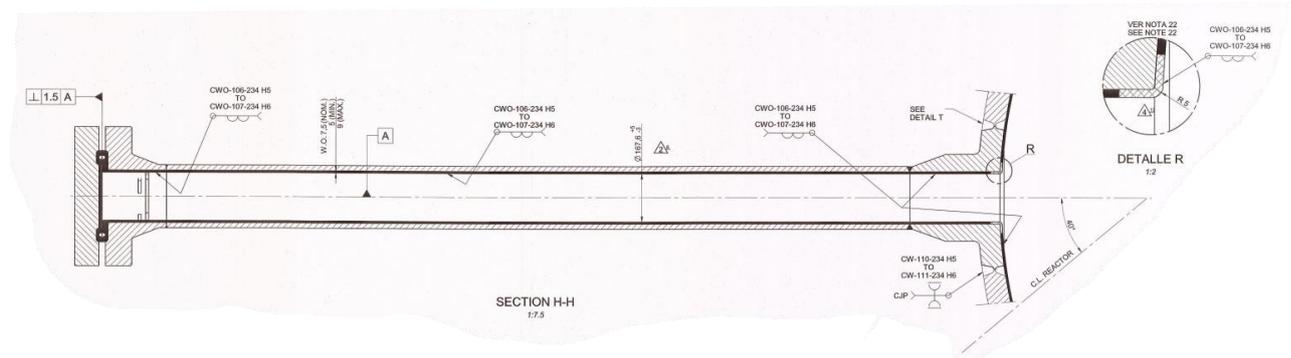


Figura 28. Sección interior del spool de salida del catalizador.

Cada spool de salida del catalizador está compuesto por una brida y un tramo de tubería recto de diámetro nominal 8". El proceso sobre el que se basa el análisis es una soldadura a tope mediante la cual se une un anillo de acero inoxidable al interior de la brida de acero aleado recargada de material inoxidable.

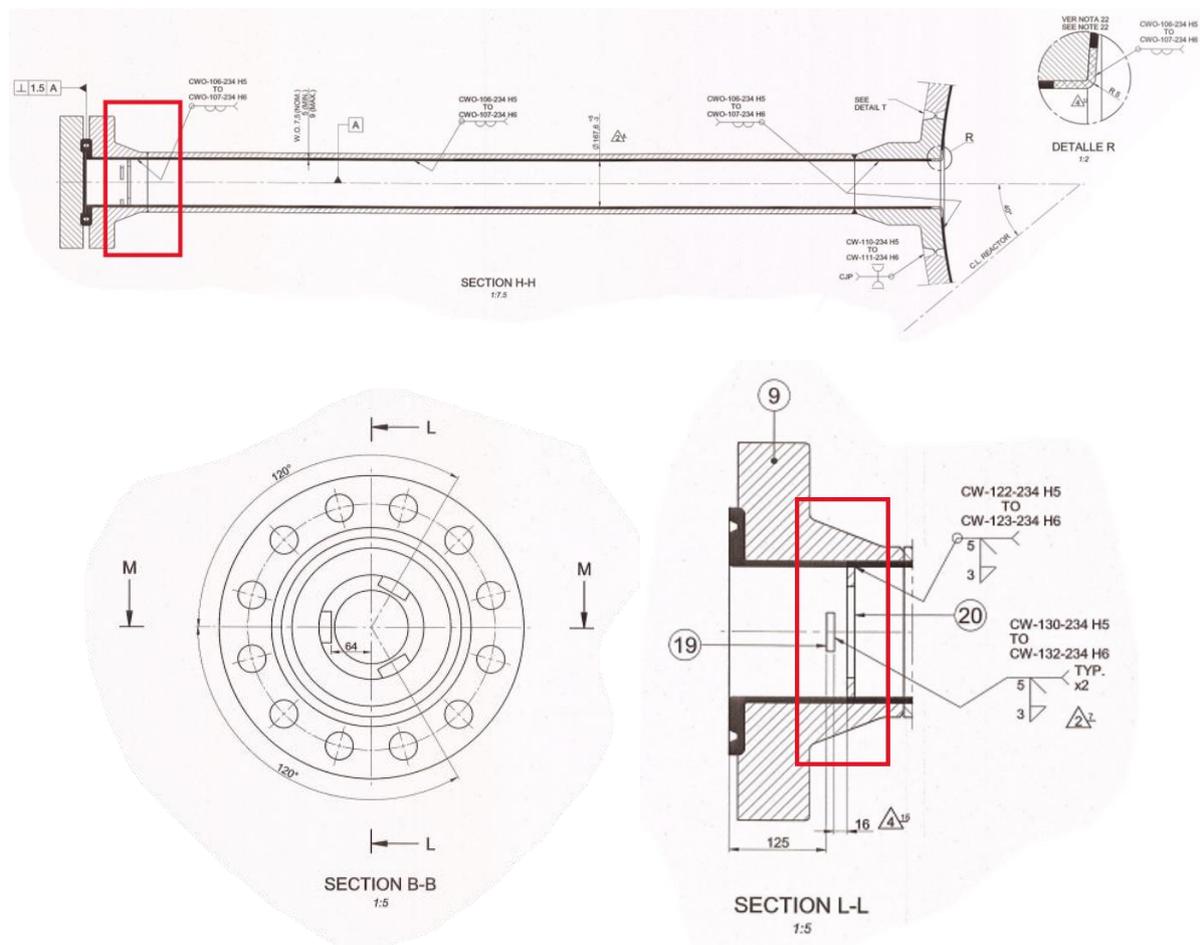


Figura 29. Localización del anillo de acero inoxidable soldado a la brida.

El cliente proporciona una especificación técnica aplicable a todos los spools con sus correspondientes soldaduras a tope y recargues resistentes a la corrosión, para ser empleados en recipientes a presión. El diseño del equipo reactor se ha realizado de acuerdo con el Código ASME Sección VIII División 2, Edición. 2021 [29].

Con el objetivo de cualificar el procedimiento de soldadura descrito, se fabrica y se ensaya un cupón que la representa. De esta forma antes de implementar el proceso al proyecto se estudia en dicho cupón las propiedades que se obtendrán tras los procesos de recargue y soldadura y como afectarán los tratamientos térmicos a los materiales.

## 5 PREPARACIÓN DEL CUPÓN DE SOLDADURA

### 5.1 GEOMETRÍA DEL CUPÓN

Para el desarrollo del PQR se utiliza el código ASME BPVC Sec. IX, la edición del 2023 [11].

El cupón está formado por dos placas de dimensiones 200x180x40 mm de acero aleado al cromo-molibdeno, representadas a la derecha en la Figura 30, cada una de ellas será recargada y tratada térmicamente, como se indica en el esquema una de ellas, designada con la letra A, mediante un tratamiento térmico denominado por sus siglas en inglés PWHT (Post Welding Heat Treatment) de temperatura máxima constante durante 8 horas y la otra, identificada con la letra B, durante 2 horas. En el apartado 5.3 Tratamiento Térmico se detalla más información.

La realización de dos tratamientos térmicos diferentes permite que en caso de futuras reparaciones puedan aplicarse más tratamientos sobre el componente soldado. Es decir, de esta forma el procedimiento de soldadura se cualifica hasta 8 horas de tratamientos acumulados, por lo que, si se aplica inicialmente un tratamiento térmico de dos horas a la soldadura original, luego se podrían aplicar hasta tres reparaciones con sus respectivos tratamientos de dos horas cada uno, dando lugar a un total de ocho horas de tratamiento térmico aplicado.

Una vez tratadas de manera individual las placas de acero aleado se sueldan a una tercera placa de acero inoxidable mediante un proceso de soldadura GTAW, por uno de los lados del cupón se realiza manualmente y por el otro con una máquina de soldadura automática.

Se pueden resumir y ordenar los procesos realizados para la fabricación y ensayo del cupón de la siguiente manera:

1. Recargue de la placa de acero aleado A
2. Recargue de la placa de acero aleado B
3. Tratamiento térmico de máxima condición a la placa A
4. Tratamiento térmico de mínima condición a la placa B
5. Unión soldada de las placas de acero aleado con la placa de acero inoxidable.
6. Ensayos no destructivos.
7. Extracción de las probetas.
8. Ensayos destructivos.

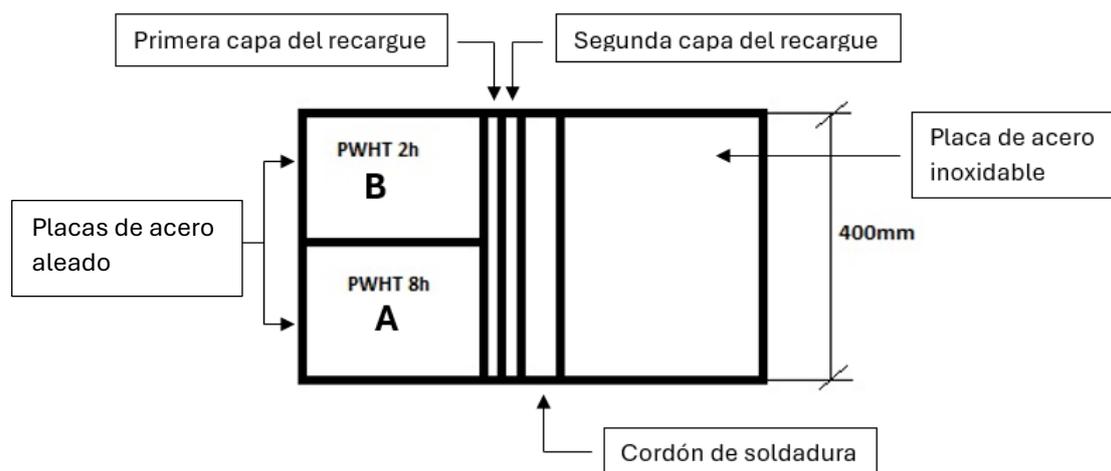


Figura 30. Esquema cupón de soldadura.

## 5.2 MATERIALES

El material base del cupón que representa la brida del spool se trata del GR F22, se trata de un acero aleado compuesto por cromo y molibdeno, lo que le proporciona una buena resistencia a la corrosión y al calor, además de una alta resistencia mecánica. Sigue la especificación de la norma ASME B16.5 [30] que establece las dimensiones, tolerancias y materiales para bridas de tuberías de aceros u otros materiales. En concreto se trata de la especificación SA 182, referida a aceros aleados e inoxidables forjados, empleados principalmente en componentes de tuberías que trabajan en servicios de alta temperatura y presión.

El recargue consta de dos capas de diferentes materiales, la primera de ellas con el material SFA / AWS A5.9 ER 309L, a esta capa se la denomina “capa colchón” y la segunda es de SFA / AWS A5.9 ER 347, material que nos interesa para realizar la posterior soldadura a tope con el acero inoxidable.

El tipo de material empleado en el recargue es muy importante. En el caso del ER309L se trata de un electrodo de acero inoxidable austenítico, tiene un bajo contenido en carbono, por debajo del 0,03%, con aproximadamente un 24% de cromo y un 13% de níquel, se suele emplear en soldaduras que requieren resistencia a la corrosión y al calor [31].

Por otro lado, el material de aportación ER347 aplicado en la segunda capa, se trata de un electrodo o alambre sólido de acero inoxidable estabilizado al niobio. Este tipo de acero inoxidable tiene mayor resistencia a la corrosión debido a la formación de carburos de niobio en la zona afectada térmicamente por el proceso de soldadura [32].

Ambos materiales de aportación siguen las especificaciones y estándares establecidos por la normativa Americana AWS [33], bajo la especificación SFA (Specification for Welding Filler Metals), en concreto la designación A5.9 de materiales de relleno para soldadura de acero y aleaciones de acero inoxidable.

El material base de la placa de acero inoxidable es el 304L. Se trata de un acero inoxidable austenítico que contiene cromo y níquel, la "L" indica que se trata de un material de bajo contenido de carbono, lo que mejora la resistencia a la corrosión intergranular tras el proceso de soldadura. Sigue la especificación SA240 de la normativa americana referida a laminas y placas de acero inoxidable y acero resistente al calor.

El material de aportación empleado en la soldadura a tope es el ER347, anteriormente descrito.

En el Anexo IV pueden consultarse los certificados de los materiales donde se detallan su composición y características.

## 5.2 PROCESO DE RECARGUE

A la placa de acero aleado se la ha aplicado un recubrimiento resistente a la corrosión mediante un proceso de soldadura por arco eléctrico de gas inerte de tungsteno (GTAW) de alambre frío. Se ha realizado mediante una máquina de soldadura automática.

Dicho proceso se ha cualificado y analizado mediante otro PQR siguiendo los requerimientos y especificaciones de la normativa ASME Sec. IX [11].

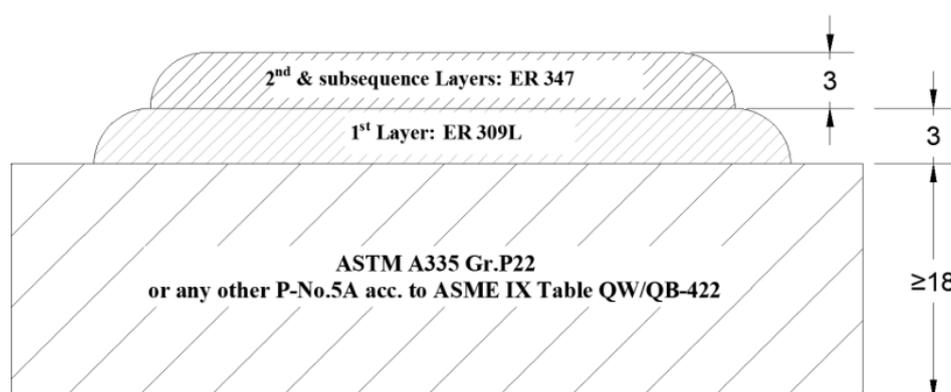


Figura 31. Proceso de recargue ASME IX.

El espesor de metal base sobre el que se aplica el recargue debe ser como mínimo de 18 mm, en este caso es de 40 mm, y se aplica una superposición del 50% en cada pasada, realizando la soldadura en dirección circular.

Es importante que el recargue tras el mecanizado tenga un espesor mínimo de 6 mm desde la línea de fusión para certificar 3 mm de ER 347 sin diluir.

El electrodo de tungsteno empleado en el proceso de recargue tiene un diámetro de 4 mm y contiene un 2% de lantano, lo que aporta estabilidad al arco eléctrico y una mayor durabilidad. La posición de soldadura es la 1G, manteniendo un ángulo de entre 70 y 90° con la pieza recargada.

En la siguiente tabla se puede ver un resumen con los parámetros y características del recargue realizado:

	<b>1ª Capa (ER 309L)</b>	<b>2ª Capa (ER 347)</b>
<b>Diámetro del material de aportación</b>	1,2 mm	1,2mm
<b>Temperatura de precalentamiento</b>	207°C	62°C
<b>Temperatura entre pasadas</b>	280°C	180°C
<b>Gas</b>	97,4% Ar	97,4% Ar
<b>Caudal del gas</b>	18 l/min	18 l/min
<b>Tipo de corriente</b>	Continua	Continua
<b>Polaridad</b>	Directa	Directa
<b>Amperaje</b>	240 A	225 A
<b>Voltaje</b>	14,5-15,5 V	14,5-15,5 V
<b>Velocidad de avance</b>	2400 mm/min	2400 mm/min
<b>Calor aportado</b>	12,4 kJ/cm	11,63 kJ/cm
<b>Técnica</b>	Cordón lineal	Cordón lineal

*Tabla 1. Parámetros del proceso de recargue.*

Para alcanzar las temperaturas de precalentamiento y entre pasadas requeridas, se ha empleado el método de calentamiento con llama mediante gas propano.

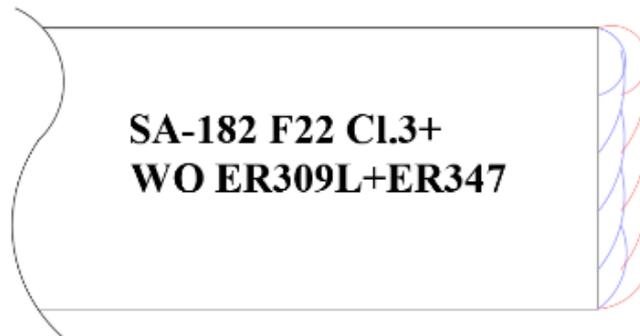


Figura 32. Esquema placa de acero aleado recargada.



Figura 33. Placas de acero aleado recargadas.



Figura 34. Espesor de la placa recargada.

### 5.3 TRATAMIENTO TÉRMICO

Para la realización del tratamiento térmico (PWHT) tras el recargue de las placas de acero aleado se ha seguido una especificación que describe el procedimiento y los parámetros de acuerdo con los requerimientos dados por el cliente.

### **5.3.1 Preparación para el tratamiento térmico**

Primeramente, se han limpiado las superficies del componente a calentar para asegurar la ausencia de fluidos de mecanizado, residuos de inspecciones por ultrasonidos, líquidos penetrantes o partículas magnéticas, así como cualquier otro contaminante que al ser calentado pueda dañar los materiales objeto del tratamiento térmico.

Las piezas por tratar térmicamente se han apoyado adecuadamente para evitar deformaciones durante la realización del tratamiento.

En este caso los cupones estudiados no llevan ningún tipo de mecanizado, pero en la especificación del cliente se concreta que todas las superficies mecanizadas, tales como bridas, agujeros de pernos roscados, o roscas, deben ser protegidas de la oxidación durante el tratamiento térmico con "deoxaluminite" u otro producto apropiado.

### **5.3.2 Horno de calentamiento**

El elemento se calienta en un horno eléctrico por radiación y convección, sin contacto directo entre las piezas y las resistencias.

Es importante que las calibraciones y supervisiones del horno queden guardadas un mínimo de 2 años tras la realización del tratamiento, y los instrumentos de registro y control de temperatura, dispongan de su calibración en vigor.

### **5.3.3 Termopares y registrador**

Los termopares utilizados son del tipo "K" (Cr-Ni). Todos los canales de medición y registro de temperaturas se han comprobado que estén en perfecto estado de funcionamiento y calibrados, además todos los termopares y el registrador se han calibrado antes de empezar cualquier operación de calentamiento usando termopares de referencia. El máximo error permitido es  $\pm 1\%$  de la temperatura real registrada.

Los termopares se han fijado a la superficie del componente mediante descarga capacitiva y la producción de energía se ha limitado a 125 W-seg.

Todos los termopares se han protegido de tal forma que no midan la radiación directa de los elementos calefactores, pero sí la temperatura de la pared a la cual están fijados. Se han distribuido uniformemente sobre la superficie del conjunto a tratar térmicamente y aunque no es este caso, si hay cambios importantes de espesores de pared deben colocarse en dichas zonas.

Una vez realizado el tratamiento térmico se han quitado los termopares y el área donde han sido fijados es cepillada o amolada, además se examina la superficie del material mediante líquidos penetrantes y otros ensayos no destructivos para asegurar que está libre de defectos.

La soldadura de los termopares y su posterior eliminación se han realizado cumpliendo un procedimiento de soldadura previamente definido y detallado más adelante.

La distribución de temperaturas en las piezas se registra sobre un gráfico, en el que se representan las fechas y horas de inicio y final, el intervalo de tiempo y la identificación de los termopares.

### 5.3.5 Aplicación de los tratamientos térmicos

El cliente en este caso requiere que una de las placas de acero aleado tenga un tiempo de mantenimiento de la temperatura máxima de mínimo 8 horas y otro de mínimo 2 horas, siendo dicha temperatura unos 680 °C con una tolerancia de +14/-0 °C.

Además, especifica que tanto la velocidad de enfriamiento como la de calentamiento no debe ser superior a 55 °C/hora y estos procesos deben controlarse mientras la temperatura esté por encima de los 425 °C.

Las especificaciones del cliente se han seguido y cumplido rigurosamente, se ha empleado una velocidad de calentamiento y enfriamiento de 50 °C/h. En el caso de la placa sometida a la condición máxima se alcanza una temperatura máxima de 693°C y en el tratamiento térmico de condición mínima 687°C.

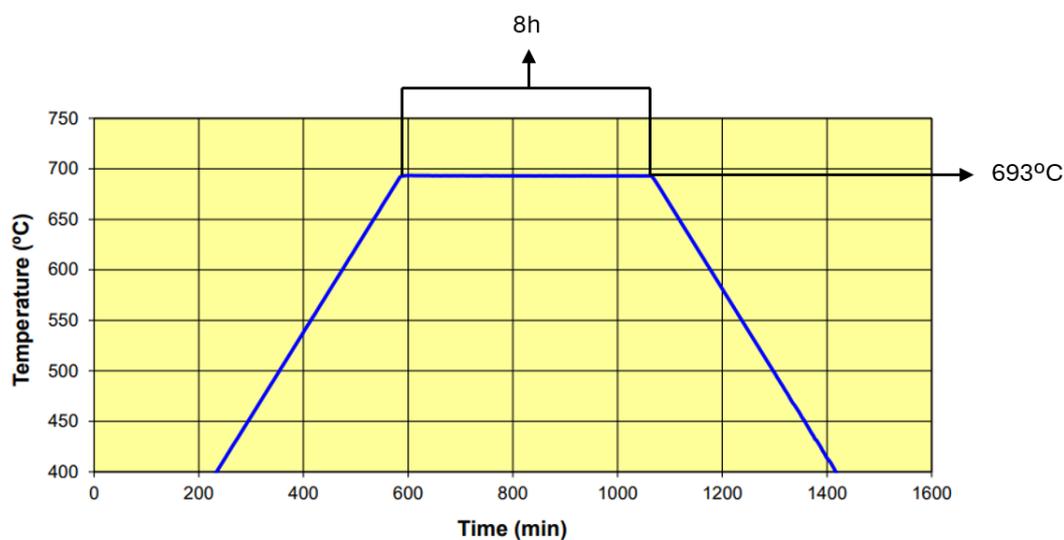


Figura 35. Gráfica tratamiento térmico con condición máxima realizado.

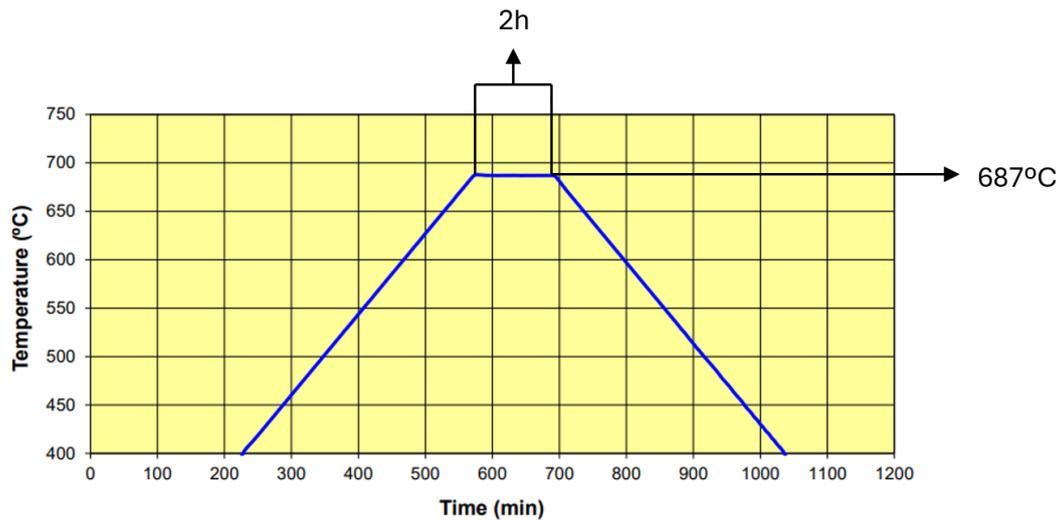


Figura 36. Gráfica tratamiento térmico con condición mínima realizado.

### 5.3.7 Procedimiento de fijación y eliminación de los termopares temporales

Para la fijación y soldadura de los termopares utilizados durante el tratamiento térmico de alivio de tensiones se ha seguido un procedimiento especificado por el cliente.

Primero se ha limpiado la superficie de las piezas donde se fijan los termopares. Se pelan los hilos entre 8 y 10mm y se sujeta uno de los hilos del termopar con las pinzas de descarga. Se presiona el botón de carga en el equipo y tras esperar unos segundos el equipo muestra la luz de “cargado”. Tras la carga se presiona el botón de descarga sujetando firmemente el hilo del termopar.

La secuencia se repite con el segundo hilo del termopar y se comprueba la firmeza de la soldadura sujetando el termopar y tirando con suavidad.

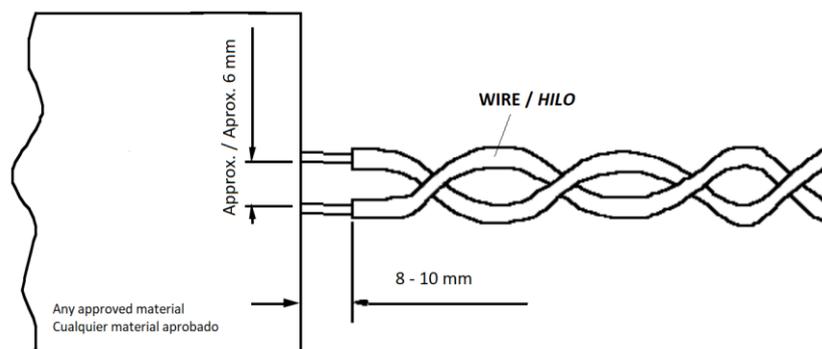


Figura 37. Esquema de la unión de un termopar.

Para la eliminación de los termopares una vez finalizado el tratamiento térmico se cortan los hilos cerca de la soldadura y mediante un lijado suave se elimina el resto de la soldadura, es necesario eliminar aproximadamente 0,2 mm del material base.

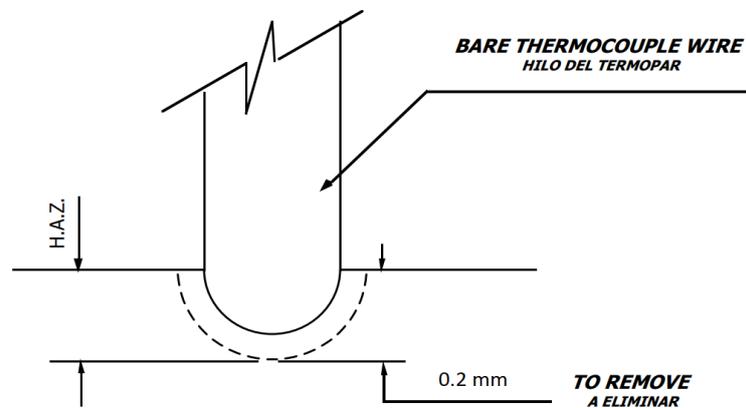


Figura 38. Penetración del termopar en el material base.

Es importante la realización de ensayos no destructivos, examen por líquidos penetrantes (PT) o partículas magnéticas (MT) para descartar posibles defectos causado por la soldadura y posterior eliminación de los termopares en los cupones. Por último, debe realizarse una inspección visual del área.

## 5.4 PROCESO DE SOLDADURA

La unión de las placas se ha realizado mediante una soldadura a tope con bisel doble, para ello previamente se ha tenido que preparar el borde del componente de acero inoxidable.

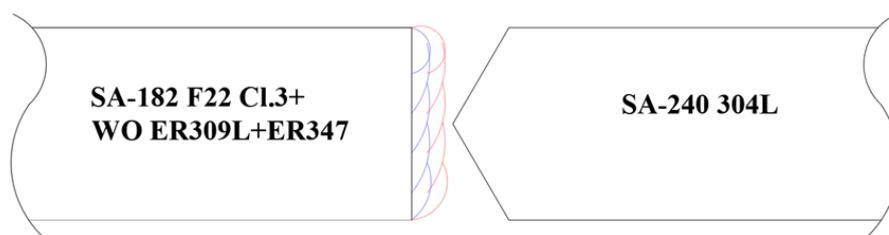


Figura 39. Esquema soldadura a tope con bisel doble.

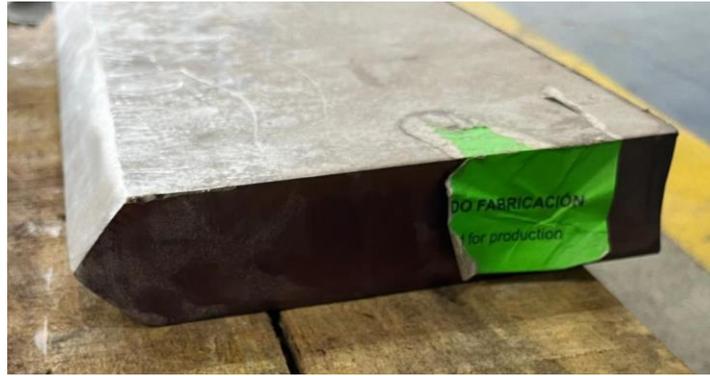


Figura 40. Preparación del borde de la placa de acero inoxidable.



Figura 41. Elementos antes del proceso de soldadura.

El proceso de soldadura empleado ha sido el GTAW. Por un lado, se ha realizado manualmente y por el contrario mediante una máquina de soldadura automática.



Figura 42. Cupón soldado por ambas caras.

En la figura 43 se puede observar la secuencia aproximada de los cordones de soldadura y las capas aplicadas en ambos procesos.

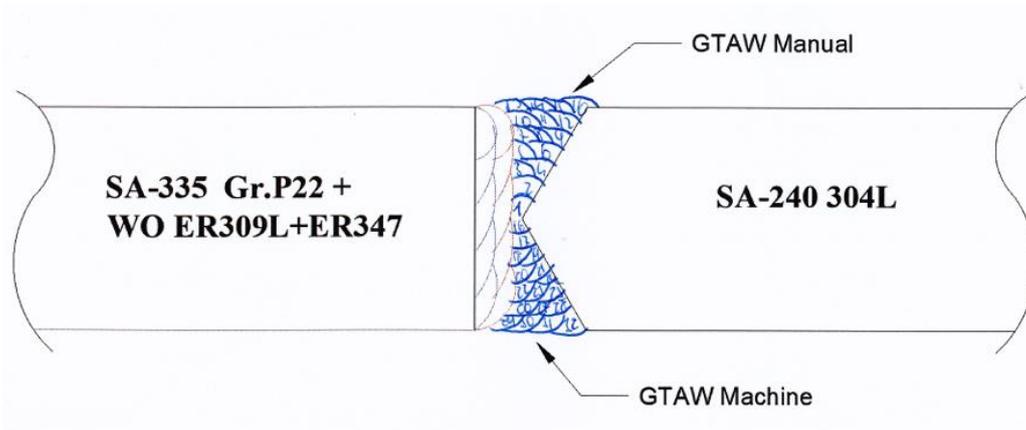


Figura 43. Esquema secuencia de soldadura.

Los parámetros y características de ambos procesos de soldadura se recogen en la siguiente tabla:

	<b>GTAW Manual</b>	<b>GTAW Automático</b>
<b>Diámetro del material de aportación</b>	2,4 mm	1,2mm
<b>Posición de soldadura</b>	1G	1G
<b>Temperatura de precalentamiento</b>	20°C	20°C
<b>Temperatura entre pasadas</b>	123°C	123°C
<b>Gas</b>	99.998% Ar	99.998% Ar
<b>Caudal del gas</b>	15 l/min	15 l/min
<b>Tipo de corriente</b>	Continua	Continua
<b>Polaridad</b>	Directa	Directa
<b>Amperaje [Min-Max]</b>	150-191 A	220-229 A
<b>Amperaje medio</b>	150,5 A	224,5 A
<b>Voltaje</b>	9-15,5 V	15-16,6 V
<b>Velocidad de avance</b>	-	130-200 mm/min
<b>Calor aportado</b>	13,66-22 kJ/cm	12,1-15,57 kJ/cm
<b>Técnica</b>	Cordón lineal	Cordón lineal
<b>Capas</b>	Multicapas	Multicapas

Tabla 2. Parámetros empleados en la soldadura.

## 5.5 OBTENCIÓN DE LAS PROBETAS

Una vez fabricado el cupón, para la realización de los ensayos destructivos es necesario extraer probetas con distintas geometrías y dimensiones en función de los ensayos que se vayan a realizar.

Este proceso se realiza mediante mecanizado en el propio laboratorio donde se realizan los ensayos no destructivos, de esta forma se mantiene correctamente la trazabilidad del cupón con las probetas de prueba.

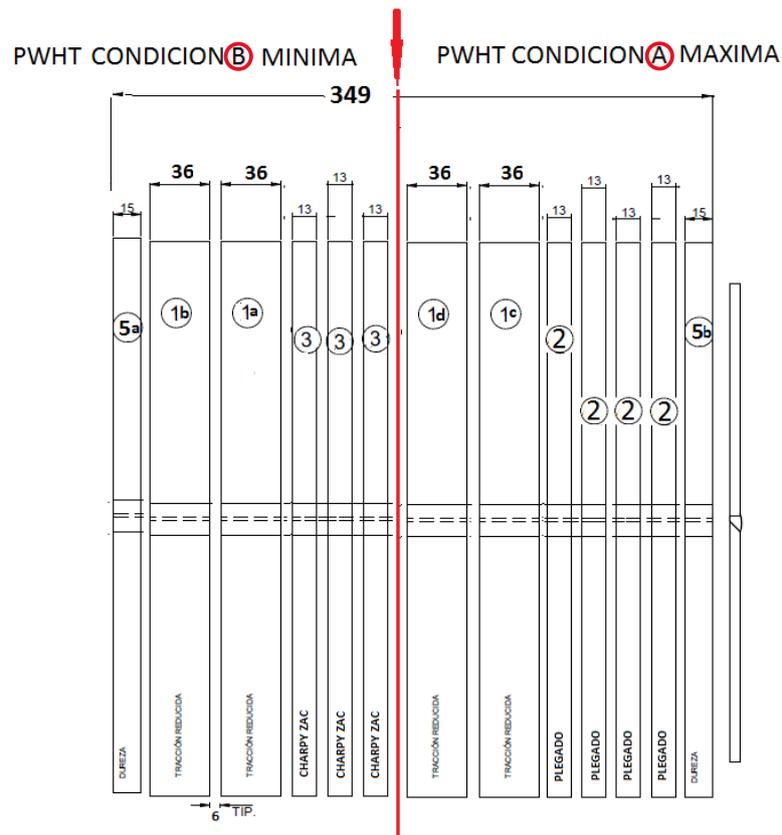


Figura 44. Esquema división del cupón para la obtención de las probetas.



Figura 45. Marcado del cupón para extraer las probetas.



Figura 46. Extracción de las probetas.

### 5.5.1 Ensayo de tracción

Para obtener las probetas que se han empleado en el ensayo de tracción se ha seguido la normativa ASME Sec. IX [11], en concreto la sección QW-151.

De acuerdo con la normativa las muestras se han extraído de forma que cumplen con los requisitos geométricos y dimensionales mostrados en la Figura A19 del Anexo II. Todos los procesos de soldadura y el material de relleno para ser calificado tienen que estar incluidos en las muestras de prueba y a menos que se indique un mínimo, un máximo o una tolerancia en las figuras, las dimensiones son consideradas aproximadas.

En total se han obtenido ocho probetas, la mitad pertenecientes al lado del cupón sometido al tratamiento térmico con la condición de tiempo máxima, A, y la otra mitad de la condición mínima, B.

Como en este caso la placa tiene un espesor mayor de 25 mm, se han empleado múltiples muestras en lugar de muestras de espesor completo. Las probetas se han cortado mecánicamente en un número mínimo de tiras, en este caso dos, de forma que sean aproximadamente iguales y con un tamaño adecuado para realizar su ensayo.

Como se observa en la Figura 47, cada grupo de dos probetas se ha extraído de tal forma que una recoge la soldadura realizada manualmente y la otra de la soldadura hecha con máquina automática.

De esta forma, cada pareja de probetas representa una sola prueba de tensión para el espesor total de la placa, es decir, simulan las condiciones y el comportamiento que tendría una muestra del espesor completo de la placa durante el ensayo. Asimismo, la suma de espesores de las muestras cubre el espesor total de la soldadura que se está evaluando.

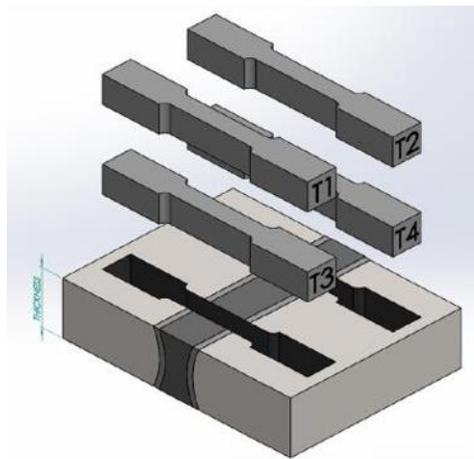


Figura 47. Esquema obtención de las probetas para el ensayo de tracción.

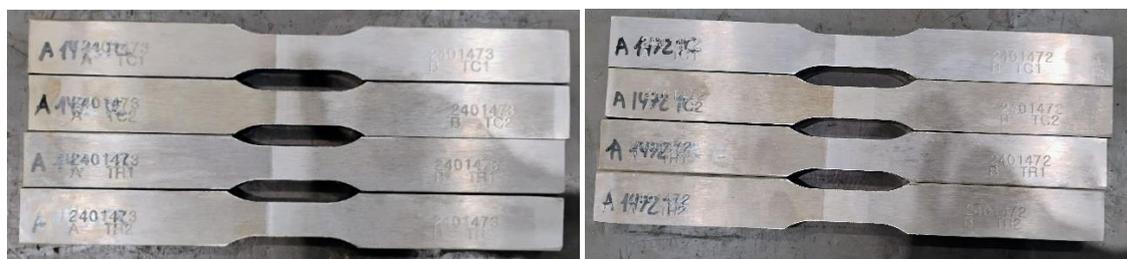


Figura 48. Cuatro probetas con la condición de tratamiento térmico máximo (imagen de la izquierda) y cuatro con el mínimo (imagen de la derecha).

Las medidas de las probetas extraídas para el ensayo de tracción transversal son:

	Tratamiento A				Tratamiento B			
	T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4
<b>Espesor (mm)</b>	16,43	16,12	16,25	16,20	16,17	16,47	16,19	16,26
<b>Ancho (mm)</b>	19,08	19,00	19,03	19,04	19,03	19,02	19,03	19,00
<b>Sección transversal (<math>mm^2</math>)</b>	313,48	306,28	309,24	308,45	307,72	313,26	308,10	308,94

Tabla 3. Medidas de las probetas para el ensayo de tracción.

El mecanizado de las muestras es importante que se haga con cuidado y precisión, ya que las probetas preparadas incorrectamente a menudo son la razón de resultados de prueba insatisfactorios e incorrectos.

### 5.5.2 Ensayo de dureza

Para el ensayo de dureza Vickers se ha empleado la normativa ISO 6507-1 [34] y la norma ISO 9015-23 [35].

De acuerdo con dichas normativas se han extraído las muestras de ensayo mediante corte mecánico de forma transversal a la unión soldada y de forma cuidadosa para que la superficie no quede afectada metalúrgicamente.

Para este ensayo no se especifican una geometría y dimensiones concretas, si no que se requieren unas condiciones superficiales y de espesor que deben cumplir.

Se han limpiado y mecanizado las superficies hasta obtener una rugosidad de 3,2  $\mu m$ , para que sean lisas y planas, y estén libres de óxidos o materias extrañas, de tal forma que se permita una determinación precisa de la longitud de la diagonal de la huella y no afecten a la indentación.

En la preparación de la superficie se han evitado los métodos que puedan alterar los resultados del ensayo, es importante prevenir o eliminar cualquier daño o alteración de la dureza de la superficie debida a un excesivo calentamiento o trabajo en frío.

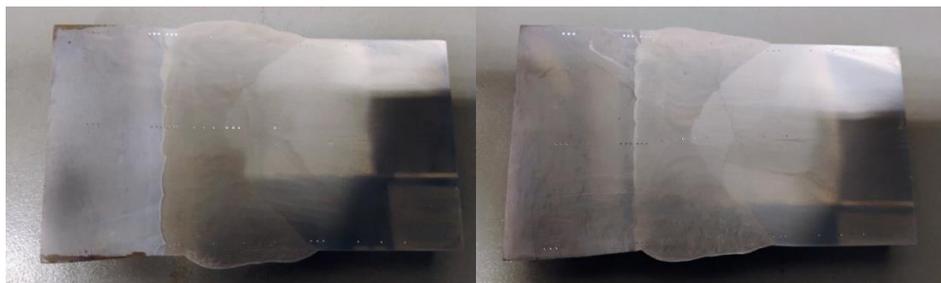


Figura 49. Probetas obtenidas para el ensayo de dureza de cada tratamiento térmico, la de la derecha con la condición máxima y la de la izquierda con la condición mínima.

El espesor de las muestras obtenidas cumple con las dimensiones mínimas, de forma que no es visible ninguna deformación o marca en la cara opuesta de la probeta tras el ensayo.

### 5.5.3 Ensayo de impacto

Para el ensayo de tenacidad al impacto, en concreto la prueba de Charpy se han extraído seis probetas, en tres de ellas el cordón de soldadura se ha realizado manualmente y en las tres restantes mediante la máquina de soldadura automática, todas ellas pertenecientes a la placa B de condición mínima.

Se ha aplicado la normativa ASTM A370 [36] por lo que las muestras se han tomado transversalmente a la dirección de la soldadura con la muesca perpendicular a la superficie, a no más de 2 mm de la superficie exterior del material.

Se han extraído tres probetas para cada proceso de soldadura porque es el número mínimo exigido por la normativa para poder obtener un resultado promedio del ensayo.

El mecanizado de las muestras debe realizarse con rigurosidad, las que se realizan incorrectamente deben desecharse y sustituirse por otras ya que los defectos en las muestras pueden afectar los resultados.

En la Figura A20 del Anexo II podemos ver los requisitos geométricos y dimensionales. Todas las probetas son de 10x10x55 mm y la entalla es en V.



Figura 50. Probetas obtenidas para el ensayo de Charpy del tratamiento térmico de mínima condición, las tres de la izquierda pertenecientes a la soldadura manual y las tres de la derecha a la automática.

### 5.5.4 Ensayo de doblado

Para el ensayo de doblado se ha empleado la normativa ASME Sec. IX [11].

Las muestras se han preparado cortando la placa, en este caso la A, formando cuatro probetas de sección transversal aproximadamente rectangular, cumpliendo las características de geometría y dimensiones que se especifican en la Figura A21 en el Anexo II.

Al tratarse de un ensayo de curvado lateral transversal, la soldadura es transversal al eje longitudinal de la muestra, que se dobla de modo que una de las superficies laterales se convierte en la superficie convexa de la muestra doblada.

Como en este caso la placa a ensayar es de más de 38 mm de espesor y las muestras pueden doblarse en todo su ancho, se han tomado probetas completas de 38 mm de espesor.

La superficie de las muestras se ha mecanizado para que sean suaves, uniformes y estén libres de rebabas, hendiduras o cualquier otro tipo de defecto superficial. Cualquier imperfección superficial puede afectar a los resultados obtenidos en el ensayo. También es importante que los bordes cortados de las probetas hayan quedado redondeados y lisos para evitar concentraciones de esfuerzos durante el ensayo.



Figura 51. Obtención de 4 probetas con la condición de tratamiento térmico máximo.

## 6 ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

Dichos ensayos se han realizado antes de obtener las probetas del cupón para realizar los ensayos destructivos. Mediante los exámenes no destructivos se verifica que el proceso de soldadura se ha realizado correctamente, de esta forma las propiedades mecánicas obtenidas posteriormente de los ensayos destructivos se pueden tomar como válidas.

### 6.1 INSPECCIÓN VISUAL

#### 6.1.1 Procedimiento y especificaciones

En ensayo visual se ha realizado siguiendo la normativa ASME Sec. V Artículo 9 [37]. Según dicha normativa los exámenes visuales se deben realizar de acuerdo con un procedimiento escrito, en este caso la entidad cuenta con un procedimiento propio en caso de que el cliente no especifique uno como es en esta circunstancia.

El tipo de inspección realizada es la directa, antes de comenzar el examen se ha verificado la adecuación del procedimiento y para ello se ha comprobado que bajo la combinación de acceso, luminosidad y ángulos de visión con los que se realiza el ensayo, se puede apreciar una línea fina de menos de 0,8 mm de anchura o algún tipo de defecto artificial situado sobre la superficie a examinar o en una situación similar a la de la zona a examinar.

Una vez verificado el procedimiento se ha limpiado la superficie a examinar con acetona y trapos blancos limpios y luego se ha comprobado que está seca y exenta de suciedad, grasa, aceite, proyecciones de soldadura y otras sustancias extrañas que puedan enmascarar discontinuidades superficiales e interferir en el examen.

Como ya se ha indicado, se ha realizado una inspección visual directa, aunque se podría haber aplicado el ensayo visual remoto, en el cual se emplean elementos de ayuda visual como el telescopio, baroscopio, cámaras u otros instrumentos adecuados, con la condición de que estos sistemas tengan una capacidad de resolución al menos equivalente a aquella obtenida por observación visual directa.

El examen visual directo se ha realizado bajo las siguientes condiciones:

- a) Acceso suficiente para situar el ojo a una distancia máxima de 609 mm de la superficie a examinar.
- b) El ángulo con la superficie a examinar mayor de 30°.
- c) Empleo de luz blanca natural y luz artificial puntual a una distancia de 300 mm.

- d) La luminosidad en la zona del examen es como mínimo de 1000 lux para la detección o estudio de pequeñas anomalías, en este caso el nivel de iluminación ha sido de 1450 lux medido mediante un luxómetro.

### **6.1.2 Criterios de aceptación**

En este ensayo los criterios de aceptación aplicados son los correspondientes a la normativa ASME Sec. IX QW-194 [11] donde se especifica que los cupones de prueba no deben mostrar grietas y tienen que presentar una penetración completa, con fusión completa del metal de soldadura y el metal base. Además, se ha aplicado un nivel de aceptación de cero defectos.

## **6.2 EXÁMEN RADIOGRÁFICO**

### **6.2.1 Procedimiento y especificaciones**

El ensayo radiográfico se ha desarrollado aplicando la normativa ASME Sec. V Artículo 2 [37], la cual indica que debe efectuarse de acuerdo con un procedimiento escrito, en este caso dado por el cliente donde se recogen las especificaciones del ensayo.

Antes de realizar el ensayo se ha preparado correctamente la superficie del material, se han removido todas las irregularidades superficiales sobre ambos lados de la soldadura. Esto se realiza cuando es posible, mediante un proceso adecuado hasta un grado tal que las imágenes resultantes en la radiografía no enmascaren o se confundan con imágenes de discontinuidades.

Además, es necesario que todas las superficies de las uniones soldadas a ensayar empalmen suavemente con el material base y tengan un sobre espesor uniforme que no exceda de lo especificado.

Las características del ensayo radiográfico son:

- a) Inspección del 100% del material.
- b) Tipo de técnica aplicada según Figura 52.

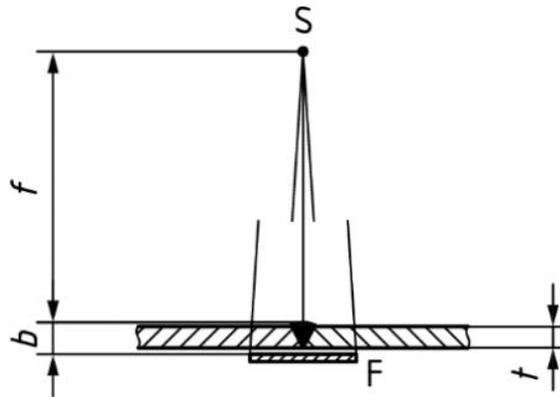


Figura 52. Disposición para el ensayo de soldaduras planas con la fuente de radiación en un lado y la película en el lado opuesto.

- c) Distancia entre la fuente y el objeto examinado de 450 mm.
- d) Pantalla de plomo de 0,027 mm de espesor.
- e) Dimensión de la fuente 3,125 mm.
- f) Tiempo de exposición 45 minutos y 55 segundos.
- g) Radiación empleada Rayos-X 13,7 Ci.
- h) Indicador de Calidad de Imagen (ICI) empleado 1C según la norma ASTM 16 colocado en el lado de la fuente.

Los ICI son una herramienta esencial para evaluar la calidad de la radiografía, pueden ser de alambres o de placas con agujeros, en función del material y el espesor de la pieza a examinar se emplean unos u otros.

El indicador empleado es de tipo alambre y consiste en un conjunto de alambres de diferentes diámetros, la calidad de la imagen se determina mediante el alambre con menor diámetro que se llega a percibir en la radiografía.

- i) Película radiográfica simple de dimensiones 10x40mm y tipo AGFA D4 CI.

La densidad de la película radiográfica ha sido leída a través de la imagen radiográfica del cuerpo del ICI. Se ha medido con un densitómetro verificado, cuya calibración debe ser verificada por contrastación con la película patrón con densidades escalonadas según un procedimiento dado por el cliente.

- j) El revelado de la película es automático.
- k) Tiempo de procesado aproximadamente 8 minutos.
- l) Temperatura 28°C.
- m) Penumbra geométrica de 0,28 mm

Para determinar si existía exposición de radiación dispersa que llega a la película se ha colocado una letra B de plomo detrás de la misma con dimensiones de 11 mm de altura y 1,5 mm de espesor. Si aparece una imagen de la letra B de menos densidad sobre un fondo más

denso, la protección contra la radiación dispersa es insuficiente y la radiografía es considerada inaceptable. Por otro lado, si una imagen es más densa que el fondo de la radiografía, no se considera causa para el rechazo del examen.

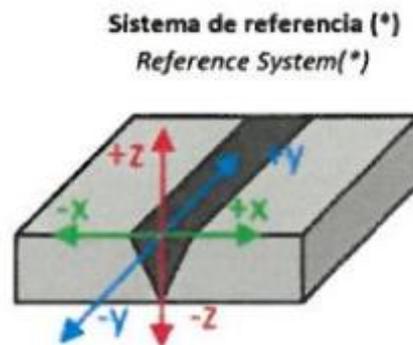


Figura 53. Sistema de referencia aplicado

## 6.2.2 Criterios de aceptación

Los criterios de aceptación siguiendo la normativa para soldaduras ASME Sec. VIII División 2 [38] son:

- a) La densidad dentro de la imagen de la indicación puede variar y no es un criterio de aceptación o rechazo.
- b) Son rechazables cualquier fisura o zona de fusión incompleta o con falta de penetración
- c) Son rechazables cualquier otra indicación lineal que tenga una longitud mayor a:
  - i. 6 mm para un espesor  $t$  menor o igual a 19 mm.
  - ii.  $t/3$  para  $t$  superior a 19 mm e inferior o igual a 57 mm.
  - iii. 19 mm para  $t$  superior a 57 mm.
- d) Son rechazables cualquier grupo de indicaciones en línea que tenga una longitud agregada mayor que  $t$ , excepto cuando la distancia entre las imperfecciones sucesivas exceda el valor de  $L$ , donde  $L$  es la longitud de la imperfección más larga del grupo.
- e) Las condiciones de la soldadura de raíz interna son aceptables cuando el cambio de densidad o brillo en la imagen como se indica en la radiografía no es abrupto. Las indicaciones lineales en la radiografía en cualquier borde de tales condiciones se evaluarán de acuerdo con los otros criterios de aceptación.

Las indicaciones redondeadas son las que tienen una longitud máxima de tres veces el ancho en la radiografía. Este tipo de indicaciones pueden ser de forma circular, elíptica, cónica o irregular y pueden tener “colas”, es decir, extensiones o proyecciones que emergen de las indicaciones. Al evaluar el tamaño de una indicación redondeada se tendrán en cuenta.

Las indicaciones alineadas son una secuencia de cuatro o más indicaciones redondeadas. Se consideran alineadas cuando tocan una línea paralela a la longitud de la soldadura, trazada a través del centro de las dos indicaciones redondeadas exteriores.

- f) Las indicaciones redondeadas relevantes caracterizadas como imperfecciones no pueden exceder las que se muestran en la Figura 54. Estas figuras ilustran varios tipos de indicaciones redondeadas para diferentes espesores de soldaduras superiores a 3 mm. Las distribuciones que se muestran no son necesariamente los patrones que pueden aparecer en la radiografía, pero son típicos de la concentración y el tamaño de las indicaciones permitidas.

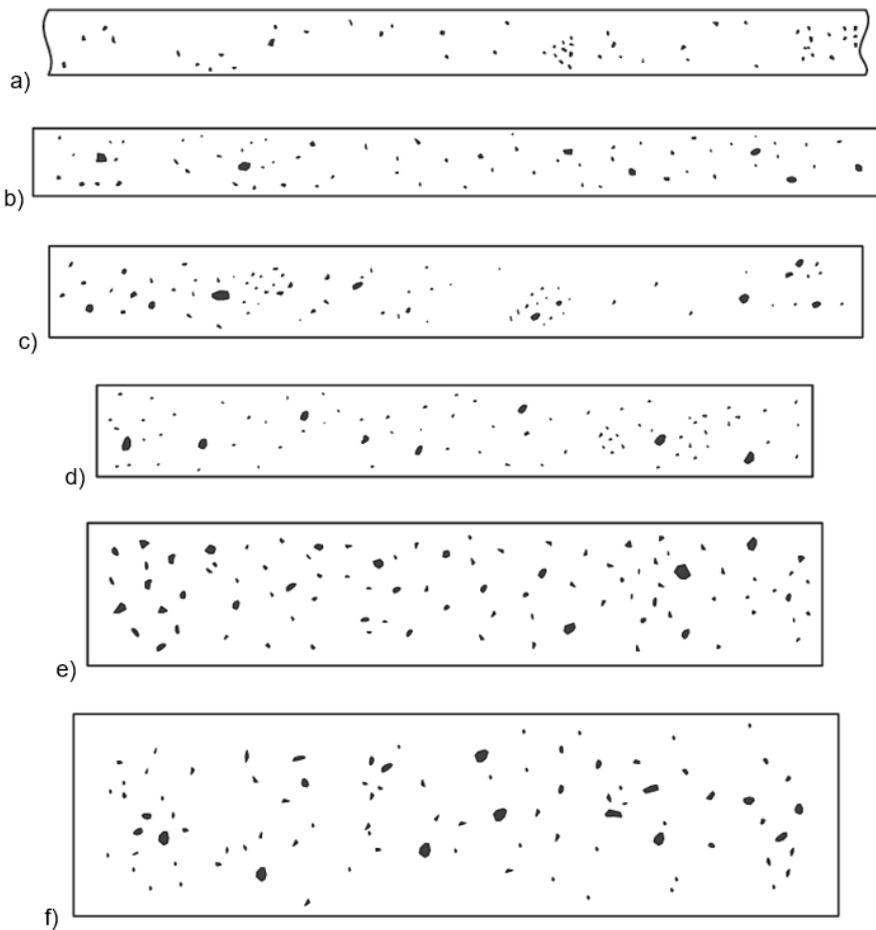


Figura 54. Indicaciones redondeadas aleatorias. a)  $t$  entre 3 y 6 mm b)  $t$  entre 6 y 10 mm c)  $t$  entre 10 y 19 mm d)  $t$  entre 19 y 50 mm e)  $t$  entre 50 y 100 mm f)  $t$  mayor de 100 mm.

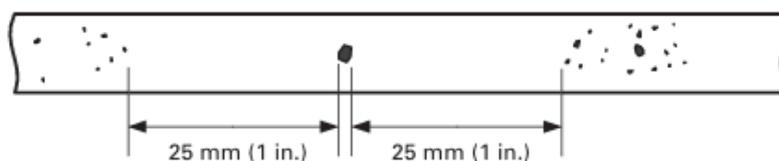


Figura 55. Indicación aislada.



Figura 56. Grupo de indicaciones o "racimo".

Para determinar que una indicación redondeada es relevante consultamos la Tabla 4.

Thickness, $t$	Maximum Size of Acceptable Rounded Indication		Maximum Size of Nonrelevant Indications
	Random	Isolated	
Less than 3 mm ( $\frac{1}{8}$ in.)	$\frac{1}{4}t$	$\frac{1}{3}t$	$\frac{1}{10}t$
3 mm ( $\frac{1}{8}$ in.)	0.8 mm ( $\frac{1}{32}$ in.)	1.1 mm ( $\frac{3}{64}$ in.)	0.4 mm ( $\frac{1}{64}$ in.)
5 mm ( $\frac{3}{16}$ in.)	1.2 mm ( $\frac{3}{64}$ in.)	1.5 mm ( $\frac{1}{16}$ in.)	0.4 mm ( $\frac{1}{64}$ in.)
6 mm ( $\frac{1}{4}$ in.)	1.5 mm ( $\frac{1}{16}$ in.)	2.1 mm ( $\frac{3}{32}$ in.)	0.4 mm ( $\frac{1}{64}$ in.)
8 mm ( $\frac{5}{16}$ in.)	2.0 mm ( $\frac{5}{64}$ in.)	2.6 mm ( $\frac{7}{64}$ in.)	0.8 mm ( $\frac{1}{32}$ in.)
10 mm ( $\frac{3}{8}$ in.)	2.5 mm ( $\frac{3}{32}$ in.)	3 mm ( $\frac{1}{8}$ in.)	0.8 mm ( $\frac{1}{32}$ in.)
11 mm ( $\frac{7}{16}$ in.)	2.8 mm ( $\frac{7}{64}$ in.)	3.7 mm ( $\frac{5}{32}$ in.)	0.8 mm ( $\frac{1}{32}$ in.)
13 mm ( $\frac{1}{2}$ in.)	3 mm ( $\frac{1}{8}$ in.)	4.3 mm ( $\frac{11}{64}$ in.)	0.8 mm ( $\frac{1}{32}$ in.)
14 mm ( $\frac{9}{16}$ in.)	3.6 mm ( $\frac{5}{64}$ in.)	5 mm ( $\frac{3}{16}$ in.)	0.8 mm ( $\frac{1}{32}$ in.)
16 mm ( $\frac{5}{8}$ in.)	4.0 mm ( $\frac{5}{32}$ in.)	5.3 mm ( $\frac{7}{32}$ in.)	0.8 mm ( $\frac{1}{32}$ in.)
17 mm ( $\frac{11}{16}$ in.)	4.0 mm ( $\frac{5}{32}$ in.)	5.8 mm (15.64 in.)	0.8 mm ( $\frac{1}{32}$ in.)
19 mm ( $\frac{3}{4}$ in.) to 50 mm (2 in.), inclusive	4.0 mm ( $\frac{5}{32}$ in.)	6.4 mm ( $\frac{1}{4}$ in.)	0.8 mm ( $\frac{1}{32}$ in.)
Over 50 mm (2 in.)	4.0 mm ( $\frac{5}{32}$ in.)	10 mm ( $\frac{3}{8}$ in.)	1.5 mm ( $\frac{1}{16}$ in.)

Tabla 4. Ejemplos de indicaciones redondeadas aceptables según ASME Sec. VIII-División 2 [38].

Solo aquellas indicaciones redondeadas que excedan las siguientes dimensiones se consideraran relevantes y se compararan con las tablas de aceptación:

- i.  $t/10$  para  $t$  menor de 3 mm.
- ii. 0,4 mm para  $t$  mayor o igual a 3 mm y menor o igual a 6 mm.
- iii. 0,8 mm para  $t$  superior a 6 mm e inferior o igual a 50 mm.
- iv. 1,5 mm para  $t$  superior a 50 mm.
- v. El tamaño máximo de cualquier indicación redondeada es de  $t/4$  o 4 mm, la medida que sea menor. Excepto que una indicación aislada esté separada de una indicación adyacente por 35 mm o más, en este caso puede ser  $t/3$  o 6 mm, lo que sea menor. Para  $t$  superior a 50 mm, el tamaño máximo permisible de una indicación aislada se debe aumentar a 10 mm.
- vi. Las indicaciones redondeadas alineadas se aceptan cuando la suma de los diámetros de las indicaciones "Lx" es menor que  $t$  en una longitud de  $12t$ , se puede ver en la Figura 57.

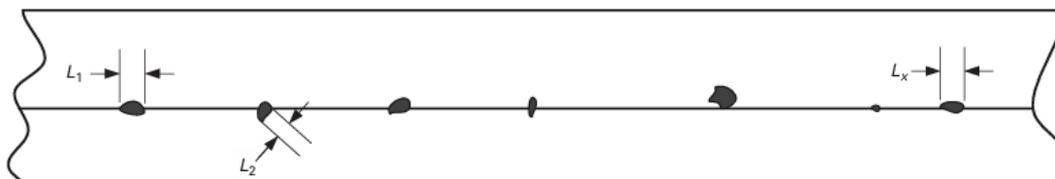


Figura 57. Indicaciones redondeadas alineadas.

- vii. La longitud de los grupos de indicaciones redondeadas alineadas y el espacio entre los grupos deben cumplir los requisitos de la Figura 58. La suma del grupo de longitudes debe ser inferior que  $t$  en una longitud de  $12t$ . La distancia mínima entre grupos debe ser  $3L$  donde  $L$  es la longitud del grupo más largo que se está evaluando. La longitud de un grupo  $L$  máxima admisible es de  $6\text{mm}$  para  $t$  menor de  $19\text{mm}$ , de  $t/3$  para  $t$  mayores o iguales a  $19\text{mm}$ , pero menores o iguales a  $57\text{mm}$ , y de  $19\text{mm}$  para  $t$  mayores de  $57\text{mm}$ .

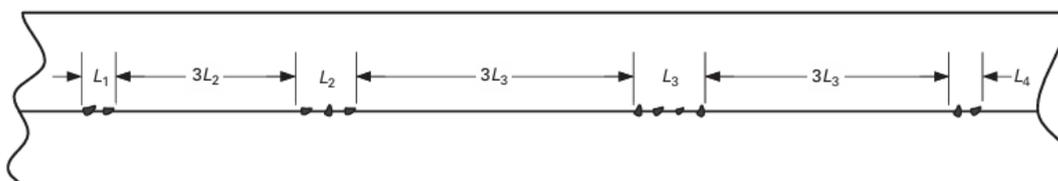


Figura 58. Grupos de indicaciones redondeadas alineadas.

- viii. En las indicaciones agrupadas, la longitud de un racimo aceptable no debe exceder los  $25\text{ mm}$  o  $2t$ , lo que sea menor. Cuando haya más de un grupo, la suma de las longitudes de los grupos no debe exceder los  $25\text{ mm}$  en una soldadura de  $150\text{ mm}$  de longitud.
- ix. En soldaduras con espesores menores de  $3\text{ mm}$  el número máximo de indicaciones redondeadas no debe exceder  $12$  en un área de  $150\text{ mm}$  de longitud de la soldadura. Se permitirá un número proporcionalmente menor de indicaciones en soldaduras de menos de  $150\text{ mm}$  de longitud.
- x. La distancia entre indicaciones redondeadas adyacentes no es un factor para determinar la aceptación o el rechazo, excepto cuando se requiera para indicaciones aisladas o grupos de indicaciones alineas.

Para que el ensayo sea aceptado es necesario que todas las radiografías estén libres de impactos mecánicos, químicos u otras imperfecciones en la medida en que no enmascaren y no se confundas con la imagen de ninguna discontinuidad. Tales defectos incluyen, pero no se limitan a empañamiento, defectos de procesado como rayas, arrugas, marcas de agua o marcas químicas, arañazos, suciedad, marcas de dedos o indicaciones falsas por pantallas defectuosas.

## 6.3 LÍQUIDOS PENETRANTES

### 6.3.1 Procedimiento y especificaciones

El ensayo no destructivo de líquidos penetrantes se ha realizado para detectar discontinuidades superficiales en materiales no porosos una vez realizada y aprobada la inspección visual.

Para la realización del examen se ha seguido la especificación entregada por el cliente, realizada con los requisitos especificados en la norma ASME V Artículo 6 [37].

Hay dos tipos de técnicas que se pueden aplicar en este ensayo. La técnica I es la fluorescente y la técnica II de contraste de color. Además, la técnica se clasifica con una “C” o una “A” en función de si el penetrante es eliminable con disolvente o lavable con agua respectivamente. El tipo de ensayo es el II C en este caso. Como especifica la normativa solo se pueden emplear materiales indicados en la Tabla 5.

<u>Solvente pre limpieza</u> <i>Precleaning solvent</i>	<u>Penetrante</u> <i>Penetrant</i>	<u>Limpiador Intermedio</u> <i>Intermediate cleaner</i>	<u>Revelador</u> <i>Developer</i>	<u>Técnica</u> <i>Technique</i>	<u>Marca comercial</u> <i>Brand</i>
Acetona o solvente <i>Acetone or solvent</i>	Penetrante coloreado <i>Penetrant coloured</i> SKL-WP	Agua <i>Water</i>	Revelador húmedo base solvente SKD-S2 (E/D)	Lavable con agua <i>Water washable</i>	MAGNAFLUX or similar
Acetona o solvente <i>Acetone or solvent</i>	Penetrante coloreado <i>Penetrant coloured</i> SKL-SP	Solvente / Solvent SKC-S	Revelador húmedo base solvente <i>Wet developer solvent base</i> SKD-S2	Lavable con solvente <i>Solvent removable</i>	MAGNAFLUX or similar
Acetona o solvente <i>Acetone or solvent</i>	Penetrante fluorescente <i>Flourescent penetrant</i> ZL-27	Agua <i>Water</i>	Revelador húmedo base solvente <i>Wet developer solvent base</i> SKD-S2	Lavable con agua <i>Water washable</i>	MAGNAFLUX or similar
Limpiador <i>cleaner</i>	Rojo/Red <i>Water removable</i> SKL-WP	Agua <i>Water</i>	Húmedo no acuoso/ <i>Nonaqueous wet</i> SKD-S2	Lavable con agua <i>Water washable</i>	MAGNAFLUX or similar
Limpiador <i>cleaner</i>	Rojo/Red <i>No Water removable</i> SKL-SP	Limpiador/cleaner SKC-S	Húmedo no acuoso/ <i>Nonaqueous wet</i> SKD-S2	Lavable con solvente <i>Solvent removable</i>	MAGNAFLUX or similar

Tabla 5. Materiales para el ensayo de líquidos penetrantes.

Antes de comenzar el ensayo se ha preparado la superficie, cuando hay irregularidades superficiales que puedan enmascarar indicaciones es importante amolar, mecanizar o aplicar otro tipo de método que las elimine. Se ha secado y limpiado la superficie que se examina y sus adyacentes, como indica la normativa al menos 25 mm, para asegurar que está seca y libre de suciedad, grasa, pintura u otras materias que puedan cubrir las imperfecciones e interferir en el ensayo.

El ensayo se ha realizado con las siguientes cualidades:

- a) Se ha empleado un líquido desengrasante de limpieza en seco.
- b) Temperatura de los materiales penetrantes y de la superficie examinada 16°C.
- c) Tiempo de secado de 5 minutos para asegurar que el desengrasante se ha evaporado correctamente antes de aplicar el líquido penetrante.
- d) Penetrante rojo formado por diferentes disolventes, tensoactivos y alcoholes entre otros compuestos.
- e) Aplicación del líquido penetrante mediante brocha, aunque otros métodos como la inmersión o la pulverización también son aceptables.
- f) Tiempo de penetración de 20 minutos.
- g) Eliminación del exceso de penetrante mediante desengrasante de limpieza en seco especial, este paso es importante hacerlo con cuidado de que no se reduzca al mínimo el exceso de penetrantes en las discontinuidades.
- h) Tiempo de secado de 5 minutos.
- i) Aplicación del agente revelador mediante pulverización. La capa aplicada es fina y uniforme, un espesor de capa insuficiente puede no producir la indicación de las discontinuidades y, por el contrario, un espesor excesivo de capa puede enmascarar indicaciones.
- j) Tiempo de revelado de 15 minutos.
- k) Se ha empleado luz blanca natural y luz artificial puntual a una distancia aproximada de 400 mm. Las condiciones de luz a la hora de interpretar y evaluar las indicaciones en el componente examinado son muy importantes.
- l) Nivel de iluminación 1450 Lux.

Tras finalizar la inspección se limpia correctamente el cupón.

### **6.3.2 Criterios de aceptación**

Todas las indicaciones se han evaluado aplicando los criterios del código ASME Sec. VIII División 2 [38].

Según dicha normativa las indicaciones inaceptables deben eliminarse o reducirse a una indicación de tamaño aceptable. Siempre que se elimine una indicación mediante astillado o esmerilado y no se requiera una reparación posterior mediante soldadura, el área excavada se mezclará con la superficie circundante para evitar muescas, hendiduras o esquinas.

Aunque una indicación puede ser mayor que la imperfección que la causa, el tamaño de la indicación es la base para la evaluación de aceptación.

Las indicaciones se pueden dividir en dos grupos:

- 1) Indicaciones relevantes, cuando tienen dimensiones mayores a 1,5 mm, estas a su vez se clasifican en tres tipos:
  - a) Indicación lineal, es una cuya longitud es mayor a tres veces su ancho.
  - b) Indicación redondeada, es una de forma circular o elíptica con su longitud igual o menos a tres veces su ancho.
  - c) Cualquier indicación dudosa o cuestionable deberá ser reexaminada para determinar si es relevante o no.
- 2) Indicaciones no relevantes, son las que exceden los estándares de aceptación, pero se consideran no relevantes. Deben ser reensayadas por el mismo método u otro ensayo no destructivo para comprobar si las discontinuidades están o no presentes en la pieza.

Los criterios de aceptación aplicados según la normativa son:

- a) Todas las superficies examinadas deben estar libres de:
  - I. Indicaciones lineales relevantes.
  - II. Indicaciones redondeadas relevantes mayores de 5 mm.
  - III. Cuatro o más indicaciones redondeadas en una línea separadas por 1,5 mm o menos, de borde a borde.
- b) Las indicaciones similares a grietas detectadas, independientemente de las condiciones de las superficies, son inaceptables.

## **7 ENSAYOS DESTRUCTIVOS**

La realización de ensayos destructivos en las diferentes probetas obtenidas del cupón nos permite evaluar y obtener las propiedades mecánicas de los materiales, y verificar que el componente es apto para su correspondiente aplicación en el proyecto industrial al que pertenece. Además, como objeto de este trabajo podemos analizar y comparar la variación de dichas propiedades mecánicas en función de los tratamientos térmicos previamente aplicados.

El tipo de ensayos que deben realizarse lo especifica la normativa y el cliente en función de las aplicaciones y las características que debe adquirir la soldadura.

Los ensayos se han llevado a cabo en un Parque Científico Tecnológico que cuenta con laboratorio de integridad y mecánica estructural.

### **7.1 ENSAYO DE TRACCIÓN TRANSVERSAL**

#### **7.1.1 Procedimiento y especificaciones**

Para la realización del ensayo de tracción se ha aplicado la normativa ASTM E8/E8M:2022 [39]. Esta normativa especifica los requisitos de las máquinas que se utilizan y las fuerzas que se aplican.

Lo primero es verificar que las máquinas de ensayo de tracción miden con precisión la fuerza aplicada, para ello se realiza una calibración aplicando fuerzas conocidas y comparándolas con las registradas durante la prueba. La máquina debe estar equipada con sensores de fuerza que sean capaces de medir la fuerza aplicada con precisión.

Para proceder al ensayo de las probetas, se ha colocado la muestra de tal forma que coincida su eje con la línea central de los cabezales de la máquina de prueba, cualquier desviación puede introducir tensiones de flexión que no se incluyen en el cálculo de tensión habitual.

Mediante los dispositivos de agarre, se ha transmitido la fuerza aplicada por la máquina de ensayo a las muestras, hasta alcanzar su rotura. Todas las probetas se han ensayado a temperatura ambiente.

Es importante que los dispositivos de medición de deformación lineal empleados como micrómetros y extensómetros sean exactos y precisos.

## 7.1.2 Criterios de aceptación

Para que el ensayo se dé como válido, las probetas examinadas deben tener una resistencia a la tracción que cumpla con los criterios de aceptación, en este caso de la norma ASME Sec. IX [11] en concreto la sección QW-153.

La resistencia a tracción de la probeta debe superar uno de los siguientes valores:

- a) La resistencia a la tracción mínima especificada del metal común.
- b) La resistencia a la tracción mínima especificada del más débil de los dos, si se utilizan metales comunes de diferentes resistencias mínimas a la tracción.
- c) La resistencia a la tracción mínima especificada del metal de soldadura cuando la sección aplicable prevea el uso de metal de soldadura que tenga una resistencia a la temperatura ambiente más baja que el metal base.

Si la muestra se rompe en el metal base fuera de la soldadura o de la interfaz de soldadura, se aceptará que la prueba cumple con los requisitos, siempre que la resistencia no sea más del 5% inferior a la resistencia a la tracción mínima especificada del metal base.

## 7.2 ENSAYO DE DUREZA (VICKERS)

### 7.2.1 Procedimiento y especificaciones

En este caso la normativa aplicada para la realización del ensayo de dureza Vickers es la ASTM E92-23 [40].

Siguiendo la normativa empleada se ha ajustado la posición de la muestra de prueba para que la hendidura se realice en la ubicación de la superficie deseada. Además, se ha colocado de forma que la superficie a examinar quede perpendicular al eje del penetrador.

Una vez colocada la probeta, se pone en contacto el penetrador con la muestra en dirección normal a la superficie y se aplica la fuerza de prueba evitando golpes o vibraciones durante el proceso de indentación.

El indentador empleado es un diamante piramidal altamente pulido, puntiagudo y de base cuadrada con ángulos de cara de 136°. Es relevante que los indentadores se examinen periódicamente y se deben reemplazar si se desgastan, se desafilan, se astillan, se agrietan o se separan del material de montaje.

Se han realizado varias indentaciones en cada muestra, correspondientes a los puntos marcados en la Figura 59, a lo largo de tres líneas. La línea 1 corresponde a la cara soldada

manualmente, la línea 2 a la zona intermedia de la placa y la línea 3 a la cara donde la soldadura se ha realizado automáticamente.

En cada línea los puntos corresponden a distintas zonas:

- 1, 2 y 3: Placa de acero aleado.
- 4, 5 y 6: Zona afectada térmicamente de la placa de acero aleado.
- 7, 8 y 9: Recargue.
- 10, 11 y 12: Cordón de soldadura.
- 13, 14 y 15: Zona afectada térmicamente de la placa de acero inoxidable.
- 16, 17 y 18: Placa de acero inoxidable.

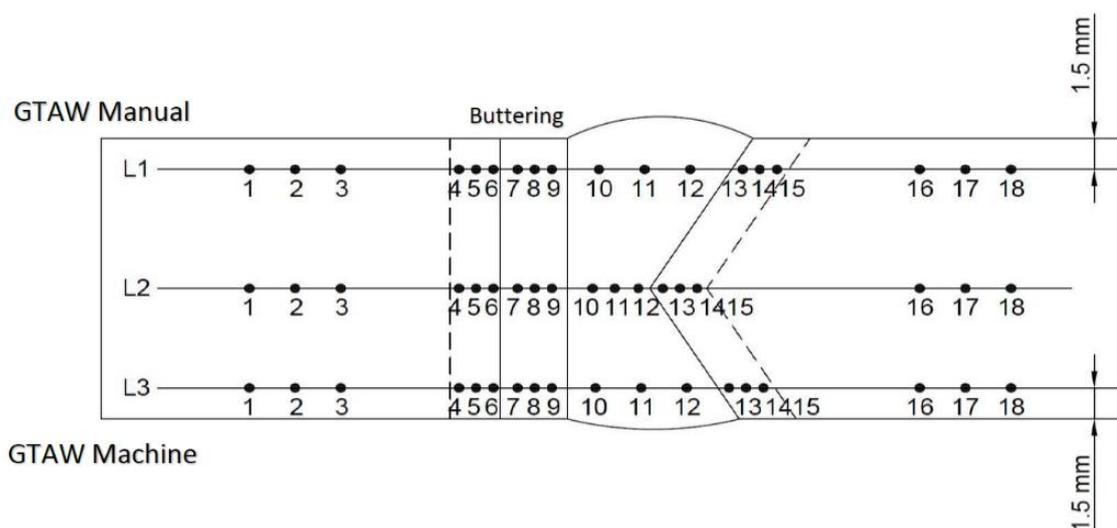


Figura 59. Puntos de aplicación de la carga.

Es necesario asegurarse de que el espacio entre las hendiduras sea lo suficientemente grande para que las pruebas adyacentes no interfieran entre sí, cumpliendo los requisitos de la Figura 60.

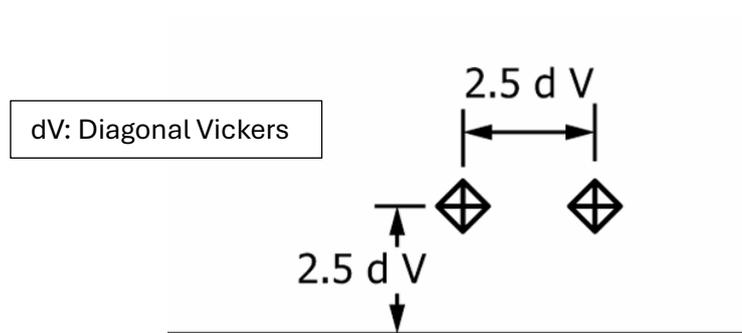


Figura 60. Distancias mínimas recomendadas para el ensayo de dureza Vickers.

En este caso como la escala de dureza Vickers es la HV10, la fuerza de prueba aplicada es de 98,07 N, se puede consultar en la Tabla 6. El tiempo transcurrido desde la aplicación inicial de la fuerza hasta que se alcance la fuerza de ensayo completa no es superior a 10 segundos,

una vez alcanzada la fuerza de ensayo completa, se mantiene durante 10 o 15 segundos y luego se elimina sin choques ni vibraciones.

Vickers scale	Knoop scale <sup>A</sup>	Test force (N)	Approximate Test force (kgf)	Approximate Test force (gf)
HV 0.001	HK 0.001	0.009807	0.001	1
HV 0.01	HK 0.01	0.09807	0.01	10
HV 0.015	HK 0.015	0.1471	0.015	15
HV 0.02	HK 0.02	0.1961	0.02	20
HV 0.025	HK 0.025	0.2451	0.025	25
HV 0.05	HK 0.05	0.4903	0.05	50
HV 0.1	HK 0.1	0.9807	0.1	100
HV 0.2	HK 0.2	1.961	0.2	200
HV 0.3	HK 0.3	2.942	0.3	300
HV 0.5	HK 0.5	4.903	0.5	500
HV 1	HK 1	9.807	1	1000
HV 2	HK 2	19.61	2	2000
HV 3		29.41	3	
HV 5		49.03	5	
HV 10		98.07	10	
HV 20		196.1	20	
HV 30		294.1	30	
HV 50		490.3	50	
HV 100		980.7	100	
HV 120		1177	120	

Tabla 6. Escalas de dureza y fuerzas de prueba de la normativa ASTM E92 [39].

La máquina de ensayo tiene un microscopio óptico de luz que además de emplearse para seleccionar la ubicación de ensayo deseada, permite medir el tamaño de la hendidura producida por el ensayo. Para obtener una resolución y contraste óptimos se ajustan la intensidad de iluminación y los diafragmas.

Al tratarse de una prueba de dureza Vickers, se miden las longitudes de las dos diagonales y se calcula la longitud diagonal media, que se utiliza para derivar el valor de dureza Vickers.

## 7.2.2 Criterios de aceptación

Los criterios de aceptación del ensayo de dureza se han establecido por el cliente.

En este caso se especifica:

- Dureza máxima de 300 HV10 en las zonas afectadas térmicamente por el proceso de recargue.
- Dureza máxima de 240 HV10 en el material base correspondiente al acero aleado de cromo-molibdeno.
- En el acero inoxidable no se requiere dureza máxima.

## 7.3 ENSAYO DE TENACIDAD AL IMPACTO (CHARPY)

### 7.3.1 Procedimiento y especificaciones

Se ha aplicado la normativa ASTM E23:2023 [41] para llevar a cabo el ensayo de tenacidad al impacto Charpy.

Como pauta la normativa, antes de comenzar el ensayo se realiza una revisión de la máquina de impacto, se examina visualmente en busca de daños y desgastes evidentes.

La temperatura de ensayo es un parámetro que afecta a las propiedades de impacto de la mayoría de los materiales y depende del método de prueba y de la aplicación específica del material por lo que su determinación es responsabilidad del cliente, en este caso ha especificado que es  $-29^{\circ}\text{C}$ .

Se prepara la maquina elevando el péndulo a la posición de enclavamiento y una vez acondicionada térmicamente la muestra se ha colocado con ayuda de unas pinzas autocentrantes sobre los soportes para realizar el ensayo. Estas pinzas se acondicionan adecuadamente, y son para probetas con muestra en V, su geometría y dimensiones quedan definidas en la normativa como se muestra en la Figura 61.

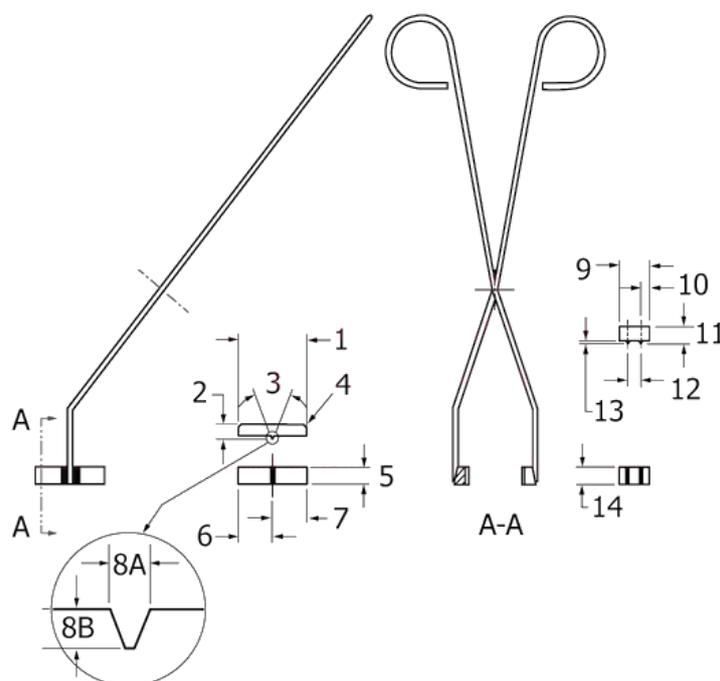


Figura 61. Pinzas de autocentrado según ASTM E23-23 [40].

ID Number	Designation	Dimension, mm
1	Support (notch side) length	39.93 + 0 -0.051
2	Support (notch side) height	7.94 ± 1
3	Insert angle	44.5 ± 0.5°
4	Radius on support	2 ± 1
5	Support width	9.5 ± 1
6	Notch center	19.96
7	Notch center	19.96
8A	10 mm specimen width	1.60 to 1.70
	5 mm specimen width	0.74 to 0.80
	3 mm specimen width	0.45 to 0.51

ID Number	Designation	Dimension, mm
8B	10 mm specimen width	1.52 to 1.65
	5 mm specimen width	0.69 to 0.81
	3 mm specimen width	0.36 to 0.48
9	Solder pad length	17.46 ± 1
10	Solder pad extension	4.76 ± 1
11	Solder pad height	9.5 ± 1
12	rod	7.94 ± 1
13		1.588 ± 1
14	Solder pad width	9.5 ± 1

Tabla 7. Dimensiones de las pinzas de autocentrado según ASTM E23-23 [40].

El péndulo se libera suavemente y sin vibraciones, la muestra es impactada por el percutor y se obtiene información del ensayo a través de la máquina y de la probeta fracturada.

### 7.3.2 Criterios de aceptación

Los criterios de aceptación aplicados corresponden a la normativa ASTM A370 [36].

El cliente proporciona unos valores mínimos de energía absorbida que deben cumplir las muestras ensayadas:

- De manera individual, cada probeta debe absorber como mínimo 55 Julios de energía antes de romperse.
- Por otra parte, el promedio de energía absorbida por las probetas ensayadas debe ser al menos 48 Julios.

Cuando se especifica un valor medio mínimo a una temperatura dada, como es el caso, el resultado del ensayo es la media aritmética redondeada al valor entero en Julios más próximo de los valores de ensayo individuales de tres muestras de un emplazamiento de ensayo.

El resultado de la prueba es aceptable cuando se cumplen todas las condiciones siguientes:

- a) El resultado de la prueba es igual o superior a la media mínima especificada.
- b) El valor de la prueba individual para no más de una muestra mide menos que el promedio mínimo especificado.

- c) El valor de prueba individual para cualquier muestra mide no menos de dos tercios del promedio mínimo especificado.

## 7.4 ENSAYO DE DOBLADO

### 7.4.1 Procedimiento y especificaciones

El ensayo de doblado se ha llevado a cabo aplicando la normativa ASME Sec. IX [11].

Como la soldadura es transversal al eje longitudinal de la probeta, se ha realizado el ensayo de flexión lateral transversal, para ello se ha doblado de modo que una de las superficies laterales se convierte en la superficie convexa de la muestra doblada.

Para realizar el ensayo la muestra se ha colocado y forzado dentro de la matriz aplicando carga sobre el émbolo hasta que la curvatura de la muestra tenía una precisión de unos 3 mm. El rodillo exterior se ha movido 180 grados desde su punto de partida, ángulo mínimo con el que el doblado se considera completo.

En la Figura 62 se determina la geometría de la máquina empleada durante el ensayo.

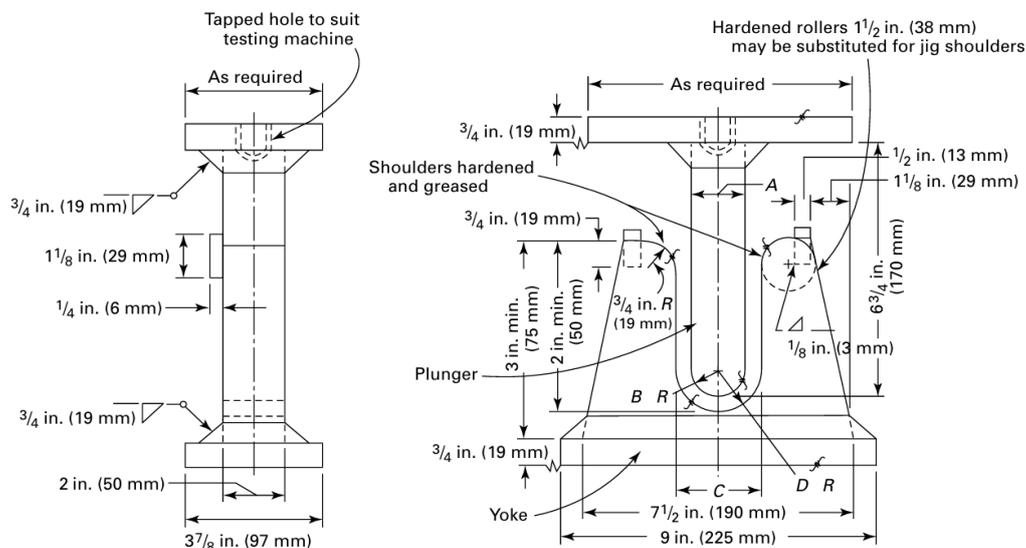


Figura 62. Dimensiones del ensayo de doblado ASME Sec. IX [11].

### 7.4.2 Criterios de aceptación

Los criterios de aceptación en este ensayo de acuerdo con la norma ASME Sec. IX [11] son los siguientes:

- a) En una muestra de flexión de soldadura transversal la zona afectada por la soldadura y el calor debe estar por completo dentro de la parte doblada de la probeta después de la prueba.
- b) Las muestras no deben tener una discontinuidad abierta en la soldadura o en la zona afectada por el calor que exceda los 3 mm, medido en cualquier dirección sobre la superficie convexa de la probeta después de aplicar la flexión.
- c) Las discontinuidades abiertas que se producen en las esquinas no se considerarán a menos que existan pruebas definitivas de que son el resultado de la falta de fusión, de las inclusiones de escoria o de otras discontinuidades internas que puede presentar la probeta ensayada.
- d) Para abolladuras revestidas de soldadura resistentes a la corrosión, sin discontinuidades abiertas que excedan 1,5 mm, medido en cualquier dirección, se pueden aceptar en el revestimiento, y no debe haber ninguna discontinuidad abierta que exceda de 3 mm a lo largo de la interfaz de la soldadura.

## 8 RESULTADOS

### 8.1 ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

#### 8.1.1 Inspección visual

Tras la realización del examen visual se ha verificado que no hay ninguna grieta ni imperfección superficial visible de acuerdo con los criterios de aceptación.

Los resultados del examen registrados en la Tabla 8 son favorables sin el registro de ninguna discontinuidad con ninguno de los dos tratamientos térmicos aplicados.

Identificación de la soldadura	Espesor (mm)	Discontinuidades registradas			Evaluación A/R
		Tipo	Posición	Dimensiones	
PQR 10264.7	40	Ninguna	N/A	N/A	A

Tabla 8. Resultados del ensayo visual.

La evaluación del ensayo puede ser:

- A: Aceptable
- R: Rechazable

#### 8.1.2 Examen radiográfico

En este caso se ha realizado el examen radiográfico dividiendo el cupón en dos secciones y los resultados obtenidos han sido favorables.

Ítem Inspeccionado	ID Técnica	Sector		Indicaciones relevantes		Calificación
				Tipo	Localización y dimensiones	
PQR 10264.7	Apartado 6.2	0	1	N/A	-	Aceptable
PQR 10264.7	Apartado 6.2	1	2	N/A	-	Aceptable

Tabla 9. Resultados del ensayo radiográfico.

No se han detectado discontinuidades relevantes que no cumplan con los criterios de aceptación para ninguno de los dos tratamientos térmicos.

### 8.1.3 Líquidos penetrantes

Tras la inspección de las indicaciones señaladas durante el ensayo de líquidos penetrantes, el resultado del ensayo es favorable, no hay ningún tipo de indicación registrada fuera de los criterios de aceptación en todo el cupón de soldadura analizado.

Identificación de la soldadura	Espesor (mm)	Técnica	Discontinuidades registradas			Evaluación A/R
			Tipo	Posición	Dimensiones	
PQR 10264.7	40	Apartado 6.3	Ninguna	N/A	N/A	A

Tabla 10. Resultados del ensayo de líquidos penetrantes.

La evaluación del ensayo puede ser:

- A: Aceptable
- R: Rechazable

## 8.2 ENSAYOS DESTRUCTIVOS

### 8.2.1 Ensayo de tracción transversal

Los resultados obtenidos del ensayo de tracción son los siguientes:

	Tratamiento A				Tratamiento B			
	GTAW Automática		GTAW Manual		GTAW Automática		GTAW Manual	
	T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4
<b>Sección paralela reducida (mm)</b>	35	35	35	35	35	35	35	35
<b>Fuerza máxima (kN)</b>	181,23	176,94	179,02	180,92	183,58	184,97	183,00	184,21
<b>Resistencia a la tracción (MPa)</b>	578	578	579	587	597	590	594	596

Tabla 11. Resultado del ensayo de tracción.

Se han tomados dos probetas para cada tipo de soldadura. Para poder realizar correctamente la trazabilidad de las probetas del ensayo de tracción se han marcado de tal forma que las

probetas indicadas como T1 y T2 pertenecen a la soldadura con máquina automática, mientras que las T3 y T4 son de la soldadura manual.

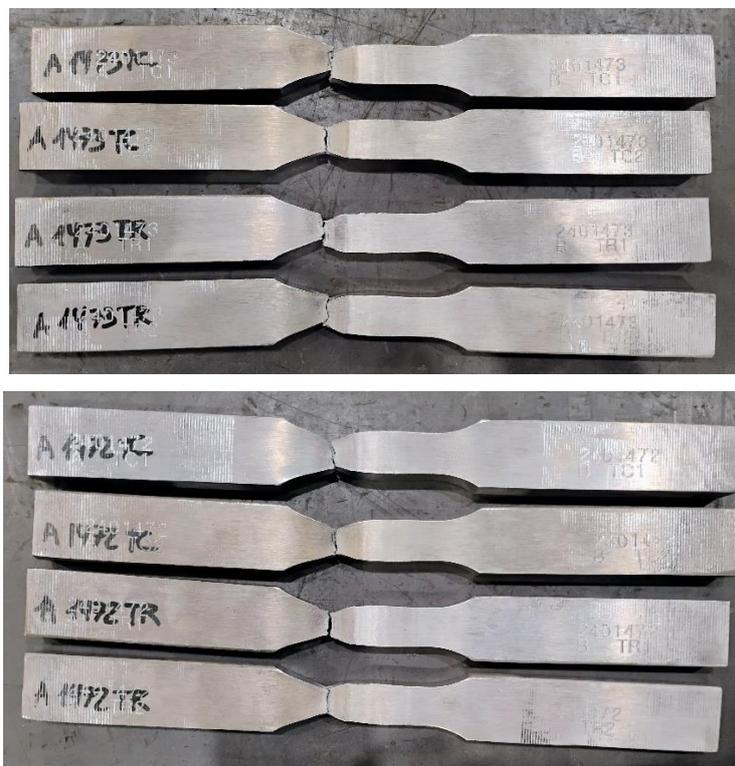


Figura 63. Probetas ensayas a tracción.

Para verificar que el ensayo cumple con los criterios de aceptación, se obtienen de la normativa los valores mínimos requeridos de resistencia a tracción de los materiales, se pueden consultar en las tablas A1 y A2 del Anexo III.

<b>MATERIAL</b>	<b>RESISTENCIA A LA TRACCIÓN MÍNIMA REQUERIDA</b>
SA-182 F22 CL3 (Acero aleado)	515 MPa
SA-240 304L (Acero inoxidable)	485 MPa
ER 309L	520 MPa
ER 347	520 MPa

Tabla 12. Valores mínimos requeridos de la resistencia a la tracción.

De acuerdo con los criterios de aceptación, para que el examen destructivo se dé como válido la resistencia a la tracción de cada probeta debe superar o ser como mínimo 485 MPa.

La zona de rotura ha sido el metal base, en concreto el acero aleado antes de la zona recargada como se puede ver en la Figura 63 y se ha superado siempre la resistencia a la tracción mínima especificada por la normativa por lo que los datos obtenidos con ambos tratamientos térmicos son válidos.

### 8.2.2 Ensayo de dureza (Vickers)

Los valores de dureza obtenidos en la probeta con el tratamiento térmico A en HV10 son los siguientes:

Zona	Punto	Línea 1	Línea 2	Línea 3	Dureza máxima requerida
Placa de acero aleado	1	179	190	193	240
	2	176	178	179	240
	3	177	177	191	240
ZAT Placa de acero aleado.	4	183	173	176	300
	5	180	185	193	300
	6	197	193	192	300
Recargue	7	235	193	208	-
	8	210	208	198	-
	9	175	219	203	-
Cordón de soldadura	10	195	225	215	-
	11	194	254	216	-
	12	210	250	210	-
ZAT de la placa de acero inoxidable	13	193	241	213	-
	14	195	238	206	-
	15	198	255	205	-
Placa de acero inoxidable	16	188	215	208	-
	17	176	206	190	-
	18	176	196	188	-

Tabla 13. Valores de dureza con el tratamiento térmico de máxima condición.

Por otra parte, los valores de dureza obtenidos en la probeta con el tratamiento térmico B en HV10 se muestran a continuación:

Zona	Punto	Línea 1	Línea 2	Línea 3	Dureza máxima requerida
Placa de acero aleado	1	165	156	167	240
	2	164	162	164	240
	3	168	158	164	240
ZAT Placa de acero aleado.	4	193	172	194	300
	5	208	201	193	300
	6	222	208	221	300
Recargue	7	187	193	181	-
	8	193	204	177	-
	9	180	206	193	-
Cordón de soldadura	10	185	232	198	-
	11	202	250	207	-
	12	189	243	202	-
ZAT de la placa de acero inoxidable	13	210	268	199	-
	14	206	254	205	-
	15	206	249	215	-
Placa de acero inoxidable	16	194	233	207	-
	17	187	205	198	-
	18	183	197	198	-

Tabla 14. Valores de dureza con el tratamiento térmico de mínima condición.

Los valores obtenidos en el ensayo cumplen los criterios de aceptación por lo que el ensayo es correcto para ambos tratamientos térmicos.

### 8.2.3 Ensayo de tenacidad al impacto (Charpy)

Los resultados obtenidos en las seis muestras tomadas han sido los siguientes:

Probeta	Energía absorbida (J)			Energía absorbida mínima requerida(J)	Valor medio (J)	Valor medio mínimo requerido(J)
	1	2	3			
<b>GTAW Automática</b>	132	163	144	55	146	48
<b>GTAW Manual</b>	96	105	108	55	103	48

Tabla 15. Resultados del ensayo Charpy.



Figura 64. Probetas ensayadas por impacto.

Como se puede comprobar en la Tabla 15, todos los valores de energía obtenidos cumplen con los requisitos de aceptación, por lo que el ensayo y los valores obtenidos son válidos.

#### 8.2.4 Ensayo de doblado

Tras la finalización del ensayo en las cuatro probetas no se han obtenido ninguna discontinuidad abierta, como se puede ver en la Figura 65.



Figura 65. Probetas ensayadas por doblado.

Los resultados son favorables, han cumplido los requerimientos especificados y el ensayo es válido.

## 9 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS E INFLUENCIA DE LOS TRATAMIENTOS TÉRMICOS

Como se comentó anteriormente la aplicación de dos tratamientos térmicos diferentes se ha realizado para poder estudiar las propiedades mecánicas de la unión soldada tras su aplicación y cualificar hasta ocho horas de implementación de estos tratamientos.

De esta forma pueden aplicarse tratamientos térmicos de un par de horas en diferentes momentos, ya sea por reparaciones o modificaciones que deban realizarse, hasta que se acumulen un máximo de ocho horas en una unión soldada.

### 9.1 RESISTENCIA A LA TRACCIÓN

Para realizar un análisis de los valores de resistencia a la tracción obtenidos, se calcula la media y se diferencia el tipo de tratamiento térmico aplicado y la forma en la que se ha hecho la soldadura GTAW.

	Tratamiento A (8 horas)		Tratamiento B (2 horas)	
Resistencia media a la tracción (MPa)	GTAW Automática	GTAW Manual	GTAW Automática	GTAW Manual
		578	583	593,5

Tabla 16. Resistencia media obtenida del ensayo de tracción.

Como se representa en la Tabla 16 se obtiene mayor resistencia a la tracción manteniendo la temperatura máxima del tratamiento térmico durante 2 horas que durante 8, y en ambas situaciones las probetas con el cordón de soldadura realizado manualmente dan lugar a una mayor resistencia a la tracción que las realizadas mediante maquina automática.

Con la aplicación del tratamiento térmico B se obtiene una resistencia que supera a la obtenida tras el tratamiento térmico A 15,5 MPa (2,68%) en el caso de la soldadura automática y 12 MPa (2,06%) en el caso del proceso de soldadura manual.

La diferencia para cada tratamiento térmico de los valores de resistencia obtenidos al realizar el proceso de soldadura automática o manualmente es menor del 1% en ambos casos.

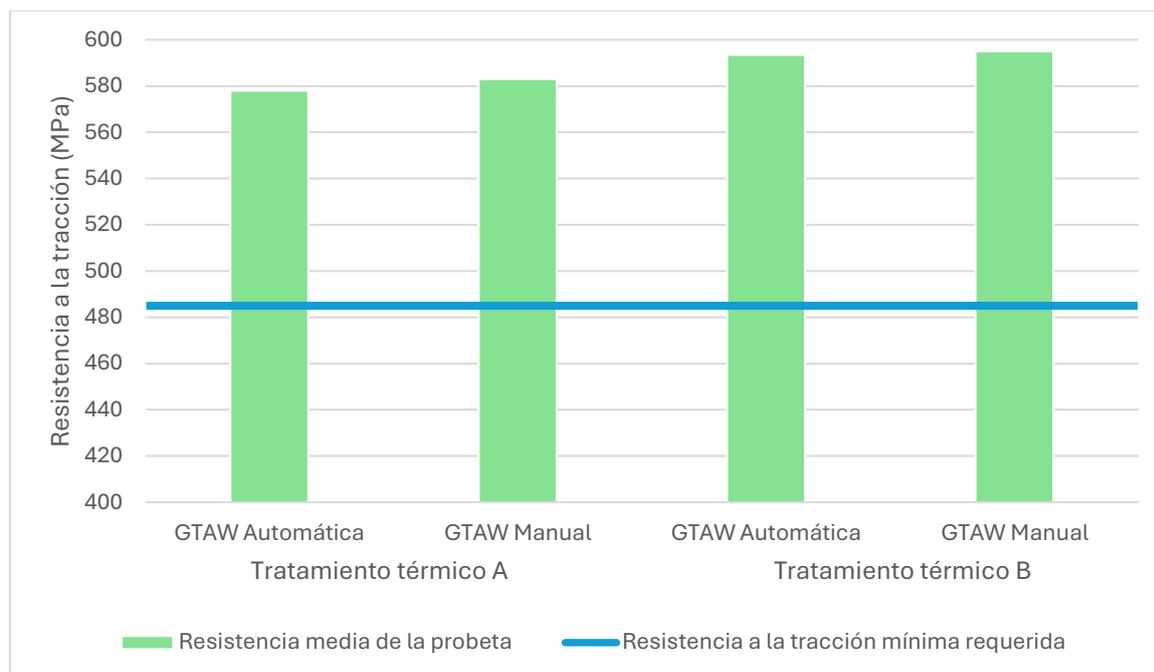


Figura 66. Gráfica de la resistencia a la tracción de las probetas.

La soldadura estudiada como se puede observar en la Figura 66 presenta valores de resistencia a la tracción que superan entre un 19,18 y un 22,68% el valor mínimo requerido por la normativa de 485 MPa en los cuatro casos estudiados. Esto significa que puede aplicarse en el proyecto industrial para su uso previsto de forma segura y efectiva.

La rotura producida en las probetas es dúctil, está caracterizada por una deformación plástica antes de alcanzar el fallo. En este tipo de materiales las grietas producidas son estables, lo que significa que sin un alto nivel de tensión el componente puede resistir sin alcanzar el fallo total, su propagación es más lenta y hay mayor absorción de energía en comparación con los materiales frágiles, [42].

Al tratarse de componentes que van a trabajar a alta temperatura y presión, es interesante que la resistencia a la tracción sea elevada. Que la soldadura estudiada no tenga una rotura frágil es muy importante para evitar fallas repentinas, de esta forma las fisuras crecen más lentamente y al ir acompañadas de una deformación plástica pueden detectarse y corregirse antes de que la rotura produzca una falla catastrófica en el componente.

Con los datos obtenidos se concluye que, si se desea obtener la mayor resistencia posible de la unión soldada, se debe aplicar el tratamiento térmico de mínima condición (Tratamiento B). Como se ha podido comprobar la diferencia entre el proceso de soldadura manual o automático es mínimo, en el caso del tratamiento térmico B la diferencia es del 0,25% por lo que, aunque el valor obtenido manualmente es superior, las soldaduras realizadas automáticamente suelen ser más eficientes y su calidad no depende de la consistencia y habilidad del soldador.

## 9.2 DUREZA

La dureza es una propiedad importante que indica la capacidad que tiene el material de resistir el desgaste, a las deformaciones permanentes y oponerse a la penetración.

Con el ensayo de dureza Vickers se obtiene la dureza en diversas zonas de las probetas, pudiendo diferenciar no solo el tipo de tratamiento térmico aplicado, sino también el proceso de soldadura y el material.

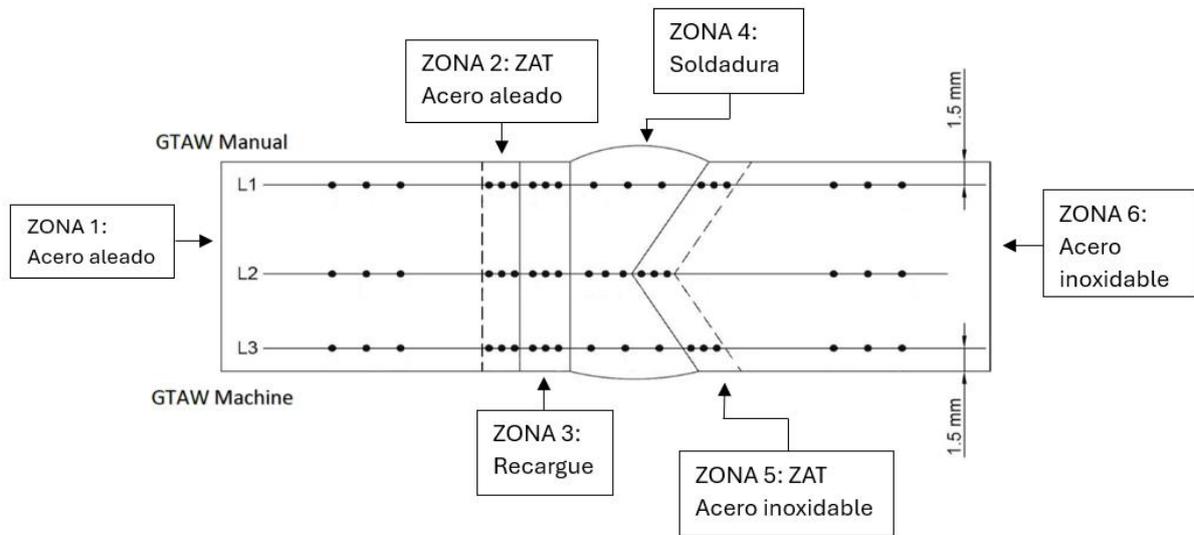


Figura 67. Puntos por zonas donde se ha medido la dureza de las probetas.

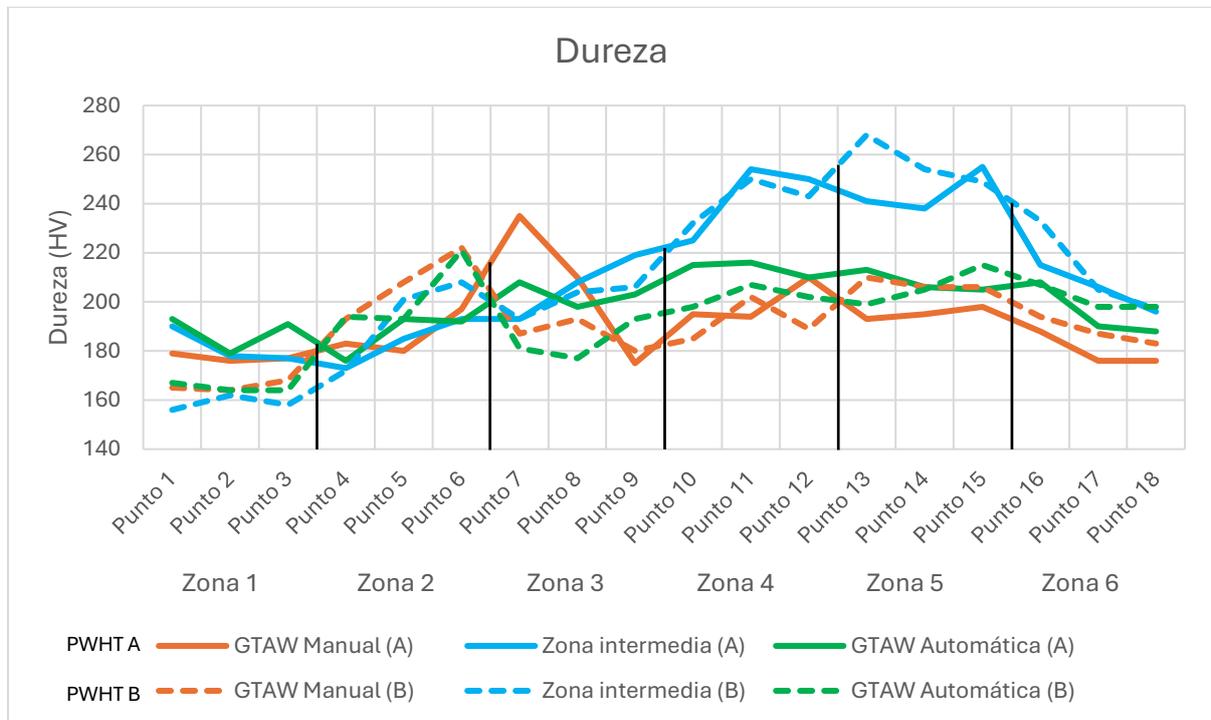


Figura 68. Gráfico de dureza Vickers.

En el gráfico de la Figura 68 se puede ver que los valores mínimos de dureza en las probetas se presentan en la placa de acero al carbono, en concreto en la zona 1, para el tratamiento térmico de mínima condición (Tratamiento B).

En cambio, los valores máximos de dureza se obtienen en la línea intermedia de la ZAT del acero inoxidable.

Los tratamientos térmicos se han aplicado sobre las placas de acero aleado tras el recargue, por lo que analizamos su influencia sólo en las zonas 1, 2 y 3.

En las zonas 1 y 3 los puntos donde se ha realizado el ensayo Vickers de la probeta tras el tratamiento térmico de máxima condición (Tratamiento térmico A) presentan valores que superan hasta un 25,66% la dureza de la probeta con el tratamiento térmico B.

Por el contrario, en la zona 2 es el tratamiento térmico B el que ha proporcionado mayor dureza, aunque en este caso los valores varían entre un 0,23 y 13,46%.

Esto puede deberse a que la zona 2 corresponde a la ZAT del acero aleado, a consecuencia del proceso de recargue presenta una mayor dureza antes de la aplicación del tratamiento térmico, la ZAT puede experimentar la formación de martensita, la precipitación de carburos y ocasionar tensiones residuales, por lo que la aplicación de un tratamiento térmico durante 2 horas (Tratamiento térmico B) puede no ser suficiente para que los carburos se precipiten completamente, manteniendo una microestructura más dura.

El recargue (Zona 3) está compuesto por dos materiales, como se ha indicado anteriormente está formado por una primera capa de ER 309L y otra de ER 347, en el gráfico donde se representa la dureza Vickers se puede ver que la zona del recargue más próxima a la placa de acero aleado, correspondiente a la primera capa, presenta una dureza de 27HV mayor en el lado de soldadura manual que en el de soldadura automática, mientras que en la segunda capa del recargue ocurre lo contrario, la cara soldada automáticamente presenta 28HV más de dureza.

Este comportamiento contradictorio puede deberse a la diferencia en la composición de los materiales empleados en el recargue, el ER 347 presenta un 4% menos de cromo y es un acero inoxidable estabilizado con niobio, lo que ayuda a prevenir la formación de carburos de cromo evitando la corrosión intergranular del acero [43]. Además, la segunda capa del recargue y el cordón de soldadura están realizados con el mismo material de aportación, y como puede apreciarse en la Figura 68 su comportamiento es lineal.

A partir del cordón de soldadura (Zona 4) comienza a haber mayor distinción entre la zona intermedia, la cual presenta los mayores valores de dureza, y los extremos, que presentan valores inferiores. Dicha variación es máxima en la ZAT del acero inoxidable (Zona 5) donde

la dureza de la línea intermedia llega a presentar valores que superan hasta 69HV los valores de las líneas correspondientes a las soldaduras manual y automática.

La zona intermedia de las probetas sufre varios ciclos térmicos de calentamiento y enfriamiento a consecuencia de ambos procesos de soldadura, esto podría ser la causa de una mayor dureza en esta zona del material.

Si en la placa de acero inoxidable se compara la dureza en función del proceso de soldadura aplicado, se obtiene que el lado soldado manualmente presenta una dureza entre 176 y 210 HV y la línea correspondiente a la soldadura automática tiene valores de dureza mayores, que oscilan entre los 188 y 215 HV. En ambos casos el valor máximo se presenta en la ZAT, mientras que el valor mínimo se encuentra en la zona más alejada a la soldadura.

Al igual que la placa de acero inoxidable el cordón de soldadura presenta mayor dureza en la soldadura automática que en la manual, habiendo una diferencia máxima de 14HV.

En el caso de ambos materiales base, los puntos con mayor dureza se sitúan en la ZAT del material, esto es debido a que su microestructura sufre una transformación al ser calentado hasta una temperatura cercana a su temperatura de fusión y posteriormente sufrir un enfriamiento. Es importante que dicho enfriamiento no sea brusco, ya que, si no el material puede aumentar su dureza considerablemente y disminuir su tenacidad, pudiendo dar lugar a grietas y producir la rotura frágil del componente. Por esto es importante mantener dentro de los límites establecidos la dureza en los procesos de soldadura [44].

En el acero aleado los valores de dureza tras el tratamiento térmico A son entre un 24,35 y 36,36% inferiores del valor máximo permitido, y para el tratamiento B entre un 42,85 y 53,84%.

Por otro lado, la zona afectada térmicamente del acero aleado con el tratamiento térmico A presenta una dureza que está entre un 52,28 y 73,41% por debajo del valor máximo, para el caso del tratamiento térmico B entre un 35,13 y 74,41%.

Como se ha comprobado, para ambos tratamientos térmicos las probetas ensayas presentan valores de dureza dentro de los rangos típicos para aceros estructurales y cumpliendo los límites de dureza máximos exigidos.

### **9.3 ENERGÍA ABSORBIDA**

Que un material tenga una alta energía absorbida indica que tiene una alta resiliencia, es tenaz y es capaz de absorber mucha energía antes de fracturarse, lo que es deseable en muchas situaciones para evitar fallos repentinos y catastróficos.

Al igual que en el ensayo de tracción, en el ensayo de impacto las probetas han sufrido una deformación hasta su rotura, por lo que reforzamos el argumento de que el material es dúctil.

El ensayo de impacto se ha realizado únicamente con probetas tratadas térmicamente con la condición mínima de 2 horas, por lo que no se puede obtener una comparativa en función del tratamiento aplicado.

Sin embargo, atendiendo a los valores obtenidos en el ensayo se puede decir que la soldadura realizada con máquina automática da valores de energía absorbida mayores que la soldadura manual, en ambos casos son valores que están por encima de los requeridos.

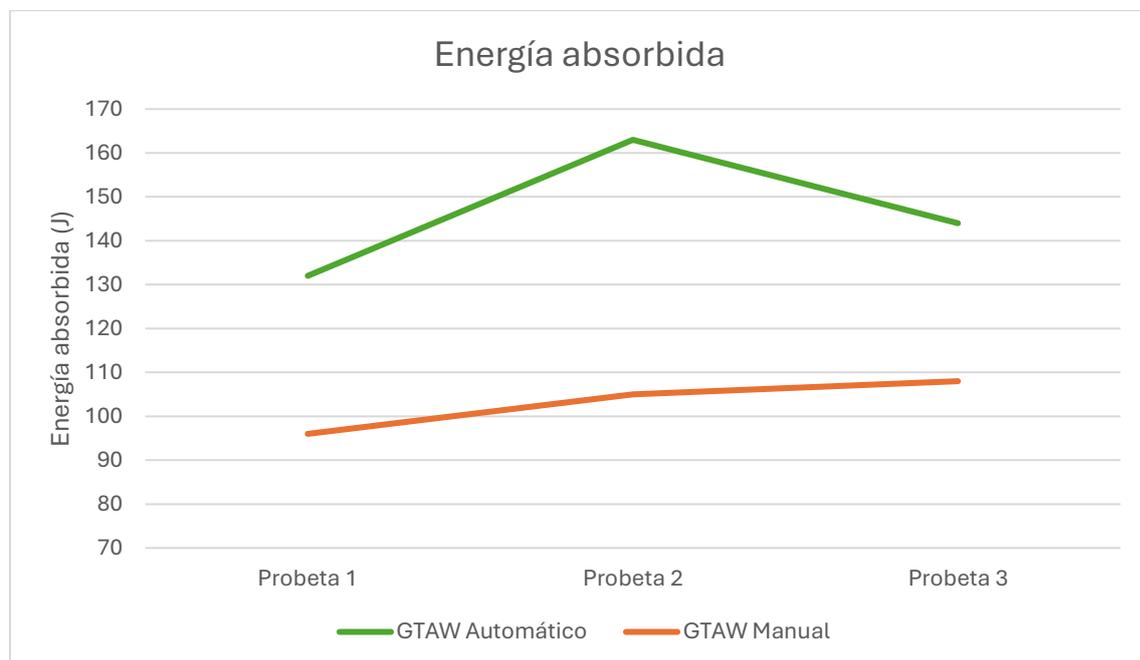


Figura 69. Gráfico de la energía absorbida en el ensayo Charpy.

En concreto mediante la soldadura automática se ha llegado a triplicar el valor promedio mínimo requerido y en el caso de la soldadura manual se ha duplicado.

## 10 CONCLUSIONES

Tras analizar los resultados obtenidos de los ensayos de tracción, dureza e impacto se puede concluir que:

- Mediante el tratamiento térmico de mínima condición (Tratamiento B) se obtiene mayor resistencia a la tracción.
- El acero aleado F22 presenta mayor dureza tras el tratamiento térmico de máxima condición (Tratamiento A). Por el contrario, en la ZAT del material los valores de dureza son mayores para el caso del tratamiento térmico de mínima condición (Tratamiento B).
- En el caso del recargue el tratamiento térmico A da lugar a mayor dureza de los materiales.
- En ambos materiales base, la zona afectada térmicamente es la zona que presenta mayor dureza.

Además, se puede añadir que analizando el proceso de soldadura se ha llegado a que:

- El proceso de soldadura manual da lugar a mayor resistencia a la tracción.
- En el acero aleado y el recargue tratados térmicamente no hay influencia del tipo de proceso realizado.
- En el cordón de soldadura y el acero inoxidable, aunque la zona intermedia de las probetas tiene mayor dureza, la soldadura automática tiende a dar lugar a valores de dureza más altos que la soldadura manual.
- La energía de absorción de las probetas es mayor en el caso de la soldadura automática.

---

## **DOCUMENTO N°2: ANEXOS**

---

## ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS.....	90
ÍNDICE DE TABLAS .....	91
ANEXO I POSICIONES DE SOLDADURA.....	92
ANEXO II REQUISITOS GEOMÉTRICOS DE LAS PROBETAS.....	102
ENSAYO DE TRACCIÓN.....	102
ENSAYO DE IMPACTO (CHARPY) .....	103
ENSAYO DE DOBLADO.....	104
ANEXO III VALORES DE RESISTENCIA A LA TRACCIÓN MÍNIMOS .....	106
ANEXO IV CERTIFICADOS DEL MATERIAL .....	108
ANEXO V PQR.....	113
ANEXO VI WPS.....	119

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura A1. Orientación de soldaduras de ranura y filete. ....	92
Figura A2. Orientación de soldaduras de pernos. ....	93
Figura A3. Soldaduras de ranura en placa. ....	94
Figura A4. Soldaduras de ranura en tubos. ....	94
Figura A5. Soldaduras de filete en placa. ....	95
Figura A6. Soldaduras de filete en tubos. ....	96
Figura A7. Soldadura de pernos. ....	97
Figura A8. Posiciones principales de soldeo - PA hasta PG. ....	98
Figura A9. PA: Posición plana. ....	99
Figura A10. PB: Posición horizontal vertical. ....	99
Figura A11. PC: Posición horizontal. ....	99
Figura A12. PD: Posición horizontal bajo techo. ....	100
Figura A13. PE: Posición bajo techo. ....	100
Figura A14. PF: Posición vertical (soldeo ascendente). ....	100
Figura A15. PG: Posición vertical (soldeo descendente). ....	100
Figura A16. PH: Posición de tubo para soldeo ascendente. ....	101
Figura A17. PJ: Posición de tubo para soldeo descendente. ....	101
Figura A18. PK: Posición de tubo para soldeo orbital. ....	101
Figura A19. Dimensionado de las probetas para en ensayo de tracción según ASME Sec. IX [11]. .....	102
Figura A20. Dimensiones de las probetas para el ensayo de impacto según la normativa ASTM A370 [35]. ....	103
Figura A21. Dimensiones de las probetas para el ensayo de doblado según la normativa ASME Sec. IX [11]. ....	104
Figura A22. Certificado del acero aleado F22. ....	108
Figura A23. Continuación del certificado del acero aleado F22. ....	109
Figura A24. Certificado del acero inoxidable. ....	110
Figura A25. Características del ER309L [44]. ....	111
Figura A26. Características del ER347 [44]. ....	112

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla A1. Resistencia a la tracción mínima requerida para metales base.....	106
Tabla A2. Resistencia a la tracción mínima requerida para metales de soldadura según AWS A5.4/A5.4M: 2006.....	107

## ANEXO I POSICIONES DE SOLDADURA

A continuación, se ilustra en la Figura A1 las orientaciones de las soldaduras de ranura y de filete de acuerdo con la norma ASME BPVC Sec.IX-2023 Sección (QW-110) [11].

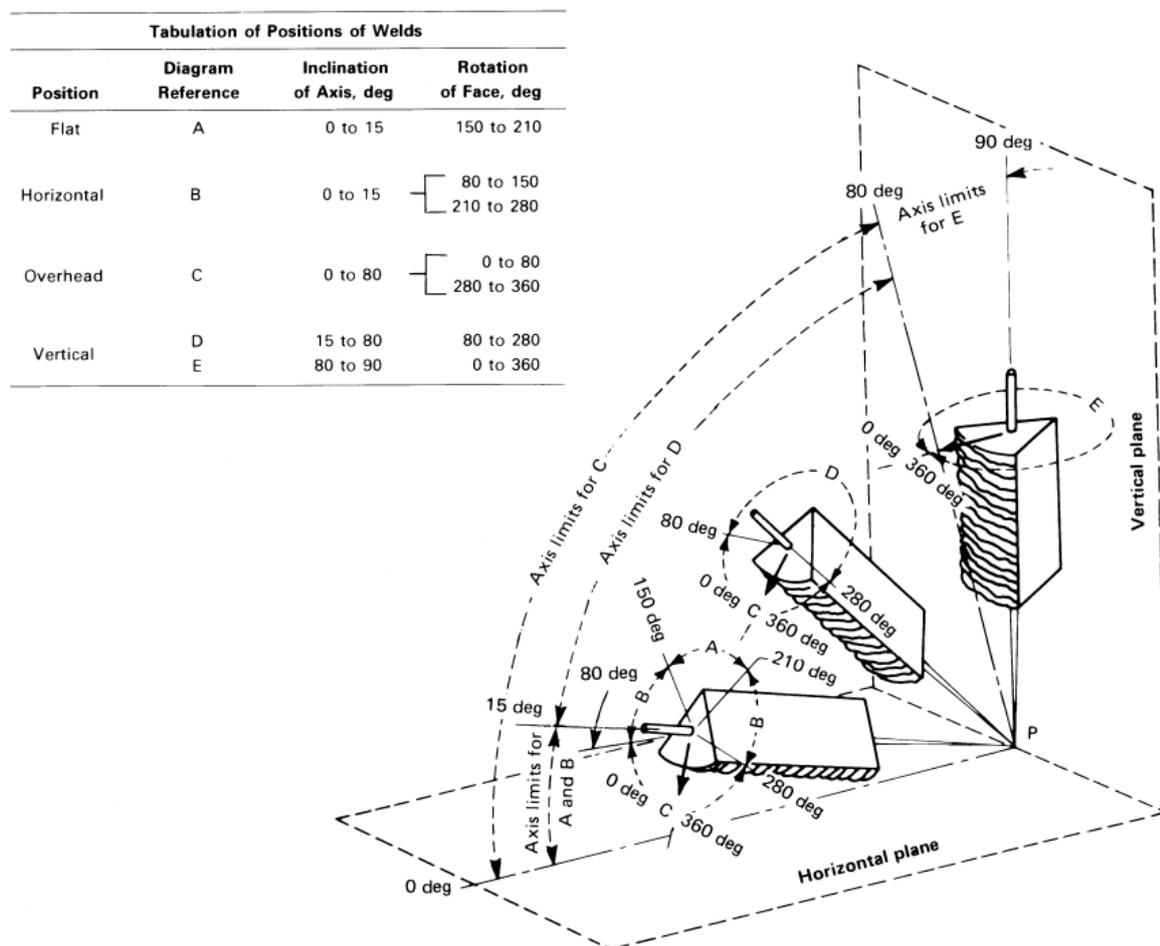


Figura A1. Orientación de soldaduras de ranura y filete.

### NOTAS GENERALES:

- Se considera que el plano de referencia horizontal siempre está por debajo de la soldadura en consideración.
- La inclinación del eje se mide desde el plano de referencia horizontal hacia la vertical.
- El ángulo de rotación de la cara se mide desde una línea perpendicular al eje de la soldadura y situada en un plano vertical que contiene este eje. La posición de referencia (0 grados) de rotación de la cara apunta invariablemente en la dirección opuesta a aquella en la que aumenta el ángulo del eje. El ángulo de rotación de la cara de la soldadura se mide en el sentido de las agujas del reloj desde esta posición de referencia (0 grados) cuando se mira el punto P.

En el caso de las soldaduras de pernos la posición plana incluye aquellas en las que el perno está posicionado entre 315 y 45 grados, la posición horizontal entre 45 y 135 grados y la posición sobre cabeza entre 135 y 225 grados, como puede verse en la Figura A2.

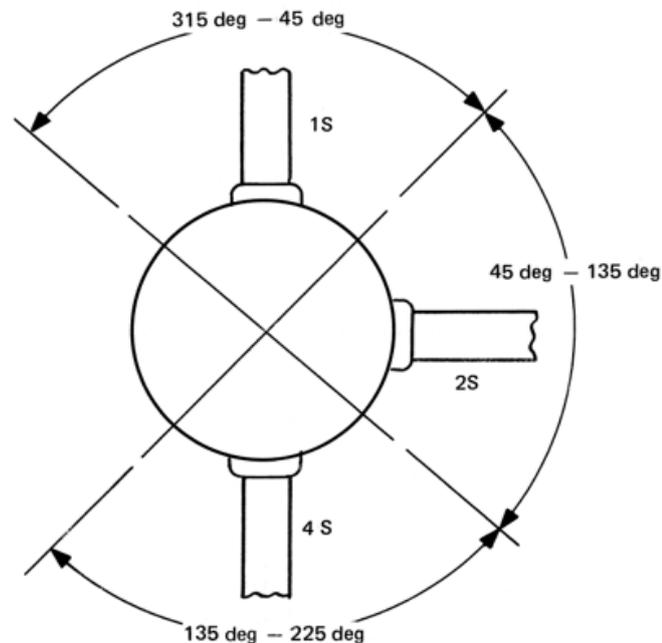


Figura A2. Orientación de soldaduras de pernos.

Para las soldaduras de los cupones de prueba, la normativa hace diferencia entre las soldaduras de ranura o filete, y si el elemento a soldar es una placa, tubo o perno.

En la Figura A3 se representan las posiciones de soldadura para placas, la letra "G" indica que son soldaduras de ranura y los números en cada caso representan lo siguiente:

- a) 1G: La soldadura se realiza con la placa colocada horizontalmente y la junta se suelda desde la parte superior.
- b) 2G: La placa se coloca en posición vertical y el cordón de soldadura se realiza horizontalmente.
- c) 3G: Tanto la posición de la placa como la forma de efectuar la soldadura son verticalmente, puede ser vertical ascendente si se realiza de abajo hacia arriba o descendente en el caso de que se haga de arriba hacia abajo.
- d) 4G: La placa se dispone horizontalmente, pero en este caso el soldador trabaja desde la parte inferior de la junta.

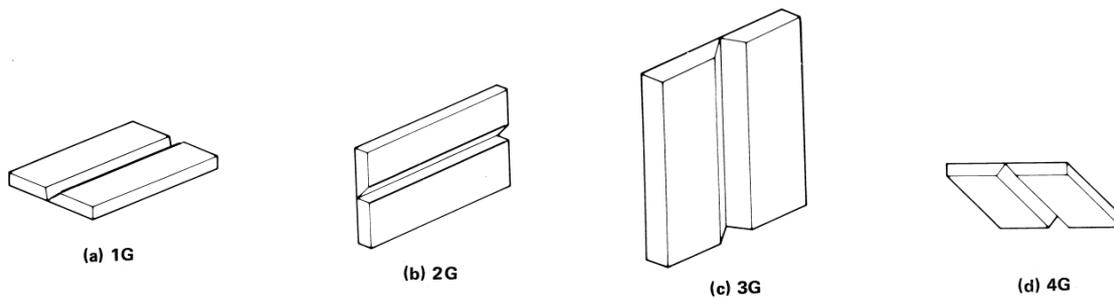


Figura A3. Soldaduras de ranura en placa.

Para los tubos se pueden distinguir las siguientes posiciones:

- 1G (Rotated): El tubo se dispone horizontalmente y el soldador, que permanece en una posición fija, efectúa la unión mientras el tubo gira.
- 2G: La posición del tubo es vertical y la soldadura se realiza horizontalmente alrededor del mismo.
- 5G: El tubo se coloca en posición horizontal y se fija para realizar la soldadura a su alrededor.
- 6G: El tubo se inclina 45 grados y se fija.

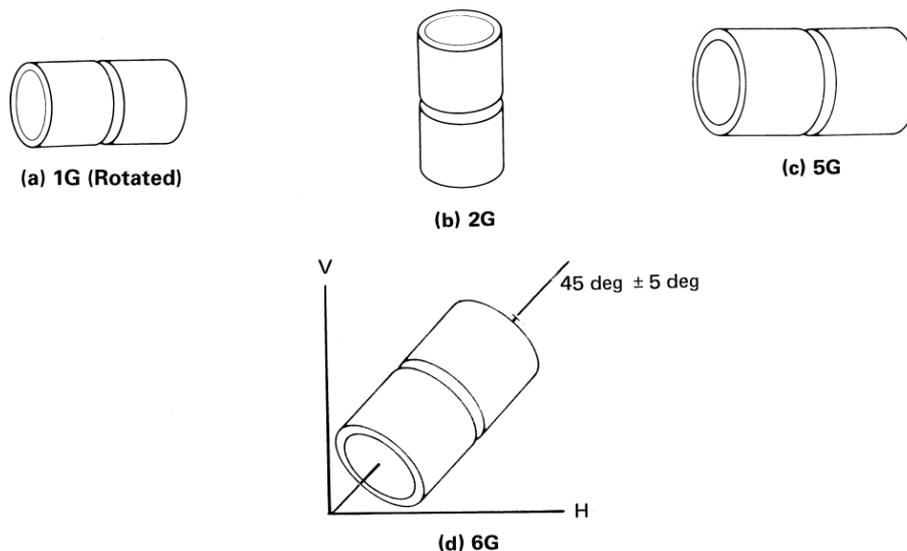


Figura A4. Soldaduras de ranura en tubos.

Para designar las soldaduras en filete se emplea la letra "F" y en el caso de las soldaduras en placas tenemos las siguientes posiciones:

- 1F: Una de las placas se coloca con una inclinación aproximada de  $45^\circ$  para realizar la soldadura horizontalmente y que el soldador pueda trabajar desde la parte superior de la junta.
- 2F: La soldadura se realiza horizontalmente con las piezas en posición horizontal.

- c) 3F: La soldadura se realiza verticalmente con la placa en posición vertical, de forma ascendente o descendente.
- d) 4F: La placa se coloca horizontalmente y el soldador realiza la unión desde debajo de la junta.

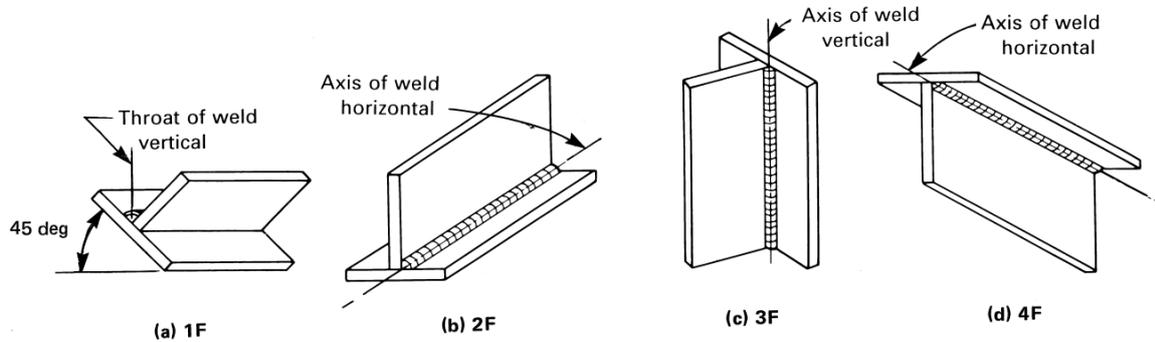


Figura A5. Soldaduras de filete en placa.

A continuación, se describen las posiciones de las soldaduras de filete en tubos que pueden verse en la Figura A6:

- a) 1F (Rotated): El tubo se inclina unos 45 grados y la soldadura en filete se realiza mientras rota.
- b) 2F: La posición del tubo es vertical y fija, la soldadura se efectúa a su alrededor horizontalmente.
- c) 2F (Rotated): Las piezas se colocan horizontalmente y se giran mientras se aplica la soldadura a su alrededor.
- d) 4F: El tubo se fija en posición vertical y el soldador se posición debajo de la junta para realizar la unión.
- e) 5F: Se fija el tubo horizontalmente para realizar la soldadura a su alrededor.

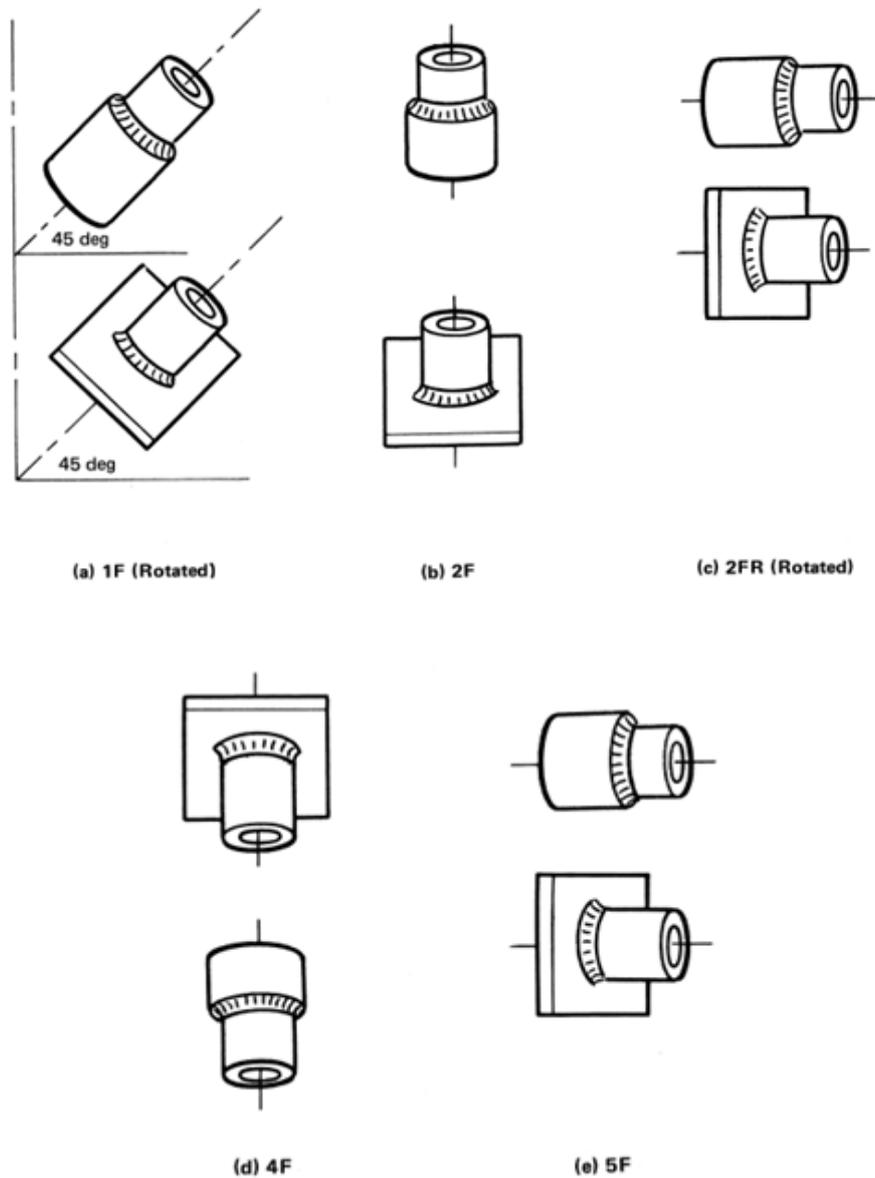


Figura A6. Soldaduras de filete en tubos.

En el caso de los pernos se emplea la letra "S" y las diferentes posiciones de prueba son las siguientes:

- 1S: El perno se coloca verticalmente y el soldador realiza la unión por la parte superior de la junta.
- 2S: La posición del perno es horizontal y se suelda su alrededor.
- 4S: La soldadura se realiza con el perno en posición vertical por debajo de la junta.

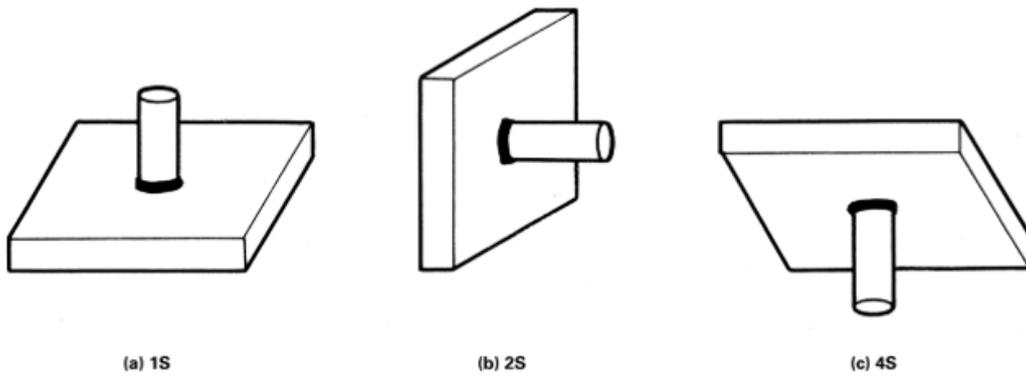


Figura A7. Soldadura de pernos.

Las posiciones principales de soldadura de acuerdo con la norma UNE-EN ISO 6947:2019 [12] se muestran en la Figura A8 y son las siguientes:

- PA: Posición plana
- PB: Posición horizontal-vertical
- PC: Posición horizontal
- PD: Posición horizontal bajo techo
- PE: Posición bajo techo
- PF: Posición vertical (soldadura ascendente)
- PG: Posición vertical (soldadura descendente)

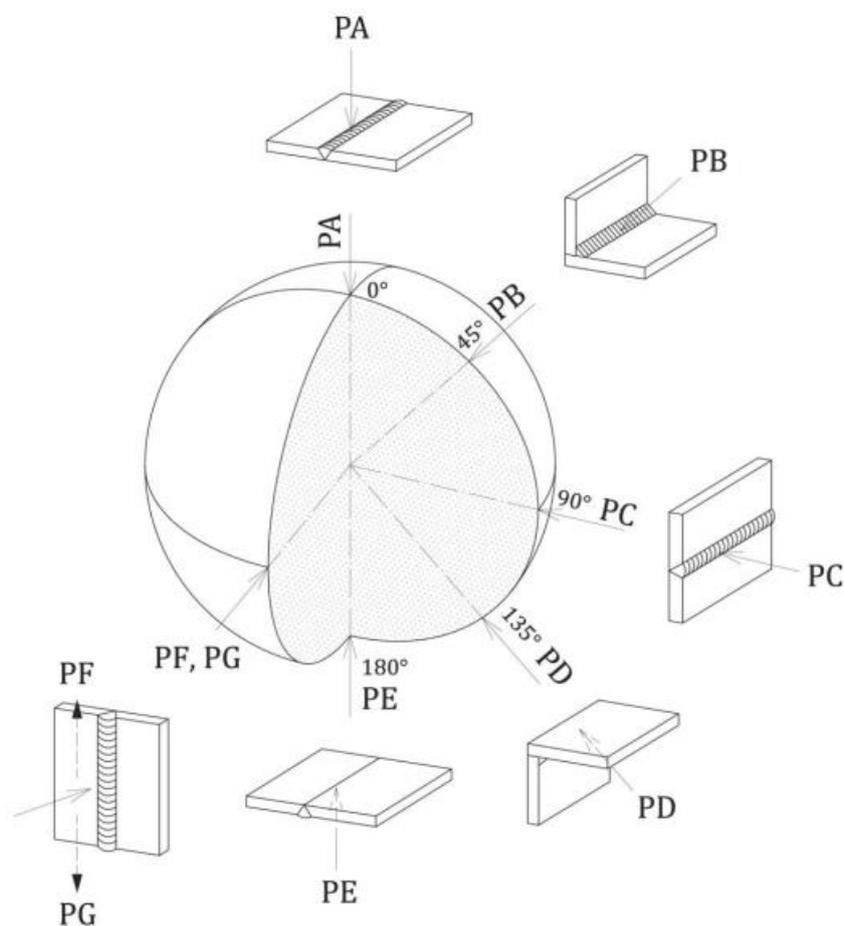


Figura A8. Posiciones principales de soldeo - PA hasta PG.

A continuación se ilustran las posiciones principales de soldeo para soldaduras a tope y en ángulo. Las flechas con la letra “a” indican la cara de la soldadura y por tanto la posición de soldeo, la “b” indica la dirección de soldeo a lo largo de la junta y con la letra “c” la flecha indica la rotación de las piezas de trabajo cuando se suelda una tubería en un posicionador.

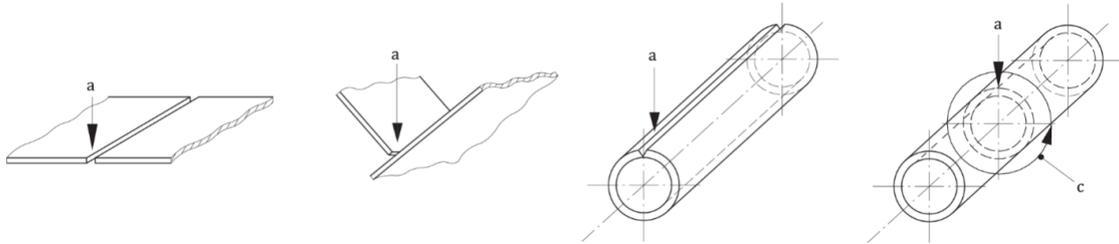


Figura A9. PA: Posición plana.

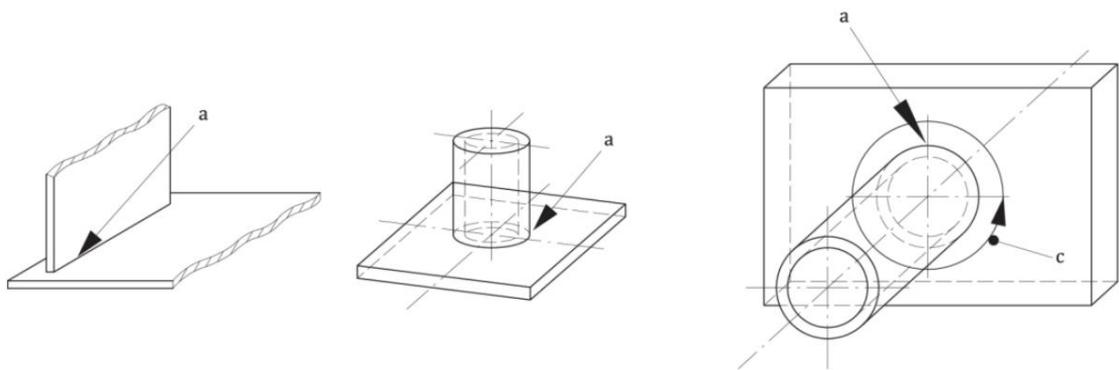


Figura A10. PB: Posición horizontal vertical.

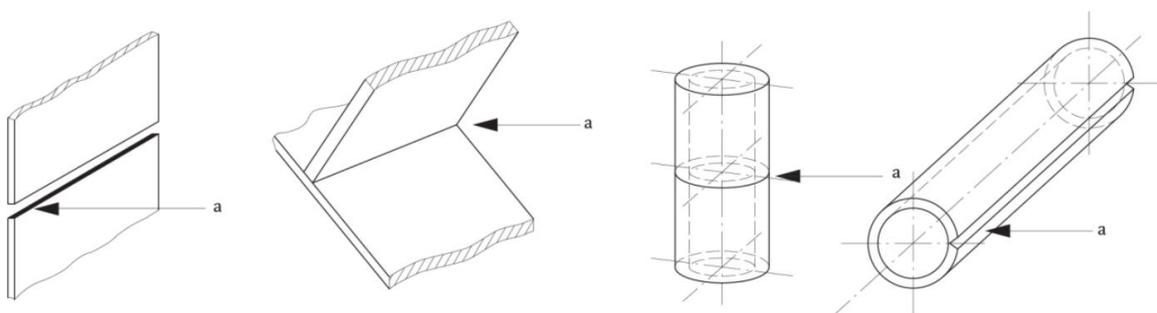


Figura A11. PC: Posición horizontal.

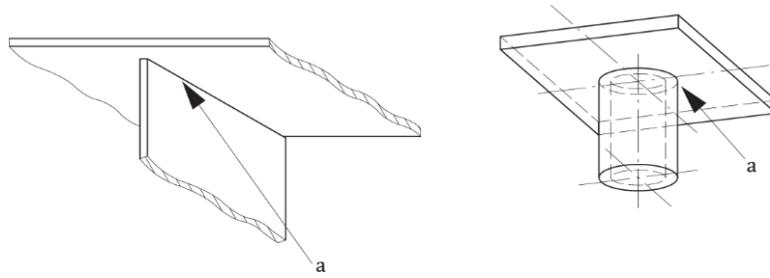


Figura A12. PD: Posición horizontal bajo techo.

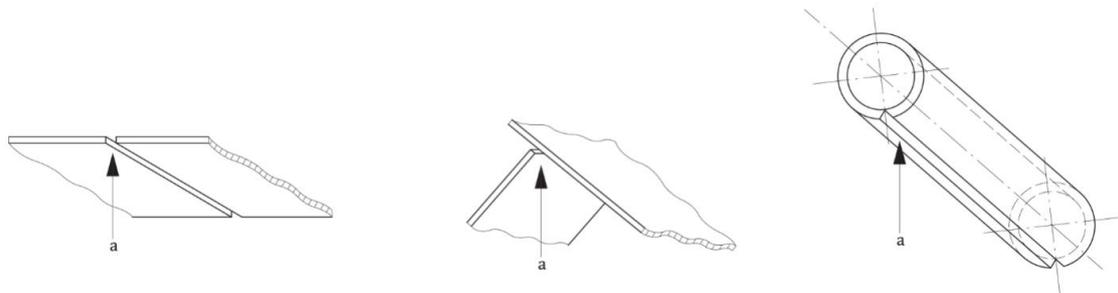


Figura A13. PE: Posición bajo techo.

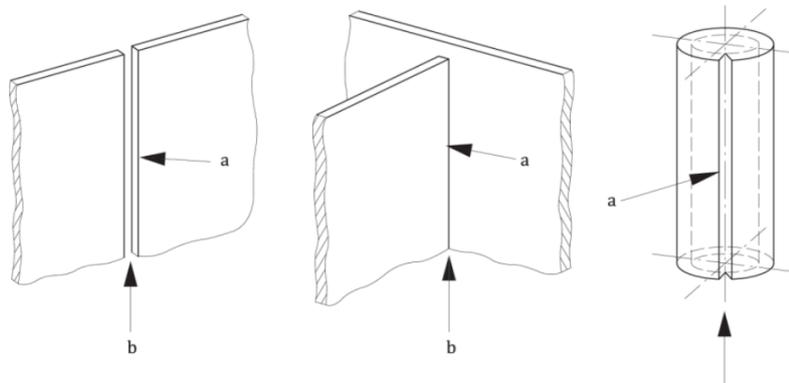


Figura A14. PF: Posición vertical (soldeo ascendente).

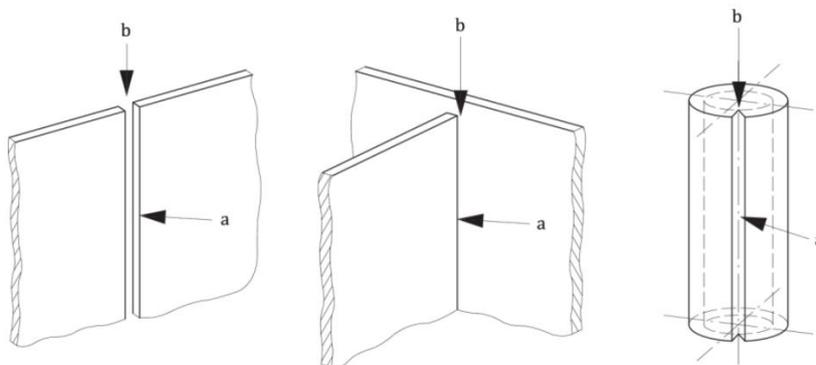


Figura A15. PG: Posición vertical (soldeo descendente).

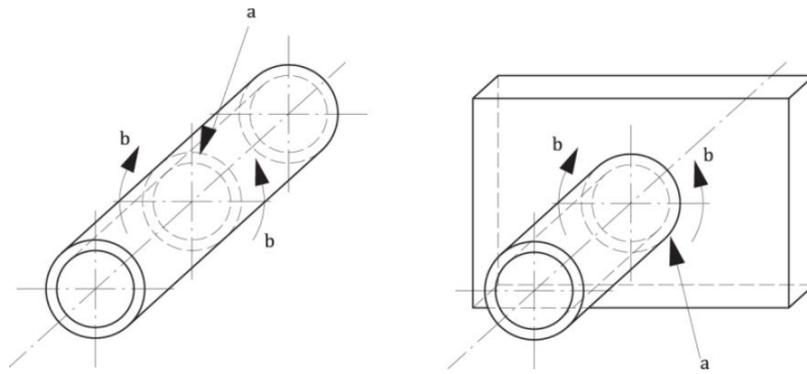


Figura A16. PH: Posición de tubo para soldeo ascendente.

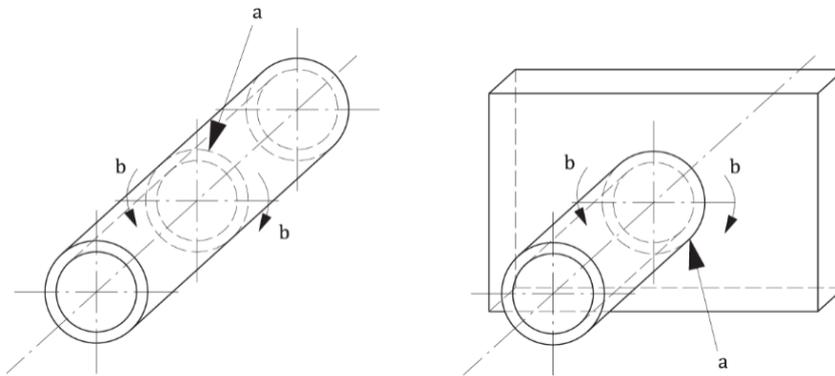


Figura A17. PJ: Posición de tubo para soldeo descendente.

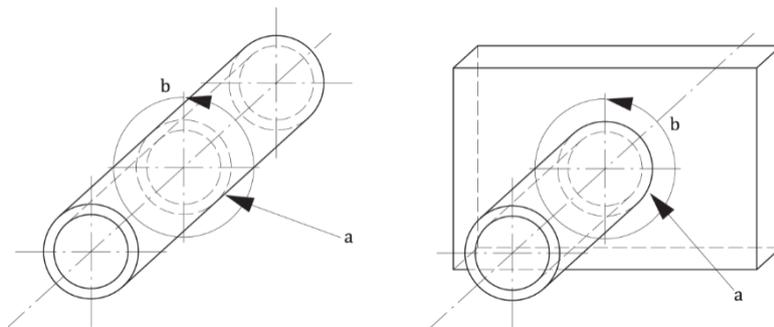


Figura A18. PK: Posición de tubo para soldeo orbital.



- La probeta debe insertarse en los agarres de la máquina de tal manera que, al menos, dos tercios de la longitud del área de sujeción (la longitud del agarre) esté ocupada por la probeta.
- La longitud paralela es igual al ancho de soldadura más 13 mm de longitud añadida.

## ENSAYO DE IMPACTO (CHARPY)

Para el ensayo de Charpy se han fabricado las probetas en base a la Figura A20, siguiendo la normativa ASTM A 370 [36].

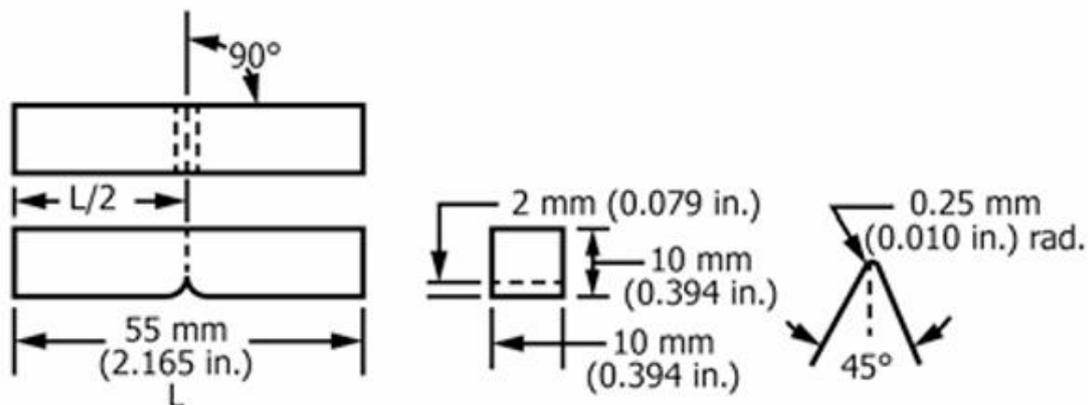


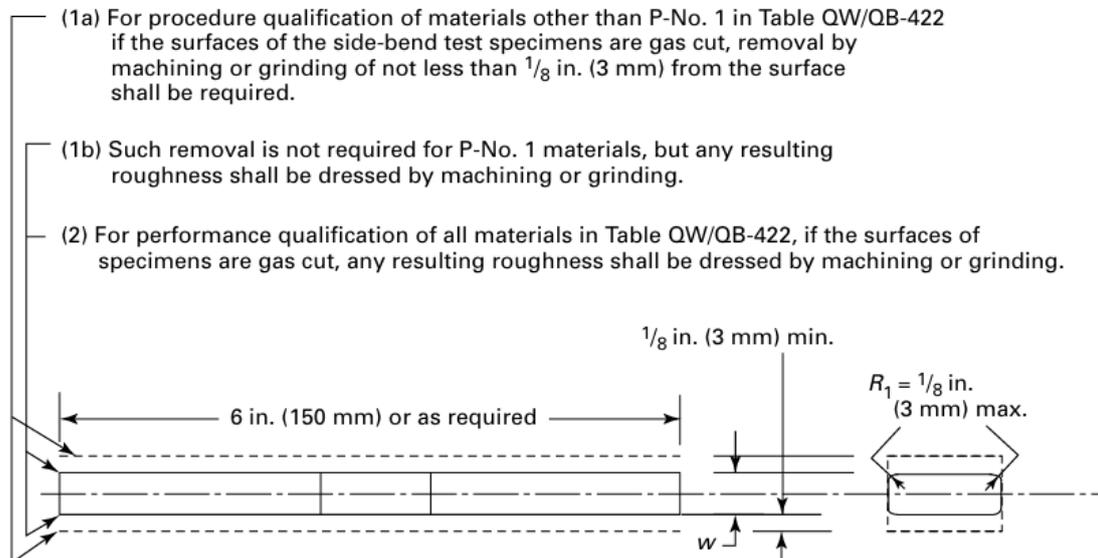
Figura A20. Dimensiones de las probetas para el ensayo de impacto según la normativa ASTM A370 [35].

Las variaciones permitidas son las siguientes:

- Longitud de la muesca hasta el borde  $90^\circ \pm 2^\circ$
- Los lados adyacentes deben estar en  $90^\circ \pm 10 \text{ min}$
- Dimensiones de la sección transversal  $\pm 0,075 \text{ mm}$
- Longitud de la muestra (L)  $+0, -2,5 \text{ mm}$
- Centrado de la muesca  $(L/2) \pm 1 \text{ mm}$
- Ángulo de la muesca  $\pm 1^\circ$
- Radio de la muesca  $\pm 0,025 \text{ mm}$
- Profundidad de la muesca  $\pm 0,025 \text{ mm}$
- Requisitos de acabado  $2 \mu\text{m}$  en la superficie con muescas y la cara opuesta, y  $4 \mu\text{m}$  en las otras dos superficies.

## ENSAYO DE DOBLADO

En la Figura A21 se pueden consultar los requisitos geométricos y dimensionales de las probetas para el ensayo de doblado según la normativa ASME Sec. IX [11].



$T$ , in. (mm)	$y$ , in. (mm)	$w$ , in. (mm)	
		P-No. 23, F-No. 23, F-No. 26, or P-No. 35	All other metals
$\frac{3}{8}$ to $< 1\frac{1}{2}$ (10 to $< 38$ )	$T$ [Note (1)]	$\frac{1}{8}$ (3)	$\frac{3}{8}$ (10)
$\geq 1\frac{1}{2}$ ( $\geq 38$ )	Notes (1) and (2)	$\frac{1}{8}$ (3)	$\frac{3}{8}$ (10)

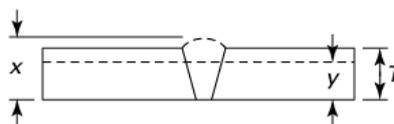


Figura A21. Dimensiones de las probetas para el ensayo de doblado según la normativa ASME Sec. IX [11].

De acuerdo con la normativa:

- 1a) Para la calificación de procedimientos de materiales distintos al P-No. 1, si las superficies de las probetas para el ensayo de doblado lateral se cortan con gas, será necesario eliminar por mecanizado o esmerilado no menos de 3 mm de la superficie.
- 1b) Dicha remoción no es necesaria para materiales correspondientes al P-No. 1, pero cualquier rugosidad resultante se tratará mediante mecanizado o rectificado.
- 2) Para la calificación del rendimiento de todos los materiales, si las superficies de las muestras se cortan con gas, cualquier rugosidad resultante se debe revestir mediante mecanizado o esmerilado.

El refuerzo de la soldadura y tira de respaldo o anillo de respaldo, si lo hay, puede retirarse al ras de la superficie de la muestra. Se puede emplear el corte térmico, el mecanizado o el rectificando.

Se permite el enderezamiento en frío antes de retirar el refuerzo.

Cuando el depósito de soldadura  $t$  es menor que el espesor del cupón  $T$ , el espesor de la muestra de flexión lateral puede ser  $t$ .

Cuando el espesor del cupón  $T$  es igual o superior a 38 mm, hay que utilizar una de las siguientes opciones:

- Cortar la muestra en múltiples muestras de ensayo de espesor entre 19 y 38 mm, y de dimensiones aproximadamente iguales.
- El espécimen puede doblarse en toda su anchura.

## ANEXO III VALORES DE RESISTENCIA A LA TRACCIÓN MÍNIMOS

En la siguiente tabla se indican los valores de resistencia a la tracción mínimos para metales base según la normativa ASME Sec. IX [11]:

Spec. No.	Designation, Type, or Grade	UNS No.	Minimum Specified Tensile, ksi (MPa)	Welding				Nominal Composition	Typical Product Form	Nominal Thickness Limits, in. (mm)
				P-No.	Group No.	ISO 15608 Group	Brazing P-No.			
<b>Ferrous (Cont'd)</b>										
A139	E	K03012	66 (455)	1	1	11.1	100	C	Welded pipe	...
A167	302B	S30215	75 (515)	8	1	8.1	130	18Cr-8Ni-2Si	Plate, sheet & strip	...
A167	308	S30800	75 (515)	8	2	8.2	130	20Cr-10Ni	Plate, sheet & strip	...
A167	309	S30900	75 (515)	8	2	8.2	130	23Cr-12Ni	Plate, sheet & strip	...
A167	310	S31000	75 (515)	8	2	8.2	130	25Cr-20Ni	Plate, sheet & strip	...
A or SA-178	A	K01200	47 (325)	1	1	1.1	100	C	E.R.W. tube	...
A or SA-178	D	K02709	70 (485)	1	2	11.1	100	C-Mn-Si	E.R.W. tube	...
A or SA-178	C	K03503	60 (415)	1	1	11.1	100	C	E.R.W. tube	...
A or SA-179	...	K01200	47 (325)	1	1	1.1	100	C	Smls. tube	...
A or SA-181	Cl. 60	K03502	60 (415)	1	1	11.1	100	C-Si	Pipe flange & fittings	...
A or SA-181	Cl. 70	K03502	70 (485)	1	2	11.1	100	C-Si	Pipe flange & fittings	...
A or SA-182	F12, Cl. 1	K11562	60 (415)	4	1	5.1	110	1Cr-0.5Mo	Forgings	...
A or SA-182	F12, Cl. 2	K11564	70 (485)	4	1	5.1	110	1Cr-0.5Mo	Forgings	...
A or SA-182	F11, Cl. 2	K11572	70 (485)	4	1	5.1	110	1.25Cr-0.5Mo-Si	Forgings	...
A or SA-182	F11, Cl. 3	K11572	75 (515)	4	1	5.1	110	1.25Cr-0.5Mo-Si	Forgings	...
A or SA-182	F11, Cl. 1	K11597	60 (415)	4	1	5.1	110	1.25Cr-0.5Mo-Si	Forgings	...
A or SA-182	F2	K12122	70 (485)	3	2	4.2	100	0.5Cr-0.5Mo	Forgings	...
A or SA-182	F1	K12822	70 (485)	3	2	1.1	100	C-0.5Mo	Forgings	...
A or SA-182	F22, Cl. 1	K21590	60 (415)	5A	1	5.2	110	2.25Cr-1Mo	Forgings	...
<b>A or SA-182</b>	<b>F22, Cl. 3</b>	<b>K21590</b>	<b>75 (515)</b>	<b>5A</b>	<b>1</b>	<b>5.2</b>	<b>110</b>	<b>2.25Cr-1Mo</b>	<b>Forgings</b>	<b>...</b>
A or SA-182	FR	K22035	63 (435)	9A	1	9.1	100	2Ni-1Cu	Forgings	...
A or SA-182	F3VCb	K31390	85 (585)	5C	1	6.2	110	3Cr-1Mo-0.25V-Cb-Ca	Forgings	...
A or SA-182	F21	K31545	75 (515)	5A	1	5.2	110	3Cr-1Mo	Forgings	...
A or SA-182	F3V	K31830	85 (585)	5C	1	6.2	120	3Cr-1Mo-V-Ti-B	Forgings	...
A or SA-182	F22V	K31835	85 (585)	5C	1	6.2	110	2.25Cr-1Mo-V	Forgings	...
A or SA-182	F5	K41545	70 (485)	5B	1	5.3	110	5Cr-0.5Mo	Forgings	...
A or SA-182	F5a	K42544	90 (620)	5B	1	5.3	110	5Cr-0.5Mo	Forgings	...
A or SA-182	F91	K90901	90 (620)	15E	1	6.4	110	9Cr-1Mo-V	Forgings	...
A or SA-182	F9	K90941	85 (585)	5B	1	5.4	110	9Cr-1Mo	Forgings	...
A or SA-240	...	N08367	95 (655)	45	...	8.2	420	46Fe-24Ni-21Cr-6Mo-N	Plate	≥0.187 (5)
A or SA-240	...	N08367	100 (690)	45	...	8.2	420	46Fe-24Ni-21Cr-6Mo-N	Sheet & strip	<0.187 (5)
A or SA-240	904L	N08904	71 (490)	45	...	8.2	420	44Fe-25Ni-21Cr-Mo	Plate, sheet & strip	...
A or SA-240	201-1	S20100	75 (515)	8	3	8.3	130	17Cr-4Ni-6Mn	Plate, sheet & strip	...
A or SA-240	201-2	S20100	95 (655)	8	3	8.3	130	17Cr-4Ni-6Mn	Plate, sheet & strip	...
A or SA-240	201LN	S20153	95 (655)	8	3	8.3	130	16Cr-4Ni-6Mn	Plate, sheet & strip	...
A or SA-240	202	S20200	90 (620)	8	3	8.3	130	18Cr-5Ni-9Mn	Plate, sheet & strip	...
A or SA-240	...	S20400	95 (655)	8	3	8.3	130	16Cr-9Mn-2Ni-N	Plate, sheet & strip	...
A or SA-240	XM-19	S20910	100 (690)	8	3	8.3	130	22Cr-13Ni-5Mn	Plate	≥0.187 (5)
A or SA-240	XM-19	S20910	105 (725)	8	3	8.3	130	22Cr-13Ni-5Mn	Sheet & strip	<0.187 (5)
A or SA-240	XM-17	S21600	90 (620)	8	3	8.3	130	19Cr-8Mn-6Ni-Mo-N	Plate	≥0.187 (5)
A or SA-240	XM-17	S21600	100 (690)	8	3	8.3	130	19Cr-8Mn-6Ni-Mo-N	Sheet & strip	<0.187 (5)
A or SA-240	XM-18	S21603	90 (620)	8	3	8.3	130	19Cr-8Mn-6Ni-Mo-N	Plate	≥0.187 (5)
A or SA-240	XM-18	S21603	100 (690)	8	3	8.3	130	19Cr-8Mn-6Ni-Mo-N	Sheet & strip	<0.187 (5)
A or SA-240	S21800	S21800	95 (655)	8	3	8.1	130	18Cr-8Ni-8Mn-4Si-N	Plate, sheet & strip	...
A or SA-240	XM-29	S24000	100 (690)	8	3	8.3	130	18Cr-3Ni-12Mn	Plate, sheet & strip	...
A or SA-240	301	S30100	75 (515)	8	1	8.1	130	17Cr-7Ni	Plate, sheet & strip	...
A or SA-240	302	S30200	75 (515)	8	1	8.1	130	18Cr-8Ni	Plate, sheet & strip	...
A or SA-240	304	S30400	75 (515)	8	1	8.1	130	18Cr-8Ni	Plate, sheet & strip	...
<b>A or SA-240</b>	<b>304L</b>	<b>S30403</b>	<b>70 (485)</b>	<b>8</b>	<b>1</b>	<b>8.1</b>	<b>130</b>	<b>18Cr-8Ni</b>	<b>Plate, sheet &amp; strip</b>	<b>...</b>
A or SA-240	304H	S30409	75 (515)	8	1	8.1	130	18Cr-8Ni	Plate, sheet & strip	...
A or SA-240	304N	S30451	80 (550)	8	1	8.1	130	18Cr-8Ni-N	Plate, sheet & strip	...
A or SA-240	XM-21	S30452	85 (585)	8	1	8.1	130	18Cr-8Ni-N	Plate	≥0.187 (5)
A or SA-240	XM-21	S30452	90 (620)	8	1	8.1	130	18Cr-8Ni-N	Sheet & strip	<0.187 (5)
A or SA-240	304LN	S30453	75 (515)	8	1	8.1	130	18Cr-8Ni-N	Plate, sheet & strip	...
A or SA-240	305	S30500	70 (485)	8	1	8.1	130	18Cr-11Ni	Plate, sheet & strip	...
A or SA-240	S30600	S30600	78 (540)	8	1	8.1	130	18Cr-15Ni-4Si	Plate, sheet & strip	...
A or SA-240	S30601	S30601	78 (540)	8	1	8.1	130	17.5Cr-17.5Ni-5.3Si	Plate, sheet & strip	...
A or SA-240	S30815	S30815	87 (600)	8	2	8.2	130	21Cr-11Ni-N	Plate, sheet & strip	...

Tabla A1. Resistencia a la tracción mínima requerida para metales base.

Los valores de resistencia a la tracción mínimos para metales de soldadura según la norma ASME Sec. II parte C [43] son:

AWS Classification	Tensile Strength, min.		Elongation, min. percent	Heat Treatment
	ksi	MPa		
E209-XX	100	690	15	none
E219-XX	90	620	15	none
E240-XX	100	690	15	none
E307-XX	85	590	30	none
E308-XX	80	550	35	none
E308H-XX	80	550	35	none
E308L-XX	75	520	35	none
E308Mo-XX	80	550	35	none
E308LMo-XX	75	520	35	none
E309-XX	80	550	30	none
E309H-xx	80	550	30	none
E309L-XX	75	520	30	none
E309Nb-XX	80	550	30	none
E309Mo-XX	80	550	30	none
E309LMo-XX	75	520	30	none
E310-XX	80	550	30	none
E310H-XX	90	620	10	none
E310Mo-XX	80	550	30	none
E312-XX	95	660	22	none
E316-XX	75	520	30	none
E316H-XX	75	520	30	none
E316L-XX	70	490	30	none
E316LMn-XX	80	550	20	none
E317-XX	80	550	30	none
E317L-XX	75	520	30	none
E318-XX	80	550	25	none
E320-XX	80	550	30	none
E320LR-XX	75	520	30	none
E330-XX	75	520	25	none
E330H-XX	90	620	10	none
E347-XX	75	520	30	none
E349-XX	100	690	25	none
E383-XX	75	520	30	none
E385-XX	75	520	30	none
E409Nb-XX	65	450	20	a
E410-XX	75	520	20	b
E410NiMo-XX	110	760	15	c
E430-XX	65	450	20	a
E630-XX	135	930	7	d
E16-8-2-XX	80	550	35	none
E2209-XX	100	690	20	none
ER2307-XX <sup>e</sup>	100	690	20	none
E2553-XX	110	760	15	none
E2594-XX	110	760	15	none
E33-31-XX	105	720	25	none

Tabla A2. Resistencia a la tracción mínima requerida para metales de soldadura según AWS A5.4/A5.4M: 2006.



Metodo di prova Test method		ASTM A370-18 Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products <sup>1</sup>														
PROVA DI TRAZIONE/Tensile Test																
	Senso Direction	Posizione Position	Temp. °C	Diam. (mm)	Yield Strength Rp 0,2t MPa		Ultimate Tensile Strength MPa		YS / UTS		Allungamento Elongation % (mm)Lo		Strizione Reduction of area %		C.Q.	
RICHIESTO Required	L		20	12,500	>= 310		520/670				>= 20,0	50,0	>= 30,0			
Prova N° Test N°	RISULTATI OTTENUTI Tests results				MPa		MPa				%	(mm)Lo	%			
0001	L		20	12,500	485		614				27,0		82,0			
PROVA DI RESILIENZA SU PROVETTA CHARPY / Charpy Impact Test																
	Direction	Type or Position	Temp. °C	Energy Min (J)			Aver (J)			Shear Area %		Lateral expansion mm				
RICHIESTO Required	L	KV	20	--			>= 40									
Prova N° Test N°	RISULTATI OTTENUTI Tests results							Aver (J)								
0001	L	KVt	20	340	333	372	348,3									
STRUMENTI /Instruments, G.Q. 1.0.156 Termogrmetro digitale G.Q. 5.1.67 Calibro a corsoio digitale G.Q. 1.0.58 Pendolo Amsler 450 J G.Q. 1.0.60 Galdabini 600 KN G.Q. 1.0.129 Estensimetro elettronico Cermac G.Q. 1.0.127 Proiettore di profili																
Trattamento / Heat treatment : Normalized and tempered																
ESITO/Result : Conforme alla specifica/According to specification																
NOTE/Notes : Test 1/4s																

Figura A23. Continuación del certificado del acero aleado F22.

Para el material SA-240 304L (Acero inoxidable) podemos consultar sus rasgos en el documento de la Figura A24:

REQUIREMENTS ESPECIFICACIONES APLICABLES				INTERGRANULAR CORROSION CORROSIÓN INTERGRANULAR		GRADE MATERIALES		FINISH ACABADO		
EN 10088-2:2014, EN-ISO-18286(Thickness Tolerances) ASTM A240Ed22/A480Ed22-ASME SecIIA SA240/SA480Ed21 AISI				EN ISO 3651-2 ASTM-A-262 PRACTICA E		Acs 160 1.4301 Acs 160 304 Acs 160 AISI 304L		1D Nº1 Nº1		
EN 10088-2:2014 EN-ISO-18286(Thickness Tolerances) ASTM A240Ed22/A480Ed22-ASME SecIIA SA240/SA480Ed21				EN ISO 3651-2 ASTM-A-262 PRACTICA E		Acs 160 1.4307 Acs 160 304L		1D Nº1		
COIL / BOX BOBINA / CAJA	CONTENT CONTENIDO	DIMENSIONS (mm) DIMENSIONES			MARKS MARCA	QUANTITY CANTIDAD	TEST Nº PROBETA			
		THICKNESS ESPESOR	WIDTH ANCHO	LENGTH LARGO						
H6330W	012JAZ CA	40,000	1500,00	6000,00	10	1	012JAZ C C			
CHEMICAL ANALYSIS / COMPOSICIÓN QUÍMICA (%)										
HEAT Nº COLADA	C	CR	MN	N	NI	P	S	SI		
2JAZ	0,027	18,070	1,780	0,077	8,040	0,031	0,001	0,354		
MECHANICAL PROPERTIES / CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS										
TEST Nº PROBETA	PROBE TIPO	Rm N/mm2	Rp 0.2 N/mm2	Rp 1.0 N/mm2	A50 %	A5 %	HRB			
012JAZ C	C T	593,82	318,70	354,58	53,94	55,94	84,00			

Figura A24. Certificado del acero inoxidable.

Los atributos de los materiales de aportación ER309L y ER347 se pueden consultar en los siguientes documentos:

Classifications					
EN ISO 14343-A	EN ISO 14343-B		AWS A5.9		
W 23 12 L	SS309L		ER309L		
Characteristics and typical fields of application					
TIG rod of W 23 12 L / ER309L type for welding dissimilar joints. Well-suited for depositing intermediate layers when welding of clad materials. Designed for very good welding and wetting characteristics as well as good safety after dilution when welding dissimilar joints.					
Due to the high ferrite content, 16 FN, the weld metal is less susceptible to hot cracking. Suitable for service temperatures between $-80^{\circ}\text{C}$ and $300^{\circ}\text{C}$ .					
Base materials					
Primarily used for surfacing (buffer layer) unalloyed or low-alloyed steels and when joining non-molybdenum-alloyed stainless and carbon steels.					
Joints and mixed joints between austenitic steels such as 1.4301 X5CrNi18-10, 1.4306 X2CrNi19-11, 1.4308 GX5CrNi19-10, 1.4401 X5CrNiMo17-12-2, 1.4404 X2CrNiMo17-12-2, 1.4408; GX5CrNiMo19-11-2, 1.4435 X2CrNiMo18-14-3, 1.4436 X3CrNiMo17-12-3, 1.4541 X6CrNiTi18-10, 1.4550 X6CrNiNb18-10, 1.4552; GX5CrNiNb19-11, 1.4571 X6CrNiMoTi17-12-2, 1.4580 X6CrNiMoNb17-12-2, 1.4581 GX5CrNiMoNb19-11-2, 1.4583 X10CrNiMoNb18-12, 1.4948 X6CrNi18-10, UNS S30400, S30403, S30809, S31600, S31603, S31635, S32100, S34700, S31640; AISI 304, 304L, 316, 316L, 316Ti, 321, 347 or mixed joints between austenitic and heat resistant steels such as 1.4713 X10CrAlSi7, 1.4724 X10CrAlSi13, 1.4742 X10CrAlSi18, 1.4826 GX40CrNiSi22-10, 1.4828 X15CrNiSi20-12, 1.4832, GX25CrNiSi20-14, 1.4837 GX40CrNiSi25-12 with ferritic steels to pressure boiler steels P295GH and fine grained structural steels to P355N, ship building steel grades A – E, AH 32 – EH 36, A40 – F40, etc.					
Typical analysis of the TIG rods (wt.-%)					
	C	Si	Mn	Cr	Ni
wt.-%	0.02	0.5	1.7	23.5	13.2
Mechanical properties of all-weld metal - typical values (min. values)					
	Yield strength $R_{p0.2}$	Tensile strength $R_m$	Elongation A ( $L_0=5d_0$ )	Impact values ISO-V CVN J	
	MPa	MPa	%	+20 °C	-120 °C
u	440 ( $\geq 320$ )	580 ( $\geq 520$ )	34 ( $\geq 25$ )	150	( $\geq 32$ )
u untreated, as-welded – shielding gas Ar					
Operating data					
	<b>Polarity:</b> DC (–)	<b>Shielding gas:</b> (EN ISO 14175) I1	<b>Marks:</b> † W 23 12 L / ER309L	<b>ø mm</b>	<b>L mm</b>
				1.6	1000
				2.0	1000
				2.4	1000
				3.2	1000
Approvals					
TÜV (02661), DNV GL, ABS, BV, NAKS, CE					

Figura A25. Características del ER309L [44].

<b>Classifications</b>						
EN ISO 14343-A	EN ISO 14343-B	AWS A5.9	Mat. No.			
W 19 9 Nb	SS347	ER347	1.4551			
<b>Characteristics and typical fields of application</b>						
Stainless; resistant to intercrystalline corrosion and wet corrosion up to 400 °C (752 °F). Corrosion-resistant similar to matching stabilized austenitic CrNi steels/cast steel grades. For joining and surfacing application with matching and similar – stabilized and non-stabilized – austenitic CrNi(N) steels and cast steel grades.						
<b>Base materials</b>						
TÜV-certified parent metal 1.4550 – X6CrNiNb18-10 and the parent metals also covered by VdTÜV-Merkblatt 1000. AISI 347, 321, 302, 304, 304L, 304LN ASTM A296 Gr. CF8, A157 Gr. C9; A320 Gr. B8C oder D						
<b>Typical analysis of the TIG rods (wt.-%)</b>						
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Nb
wt-%	0.05	0.5	1.8	19.5	9.5	≥ 12xC
<b>Structure:</b> Austenite with part ferrite						
<b>Mechanical properties of all-weld metal</b>						
Heat-treatment	Yield strength R <sub>p0.2</sub>	Yield strength R <sub>p1.0</sub>	Tensile strength R <sub>m</sub>	Elongation A (L <sub>0</sub> =5d <sub>0</sub> )	Impact work ISO-V KV J	
	MPa	MPa	MPa	%	+20 °C	
aw	400	430	570	30	65	
<b>Operating data</b>						
<b>Polarity:</b> DC (–)	<b>Shielding gas:</b> (EN ISO 14175) I 1		<b>Marks:</b> ‡ W 19 9 Nb / ER347		<b>ø (mm)</b>	<b>L mm</b>
					1.0	1000
					1.6	1000
					2.0	1000
					2.4	1000
					4.0	1000
<b>Welding instruction</b>						
Materials			Preheating	Postweld heat treatment		
Matching and similar steels / cast steel grades			None	None. Otherwise solution annealing at 1020 °C (1868 °F)		
<b>Approvals</b>						
TÜV (09475), DB (43.132.21), CE						

Figura A26. Características del ER347 [44].

## **ANEXO V PQR**

A continuación, puede consultarse el PQR (Procedure Qualification Record) realizado a partir del cupón de soldadura fabricado, ensayado y analizado en este trabajo.

**PROCEDURE QUALIFICATION RECORD (PQR)**  
**ASME BPVC Section IX: 2023Ed.**

**PQR N°: 10264.7**

**Sheet N° 1 of 6**

**Company**

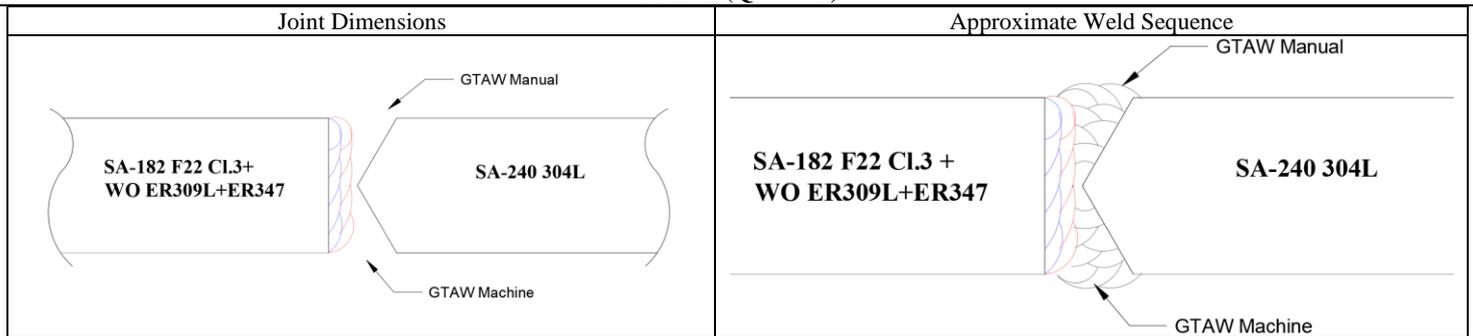
**Welding Process: Weld overlay according to PQR NTS-10264.1, Butt weld GTAW Manual & GTAW Machine**

**Type: Manual & Machine**

**pWPS N°: 10264.7      Rev.:1      Test coupon N° PQR - 10264.7**

**Welder & Welding Operator: GTAW Manual: N°138; GTAW Machine: N°107**  
**Laboratory test report N° 2401472 & 2401473**

**JOINT (QW-402)**



**BASE METALS (QW-403)**

**Material Spec & Type-Grade, or UNS Number: SA182 F22 Cl.3+ WO ER347 to SA240 F304L**

**P-No: 5A Group 1 + F-No:6 to P-No: 8 Group 1**

**Thickness of Test Coupon: 40 mm**

**Outside Diameter of Test Coupon: Plate**

**Thickness Range base metal this Test Qualified for butt weld: 5 mm to 200 mm (if fillet welds all thickness qualified)**

**Diameter range this test qualified for butt welds: All diameters qualified.**

**Other: 2 x Plates 400x180x40 mm; Heat n°: 200586 & 2JAZ**

**FILLER METALS (QW-404)**

**SFA Specification:** - Weld overlay with ER 309L → 5.9 ASME II PART-C  
 - Weld overlay & Butt weld with ER 347 → 5.9 ASME II PART-C

**AWS Classification:** - Weld overlay with ER 309L → Heat: 106713 // Brand name: Thermanit 309L  
 - Weld overlay & Butt weld (GTAW Machine) with ER 347 → Heat: 107222 // Brand name: Thermanit H-347  
 - Butt weld (GTAW Manual) with ER 347 → Heat: 106718 // Brand name: Thermanit H-347

**Filler Metal F-No:** - Weld overlay with ER 309L → 6  
 - Weld overlay & Butt weld with ER 347 → 6

**Weld Metal Analysis A No:** - Buttering with ER 309L → 8  
 - Buttering & Butt weld with ER 347 → 8

**Size of Filler Metal: Ø 1.2 mm (weld overlay & GTAW Machine) & Ø2.4mm (GTAW Manual) Solid Wire**

**Flux Trade Designation N.A**

**Deposit Weld Metal: 40 mm**

**Weld metal thickness Range: GTAW Manual ≤200mm & GTAW Machine ≤200mm.**

**Other: Filler Metal: Bare Solid Wire**

**Addition or deletion of filler metal is not allowed.**

**PROCEDURE QUALIFICATION RECORD (PQR)**  
**ASME BPVC Section IX: 2023Ed.**

**PQR N°: 10264.7**

**Sheet N° 2 of 6**

**POSITION (QW-405)**

**Position of Groove: 1G**  
**Weld Progression (Uphill / Downhill): N.A.**  
**Other: N.A.**

**PREHEAT (QW-406)**

**Preheat Temperature: 20°C.**  
**Interpass Temperature: 123°C**  
**Other: Method of check by Pyrometer / Cooling by water and/or forced air**

**POSTWELD HEAT TREATMENT (QW-407)**

**Temperature: 687°C ± 7°C // 693°C ± 7°C**  
**Time: 2 hrs. // 8 hrs.**  
**Other: Heating and Cooling rate 50°C/hr max**  
**Heating and Cooling may be uncontrolled <400°C**

PWHT is performed after Weld overlay but before Butt weld

**GAS (QW-408)**

	Gas(es)	Mixture	Flow Rate
Shielding	GTAW Manual: ISO 14175: II GTAW Machine: ISO 14175: II	99.998 %Ar	15 l/min 15 l/min
Trailing	N.A	N.A	N.A
Backing (Butt weld)	ISO 14175: II	99.998 %Ar	20 l/min

**Other: Nozzle Diam. Ø 10-20 mm**

**ELECTRICAL CHARACTERISTICS (QW-409)**

**Current: DC**  
**Polarity: EN**

Sequence	Butt weld with ER 347 GTAW Manual			Butt weld with ER 347 GTAW Machine		
	Root ER 347	Hot Pass ER 347	Subsequent Passes ER NiCr-3	Root ER 347	Hot Pass ER 347	Subsequent Passes ER NiCr-3
Amps. [A]	150	191	191	227	229	220
Volts. [V]	9-11	13.5-15.5	13.5-15.5	15-16	15.5-16.5	15.5-16.5
Feed speed [mm/min]	-	-	-	130	160	200
Travel speed [cm/min]	4.5	13	11.5	13	18	18
Heat Input* [kJ/cm]	22	13.66	15.45	15.57	12.60	12.1

**Pulsating current: No**  
**Tungsten Electrode Size: 2% La- SFA 5.12 EWLa 20 (ISO6848)**  
**GTAW Manual: Ø 2.4 mm**  
**GTAW Machine: Ø 4 mm**

**Other:**  
\* "Heat input calculation = [(A x V x 60) ÷ Travel Speed cm/min]"

**TECHNIQUE (QW-410)**

**String or Weave Bead: String**  
**Oscillation: No**  
**Multilayer or Single layer: Multilayer**  
**Single or Multiple Electrodes: Single**  
**Other: Hot wire Amps: N.A.**  
**Hot Wire Volts: N.A.**  
**Current Type: N.A.**

**WELDING ACTIVITIES SUPERVISED BY (QG-106)**

**Name:**  
**Job position: Welding Supervisor**  
**Date: 29/02/2024**  
**Welding Record: WR PQR-10264.7**

**PROCEDURE QUALIFICATION RECORD (PQR)**  
**ASME BPVC Section IX: 2023Ed.**

**PQR N°: 10264.7**

**Sheet N° 3 of 6**

**NON DESTRUCTIVE EXAMINATION**

**BUTT WELD**

Sequence	Extension	Test specification	Acceptance Standard	Test Result	Report N°
Visual Inspection	100%	ASME V Art. 9: 2021Ed.	ASME IX QW-194: 2023Ed.	Satisfactory	24.022.0035.0323 - VT
Dye Penetrant Inspection	100%	ASME V Art. 6: 2021Ed.	ASME VIII Div.2: 2021Ed.	Satisfactory	24.022.0035.0324 - PT
Radiographic Examination	100%	ASME V Art. 2: 2021Ed.	ASME VIII Div.2: 2021Ed.	Satisfactory	01439753

**DESTRUCTIVE EXAMINATION**

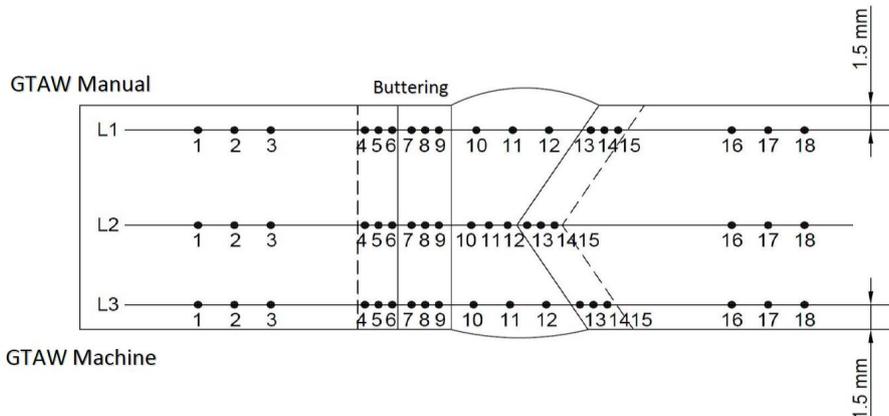
**TEST ON SECTION WITH PWHT MINIMUM (2 HOURS) – Laboratory report N°: 2401473**

**TRANSVERSE TENSILE TESTING**

Number of specimens		2 specimens per process (2 for GTAW Manual and 2 for GTAW Machine)					
Test method & locations		QW-151. Specimens to be full thickness of test coupon and in accordance with ASME IX QW-462.1(a).					
Acceptance standard		Tensile Strength: $\geq 485\text{MPa}$ Yield Strength: $\geq 205\text{MPa}$ (Only reported as informative) Elongation $\geq 30\%$ . (Only reported as informative)					
Type/N°	Temperature	Width or outer diameter (mm)	Cross Sección (mm <sup>2</sup> )	Tensile Strength Load break (kN)	Tensile Strength Load break (Rm) (MPa)	Location of fracture	Report N°
T1	Room T <sup>a</sup>	19.03	307.72	183.58	597	Base Metal	2401473
T2	Room T <sup>a</sup>	19.02	313.26	184.97	590	Base Metal	2401473
T3	Room T <sup>a</sup>	19.03	308.10	183.00	594	Base Metal	2401473
T4	Room T <sup>a</sup>	19.00	308.94	184.21	596	Base Metal	2401473
T1 & T2: GTAW Machine T3 & T4: GTAW Manual							

**HARDNESS TEST**

Number of specimens		1 specimen	
Test method & locations		Survey 1: One survey to ISO 6507-1 (survey to be in accordance with ISO 9015-1)	
Acceptance standard		HAZ: 300HV10 max. Base Material: 240 HV10 max Weld metal: INFO.	
Type / Standard	Load	Report N°	
VICKERS /ASTM E92:2023	10 Kg	2401473	



Line/Point	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
L1	165	164	168	193	208	222	187	193	180	185	202	189	210	206	206	194	187	183
L2	156	162	158	172	201	208	193	204	206	232	250	243	268	254	249	233	205	197
L3	167	164	164	194	193	221	181	177	193	198	207	202	199	205	215	207	198	198

**PROCEDURE QUALIFICATION RECORD (PQR)**  
**ASME BPVC Section IX: 2023Ed.**

**PQR N°: 10264.7**

**Sheet N° 4 of 6**

**CHARPY V-NOTCH IMPACT TEST**

<b>Number of specimens</b>	2 set of 3 specimens								
<b>Test method &amp; locations</b>	ASTM A370. Specimens to be taken transverse to the weld direction with the notch perpendicular to the surface, not more than 2mm from outer surface of material. Test at -29°C.								
<b>Acceptance standard</b>	55J minimum individual, 48J average. Report lateral expansion for information								
NOTCH LOCATION / DIRECTION	TEMPERATURE	VALUES [J]			AVERAGE [J]	MEAN OF SHEAR FRACTURE APPERANCE (%)	MEAN OF LATERAL EXPANSION [mm]	RESULTS	Report N°
		1	2	3					
1 set HAZ produced by GTAW Machine	-29°C	132	163	144	146	-	-	Satisfactory	2401473
1 set HAZ produced by GTAW Manual	-29°C	96	105	108	103	-	-	Satisfactory	2401473

**TEST ON SECTION WITH PWHT MAXIMUM (8 HOURS) – Laboratory report N°: 2401472**

**TRANSVERSE TENSILE TESTING**

<b>Number of specimens</b>	2 specimens per process (2 for GTAW Manual and 2 for GTAW Machine)						
<b>Test method &amp; locations</b>	QW-151. Specimens to be full thickness of test coupon and in accordance with ASME IX QW-462.1(a).						
<b>Acceptance standard</b>	Tensile Strength: $\geq 485\text{MPa}$ Yield Strength: $\geq 205\text{MPa}$ (Only reported as informative) Elongation $\geq 30\%$ . (Only reported as informative)						
Type/N°	Temperature	Width or outer diameter (mm)	Cross Sección (mm <sup>2</sup> )	Tensile Strength Load break (kN)	Tensile Strength Load break (Rm) (MPa)	Location of fracture	Report N°
T1	Room T <sup>a</sup>	19.08	313.48	181.23	578	Base Metal	2401472
T2	Room T <sup>a</sup>	19.00	306.28	176.94	578	Base Metal	2401472
T3	Room T <sup>a</sup>	19.03	309.24	179.02	579	Base Metal	2401472
T4	Room T <sup>a</sup>	19.04	308.45	180.92	587	Base Metal	2401472
T1 & T2: GTAW Machine T3 & T4: GTAW Manual							

**GUIDED BEND TEST**

<b>Number of specimens</b>	4 specimens		
<b>Test method &amp; locations</b>	QW-161.1. Specimens taken in accordance with ASME IX QW-462.2		
<b>Acceptance standard</b>	QW-163		
Type and Figure N°	Specimen Orientation	Results	OBSERVACIONES/Observation SBO= Transverse Side Bend Overlay test $\alpha=180^\circ, A=4t$ <b>MANDREL BEND TEST</b> ASME IX-2021, QW 462.2 Report N°: 2401472
SBB 1	Transverse side [QW-462.2]	Satisfactory	
SBB 2	Transverse side [QW-462.2]	Satisfactory	
SBB 3	Transverse side [QW-462.2]	Satisfactory	
SBB 4	Transverse side [QW-462.2]	Satisfactory	

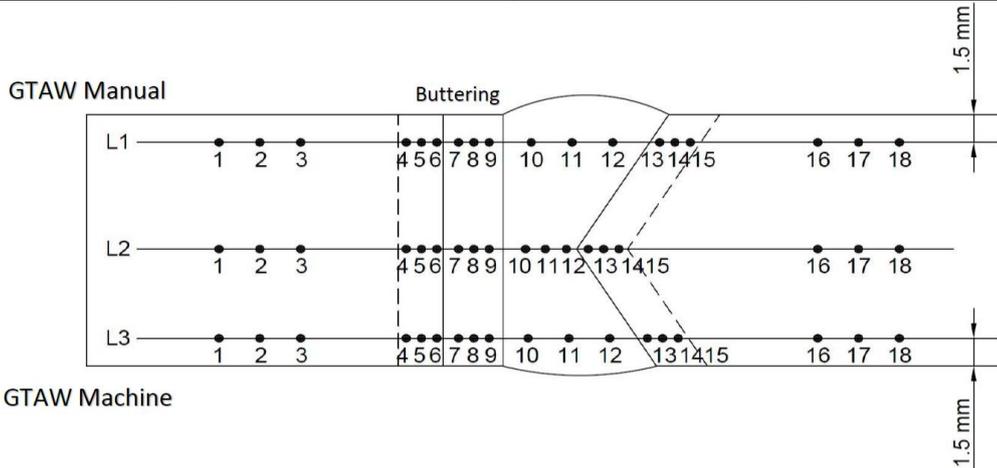
**PROCEDURE QUALIFICATION RECORD (PQR)**  
**ASME BPVC Section IX: 2023Ed.**

**PQR N°: 10264.7**

**Sheet N° 5 of 6**

**HARDNESS TEST**

<b>Number of specimens</b>	<b>1 specimen</b>	
<b>Test method &amp; locations</b>	<b>Survey 1:</b> One survey to ISO 6507-1 (survey to be in accordance with ISO 9015-1)	
<b>Acceptance standard</b>	HAZ: 300HV10 max. Base Material: 240 HV10 max Weld metal: INFO.	
<b>Type / Standard</b>	<b>Load</b>	<b>Report N°</b>
<b>VICKERS /ASTM E92:2023</b>	<b>10 Kg</b>	<b>2401472</b>



Line/Point	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
<b>1</b>	179	176	177	183	180	197	235	210	175	195	194	210	193	195	198	188	176	176
<b>2</b>	190	178	177	173	185	193	193	208	219	225	254	250	241	238	255	215	206	196
<b>3</b>	193	179	191	176	193	192	208	198	203	215	216	210	213	206	205	208	190	188

**Test Conducted by: Centro Tecnológico**

**RESULT:**



**ACCEPTED**



**NO ACCEPTED**

We Certify that the statements in this record are correct and that the test welds were prepared, welded, and tested in accordance with the requirements of Section IX of the ASME Boiler and Pressure Vessels Code.

**Prepared by:**

**Revised by:**

**Approved by:**

**External inspection:**

## **ANEXO VI WPS**

La WPS desarrollada a partir de PQR puede verse a continuación, donde se especifican todas las variables y características del proceso de soldadura cualificado.

	<b>WELDING PROCEDURE SPECIFICATION (WPS) ASME CODE SECTION IX: 2023Ed.</b>	<b>WPS No.10264.7</b>
		Page 1 of 2

WPS No 10264.7      Rev. No. 01      Date 24/05/2024  
Supporting PQR No. (s) PQR-10264.7      Date 24/05/2024  
Welding process(es) GTAW      Type(s) MANUAL  
(Automatic, Manual, Machine or Semi-automatic)

**JOINTS (QW-402)** Details

Joint Design See Sketch  
Root Spacing No  
Backing Yes  
Backing material (type) (Refer to both backing and retainers)  
 Metal       Nonfusing metal  
 Nonmetallic       Other

**BASE METALS (QW-403)**  
P-No. 5A + F-No:6      Group No. 1      to P-No. 8      Group No. 1  
Specification and type/grade or UNS Number SA182 Gr. F22 Cl.3 + ER 347  
to Specification and type/grade or UNS Number SA240 Tp 321  
Thickness range  
Base metal: Groove 5 to 200 mm      Fillet All  
Maximum Pass Thickness < 1/2"      Yes X      No  
Other

**FILLER METALS (QW-404)**

Spec. No. (SFA)	5.28 ASME II Part-C
AWS No. (Class)	ER 347 // Brand name: Thermanit H-347// Heat: 106718
F-No.	6
A-No.	8
Size of Filler Metals	2.4 mm
Filler Metal Product Form	Solid Wire
Supplemental Filler Metal	No
Weld Metal	
Thickness Range	
Groove	≤ 200 mm
Fillet	All
Electrode-Flux (Class)	N.A.
Flux Type	N.A.
Flux Trade Name	N.A.
Consumable Insert	NO

Other: Removal of tack welds by grinding



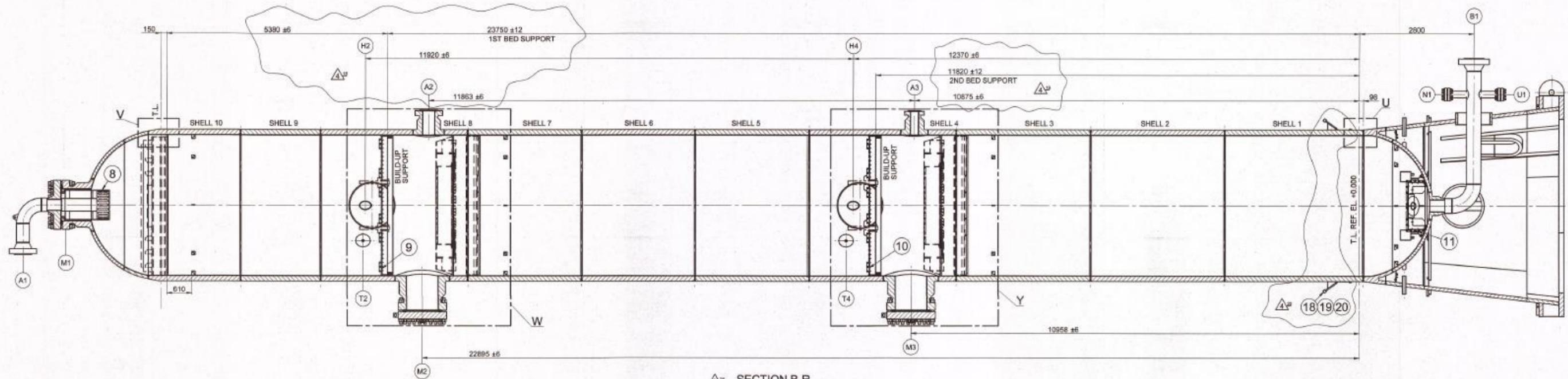
---

## **DOCUMENTO N°3: PLANOS**

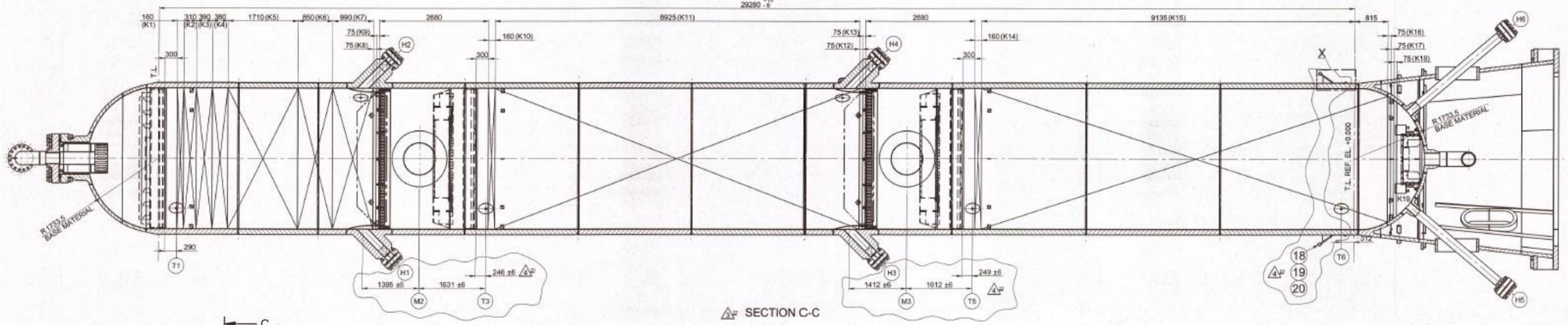
---

## ÍNDICE

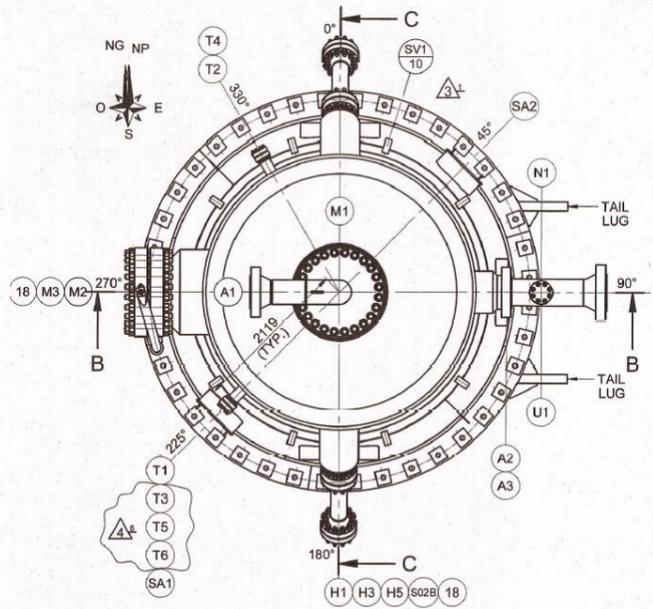
<b>3.1 REACTOR DE HIDRODESULFURACIÓN .....</b>	<b>124</b>
<b>3.2 SPOOL SALIDA DEL CATALIZADOR .....</b>	<b>125</b>
<b>3.3 CUPÓN DE SOLDADURA .....</b>	<b>126</b>
<b>3.4 DISPOSICIÓN DE LAS PROBETAS .....</b>	<b>127</b>
<b>3.5 PROBETA PARA EL ENSAYO DE TRACCIÓN .....</b>	<b>130</b>
<b>3.6 PROBETA PARA EL ENSAYO DE DUREZA .....</b>	<b>131</b>
<b>3.7 PROBETA PARA EL ENSAYO DE IMPACTO .....</b>	<b>132</b>
<b>3.8 PROBETA PARA EL ENSAYO DE DOBLADO .....</b>	<b>133</b>



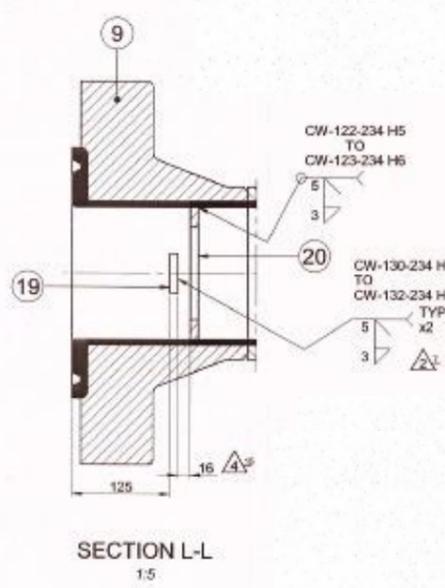
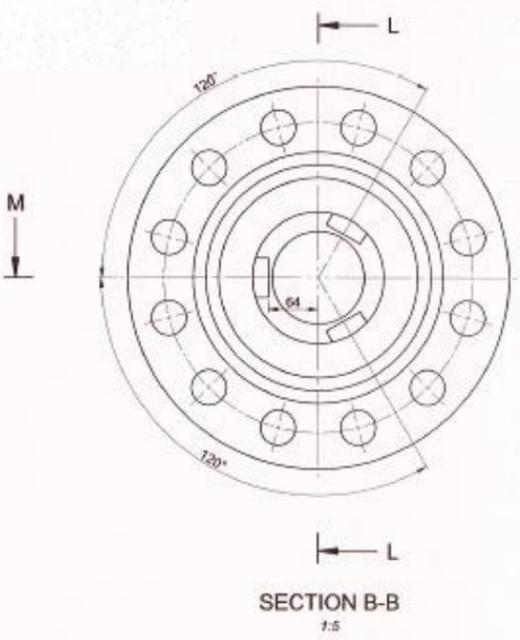
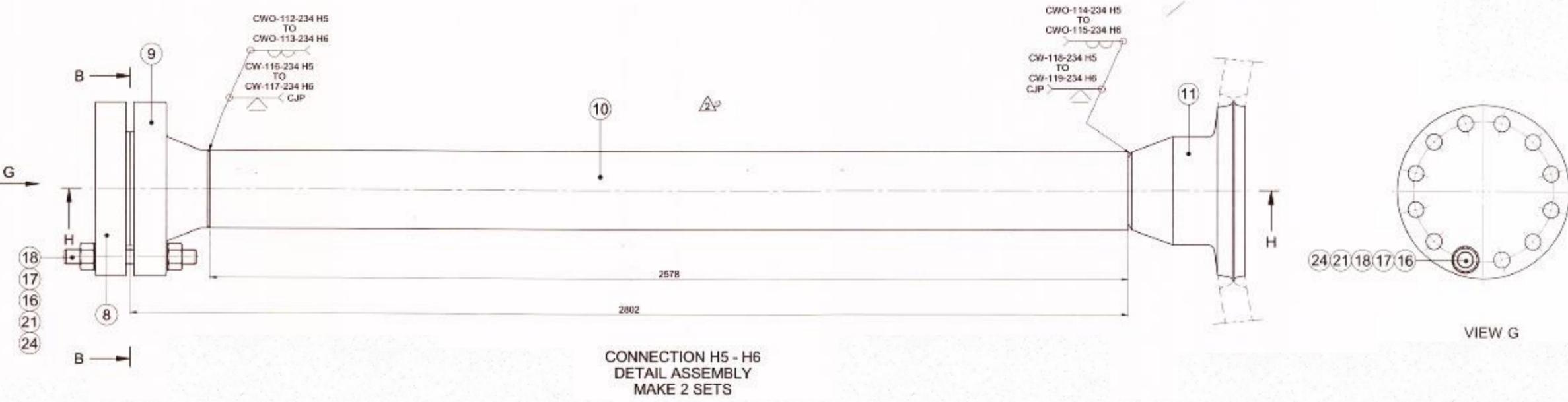
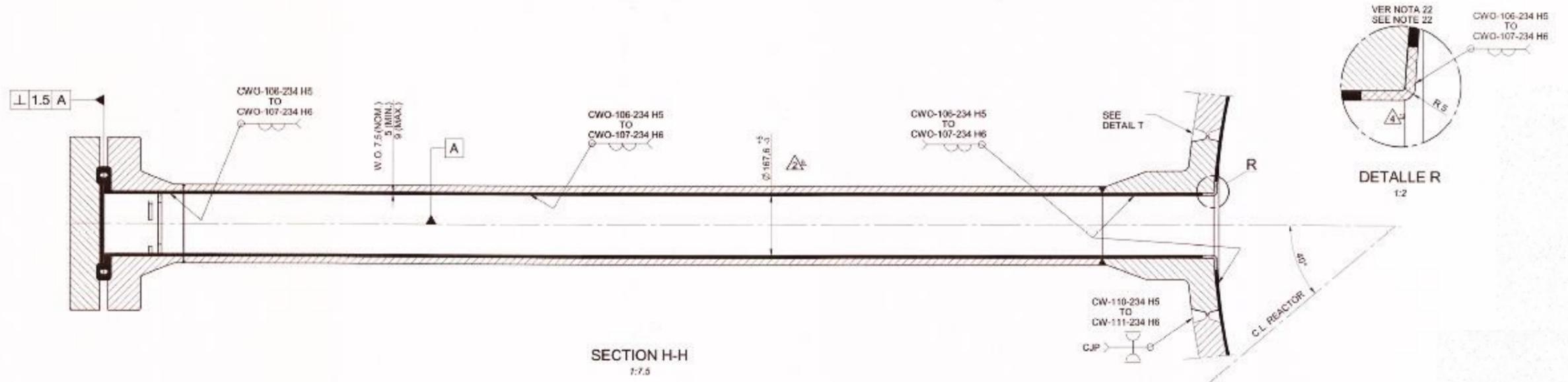
SECTION B-B  
29280 ±13  
-9

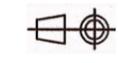


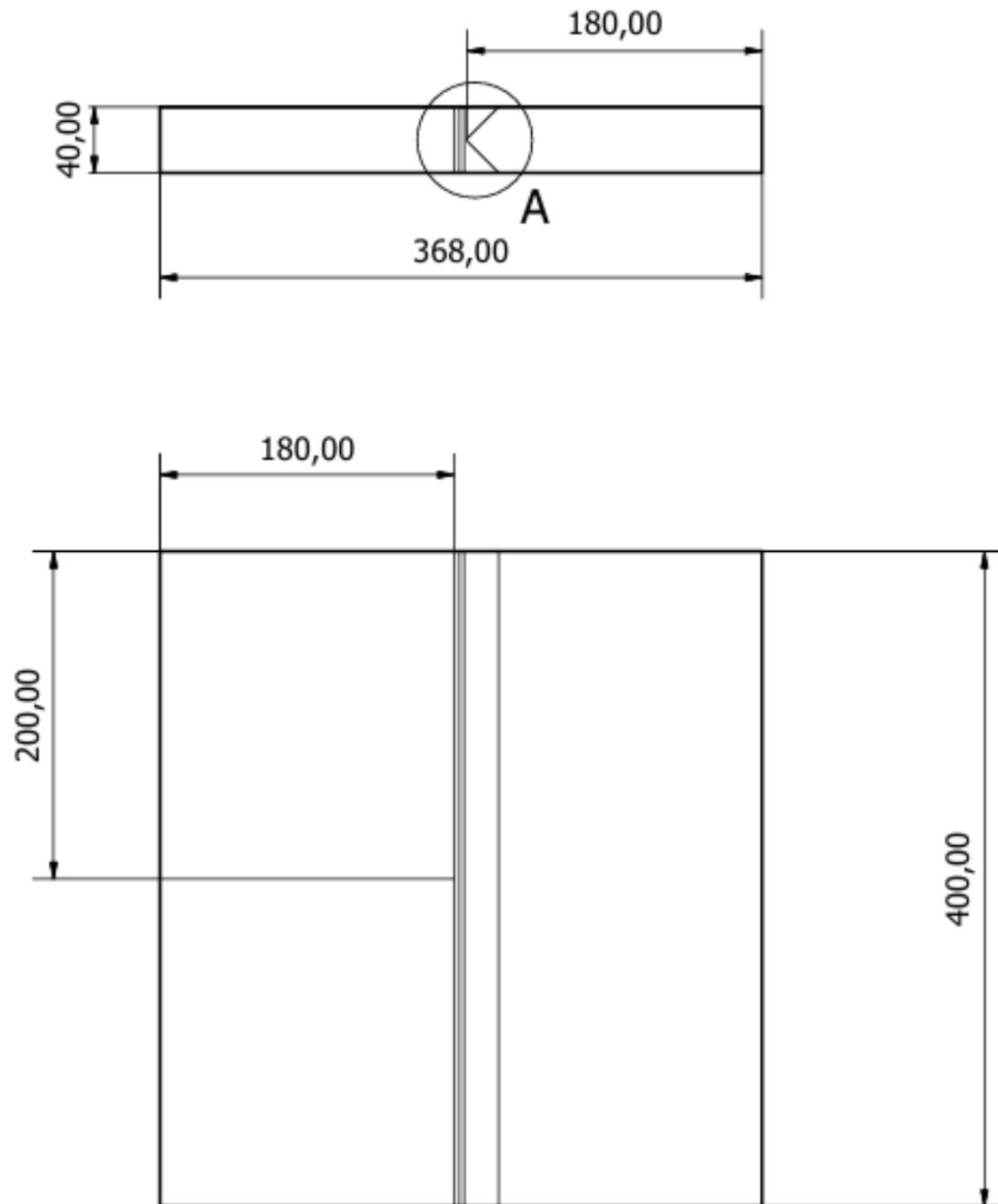
SECTION C-C



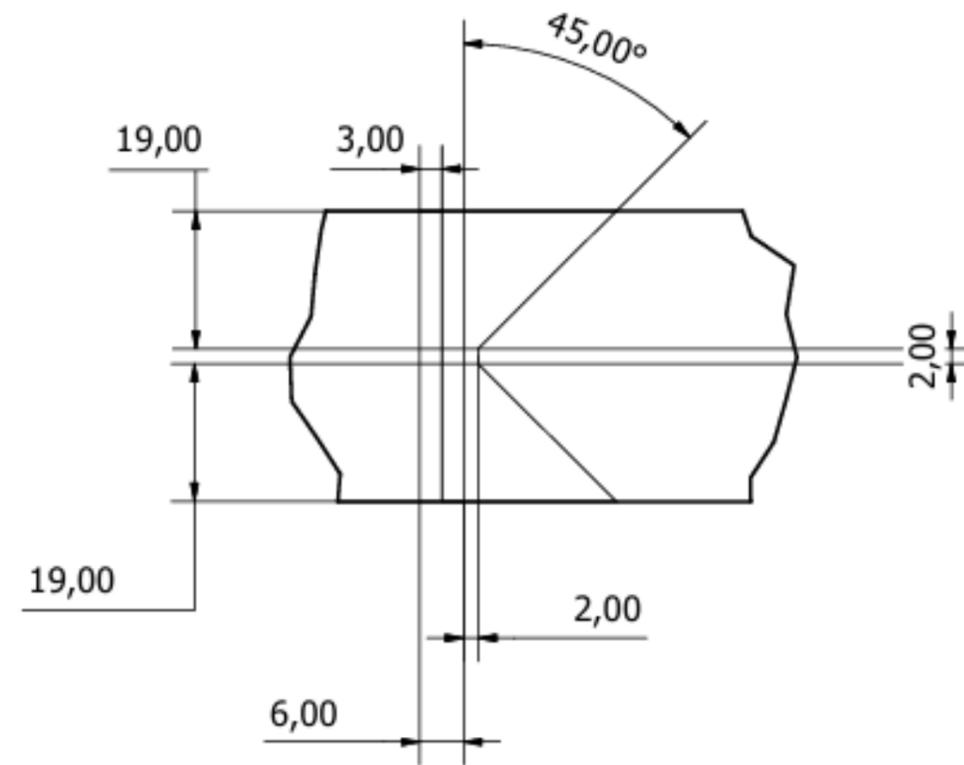
Autor:		<b>Reactor de hidrodesulfuración</b>	
Revisado por:			
Norma aplicada:		ASME Sección VIII Div 2, Edición. 2021	Notas: Todas las cotas están en mm
	Universidad de Cantabria Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicaciones		
	Fecha: 03 febrero 2022	Escala:	



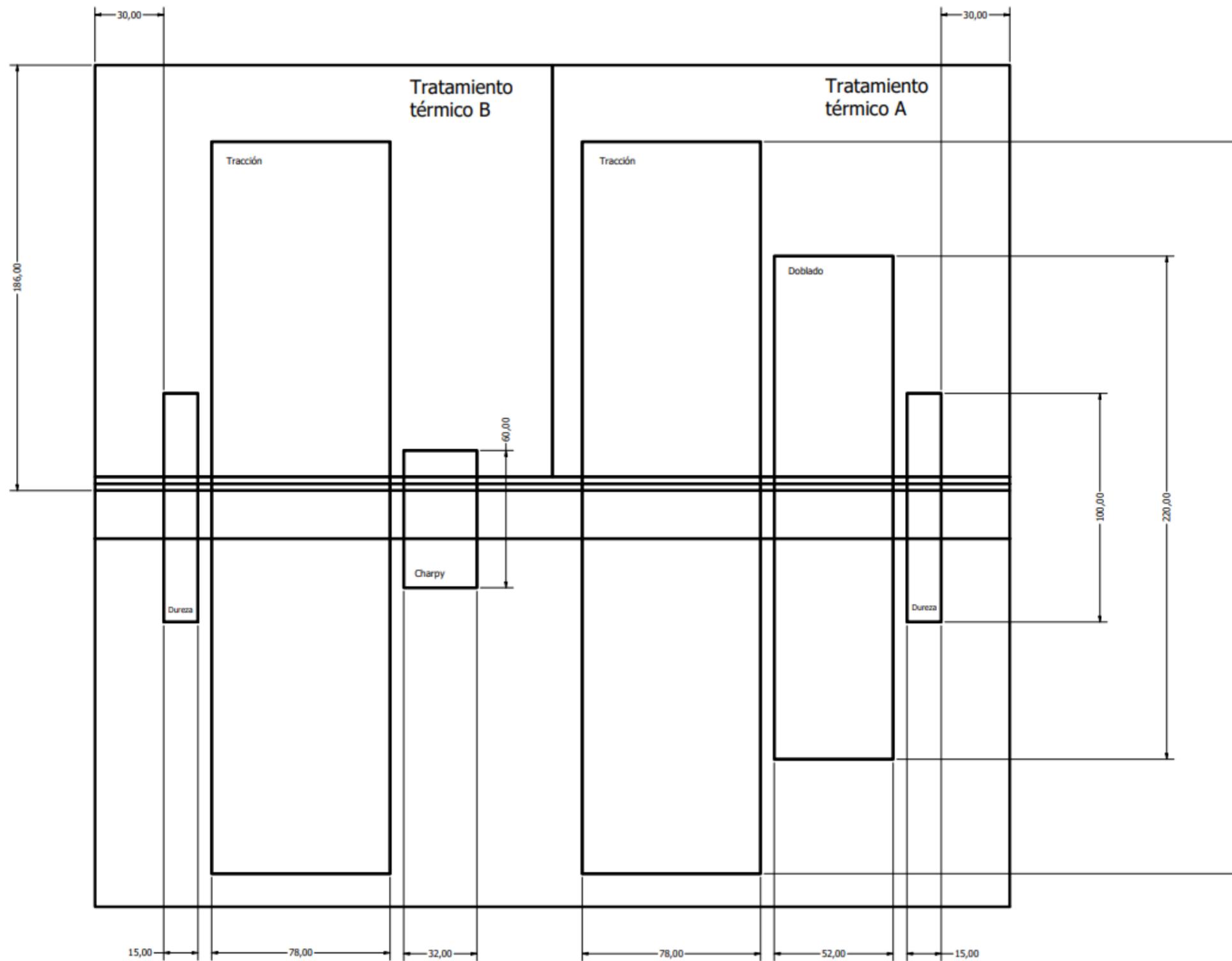
Autor:		Spool salida del catalizador	
Revisado por:			
Norma aplicada:	ASME Sección VIII Div 2, Edición. 2021	Notas: Todas las cotas están en mm	
	Universidad de Cantabria Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicaciones		
	Fecha: 03 febrero 2022	Escala:	



A ( 1 : 1 )

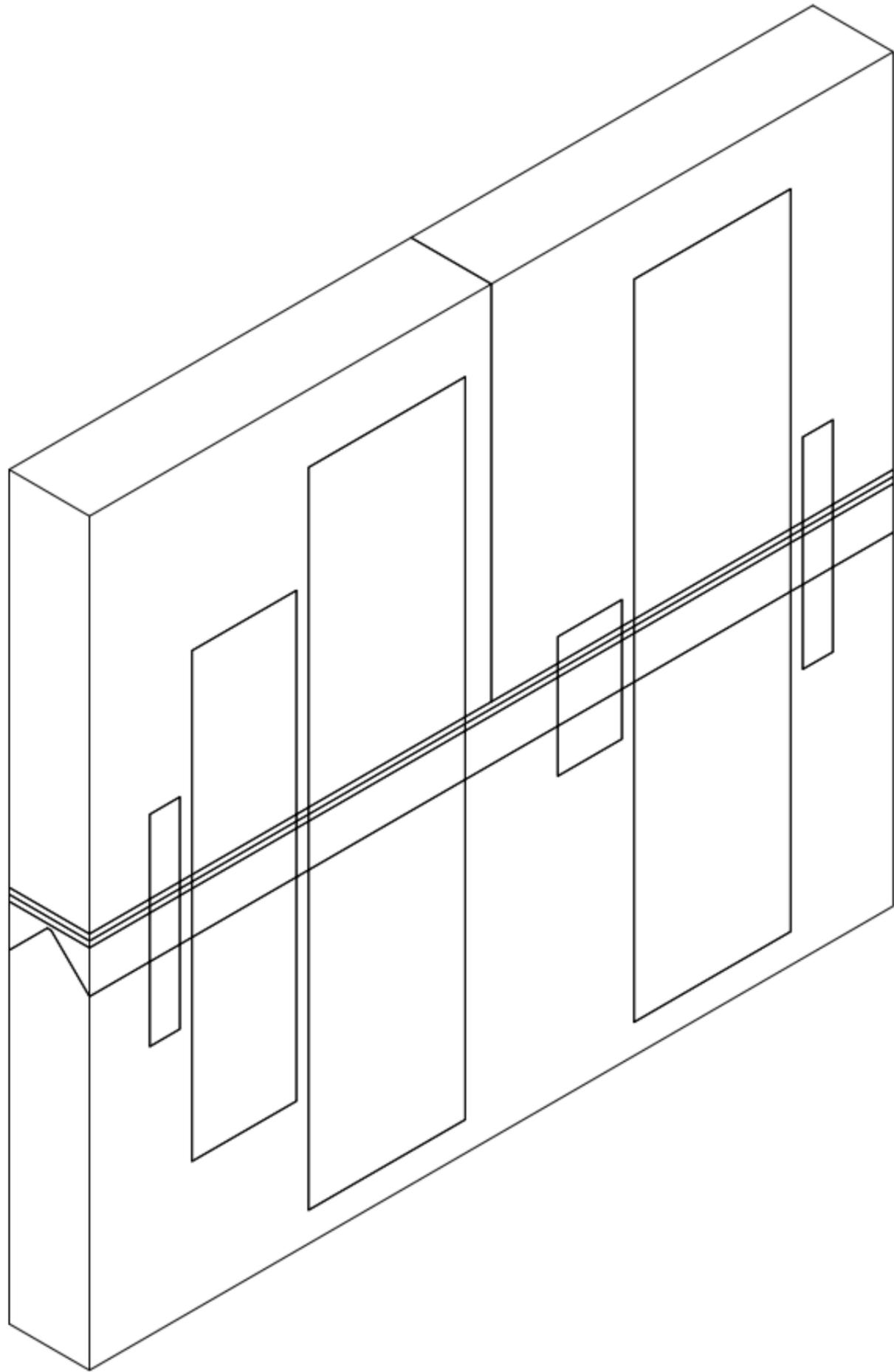


Autor:	Sonia García Gil	Cupón de soldadura	
Revisado por:			
Norma aplicada:	ASME Sec. IX Edición 2023	Notas: Todas las cotas están en mm	
	Universidad de Cantabria Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicaciones		
	Fecha: 29 mayo 2024	Escala: 1:4	
			Hoja: 1/1

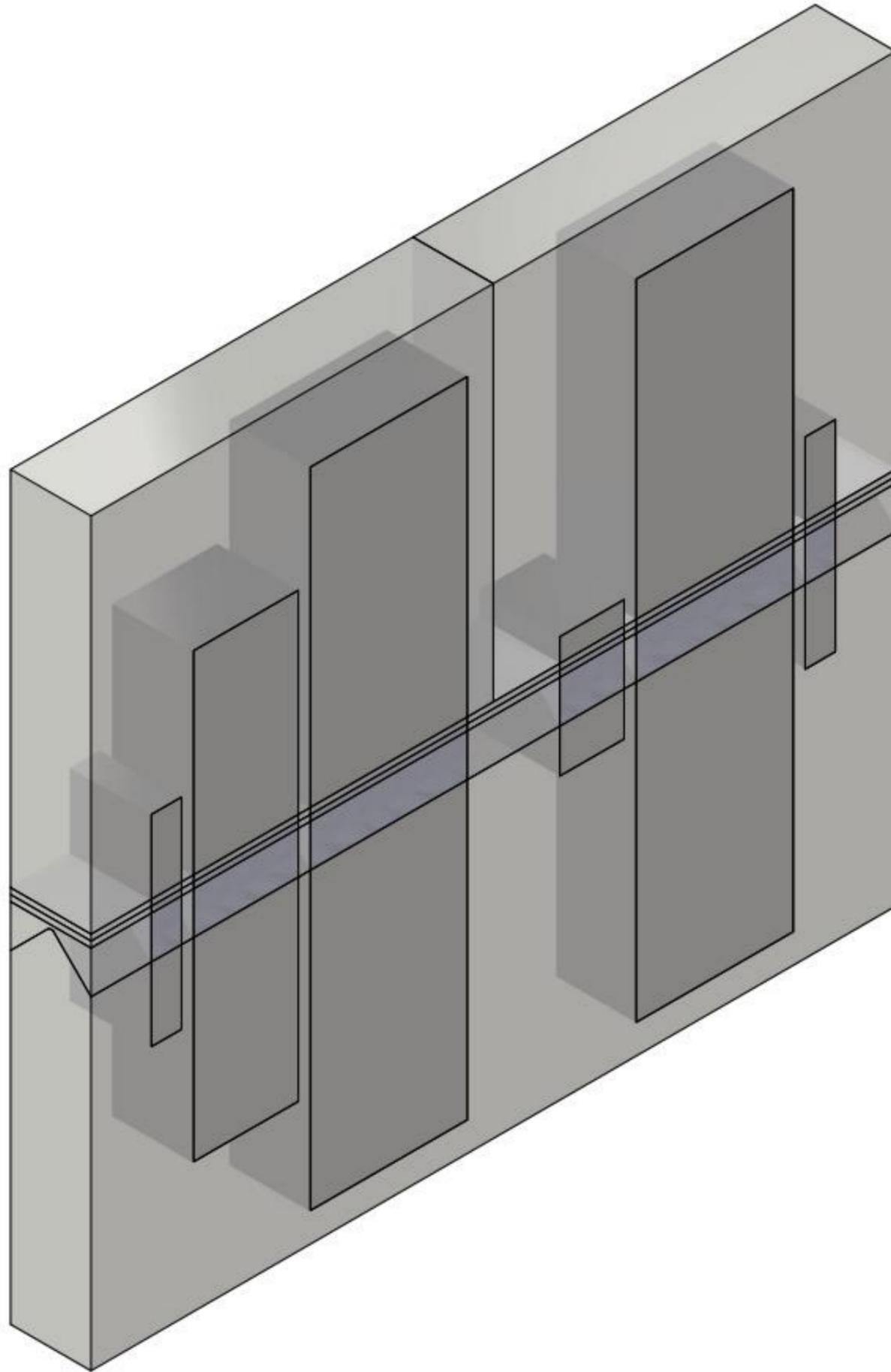


NOTA: Distancia entre bloques 6 mm

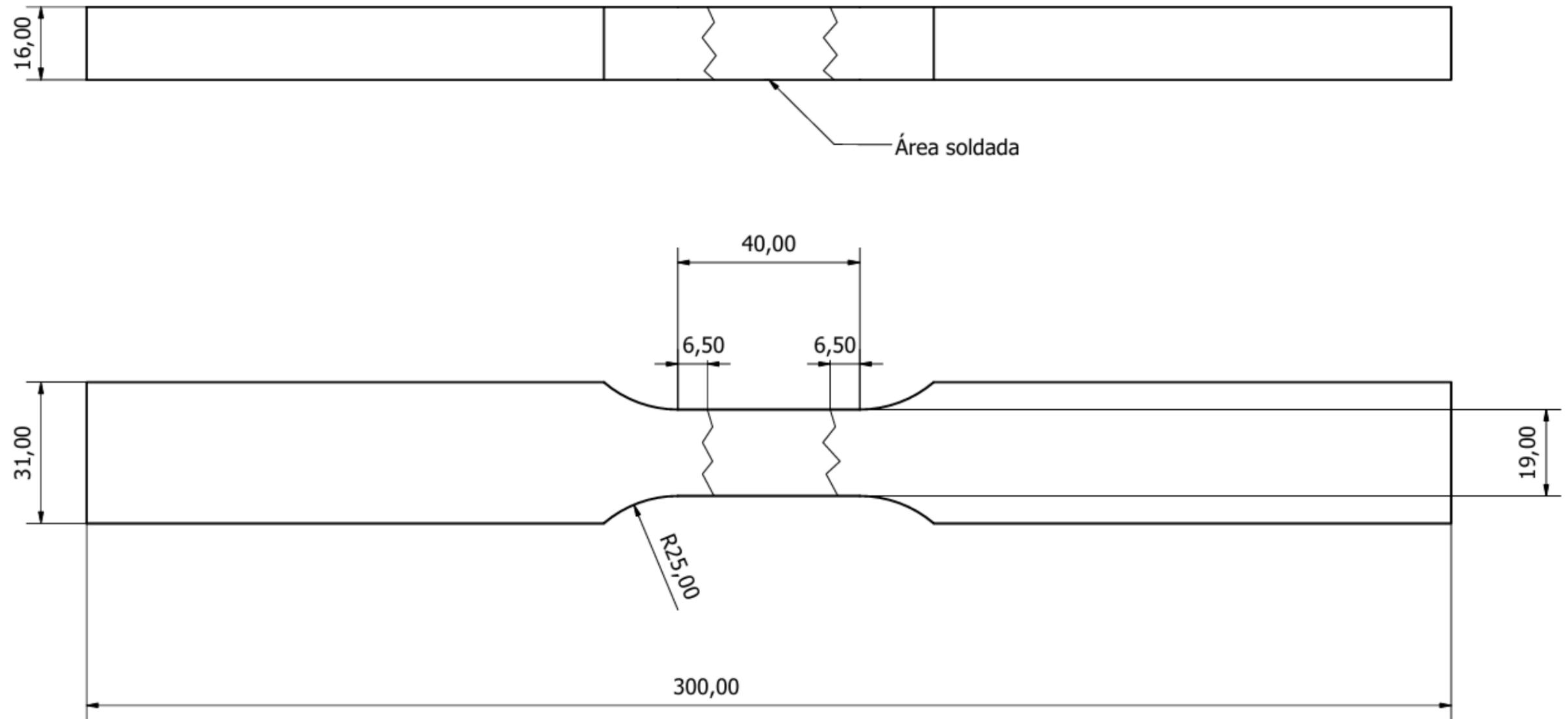
Autor:	Sonia García Gil	<b>Disposición de las probetas</b>
Revisado por:		
Norma aplicada:	ASME Sección IX, Edición. 2023	Notas: Todas las cotas están en mm
	Universidad de Cantabria Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicaciones	
	Fecha: 20 junio 2024	Escala: 1:1 N.º de plano: 4 Hoja: 1/3



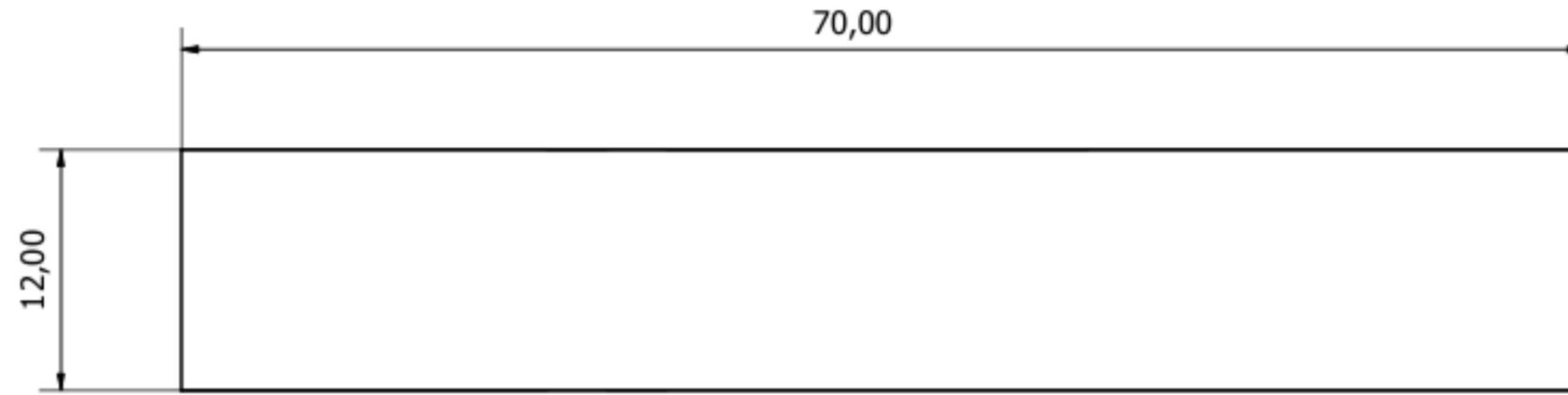
Autor:	Sonia García Gil	<b>Disposición de las probetas</b>	
Revisado por:			
Norma aplicada:	ASME Sección IX, Edición. 2023	Notas: Todas las cotas están en mm	
	Universidad de Cantabria Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicaciones		
	Fecha: 20 junio 2024	Escala: 1:1	N.º de plano: 5



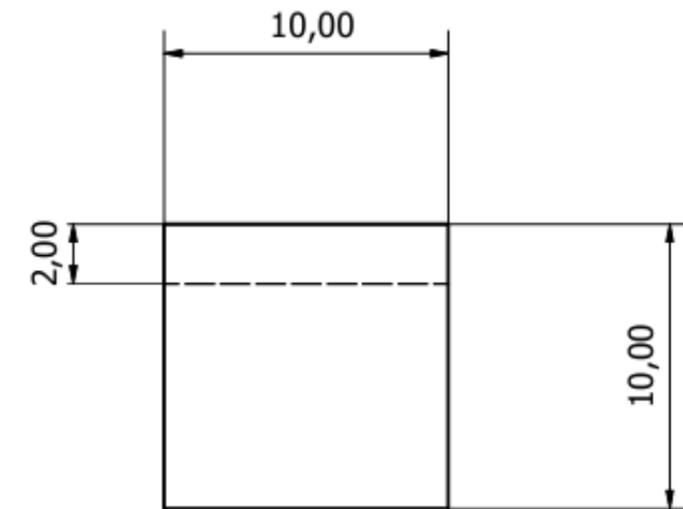
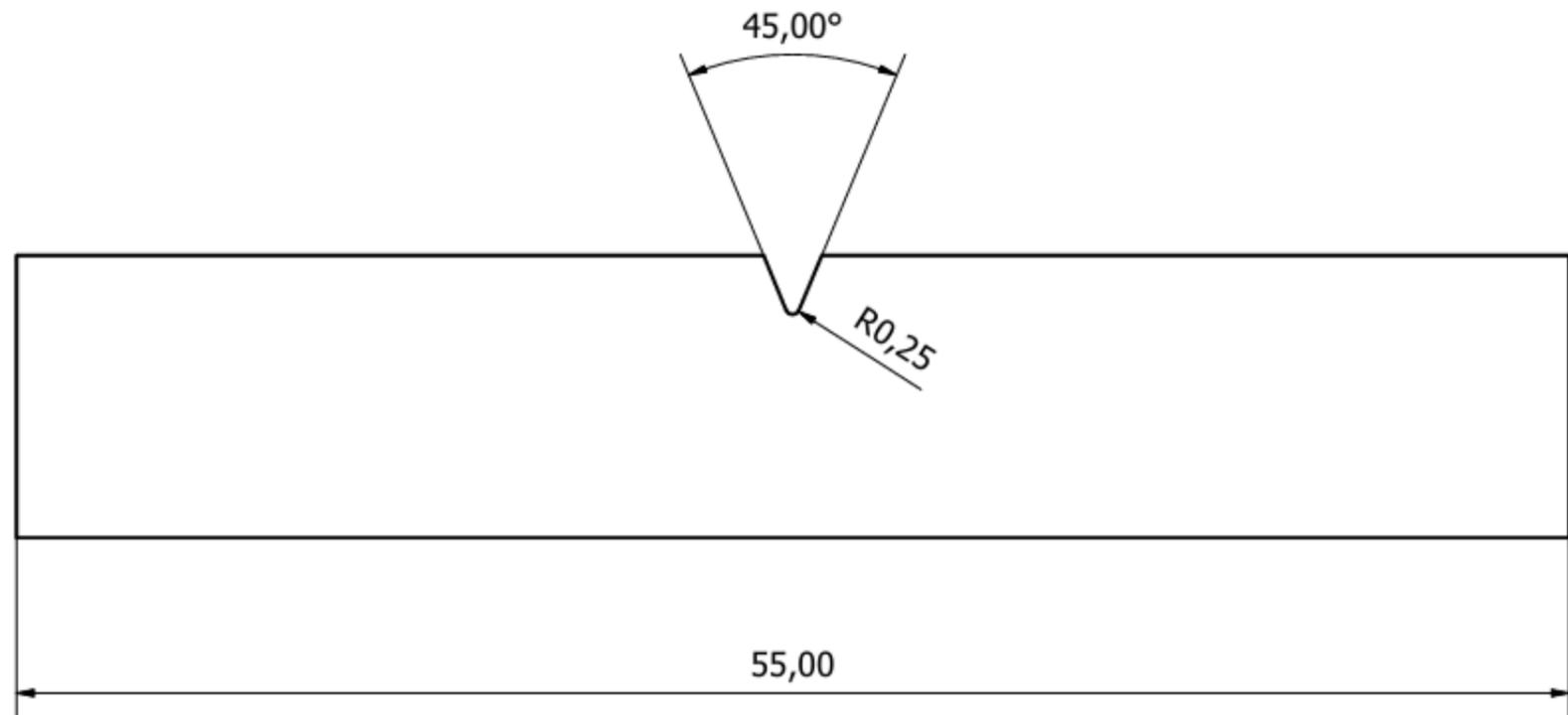
Autor:	Sonia García Gil	<b>Disposición de las probetas</b>	
Revisado por:			
Norma aplicada:	ASME Sección IX, Edición. 2023	Notas: Todas las cotas están en mm	
	Universidad de Cantabria Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicaciones		
	Fecha: 20 junio 2024	Escala: 1:1	N.º de plano: 6



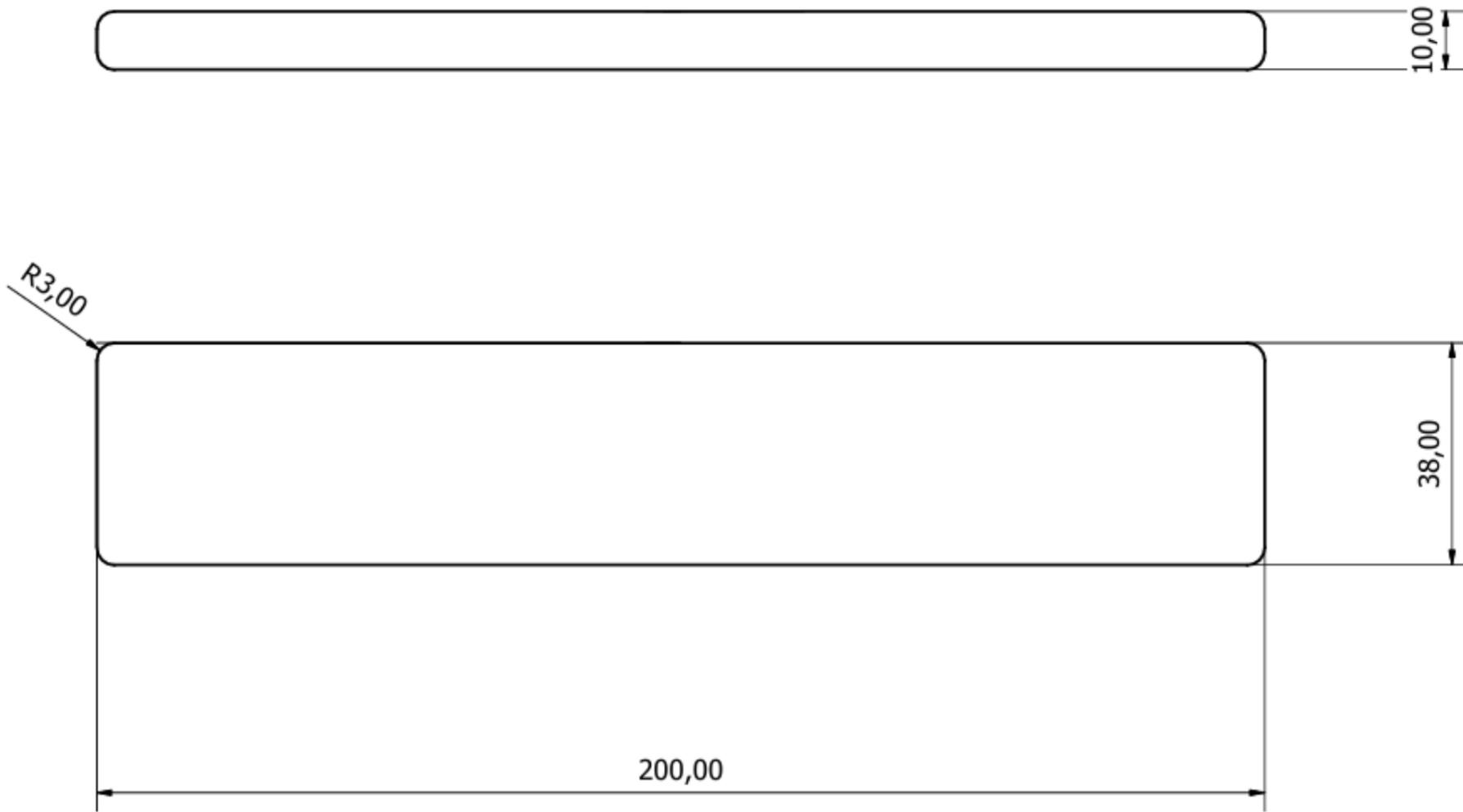
Autor:	Sonia García Gil	<b>Probeta para el ensayo de tracción</b>	
Revisado por:			
Norma aplicada:	ASME Sec. IX Edición 2023	Notas: Todas las cotas están en mm	
	Universidad de Cantabria		
	Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicaciones		
	Fecha: 29 mayo 2024	Escala: 1:1	N.º de plano: 7 Hoja: 1/1



Autor:	Sonia García Gil	<b>Probeta para el ensayo de dureza</b>	
Revisado por:			
Norma aplicada:	ISO 6507-1 y ISO 9015-23	Notas: Todas las cotas están en mm	
	Universidad de Cantabria Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicaciones		
	Fecha: 29 mayo 2024	Escala: 3:1	N.º de plano: 8



Autor:	Sonia García Gil	<b>Probeta para el ensayo de impacto</b>	
Revisado por:			
Norma aplicada:	ASTM A370	Notas: Todas las cotas están en mm	
	Universidad de Cantabria Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicaciones		
	Fecha: 29 mayo 2024	Escala: 4:1	N.º de plano: 9 Hoja: 1/1



Autor:	Sonia García Gil		<b>Probeta para el ensayo de doblado</b>
Revisado por:			
Norma aplicada:	ASME Sec. IX Edición 2023		Notas: Todas las cotas están en mm
	Universidad de Cantabria Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicaciones		
	Fecha: 29 mayo 2024	Escala: 1:1	N.º de plano: 10

---

# **DOCUMENTO N°4: PLIEGO DE CONDICIONES**

---

## ÍNDICE

<b>4 PLIEGO DE CONDICIONES .....</b>	<b>136</b>
<b>4.1 DISPOSICIONES GENERALES.....</b>	<b>136</b>
4.1.1 Objetivo .....	136
4.1.2 Normativa y reglamentación .....	136
4.1.3 Formación y personal .....	137
4.1.4 Plazos de ejecución .....	137
4.1.5 Rescisión del contrato.....	137
<b>4.2 DISPOSICIONES FACULTATIVAS.....</b>	<b>138</b>
<b>4.3 DISPOSICIONES ECONÓMICAS .....</b>	<b>138</b>
<b>4.4 PLIEGO DE CONDICIONES TÉCNICAS PARTICULARES.....</b>	<b>139</b>
4.4.1 Especificaciones de los materiales .....	139
4.4.2 Especificaciones de la fabricación del cupón.....	141
4.4.3 Especificaciones de los ensayos.....	141

## **4 PLIEGO DE CONDICIONES**

El pliego de condiciones establece las condiciones de tipo administrativo, técnico, normativo, económico y laboral, de todos los aspectos relacionados con la ejecución del Proyecto. Su finalidad es resolver cualquier duda que pueda surgir durante su desarrollo y evitar interpretaciones erróneas.

### **4.1 DISPOSICIONES GENERALES**

#### **4.1.1 Objetivo**

Por un lado, el cliente contrata los procesos de soldadura y recargue que requiere un reactor de deshidrodesulfuración para su fabricación a una entidad llamada en adelante proveedor especializada en la realización de este tipo de trabajos.

Por otro lado, el proveedor proporciona las actividades contratadas que quedan definidas en este documento, el cual establece cualquier duda que pueda surgir entre las partes tanto en responsabilidades como aspectos de ejecución del proyecto.

Con este fin se acuerda establecer un contrato privado entre el cliente y el proveedor, sus condiciones deben ser claras con el objetivo de evitar malinterpretaciones entre las dos partes firmantes. Si bien podrá elevarse ante un fedatario público si fuese requerido por alguna de las partes implicadas.

El idioma del contrato y de la documentación será el inglés.

Para poder realizar el trabajo, primero es necesaria la cualificación de los procesos de soldadura mediante la emisión de un Procedimiento de Cualificación de Soldadura o PQR y una vez aprobado, el proveedor queda habilitado para realizar la soldadura cualificada.

Aprovechando la cualificación de un proceso concreto, se realiza el análisis de las propiedades mecánicas obtenidas tras los tratamientos térmicos siendo objeto principal de este trabajo.

#### **4.1.2 Normativa y reglamentación**

El proveedor queda obligado a cumplir la legislación laboral vigente, así como la contratación del seguro de responsabilidad civil, del seguro de accidentes y las obligaciones sociolaborales que el reglamento vigente determine.

Además, todas las actividades que deben realizarse para ejecutar el Proyecto deben cumplir con los reglamentos de seguridad y normas que son de obligado cumplimiento tanto a nivel nacional como internacional y establecen las disposiciones mínimas de seguridad y salud para el uso de equipos de trabajo y prevención de riesgos laborales.

Antes del comienzo de la ejecución de los trabajos el proveedor debe cumplir con diversas normas medioambientales y acreditar que está en posesión de los certificados del sistema de gestión ambiental correspondientes. De esta forma se asegura que el impacto ecológico sea mínimo y se asegura la sostenibilidad de los trabajos implicados en el proyecto.

### **4.1.3 Formación y personal**

El proveedor tiene la responsabilidad de proporcionar a todo el personal a su cargo la formación en todas aquellas materias involucradas en el proceso de ejecución de los trabajos, incluyendo:

- Cursos de prevención de riesgos laborales e higiene adecuados a cada puesto de trabajo.
- Formación medioambiental para la concienciación relativa a los residuos generados.
- Formación sobre el uso adecuado de los elementos de protección tanto individual como colectiva, así como de la provisión de todos los EPIs necesarios.

### **4.1.4 Plazos de ejecución**

Mediante el contrato establecido entre el cliente y el proveedor se acuerdan las fechas límite de emisión y aprobación del PQR, realización de inspecciones y entrega de los componentes acabados.

### **4.1.5 Rescisión del contrato**

El contrato podrá ser rescindido de manera unilateral por cualquiera de las partes y con ello obligará a la parte que rescinde a una indemnización definida en el propio contrato.

Dicha indemnización será calculada de acuerdo con la fase de ejecución en la que se encuentren los trabajos y los pagos ya realizados.

Se considerarán motivos de fuerza mayor para la rescisión del contrato las siguientes:

- Actuación consciente contraria a la ley o voluntad de engañar a la otra parte.
- Subcontratación de cualquier tarea sin la aprobación del cliente.

- Quiebra económica.
- Entrada en situación de concurso de acreedores.
- Entrada en situación de expediente regulatorio de empleo.

En caso de disputa entre las partes la prioridad será siempre alcanzar un acuerdo amistoso, si esto no fuese posible ambas partes acuerdan someterse a la jurisdicción de los Tribunales Administrativos.

## 4.2 DISPOSICIONES FACULTATIVAS

En este apartado quedan descritas las responsabilidades por parte del proveedor durante la ejecución del proyecto.

- **Director de proyectos:**  
Responsable de establecer los objetivos y de planificar y gestionar los recursos necesarios para alcanzarlos. Además de supervisar y aprobar las tareas realizadas.
- **Ingeniero técnico:**  
Genera la documentación necesaria y controla los trabajos implicados en el desarrollo de las soldaduras. Diseña y desarrolla los procesos de soldadura para que se ajusten a los requerimientos del cliente y de las normativas optimizando su eficiencia y calidad.
- **Responsable de calidad:**  
Encargado de garantizar la calidad de los componentes y procesos.
- **Jefe de taller:**  
Supervisa y organiza todos los trabajos de mecanizado y soldadura que se realizan.
- **Técnicos y personal especializado:**  
Soldadores certificados que ejecutan los trabajos de soldadura, técnicos de mantenimiento encargados del mantenimiento diario y preventivo de la maquinaria e inspectores ya sean de la propia entidad, por parte del cliente o subcontratados para verificar el buen desarrollo de los trabajos.
- **Todos los trabajadores:**  
Deben cumplir en todo momento tanto la legislación vigente como las normas internas de la entidad.

## 4.3 DISPOSICIONES ECONÓMICAS

Los precios de los materiales, mano de obra y todos los costes asociados al proyecto se recogerán en el presupuesto. Se realizará un presupuesto inicial el cual una vez firmado por ambas partes implicadas debe cumplirse. Siempre que las dos partes estén de acuerdo,

puede sufrir posteriores modificaciones en caso de necesidad ya sea por cambios realizados por partes del cliente o del proveedor o por la variación de los precios de mercado.

Para asegurar el pago adecuado de los trabajos realizados durante el proyecto, ambas partes acuerdan las siguientes modalidades de pago:

- El 30% del total del importe a la firma del contrato.
- Un 20% en un plazo no superior a 60 días naturales desde la aprobación del PQR.
- El 50% restante a la entrega del producto acabado.

Todos los pagos se efectuarán a 30 días de la fecha de factura y la moneda utilizada para la totalidad de los pagos será el EURO (€).

Todos los suministros y gastos derivados de los servicios de agua y electricidad necesarios para la realización del Proyecto serán a cuenta del cliente.

Cuando los plazos de entrega estipulados sufran cualquier tipo de incumplimiento, en el contrato quedaran definidas las penalizaciones, tanto los importes como los días de demora.

Dichas penalizaciones serán descontadas de la cantidad total del pago final y el proveedor no podrá reclamarlas en ninguna circunstancia.

## **4.4 PLIEGO DE CONDICIONES TÉCNICAS PARTICULARES**

El cliente proporciona una especificación técnica aplicable a todos los procesos de recargue por materiales resistentes a la corrosión y a las soldaduras a tope realizados en recipientes a presión.

En dicha especificación se concretan los materiales, las posiciones de los componentes soldados, la forma de cualificar los procesos, los tratamientos térmicos aplicables y los ensayos que deben realizarse entre otros aspectos.

Para la fabricación y desarrollo del PQR se aplica la norma ASME Sec. IX: Qualification standard for welding, brazing, and fusing procedures; welders; brazers; and welding, brazing, and fusing operators [11].

### **4.4.1 Especificaciones de los materiales**

Los materiales base especificados y empleados se ajustan a la norma ASME B16.5: Pipe Flanges and Flanged Fittings NPS 1/2 Through NPS 24 Metric/Inch Standard [30].

El acero aleado GR F22 CL3 se sujeta a la especificación SA 182 y el acero inoxidable 304L a la SA 240.

Esta norma americana cubre las especificaciones de presión-temperatura, los materiales, las dimensiones, las tolerancias, el marcado, las pruebas de ensayo y los métodos de designación de las bridas y accesorios para tubería.

Por otro lado, para los materiales de aportación se aplica la norma AWS A5.9/A5.9M: Specification for Bare Stainless Steel Welding Electrodes and Rods [33].

Esta especificación prescribe los requisitos para la clasificación de electrodos de alambre de acero inoxidable, electrodos de tira, alambres y varillas para soldadura por arco metálico con gas, soldadura por arco de tungsteno con gas, soldadura por arco de plasma, soldadura por arco sumergido, soldadura por electroescoria y soldadura por rayo láser de aceros inoxidables y resistentes al calor.

La clasificación de los electrodos de alambre, electrodos de tira, alambres y varillas se basa en su composición química. El contenido de cromo de estos metales de aporte no es inferior al 10,5% y el contenido de hierro supera al de cualquier otro elemento.

Con la compra de los materiales se proporcionan los certificados correspondientes garantizando que las composiciones químicas y las propiedades mecánicas que tienen han sido verificadas y cumplen con los criterios de las normativas.

El cliente requiere el sello ASME U2 activo y la emisión de un MDR (Manufacturer Data Report) separado para cada bobina que se suministre. Cada MDR Parcial deberá ser firmado y sellado por un Inspector Autorizado y registrado en la Junta Nacional.

Asimismo, el fabricante está obligado a que en cada paquete se indiquen los siguientes datos:

- Designación del material según norma.
- Nombre del fabricante.
- Marca
- Numero de colada y/o del lote
- Grado
- Dimensiones (diámetro del hilo)
- Cantidad

Todos los materiales aparte de cumplir con todas las normativas aplicadas se han de conservar y almacenar bajo las condiciones de temperatura y humedad óptimas para su conservación establecidas en la normativa correspondiente.

#### 4.4.2 Especificaciones de la fabricación del cupón

Las secciones del código ASME Sec. IX que describe las diferentes características de las soldaduras son:

- QW-405 Position.
- QW-406 Preheat.
- QW-407 Post Weld Heat Treatment.
- QW-408 Gas.
- QW-409 Electrical Characteristics.
- QW-410 Technique.
- QG-106 Welding Activities Supervised.

Las particularidades y los parámetros de los tratamientos térmicos posteriores a las soldaduras aplicados al cupón de soldadura vienen definidos por el cliente.

#### 4.4.3 Especificaciones de los ensayos

El tipo de ensayo y el número de probetas sometidas a cada prueba dependen de las especificaciones del cliente y de la normativa aplicada.

Los ensayos no destructivos se han realizado en la propia entidad y los ensayos destructivos en un laboratorio, pero en ambos casos se ha acudido a un tercero para subcontratar estos trabajos.

A continuación, se indican los códigos y normas aplicadas para cada tipo de ensayo, cuyas especificaciones deben cumplir con carácter obligatorio.

Ensayos no destructivos (END):

- Ensayo visual
  - ASME Sec. V Edition 2021 - Art.9 Visual Examination [37].
  - Procedimiento interno de la empresa.
  - ASME Sec. IX Edition 2023 - QW-194 Visual Examination – Performance [11].
- Líquidos penetrantes
  - ASME Sec. V Edition 2021 - Art.6 Liquid Penetrant Examination [37].
  - ASME Sec. VIII Div. 2 Edition 2021 – Part 7.5.7 Liquid Penetrant Examination (PT) [29].
- Ensayo radiográfico
  - ASME Sec. V Edition 2021 - Art.2 Radiographic Examination [37].
  - ASME Sec. VIII Div.2 Edition 2021 – Part 7.5.3 Radiographic Examination [29].

**ENSAYOS DESTRUCTIVOS (ED):**

- Ensayo de tracción
  - ASME Sec. IX Edition 2023 – QW-150 Tension Test [11].
  - ASME Sec. IX Edition 2023 – QW-151.1 Reduced Section – Plate [11].
  - ASME Sec. IX Edition 2023 – QW-462.1 (a) Tension – Reduced Section – Plate [11].
  - ASTM E8/E8M Edition 2022 – Standard Test Methods for Tension Testing of metallic Materials [39].
- Ensayo de dureza
  - UNE-EN ISO 6507-1 mayo 2024 – Materiales metálicos. Ensayo de dureza Vickers. Parte 1: Métodos de ensayo (ISO 6507-1:2023) [34].
  - UNE-EN ISO 9015-1 noviembre 2011 – Ensayos destructivos de soldaduras en materiales metálicos. Ensayo de dureza. Parte 1: Ensayo de dureza en uniones soldadas por arco (ISO 9015-1:2001) [35].
  - ASTM E92 Edition 2023 – Standard Test Methods for Vickers hardness and Knoop Hardness of Metallic Materials [40].
- Ensayo de impacto
  - ASTM A370 – Métodos de prueba estándar y definiciones de pruebas mecánicas de productos de acero [36].
  - ASTM E23 Edition 2023 – Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials [41].
- Ensayo de doblado
  - ASME Sec. IX Edition 2023 – QW-161.1 Transversal Side Bend [11].
  - ASME Sec. IX Edition 2023 – QW-462.2 Side Bend [11].
  - ASME Sec. IX Edition 2023 – QW-163 Acceptance Criteria – Bend test [11].

---

## **DOCUMENTO N°5: PRESUPUESTO**

---

## ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS.....	145
ÍNDICE DE TABLAS .....	146
5 PRESUPUESTO.....	147
5.1 PRESUPUESTO DE LOS MATERIALES .....	147
5.2 PRESUPUESTO DE LA MANO DE OBRA .....	148
5.3 PRESUPUESTO DE LOS ENSAYOS .....	149
5.4 PRESUPUESTO FINAL .....	150

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura P1. Costes generales del proyecto.....	150
---	-----

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla P1. Costes del material.....	148
Tabla P2. Costes de la mano de obra.....	149
Tabla P3. Costes de los ensayos realizados.....	149
Tabla P4. Coste total. ....	150

## 5 PRESUPUESTO

En el presente documento se especifica el coste económico asociado al proyecto, haciendo una diferenciación entre:

- Costes de los materiales y componentes.
- Costes de mano de obra.
- Costes de los ensayos no destructivos y destructivos.

La fabricación y ensayo de un cupón de soldadura es un proceso previo requerido antes de implementar la soldadura en el proyecto industrial, esta actividad no supone beneficios directos en la empresa, pero su inversión inicial supone mejora en la calidad, optimización del proceso y reducción de costos a largo plazo.

### 5.1 PRESUPUESTO DE LOS MATERIALES

La fabricación del cupón de soldadura estudiado ha implicado la compra de dos placas de acero, se han adquirido con las dimensiones específicas del cupón por lo que no han requerido un mecanizado posterior.

La cantidad de material de aporte empleado en la soldadura se ha calculado empleando el programa Voestalpine. Este programa permite obtener información aproximada sobre materiales de aportación, temperaturas de precalentamiento o tiempos de enfriamiento en los procesos de soldadura.

Los resultados obtenidos son que aproximadamente se ha empleado 1,34 kg para el recargue y 1,61 kg de material de aportación en la soldadura, pero el material se proporciona en paquetes de 10 kg.

Adicionalmente se tiene en cuenta la cantidad de gas argón empleado en la soldadura GTAW.

Todos los precios incluyen impuestos y son costes finales.

DESCRIPCIÓN	COSTE UNITARIO	CANTIDAD	COSTE TOTAL
Material base F22	62,5 €/dm <sup>3</sup>	2,88 dm <sup>3</sup>	180 €
Material base 304L	45,83 €/dm <sup>3</sup>	2,88 dm <sup>3</sup>	132 €
Material de aporte Thermanit 309L.	10,28 €/kg	10 kg	102,8 €
Material de aporte Thermanit H-347.	11,51 €/Kg	10 kg	115,1 €
Gas de respaldo 99.999% Argón.	5 €/h	8 horas	40 €
Pallet de transporte	20 €/unidad	1 unidad	20 €
Transporte del material base.	60 €/unidad	1 unidad	60 €
TOTAL			649,9 €

Tabla P1. Costes del material.

El precio total del material empleado es de **seiscientos cuarenta y nueve euros con noventa céntimos**.

## 5.2 PRESUPUESTO DE LA MANO DE OBRA

Para la estimación del coste de la mano de obra se proporcionan valores aproximados. Se incluye la realización del cupón de soldadura, la generación de la documentación necesaria y su inspección.

Las cantidades son brutas donde se tienen en cuenta diversos gastos, a parte del salario neto, como la cotización a la seguridad social, seguros de accidentes laborales y enfermedades profesional, vacaciones, pagas extra, formación y equipo, ya sea de protección como herramientas o material necesario para el trabajador.

DESCRIPCIÓN	COSTE UNITARIO	CANTIDAD	COSTE TOTAL
Preparación del cupón de soldadura.	40 €/h	2 horas	80 €
Trabajo del soldador.	40 €/h	8 horas	320 €
Supervisor de la soldadura.	60 €/h	4 horas	240 €
Preparación de documentación necesaria.	60 €/h	12 horas	720 €
Inspección y firma de la tercera parte.	585 €/PQR	1 PQR	585 €
TOTAL			1.945 €

Tabla P2. Costes de la mano de obra.

El coste total en mano de obra es de aproximadamente **mil novecientos cuarenta y cinco euros**.

### 5.3 PRESUPUESTO DE LOS ENSAYOS

Los datos de los costes de la realización de los ensayos son aproximados.

Cada coste incluye a parte de la mano de obra requerida para la realización de cada ensayo, la extracción de las probetas, el material necesario, el análisis de los datos obtenidos y la realización de los certificados correspondientes.

DESCRIPCIÓN	COSTE UNITARIO	CANTIDAD	COSTE TOTAL
Ensayo visual.	50 €/h	0,5 h	25 €
Ensayo de líquidos penetrantes.	70 €/h	1 h	70 €
Ensayo radiográfico.	70 €/h	2 h	140 €
Trasporte al laboratorio.	60 €/Unidad	1 unidad	60 €
Mecanizado del cupón de soldadura y extracción de las muestras de prueba.	40 €/h	11 h	440 €
Ensayo de tracción.	100 €/h	5 h	500 €
Ensayo de dureza.	80 €/h	4 h	320 €
Ensayo de impacto.	90 €/h	4 h	360 €
Ensayo de doblado.	80 €/h	3 h	240 €
TOTAL			2.155 €

Tabla P3. Costes de los ensayos realizados.

La realización de los ensayos no destructivos y destructivos de las probetas implica un coste total aproximado de **dos mil ciento cincuenta y cinco euros**, siendo de este presupuesto

un 10,9% correspondiente a los ensayos no destructivos y un 89,1 % a los ensayos destructivos

## 5.4 PRESUPUESTO FINAL

DESCRIPCIÓN	COSTE TOTAL
Materiales	649,9 €
Mano de obra	1.945 €
Ensayos	2.155 €
TOTAL	4.749,9 €

Tabla P4. Coste total.

El coste total del proyecto es de **cuatro mil setecientos cuarenta y nueve euros con noventa céntimos**.

Como se puede ver en la Figura P1 los principales focos de coste son la mano de obra y los ensayos destructivos, seguido del material y por ultimo y menos costos los ensayos no destructivos.

Costes del proyecto

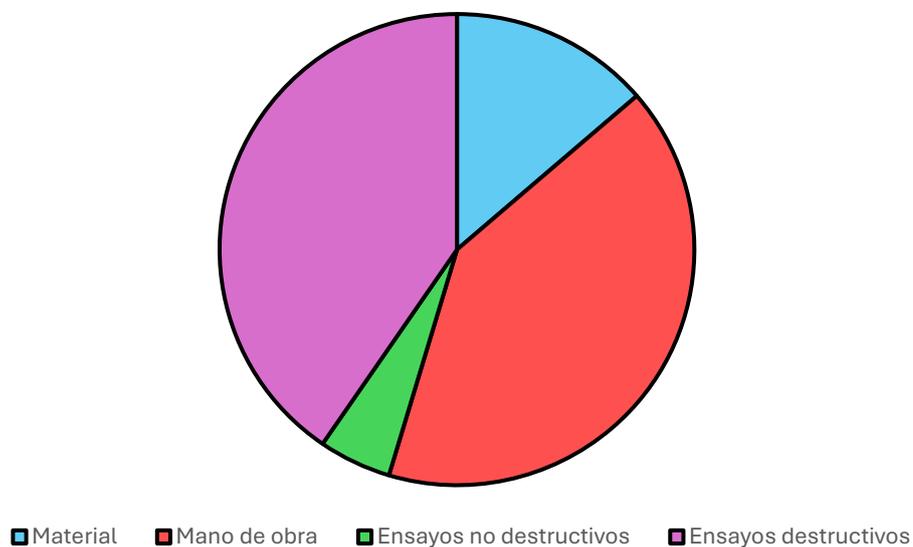


Figura P1. Costes generales del proyecto.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] K. Oy, «KEMPPi,» [En línea]. Available: <https://www.kemppi.com/es-ES/asistencia/fundamentos-de-soldadura/que-es-la-soldadura/>.
- [2] Soldaduracap3. [En línea]. Available: <https://soldaduracap3.wordpress.com/procesos-de-soldadura/>. [Último acceso: 17 Mayo 2024].
- [3] L. Castañón, «Procesos de fabricación,» de *Soldaduras*.
- [4] KUKA, «KUKA,» 2024. [En línea]. Available: <https://www.kuka.com/es-es/productos-servicios/tecnolog%C3%ADas-de-procesamiento/soldadura-por-fricci%C3%B3n-y-agitaci%C3%B3n>. [Último acceso: 18 Mayo 2024].
- [5] W. S. Juan, «Welding San Juan,» 18 Agosto 2023. [En línea]. Available: <https://weldingsanjuan.com/la-soldadura-oxiacetilenica-en-que-consiste/>. [Último acceso: 27 Mayo 2024].
- [6] B. Labrador, «STARGAS,» 21 Septiembre 2018. [En línea]. Available: <https://stargas.com.ve/blog/proceso-de-soldadura-por-arco-electrico-con-electrodo-revestido-smaw/>.. [Último acceso: 25 Abril 2024].
- [7] U. -. F. R. Mendoza. [En línea]. Available: [http://www1.frm.utn.edu.ar/cmateriales/Trab.%20Inves.\(alum\)/Soldadura%20MAG/SOLDADURA%20POR%20ARCO%20SUMERGIDO.htm](http://www1.frm.utn.edu.ar/cmateriales/Trab.%20Inves.(alum)/Soldadura%20MAG/SOLDADURA%20POR%20ARCO%20SUMERGIDO.htm). [Último acceso: 25 Abril 2024].
- [8] L. Electric, «Lincoln Electric,» [En línea]. Available: <https://www.lincolnelectric.com/-/media/images/c32400-innershield-welding-guide-cover/c8100-aluminum-mig-welding-guide/content-card-weldingguides-saw.ashx?h=430&iar=0&w=602&hash=004C1DBD8676D860FFD364010301E5B2..>. [Último acceso: 25 Abril 2024].
- [9] Sordonez, 29 Septiembre 2003. [En línea]. Available: <https://metalurgia.usach.cl/sites/metalurgia/files/documentos/capitulo26.pdf>. [Último acceso: 25 Abril 2024].
- [10] «Sotec Ingeniería,» [En línea]. Available: <https://sotecingenieria.com/soldadura-y-equipos/>. [Último acceso: 25 Abril 2024].
- [11] T. A. S. o. M. Engineers, *Normativa ASME sec IX 2023*, New York, 2023.
- [12] U.-E. ISO, *Soldeo y técnicas afines. Posiciones de trabajo (ISO 6947:2019)*, 2019.
- [13] «Blogspot,» 6 Febrero 2014. [En línea]. Available: <https://procesosmetalurgicostecnicocentral.blogspot.com/2014/06/soldabilidad.html>. [Último acceso: 26 Abril 2024].

- [14] «Area Academica de Metalurgia,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.areametalurgia.com/post/qu%C3%A9-es-la-zona-afectada-por-el-calor-zat>. [Último acceso: 26 Abril 2024].
- [15] G. D. Pacheco, «UNAM,» 2019. [En línea]. Available: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/16941/Tesis.pdf?sequence=3&isAllowed=y>. [Último acceso: 2 Mayo 2024].
- [16] M. I. EOS, «M.I.E.S.A.,» 21 Febrero 2017. [En línea]. Available: <https://www.miesa.com/single-post/2017/02/21/soldadura-y-tratamientos-t%C3%A9rmicos>.
- [17] i. E. n. d. S.L., «ipunto Ensayos no destructivos S.L.,» [En línea]. Available: <https://ipend.es/ensayos-no-destructivos/inspeccion-visual-vt>.
- [18] AEISA, «AEISA,» [En línea]. Available: <https://www.aeisa.com.mx/liquidados-penetrantes-todo-lo-que-tienes-que-saber-sobre-esta-prueba-no-destructiva/>. [Último acceso: 2 Mayo 2024].
- [19] SCI, «SCI Control & Inspeccion,» [En línea]. Available: <https://scisa.es/ensayos-no-destructivos-y-laboratorio-metalurgico/ensayo-no-destructivos/ensayos-por-particulas-magneticas/>. [Último acceso: 3 Mayo 2024].
- [20] ILOG, «ILOG S.A. de C.V.,» [En línea]. Available: [http://www.llogsa.com/Descargas/Ultratips/Ediciones/Utipsed\\_161.php](http://www.llogsa.com/Descargas/Ultratips/Ediciones/Utipsed_161.php). [Último acceso: 3 Mayo 2024].
- [21] Nodestructivos, «Nodestructivos,» [En línea]. Available: <https://nodestructivos.com/rt/principio-de-radiografia-industrial/>. [Último acceso: 3 Mayo 2024].
- [22] Á. A. d. Metalurgia, «Área Académica de Metalurgia,» [En línea]. Available: <https://www.areametalurgia.com/post/la-madre-de-todas-las-pruebas-a-los-metales-prueba-de-doblez>. [Último acceso: 3 Mayo 2024].
- [23] TESLA, «Laboratorio De Ensayos No Destructivos TESLA,» [En línea]. Available: <https://endtesla.mx/servicio/prueba-de-dureza>. [Último acceso: 3 Mayo 2024].
- [24] Struers, «Struers Ensuring Certainty,» [En línea]. Available: <https://www.struers.com/es-ES/Knowledge/Hardness-testing#hardnesstestinghowto>. [Último acceso: 3 Mayo 2024].
- [25] Borja, «Bruschenko Blog,» Tecnología Industrial, [En línea]. Available: <https://bruschenko-b2.blogspot.com/2016/10/ensayo-de-resiliencia.html>. [Último acceso: 3 Mayo 2024].
- [26] S. Steel, «Sedipsa Steel,» [En línea]. Available: <https://www.sedipsasteel.com.mx/macroataque.html>. [Último acceso: 3 Mayo 2024].
- [27] G. d. A. Cía, «Cía, General de Aceros,» 23 Mayo 2022. [En línea]. Available: <https://www.cga.com.co/blog/que-significa-wps-y-pqr-en->



oceli/dokumentace/L1\_4489\_en\_\_Thermanit%20309L\_ss\_en\_19.pdf. [Último acceso: 2024].

[46] «Cemausa,» Junio 2024. [En línea]. Available:  
<https://www.cemausa.com/docs/DUREZA.pdf>.

[47] T. A. S. o. M. Engineers, *ASME Sec II parte C*, New York, 2019.