



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA Y
METALÚRGICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA



ESTUDIO COMPARATIVO DE LOS PROCESOS DE SOLDADURA
SMAW Y GTAW EN ACEROS INOXIDABLES AUSTENÍTICOS
AISI 304 PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA A LA DUREZA

TESIS

PRESENTADA POR:

Bach. NADIR CANAHUA ANCHAPURI

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO METALURGISTA

PUNO – PERÚ

2022



DEDICATORIA

A mis padres Antonio Canahua y Teodora Anchapuri ellos son mi motivación y lo más valioso en la vida, por el continuo apoyo incondicional, el encaminar de mis queridos hermanos que me enseñaron a conseguir los propósitos con esfuerzo, trabajo y perseverancia, a mi abuelo Antonio Anchapuri que descansa en el cielo por su inmenso amor.

Nadir Canahua



AGRADECIMIENTOS

A mi asesor Dr. Walter Sarmiento por la orientación y la exigencia que hicieron posible la realización del presente trabajo de tesis. Muchas gracias.

Como no agradecer a mis jurados por su acertada acotación durante el proceso de revisión de borrador y cada uno de los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica por compartir sus conocimientos que aportaron para mi formación profesional.

Nadir Canahua



ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTOS	
ÍNDICE GENERAL	
ÍNDICE DE FIGURAS	
ÍNDICE DE TABLAS	
ÍNDICE DE ACRÓNIMOS	
RESUMEN	14
ABSTRACT.....	15
CAPÍTULO I	
INTRODUCCIÓN	
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	16
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	17
1.2.1. Problema general.....	17
1.2.2. Problema específicos.....	17
1.3. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN.....	17
1.3.1. Hipótesis general	18
1.3.2. Hipótesis específicas	18
1.4. JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO	18
1.5. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	19
1.5.1. Objetivo general	20
1.5.2. Objetivos específicos	20



CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. MARCO TEÓRICO	21
2.1.1. Acero inoxidable	21
2.1.2. Efectos de los componentes de los aceros inoxidables	21
2.1.3. Clasificación de los aceros inoxidables.....	23
2.1.4. Metalurgia de la soldadura	26
2.1.4.1. Elementos que se forma en el proceso de soldadura.....	27
2.1.5. Procesos de soldadura en aceros inoxidables.....	28
2.1.5.1. Proceso de Soldadura SMAW (Soldadura por Arco Eléctrico con Electrodo Revestido).....	28
2.1.5.2. Proceso de soldadura GTAW (Tungsten Inert Gas).....	30
2.1.6. Electrodo.....	34
2.1.6.1. Electrodo para el proceso de soldadura SMAW.....	34
2.1.6.2 Electrodo para el proceso GTAW	36
2.1.7. Ensayo de Dureza Rockwell	39
2.2. ANTECEDENTES	41

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA DEL ESTUDIO	46
3.2. PERIODO DE DURACIÓN DEL ESTUDIO	46
3.3. PROCEDENCIA DEL MATERIAL ESTUDIADO	47
3.4. POBLACIÓN Y MUESTRA DEL ESTUDIO	48
3.4.1. Población.....	48
3.4.2. Muestra.....	48



3.5. DISEÑO ESTADÍSTICO	49
3.6. PROCEDIMIENTO	49
3.6.1. Metodología	50
3.6.2. Modalidad de la investigación	51
3.6.3. Niveles de la investigación.....	51
3.6.4. Desarrollo del procedimiento de investigación.....	52
3.6.5. Técnicas y procedimientos de recolección de datos	55
3.7. VARIABLES	55
3.8. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	56

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. RESULTADOS	57
4.1.1. Selección de electrodos de trabajo y determinación de los parámetros óptimos de soldadura en la aplicación del proceso SMAW y GTAW en uniones soldadas del acero AISI 304	61
4.1.2. Especificación del procedimiento de soldadura (WPS)	61
4.1.3. Soldadura de placas con procesos SMAW y GTAW.....	62
4.1.4. Especificaciones del procedimiento de soldadura (WPS) del proceso de soldadura SMAW	64
4.1.5. Interpretación de resultados del proceso SMAW con E 308L, E309 y E316L.....	70
4.1.6. Especificaciones del procedimiento de soldadura (WPS) del proceso de soldadura GTAW	71
4.1.7. Interpretación de resultados del proceso de soldadura GTAW con ER308 y ER309.....	74



4.1.8. Selección definitiva de conjuntos de parámetros de soldadura SMAW y GTAW	76
4.1.9. Evaluación de la propiedad mecánica de resistencia de la dureza aplicando el proceso de soldadura SMAW y GTAW en la soldabilidad del acero AISI 304.....	77
4.1.10. Cálculos del ensayo dureza	78
4.1.11. Resultados de ensayo de dureza de soldadura SMAW	80
4.1.12. Interpretación de resultados de los ensayos de dureza del proceso de soldadura SMAW con E 308L-16, E309-16 y E316L-16.....	84
4.1.13. Resultados de ensayo de dureza del proceso de soldadura GTAW	87
4.1.14. Interpretación de resultados de los ensayos de dureza del proceso de soldadura GTAW con ER 308 y ER309	89
4.1.15. Selección definitiva del proceso de soldadura SMAW y GTAW tomando en consideración la resistencia de la dureza HRB	92
4.2. DISCUSIÓN	95
V. CONCLUSIONES.....	97
VI. RECOMENDACIONES	98
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	99
ANEXOS.....	105

Área : Metalurgia Transformativa

Tema : Metalurgia de la Soldadura

FECHA DE SUSTENTACIÓN: 02 de febrero de 2022



ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Componentes que se forma y representación de temperaturas en el proceso de soldadura.	28
Figura 2. Equipo Proceso de soldadura SMAW	28
Figura 3. Proceso de la soldadura SMAW	29
Figura 4. Elementos esenciales de proceso GTAW.....	30
Figura 5. Proceso de la soldadura GTAW	31
Figura 6. Tipos de corriente en el proceso de soldadura GTAW.....	32
Figura 7. Varilla de aporte ER 308L.....	38
Figura 8. Imagen de durómetro con su tabla de dureza Rockwell	40
Figura 9. Flujograma del procedimiento experimental.....	50
Figura 10. Máquina de soldadura GTAW.....	58
Figura 11. Probetas de acero AISI 304 en distintas posiciones	60
Figura 12. Elaboración de probetas con proceso GTAW	60
Figura 13. Preparación de placas del proceso de soldadura SMAW y GTAW	63
Figura 14. Juntas soldadas con proceso SMAW y GTAW.....	77
Figura 15. Descripción del Durómetro	78
Figura 16. Durómetro.....	80
Figura 17. Comparación de Dureza Rockwell (HRB) con variación de 4 mm	84
Figura 18. Comparación de Dureza (HRB) con variación de electrodos de 8 mm.....	85
Figura 19. Comparación de Dureza Rockwell (HRB) con variación de 12 mm	86
Figura 20. Relación de durezas en juntas soldadas SMAW	86



Figura 21. Comparación de dureza (HRB) en soldadura con varilla de 4mm, proceso GTAW.....	89
Figura 22. Comparación de dureza (HRB) en soldadura con varilla de 8 mm, proceso GTAW.....	90
Figura 23. Comparación de dureza (HRB) en soldadura con varilla de 12 mm, proceso GTAW.....	91
Figura 24. Relación de durezas en juntas soldadas GTAW.....	91
Figura 25. Comparación de Procesos de Soldadura SMAW vs. GTAW.....	93



ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Propiedades químicas del acero AISI 304	26
Tabla 2. Propiedades mecánicas del acero inoxidable AISI 304	26
Tabla 3. Características de los gases protectores según la Norma AWS	32
Tabla 4. Propiedades de los electrodos AWS: E 308L-16	34
Tabla 5. Propiedades de los electrodos AWS: E309 L	35
Tabla 6. Electrodos para el proceso GTAW	36
Tabla 7. Clasificación AWS A.5.12 para electrodos de tungsteno	37
Tabla 8. Características varilla de acero inoxidable ER 308L	38
Tabla 9. Propiedades de la varilla de aporte ER 308L	39
Tabla 10. Datos informativos del metal base	57
Tabla 11. Especificación del procedimiento de soldadura (WPS) con E308L-16	64
Tabla 12. Análisis del proceso de soldadura con electrodo E 308L-16	65
Tabla 13. Especificación del procedimiento de soldadura (WPS) con E309L-16	66
Tabla 14. Análisis del proceso de soldadura con electrodo E 309L-16	67
Tabla 15. Especificación del procedimiento de soldadura (WPS) con E316L-16	68
Tabla 16. Análisis del proceso de soldadura con electrodo E 316L-16	69
Tabla 17. Especificación del procedimiento de soldadura (WPS) con ER308L	71
Tabla 18. Análisis del proceso de soldadura con electrodo ER 308L	72
Tabla 19. Especificaciones del procedimiento de soldadura (WPS) con ER309 L	73
Tabla 20. Análisis del proceso de soldadura con electrodos ER 309 L	74
Tabla 21. Parámetros de soldadura SMAW	76
Tabla 22. Parámetros de soldadura GTAW	76



Tabla 23. Ensayo de dureza en soldadura SMAW de un acero inoxidable AISI 304 sin material de aporte	79
Tabla 24. Ensayo de dureza en soldadura SMAW de un acero inoxidable AISI 304 con electrodo AWS E308L-16.....	81
Tabla 25. Ensayo de dureza en soldadura SMAW de un acero inoxidable AISI 304 con electrodo AWS E309L-16.....	82
Tabla 26. Ensayo de dureza en soldadura SMAW de un acero inoxidable AISI 304 con un electrodo AWS E316L-16.....	83
Tabla 27. Datos obtenidos en los ensayos de dureza en acero inoxidable AISI 304 austenítico en juntas soldadas con variación de electrodos	84
Tabla 28. Ensayo de dureza en soldadura GTAW de un acero inoxidable AISI 304 con electrodo AWS ER 308L	87
Tabla 29. Ensayo de dureza en soldadura GTAW de un acero inoxidable AISI 304 con electrodo AWS E309L	88
Tabla 30. Datos obtenidos en los ensayos de dureza en acero inoxidable AISI 304 austenítico en juntas soldadas con variación de varillas	89
Tabla 31. Comparación de procesos de soldadura SMAW y GTAW vs. Dureza HRB	93



ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

A	: Amperio
AC	: Corriente alterna
AISI	: Instituto Americano del Hierro y Acero
ASME	: Sociedad Americana de ingenieros mecánicos
ASTM	: Sociedad Americana de Pruebas de Materiales
AWS	: Sociedad Americana de Soldadura
CC	: Corriente continúa
DCEN	: Electrodo negativo de corriente directa
DCEP	: Electrodo positivo de corriente directa
GTAW	: Gas Tungsteno Arc Welding (Soldadura por Arco de Tungsteno a Gas)
HRB	: Dureza Rockwell Escala
Hz	: Hertz
In	: Pulgada
Kgf	: Kilógramo-fuerza
MB	: Metal Base
MB	: Metal Base
Mpa	: Megapascales
SAE	: Sociedad de ingenieros automóbiles



SMAW : Shielded Metal Arc Welding (Soldadura Manual por Arco Eléctrico)

TIG : Tungsteno Inert Gas

V : Voltio

ZAC : Zona Afectada por el Calor

ZF : Zona Fundida



RESUMEN

En esta investigación se estudió la resistencia a la dureza del acero inoxidable austenítico AISI 304 mediante un estudio comparativo de los procesos de soldadura SMAW y GTAW para unir planchas de 8.0 mm de espesor con una junta a tope en V y en posición plana 1G. Se procedió a determinar los parámetros de operación adecuados, siendo este uno de los objetivos del estudio, para luego establecer cuál de los procesos con uniones soldadas presenta óptimas propiedades mecánicas de resistencia adecuada de dureza en la zona afectada por el calor. Se utilizó la metodología del tipo experimental y aplicada, una vez obtenidas las juntas soldadas primeramente se realizó una inspección visual, seguido de un barridos de dureza con escala Rockwell B aplicada en zonas cercanas a la soldadura, considerándose la norma AWS D1.6 como referencia para establecer los criterios de aceptación de los ensayos realizados. Los datos obtenidos se tabularon, se procedió a la selección del mejor material de aporte, mediante un análisis adecuado con la finalidad de determinar cuál presenta una mejor influencia en las propiedades de dureza del acero inoxidable austenítico AISI 304. Los resultados que se obtuvieron demuestran que utilizando el proceso de soldadura GTAW con varilla ER308L, es más eficiente para unir el acero AISI 304 frente al proceso SMAW utilizando electrodo E308L-16, debido a que la soldadura GTAW proporciona soldadura limpia de escoria, son de gran calidad al tener siempre protegido el área de la soldadura de la atmósfera y presenta mayor resistencia a la dureza en la ZAC de 99.5 HRB frente al proceso de soldadura SMAW que tiene 98.0 HRB de resistencia a la dureza; así mismo se contribuye a mejorar los procedimientos de soldadura en este tipo de material que pueden ser aplicados en el campo industrial de la metalurgia transformativa.

Palabras clave: Austenítico, dureza, parámetros, Rockwell y soldabilidad.



ABSTRACT

In this investigation, the resistance to hardness of austenitic stainless steel AISI 304 was studied through a comparative analysis of the SMAW and GTAW welding processes. We proceeded to determine the appropriate welding parameters (advance speed, current intensity and voltage), this being one of the objectives of the study, to then establish which of the processes with welded joints presents optimal mechanical properties of adequate resistance of hardness in the ZAC. The methodology of the experimental and applied type was used and once the welded joints were obtained, a visual inspection was carried out, and additionally hardness scans were carried out with Rockwell B scale of the areas near the weld, considering the AWS D1.6 standard as a reference. to establish the acceptance criteria for the tests carried out. The data obtained were tabulated and the best filler material was selected through an adequate analysis in order to determine which one has a better influence on the hardness properties of austenitic stainless steel AISI 304. The results obtained show that using the GTAW welding process with ER308L rod is the most efficient to join the AISI 304 steel compared to the SMAW process using E308L-16 electrode, because the GTAW welding provides clean welding of slag, they are of high quality by always having the weld area from the atmosphere and presents greater resistance to hardness in the heat affected zone of 99.5 HRB compared to the SMAW welding process that has 98.0 HRB of hardness resistance; Likewise, it contributes to improving welding procedures in this type of material that can be applied in the industrial field of transformative metallurgy.

Keywords: Austenitic, hardness, parameters, rockwell and weldability.



CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El desconocimiento de la importancia de las propiedades mecánicas como: la dureza en la zona afectada por el calor utilizando el proceso de soldadura SMAW y GTAW y la selección correcta del material de aporte y los parámetros óptimos de soldadura en un acero AISI 304 propicia la necesidad de esta investigación teniendo conocimiento de antemano las múltiples aplicaciones de soldadura en materiales diferentes.

El acero inoxidable AISI 304 pertenece al tipo austenítico y para soldarlo se tiene en cuenta las propiedades mecánicas y las características químicas que afectan la resistencia a la corrosión. Al elegir el proceso de soldadura, está condicionado a reacciones posibles de cromo con el oxígeno y el carbono a las temperaturas del proceso, tal es así que el proceso de soldadura del acero inoxidable austenítico AISI 304, implica una serie de complicaciones mecánicas y metalúrgicas que inciden en la calidad de los procesos industriales. La identificación del material base, la selección adecuada del material de aporte y el diseño del proceso, deben realizarse escrupulosamente para mantener sus propiedades mecánicas al ser sometidos a la soldadura y se puedan minimizar las transformaciones que ocurren en la zona fundida (ZF) y en la zona afectada por el calor (ZAC).

Por otra parte, los parámetros de soldeo y los procesos de soldadura utilizados en los aceros inoxidables, por lo general son definidos por las recomendaciones de los fabricantes o la experiencia del soldador, pero se debe tener en cuenta que las



recomendaciones que hace todo fabricante, solo tienen un carácter orientativo y lo mismo sucede con la experiencia de un operario por calificado que este sea, solo podemos confiar en datos probados y corroborados dentro de un marco de investigación científica y/o tecnológica.

El problema principal que está asociado con la soldadura en los aceros inoxidable austeníticos y que de una u otra manera van a alterar sus propiedades mecánicas en su resistencia de dureza de la junta soldada. Si no se realiza un análisis adecuado de las propiedades mecánicas de dureza en el proceso de soldadura SMAW y GTAW se tendrá grandes pérdidas económicas y posibles rupturas de juntas soldadas, dando cada vez poca utilidad de ensayos de dureza para la evaluación de la resistencia de uniones soldadas. La utilización de un proceso adecuado para el análisis de propiedades mecánicas aportará considerables beneficios, no sólo a las industrias metalmeccánicas, sino también al usuario final. Permitirá la integración y confianza en los elementos soldados, dando así la posibilidad de mejorar la producción en soldadura en aceros inoxidable.

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.2.1. Problema general

¿Cuál será la resistencia a la dureza de un acero inoxidable austenítico AISI 304 al realizar un estudio comparativo de los procesos de soldadura SMAW y GTAW?

1.2.2. Problemas específicos

- ¿Cuál es el material de aporte y los parámetros óptimos en la aplicación de los procesos de soldadura SMAW y GTAW?
- ¿Cuál es la resistencia a la dureza del proceso de soldadura SMAW y GTAW que determine la eficiencia de soldabilidad del acero inoxidable austenítico AISI 304?



1.3. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

1.3.1. Hipótesis general

El estudio comparativo de los proceso de soldadura SMAW y GTAW en aceros inoxidables austeníticos AISI 304 determina la mejor resistencia a la dureza.

1.3.2. Hipótesis específicas

- La selección del material de aporte y los parámetros de soldadura se aplican en los procesos de soldadura SMAW y GTAW.
- La evaluación de resistencia a la dureza de los procesos de soldadura SMAW y GTAW influye en la soldabilidad del acero inoxidable austenítico AISI 304.

1.4. JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO

Al momento soldar un material y tomando en cuenta que existen diversos procesos de soldadura, es importante conocer el proceso más adecuado para un material específico.

En ese sentido, en el presente estudio se pretende determinar cuál es el proceso más conveniente para soldar en acero inoxidable AISI 304, que es un acero inoxidable austenítico con una amplia gama de aplicaciones en diferentes industrias debido a su alta resistencia a la corrosión, por ejemplo, construcción soldada, equipo ligero de transporte, partes para hornos e intercambiadores de calor, componentes para ambientes químicos severos, equipos en la industria petroquímica, industria naval y otros.

El proceso de soldadura del acero inoxidable austenítico AISI 304, implica una serie de consideraciones mecánicas y metalúrgicas que inciden en la calidad de los procesos industriales. La identificación del material base, la selección adecuada del material de aporte y el diseño del proceso, deben realizarse escrupulosamente para



mantener sus propiedades mecánicas al ser sometidos a la soldadura y se puedan minimizar las transformaciones que ocurren en la zona fundida (ZF) y en la zona afectada por el calor (ZAC).

Desde el punto de vista técnico corresponde hacer un análisis de la unión que se debe realizar al acero inoxidable, de tal forma que los resultados sean satisfactorios, estableciendo al mismo tiempo el proceso y tipo de soldadura a utilizar, dependiendo este, del espesor, equipo, tipo de aporte y requerimientos de calidad establecidos en códigos. Los resultados de este estudio servirán de herramienta al momento de seleccionar el proceso de soldadura para unir partes de acero inoxidable 304, pues contendrá resultados de la aplicación de dos de ellos, brindando información acerca de la calidad de la unión soldada y por tanto, facilitando la toma de decisión.

La importancia de este estudio radica en que será de mucho interés y ayuda para realizar un proceso adecuado de soldadura ya sea SMAW o GTAW para obtener productos de calidad mediante un estudio comparativo y además de ayudar a las industrias metalmeccánicas a ser más competitivos y mejorar ingresos económicos mediante un incremento de mercado frente a productos extranjeros los cuales cuentan con sistemas tecnificados. En este trabajo se realizó un estudio de la soldadura SMAW y GTAW en el acero autentico AISI 304, enfocando los problemas que se presenta durante este proceso y su efecto en la propiedad mecánica de dureza. De acuerdo a esto se observa desde el punto de vista metalúrgico, además de relacionar los efectos de la composición en la soldabilidad de los aceros inoxidables.



1.5. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.5.1. Objetivo general

Comparar el proceso de soldadura SMAW Y GTAW en aceros inoxidable AISI 304 para determinar la resistencia a la dureza.

1.5.2. Objetivos específicos

- Seleccionar el material aporte y los parámetros adecuados de soldadura en la aplicación de los procesos de soldadura SMAW y GTAW en uniones soldadas del acero inoxidable austenítico AISI 304.
- Evaluar la resistencia a la dureza de los procesos de soldadura SMAW y GTAW en acero inoxidable austenítico AISI 304 para determinar la eficiencia de su soldabilidad.



CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. MARCO TEÓRICO

2.1.1. Acero inoxidable

El acero inoxidable tiene una gamma de aleaciones ferrosas (base hierro) complejas, en las que intervienen un conjunto importante de elementos químicos, donde el principal aleante es el cromo que contienen un mínimo de 11%. El cromo forma en la superficie del acero una película pasiva, extremadamente delgada, continua y estable. Esta película deja la superficie inerte a las reacciones químicas. Debido a su superficie brillante se emplean mucho para fines decorativos, así como también para tuberías y tanques. Es propia de estos aceros su resistencia a la corrosión, su gran resistencia mecánica y sus resistencias a temperaturas elevadas y criogénicas de no existir esta película el metal queda expuesto a una corrosión rápida como la del acero dulce (Apraiz, 1978).

2.1.2. Efectos de los componentes de los aceros inoxidables

Según Cortes *et al.* (2004) el silicio, manganeso, níquel, cromo, molibdeno, cobre, vanadio y otros metales son elementos de combinación más utilizados para aleaciones de hierro, algunos de ellos se combinan con el carbono durante el enfriamiento, formando carburos u otros compuestos, es decir son agentes endurecedores del acero y se detalla a continuación:



- Cromo: Es el elemento que identifica y es imprescindible para la formación de la película (Cr_2O_3) pasiva que proporciona resistencia a la corrosión del acero. La película es muy susceptible de romperse en medios agresivos (Lázaro, 2012).
- Níquel: En moderadas cantidades es estabilizador de la estructura austenítica. Es un elemento muy efectivo en la reformación de la capa pasivada. El níquel es particularmente útil para aumentar la resistencia a la corrosión en medios ácidos (Lázaro, 2012).
- Manganeso: Reduce la actividad del carbono e incrementa su solubilidad, por lo que aparece como inhibidor de carburos al retardar su precipitación (Parvathavarthini, 2002).
- Silicio. Favorece la sensibilización de aceros inoxidables comerciales y de alta pureza en soluciones altamente oxidantes debido a la segregación de Si en límite de grano (Parvathavarthini, 2002).
- Molibdeno: Reduce la solubilidad del carbono en la austenita, acelerando la precipitación de carburos a elevadas temperaturas, además de favorecer la formación de fase sigma. En aceros inoxidables austeníticos que contienen Mo, en un rango de temperaturas entre 750°C y 850°C y con un tiempo prolongado de envejecimiento, este elemento de aleación se incorpora a los carburos los cuales finalmente se transforman en fase Chi (χ), ocasionando empobrecimiento en Cr y Mo (Parvathavarthini, 2002).
- Carbono: Es útil ya que aumenta la capacidad de endurecimiento mediante tratamiento térmico al resultar un acero susceptible de transformación martensíticos. En general, el carbono disminuye la resistencia a la corrosión del acero inoxidable al formarse carburos de cromo (Lázaro, 2012).



- **Nitrógeno:** Beneficia a los aceros inoxidable austeníticos en cuanto a su resistencia a corrosión por picaduras, retardando la formación de la fase σ -cromo molibdeno. Su presencia es esencial en los nuevos tipos de aceros inoxidable dúplex ya que incrementa el contenido de austenita y disminuye la segregación de cromo y molibdeno, aumentando así la resistencia a la corrosión de la fase austenítica. Sin embargo, el nitrógeno disminuye enormemente las propiedades mecánicas de los aceros inoxidable ferríticos (Lázaro, 2012).

2.1.3. Clasificación de los aceros inoxidable

Hoy en día existe una gran variedad de aceros inoxidable en donde se le clasifican según su estructura cristalina y su propiedad de endurecimiento, los aceros inoxidable según su estructura se pueden clasificar en tres grandes grupos:

- **Aceros inoxidable ferríticos**

Los aceros inoxidable ferríticos tienen de 13-17% de cromo (resistentes al calor hasta 29%) y un contenido aproximado de 0,07% de carbono, son adecuados para casos en que tales fuerzas destructivas tienen que combatirse a temperaturas elevadas como partes de hornos, intercambiadores de calor, moldes, soldadura de automóviles y otros. Contienen, de un modo general, un porcentaje de cromo superior al de los martensíticos. El aumento en la cantidad de cromo mejora la resistencia a la corrosión en diversos medios, pero sacrifica en parte otras propiedades, como la resistencia al impacto y sus características son:

- Resistencia a la corrosión de moderada a buena, la cual se incrementa con el contenido de cromo y algunas aleaciones de molibdeno.



- Endurecidos moderadamente por trabajo en frío: no pueden ser endurecidos por tratamiento térmico.
- Son magnéticos.
- Su soldabilidad es pobre por lo que generalmente se eliminan las uniones por soldadura a calibres delgados.
- Usualmente se les aplica un tratamiento de recocido con lo que obtienen mayor suavidad, ductilidad y resistencia a la corrosión.
- Debido a su pobre dureza, el uso se limita generalmente a procesos de formado en frío. Según la clasificación AISI, los más empleados son los siguientes: 405, 409, 430, 434, 446 (Mipsa, 2012).

- **Aceros inoxidables martensíticos**

Los aceros inoxidables martensíticos son esencialmente aleaciones de cromo y carbono. El contenido de cromo es generalmente de 10.5 a 18% y el de carbono es alto, alcanzando valores de hasta 1.2%. Son la primera rama de los aceros inoxidables simplemente al cromo. Representan una porción de la serie 400, sus características son:

- Moderada resistencia a la corrosión, la menor en todas las clases de aceros inoxidables.
- Endurecibles por tratamiento térmico y por lo tanto se pueden desarrollar altos niveles de resistencia mecánica y dureza.
- Son magnéticos.



Debido al alto contenido de carbono y a la naturaleza de su dureza, es de pobre soldabilidad. Según la clasificación AISI, los más empleados son los siguientes: 403, 410, 416, 420, 422, 431, 440 (Bonnet, 2010).

- **El acero inoxidable austenítico**

Es el acero inoxidable más requerido por las industrias debido a la magnífica propiedad de este tipo de metal como la resistencia a la corrosión y el bajo costo a comparación los otros tipos de acero inoxidable, el porcentaje de cromo en este tipo de acero va desde 16% a 24%. Es usado ampliamente en la industria alimentaria y la industria química (Avner, 1988).

Éste es el más versátil y de los más usados de los aceros inoxidables de la serie 300. Tiene excelentes propiedades para el conformado y el soldado. Se puede usar para aplicaciones de embutición profunda, de rolado y de corte. Tiene buenas características para la soldadura, no requiere recocido tras la soldadura para que se desempeñe bien en una amplia gama de condiciones corrosivas. Incluyendo productos de petróleo calientes o con vapores de combustión de gases. Tiene excelente resistencia a la corrosión en servicio intermitente hasta 870 °C y en servicio continuo hasta 925°C. No se recomienda para uso continuo entre 425 - 860°C pero se desempeña muy bien por debajo y por encima de ese rango (Sumiteccr, 2004).

En la Tabla 1 y 2 se muestran la composición química y las propiedades mecánicas del acero inoxidable austenítico AISI 304 respectivamente.

Tabla 1. Propiedades químicas del acero AISI 304

Grado (Max.)	Porcentaje %						
	C	Cr	Ni	Si	Mn	S	P
AISI 304	0.08	16-24	8-12	1	2	0.03	0.04

Fuente: ASTM (2016).

Tabla 2. Propiedades mecánicas del acero inoxidable AISI 304

Grado	Resistencia a la tracción (Mpa)	Elongación (%)	Límite de fluencia (Mpa)	Propiedades para trabajo en frío
AISI 304	460-700	<60	206	muy buena

Fuente: ASTM (2016).

2.1.4. Metalurgia de la soldadura

Soldar es unir sólidamente dos piezas metálicas o dos partes de una misma pieza. Esta unión se realiza, elevando la temperatura de las superficies a soldar, puestas en contacto, sin aportación de alguna sustancia o con aportación de una sustancia igual o semejante a las piezas a soldar (Nidi, 1988).

Existen cuatro principales procesos en la soldadura por fusión de los aceros inoxidables ellos son:

- Soldadura por arco metálico protegido (SMAW).
- Soldadura por electrodo de tungsteno (TIG o GTAW).
- Soldadura por arco metálico spray (GMAW).
- Soldadura por arco sumergido (SAW) (Nidi, 1988).

La soldadura eléctrica por arco se realiza utilizando el calor producido al soltar un arco eléctrico entre 2 conductores de distinta polaridad denominados electrodos. Como la

temperatura alcanzada por este procedimiento supera los 3500°C, se llega a fundir la zona de soldadura, por tanto, puede considerarse este sistema como una verdadera soldadura por fusión (Nidi, 1988).

La expansión térmica durante el calentamiento y la contracción durante el enfriamiento pueden resultar en patrones de esfuerzos complejos y alrededor de los cordones de soldadura. Estos esfuerzos pueden afectar la microestructura y las propiedades de la soldadura, y pueden promover el fisuramiento en regiones donde el esfuerzo de tracción resultante excede la ductilidad del material (Lippold, 2014).

2.1.4.1. Elementos que se forma en el proceso de soldadura

En la Figura 1 se observa de forma didáctica el proceso de soldadura, donde se indica los elementos que se forman:

- Metal base: es el material en el que se efectúa la fusión con el elemento de aporte y forman uno solo; en el cuerpo unificado existe una superficie afectada por el incremento de temperatura que genera la soldadura y una superficie no afectada que no ha sufrido ninguna transformación en el proceso de soldadura (Oxgasa, 200).
- Metal de aporte de soldadura: es el metal fundido, sus propiedades químicas y mecánicas son las correspondientes a la fusión del material de aporte suministrado (Gorka, 2014).
- Zona afectada térmicamente (ZAT): Es la zona adyacente a la soldadura que se calienta en gran medida y se ve afectada por el calor, pero que no funde. Esta zona sufre cambios metalúrgicos y cambios en sus características mecánicas, pudiendo ser muy propensa a desarrollar grietas o condiciones desfavorables (Avilés, 2010).

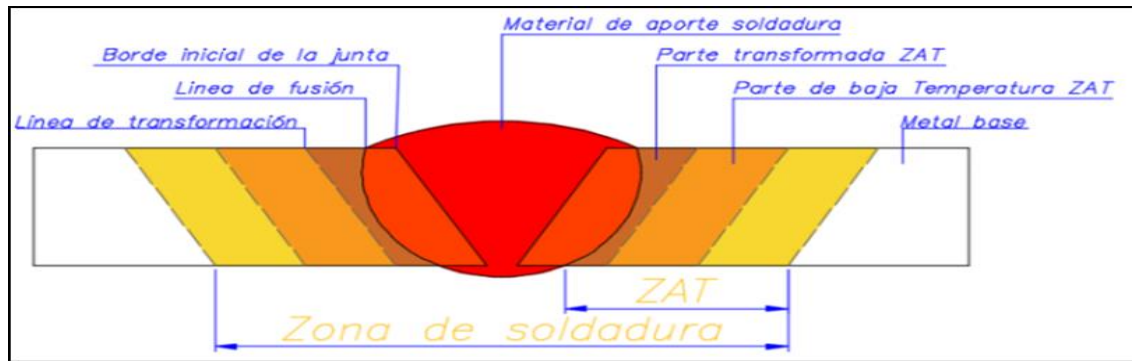


Figura 1. Componentes que se forma y representación de temperaturas en el proceso de soldadura.

Fuente: Leyensetter (1974).

2.1.5. Procesos de soldadura en aceros inoxidable

2.1.5.1. Proceso de Soldadura SMAW (Soldadura por Arco Eléctrico con Electrodo Revestido)

Proceso de soldadura SMAW (Shield Metal Arc Welding) Este proceso se le conoce también como soldadura por arco metálico protegido o comúnmente “soldadura eléctrica”, para lograr la unión de dos metales por medio de la concentración del calor del arco eléctrico que se establece en el metal a soldar y el electrodo, generando una zona de fusión, tal como se muestra en la Figura 2 (Hernández, 2006).

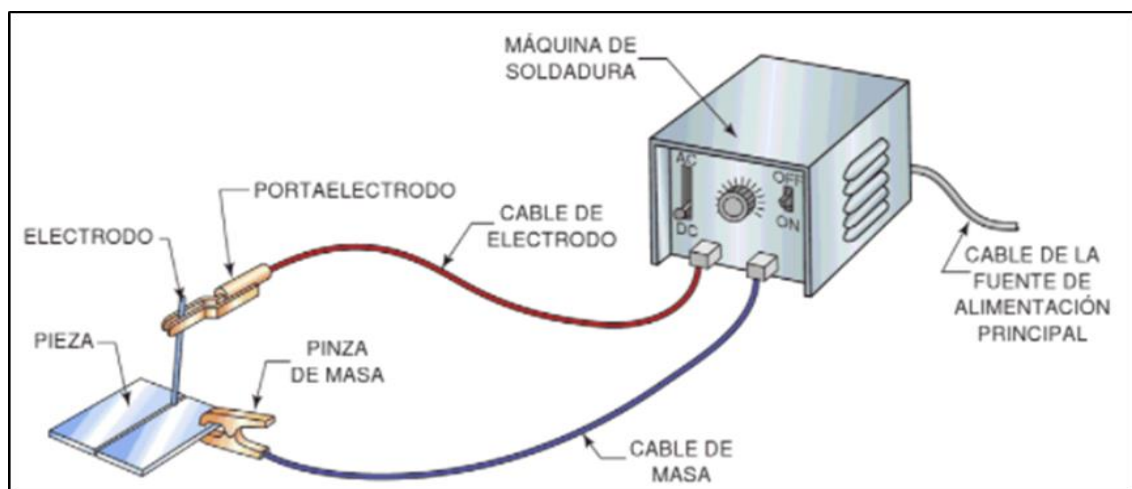


Figura 2. Equipo Proceso de soldadura SMAW

Fuente: Manual Soldexa.

El calor que se genera en el arco eléctrico funde una parte de la punta del electrodo, su recubrimiento y el metal base en la zona inmediata del arco. El metal fundido es una mezcla del metal base, el metal del electrodo y las sustancias presentes en el recubrimiento del electrodo; esta mezcla es la que constituye la soldadura cuando se solidifica. La parte desnuda en el extremo del electrodo se sujeta a una terminal de la fuente de poder, mientras que, la otra terminal se conecta a la pieza de trabajo, como se observa en la Figura 2. La soldadura SMAW tiene la ventaja de ser sencilla y versátil, el equipo está conformado por una fuente de poder, cables de corriente y un portaelectrodo. Este proceso se usa comúnmente en la construcción en general, en astilleros, oleoductos y en trabajos de mantenimiento (Kalpakjian, 2008).

El arco en este proceso puede ser generado con corriente alterna o continua, los electrodos no deben presentar humedad para poder obtener un buen cordón de soldadura. Las corrientes que se emplean en este proceso varían entre 30 a 300 amperios y los voltajes están entre 15 a 45 voltios (Groover, 2009).

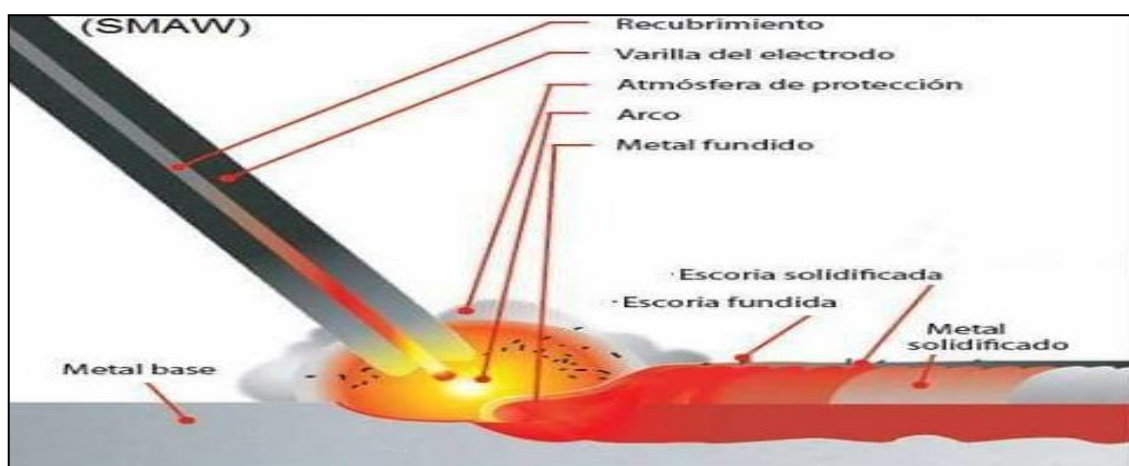


Figura 3. Proceso de la soldadura SMAW

Fuente: www.demaquinasyherramientas.com.

- **Ventajas de la soldadura SMAW**

- Equipo de bajo costo y fácil transportación.

- Es un proceso fácil de adaptación y de bajo precio.
- Es utilizado en casi todo los metales.
- Se puede trabajar en condiciones abiertas.
- **Desventajas de la soldadura SMAW**
 - No se puede soldar espesores menores de 3mm
 - Proceso que produce bastante escoria
 - Se requiere cambio de electrodo constantemente.

2.1.5.2. Proceso de soldadura GTAW (Tungsten Inert Gas)

Este proceso de soldadura por arco bajo gas protector también conocido como soldadura TIG (Tungsten Inert Gas) utiliza la fuente de energía del arco eléctrico, que se forma con el electrodo no consumible y el metal o pieza a soldar que a su vez el baño de fusión es protegido por un gas inerte Figura 5. Para poder realizar este proceso es necesario el material de aportación por medio de varillas (Hernández, 2000).

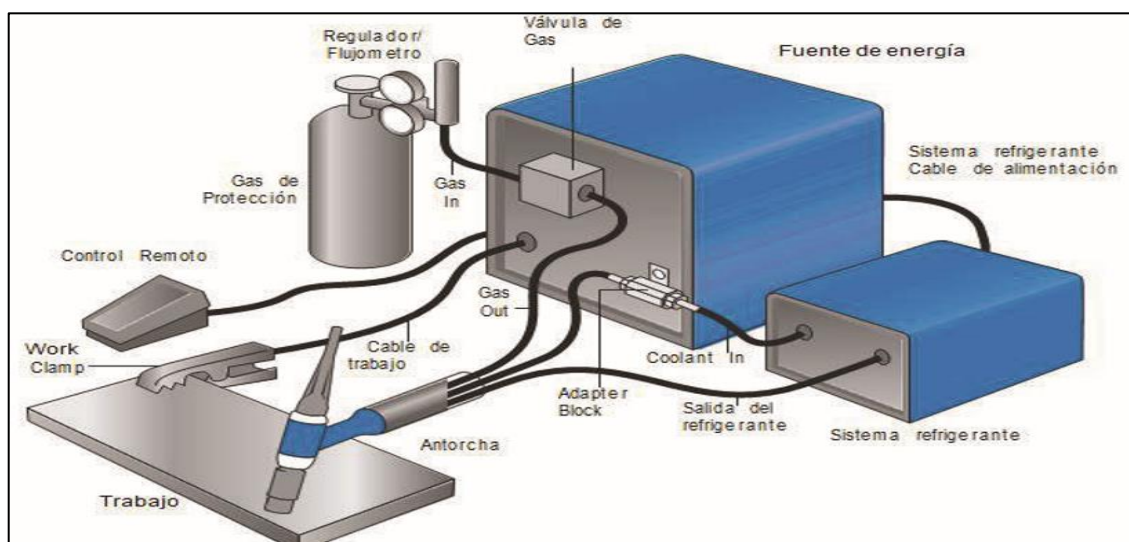


Figura 4. Elementos esenciales de proceso GTAW

Fuente: Miller (2011).

El proceso de soldadura GTAW se puede utilizar en casi todos los metales esto incluye al aluminio y el magnesio, con este proceso se puede obtener soldadura de mayor calidad y con una buena pureza metalúrgica y los cordones de soldadura con mejor acabado superficial, este proceso abarca en casi todo el sector industrial (Reina, 2003).

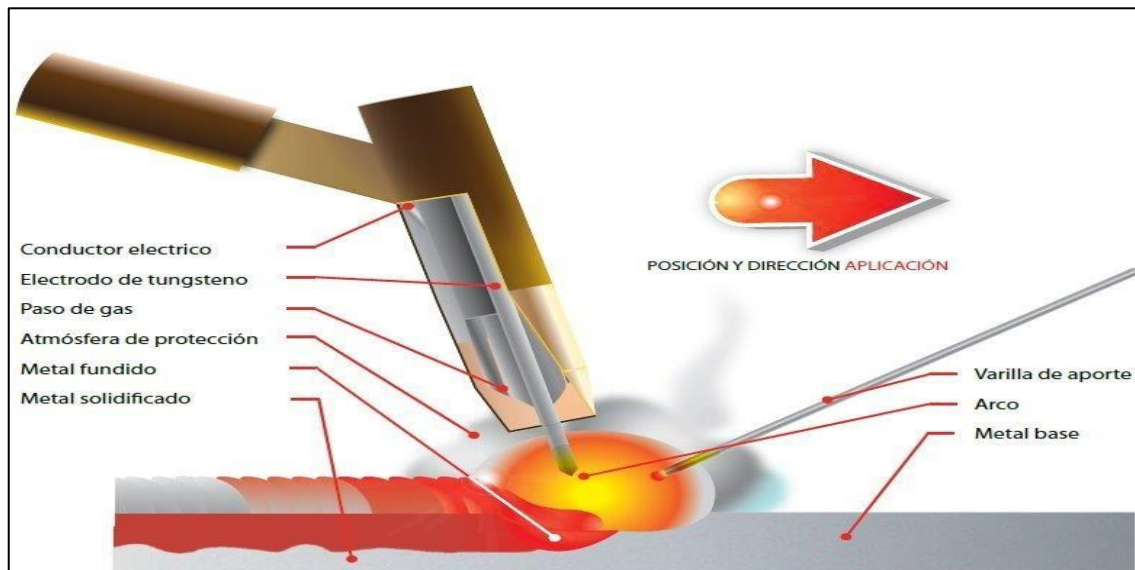


Figura 5. Proceso de la soldadura GTAW

Fuente: www.testekndt.net.

El proceso GTAW se puede usar para soldar más materiales que cualquier otro proceso de soldadura, se pueden soldar aceros al carbono e incluso metales exóticos o aleaciones pesadas, entre ellos: el acero inoxidable, aluminio, cromo, molibdeno, níquel y titanio. Además produce soldaduras muy limpias y de alta calidad. Éste proceso también funciona muy bien para materiales delgados, incluso aquellos con espesores en milímetros (Llano, 2009).

- Selección de tipo de corriente

En el proceso de soldadura GTAW se puede utilizar corriente continua y corriente alterna, esta elección dependerá del material a soldar, cuando se suelda con corriente continua la polaridad recomendada es la directa ya que la polaridad inversa sobrecalienta el electrodo dificultando soldar. En el caso de la corriente alterna reúne las condiciones intermedias de la corriente continua tanto en polaridad directa como inversa, se muestra en la Figura 6 (Rodríguez, 2001).

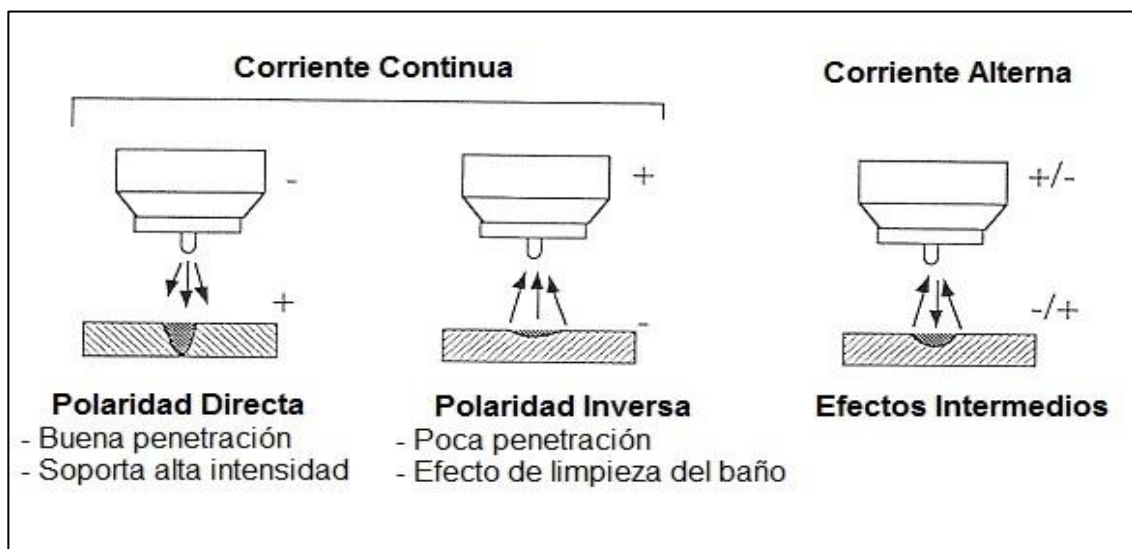


Figura 6. Tipos de corriente en el proceso de soldadura GTAW

Fuente: Manual del Soldexa.

Tabla 3. Características de los gases protectores según la Norma AWS

Gases en la soldadura TIG	
Metales	Gas a utilizar
aluminio y sus aleaciones	Argón
latón y sus aleaciones	Argón o helio
cobre con espesores menores a 3 mm	Argón
cobre con espesores mayores a 3 mm	Helio
Aceros al carbono	Argón
Aceros inoxidables	Argón

Fuente: Soldadura de los aceros (2003).



- **Gases de protección**

Los gases de protección se utilizan para optimizar el rendimiento y aumentar la calidad de soldadura, en los aceros inoxidables proporciona una mejor resistencia a la corrosión y conservación de la microestructura en la zona soldada, Se utiliza normalmente de 7 a 16L/min para utilizar el Argón, y de 14 a 24 L/min para utilizar el helio. En la Tabla 3 muestra los principales gases utilizados en la soldadura GTAW (Reina, 2003).

- **Ventajas del proceso GTAW**

- Generalmente produce soldaduras de muy buena calidad
- Está libre de las salpicaduras que ocurren con otros
- Puede usarse con metal de aporte o sin el
- Ofrece un control excelente de penetración
- Puede usar fuentes de potencia de costo relativamente bajo
- Permite controlar de manera precisa las variables
- Puede servir para soldar casi todos los metales, incluso las uniones de los metales disímiles
- Permite controlar en forma independiente la fuente de calor y las adiciones de metal de aporte.
- Excelente calidad de la soldadura en casi todos los metales y aleaciones empleados por la industria.
- Prácticamente no se requiere ninguna limpieza posterior.
- No se produce escoria que podría quedarse atrapada en la soldadura.

2.1.6. Electroodos

Los electroodos por arco se clasifican a partir de las propiedades del metal de aporte, que fueron clasificados, normados y estudiados por un comité asociado a la AWS y ASME (Indura, 2010).

2.1.6.1. Electroodos para el proceso de soldadura SMAW

- Electroodo 308 L (AWS: E 308 L-16)

Descripción: Tiene un revestimiento rutílico, lo que permite soldar con CA o CCEP, electrodo positivo. Arco estable de transferencia spray, depósito de excelente forma y apariencia. La escoria se desprende fácilmente, muy buena reanudación de arco. El depósito es de acero inoxidable austenítico.

Usos: Aceros inoxidables austenítico con un contenido extra bajo de carbono. El contenido de 0.04% de carbono, evita la formación y la precipitación de carburos. Excelente protección contra la corrosión intergranular. Se recomienda especialmente para aplicaciones resistentes a la corrosión, producida por los ácidos y soluciones de celulosa. Se recomienda su uso en soldaduras intermitentes.

Aplicaciones típicas: Aceros Inoxidables. 304, 304L, 308, 308L, 321, 347, 348. Equipos químicos y petroquímicos. Estanques (Indura, 2010).

Tabla 4. Propiedades de los electroodos AWS: E 308L-16

Composicion quimica	Propiedades mecanicas
C: 0.02 % Mn: 0.63 %	
Si: 0.76 % P: 0.025 %	Resistencia a la traccion 590 MPa
S: 0.008 % Cr: 18.7 %	Elongación (L = 4d) 53 %
Ni: 10.0 % Mo: 0.18 %	
Posiciones de soldadura	Tipo de corriente:
P, H, V, SC	CCEP, CA

Fuente: Willian Naula.

- **Electrodo 309 L (AWS: E 309 L-16)**

Descripción: Su bajo contenido de carbono previene la precipitación de carburos de cromo. Excelente contra la corrosión intergranular. Excelente operatividad en toda posición.

Usos: Adecuado para uniones de aceros inoxidable a aceros bajo carbono y baja aleación. Apto para enmantequillado (buttering) y como depósito base para aplicaciones que requieren un posterior recubrimiento duro.

Su depósito tiene excelente resistencia a la corrosión a temperatura ambiente, pero primordialmente fue diseñado para resistir la oxidación a altas temperaturas (1000°C).

Aplicaciones típicas: Adecuado para aceros AISI 309,309L, 309Cb, 304, 304L, 321, 347 y soldaduras disímiles (Indura, 2010).

Tabla 5. Propiedades de los electrodos AWS: E309 L

Composicion química	Propiedades mecanicas
C: 0.02 % Mn: 0.69 % Si: 0.80 % P: 0.022 % S: 0.009 % Cr: 22.5 % Ni: 13.4 % Mo: 0.16 %	Resistencia a la traccion 555 MPa Elongación (L = 4d) 42 %
Posiciones de soldadura	Tipo de corriente:
P, H, V, SC	CCEP, CA

Fuente: Willian Naula.

- **Electrodo (AWS: E 316 H-16)**

Descripción: Electrodo para aceros de alta resistencia a la oxidación y la corrosión. Es un electrodo de fácil aplicación, con fácil encendido y reencendido. Posee un núcleo sólido tipo austenítico de la familia de aceros inoxidable al Cr/Ni/Mo, recomendado para la soldadura de aceros inoxidable del tipo 316, y 316H, industria química, ambientes corrosivos acompañados de alta temperatura.

Aplicaciones típicas: Usado ampliamente en construcción, soldadura y reparación de equipo de la industria química, manejo de cárnicos y de alimentos que conlleven ácidos o sustancias básicas, equipos de revelado fotográficos, etc., trabaja particularmente bien en medios donde existan ácidos diluidos. Utilizado para la construcción de reactores, intercambiadores de calor, destiladores, tuberías, digestores, recipientes de alta y baja presión y en la industria electroquímica (Infra, 2009, p.74).

Tabla 6. Electrodo para el proceso GTAW

Composicion quimica	Propiedades mecanicas
C: 0.04-0.08 % Mn: 0.6-2.5 %	
Si: 1.0 % P: 0.04 %	Resistencia a la traccion 520 MPa
S: 0.03 % Cr: 17-20 %	Elongación (L = 4d) 30 %
Ni: 11-14 % Mo: 2-3 %	
Posiciones de soldadura	Tipo de corriente:
P, H, V, SC	CCEP, CA

Fuente: Willian Naula.

2.1.6.2 Electrodo para el proceso GTAW

- Electrodo de TUNGSTENO

Los electrodos de Tungsteno tienen un punto de fusión de 3 410 °C gracias al calentamiento por resistencia y debido al desprendimiento de electrones que se desprenden de su punta y una vez alcanzado esta temperatura tienen una fuente abundante de electrones y prácticamente no se consume. Para este tipo de proceso la AWS A.5.12. El diámetro que se utiliza frecuentemente son 1.5, 2.5 y 3 mm, siendo solamente tungsteno aleado o tungsteno puro, pudiendo también tener 2% de circonio o torio, cuando se adiciona torio incrementa las capacidades de corriente en el electrodo. Se muestra la clasificación de los electrodos de tungsteno en la soldadura GTAW en las tablas siguientes.

Tabla 7. Clasificación AWS A.5.12 para electrodos de tungsteno

Clasificación de la AWS	Color (a) elemento	Elemento Aleado	Oxido amalgamante	% de óxido
EWP	Verde	-	-	-
EWCe-2	Naranja	Cerio	CeO ₂	2
EWCLa-1	Negro	Lantano	La ₂ O ₃	1
EWLa-1.5	Dorado	Lantano	La ₂ O ₃	1.5
EWLa-2	Azul	Lantano	La ₂ O ₃	2
EWTh-1	Amarillo	Torio	ThO ₂	1
EWTh-2	Rojo	Torio	ThO ₂	2
EWZr-1	Café	Zirconio	ZrO ₂	0.25
EWG	Gris	No especificado	ZrO ₂	0.25

(a) El color puede estar aplicado en forma de bandas, puntos u otros, en cualquier punto de la superficie del electrodo.

(b) El fabricante debe identificar el tipo y el contenido nominal de la tierra rara u otros agregados de óxido.

Fuente: Willian Naula.

Así mismo cabe aclarar que, si bien es cierto que existe prácticamente un determinado tipo de electrodo para cada tipo de acero inoxidable, los aceros inoxidables tipo 301, 302, 303, 304 y 308 se sueldan todos con el electrodo E308L-16, en vista de que todos estos aceros están comprendidos bajo el tipo 18/8.

Los electrodos de tungsteno se identifican por un código de color, el cual permite que no aumente su diámetro con la finalidad de prevenir contactos mecánicos entre el tungsteno y la pinza.

- E: Electrodo
- W: Tungsteno
- P: Tungsteno puro sin elementos de aleación
- G: Aleaciones que no se han establecido.
- La última nota denota la aleación u oxido que se ha añadido al tungsteno.

- Varillas para soldar aceros inoxidables

La utilización del material de aporte se puede emplear o no, como láminas delgadas no se utiliza material de aporte. Para nuestro tema de investigación utilizaremos los siguientes tipos de material de aporte para acero inoxidable ER 308L Figura 7.



Figura 7. Varilla de aporte ER 308L

Fuente: Manual soldexa.

Cada metal base y cada varilla de aportación requiere de un fundente especial, de acuerdo a sus propias características. Para la aplicación de los fundentes la regla fundamental consiste en: usar siempre el fundente adecuado para el trabajo o la varilla a utilizarse.

Tabla 8. Características varilla de acero inoxidable ER 308L

Descripcion	Usos	Aplicaciones típicas
Es una varilla de acero inoxidable de bajo contenido de carbono la cual reduce la formación de carburos de cromo por lo que disminuye la corrosión intergranular, resistencia al impacto y la abrasión.	Generalmente para todo tipo de aceros inoxidables asi como tambien para aceros al cromo-niquel-manganeso en donde se requiere que la resistencia a la corrosión sea elevada.	Aceros inoxidables 301, 302, 321, 347, 348, 405, 410, 420 y para aceros al cromo-niquel-manganeso 201, 202

Fuente: Willian Naula.

Tabla 9. Propiedades de la varilla de aporte ER 308L

Análisis químico						
C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr
0.025	1-2.5	0.30-0.65	Máx. 0.025	Máx. 0.025	9-11	19.5-22
Tratamiento Térmico	Resistencia a la Tracción [Mpa(psi)]	Límite de Fluencia [Mpa(psi)]	Elongación en 2" [%]	Energía absorbida [J]		
Sin tratamiento	>550 (79 750)	>320 (46 400)	>35	110		

Fuente: Willian Naula.

2.1.7. Ensayo de Dureza Rockwell

Se entiende por dureza la propiedad de la capa superficial de un material de resistir la deformación elástica y destrucción, en presencia de esfuerzos de contactos locales inferidos por otro cuerpo más duro, el cual no sufre deformaciones residuales (indentador o penetrador), de una determinada forma y dimensiones (Calle, 2000).

Al igual que en otros tipos de ensayos de dureza, para realizar el ensayo Rockwell se empleará una máquina calibrada llamada durómetro. A continuación se define la técnica operativa, paso a paso, para llevar a cabo el ensayo de dureza Rockwell: en primer lugar, se deberá realizar la preparación de la probeta del material a ensayar: limpiar, aplanar, pulir. En segundo lugar, y haciendo uso de tablas, habrá que seleccionar, en función del tipo de material a ensayar, la carga a aplicar, el tipo de indentador, y la escala, roja o negra, que habrá que leer en el dial del reloj graduado de la máquina (<https://ingemecanica.com/>).



		Método	Penetrador	Carga (kp)	Materiales de aplicación
ROCKWELL NORMAL	ESCALA NEGRA (C -)	HRA	Cono	60	Metales duros, superficies templadas, chapas finas (≥ 0.4 mm).
		HRC	Cono	150	Aceros templados, etc.
		HRD	Cono	100	Piezas con superficies templadas con dureza media, chapas.
	ESCALA ROJA (B . bola)	HRB	Bola 1/16"	100	Aceros blandos, de construcción y metales no ferrosos.
		HRE	Bola 1/8"	100	Fundición, aleaciones aluminio-magnesio, metales antifricción o sintéticos.
		HRF	Bola 1/16"	60	Aleaciones de cobre. Chapa fina metálica ($\geq 0,6$ mm)
		HRG	Bola 1/16"	150	Bronce poroso, cobre-berilio, cobre-níquel, fundición maleable
		HRH	Bola 1/8"	60	Aluminio, zinc, plomo.
		HRK	Bola 1/8"	150	Metales antifricción o de dureza muy baja.
		HRL	Bola 1/4"	60	Ebonitas (ASTM D530-59T)
		HRM	Bola 1/4"	100	Madera laminada (ASTM D 805-52)
		HRP	Bola 1/4"	150	Materiales sintéticos (ASTM D-785-60T)
		HRR	Bola 1/2"	60	Otros materiales muy blandos o finos
		HRS	Bola 1/2"	100	
HRV	Bola 1/2"	150			
ROCKWELL SUPERFICIAL	ESCALA NEGRA (C+B cono o bola)	HR15N	Cono	15	Como HRA, HRC o HRD pero para capas de dureza especialmente finas o para chapas desde 0,15 mm
		HR30N		30	
		HR45T		45	
		HR15T	Bola 1/16"	15	Como HRB, HRF o HRG pero para chapas particularmente finas desde 0.25 mm
		HR30T		30	
		HR45T		45	
		HR15W	Bola 1/8"	15	Para metales con durezas muy débiles y para capas muy finas (antifricción) HRX, HRY particularmente para sintetizados
		HR30W		30	
		HR45W		45	
		HR15X	Bola 1/4"	15	
		HR30X		30	
		HR45X		45	
HR15Y	Bola 1/2"	15			
HR30Y		30			
HR45Y		45			

Figura 8. Imagen de durómetro con su tabla de dureza Rockwell

Fuente: INGEMET.



2.2. ANTECEDENTES

Flores y Suarez (2020) en su trabajo de titulación plantearon como objetivo caracterizar las juntas soldadas en acero inoxidable AISI 304 mediante los procesos de soldadura SMAW, GMAW y GTAW. Para esto se relacionó cambios en la microestructura, ZAC, propiedades mecánicas y costos en cada proceso. Para el análisis experimental prepararon las placas con la separación y bisel adecuado para cada proceso. Una vez obtenidas las juntas soldadas realizaron los ensayos no destructivos de: inspección visual, tintas penetrantes y radiografía industrial. También realizó ensayos destructivos: ensayo de tracción, doblado de cara y raíz. Adicionalmente, efectuaron barridos de dureza con escala Rockwell B de las zonas cercanas a la soldadura. Realizó comparaciones entre los tres procesos para determinar cuál de ellos: produce cordones con mayor resistencia a tracción, menor ZAC y genera menor costo. Estos resultados sirvieron para establecer el proceso más adecuado para la soldadura del material en estudio. Finalmente, se determinó que el proceso GMAW es el más conveniente desde el punto de vista técnico y económico para la soldadura en placas de acero inoxidable AISI 304.

Alberco (2020) en su investigación estudió la soldabilidad del acero inoxidable austenítico AISI 304 mediante un estudio comparativo de los procesos de soldadura GMAW y GTAW, para determinar el mejor procedimiento en estos tipos de aceros. Para realizar la evaluación de los procesos de soldadura GMAW y GTAW soldó dos probetas con ambos procesos, el cual fueron evaluados con los ensayos no destructivos de inspección y líquidos penetrantes, luego se prepararon 8 probetas para el ensayo de doblado, 4 para el ensayo de tracción y 3 para en ensayo de dureza.



Luego de realizar los ensayos no destructivos de inspección visual y líquidos penetrantes a las probetas de los procesos de soldadura GMAW y GTAW, ambas probetas pasaron los criterios de aceptación según los códigos de soldadura, sin embargo, observaron una mejor formación de raíz (cordón interior de la tubería). Seguidamente realizaron los ensayos destructivos de doblez y de tracción, ambos procesos de soldadura obtuvieron un resultado aceptable según el criterio de aceptación del código de soldadura ASME IX.

Ushiña (2018) su trabajo de investigación se basa en el proceso de soldadura GTAW realizada en juntas de acero inoxidable martensítico AISI 420 con material de aporte ER 308L y ER 312. Posteriormente procedió a obtener probetas para realizar ensayos destructivos de impacto, dureza, doblez guiado y tracción; cuyos resultados fueron evaluados con la finalidad de determinar la influencia de los materiales de aporte en las propiedades mecánicas de las juntas soldadas. A una de las conclusiones que llegó es que en el proceso de soldadura GTAW aplicado en el acero inoxidable martensítico AISI 420 incrementó la dureza en el punto de fusión del material base con el material de aporte (ZAC) dando como resultado que no existe riesgo alguno de romperse en el cordón de soldadura. Los mayores valores de dureza en todas las probetas ensayadas presentó a una distancia de 6 mm medidas desde el centro del cordón de soldadura, los valores mínimos se producen a una distancia de 2 mm y a partir de una distancia de 8 mm hasta una distancia de 15 mm la dureza tiende a estabilizarse.

Esquivias (2018) manifiesta un estudio en la que se aprecia la importancia de una buena recuperación y mantenimiento a los álabes de un impulsor de acero inoxidable por medio de la soldadura, considerando los principales parámetros de operaciones en el proceso GTAW (Gas Tungsten Arc Welding); para ello preparó probetas normalizadas de acero inoxidable austenítico, las cuales fueron soldadas con diferente amperaje, voltaje



y velocidad de avance, para luego llegar a una constante que permitió lograr una soldadura de calidad mediante el proceso TIG (Tungsten Inert Gas) llamado también GTAW. Luego las muestras fueron ensayadas a tracción, impacto, dureza y análisis metalográfico con el fin de evaluar sus propiedades mecánicas, donde determinó que las durezas obtenidas en la zona fundida en la ZAC son mayores respecto al material base, dado que estas zonas alcanzan las más altas temperaturas y velocidades de enfriamiento, por ello sus durezas aumentan con respecto al material base.

Gómez y Ramírez (2016) realizó un estudio de la soldabilidad y del comportamiento corrosivo en medio salino, de un acero inoxidable AISI 304, utilizaron el proceso de soldadura GTAW (TIG) con electrodo de aporte 308L-15, mediante la determinación de algunas propiedades mecánicas metalúrgicas. Los autores decidieron realizar un análisis de acero inoxidable 304 en forma de tubería al ser sometido a la soldadura, pues en este caso viene siendo el principal candidato para la fabricación las tuberías sanitarias. Por lo anterior, se ha dedicado aplicar sobre dos tuberías estandarizadas de acero inoxidable 304 el proceso de soldadura TIG, comúnmente es utilizado en la industria, para analizar seguidamente las propiedades mecánicas y metalúrgicas de las uniones soldadas. Finalmente realizaron la revisión del código AWS A1.6 sobre el tema de soldadura, en la cual se definieron los parámetros, variables esenciales y no esenciales del procedimiento logrando comprender la importancia de estos en la realización de un procedimiento de soldadura.

Celada (2015) en su proyecto evaluó básicamente las fallas que se presenta en la soldadura del acero inoxidable AISI 304 por medio del proceso al arco con electrodo revestido (SMAW). En el caso específico analizaron las fallas generadas en una planta textilera en elementos de máquina y tuberías de conducción de agentes químicos. Celada revisó el procedimiento de soldadura actual o convencional y se planteó un método



experimental evaluado por medio de ensayos. Se identificó al acero inoxidable austenítico AISI 304, como un acero que presenta un alto grado de soldabilidad durante la aplicación del proceso SMAW. Adquiere alta soldabilidad al emplear y aplicar el electrodo E308L teniendo mejor compatibilidad con el material base presenta la siguiente conclusión: la temperatura de soldadura deberá ser inferior a 150 °C y mantener cordones cortos con baja o nula oscilación de arco. Si la chapa del material es superior a 3 mm se puede emplear precalentamiento de 50 - 60 °C y para el enfriamiento se debe de realizar de forma rápida con algún fluido y evita la zona de 450 - 900 °C.

Naula (2014) en su trabajo de investigación determinó la relación microestructura/propiedades para soldaduras con diferentes electrodos en acero inoxidable austenítico AISI 304 que fueron evaluados por Naula con la finalidad de determinar los cambios estructurales y las propiedades mecánicas de las juntas soldadas como: dureza Rockwell B, pruebas de impacto, análisis metalográfico, resistencia a la fluencia y rotura. El metal base fueron soldados en múltiples pasadas usando como material de aporte distintos electrodos AWS E308L-16, AWS E309L-16, AWS E316H-16 con el proceso de soldadura SMAW manual, para lo cual calibró la máquina a un amperaje adecuado según catálogos de fabricantes de electrodos, para mantener un arco equilibrado y una correcta disolución del material de aporte. Los ensayos de dureza Rockwell B indicaron una tendencia desde la zona de fusión donde incrementó la dureza y se disminuyó la misma cuando más se aproxima al metal base, mientras que los ensayos de tracción y rotura tuvieron resistencias aceptables.

Villavicencio (2010) indica que la relación microestructura/propiedades para soldaduras similares y disimiles entre aceros inoxidables AISI 304 y acero de bajo contenido de carbono AISI 1008 han sido evaluadas en su trabajo con la finalidad de determinar los cambios microestructurales y las propiedades mecánicas de las juntas



como: microdureza Vickers, resistencia a la fluencia y rotura. Los materiales fueron soldados en una sola pasada usando el material de aporte ER-316L con el proceso GTAW semiautomático, para lo cual diseñó y construyó un dispositivo de traslación lineal que permitió controlar la longitud de arco y velocidad de avance. Los perfiles de microestructura Vickers indicaron una tendencia descendente desde la zona de fusión hasta el metal base. Los ensayos de doblado revelaron buena ductilidad en las juntas, mientras que los límites de fluencia y rotura tuvieron resistencias aceptables. En esta investigación demostró muy buenos resultados para la relación entre la microestructura y propiedades en este tipo de soldaduras disimiles.



CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA DEL ESTUDIO

Para cumplir con el primer objetivo específico de seleccionar los electrodos de trabajo y determinar los parámetros óptimos de soldadura en la aplicación del proceso SMAW y GTAW en uniones soldadas del acero AISI 304 y preparar las probetas para su respectiva evaluación de dureza, estas se desarrollaron en la empresa ULR INDUSTRIAS E.I.R.L. especializada en fabricación de productos metálicos para uso estructural que se encuentra ubicado en el Departamento de Puno, Provincia de Puno y Distrito de Puno, registrada dentro de las sociedades mercantiles y comerciales como una sociedad anónima cerrada con RUC 20600064755 y ubicado en el parque industrial salcedo LL-7 y para llevar a cabo el ensayo de dureza estos se realizaron en la empresa JMC SOLUCIONES INDUSTRIALES E.I.R.L dirección Av. Industrial N° 302-B APIMA, ubicado en el Departamento de Arequipa, Provincia de Arequipa Distrito de Paucarpata.

3.2. PERIODO DE DURACIÓN DEL ESTUDIO

El periodo de ejecución del presente proyecto se desarrolló en dos etapas consistentes en seleccionar los electrodos, determinar los parámetros óptimos y preparación de probetas para ejecutar el ensayo de dureza se realizaron durante los meses de mayo junio del 2021 y la evaluación de la propiedad mecánica de resistencia a la dureza se realizó en el mes de junio del 2021.



3.3. PROCEDENCIA DEL MATERIAL ESTUDIADO

Metal base

Se empleó el acero AISI 304, con las siguientes características:

Material: Metal base.

Forma del producto: Plancha de acero inoxidable.

Espesor: 8 mm.

Estado de suministro: Recocido.

Los aceros inoxidables AISI 304 se caracterizan por su tenacidad y resistencia a la corrosión, además de ser los aceros más fáciles de soldar del grupo de los inoxidables.

Metal de aporte

En la fabricación de las probetas soldadas se emplearon electrodos de acero inoxidable revestidos para el proceso de soldadura SMAW electrodo E308L-16, E309L-16 y E316L-16.

Para el proceso de soldadura GTAW se emplearon electrodos ER 308L y ER309L

Así mismo los materiales que se necesitan para cumplir los objetivos propuestos vienen a ser los siguientes:

- Máquina de soldar SMAW
- Máquina de soldar GTAW
- Durómetro: Rockwell
- Vernier



- Micrómetro
- Cepillo circular de alambre suave
- Amoladora
- Telas de algodón
- cámara fotográfica
- equipo de protección personal
- Código AWS D1.6
- Código ASTM E18
- Especificaciones técnicas, normas y estándares aplicables

3.4. POBLACIÓN Y MUESTRA DEL ESTUDIO

3.4.1. Población

La población sobre la cual se basa la investigación está constituida por placas de acero inoxidable AISI 304 austenítico, a los cuales se realizarán una serie de pruebas de laboratorio con el objeto de obtener datos acerca de las propiedades mecánicas los cuales deben ser concretos y verídicos. Los datos se obtendrán de: Placas en acero inoxidable AISI 304 austenítico.

3.4.2. Muestra

Para ensayos en juntas de soldadura de aceros inoxidables según norma AWS D1.6 recomienda 2 muestras, en este caso para una mejor interpretación de datos se consideró 3 muestras para el proceso SMAW y 2 muestras para el proceso GTAW.



1 placa soldada, acero inoxidable AISI 304 austenítico con electrodo E 308L-16.

1 placa soldada, acero inoxidable AISI 304 austenítico con electrodo E 309 L-16.

1 placa soldada, acero inoxidable AISI 304 austenítico con electrodo E 316 L-16.

1 placa soldada, acero inoxidable AISI 304 austenítico con varilla ER 308L.

1 placa soldada, acero inoxidable AISI 304 austenítico con varilla ER309L.

3.5. DISEÑO ESTADÍSTICO

Para el análisis e interpretación de los datos obtenidos se utilizó la referencia MICROSOFT EXCEL, el cual permitió conocer los parámetros de la presente investigación y la resistencia de la dureza y en cuanto a los indicadores se utilizaron tablas, gráficas de barras, dispersión entre otros para detallar los resultados a obtenerse.

3.6. PROCEDIMIENTO

En la siguiente figura 9 se muestra el flujograma que describe el procedimiento experimental empleado en esta investigación, en el mismo se destacan seis etapas principales: Selección del material base, preparación de junta, selección de material de aporte y parámetros de soldadura, evaluación de la resistencia a la dureza y su eficiencia en la soldabilidad del acero AISI 304 y comparación de resultados de la resistencia óptima para soldar acero AISI 304.

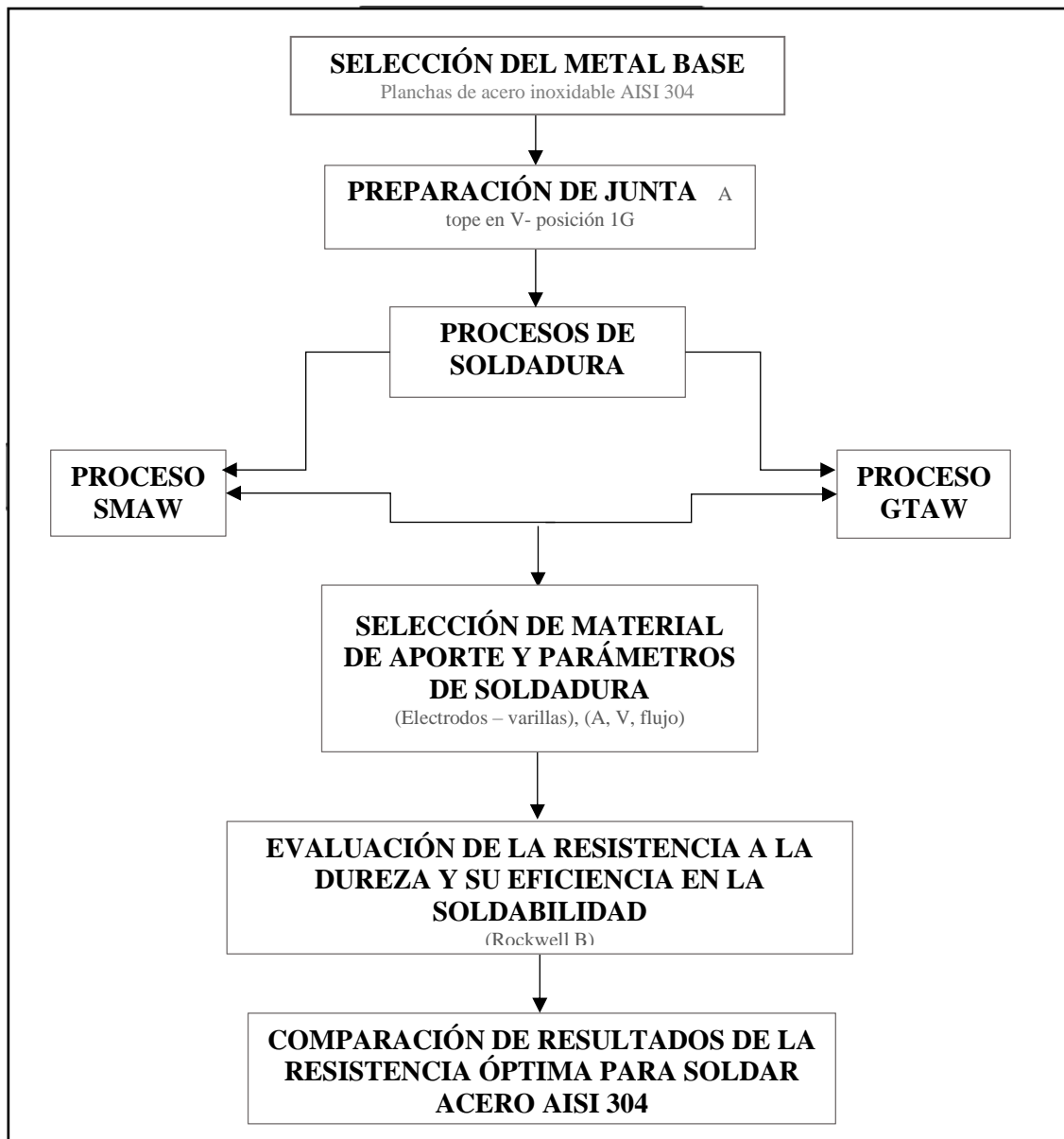


Figura 9. Flujograma del procedimiento experimental

3.6.1. Metodología

La metodología que se empleó es del tipo experimental y aplicada, debido a que se seleccionaron los materiales base, procesos de soldadura SMAW y GTAW, selección de parámetros de soldadura, material de aporte con los cuales se procedió a efectuar las uniones soldadas, y previa preparación de las probetas, se sometieron a pruebas de ensayo de dureza y finalmente se analizaron los resultados en forma cuantitativa para elaborar y validar un procedimiento de soldadura.



No es necesario utilizar precalentamiento, debido a que son aceros inoxidable austeníticos, sin embargo, sí es necesario efectuar protección gaseosa en el reverso al efectuarse la soldadura GTAW. Asimismo, tampoco es necesario la caracterización de la composición química de los materiales debido a que se adquirió en formatos estandarizados o normalizados; sin embargo, para corroborar se hicieron los ensayos de dureza HRB.

3.6.2. Modalidad de la investigación

Tiene la siguiente modalidad:

Descriptivo. – En esta investigación se da un enfoque muy minucioso referente al problema en una circunstancia especial determinada, la siguiente investigación es la más acertada al problema enfocado por su origen después de realizar el ensayo de dureza.

Aplicada: Los resultados obtenidos de esta investigación se utilizaron para la solución de la problemática de la investigación, es decir el estudio que se realizó contiene las soldaduras SMAW y GTAW en un acero inoxidable AISI 304 contendrá resultados de la aplicación de dos de ellos, brindando información acerca de la calidad de la unión soldada y por tanto, facilitando la toma de decisión.

3.6.3. Niveles de la investigación

La presente investigación contiene una modalidad de nivel experimental. La investigación experimental es indispensable en este proyecto puesto que para el desarrollo del trabajo se analizó y evaluó la fiabilidad de nuestro proyecto y científica haciendo la comparación de los procesos de soldadura SMAW y GTAW; esta modalidad toma contacto en forma directa con la realidad, para obtener información de acuerdo al objetivo del proyecto.



La modalidad de la investigación documental bibliográfica tiene como propósito detectar, ampliar y profundizar diferentes enfoques, teorías, conceptualizaciones y criterios de diversos autores sobre una cuestión determinada, basándose en documentos, libros, revistas, internet y estadística, La recolección de información es uno de los procesos más importante y complejos no solamente para la investigación de las partes constitutivas sino también para comparar datos y ampliar los conocimientos en cuanto se refiere a los procesos de soldadura SMAW y GTAW.

3.6.4. Desarrollo del procedimiento de investigación

Se describe las partes más relevantes y la forma más adecuada.

- Material base acero inoxidable AISI 304 austenítico

Se tomó como parte principal del tema a estudiar el acero ya mencionado, por la principal característica que es la más utilizada en la actualidad en la industria láctea, alimentos por su alta resistencia a la corrosión.

1. Tipos electrodos

Para interpretación de resultados se adquirieron tres tipos de electrodos y dos tipos de varillas que se puede encontrar en el mercado, pero con algo de dificultad por tener un costo considerable y los proveedores limitan la venta por ser consumidores minoristas.

2. Preparación de juntas

La preparación de juntas se apoya según normas de soldadura de acero inoxidable Structural Welding Code Stainless Steel AWS D1.6.



3. Junta a tope con ranura en V

Es una junta que está diseñada de un ángulo de 60 grados por elemento a ser soldado y un talón de 2.4 mm.

- 3.1. El ángulo se le da forma con una amoladora con piedra de desbaste que no sea usada en acero al carbono para evitar la contaminación.
- 3.2 Se trata de evitar el exceso de calor al momento a ser amolado, para esto debe dar tramos cortos y sin aplicar excesiva carga.

4. Soldado de las juntas

- 4.1. Regulación de amperaje de la máquina soldadora de acuerdo a catálogos recomendado por los fabricantes de electrodos.
- 4.2. Ubicar las probetas en un lugar completamente limpio de grasas y aceites.
- 4.3. Dar puntos de soldadura en los extremos de la probeta para evitar ser deformado al momento de ser soldados y anclar con prensas en los extremos.
- 4.4. Se da tramos cortos del cordón para evitar el exceso de temperatura en la probeta.
- 4.5. Una vez terminado de soldar debe ser enfriado a temperatura ambiente, evitando el enfriamiento forzado para que no se altere las propiedades de las probetas soldadas.

5. Preparación de las probetas

- 5.1. Una vez que se encuentran completamente fría la probeta se debe pulir con mucho cuidado la parte del cordón, con el fin que quede a espesor del material base.



- 5.2. Se procede a señalar para el corte de las probetas según las dimensiones que nos indican la norma ASTM E 18.0 para ensayos de dureza.

6. Análisis de dureza

- Preparación de la probeta de la junta soldada.
- Una vez terminado el proceso debe ser enfriado a temperatura ambiente, rectificar la cara y la raíz de la soldadura, mediante una máquina herramienta. Este método se logra definir por medio de la norma ASTM E 18.0.
- Calibración del durómetro.
- Antes de realizar el ensayo debe ser calibrado el durómetro, mediante un patrón para evitar la adquisición de datos erróneos.
- Realización del ensayo de dureza.
- Para realizar este ensayo la separación entre borde de la otra debe ser mayor a 2,5 veces el diámetro del Identador.
- Apreciación de resultados
- Para cumplir con el primer objetivo específico los resultados se demuestran haciendo la mejor elección de los tres tipos de electrodos que se usaron en el proceso SMAW y de las dos varillas que se utilizaron en el proceso GTAW y en función a ello seleccionar los mejores parámetros de soldadura para luego de ello demostrar cuál de los dos procesos de soldadura es el más eficiente.

Luego para poder cumplir con el segundo objetivo específico en las mismas probetas soldadas se hicieron el ensayo de dureza HRB para ver la resistencia de la dureza, entre las tres primeras probetas soldadas con el proceso SMAW y luego con las



dos últimas probetas soldadas con el proceso GTAW y así demostrar cuál de estos dos procesos de soldadura presenta mejor resistencia a la dureza en la zona ZAC.

3.6.5. Técnicas y procedimientos de recolección de datos

La recolección de información se tomó de los parámetros de soldadura y ensayos de dureza, esta información fue tomada de manera directa de las probetas de acero inoxidable austenítico AISI 304 soldadas mediante el proceso SMAW y GTAW, además cabe destacar que se usó como fuentes de ayuda catálogos y normas que nos facilitaron datos técnicos los cuales ayudaron al momento de realizar el procesamiento y análisis de los resultados obtenidos.

Al concluir con la recolección de datos y resultados se procedió a realizar una revisión minuciosa de la misma mediante esta revisión se detectó datos erróneos, incompletos con la finalidad de facilitar la tabulación de los datos.

Una vez concluido con la revisión de los datos y resultados obtenidos se procedió a interpretar de una manera adecuada y ordenada basándonos en los datos y resultados obtenidos mencionados anteriormente. Además, se realizó la representación de resultados obtenidos a través de tablas y gráficos los cuales permitieron de manera visual una mayor apreciación de los resultados los cuales nos facilitaron determinar las conclusiones y recomendaciones que permitirán evaluar de manera global el tema de investigación planteado al inicio de este trabajo experimental.

3.7. VARIABLES

Variable dependiente

Proceso de soldadura SMAW y GTAW.



Variable independiente

Resistencia a la dureza

3.8. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

La selección de los parámetros de entrada cumplió un rol muy importante y significativo en la determinación de la calidad de la junta soldada. La calidad de la junta puede ser definida en términos de propiedades tales como la resistencia mecánica o última resistencia a la tensión, porcentaje de elongación y muchos otros. Generalmente todos los procesos de soldadura son usados con el objetivo de obtener una junta soldada con las propiedades mecánicas deseadas y con un mínimo de distorsión. El presente trabajo se planifica para investigar algunos aspectos de la soldadura SMAW y GTAW. El material de trabajo considerado fue el acero inoxidable austenítico AISI 304. Los parámetros de trabajo seleccionados influyeron en lo que se deseó medir como variable de respuesta que fue la prueba de dureza.

El proceso de soldadura seleccionado para la soldadura de los aceros inoxidables AISI 304 utilizando los procesos de soldadura SMAW y GTAW, son óptimos y sirven de guía en diversas construcciones estructurales donde se requiera en las empresas metal mecánicas de la región Puno y de la propia Universidad, como parte fundamental en el desarrollo de la Metalurgia Transformativa y de calidad, con la finalidad de generar ahorros, sin poner en riesgo su resistencia mecánica de dureza.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. RESULTADOS

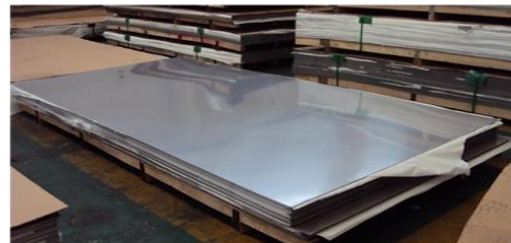
En este capítulo se presentan los resultados obtenidos después de llevar a cabo el desarrollo experimental expuesto, permitiendo analizar la resistencia a la dureza en la soldabilidad del acero inoxidable 304 por los procesos SMAW y GTAW exponiéndose los resultados en el siguiente orden para cada proceso:

- Metal base

Se seleccionó el acero austenítico AISI 304 debido a su tenacidad y resistencia a la corrosión, además de ser los aceros más fáciles de soldar del grupo de los inoxidables; en cuanto a sus características específicas, el 304 es la primera opción para una buena resistencia a la corrosión por ser la aleación base de los aceros de la serie 300 con las siguientes características:

Tabla 10. Datos informativos del metal base

DATOS INFORMATIVOS			
Probeta: N.-1	Acero AISI		
Realizado por:	Nadir Canahua Anchapuri	Supervisado por:	Julcar Melo Cari
Lugar de análisis:	Arequipa-Perú	Fecha:	4/06/2021
Dureza:	90 Rockwell B Max	Temperatura ambiente	22°C
DENOMINACIONES DEL ACERO UTILIZADO			4/06/2021
Material	Acero AISI	Tipo	Austenítico
Espesor	8 mm	Resistencia a la tracción	515 Mpa 75 KSI
Longitud	18"	Dureza	90 Rockwell B Max
Características	plancha	Tratamiento térmico	Condiciones de recocido
Elongación 50mm	40%	Resistencia a la fluencia 0,2%	205 Mpa 30 KSI
OBSERVACIÓN:			
Las propiedades principales de aceros inoxidables austeníticos fueron obtenidas según normas ASTM A - 240			



- **Metal de aporte**

En la fabricación de las probetas soldadas se emplearon los siguientes materiales de aporte: E 308L, E 309L y E316L, para el proceso SMAW y las varillas ER 308L y ER 309L para el proceso GTAW en la soldabilidad del acero austenítico AISI 304. Para el metal de aporte seleccionado, como regla general, se decidió por aquellos que tenga una composición similar.

En el WPS se especifica los usos, características y aplicaciones de los electrodos proporcionados por el fabricante y sus propiedades mecánicas.

- **Maquinaria utilizada para la soldadura SMAW**

Marca: IMS PRO. Modelo: inverter 200P

Es un generador de corriente continua. Suministro de monofásica 400 V 50/60 Hz.

La intensidad máxima de soldadura con la que puede trabajar es de 200 A en un factor de marcha del 16%.

Dimensiones: 380 mm longitud 180 mm Ancho 220 mm Alto Peso: 5.1 kg



Figura 10. Máquina de soldadura GTAW



- **Maquinaria utilizada para la soldadura GTAW**

Marca: Sincosal, Modelo: NOVATIG 252 DC PULSE.

Es un generador de corriente continua, suministro de trifásica 400 V - 50/60 Hz.

Corriente de soldadura máxima que alcanza es de 250 A en un factor de marcha del 60 % y una tensión en vacío de 67 V, dimensiones: 480 mm longitud 190 mm Ancho 360 mm Alto. Peso 11 Kg.

- **Selección del gas de protección**

Para el proceso GTAW se requirió emplear un gas de protección inerte que puede ser argón o helio, sin embargo, se decide emplear argón porque las juntas soldadas van a realizarse en posición 1G. Por lo tanto, para esta posición no se puede emplear helio, debido a que este gas tiende a ascender y es más adecuado para la posición 4G o sobre cabeza.

- **Soldeo de probetas**

Las pruebas experimentales de soldeo se realizaron en la empresa ULR INDUSTRIAS E.I.R.L. de la ciudad de Puno, de acuerdo al WPS elaborado con anterioridad y que se presentan en las Tablas 11, 13, 15, 17 y 19, con la finalidad de determinar el efecto de soldabilidad de los aceros inoxidable austeníticos AISI 304 con diferentes aportes E 308L, E 309L, E316L, ER 308L y ER 309L para los procesos SMAW y GTAW.

En la parte experimental se realizaron las soldaduras con los procesos de soldadura SMAW Y GTAW. Las pruebas consisten en la unión de cinco probetas de acero AISI 304, cuyas dimensiones de las probetas fueron 100 mm x 40 mm x 8 mm.

La posición de soldeo en la que se realizaron las soldaduras fue en posición plana designada según la AWS como 1G. En todas las pruebas se realizaron dos puntos de soldadura antes de empezar con el cordón.



Figura 11. Probetas de acero AISI 304 en distintas posiciones



Figura 12. Elaboración de probetas con proceso GTAW



4.1.1. Selección de electrodos de trabajo y determinación de los parámetros óptimos de soldadura en la aplicación del proceso SMAW y GTAW en uniones soldadas del acero AISI 304

Durante el proceso de soldadura se siguió una especificación del procedimiento de soldadura (WPS), para que los resultados fueran repetibles.

La selección de los parámetros de entrada cumple un rol muy importante y significativo en la determinación de la calidad de la junta soldada. La calidad de la junta puede ser definida en términos de propiedades tales como la resistencia mecánica o última resistencia a la tensión, porcentaje de elongación y muchos otros. Generalmente todos los procesos de soldadura son usados con el objetivo de obtener una junta soldada con las propiedades mecánicas deseadas y con un mínimo de distorsión.

El presente trabajo se planificó para investigar, seleccionar el material de aporte y parámetros adecuados de soldadura y por ende medir la resistencia de la dureza en la soldadura SMAW y GTAW cuyo material de trabajo fue el acero inoxidable austenítico AISI 304.

4.1.2. Especificación del procedimiento de soldadura (WPS)

El WPS es un documento que relaciona las variables a considerar en la realización de una soldadura específica, determina la ejecución de las pruebas de calificación tanto de proceso y procedimiento como del operario de soldadura.

El procedimiento se refiere a todas las condiciones presentes en la realización de una soldadura, el procedimiento de soldadura se efectuó en las condiciones referenciadas en el código AWS D1.6.



Posteriormente se han sometido los materiales utilizados en el procedimiento (cupones de prueba), a las pruebas de dureza HRB para comprobar la conservación de sus propiedades físicas de resistencia a la dureza, que es motivo del presente trabajo.

En cada prueba se midieron parámetros como: el tiempo invertido en realizar la unión de las probetas, el material aportado, la intensidad y voltaje, así como la complejidad al realizar la soldadura y el acabado final. Para finalmente realizar un análisis comparativo entre los diferentes procesos de soldadura.

4.1.3. Soldadura de placas con procesos SMAW y GTAW

El electrodo o metal de aporte que se utilizó son electrodos E308L, E309L y E316L de acuerdo con la norma AWS A5.4 para el caso del proceso SMAW, y varillas de soldadura ER308L y ER309L según la norma AWS A5.9 para el proceso GTAW. Esta elección de electrodo y metal de aporte se seleccionó tomando en consideración lo recomendado en los catálogos o manuales de soldadura (SOLDEXA-OERLIKON) para soldar este tipo de acero inoxidable, lo cual fue corroborado en el presente estudio y demostrándose el uso de estos electrodos en soldaduras que se llevan a cabo a una altura de 3500 m.s.n.m. aproximadamente.

En la preparación de las placas antes de soldarlas se tomó en cuenta las especificaciones detalladas en los respectivos WPS de acuerdo con los distintos procesos de soldadura: SMAW y GTAW. Se puede observar las placas preparadas antes de ser soldadas en la Figura 13.

Generalmente, no es beneficioso someter una pieza de acero inoxidable austenítico a un precalentamiento previo a la soldadura, porque se deteriora la resistencia a la corrosión de estos aceros como consecuencia de fenómenos de precipitación de compuestos de carburo de cromo, también se aumenta el riesgo de producir fisuración en

caliente en la soldadura, generar distorsión y deformaciones de las piezas, esto se debe a que los aceros inoxidable austeníticos tienen un mayor coeficiente de dilatación respecto a otros aceros. Por lo tanto, no se utilizó precalentamiento previo a la soldadura.



Figura 13. Preparación de placas del proceso de soldadura SMAW y GTAW

4.1.4. Especificaciones del procedimiento de soldadura (WPS) del proceso de soldadura SMAW

Tabla 11. Especificación del procedimiento de soldadura (WPS) con E308L-16

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO - PUNO ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA METALURGICA TESIS: ESTUDIO COMPARATIVO DE LOS PROCESO DE SOLDADURA SMAW Y GTAW EN ACEROS INOXIDABLES AUSTENITICOS AISI 304 PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA A LA DUREZA						
ESPECIFICACION DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS)						
Nombre de la Institución:		UNA-PUNO		N° Identificación: TESIS 001		
PQR N°:		UNA-PUNO-001		Fecha: 06/05/2021		
Según norma:		AWS D1.6 Structural Welding Code-Stainless Steel		Realizado por: Nadir Canahua Anchapuri		
Artículo I. Junta utilizada			Artículo II. Técnica de soldadura			
Tipo de junta:		A tope en "V"		Proceso de soldadura: SMAW		
Abertura de raíz:		1.5 mm		Tipo de soldadura: Ranura a escuadra		
Talón:		2.4 mm		Soldadura a: Un lado		
Ángulo de ranura:		60°		Cordón de respaldo: No		
Placa de respaldo:		No		Limpieza: Si		
Preparar bisel:		Si		Paso raíz: Amoladora		
Método:		Amolado				
Artículo III. Metal Base			Artículo V. Posición de Soldadura			
Especificación:		AISI 304		Posición de soldadura: 1G		
Espesor:		8 mm		Progresión: Ascendente		
Material base		Plancha				
Artículo IV. Metal de Aporte			Precalentamiento		NA	
Diámetro:		3.25mm		Tiempo entre pases		
Denominación AWS:		E308 L - 16		NA		
Especificación AWS:		AWS A5.4				
Casa comercial:		Soldexa				
Denominación comercial:		Oerlikon				
			Artículo VI. Notas			
			* Verificar alineación de la junta			
			* Asegurar limpieza de las partes			
Detalle de la Junta						
<p style="text-align: right;">e: 8 a: 1.5 t: 2.4</p>						
Metal de aporte		Corriente		Tensión de trabajo (Voltios)	Técnica de soldadura	
Clase	Diámetro (mm)	Tipo y polaridad	Intensidad (Amperios)		oscilado	recto
308L	3.25	(DC): DCEP	60-120	27	x	

Tabla 12. Análisis del proceso de soldadura con electrodo E 308L-16

Parámetros de operación

Intensidad de corriente: 100 Amperios

Velocidad de avance: 68 mm/min

Voltaje: 27 V



Cebado del arco	Muy fácil
Facilidad de soldadura	Alta
Calidad del cordón	Muy alta
Penetración	Muy alta
Proyecciones	Ninguna

Observaciones: Fácil cebado de arco y aspecto muy bueno, consiguiendo un cordón a casi mismo nivel que las piezas

Tabla 13. Especificación del procedimiento de soldadura (WPS) con E309L-16

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO - PUNO ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA METALURGICA TESIS: ESTUDIO COMPARATIVO DE LOS PROCESO DE SOLDADURA SMAW Y GTAW EN ACEROS INOXIDABLES AUSTENITICOS AISI 304 PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA A LA DUREZA						
ESPECIFICACION DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS)						
Nombre de la Institución:	UNA-PUNO		N° Identificación: TESIS 002			
PQR N°:	UNA-PUNO-002		Fecha: 06/05/2021			
Según norma:	AWS D1.6 Structural Welding Code-Stainless Steel		Realizado por: Nadir Canahua Anchapuri			
Artículo I. Junta utilizada			Artículo II. Técnica de soldadura			
Tipo de junta:	A tope en "V"		Proceso de soldadura:	SMAW		
Abertura de raíz:	1.5 mm		Tipo de soldadura:	Ranura a escuadra		
Talón:	2.4 mm					
Ángulo de ranura:	60°		Soldadura a:	Un lado		
Placa de respaldo:	No		Cordón de respaldo:	No		
Preparar bisel:	si		Limpieza:	Si		
Método:	Amolado		Paso raíz:	Amoladora		
Artículo III. Metal Base			Artículo V. Posición de Soldadura			
Especificación:	AISI 304		Posición de soldadura:	1G		
Espesor:	8 mm		Progresión:	Ascendente		
Material base	Plancha					
Artículo IV. Metal de Aporte			Pre calentamiento	NA		
Diámetro:	3.25mm		Tiempo entre pases	NA		
Denominación AWS:	E309 L - 16		Artículo VI. Notas			
Especificación AWS:	AWS A5.4					
Casa comercial:	Soldexa					
Denominación comercial:	Oerlikon					
Detalle de la Junta						
Metal de aporte		Corriente		Tensión de trabajo	Técnica de soldadura	
Clase	Diámetro (mm)	Tipo y polaridad	Intensidad (Amperios)	(Voltios)	oscilado	recto
E309L	3.25	(DC):DCEP	90-120	27	x	

Tabla 14. Análisis del proceso de soldadura con electrodo E 309L-16

Parámetros de operación

Intensidad de corriente: 100 Amperios

Velocidad de avance: 68 mm/min

Voltaje: 27 V



Cebado del arco	Fácil
Facilidad de soldadura	Media
Calidad del cordón	Alta
Penetración	Alta
Proyecciones	Pocas

Observaciones: Fácil cebado de arco y aspecto regular, consiguiendo un cordón con pocas proyecciones a casi el mismo nivel que las piezas

Tabla 15. Especificación del procedimiento de soldadura (WPS) con E316L-16

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO - PUNO ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA METALURGICA TESIS: ESTUDIO COMPARATIVO DE LOS PROCESO DE SOLDADURA SMAW Y GTAW EN ACEROS INOXIDABLES AUSTENTICOS AISI 304 PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA A LA DUREZA					
ESPECIFICACION DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS)					
Nombre de la Institución:		UNA-PUNO		N° Identificación: TESIS 003	
PQR N°:		UNA-PUNO-003		Fecha: 06/05/2021	
Según norma:		AWS D1.6 Structural Welding Code-Stainless Steel		Realizado por: Nadir Canahua Anchapuri	
Artículo I. Junta utilizada			Artículo II. Técnica de soldadura		
Tipo de junta:		A tope en "V"		Proceso de soldadura: SMAW	
Abertura de raíz:		1.5 mm		Tipo de soldadura: Ranura a escuadra	
Talón:		2.4 mm		Soldadura a: Un lado	
Ángulo de ranura:		60°		Cordón de respaldo: No	
Placa de respaldo:		No		Limpieza: Si	
Preparar bisel:		si		Paso raíz: Amoladora	
Método:		Amolado			
Artículo III. Metal Base			Artículo V. Posición de Soldadura		
Especificación:		AISI 304		Posición de soldadura: 1G	
Espesor:		8 mm		Progresión: Ascendente	
Material base		Plancha			
Artículo IV. Metal de Aporte			Precalentamiento		NA
Diámetro:		3.25mm		Tiempo entre pases	
Denominación AWS:		E316 L - 16		NA	
Especificación AWS:		AWS A5.4			
Casa comercial:		Soldexa			
Denominación comercial:		Oerlikon		Artículo VI. Notas	
				* Verificar alineación de la junta	
				* Asegurar limpieza de las partes	
Detalle de la Junta					
Metal de aporte		Corriente		Tensión de trabajo (Voltios)	Técnica de soldadura
Clase	Diámetro (mm)	Tipo y polaridad	Intensidad (Amperios)		oscilado recto
E316	3.25	(AC o DC): DCEP	70-120	27	x

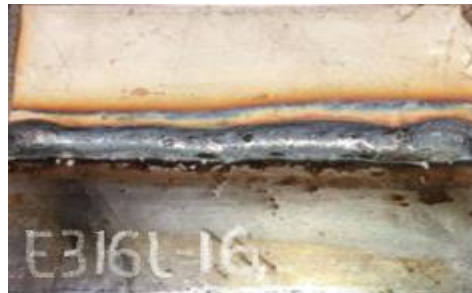
Tabla 16. Análisis del proceso de soldadura con electrodo E 316L-16

Parámetros de operación

Intensidad de corriente: 100 Amperios

Velocidad de avance: 68 mm/min

Voltaje: 27 V



Cebado del arco	fácil
Facilidad de soldadura	media
Calidad del cordón	alta
Penetración	alta
Proyecciones	muchas

Observaciones: Fácil cebado de arco y aspecto no tan bueno, consiguiendo un cordón irregular.



4.1.5. Interpretación de resultados del proceso SMAW con E 308L, E309 y E316L

Una vez elaborados los cupones de ensayo, se determinaron mediante inspección visual la mejor soldadura en función del aspecto superficial, ancho del cordón y penetración. La selección final para la selección del mejor cupón se realizó posteriormente a la inspección visual, tomando como criterio la junta soldada que presentó alteraciones o cambios mínimos a nivel microestructural, específicamente en la ZF, con lo cual se garantizaría un balance de fases adecuado (austenita, ferrita) y cambios relevantes mínimos en las propiedades mecánicas de la junta. La velocidad de soldadura influyó de forma significativa en la calidad de la soldadura ya que está directamente relacionada con la cantidad de calor suministrada a la pieza de trabajo por unidad de tiempo. Por otra parte, la intensidad de corriente seleccionada dependió directamente del espesor de la pieza de trabajo. Si la corriente es insuficiente no es posible lograr un arco estable, se produce un depósito fundido reducido y por consiguiente una soldadura de calidad deficiente por la falta de penetración y un acabado superficial irregular.

Todos los parámetros analizados anteriormente en el análisis de variación de electrodos en un proceso de soldadura SMAW en acero inoxidable AISI 304 austenítico, fue importante tomar en cuenta, que todo los electrodos tengan una función específica en el campo de la industria metalmecánica, en nuestro estudio podemos enmarcar el tipo de electrodo que nos brinda la mejor característica en una junta soldada de un acero austenítico, el tipo de electrodo más ideal, por sus características el AWS E 308L-16.

4.1.6. Especificaciones del procedimiento de soldadura (WPS) del proceso de soldadura GTAW

Tabla 17. Especificación del procedimiento de soldadura (WPS) con ER308L

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO - PUNO ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA METALURGICA TESIS: ESTUDIO COMPARATIVO DE LOS PROCESO DE SOLDADURA SMAW Y GTAW EN ACEROS INOXIDABLES AUSTENITICOS AISI 304 PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA A LA DUREZA			
ESPECIFICACION DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS)			
Nombre de la Institución:	UNA-PUNO	N° Identificación: TESIS 004	
PQR N°:	UNA-PUNO-004	Fecha: 06/05/2021	
Según norma:	AWS D1.6 Structural Welding Code-Stainless Steel	Realizado por: Nadir Canahua Anchapuri	
Artículo I. Junta utilizada		Artículo II. Técnica de soldadura	
Tipo de junta:	A tope en "V"	Proceso de soldadura:	GTAW
Abertura de raíz:	1.5 mm	Tipo de soldadura:	Ranura a
Talón:	2.4 mm		escuadra
Ángulo de ranura:	60°	Soldadura a:	Un lado
Placa de respaldo:	No	Cordón de respaldo:	No
Preparar bisel:	si	Limpieza:	Si
Método:	Amolado	Paso raíz:	Amoladora
Artículo III. Metal Base		Artículo V. Posición de Soldadura	
Especificación:	AISI 304	Posición de soldadura:	1G
Espesor:	8 mm	Progresión:	Ascendente
Material base:	Plancha		
Artículo IV. Metal de Aporte		Pre calentamiento	NA
		Tiempo entre pases	NA
Diámetro:	3.25mm	Artículo VI. Notas	
Denominación AWS:	ER308 L	* Verificar alineación de la junta	
Especificación AWS:	AWS A5.9	* Asegurar limpieza de las parte	
Casa comercial:	Soldexa	* Raíz del cordón con un caudal de 12	
Denominación comercial:	Oerlikon	l/min	
Artículo V. Electrodo		Artículo VII. GAS PROTECCIÓN	
Tipo:	No consumible	Tipo:	Argón
Composición:	Tungsteno con 2% Torio	Caudal:	12 L/min
Detalle de la Junta			
Metal de aporte	Corriente		Técnica de soldadura

Clase	Diámetro (mm)	Tipo y polaridad	Intensidad (Amperios)	Tensión de trabajo (Voltios)	oscilado	recto
ER308 L	3.25	DCEN	30-250	16	x	

Tabla 18. Análisis del proceso de soldadura con electrodo ER 308L

Parámetros de operación

Intensidad de corriente: 100 Amperios

Velocidad de avance: 60 mm/min

Voltaje: 16 V / Flujo: Argón 12 l/min



Cebado del arco	Muy fácil
Facilidad de soldadura	Media
Calidad del cordón	Muy alta
Penetración	Muy alta
Proyecciones	ninguna

Observaciones: Fácil cebado de arco y aspecto muy bueno, consiguiendo un cordón a casi el mismo nivel que la pieza.

Tabla 19. Especificaciones del procedimiento de soldadura (WPS) con ER309 L

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO - PUNO ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA METALURGICA TESIS: ESTUDIO COMPARATIVO DE LOS PROCESO DE SOLDADURA SMAW Y GTAW EN ACEROS INOXIDABLES AUSTENTICOS AISI 304 PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA A LA DUREZA			
ESPECIFICACION DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS)			
Nombre de la Institución:	UNA-PUNO	N° Identificación: TESIS 005	
PQR N°:	UNA-PUNO-005	Fecha: 06/05/2021	
Según norma:	AWS D1.6 Structural Welding Code-Stainless Steel	Realizado por: Nadir Canahua Anchapuri	
Artículo I. Junta utilizada		Artículo II. Técnica de soldadura	
Tipo de junta:	A tope en "V"	Proceso de soldadura:	GTAW
Abertura de raíz:	1.5 mm	Tipo de soldadura:	Ranura a
Talón:	2.4 mm		Escuadra
Ángulo de ranura:	60°	Soldadura a:	Un lado
Placa de respaldo:	No	Cordón de respaldo:	No
Preparar bisel:	si	Limpieza:	Si
Método:	Amolado	Paso raíz:	Amoladora
Artículo III. Metal Base		Artículo V. Posición de Soldadura	
Especificación:	AISI 304	Posición de soldadura:	1G
Espesor:	8 mm	Progresión:	Ascendente
Material base:	Plancha		
Artículo IV. Metal de Aporte		Pre calentamiento	NA
Diámetro:	3.25mm	Tiempo entre pases	NA
Denominación AWS:	ER309 L		
Especificación AWS:	AWS A5.9	Artículo VI. Notas	
Casa comercial:	Soldexa	* Verificar alineación de la junta	
Denominación comercial:	Oerlikon	* Asegurar limpieza de las partes	
		* Raíz del cordón con un caudal de 12 l/min	
Artículo V. Electrodo		Artículo VII. GAS PROTECCIÓN	
Tipo:	No consumible	Tipo:	Argón
Composición:	Tungsteno con 2% Torio	Caudal:	12 l/min
Detalle de la Junta			
<p style="text-align: right;"> e: 8 a: 1.5 t: 2.4 </p>			
Metal de aporte	Corriente		Técnica de soldadura

Clase	Diámetro (mm)	Tipo y polaridad	Intensidad (Amperios)	Tensión de trabajo (Voltios)	oscilado	recto
ER309 L	3.25	DCEN	30-250	16	x	

Tabla 20. Análisis del proceso de soldadura con electrodos ER 309 L

Parámetros de operación

Intensidad de corriente: 100 Amperios

Velocidad de avance: 60 mm/min

Voltaje: 16 V / Flujo: Argón 12 l/min



Cebado del arco	Fácil
Facilidad de soldadura	Media
Calidad del cordón	Alta
Penetración	Alta
Proyecciones	Ninguna

Observaciones: Observaciones: Fácil cebado de arco y aspecto no tan bueno, consiguiendo un cordón irregular.

4.1.7. Interpretación de resultados del proceso de soldadura GTAW con ER308 y ER309

Una vez elaborados los cupones de ensayo, se determinó mediante inspección visual la mejor soldadura en función del aspecto superficial, ancho del cordón y penetración. La selección final para la escogencia del mejor cupón se realizó



posteriormente a la inspección visual, tomando como criterio la junta soldada que presentó alteraciones o cambios mínimos a nivel microestructural, específicamente en la ZF, con lo cual se garantizaría un balance de fases adecuado (austenita, ferrita) y cambios relevantes mínimos en las propiedades mecánicas de la junta. La velocidad de soldadura influye de forma significativa en la calidad de la soldadura ya que está directamente relacionada con la cantidad de calor suministrada a la pieza de trabajo por unidad de tiempo. Por otra parte, la intensidad de corriente seleccionada depende directamente del espesor de la pieza de trabajo. Si la corriente es insuficiente no es posible lograr un arco estable, se produce un depósito fundido reducido y por consiguiente una soldadura de calidad deficiente por la falta de penetración y un acabado superficial irregular.

La tasa de flujo de gas protector tiene un efecto significativo en la formación y estabilidad del arco para la formación del charco metálico y la obtención de un cordón de soldadura de buena calidad. En líneas generales, un aumento en el flujo de gas resulta en un incremento de la velocidad de emisión del arco desde la cámara constructora, aumentando la presión sobre el charco metálico, con lo cual se logra desplazar mayor cantidad de metal fundido. Es decir, a medida que se aumentan los niveles de flujo de gas, aumenta la relación profundidad/ancho del cordón, consiguiéndose los niveles de penetración adecuados. Para nuestro estudio, se fijó un nivel de flujo de gas Argón estándar a 12 l/min, debido a que los diferentes autores concuerdan con este valor.

Todos los parámetros analizados anteriormente en el análisis de variación de electrodos en un proceso de soldadura GTAW en acero inoxidable AISI 304 austenítico, fue importante tomar en cuenta, que todo los electrodos tienen una función específica en el campo de la industria metalmecánica, en nuestro estudio podemos enmarcar el tipo de electrodo que nos brinda la mejor característica en una junta soldada de un acero austenítico, el tipo de electrodo más ideal, por sus características el AWS ER 308L.

4.1.8. Selección definitiva de conjuntos de parámetros de soldadura SMAW y GTAW

A partir de los resultados de la inspección visual se escogieron los conjuntos de parámetros que produjeron cordones con características superficiales y de penetración óptimas. En las Tablas 21 y 22 se presentan dichos conjuntos de parámetros. Tomando en cuenta estos aspectos y los estudios anteriores se escogió realizar los cordones de soldadura definitivos con los siguientes parámetros:

Tabla 21. Parámetros de soldadura SMAW

Velocidad de avance	68 mm/min
Amperaje	100 Amp
Voltaje	27 V

Fuente: Manual de soldadura Soldexa.

Tabla 22. Parámetros de soldadura GTAW

Velocidad de avance	60 mm/min
Amperaje	100 Amp
Voltaje	16 V
Flujo	Argón 12 l/min

Fuente: Manual de soldadura Soldexa.

La selección de ambos conjuntos se basó en la ausencia de discontinuidades que pudiesen afectar negativamente el desempeño de la junta en condiciones reales de servicio. Igualmente, se tomó en cuenta el grado de penetración, el cual permite predecir la fusión adecuada en la raíz de la junta dependiendo del aporte de energía. Sin embargo, si éste es muy elevado se favorece la posible distorsión de la junta, especialmente, el componente correspondiente al acero inoxidable, ya que esta aleación presenta un alto coeficiente de dilatación térmica y una baja conductividad térmica.

Finalmente, el proceso de soldadura GTAW es el más adecuado para unir material austenítico AISI 304 en el presente trabajo de investigación, debido a que proporciona soldaduras limpias de escoria y además son de gran calidad al tener siempre protegido el área de soldadura de la atmosfera, esto se corrobora al no encontrar ningún tipo de defecto en las probetas ensayadas. Las juntas soldadas con ambos procesos se pueden observar en la Figura 14.



Figura 14. Juntas soldadas con proceso SMAW y GTAW

4.1.9. Evaluación de la propiedad mecánica de resistencia de la dureza aplicando el proceso de soldadura SMAW y GTAW en la soldabilidad del acero AISI 304

Teniendo en consideración que en el estudio de la soldadura de acero inoxidable austeníticos, existen investigaciones relacionadas en comparación del tipo de proceso, pero no se encuentran el análisis de variación de electrodos en un proceso de soldadura SMAW y GTAW en acero inoxidable AISI 304 austenítico debido a que en la variación de electrodos se puede determinar el porcentaje del carbono, que contiene cada tipo de electrodo y la soldabilidad que contengan cada uno de ellos; es que a continuación se muestran los resultados del ensayo de dureza HRB realizado en las juntas soldadas del acero inoxidable austenítico AISI 304, utilizando el proceso SMAW en donde se utilizaron los electrodos revestidos E308L-16, E309L-16 y E 316L-16 y para el proceso de soldadura GTAW en donde se utilizaron varillas de aporte ER 308L y ER 309L

desarrollados en la empresa JMC soluciones; estos resultados se detallan en formatos establecidos para indicar los datos y resultados obtenidos al realizar los ensayos antes mencionados.

4.1.10. Cálculos del ensayo dureza

Se utilizó el ensayo de dureza Rockwell (HRB) debido a que no requiere la utilización de fórmula alguna para la determinación de la dureza. Esta se obtiene directamente del dial indicador de la máquina ya que la misma está dada por el incremento de profundidad de penetración debido a la acción del penetrador, el cual es una bolilla de acero.

El equipo que se utilizó para el barrido de dureza se muestra en la Figura 15 y su descripción técnica.

Descripción técnica del equipo para el ensayo de dureza	
Imagen del equipo	
Marca	Hardrocker
Modelo	HR 150 A
Indentador	Esférico de carburo de tungsteno. Diámetro 1/16 in
Cargas disponibles	60, 100, 150 kgf
Precarga	10 kgf
Medición	Análoga

Figura 15. Descripción del Durómetro

Fuente: www.ingemet.com.

Para llevar a cabo el presente ensayo se utilizó la norma ASTM E 18.0

Datos:

- Método dureza Rockwell B

- Identador esfera de acero diámetro 1/16"
- Carga aplicada (F): 980 N = 100 Kg.
- Tiempo de aplicación = 7 minutos

Tabla 23. Ensayo de dureza en soldadura SMAW de un acero inoxidable AISI 304 sin material de aporte

ENSAYO DE DUREZA			
DATOS INFORMATIVOS			
Probeta: N.-1	Acero AISI	Tipo de estudio	De laboratorio
Realizado por:	Nadir Canahua Anchapuri	Supervisado por:	Julcar Melo Cari
Lugar de análisis:	Arequipa-Perú	Fecha:	4/06/2021
Revisado por:	Julcar Melo Cari	N° de mediciones:	7
Laboratorio: JMC SOLUCIONES INDUSTRIALES E.I.R.L.			
PARAMETROS DE ENSAYO DE DUREZA			
Descripción			
Método	Rockwell (B)	Norma aplicable	ASTM E - 18.0
Tipo de penetrador		Identador 1/16" Esfera de acero	
Carga aplicada	100 Kgf	Tiempo de ensayo:	7 min
RESULTADO			
Número	mm	DUREZA HRB	
1	0	86	
2	4	87	
3	8	88	
4	12	89	
5	16	90	
6	20	89	
7	24	88	
Promedio		88	
Es una separación de 4 mm por espacio de Identador			
INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS			
En material sin soldadura la dureza máxima es de 90 RHB y un valor mínimo es de 86 RHB donde el promedio es 88 RHB del acero inoxidable austenítico 304.			

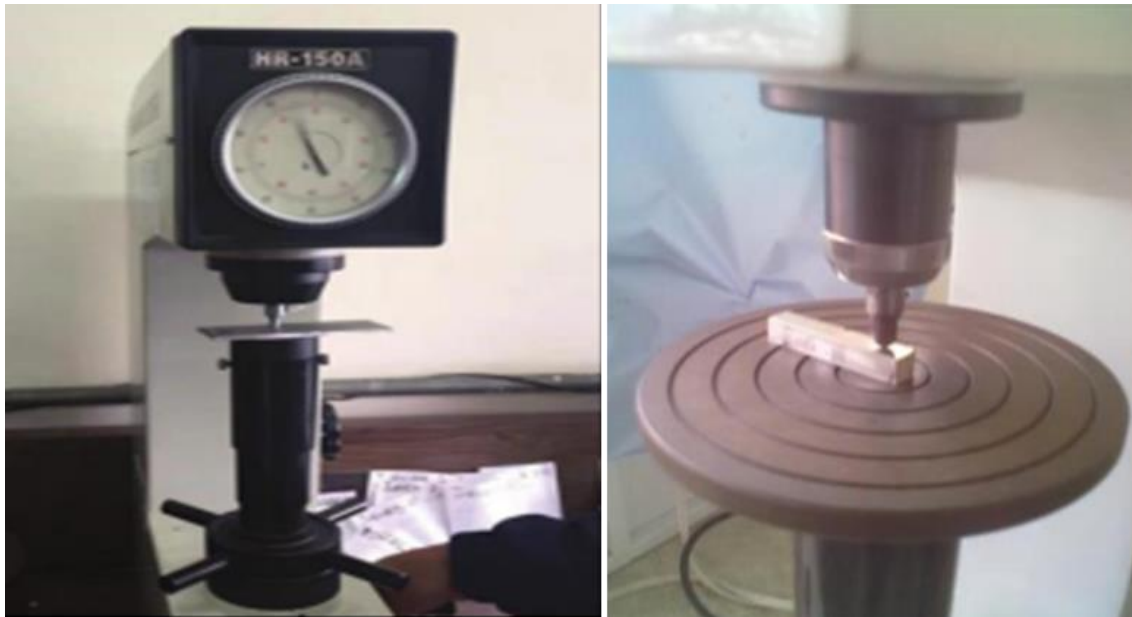


Figura 16. Durómetro

El procedimiento para desarrollar el proceso de evaluación de dureza de las probetas preparadas en juntas soldadas con soldadura SMAW y GTAW en un acero austenítico AISI 304, se siguió la siguiente secuencia:

- Preparación de la probeta.
- Calibración del durómetro.
- Realización del ensayo de dureza.
- Apreciación de resultados.

4.1.11. Resultados de ensayo de dureza de soldadura SMAW

Las mediciones de dureza fueron realizadas en cada una de las probetas soldadas y seleccionadas se realizó usando la norma ASTM E18. Los resultados del ensayo de Dureza Rockwell B son reportados en las Tablas 24, 25 y 26.

Tabla 24. Ensayo de dureza en soldadura SMAW de un acero inoxidable AISI 304 con electrodo AWS E308L-16

ENSAYO DE DUREZA																			
DATOS INFORMATIVOS DEL ESPECIMEN A ENSAYAR																			
Material base:	Acero AISI	Grado:	304																
Material de aporte:	AWS E308L-16	Amperaje:	100 A																
Tipo de soldadura:	SMAW	Voltaje:	220																
Tipo de estudio:	De laboratorio	Fecha:	4/06/2021																
Lugar de análisis:	Arequipa-Perú	JMC Soluciones																	
Realizado por:	Nadir Canahua Anchapuri	Supervisado por:	Julcar Melo Cari																
PARAMETROS DE ENSAYO DE DUREZA																			
Método:	Rockwell (B)	Normas de referencias	ASTM E 18.0																
Penetrador:	Esfera de acero de 1/16 pulgadas esfera de acero																		
Carga aplicada:	100 Kg	Tiempo de ensayo	7 min																
RESULTADOS																			
Huella N°	Zona de ensayo	Dureza HRB	<p>1 a 7 improntas d=mm</p>																
1	MF	95																	
2	MF	96																	
3	ZAC	98																	
4	MB	92																	
5	MB	89.1																	
6	MB	88.9																	
7	MB	88																	
<p style="text-align: center;">DUREZA EN SOLDADURA CON E 308L-16</p> <table border="1"> <caption>Datos del gráfico de dureza vs distancia</caption> <thead> <tr> <th>Distancia del centro del cordón (mm)</th> <th>Dureza HRB</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>95</td></tr> <tr><td>4</td><td>96</td></tr> <tr><td>8</td><td>98</td></tr> <tr><td>12</td><td>92</td></tr> <tr><td>16</td><td>89.1</td></tr> <tr><td>20</td><td>88.9</td></tr> <tr><td>24</td><td>88</td></tr> </tbody> </table>				Distancia del centro del cordón (mm)	Dureza HRB	0	95	4	96	8	98	12	92	16	89.1	20	88.9	24	88
Distancia del centro del cordón (mm)	Dureza HRB																		
0	95																		
4	96																		
8	98																		
12	92																		
16	89.1																		
20	88.9																		
24	88																		
INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS																			
<p>Los resultados obtenidos en este ensayo se muestran en la figura a través de un gráfico HRB vs Distancia, donde en la junta soldada la dureza máxima es de 98 HRB a 4 mm del centro del cordón y la dureza mínima es de 88 HRB a 24 mm del centro del cordón.</p>																			
OBSERVACIONES																			
<p>En los ensayos aumenta la dureza en la zona afectada por el calor en relación al cordón y el material base.</p>																			

Tabla 25. Ensayo de dureza en soldadura SMAW de un acero inoxidable AISI 304 con electrodo AWS E309L-16

ENSAYO DE DUREZA																			
DATOS INFORMATIVOS DEL ESPECIMEN A ENSAYAR																			
Material base:	Acero AISI	Grado:	304																
Material de aporte:	AWS E309L-16	Amperaje:	100 A																
Tipo de soldadura:	SMAW	Voltaje:	70v																
Tipo de estudio:	De laboratorio	Fecha:	4/06/2021																
Lugar de análisis:	Arequipa-Perú	JMC Soluciones																	
Realizado por:	Nadir Canahua Anchapuri	Supervisado por:	Julcar Melo Cari																
PARAMETROS DE ENSAYO DE DUREZA																			
Método:	Rockwell (B)	Normas de referencias	ASTM E 18.0																
Penetrador:	Esfera de acero de 1/16 pulgadas esfera de acero																		
Carga aplicada:	100 Kg	Tiempo de ensayo	7 min																
RESULTADOS																			
Huella N°	Zona de ensayo	DUREZA HRB	<p>1 a 7 improntas d=mm</p>																
1	MF	96																	
2	MF	96.2																	
3	ZAC	97																	
4	MB	94																	
5	MB	92.2																	
6	MB	91.5																	
7	MB	88.2																	
<p>DUREZA EN SOLDADURA CON E 309L-16</p> <table border="1"> <caption>Datos del gráfico de dureza vs distancia</caption> <thead> <tr> <th>Distancia del centro del cordón (mm)</th> <th>Dureza HRB</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>96</td></tr> <tr><td>4</td><td>96.2</td></tr> <tr><td>8</td><td>97</td></tr> <tr><td>12</td><td>94</td></tr> <tr><td>16</td><td>92.2</td></tr> <tr><td>20</td><td>91.5</td></tr> <tr><td>24</td><td>88.2</td></tr> </tbody> </table>				Distancia del centro del cordón (mm)	Dureza HRB	0	96	4	96.2	8	97	12	94	16	92.2	20	91.5	24	88.2
Distancia del centro del cordón (mm)	Dureza HRB																		
0	96																		
4	96.2																		
8	97																		
12	94																		
16	92.2																		
20	91.5																		
24	88.2																		
INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS																			
<p>Los resultados obtenidos en este ensayo se muestran en la figura a través de un grafico HB vs Distancia, donde en la junta soldada la dureza máxima es de 97 HRB a 8 mm del centro del cordón y la dureza mínima es de 88.20 HRB a 24 mm del centro del cordón.</p>																			
OBSERVACIONES																			
<p>En los ensayos aumenta la dureza en la zona afectada por el calor en relación al cordón y el material base</p>																			

Tabla 26. Ensayo de dureza en soldadura SMAW de un acero inoxidable AISI 304 con un electrodo AWS E316L-16

ENSAYO DE DUREZA			
DATOS INFORMATIVOS DEL ESPECIMEN A ENSAYAR			
Material base:	Acero AISI	Grado:	304
Material de aporte:	AWS E316	Amperaje:	100 A
Tipo de soldadura:	SMAW	Voltaje:	70v
Tipo de estudio:	De laboratorio	Fecha:	4/06/2021
Lugar de análisis:	Arequipa-Perú	JMC Soluciones	
Realizado por:	Nadir Canahua Anchapuri	Supervisado por:	Julcar Melo Cari
PARAMETROS DE ENSAYO DE DUREZA			
Método:	Rockwell (B)	Normas de referencias	ASTM E 18.0
Penetrador:	Esfera de acero de 1/16 pulgadas		
Carga aplicada:	100 Kg	Tiempo de ensayo	7 min
RESULTADOS			
Huella N°	Zona de ensayo	DUREZA HRB	<p>1 a 7 improntas d=mm</p>
1	MF	94.8	
2	MF	96	
3	ZAC	96.8	
4	MB	95.5	
5	MB	94.1	
6	MB	92	
7	MB	90.8	
<p style="text-align: center;">DUREZA EN SOLDADURA CON E 316</p>			
INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS			
<p>Los resultados obtenidos en este ensayo se muestran en la figura a través de un grafico HB vs Distancia, donde en la junta soldada la dureza máxima es de 96.8 HRB a 8 mm del centro del cordón y la dureza mínima es de 90.8 HRB a 24 mm del centro del cordón.</p>			
OBSERVACIONES			
<p>En los ensayos aumenta la dureza en la zona afectada por el calor en relación al cordón y el material base</p>			

4.1.12. Interpretación de resultados de los ensayos de dureza del proceso de soldadura SMAW con E 308L-16, E309-16 y E316L-16

Se efectuó la toma de medidas desde el centro del cordón como punto de origen donde se determinó la máxima dureza a 8 mm del centro del cordón es decir aproximadamente en la zona afectada por el calor

Tabla 27. Datos obtenidos en los ensayos de dureza en acero inoxidable AISI 304 austenítico en juntas soldadas con variación de electrodos

SOLDADURA CON VARIACIÓN DE ELECTRODOS SMAW			
PROBETAS	Dureza HRB		
	(4mm)	(8mm)	(12mm)
	MF	ZAC	MB
Material base sin soldadura	88		
Soldadura con electrodo AWS E308L-16	96	98	92
Soldadura con electrodo AWS E309L-16	96.2	97	94
Soldadura con electrodo AWS E316L-16	96	96.8	95.5

Los ensayos de dureza realizados en juntas soldadas en acero inoxidable AISI 304 austeníticos incrementan la dureza considerablemente en relación al material base.

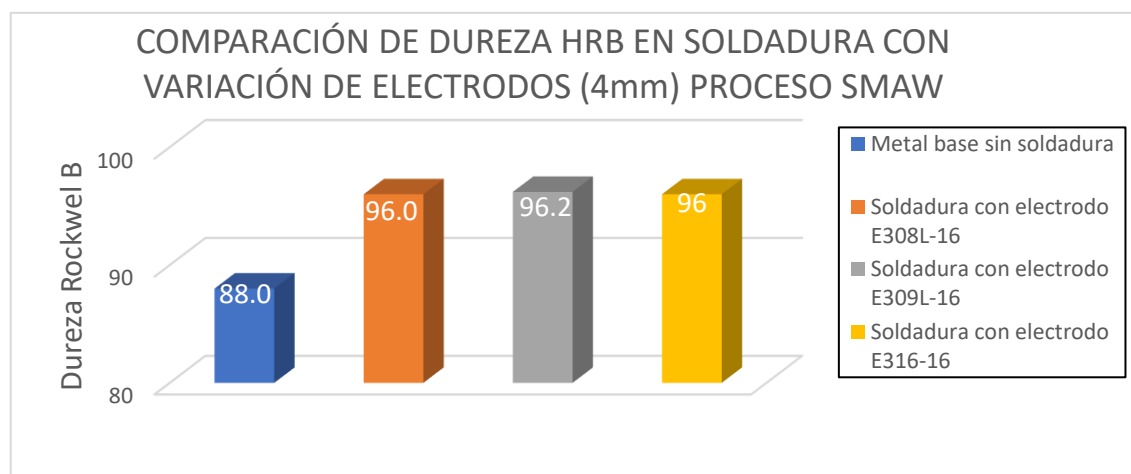


Figura 17. Comparación de Dureza Rockwell (HRB) con variación de 4 mm

En la Figura 17 observamos los valores de dureza máximas obtenidas en elementos soldados, a la distancia de (4 mm) del centro de la soldadura, con variación de electrodos son valores elevados respecto al metal sin soldadura, el proceso realizado con electrodo AWS E308L-16 la dureza rockwell (B) es de 96 HRB, el valor mayor de dureza está en la soldadura con electrodo AWS E309L-16, cuya dureza Rockwell (B) es de 96.2 HRB y el mínimo valor en juntas soldadas apreciamos con electrodos E308L y E316L, cuya dureza Rockwell (B) es de 96.0 HRB.

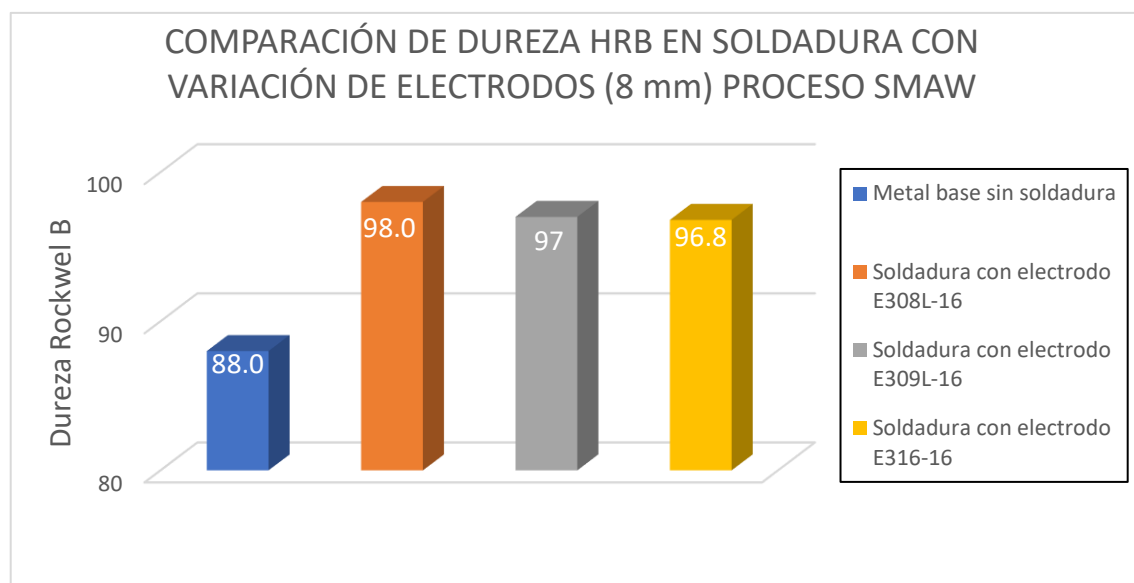


Figura 18. Comparación de Dureza (HRB) con variación de electrodos de 8 mm

En la Figura 18 observamos los valores de dureza máximas obtenidas en elementos soldados, a la distancia de (8 mm) del centro de la soldadura, con variación de electrodos cuyos valores son elevados respecto al metal sin soldadura, el proceso realizado con electrodo AWS E 309L-16 la dureza Rockwell (B) es de 97.0 HRB, el valor mayor de dureza está en la soldadura con electrodo AWSE 308L-16 donde la dureza Rockwell (B) es de 98 HRB y el mínimo valor en juntas soldadas apreciamos con electrodo AWS E 316L-16 cuya dureza Rockwell (B) es de 96.8 HRB.

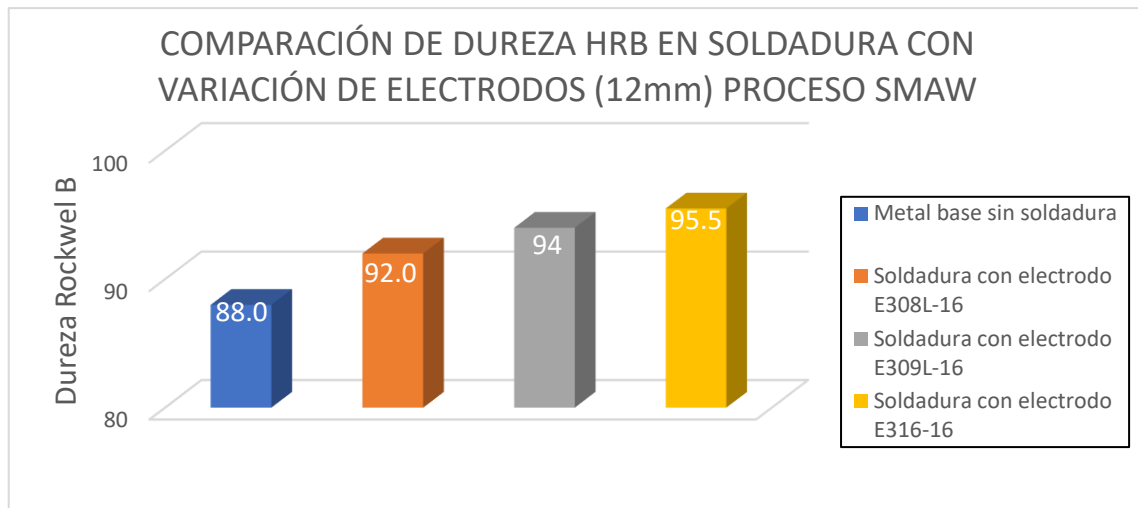


Figura 19. Comparación de Dureza Rockwell (HRB) con variación de 12 mm

En la Figura 19 observamos los valores de dureza obtenidas en elementos soldados, a la distancia de (12 mm) del centro de la soldadura, con variación de electrodos, se observa que los valores disminuyen a medida que se alejan de la zona soldada, en el proceso realizado con electrodo AWS E 308L-16 se observa que la dureza Rockwell (B) es mínima es de 92.0 HRB, el valor mayor de dureza está en la soldadura con electrodo AWS E 316H-16, donde la dureza Rockwell (B) es de 95,5 HRB y el valor medio en juntas soldadas apreciamos con electrodo AWS E 309L-16 cuya dureza Rockwell (B) es de 94 HRB.

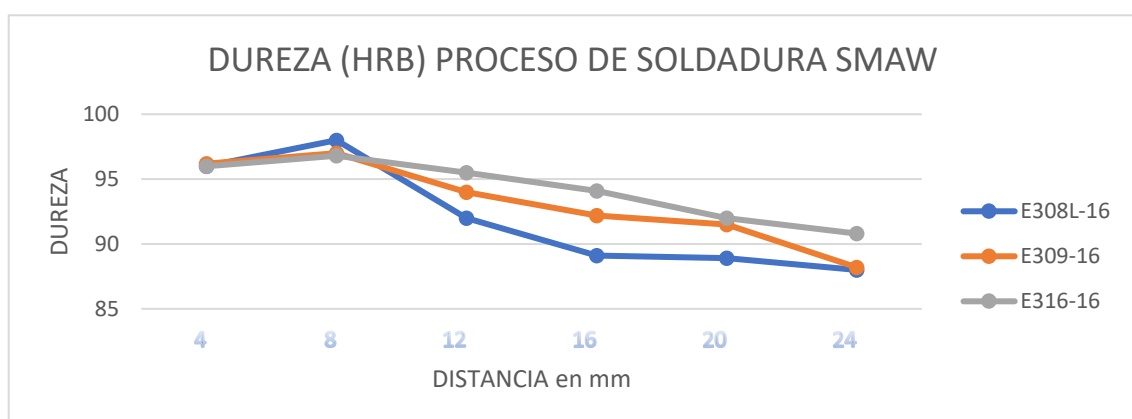


Figura 20. Relación de durezas en juntas soldadas SMAW

Los valores de dureza máximas obtenidas en elementos soldados, se presentan a la distancia de (8 mm) del centro de la soldadura, los mínimos valores a la distancia de

(12 mm) del centro de la soldadura y de (16 mm) del origen descienden paulatinamente acercando hacia la dureza del metal base que es de 88 HRB.

4.1.13. Resultados de ensayo de dureza del proceso de soldadura GTAW

Las mediciones de Dureza fueron realizadas en cada una de las probetas soldadas y seleccionadas usando la norma ASTM E18. Los resultados del ensayo de Dureza Rockwell B son reportados en las Tablas 28 y 29.

Tabla 28. Ensayo de dureza en soldadura GTAW de un acero inoxidable AISI 304 con electrodo AWS ER 308L

ENSAYO DE DUREZA																			
DATOS INFORMATIVOS DEL ESPECIMEN A ENSAYAR																			
Material base:	Acero AISI	Grado:	304																
Material de aporte:	ER 308L	Amperaje:	100 A																
Tipo de soldadura:	GTAW	Voltaje:	220 v																
Gas protector	99.8% Argón	Junta:	a Tope																
Tipo de aporte	Varilla	Fecha:	4/06/2021																
Lugar de análisis:	Arequipa-Perú	JMC Soluciones																	
Realizado por:	Nadir Canahua Anchapuri	Supervisado por:	Julcar Melo Cari																
PARAMETROS DE ENSAYO DE DUREZA																			
Método:	Rockwell (B)	Normas de referencias	AWSD1.6/ASTM E-18.0																
Penetrador:	Esfera de acero de 1/16"	Norma aplicada	ASTM E-18.0																
Equipo:	Durómetro	Electrodo	no consumible W																
Carga aplicada:	100 Kg	Tiempo de ensayo	7 min																
RESULTADOS																			
Huella N°	Zona de ensayo	DUREZA HRB	<p>1 a 7 improntas d=mm</p>																
1	MF	96																	
2	MF	97																	
3	ZAC	99.5																	
4	MB	93																	
5	MB	89																	
6	MB	88.4																	
7	MB	88																	
<p>ENSAYO DE DUREZA CON MATERIAL DE APORTE ER 308L EN ACERO INOXIDABLE AISI 304</p> <table border="1"> <caption>Datos del gráfico de dureza vs distancia</caption> <thead> <tr> <th>Distancia del centro del cordón (mm)</th> <th>Dureza HRB</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>96</td></tr> <tr><td>4</td><td>97</td></tr> <tr><td>8</td><td>99.5</td></tr> <tr><td>12</td><td>93</td></tr> <tr><td>16</td><td>89</td></tr> <tr><td>20</td><td>88.4</td></tr> <tr><td>24</td><td>88</td></tr> </tbody> </table>				Distancia del centro del cordón (mm)	Dureza HRB	0	96	4	97	8	99.5	12	93	16	89	20	88.4	24	88
Distancia del centro del cordón (mm)	Dureza HRB																		
0	96																		
4	97																		
8	99.5																		
12	93																		
16	89																		
20	88.4																		
24	88																		
INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS																			
Los resultados obtenidos en este ensayo se muestran en la figura a través de un grafico HB vs Distancia, donde en la junta soldada la dureza máxima es de 99.5 HRB a 8 mm del centro del cordón y la dureza mínima es de 88 HRB a 24 mm del centro del cordón.																			
OBSERVACIONES																			
En los ensayos aumenta la dureza en la zona afectada por el calor en relación al cordón y el material base																			

Tabla 29. Ensayo de dureza en soldadura GTAW de un acero inoxidable AISI 304 con electrodo AWS E309L

ENSAYO DE DUREZA																			
DATOS INFORMATIVOS DEL ESPECIMEN A ENSAYAR																			
Material base:	Acero AISI	Grado:	304																
Material de aporte:	ER 309L	Amperaje:	100 A																
Tipo de soldadura:	GTAW	Voltaje:	220 v																
Gas protector	99.8% Argón	Junta:	a Tope																
tipo de aporte:	Varilla	Fecha:	4/06/2021																
Lugar de análisis:	Arequipa-Perú	JMC Soluciones																	
Realizado por:	Nadir Canahua Anchapuri	Supervisado por:	Julcar Melo Cari																
PARAMETROS DE ENSAYO DE DUREZA																			
Método:	Rockwell (B)	Normas de referencias	AWSD1.6/ASTM E-18.0																
Penetrador:	Esfera de acero de 1/16"	Norma aplicada	ASTM E-18.0																
Equipo:	Durómetro	Electrodo	no consumible W																
Carga aplicada:	100 Kg	Tiempo de ensayo	7 min																
RESULTADOS																			
Huella N°	Zona de ensayo	Dureza HRB																	
1	MF	97																	
2	MF	98.2																	
3	ZAC	98.9																	
4	MB	95																	
5	MB	93																	
6	MB	91.9																	
7	MB	90																	
<p style="text-align: center;">ENSAYO DE DUREZA CON MATERIAL DE APORTE ER 309L EN ACERO INOXIDABLE AISI 304</p> <table border="1"> <caption>Datos del Gráfico de Dureza vs Distancia</caption> <thead> <tr> <th>Distancia del centro del cordón (mm)</th> <th>Dureza HRB</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>97</td></tr> <tr><td>4</td><td>98.2</td></tr> <tr><td>8</td><td>98.9</td></tr> <tr><td>12</td><td>95</td></tr> <tr><td>16</td><td>93</td></tr> <tr><td>20</td><td>91.9</td></tr> <tr><td>24</td><td>90</td></tr> </tbody> </table>				Distancia del centro del cordón (mm)	Dureza HRB	0	97	4	98.2	8	98.9	12	95	16	93	20	91.9	24	90
Distancia del centro del cordón (mm)	Dureza HRB																		
0	97																		
4	98.2																		
8	98.9																		
12	95																		
16	93																		
20	91.9																		
24	90																		
INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS																			
<p>Los resultados obtenidos en este ensayo se muestran en la figura a través de un grafico HB vs Distancia, donde en la junta soldada la dureza máxima es de 98.9 HRB a 8 mm del centro del cordón y la dureza mínima es de 90 HRB a 24 mm del centro del cordón</p>																			
OBSERVACIONES																			
<p>En los ensayos aumenta la dureza en la zona afectada por el calor en relación al cordón y el material base</p>																			

4.1.14. Interpretación de resultados de los ensayos de dureza del proceso de soldadura GTAW con ER 308 y ER309

Se efectuó la toma de medidas desde el centro del cordón como punto de origen donde se determinó la máxima dureza a 8 mm de del centro es decir aproximadamente en la zona afectada por el calor.

Tabla 30. Datos obtenidos en los ensayos de dureza en acero inoxidable AISI 304 austenítico en juntas soldadas con variación de varillas

SOLDADURA CON VARIACIÓN DE VARILLAS GTAW			
Probetas Material base sin soldadura	Dureza HRB		
	(4mm)	(8mm)	(12mm)
	MF	ZAC	MB
		88	
Soldadura con electrodo AWS ER308L-16	97	99.5	93
Soldadura con electrodo AWS ER309L-16	98.2	98.9	95

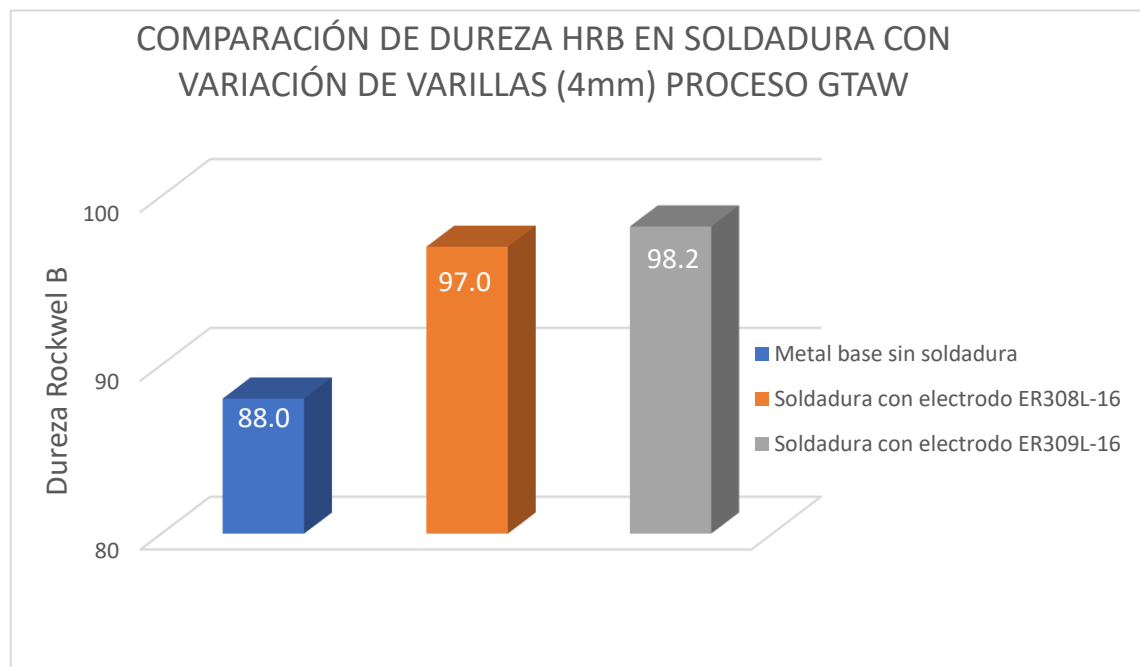


Figura 21. Comparación de dureza (HRB) en soldadura con varilla de 4mm, proceso GTAW

En la Figura 21 observamos los valores de dureza máximas obtenidas en elementos soldados, a la distancia de (4 mm) del centro de la soldadura, con variación de electrodos cuyos valores son elevados respecto al metal sin soldadura; en el proceso realizado con electrodo AWS ER 308L-16 la dureza Rockwell (B) es de 97.0 HRB, el valor mayor de dureza está en la soldadura con electrodo AWS ER 309L-16, cuya dureza Rockwell (B) es de 98.2 HRB, del cual se observa que el valor mínimo de dureza en juntas soldadas se presenta con electrodo AWS ER309 que es de 97.0 HRB.

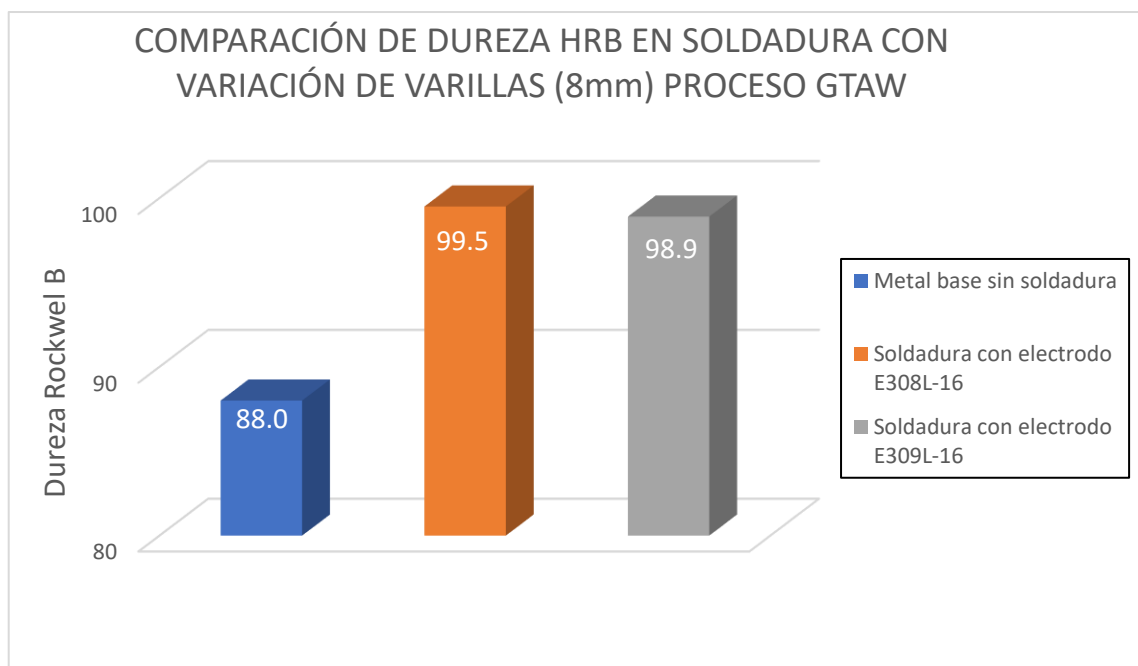


Figura 22. Comparación de dureza (HRB) en soldadura con varilla de 8 mm, proceso GTAW

En la Figura 22 observamos los valores de dureza máximas obtenidas en elementos soldados, a la distancia de (8 mm) del centro de la soldadura, con variación de electrodos los valores son elevados respecto al metal sin soldadura, el valor mayor de dureza está en la soldadura con electrodo AWS ER 308L-16 donde la dureza Rockwell (B) es de 99.5 HRB y el mínimo valor en juntas soldadas apreciamos con electrodo AWS ER 309L cuya dureza Rockwell (B) es de 98.9. HRB.

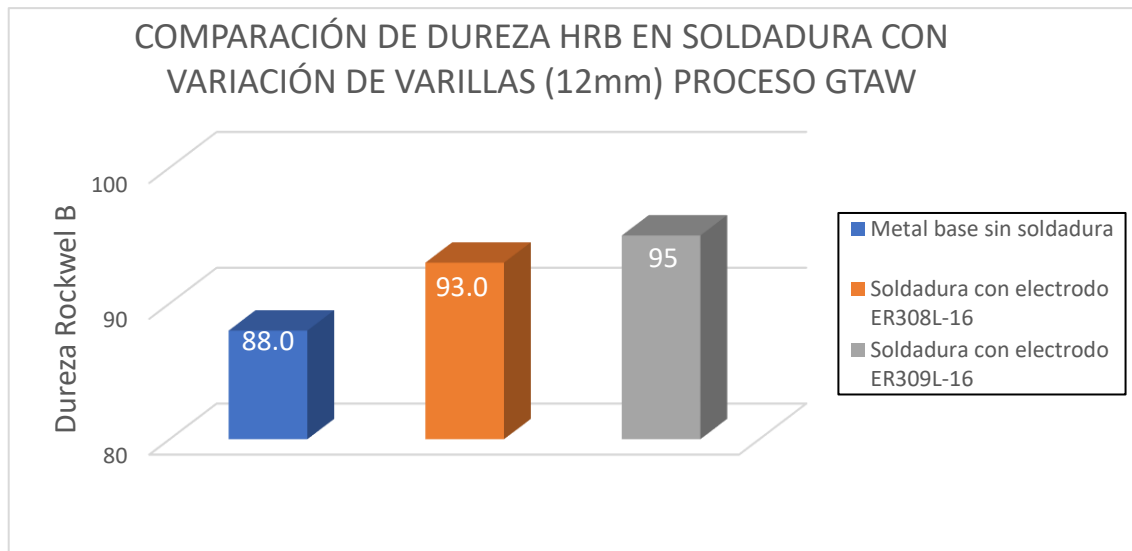


Figura 23. Comparación de dureza (HRB) en soldadura con varilla de 12 mm, proceso GTAW

En la Figura 23 observamos los valores de dureza obtenidas en elementos soldados, a la distancia de (12 mm) del centro de la soldadura, con variación de electrodos, se observa que los valores disminuyen a medida que se alejan de la zona soldada, en el proceso realizado con electrodo AWS ER 308L se observa que la dureza Rockwell (B) es mínima de 93.0 HRB, el valor mayor de dureza está en la soldadura con electrodo AWS ER 309L, donde la dureza Rockwell (B) es de 95.0 HRB.

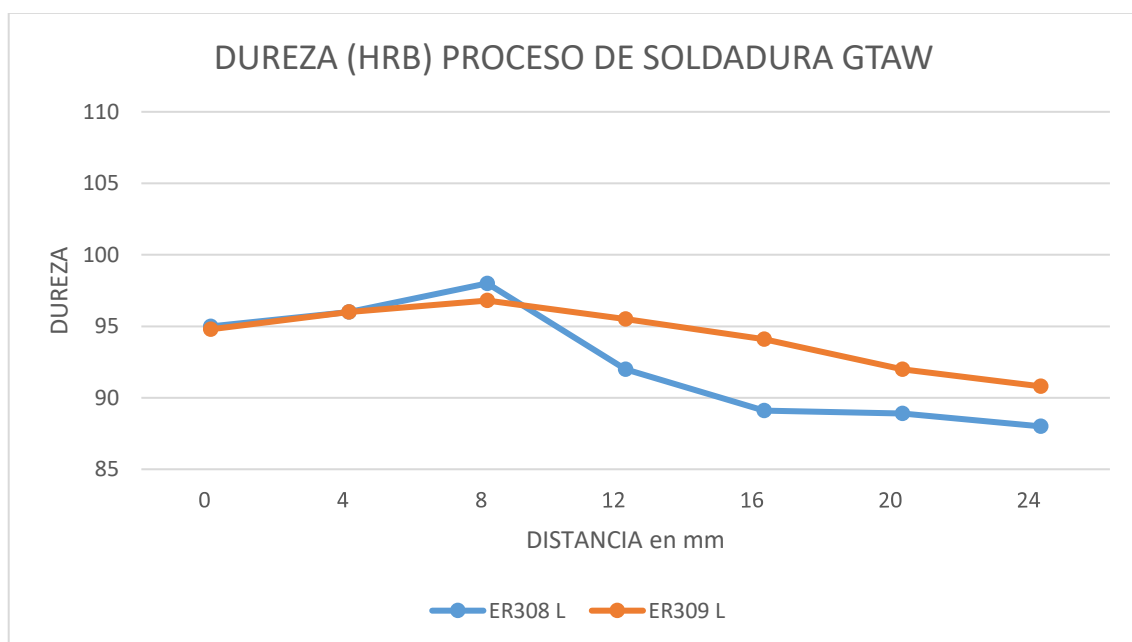


Figura 24. Relación de durezas en juntas soldadas GTAW



Los valores de dureza máximas obtenidas en elementos soldados, se presentan a la distancia de (8 mm) del centro de la soldadura, los mínimos valores a la distancia de (12 mm) del centro de la soldadura y de (16 mm) del origen descienden paulatinamente acercando hacia la dureza del metal base que es de 88 HRB.

En un proceso de soldadura, se incrementa la dureza en la zona afectada por el calor (ZAC) dando esto como resultado que el elemento, puede fallar en un momento, se disminuye la dureza en el centro del cordón es decir no existe riesgo alguno de romperse en la soldadura. El ensayo Rockwell es uno de los más utilizados, porque no constituye una gran pérdida de material, este tipo de ensayo es fácil de llevar a cabo, porque no implica mayores cálculos matemáticos y el resultado de cada ensayo se obtiene de la directa lectura del dial.

4.1.15. Selección definitiva del proceso de soldadura SMAW y GTAW tomando en consideración la resistencia de la dureza HRB

La Tabla 31 y la Figura 25 representan los valores extraídos de los ensayos de dureza HRB utilizando una carga de 100 kg. gr de presión sobre las muestras soldadas a un valor de 100 amperios, los estudios se realizaron en las tres zonas más importantes las cuales son:

- Cordón de soldadura.
- Zona afectada por el calor.
- Material base.

Luego de la presentación de la tabla de dureza del proceso de soldadura SMAW con electrodo E308L y GTAW con varilla ER308L, cada condición se muestra en el

gráfico de comparación entre los valores de cada probeta en el cordón de soldadura, zona afectada por el calor y el metal base.

Tabla 31. Comparación de procesos de soldadura SMAW y GTAW vs. Dureza HRB

COMPARACION DE PROCESOS DE SOLDADURA SMAW Y GTAW	Dureza HRB		
	(4mm)	(8mm)	(12mm)
	MF	ZAC	MB
Soldadura con electrodo AWS E308L-16	96	98	92
Soldadura con electrodo AWS ER308L-16	97	99.5	93

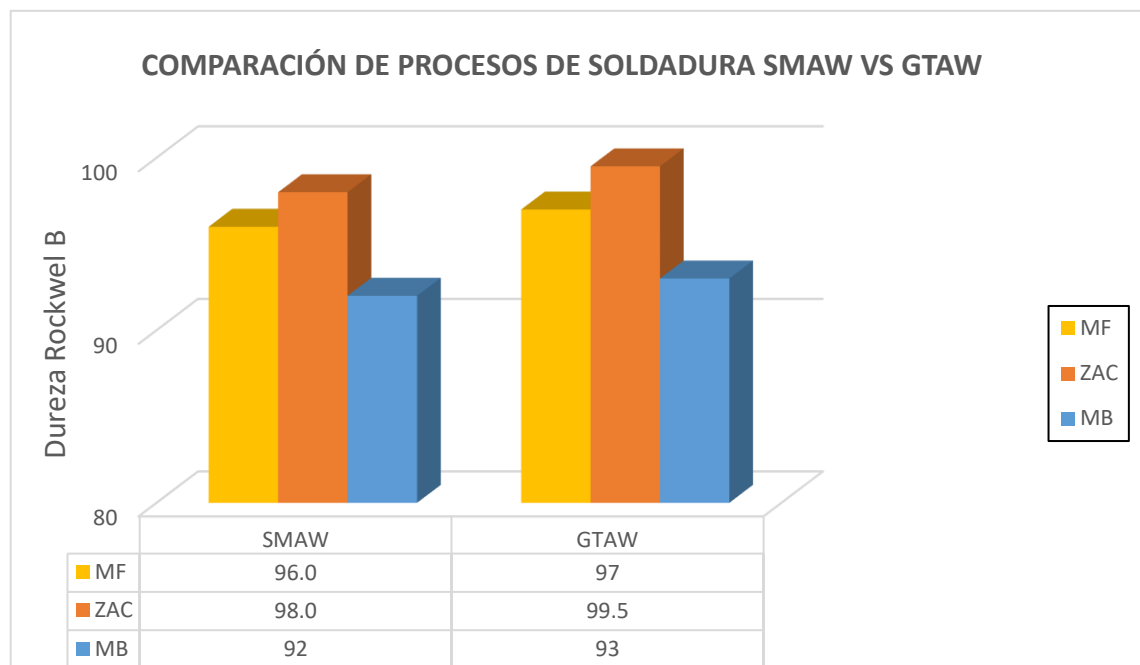


Figura 25. Comparación de Procesos de Soldadura SMAW vs. GTAW

Figura 25 indica la comparación de procesos de soldadura en zonas del metal fundido, zona afectada por el calor y metal base con procesos de soldadura SMAW y GTAW.

Las mediciones de Dureza fueron realizadas en cada una de las probetas soldadas y seleccionadas usando la norma ASTM E18, de estos resultados indican que los mayores valores de dureza tienen lugar en la zona afectada por el calor (ZAC) en el proceso



GTAW. Este hecho era de esperarse en virtud de los efectos metalúrgicos derivados del proceso de soldadura. También se atribuye este hecho al refinamiento del grano por la presencia del silicio y a las pérdidas de elementos aleantes que se producen durante la soldadura por el aire circundante. Según estudios relacionados a este tema estos valores de dureza son normales para estos aceros soldados por el proceso GTAW. El efecto de los parámetros de soldadura para los cinco cupones estudiados, no es significativo desde el punto de vista de la dureza, ya que los valores obtenidos son muy similares. Este hecho se le puede atribuir a la condición de no existir material de aporte en los cordones.

Bajo estos criterios se concluye que todas las probetas soldadas dentro de los parámetros de la AWS D1.6, se observa que el proceso de soldadura SMAW es más propenso a presentar defectos superficiales y la dureza en la ZAC es menor comparada con el proceso GTAW, ya que con la correcta selección del gas argón, la alta tasa de aportación, el mejor control del arco permite obtener cordones de mejor calidad y con durezas en la ZAC mejor que en el proceso SMAW.

También se comprueba que las probetas que presentan mayores discontinuidades en la superficie de inspección, son las que se realizan con soldadura SMAW, esto es por que se necesita mayor habilidad de los soldadores en el manejo de este proceso y debe controlarse todas las variables de la soldadura tal como el voltaje, el amperaje y la velocidad de la soldadura. Cuando faltan en el manejo de alguna de estas variables principales son mas propensos a producir defectos en el cordón de soldadura lo cual influirá en la propiedad de la resistencia a la dureza.

La zona afectada por el calor presenta los mayores valores de dureza, el material de aporte presenta valores de dureza mayores al metal base; esto se debe a que en la ZAC existe un normalizado en donde la dureza aumenta debido al afinamiento del grano.



Finalmente el proceso de soldadura GTAW es el adecuado para unir el material AISI 304 planteado en el presente proyecto, debido a que proporciona soldadura limpias de escoria, son de gran calidad al tener siempre protegido el área de la soldadura de la atmósfera, esto se corrobora al no encontrar ningún defecto en las probetas ensayadas los cuales repercuten en la resistencia a la dureza que presenta en este caso el mismo proceso de soldadura GTAW al obtener mayor valor de dureza en la ZAC que es de 99.50 HRB.

4.2. DISCUSIÓN

Una de las más grandes preocupaciones que existe hoy en día en la industria es dar el uso adecuadamente de procesos de soldadura SMAW y GTAW y en especial para las fabricaciones de elementos de máquinas como son ejes, tuberías, silos, planchas, los mismos que por falta de asistencia técnica se realiza sin un adecuado diagnóstico.

La soldadura SMAW, GTAW y los demás procesos son de gran importancia por tener la capacidad de crear un cordón de soldadura en las dos piezas que une, formando prácticamente un solo elemento. Por esto la soldadura tiene más importancia como tecnología que como elemento, ya que lo importante y lo más difícil es el proceso seguido.

En vista de que los procesos de soldadura no son adecuados es necesario realizar un análisis en los elementos soldados, la cual intervienen varias dificultades como carencia de información sobre el procedimiento de análisis de la microestructura y costos elevados de equipos para realizar el proceso con técnicas adecuadas, escasos centros de capacitación para la correcta elección de los electrodos. El cual ayuda para evitar fisuras en el material base y pérdidas de tiempo, para eliminar irregularidades en la microestructura donde existe disminución o crecimiento del tamaño de grano.

Si no se realiza un análisis adecuado de las propiedades mecánicas en el proceso de soldadura SMAW y GTAW en la soldabilidad de un acero AISI 304 se tendrán grandes



pérdidas económicas y posibles rupturas de juntas soldadas, dando cada vez poca utilidad de ensayos metalográficos para evaluación de la microestructura de uniones soldadas. La utilización de un proceso adecuado para el análisis de propiedades mecánicas aportará considerables beneficios, no sólo a las industrias metalmeccánicas, sino también al usuario final. Permitirá la integración y confianza en los elementos soldados, dando así la posibilidad de mejorar la producción en soldadura en elementos de máquina.

En mi trabajo de investigación llegue a la conclusión general de que el proceso GTAW es el más eficiente para soldar acero austenítico AISI 304 frente al proceso de soldadura SMAW, así también lo determina Flores y Suarez en su trabajo de investigación caracterización de juntas soldadas en acero inoxidable AISI 304 mediante los procesos SMAW, GMAW Y GTAW por lo que me permito validar mi trabajo de investigación.

Así mismo llegue a una de las conclusiones de que en el proceso de soldadura SMAW el electrodo que presenta mejor resistencia a las propiedades mecánicas entre ellas la resistencia a la dureza haciendo uso de los electrodos E308L, E309L y E316L se seleccionó el electrodo E308L, eso mismo determino Naula en su estudio análisis de variación de electrodos en un proceso de soldadura SMAW en acero inoxidable AISI 304 austenítico y su incidencia en las propiedades mecánicas.



V. CONCLUSIONES

PRIMERA: El material de aporte ER308L presenta una dureza en la zona afectada por el calor de 99.5 HRB, seguido del E308L-16 que presenta 98.0 HRB, determinándose que el proceso de soldadura GTAW genera una mayor resistencia a la dureza en la soldabilidad del acero AISI 304.

SEGUNDA: Para realizar una soldadura a tope del acero inoxidable austenítico AISI 304, en posición plana (1G), con espesor de 0,8 mm se seleccionó el proceso de soldadura GTAW con: Intensidad de corriente: = 100 A, Velocidad de avance = 60 mm/min, flujo de gas protector argón: 12 l/min, tipo de corriente y polaridad: DCEN y voltaje =16 V.

TERCERA: El proceso de soldadura GTAW con material de aporte ER308L, es el más eficiente para unir el acero AISI 304 frente al proceso SMAW utilizando material de aporte E308L-16, debido a que la soldadura GTAW proporciona soldadura limpia de escoria, son de gran calidad al tener siempre protegido el área de la soldadura de la atmosfera y presenta mayor resistencia a la dureza en la zona afectada por el calor de 99.5 HRB frente al proceso de soldadura SMAW que tiene 98.0 HRB.



VI. RECOMENDACIONES

PRIMERA: El ingeniero encargado de la fabricación o reparación que implica la soldadura en aceros inoxidable debe analizar qué proceso de soldadura utilizar en el campo aplicativo ya que en cada proceso de soldadura el uso de las herramientas adecuadas, equipos o fuente de poder en buen estado, limpieza en el material base y el uso adecuado de los EPP; garantiza la eficiencia del trabajo con una mayor aprobación a las pruebas a ser sometidas tanto ensayos destructivos como no destructivos.

SEGUNDA: La Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Nacional del Altiplano debe brindar cursos de homologación en procesos de soldadura y de aceros especiales, para que así los futuros ingenieros trabajen bajo estándares nacionales e internacionales y puedan estar capacitados para evaluar otros factores que afectan la calidad de las piezas soldadas del acero inoxidable AISI/SAE 304.

TERCERA: Utilizar todos los equipos de protección personal debido a que el tipo de soldadura GTAW se trabaja a altas temperaturas los cuales pueden causar severos daños como a los pulmones, la vista, quemaduras y otros; y así también debido al gas de protección (Argón) genera dificultad al momento de respirar lo que genera molestias en la salud del soldador



VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abanto, C. y Horna, P. (2017). *Calidad superficial de uniones soldadas evaluadas mediante inspección visual de acuerdo al código AWS D1.1.* (tesis). Universidad Nacional de Trujillo. Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Metalúrgica. Perú.
- American Society for Testing and Materials ASTM E-1316 (2019). *Standard Terminology for Nondestructive Examinations.*
- American Society for Testing and Materials, ASTM E-165 (2012). *Standard Practice for Liquid Penetrant Examination for General Industry.*
- American Society of Mechanical Engineers (2015). *Section V. ASME Boiler and Pressure Vessel Code.* New York, USA.
- Alberco. (2020). *Estudio comparativo de los procesos de soldadura GMAW y GTAW para determinar el mejor procedimiento en la unión de tuberías de acero inoxidable austenítico AISI 304 del sector alimenticios.* Universidad Cesar Vallejo, Facultad de ingeniería y arquitectura, Trujillo.
- Apraiz, J. (1978). *Fabricación de hierro, aceros y fundiciones.* Tomo1.
- Avilés, (s.f.). C.I.F.P. *Centro integrado de formación profesional.* Recuperado el 10 de marzo de 2015, de C.I.F.P. <http://cifpaviles.webcindario.com/U.D%205.pdf>.
- Avner. (1988). *Introducción a la metalurgia física.* (2da edición). McGraw Hill. pp.375.
- AWS (2007). *Norma para la certificación de inspectores de soldadura AWS.* Miami: American Welding Society.



- Barrera, L. y Coronel, M. (2011). *Desarrollo y procedimientos para la utilización de técnicas de ensayos no destructivos con ultrasonido para inspección de tuberías*. Universidad Pontificia Bolivariana. Facultad de Ingeniería Electrónica, Bucaramanga.
- Becerra, D. (2018) *Implementación de un plan de calidad para obras metal mecánicas en la empresa CYP ICE SAC*, Huancayo.
- Bonnet, S. (2010). *Boletín informativo aceros inoxidable*. Islas Canarias, España.
<http://www.bonnet.es/clasificacionacerinox.pdf>.
- Cabrera, M. y Mohammed EI Wahabi. (2002). *Caracterización termomecánica de los aceros austeníticos* (tesis doctoral). Capítulo I, pp. 2-15.
- Calle. (2000). *Ensayo dinámico a flexión de probetas ranuradas ensayo Charpy*.
- Carrión, F. Lomelí, M., Quintana, J. y Martínez, M. (2002). *La evaluación no destructiva de materiales estructurales y puentes*. Secretaria de comunicaciones y transportes Instituto Mexicano Del Transporte, Publicación Técnica N° 231 Sanfandila.
- Celada. (2015). *Ensayos de soldadura al arco con electrodo revestido en acero inoxidable austenítico AISI 304*. (Tesis de grado). Universidad San Carlos de Guatemala, pp.136
- Cedeño, C., Solórzano, J. y Vergara, E. (2015). *Análisis de los cordones de soldadura de la estructura metálica del centro de investigaciones de ciencias agropecuarias de la Universidad Técnica de Manabí* (tesis de pregrado). Universidad Técnica de Manabí, Facultad de Ciencias Matemáticas, Físicas y Químicas. Manabí, Ecuador.



- Chambi, E. (2013). *Aplicación de los ensayos no destructivos para el control de calidad de tolvas para volquetas* (tesis). Universidad Nacional del Altiplano-Puno.
- Cortes, R., Villanueva, J., Ponce, E., Rojas, M. y Rojas, E. (2004). *Estudio de la soldabilidad y corrosión del acero inoxidable AISI 904L con los agentes utilizados en la lixiviación del cobre*. Revista Facultad de Ingeniería, UTA, Chile.
- Esquivias. (2018). *Estudio de investigación de los parámetros de operación en el proceso de soldadura GTAW para la recuperación de los álabes de un impulsor*. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.
- Flores, C. y Suarez, J. (2020) *Caracterización de juntas soldadas en acero inoxidable AISI 304 mediante los procesos SMAW, GMAW y GTAW*. Escuela Politécnica Nacional Facultad de Ingeniería Mecánica. Quito, Ecuador.
- Garcimartín, M. (2002). *La soldadura en estructuras metálicas de edificación*, 1- 2-4-6. Obtenido de: <http://www.cvr.etsia.upm.es/Soldadura%20en%20Estructuras%20Met%Ellicas.pdf>.
- Gorka, R. (setiembre de 2014). *Alivio de tensiones residuales: Tratamiento térmico vs. Vibración*. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación.
- Gómez y Ramírez. (2016). *Estudio de soldabilidad de tubería sanitaria en acero inoxidable con soldadura TIG para la empresa Ingeniar inoxidables de Pereira*. Universidad Tecnológica de Pereira.
- Groover, M. (2009). *Fundamentos de manufactura moderna* (3ra Edición).
- Hernández, G. (2006). *Manual del soldador*. (16° Edición). España.



- Indura S.A. industria y comercio (2010). *Manual de sistema y materiales de soldadura*.
- Jeffus, L. (2009) *Soldadura principios y aplicaciones*. (5ta Edición). España: Delmar Cengage Learning.
- Kalpakjian, S. (2008). *Manufactura, ingeniería y tecnología*. (P. Educación, Ed.). México.
- Lázaro. (2012, abril 9). *Propiedades y soldabilidad de los aceros inoxidables*.
<http://www.osalan.eus/adi.net/Soldador.pdf>.
- Leyensetter, A. (1974). *Tecnología de los oficios metalúrgicos*. Libro, editor Reverte pp.551
- Lippold, J. C. (2014). *Welding Metallurgy and Weldability*.
- Llano, C. (noviembre 2008-enero 2009). *Soldadura GMAW-MIG/MAG. Un proceso rápido, limpio y versátil*. Metal Actual.
- Miller. (2000). *Manual del operador*.
- Mipsa. (2012). *Clasificación de los aceros inoxidables*. Ciudad de México-México.
<https://mipsa.com.mx/dotnetnuke/Sabias-que/Clasificaciondel-acero-inoxidable>
- N. Parvathavarthini, R. K. Dayal. (2002). *Journal of Nuclear Materials*, 305.
- Naula, W. (2014). *Análisis de variación de electrodos en un proceso de soldadura SMAW en acero inoxidable AISI 304 austenítico y su incidencia en las propiedades mecánicas* (tesis). Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica Universidad Técnica de Ampato, Ecuador pp.252.



- Naula. (2015). *Ensayos de soldadura al arco con electrodo revestido en acero inoxidable austenítico AISI 304*. Universidad de San Carlos de Guatemala. Tesis de Maestría.
- Nidi.(1988). *Welding of Stainless Steel*, Nickel Development Institute
<http://www.ssina.com/publications/welding.html>.
- Oxgasa. (2000). *Manual del soldador*.
- Pere, M. (1990). *Metales resistentes a la Corrosión*. Marcombo S.A, 124pp.
- Reina, M. (2003). *Soldadura de Los Aceros*. (4° Edición). España, S.L, 498pp.
- Rodríguez, H. (2012). *Aceros inoxidables: Clasificación y propiedades*. Ingemecánica. España. <http://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn102.html>.
- Soldexa. (2015). *Manual de soldadura y catálogo de productos Oerlikon*, 295pp.
- Sumiteccr. (2004). *Aplicaciones de los aceros inoxidables*. Obtenido de:
<http://www.sumiteccr.com/Aplicaciones/Articulos/pdfs/AISI%20304.pdf>
- Ushiña, J. R. (2018). *Análisis de material de aporte en el proceso de soldadura GTAW aplicado en el acero inoxidable martensítico AISI 420 y su influencia en las propiedades mecánicas* (tesis). Ambato, Ecuador.
- Villavicencio. (2010). *relación microestructura/propiedad en la soldadura GTAW entre aceros inoxidables y aceros al carbono*. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo
- Zambrano, J. (2015) *Elaboración de una guía de inspección de soldadura y calificación de soldadores aplicado a las Normas ASME BPVC y API 1104* (tesis). Escuela Politécnica Nacional-Facultad de Ingeniería Mecánica. Quito, Ecuador.



WEBGRAFÍA

Construmática (2014). *Construmática*. Obtenido de:

http://www.construmatica.com/construpedia/Estructuras_Met%C3%A1licas

www.demaquinas.com

www.ingemet.com

www.testekndt.net.



ANEXOS

SMAW

Acero Inoxidable



INOX AW

Material depositado de estructura austeno-ferrítica, exento de poros y buen acabado. Para soldar aceros inoxidable no estabilizados del grupo 18/8 y 19/9. El revestimiento rutilico le proporciona excelentes características de soldabilidad en corriente continua y corriente alterna, además de facilitar la operación del soldeo, tanto en soldadura de unión como en recargue. Debe soldarse con arco corto y con electrodos secos. Al realizar pulido espejo los cordones depositados se confunden con el metal base 18/8 ó 19/9. El INOX AW posee un contenido extra bajo de carbono (ELC) lo que le disminuye la posibilidad de precipitación de carburos de cromo.

Clasificación	
AWS A5.4 / ASME SFA-5.4	E308L-16

Análisis Químico de Metal Depositado (valores típicos) [%]

C	Mn	Si	P	S	Mo	Ni	Cr	Cu	Otros
0,021	0,90	0,80	máx. 0,025	máx. 0,025	-	9,5	19	-	-

Propiedades Mecánicas del Metal Depositado

Tratamiento Térmico	Resistencia a la Tracción [MPa (psi)]	Límite de Fluencia [MPa (psi)]	Elongación en 2" [%]	Energía Absorbida ISO-V (+20°C) [J]
Sin tratamiento	550 – 650 (79 750 – 94 250)	> 350 (50 750)	> 35	> 50

Conservación del Producto
<ul style="list-style-type: none"> Mantener en un lugar seco y evitar humedad. Almacenamiento bajo horno: 50°C. Resecado de 350°C a 370°C por 1 hora.

Posiciones de Soldadura
P, H, Va, Sc.

Parámetros de Soldeo Recomendados

Para corriente continua (DC): Electrodo al positivo DCEP								
Diámetro	[mm]	1,60	2,00	2,50	3,25	4,00	5,00	6,30
	[pulgadas]	1/16	5/64	3/32	1/8	5/32	3/16	1/4
Amperaje mínimo		20	30	50	60	100	130	170
Amperaje máximo		30	60	80	120	140	180	250

Aplicaciones

- Para soldar aceros inoxidable no estabilizados, del tipo: AISI 301, 302, 304, 308, 301L, 302L, 304L y 308L.
- Para soldar cierto tipo de uniones en aceros disímiles.
- Como cama cojín (base) para la aplicación posterior de recubrimientos protectores.
- En la reconstrucción de equipos de minería, como por ejemplo para reconstruir bordes de cucharones de draga, palas, lápices, etc. Ideal para la soldadura de piezas de acero al manganeso.
- En la construcción de tanques, tuberías, ductos, empleados en la industria cervecera, lechera, textil y papelería.
- En la industria química o petroquímica, donde no se presenta corrosión excesiva.

GTAW

Acero Inoxidable



TIGFIL 199

(Antes EXSATIG 199)

Varilla sólida para el proceso TIG (GTAW) cuyo depósito es un acero inoxidable austenítico de bajo contenido de carbono, del tipo Cr-Ni, sus depósitos tienen una resistencia a temperaturas hasta de 350°C expuestos al aire y a gases oxidantes producto de combustión hasta 800°C.

Clasificación	
AWS A5.9 / ASME SFA-5.9	ER308L

Análisis Químico de Metal Depositado (valores típicos*) [%]

C	Mn	Si	P	S	Mo	Ni	Cr	Cu	Otros
0,025	1,00 2,50	0,30 0,65	máx 0,025	máx 0,025	-	9,00 11,00	19,50 22,00	-	-

Propiedades Mecánicas del Metal Depositado

Tratamiento Térmico	Resistencia a la Tracción [MPa (psi)]	Límite de Fluencia [MPa (psi)]	Elongación en 2" [%]	Energía Absorbida ISO-V (-60°C) [J]
Sin tratamiento	> 550 (79 750)	> 320 (46 400)	> 35	110

Conservación del Producto
<ul style="list-style-type: none"> Mantener en un lugar seco y evitar humedad. No requiere almacenamiento bajo horno.

Posiciones de Soldadura
P, H, Va, Sc.

Parámetros de Soldeo Recomendados

Diámetro [mm (pulg.)]	2,50 (3/32")	3,25 (1/8")
Polaridad	Corriente continua electrodo al negativo (DCEN)	
Gas protector	100% Ar	
Amperaje (A)	20 - 150	30 - 250
Voltaje (V)	9 - 15	10 - 20
Stick out (mm)	-	-
Flujo de Gas (l/min)	5 - 15	5 - 15

Aplicaciones

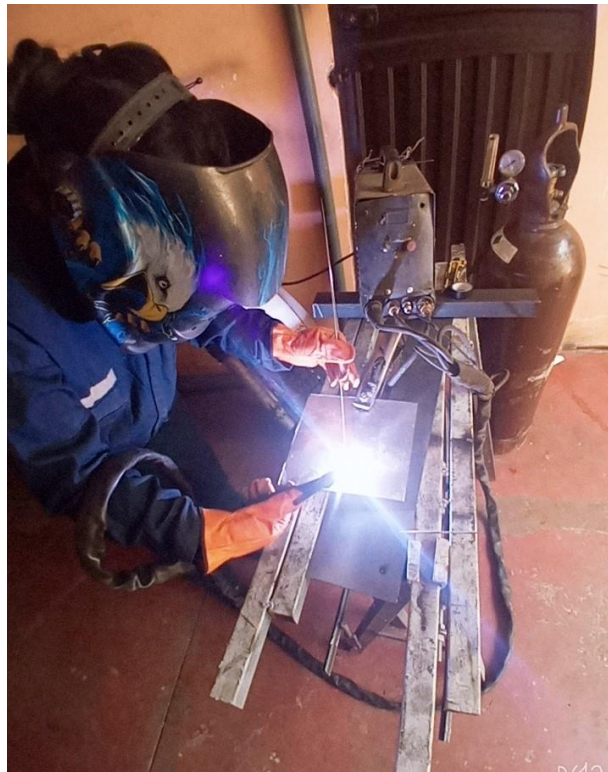
- Se usa para los aceros inoxidables de la familia Cr/Ni: AISI 301, 302, 304, 308.
- Se usa para los aceros inoxidables estabilizados de la familia Cr/Ni: 321, 347 pero dependiendo del medio que lo rodea.
- También puede unir los aceros: DIN: X5 CrNi 18 8, X5 CrNi 18 10, X5 CrNi 18 12, X2 CrNi 19 11.



TALLER DE SOLDADURA U.L.R. INDUSTRIAS E.I.R. LTDA.



PROCESO DE SOLDADURA SMAW



PROCESO DE SOLDADURA GTAW



MAQUINA DE SOLDAR MULTIPROCESOS