

**ESTUDIO COMPUTACIONAL DEL COMPORTAMIENTO A LA FATIGA EN
JUNTAS SOLDADAS DE UN ACERO ESTRUCTURAL UTILIZADO PARA LA
FABRICACION DE RECIPIENTES A PRESION**

JUAN SEBASTIAN RODRIGUEZ MATEUS 2165536

ANDRES CAMILO GIRALDO RODRIGUEZ 2154694

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero Mecánico

Director

MANUEL DE JESUS MARTINEZ

PhD en Mecánica Computacional

Universidad Industrial de Santander
Facultad de ingeniería Físico-mecánica
Escuela de Ingeniería Mecánica
Bucaramanga

2022

Dedicatoria

Este logro tan importante en mi vida se basó en la confianza y cariño que tuvo mi familia a la hora de apoyarme en este camino que tome, en especial a mi madre Martha Patricia Mateus a mi padre Gilberto Rodriguez Patarroyo a mi hermana Danna Alejandra y a una persona que ya no está con nosotros como es mi abuela María Teresa Patarroyo quien fue un pilar para lograr este sueño. De la misma manera, agradezco a todas las personas que me apoyaron y me ayudaron a crecer como persona en este ciclo de mi vida.

Juan Sebastian Rodriguez Mateus

Agradezco a Dios, a mis padres y familiares por ayudarme en todo este proceso, siempre fueron mi apoyo y me dieron fortaleza en el camino, sin ellos nada de este trabajo se hubiera logrado. Este trabajo quisiera dedicarlo a mi Padre CARLOS HUMBERTO GIRALDO RIOS que se encuentra en el cielo, hago esta dedicatoria por qué uno de mis sueños era que mi padre pudiera ver este documento y ya que no lo puede hacer en vida solo quiero que esté orgulloso desde allá arriba.

Andrés Camilo Giraldo Rodriguez

Agradecimientos

Agradecemos a la Universidad Industrial de Santander por permitirnos cumplir con el sueño de ser Ingenieros Mecánicos y expresamos nuestra eterna gratitud a la escuela de Ingenieria Mecánica por cada etapa de aprendizaje en nuestra vida de pregrado por medio de nuestro docentes quienes se preocuparon por nuestra formacion ética e integral.

Además agradecemos a nuestro director Manuel de Jesus Martinez y nuestros evaluadores Alberto David Pertuz y Leonidas Vasquez Chaparro quienes fueron un gran apoyo y gracia a la hora de realizar el proyecto de grado y nos brindaron de su confianza, paciencia y tiempo.

Y por ultimo pero no menos importante agradecer al Youtuber chileno Asdrúbal Ayestaran, ya que gracias a su tiempo y videos logramos comprender y entender el funcionamiento del software Ansys.

Tabla de Contenido

	Pág.
1. Planteamiento del problema	16
2. Objetivos	17
2.1. Objetivo General	17
2.2. Objetivos Especificos.....	17
3. Justificación	18
4. Marco teórico	19
4.1. Estados del arte	19
4.1.1. Antecedentes internacionales	19
4.1.2. Antecedentes nacionales	23
4.1.3. Antecedentes regionales.....	24
4.2. Referentes teóricos.....	25
4.2.1. Fatiga en metales.....	25
4.2.2. Curva de whöler	25
4.2.2.1. Vida a la fatiga	25
4.2.2.2. Resistencia a la fatiga.....	26
4.2.2.3. Límite de fatiga	26
4.2.3. Comportamiento a la fatiga de una unión soldada.....	26
4.2.4. ANSYS (WorkBench)	27
4.2.4.1 Análisis por elementos finitos.....	27
4.2.5. Ensayo de fatiga.....	28

4.2.5.1. Definición	28
4.2.5.2. Vida a la fatiga	30
4.2.6. Juntas soldadas	34
4.2.6.1. Tipos de uniones soldadas	35
4.2.6.1.1. Juntas a tope	35
4.2.6.1.2. Ubicación de la junta soldada	36
4.2.6.1.3. Categoría A	36
4.2.7. Proceso de soldadura en juntas a tope	37
4.2.7.1. Posiciones para soldadura en ranura	37
4.2.7.2. Posición Plana (1G)	38
4.2.7.3. Principales técnicas de soldadura según su tipología	38
4.2.8. Soldadura GMAW	38
4.2.9. Zona afectada por el calor	40
4.2.10. Esfuerzos	41
4.2.10.1 Esfuerzo normal en junta soldada a tope	41
4.2.10.2. Esfuerzos en recipiente de pared delgada sometido a una presión interna	41
4.2.10.3 Concentradores de esfuerzos	44
4.2.10.4. Esfuerzos residuales	44
4.2.11. Generalidades Del Código ASME (American Society of Mechanical Engineers)	46
4.2.11.1. Código ASME para calderas y recipientes de presión	46
4.2.11.2. Código ASME sección VIII división 1	46
5. Desarrollo de proyecto	47
5.1. Materiales	49

5.1.1. Material Base	49
5.1.1.1 Resistencia la tracción o esfuerzo último.....	50
5.1.1.2 Resistencia a la fluencia.....	51
5.1.1.3 Límite de fatiga.....	52
5.1.1.4. Módulo de elasticidad.....	53
5.1.1.5. Relación de Poisson y Densidad.....	54
5.1.1.6. Curva S-N para acero estructural.....	55
5.1.2. Material del cordón de soldadura (acero 1045)	56
5.1.2.1. Curva S-N para material de aporte.....	57
6. Simulación en ansys.....	59
6.1. Diseño de la junta.....	59
6.2. Interfaz de ansys	59
6.2.1. Engineering Data	60
6.2.2. Geometry.....	64
6.2.3. Model	66
6.2.3.1. Geometry.....	66
6.2.3.2. Materials	67
6.2.3.3. Connections.....	68
6.2.4 Geometry Circunferencial.....	69
6.2.4.1. Mesh.....	69
4.2.4.1.1 Análisis de Convergencia	70
6.2.4.2. Static Structural.....	73
6.2.4.3. Solución	75

6.2.5. Geometry longitudinal	80
6.2.5.1. Mesh.....	81
6.2.5.2. Static Structural.....	82
6.2.5.3. Solution	84
7. Validación de datos con relacion a una metodologia experimental	87
7.1 Parámetros de diseño	87
7.1.1. Materiales.....	87
7.1.2. Proceso de soldadura.....	88
7.2. Metodología	88
7.2.1. Ensayos	88
7.2.1.1. Ensayo de Fatiga	89
8. Conclusiones	91
Referencias Bibliográficas.....	92
Apéndices	93

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Sucesiones de la división 1	47
Tabla 2. Valores de resistencia a la tracción para el acero SA516-70	51
Tabla 3. Valores de resistencia a la fluencia para el acero SA516-70	52
Tabla 4. Valores de límite de fatiga para el acero SA516-70	53
Tabla 5. Valores de módulo de Young para el acero SA516-70	54
Tabla 6. Valores de relación de Poisson y densidad para el acero SA516-70	54
Tabla 7. Propiedades	57
Tabla 8(a). Análisis de convergencia circunferencial	71
Tabla 8(b). Análisis de convergencia longitudinal	71
Tabla 9. Tabla comparativa.....	87
Tabla 10. Tabla comparativa.....	88
Tabla 11. Tabla comparativa.....	89
Tabla 12. Tabla comparativa.....	89
Tabla 13. Esfuerzos y número de ciclos de ensayo de fatiga experimental.....	90
Tabla 14.Esfuerzos y numero de ciclos de ensayo de fatiga en el simulador ANSYS.....	90

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Aplicación del método finito	27
Figura 2. Representación de la superficie de fractura de un material sometido a fatiga	29
Figura 3. Recipiente a presión	34
Figura 4. Cordón de soldadura.....	34
Figura 5. Formas de juntas a tope	35
Figura 6. Ubicación de categorías de juntas en recipiente a presión	36
Figura 7. Categoría A (longitudinal “azul”, soldada “verde”, circunferenciales “rojo”)	37
Figura 8. Posición 1G	38
Figura 9. Junta después del proceso de soldadura	40
Figura 10. Ecuación de esfuerzo normal.....	41
Figura 11. Recipiente cilíndrico sometido a esfuerzo transversal σ_{θ} y Longitudinal σ_l	43
Figura 12. Defectos en la soldadura.....	44
Figura 13. Esfuerzos residuales	45
Figura 14. Bisel y Soldadura a tope	49
Figura 15. Material de aporte.....	57
Figura 16. Formatos para importar la geometría en ANSYS.....	59
Figura 17. Interfaz principal de ANSYS y sistema de análisis que se utilizó	60
Figura 18. Ventana de Stalic Structural / implementación de material en Engineering Data	61
Figura 19. Ventana donde se adiciona un material en la librería de Engineering Data.....	62
Figura 20. Ventana de propiedades del acero SA 516-70 y curva S-N en Engineering Data	62

Figura 21. Ventana de propiedades del acero SA 516-70 y curva S-N en Engineering Data	63
Figura 22. Ventana de propiedades electrodo E7018, E6010 y curva S-N en Engineering Data.	63
Figura 23. Ventana de propiedades electrodo E7018, E6010 y curva S-N en Engineering Data	64
Figura 24. Ventana del análisis Stalic Structural / geometría importada.....	64
Figura 25. Ventana del análisis Stalic Structural / selección de editor de geometría	65
Figura 26. Geometría de la junta.....	65
Figura 27. Ventana del Model / asignación de material a los sólidos en la geometría	66
Figura 28a. Ventana del Model / material SA516-70 usados para el análisis	67
Figura 28b. Ventana del Model / material SA516-70 usados para el análisis	67
Figura 29. Ventana del Model / conexiones entre los sólidos en la geometría.....	68
Figura30. Geometría de la junta.....	68
Figura 31. Stalic Structural / selección de editor de geometría circunferencial	69
Figura 32(a). Diagrama de convergencia (Circunferencial).	70
Figura 32(b). Diagrama de convergencia (Longitudinal).	71
Figura 33. Ventana del Model / mallado de la superficie	72
Figura 34. Ventana del Model / mallado completado.....	73
Figura 35. Ventana del Model / condiciones de trabajo para el análisis.....	74
Figura 36. Ventana del Model / condiciones de simetría del sólido para el análisis	75
Figura 37. Ventana del Model / resultado del esfuerzo equivalente en la superficie de la junta..	76
Figura 38. Ventana del Model / forma para realizar ensayo de fatiga con herramienta ANSYS.	76
Figura 39. Ventana del Model / forma para realizar ensayo de fatiga con herramienta ANSYS.	77
Figura 40. Ventana del Model / forma para realizar ensayo de fatiga con herramienta ANSYS.	77
Figura 41. Fatigue Tool / vida de la junta con el simulador ANSYS	79

Figura 42. Fatigue Tool / zona donde soporta menor número de ciclos con simulador ANSYS.	79
Figura, 43. Ventana del Model / resultado del esfuerzo alternante en la superficie de junta	80
Figura 44. Ventana del análisis Stalic Structural / selección editor de geometría longitudinal....	81
Figura 45. Ventana del Model / mallado de la superficie con Method.....	81
Figura 46. Ventana del Model / mallado completado.....	82
Figura 47. Ventana del Model / condiciones de trabajo para el análisis.....	83
Figura 48. Ventana del Model / condiciones de simetría del sólido para el análisis	84
Figura 49. Ventana del Model / resultado del esfuerzo equivalente en la superficie de la junta..	85
Figura 50. Ventana del Model / resultado del esfuerzo alternante en la superficie de la junta	85
Figura 51. Fatigue Tool / vida de la junta con el simulador ANSYS	86
Figura 52. Fatigue Tool / zona donde hay menor número de ciclos con simulador ANSYS.....	86

Lista de Apéndices

	pág.
Apendica A. Tipos de juntas soldadas y resistencia a la fatiga para aceros	93
Apendice B. Maquinas de flexion rotativa	95
Apendice C. tipo de junta según ASME sección VIII, Div 1	98
Apendice D. Tabla UW-12 ASME sección VIII	100
Apendice E. Categoria de juntas según ASME	104
Apendice F. Posicion de aplicación de soldadura ASME sección IX	108
Apendice G. Tecnicas de soldadura.....	111
Apendice H. Metodo para determinar el ensayo de fatiga.....	114
Apendice I. Cargas en un recipiente sometido a presión	115
Apendice J. Curva de Wohler	116
Apendice K. Factores de Marin	117
Apendice L. Propiedades de los materiales	122
Apendice M. Planos de la geometria de la junta soldada	123

Glosario

Fatiga: la fatiga es un fenómeno que aparece en elementos sometidos a cargas variables hasta que fallan para tensiones inferiores a la resistencia a fluencia del material obtenida del ensayo estático a tracción.

Esfuerzo: el esfuerzo es la relación entre la fuerza aplicada y el área de la sección transversal donde está actuando la fuerza aplicada.

Junta Soldada: La soldadura es una técnica que se utiliza para unir dos piezas de metal. Se puede usar metal de relleno para rellenar la junta entre estos dos objetos, o se pueden usar altos niveles de calor para simplemente fundir los bordes del material y unirlos. Este proceso de unir metales mediante calor da como resultado uniones soldadas.

ASME: (American Society of Mechanical Engineers), es una asociación de profesionales, que ha generado un código de diseño, construcción, inspección y pruebas para equipos, entre otros, calderas y recipientes sujetos a presión. Este código tiene aceptación mundial.

Resumen

Título: estudio computacional del comportamiento a la fatiga en juntas soldadas de un acero estructural utilizado para la fabricación de recipientes a presión

Autor: Juan Sebastian Rodriguez Mateus, Andres Camilo Giraldo Rodriguez

Palabras Clave: Ensayo de Fatiga, Junta Soldada, Esfuerzos, ASME.

Descripción: En este proyecto se muestra el comportamiento frente al fenómeno de fatiga de un acero estructural (SA-516-70) que generalmente es usado para la construcción de recipientes a presión horizontales. El ensayo se realizó en forma de simulación en el software ANSYS WorkBench por medio del método de elementos finitos a una junta soldada de categoría A, tipo 1 a tope con un ángulo de 37.5° , según el código ASME sección VIII div 1. Esta junta será analizada después de que se le aplique el cordón de soldadura y será sometida a esfuerzos equivalentes a los presentes en un recipiente a presión cuando este está en presencia de cargas cíclicas, como lo son el esfuerzo longitudinal y circunferencial en un proceso de presurización y despresurización. En los resultados se observó que el elemento que no presenta efecto sobre la resistencia a la fatiga es el cordón de soldadura y que el material base es el que tiende a fallar cerca al cordón, debido a la geométrica y a los posibles esfuerzos residuales y concentradores de esfuerzos que quedan presentes después de ser aplicada la soldadura.

Abstract

Title: computational study of fatigue behavior in welded joints of a structural steel used for pressure vessel fabrication

Author(s): Juan Sebastian Rodriguez Mateus, Andres Camilo Giraldo Rodriguez

Key Words: Fatigue Test, Welded Joint, Stress, ASME.

Description: This project shows the fatigue behavior of a structural steel (SA-516-70) generally used for the construction of horizontal pressure vessels. The test was performed as a simulation in ANSYS WorkBench software using the finite element method on a welded joint of category A, type 1 butt weld with an angle of 37.5° , according to ASME code section VIII div 1. This joint will be analyzed after the weld bead is applied and will be subjected to stresses equivalent to those present in a pressure vessel when it is in the presence of cyclic loads, such as longitudinal and circumferential stress in a process of pressurization and depressurization. In the results it was observed that the element that had no effect on fatigue resistance is the weld bead and that the base material is the one that tends to fail near the bead, due to the geometry and the possible residual stresses and stress concentrators that are present after the welding is applied.

1. Planteamiento del problema

En la escuela de ingeniería mecánica de la universidad industrial de Santander se realizan una gran cantidad de proyectos que hacen uso de juntas soldadas. Los recipientes a presión son un ejemplo de los tantos proyectos que se realizan, sin embargo, para realizar un ensayo de fatiga de las juntas soldadas en estos recipientes en forma experimental resulta muy costoso en la actualidad.

Las juntas soldadas de un recipiente a presión son la principal causa de fallas debido a las diferentes discontinuidades que se puedan presentar, esfuerzos residuales y desalineaciones entre las partes soldadas. Imperfecciones como las discontinuidades pueden producir grietas por las cuales falla el material produciéndose su crecimiento a medida que las cargas fluctúan, hasta que el área restante no sea capaz de soportar el esfuerzo aplicado, fallando finalmente la pieza.

El proceso de fatiga suele ser la causante de la mayor parte de las roturas de los componentes expuestos a cargas cíclicas en las máquinas de la industria. Las roturas por fatiga son especialmente peligrosas porque no suelen presentar indicios de fallo, sino que este se produce de modo repentino y sin observar deformaciones plásticas de conjunto.

2. Objetivos

2.1. Objetivo General

Analizar el comportamiento a la fatiga en juntas soldadas de un acero estructural para la fabricación de recipientes a presión mediante el método de elementos finitos utilizando la herramienta computacional (ANSYS).

2.2. Objetivos Especificos

- Seleccionar los tipos de juntas con que se diseña el recipiente a presión.
- Establecer los parámetros que influyen en el análisis computacional de la junta soldada.
- Desarrollar los modelos computacionales de ensayo con respecto a las normas de la American Society of Mechanical Engineers (ASME) sección VIII.
- Validar los datos obtenidos con el programa computacional (ANSYS) con relación a la metodología experimental de un ensayo a fatiga de juntas soldadas en un acero de alta resistencia.

3. Justificación

Los recipientes a presión pueden ser producidos de una manera óptima en lo que respecta a tiempo, calidad y coste. Esto implica que muchas empresas necesiten prepararse para integrar los sistemas de simulación computacional que permiten verificar la funcionalidad de los productos para aumentar la calidad y fiabilidad.

Actualmente para realizar los ensayos a fatiga de juntas soldadas se utilizan probetas de diferentes materiales en los laboratorios, dado a que este tipo de ensayos se realizan de esta manera. Las juntas soldadas se convirtieron en el punto con más probabilidad de fallar por fatiga. Este proyecto tiene como fin hacer un análisis por medio de la ingeniería asistida por ordenador (CAE), donde se hará uso de la herramienta computacional (ANSYS) para ampliar y mejorar el entendimiento del ensayo a fatiga en los diferentes materiales para la fabricación de juntas soldadas a tope y recipientes de acero de alta resistencia mediante el método de elementos finitos, teniendo en cuenta las normas American Society of Mechanical Engineers (ASME) sección VIII, y así ver la efectividad del estudio.

4. Marco teórico

A continuación, se presentan el estado del arte y referentes teóricos necesarios que ayuden a abordar el problema planteado, desde el entendimiento de conceptos claves que nos den una mejor comprensión del tema e información de diferentes autores que nos permitan plantear las soluciones al problema de la mejor manera posible, basándonos en los resultados obtenidos y la manera en que se abordaron estas investigaciones.

4.1. Estados del arte

En el estado del arte se presentan diferentes trabajos de investigación desde el ámbito internacional, local y regional que permitan mejorar el resultado final en el análisis de fatiga en las juntas soldadas de los recipientes a presión.

4.1.1. Antecedentes internacionales

1. Halfpenny, Plaskitt, Mentley, Mann (2013), realizaron la investigación y ensayo titulado “análisis de fatiga de una junta soldada de un recipiente de presión usando el método de integración de esfuerzos descrito en el código de caldera y recipientes de presión ASME VIII”, en donde se analiza la eficiencia del método FEA (análisis de elementos finitos de conjuntos soldados) por medio de un software que analiza el comportamiento de la falla por fatiga de las unidades soldadas, además proporciona monitoreo continuo y en tiempo real, registrando los datos del comportamiento del valor con relación al número de ciclos requeridos para causar el fallo del material, esto implica que se va a tener una mejor interpretación de los factores presentes en el comportamiento del material del recipientes en el que se da uso de la unidad soldada, como la geometría de la soldadura, tensiones residuales, profundidad de penetración y la calidad general. Con el método de análisis de elementos finitos se puede determinar el material

adecuando para la fabricación de los recipientes a presión de menor costo, y así configuran la geometría del recipiente como el espesor de la pared, cumpliendo los requisitos reglamentarios del código de calderas y recipientes a presión de la ASME. Esta investigación plantea una alternativa diferente para el análisis del comportamiento de la falla por fatiga del material usado para la fabricación de recipientes, con el uso del software se tendrá una mejor interpretación de la información relevante que se brinda en tiempo real, generando un mejor estudio con relación a los métodos experimentales usados para dicho análisis. (Halfpenny, 2013)

2. González de león, Martínez, Pertuz-comas, Álvarez, Arenas (2008), Realizaron la investigación titulada “**análisis de fatiga de juntas soldadas de acero al carbono utilizado en recipientes a presión**”, en donde se estudió el comportamiento del fenómeno de fatiga en las juntas soldadas de acero de alta resistencia usadas en la fabricación de recipientes a presión, por medio de ensayos experimentales empleando probetas fabricadas de dicho material. Para el análisis se realizó una caracterización del material por medio del microscopio óptico y sometidos a ensayos de micro-indentación para determinar la dureza, además de realizar los ensayos de tracción y fatiga a flexión, con el fin de conocer el comportamiento de las probetas (usando cordón de soldadura en el material base del recipiente) a diferentes esfuerzos fluctuantes, para el ensayo de fatiga a flexión se usaron 12 probetas de material base de recipiente (con presencia de cordón de soldadura) para visualizar la región o zona donde sucederá la fractura, los resultados de este ensayo nos indican que todas las fracturas sucedieron en el material base y no en el cordón de soldadura. Como conclusión del ensayo se observó que el cordón de soldaduras no influye la forma en la que se presenta fatiga teniendo el mismo número de ciclos de falla y nivel de esfuerzo del material base del recipiente. (Martinez.M, 2008)

3. Reséndiz Hernández, Palacios Pineda (2017), realizaron un artículo titulado **“análisis de deformaciones unitarias en juntas soldadas utilizando correlación digital de imágenes”**, en donde realizó un análisis de las deformaciones unitarias por medio de imágenes digitales utilizando un software que emplea la técnica DIC (correlación digital de imágenes), donde se observó el comportamiento de falla en las juntas soldadas usando imágenes en 2D para visualizar las zonas locales con elevada deformación donde puede iniciarse grietas. En la actualidad hay muchos métodos de ensayo experimental tradicional, como el ensayo del extensómetro que mide las deformaciones ocasionadas por cargas durante un estado estático. El ensayo fue realizado en tres pasos, el primero consiste en pintar la superficie de la probeta de negro y luego rociar pintura blanca, creando un patrón en la superficie facilitando el proceso de análisis de deslizamiento de superficie generado por la máquina de tensión, el segundo paso consiste en tomar imágenes de la probeta con una cámara térmica para después ser visualizadas en un software que maneja métodos finitos como es ANSYS, con el fin de interpretar la distribución térmica presente en la imagen, y como tercer paso consiste en mirar el comportamiento de la probeta antes y después de realizar el proceso de tracción. Los resultados que se obtuvieron del análisis DIC fueron que en las zonas donde se realizó el cordón es la que presenta elevada deformación y por tanto se puede iniciarse las grietas, debido a que el proceso de soldadura se caracteriza por genera una diferencia de temperatura en la zona del cordón con respecto al resto del material base. Este artículo plantea una alternativa diferente para la realización de ensayos experimentales, el cual nos brindan un resultado muy parecido a los obtenidos en ensayos tradicionales, pero con la diferencia de ser fácil y rápido al obtener los resultados. (Hernandez.J, 2017)

4. Romero Pino (2010), realizó la investigación y ensayo titulado **“evaluación de los criterios de diseño y configuración estructural de recipientes a presión”**, en este trabajo se

realizó un informe mediante una investigación tipo documental sobre los criterios de diseño, configuración estructural de equipos y recipientes presurizados para así analizar los parámetros que comprendan este tipo de diseño y las fallas que puedan presentar estos, las cuales normalmente no son consideradas en el diseño del equipo. Con esto se quiere ofrecer parámetros que contribuyan a alargar la vida útil del recipiente y garantizar la seguridad e integridad de estos, para así evitar accidentes o eventualidades que puedan afectar el factor de servicio de una empresa que trabaje con recipientes de esta índole. En esta investigación especificaron las características de diseño según las distintas normas nacionales e internacionales y se realizaron los cálculos necesarios en el diseño de recipientes cilíndricos y esféricos, sujetos a presión, con esta información se puede realizar un mejor diseño de un recipiente a presión y conocer los parámetros que pueden influir en la falla de este sin la necesidad de usar un Software. (Romero.P, 2010)

5. Aguirre Revelo (2008), realizo el proyecto titulado “construcción de una máquina para ensayos de juntas soldadas”, en este trabajo se determinaron propiedades mecánicas de la soldadura ya que estas son muy importantes y esenciales en la producción industrial ya que sirven para la calificación de soldadores, las características de este ensayo se especificaron en la norma ASME IX y API 1104, en las cuales se puede encontrar todo lo relacionado con el ensayo mencionado. Para la construcción de esta máquina se usaron conceptos, conocimientos y herramientas relacionadas con el proceso constructivo. Esta investigación aporta diferentes conceptos que son importantes a la hora de analizar una junta soldada en un recipiente a presión, como la clasificación de aceros estructurales según la norma ASME o API y las propiedades de algunos materiales que se usaron en este análisis. (Aguirre.L, 2008)

6. Claro, López, Arce, Soliz y Méndez (2014), realizaron el proyecto titulado “Validación del procedimiento de soldadura con electrodo revestido en juntas a tope y posiciones plana, horizontal, vertical y sobrecabeza”, este proyecto de investigación contribuyo con la validación de un proceso de soldadura de juntas a tope con electrodo revestido, existen varios tipos de procedimiento de soldadura, en esta investigación se tomó en cuenta la soldadura a tope por ser la de mayor aplicación práctica, Luego viene el acondicionamiento de probetas normalizadas, donde se realizó la práctica del procedimiento de soldadura, bajo un protocolo establecido para este trabajo, donde se procedió a la rotura de estas. Al ser evaluar esto se demuestra la validez de la aplicación del procedimiento, además de la generación de una habilidad técnica para ejecutar este tipo de trabajos de acuerdo con estándares exigidos en esta área y en la industria. Con este trabajo de investigación se establecieron conceptos básicos de soldadura y se determinó un proceso de calificación en soldadura, de esta manera se puede determinar el método de soldadura más adecuado para una junta a tope de un recipiente a presión y así, tenga menos probabilidad de fallar. (Lope.K, 2014)

4.1.2. Antecedentes nacionales

1. Araque de los Ríos, Arzola de la Peña (2013), realizaron el proyecto titulado “Estado del arte sobre la integridad estructural de uniones soldadas y modelos de propagación de grietas para la gestión de vida en estructuras” En este artículo de revisión se hablaron de temas relacionados con el análisis de esfuerzos como lo son la influencia de la geometría de los cordones de soldadura, la detección de los diferentes defectos que este pueda llegar a tener, también se revisaron diferentes investigaciones que tocan el tema del análisis de la integridad de uniones soldadas, visto desde el punto de vista de la mecánica de fractura. Además, se presentan diferentes criterios que se relacionan con la capacidad de resistencia en presencia de grietas o

diferentes defectos estructurales. Se determinaron los protocolos para la gestión de vida en soldaduras que tienen que ver con factores como la carga, tamaño del defecto y resistencia del material, por último, se incluyeron resultados de diferentes investigaciones que tenían que ver con el análisis de diversas situaciones de carga y clasificación de uniones soldadas. Con la información que se obtuvo en los diferentes análisis de las investigaciones se determinó que los defectos tipo grieta de solidificación afectan significativamente el campo de tensiones de la soldadura, cuando el componente es soldado y a su vez es sometido a diferentes cargas cíclicas. Con este artículo de revisión se pudo comparar entre los diferentes trabajos investigaciones y así determinar cuáles son los factores que más afectan a la soldadura de una junta de un recipiente a presión, también se determinó que la mecánica de fractura se utiliza ampliamente para la determinación de mecanismos de falla y detección de grietas en soldaduras volviéndose así muy útil para estimar la vida de uniones soldadas de componentes estructurales. (Rios.O, 2013)

4.1.3. Antecedentes regionales

1. Bejarano U. Alberto (2007), realizo el proyecto titulado **“Consideraciones de diseño y factores que afectan el desempeño de las uniones soldadas bajo carga cíclica”**, En este artículo se buscaba presentar y argumentar de manera concisa y practica criterios que apoyen la toma de decisiones del ingeniero en el proceso de diseño basados en la amplia normalización existente. En este documento se mencionaron diferentes tipos de acero con más o menos de 0.35 % de carbono y los procesos de soldadura por arco eléctrico, además de mencionar los tipos de falla asociados a la carga cíclica en soldadura. Con los criterios y conceptos que se mencionan en el artículo, se determinaron factores que afectan el desempeño de las juntas soldadas bajo algún tipo de carga, además de identificar varias consideraciones en el diseño de una unión soldada. (Bejarano.A, 2007)

4.2. Referentes teóricos

En esta sección del documento, se presentan los conceptos y definiciones necesarias que servirán de referencia para una mejor comprensión del tema, la problemática y todo lo relacionado con el diseño de la junta.

4.2.1. Fatiga en metales

La fatiga en metales es un modo de falla que se presenta principalmente en elementos mecánicos que se encuentran sometidos a condiciones que generan esfuerzos en una secuencia de cargas cíclicas, estas cargas cíclicas son conocidas como esfuerzos variables o fluctuantes. Según las ASTM (American Society for Testing and Materials), define la fatiga en metales como “Proceso de cambio estructural progresivo, localizado y permanente, que ocurre en un material sometido a condiciones que producen esfuerzos y deformaciones fluctuantes en algún punto o puntos, y el cual puede culminar en grietas o fractura completa después de un número suficiente de fluctuaciones.” (Collevecchio.S, 2004, pág. 19)

En el proceso de fatiga se generan grietas debido a las cargas fluctuantes presentes en una zona propensa, dicha grietas en condiciones específicas (puntuales) pueden crecer hasta producir la rotura de la pieza al aplicar un número de ciclos suficientes y así generar las llamadas fallas por fatiga.

4.2.2. Curva de whöler

Para hablar de la curva de whöler es necesario entender los siguientes conceptos:

4.2.2.1. Vida a la fatiga

Consiste en el número de ciclos de esfuerzo que soporta un pieza o conjunto de piezas antes de que se presente la falla en ellas. La vida de un componente sometido a fatiga está

determinada por el número de ciclos requeridos para iniciar la grieta y por el número de ciclos necesarios para hacer crecer la grieta desde sus dimensiones iniciales hasta el valor crítico.

4.2.2.2. Resistencia a la fatiga

Es el valor teórico de esfuerzo al cual ocurre la falla para un cierto número de ciclos.

4.2.2.3. Límite de fatiga

Es el valor límite de la resistencia a la fatiga promedio cuando la vida a la fatiga (N) se hace muy grande. Para valores inferiores a este límite. (Collevecchio.S, 2004)

La curva de whöler o curva S-N (esfuerzo – vida a la fatiga) es un método que se usa para visualizar los resultados obtenidos de ensayos o pruebas de fatiga, visualizando el comportamiento de las propiedades del material a analizar. Para observar el comportamiento a fatiga de un material, es necesario realizar diferentes ensayos a probetas variando el nivel de esfuerzos, para saber la resistencia o nivel de fatiga del material y así poder determinar la vida que soporta antes de fallar en número de ciclos. (Collevecchio.S, 2004, pág. 20)

4.2.3. Comportamiento a la fatiga de una unión soldada

El proceso de soldadura es considerado complejo debido a que la materia adherida y el material a unir deben ser compatibles en su microestructura para obtener una resistencia a la fatiga similar a un proceso de forja o un mecanizado de una pieza, pero con la ventaja de tener un menor costo. En las uniones soldadas se presentan problemas ocasionados por el desempeño en conjunto de los materiales que se utilizaron, además puedes presentarse problemas por causa del esfuerzo residual, macro y micro discontinuidades (**Véase en Apéndice A**).

En el proceso de soldadura se presenta una cantidad de calor puntual que produce una distribución uniforme de temperaturas en la zona soldada, la cual generará tensiones residuales

del orden del límite elástico que influirán en la tensión real de fatiga en los distintos puntos afectados por el calor. (Monsalve.V, 2012)

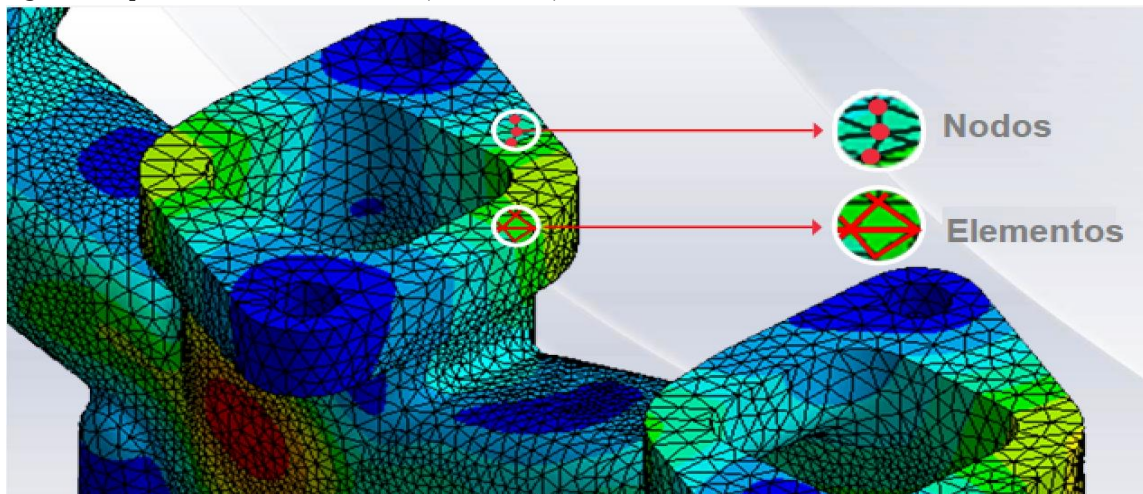
4.2.4. ANSYS (WorkBench)

“ANSYS WorkBench es una plataforma de software donde se crean los proyectos de análisis CAE en diferentes disciplinas, WorkBench despliega gráficamente el intento de la simulación en ingeniería y se establecen las relaciones entre fenómenos físicos y sus módulos incluyendo multi física.” (3DCadPortal, 2006)

4.2.4.1 Análisis por elementos finitos

El análisis mediante elementos finitos (Finite Element Analysis, FEA) ha sido un gran avance para la creación de múltiples plataformas que facilitan el estudio de comportamiento de las propiedades de la materia a condiciones de ensayos, una de estas plataformas es ANSYS, en donde se puede determinar estimaciones de la vida de fatiga de los materiales entre otras ensayos y funciones.

Figura 1. Aplicación del método finito (ESSS, 2016)



El método de Elementos Finitos permite a los ingenieros obtener información del comportamiento de objetos de forma complicada bajo casi cualquier carga imaginable (cargas puntuales, de presión, térmicas, fuerzas inerciales, cargas dependientes del tiempo). además,

permite observar el comportamiento del material a efectos especiales como: plasticidad, propiedades dependientes de la temperatura, mecánica de sólidos, mecánica de fluidos, electromagnetismo, biomecánica, transferencia de calor y acústica, entre muchas otras. Este programa permite resolver problemas en estado estable o dependiente del tiempo, lineal o no lineal. (Monsalve.V, 2012)

4.2.5. Ensayo de fatiga

4.2.5.1. Definición

La mayoría de los elementos mecánicos sometidos a cargas variables, llegan a presentar fallas en su estructura, debido a presencia de esfuerzos alternantes menores al esfuerzo máximo que soporta el material, a este proceso se le conoce como falla por fatiga. La manera para determinar la falla por fatiga en forma experimental es por medio de un ensayo, el cual determina el número de ciclos que soporta el material antes de llegar a la falla.

El ensayo de fatiga tradicional se realiza por medio de una probeta del material a analizar, la cual es sometida a una carga variable hasta llegar a generar una grieta que en condiciones adecuadas puede crecer hasta producir una rotura en la pieza. El proceso de crecimiento de la grieta se da en la mayoría de las situaciones en tres etapas:

Inicio (A):

En esta etapa se presenta cuando hay formación de micro fisuras imperceptibles a simple vista en algún sector en el material, donde se visualiza el comportamiento de un grano al momento de inicia la grieta. En la zona de inicio de grieta se presenta un deslizamiento de átomos hacia afuera y hacia dentro, conocido como extrusión e intrusión respectivamente.

Propagación (B):

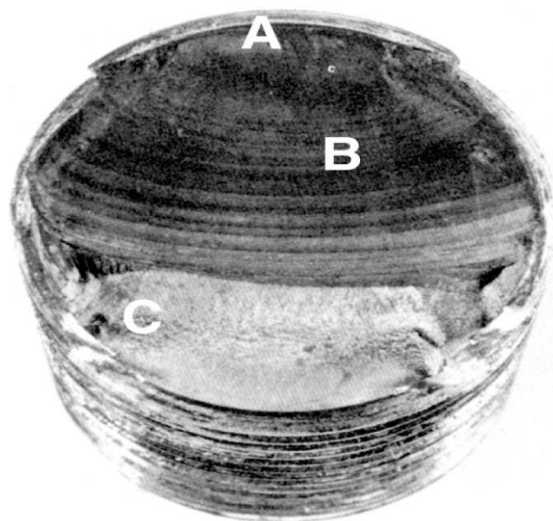
La etapa de propagación ocurre cuando la micro fisura pasa a ser una macro fisura en la superficie afectada, debido a la constante presencia de las cargas cíclicas. En este punto la grieta empieza a crecer hasta llegar a generar acumulación de grano en zonas cóncavas, conocidas comúnmente como zona de playa.

Rotura (C):

La etapa de rotura ocurre cuando la zona del material que no ha sido afectado por la grieta ya no es capaz de soportar las cargas variables y llegar a presentar la rotura o falla del material.

“La velocidad y la dirección de la propagación de la grieta por fatiga están controladas principalmente por las tensiones localizadas y por la estructura del material en la grieta. Sin embargo, al igual que con la formación de grietas, otros factores pueden ejercer una influencia significativa, como el entorno, la temperatura y la frecuencia.” (Shirley.J.E. Mischke.C.R., 2011, pág. 273)

Figura 2. Representación de la superficie de fractura de un material sometido a fatiga (Shirley.J.E. Mischke.C.R., 2011)



Al momento de realizar el ensayo de fatiga a cualquier material, es necesario una máquina que se encargue de someter el material a cargas variables mientras va midiendo la vida del material, algunas máquinas que se utilizan para este ensayo se pueden ver en la parte de anexos en este mismo documento (**Véase en Apendice B**).

4.2.5.2. Vida a la fatiga

Al momento de realizar un ensayo a la fatiga a un material, se busca predecir o determinar el tiempo en número de ciclos que soporta el material hasta presentar un fallo para un nivel específico de carga variable. Con base a ensayos en laboratorios con probetas se determinó que si el número de ciclos para llegar a la fatiga esta entre 1 y 10^3 ($1 \leq N \leq 10^3$) se clasifica en fatiga de bajos ciclos, y si el número de ciclos para llegar a la fatiga es superior a 10^3 ($N > 10^3$) la fatiga se clasifica en fatiga de alto ciclos como se observa en la (Figura 4).

El método más usado para determinar la vida del material con relación al ensayo a la fatiga es la curva S-N donde se visualiza el esfuerzo que soporta un material a un cierto número de ciclos, la gráfica está constituida a base de diferentes puntos que representan los datos de fatiga determinados por medio de los ensayos, donde la tensión alternante está ubicada en el eje vertical (S) frente al número de ciclos que soporta el material hasta el fallo ubicado en el eje horizontal (N). “La resistencia a la fatiga se define como la tensión en la que ocurre el fallo por fatiga tras cierto número de ciclos” (Systemes, 2018). La representación típica de la curva S-N para un acero está en el anexo 10.

Para determinar y realizar la curva, se puede utilizar las ecuaciones y tablas que se encuentran en el libro *Mechanical Engineering Design de Shigley's* en la sección 6 de fatiga (Shirley.J.E. Mischke.C.R., 2011), en donde se indica que para formar la curva del material, es

necesario conocer la resistencia máxima de tracción (S_{ut}), con la cual se puede calcular el valor límite entre la fatiga de ciclo bajo y fatiga de ciclo alto por medio de un factor F, el cual está relacionada con la resistencia máxima de tracción de la siguiente manera: sí, la resistencia máxima es inferior a 70ksi, el valor de F será de 0.9 ($S_{ut} < 70ksi \rightarrow f = 0.9$), y si la resistencia máxima es superior a 70ksi e inferior a 200ksi ($70ksi < S_{ut} < 200ksi$). El valor de F está determinado según la gráfica en el anexo 10.

En el caso donde se presenta fatiga de alto ciclo, se puede utilizar la ecuación de Basquin que genera una gráfica aproximada del comportamiento del material para un número de ciclos determinado $10^3 < N < 10^6$ para los aceros. La ecuación de Basquin esta expresada de la siguiente manera:

$$S_f = a * N^b$$

Para determinar las constantes **a** y **b** en la ecuación de Basquin, es necesario realizar un sistema 2x2, donde la primera ecuación se reemplaza el valor del límite de resistencia a la tracción por el factor F ($f * S_{ut}$) con su correspondiente número de ciclos (10^3), y para la segunda ecuación se reemplaza el valor del límite de resistencia a la fatiga (S_e) con su correspondiente número de ciclos (10^6).

$$f * S_{ut} = a * (10^3)^b$$

$$S_e = a * (10^6)^b$$

Una vez realizado el sistema 2x2 con las dos ecuaciones anteriores se obtiene:

$$a = \frac{(f \cdot S_{ut})^2}{S_e}$$

$$b = -\frac{1}{3} * \log \left(\frac{f \cdot S_{ut}}{S_e} \right)$$

Para determinar el valor del límite de resistencia de fatiga se debe tener presente el valor de la resistencia máxima del material al cual se le realiza el ensayo de fatiga, de la siguiente manera:

$$S'_e = 0.5 * S_{ut} \rightarrow S_{ut} \leq 200 \text{ kpsi}$$

$$S'_e = 100 \text{ kpsi} \rightarrow S_{ut} > 200 \text{ kpsi}$$

$$S'_e = 700 \text{ MPa} \rightarrow S_{ut} > 1400 \text{ MPa}$$

Las expresiones anteriores fueron obtenidas en forma experimental con base a múltiples ensayos que se realizaron en condiciones muy controladas, debido a esto, se deben de tener presentes algunos parámetros para aproximar el verdadero valor del límite de resistencia a la fatiga, como son composición química, manufactura, acabados superficiales, corrosivo, temperatura, estado de esfuerzos, tamaño forma, etc. Para ello se va a multiplicar unos factores K, conocidos como **factores de Marín**, como se muestra a continuación:

$$S_e = K_a * K_b * K_c * K_d * K_e * K_f * S'_e$$

- K_a = factor de modificación de la condición superficial
- K_b = factor de modificación de tamaño (flexión y torsión)
- K_c = factor de modelación de carga

- K_d = factor de modelación de temperatura
- K_e = factor de confiabilidad
- K_f = factor de modificación de efectos varios
- S'_e = límite de resistencia a la fatiga
- S_e = límite de resistencia a la fatiga en la ubicación crítica

La manera para determinar los factores de Marín se puede encontrar el anexo 11.

Después de haber determinado el valor del límite de fatiga, se observa el comportamiento del material después de 10^6 para los aceros, si el valor del límite de fatiga se mantiene aproximadamente constante, se puede decir que la vida del material será constante y no presentará alguna falla o rotura debido a la fatiga.

Al momento de realizar un ensayo de fatiga experimental se tiene que observar en qué momento la probeta falla, si la probeta es de acero puede llegar a falla en alguna de estas siguientes 3 situaciones:

- Sí, la probeta llega a la rotura entre 1 a 10^3 ciclos el fallo es conocido como **falla por fatiga plástica**.
- Sí, la probeta llega a la rotura entre 10^3 a 10^6 ciclos, se conoce como **fallo en vida temporal**.
- Sí, la probeta sobrepasa los 10^6 ciclos, la probeta se puede considerar que tiene **vida infinita a la fatiga**.

4.2.6. Juntas soldadas

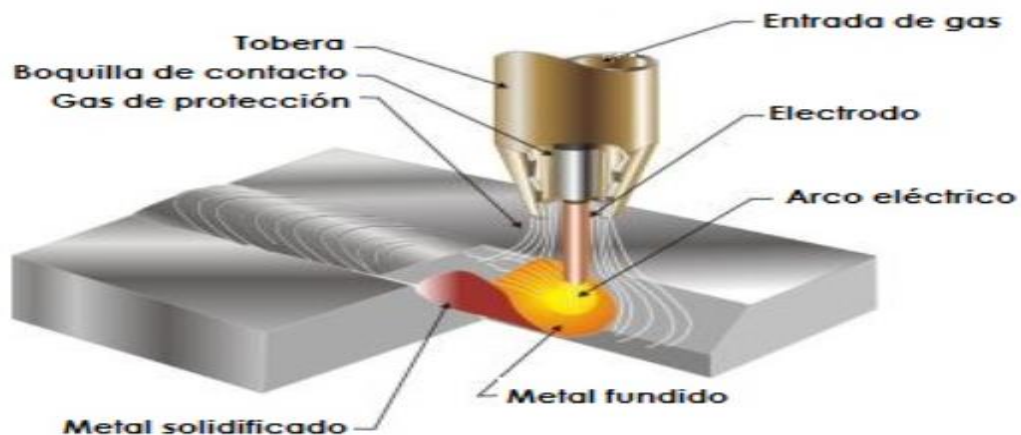
Cuando se habla de recipientes a presión se hace referencia a tres tipos en sí, el horizontal, vertical y esférico. Para la simulación se tomará una junta soldada a tope de un recipiente horizontal dado que este tipo de recipiente es de los más usados en la industria además de ser más económicos, ligeros y fáciles de transportar en comparación a los tipos de tanques.

Figura 3. Recipiente a presión (Collevecchio.S, 2004)



La soldadura en juntas es un proceso de unión de materiales principalmente metálicos, donde se fusionan dos a más superficies por medio de calor o presión, este proceso es conocido como *ensamble soldado*. En algunos casos se adiciona material para rellenar y facilitar el proceso de unión de material.

Figura 4. Cordón de soldadura (Ayon., 2021)



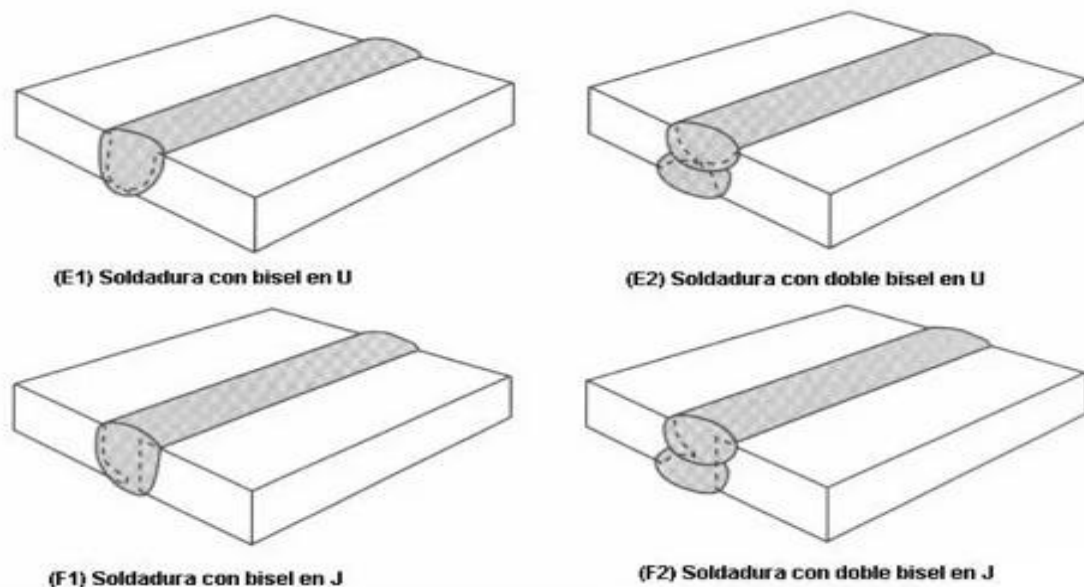
4.2.6.1. Tipos de uniones soldadas

En el proceso de unión de elementos metálicos por medio de soldadura se utiliza diferentes formas, entre las más conocidas según el código ASME sección VIII Div 1 tenemos junta a tope, junta de esquina, unión en ángulo y soldadura en filete (**véase en Apendice C**). En este caso se analizará **la junta de tipo a tope**, dado que es el tipo de junta más usado en un recipiente horizontal según el código ASME sección VIII div 1 (ASME, seccion VIII Division 1. Rules for Construction of Pressure Vessels, 2017).

4.2.6.1.1. Juntas a tope

Una junta a tope es la conexión entre los bordes de dos miembros o piezas por medio de una soldadura de penetración completa. Para la aplicación de la soldadura se realiza una ranura que puede ser por una cara o en doble cara, donde la soldadura es colocada en una sola cara para que se extienda completamente en las ranuras, en algunos casos se utiliza el proceso de biselado.

Figura 5. Formas de juntas a tope (Flores, 2015)



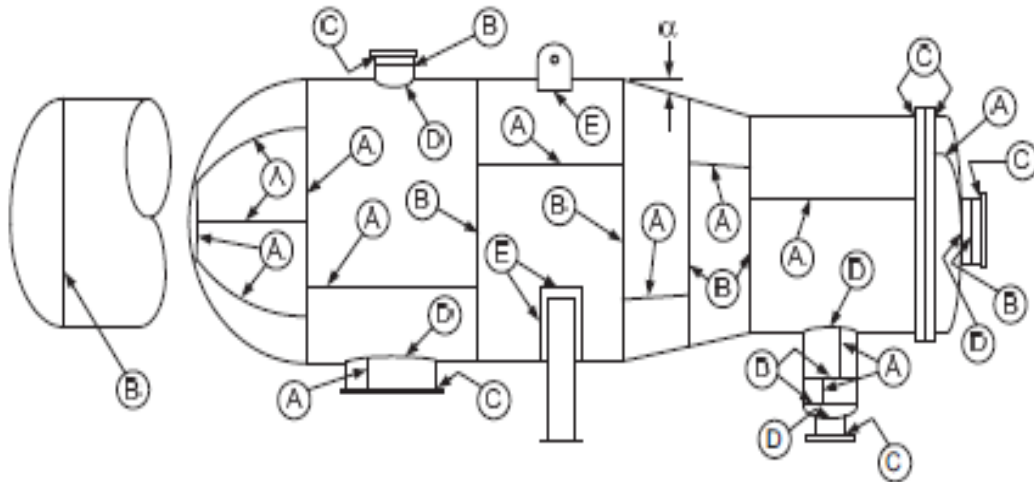
Para la selección de la junta soldada con base al código ASME sección VIII div 1, se usa la Tabla UW-12 (**véase en Apendice D**), donde se encuentra 8 tipos de soldaduras con las

eficiencias apropiadas para usar cuando se aplican diferentes niveles de radiografía (Laurence, 2012).

4.2.6.1.2. Ubicación de la junta soldada

Al momento de analizar una junta soldada en un recipiente a presión horizontal, se debe de conocer los diferentes tipos de juntas y su ubicación, según el código ASME sección VIII div 1, menciona que la ubicación de las uniones de soldaduras se clasificación en cuatro (4) categorías: A, B, C y D según la sección UW-3 de este código. En la (Figura 6) se puede visualizar la ubicación de las cuatro categorías en un recipiente a presión (**véase en Apéndice E**). Para la simulación se utilizará la junta de **categoría A**.

Figura 6. Ubicación de categorías de juntas en recipiente a presión (Yuliana.R, 2005)



4.2.6.1.3. Categoría A

Las uniones de soldadura en esta categoría deben ser de Tipo 1 (unión a tope) y se clasifican en tres (3) tipos principales que son juntas longitudinales, juntas soldadas y articulaciones circunferenciales.

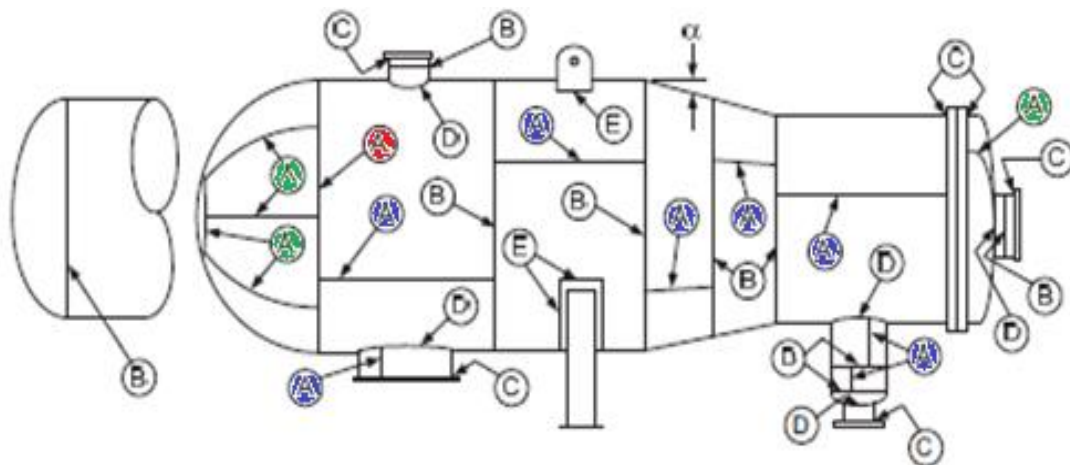
- **Juntas longitudinales:** se encuentran ubicadas en la carcasa principal, dentro de la cámara de comunicación de la celda principal cambiando el diámetro y las boquillas.

- **Juntas soldadas:** se ubican en las placas de cabezal planas o dentro de las placas laterales de un recipiente de lados planos, dentro de la cabeza de espuma de lanzas.
- **Articulaciones circunferenciales:** en uniones de soldadura circunferenciales que conectan los cabezales semiesféricos a la carcasa principal, en transiciones de diámetros con las boquillas o con las cámaras comunicantes.

Figura 7. Categoría A (longitudinal “azul”, soldada “verde”, circunferenciales “rojo”

(Yuliana.R,

2005)



4.2.7. Proceso de soldadura en juntas a tope

4.2.7.1. Posiciones para soldadura en ranura

Al momento de realizar el proceso de soldadura se deben tener en cuenta la posición con la que se aplica el material a adherir en la ranura, estas precisiones se clasifican en dos categorías según el código ASME sección IX parte QW-460 Y QW-461 (ASME, Section IX, Welding and Brizing Qualifications, 2017) :

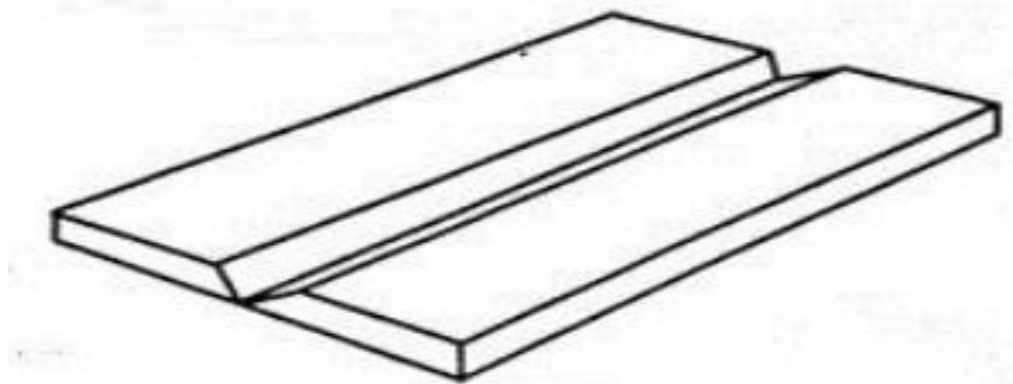
- **Posición en placa:** Posición plana (1G), posición horizontal (2G), Posición vertical (3G), Posición sobrecabeza (4G) (Véase en Apéndice F).

- **Posición en tubo: Posición plana (1G), posición horizontal (2G), Posiciones múltiples (5G), Posiciones múltiples (6G) (Véase en Apendice F).**

4.2.7.2. Posición Plana (1G)

Es la posición que corresponde cuando la pieza está en una superficie plana, mientras el material adicional es colocado directamente en dicha pieza en el mismo sentido y dirección de la ranura. Véase en la (Figura 8).

Figura 8. Posición 1G (AWS, 2000)



4.2.7.3. Principales técnicas de soldadura según su tipología

En la actualidad en la industria se manejan diferentes tipos de técnicas de aplicación de soldadura, pero entre las más usadas tenemos las siguientes tres (3) técnicas: soldadura por arco metálico protegido SMAW, soldadura por arco metálico con gas GMAW Y soldadura por arco con gas tungsteno GTAW (véase en Apendice G).

4.2.8. Soldadura GMAW

El proceso de soldadura por arco metálico con gas, identificado por la AWS como GMAW (Gas Metal Arc Welding), consiste en establecer un arco eléctrico entre una varilla o alambre largo que esta alimentado de manera continua y una pieza para soldar. Para realizar este proceso es necesario de un gas que se encargue de proteger la zona soldada principalmente del aire, que es el causante del proceso de oxidación. En la actualidad hay dos tipos de gas, el gas

inerte y el gas activo, que según la AWS son identificados con las siglas MIG (Metal Inert Gas) Y MAG (Metal Active Gas) respectivamente.

En la soldadura MIG se utilizan los gases inertes como el Argón (Ar) o Helio (He), se emplea en la unión de piezas de espesor delgado de aluminio, cobre, magnesio, inoxidable y titanio. Y en la soldadura MAG se utilizan los gases activos como es el dióxido de carbono (CO₂), por el contrario de la soldadura MIG, en esta se emplea para unir piezas de acero, hierro al carbono, bajo carbono de todo tamaño de espesores.

El realizar el proceso de soldadura por GMAW se deben de conocer algunas limitaciones y las ventajas al realizarlo, las cuales son:

Ventajas:

- Velocidades de soldadura mayores a SMAW y GTAW.
- Mayor tasa de deposición horaria
- Se requiere mínima limpieza luego de soldar
- Puede utilizarse para soldar cualquier metal ferroso y no ferroso.
- Se pueden realizar soldaduras de grandes longitudes sin que tengan empalmes entre los cordones, evitando imperfecciones.

Limitaciones:

- El equipo para GMAW es más complejo, más costoso y menos portable que SMAW.
- El arco debe ser protegido de las corrientes de aire, por lo que su aplicación al aire libre es limitada.

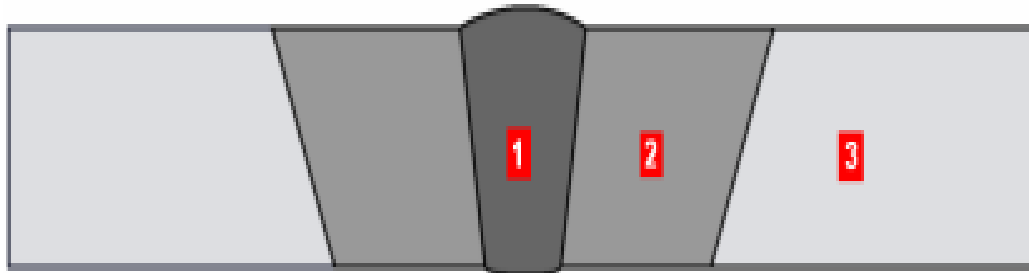
(ESAB, Proceso de Soldadura - GMAW, 2017)

4.2.9. Zona afectada por el calor

Para este estudio la zona afectada térmicamente (ZAC) es la zona donde se presenta un mayor interés a la hora de realizar el estudio de fatiga, debido a que experimenta altas temperaturas que originan cambios Microestructurales en el material base durante la solidificación de la soldadura. Una vez la junta es sometida al proceso de soldadura se pueden distinguir tres zonas:

- A. La zona fundida o el cordón de soldadura (1).
- B. La zona afectada térmicamente (ZAT) (2).
- C. La zona no afectada (3).

Figura 9. Junta después del proceso de soldadura (Yuliana.R, 2005)



Metal base: Es el metal de la junta no afectado por el proceso de soldadura, cuya composición química y estructura corresponden completamente a las propias del metal a soldar.

Metal del cordón de soldadura: Es el metal fundido por la operación de soldadura y cuya composición química y estructura corresponden a las proporcionadas por la fusión del metal de aporte y del metal base.

Zona afectada térmicamente: Es la zona del metal base que ha permanecido expuesto durante cierto tiempo a un intervalo de temperaturas en el que se pueden producir cambios en la microestructura.

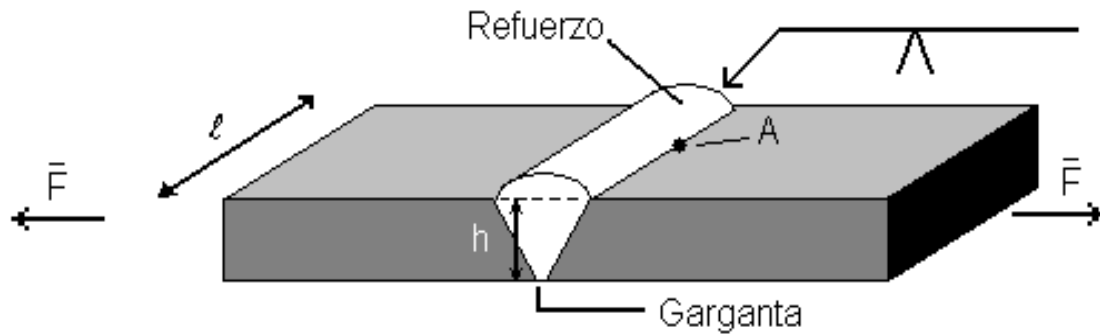
Dado que la zona afectada térmicamente sufre un cambio en su microestructura, es importante identificar la estructura **metalográfica** en una junta soldada. Verse en anexo 12.

4.2.10. Esfuerzos

4.2.10.1 Esfuerzo normal en junta soldada a tope

Para el cálculo de la tensión normal se deben tener en cuenta la presión, la altura de la garganta y la longitud del cordón.

Figura 10. Ecuación de esfuerzo normal (*Fatigue Failure Resulting From Variable Loading*, 1992)



l = Long. del cordón

h = altura de la garganta

$$\sigma = \frac{p}{h \cdot L}$$

Donde h no incluye el espesor del refuerzo. Este refuerzo sirve para compensar las grietas o huecos de la junta. Para que la soldadura resista mejor a la fatiga, en la práctica lo que se hace es esmerilar (amolar) el refuerzo pues en el punto A se origina concentración de tensiones.

4.2.10.2. Esfuerzos en recipiente de pared delgada sometido a una presión interna

Para que un recipiente a presión sea de pared delgada debe cumplir con los siguientes requisitos:

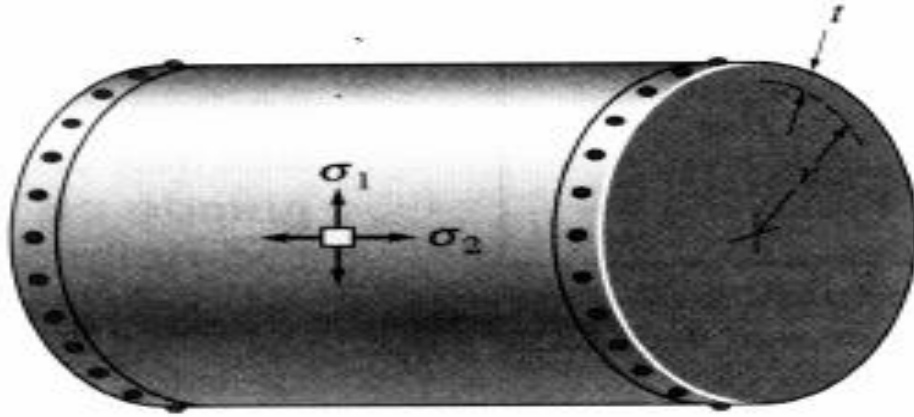
- Las secciones planas permanecen planas
- $\frac{r}{t} \geq 10$ siendo t uniforme y constante
- El material es lineal – elástico, isotrópico y homogéneo.
- El peso del fluido se considera despreciable

Teniendo en cuenta lo anterior, cuando $\frac{r}{t} = 10$, los resultados de un estudio en una pared delgada predicen un esfuerzo que es casi 4% menor que el esfuerzo máximo real en el recipiente. Para razones $\frac{r}{t}$ mayores, este error será aún menor.

En los recipientes a presión de pared delgada la distribución de esfuerzos a través de su espesor (t), no varía de manera significativa y por lo tanto en el análisis del estado de esfuerzo en recipientes a presión de pared delgada cilíndricos se pueden suponer uniformes o constantes. (MEJIA.A, 2008, pág. 25)

Considere que el recipiente cilíndrico tiene un espesor de pared t y un radio interior r como se muestra en la (Figura 11).

Figura 11. Recipiente cilíndrico sometido a esfuerzo trasversal σ_θ y Longitudinal σ_L (MEJIA.A, 2008)



Debido a la uniformidad de estas cargas originadas por la presión, un elemento del recipiente suficientemente alejado del extremo y orientado, se somete a los esfuerzos normales σ_θ en la **dirección anular o circunferencial** y σ_L en la **dirección longitudinal o axial**.

(MEJIA.A, 2008)

Estas dos componentes de esfuerzo ejercen tensión sobre el recipiente. Para determinar la magnitud de cada una de esas componentes en términos de la geometría del recipiente, la presión interna y la eficiencia de la soldadura, se utiliza las ecuaciones estipuladas por la norma ASME sección VIII.

$$\sigma_\theta = \frac{PD}{E \cdot (D_0 - D)}$$

$$\sigma_L = \frac{PD^2}{E \cdot (D_0^2 - D^2)}$$

En donde:

σ_θ, σ_L = esfuerzo circunferencial y longitudinal, respectivamente.

P = presión manométrica interna desarrollada por el gas o fluido contenido.

D = diámetro interno del cilindro.

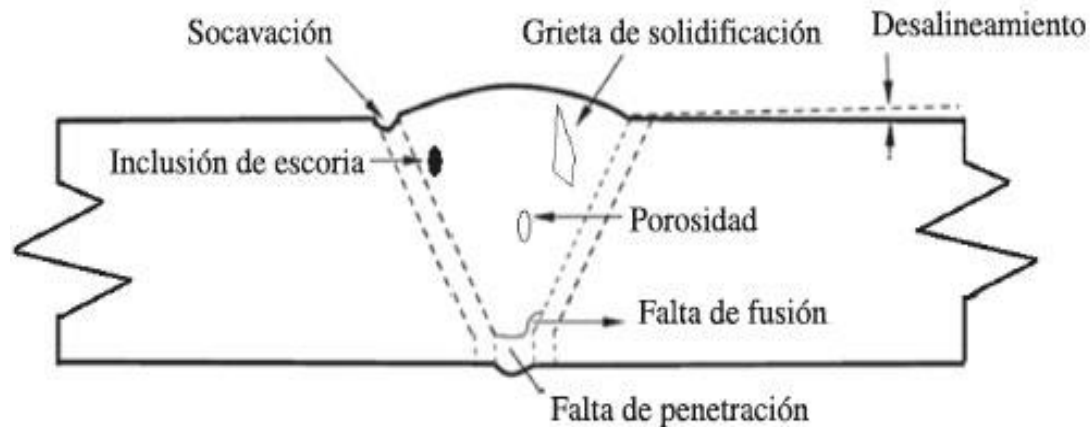
D_0 = diámetro externo del cilindro.

E = eficiencia de la junta soldada.

4.2.10.3 Concentradores de esfuerzos

Los concentradores de esfuerzos generalmente se pueden presentar donde hay cambios súbitos en la sección transversal del elemento, ya que en esas zonas la distribución de los esfuerzos tendrá altos gradientes en puntos específicos, ya que cuando la sección transversal es constante el flujo de esfuerzos es uniforme, pero donde hay cambios en esta sección transversal, el flujo de esfuerzos se vuelve irregular, volviendo este punto más propenso, en este caso se pueden presentar por un mal proceso de soldadura. En la (Figura 12) se observan los defectos debido a un mal proceso de soldadura.

Figura 12. Defectos en la soldadura (Shirley.J.E. Mischke.C.R., 2011)

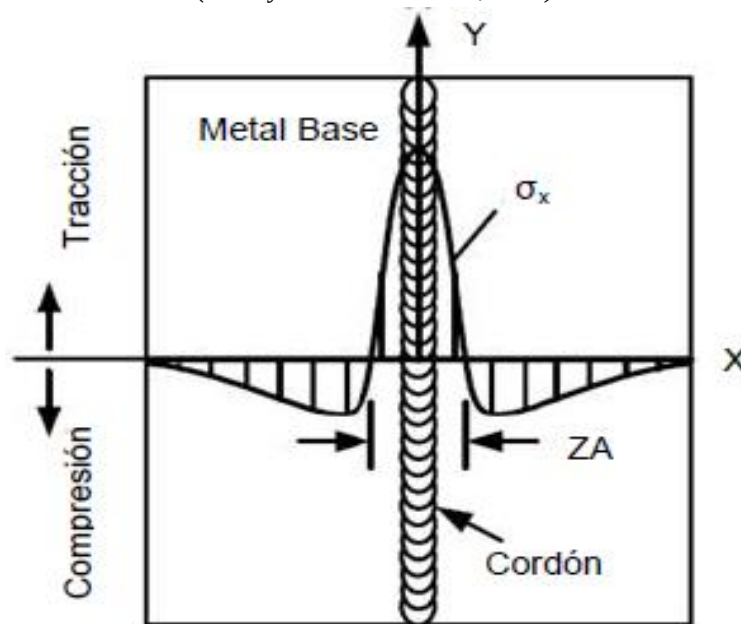


4.2.10.4. Esfuerzos residuales

Estos esfuerzos se pueden producir cuando en la pieza de trabajo se producen deformaciones no uniformes a lo largo de ella, causadas por procesos de fabricación o condiciones de servicio. Estos son esfuerzos que permanecen en el material en ausencia de cargas externas. Siempre que se realice la unión de dos piezas mediante soldadura, el cordón de

soldadura y una zona contigua están sometidos a esfuerzos de tracción longitudinal de un valor elevado, estando a esfuerzos de compresión el resto de la pieza según se presenta en la (Figura 13). Los esfuerzos, especialmente los esfuerzos de tracción; favorecen la aparición de discontinuidades y la generación de fisuras.

Figura 13. Esfuerzos residuales (Shirley.J.E. Mischke.C.R., 2011)



Los esfuerzos residuales pueden ser benéficos o perjudiciales dependiendo la magnitud, sentido y distribución de estos. La falla por fatiga es producto de los esfuerzos a tensión, por lo que esfuerzos residuales a compresión resultan benéficos para piezas sujetas a esfuerzos oscilantes que puedan inducir al fallo por fatiga (Norton, 2011), sin embargo, los procesos de manufactura mencionados anteriormente tienden a inducir esfuerzos residuales a tensión, lo que conlleva a que esto sea un factor predominante que favorece a la fatiga de lo cual existen muchos casos documentados.

4.2.11. Generalidades Del Código ASME (American Society of Mechanical Engineers)

Es una asociación de ingenieros que ha generado unas normas para el diseño, construcción, inspección y prueba para equipos, como lo son las calderas y los recipientes a presión.

4.2.11.1. Código ASME para calderas y recipientes de presión

I - Reglas para la construcción de calderas de potencia.

II - Materiales.

III - Reglas para la construcción de componentes de plantas nucleares.

IV - Normas para la construcción de calderas de calefacción.

V - Ensayos no destructivos.

VI - Recomendaciones para el cuidado y la operación de calderas de calefacción.

VII - Lineamientos para el cuidado de calderas de potencia.

VIII - Reglas para la construcción de recipientes de presión.

- División 1 -Reglas básicas.
- División 2 -Reglas alternativas.
- División 3-Reglas alternativas para recipientes de muy alta presión.

IX - Calificaciones de procedimientos de soldadura. **X** - Recipientes de plástico reforzado con fibras.

XII - Reglas para la inspección en servicio de componentes de plantas nucleares.

XII - Reglas para la construcción y servicio continuado de recipientes para transporte.

4.2.11.2. Código ASME sección VIII división 1

La división 1 se divide en tres (3) subsecciones, como se muestran a continuación:

Tabla 1. Sucesiones de la división 1 (ASME, seccion VIII Division 1. Rules for Construction of Pressure Vessels, 2017)

DIVISION 1	
SUBSECCION A	REQUERIMIENTOS GENERALES
parte UG	Reciersos generales aplicados a todos los recipientes apresion
SUBSECCION B	REQUERIMIENTOS ESPECIALES APLICABLES A LOS VARIOS METODOS DE FABRICACION
parte UW	Metodos soldados
parte UF	Metodos forjados
parte UB	Metodos forjados en latón
SUBSECCION C	REQUERIMIENTOS ESPECIFICOS PARA VARIAS CLASES DE MATERIALES UTILIZADOS EN LA CONSTRUCCION DE RECIPIENTES A PRESION
parte UCS	Aceros al cabono de baja aleación
parte UNF	Metales no ferrosos
parte UHA	Acero de alta aleación
parte UCI	Hierro fundido
parte UCL	Placa integral o recubierta tipo "lining"
parte UCD	Hierro fundido ductíl
parte UNT	Acero ferritico con propiedades mejoradas por tratamiento térmico
parte ULW	Construcción de capas "layered"
parte ULT	Materiales a baja temperatura
parte UIG	Grafito impregnado

5. Desarrollo de proyecto

Para el desarrollo de esta simulación se tienen en cuenta las normas y pasos a seguir que ofrece el código ASME, con relación a las propiedades y características de una junta soldada. En este proyecto se va a tratar el comportamiento a la fatiga de una sección de una junta soldada de categoría A, tipo 1 (a tope - Longitudinal) según la ASME UW-12 de un recipiente a presión de tipo horizontal, fabricada con un acero estructural SA 516-70 como material base ya que es común mente usado en la fabricación de estos recipientes y como material de aporte un electrodo E6010 para la penetración Y E7018 para el acabado superficial.

Dadas las condiciones de trabajo se asumirá un cordón de soldadura ideal para así minimizar la presencia de concentradores de esfuerzos y esfuerzos residuales no deseados, de

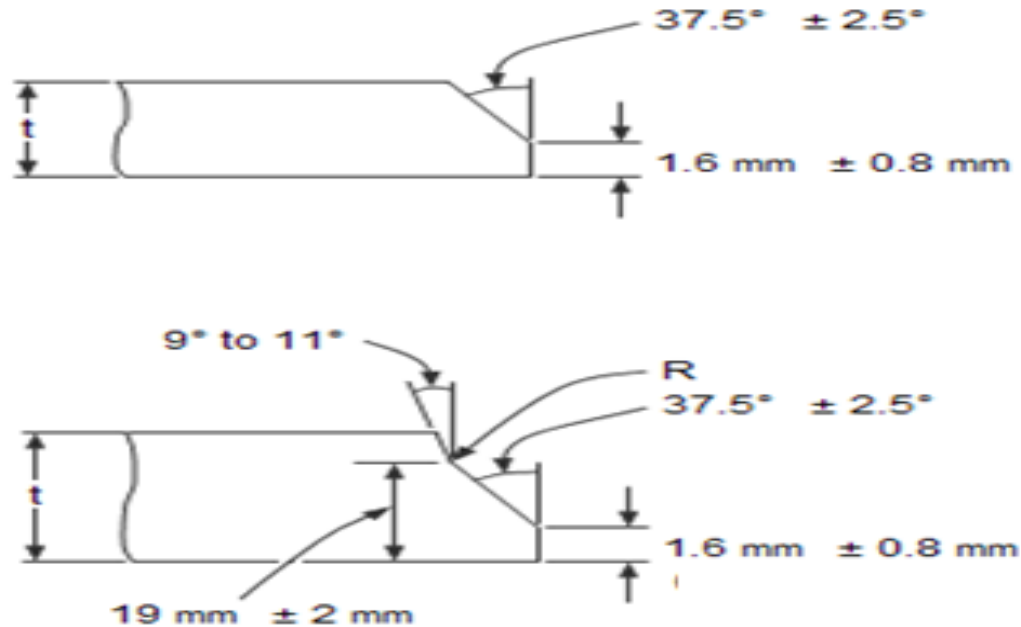
esta manera poder decir que la falla no va a ocurrir en el cordón de soldadura ya que las propiedades de este son controladas, este cordón será aplicado según la AWS con la técnica de aplicación GMAW con gas MIG y una posición plana (1G), dado que esta técnica de soldadura es de las más seguras y eficientes al momento de fabricar estos recipientes. También se tomará solo una sección del recipiente donde se encuentre la junta soldada de la categoría mencionada anteriormente. Además, para la simulación en ANSYS se tomará como una placa horizontal la sección del recipiente a analizar y de esta manera obtener resultados más precisos.

El análisis de la junta se realizará después de que el cordón sea aplicado correctamente. No se tendrán en cuenta las condiciones ambientales ni del lugar de operación, solo se tendrá en cuenta la temperatura ambiente y la única carga presente va a ser la presión interna a la cual será sometido el recipiente. La zona de la junta donde se espera que falle es la zona más cercana al cordón de soldadura conocida como ZAC (Zona afectada por el calor) dado que allí se presenta cambios en la microestructura del material base debido a la variación de temperatura causada por el proceso de soldadura, generando así esfuerzos residuales y concentradores de esfuerzos.

La junta soldada va a estar diseñada según las normas del código ASME sección VIII Div1, en la subsección UW -12, donde especifica que, si en el proceso de soldadura el material supera los 3/16" de espesor, los extremos de los elementos a soldar deben de estar achaflanados a aproximadamente $37.5^{\circ} \pm 2.5^{\circ}$, conocida comúnmente como bisel de soldadura. "Los dos tipos de biseles más utilizados son el "Bisel liso" a partir de espesores de pared (t) de 4 a 22,5 [mm], y el "Bisel compuesto" para espesores de pared superiores a 22 [mm]." (Yuliana.R, 2005). El procedimiento para realizar un bisel se presenta en la (Figura 14) . Para el estudio computacional se escogió trabajar con un ángulo de bisel de 37.5° , un talón de 1/8 [in] y una Raíz de 1/8 [in]

para una junta de un espesor de placa de $1/4$ in, una altura de $1/8$ [in], un ancho de $25/8$ [in], un largo de 6 [in] y una presión interna de 150 Psi.

Figura 14. Bisel y Soldadura a tope (ASME, Section IX, Welding and Brazing Qualifications, 2017)



5.1. Materiales

Las propiedades que se van a usar para el ensayo de fatiga son tomadas del código ASME (American Society of Mechanical Engineers) sección II parte D para el acero estructural SA516-70 y para el material de relleno E6010 y E7018 son escogidas del código AWS (American Welding Society) y del código ASME sección VIII.

5.1.1. Material Base

El acero estructural SA 516-70 “es un acero al carbono-manganeso, considerado como el material más popular para la fabricación de recipientes a presión, debido a su capacidad para resistir elevadas presiones a diferentes temperaturas, presenta buenos niveles de soldabilidad, resiliencia y alta resistencia a esfuerzo de tracción” (aceros, 2020).

Las propiedades de este acero se obtuvieron de la sección II parte D del código ASME, donde se encuentran las propiedades físicas de materiales ferrosos, no ferrosos, materiales de atornillado, entre otros. Con relación al acero *SA516-70* se encontró las propiedades de: esfuerzo último, resistencia a la fluencia, límite de fatiga, módulo de elasticidad de Young, relación de Poisson y densidad.

Al escoger los valores de las propiedades anteriores se debe tener en cuenta una temperatura máxima en la que se va a trabajar el material, la temperatura que se selecciona fue una temperatura no tan superior a la temperatura ambiente; la temperatura a la que se va a determinar las propiedades es de 40°C.

Antes de todo es importante conocer la composición química del material *SA516-70*, en la (Tabla 8), donde se mencionan la composición porcentual de carbono (C), manganeso (Mn), fósforo (P), azufre (S), silicio (Si). Véase en anexo 13.

5.1.1.1 Resistencia la tracción o esfuerzo último

La resistencia a la tracción o esfuerzo último se define como el esfuerzo de tracción mecánico máximo que permite un material antes de presentar una rotura; antes de alcanzar la resistencia a la tracción el material empieza a experimentar una deformación plástica hasta el punto de fallo. Para el acero estructuras *SA516-70* se obtiene el siguiente valor para un valor de temperatura de 40°C en la tabla U.

- Esfuerzo ultimo → 483MPa

Tabla 2. Valores de resistencia a la tracción para el acero SA516-70 (ASME, Section II Materials Apart D, 2017)

Table U (Cont'd)																
Tensile Strength Values S _u for Ferrous and Nonferrous Materials																
Line									Alloy		Class/Condition/		Size/		Min.	
No.	Nominal Composition	Product Form	Spec. No.	Type/Grade	Desig./UNS	No.	Temper	Thickmess, mm	Strength, MPa							
Ferrous Materials (Cont'd)																
1	Carbon steel	Plate	SA-515	70	K03101	...	...	...	485							
2	Carbon steel	Plate	SA-516	70	K02700	...	...	...	485							
3	Carbon steel	Wld. pipe	SA-671	CB70	K03101	...	...	...	485							
4	Carbon steel	Wld. pipe	SA-671	CC70	K02700	...	...	...	485							
5	Carbon steel	Wld. pipe	SA-672	B70	K03101	...	...	...	485							
6	Carbon steel	Wld. pipe	SA-672	C70	K02700	...	...	...	485							
Tensile Strength, MPa (Multiply by 1000 to Obtain kPa), for Metal Temperature, °C, Not Exceeding																
Line	No.	40	100	150	200	250	300	325	350	375	400	425	450	475	500	525
Ferrous Materials (Cont'd)																
1	483	483	483	483	483	483	483	483	483	476	446	411	372	332	296	
2	483	483	483	483	483	483	483	483	483	476	446	411	372	332	296	
3	483	483	483	483	483	483	483	483	483	476	446	411	372	332	296	
4	483	483	483	483	483	483	483	483	483	476	446	411	372	332	296	
5	483	483	483	483	483	483	483	483	483	476	446	411	372	332	296	
6	483	483	483	483	483	483	483	483	483	476	446	411	372	332	296	

5.1.1.2 Resistencia a la fluencia

La resistencia a la fluencia es el proceso en el cual evita que un material pase de su estado elástico o presenta una deformación permanente debido a esfuerzos que actúan sobre este. El valor que se encuentra del material SA516-70 en el código ASME están en la tabla Y1 son:

Resistencia a la fluencia $\rightarrow$ 262Mpa

Tabla 3. Valores de resistencia a la fluencia para el acero SA516-70 (ASME, Section II Materials Apart D, 2017)

Table Y-1 (Cont'd)										
Yield Strength Values S_y for Ferrous and Nonferrous Materials										
17	Carbon steel	Plate	SA-515	70	K03101	...				
18	Carbon steel	Plate	SA-516	70	K02700	...				
19	Carbon steel	Wld. pipe	SA-671	CB70	K03101	...				
20	Carbon steel	Wld. pipe	SA-671	CC70	K02700	...				
21	Carbon steel	Wld. pipe	SA-672	B70	K03101	...				
22	Carbon steel	Wld. pipe	SA-672	C70	K02700	...				
Yield Strength, MPa (Multiply by 1000 to Obtain kPa), for Metal Temperature, °C, Not Exceeding										
Line No.	40	65	100	125	150	175	200	225	250	275
17	262	246	239	235	232	228	225	221	216	210
18	262	246	239	235	232	228	225	221	216	210
19	262	246	239	235	232	228	225	221	216	210
20	262	246	239	235	232	228	225	221	216	210
21	262	246	239	235	232	228	225	221	216	210
22	262	246	239	235	232	228	225	221	216	210

5.1.1.3 Límite de fatiga

“El límite de fatiga (también llamado a veces límite de resistencia) es el nivel de estrés, por debajo del cual no ocurre falla por fatiga. Este límite existe solo para algunas aleaciones ferrosas (a base de hierro) y de titanio” (Handbook, 1993). Los valores que se encuentra del material SA516-70 en el código ASME están en la tabla 5A son:

Límite de fatiga → 175MPa

Tabla 4. Valores de límite de fatiga para el acero SA516-70 (ASME, Section II Materials Apart D, 2017)

Table 5A (Cont'd)																				
Section VIII, Division 2																				
Maximum Allowable Stress Values S for Ferrous Materials																				
Line		Nominal Composition		Product Form		Spec. No.		Type/Grade		Alloy		Class/		Size/		Group				
No.										Desig./	Condition/	Thickness,	P-No.	No.	Temper			mm	No.	
6		Carbon steel		Forgings		SA-541		1		K03506	...	...				1	2			
7		Carbon steel		Forgings		SA-541		1A		K03020	...	...				1	2			
8		Carbon steel		Forgings		SA-765		II		K03047	...	...				1	2			
9		Carbon steel		Plate		SA-515		70		K03101	...	...				1	2			
10		Carbon steel		Plate		SA-516		70		K02700	...	...				1	2			
Maximum Allowable Stress, MPa (Multiply by 1000 to Obtain kPa), for Metal Temperature, °C, Not Exceeding																				
Line		No.	40	65	100	125	150	175	200	225	250	275	300	325	350	375	400	425	450	475
6		165	156	151	148	146	144	142	139	136	133	129	125	122	118	101	83.8	66.8	50.3	
7		165	156	151	148	146	144	142	139	136	133	129	125	122	118	101	83.8	66.8	50.3	
8		165	156	151	148	146	144	142	139	136	133	129	125	122	118	101	83.8	66.8	50.3	
9		175	164	159	157	154	152	150	147	144	140	136	132	128	122	101	83.8	66.8	50.3	
10		175	164	159	157	154	152	150	147	144	140	136	132	128	122	101	83.8	66.8	50.3	

5.1.1.4. Módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad (E), también llamado módulo de Young es un parámetro característico de cada material que indica la relación existente entre los incrementos de tensión aplicados ($d\sigma$) y los incrementos de deformación longitudinal unitaria ($d\epsilon$) de la siguiente manera $E = \frac{d\sigma}{d\epsilon}$. Para el acero estructuras SA516-70 se obtiene el siguiente valor para un valor máximo de temperatura de 40°C en la tabla TM-1.

Módulo de elasticidad o de Young $\rightarrow 202 \times 10^3 \text{ MPa}$

Tabla 5. Valores de módulo de Young para el acero SA516-70 (ASME, Section II Materials Apart D, 2017)

Materials	Modulus of Elasticity <i>E</i> = Value Given × 10 ³ MPa, for Temperature, °C, of															
	-200	-125	-75	25	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650
Carbon steels with C ≤ 0.30%	216	212	209	202	198	195	192	189	185	179	171	162	151	137	...	...
Carbon steels with C > 0.30%	215	211	207	201	197	194	191	188	183	178	170	161	149	136	121	...
Ductile cast iron	...	...	169	161	155	151	147	142	138	134	...	...	...	...	...	...

5.1.1.5. Relación de Poisson y Densidad

La relación de Poisson es “una constante elástica que es una medida de la compresibilidad de un material perpendicular al esfuerzo aplicado, o la relación entre la deformación latitudinal y la deformación longitudinal” (Gavilanes.P, 2016). Mientras la densidad es una magnitud escalar que permite medir la cantidad de masa que hay en determinado volumen de una sustancia. Los valores de la relación de Poisson y de la densidad se encuentra en la tabla PRD de la sección II parte D del código ASME del 2017.

$$\text{Relación de Poisson} \rightarrow 0.3 \quad \text{Densidad} \rightarrow 7750 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

Tabla 6. Valores de relación de Poisson y densidad para el acero SA516-70 (ASME, Section II Materials Apart D, 2017)

Table PRD
Poisson's Ratio and Density of Materials

Material	Poisson's Ratio	Density, kg/m ³	Material	Poisson's Ratio	Density, kg/m ³
Ferrous Materials			Cast high alloy steels	0.30	7830
Carbon steels	0.30	7750	Nonferrous Materials		
Cast irons	0.29	7200	Aluminum Base		
Low alloy steels			Alclad 3003	0.33	2730
C-Mn steels	0.30	7750	Alclad 3004	0.33	2720
1/2Cr to 1 1/4Cr steels	0.30	7750	Alclad 6061	0.33	2700
1 3/4Cr to 3Cr steels	0.30	7750	A02040	0.33	2800
5Cr to 9Cr steels	0.30	7750	A03560	0.33	2680
Mn, Mn-Mo, and Si steels	0.30	7750	A24430	0.33	2700
Ni steels	0.30	7750	A91060	0.33	2705
PH stainless: S15500, S17400, S17700	0.31	7750	A91100	0.33	2710

5.1.1.6. Curva S-N para acero estructural

La curva S-N para el acero SA516-70 se realiza por medio de ecuaciones de Basquin, donde el comportamiento de dicha función es similar a la curva S-N del material entre los 10^3 a 10^6 ciclos que comúnmente se conoce en el ensayo a la fatiga como **vida temporal**.

$$S_f = a * N^b$$

Para determinar la ecuación de Basquin para el acero SA516-70, es necesario conocer el valor de las constantes a y b que están relacionadas con el esfuerzo y el número de ciclos en el que se presenta dicho esfuerzo; por ello, es necesario conocer el valor de la resistencia a la fluencia (S_y) y del valor del límite de fatiga (S_e), donde dichos valores corresponden a 262MPa y a 175MPa respectivamente. El valor de S_y se presenta cuando el material está en 10^3 ciclos y el valor de S_e cuando está en los 10^6 ciclos para la mayoría de los aceros.

$$262MPa = a * (10^3)^b$$

$$175MPa = a * (10^6)^b$$

Realizando un sistema de ecuaciones 2x2 se puede conocer los valores de a y b, que corresponden a:

$$a = 392,3$$

$$b = -0,05842$$

Reemplazando las constantes a y b en la ecuación original de Basquin, se obtiene la ecuación correspondiente para el acero estructural SA516-70:

$$S = 392,3 * N^{-0,05842}$$

5.1.2. Material del cordón de soldadura (acero 1045)

Para el proceso de uniones soldadas se escoge como material de adición el electrodo *E6010* para la penetración y el electrodo *E7018* para el acabo superficial, que proporcionan una alta resistencia al impacto y además son compatible con cualquier tipo de acero, la nomenclatura del electrodo según el código AWS en la sección A5.1 la cual se refiere a los electrodos revestidos para soldar aceros al carbono.

La nomenclatura según la sección A5.1 del código AWS es de la forma EXXYQ, donde:

E: Indica que el electrodo para soldadura es por arco eléctrico, el cual por definición es un conductor de la corriente eléctrica.

XX: Dos dígitos que designan la mínima resistencia a la tracción del metal de soldadura depositado, en ksi.

Y: Este dígito designa la posición o posiciones de soldadura en que puede trabajar el electrodo: 1→”todas”, 2→”plana y horizontal en filete” y 4→”todas y en vertical trabaja en progresión descendente”.

Q: Este dígito designa el tipo de revestimiento y el tipo de corriente y polaridad adecuado para el electrodo: (0 y 1)→”revestimiento celulósico”, (2, 3 y 4)→ “revestimiento rutílico”, (5, 6 y 8)→ “revestimiento básico (bajo hidrógeno)”.

Debido a que se va a utilizar dos tipos de electrodos como material de relleno en la junta, se decidió tomar un componente que tienen los dos electrodos, que corresponde al acero 1045. Con base a este acero se buscará las propiedades que tiene el cordón de soldadura.

Antes de todo es importante conocer la composición química del material del acero 1045 en la tabla 14, donde se mencionan la composición porcentual de carbono (C), manganeso (Mn), fósforo (P), azufre (S), silicio (Si). Véase en anexo 13.

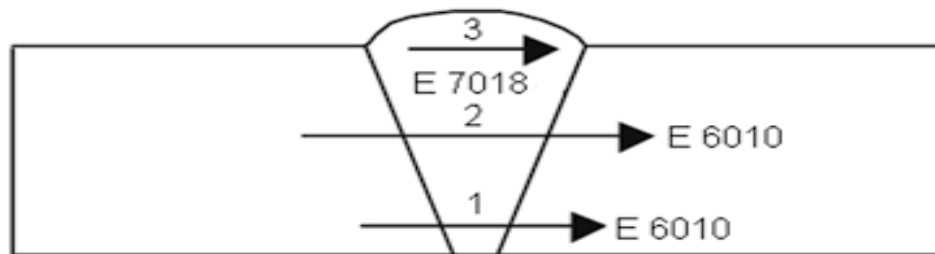
Las propiedades más relevantes del acero 1045 según la AWS son: la densidad, resistencia a la tracción, punto de fluencia, módulo de elasticidad, coeficiente de Poisson.

Tabla 7. Propiedades

Propiedades	Valor
Densidad	7.85 gr/cm^3
Resistencia a la tracción (S_{ut})	655 MPa
Límite de fluencia (S_y)	413 MPa
Modelo de elasticidad	$2 * 10^{11} \text{ Pa}$ ($24 * 10^6 \text{ psi}$)
Coeficiente de Poisson	0.3

5.1.2.1. Curva S-N para material de aporte

Figura 15. Material de aporte. (Reyes.D, 2017)



La curva S-N para la soldadura se realiza por medio de ecuaciones de Basquin, donde el comportamiento de dicha función es similar a la curva S-N del material entre los 10^3 a 10^6 ciclos que comúnmente se conoce en el ensayo a la fatiga como **vida temporal**.

$$S_f = a * N^b$$

Para determinar la ecuación de Basquin para los electrodos, es necesario conocer el valor de las constantes a y b que están relacionadas con el esfuerzo y el número de ciclos en el que se

presenta dicho esfuerzo; por ello, es necesario conocer el valor de la resistencia a la fluencia (S_y) y del valor del límite de fatiga (S_e).

Debido a que el valor del límite de fatiga no se encuentra en las propiedades mecánicas ya mencionadas de la soldadura, se utiliza una ecuación que aproxima el valor del límite de fatiga teórica del material (S_e) que se encuentra en el libro de *Mechanical Engineering Design* de Shigley's (Shirley.J.E. Mischke.C.R., 2011).

$$S_e = 0.5 * S_{ut}$$

$$S_e = 0.5 * 655 \text{ MPa}$$

$$S_e = 327,5 \text{ MPa}$$

donde dichos valores corresponden a 413MPa y a 327.5MPa respectivamente. El valor de S_y se presenta cuando el material está en 10^3 ciclos y el valor de S_e cuando está en los 10^6 ciclos para la mayoría de los aceros.

$$413 \text{ MPa} = a * (10^3)^b$$

$$327,5 \text{ MPa} = a * (10^6)^b$$

Realizando un sistema de ecuaciones 2x2 se puede conocer los valores de a y b, que corresponden a:

$$a = 520,8$$

$$b = -0,03358$$

Reemplazando las constantes a y b en la ecuación original de Basquin, se obtiene la ecuación correspondiente para la soldadura:

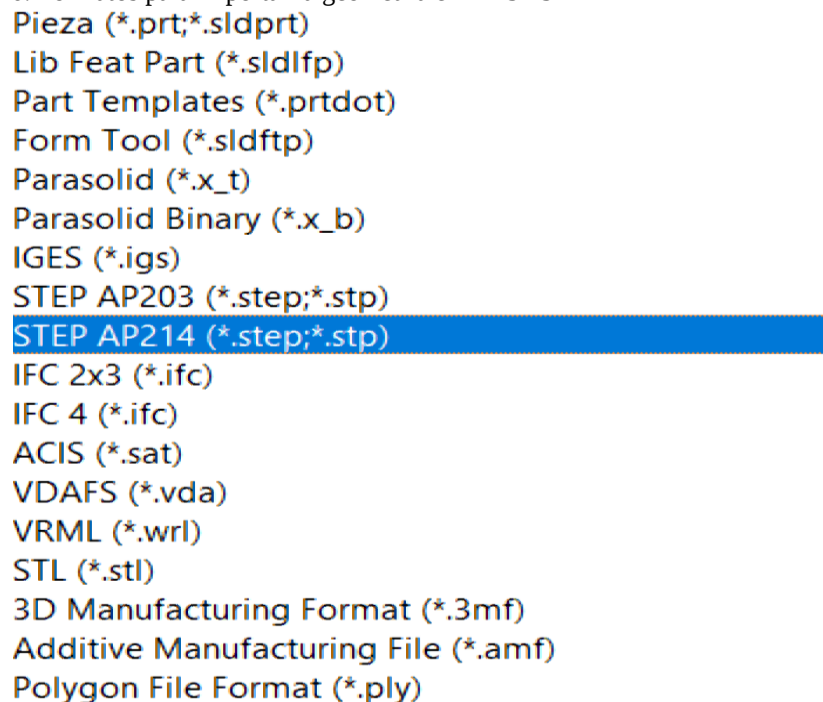
$$S = 520,8 * N^{-0,03358}$$

6. Simulación en ansys

6.1. Diseño de la junta

Antes de empezar a utilizar ANSYS, se realiza el diseño de la junta en un software CAD llamado SolidWorks. Al finalizar el diseño de la junta en SolidWorks, el archivo se guarda con el formato (*.step; *.stp; *.igs) como se muestra en la (Figura 16) para que ANSYS reconozca el archivo al momento de importar la geometría realizada. En este caso se escogió el formato **STEP AP214 (*.step; *.stp)**.

Figura 16. Formatos para importar la geometría en ANSYS



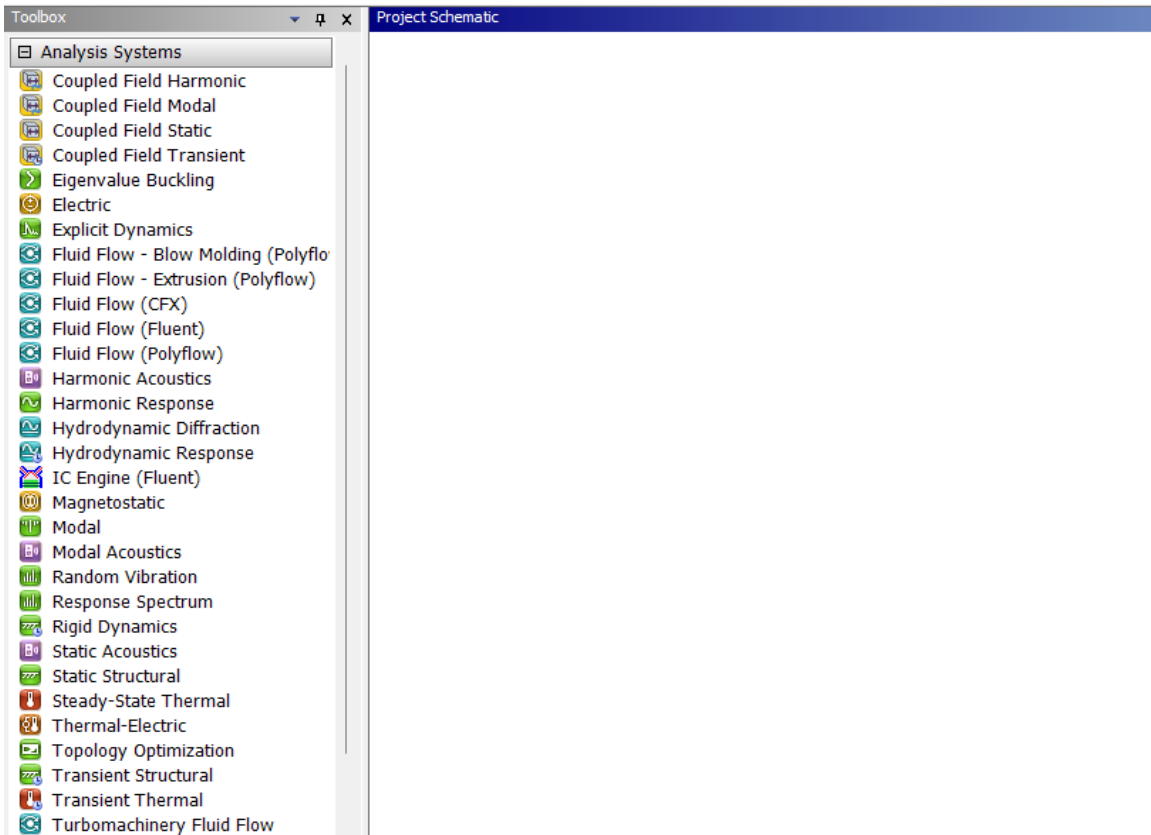
Pieza (*.prt;*.sldprt)
Lib Feat Part (*.sldlfp)
Part Templates (*.prtdot)
Form Tool (*.sldftp)
Parasolid (*.x_t)
Parasolid Binary (*.x_b)
IGES (*.igs)
STEP AP203 (*.step;*.stp)
STEP AP214 (*.step;*.stp)
IFC 2x3 (*.ifc)
IFC 4 (*.ifc)
ACIS (*.sat)
VDAFS (*.vda)
VRML (*.wrl)
STL (*.stl)
3D Manufacturing Format (*.3mf)
Additive Manufacturing File (*.amf)
Polygon File Format (*.ply)

6.2. Interfaz de ansys

En la (Figura 17) se evidencia la interfaz de ANSYS al momento de iniciar el programa, en esta pantalla de inicio se pueden observar varios tipos de análisis que ofrece el software, algunas de estos son: Fluid Flow, Hydrodynamic, Rigid Dynamics, Static Structural, Thermal Electric y Transient Structural o Thermal. Para este estudio se utilizó el análisis **Static**

Structural, debido a que el análisis se aplica a un objeto en estado estático que en este caso es la junta del recipiente.

Figura 17. Interfaz principal de ANSYS y sistema de análisis que se utilizó

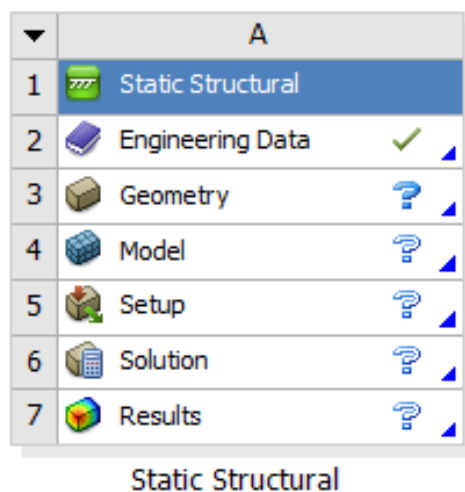


Al seleccionar el análisis **Static Structural** se despliega una ventana con las opciones de *Engineering Data, Geometry, Model, Setup, Solution, Results* en la pantalla Project Schematic.

6.2.1. Engineering Data

El primer paso para realizar el ensayo de fatiga es implementarle el material base de la junta soldada; los materiales elegidos están especificados en la sección 5.1 de este documento.

Figura 18. Ventana del análisis Stalic Structural / implementación de material en Engineering Data



Al seleccionar la opción Engineering Data se abre una nueva ventana donde se encuentran todos los materiales que vienen ya incluidos en la plataforma ANSYS, entre los materiales más usados encontramos el Structural Steel, Air-gas, Alumina, Plastic, entre otros. Como los materiales elegidos para el diseño del recipiente y la junta son materiales específicos como lo es el acero estructural **SA516-70** y los electrodos **ASW E6010**, **AWS E7018** para la soldadura. Es necesario ingresar dichos materiales a la librería ya predeterminada de ANSYS.

Para el ingreso de los materiales a la librería, se debe dar clic en el espacio en blanco de la (Figura 19). Luego se escribe el nombre del material a adicionar. Después de ingresar el nombre del material, va a aparecer un Toolbox con todas las propiedades que un material puede llevar; para el caso del ensayo de fatiga el material se debe tener por obligación las propiedades de: **Isotropic Elasticity**, **Tensile Yield Strength**, **Tensile Ultimate Strength** y **S-N curve**. En las propiedades de **Isotropic Elasticity** van incluidas el módulo de Young, razón de Poisson; para visualizar la curva S-N del material se debe ingresar los valores de la variación de ciclos y el esfuerzo que soporta para cada ciclo, dichos valores se ingresan en una tabla que está ubicada en la parte superior derecha de la ventana de materiales (Figura 20) y (Figura 22). Los valores que se toman para la curva S-N en el acero estructural están en la en la (Figura 21) y los valores

que se toman para la curva S-N del electrodo están en la (Figura 23). Estos son calculados con la función mencionada en la sección 4.2.5.2 de este documento.

Figura 19. Ventana donde se adiciona un material en la librería de Engineering Data

Outline of Schematic A2, C2, E2: Engineering Data			
	A	B	C
1	Contents of Engineering Data		Source
2	Material		
3	MATERIAL BASE (SA516-70)		C:\Users\USUARIO\Desktop\tesis ANSYS\esfuerzos circ
4	SOLDADURA (E6010 y E7018)		C:\Users\USUARIO\Desktop\tesis ANSYS\esfuerzos circ
5	Structural Steel		General_Materials.xml
*	Click here to add a new material		

Figura 20. Ventana de las propiedades del acero estructural SA 516-70 y la curva S-N en Engineering Data

Properties of Outline Row 3: MATERIAL BASE (SA516-70)				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	7750	kg m ⁻³	
4	Isotropic Elasticity			
5	Derive from	Young's Modulus and Poisson's R...		
6	Young's Modulus	2,02E+05	MPa	
7	Poisson's Ratio	0,3		
8	Bulk Modulus	1,6833E+11	Pa	
9	Shear Modulus	7,7692E+10	Pa	
10	S-N Curve	Tabular		
11	Interpolation	Log-Log		
12	Scale	1		
13	Offset	0	MPa	
14	Tensile Yield Strength	262	MPa	
15	Tensile Ultimate Strength	483	MPa	

Figura 21. Ventana de las propiedades del acero estructural SA 516-70 y curva S-N en Engineering Data

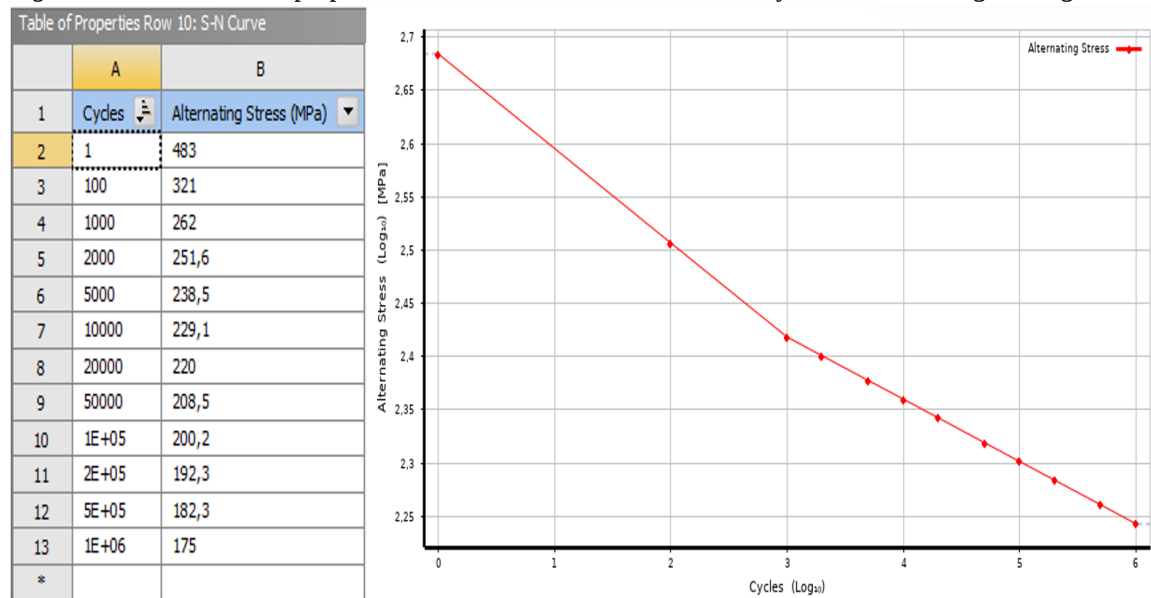
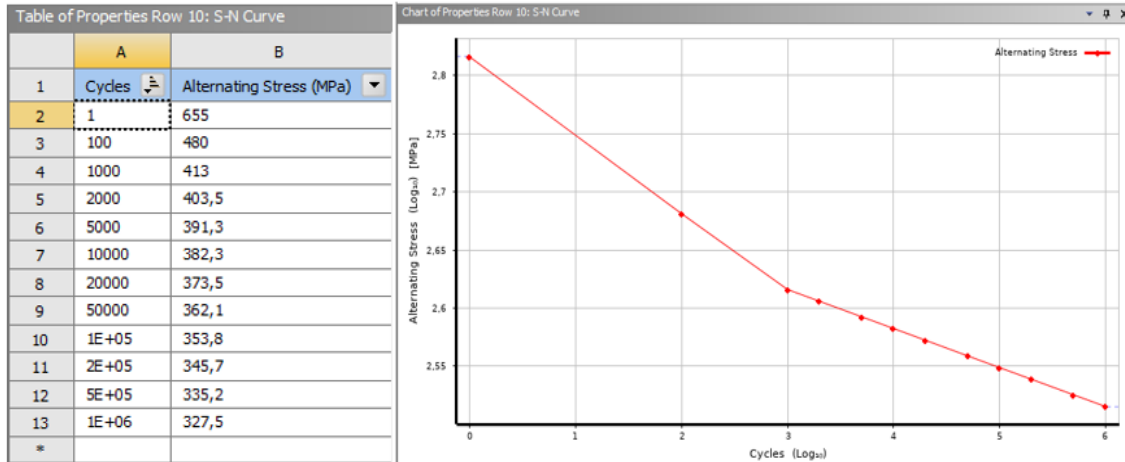


Figura 22. Ventana de las propiedades del electrodo AWS E7018, AWS E6010 y la curva S-N en Engineering Data

Properties of Outline Row 4: SOLDADURA (E6010 y E7018)

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Material Field Variables	Table			
3	Density	7,85	g cm ⁻³		
4	Isotropic Elasticity				
5	Derive from	Young's Modulus and Poisson's R...			
6	Young's Modulus	2E+11	Pa		
7	Poisson's Ratio	0,3			
8	Bulk Modulus	1,6667E+11	Pa		
9	Shear Modulus	7,6923E+10	Pa		
10	S-N Curve	Tabular			
11	Interpolation	Log-Log			
12	Scale	1			
13	Offset	0	MPa		
14	Tensile Yield Strength	413	MPa		
15	Tensile Ultimate Strength	655	MPa		

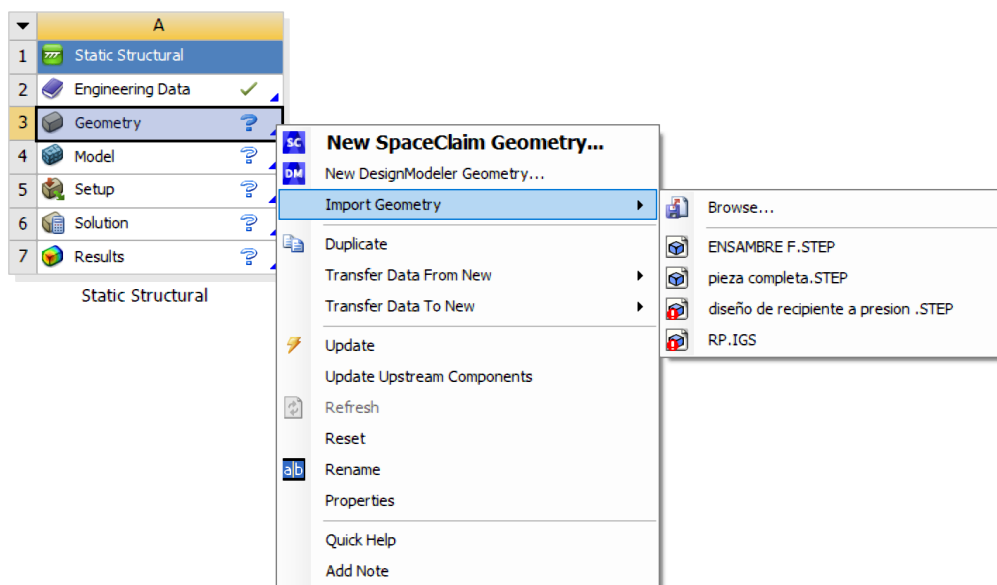
Figura 23. Ventana de las propiedades del electrodo AWS E7018, AWS E6010 y la curva S-N en Engineering Data



6.2.2. Geometry

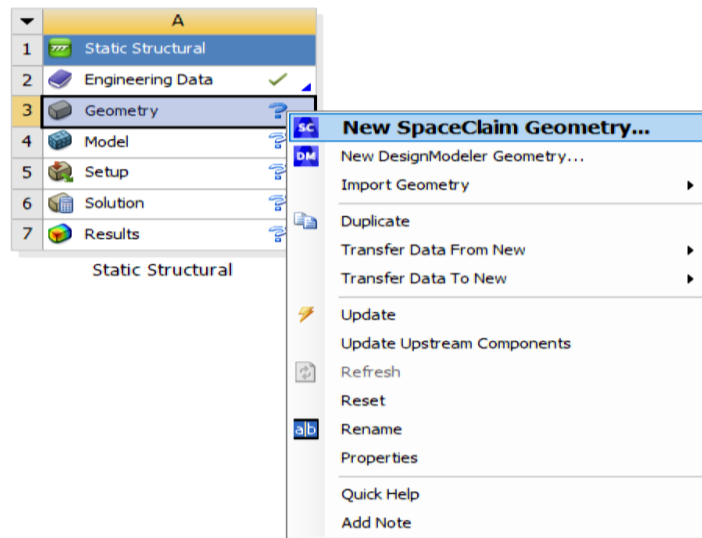
Después de incorporado el acero estructural y el electrodo a la librería de ANSYS se importa la geometría realizada previamente en SolidWorks en formato *. Step; para importar el archivo en ANSYS se da clic derecho en Geometry y se selecciona la tercera opción Import Geometry, se busca el archivo en Browse y se selecciona; como se muestra en la (Figura 24).

Figura 24. Ventana del análisis Stalic Structural / geometría importada



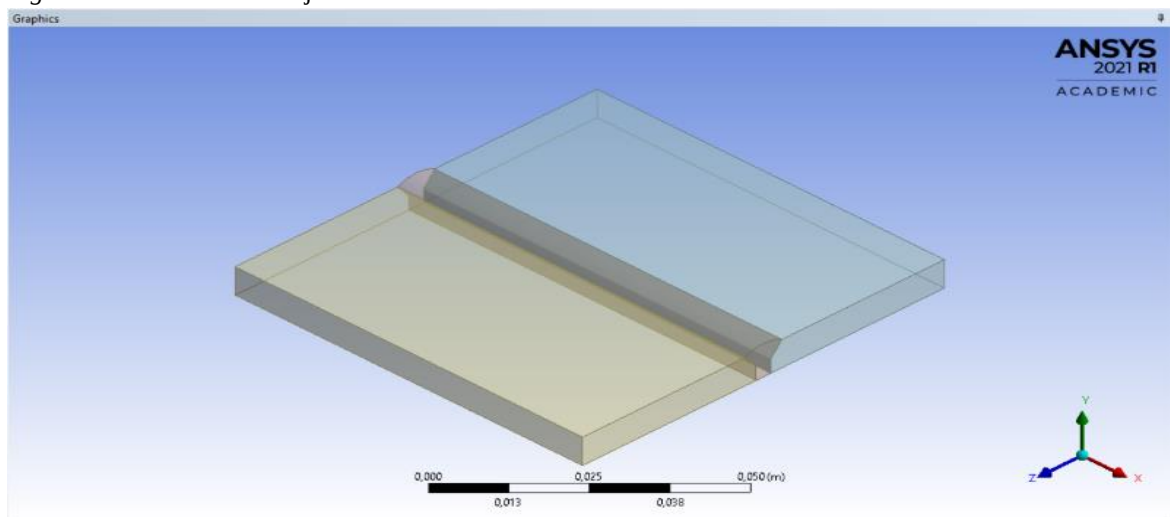
Para visualizar y editar la geometría en ANSYS es necesario dar clic derecho en Geometry y escoger cualquiera de los editores que incluye ANSYS, preferiblemente el editor *SpaceClaim* por ser el más moderno como se observa en la (Figura 25).

Figura 25. Ventana del análisis Stalic Structural / selección de editor de geometría



Una vez escogido el editor de preferencia podemos observar en la (Figura 26) la geometría de la junta a la cual se le realizara la simulación a fatiga.

Figura 26. Geometría de la junta



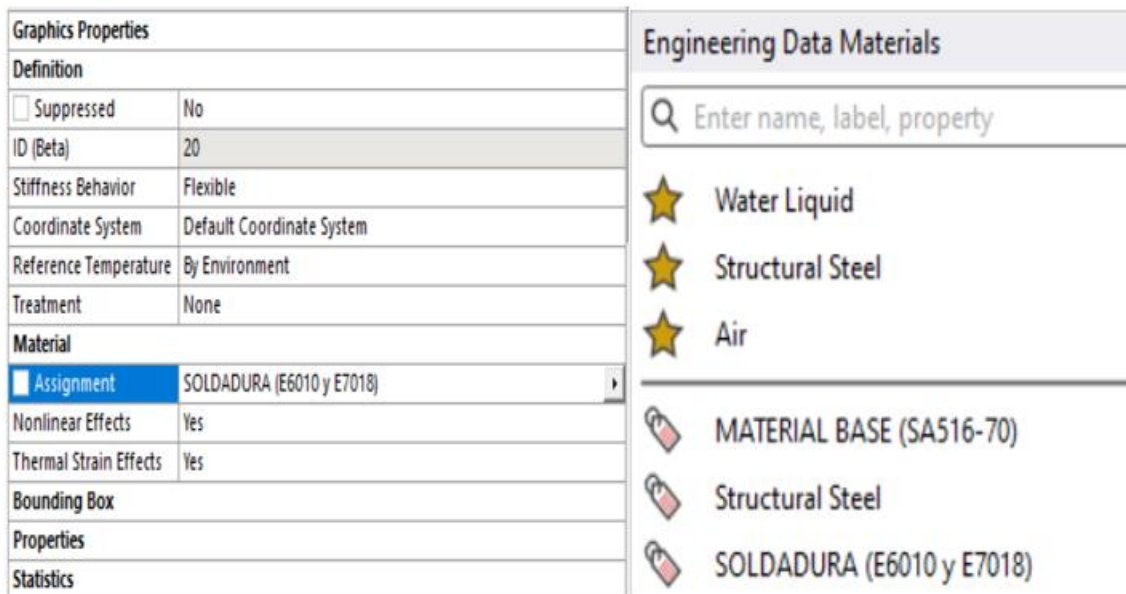
6.2.3. Model

Para ingresar a la función Model, se retorna a la ventana de Static Structural (Figura 25) y se da doble clic a Model para abrir la interfaz en una nueva ventana, en dicha ventana se selecciona en el lado izquierdo los componentes que estar predeterminados en aparecer que son: Geometry, Materials, Coordinate Systems, Connections, Mesh y Static Structural.

6.2.3.1. Geometry

En esta sección se muestran todos los sólidos que están presentes en la geometría ya incluida en el programa, es importante asignar el material correspondiente a cada sólido como es el acero estructural SA516-70 para la junta y el AWS E7018 y E6010 al cordón de soldadura, como se muestra en la (Figura 27).

Figura 27. Ventana del Model / asignación de material a los sólidos en la geometría



6.2.3.2. Materials

En esta sección se encuentra los materiales ingresados en la librería de ANSYS como lo son el SA516-70 Y AWS E7018, ASW E6010 con las propiedades que se asignaron a cada material como se muestre en la (Figura 28a y 28b).

Figura 28a. Ventana del Model / material SA516-70 usados para el análisis

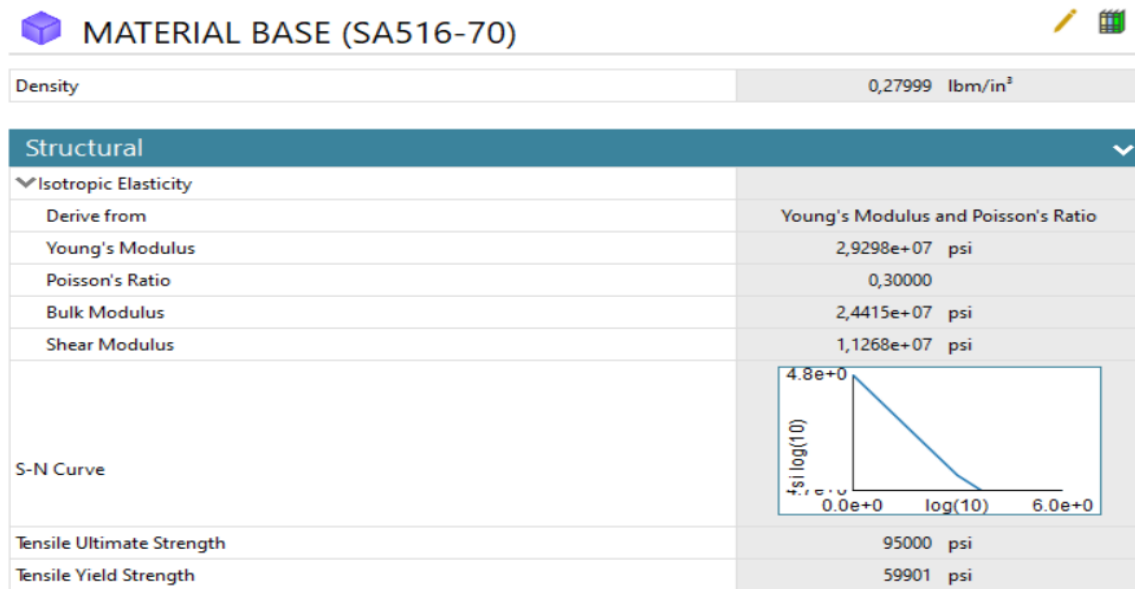
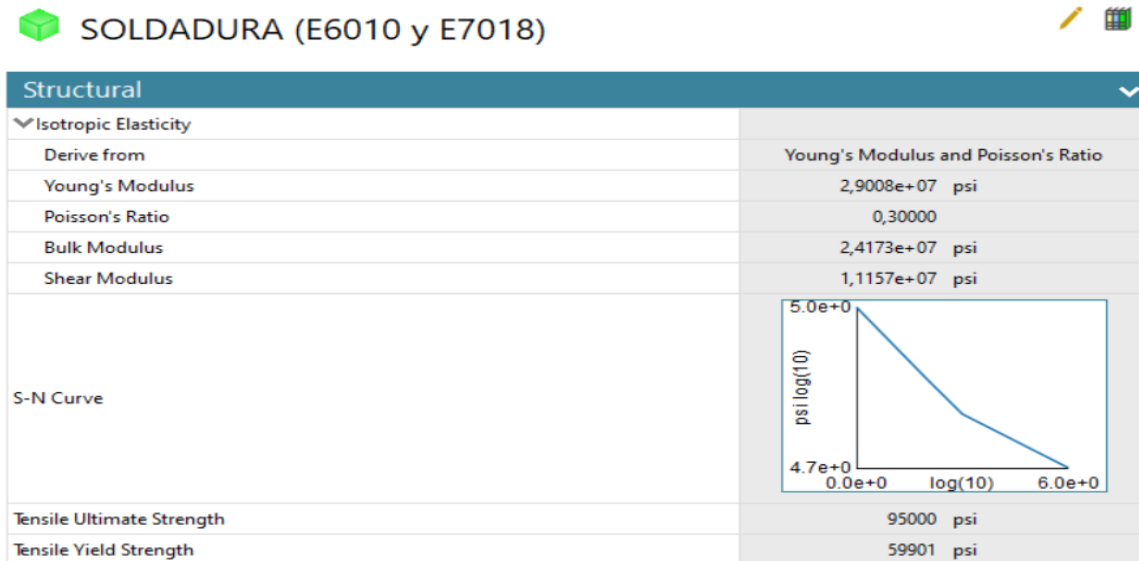


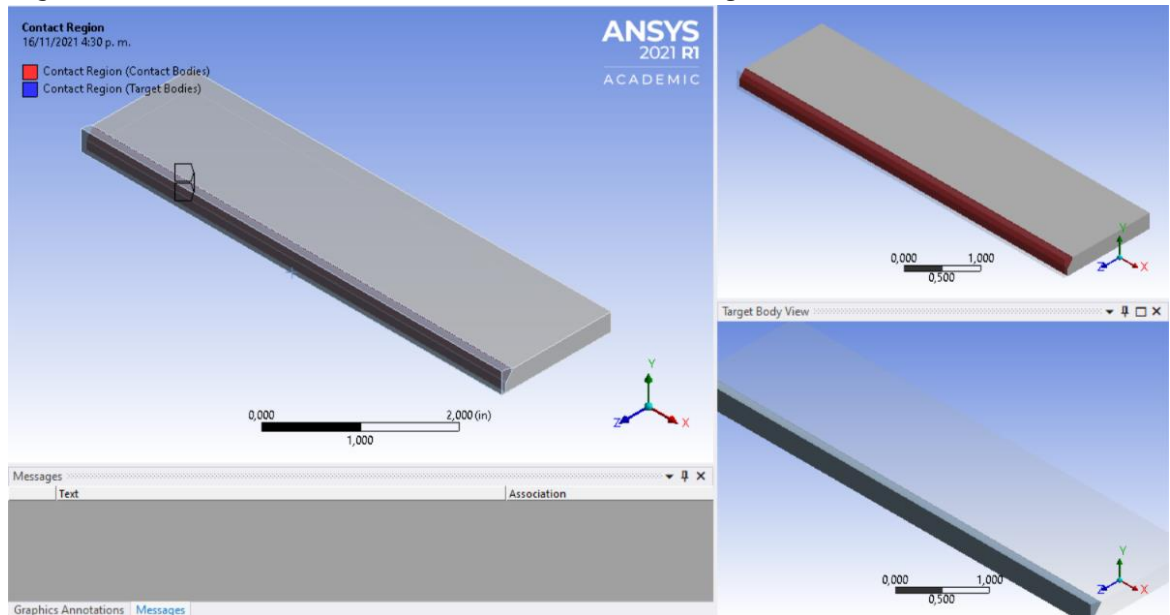
Figura 28b. Ventana del Model / material SA516-70 usados para el análisis



6.2.3.3. Connections

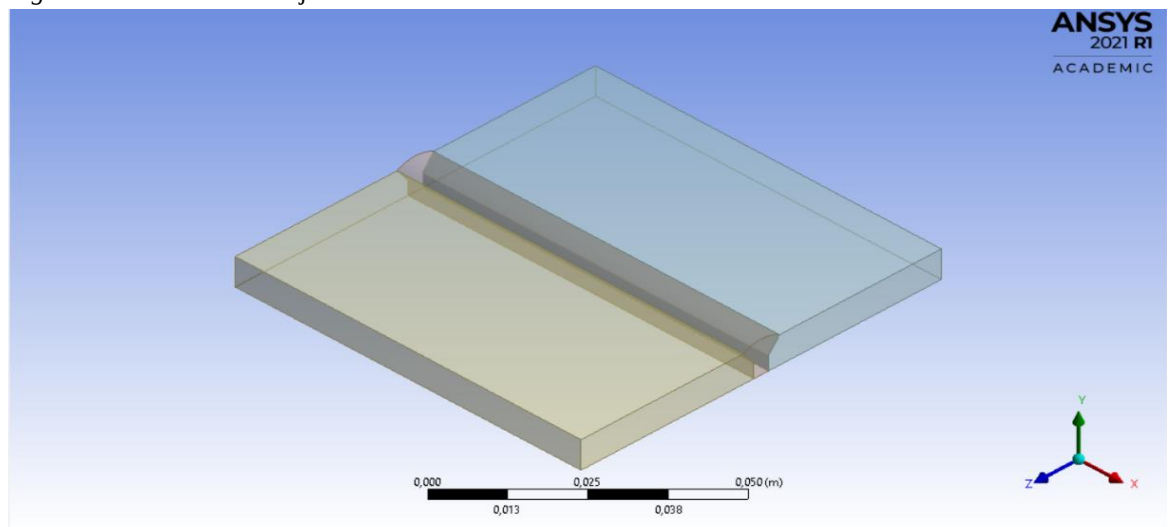
Se encuentran los puntos de conexión entre los sólidos presentes en la geometría como son en este caso el material base y el cordón de soldadura.

Figura 29. Ventana del Model / conexiones entre los sólidos en la geometría



Una vez escogido el editor de preferencia podemos observar en la (Figura 30) la geometría de la junta a la cual se le realizara la simulación a fatiga.

Figura30. Geometría de la junta

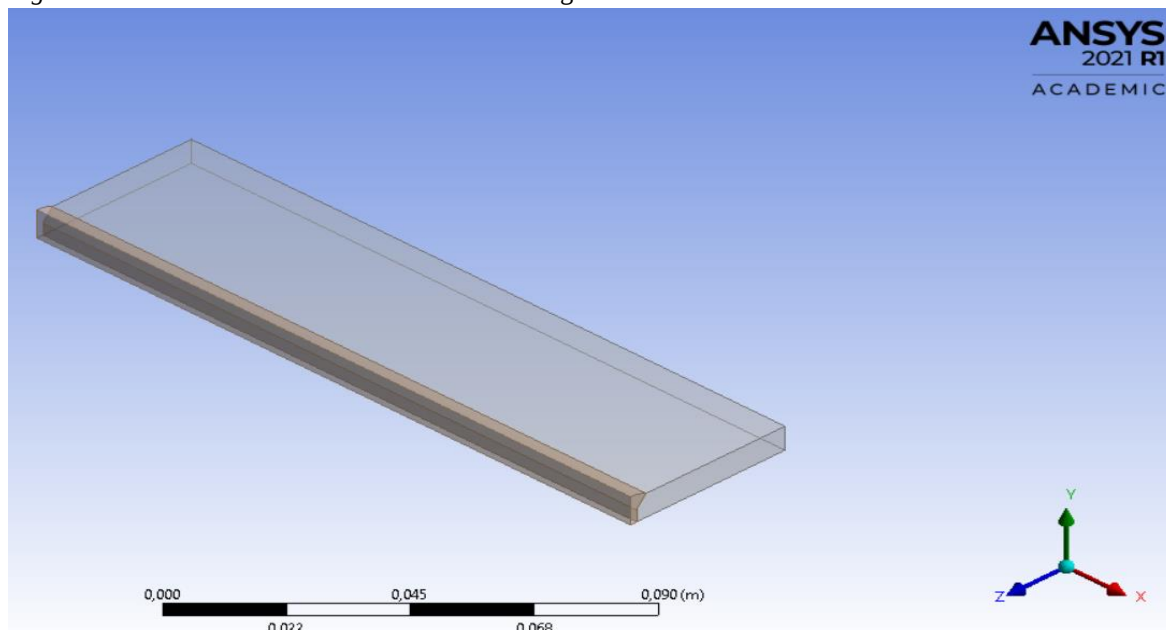


En esta simulación se van a analizar los esfuerzos presentes en la junta por aparte, para observar el proceso de fatiga más detalladamente. Donde se analizará primero el esfuerzo circunferencial y luego el longitudinal.

6.2.4 Geometry Circunferencial

En este análisis se tomará la geometría de una sección de la junta paralela al cordón de soldadura como se observa en la (Figura 31).

Figura 31. Stalic Structural / selección de editor de geometría circunferencial



6.2.4.1. Mesh

Para poder realizar cualquier ensayo en ANSYS es necesario tener en cuenta los tipos de mallado para dividir el sólido en pequeñas partes para tener un estudio puntual en cada parte del mallado. Hay que aclarar que el ANSYS WorkBench versión académica del 2021; permite generar un mallado de máximo 128 mil nodos y 512 mil celdas según la página oficial de ANSYS, por lo tanto, si el mallado que se le asigna al sólido es superior a alguno de los dos parámetros ya mencionados se va a generar un error por límites de licencia.

Para este ensayo se escoge un mallado **tetraédrico** debido a que la superficie es irregular por la zona de soldadura, por lo tanto, se le adición un *Method* como se muestra en la (Figura 34).

4.2.4.1.1 Análisis de Convergencia

En este estudio se generaron refinamientos de mallas de elementos finitos con el propósito de realizar un estudio de convergencia por Número de Ciclos versus Número de Elementos, estos datos se presentan en la (Tabla 8).

En la (Figura 32a) y (Figura 32b) se pueden observar como para cada modelo (actual) se calcularon las diferencias porcentuales de los resultados numéricos con respecto al modelo de referencia (anterior) y se asumió que la malla estaba en convergencia si dicha diferencia porcentual era menor al 2.5%.

Figura 32(a). Diagrama de convergencia (Circunferencial).

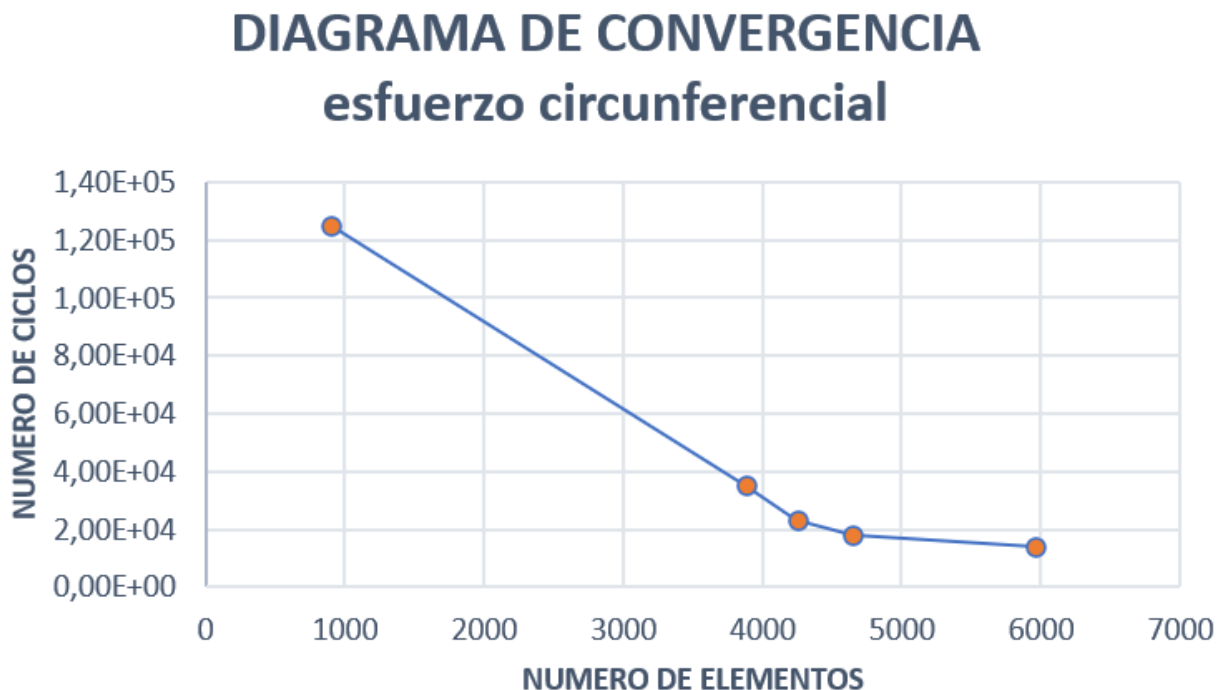


Figura 32(b). Diagrama de convergencia (Longitudinal).

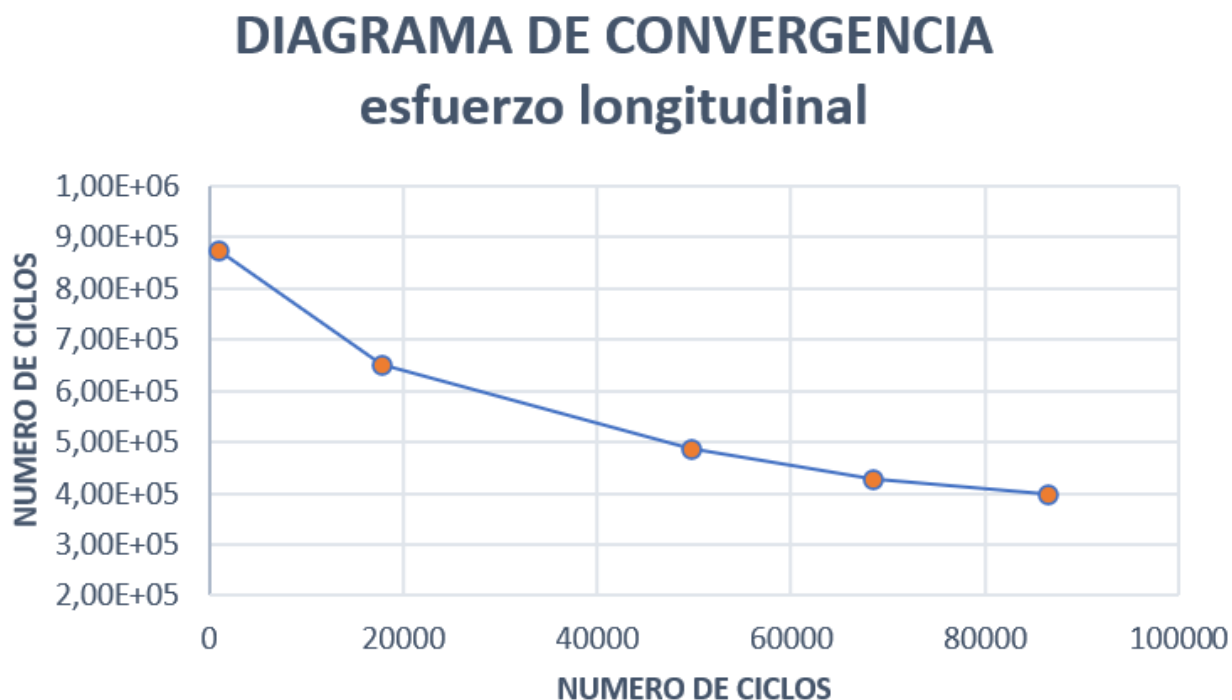


Tabla 8(a). Análisis de convergencia circunferencial.

Análisis de convergencia para la malla circunferencial				
	N° de elementos	N°de ciclos	$\sigma_{\text{max}}/\sigma_{\text{min}}$	Tamaño de elemento
1	898	1,25E+05	18806 / 135,5	0,2 in
2	3878	35190	26607 / 310,42	0,1 in
3	4248	23370	29748 / 255,4	0,095 in
4	4651	18307	34227 / 258,02	0,09 in
5	5962	14067	31973 / 366,03	0,08 in

Tabla 8(b). Análisis de convergencia longitudinal.

Análisis de convergencia para la malla longitudinal				
	N° de elementos	N°de ciclos	$\sigma_{\text{max}}/\sigma_{\text{min}}$	Tamaño de elemento
1	940	8,74E+05	5296,2 / 2857,1	0,2 in
2	17846	6,51E+05	12114 / 1915,8	0,05 in
3	49690	4,87E+05	20846 / 1698,4	0,03 in
4	68465	4,28E+05	26680 / 1663,2	0,025 in
5	86475	3,99E+05	29745 / 1621,4	0,02 in

Para determinar el número de elementos correcto para el análisis se va a usar el criterio de Soderberg que consiste en relacionar el esfuerzo medio, el esfuerzo alternante con el límite de fluencia. El cual consiste en determinar un valor mayor o igual a uno.

$$\frac{\sigma_m}{S_y} + \frac{\sigma_a}{S_e} \leq 1$$

$$\sigma_m = \left| \frac{\sigma_{min} + \sigma_{max}}{2} \right|$$

$$\sigma_a = \left| \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \right|$$

$$n_s = \frac{1}{\frac{\sigma_m}{S_y} + \frac{\sigma_a}{S_e}}$$

Como se observa en la (Figura 34) el mallado queda aceptable para realizar cualquier ensayo, además se puede verificar el número de Nodos (Nodes) y celdas (Elements) para así no sobrepasar el límite permitido por la licencia académica. En el ensayo correspondiente al esfuerzo circunferencial se trabajó con **4248 Elementos** de **0,095 (in) de Tamaño** y en el ensayo correspondiente al esfuerzo circunferencial se trabajó con **68465 Elementos** de **0.025 de Tamaño**.

Figura 33. Ventana del Model / mallado de la superficie

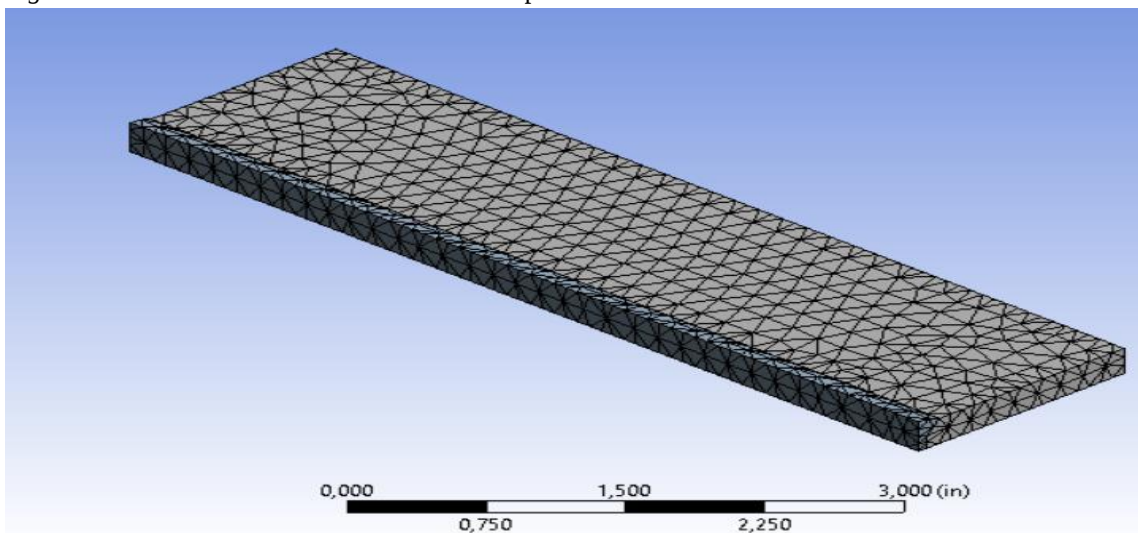
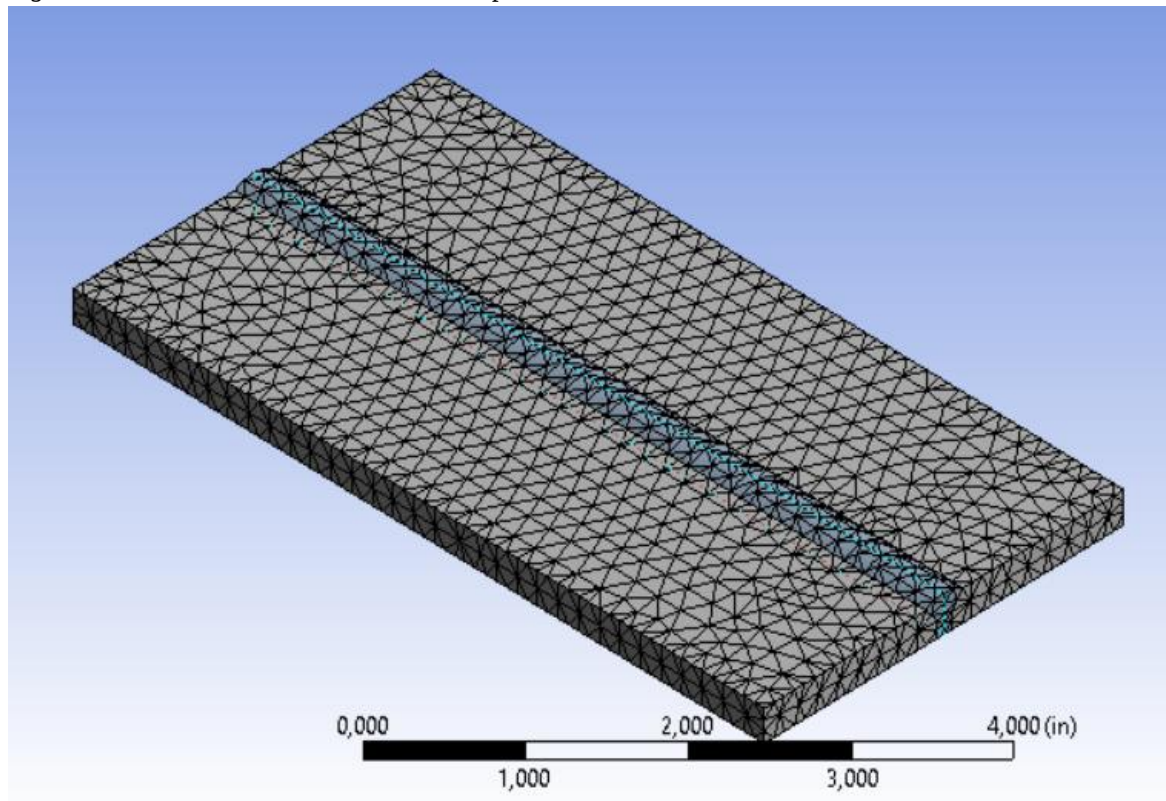


Figura 34. Ventana del Model / mallado completado



6.2.4.2. Static Structural

Esta es la sección más importante para el proceso de análisis en sólidos estáticos, se encuentra todo tipo de condiciones que se aplican a la geometría como son: la fuerza (Force), momento (Moment), presión (Pressure), peso propio (Inercial), soportes (Fixed, Frictionless, Displacements), entre otros.

Para este ensayo se aplica una fuerza de 26775 *Lbf* que corresponde a la ejercida por el esfuerzo circunferencial en el área paralela al cordón de soldadura en la sección de análisis de la junta soldadura. Para el cálculo del esfuerzo circunferencial se tomaron la ecuación del subcapítulo 4.2.10.2 de este documento.

$$\sigma_{\theta} = \frac{PD}{E.(D_0 - D)}$$

$$\sigma_{\theta} = \frac{150(Psi).59.5(in)}{1.(60(in) - 59.5(in))}$$

$$\sigma_{\theta} = 17850(Psi)$$

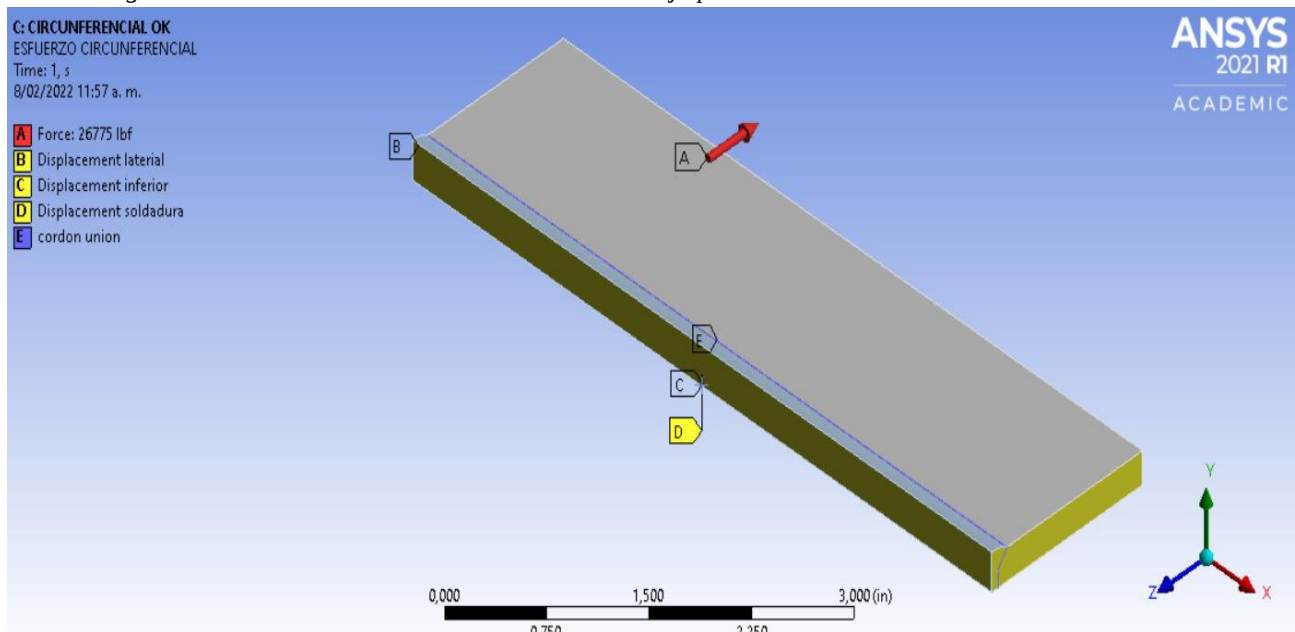
$$F = A.\sigma_{\theta}$$

$$A = 6(in) \cdot \frac{1}{4}(in) = 1.5(in)^2$$

$$F = 1.5(in)^2 \cdot 17850(Psi)$$

$$F = 26775(Lbf)$$

Figura 35. Ventana del Model / condiciones de trabajo para el análisis



En el proceso de visualización de resultados se generó la función *Symmetry*, que ayuda a simular la junta completa generando un reflejo de los resultados en el plano XY. Como se muestra en la (Figura 36).

Figura 36. Ventana del Model / condiciones de simetría del sólido para el análisis

Graphical Expansion 1 (Beta)	
Num Repeat	2
Type	Cartesian
Method	Half
ΔX	0, in
ΔY	0, in
ΔZ	3,937e-008 in
Coordinate System	Global Coordinate System

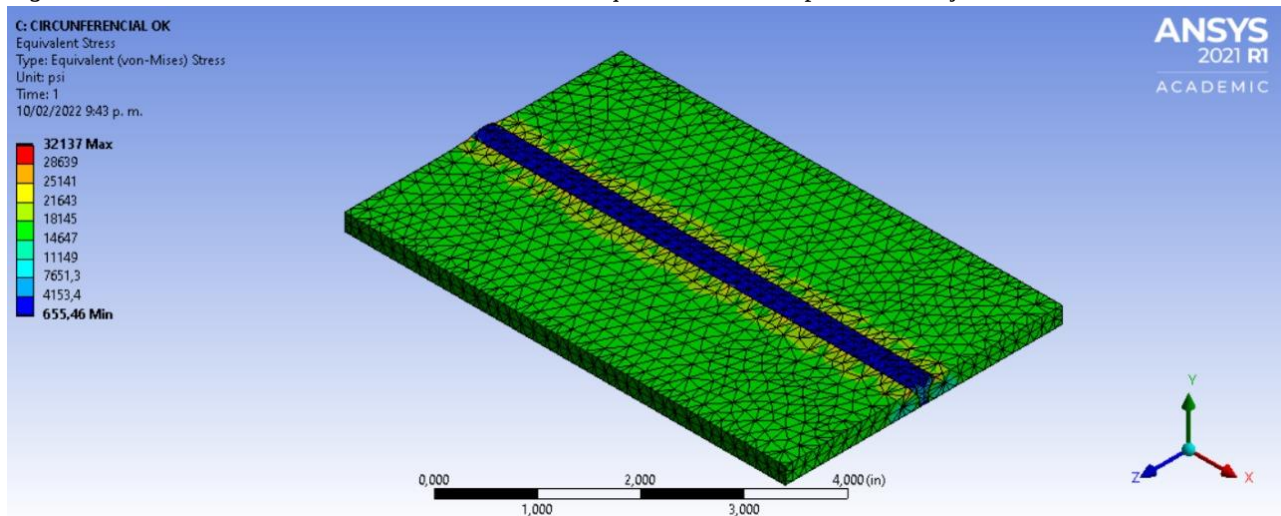
6.2.4.3. Solución

Finalmente, después de completar los componentes anteriores se genera los resultados que favorezcan al análisis de fatiga, como son: Esfuerzo equivalente circunferencial, vida a la fatiga y esfuerzo alternante equivalente.

Esfuerzo equivalente circunferencial

En la (Figura 37) se puede observar como el esfuerzo circunferencial cuando la carga no está fluctuando tiene un valor promedio de **13695 Psi** y se encuentra entre los valores de **655.46 (Psi)** y **32137 (Psi)**, donde el esfuerzo máximo está presente en la parte más cercana al cordón de soldadura debido a las diferentes discontinuidades en la superficie que se presentan en esa zona del material.

Figura 37. Ventana del Model / resultado del esfuerzo equivalente en la superficie de la junta

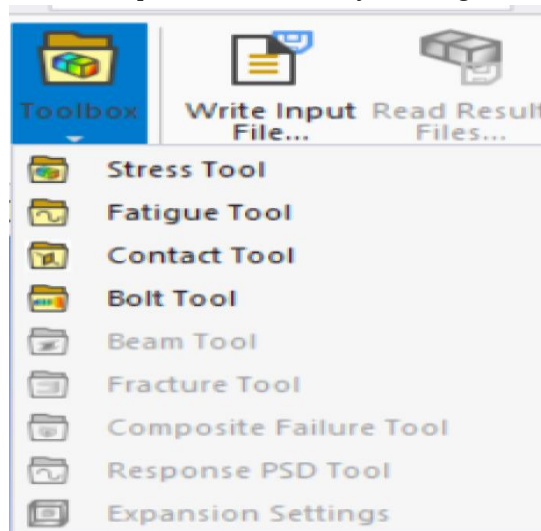


Ensayo de fatiga

Para realizar el ensayo de fatiga en el Software ANSYS es necesario señalar que los parámetros mencionados anteriormente en esta sección serán los mismos para el cálculo de la vida solo variara el tipo de esfuerzo.

En este análisis se debe dar clic en la opción de Toolbox y seleccionar *Fatigue Tool*, después se despliega una nueva carpeta en el lado izquierdo en la sección de *Solution* con el nombre del Toolbox seleccionado como se muestra en la (Figura 38).

Figura 38. Ventana del Model / forma para realizar un ensayo de fatiga con herramienta de ANSYS

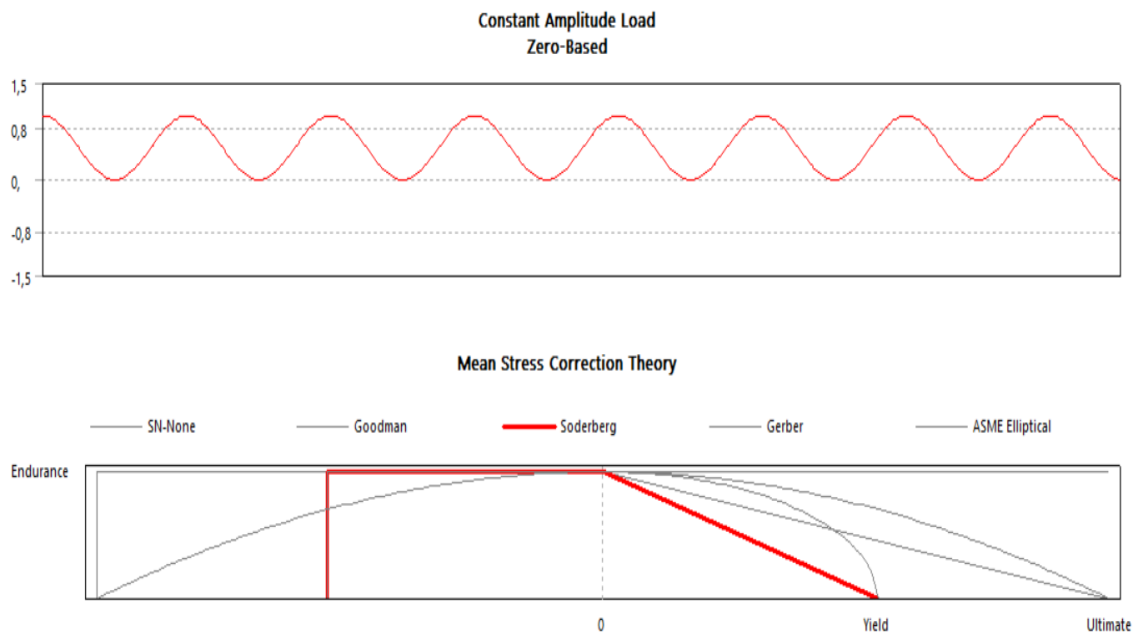


Después de incorporar la función de fatiga en la solución se despliega una serie de condiciones que se deben tener en cuenta para realizar del ensayo como se muestra en la (Figura 39), las condiciones que se modifican para este proyecto son: *Fatigue Strength Factor, Type, Mean Stress Theory, Units Name*.

Figura 39. Ventana del Model / forma para realizar un ensayo de fatiga con herramienta de ANSYS

Domain	
Domain Type	Time
Materials	
Fatigue Strength Factor (Kf)	0,9
Loading	
Type	Zero-Based
☐ Scale Factor	1,
Definition	
☐ Display Time	End Time
Options	
Analysis Type	Stress Life
Mean Stress Theory	Soderberg
Stress Component	Equivalent (von-Mises)
Results Input (Beta)	Stress
Life Units	
Units Name	cycles
1 cycle is equal to	1, cycles

Figura 40. Ventana del Model / forma para realizar un ensayo de fatiga con herramienta de ANSYS



- **Fatigue Strength Factor:** En este factor se tienen encuentra las diferentes formas de presentarse concertaciones de esfuerzos, como se explica en la sección anterior de este documento. Este factor varía entre 0 y 1, para este ensayo según las condiciones de trabajo su factor de concentración de esfuerzo es de **0.9** dado que la soldadura fue aplicada de tal manera que se supone ideal.
- **Type:** Consisten en la forma como se desea realizar la variación de las cargas cíclicas, se pueden realizar en forma *Zero-based* variación que consiste en variar la carga de un valor positivo y un valor negativo, o en la forma *cero-base* donde se varia la carga desde un valor de cero hasta un valor positivo, para este ensayo se utiliza la forma de variación de cargas *Fully-Reversed* debido a que la carga aplicada a la junta para generar fatiga será el proceso de **presurización y despresurización, variando la presión.**
- **Units Name:** Para dar la forma de medir la vida del material para el ensayo de fatiga se da uso de esta función, donde la vida puede darse en: *cycles, seconds, minutes, hours, dais y months*. En este ensayo se tomó como tiempo de vida del material **los ciclos** por ser la forma de medir óptima.

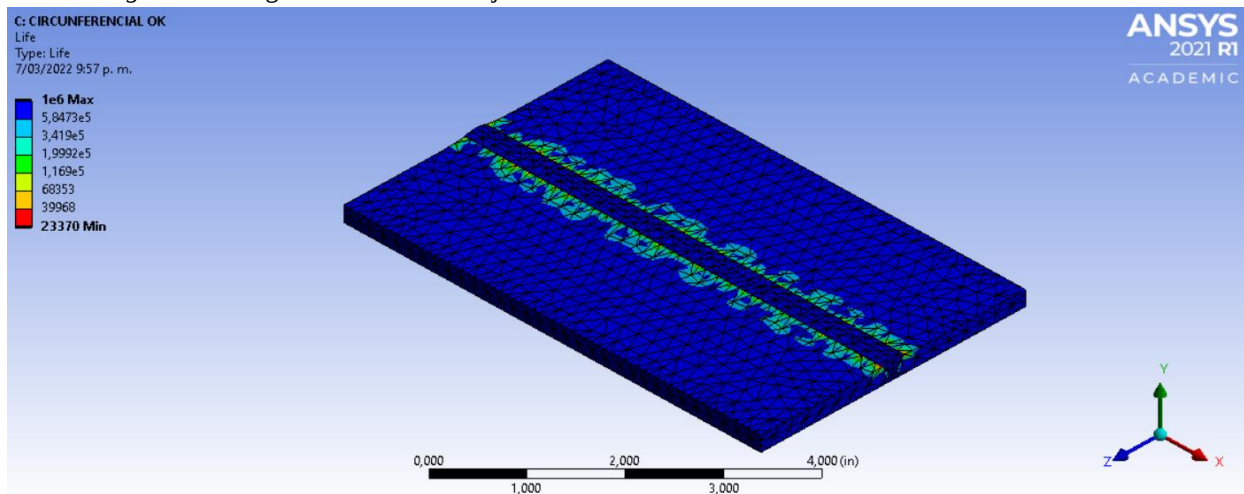
Una vez ingresados los parámetros para el ensayo se selecciona los contornos que ofrece *fatigue Tool* para visualizar el comportamiento de la junta a las condiciones a las que está afectada, los contornos que proporciona ANSYS para el ensayo de fatiga son: *life, equivalent alternating stress*.

Life (vida)

Para conocer el tiempo que puede durar la junta soldada sin presentar ninguna falla es necesario realizar la visualización de la herramienta *life*, en esta herramienta el software calcula

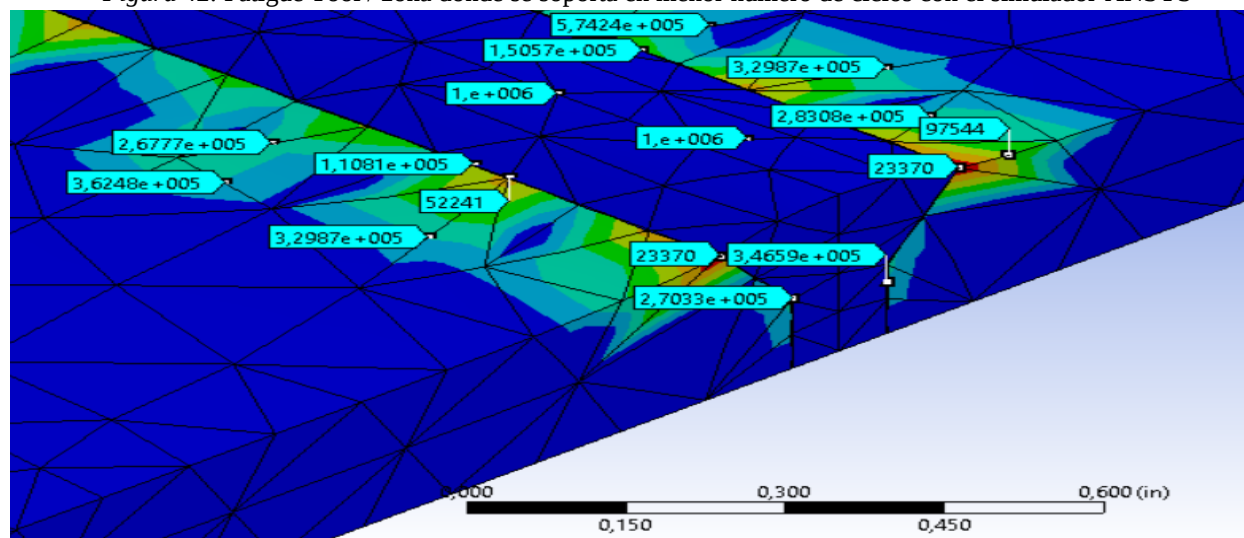
la duración del recipiente sin presentar ninguna rotura o falla al estar sometido a cargas cíclicas. En la (Figura 41) se evidencia el número de ciclos que puede soportar el recipiente en una barra de colores donde el color rojo indica el valor más bajo de ciclos y color azul es el valor más alto de ciclos que puede soportar la junta. Además de indicar el valor más alto y bajo de ciclos de forma numérica.

Figura 41. Fatigue Tool / vida de la junta con el simulador ANSYS



Para visualizar con más detalle la zona donde se presenta el menor número de ciclos se aplica un aumento en la parte interna del recipiente cerca del condón de soldadura como se muestra en la (Figura 42).

Figura 42. Fatigue Tool / zona donde se soporta en menor número de ciclos con el simulador ANSYS

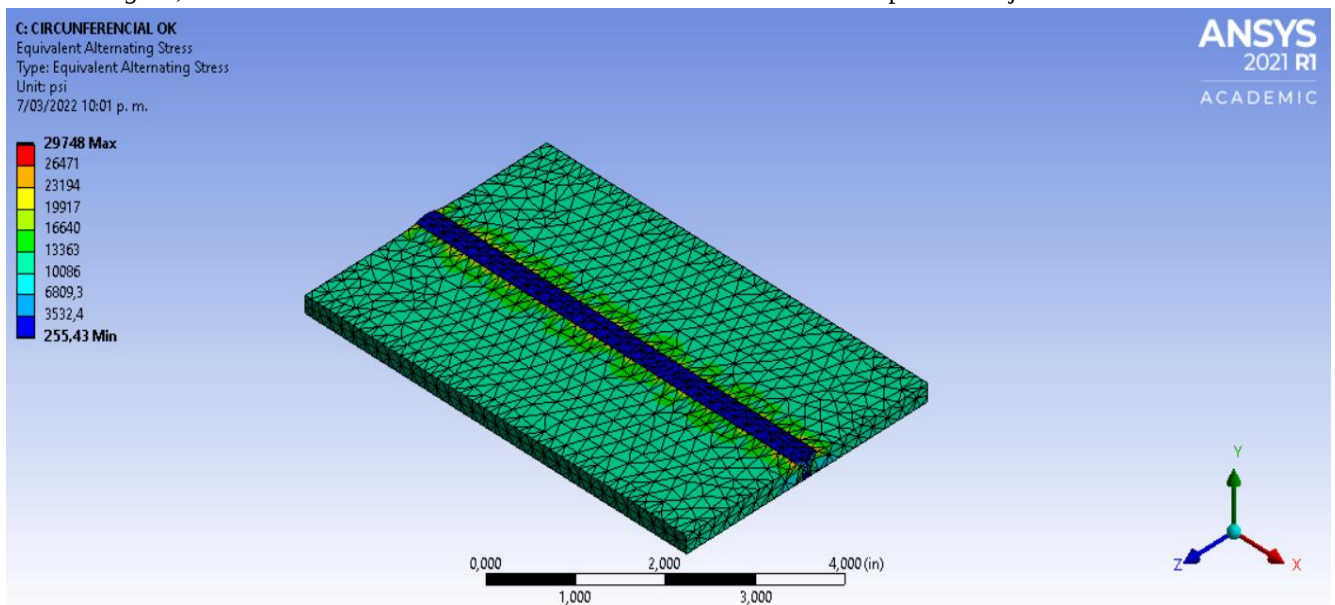


El valor de la vida a la fatiga de la junta soldada en presencia de las fuerzas ejercidas por los esfuerzos circunferenciales oscila entre el valor mínimo y máximo de 23370 y los 10^6 ciclos respectivamente.

Esfuerzo alternante equivalente circunferencial

En la (Figura 43) se puede observar como el esfuerzo circunferencial alternante tiene un valor promedio de 9525,9 Psi y se encuentra entre los valores de 255,43 (Psi) y 29748 (Psi), si comparamos estos valores con los del esfuerzo circunferencial, se puede decir que hay un incremento aproximadamente el doble entre uno y el otro, esto es debido a que las cargas fluctuantes presentes generan mayores esfuerzos.

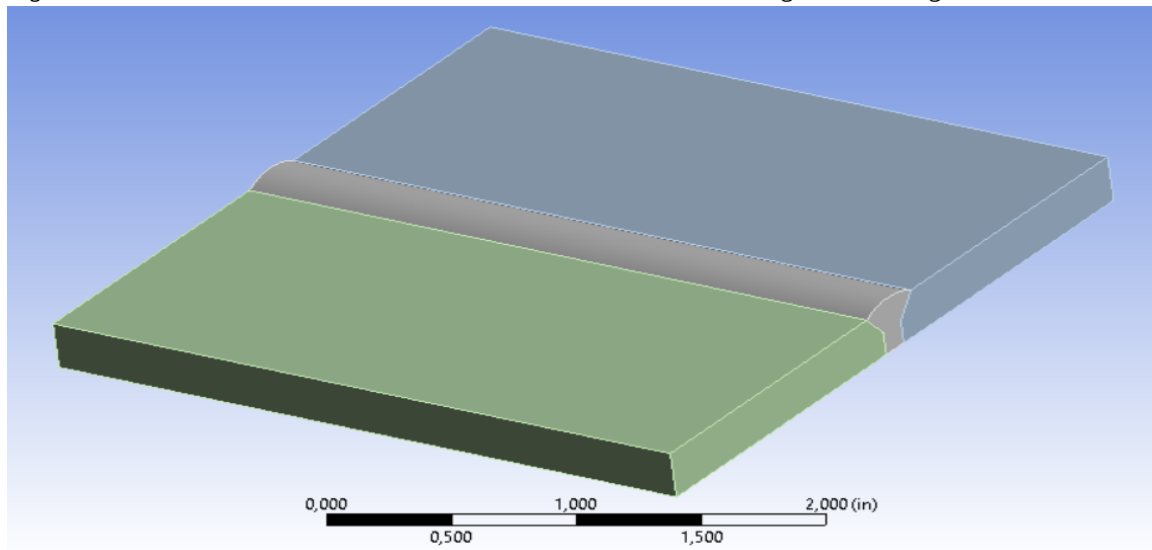
Figura, 43. Ventana del Model / resultado del esfuerzo alternante en la superficie de junta



6.2.5. Geometry longitudinal

En este análisis se tomará la geometría de una sección de la junta perpendicular al cordón de soldadura como se observa en la (Figura 44).

Figura 44. Ventana del análisis Stalic Structural / selección de editor de geometría longitudinal



6.2.5.1. Mesh

Para este ensayo se escoge un mallado **tetraédrico** debido a que la superficie es irregular por la zona de soldadura, por lo tanto, se le adición un *Method* como se muestra en la (Figura 45). Además, se le aplico un *Sizing* en la zona de soldadura para generar un mallado más pequeño como se observa en la (Figura 46) y así poder ver y analizar con mayor detalle en comportamiento del material a ciertas condiciones.

Figura 45. Ventana del Model / mallado de la superficie con Method

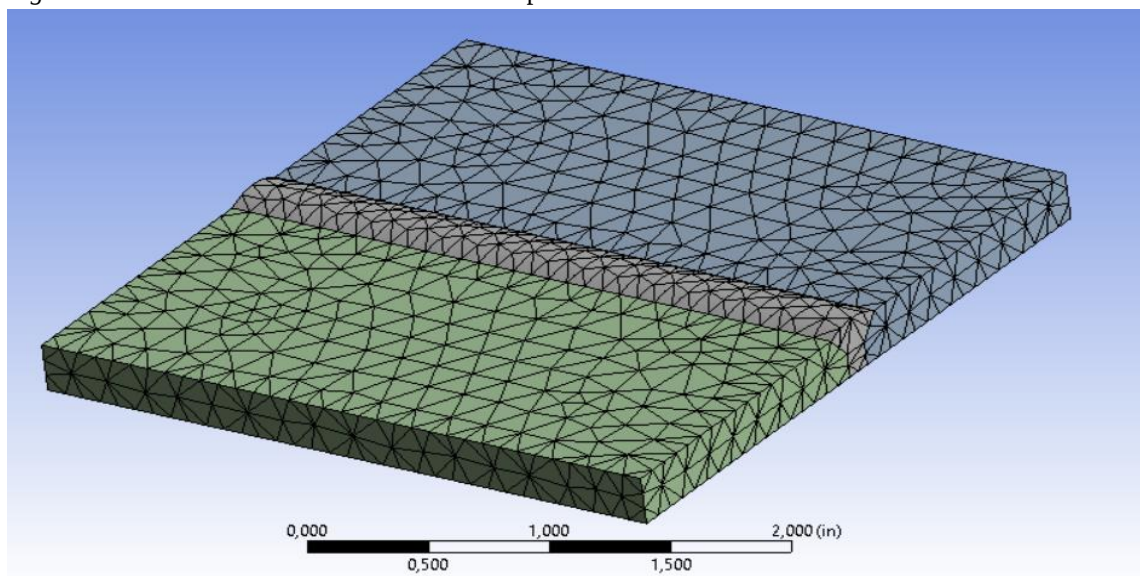
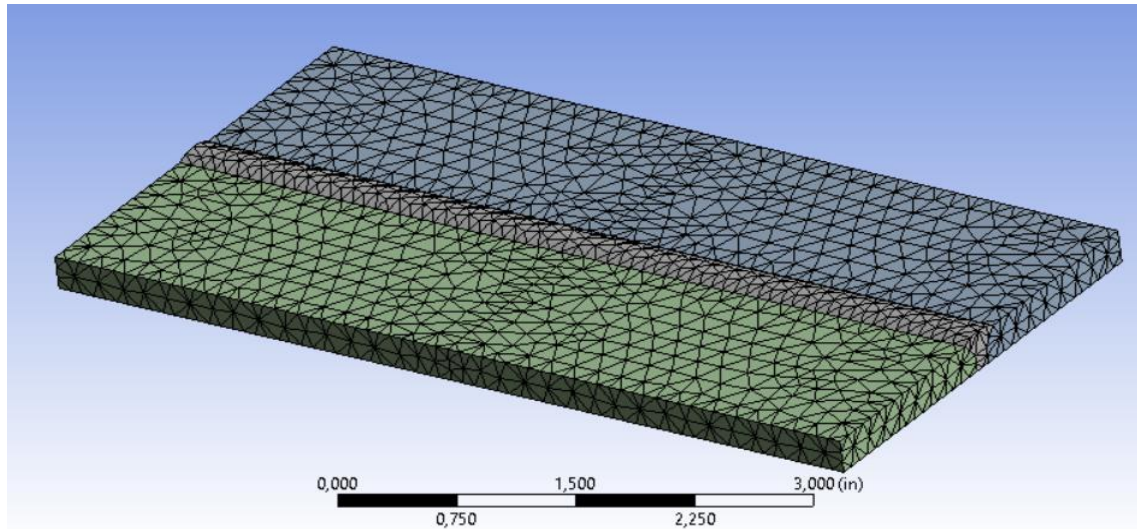


Figura 46. Ventana del Model / mallado completado



6.2.5.2. Static Structural

Para este ensayo se aplica una fuerza de **6943,4 Lbf** que corresponde a la ejercida por el esfuerzo longitudinal en el área perpendicular al cordón de soldadura en la sección de análisis de la junta soldadura. Para el cálculo del esfuerzo longitudinal se tomaron la ecuación del subcapítulo 4.2.10.2.2 de este documento.

$$\sigma_L = \frac{PD^2}{E \cdot (D_0^2 - D^2)}$$

$$\sigma_L = \frac{150(Psi) \cdot 59.5^2(in)}{1 \cdot (59.5^2(in) - 60^2(in))}$$

$$\sigma_L = 8887,6 (Psi)$$

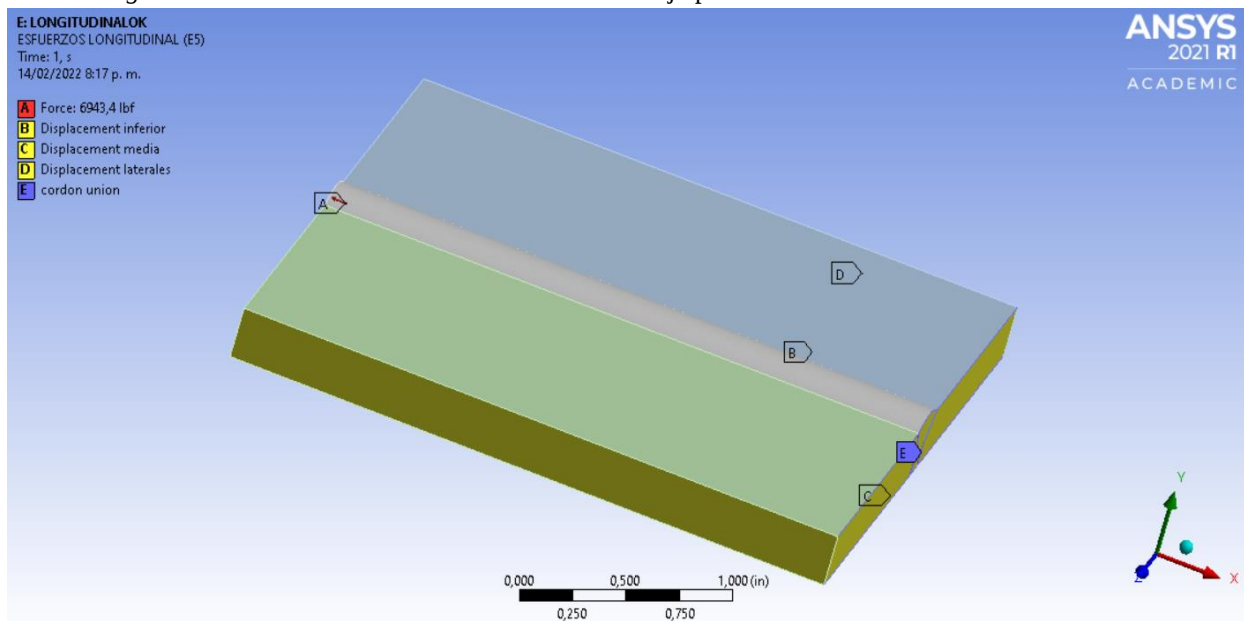
$$F = A \cdot \sigma_L$$

$$A = \left(3 + \frac{1}{8}\right) (in) \cdot \frac{1}{4} (in) = 0.78125(in)^2$$

$$F = 0.78125(in)^2 \cdot 8887,6(Psi)$$

$$F = 6943,4 (Lbf)$$

Figura 47. Ventana del Model / condiciones de trabajo para el análisis



En el proceso de visualización de resultados se usó la función *Symmetry*, para reflejar las condiciones de operación en el plano YZ y poder ver el comportamiento completo de la junta en presencia de la fuerza ejercida por los esfuerzos longitudinales. Como se muestra en la (figura 48).

Figura 48. Ventana del Model / condiciones de simetría del sólido para el análisis

Graphical Expansion 1 (Beta)	
Num Repeat	2
Type	Cartesian
Method	Half
ΔX	3,738e-008 in
ΔY	0, in
ΔZ	0, in
Coordinate System	Global Coordinate System

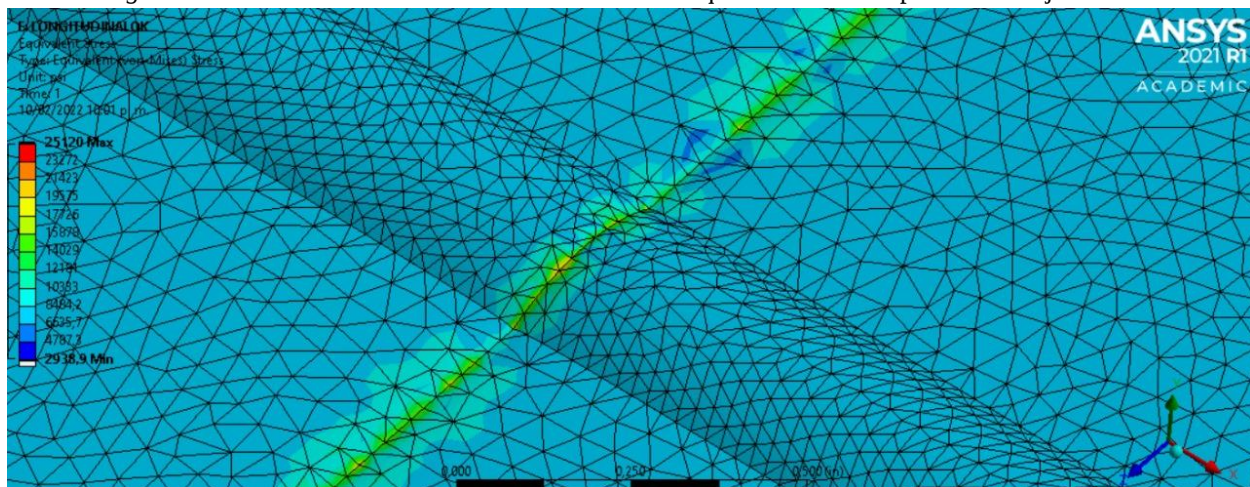
6.2.5.3. Solution

Finalmente, después de completar los componentes anteriores se genera los resultados que favorezcan al análisis de fatiga, como son: *Esfuerzo equivalente longitudinal* , *vida a la fatiga* y *esfuerzo alternante equivalente*.

Esfuerzo equivalente longitudinal

En la (Figura 49) se puede observar como el esfuerzo longitudinal cuando la carga no está fluctuando tiene un valor promedio de 7755.1 **Psi** y se encuentra entre los valores de **2938.9Psi** y **25120Psi**, donde el esfuerzo máximo longitudinal comparado con el circunferencial es mucho menor, esto es debido a que las fuerzas que actual en la sección circunferencial son mayores que las longitudinales por razones del área que se ve afectada, y tienen como característica que el esfuerzo circunferencial es el doble que el esfuerzos longitudinal.

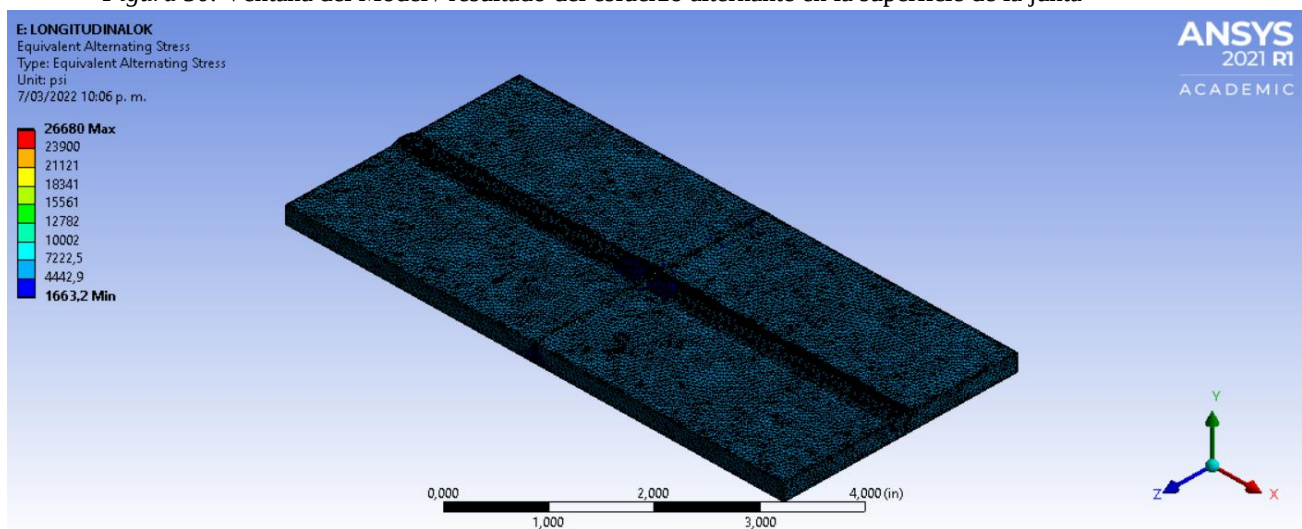
Figura 49. Ventana del Model / resultado del esfuerzo equivalente en la superficie de la junta



Esfuerzo alternante longitudinal

En la (Figura 50) se puede observar como el esfuerzo alternante longitudinal no presenta variación ante el esfuerzo longitudinal, si lo comparamos con el esfuerzo alternante circunferencial podemos decir que este no tiene gran efecto en el proceso de fatiga de la junta.

Figura 50. Ventana del Model / resultado del esfuerzo alternante en la superficie de la junta

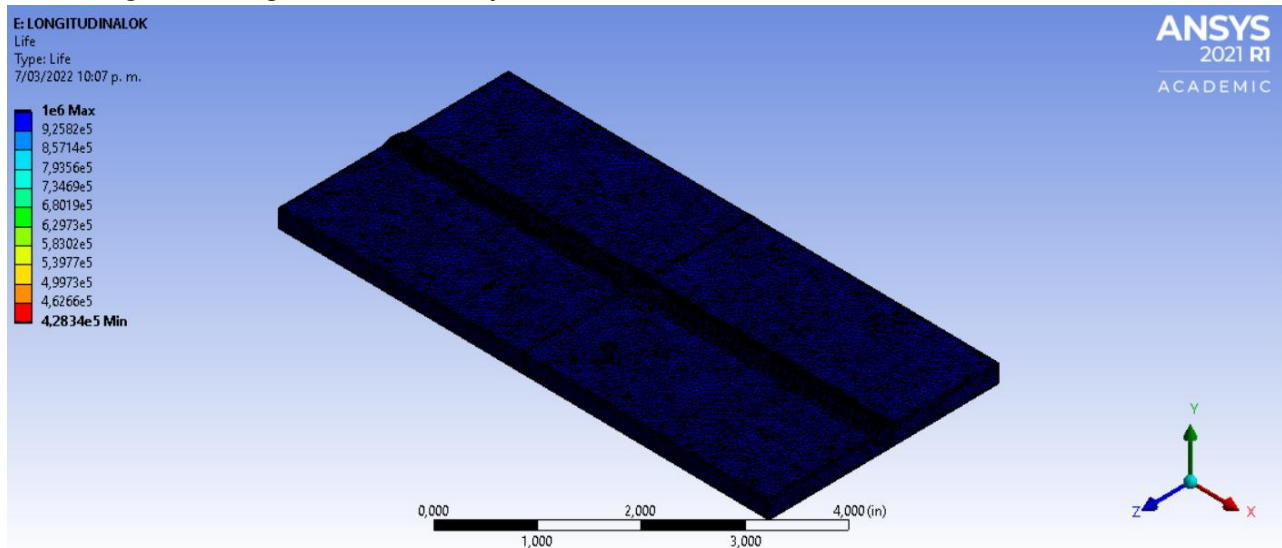


Life (vida)

En la (Figura 51) se puede observar cómo en casi todas las zonas del material se tiende a tener una vida infinita y las zonas donde se presenta menor vida es donde hay imperfecciones o

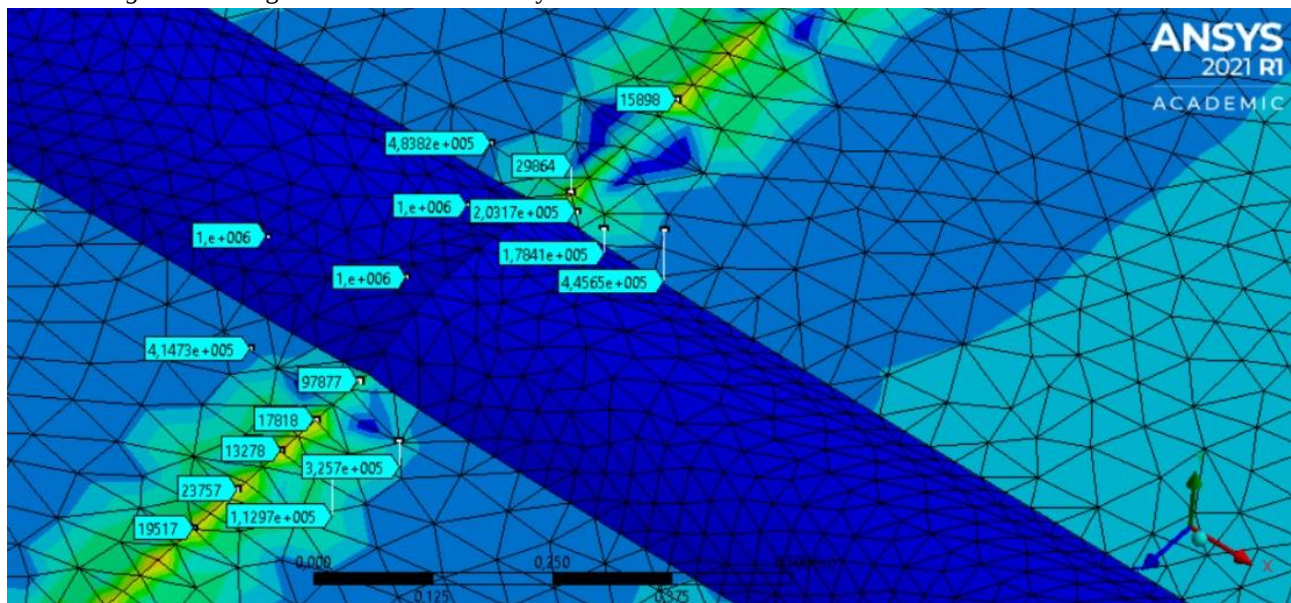
discontinuidades en el material que pueden generar concentradores de esfuerzo y esfuerzos residuales.

Figura 51. Fatigue Tool / vida de la junta con el simulador ANSYS



Para visualizar con más detalle la zona donde se presenta el menor número de ciclos se aplica un aumento en la parte interna del recipiente cerca del condón de soldadura como se muestra en la (Figura 52).

Figura 52. Fatigue Tool / zona donde hay un menor número de ciclos con el simulador ANSYS



El valor de la vida a la fatiga de la junta soldada en presencia de las fuerzas ejercidas por los esfuerzos longitudinales oscila entre el valor mínimo y máximo de 428000 y los 10^6 ciclos respectivamente.

7. Validación de datos con relación a una metodología experimental

Para la validación de datos, se tomaron en cuenta los resultados obtenidos del proyecto “Análisis de fatiga de juntas soldadas de acero al carbono utilizado en recipientes a presión” (González De León, 2008), donde se analiza el fenómeno de fatiga en una junta soldada a tope con un ángulo de 30° de un acero estructural utilizado para para la fabricación de recipientes a presión (SA516-70), unido mediante soldadura con un con un electrodo AWS E7018.

7.1 Parámetros de diseño

7.1.1. Materiales

- **Material Base:** el material base que se utiliza es el SA 516-70, que corresponde al mismo al que se usó en este proyecto, debido a que es un acero de alta resistencia y es usado comúnmente en la fabricación de recipiente a presión. Mirando las propiedades químicas de ambos proyectos, se puede decir que son muy similares, sin importar que los datos fueron tomados de diferentes fuentes.

Tabla 9. Tabla comparativa (Martinez.M, 2008)

Componente	Datos en proyecto (%)	Datos de validación (%)
Carbono (C)	0.27	0.27
Manganeso (Mn)	0.85 – 1.20	0.79 - 1.30
Fosforo (P)	0.025	0.035
Azufre (S)	0.025	0.035
Silicio (Si)	0.15 – 0.40	0.13 – 0.45

- **Material de Aporte:** como material de aporte se utiliza el electrodo AWS E7018, que es ideal en conjunto con el acero SA 516-70 en la fabricación de recipientes a

presión. Dadas las características investigadas en este proyecto se escogió como material de aporte el electrodo E6010 para la penetración y E7018 para el acabado superficial.

7.1.2. Proceso de soldadura

El proceso de soldadura que se utilizó en este proyecto es muy similar a la usado en el documento de validación, donde se tuvieron las siguientes condiciones para realizar una junta a tope tipo N°1, según la tabla UW-12 del código ASME sección VIII div 1 en una platina o placa de acero SA516-70 que fue mecanizada y biselada con un ángulo de 30°. La soldadura que se aplico fue con la técnica SMAW, en posición plana horizontal (1G) según la división QW-121 del código ASME sección XI.

7.2. Metodología

7.2.1. Ensayos

En el documento de validación se realizaron múltiples ensayos de tracción a probetas construidas según la norma ASTM-A370 para obtener el valor del esfuerzo ultimo y el esfuerzo de fluencia del material base SA516-70, obtenido los siguientes valores:

Tabla 10. Tabla comparativa

N° probetas	Esfuerzo de fluencia (S_y) [MPa]	Esfuerzo ultimo (S_u) [MPa]
1	595.64	887.43
2	607.41	891.17
3	560.05	875.37
Promedio	587.70	884.66

Al verificar y comparar los valores anteriores del esfuerzo ultimo y el esfuerzo de fluencia del material del SA516-70 con los obtenidos por medio del código ASME sección II parte D, se ve una gran variación entre dichos valores.

Tabla 11. Tabla comparativa

	Esfuerzo de fluencia (S_y)	Esfuerzo ultimo (S_u) [MPa]
	[MPa]	
Documento validación	587.70	884.66
Código ASME	262	483

La diferencia de los resultados puede haberse presentado por problemas a la toma de datos por ser ensayo experimental en comparación a los datos tomados del código ASME los cuales ya están verificados.

7.2.1.1. Ensayo de Fatiga

El ensayo de fatiga realizado en la validación fue de flexión alternativa, donde se sometió 12 probetas a cuatro (4) esfuerzos con la base de diferentes porcentajes (75, 80, 85 y 90 %) de la resistencia a la fluencia determinado anteriormente con el ensayo de tracción. Las probetas fueron sometidas a estos esfuerzos hasta llegar al punto del fallo, con el propósito de determinar el número de ciclos que soporta cada probeta al fallo. Obteniendo los valores de la siguiente tabla.

Tabla 12. Tabla comparativa (González De León, 2008)

Nivel de	Esfuerzo	N° de ciclos	Desviación	N° promedio
90	528,92	285600	40801	27533
		305200		
		227440		
85	499,53	397440	53648	407747
		465800		
		360000		
80	470,15	637200	112097	598320
		685800		
		471960		
75	440,76	783000	96690	825360
		757080		
		936000		

para validar que los resultados obtenidos del ensayo de fatiga utilizando el simulador ANSYS estén bien, es necesario compararlos con los brindados anteriormente en el ensayo de fatiga experimental.

Tabla 13. Esfuerzos y número de ciclos de ensayo de fatiga experimental

Nivel de esfuerzo de fluencia (%)	90	85	80	75
Esfuerzo aplicado (MPa)	528.92	499.53	470.15	440.76
N° promedio de ciclos	27533	407747	598320	825360

Tabla 14. Esfuerzos y numero de ciclos de ensayo de fatiga en el simulador ANSYS

Tipo de Esfuerzos	Esfuerzo aplicado (psi)	N° de ciclos
Longitudinal	8888	428000
Circunferencial	17850	23370

Comparando los valores experimentales con los obtenidos por medio de simulación de ANSYS, se puede ver que el número de ciclos se encuentra en el rango teórico para un acero estructural, que corresponde entre los 10^3 y 10^6 ciclos, además con relación al material base y la soldadura, se presenta una mayor vida a la fatiga en el cordón de soldadura y una menor vida en donde halla presencia de discontinuidades en la superficie que pueden ser ocasionadas por una variación de la microestructura del material como sucede en la zona afectado por calor o comúnmente conocida como (ZAC).

8. Conclusiones

- Para analizar y diseñar una junta soldada es fundamental tener en cuenta las Normas ASME Sección VIII, dado que actualmente este código es el más utilizado para este tipo de estudios.
- Al seleccionar el material de fabricación de la junta soldada se deben tener en cuenta factores como la composición, condiciones de trabajo, costos y accesibilidad.
- En el proceso de soldadura a tope es fundamental que los aspectos geométricos y químicos no estén por fuera de los estándares del código ASME, para así lograr una soldadura óptima.
- Para realizar el estudio en la junta por medio del software, no es necesario analizar todo el recipiente, solo la sección de interés. Pero si se deben tener presente las fuerzas que actúan en dicha sección ya que son parámetros a tener en cuenta a la hora de realizar la simulación.
- Los esfuerzos circunferenciales y longitudinales obtenidos por medio del software ANSYS son similares a los obtenidos con las ecuaciones teóricas, por ende, se puede decir que el software no tiene un margen de error bastante pequeño.
- La zona más afectada después de haber realizado el ensayo a fatiga es en el material base SA-516-70 cerca al cordón de soldadura hablando más específicamente en la zona (ZAC), esto es ocasionado por la superficie irregular y por la diferencia entre las propiedades de los materiales que pueden ocasionar una discontinuidad tanto en lo geométrico como en la composición del material.

Referencias Bibliográficas

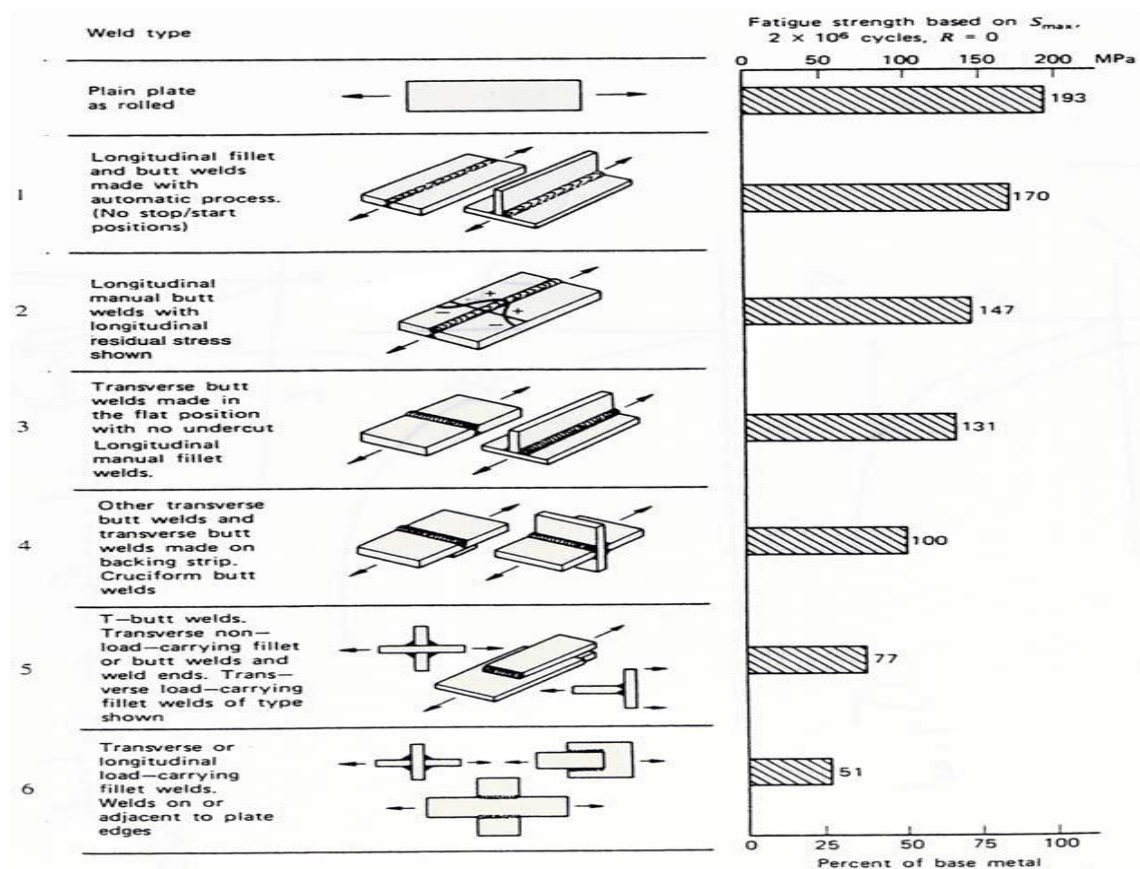
- Shirley.J.E. Mischke.c.r. (2011). diseño de ingeniería mecánica (9 ed.). mexico: mc graw hill.
- González de león, m. m.-c. (diciembre de 2008). análisis de fatiga de juntas soldadas de acero al carbono utilizado en recipientes a presión. 12, 287-294. venezuela.
- ASME.(2017). section IX, welding and brizing qualifications. en boiler and pressure vessels code. new york.
- ASME.(2017). seccion VIII division 1. rules for construction of pressure vessels. en boiler and pressure vessels code. new york, usa.
- ASME.(2017). section II materials apart D. en boiler and pressure vessels code. new york, ny.
- ASME.(2017). section VIII division 2, alternative rules for construction of pressure vessel. en boiler and pressure vessels code. new york ny.
- Collevecchio.s, m. (noviembre de 2004). estudio del comportamiento a la fatiga en juntas soldadas de un acero estructural utilizado para la fabricacion de recipientes a presion. caracas.
- Carrasco a, o. (2009). anales de mecánica de la fractura 26. modelo de comportamiento en fatiga basado en el daño continuo medido a partir de parametros energeticos de un polimerocompuesto, 1, 277. españa.
- Handbook. (enero de 1993). ciencia de materiales.
- Rios.o, (2013). estado del arte sobre la integridad estructural de uniones soldadas y modelos de propagación de grietas para la gestión de vida en estructuras. 21, 279-292.

Apéndices

Apéndice A. Tipos de juntas soldadas y resistencia a la fatiga para aceros

En la Figura 53 se muestran los tipos más frecuentes de juntas soldadas, acompañadas por su correspondiente resistencia a la fatiga para aceros estructurales a 2×10^6 ciclos. Donde el amplio intervalo representado indica una variación significativa en la resistencia a la fatiga de los elementos soldados.

Figura 53. Tipos de juntas soldadas y resistencia a la fatiga para aceros a 2×10^6 ciclos (Collevecchio, S., 2004)



La temperatura es un factor que influye en el proceso de deformación elasto-plástica en la soldadura, debido a que puede generar *esfuerzos residuales* biaxiales y triaxiales en toda la soldadura. Los esfuerzos residuales a tensión pueden alcanzar valores iguales al esfuerzo de

fluencia y pueden contribuir a la disminución de la resistencia a la fatiga de algunos elementos soldados.

“existen siempre macro y/o micro discontinuidades en elementos soldados que proveen lugares ideales para la nucleación de grietas. Algunas de estas discontinuidades pueden ser planas, como en el caso de grietas y por tanto la componente de vida a la fatiga asociada con la etapa de nucleación podría ser cero, o en todo caso muy pequeña. De allí que, la vida por fatiga en elementos soldados es entonces considerada de acuerdo con el aporte de los ciclos de falla relacionados al crecimiento de estas grietas. Cuando las grietas como discontinuidades no existen, la vida a fatiga del elemento soldado puede ser considerada como la sumatoria de los ciclos asociados a la nucleación de grietas por fatiga y los ciclos correspondientes al crecimiento de estas grietas por efecto de la carga aplicada. Dichas discontinuidades de los elementos soldados pueden ser clasificadas como planas, volumétricas o geométricas de acuerdo con el siguiente criterio.

- **Planas:** grietas de solidificación, grietas por contracción, grietas inducidas por hidrógeno, falta de fusión, penetración parcial, o inclusiones de óxido en forma de láminas delgadas.
- **Volumétricas:** porosidad o inclusiones de escoria.
- **Geométricas:** lugares parada/comienzo/terminación/intermitentes, superficie con rizos, refuerzos, radio de curvatura del talón, raíz, metal de aporte derramado, cambios de sección, desalineamientos o salpicaduras.”

(Collevecchio.S, 2004, págs. 34-35)

Apendice B. Maquinas de flexion rotativa**Máquina de ciclos de tensiones por flexión plana**

Estas máquinas se caracterizan por someter la probeta a cargas axiales tanto de tracción como de compresión. En procedimiento consiste en sujetar la probeta en sus dos extremos y aplicar una carga axial alternativa (push-pull). Actualmente este ensayo se utiliza en máquinas con sistema hidráulico que permite realizar ensayos de fatiga estáticos como dinámicos. La máquina de ciclos de tensión de flexión plana se ve ilustrada en la Figura 54 (Mollerach.C, MÁQUINA DE ENSAYOS DE FATIGA TIPO SCHENCK, 2015)

Figura 54. Máquina de ciclos de tensión de flexión plana (Mollerach.C, Maquina de ensayos de fatiga tipo SCHENCK, 2015)

**Máquina de ciclos de tensiones por flexión rotativa**

El funcionamiento de las máquinas de tensión por flexión rotativo consiste en generar un momento flector a la probeta mientras se encuentra rotando por un motor eléctrico que gira a un número de revoluciones constantes. La probeta debido al momento flector provoca que la tensión oscile de cero (0) hasta el máximo de tracción, generando una fatiga en un punto en la superficie

de la probeta hasta llegar a la falla del material. Las máquinas que actualmente son usadas son *la máquina de Wöhler* y *la máquina de Moore*.

Máquina de Wöhler (flexión rotativa)

La máquina de Wöhler o máquina de flexión rotativa tipo viga en voladizo se caracteriza por aplicar la carga de en un solo punto de la probeta y tener el motor eléctrico en revolución sujeto en el externo opuesto a donde se aplica la carga. El momento flector a que somete la probeta no permanece constante a lo largo de la misma, sino que aumenta axialmente a medida que aumenta la distancia respecto al punto donde se aplica la carga. (Mollerach.C, MÁQUINA DE ENSAYOS DE FATIGA TIPO SCHENCK, 2015)

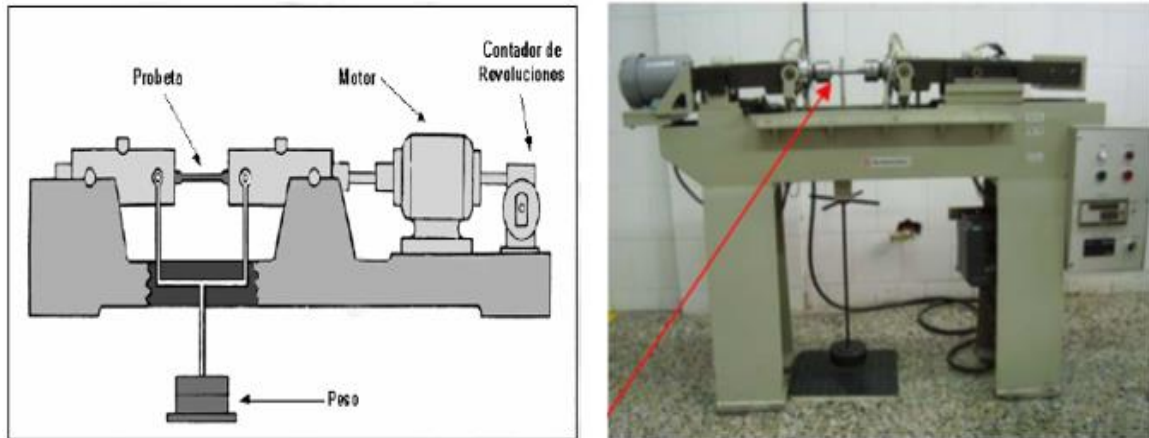
Figura 55. Maquina Wöhler (Mollerach.C, Maquina de ensayos de fatiga tipo SCHENCK, 2015)



Máquina de Moore (schenck)

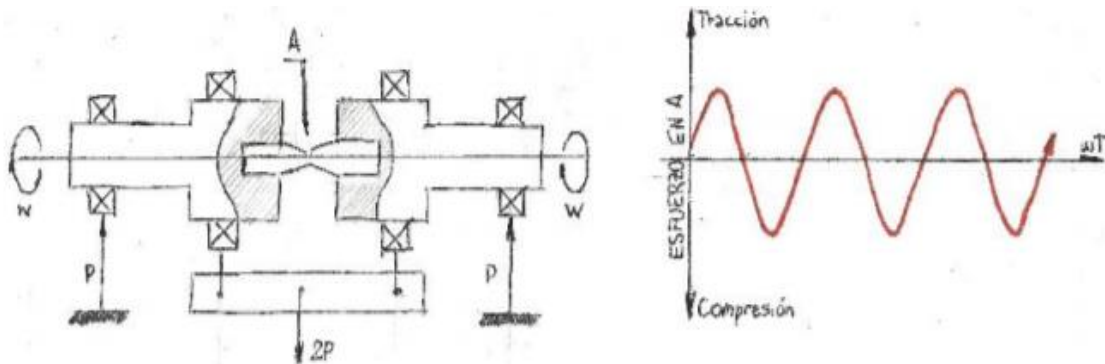
La máquina de Moore con respecto a la anterior presenta una mejora con relación al ensayo, esta máquina maneja dos puntos de carga en la probeta mientras está sujeta en sus dos extremos. Debido a dos cargas que actúan sobre la probeta, el esfuerzo es nulo y el momento flector permanecerá constante a lo largo del ensayo.

Figura 56. Máquina de Moore y partes de esta (Distrital, 2016)



El comportamiento de los esfuerzos que se obtiene de este ensayo se caracteriza por generar un comportamiento sinusoidal, debido a que las tensiones actúan a una cierta distancia de eje neutro, donde se ve evidenciada como la amplitud máxima del comportamiento sinusoidal de las tensiones. La superficie de la probeta se ve afectada directamente con la amplitud máxima, debido a que será el punto más propenso a comenzar la fisura del material hasta llegar a la rotura de la probeta. (Mollerach.C, MÁQUINA DE ENSAYOS DE FATIGA TIPO SCHENCK, 2015)

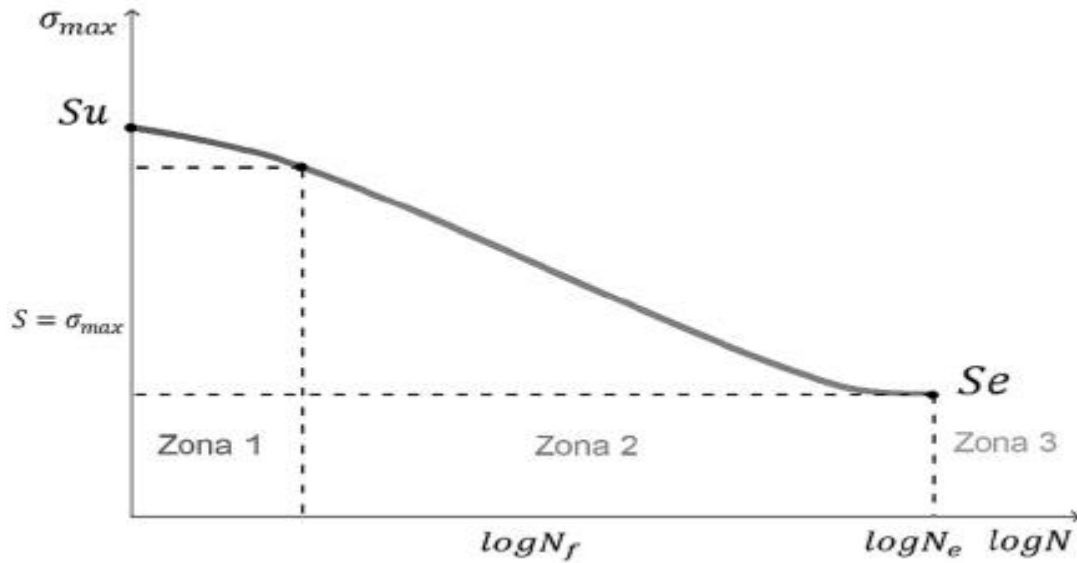
Figura 57. Diagrama de tensiones en punto A y comportamiento sinusoidal de esfuerzos en la probeta (Mollerach.C, Máquina de ensayos de fatiga tipo SCHENCK, 2015)



Una vez realizado el ensayo, se va a utilizar el método de la curva de Wöhler, donde se visualiza los resultados obtenidos del comportamiento de fatiga. La curva de Wöhler o también llamado curva de S-N (Stress-Number of cycles) mide la vida útil del material de la probeta,

usando una gráfica donde se toma el número de ciclos hasta la rotura N (eje x) y los esfuerzos generados por la máxima tensiones en tracción y compresión (eje Y). (Distrital, 2016)

Figura 68. Curva de Wöhler ($S-N$) de un material ferroso (A. Pertuz, 2018)

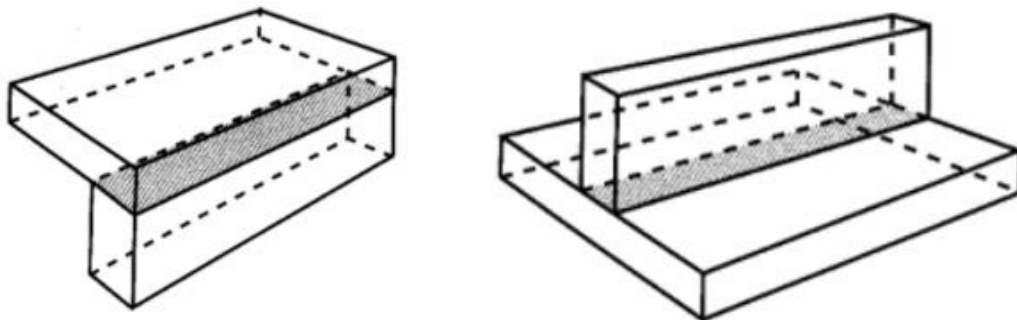


Apéndice C. tipo de junta según ASME sección VIII, Div 1

Juntas a esquina

Una junta de esquina es una conexión entre dos miembros o piezas en ángulo recto entre sí en forma de L o T que se realiza con una soldadura de penetración total o parcial, o soldaduras de filete. (ASME, seccion VIII Division 1. Rules for Construction of Pressure Vessels, 2017)

Fig. 59. Formas de juntas a esquina en L o T (Matrin.A, 2016)



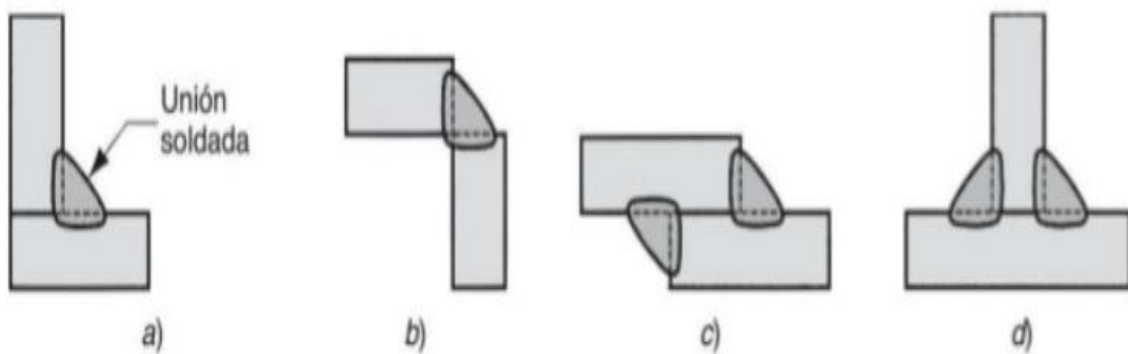
Juntas en ángulo

Una unión en ángulo es una conexión entre los bordes de dos miembros con una soldadura de penetración completa con uno de los miembros que consiste en una transición de diámetro. (ASME, seccion VIII Division 1. Rules for Construction of Pressure Vessels, 2017).

Soldadura de filete

Una soldadura de filete es una soldadura que es aproximadamente triangular en sección transversal que une dos superficies en aproximadamente ángulos rectos entre sí. (ASME, seccion VIII Division 1. Rules for Construction of Pressure Vessels, 2017)

Figura 60. Formas de la soldadura de filete (Chamorro.C, 2017)



Apéndice D. Tabla UW-12 ASME sección VIII

Figura 61. Tabla UW-12 del código ASME sección VIII (ASME, seccion VIII Division 1. Rules for Construction of Pressure Vessels, 2017)

Tipo N°	Descripción	Limitaciones	Categoría	Radiografiado		
				(a) Total ²	(b) Parcial ³	(c) Nada
1	Juntas a tope de doble arco de soldadura, (con depósito de material en las superficies interna y externa) u otros medios que provean igual calidad en el interior y en el exterior de la superficie soldada para cumplir con los requerimientos de UW-35. Las juntas que usan topes metálicos que quedan adheridos están excluidas.	Ninguna	A, B, C y D	1,0	0,85	0,70
2	Juntas a tope de simple arco de soldadura, con respaldo, diferentes de las incluidas en 1.	(a) Ninguna excepto las mencionadas en (b) a continuación. (b) Uniones a tope circunferenciales con una placa desplazada respecto de la otra; ver UW-13(b)(4) y Figura 10, tipo 2 parte inferior.	A, B, C y D A, B y C	0,9 0,9	0,80 0,80	0,65 0,65
3	Juntas a tope de simple arco de soldadura, sin respaldo.	Uniones circunferenciales a tope de espesor no mayor a $\frac{3}{4}$ " (16 mm) y de diámetro exterior no mayor a 24" (610mm).	A, B y C	NA	NA	0,60
4	Juntas a filete completas de doble solape.	(a) Soldaduras longitudinales de espesor no superior a $\frac{3}{4}$ " (10 mm). (b) Soldaduras circunferenciales de espesor no superior a $\frac{3}{4}$ " (16 mm).	A B y C ⁵	NA NA	NA NA	0,55 0,55
5	Juntas a filete completas de simple solape con soldaduras tipo enchufada (plug weld) de acuerdo a UW-17.	(a) Soldaduras circunferenciales ⁴ para cabezales de no más de 24" (610 mm) de diámetro exterior y no más de $\frac{1}{4}$ " (13 mm) de espesor. (b) Uniones circunferenciales para fijar cabezales <i>encamizados</i> de espesor nominal no mayor a $\frac{3}{4}$ " (16 mm) donde la distancia desde el centro de la soldadura tipo <i>enchufada</i> al extremo de la placa no es menor a 1,5 veces el diámetro del agujero para el encamisado (ver Figura 10, Tipo 5).	B C	NA NA	NA NA	0,50 0,50
6	Juntas a filete completas de simple solape no enchufadas (sin plug welds).	(a) Para fijar cabezales con presión del lado convexo a cuerpos cilíndricos que no requieren espesores superiores a $\frac{3}{4}$ " (16 mm), utilizando junta a filete sólo en el interior del cuerpo cilíndrico. (b) Para fijar cabezales con presión exterior o interior a cuerpos cilíndricos de diámetro interior no mayor a 24" (610 mm) y que no requieren espesores superiores a $\frac{1}{4}$ " (6 mm), utilizando únicamente soldadura a filete en la parte exterior de la brida.	A y B A y B	NA NA	NA NA	0,45 0,45
7	Juntas de esquina, penetración total, penetración parcial, y/o soldadura a filete.	Limitaciones dadas en la Figura UW-13.2 y en la Figura UW-16.1.	C ⁶ y D ⁶	NA	NA	NA
8	Juntas en ángulo.	Cumplir U-2(g) para uniones Categoría B y C.	B, C y D	NA	NA	NA

NOTAS:

- (1) $E = 1$ para uniones soldadas a tope en compresión.
- (2) Ver UW-12(a) y UW-51.
- (3) Ver UW-12(b) y UW-52.
- (4) Quedan excluidas las uniones que fijan cabezales hemisféricos al cuerpo del cilindro.
- (5) Para uniones Tipo 4 Categoría C, la limitación no es aplicable a conexiones a bridas abulonadas.
- (6) En las fórmulas de diseño de la División 1 no se considera eficiencia de junta E para las juntas de esquina de las Categorías C y D. Cuando sea necesario se puede usar un valor de E no mayor que 1.

Para una mejor comprensión de los ocho (8) tipos de uniones soldadas ya mencionadas en la tabla 1, se va a realizar una explicación muy breve de cada una con su correspondiente esquema, adicional se va a mencionar la categoría que pertenece cada tipo de junta en la fabricación de un recipiente a presión, la cual se va a explicar más adelante en este trabajo.

- **Tipo 1:** es el más común e importante de los tipos de juntas, se caracteriza por adicionar soldadura a ambos lados de la unión a tope manteniendo la misma cantidad

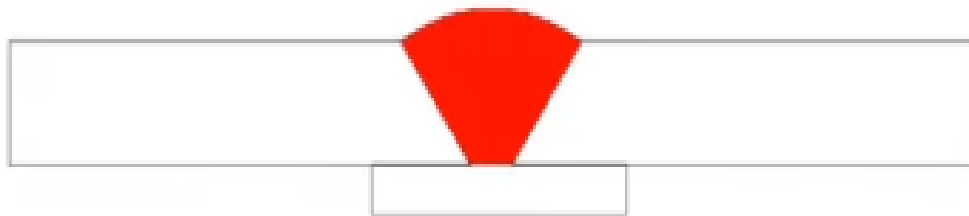
a ambos lados. La eficiencia que ofrece este tipo de soldadura es 1 para radiación completa, 0.85 para sportografía y 0.7 para no radiografía. Este tipo de soldadura es usada en la categoría A, B, C y D.

Figura 62. Junta tipo 1 (Engineering, 2020)



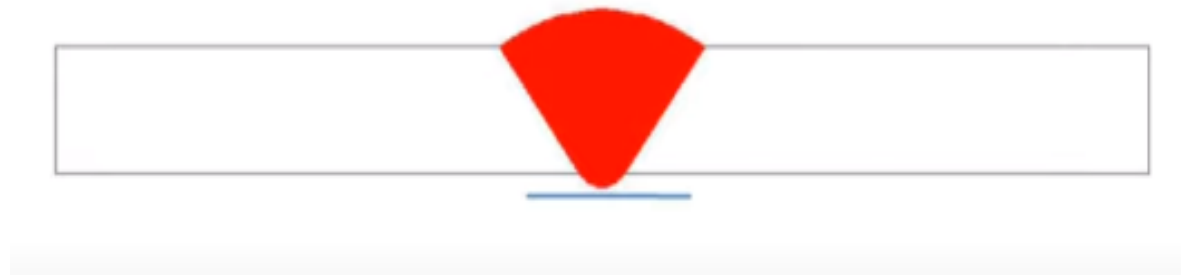
- **Tipo 2:** la forma de aplicación de este tipo de soldadura es en solo una cara de la unión a tope mientras en lado opuesta tiene una tira soldada al respaldo. La eficiencia este tipo de soldadura es 0.9 para radiación completa, 0.8 para sportografía y 0.65 para no radiografía. Este tipo de soldadura es usada en la categoría A, B, C y D.

Figura 63. Junta tipo 2 (Engineering, 2020)



- **Tipo 3:** En esta forma de unión a tope se aplica soldadura en solo un lado sin tira al respaldo, este tipo de junta es una unión muy crítica, por lo que hay que tener cuidado al soldar la raíz de la soldadura. La eficiencia este tipo de soldadura es 0.6 para no radiografía. Este tipo de soldadura es usada en la categoría A, B y C.

Figura 64. Junta tipo 3 (Engineering, 2020)



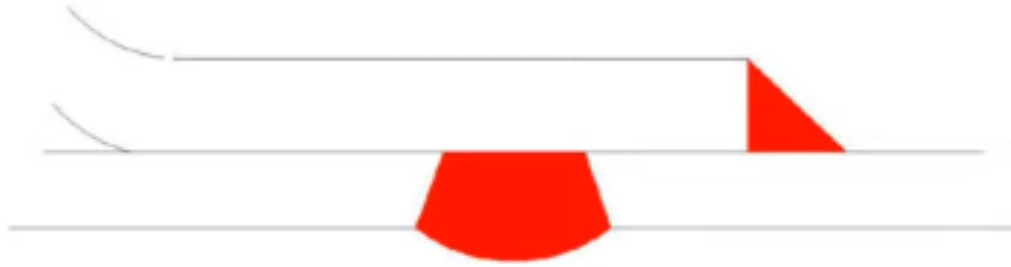
- **Tipo 4:** En este tipo se tiene relleno de soldadura en forma de filete completo con articulaciones en ambos lados (lado 1 y lado 2). La eficiencia este tipo de soldadura es 0.55 para no radiografía. Este tipo de soldadura es usada en la categoría A, B y C.

Figura 65. Junta tipo 4 (Engineering, 2020)



- **Tipo 5:** la soldadura es aplicada a un lado con la articulación fileteada y el otro lado es soldada con la junta de enchufe para que esta junta actúe como soporte adicional que da una fuerza extra a la junta. La eficiencia este tipo de soldadura es 0.5 para no radiografía. Este tipo de soldadura es usada en la categoría B y C

Figura 66. Junta tipo 5 (Engineering, 2020)



- **Tipo 6:** la soldadura es aplicada a un lado con la articulación fileteada completa con una diferencia del tipo 5 de no tener soldadura al otro lado la junta en enchufe. La eficiencia este tipo de soldadura es 0.45 para no radiografía. Este tipo de soldadura es usada en la categoría A y B.

Figura 67. Junta tipo 6 (Engineering, 2020)



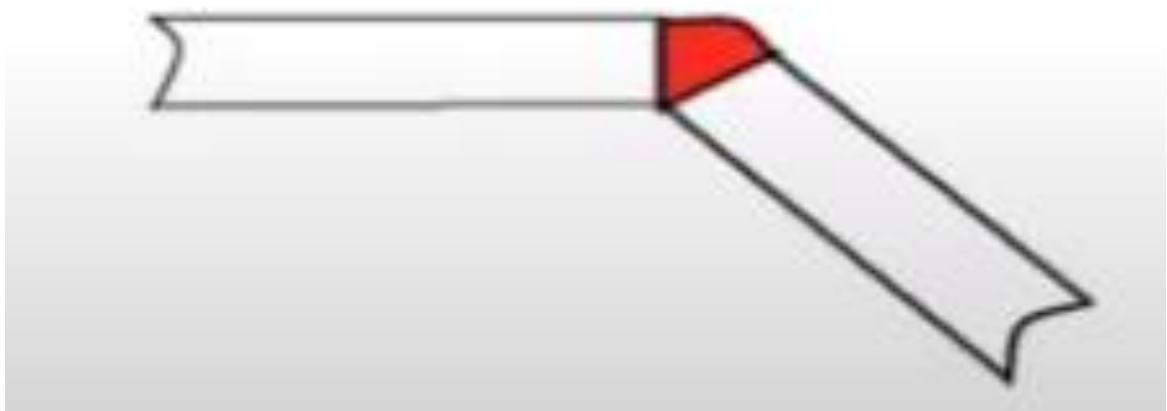
- **Tipo 7:** la soldadura es aplicada en forma de juntas de esquinas con penetración total o penetración parcial y/o filete soldado. Este tipo de soldadura es usada en la categoría C y D.

Figura 68. Junta tipo 7 (Engineering, 2020)



- **Tipo 8:** la soldadura es aplicada en forma de juntas en ángulo. Este tipo de soldadura es usada en la categoría B, C y D.

Figura 69. Junta tipo 8 (Engineering, 2020)



Apendice E. Categoría de juntas según ASME

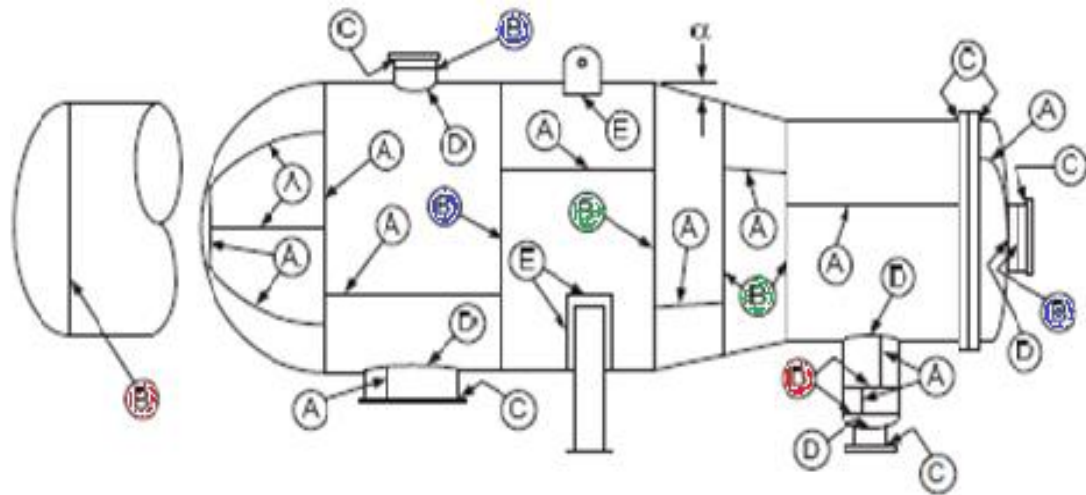
Categoría B

Las uniones de soldadura en esta categoría deben ser de Tipo 1, tipo 2 y tipo 3, se clasifican en tres (3) tipos principales que son juntas circunferenciales, juntas soldadas de transición y articulaciones circunferenciales.

- **Juntas circunferenciales:** se encuentran ubicadas en la carcasa principal, dentro de la cámara de comunicación de la celda principal cambiando el diámetro y las boquillas.

- **Juntas soldadas:** son las uniones de transiciones de diámetro y en el cilindro en el extremo grande o pequeño.
- **Articulación circunferencial:** son las articulaciones que se conectan del cabezal a otro elemento excepto los cabezales hemisféricos, también están presentes en la transición en boquillas de diámetro y cámaras comunicantes.

Figura 70. Categoría B (circunferenciales “azul”, soldada “verde”, circunferenciales “rojo” (Yuliana.R, 2005)

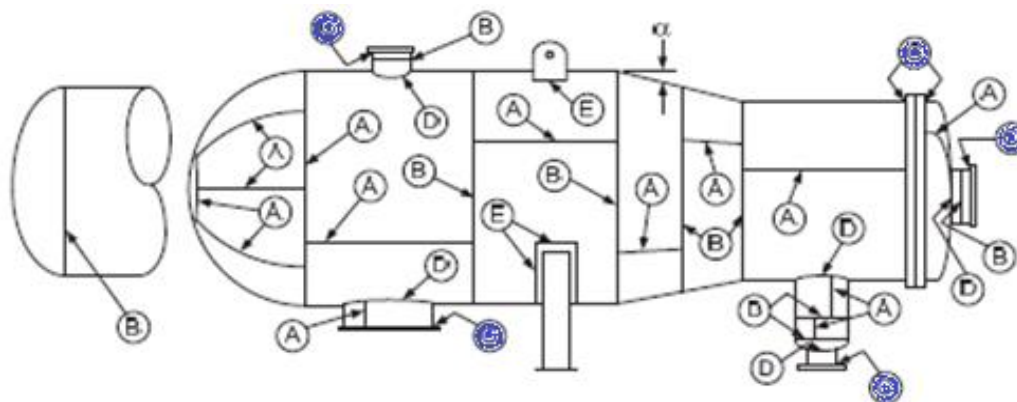


Categoría C

Las uniones de soldadura en esta categoría deben ser de Tipo 1 (a tope), juntas de esquina (penetración total) y juntas de soldadura en filete, se clasifican en uniones cabezal.

- **Uniones cabezal:** uniones soldadas que conectan bridas, solapas, placas tubulares o cabezas planas a la carcasa principal, a las cabezas formadas, a las transiciones de diámetro, a las boquillas o a las cámaras de comunicación.

Figura 71. Categoría C (Uniones cabezal “azul”) (Yuliana.R, 2005)

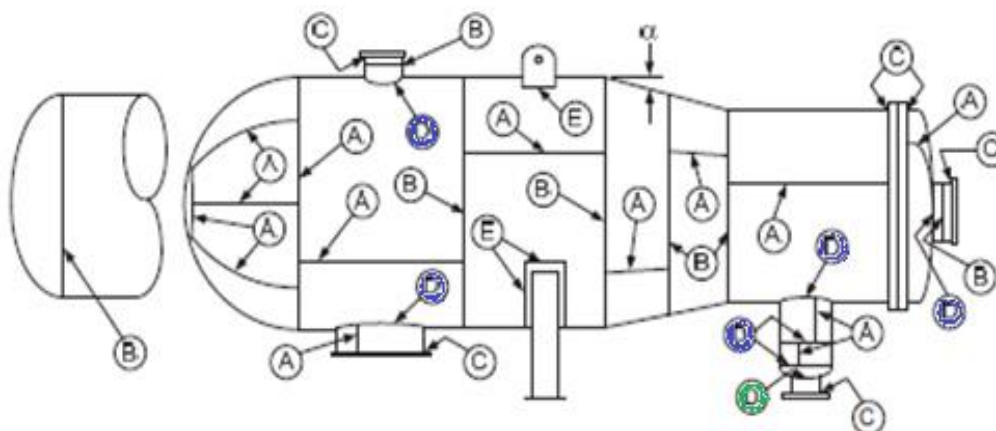


Categoría D

Las uniones de soldadura en esta categoría deben ser de Tipo 1 (a tope), juntas de filete (penetración total), se clasifican en dos (2) tipos principales que son uniones cabezal y juntas soldadas.

- **uniones cabezal:** Son las uniones entre la conexión comunicando con la cámara o la boquilla a las lanzas del caparazón principal, también transición en cabezas de diámetro y vasos de lado plano.
- **Juntas soldadas:** son las uniones de la boquilla en el extremo pequeño del diámetro de transición.

Figura 72. Categoría D – Uniones cabezal “azul”, junta soldada “verde” (Yuliana.R, 2005)



Características principales de las categorías de soldadura

Categoría A

- Uniones soldadas longitudinales y en espiral dentro de la carcasa principal, cámaras de comunicación, transiciones de diámetro o boquillas.
- Cualquier unión soldada dentro de una esfera, dentro de una cabeza formada o plana, o dentro de las placas laterales de un recipiente de lados planos
- Toda junta soldada a tope dentro de una placa tubular plana
- Las uniones soldadas circunferenciales que conecten las cabezas semiesféricas con los cascos principales, con las transiciones de diámetro, con las toberas o con cámaras de comunicación.

Categoría B

- Juntas soldadas circunferenciales dentro de la carcasa principal, las cámaras de comunicación, las toberas o las transiciones en diámetro incluidas las juntas entre la transición y un cilindro en el extremo grande o pequeño.
- Juntas soldadas circunferenciales que conecten cabezas formadas que no sean hemisféricas a casquillos principales, a transiciones en diámetro a boquillas, o a cámaras de comunicación

Categoría C

- Juntas soldadas que conectan las bridas, los solapamientos Van Stone, las placas tubulares o los cabezales planos a la carcasa principal, a los cabezales formados, a las transiciones en diámetro, a las toberas o a las cámaras de comunicación.
- Cualquier junta soldada que conecte una placa lateral con otra placa lateral de un recipiente de lados planos.

Categoría D

- Juntas soldadas que conecten cámaras comunicantes o toberas a cascos principales, a esferas, a transiciones de diámetro, a los cabezales o a los recipientes de lados planos.
- Juntas soldadas que conectan las toberas con las cámaras comunicantes (para las toberas situadas en el extremo pequeño de una transición de diámetro, véase la categoría B).

(Masa.J, 2015, pág. 138).

Apéndice F. Posición de aplicación de soldadura ASME sección IX**Posiciones en placa****Posición Plana (1G)**

Es la posición que corresponde cuando la pieza está en una superficie plana, mientras el material adicional es colocado directamente en dicha pieza en el mismo sentido y dirección de la ranura.

Posición horizontal (2G)

Es la posición en la que la pieza a soldar está en el plano vertical (frente a la cara del soldador) con la ranura en posición horizontal, donde se coloca el material a adicional de derecha a izquierdo o viceversa.

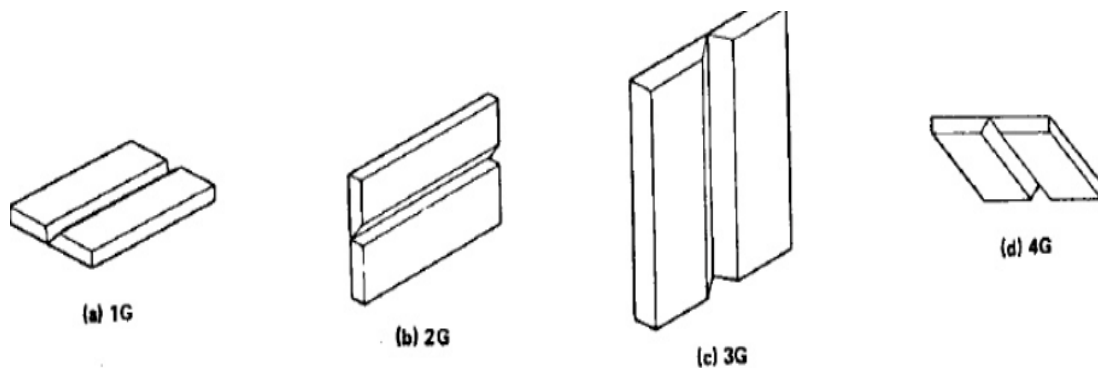
Posición vertical (3G)

Es la posición en la que la pieza a soldar está en el plano vertical (frente a la cara del soldador) con la ranura en posición vertical, donde se coloca el material a adicional de arriba a abajo o viceversa.

Posición sobre-cabeza (4G)

Es la posición en la que la pieza está ubicada a una altura superior con relación a la cabeza del soldador, el electrodo es ubicado en forma vertical apuntado a la parte inferior de la pieza.

Figura 73. Posiciones en placas para el proceso de soldadura en ranura según la ASME sección XI (fuente, 2016; ASME, Section IX, Welding and Brazing Qualifications, 2017)



QW-461.3 SOLDADURA EN RANURA EN PLACA — POSICIONES DE PRUEBA

Posiciones en tubos

Posición plana (1G)

La posición plana con relación a piezas en forma tubular se caracteriza por tener un eje horizontal que pasa por el centro de la pieza, además por el proceso para suministrar el material adicional de soldadura es rotada la pieza en su eje horizontal mientras es aplicada la soldadura desde la parte superior de la pieza. Figura 74(a)

Posición horizontal (2G)

La posición horizontal con relación a piezas en forma tubular se caracteriza por tener un eje vertical que pasa por el centro del tubo y tener el eje de soldadura en el plano horizontal al

igual que el eje de la ranura. La pieza tubular en este caso no genera ninguna rotación con respecto a su eje. Figura 74(b)

Posición múltiple (5G)

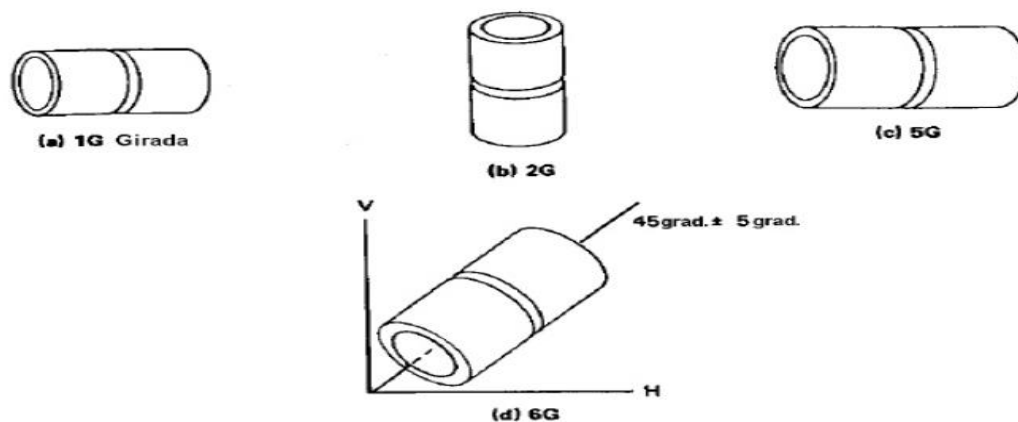
En esta posición el eje de tubo está en plano horizontal mientras eje de soldadura y ranura está en el plano vertical, en esta posición la pieza se encuentra quieta en comparación a la posición plana. Figura 74(c)

Posición múltiple (6G)

En la posición múltiple 6G establece una posición de inclinación de 45° de la pieza con respecto a la horizontal, igual que en las anteriores dos posiciones la pieza permanecerá sin movimiento en el proceso de suministro de soldadura.

Figura 74(d)

Figura 74. Posiciones en tubos para el proceso de soldadura en ranura según la ASME sección XI (fuente, 2016; ASME, Section IX, Welding and Brazing Qualifications, 2017)



QW-461.4 SOLDADURA EN RANURA EN TUBO—POSICIONES DE PRUEBA

Al momento de ser realizado el proceso de soldadura, la norma QW de la asociación americana de soldadores (AWS) permite tener una desviación de ± 15 grados a la posición de los planos horizontales y verticales, mientras de ± 5 grados en planos inclinados. (fuente, 2016)

Apéndice G. Técnicas de soldadura

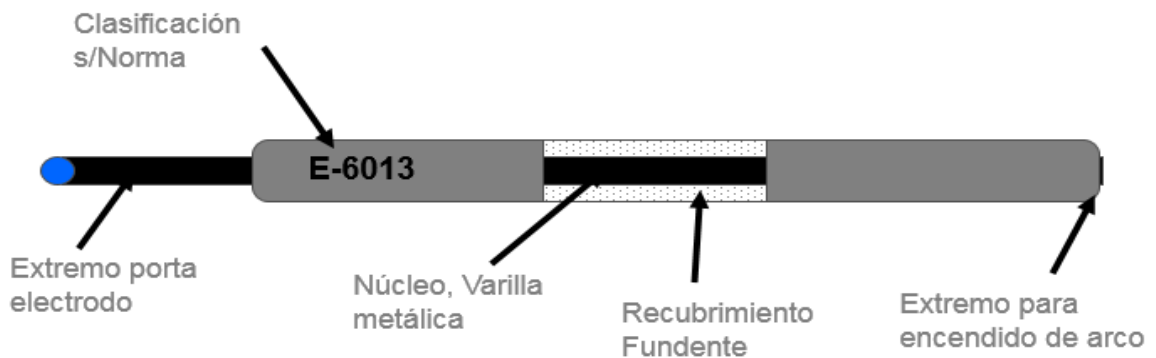
Soldadura SMAW

El proceso de soldadura por arco manual, identificado por la AWS como SMAW (Shield Metal Arc Welding), en este proceso se da uso de un electrodo revestido y de un metal base, los cuales, por medio de un arco eléctrico se unen por fundición (el metal base con el eléctrico revestido) a una temperatura aproximada de 3500°C , al momento de realizar el proceso de fundición se genera un baño de fusión o también conocido como pileta líquida, que va solidificando a medida que el electrodo se mueve a lo largo de la junta.

Figura 75. proceso de soldadura en ranura según la ASME sección XI (ASME, Section IX, Welding and Brazing Qualifications, 2017)



Figura 76. Partes de un electrodo (ESAB, Proceso de Soldadura - GMAW, 2017)



El realizar el proceso de soldadura por SMAW se deben de conocer algunas limitaciones y las ventajas al realizarlo, las cuales son:

Ventajas:

- Bajo nivel de inversión
- Capacidad de soldar la mayoría de los metales ferrosos y no ferrosos
- Acceso a juntas en lugares difíciles de llegada
- Proceso simple, flexible y portable
- Uso en exteriores, al aire libre

Limitaciones:

- La productividad, las velocidades de deposición con electrodo revestido son menores que aquéllas obtenidas el proceso de soldadura MIG-MAG
- El rendimiento del electrodo revestido (60%) es menor que el alambre macizo del proceso MIG-MAG (95%).

(ESAB, Proceso de Soldadura - SMAW, 2017)

Soldadura GTAW

El proceso de soldadura por arco de tungsteno con gas, identificado por la AWS como GTAW (Gas Tungsten Arc Welding), es un proceso de unión entre un electrodo de tungsteno y la pieza a soldar. Al igual que en la soldadura MIG, se da uso de un gas inerte que evita el contacto del aire con el baño de fusión y con el electrodo. El electrodo de Tungsteno esta siempre conectado a una fuente de corrientes continua o alterna, para llegar siempre a la temperatura de fusión.

Ventajas:

- Permite soldar en toda posición y todos los metales, a saber, aceros aleados, aluminio, magnesio, cobre, níquel y otros metales especiales, tales como el titanio y el circonio; es imprescindible para espesores finos.
- Debido a que el electrodo de tungsteno y el material de aporte son independientes, permite añadir sólo la cantidad adecuada, evitando generar soldaduras con sobre espesores innecesarios, con muy buen aspecto.
- Genera un decapado de la capa de óxido que recubre los metales, refractaria en el caso del aluminio, mientras que el gas inerte evita la regeneración de esta, lo que produce una soldadura limpia, sin escoria.
- No transfiere material a través del arco, por lo que no se producen salpicaduras.
- Permite al soldador ver bien la pileta líquida, con lo que podrá manejarla.
- Mantiene el arco aún con muy bajas corrientes, se puede soldar una amplia gama de espesores y hasta 4 mm de espesor sin preparación de bordes.
- Permite controlar la penetración, por lo que se usa para la pasada de raíz de finos y grandes espesores, luego se puede completar la junta con cualquier otro proceso.
- Aporta energía concentrada, con mínimas deformaciones y la zona afectada al calor.
- Permite obtener soldaduras con la misma composición química y propiedades mecánicas que el metal base, cuando no hay material de aporte.

Limitaciones:

- Velocidades de deposición son menores que aquéllas obtenidas con otros procesos de soldadura por arco eléctrico con consumible.
- Se requiere mayor habilidad del soldador que con electrodo revestido y MIG-MAG.
- Presenta baja tolerancia a los contaminantes de los consumibles o el metal base.

Figura 77. Máquina de soldadura (fuente, 2016)



Apéndice H. Metodo para determinar el ensayo de fatiga

El **método Stress-Life**, basado únicamente en los niveles de tensión, es el enfoque menos preciso especialmente para aplicaciones de bajo ciclo. Sin embargo, es el método más tradicional, ya que es el más fácil de implementar para una amplia gama de aplicaciones de diseño, tiene amplios datos de apoyo y representa adecuadamente las aplicaciones de alto ciclo.

El **método Strain-Life** implica un análisis más detallado de la deformación plástica en regiones localizadas donde se consideran las tensiones y deformaciones para estimar la vida útil. Este método es especialmente bueno para aplicaciones de fatiga de bajo ciclo. Al aplicar este método varias idealizaciones deben ser compuestas, por lo que existirán algunas incertidumbres

en los resultados. Por esta razón, se discutirá sólo por su valor en la adición a la comprensión de la naturaleza de la fatiga.

(Shirley.J.E. Mischke.C.R., 2011)

Apéndice I. Cargas en un recipiente sometido a presión

Presión interna: Ya que el esfuerzo longitudinal en los recipientes es sólo la mitad de los esfuerzos circunferenciales, aproximadamente la mitad del espesor de la envolvente nos sirve para soportar la carga debida al peso del equipo.

Presión externa: Si el recipiente no ha sido diseñado para soportar vacío total, porque se espera que el vacío ocurra solamente en condiciones accidentales, se deberá instalar una válvula rompedora de vacío, especialmente cuando la descarga del recipiente esté conectada a una bomba.

Cargas del viento: Cuando la relación t/r es muy pequeña en recipientes a presión, están expuestos a sufrir distorsión debida a la presión ejercida por el viento. De acuerdo con el Método de Zick, las experiencias indican que un recipiente diseñado para soportar una presión exterior de 1 libra/pulg²., tendrá la resistencia suficiente para soportar las cargas externas a las que será sometido en condiciones de operación normales.

Cargas por impacto: La experiencia nos ha demostrado que, durante el embarque y transporte de los recipientes a presión, pueden sufrir daños, debidos a los golpes recibidos. Debemos tener esto en mente al diseñar el ancho de las silletas y las dimensiones de las soldaduras.

Apéndice J. Curva de Wohler

Figura 78. Curva de Wöhler (S-N) de un material ferroso con su distribución típica (Shirley.J.E. Mischke.C.R., 2011)

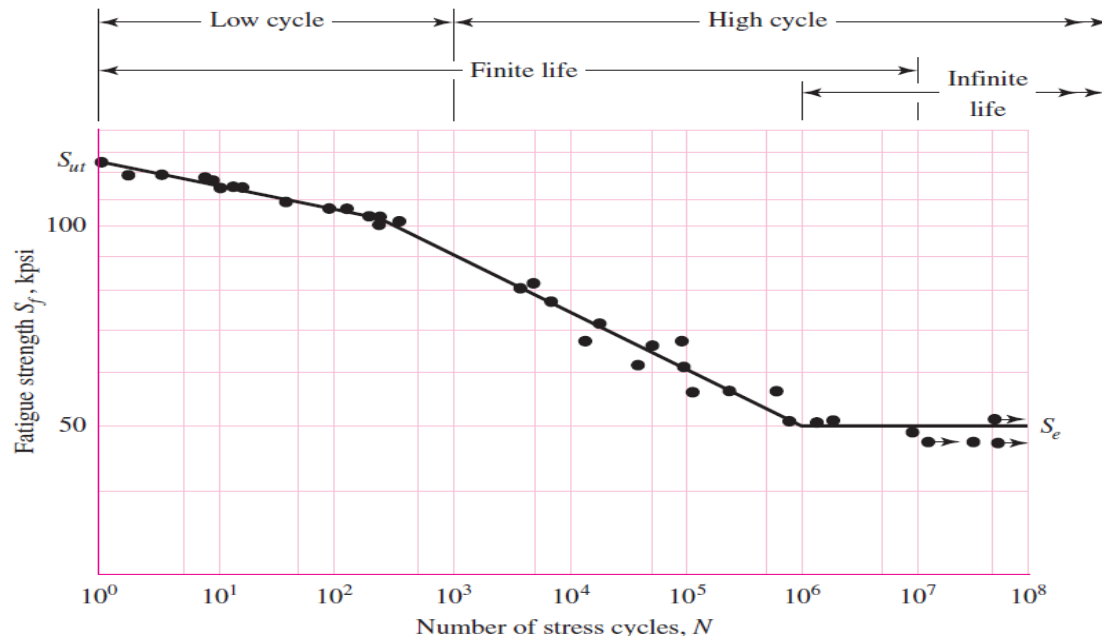
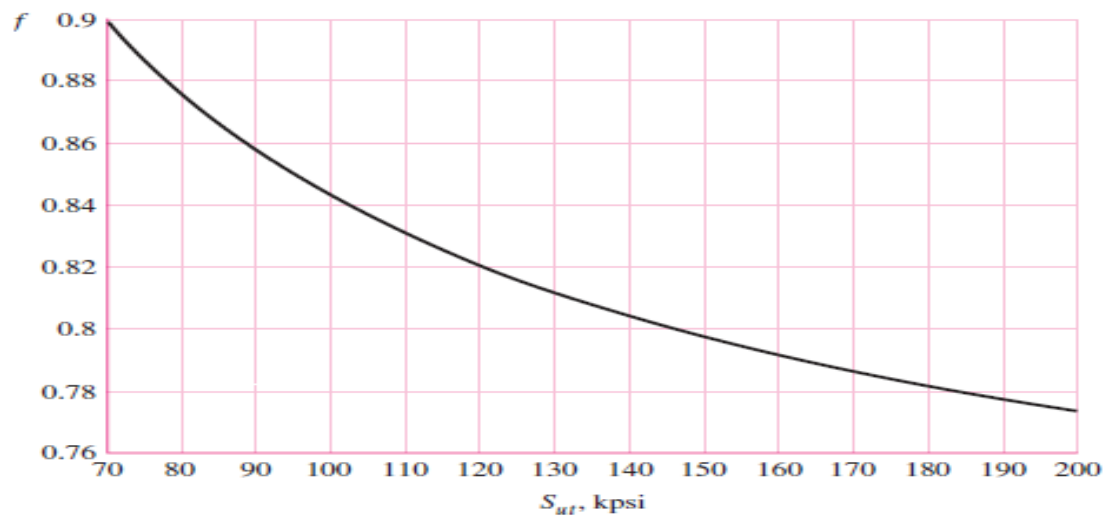


Figura 79. Curva para calcular el factor f (Fatigue Failure Resulting From Variable Loading, 1992)



Apendice K. Factores de Marin

Factor de modificación de la condición superficial (K_a)

El factor de modificación de la condición superficial está relacionado con el acabado de la superficie real de la pieza y la resistencia máxima del material de la pieza. Los acabados más comunes de piezas mecánicas y los que se tendrán en cuenta en este factor son: esmerilado, maquinado o laminado en frío, laminado en caliente, como sale de la forja. Al momento de cuantificar se dará uso de la siguiente función exponencial:

$$K_a = a * S_{ut}^b$$

Donde el factor a y b se toman de la (Tabla 1) dependiendo el acabado que tiene la superficie y la resistencia máxima del material.

Tabla 15. Valores a y b (Shirley.J.E. Mischke.C.R., 2011)

Factor a			
Superficie final	Sut (Kpsi)	Sut (MPa)	Exponente b
Esmerilado	1.34	1.58	-0.085
Laminado en frío	2.70	4.51	-0.265
Laminado en calor	14.4	57.7	-0.718
Forja	39.9	272	-0.995

Factor de modificación de tamaño (K_b)

El factor de modificación de tamaño está relacionado con las dimensiones de la pieza, para determinar de manera cuantitativa el valor de K_b es necesario clasificar la pieza según su forma y carga aplicada.

Para piezas circulares y giratorias afectadas por cargas de flexión y torsión, el valor de K_b este dado por:

Tabla 16. Tabla de modificación de tamaño. (Shirley.J.E. Mischke.C.R., 2011)

Kb	Condiciones cilíndricas
$0.879 * d^{-0.107}$	0.11<d<2 in
$0.91 * d^{-0.157}$	2<d<10 in
$1.24 * d^{-0.107}$	2.79<d<51 mm
$1.51 * d^{-0.157}$	51<d<254 mm

Para piezas no circulares, giratorias afectadas por cargas de flexión y torsión, se calcula un diámetro con la siguiente ecuación y se reemplaza en alguna de las ecuaciones anteriores dependiendo el valor del diámetro que se obtenga. Además, para piezas sometidas a cargas axiales, el valor de K_b es de 1.

Tabla 17. Tabla de valores Kb (Shirley.J.E. Mischke.C.R., 2011)

Kb	Condiciones no circulares
$d = 0.808\sqrt{hb}$	Viga rectangular giratoria
1	Cargas axiales

Factor de modelación de carga (K_c)

El factor de modelación de carga está relacionado con el tipo de carga que se le está aplicando a la pieza para el ensayo de fatiga, los valores de K_c para cada carga son:

Tabla 18. Tabla de valores K_c (Shirley.J.E. Mischke.C.R., 2011)

K_c	Carga
1	Flexión
0.85	Axial
0.59	Torsión

Factor de modelación de temperatura (K_d)

El factor de modelación de temperatura se tiene en cuenta cuando la temperatura del material de trabajo es superior a la temperatura ambiente, debido al límite de fluencia del material disminuye rápidamente con la temperatura como se muestra en la (Tabla 5), donde el factor K_d esta dado por la relacion $\frac{S_T}{S_{RT}}$.

Tabla 19. Tabla modelación de temperatura (Shirley.J.E. Mischke.C.R., 2011)

Temperatura, °C	St/Srt	Temperatura, °F	St/Srt
20	1.000	70	1.000
50	1.010	100	1.008
100	1.020	200	1.020
150	1.025	300	1.024
200	1.020	400	1.018
250	1.000	500	0.995
300	0.975	600	0.963
350	0.943	700	0.927
400	0.900	800	0.872
450	0.843	900	0.797
500	0.768	1000	0.698
550	0.672	1100	0.567
600	0.549		

Nota: si no se conoce S_e , se hace la equivalencia de $S_e=0.5 S_{ut}$ y el $K_d=1$

Factor de confiabilidad (K_e)

El factor de confiabilidad se relaciona con el límite medio de resistencia que se obtiene de la relación de $\frac{S'_e}{S_{ut}}$, donde para acero se tiene un valor de 0,5. Con base a esa relación se

origina la siguiente ecuación para determinar la confiabilidad:

$$K_e = 1 - 0,08 * Z_a$$

El valor de Z_a esta relacionado con la confiabilidad que se tiene, que puede oscilar entre 50% y el 99,999%, como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 20. Tabla de valores Z_e (Shirley.J.E. Mischke.C.R., 2011)

Reliability, %	Transformation Variate Z_e	Reliability Factor K_e
50	0	1.000
90	1.288	0.897
95	1.645	0.868
99	2.326	0.814
99.9	3.091	0.753
99.99	3.719	0.702
99.999	4.265	0.659
99.9999	4.753	0.620

Factor de modificación de efectos varios (K_f)

El factor de modificación de efectos es en donde se tienen analizan las concentraciones de esfuerzos ocasionadas por irregularidades o discontinuidades como muescas, agujeros, ranuras en la pieza aumentando las tensiones. Para determinar de manera cuantitativa el valor de este factor se utiliza la siguiente relación:

$$K_f = \frac{\text{tensión máxima en la probeta con muescas}}{\text{tensión en la probeta sin muescas}}$$

Apendice L. Propiedades de los materiales

Tabla 21. Propiedades químicas del acero estructural SA-516-70 (LEECO, 2020)

Elemento químico	Composición porcentual
Máx. de carbono, espesor $\leq 1/2"$	0.27 %
Máx. de carbono, espesor de $>1/2"$ a $\leq 2"$	0.28 %
Máx. de carbono, espesor de $>2"$ a $\leq 4"$	0.30 %
Máx. de carbono, espesor de $>4"$	0.31 %
Manganeso	0.85-1.20 %
Máx. de fósforo	0.025 %
Máx. de azufre	0.025 %
Silicio	0.15-0.40 %

Tabla 22. Propiedades químicas del electrodo AWS E7018 (WESTARCO, 2016)

Elemento químico	Composición porcentual
Carbono (C)	0.43 a 0.5 %
Silicio (Si)	0.4 a 0.65 %
Manganeso (Mn)	0.2 a 0.4 %
Azufre (S)	≤ 0.05 %
Fosforo (P)	≤ 0.04 %

Apendice M. Planos de la geometria de la junta soldada

