

**CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**ANÁLISIS ESTRUCTURAL PARA EL DISEÑO DE UNION SOLDADA  
CARGADA ESTÁTICAMENTE EN OREJAS DE IZAJE DE ACERO ASTM A36  
SOLDADAS MEDIANTE EL PROCESO GMAW**

**POR**

**RAFAEL ANTONIO PÉREZ GARCÍA**

**MONOGRAFÍA**

**EN OPCIÓN COMO ESPECIALISTA  
EN TECNOLOGÍA DE LA SOLDADURA INDUSTRIAL**

**SALTILLO, COAHUILA. ENERO DE 2017**

**CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**ANÁLISIS ESTRUCTURAL PARA EL DISEÑO DE UNION SOLDADA  
CARGADA ESTÁTICAMENTE EN OREJAS DE IZAJE DE ACERO ASTM A36  
SOLDADAS MEDIANTE EL PROCESO GMAW**

**POR**

**RAFAEL ANTONIO PÉREZ GARCÍA**

**MONOGRAFÍA**

**EN OPCIÓN COMO ESPECIALISTA  
EN TECNOLOGÍA DE LA SOLDADURA INDUSTRIAL**

**SALTILLO, COAHUILA. ENERO DE 2017**

# AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Melvyn la Dr. Alejandra y al Mtro. Fernando por sus correcciones en la estructura y redacción de este proyecto, por sus consejos y por regalarme parte de su experiencia.

A mis profesores, a la Dra. Rocio, Dra. Rita, Dra. Argelia, Dra. Alejandra, Dr. Victor, M.C. Fernando, Ing. Jose Eduardo, Dra. Gladys, Dr. Elias, Mtra. Pilar, por brindarnos su experiencia y conocimientos, con atinos y desatinos, pero enriquecedores.

A mis compañeros no a todos, pero si en especial a mi compañera de licenciatura y amiga y guía en este proceso, Medy.

# DEDICATORIAS

A mi madre. María Guadalupe García Concepción

# ÍNDICE

<b>SÍNTESIS .....</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO 1.....</b>	<b>3</b>
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>3</b>
1.1 ANTECEDENTES.....	3
1.2 OBJETIVOS.....	5
1.2.1 Objetivo general.....	5
1.2.2 Objetivos específicos.....	5
1.3 JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO.....	5
1.4 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	6
1.5 APORTACIÓN .....	6
1.6 ALCANCE .....	6
<b>CAPÍTULO 2.....</b>	<b>7</b>
<b>MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE .....</b>	<b>7</b>
2.1 ACEROS ESTRUCTURALES .....	7
2.1.1 Clasificación de los aceros .....	9
2.1.2 Acero ASTM A36 .....	9
2.1.2.1 Elementos químicos aleantes del acero ASTM A36 .....	10
2.2 PROCESO GMAW .....	12
2.2.1 Principios de operación.....	13

2.2.2 Consumibles .....	15
2.3 UNIONES SOLDADAS .....	16
2.3.1 Tipos de soldaduras.....	18
2.3.2 Tipos de juntas .....	22
2.3.3 Posición de soldadura.....	22
2.3.4 Símbolos en soldadura .....	23
2.3.5 Calidad en soldadura .....	24
2.4 ECUACIONES DE DISEÑO .....	26
2.4.1 Teoría Euler-Bernoulli .....	28
2.4.2 La soldadura considerada como una línea .....	29
2.4.3 Tipos de esfuerzos en las uniones soldadas .....	34
2.4.3.1 Tensión y compresión.....	34
2.4.3.2 Cortante .....	36
2.4.3.3 Flexión .....	37
2.4.3.4 Torsión.....	39
2.5 FALLAS EN CONEXIONES SOLDADAS .....	41
2.5.1 Normas oficiales .....	43
2.5.2 Enfoque analítico y teórico.....	45
2.5.3 Falla de conexiones en estructuras soldadas por terremotos.....	47
2.5.4 Momento resistente en marcos de acero .....	49
2.5.4.1 Comportamiento de las uniones soldadas de momento resistente de marcos viga-columna.....	50
2.6 USO DE SOFTWARE PARA EL ANÁLISIS Y DISEÑO DE UNIONES SOLDADAS .....	54
<b>CAPÍTULO 3.....</b>	<b>59</b>
<b>DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>59</b>
<b>CAPÍTULO 4.....</b>	<b>62</b>
<b>CASO DE ESTUDIO.....</b>	<b>62</b>
4.1 Descripción de la metodología.....	62
4.2 Propuesta de unión.....	63

4.2.1 Metal base .....	67
4.2.2 Metal de aporte .....	67
4.3 Diseño de unión soldada .....	68
4.3.1 Factor de Carga y Resistencia .....	69
4.3.2 Determinación de esfuerzos por unidad de longitud .....	71
4.3.2.1 Obtención de tamaño y garganta de soldadura. ....	72
4.3.3 Determinación de esfuerzos mediante software .....	74
4.3.3.1 Obtención de tamaño de soldadura. ....	78
4.4 Ensayo de tensión .....	80
<b>CAPÍTULO 5.....</b>	<b>85</b>
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>85</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>87</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>88</b>
<b>LISTADO DE TABLAS.....</b>	<b>92</b>
<b>LISTADO DE FIGURAS .....</b>	<b>93</b>

# SÍNTESIS

Con el fin de identificar los principios fundamentales que se utilizan en el análisis estructural para el diseño de uniones soldadas y las consideraciones que se tienen de acuerdo al código D1.1, se ha llevado a cabo un análisis comparativo con las necesidades reales que se presentan durante el proceso de soldadura por arco metálico y gas (GMAW, por sus siglas en inglés, *Gas Metal Arc Welding*) en uniones de filete en acero ASTM A36. Para dicho análisis se ha considerado tanto la composición química del metal base como la del metal de aporte.

Los resultados analíticos y experimentales demostraron que la teoría de la viga en la cual se basan las ecuaciones de diseño de uniones soldadas, no da predicciones precisas acerca de la transmisión de esfuerzos, esto debido a que el diseño de uniones soldadas se basa en normas oficiales, las cuales son precavidas con el fin de preservar la integridad estructural.

La utilización del software SAP2000 revelo ser una herramienta capaz de analizar, diseñar y optimizar con mayor precisión en comparación con los métodos de análisis convencionales debido a su capacidad de incluir fenómenos externos y manejar a la unión soldada como un elemento heterogéneo.



La unión fue diseñada de acuerdo a la especificación por Factor de Carga y Resistencia (LRFD, por sus siglas en inglés, *Load and Resistance Factor Desing*). Considerando el 40% adicional del peso muerto de la estructura analizada.

De acuerdo a la comparación de la sección transversal de soldadura obtenido mediante el análisis estructural convencional y el obtenido mediante el software SAP2000 se encontró que se pudo reducir la sección transversal de la soldadura hasta 51.02% mediante la optimización de datos.

La probeta fue sometida a un ensayo de tensión donde la fractura ocurrió a 37500kgf, un esfuerzo 10 veces superior a la carga de diseño.

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 ANTECEDENTES

Una estructura soldada es un conjunto de piezas y componentes unidos por soldadura. Puede ser desde un puente, la estructura de un edificio, un automóvil, la carrocería de un camión, el enganche de un remolque, una pieza de maquinaria, o hasta una estructura en alta mar para la perforación y extracción de petróleo. En el campo del diseño de la soldadura, los objetivos primarios son producir estructuras que (1):

1. lleven a cabo las funciones previstas;
2. tengan la confiabilidad y seguridad requerida; y
3. puedan ser fabricados, inspeccionados, transportados y puestos en servicio con un costo total mínimo.

Este costo total incluye el costo del diseño, materiales, fabricación, montaje, inspección, operación, reparación y mantenimiento de la estructura.

Un diseñador de estructuras soldadas debe tener comprensión de los principios y conceptos básicos del diseño de soldadura. Tiene que tener conocimiento y experiencia en corte y conformado de metales; el montaje de los componentes; la preparación y la fabricación de las uniones soldadas; la evaluación de las soldaduras en el cumplimiento de los criterios de aceptación establecidos; como son la realización de pruebas no destructivas y pruebas mecánicas. Los diseñadores aplican rutinariamente conocimiento de las siguientes áreas cuando evalúan los efectos que se pueden presentar en el diseño de estructuras soldadas (1):

1. Propiedades mecánicas y físicas de los metales y piezas soldadas
2. Soldabilidad de los metales;
3. Costos y las variaciones en los procesos de soldadura;
4. Propiedades de los metales de aporte;
5. Efectos térmicos de la soldadura;
6. Efectos de restricción y concentraciones de esfuerzo;
7. Control de las distorsiones;
8. El uso eficiente de acero, aluminio y otros metales en piezas soldadas;
9. Diseño de rigidez o flexibilidad en vigas soldadas y otros elementos estructurales apropiados;
10. Diseño para la resistencia a la torsión;
11. Efectos de la deformación por temperatura inducidas por la soldadura en elementos restringidos;
12. Efectos de las tensiones inducidas por soldadura en combinación con los esfuerzos de diseño;
13. Consideraciones prácticas de soldadura y la selección de diseños de unión adecuados para su aplicación.
14. Comunicación de quien realiza el diseño de soldadura al taller de fabricación, incluyendo el uso de símbolos de soldadura; y
15. Códigos aplicables de soldadura y normas de seguridad.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 Objetivo general**

Realizar estudio del estado del arte del análisis estructural y su aplicación para el diseño de uniones soldadas bajo cargas estáticas aplicadas en aceros estructurales.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- Identificar los principios fundamentales utilizados en el análisis estructural para el diseño de uniones soldadas.
- Diseñar una unión de filete bajo los requerimientos utilizados para el diseño de uniones soldadas.
- Comparar los principios del diseño de uniones soldadas en el código D1.1 y las necesidades reales que se presentan durante el proceso de soldadura.
- Realizar un caso de estudio para comparar los principios en los que se fundamenta el diseño estructural de uniones soldadas en el código D1.1 con el proceso real de soldadura.

## **1.3 JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO**

Los enfoques experimentales proporcionan información directa sobre el comportamiento de la estructura, en este documento se busca subrayar la importancia de las observaciones experimentales y los procedimientos prácticos con el fin de evaluar la magnitud de esfuerzo-deformación que podrían llevar a algunos componentes a condiciones de trabajo inseguras.

Los enfoques experimentales pueden apoyar fuertemente a los diseñadores involucrados en la industria de la soldadura en donde se necesita una respuesta rápida y confiable.

## **1.4 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

El diseño de estructuras soldadas bajo cargas se rige por dos exigencias contradictorias:

Se busca minimizar el peso de la estructura sin comprometer la seguridad de la misma, y además para el diseño de uniones soldadas, cualquier enfoque teórico y numérico se basa necesariamente en algunos supuestos simplificadores, debido a lo complejo de los fenómenos que se presentan durante el proceso de soldadura esto podría representar dejar pasar por alto alguno de los aspectos reales que intervienen en el comportamiento de la estructura.

## **1.5 APORTACIÓN**

Con el presente documento se busca la recopilación del estado del arte del análisis estructural y su aplicación en el diseño de uniones soldadas con el fin de brindar a quien consulte, la información necesaria para la toma de decisiones en el diseño de unión de filete utilizando acero ASTM A36.

## **1.6 ALCANCE**

En el presente documento se busca conocer los procedimientos y lineamientos para llevar a cabo un correcto diseño de unión para soldadura de filete a través del proceso de soldadura GMAW en acero estructural ASTM A36.

## **CAPÍTULO 2**

# **MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE**

### **2.1 ACEROS ESTRUCTURALES**

Los aceros son básicamente aleaciones de hierro y otros elementos presentes en la tabla periódica. La gran mayoría de aceros contienen carbono como principal elemento de aleación. Como una definición general, el acero es una aleación de hierro, carbono (menos de 2% de C), y otros elementos de aleación, el cual es capaz de ser deformado de varias formas ya sea en caliente o frío. Los aceros son los materiales metálicos más utilizados y menos costosos en la tierra (2).

En general, los aceros al carbono y de baja aleación entran en un sistema de clasificación basado en la composición. Los aceros de alta aleación (los,

resistentes al desgaste, aceros inoxidable, resistentes al calor, etc.) pueden ser clasificados de acuerdo a muchos sistemas diferentes, incluyendo la composición, microestructura, la aplicación o especificación. En el diagrama de la Figura 2. 1 se muestra de manera general la clasificación de los aceros. En el lado izquierdo del diagrama se clasifican por su nombre comercial o aplicación y en el lado derecho por microestructura (3).

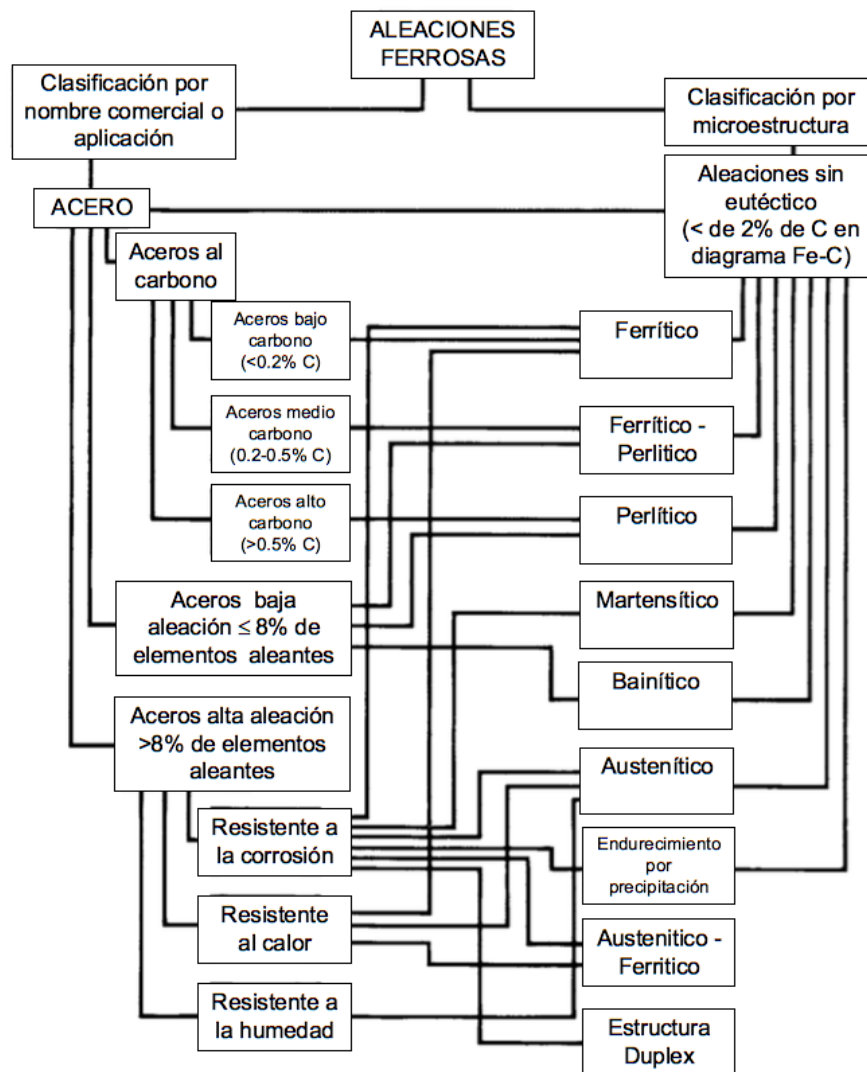


Figura 2. 1 Aleaciones ferrosas (3).

### **2.1.1 Clasificación de los aceros**

Existen diferentes sistemas de clasificación para los aceros, debido a la complejidad de estos diferentes sistemas de clasificación se describen en este documento los principales utilizados en la industria.

#### **AISI/SAE**

El Instituto Americano del Hierro y el Acero (AISI, por sus siglas en inglés, *The American Iron and Steel Institute*) y la Sociedad de Ingenieros Automotrices (SAE, por sus siglas en inglés, *Society of Automotive Engineers*). Este sistema se basa únicamente en la composición. En la designación de código de cuatro o cinco dígitos, los últimos dos o tres dígitos representan el contenido de carbono utilizando tres dígitos para los aceros con un contenido mayor al 1,00% de carbono y los dos primeros dígitos representan la clase de composición. Por lo tanto, en un acero AISI/SAE 1040, el "10" representa la clase de acero y el "40" representa el contenido de carbono de 0,40% de C (3).

#### **ASTM**

La Sociedad Americana de Ensayos y Materiales (ASTM, por sus siglas en inglés, *The American Society for Testing and Materials*). Este sistema fue diseñado por ASTM. Este sistema no se basa en la composición sino en el producto de acero y su aplicación, por ejemplo, rieles de ferrocarril, tubos de calderas, placas y pernos. ASTM ha ideado un sistema de especificaciones que contienen composición, propiedades mecánicas y otras características requeridas en los aceros e hierros fundidos (4).

### **2.1.2 Acero ASTM A36**

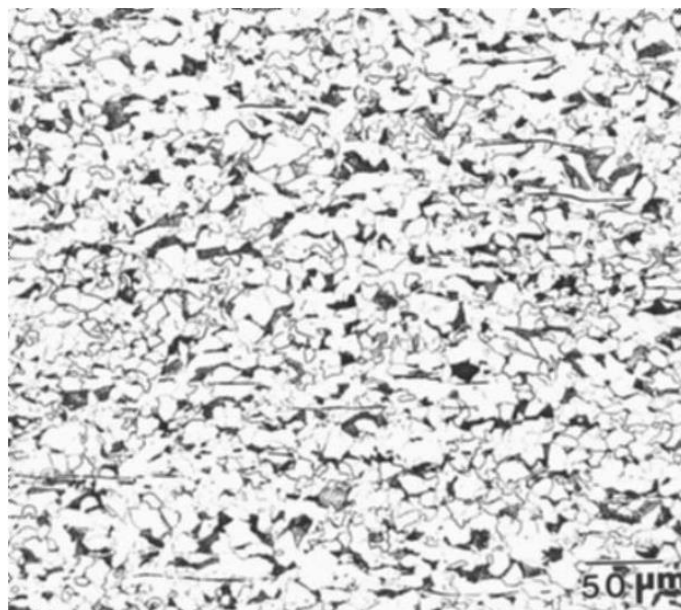
El acero ASTM A36 es un acero formado por Hierro, Carbono, Manganeso, Fosforo, Azufre, Silicio y Cobre. En la Tabla 2. 1 se muestra la composición química del acero ASTM A36 de acuerdo a la especificación ASTM.



**Tabla 2. 1 Especificación ASTM de la composición química del acero ASTM A36 (5)**

ASTM A36	Requisitos químicos					
	C (Máx.)	Mn	P (Máx.)	S(Máx.)	Si (Máx.)	Cu (Min.)
	0.25	-	0.030	0.030	0.40 Max	0.20

La microestructura de un acero estructural ASTM A 36 típico se muestra en la Figura 2. 2 La microestructura es una mezcla de perlita y ferrita, con algunas bandas de sulfuro de manganeso.



**Figura 2. 2 Micrografía de acero estructural ASTM A 36 que muestra una microestructura constituida por ferrita (componente claro) y perlita (componente oscuro). Revelado por 4% picral seguido por 2% nital a 200X (3).**

### **2.1.2.1 Elementos químicos aleantes del acero ASTM A36**

La clasificación de los aceros puede presentarse por su composición química. Los elementos de aleación son agregados al hierro con el fin de conseguir propiedades y características específicas. Dentro de estos elementos se incluyen, pero no se limitan al Carbono, Manganeso, Fosforo, Azufre, Silicio y Cobre (6).

Elemento	Función
<b>Carbono</b> <b>(C)</b>	Elemento de aleación esencial en la mayoría de los aceros. Añadido para aumentar la resistencia y la dureza, así como para aumentar la templabilidad. Se disuelve en el hierro para formar ferrita y austenita. Se combina con el hierro para formar un carburo (Cementita-Fe <sub>3</sub> C). El carburo es un componente de perlita.
<b>Manganeso</b> <b>(Mn)</b>	Elemento de aleación esencial en la mayoría de los aceros. Añadido para aumentar la resistencia y la dureza, así como para aumentar la templabilidad. Contrarresta la fragilidad causada por azufre (sulfuro de hierro) a través de la formación de un sulfuro de manganeso (MnS). Los altos niveles de manganeso producen un acero austenítico con una mejor resistencia al desgaste y la abrasión.
<b>Fosforo</b> <b>(P)</b>	Considerado como una impureza en la mayoría de los aceros. Se puede añadir a los aceros de bajo carbono para aumentar la resistencia y dureza. Mejora la maquinabilidad de los aceros de fácil mecanización. Promueve la fragilización por temperatura. Forma un fosfuro de hierro no deseado (Fe <sub>3</sub> P) a niveles altos de fosfuro (sobre todo en el molde tipo plancha).
<b>Azufre</b> <b>(S)</b>	Considerado como una impureza en el acero. Se añade a los aceros especiales para mejorar la maquinabilidad.
<b>Silicio</b> <b>(Si)</b>	Elemento de aleación esencial en la mayoría de aceros. Añadido para aumentar la resistencia y la dureza, así como para aumentar la templabilidad. Se añade al acero fundido para eliminar el oxígeno (desoxidante). No forma carburos. Mejora la resistencia a la oxidación. Se agrega a los aceros especiales

para mejorar las propiedades eléctricas y magnéticas, así como su capacidad de endurecimiento.

**Cobre (Cu)** Generalmente se considera un elemento de impureza, en la mayoría de los aceros, ya que promueve la falta de fusión. Se añade a algunos aceros para mejorar la resistencia a la corrosión. Se añade en aceros especiales para mayor resistencia y dureza mediante tratamiento térmico (envejecimiento). Muy insoluble en hierro a temperatura ambiente y no es formador de carburo.

---

## 2.2 PROCESO GMAW

La soldadura es el método más eficaz y es el único posible de unir dos piezas metálicas y hacerlas funcionar como un solo elemento. Es un proceso de unión de materiales que produce su coalescencia calentándolos a temperatura de fusión, con o sin la aplicación de presión, o por medio de la aplicación de calor solamente y con o sin el uso de material de aporte (7).

El proceso de Soldadura por Arco de Metal y Gas (GMAW, por sus siglas en inglés, *Gas Metal Arc Welding*) es un proceso de soldadura por arco que emplea un arco entre un electrodo continuo de metal de aporte y el charco de soldadura. El proceso se realiza bajo un escudo de gas suministrado externamente y sin aplicación de presión (8).

Es un proceso que consiste de una corriente directa con polaridad invertida (CD y PI, por sus respectivas iniciales), en el cual el electrodo consumible es protegido del aire por medio de una atmósfera como se muestra en la Figura 2. 3. También puede ser usado con polaridad directa, sin embargo, ésta presenta menor profundidad de penetración (9).

Todos los metales importantes comerciales como acero al carbono, baja aleación y alta resistencia, aceros inoxidable, aluminio, cobre, titanio, y aleaciones base níquel pueden ser soldados en todas posiciones con este proceso seleccionando apropiadamente el gas de protección, electrodo y variables del proceso (8).

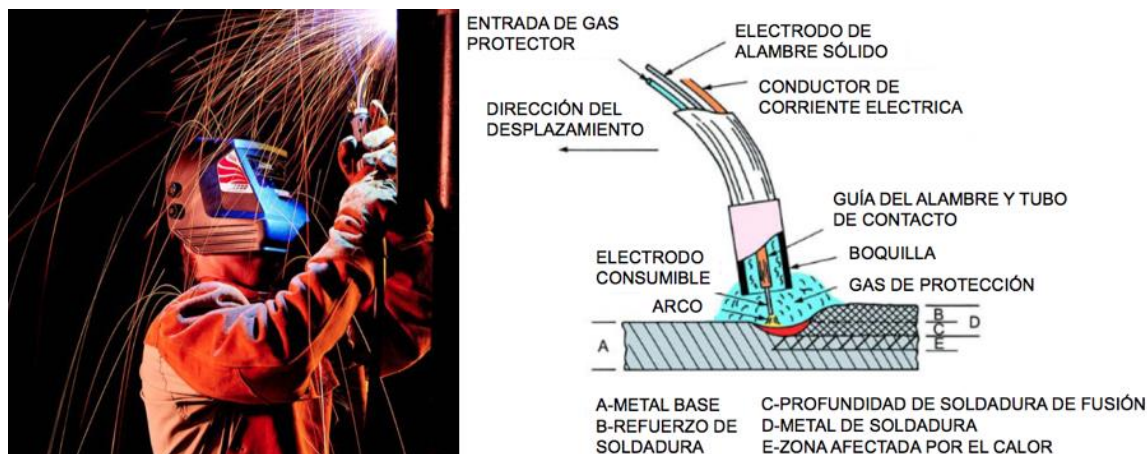


Figura 2. 3 Proceso de Soldadura por arco de metal y gas (9).

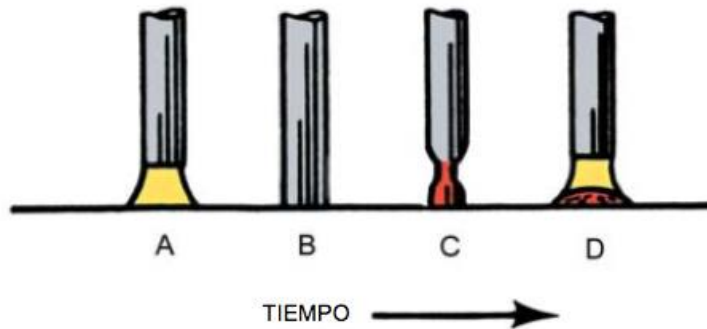
### 2.2.1 Principios de operación

El proceso GMAW se basa en la alimentación automática de un electrodo continuo consumible que se protege mediante un gas de procedencia externa. El equipo puede regular automáticamente las características eléctricas del arco.

La pistola guía el electrodo consumible y conduce la corriente eléctrica y el gas protector a la pieza de trabajo, esto proporciona la energía para establecer y mantener el arco y fundir el electrodo, además de proteger contra la atmosfera del entorno.

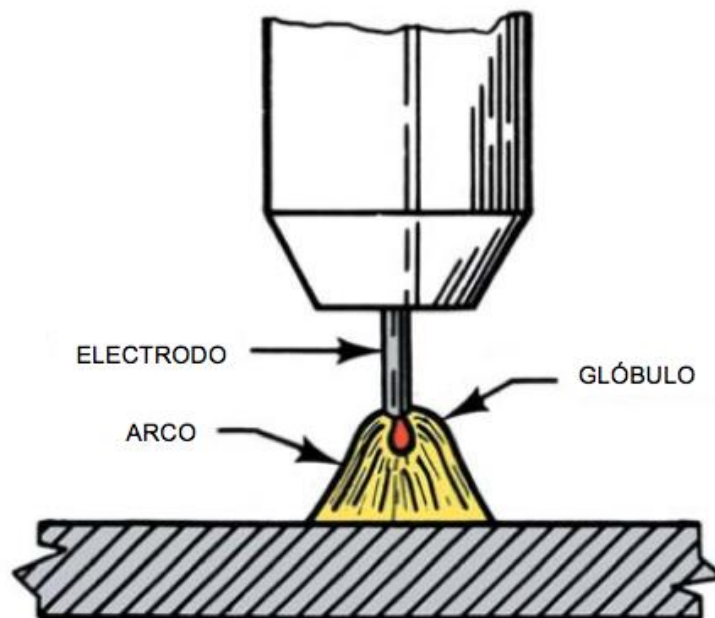
La mejor forma de describir las características del proceso GMAW es el término de los mecanismos básicos empleados para transferir el metal del electrodo a la pieza de trabajo (8).

1. Transferencia en corto circuito. Abarca el intervalo más bajo de corriente y de diámetro del electrodo. Genera un charco pequeño apropiado para unir secciones delgadas, soldar fuera de posición y tapar aberturas de raíz anchas (8).



**Figura 2. 4 Modo de transferencia de metal por corto circuito, GMAW (9).**

2. Transferencia globular. Con corriente continua electrodo al positivo (CCEP por sus iniciales) existe transferencia globular con temperatura baja. Con CO<sub>2</sub> y He como gas de protección, ocurre esta transferencia con todas las corrientes de soldadura. El tamaño de gota es mayor que el tamaño del electrodo (8).



**Figura 2. 5 Modo de transferencia de metal por glóbulo, GMAW (9).**

3. Transferencia espray o rocío. Se produce con una protección rica en argón. Se debe usar CCEP, no se aplica en soldaduras fuera de posición, a menos que se emplee una fuente de poder con arco pulsado que produce ondas y frecuencias controladas que pulsan la corriente de soldadura (8).

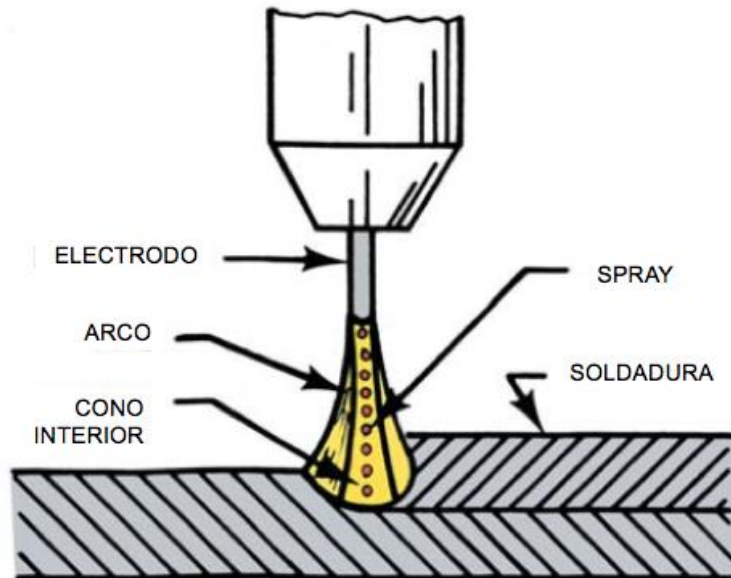


Figura 2. 6 Modo de transferencia de metal por spray, GMAW (9).

## 2.2.2 Consumibles

### Electrodos

Los electrodos que se utilizan para GMAW son de diámetro muy pequeño si se les compara con los de la soldadura por arco sumergido o por arco con núcleo de fundente. Como los diámetros de electrodo son pequeños y las corrientes relativamente altas, las velocidades de alimentación de alambre en GMAW son altas, desde unos 40 hasta 340mm/s. Los electrodos se proveen en forma de hilos continuos de alambre, los alambres están enrollados en carretes o en bobinas (8).

La selección de metal de aporte adecuado se define como aquel que logre las siguientes características en el metal de soldadura (8):

1. Depósito similar al del metal base (propiedades mecánicas y físicas).
2. Metal de soldadura íntegro y sin discontinuidades.
3. Resistencia mecánica igual o superior al metal base.

### **Gas de protección**

El gas de protección impide que la atmósfera entre en contacto con el metal fundido. Si esto llega a ocurrir podemos tener en el metal de soldadura porosidad, una gran tendencia a formar óxidos, se disminuye la tendencia a formar nitruros y el oxígeno reacciona con el carbono formando CO<sub>2</sub> o CO.

Principales efectos del gas de protección (8):

1. Características del arco.
2. Contribuye al tipo de transferencia del metal.
3. Penetración en la soldadura.
4. Acción limpiadora.
5. Propiedades mecánicas del metal de soldadura.
6. Velocidad de soldadura.

## **2.3 UNIONES SOLDADAS**

Las conexiones son parte íntima en una estructura de acero y un manejo adecuado es esencial para considerar a una estructura segura y económica. Hay dos formas comunes de conectar miembros metálicos estructurales; con pernos y con soldadura. En la presente investigación se estudian las conexiones soldadas.

Las conexiones soldadas se utilizan debido a su simplicidad de diseño, la utilización de un menor número de piezas, menos material y la disminución de mano de obra por fabricación y operación. Frecuentemente una combinación de soldadura de taller y de campo es ventajosa. Por ejemplo, en conexiones soldadas en ángulo los problemas de espacio entre elementos pueden disminuir respecto a una conexión totalmente atornillada (10).

Las conexiones soldadas tienen una rigidez que puede ser ventajosa si se cuenta con un diseño adecuado. Las armaduras soldadas, por ejemplo, presentan menos rotación que las armaduras atornilladas, debido a que el extremo de un miembro soldado en una articulación no puede girar con respecto a los otros miembros. Sí el extremo de una viga está soldada a una columna, la rotación ahí es prácticamente la misma para la columna y la viga.

Sin embargo, una desventaja de la soldadura, son los esfuerzos residuales que se presentan en soldaduras de grandes dimensiones. Esto es especialmente importante en estructuras de grandes dimensiones en las que habrá un efecto acumulativo.

Realizada correctamente y con un diseño apropiado la soldadura debe ser más fuerte que el metal base. Una soldadura realizada inapropiadamente, incluso teniendo buen aspecto puede ser ineficiente. Realizada correctamente, una soldadura tiene la penetración requerida y no presenta fragilidad.

Los procedimientos de soldadura, y procedimientos para soldadores calificados están cubiertos por el código AWS D1.1, Código de soldadura para estructuras de acero, de la Sociedad Americana de Soldadura (AWS, por sus siglas en inglés, *American Welding Society*). Los procedimientos convencionales de soldaduras en aceros estructurales cuando se hace de conformidad con las especificaciones AWS pueden ser especificados por nota o símbolo con la garantía de que se obtendrá una buena conexión.

En la fabricación de una pieza soldada, los diseñadores deben especificar sólo la cantidad y tamaño de soldadura que se requiere realmente. En general, el espesor de 5/16 de pulgada se considera como espesor máximo aplicado en soldadura para una sola pasada. Una soldadura de 3/8, requiere tres pases de soldadura y por lo tanto genera un aumento en el costo de producción (10).



El costo de producción depende del diseño de las conexiones soldadas y puede variar aproximadamente un tercio del costo original, por lo tanto, los diseñadores deben tener en cuenta los trabajos necesarios para la fabricación y montaje de los miembros para ser soldados (10).

### **2.3.1 Tipos de soldaduras**

Los principales tipos de soldadura utilizados para el acero estructural son filete, tapón, muesca y ranura. La soldadura comúnmente más utilizada es de filete, es utilizada para cargas ligeras y es la más económica debido a que requiere poca preparación del metal base, para cargas pesadas la soldadura por ranura es más eficiente ya que el esfuerzo total del metal base se puede transmitir fácilmente. El uso de la soldadura por tapón y muesca en general se limita a condiciones especiales en las que el filete o ranura no son prácticos.

Más de un tipo de soldadura puede ser utilizado en una conexión, si es así, la capacidad de la conexión es la suma de la capacidad efectiva de cada tipo de soldadura utilizada, calculada por separado con respecto al eje del grupo de conexiones.

Los puntos de soldadura pueden ser utilizados para el montaje o traslado de las piezas al lugar de ensamble. No se les asigna ninguna carga de tensión en la estructura final, en algunos casos estas soldaduras se deben retirar después del montaje final de la construcción (11).

#### **Soldadura de filete**

Tiene la forma general de un triángulo isósceles. El tamaño de la soldadura está dado por la longitud de la pierna. La resistencia está determinada por el espesor de garganta, la cual es la distancia más corta desde la raíz (intersección de las piernas) a la cara de la soldadura. Si las dos piernas son desiguales, el tamaño nominal de la soldadura está dado por la más corta de

las piernas. Si las soldaduras son cóncavas la garganta se reduce y consecuentemente también la resistencia.

La soldadura de filete es utilizada para la unión de dos superficies aproximadamente en ángulo recto entre sí. Las uniones pueden ser de traslape, T o de esquina. Las soldaduras de filete también se pueden usar con soldaduras de ranura para reforzar uniones de esquina. En una junta tipo te sesgada, el ángulo de depósito de soldadura puede variar hasta  $30^\circ$  respecto a la perpendicular y un borde de esquina puede ser conectado con una elevación de hasta  $3/16$  de pulgada. Si la separación es mayor que  $1/16$  de pulgada, la pierna de la soldadura debe incrementarse por la cantidad de la abertura de raíz (10) (11).

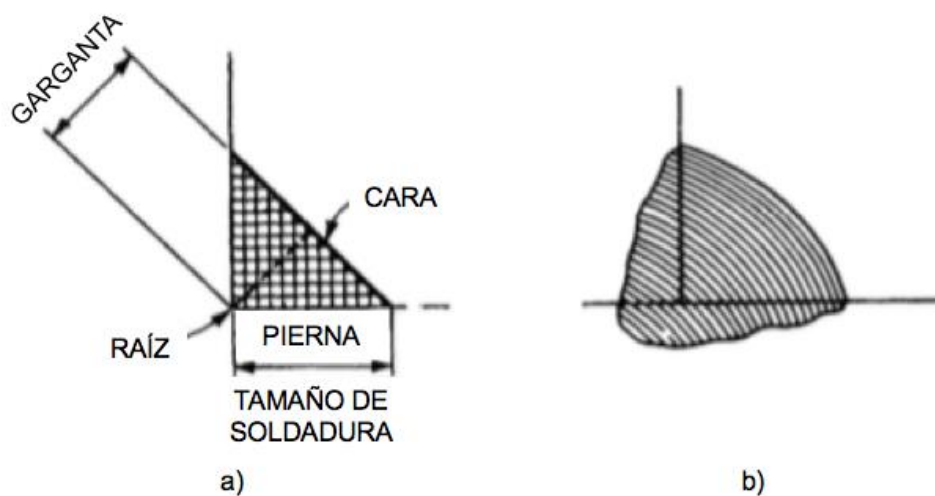


Figura 2. 7 Soldadura de filete: a) Sección transversal teórica y b) Sección transversal real (10).

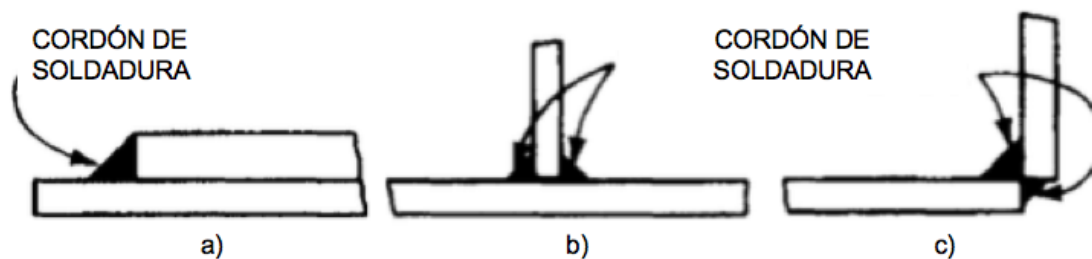


Figura 2. 8 Uniones de a) Traslape, b) T y c) De esquina (10).

### Soldadura de ranura

Se realiza un biselado en los bordes de las piezas que serán unidas. Estos tipos de soldadura generalmente son usados para unir dos placas ubicadas en el mismo plano (unión a tope), pero también se puede utilizar para uniones en T y uniones de esquina (11).

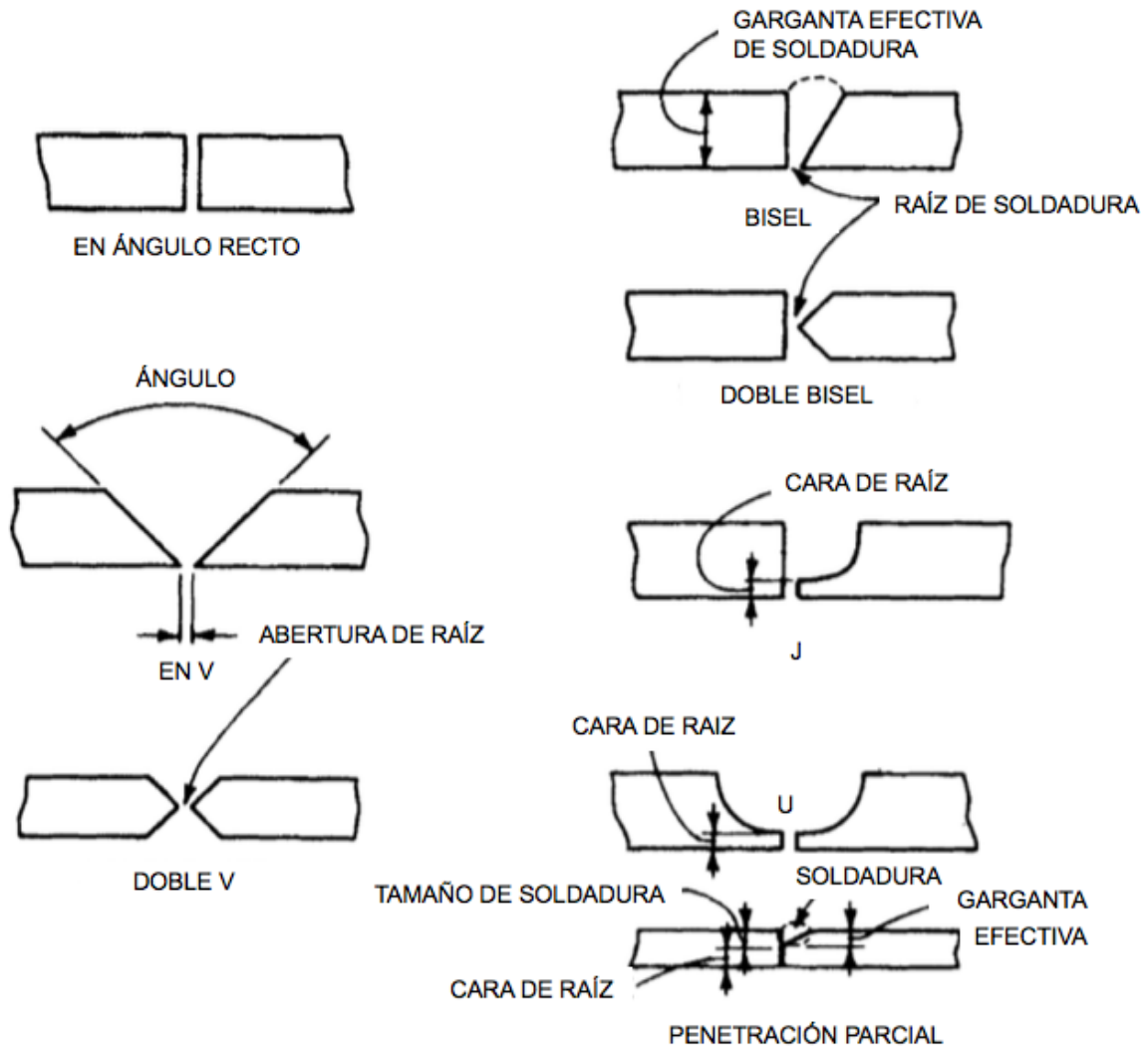


Figura 2. 9 Soldaduras de ranura (10)

Las soldaduras de ranura estándar son nombradas de acuerdo con la forma dada de los bordes a soldar, en ángulo recto, en V simple, doble V, bisel simple, doble bisel, en T, doble T, en J simple. Los bordes pueden ser obtenidos por oxicorte, ranurado por arco-aire, por aplanado. Sin embargo, con materiales de

hasta 3/8 de pulgada de espesor, puede realizarse una soldadura de ranura con bordes rectos dependiendo del proceso de soldadura utilizado.

La soldadura de ranura puede extenderse por completo en el ancho de las partes unidas. Las soldaduras intermitentes y empalmes que no son totalmente soldados en la sección transversal no son permitidos.

La soldadura por ranura también puede ser clasificada de acuerdo a la penetración de soldadura, penetración completa y penetración parcial.

### ***Penetración completa***

En una unión de soldadura completa, el material de aporte y el metal base se funden a través de la profundidad de la unión. Este tipo de soldadura se realiza mediante soldadura de ambos lados o de un solo lado. Cuando la unión es realizada mediante soldadura por ambos lados, la raíz de la primera pasada tiene la función de soportar y evitar el escurrimiento de la soldadura, antes de la realización de la soldadura del lado opuesto. Para la medición de esfuerzos en una unión de ranura con penetración completa se considera la dimensión de la garganta de soldadura el espesor completo desde la parte unida donde el espesor sea más delgado, incluso en una soldadura reforzada (10).

### ***Penetración parcial***

Las soldaduras de penetración parcial, se utilizan cuando las fuerzas que se transfieren son menores que las que requieren una soldadura de ranura con penetración completa. Los bordes pueden no tener la forma de soldadura en todo el espesor de la junta y por lo tanto la profundidad de la soldadura es menor al espesor completo de la unión. Si los bordes están completamente formados, y la soldadura de ranura se realiza sin una barra de soporte, o es realizada por ambos lados sin que se presente la unión de las dos soldaduras se considera que hay una penetración parcial. Este tipo de penetración es

utilizado en la construcción de empalmes en columnas las cuales llevan solamente cargas axiales (10) (11).

### 2.3.2 Tipos de juntas

La soldadura también se puede clasificar de acuerdo con el tipo de junta utilizada: estas pueden ser a tope, traslape, te, canto, en esquina. Véase Figura 2. 10 (11).

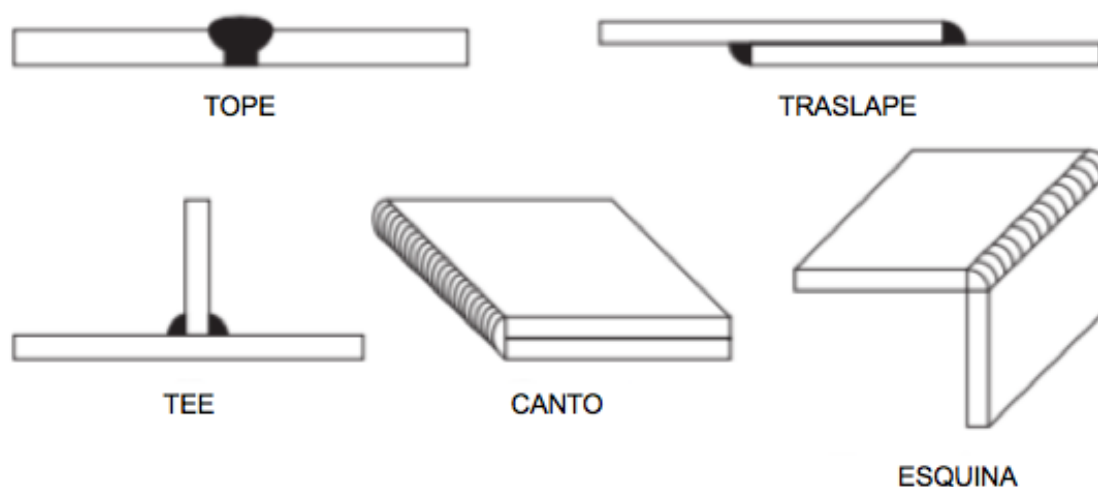


Figura 2. 10 Tipos de juntas de soldadura (11).

### 2.3.3 Posición de soldadura

La soldadura se clasifica de acuerdo a la posición en que se realiza como: plana, horizontal, vertical y sobre cabeza, siendo la plana la más económica y el tipo sobre cabeza la más costosa. Aunque la soldadura plana puede realizarse de manera automática, gran parte de la soldadura realizada en la construcción de estructuras se realiza manualmente (11).

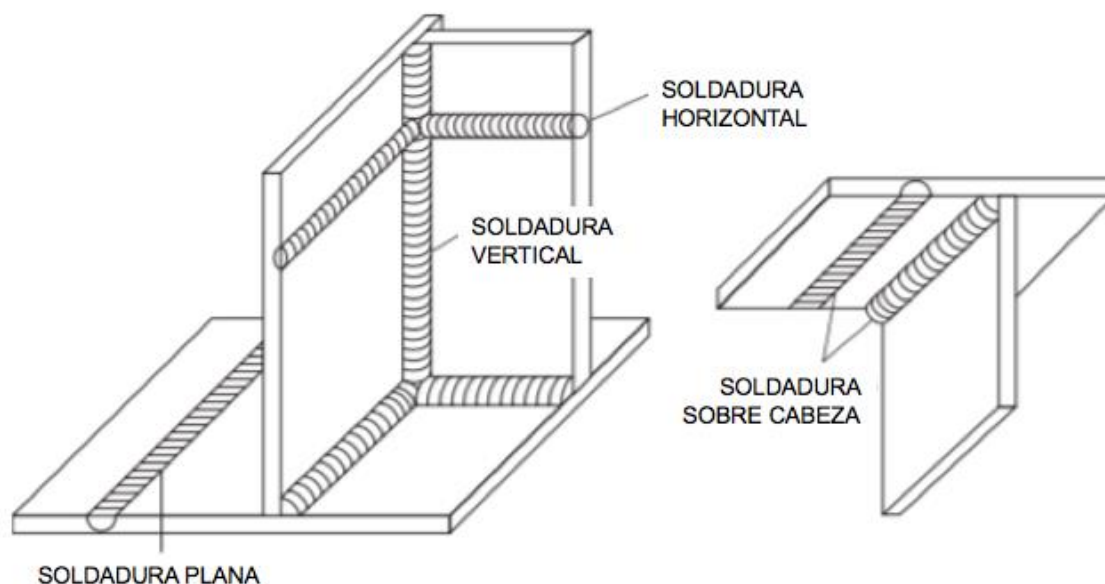


Figura 2. 11 Posiciones de soldadura (11).

### 2.3.4 Símbolos en soldadura

En la Figura 2. 12 se presentan los diversos símbolos de soldadura desarrollados por la AWS. Con este sistema se busca brindar toda la información necesaria mediante líneas y números, ocupando pequeños espacios en los planos y dibujos de ingeniería. Estos símbolos eliminan la necesidad de realizar largas notas descriptivas (11).

SÍMBOLOS BÁSICOS DE SOLDADURA									
POSTERIOR	FILETE	TAPÓN O RANURA	RANURA O A TOPE						
			ANGULO RECTO	V	BISEL	U	J	ENSANCHAMIENTO EN V	ENSANCHAMIENTO DE BISEL
SÍMBOLOS SUPLEMENTARIOS DE SOLDADURA									
RESPALDO	ESPACIADO	SOLDADURA TODO ALREDEDOR	SOLDADURA DE CAMPO	CONTORNO		PARA VER OTROS SÍMBOLOS BÁSICOS Y COMPLEMENTARIOS DE SOLDADURA CONSULTAR AWS A2.4			
				AL RAS	CONVEXO				

Figura 2. 12 Símbolos básicos de soldadura (11).

### **2.3.5 Calidad en soldadura**

La calidad de la soldadura es un área que requiere atención en cada fase de fabricación y durante la vida útil de las estructuras soldadas, este proceso comienza con el diseño apropiado de los requisitos y vida de servicio para el producto, así como los requerimientos de fabricación. Consiguientemente también los factores de fabricación y construcción deben ser considerados, lo que incluye la selección del proceso de unión, materiales, material de aporte, el lugar de trabajo, los rendimientos y cualidades de los operadores, la selección de los métodos y frecuencia de los ensayos de inspección y pruebas no destructivas (10).

La calidad de la soldadura está directamente relacionada con la integridad de las estructuras soldadas. Una estructura soldada, debe tener la fiabilidad requerida durante toda su vida útil, debe exhibir un nivel suficiente de calidad y aptitud para el uso. La calidad incluye consideraciones de diseño, lo que significa que cada pieza soldada debe ser (10):

1. Adecuadamente diseñada para cumplir con las solicitudes de servicio previstas para la vida útil requerida;
2. Fabricada con materiales específicos y de acuerdo con las normas de diseño; y
3. La instalación, manejo y mantenimiento deberán estar dentro de los límites de esfuerzo, fatiga y corrosión.

Tanto las consideraciones económicas como seguridad influyen en la calidad de la soldadura. Las consideraciones económicas requieren que un producto sea competitivo en el mercado, mientras que la seguridad requiere que el funcionamiento del producto no suponga un riesgo para las personas o los bienes para los que fue ideado. Con el fin de cumplir con la vida de servicio requerida, las piezas soldadas deben estar diseñadas de manera adecuada,

deben ser fabricadas con los materiales aceptados en las normas de diseño, deben tener los adecuados usos de operación y mantenimiento (10).

A pesar de las consideraciones de calidad de soldadura a menudo se limitan estrictamente a las características físicas las cuales normalmente son examinadas por los inspectores. La calidad también influye en factores tales como la dureza, composición química y propiedades mecánicas.

El nivel de calidad requerida para proporcionar la confiabilidad deseada depende de los modos de falla previstos en condiciones de servicio.

Cuando se habla de “*Calidad*” se dice que es cualitativa y cuantitativa, y es un término a menudo que se utiliza de manera relativa para hacer frente a la necesidad percibida de mejorar un producto. Requerir estándares de calidad más altos que los que son necesarios para una aplicación no solo son innecesarios, sino también económicamente imprudente. Por lo tanto, los niveles de calidad se permiten variar entre las diferentes piezas soldadas, soldaduras individuales, esto depende de los aspectos cuantitativos que pida como requisito el diseño.

La mayoría de las normas de fabricación de soldadura, definen los requerimientos de calidad para asegurar las operaciones de funcionamiento en estado de servicio.

La calidad de la soldadura puede ser verificada mediante Ensayos No Destructivos (NDE, por sus siglas en inglés, *Nondestructive Examination*). Las normas de aceptación para soldadura generalmente están relacionadas con los métodos NDE utilizados en la inspección de soldadura. Todas las diferencias dentro de los límites de aceptación requieren evaluación. La aceptación o rechazo se basan en condiciones bien definidas. La reparación de condiciones



inaceptables o defectuosas es normalmente permitida con el fin de elevar la calidad de la soldadura a un nivel de aceptación (10).

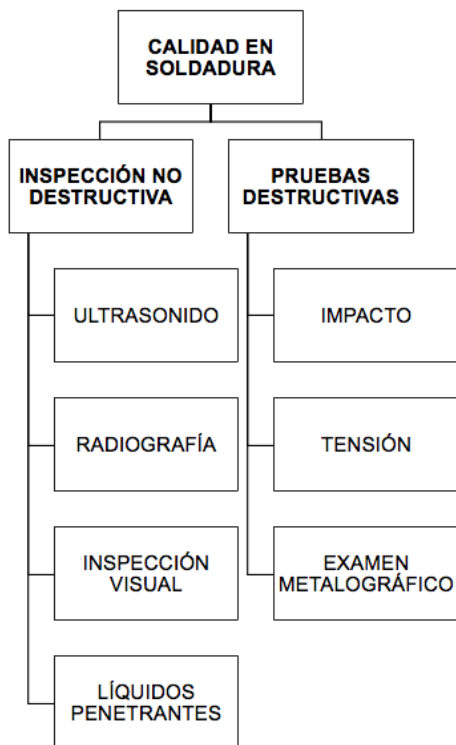


Figura 2. 13 Calidad en Soldadura.

## 2.4 ECUACIONES DE DISEÑO

Las ecuaciones de diseño para la resistencia y la rigidez de un elemento siempre contienen términos que representan a la carga, el miembro, el esfuerzo, la deformación o distorsión. Si dos de los tres primeros términos son conocidos, los otros pueden ser calculados. Todos los problemas de diseño de este modo se pueden reducir a lo siguiente:

1. Determinación de los esfuerzos internos o la deformación causada por una carga externa de un miembro dado,
2. Determinación de las cargas externas que pueden presentarse en un miembro determinado para cualquier resistencia o deformación dada, o

3. Selección de un miembro que soporte una carga dada, sin exceder a una resistencia o deformación especificada.

Una fuerza provoca una reacción, puede ser tensión, compresión, flexión, torsión o esfuerzo cortante en el miembro. El resultado es una deformación la cual es medida por medio de los desplazamientos relativos en el miembro. Estos son, alargamiento, contracción, deflexión, rotación angular. Un miembro bien diseñado debe soportar cierto tipo de carga dentro de la deformación o distorsión permisible. En el diseño dentro de los límites permisibles, los diseñadores deben seleccionar el material, la forma y tamaño de la sección más eficiente.

Las propiedades del material y las de la sección determinan la capacidad de un miembro de soportar una carga dada.

La aplicación de las ecuaciones de diseño puede ser ilustrada al obtener la rigidez adecuada en una viga en voladizo. La cantidad de deflexión vertical en el extremo de la viga bajo una carga puntual en el extremo, que se ilustra en la Figura 2. 14, se puede determinar usando la siguiente ecuación para la deflexión (1).

$$\Delta = \frac{FL^3}{3EI} \quad \text{Ecuación 2.1}$$

Dónde:

$\Delta$ = Deflexión;

F= Carga puntual;

L= Longitud;

E= Modulo de elasticidad; y

I= Momento de inercia.

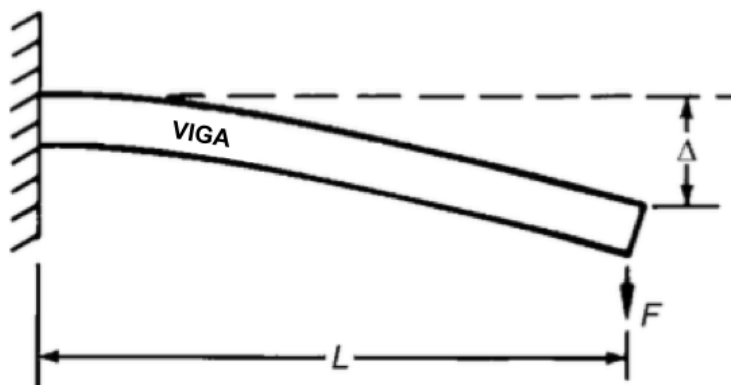


Figura 2. 14 Deflexión ( $\Delta$ ) de una viga en voladizo bajo carga puntual,  $F$  (1).

En el análisis estructural de los elementos lineales homogéneos se utiliza normalmente las teorías clásicas de la viga de Euler- Bernoulli y la teoría de Timoshenko. Ambas teorías se basan en la suposición de que la sección transversal del elemento se mantiene plana después de la deformación. Esta hipótesis conduce a una variación lineal de desplazamiento axial del elemento (12).

### 2.4.1 Teoría Euler-Bernoulli

La teoría de la viga de Euler-Bernoulli también conocida como la teoría de la ingeniería de la viga o teoría clásica de la viga es una simplificación de la teoría lineal de la elasticidad que proporciona un medio para calcular las características de transmisión de esfuerzos y la deflexión característica de la viga. Cubre el caso de la deflexión de vigas que son sujetas a cargas laterales. Por lo tanto, es un caso especial de la teoría de vigas de Timoshenko. Fue enunciado por primera vez alrededor del año 1750, pero no se aplicó a gran escala hasta que se desarrolló el proyecto de la torre Eiffel y la rueda de la fortuna en el siglo XIX. A raíz del éxito de estas estructuras la teoría de la viga se convirtió rápidamente en una herramienta principal para el cálculo de estructuras y un facilitador durante la segunda revolución industrial.

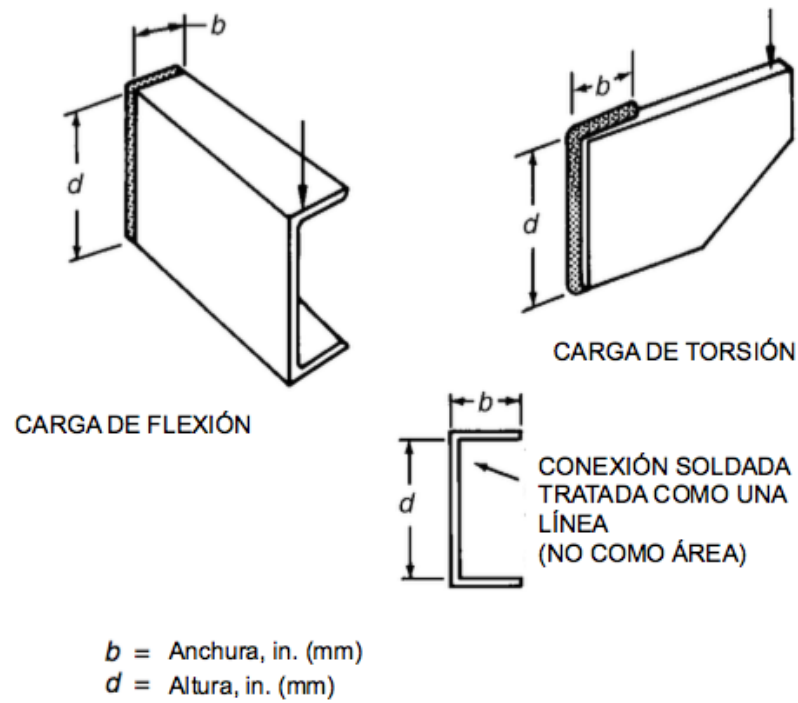


Figura 2. 15 La Torre Eiffel (abril 1888 - mayo 1889) (13).

Existen herramientas de análisis que se han desarrollado adicionalmente como la teoría de la placa y el análisis de elementos finito, pero la simplicidad de la teoría de la viga hace que sea una herramienta esencial para la ingeniería estructural y mecánica (13).

#### 2.4.2 La soldadura considerada como una línea

Cuando la longitud total de la soldadura en una conexión es mayor en comparación con su garganta efectiva, la soldadura puede suponerse que es una línea la cual tiene una longitud y configuración definida en lugar de un área. El tamaño adecuado de soldadura requerida para una resistencia adecuada se puede determinar usando este concepto. *La conexión soldada se considera como una sola línea que tiene la misma configuración que el área de la conexión.* Esto se muestra en la Figura 2. 16, en donde  $b$  denota la anchura y  $d$  representa la altura. Por lo tanto, la conexión soldada tiene longitud, y no un área efectiva. De esta manera, se busca determinar la fuerza por unidad de longitud en la soldadura en vez de la presión a la que se somete la soldadura, ya que la presión no puede establecerse hasta que se conozca el tamaño de la soldadura (1).

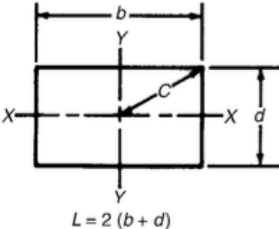
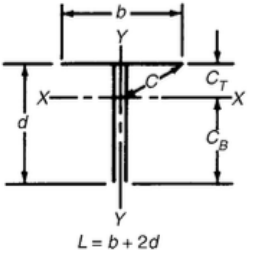
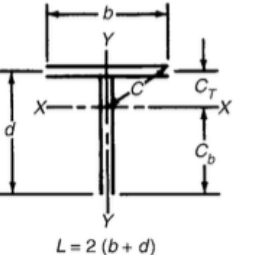
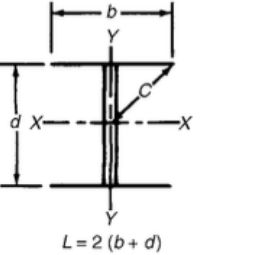


**Figura 2. 16 Consideración de la unión soldada como una línea (1).**

Las propiedades geométricas de configuraciones de unión comunes se pueden determinar usando las ecuaciones que se muestran en la Tabla 2. 2.

Tabla 2. 2 Propiedades de la soldadura considerada como una línea (1).

	$I_X = \frac{d^3}{12}$	$S_X = \frac{d^2}{6}$	
	$I_X = \frac{d^3}{6}$	$S_X = \frac{d^2}{3}$	$J_W = \frac{d}{6} (3b^2 + d^2)$
	$I_Y = \frac{b^2 d}{2}$	$S_Y = bd$	$C = \frac{(b^2 + d^2)^{1/2}}{2}$
	$I_X = \frac{d^3}{12} \left( \frac{4b+d}{b+d} \right)$	$S_{XT} = \frac{d}{6} (4b+d)$	$S_{XB} = \frac{d^2}{6} \left( \frac{4b+d}{2b+d} \right)$
	$I_Y = \frac{b^3}{12} \left( \frac{b+4d}{b+d} \right)$	$S_{YL} = \frac{b}{6} (b+4d)$	$S_{YR} = \frac{b^2}{6} \left( \frac{b+4d}{2d+b} \right)$
	$J_W = \frac{b^3 + d^3}{12} + \frac{bd(b^2 + d^2)}{4(b+d)}$	$C_T = \frac{d^2}{2(b+d)}$	$C_B = \frac{d}{2} \left( \frac{2b+d}{b+d} \right)$
	$C_{YL} = \frac{b^2}{2(b+d)}$	$C_{YR} = \frac{b}{2} \left( \frac{b+2d}{b+d} \right)$	$C_1 = (C_T^2 + C_{YR}^2)^{1/2}$
			$C_2 = (C_B^2 + C_{YL}^2)^{1/2}$
	$I_X = \frac{d^2}{12} (6b+d)$	$S_X = \frac{d}{6} (6b+d)$	
	$I_Y = \frac{b^3}{3} \left( \frac{b+2d}{2b+d} \right)$	$S_{YL} = \frac{b}{3} (b+2d)$	
	$C_{YL} = \frac{b^2}{2b+d}$	$C_{YR} = \frac{b(b+d)}{2b+d}$	$S_{YR} = \frac{b^2}{3} \left( \frac{b+2d}{b+d} \right)$
	$C = \left[ C_{YR}^2 + \left( \frac{d}{2} \right)^2 \right]^{1/2}$	$J_W = \frac{b^3}{3} \left( \frac{b+2d}{2b+d} \right) + \frac{d^2}{12} (6b+d)$	

 <p style="text-align: center;"><math>L = 2(b + d)</math></p>	$I_X = \frac{d^2}{6}(3b + d)$	$S_X = \frac{d}{3}(3b + d)$	
	$I_Y = \frac{d^2}{6}(b + 3d)$	$S_Y = \frac{b}{3}(b + 3d)$	
	$J_W = \frac{(b + d)^3}{6}$	$C = \frac{(b^2 + d^2)^{1/2}}{2}$	
 <p style="text-align: center;"><math>L = b + 2d</math></p>	$I_X = \frac{d^3}{3} \left( \frac{2b + d}{b + 2d} \right)$	$S_{XT} = \frac{d}{3}(2b + d)$	$S_{XB} = \frac{d^2}{3} \left( \frac{2b + d}{b + d} \right)$
	$I_Y = \frac{b^3}{12}$	$S_Y = \frac{b^2}{6}$	$C_T = \frac{d^2}{b + 2d}$
	$J_W = \frac{d^3}{3} \left( \frac{2b + d}{b + 2d} \right) + \frac{b^3}{12}$	$C_B = d \left( \frac{b + d}{b + 2d} \right)$	$C = \left[ C_T^2 + \left( \frac{b}{2} \right)^2 \right]^{1/2}$
 <p style="text-align: center;"><math>L = 2(b + d)</math></p>	$I_X = \frac{d^3}{6} \left( \frac{4b + d}{b + d} \right)$	$S_{XT} = \frac{d}{3}(4b + d)$	$S_{XB} = \frac{d^2}{3} \left( \frac{4b + d}{2b + d} \right)$
	$I_Y = \frac{b^3}{6}$	$S_Y = \frac{b^2}{3}$	$C_T = \frac{d^2}{2(b + d)}$
	$J_W = \frac{d^3}{6} \left( \frac{4b + d}{b + d} \right) + \frac{b^3}{6}$	$C_b = \frac{d}{2} \left( \frac{2b + d}{b + d} \right)$	$C = \left[ C_T^2 + \left( \frac{b}{2} \right)^2 \right]^{1/2}$
 <p style="text-align: center;"><math>L = 2(b + d)</math></p>	$I_X = \frac{d^2}{6}(3b + d)$	$S_X = \frac{d}{3}(3b + d)$	
	$I_Y = \frac{b^3}{6}$	$S_Y = \frac{b^2}{3}$	
	$J_W = \frac{d^2}{6}(3b + d) + \frac{b^3}{6}$	$C = \frac{(b^2 + d^2)^{1/2}}{2}$	

	$I_X = \frac{d^2}{6} (6b + d)$	$S_X = \frac{d}{3} (6b + d)$	
	$I_Y = \frac{b^3}{3}$	$S_Y = \frac{2}{3} b^2$	
	$J = \frac{d^2}{6} (6b + d) + \frac{b^3}{3}$	$C = \frac{(b^2 + d^2)^{1/2}}{2}$	
	$I = \pi r^3$	$S_W = \pi r^2$	$J_W = 2\pi r^3$

Dónde:

$\sigma$  = Esfuerzo normal, ksi (MPa).

$P$  = Fuerza aplicada; kips (kN).

$A$  = Área total de la sección transversal, in.<sup>2</sup> (mm<sup>2</sup>).

$f$  = Fuerza por unidad de longitud, kips (kN).

$L_w$  = Longitud total de la línea de soldadura, in. (mm).

$\tau$  = Esfuerzo cortante, ksi (MPa).

$V$  = Carga cortante vertical; kips (kN).

$M$  = Momento flexionante, kips in. (kN mm).

$S$  = Modulo de sección de un área, in.<sup>2</sup> (mm<sup>2</sup>).

$I$  = Momento de inercia, in.<sup>4</sup> (mm<sup>4</sup>).

$S_w$  = Módulo de sección de la soldadura considerada como una línea, in.<sup>4</sup> (mm<sup>4</sup>).

$I_w$  = Momento de inercia de la soldadura considerada como una línea, in.<sup>3</sup>/in (mm<sup>3</sup>/mm).

$T$  = Torque en la unión soldada, kips in. (kN mm)

$c$  = Distancia desde el eje neutral de la soldadura a la distancia más lejana al eje de la soldadura, in. (mm).

$J$  = Momento polar de inercia de un área, in.<sup>4</sup> (mm<sup>4</sup>).

$J_w$  = Momento polar de inercia de una línea de soldadura, in.<sup>4</sup>/in (mm<sup>4</sup>/mm).



### **2.4.3 Tipos de esfuerzos en las uniones soldadas**

Existen cinco tipos básicos de cargas en las uniones soldadas; tensión, compresión, flexión, cortante y torsión. Cuando uno o más tipos de esfuerzos son aplicados a un miembro, estos inducen esfuerzos adicionales a cualquier esfuerzo residual que éste presente.

Las cargas aplicadas resultan en esfuerzos dentro del elemento, y la magnitud de la deformación se rige por el módulo de elasticidad del metal. Las deformaciones siempre tienen lugar en un miembro que ha sido sometido a alguna carga debido a que el esfuerzo inevitablemente causa deformación.

Las uniones soldadas que se encuentren en una estructura pueden estar sometidas a diversos tipos de esfuerzos por lo que es conveniente saber cómo calcular cada uno de ellos de acuerdo al tipo de soldadura y la dirección de la carga aplicada (14).

#### **2.4.3.1 Tensión y compresión**

Las cargas de tracción pura son generalmente el tipo más simple de carga desde una perspectiva de diseño y análisis. Las cargas de tracción axial provocan deformaciones axiales y elongación. En el caso de una carga de tracción, el requisito de diseño principal es un área de la sección transversal bruta y neta adecuada para soportar la carga (15).

Para soldadura de filete el esfuerzo de tensión y compresión puede estar normal al eje de la soldadura como se puede ver en la Figura 2. 17, pero además ésta carga de tensión provoca un cortante en la garganta de la soldadura.

El esfuerzo de tensión se calcula en base a la garganta de la soldadura con la ecuación 2.2.

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad \text{Ecuación 2.2}$$

Dónde:

$\sigma$  = Esfuerzo normal (Tensión o compresión);

$P$  = Fuerza aplicada; y

$A$  = Área total de la sección transversal.

Considerando la fuerza por unidad de longitud se tiene:

$$f = \frac{P}{Lw} \quad \text{Ecuación 2.3}$$

Dónde:

$f$  = Fuerza por unidad de longitud;

$P$  = Fuerza aplicada; y

$Lw$  = Longitud total de la soldadura considerada como una línea.

En la Figura 2. 17 se muestra la zona donde se concentra el esfuerzo en una unión en T sometida a tensión, donde también se puede ver que la soldadura adyacente a la otra placa ejerce esfuerzo, pero más ligero.

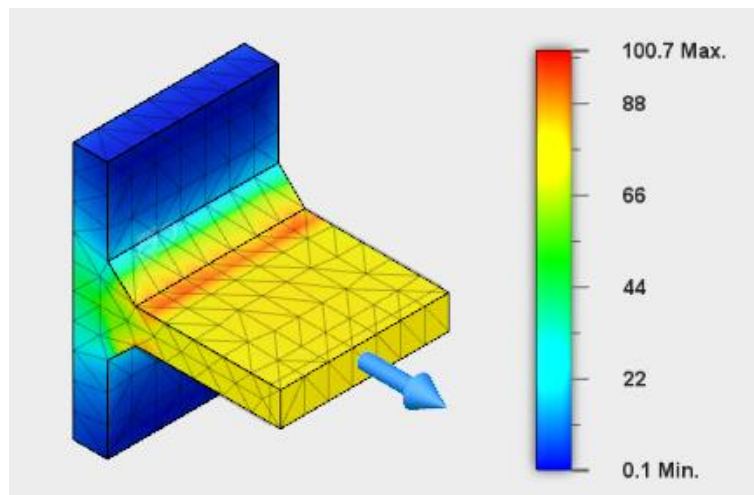


Figura 2. 17 Simulación de tensión en filete de una unión en T. Esfuerzos en MPa.

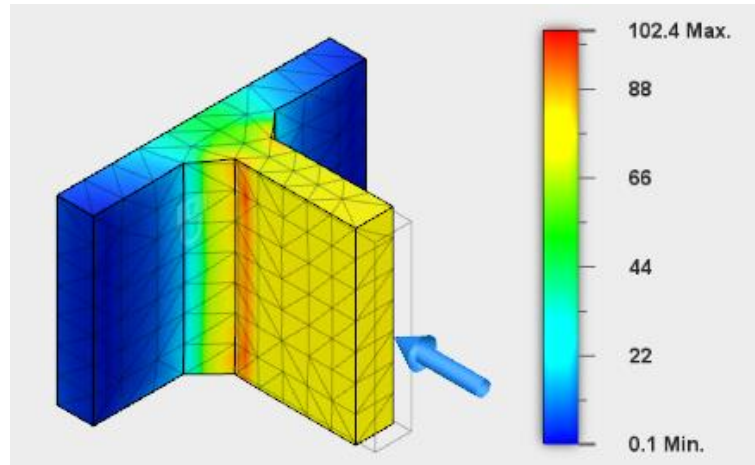


Figura 2. 18 Simulación de compresión en filete en unión en T. Esfuerzos en MPa.

### 2.4.3.2 Cortante

El esfuerzo cortante se produce en la soldadura cuando se aplica una carga transversal a la soldadura de filete como se muestra en Figura 2. 19, donde la aplicación de la fuerza externa provoca un cortante en el área de la garganta efectiva del filete (16).

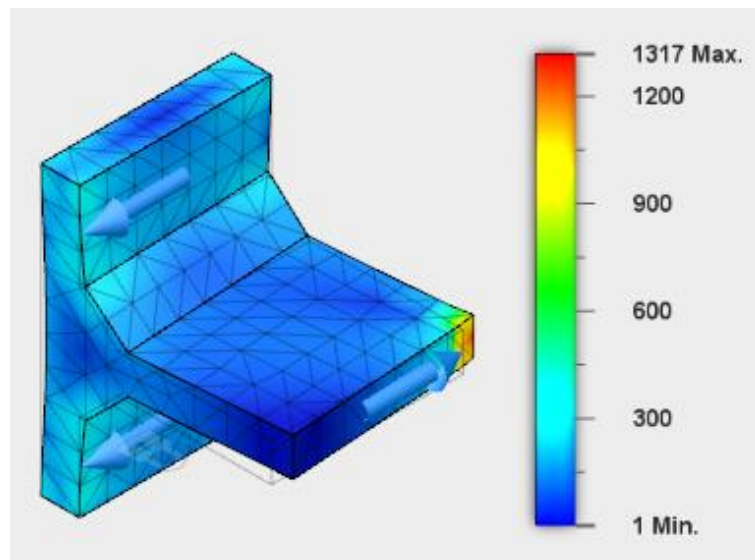


Figura 2. 19 Unión sometida a cortante. Esfuerzos en MPa.

Como el cortante en la soldadura de filete se calcula en base a la garganta, la ecuación para calcular el esfuerzo cortante queda como:

$$\tau = \frac{V}{A} \quad \text{Ecuación 2.4}$$

Dónde:

$\tau$  = Esfuerzo cortante;

$V$  = Carga cortante vertical; y

$A$  = Área total de la sección transversal.

Considerando la fuerza por unidad de longitud se tiene:

$$f = \frac{V}{L_w} \quad \text{Ecuación 2.5}$$

Dónde:

$f$  = Fuerza por unidad de longitud;

$V$  = Carga cortante vertical; y

$L_w$  = Longitud total de la soldadura considerada como una línea.

### 2.4.3.3 Flexión

En la Figura 2. 20. Se presenta la flexión de un miembro sujeto a una carga puntual. La carga podría presentarse de igual manera uniforme y no uniformemente distribuida.

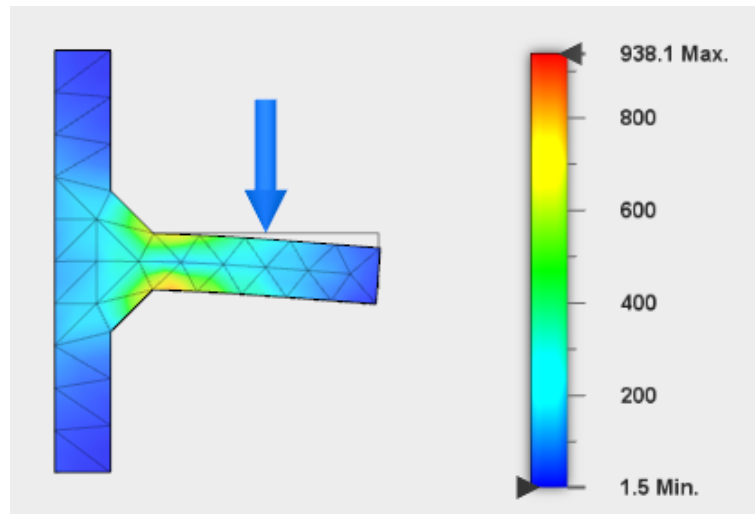


Figura 2. 20 Simulación de una carga puntual en filete de una unión en T. Esfuerzos en MPa.

Cuando un miembro es sujeto a carga de flexión dentro del rango elástico, los esfuerzos de flexión total son cero a lo largo del eje neutral y aumentan linealmente hasta un valor máximo.

El esfuerzo de flexión en cualquier distancia desde el eje neutral de la sección transversal de una viga recta se muestra en la Figura 2. 21 (17).

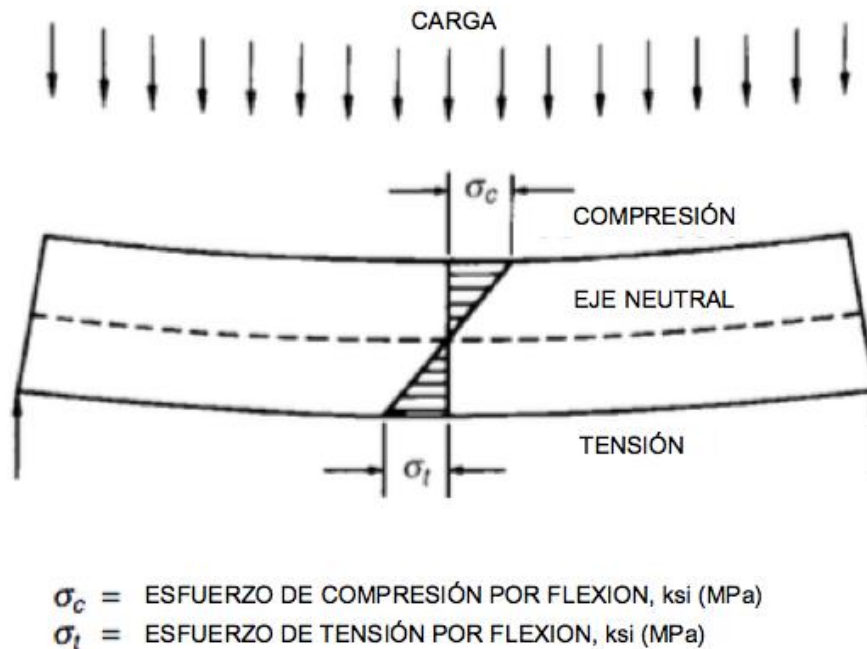


Figura 2. 21 Esfuerzo de un miembro sujeto a carga uniformemente distribuida (1).

El esfuerzo de flexión de la unión soldada se determina con la siguiente expresión.

$$\sigma = \frac{My}{I} \quad \text{Ecuación 2.6}$$

Dónde:

$\sigma$  = Esfuerzo de flexión (tensión o compresión);

$M$  = Momento flexionante desde el punto de interés;

$y$  = Distancia desde el eje neutral de la soldadura a una distancia específica “ $y$ ”;  $y$

$I$  = Momento de inercia.

En la mayoría de los casos, el esfuerzo máximo de flexión es de mayor interés. En ese caso la ecuación que se aplica es la siguiente.

$$\sigma = \frac{Mc}{I} = \frac{M}{S} \quad \text{Ecuación 2.7}$$

Dónde:

$\sigma$  = Esfuerzo de flexión (tensión o compresión);

$M$  = Momento flexionante desde el punto de interés;

$c$  = Distancia desde el eje neutral de la soldadura a la distancia más lejana al eje de la soldadura.

$I$  = Momento de inercia.

$S$  = Módulo de sección de un área.

Considerando la fuerza por unidad de longitud se tiene:

$$f = \frac{M}{S_w} = \frac{Mc}{I_w} \quad \text{Ecuación 2.8}$$

Dónde:

$f$  = Fuerza por unidad de longitud;

$M$  = Momento flexionante desde el punto de interés;

$S_w$  = Módulo de sección de la soldadura considerada como una línea;

$c$  = Distancia desde el eje neutral de la soldadura a la distancia más lejana al eje de la soldadura; y

$I_w$  = Momento de inercia de la soldadura considerada como una línea;

#### 2.4.3.4 Torsión

Este esfuerzo ocurre cuando la pieza soldada se encuentra cargada en un extremo libre y el otro extremo se encuentra soldado, como se muestra en la Figura 2. 22. Este tipo de esfuerzos se presenta principalmente en soldaduras de filete a traslape.

De la misma forma que se presenta el esfuerzo de flexión se produce un esfuerzo cortante en la soldadura que se determina con la Ecuación 2.4.

La fuerza aplicada en el extremo de la unión crea un momento que genera la torsión, que se calcula con la siguiente ecuación (18):

$$\tau' = \frac{Tc}{J} \quad \text{Ecuación 2.9}$$

Dónde:

$\tau'$  = Esfuerzo de torsión;

$T$  = Torque en la unión soldada;

$c$  = Distancia desde el eje neutral de la soldadura a la distancia más lejana al eje de la soldadura; y

$J$  = Momento polar de inercia del área de la sección transversal de la soldadura, la cual se calcula con respecto a la garganta de la soldadura.

Considerando la fuerza por unidad de longitud se tiene:

$$f = \frac{Tc}{Jw} \quad \text{Ecuación 2.10}$$

Dónde:

$f$  = Fuerza por unidad de longitud;

$T$  = Torque en la unión soldada;

$c$  = Distancia desde el eje neutral de la soldadura a la distancia más lejana al eje de la soldadura; y

$Jw$  = Momento polar de inercia de la soldadura considerada como una línea.

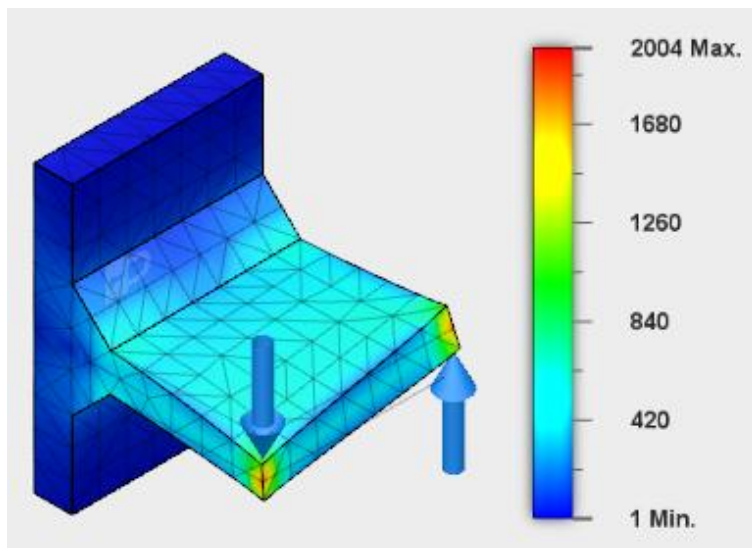


Figura 2. 22 Simulación de torsión en soldadura de filete. Esfuerzos en MPa.

## 2.5 FALLAS EN CONEXIONES SOLDADAS

Los requerimientos sobre una resistencia específica de las uniones soldadas bajo cargas de fatiga han originado la búsqueda de nuevas metodologías de diseño y validación, además de los métodos tradicionales. El comportamiento de estructuras soldadas bajo cargas de fatiga es un fenómeno muy complejo, porque depende simultáneamente de muchos parámetros que afectan el fenómeno esfuerzo/deformación justo donde se produce la fractura final. La complejidad se debe principalmente a:

1. geometría estructural;
2. materiales no homogéneos; y
3. esfuerzo residual por soldadura.

Las uniones soldadas, se originan de un metal base y un metal de aporte, y por tanto son estructuras no homogéneas, que lejos de ser perfectas, contienen poros, inclusiones de escoria y socavados. El ciclo térmico de soldadura contribuye significativamente a la generación de un estado de esfuerzo residual triaxial cuya magnitud a menudo es cercana al esfuerzo de cedencia del material. Sin embargo, el papel más importante de la resistencia de los materiales es por los desalineamientos y distorsiones los cuales podrían



aumentar significativamente los esfuerzos y tensiones en el borde de la soldadura.

El diseño estructural tradicionalmente se ha basado durante mucho tiempo en normas oficiales, inherentemente precavidas con el fin de preservar la integridad estructural. Sin embargo, la globalización obliga hoy en día a los ingenieros a revisar los procedimientos tradicionales de diseño con el fin de proporcionar a los clientes productos que pueden ser competitivos en el mercado en términos de costos bajos y adecuación a aplicaciones altamente especializadas. Por lo tanto, el requisito más drástico que deben cumplir los diseñadores es maximizar la resistencia específica de la estructura. En palabras sencillas, se debe garantizar el más alto nivel de seguridad estructural y el peso de la estructura debe reducirse al mínimo. Este hecho contrasta abiertamente con el uso racional adoptado detrás de cualquier norma (19).

Una gran cantidad de literatura se ha producido sobre el tema fatiga con el fin de mejorar el proceso de diseño con respecto a las normas disponibles. Cabe señalar que el comportamiento a la fatiga de las estructuras soldadas en la realidad difícilmente puede describirse por medio de las fórmulas o argumentos teóricos o deberán deducirse mediante el estudio de un conjunto complejo de sus componentes elementales. Esto es debido a las muchas interacciones entre los diferentes factores que gobiernan el fenómeno. En efecto, cualquier enfoque teórico y/o numérico se basa necesariamente en un conjunto de supuestos simplificadores que, debido a la complejidad de los fenómenos de fatiga, podría pasar por alto algunos hechos implicados en el comportamiento de la estructura real.

Los enfoques experimentales pueden proporcionar información más directa y por lo tanto, es intrínsecamente capaz de retratar el comportamiento complejo de las estructuras reales, incluyendo uniones soldadas (19).

### 2.5.1 Normas oficiales

Las normas oficiales americanas en materia de estructuras soldadas son los códigos emitidos por la AWS, respectivamente D1.1 para estructuras de acero y D1.2 para las aleaciones de aluminio. Normas similares son emitidas por;

1. Instituto Británico de Normatividad (BS, por sus siglas en inglés, *British Standards Institute*);
2. Instituto Internacional de Soldadura (IIW, por sus siglas en inglés, *International Institute for Welding*) (20);

En estas normas, las uniones soldadas se enumeran con respecto a los diferentes detalles y tipos de carga. El enfoque sugerido por las normas oficiales es útil para diseñar rápidamente los componentes soldados que caen claramente dentro de una clase específica de la norma. De hecho, el diseñador debe simplemente identificar el detalle de referencia para la estructura considerada. Sin embargo, existen componentes soldadas que son a menudo diferentes de los previstos en las normas. Esto ocurre en varios casos de interés práctico.

Las curvas de resistencia a la fatiga previstas por las normas se obtienen y validan experimentalmente y se utiliza inclusive la amplificación de los esfuerzos locales causados por el cordón de soldadura en la geometría original, las modificaciones sustanciales de la microestructura y los esfuerzos residuales generados por los ciclos térmicos de la soldadura. Sin embargo, no hay manera de discriminar el impacto real que cada uno de estos hechos pueden tener sobre la resistencia a la fatiga del componente analizado. Por esta razón, aunque el diseño y validación de las curvas de fatiga reportadas en las normas se determinan sobre una base estadística, a veces todavía existe la necesidad de utilizar grandes factores de seguridad. Esto da lugar a subestimar la vida a fatiga efectiva de los componentes soldados y en el diseño de estructuras pesadas (19).

A través de los años, un análisis crítico realizado en un amplio espectro de casos reales demostró que las normas oficiales a menudo pueden errar por el lado delimitado, como fue investigado en *Industrial application of a new local strain method for fatigue strength evaluation of welded structures* en 2004 por Casavola. Esto se debe a que las normas tienen que proporcionar indicaciones sencillas acerca de un fenómeno que es en sí es complejo como puede ser el de esfuerzos y, al mismo tiempo, tienen que proporcionar a los ingenieros las directrices de diseño simples e inmediatas destinadas a garantizar la seguridad estructural. Este doble objetivo se logra mediante las normas a costa de incrementar el peso estructural (21).

Muchos autores, han debatido sobre la validez del enfoque global en el que se basan las normas oficiales. En el caso de elementos estructurales complejos, de hecho, es muy difícil o incluso imposible establecer criterios de fallo capaces de identificar el esfuerzo real que actúa sobre la estructura. Las normas oficiales manejan la hipótesis de que la unión bajo estudio es un fenómeno “aislado” del resto de la estructura que la incluye. A diferencia del caso real, donde la unión en sí interactúa con el resto de la estructura y el tipo de carga resultante es compleja y difícil de comparar a la que está contemplada en la norma. Ciertamente, esto puede resultar en un número significativamente diferente de ciclos de falla. Las líneas de investigación más recientes parecen confirmar esta discrepancia donde se muestra ejemplos de estructuras industriales a gran escala, donde las normas son claramente limitadas.

Algunas normas afirman que la resistencia a fatiga puede disminuir en caso de altas temperaturas y ambientes corrosivos, sin embargo, se ha observado que puede existir una disminución de la resistencia a la fatiga con el aumento del número de ciclos de carga incluso en ausencia de corrosión o efectos de temperatura (22). Este hecho se debe advertir al diseñador ya que el uso del límite de resistencia a la cedencia puede conducir a un fallo inesperado y

catastrófico de los componentes estructurales que han sido diseñados siguiendo las normas.

### **2.5.2 Enfoque analítico y teórico**

El enfoque local tiene como objetivo superar las limitaciones que se pueden dar en un enfoque ideal donde la geometría de la pieza es sencilla y las cargas definidas están en condiciones ideales, el enfoque local en cambio permite dar cuenta de los efectos de los parámetros que intervienen en los esfuerzos de fatiga: como la presencia de defectos en el material, si el material es homogéneo o no, la geometría del cordón de soldadura, la distorsión y desajustes, las tensiones residuales. Diferentes enfoques locales están relacionados con los parámetros elegidos para ofrecer resistencia a la fatiga.

El principal inconveniente de la utilización analítico y numérico del enfoque local es que se necesitan hipótesis simplificadoras, con el fin de hacer frente a la complejidad de los casos reales. Algunos ejemplos de estas discrepancias que se pueden encontrar en las mediciones prácticas se ilustran ahora.

El hecho más evidente es que después del ciclo de soldadura, la unión ciertamente no puede ser considerada como un material homogéneo. De hecho, el metal base (MB), la zona afectada por el calor (ZAC), y metal fundido (MF) tiene completamente diferentes microestructuras, diferentes tamaños de grano y diferentes valores de dureza. Esto da lugar a diferentes límites de cedencia y por lo tanto diferentes capacidades de distribución de carga. En la Figura 2. 23 se muestran las diferentes regiones (MB, ZAC, MF) observadas en una unión soldada de acero estructural mediante arco eléctrico. Los valores correspondientes de dureza Vickers se muestran en la Figura 2. 23, se puede observar que la diferencia de dureza entre HAZ y BM es del 15% para la junta de acero. Como es evidente, tal diferencia modificará el mecanismo de transferencia de carga en las diferentes regiones de la unión. Este hecho debe ser considerado cuidadosamente en el Modelado de la estructura con

Elementos Finitos (FEM, por sus siglas en inglés, *Finite Element Model*), estos aspectos, a menudo no son adecuadamente considerados en los estudios reportados en la literatura. De otra manera, una técnica experimental que mide directamente las tensiones en la zona con diferentes características del material podría tener en cuenta este tipo de fenómenos. Como es evidente, diferentes valores de dureza implican diferentes resistencias mecánicas. Por lo tanto, la estrategia utilizada por muchos autores para modelar la unión como estructura homogénea podría ser cuestionable.

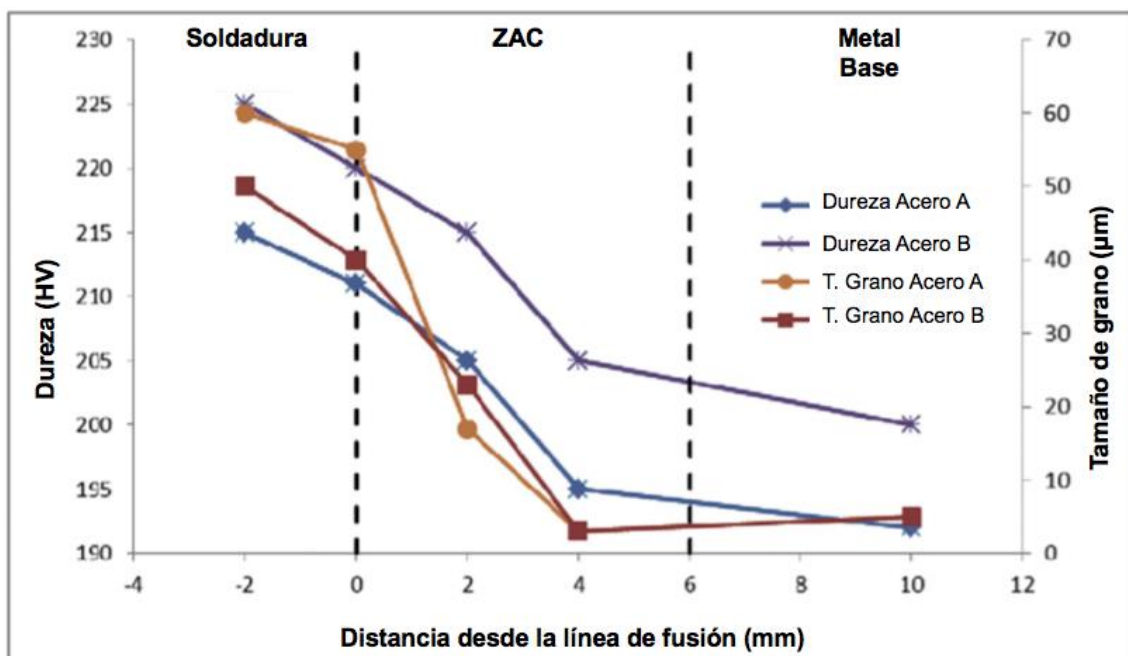
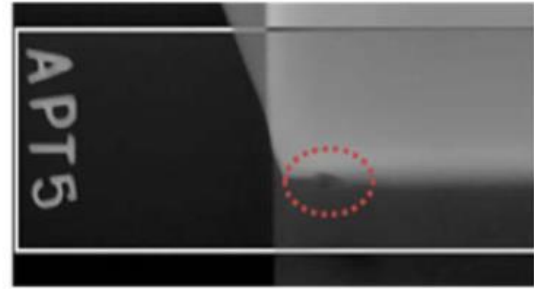


Figura 2. 23 Dureza Vickers y tamaño de grano de la estructura soldada (23).

La Figura 2. 24 muestra diferentes tipos de defectos que pueden ser incluidos en las uniones soldadas en diferentes materiales usando diferentes técnicas de soldadura. Los defectos ciertamente reducen la fuerza total y por lo tanto la resistencia a la fatiga resultante de los componentes soldados. Los tipos, tamaños y distribución de los defectos no pueden ser conocidos a priori, pero se pueden detectar usando técnicas radiográficas. Como es evidente, en los modelos numéricos no se pueden tomar cuenta de ninguna manera la presencia y el efecto de los defectos.



INCLUSIONES DE ESCORIA EN PLACAS DE ACERO  
SOLDADAS



RADIOGRAFIA EN PLACAS DE  
ACERO SOLDADAS A TOPE

**Figura 2. 24 Defectos de Soldadura (19).**

En *Recommendation for fatigue design of welded joints and components* del IIW tratan en cierta medida de corregir la vida de fatiga de las estructuras en presencia de defectos. También utilizando técnicas experimentales este tipo de defectos no pueden ser tomados en cuenta. Sin embargo, los defectos son de diferentes tipos y tamaño, y están distribuidos a través de la unión (24).

### **2.5.3 Falla de conexiones en estructuras soldadas por terremotos**

Después del terremoto de Northridge, California en 1994, en Estados Unidos de Norteamérica se encontró que los momentos para conexiones soldadas no pudieron resistir las distorsiones esperadas por terremotos, y de hecho la fractura se presentó muy por debajo de los niveles proyectados. El problema no fue el resultado simplemente de errores de diseño o construcción, sin embargo, podría originarse por una acumulación progresiva de los “refinamientos” en el diseño, materiales y métodos de fabricación. P. D. Moncarz at al en su documento titulado *Earthquake failures of welded building connctions* arroja a la luz las deficiencias en el proceso de cooperación entre el mundo académico, ingenieros profesionales, y los proveedores de materiales y equipos que han llevado miles de millones de dólares en pérdidas derivadas del potencial

proceso de reparación o reacondicionamiento de los edificios que se sitúan en zonas de actividad sísmica (25).

Cada año, grandes desastres donde se involucran estructuras de ingeniería tienen un costo humano y económico significativo en todo el mundo. Entre las principales responsabilidades de la comunidad de ingeniería consiste en examinar continuamente el rendimiento de estas estructuras y promover mejoras correspondientes en los métodos de diseño, prácticas de construcción y selección de material para resistir mejor los siguientes retos. El proceso es iterativo, combinando el análisis de fallos con las correspondientes acciones correctivas (26). Los ejemplos incluyen el colapso de presas, a partir de los cuales los volúmenes de agua que resultan, son muchas veces mayores que los volúmenes considerados en el cálculo estructural para las cuales estaba destinada a almacenar y resistir. Los ingenieros de puentes históricamente se han enfrentado a la construcción de estructuras más largas y más resistentes, su progreso en ocasiones se ha visto frenado por las fallas en las estructuras principales. Las fallas estructurales que se presentan durante un incendio en una estructura fueron prevenidas mediante el uso de fibras de asbesto que servían como protección contra el fuego, ahora se sabe que este material es carcinógeno.

Mediante el refinamiento continuo, sin duda, se conduce a una mejor comprensión de la dinámica estructural y comportamiento de los materiales, y en consecuencia edificios más resistentes, sin embargo, errores y fallas aún se pueden presentar. El terremoto de enero de 1994 en Northridge, CA desencadenó el inicio de otros estudios, los propietarios de edificios descubrieron que decenas de edificios de estructura de acero, los cuales representaban el estado del arte en cuestiones de diseño antisísmico, sufrieron un severo agrietamiento. De hecho, antes del terremoto de Northridge, los marcos de acero soldados fueron diseñados con la confianza plena de las comunidades de construcción con las áreas de estudio sísmico más avanzado

del mundo como son Asia y California. Estas estructuras se asumieron lo suficientemente fuertes como para resistir las tensiones y tener la suficiente ductilidad para resistir las distorsiones generadas por terremotos severos. En lugar de esto, las conexiones entre las vigas y columnas se fracturaron en demandas de carga y deformación muy por debajo de los valores para los que estaban destinados. Esté muestra cómo el concepto inicial, donde se demostró ser un éxito razonable en pruebas de laboratorio y desarrollo, eventualmente tuvo fatales consecuencias en el estado de la práctica con valores diferentes que los prototipos (25).

#### **2.5.4 Momento resistente en marcos de acero**

El tipo de estructura que es objeto de estudio en este trabajo son los Marcos de Acero Resistentes a Momentos (SMRF, por sus siglas en inglés, *Steel Moment Resisting Frames*) Los marcos se caracterizan por estar formados por las conexiones rígidas entre las vigas y columnas que obligan a todo el marco a ser deformado cuando se somete a carga lateral. En teoría, bajo cargas laterales intensas resultantes de un sismo, la energía debe ser disipada de una manera uniforme cuando los marcos se distorsionan. Cuando se presentan eventos sísmicos graves, las vigas podrían someterse a deformaciones inelásticas sustanciales, pero el edificio no debe colapsar, por lo tanto, se busca proteger la vida de los ocupantes. El concepto fue popularizado por el deseo de los diseños de arquitectura donde se buscaba aumentar los claros libres sin apoyos y muros de carga en los edificios, lo que nos llevó a la construcción de marcos de acero con grandes claros libres para los cuales se requiere utilizar grandes elementos estructurales.

Los SMRF se han utilizado para resistir las cargas laterales de viento y terremoto desde el cambio de siglo pasado, cuando parcialmente la conexión se logró mediante remachado en caliente, y más tarde, atornillado. El uso de marcos de momentos resistentes de acero soldados en la construcción de edificios comerciales en las regiones sísmicamente activas ha sido una práctica



común desde principios de 1970. La tecnología SMRF se utiliza en todo el mundo; se ha estimado que hay unos 20.000 edificios SMRF en la costa oeste de los EE.UU. y Canadá solamente.

Desde la concepción y el ensayo original de SMRF soldados, varios aspectos del diseño de marcos de acero han cambiado. En primer lugar, los tamaños típicos de vigas y columnas de los edificios se han incrementado, y como tal, se necesitan menos marcos por edificio para resistir la carga lateral. Por consiguiente, la redundancia estructural se ha reducido. En segundo lugar, el proceso de Soldadura por Arco con Núcleo de Fundente (FCAW, por sus siglas en inglés, *Flux-Cored Arc Welding*) (Wire) ha reemplazado al proceso de Soldadura por Arco de Metal Protegido (SMAW, por sus siglas en inglés, *Shielded Metal Arc Welding*) (Stick) para la aplicación de soldaduras en las conexiones de momentos de acero. El acero también ha cambiado con el tiempo, con límites de elasticidad que se han deslizado hacia arriba. Todos estos cambios se están introduciendo con el fin evolutivo de bajar el costo de construcción de los edificios SMRF. Debido a que cada cambio se hace de una manera evolutiva e independiente, pocas pruebas de laboratorio adicionales se han integrado para evaluar los cambios individuales, sin evaluar los desarrollos en conjunto (25).

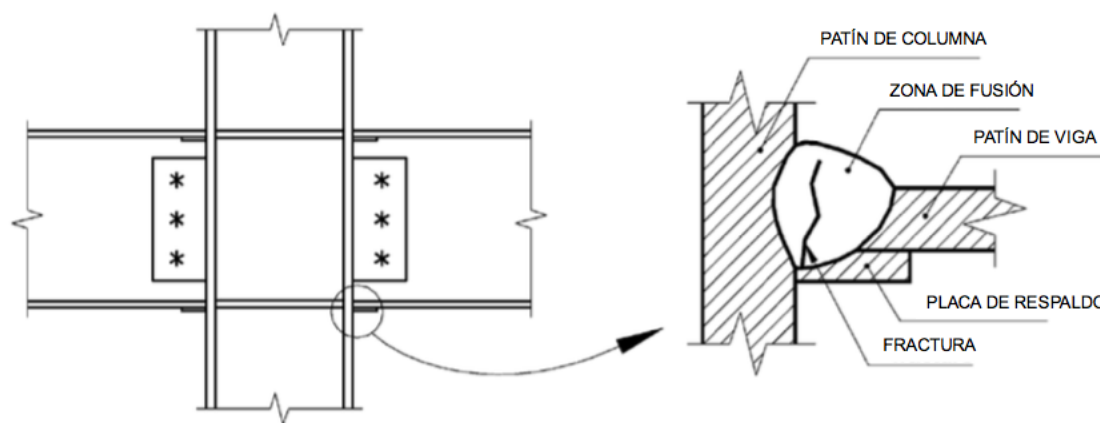
#### **2.5.4.1 Comportamiento de las uniones soldadas de momento resistente de marcos viga-columna**

Los SMRF se han utilizado tradicionalmente en zonas sísmicas para edificios de baja y mediana altura. Este sistema estructural tiene la ventaja de grandes espacios libres de columnas. Por otra parte, los SMRF se consideran adecuados desde el punto de vista sísmico debido a su inherente ductilidad tanto local como globalmente. Sin embargo, los terremotos de Northridge (1994) y Hyogoken-Nanbu (1995) revelaron una serie de fallas frágiles las cuales son indeseables en las uniones soldadas viga-columna y cuestionaron el desempeño sísmico de los SMRF. Este hecho genera preocupación en la

comunidad científica de las causas del mal comportamiento inesperado de conexiones momento viga-columna. Extensos estudios de laboratorio se han llevado a cabo para conocer el rendimiento de las uniones viga-columna y para desarrollar los detalles de conexión y metodología. Entre las posibles causas de las fracturas frágiles en las uniones soldadas se han identificado las siguientes:

1. Trabajo en taller (defectos de soldadura);
2. Concentración de tensiones en la raíz o el borde de la soldadura;
3. Materiales (tenacidad baja debido al metal soldado); y
4. Inusual carga sísmica alta (altos grados de deformación).

Una falla común en la unión viga-columna es el agrietamiento de la unión en el patín inferior de la viga soldada a la columna. (Ver Figura 2. 25 Grieta en soldadura en el patín inferior de la viga). Las principales causas de este tipo de falla son defectos de soldadura en la raíz de la soldadura (soldadura hacia abajo) y las tensiones altas en el patín exterior de la viga. Las grietas inducidas en la raíz de soldadura se pueden propagar ya sea en el patín de la viga y de la membrana, o en el patín de la columna (27).



**Figura 2. 25 Grieta en soldadura en el patín inferior de la viga (27).**

La investigación de las causas de fallas frágiles en la unión viga-columna tomó diferentes direcciones por los últimos terremotos. Investigaciones japonesas se han concentraron en pruebas dinámicas, la influencia de la

temperatura sobre el desempeño de la conexión, las propiedades de los materiales tanto del metal base y el metal de aporte, el desarrollo de nuevos materiales, la geometría de las capas de soldadura y la eliminación de las mismas. Las investigaciones en Estados Unidos han tratado de comprender mejor el rendimiento no lineal y frágil de los marcos estructurales de acero y las propiedades de los materiales y la soldadura, una parte significativa de la investigación se dedica hacia el desarrollo de nuevas geometrías de conexión. En estudios similares, los procedimientos de soldadura en EE.UU. utilizando FCAW y Japón el proceso GMAW han sido comparados. Se sugiere que el proceso GMAW es más costoso, pero puede proporcionar una mayor tenacidad. Nakashima y colaboradores en el artículo *Full-Scale test of beam-column subassemblages having connection details of shop-welding type* de 1998 teniendo como variables principales, el tipo de conexión, el tipo de carga y el tipo de patín obtuvo que el tipo de patín afectó significativamente la capacidad de ductilidad de la unión, así mismo la carga dinámica no mostró ningún efecto perjudicial sobre la ductilidad en comparación con la carga cuasi-estática (28).

El programa experimental de Dexter y colaboradores titulado *Through-thickness properties of column flanges in welded moment connection* del 2000 se enfoca principalmente en la resistencia y ductilidad que se puede presentar a través del patín de la columna y donde fueron probadas uniones en te demostrando que, a pesar de la alta velocidad de deformación, alta entrada de calor por la soldadura y los diseños para inducir fracturas, a través del patín de la columna, este no representó un modo de falla potencial en las conexiones soldadas (29).

Después del terremoto de Northridge varias configuraciones de conexión han sido propuestas por los investigadores para mejorar la ductilidad de las uniones rígidas. Este estudio paramétrico de la fuerza y la ductilidad de las conexiones en vigas de grandes dimensiones se llevó a cabo utilizando el

método de elementos finitos. Los parámetros estudiados son; las propiedades del material, espesor del elemento, longitud del elemento, la soldadura, la forma final del elemento, la igualdad o desigualdad de la longitud inicial y final.

El empleo de la teoría clásica de viga para el cálculo de uniones soldadas de acero ha sido puesto en cuestión desde el terremoto de Northridge en 1994. En este estudio, el mecanismo de transmisión de fuerza en varias conexiones soldadas de acero momento se revisa exhaustivamente basada principalmente en estudios recientes. Los resultados analíticos y experimentales disponibles mostraron que la teoría de la viga no da predicciones precisas de la trayectoria de la tensión en casi todas las conexiones soldadas de acero a causa de los efectos de las condiciones de contorno. Placas verticales cerca de la conexión, como el alma de la viga, el alma de la columna, actúan como un puntal en cierta medida. El mecanismo de transferencia de fuerza en la conexión de la sección de viga reducida (RBS) es esencialmente la misma que en las conexiones de tipo pre-Northridge. También se presentan brevemente algunos modelos analíticos simplificados que pueden ser utilizados como la base de un procedimiento de diseño práctico. Los terremotos de Northridge en 1994 y Kobe 1995 causaron grandes daños en las conexiones de acero. Este tipo de sistema se pensó que era uno de los parteaguas para la resistencia sísmica. En respuesta al daño inesperado, se llevó a cabo una amplia investigación para encontrar maneras de reparar las estructuras de acero dañadas, así como para fortalecer las construcciones de acero existentes y nuevas. Una variedad de nuevas ideas que se han propuesto en los EE.UU. son las conexiones de acero que comúnmente han sido diseñadas por el empleo de la teoría de la viga clásica que se basa en la hipótesis de Bernoulli-Euler, o el supuesto de que secciones transversales de una viga en flexión permanezca plano. Sin embargo, la aplicación de la teoría clásica de la viga en el diseño de las conexiones de acero se ha puesto en entredicho después del terremoto de Northridge (30)

## 2.6 USO DE SOFTWARE PARA EL ANÁLISIS Y DISEÑO DE UNIONES SOLDADAS

La distribución del esfuerzo de cortante en la sección transversal del alma de una viga tipo I se muestra en la Figura 2. 26 la cual se obtiene mediante el uso de la ecuación [5]. En el diseño práctico, el esfuerzo cortante máximo se calcula dividiendo la fuerza cortante total entre la longitud total de la soldadura considerada como una línea. Para vigas tipo I, el valor medio de la tensión de cizallamiento, calculado por la ecuación [4] donde el esfuerzo cortante máximo se calcula dividiendo la fuerza cortante total entre la sección transversal de la soldadura, está dentro del 90% del valor máximo real que se produce en la ubicación del eje neutro del esfuerzo cortante máximo producido véase ecuación [11].

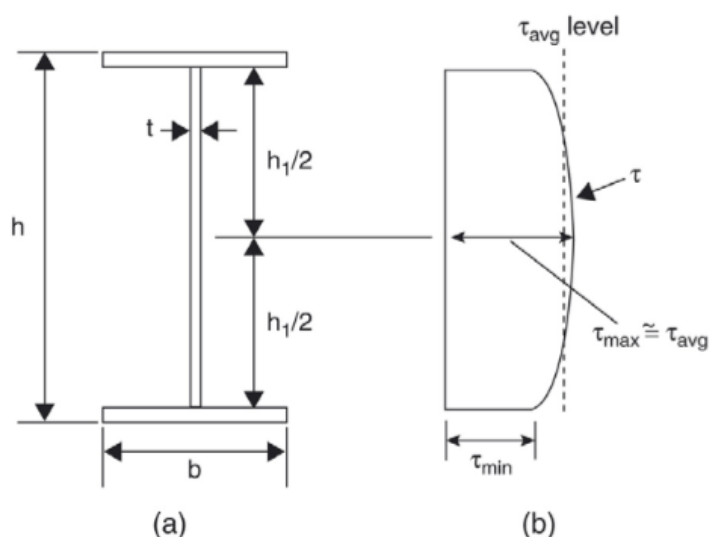


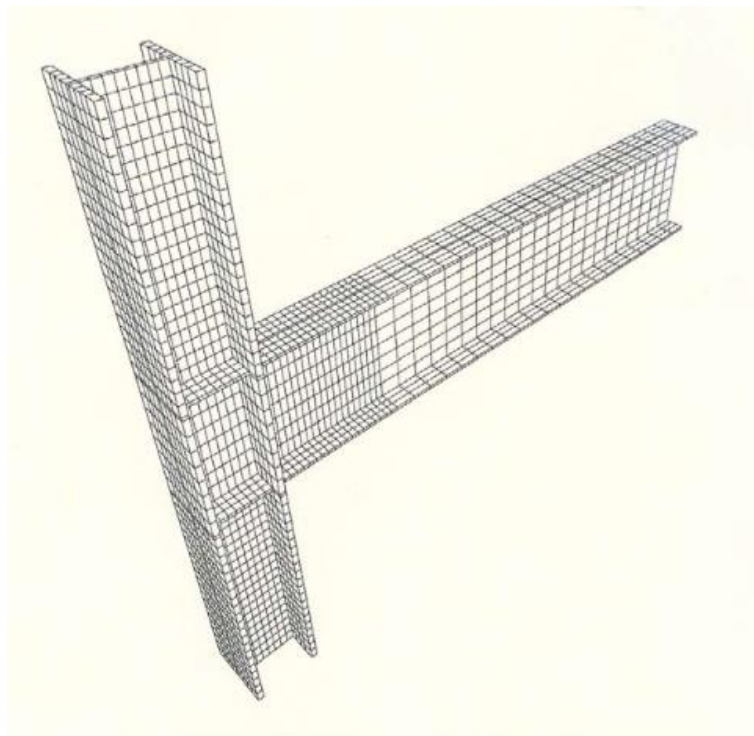
Figura 2. 26 Distribución típica de esfuerzo cortante en el alma de una viga tipo I (31).

$$\tau_{\max} \approx \tau_{\text{avg}} = \frac{V}{A} \quad \text{Ecuación 2.11}$$

La mayor parte de las cargas son transferidas a los patines de las vigas, por lo tanto, el desarrollado para maximizar la eficiencia de las estructuras se ha presentado principalmente para la resistencia a la flexión, una sección en forma de I divide la transferencia de esfuerzos; los patines transfieren principalmente el momento mientras que el alma de la viga transfiere el esfuerzo cortante. Los

cálculos basados en la ecuación 2.4 muestran que los esfuerzos cortantes se representan típicamente entre 90 al 98% de la fuerza total de corte. Los patines de la viga contribuyen muy poco a la transferencia de corte total realizada por la sección transversal y típicamente no necesitan ser considerados en el diseño de corte. En consecuencia, se ha asumido universalmente en el diseño de conexiones que todo el esfuerzo cortante se transfiere a la columna a través del alma de la viga. Este supuesto sólo puede justificarse cuando la hipótesis de Bernoulli-Euler todavía se presenta en la región de conexión. Pero la región de conexión entre viga-columna es una región límite (o región de tensión-perturbada) donde las colocaciones múltiples de placas de acero convergen teniendo como resultado una configuración geométrica complicada. La distribución de los esfuerzos cerca de la conexión se altera de manera significativa debido a los efectos de extremo o efectos St. Venant, y la división de la función entre el patín y el alma, según lo predicho por la teoría de vigas clásica, no se logra y por lo tanto se debe recurrir a otro medio para el análisis y diseño de uniones soldadas como los softwares utilizados en computadoras.

La Figura 2. 27 muestra el enmallado de elementos finitos de una conexión viga-columna a través del software SAP2000. El SAP2000 es un software de uso general para el análisis y diseño de cualquier tipo de sistema estructural. Los sistemas pueden ser básicos o avanzados, van del modelado 2D al 3D, de la geometría simple a lo complejo, se pueden modelar, analizar, diseñar y optimizar utilizando un entorno de modelado basado en objetos prácticos e intuitivos que simplifican y agilizan el proceso de ingeniería. Se rige bajo un motor de análisis de elementos finitos que se base en la práctica del estado del arte de la técnica a través de una evaluación dinámica y no lineal (16) (31).



**Figura 2. 27 Mallado de elemento finito para una unión viga-columna (16).**

La Figura 2. 28 presenta la distribución de esfuerzos cortantes obtenidos a partir del análisis de elementos finitos. El esfuerzo puntual se aplica al extremo de la viga, los esfuerzos cortantes a lo largo del borde de la viga no deben variar si la teoría clásica de la viga se cumpliera. Pero las transferencias de los esfuerzos cortantes cercanos al patín de la columna se alteran significativamente. Los resultados del análisis de elementos finitos también revelan que la hipótesis de Bernoulli-Euler no se cumple en el patín de la columna; los efectos en el borde de la viga no desaparecieron hasta ubicarse aproximadamente 40% por debajo de la altura de la viga desde el patín de la columna. La magnitud del esfuerzo cortante en la mitad de la altura de la viga es mínimo y no un máximo. Incluso el esfuerzo cortante tiende a ocurrir inversamente en la parte media del alma de la viga. El alma de la viga no transfiere absolutamente el esfuerzo cortante desde la viga al patín de la columna, dando como resultado el exceso de esfuerzos en el patín de la viga en conexiones viga-columna. El esfuerzo cortante es inesperado en el patín de la

viga ya que estos esfuerzos se esperan sean absorbidos por el alma de la viga y cuando se combina con otros efectos perjudiciales existentes alrededor de la unión soldada, se aumenta así la propensión de la conexión para llegar a la fractura por fragilidad ver Figura 2. 29. Siendo esta unas de las causas más discutidas exhaustivamente como una de las posibles causas de fallas en las conexiones que fueron estudiadas después del terremoto de 1994 en Northridge (32).

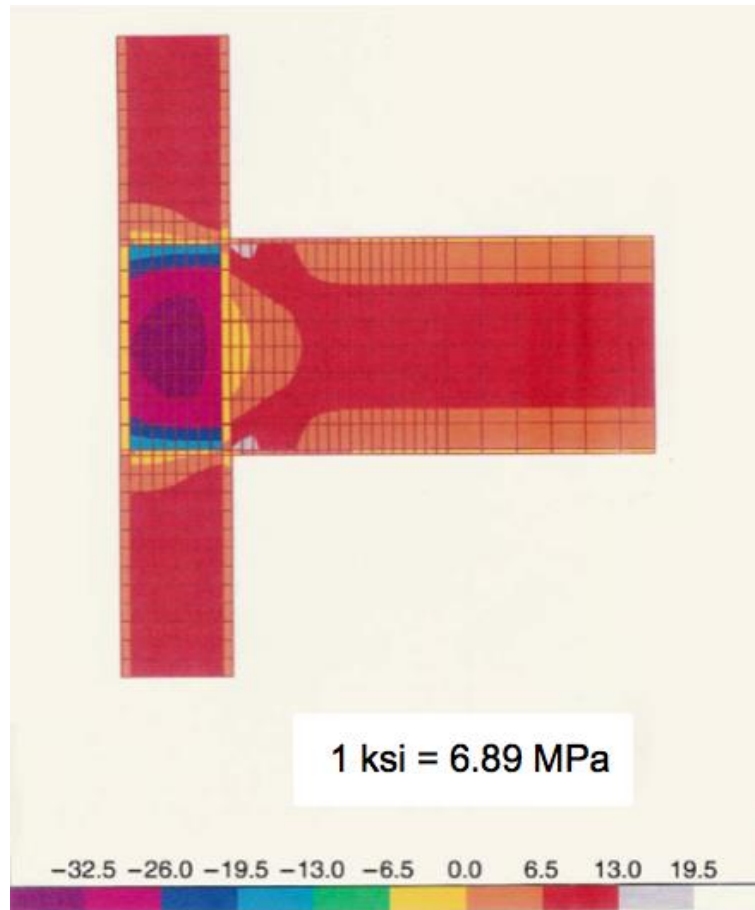
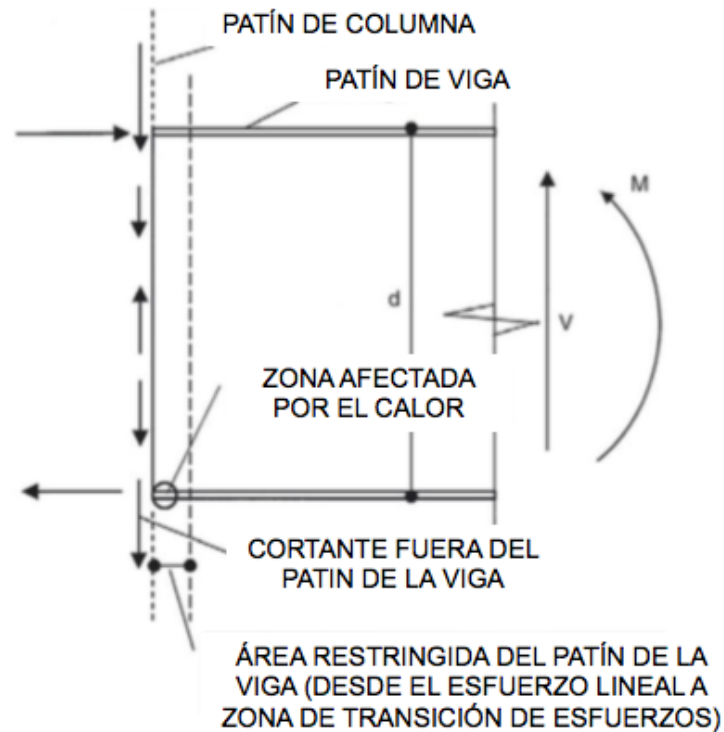


Figura 2. 28 Distribución de esfuerzos cortantes en una unión viga-columna (16).





**Figura 2. 29 Transferencias de esfuerzos en conexión viga-columna (32).**

Los resultados analíticos y experimentales han demostrado que la teoría de la viga no da predicciones precisas de la transmisión de esfuerzos en casi todas las conexiones de acero soldadas (sin refuerzo o reforzada) debido a los efectos de las condiciones de borde. Tanto la identificación de la transmisión de los esfuerzos como el establecimiento de un modelo analítico simplificado son esenciales para el desarrollo de un método de diseño racional y práctico.

## **CAPÍTULO 3**

# **DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE BIBLIOGRAFÍA**

Mediante la revisión bibliográfica se documentaron diferentes aspectos que incurren en el diseño de uniones soldadas, desde la teoría de la viga en la cual se basa el diseño de las uniones soldadas, las afectaciones que se dieron con el terremoto de Northridge en Estados Unidos de 1994 siendo un parteaguas en el diseño de las estructuras y las aplicaciones que tienen los softwares por computadora que buscan hacer más eficiente y confiable el diseño estructural.

Según la AWS la soldadura es el método más eficaz y el único posible de unir dos o más piezas metálicas para hacerlas funcionar como un solo elemento, mediante la coalescencia de los materiales donde uno o más materiales son elevados a la temperatura de fusión con o sin la aplicación de presión (33).

Las conexiones soldadas son parte íntima de la estructura debido que a través de ellas es posible transferir las cargas presentes en una estructura desde las vigas a las columnas, de las columnas a la cimentación y por último de la cimentación al suelo.

Sin embargo, una de las principales desventajas de las conexiones soldadas son los esfuerzos residuales que se presentan en las mismas, que son de carácter acumulativo y que podrían llevar a alguna falla. Las uniones soldadas se originan de un metal base y un metal de aporte y por lo tanto son estructuras no homogéneas que pueden tener poros, inclusiones de escoria y socavados (10).

El diseño de uniones soldadas se basa en normas oficiales, las cuales son precavidas con el fin de preservar la integridad estructural, sin embargo, hoy en día la globalización y la competencia laboral obliga a tener procedimientos que optimicen los materiales con los que se fabrica una estructura para que esta sea económica sin embargo la estructura deberá tener el más alto nivel de seguridad estructural (19).

Después del terremoto de Northridge, California en 1994 se encontró que las conexiones soldadas no pudieron resistir las distorsiones esperadas por terremotos, presentándose la fractura por debajo de los niveles proyectados, esto pudo ser debido al enfoque global en el que se basan las normas oficiales. Las normas oficiales, aunque utilizan factores de seguridad manejan la hipótesis de que la unión es un fenómeno aislado (25).

Debido al cuestionamiento que se ha tenido para las normas oficiales cuando lo proyectado es superado y llevado a la falla la utilización de softwares por computadora ha sido una herramienta capaz de analizar, diseñar y optimizar con mayor precisión, debido a que los softwares son capaces de

incluir fenómenos externos y manejar la unión soldadas como un fenómeno heterogéneo llevando el análisis más a la realidad (31).

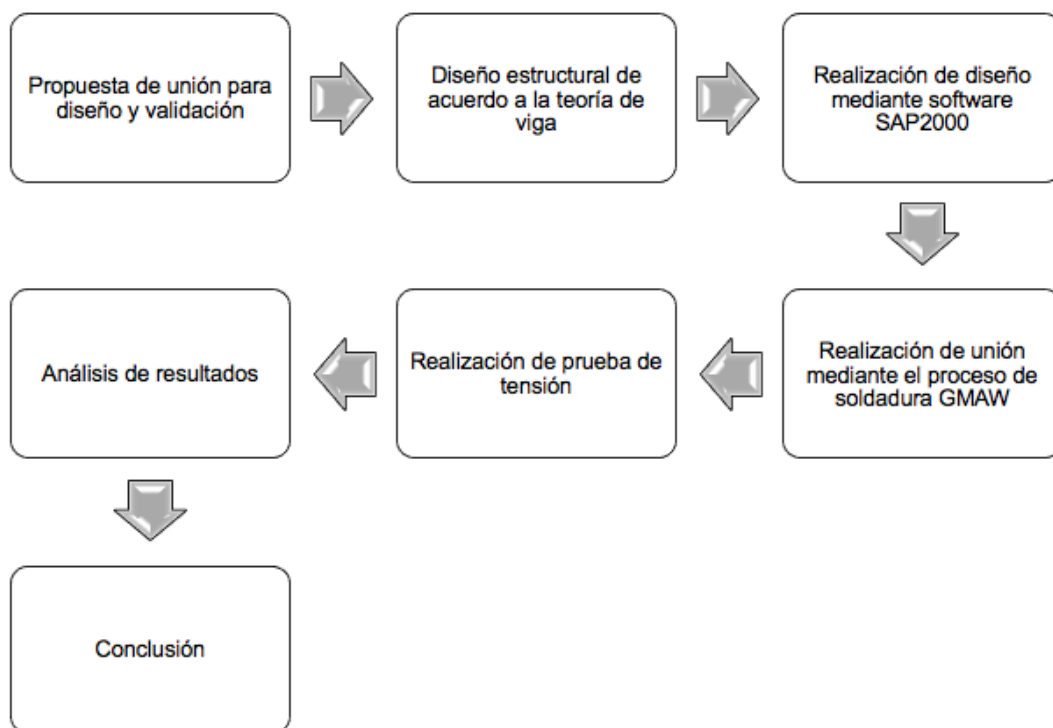
# CAPÍTULO 4

## CASO DE ESTUDIO

### 4.1 Descripción de la metodología

Se propone un caso para comprender la relación entre el diseño de las uniones soldadas mediante la teoría clásica de viga y los softwares por computadora, se realizará una prueba destructiva para corroborar lo encontrado en la revisión bibliográfica.

En la Figura 4. 1 se muestra la metodología a seguir para la realización del caso de estudio. El cual consistió en realizar una propuesta de unión, la realización del diseño de unión mediante la teoría de la viga y el uso de un software por computadora para validar y comparar con el proceso realizado mediante la teoría de la viga, se realizó una prueba de tensión para conocer las propiedades mecánicas de la unión, con base a los resultados obtenidos de las actividades anteriormente mencionadas se procederá a realizar las conclusiones.



**Figura 4. 1 Metodología del desarrollo experimental**

## 4.2 Propuesta de unión

La unión a diseñar se trata de una oreja de izaje de acero ASTM A36 de 19,05mm de espesor la cual es unida a una placa base de acero ASTM A36 de 12,7mm.

La unión en la oreja de izaje es sometida a carga de tensión ya que las orejas están conectadas a tanques de almacenamiento y cuando se requiere que estos tanques sean trasladados de un lugar a otro los tanques son sujetos a través de las orejas y movidos con grúas, se busca que la unión sea capaz de sujetar el peso propio de la estructura y resistir la tensión a la cual es sometida la unión una vez que es izada la oreja.

Los tanques son utilizados para el tratamiento de aguas residuales durante la extracción de petróleo, pueden ser utilizados para el almacenamiento de

agua dulce, los tanques tienen una dimensión de 3.05m x 2.43m x 12.19m. Con una capacidad de 71,544.28 l.



Figura 4. 2 Tanque de almacenamiento (Se observa en recuadro orejas de izaje).

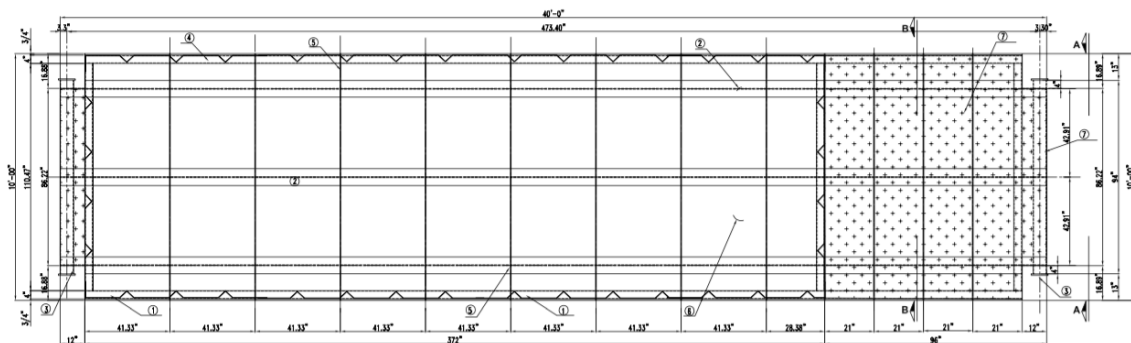


Figura 4. 3 Vista en planta inferior de tanque de almacenamiento.

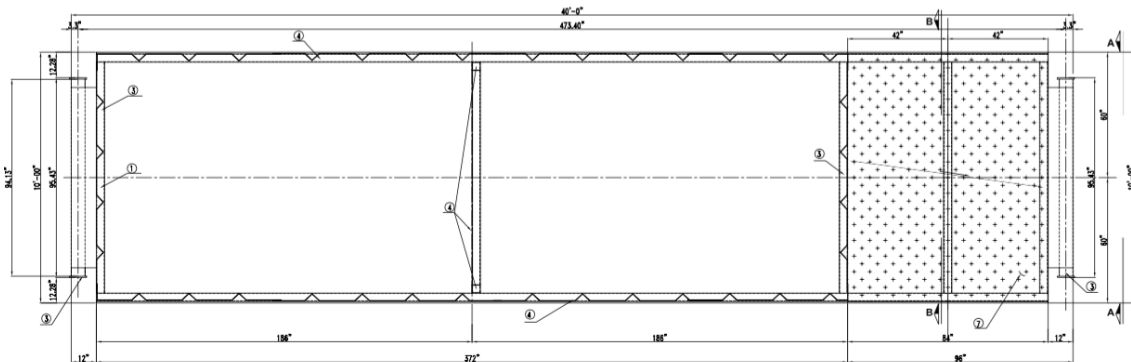


Figura 4. 4 Vista en planta superior de tanque de almacenamiento.

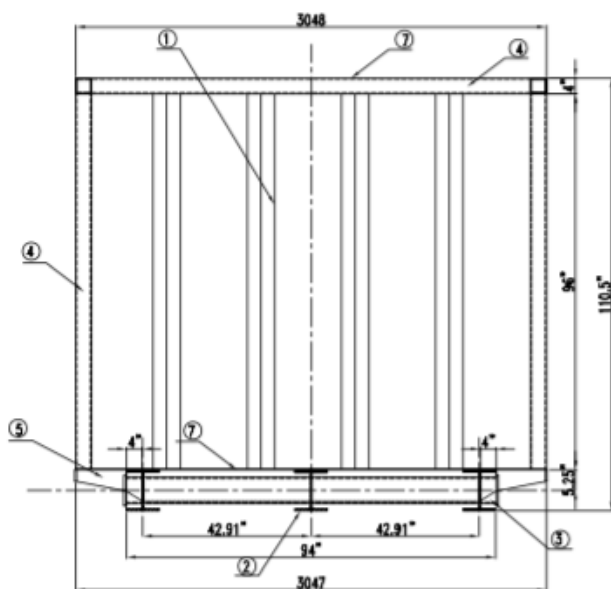


Figura 4. 5 Corte A-A de tanque de almacenamiento. (Los números en círculos indican el material con el que está fabricado)

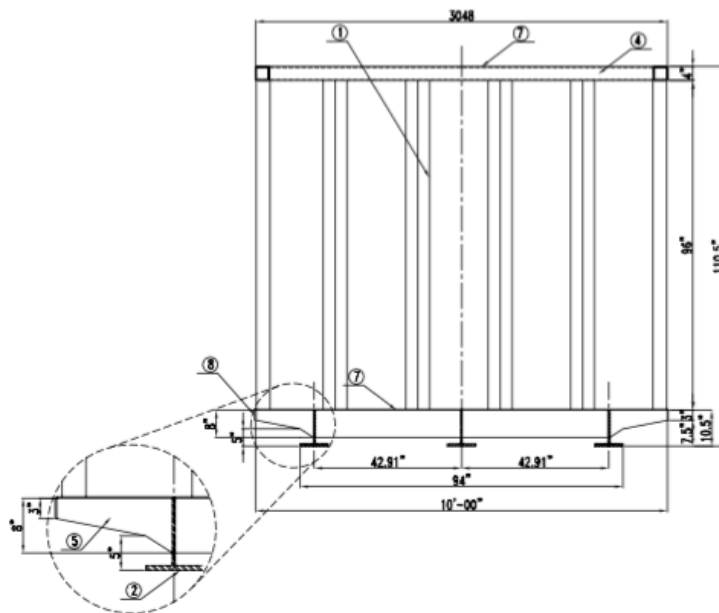


Figura 4. 6 Corte B-B de tanque de almacenamiento. (Los números en círculos indican el material con el que está fabricado).



Tabla 4. 1 Lista de material que componen el tanque de almacenamiento.

		DESPIECE DE CONTENEDOR		
	MATERIAL	CANTIDAD UNIDAD	PESO kg/m - kg/m2	PESO
1	Viga de 8" x 4.28 kg/m	36.57 ml	4.28	156.52 kg
2	Tubo redondo de 4" de Ø 2.07 kg/m	5.00 ml	2.07	10.35 kg
3	Tubo cuadrado de 4" x ¼"	49.44 ml	20.00	988.80 kg
4	Placa ondulada de ¼"	58.32 m2	49.85	2907.25 kg
5	Placa de 3/8"	8.40 m2	74.77	628.07 kg
6	Placa de ¼"	27.00 m2	49.85	1345.95 kg
7	Placa antiderrapante ¼"	9.00 m2	49.85	448.65 kg
8	Placa de ½" x 3"	2.29 m2	99.69	227.89 kg
<b>TOTAL</b>				<b>6713.48 kg</b>

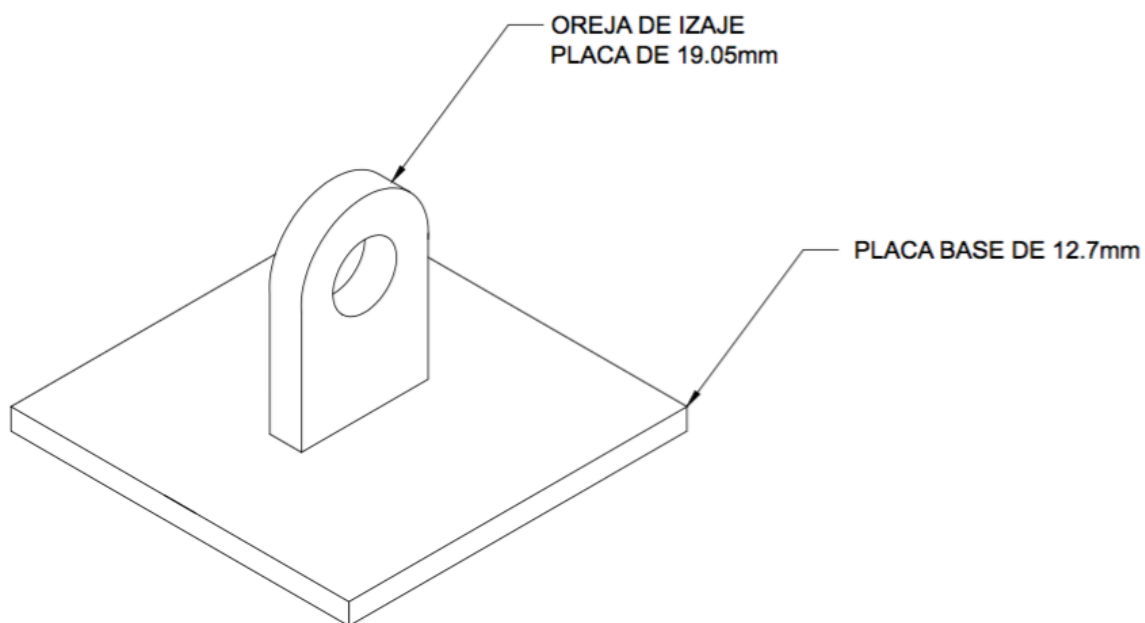


Figura 4. 7 Isométrico de unión a diseñar, oreja de izaje a placa base.

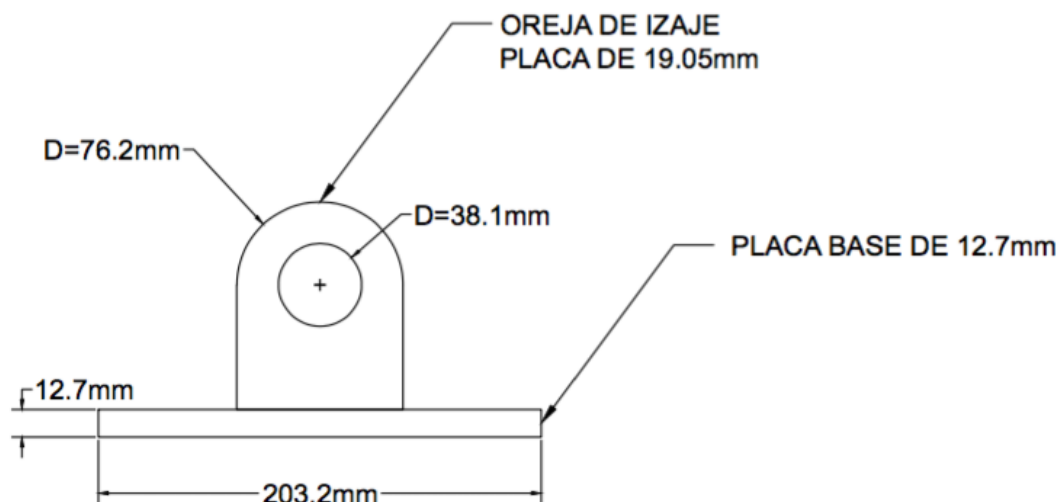


Figura 4. 8 Vista lateral de unión a diseñar, oreja de izaje a placa base.

#### 4.2.1 Metal base

En la Tabla 4. 2 Especificación ASTM de la composición química del acero ASTM A36 .Tabla 4. 2 se muestra la composición química del acero ASTM A36 de acuerdo a las especificaciones ASTM.

Tabla 4. 2 Especificación ASTM de la composición química del acero ASTM A36 (5).

ASTM A36	Requisitos químicos					
	C (Máx.)	Mn	P (Máx.)	S(Máx.)	Si (Máx.)	Cu (Min.)
	0.25	-	0.030	0.030	0.40 Max	0.20

#### 4.2.2 Metal de aporte

En la Tabla 4. 3 se muestra la composición química del electrodo ER70S-6 que se utilizara para la realización de la probeta de soldadura. El electrodo tiene una resistencia a la tensión de 480 MPa.

**Tabla 4. 3 Especificación AWS A5.18 de la composición química del electrodo ER70S-6 (34).**

ER70S-6	Requisitos químicos									
	C	Mn	Si	P (Máx.)	S (Máx.)	Ni (Máx.)	Cr (Máx.)	Mo (Máx.)	V (Máx.)	Cu (Máx.)
	De 0.06 a 0.15 %	De 1.40 a 1.85 %	0.80 a 1.15 %	0.25 %	0.035 %	0.15 %	0.15 %	0.15 %	0.03 %	0.50 %

### 4.3 Diseño de unión soldada

A continuación, se describen los pasos realizados para el diseño de la unión soldada.

1. Encontrar la posición de la conexión soldada donde el esfuerzo es máximo.
2. Encontrar cada una de los esfuerzos en la conexión soldada en la posición a evaluar.
3. Seleccionar de Tabla 4. 4 la ecuación apropiada para encontrar el esfuerzo por unidad de longitud en la soldadura.
4. Usando la Tabla 2. 2 encontrar las propiedades adecuadas de la conexión soldada considerada como una línea
5. Determinar los requerimientos efectivos para el tamaño de garganta que soportaran los esfuerzos en la soldadura.

**Tabla 4. 4 Resumen de ecuaciones de acuerdo al tipo de carga para calcular el esfuerzo unitario y por unidad de longitud**

Tipo de carga	Ecuación estándar para esfuerzo unitario	Ecuación para esfuerzo por unidad de longitud
Tensión o compresión	$\sigma = \frac{P}{A}$ ksi (MPa)	$f = \frac{P}{L_w}$ lb/in. (N/mm)
Cortante vertical	$\tau = \frac{V}{A}$ ksi (MPa)	$f = \frac{V}{L_w}$ in./in. (N/mm)
Flexión	$\sigma = \frac{M}{S} = \frac{Mc}{I}$ ksi (MPa)	$f = \frac{M}{S_w} = \frac{Mc}{I_w}$ lb/in. (N/mm)
Torsión	$\tau = \frac{Tc}{J}$ ksi (MPa)	$f = \frac{Tc}{J_w}$ lb/in. (N/mm)

### 4.3.1 Factor de Carga y Resistencia

La Especificación AISC proporciona dos métodos aceptables para diseñar miembros de acero estructural y sus conectores. Éstos son el Diseño con factores de carga y resistencia (LRFD, por sus siglas en inglés, *Load and Resistance Factor Design*) y el Diseño por esfuerzos permisibles (ASD, por sus siglas en inglés, *Allowable Strength Design*).

La resistencia requerida de un miembro para el método LRFD (35) se determina a partir de las combinaciones de cargas dadas en el reglamento de construcción aplicable en el país o ciudad. Si no existe este reglamento, los valores para utilizar son los siguientes.

1.  $U = 1.4D$
2.  $U = 1.2D + 1.6L + 0.5(L \text{ o } S \text{ o } R)$
3.  $U = 1.2D + 1.6(L \text{ o } S \text{ o } R) + (L \text{ o } 0.5W)$
4.  $U = 1.2D + 1.0W + L + 0.5(L \text{ o } S \text{ o } R)$
5.  $U = 1.2D + 1.0E + L + 0.2S$
6.  $U = 0.9D + 1.0W$
7.  $U = 0.9D + 1.0E$

Dónde:

U = carga factorizada o de diseño.

D = carga muerta.

L = carga viva debida a la ocupación.

$L_r$  = carga viva del techo.

S = carga de nieve.

R = carga nominal debida a la precipitación pluvial o el hielo iniciales, independientemente de la contribución por encharcamiento.

W = carga de viento.

E = carga de sismo

Para el componente en estudio se utilizará la combinación de carga 1, ya que el movimiento del componente representa el peso propio de la estructura que se conoce como carga muerta.

De acuerdo a los planos se obtuvo que el peso muerto de la estructura es de 6715.13kg por lo tanto se tiene que.

$$U = 1.4D$$

$$U = 1.4 (6713.48\text{kg}) = 9398.87\text{kg}$$

Se busca que el componente tenga 4 orejas de izaje así que la carga obtenida de 9401.18kg es dividida, obteniendo el peso a resistir de cada oreja.

$$\frac{9398.87\text{kg}}{4} = 2349.72\text{kg}$$

Para manejar N se multiplica por la gravedad.

$$23050.73 \text{ N}$$

### 4.3.2 Determinación de esfuerzos por unidad de longitud

La unión soldada será sometida a tensión una vez que sea izada la oreja, debido a la excentricidad de la carga se presentara una torsión en la unión de soldadura por lo tanto se ocuparan dichas ecuaciones para calcular la longitud efectiva de la garganta de la soldadura.

Para calcular el esfuerzo de tensión por unidad de longitud es determinada por la Ecuación 2.3.

$$f = \frac{P}{Lw} = f = \frac{23050.73N}{190.5mm} = 121.00 \text{ N/mm}$$

Dónde:

$f$  = Fuerza por unidad de longitud;

$P$  = Fuerza aplicada; y

$Lw$  = Longitud total de la soldadura considerada como una línea.

Debido a la excentricidad de la carga se tiene un esfuerzo torsionante en la unión de soldadura donde la carga se divide en un componente horizontal y uno vertical.

La componente horizontal de torsión,  $fh$  es determinada por la Ecuación 2.10.

$$fh = \frac{T(\frac{d}{2})}{Jw} = fh = \frac{(23050.73N * 95.25mm)(\frac{76.2mm}{2})}{144026.93mm^3} = 580.80 \text{ N/mm}$$

Dónde:

$fh$  = Fuerza horizontal por unidad de longitud;

$T$  = Torque en la unión soldada, fuerza aplicada por la longitud del elemento torsionado.

$d$  = Longitud vertical de la soldadura; y

$Jw$  = Momento polar de inercia de la soldadura considerada como una línea.

La componente vertical de torsión,  $f_v$  es determinada por la Ecuación 2.10.

$$f_v = \frac{T(c)}{J_w} = f_v = \frac{(23050.73N \cdot 95.25mm)(39.17mm)}{144026.93mm^3} = 597.12 \text{ N/mm}$$

Dónde:

$f_v$  = Fuerza vertical por unidad de longitud;

$T$  = Torque en la unión soldada, fuerza aplicada por la longitud del elemento torsionado.

$c$  = Centroide de la geometría de la soldadura, distancia desde el eje neutral de la soldadura a la distancia más lejana al eje de la soldadura; y

$J_w$  = Momento polar de inercia de la soldadura considerada como una línea.

La fuerza resultante es determinada por la siguiente ecuación.

$$f_r = \sqrt{f_h^2 + (f_v + f_s)^2}$$

$$f_r = \sqrt{\left(\frac{580.80N}{mm}\right)^2 + \left(\frac{597.12N}{mm} + \frac{121.00N}{mm}\right)^2} = 923.59 \text{ N/mm}$$

#### 4.3.2.1 Obtención de tamaño y garganta de soldadura.

Para calcular la garganta efectiva se utilizará el esfuerzo encontrado con la ecuación de torsión debido a que es superior al esfuerzo de tensión.

Utilizando el procedimiento LRFD se calculará el área efectiva de la soldadura de acuerdo al esfuerzo nominal.

$$\phi F_n = 0.75 (0.6 F_{EXX})$$

Dónde:

$\phi$  = Factor de resistencia LRFD

$F_n$  = Esfuerzo nominal.

$F_{EXX}$  = Esfuerzo mínimo a la tensión del metal de soldadura.

Utilizando un electrodo ER70S-6

$$\phi F_n = 0.75 (0.6 \times 481.88 \text{ MPa})$$

$$\phi F_n = 216.82 \text{ MPa}$$

La garganta efectiva es determinada mediante la siguiente ecuación.

$$E = \frac{f}{\phi F_n}$$

Dónde:

E= Garganta efectiva

f= Esfuerzo

$\phi$  = Factor de resistencia LRFD

$F_n$  = Esfuerzo nominal.

$F_{EXX}$  = Esfuerzo mínimo a la tensión del metal de soldadura.

Se tiene:

$$E = \frac{923.59 \text{ N/mm}}{216.82 \text{ N/mm}^2} = 4.26 \text{ mm}$$

$$E \approx 5 \text{ mm}$$

Asumiendo que el tamaño de la soldadura para ambas piernas es el mismo se tiene.

$$S = \frac{E}{\text{sen}(45^\circ)}$$

Dónde:

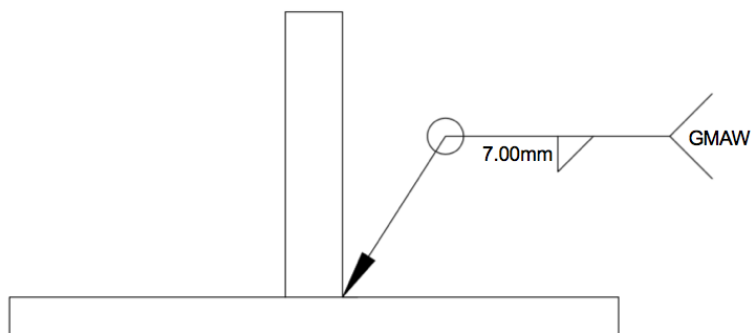
S= Longitud de la pierna.

E= Garganta efectiva.

Se tiene:

$$S = \frac{5}{0.707} = 7.02 \text{ mm}$$



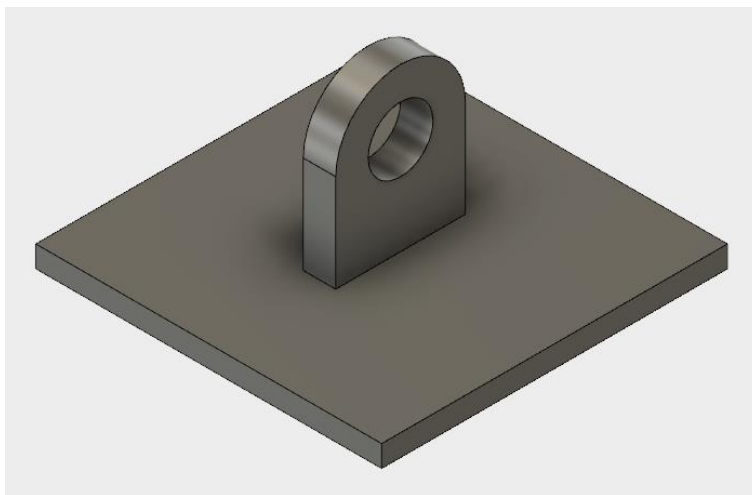


**Figura 4. 9 Diagrama de unión soldada para el diseño de soldadura para esfuerzo por unidad de longitud.**

### 4.3.3 Determinación de esfuerzos mediante software

Para la determinación de esfuerzos mediante software se utilizó el programa por computadora SAP2000.

Es necesario cargar la geometría de la pieza, a la cual se le asigna la carga factorizada por el método LRFD.



**Figura 4. 10 Geometría de pieza 3D, considerando metal base acero ASTM A36.**

Durante la recopilación del estado del arte para el diseño de uniones soldadas se encontró que la separación del mallado influye en los resultados que se obtendrán a través del software, para este estudio se propone un mallado de 7, 5, 3 y 1mm de separación.

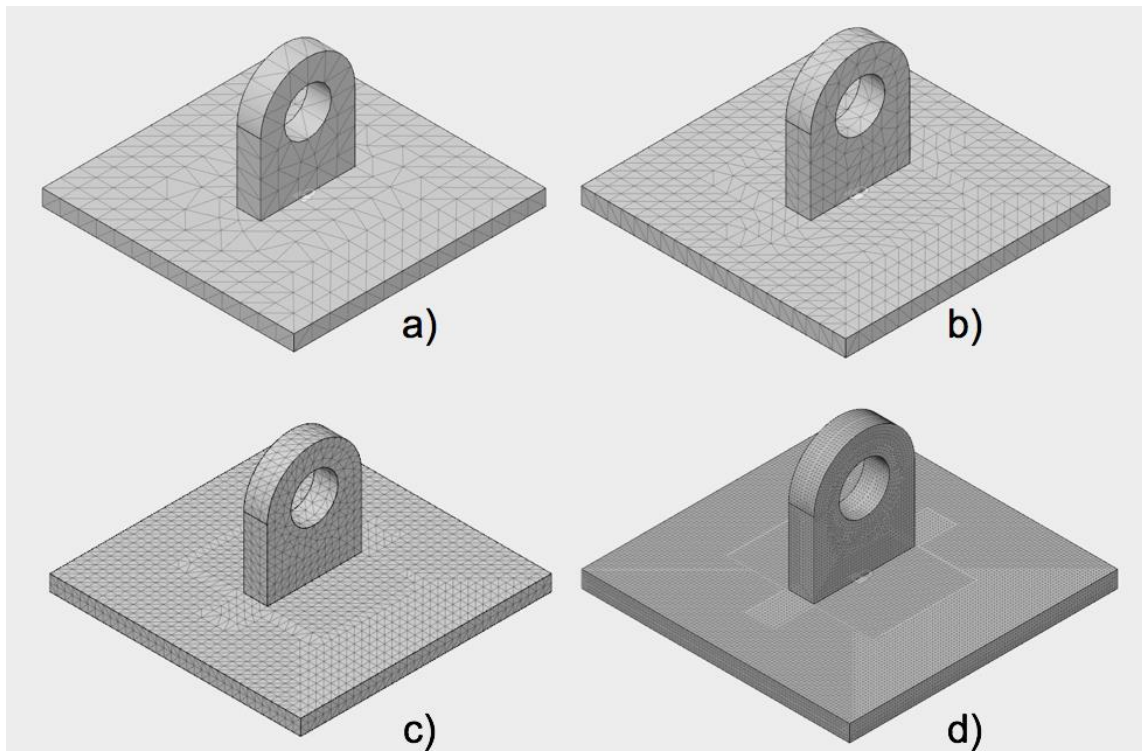


Figura 4. 11 Mallado de la geometría a soldar a) 7mm, b) 5mm, c) 3mm, y d) 1mm de separación.

A la geometría se le asigna la carga obtenida por el método LRFD, la cual representa el peso muerto factorizado de la estructura, esta carga es descompuesta para encontrar las componentes.

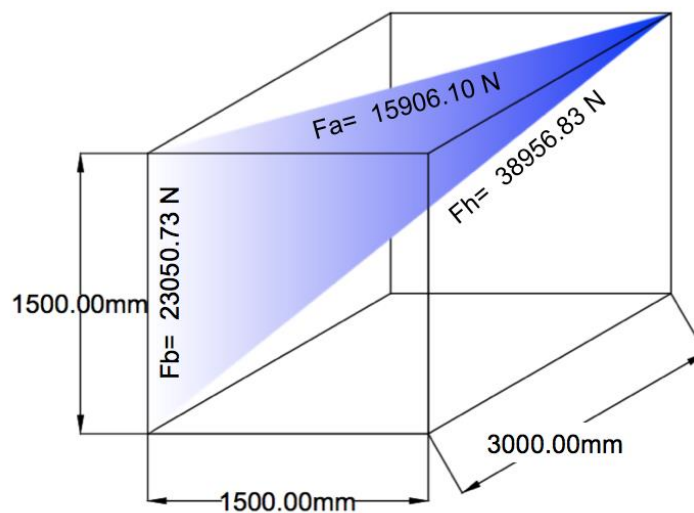


Figura 4. 12 Descomposición de la carga muerta factorizada obtenida por el factor LRFD.

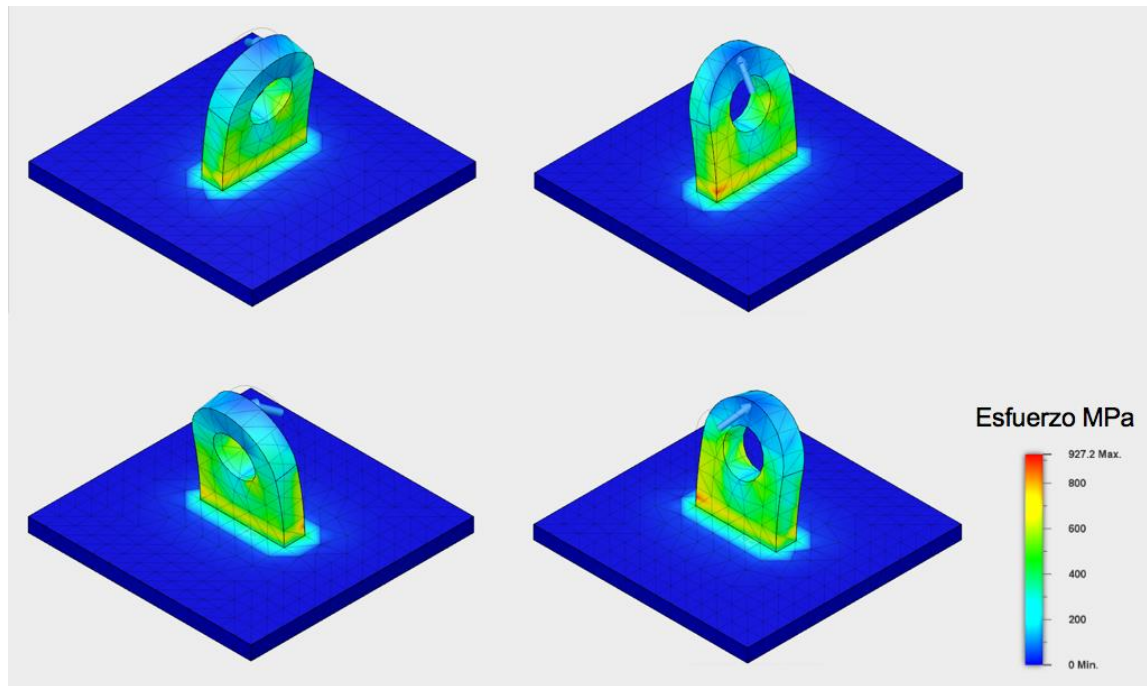


Figura 4. 13 Asignación de la carga para la pieza con una separación de mallado de 7mm. Esfuerzo máximo obtenido de 927.2 MPa.

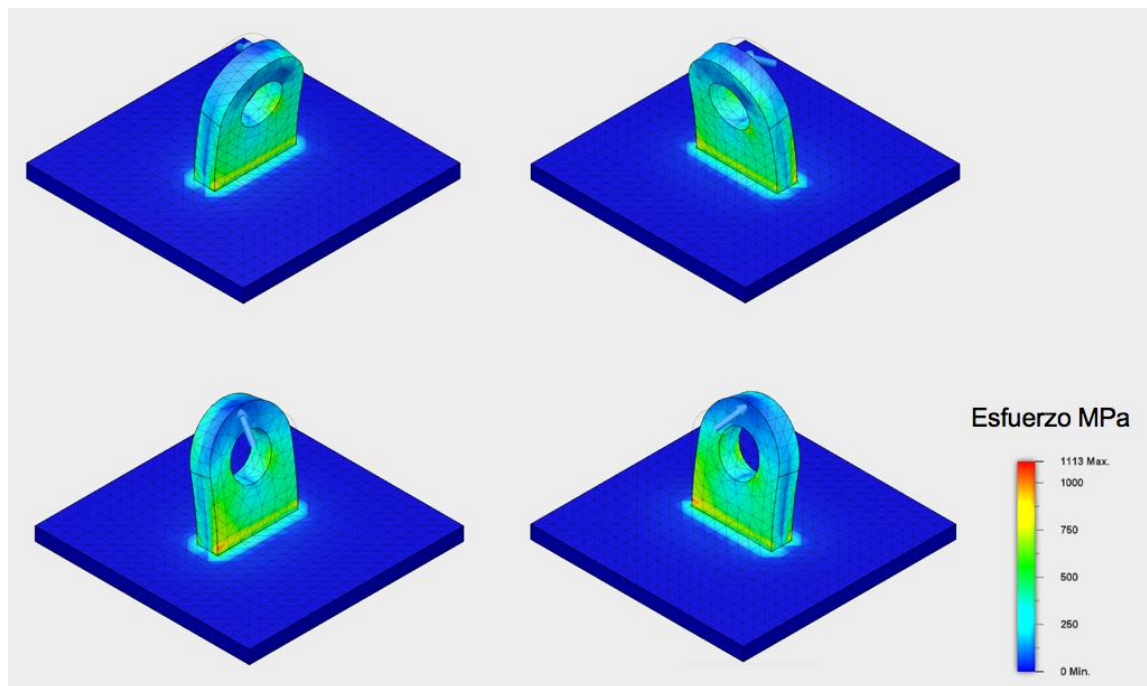
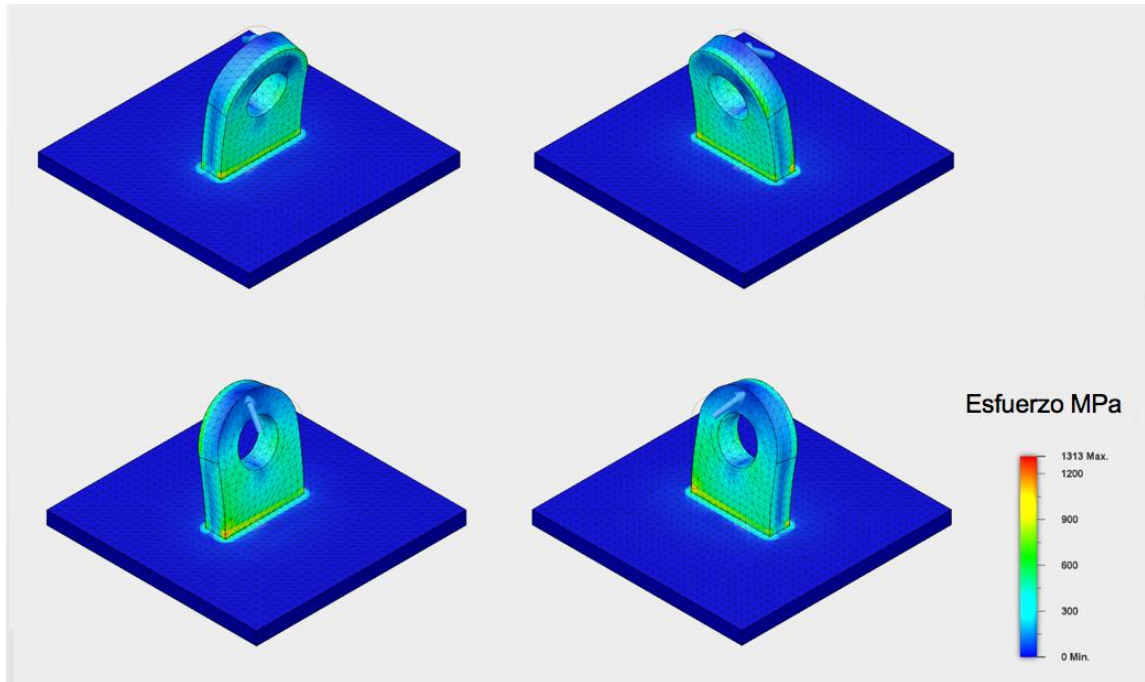
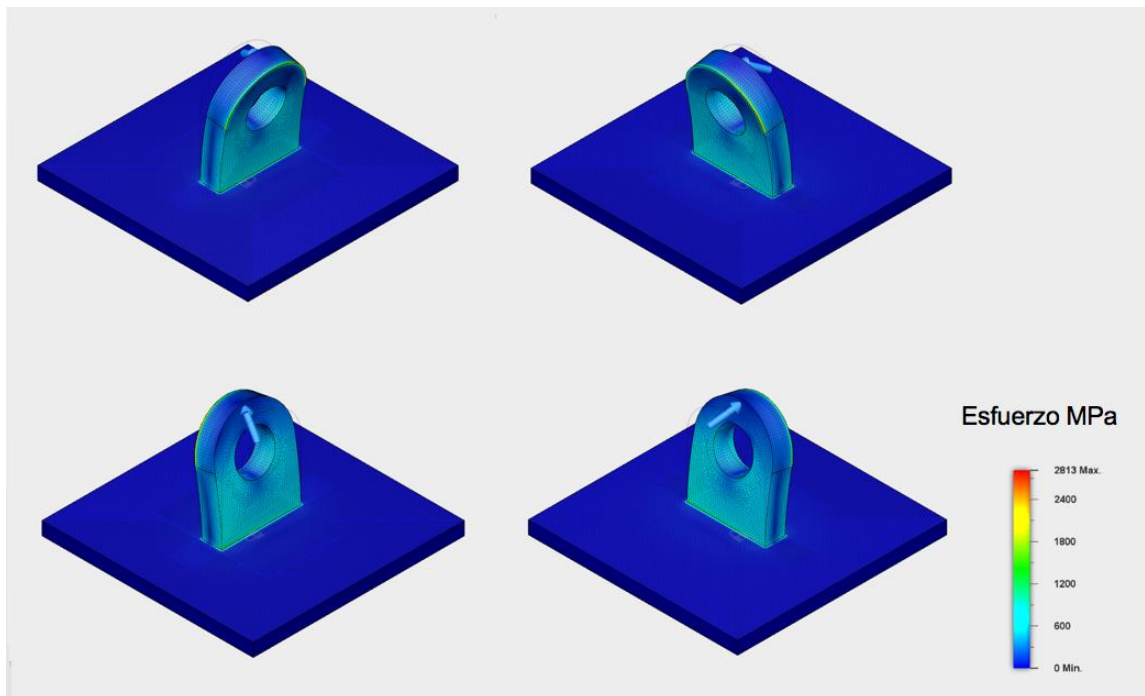


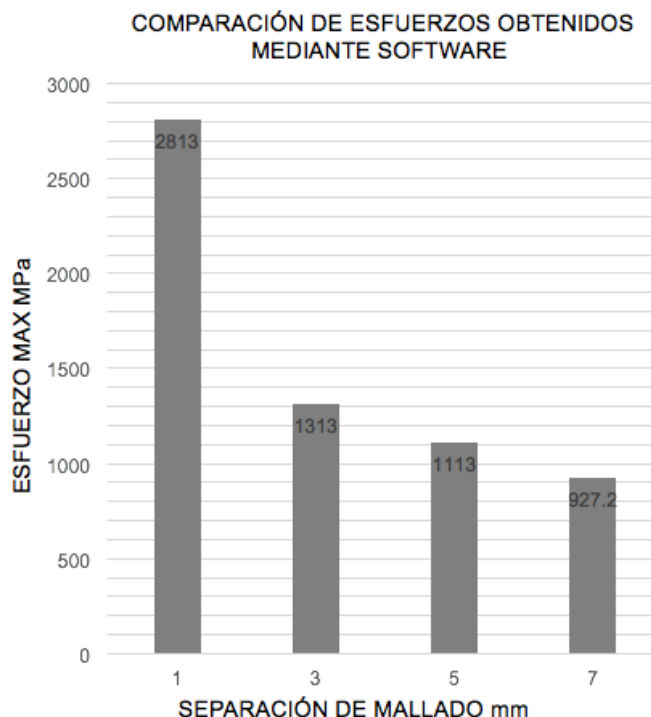
Figura 4. 14 Asignación de la carga para la pieza con una separación de mallado de 5mm. Esfuerzo máximo obtenido de 1113.2 MPa.



**Figura 4. 15** Asignación de la carga para la pieza con una separación de mallado de 3mm.  
Esfuerzo máximo obtenido de 1313.00 MPa.



**Figura 4. 16** Asignación de la carga para la pieza con una separación de mallado de 1mm.  
Esfuerzo máximo obtenido de 2813.00 MPa.



**Figura 4. 17 Grafica para la comparación de esfuerzos obtenidos mediante software de acuerdo a la separación de mallado.**

La grafica muestra una diferencia de hasta 46.67% en comparación entre el mallado con una separación de 3 y 1mm. También se observa que entre es más fino el mallado los esfuerzos son más localizados, es decir para el mallado de 7mm los esfuerzos se localizan principalmente en el cuerpo de la oreja a partir de la unión a placa base y para el mallado de 1mm los mayores esfuerzos son localizados en el lado externo de la oreja.

Para el diseño de la soldadura se utilizará el esfuerzo máximo obtenido para el mallado de 1mm de separación el cual es de 2813.00 MPa que es equivalente a 2813.00 N/mm<sup>2</sup>.

#### **4.3.3.1 Obtención de tamaño de soldadura.**

De acuerdo a la Ecuación 2.2 se tiene.

$$\sigma = \frac{P}{A} = 2813.00 \text{ N/mm}^2 = \frac{23050.73 \text{ N}}{A}$$

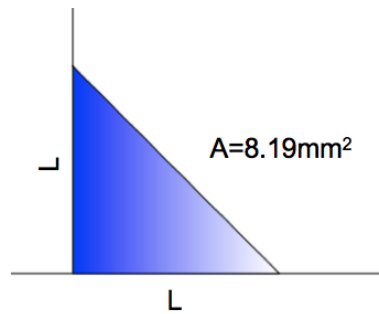
Dónde:

$\sigma$  = Esfuerzo máximo;  
 $P$  = Fuerza aplicada; y  
 $A$  = Área total de la sección transversal.

Se despeja el área de la sección transversal de la soldadura.

$$A = \frac{23050.73N}{2813.00N/mm^2}$$

$$A = 8.19mm^2$$

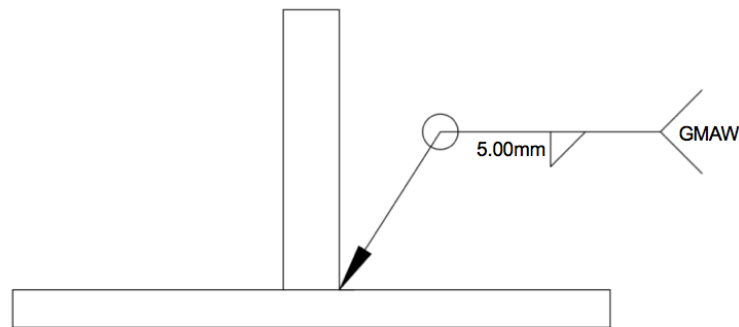


Considerando que los catetos de la soldadura son del mismo tamaño tenemos que.

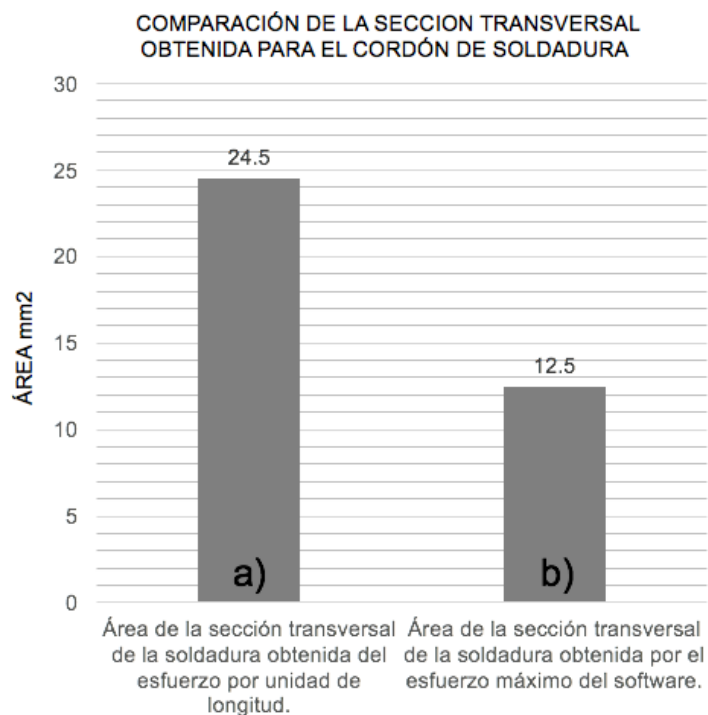
$$\frac{L^2}{2} = 8.19mm^2$$

$$L = \sqrt{8.19mm^2(2)}$$

$$L = 4.04mm \approx 5.00mm$$



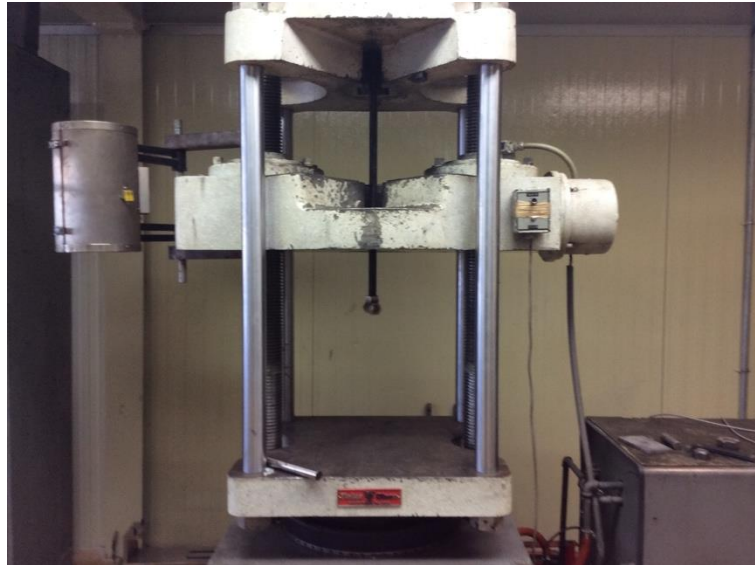
**Figura 4. 18 Diagrama de unión soldada para el diseño de soldadura para esfuerzo obtenido mediante software.**



**Figura 4. 19 Grafica de comparación entre la sección transversal obtenida por el diseño de esfuerzo por unidad de longitud y la sección transversal obtenida por el esfuerzo máximo mediante el software. Se observa una reducción área de hasta 51.02%.**

#### **4.4 Ensayo de tensión**

Se realizó una prueba de tensión con una maquina Tinius Olsen Super L290 con una carga de 600KN para la oreja de 19.05mm de espesor unida a la placa base con un espesor de 12,7mm. La prueba no es un método acreditado y consistió en realizar dos uniones de orejas en cada una de las caras de la placa base, aplicando una fuerza de tensión y determinando su resistencia máxima a la fractura.



**Figura 4. 20** Maquina utilizada para realizar las pruebas de tensión con capacidad de 600 KN.



**Figura 4. 21** Probeta para ensayo de tensión.





**Figura 4. 22 Ensamble de componente y dispositivos antes del ensayo.**



**Figura 4. 23 Colocación esquemática del componente para aplicar la carga.**

En la Figura 4. 24 se ve que la probeta ensayada la fractura ocurrió en el metal base de la oreja de izaje, la carga a la cual ocurrió la fractura fue de 37500kgf. Los resultados obtenidos confirman que el diseño de soldadura fue el correcto ya que el esfuerzo al que se sometió la unión es 10 veces superior a la carga de diseño.



Figura 4. 24 Fractura en el metal base del lado externo de la oreja.

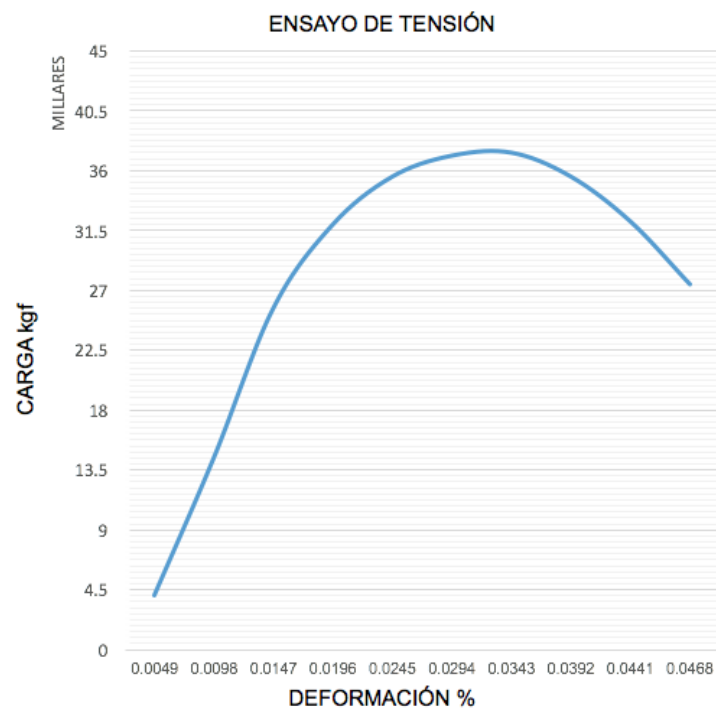


Figura 4. 25 Grafica esfuerzo-deformación para el ensayo de tensión de la probeta, carga máxima 37500 kgf.

Tabla 4. 5 Ensayo de tensión

Probeta	Carga Máxima aplicada (kgf)	Observaciones
Unión de oreja para izaje a placa base de acero ASTM A36	37500.00	Fractura en el material base del lado externo de la oreja a carga indicada.

## **CAPÍTULO 5**

### **CONCLUSIONES**

Las conexiones soldadas se utilizan debido al ahorro que pueden significar en tiempo de fabricación y en el peso total de la estructura en comparación con la utilización de las conexiones atornilladas.

La calidad de la soldadura se relaciona directamente con la integridad estructural, por lo tanto, deben ser diseñadas para cumplir con las solicitudes de servicio y fabricarse con materiales que cumplan las especificaciones asignadas, se busca que las estructuras soldadas sean económicas y seguras, con la utilización de herramientas adecuadas y un diseño garantizado se puede llevar a un ahorro y cumplir aun así con los estándares de calidad. Cumplir con estándares de calidad más altos de los que son necesarios no solo es innecesario sino económicamente imprudente.

El diseño de uniones soldadas mediante la utilización de las ecuaciones para el esfuerzo por unidad de longitud es una herramienta sencilla y rápida que nos proporciona las magnitudes necesarias para la fabricación de uniones soldadas sino se cuenta con un software de elementos finitos.

La utilización de herramientas computacionales para el cálculo de esfuerzos en una unión puede significar un ahorro en el diseño y fabricación de uniones soldadas.

En la Figura 5. 1 la simulación indica que los mayores esfuerzos son localizados en el lado externo de la oreja de izaje, se observa la similitud que hay entre la simulación mediante el software y el ensayo realizado donde la fractura se presentó en el lado externo de la oreja de izaje.



**Figura 5. 1 Comparación de la localización de esfuerzos mediante el software de simulación y el ensayo real de tensión.**

A través de las herramientas computacionales se puede conocer con mayor precisión en dónde y bajo qué cargas puede llevarse a cabo la falla en la estructura.

## RECOMENDACIONES

La ingeniería encierra muchas alternativas de investigación y de estudio, el área de la soldadura en la ingeniería estructural es muy interesante además de extensa. En próximas investigaciones se debería abordar a fondo el comportamiento de las uniones soldadas en las uniones viga-columna en las estructuras para la construcción de edificios, debido que al presentarse fallas éstas podrían representar un riesgo potencial para mayor número de vidas humanas.

El avance en la ingeniería de materiales ha aportado diversos aceros avanzados que con un espesor y peso menor representan la misma o mayor resistencia que los aceros convencionales y por tanto en futuras investigaciones el uso de los aceros avanzados en el diseño y construcción de estructuras podría ser un campo potencial para llegar a conocer el comportamiento de éstos aceros bajo cargas donde se necesita soportar sismos, o vientos.

Se debe tener siempre presente que las estructuras deben cumplir con tres aspectos básicos para que estas tengan un correcto funcionamiento: deben ser confiables, seguras para el fin que fueron diseñadas y económicas.

## BIBLIOGRAFÍA

1. **Jenney, Cynthia L. O'Brien, Annette.** Welding Handbook. [ed.] American Welding Society (AWS). 9th Edition. s.l. : Welding Science and Technology , 2001, Vol. Volume 1.
2. **ASM Handbook.** *Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys, Vol 1.* ASM Handbook. s.l. : ASM International, 1990.
3. **Bramfitt, Bruce L. Benschoter, Arlan O. Metallographer's Guide - Practices and Procedures for Irons and Steels. ASM International. Introduction to Steels and Cast Irons. Metallographer's Guide - Practices and Procedures for Irons and Steels. .** s.l. : ASM International, 2002.
4. **David, J. R.** *ASM Speciality Handbook: Cast Irons.* ASM International. s.l. : ASM International, 1996.
5. **ASTM.** *Standard Specification for Carbon Structural Steel.* West Conshohocken, Pensilvania. Estados Unidos : ASTM, 2014. pp. 1-3, Especificación.
6. **Askeland, Donald R.** *The Science and Engineering of Materials.* s.l. : PSW Publishing Company, 1998.
7. **Magaña Martínez, Lázaro.** *ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS PROCESOS DE SOLDADURA POR ARCO FCAW Y GMAW EN ACEROS DE BAJA ALEACIÓN EN UNIONES CON ESPESORES SUPERIORES A 50 MM.* Desarrollo Humano, COMIMSA. Saltillo : s.n., 2013.

8. **D. B. Holliday, Chair. R. M. Dull. D. K. Hartman. D. A. Wrigth.** Gas Metal Arc Welding. [book auth.] Chair. R. M. Dull. D. K. Hartman. D. A. Wrigth D. B. Holliday. *Welding Handbook*. Miami : American Welding Society (AWS), 2004.
9. **W. H. Kielhorn, Chair.** SURVEY OF JOINING, CUTTING, AND ALLIED PROCESSES. [book auth.] American Welding Society. *Welding Handbook Volume 1*. Miami : AWS, 2001.
10. **Tamboli, Akbar R.** Handbook Of Structural Steel Connection Design and Details. [ed.] FASCE. *Handbook Of Structural Steel Connection Design and Details*. 2a edición. New York : The McGraw-Hill Companies, Inc, 2010.
11. **Csernak, Jack C. McCormac - Stephen F.** Diseño de Estructuras de Acero. *Diseño de Estructuras de Acero*. 5ta edición. México : Alfaomega, 2013.
12. **Daniel Di Capua, Eugenio Oñate.** *Two-noded zigzag beam element accounting for shear effects based on an extended Euler Bernoulli theory*. 132, Barcelona, España : Elsevier, Julio 17, 2015, Composite Structures, pp. 1192–1205.
13. **Timoshenko, Stephen P.** *History Of Strength Of Materials*. New York : McGraw-Hill Book Company, 1983. 0-486-61187-6.
14. **Gang Liu, Yingfang Liu, Yi Huang.** *A novel structural stress approach for multiaxial fatigue strength assessment of welded joints*. 63, Dalian, PR China : Elsevier, Enero 31, 2014, International Journal of Fatigue, pp. 171-182.
15. **Sandra Jordão, L. Simões da Silva, Rui Simões.** *Design formulation analysis for high strength steel welded beam-to-column joints*. 70, Coimbra, Portugal : Elsevier, Abril 21, 2014, Engineering Structures, pp. 63-81.
16. **Lee, Choel-Ho.** *Review of force transfer mechanism of welded steel moment connections*. 62, Seul, Republica de Corea : Elsevier, Noviembre 2, 2005, Journal of Constructional Steel Research, pp. 695-705.
17. **Gerardo Terán, Apolinar Albiter, Ruben Cuamatzi-Meléndez.** *Parametric evaluation of the stress concentration factors in T-butt welded connections*. 56, DF, Mexico : Elsevier, Agosto 17, 2013, Engineering Structures, pp. 1484-1495.
18. **Francesco Frenzo, Leonardo Bertini** *Fatigue resistance of pipe-to-plate welded joint under in-phase and out-of-phase combined bending and torsion..*



79, Pisa, Italia : Elsevier, Mayo 11, 2015, International Journal of Fatigue, pp. 46-53.

19. **Casavola, C. Pappalettere.** *Discussion on local approaches for the fatigue desing of welded joints.* C. Bari : s.n., Octubre 1, 2008, International Journal of Fatigue, Vol. 31, pp. 41-49.

20. **Construction, American Institute Of Steel.** *Manual of Steel Construction 2005.* [ed.] AISC. 2005.

21. **Casavola C, Pappalettere C.** *Industrial application of a new local strain method for fatigue strength evaluation of welded structures.* [ed.] Pappalettere C. s.l. : McGraw-Hill, 2004, Advances in experimental mechanics , pp. 234-235.

22. **CM., Sonsino.** *Course of SN-curves especially in the high-cycle fatigue regime with regard to component desing safety.* s.l. : Journal of Fatigue, 2007, Journal of Fatigue, Vol. 29, pp. 2246-2258.

23. **Gholamreza Khalaj, Mohammad-Javad Khalaj.** *Investigating the corrosion of the Heat-Affected Zones (HAZs) of API- X70 pipeline steels in aerated carbonate solution by electrochemical methods.* 145, Saveh, Iran : Elsevier, Junio 2016, 2016, International Journal of Pressure Vessels and Piping, pp. 1-12.

24. **Radaj D, Sonsino CM.** *Fatigue assessment of welded joints by local approaches.* [ed.] International Institute of Welding. s.l. : Cambridge: Abington Publishers, 2016.

25. **Piotr D. Moncarz, Brian M. McDonald, Robert D. Caligiuri.** *Earthquake Failures Of Welded Building Connections.* Menlo Park : Pergamon, Enero 13, 2000, International Journal Of Solids And Structures, Vol. 38, pp. 2025-2032.

26. **Petroski, H.** *Design paradigms case histories of error and judgement in engineering.* Press Syndicate of the University of Cambridge. 1994.

27. **S. Cicero, F. Gutiérrez-Solana.** *FRACTURE AND FATIGUE ASSESSMENT OF WELDED STRUCTURES.* [ed.] Richard J. Klein. s.l. : Nova Science Publishers, Inc., 2011, Welding: Processes, Quality, and Applications, pp. 333-364.

28. **Anderson, T.L.** *Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications*. Florida : s.n., 2005, CRC Press.
29. **Dexter RJ, Melendrez MI.** *Through-thickness properties of column flanges in welded moment connections*. 1, s.l. : ASCE, 2000, Journal of Structural Engineering, Vol. 126, pp. 24-31.
30. **A.R. Dowling, C.H.A. Townley.** *The effects of defects on structural failure: a two criteria approach*. 3, 1975, Vol. 3, pp. 77-137.
31. **Aviram, A., Mackie, K., Stojadinovic, B.** *Nonlinear Analysis of Bridge Structures*. 89, s.l. : Elsevier, Agosto 20, 2008, Earthquake Engineering Research, pp. 1959-1965.
32. **Bruneau M, Uang CM, Whittaker A.** *Ductile design of steel structures*. New York : McGraw-Hill, 1998.
33. **American Welding Society (AWS) D1 Committee on Structural Welding.** *Structural Welding Code — Steel*. Miami : AWS, 2015. pp. 396-399.
34. **AWS.** *Specification for Carbon Steel Electrodes and Rods for Gas Shielded Arc Welding*. American Welding Society. Miami : AWS, 2005. p. 2.
35. **Construction, American Institute of Steel.** *Steel Design Handbook LRFD Method*. Chicago : AISC, 2006.

## LISTADO DE TABLAS

Tabla 2. 1 Especificación ASTM de la composición química del acero ASTM A36 (5).....	10
Tabla 2. 2 Propiedades de la soldadura considerada como una línea (1). .....	31
Tabla 4. 1 Lista de material que componen el tanque de almacenamiento. ....	66
Tabla 4. 2 Especificación ASTM de la composición química del acero ASTM A36 (5).....	67
Tabla 4. 3 Especificación AWS A5.18 de la composición química del electrodo ER70S-6 (34).....	68
Tabla 4. 4 Resumen de ecuaciones de acuerdo al tipo de carga para calcular el esfuerzo unitario y por unidad de longitud .....	69
Tabla 4. 5 Ensayo de tensión .....	84

## LISTADO DE FIGURAS

Figura 2. 1 Aleaciones ferrosas (3).....	8
Figura 2. 2 Micrografía de acero estructural ASTM A 36 que muestra una microestructura constituida por ferrita (componente claro) y perlita (componente oscuro). Revelado por 4% picral seguido por 2% nital a 200X (3).....	10
Figura 2. 3 Proceso de Soldadura por arco de metal y gas (9).....	13
Figura 2. 4 Modo de transferencia de metal por corto circuito, GMAW (9). .....	14
Figura 2. 5 Modo de transferencia de metal por glóbulo, GMAW (9).....	14
Figura 2. 6 Modo de transferencia de metal por spray, GMAW (9).....	15
Figura 2. 7 Soldadura de filete: a) Sección transversal teórica y b) Sección transversal real (10).....	19
Figura 2. 8 Uniones de a) Traslape, b) T y c) De esquina (10). .....	19
Figura 2. 9 Soldaduras de ranura (10) .....	20
Figura 2. 10 Tipos de juntas de soldadura (11).....	22
Figura 2. 11 Posiciones de soldadura (11). .....	23
Figura 2. 12 Símbolos básicos de soldadura (11).....	23
Figura 2. 13 Calidad en Soldadura. ....	26
Figura 2. 14 Deflexión ( $\Delta$ ) de una viga en voladizo bajo carga puntual, F (1)...	28
Figura 2. 15 La Torre Eiffel (abril 1888 - mayo 1889) (13).....	29

Figura 2. 16 Consideración de la unión soldada como una línea (1). .....	30
Figura 2. 17 Simulación de tensión en filete de una unión en T. Esfuerzos en MPa. ....	35
Figura 2. 18 Simulación de compresión en filete en unión en T. Esfuerzos en MPa. ....	36
Figura 2. 19 Unión sometida a cortante. Esfuerzos en MPa. ....	36
Figura 2. 20 Simulación de una carga puntual en filete de una unión en T. Esfuerzos en MPa. ....	37
Figura 2. 21 Esfuerzo de un miembro sujeto a carga uniformemente distribuida (1). ....	38
Figura 2. 22 Simulación de torsión en soldadura de filete. Esfuerzos en MPa. ....	41
Figura 2. 23 Dureza Vickers y tamaño de grano de la estructura soldada (23). ....	46
Figura 2. 24 Defectos de Soldadura (19). ....	47
Figura 2. 25 Grieta en soldadura en el patín inferior de la viga (27). ....	51
Figura 2. 26 Distribución típica de esfuerzo cortante en el alma de una viga tipo I (31). ....	54
Figura 2. 27 Mallado de elemento finito para una unión viga-columna (16).....	56
Figura 2. 28 Distribución de esfuerzos cortantes en una unión viga-columna (16). ....	57
Figura 2. 29 Transferencias de esfuerzos en conexión viga-columna (32).....	58
Figura 4. 1 Metodología del desarrollo experimental .....	63
Figura 4. 2 Tanque de almacenamiento (Se observa en recuadro orejas de izaje). ....	64
Figura 4. 3 Vista en planta inferior de tanque de almacenamiento. ....	64
Figura 4. 4 Vista en planta superior de tanque de almacenamiento. ....	64
Figura 4. 5 Corte A-A de tanque de almacenamiento. (Los números en círculos indican el material con el que está fabricado).....	65
Figura 4. 6 Corte B-B de tanque de almacenamiento. (Los números en círculos indican el material con el que está fabricado).....	65
Figura 4. 7 Isométrico de unión a diseñar, oreja de izaje a placa base. ....	66

Figura 4. 8 Vista lateral de unión a diseñar, oreja de izaje a placa base. ....	67
Figura 4. 9 Diagrama de unión soldada para el diseño de soldadura para esfuerzo por unidad de longitud.....	74
Figura 4. 10 Geometría de pieza 3D, considerando metal base acero ASTM A36. ....	74
Figura 4. 11 Mallado de la geometría a soldar a) 7mm, b) 5mm, c) 3mm, y d) 1mm de separación. ....	75
Figura 4. 12 Descomposición de la carga muerta factorizada obtenida por el factor LRFD. ....	75
Figura 4. 13 Asignación de la carga para la pieza con una separación de mallado de 7mm. Esfuerzo máximo obtenido de 927.2 MPa.....	76
Figura 4. 14 Asignación de la carga para la pieza con una separación de mallado de 5mm. Esfuerzo máximo obtenido de 1113.2 MPa.....	76
Figura 4. 15 Asignación de la carga para la pieza con una separación de mallado de 3mm. Esfuerzo máximo obtenido de 1313.00 MPa.....	77
Figura 4. 16 Asignación de la carga para la pieza con una separación de mallado de 1mm. Esfuerzo máximo obtenido de 2813.00 MPa.....	77
Figura 4. 17 Grafica para la comparación de esfuerzos obtenidos mediante software de acuerdo a la separación de mallado.....	78
Figura 4. 18 Diagrama de unión soldada para el diseño de soldadura para esfuerzo obtenido mediante software. ....	79
Figura 4. 19 Grafica de comparación entre la sección transversal obtenida por el diseño de esfuerzo por unidad de longitud y la sección transversal obtenida por el esfuerzo máximo mediante el software. Se observa una reducción área de hasta 51.02%.....	80
Figura 4. 20 Maquina utilizada para realizar las pruebas de tensión con capacidad de 600 KN. ....	81
Figura 4. 21 Probeta para ensayo de tensión. ....	81
Figura 4. 22 Ensamble de componente y dispositivos antes del ensayo. ....	82
Figura 4. 23 Colocación esquemática del componente para aplicar la carga. ..	82
Figura 4. 24 Fractura en el metal base del lado externo de la oreja. ....	83

Figura 4. 25 Grafica esfuerzo-deformación para el ensayo de tensión de la probeta, carga máxima 37500 kgf. ....	83
Figura 5. 1 Comparación de la localización de esfuerzos mediante el software de simulación y el ensayo real de tensión. ....	86