



**ESPE**

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y  
MECÁNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL  
TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO**

**TEMA: ANÁLISIS DE ESFUERZOS Y DEFORMACIÓN EN  
VIGAS SECUNDARIAS DE SECCIÓN ARMADA TIPO I  
SOMETIDAS A FLEXIÓN, VARIANDO LA INTERMITENCIA  
DEL CORDÓN DE SOLDADURA EN LA UNIÓN ALMA-PATIN**

**AUTORES: ALCÍVAR VACA, MARÍA JOSÉ**

**NICOLALDE ESPINOSA, FABRICIO XAVIER**

**DIRECTOR: ING. NARANJO, CARLOS MSC.**

**SANGOLQUÍ**

**2017**



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA  
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

## CERTIFICADO

Certifico que el presente trabajo de titulación “**ANÁLISIS DE ESFUERZOS Y DEFORMACIÓN EN VIGAS SECUNDARIAS DE SECCIÓN ARMADA TIPO I SOMETIDAS A FLEXIÓN, VARIANDO LA INTERMITENCIA DEL CORDÓN DE SOLDADURA EN LA UNIÓN ALMA-PATIN**”, fue desarrollado en su totalidad por los estudiantes **MARÍA JOSÉ ALCÍVAR VACA** y **FABRICIO XAVIER NICOLALDE ESPINOSA**, bajo mi dirección.



Ing. Carlos Naranjo MSc.  
**DIRECTOR**



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA  
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

### **AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD**

El presente trabajo de titulación **“ANÁLISIS DE ESFUERZOS Y DEFORMACIÓN EN VIGAS SECUNDARIAS DE SECCIÓN ARMADA TIPO I SOMETIDAS A FLEXIÓN, VARIANDO LA INTERMITENCIA DEL CORDÓN DE SOLDADURA EN LA UNIÓN ALMA-PATIN”**, ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado el derecho intelectual de terceros considerándolos en citas a pie de página y como fuentes en el registro bibliográfico.

Consecuentemente declaramos que este trabajo es de nuestra autoría, en virtud de ello nos declaramos responsables del contenido, veracidad y alcance del proyecto en mención.

María José Alcívar Vaca

Fabricio Xavier Nicolalde Espinosa



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA  
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

## AUTORIZACIÓN

Nosotros, **MARÍA JOSÉ ALCÍVAR VACA** y **FABRICIO XAVIER NICOLADE ESPINOSA**, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE” a publicar en la biblioteca virtual de la institución el presente trabajo de titulación “**ANÁLISIS DE ESFUERZOS Y DEFORMACIÓN EN VIGAS SECUNDARIAS DE SECCIÓN ARMADA TIPO I SOMETIDAS A FLEXIÓN, VARIANDO LA INTERMITENCIA DEL CORDÓN DE SOLDADURA EN LA UNIÓN ALMA-PATIN**”, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra autoría y responsabilidad.

Sangolquí, octubre de 2017

María José Alcívar Vaca

Fabricio Xavier Nicolalde Espinosa

## **DEDICATORIA**

Dedico este proyecto de titulación a las personas que han estado siempre a mi lado y confiaron en mí, a mi madre Gladys, quien ha sido el apoyo incondicional de mi vida, gracias a ella que con su infinito amor, sacrificio y ejemplo soy lo que soy ahora, a mi hermana Andrea que siempre tuvo una palabra de aliento y amor cuando sentí que no podía.

**María José Alcívar**

El presente proyecto de titulación está dedicado a mi madre Jacqueline por el amor y apoyo incondicional, a mi padre Vinicio por darme ejemplo de perseverancia, a mi hermana Josselyn por la motivación y estar pendiente de mí durante esta etapa; juntos son el pilar fundamental de mi vida y lo que me impulso a alcanzar esta meta.

**Xavier Nicolalde**

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco principalmente a Dios que ha estado en cada paso que he dado y me ha fortalecido, agradezco a mi madre por su amor y apoyo incondicional en mi formación profesional, a mi hermana que nunca dejó de estar pendiente de mí, a toda mi familia en general, a mi novio por su apoyo y confianza, a mis amigos que han estado en buenos y malos momentos a lo largo de esta trayectoria, al Ing. Carlos Naranjo MSc. director de este proyecto de titulación por su paciencia y guía, y a la prestigiosa Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE en la cual nos llenamos de conocimientos.

**María José Alcívar**

No me queda nada más que agradecer de todo corazón a las personas que han formado parte de esta gran etapa y han contribuido a alcanzar un logro más en mi desarrollo personal, agradezco a mis padres y hermana que han sabido guiarme y motivarme, a mis familiares que han estado pendientes de mí, a mis amigos los cuales estuvieron conmigo en los malos y buenos momentos, a mis profesores y a la universidad por formarme como un profesional competente; gracias a todos, ya que cada uno me ayudo a alcanzar esta meta y nada de esto fuera posible sin ustedes.

**Xavier Nicolalde**

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICADO.....	ii
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD .....	iii
AUTORIZACIÓN.....	iv
DEDICATORIA .....	v
AGRADECIMIENTO .....	vi
RESUMEN.....	xvi
CAPÍTULO I.....	1
1. GENERALIDADES.....	1
1.1. Antecedentes .....	1
1.2. Objetivos .....	3
1.2.1. Objetivo general .....	3
1.2.2. Objetivos específicos .....	3
1.3. Alcance del proyecto .....	3
1.4. Justificación del proyecto .....	4
CAPÍTULO II.....	7
2. MARCO TEÓRICO.....	7
2.1. Viga .....	7
2.2. Tipos de vigas .....	7
2.2.1. Según su sección transversal .....	7
2.2.2. Según su función estructural .....	8
2.2.2.1. Vigas primarias .....	8
2.2.2.2. Vigas secundarias .....	8
2.2.3 Según su proceso de fabricación.....	9
2.2.3.1. Vigas laminadas .....	9
2.2.3.2. Vigas armadas.....	9
2.3. Cargas y esfuerzos en vigas .....	10
2.3.1. Cargas .....	10
2.3.1.1. Cargas muertas .....	10
2.3.1.2. Cargas vivas .....	11
2.3.1.3. Cargas ambientales.....	11
2.3.2. Esfuerzos.....	11

2.3.2.1.	Esfuerzo normal.....	12
2.3.2.2.	Esfuerzo cortante.....	13
2.4.	Tipos de fallas en vigas .....	14
2.4.1.	Articulaciones plásticas.....	14
2.4.2.	Fallas por flexión.....	16
2.4.2.1.	Pandeo lateral.....	16
2.4.2.2.	Pandeo local del ala .....	16
2.4.2.3.	Abolladura del alma .....	17
2.5.	Flexión en vigas .....	17
2.6.	Diseño de vigas .....	18
2.6.1.	Diseño elástico .....	18
2.6.1.1	Momento de fluencia .....	19
2.6.2.	Diseño plástico .....	19
2.6.2.1.	Momento plástico.....	20
2.7.	Soldadura GMAW .....	20
2.7.1.	Equipo.....	20
2.7.2.	Gas protector .....	21
2.8.	Galgas extensométricas .....	23
CAPÍTULO III .....		25
3.	DISEÑO Y SIMULACIÓN .....	25
3.1.	Diseño de la viga .....	25
3.1.1.	Normativa .....	25
3.1.2.	Requisitos de diseño.....	25
3.1.3.	Diseño geométrico de la viga.....	25
3.1.4.	Comprobación relaciones de esbeltez .....	27
3.1.4.1.	Patines.....	27
3.1.4.2.	Alma .....	27
3.1.5.	Propiedades geométricas de la sección .....	27
3.1.5.1.	Área .....	28
3.1.5.2.	Inercia respecto al eje mayor:.....	28
3.1.5.3	Inercia respecto al eje menor:.....	28
3.1.5.4	Radio de giro respecto al eje menor: .....	28



3.1.5.5	Radio de giro respecto al eje mayor: .....	28
3.1.6.	Peso de la viga .....	29
3.1.7.	Módulo plástico de la sección .....	29
3.1.8.	Carga crítica .....	29
3.1.9.	Deformación máxima .....	31
3.1.10.	Esfuerzo cortante en la unión alma - patín .....	31
3.1.11.	Esquema de la sección de la viga .....	32
3.1.12.	Arriostramiento o apoyos laterales .....	33
3.1.12.1.	Distancia entre apoyos .....	33
3.1.12.2.	Resistencia requerida .....	34
3.2.	Diseño de la soldadura .....	34
3.2.1.	Normativa .....	34
3.2.2.	Selección del proceso de soldadura .....	34
3.2.3.	Selección de consumibles .....	35
3.2.3.1.	Electrodo .....	35
3.2.3.2.	Gas de protección .....	35
3.2.4.	Fuerza cortante en la soldadura .....	36
3.2.5.	Geometría del cordón de soldadura .....	37
3.2.5.1.	Pie de cordón .....	37
3.2.5.2.	Longitud de los cordones .....	37
3.2.5.3.	Longitud mínima .....	37
3.2.5.4.	Intermitencia de los cordones .....	38
3.2.6.	Esfuerzo cortante en la soldadura .....	41
3.2.7.	Selección de los casos para experimentación .....	42
3.2.8.	Parámetros de la soldadura .....	43
3.3.	Diseño del experimento .....	43
3.3.1.	Variables a medir .....	43
3.3.2.	Instrumentación y procedimiento de medición .....	44
3.3.2.1	Ubicación de las galgas extensométricas .....	45
3.3.3.	Registro de datos .....	45
3.3.4.	Variables a controlar .....	46
3.4.	Simulación en software CAD/CAE .....	46

3.4.1. Ejemplo de simulación .....	47
3.4.1.1. Modelo CAD de la viga .....	47
3.4.1.2. Asignación de materiales.....	48
3.4.1.3. Condiciones de carga y apoyos en la viga .....	49
3.4.1.4. Convergencia de la malla .....	51
3.4.2. Resultados de las simulaciones.....	53
3.5. Planos según norma INEN .....	56
CAPÍTULO IV.....	57
4. EJECUCIÓN DEL EXPERIMENTO.....	57
4.1. Construcción de las vigas.....	57
4.1.1. Selección de materiales de construcción.....	57
4.1.2. Armado de las vigas .....	57
4.1.3. Proceso de soldadura en las vigas .....	59
4.1.4. Proceso de remoción de refuerzos .....	60
4.2. Verificación de la geometría de la viga.....	61
4.3. Verificación de la geometría de los cordones de soldadura .....	63
4.4. Instrumentación de la viga.....	65
4.4.1. Colocación de las galgas extensométricas .....	65
4.5. Preparación para el ensayo a flexión .....	67
4.5.1. Soportes laterales.....	67
4.5.2. Condiciones de apoyo .....	69
4.5.3. Condiciones de carga .....	70
4.6. Ensayo a flexión de viga.....	70
CAPÍTULO V.....	75
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	75
5.1. Resultados de los modelos computacional, experimental y teórico. .	75
5.1.1. Modelo teórico .....	75
5.1.2. Modelo computacional .....	75
5.1.3. Modelo experimental.....	75
5.2. Comparación de los resultados de los modelos computacional, experimental y teórico. ....	77
5.3. Validación del modelo computacional .....	80

5.4. Comparación de esfuerzo normal, esfuerzo cortante y deformación entre casos experimentales.....	81
5.5. Relación entre intermitencia de soldadura y esfuerzos en la viga.....	81
5.6. Relación entre intermitencia de soldadura y deformación máxima ...	83
5.7. Relación entre intermitencia de soldadura y esfuerzo cortante en el cordón de soldadura.....	84
5.8. Análisis de pandeo lateral .....	87
CAPÍTULO VI.....	89
6. EVALUACIÓN ECONÓMICA .....	89
6.1. Comparación de costos entre vigas con cordón continuo e intermitente	89
6.1.1. Mano de obra.....	89
6.1.2. Consumibles para soldadura .....	92
6.1.2.1. Electrodo.....	92
6.1.2.2. Gas en la soldadura.....	96
6.1.3. Costo total de los parámetros variables de fabricación .....	98
6.2. Costos de fabricación.....	99
6.2.1. Costos directos .....	100
6.2.2. Costos indirectos .....	100
6.2.3. Costo total.....	101
CAPÍTULO VII.....	102
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	102
7.1. Conclusiones.....	102
7.2. Recomendaciones.....	103
BIBLIOGRAFÍA.....	105

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Tensiones residuales filete continuo e intermitente. ....	2
Figura 2. Sección transversal y distribución de esfuerzos cortantes.....	5
Figura 3. Soldadura continúa.....	5
Figura 4. Soldadura intermitente.....	6
Figura 5. Ejemplos de vigas con diferentes secciones. ....	8
Figura 6. Esquema de distribución de vigas primarias y secundarias.....	9
Figura 7. Diagrama cuerpo libre de una viga simplemente apoyada. ....	12
Figura 8. Esfuerzos normales en una viga de sección I.....	12
Figura 9. Viga cargada.....	13
Figura 10. Viga solicitada por 1 carga sección transversal constante.....	14
Figura11. Articulación plástica en la viga sometida a una carga. ....	15
Figura 12. Viga estáticamente indeterminada, aplicada una carga.....	15
Figura13. Articulaciones plásticas en una viga. ....	15
Figura 14. Viga empotrada en un extremo y apoyada en el otro. ....	16
Figura 15. Articulaciones plásticas en una viga empotrada y apoyada.....	16
Figura 16. Pandeo lateral en una viga. ....	16
Figura17. Pandeo local del ala.....	17
Figura 18. Abolladura del alma. ....	17
Figura 19. Viga sometida a flexión.....	18
Figura 20. Equipo para soldadura GMAW. ....	21
Figura 21. Tipos de galga, cementada y sin cementar. ....	23
Figura 22. Sección de una viga I.....	26
Figura23. Viga simplemente apoyada con carga puntual en la mitad.....	30
Figura 24. Deflexión máxima de la viga. ....	31
Figura25. Geometría de la viga.....	33
Figura26. Junta a tope, soldadura de filete. ....	34
Figura 27. Geometría del cordón de soldadura.....	37
Figura 28. Soldadura intermitente opuesta. ....	39
Figura 29. Disposición de la soldadura. ....	40
Figura 30. Esquema de medición desplazamiento laterales. ....	44
Figura 31. Esquema de ubicación de las galgas extensiométricas.....	45
Figura 32. Esquema de ubicación de las galgas viga 37%.....	45
Figura 33. Dibujo de la viga en un software CAD. ....	47
Figura34. Longitud de cordón 210 mm y espacio de 100 mm (viga 3). ....	47
Figura 35. Asignación de material a elementos de la viga.....	48
Figura 36. Asignación de material a los cordones de soldadura.....	49
Figura 37. Área en la que se aplicará la carga (zona verde). ....	49
Figura 38. Área en la que se pondrá el apoyo (Línea roja).....	50
Figura 39. Espacio entre apoyos (zona verde). ....	50
Figura 40. Aplicación de la carga.....	50
Figura 41. Convergencia de la malla. ....	52

Figura 42. Viga mallada.....	52
Figura 43. Deformación total.....	53
Figura 44. Esfuerzos normales de la viga.....	53
Figura 45. Esfuerzos normales de los cordones centrales.....	54
Figura 46. Esfuerzos cortantes.....	54
Figura 47. Esfuerzos cortantes de los cordones centrales.....	54
Figura48. Distancias entre refuerzos de cada lado de la viga.....	58
Figura49. Delimitación de las zonas soldadas y libres.....	58
Figura50. Refuerzos soldados en el patín.....	59
Figura 51. Vigas armadas.....	59
Figura 52. Vigas Soldadas con Refuerzo.....	60
Figura53. Vigas construidas.....	61
Figura54. Verificación geométrica de la sección de la viga.....	61
Figura55. Verificación de la rectitud de la viga.....	62
Figura56. Esquema de la geometría del cordón de soldadura.....	64
Figura57. Esquema instrumentación viga 2 y 3.....	66
Figura58. Esquema instrumentación viga 1.....	67
Figura59. Medidas de los apoyos laterales.....	68
Figura60. Diagrama de cuerpo libre del apoyo lateral.....	68
Figura 61. Estructura de soporte lateral.....	69
Figura 62. Apoyos de la viga.....	70
Figura 63. Aplicación de la carga en la viga.....	70
Figura 64. Esquema del ensayo a flexión.....	71
Figura65. Ensayo a flexión real.....	71
Figura 66. Numeración de apoyos y puntos de medición.....	73
Figura 67. Esfuerzo Normal vs Porcentaje de soldadura.....	82
Figura 68. Esfuerzo Cortante en la unión vs % de soldadura.....	83
Figura 69. Deformación máxima vs Porcentaje de soldadura.....	83
Figura 70. Esfuerzo cortante en la soldadura vs porcentaje de soldadura.....	86
Figura 71. Esquema del pandeo lateral de las vigas.....	88
Figura72. Tipo de junta soldada.....	92
Figura 73. Consumo de insumos de soldadura vs tamaño de filete.....	94

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	<i>Datos de la intermitencia de soldadura en cada caso de estudio.</i>	40
Tabla 2.	<i>Esfuerzos cortantes de la soldadura en cada caso de estudio.</i>	42
Tabla 3.	<i>Casos de experimentación, medidas de soldadura.</i>	43
Tabla 4.	<i>Instrumentación y proceso de medición.</i>	44
Tabla 5.	<i>Propiedades mecánicas del acero ASTM A36.</i>	48
Tabla 6.	<i>Propiedades mecánicas del electrodo ER 70S-6.</i>	48
Tabla 7.	<i>Convergencia de malla.</i>	51
Tabla 8.	<i>Resultados de las simulaciones.</i>	55
Tabla 9.	<i>Valores de esfuerzos y deformación de las vigas.</i>	56
Tabla 10.	<i>Material de aporte y gas de protección.</i>	60
Tabla 11.	<i>Verificación de la geometría viga 1.</i>	62
Tabla 12.	<i>Verificación de la geometría viga 2.</i>	63
Tabla 13.	<i>Verificación de la geometría viga 3.</i>	63
Tabla 14.	<i>Verificación de la geometría de la soldadura en la viga 1.</i>	64
Tabla 15.	<i>Verificación de la geometría de la soldadura en la viga 2.</i>	65
Tabla 16.	<i>Verificación de la geometría de la soldadura en la viga 3.</i>	65
Tabla 17.	<i>Deflexión y deformaciones unitarias.</i>	72
Tabla 18.	<i>Desplazamientos laterales viga 1.</i>	74
Tabla 19.	<i>Desplazamientos laterales viga 2.</i>	74
Tabla 20.	<i>Desplazamientos laterales viga 3.</i>	74
Tabla 21.	<i>Resultados obtenidos de la simulación.</i>	75
Tabla 22.	<i>Datos para ejemplo cálculo esfuerzo normal.</i>	76
Tabla 23.	<i>Datos para ejemplo cálculo esfuerzo cortante.</i>	76
Tabla 24.	<i>Esfuerzos y deformaciones obtenidos experimentalmente.</i>	77
Tabla 25.	<i>Comparación resultados experimental vs computacional.</i>	78
Tabla 26.	<i>Comparación resultados experimental vs teórico.</i>	78
Tabla 27.	<i>Comparación resultados teórico vs computacional.</i>	79
Tabla 28.	<i>Factor de corrección para la deformación.</i>	80
Tabla 29.	<i>Comparación deformación experimental vs teórica corregida.</i>	80
Tabla 30.	<i>Esfuerzos y deformación máxima modelo experimental.</i>	81
Tabla 31.	<i>Comparación entre casos experimentales.</i>	81
Tabla 32.	<i>Esfuerzo cortante en la soldadura casos computacionales.</i>	85
Tabla 33.	<i>Esfuerzo cortante en la soldadura casos experimentales.</i>	85
Tabla 34.	<i>Comparación esfuerzo cortante experimental-computacional.</i>	86
Tabla 35.	<i>Variación del desplazamiento lateral.</i>	87
Tabla 36.	<i>Longitudes soldadas en cada viga.</i>	89
Tabla 37.	<i>Velocidades de avance en cada viga.</i>	90
Tabla 38.	<i>Tiempo de producción para cada viga.</i>	90
Tabla 39.	<i>Tiempo muerto de fabricación para cada viga.</i>	91
Tabla 40.	<i>Tiempo total de fabricación para cada viga.</i>	91
Tabla 41.	<i>Costos de mano de obra en cada viga.</i>	91

Tabla 42.	<i>Cantidad estimada de consumibles para soldadura de filete.</i>	93
Tabla 43.	<i>Cantidad depositada de alambre de soldadura.</i>	95
Tabla 44.	<i>Costo total de alambre de soldadura utilizado en cada viga.</i>	95
Tabla 45.	<i>Costo total de gas de soldadura utilizado en cada viga.</i>	98
Tabla 46.	<i>Costo total de cada viga.</i>	98
Tabla 47.	<i>Costo total por metro.</i>	99
Tabla 48.	<i>Costos directos de fabricación.</i>	100
Tabla 49.	<i>Costos indirectos de fabricación.</i>	100
Tabla 50.	<i>Costo total de fabricación.</i>	101

## RESUMEN

Este trabajo se desarrolló con la finalidad de conocer si una viga secundaria altera su capacidad de carga al variar el porcentaje de soldadura que une a sus elementos, y optimizar el uso tanto de materiales como de mano de obra empleados en su fabricación. Para esto, se diseñó la viga según los criterios establecidos en las normas NEC-SE-AC y AWS D1.1, con lo cual se encontraron 21 casos de estudio, que fueron simulados en un software CAD/CAE. Para validar el modelo computacional se construyeron tres vigas con la misma geometría pero con una variación en el porcentaje de soldadura que une sus elementos del 70%, 57% y 37% respectivamente, las cuales fueron sometidas a un ensayo a flexión bajo las mismas condiciones de carga y apoyos, los resultados se compararon con los datos obtenidos en el modelo computacional y modelo teórico. Se realizó el análisis de esfuerzos y deformación de cada viga y se encontró como resultado que una adecuada intermitencia del cordón de soldadura en vigas secundarias no altera su capacidad de carga. Adicional a esto se presenta un análisis económico de la fabricación de cada viga, tomando como parámetros principales los consumibles de soldadura y la mano de obra, así se determinó la variación de costos de fabricación comparando una viga soldada completamente con una de soldadura intermitente. Según este estudio, fabricar vigas soldadas el 57% presenta un beneficio económico y una adecuada funcionalidad de estas.

### **PALABRAS CLAVES:**

- SOLDADURA
- INTERMITENCIA
- VIGA
- FLEXIÓN
- ESFUERZO
- DEFORMACIÓN



## **ABSTRACT**

This work was developed with the purpose to know if a secondary beam alters its load capacity by varying the percentage of welding that joins its elements, and to optimize the use of both materials and workforce employed in its manufacture. For this, the beam was designed according to the criteria established in the standards NEC-SE-AC and AWS D1.1, which found 21 case studies, which were simulated in CAD / CAE software. To validate the computational model, three beams with the same geometry were constructed but with a variation in the percentage of welding that join its elements of 70%, 57% and 37% respectively, which were subjected to a bending test under the same conditions of load and supports, the results were compared with the data obtained in the computational model and theoretical model. The analysis of stress and deformation of each beam found that an adequate welding of the weld bead on secondary beams does not alter its load capacity. In addition to this, an economic analysis of the manufacture of each beam is presented, taking as main parameters the consumables of welding and the workforce, thus the variation of manufacturing costs was determined by comparing a fully welded beam with an intermittence weld. According to this study, produce welded beams 57% presents an economic benefit and an adequate functionality of these.

### **KEYWORDS:**

- WELDING
  
- INTERMITTENCE
  
- BEAM
  
- FLEXION
  
- STRESS
  
- DEFORMATION

## CAPÍTULO I

### 1. GENERALIDADES

#### 1.1. Antecedentes

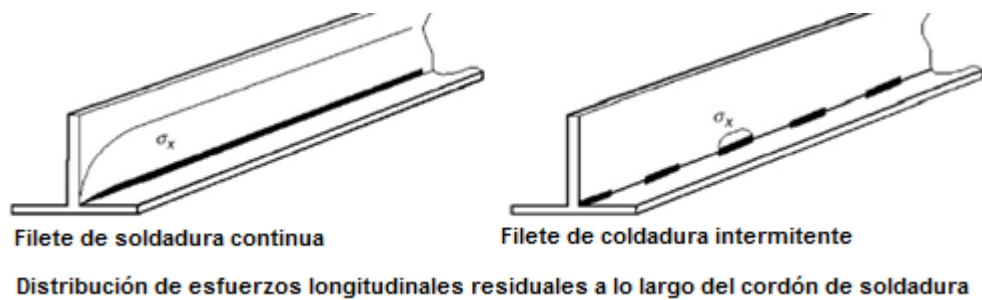
En estructuras metálicas existen vigas primarias, secundarias y terciarias. Las vigas primarias, que generalmente tienen mayor carga, se colocan entre las columnas en la dirección corta, en tanto que las vigas secundarias, que generalmente tienen cargas comparativamente ligeras, se conectan entre las vigas primarias en la dirección larga. (McCormac, 2013)

Las vigas secundarias transmiten su carga al ser conectas a vigas principales, estas pueden transmitir flexión o cortante dependiendo del tipo de conexión que se realice.

El alma y los patines de las vigas se unen generalmente mediante soldadura, a pesar de que la unión de estos elementos puede ser de otras formas, las vigas soldadas son las más utilizadas en la actualidad, debido a las mejoras notorias en las propiedades del acero y el perfeccionamiento los sistemas de soldadura.(Gómez, 2012)

Se puede encontrar algunos estudios relacionados a la intermitencia de soldadura en diferentes elementos mecánicos, por ejemplo: “Estudio numérico sobre el espacio admisible de las soldaduras discontinuas intermitentes de placas rigidizadas longitudinalmente sometidas a compresión axial plana” en el cual, se investiga la soldadura intermitente en los refuerzos a placas y su influencia en el comportamiento de colapso de placas rigidizadas aplicando el método de elementos finitos. Se hace un estudio especial al modelado de las soldaduras de filete en la unión placa-refuerzo. Las placas rígidas se seleccionan de la estructura de la cubierta de buques. Se presenta una propuesta para la separación admisible de soldaduras en la soldadura intermitente de filetes de placas rigidizadas. En dicho estudio, los autores hacen referencia en la reducción de los costos de mano de obra y materiales en la fabricación de elementos o estructura. Como técnicas de fabricación utilizadas para soldadura, menciona la de filete continuo y la de filete intermitente, si se utiliza el segundo método, los costos de construcción y

también las magnitudes de las tensiones residuales de soldadura se reducen en comparación con las de soldadura continua; “esto se debe a la longitud de la soldadura y la energía de entrada de calor en la soldadura intermitente es menor que en el caso de la soldadura continua (ver Figura 1).”(Reza, Rastani, & Ghavami, 2006)



**Figura 1. Tensiones residuales filete continuo e intermitente.**

Fuente: (Reza, Rastani, & Ghavami, 2006)

Otro estudio relacionado con la intermitencia del cordón de soldadura es: “Control de propiedades mecánicas en soldaduras de acero estructural por simulación numérica de acoplamientos entre temperatura, micro-estructura y macro-mecánica” en este artículo, se ha desarrollado y aplicado un método de simulación numérica para el análisis de acoplamiento de campos de temperatura, micro-estructura y esfuerzo-deformación para investigar los efectos de la entrada de calor y la temperatura inter pasada en la unión soldada multi paso de conexiones de viga a columna. Existe un cambio en los parámetros de entrada de calor, temperatura de paso y dirección de soldadura, y los resultados se utilizan para considerar el efecto de ciclos de calor múltiples en el rendimiento de la junta; es por esta razón que en este estudio se encuentran referencias acerca de la intermitencia del cordón de soldadura, ya que esta permite asegurar características de tracción más altas que la soldadura continua. La soldadura intermitente que controla la temperatura inter pasada, tiene una entrada de calor más alta en el paso final que la de otras secuencias de paso continuo, esto se debe a que el espécimen está totalmente enfriado durante la espera para el próximo paso de soldadura y es necesario depositar mucho calor en el tipo controlado.(Toyoda & Mochizuki, 2004)

Haciendo un análisis de los artículos antes mencionados, se concluye que de cierta forma la intermitencia o continuidad de los filetes en uniones soldadas inciden en el comportamiento de elementos estructurales.

No se encuentran casos fundamentados exclusivamente en la optimización de la intermitencia de los cordones de soldadura en la unión alma-patín de vigas secundarias de sección armadas tipo I sometidas a flexión.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo general**

Analizar esfuerzos y deformaciones en vigas secundarias de sección armada tipo I sometidas a flexión, variando la intermitencia del cordón de soldadura en la unión alma-patín.

### **1.2.2. Objetivos específicos**

- Diseñar la viga en base a criterios establecidos en la norma NEC – SE – AC.
- Simular el comportamiento de las vigas, mediante un software CAD/CAE para obtener una relación entre la intermitencia de la soldadura y el esfuerzo generado por flexión en la viga.
- Construir las vigas propuestas en el diseño y realizar los ensayos mecánicos pertinentes, para validar la relación obtenida en el análisis computacional.
- Realizar un análisis económico comparativo entre el uso de cordones de soldadura intermitente en lugar de cordones de soldadura continuos en la construcción de vigas secundarias.

## **1.3. Alcance del proyecto**

El alcance del proyecto contempla el diseño de la viga, la simulación de su comportamiento a flexión en un software CAD/CAE, variando la intermitencia del cordón de soldadura, para obtener una aproximación de la intermitencia

óptima, y posteriormente la construcción de cierto número de vigas de igual geometría, con su respectiva instrumentación, las cuales se diferenciarán por la longitud de los cordones de soldadura.

Serán considerados los esfuerzos de flexión y cortante producidos por la carga a la que se someterán las vigas armadas con las diferentes intermitencias de soldadura.

Koichi Masubuchi en su libro "Analysis of Welded Structures" menciona que al unir elementos con cordón intermitente de soldadura, la resistencia a la fatiga será significativamente menor que al realizar una unión con un cordón de soldadura continuo, por lo que este estudio se limita al análisis de elementos que no se encuentren sometidos a fatiga. (Masubuchi, 1980)

Se realizará el análisis y comparación del comportamiento a flexión de cada una de las vigas sometidas a las mismas condiciones de carga y apoyo, para poder emitir criterios en base a los resultados y establecer conclusiones en cuanto a la optimización de la intermitencia de la soldadura.

Complementario al estudio se hará un análisis económico para estimar la optimización en los costos de fabricación al utilizar cordones de soldadura intermitente en lugar de cordones de soldadura continuos.

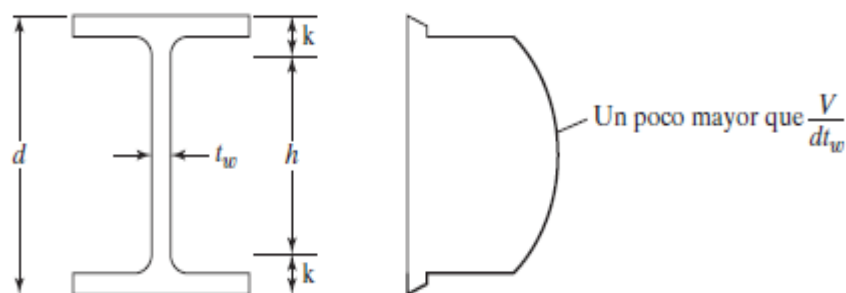
#### **1.4. Justificación del proyecto**

La industria de la construcción y el sector asociado se considera un indicador del crecimiento económico de los países. Uno de los impactos negativos de esta actividad se da en el mal uso y desperdicio de recursos como materiales y de mano de obra, esto afecta al ambiente y a su vez repercute en el costo y tiempo de ejecución de los proyectos de construcción. Por esta razón se ve la necesidad de optimizar al máximo los recursos utilizados en proyectos de construcción. (Abarca, 2016).

Cuando una viga trabaja a flexión se producen esfuerzos longitudinales en sus fibras y estos dependen de la distancia de la fibra al eje neutro. Estos esfuerzos se trasladan a los cordones de soldadura que unen el alma con los

patines como un esfuerzo cortante que disminuye entre más lejos este el cordón de soldadura del eje neutro.

La distribución de los esfuerzos cortantes en el área transversal de la viga (ver Figura 2) nos indica que en la unión del alma con los patines no se encuentran los esfuerzos máximos, por lo cual se puede inferir que un cordón intermitente cumplirá satisfactoriamente con la sollicitación de cargas sin afectar la resistencia de la viga.

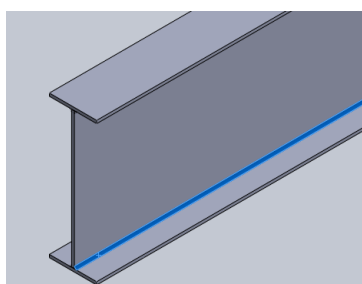


**Figura 2. Sección transversal y distribución de esfuerzos cortantes.**

Fuente: (McCormac, 2013)

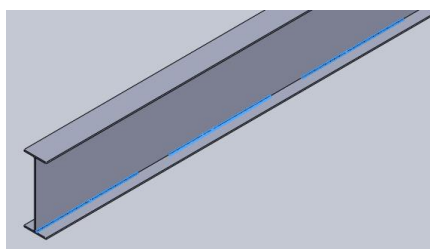
Si se tiene una viga de sección I simétrica, los esfuerzos cortantes en cada cordón serán iguales, por lo cual se podrá utilizar la misma intermitencia para unir tanto el patín superior como el patín inferior con el alma.

En la práctica, para la construcción de vigas armadas tipo I en estructuras, se considera un cordón de soldadura longitudinal continuo en la unión de alma y los patines como se ve en la Figura 3, pero para los cálculos de resistencia de la soldadura no se toma en cuenta la longitud total del cordón, por lo que se puede buscar una relación que disminuya la longitud de la soldadura.



**Figura 3. Soldadura continua.**

Al realizar un análisis de intermitencia en la soldadura que une los elementos de una viga, como se observa en la Figura 4, se pretende optimizar material, eliminar gastos innecesarios y disminuir tiempos de construcción, siempre y cuando se utilice un proceso controlado, una inspección pertinente y de acuerdo a las normas vigentes, sabiendo que la viga seguirá garantizando la misma rigidez y deformación.



**Figura 4. Soldadura intermitente.**

Las normas NEC-SE-AC y AWS D1.1 nos brindan solo recomendaciones de valores máximos o mínimos en la intermitencia de soldadura, no proponen un modelo de optimización que nos permita ahorrar recursos en el proceso de armado de vigas, por lo cual se considera de importancia esta investigación, ya que pretende encontrar una relación entre la intermitencia del cordón de soldadura la resistencia de la viga que sirva de guía para el diseño de estructuras metálicas en el país.

## CAPÍTULO II

### 2. MARCO TEÓRICO

#### 2.1. Viga

La viga es uno de los principales elementos de una estructura que se diseñan para soportar cargas de gravedad y verticales que son transversales a su eje longitudinal.

Las cargas son transferidas a puntos específicos de las vigas llamados apoyos, lo cuales pueden ser muros, columnas u otras vigas a las cuales el elemento se ensambla.(Vinnakota, 2006).

Se usan generalmente en posiciones horizontales o con un grado de inclinación menor a  $60^\circ$ . Estos elementos están sujetos principalmente a flexión y a cortante, aunque en ciertas condiciones también pueden estar sometidas a torsión.(Vinnakota, 2006)

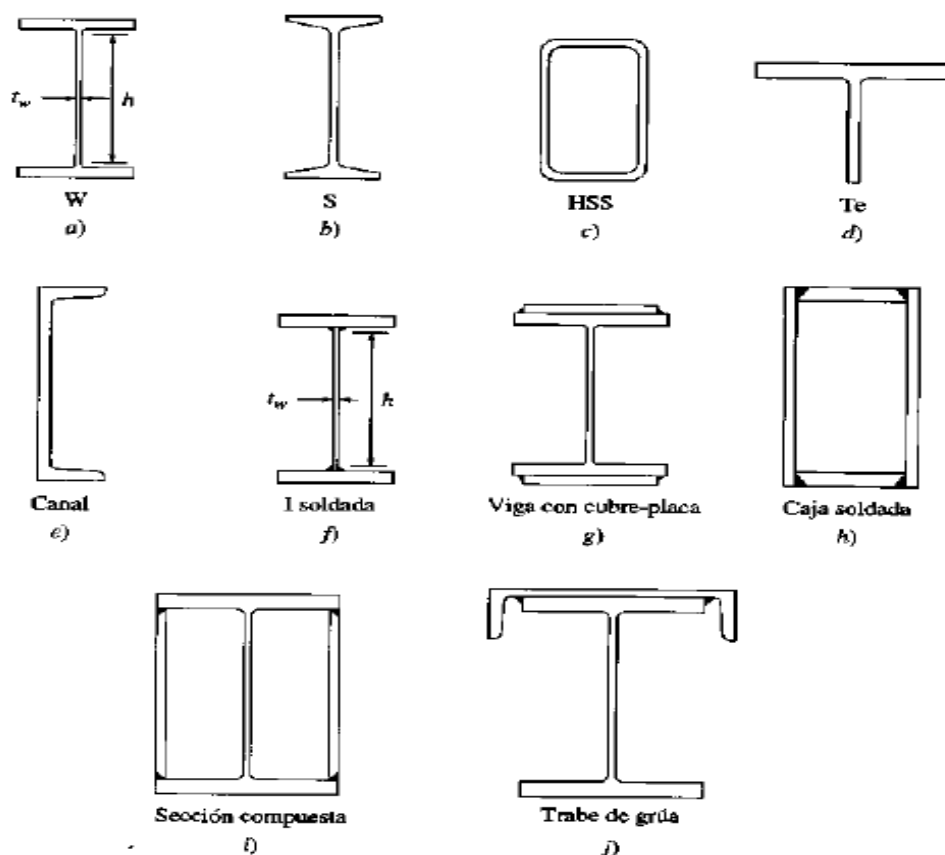
#### 2.2. Tipos de vigas

Las vigas se pueden clasificar tomando en cuenta diferentes criterios como: sección transversal, función estructural, proceso de fabricación, tipo de apoyos, etc.

##### 2.2.1. Según su sección transversal

Las vigas pueden ser fabricadas con diferentes formas en sus secciones transversales dependiendo de las cargas a las que se encuentren sometidas, ya que sus inercias son directamente proporcionales a los esfuerzos normales producidos por la flexión. A continuación, se presentan algunos ejemplos de secciones más comunes en vigas:





**Figura 5. Ejemplos de vigas con diferentes secciones.**

Fuente:(McCormac, 2013)

## 2.2.2. Según su función estructural

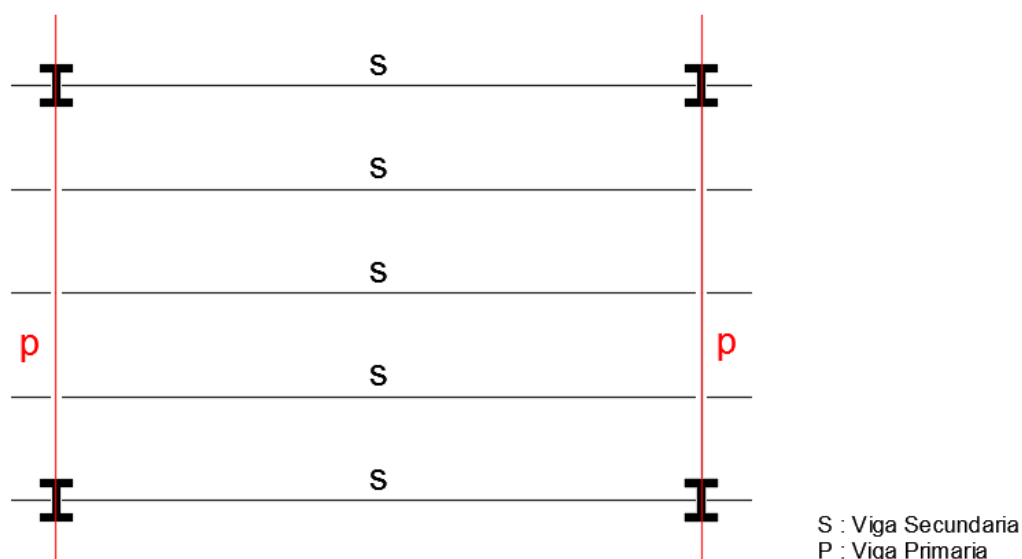
### 2.2.2.1. Vigas primarias

También llamada traveses, estas vigas se colocan entre las columnas, apoyos o muros generalmente en la dirección de distancia más corta. Soportan cargas combinadas y sirven de apoyo para las vigas secundarias.

### 2.2.2.2. Vigas secundarias

Ayudan a la repartición del peso de la losa, cubierta o cualquier otra carga a las vigas principales. Pueden conectarse mediante uniones a flexión o a cortante, además otorgan rigidez y estabilidad a las estructuras.

Soportan cargas relativamente menores a las vigas principales por lo que tienen una sección menor. Se las ubica entre las vigas principales y columnas en la dirección más larga como indica la Figura 6.



**Figura 6. Esquema de distribución de vigas primarias y secundarias.**

### 2.2.3 Según su proceso de fabricación

En la actualidad los procesos más utilizados en la fabricación de vigas son por laminación y vigas armadas, a continuación, se detalla a cada una.

#### 2.2.3.1. Vigas laminadas

Se fabrican mediante un proceso de laminación que puede ser en frío o caliente. Estas vigas son extruidas a través de matrices para adoptar formas estandarizadas en las normas o por el fabricante. Por lo general se utilizan para claros pequeños.

#### 2.2.3.2. Vigas armadas

Estas vigas se fabrican a través de la unión de placas u otras vigas laminadas mediante remaches, pernos o soldadura para crear secciones específicas que satisfagan los requerimientos de diseño.

El proceso más utilizado para la unión de los componentes de la viga es la soldadura debido a la facilidad que brinda para la fabricación, no utiliza placas u otros elementos para la unión y no afecta significativamente las propiedades geométricas de la sección.

Las vigas armadas se utilizan en aplicaciones donde los claros y las cargas son grandes como puentes y edificios.

La sección de una viga armada debe reunir las siguientes condiciones:

- Que la resistencia a la flexión sea suficiente, determinado por su módulo resistente.
- Que la rigidez ante la deformación sea suficiente, que se determina por su momento de inercia.
- Capacidad de resistencia al cortante determinado por el área del alma.
- Un dimensionamiento adecuado para evitar que exista la abolladura en el alma, que será determinado con la relación espesor/altura del alma.

La especificación LRFD presenta la resistencia de diseño de soldaduras en general, pero no especifica un modelo o método específico de análisis para juntas cargadas en cortante y flexión, que en este caso es la unión de los elementos de la viga armada, el método que se emplee está abierto al criterio y discreción del diseñador.(Vinnakota, 2006)

### **2.3. Cargas y esfuerzos en vigas**

#### **2.3.1. Cargas**

Una carga se define como la acción directa de una fuerza ya sea concentrada o distribuida, la cual actúa sobre elementos estructurales, un diseñador de estructuras debe estimar de forma precisa las cargas a la que será sometida una estructura durante su vida útil, sin omitir cualquiera que pueda llegar a presentarse(McCormac, 2013).

Las cargas a las que son sometidas las vigas pueden ser: cargas vivas, cargas muertas o cargas ambientales.(Vinnakota, 2006).

##### **2.3.1.1. Cargas muertas**

Las cargas muertas son aquellas que tienen magnitud constante, las cuales permanecen fijas en un lugar determinado.(McCormac, 2013).

Es la representación del peso de los materiales permanentes de una construcción, en este tipo de cargas se incluye el peso propio del elemento

estructural, junto con otras partes a las que están unidos que son necesarias para que dicho elemento pueda funcionar como se desea.(Vinnakota, 2006).

### **2.3.1.2. Cargas vivas**

En este tipo de cargas, se encuentran las relacionadas con la construcción, ocupación y el uso o mantenimiento que se le da a la estructura, al contrario de las cargas muertas, estas cargas pueden cambiar de lugar y de magnitud. A continuación, se citan algunos ejemplos de cargas vivas: la gente, mobiliario, materiales almacenados, equipo móvil, entre otros. (Vinnakota, 2006).

### **2.3.1.3. Cargas ambientales**

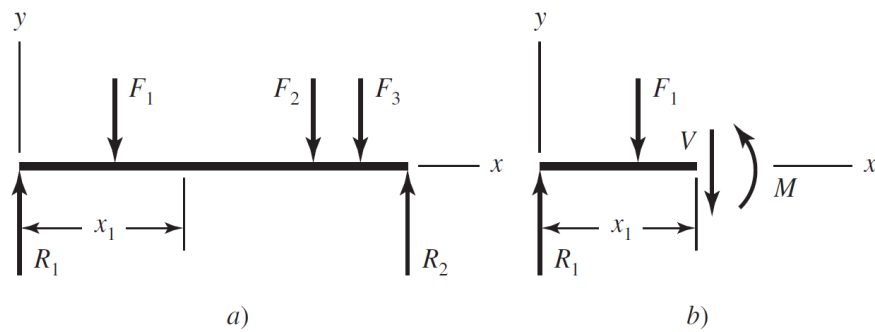
Como su nombre lo indica, estas son generadas por el ambiente, por ejemplo: lluvia, nieve, el viento, el hielo, los sismos, entre otras. Las cargas ambientales varían de acuerdo a la localización geográfica, por esta razón la estructura metálica debe ser diseñada de acuerdo a los precedentes ambientales que tenga la zona en que se construirá, de esta manera se evitan desastres estructurales por cargas ambientales. (Vinnakota, 2006).

## **2.3.2. Esfuerzos**

En la Figura 7(a), se muestra una viga apoyada en las reacciones R1 y R2, se encuentra cargada por las fuerzas concentradas F1, F2 y F3; al aislar una superficie interna, como se observa en la Figura 7(b), la fuerza y el momento total que se encuentran actuando sobre la superficie se manifiestan como distribución de fuerzas a través de toda el área.

Dicha distribución de fuerzas que actúa en un punto sobre la superficie es única, tendrá componentes en dos direcciones: normal y tangencial, los cuales toman el nombre de esfuerzo normal ( $\sigma$ ) y esfuerzo cortante tangencial ( $\tau$ ), respectivamente.

Es importante mencionar que las unidades de esfuerzos usuales son: en Estados Unidos libras por pulgada (psi) y en SI Newtons por metro cuadrado ( $\frac{N}{m^2}$ ). (Budynas & Keith, 2008).



**Figura 7. Diagrama cuerpo libre de una viga simplemente apoyada.**

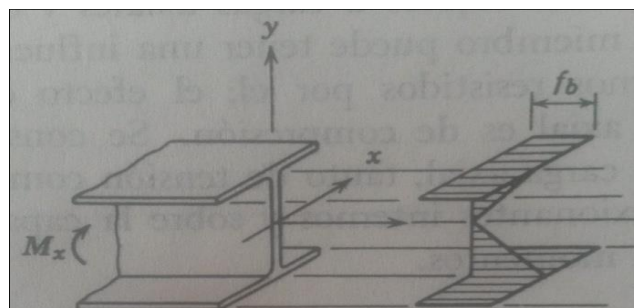
Fuente: (Budynas & Keith, 2008)

Algunos experimentos indican que, si una sección plana es sometida a flexión, puede permanecer casi plana después de ésta, el esfuerzo es proporcional a la deformación unitaria dentro del rango elástico. (Bresler, Lin, & Scalzi, 1990).

A continuación, se hablará de los esfuerzos normal y cortante, ya que, estos se producen cuando una viga es sometida a flexión y es parte del estudio de este trabajo.

### 2.3.2.1. Esfuerzo normal

Los esfuerzos normales ( $\sigma$ ) actúan sobre una fibra a una distancia ( $y$ ) del eje neutro ( $xx$ );  $M_x$  es el momento flexionante respecto al eje neutro ( $xx$ ) en la sección en donde el esfuerzo normal está actuando (ver Figura 8). (Bresler, Lin, & Scalzi, 1990).



**Figura 8. Esfuerzos normales en una viga de sección I.**

Fuente: (Bresler, Lin, & Scalzi, 1990)

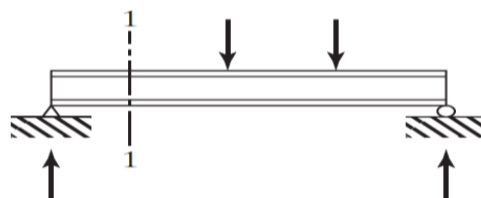
Las ecuaciones que representan los esfuerzos normales en flexión en vigas rectas se basan en algunos supuestos como:

- La viga es sometida a flexión pura.
- El material de la viga es isotrópico y homogéneo.
- El material cumple con la ley de Hooke.
- Antes de la viga ser sometida a flexión, es recta y tiene una sección transversal constante en toda su longitud.
- La viga tiene un eje de simetría en el plano de flexión.
- La viga fallaría únicamente ante flexión, en lugar de fallar por aplastamiento, corrugación o pandeo lateral.
- La sección transversal de la viga permanecerá plana durante la flexión.

### 2.3.2.2. Esfuerzo cortante

La mayoría de las vigas presentan fuerzas cortantes y momentos flexionantes, en ocasiones se pueden presentar vigas con fuerza cortante igual a cero, es decir que han sido sometidas a flexión pura (Budynas & Keith, 2008).

Considerando la viga de la Figura 9, cuando esta se flexión aparecen esfuerzos cortantes, ya que, la longitud de sus fibras longitudinales cambia de la siguiente manera: las fibras inferiores se alargan y las superiores se acortan en la zona de momento positivo, mientras que en un lugar intermedio existirá un plano neutro en el cual no existirá un cambio en la longitud de las fibras. Debido a esas deformaciones variables, una determinada fibra podría deslizarse sobre las fibras que se encuentren arriba o abajo de ella. (McCormac, 2013).



**Figura 9. Viga cargada.**

Fuente: (McCormac, 2013)

Generalmente, el esfuerzo cortante no se considera un problema en las vigas de acero, ya que las almas de perfiles laminados tienen la capacidad de resistir grandes fuerzas cortantes. (McCormac, 2013).

Pero el cortante podría llegar a ser un problema aun para cargas ordinarias cuando en una viga se usan almas muy delgadas, esto puede suceder en las vigas armadas. (McCormac, 2013).

En la Figura 2 se puede ver como varía el esfuerzo cortante en la sección transversal de un perfil I, se puede observar que la fuerza cortante en las secciones I, la resiste principalmente el alma. (McCormac, 2013).

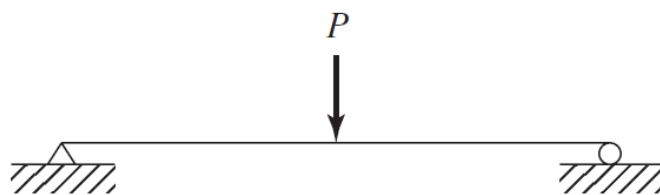
Al incrementar la carga en un miembro estructural de sección I hasta que se alcance el esfuerzo de fluencia por flexión en el patín, éste no tendrá capacidad para resistir esfuerzos cortantes, por esta razón quien tendrá que soportar dichos esfuerzos es el alma. (McCormac, 2013).

## 2.4. Tipos de fallas en vigas

Una viga estáticamente determinada puede presentar fallas si se desarrollaría una articulación plástica en ella. (McCormac, 2013).

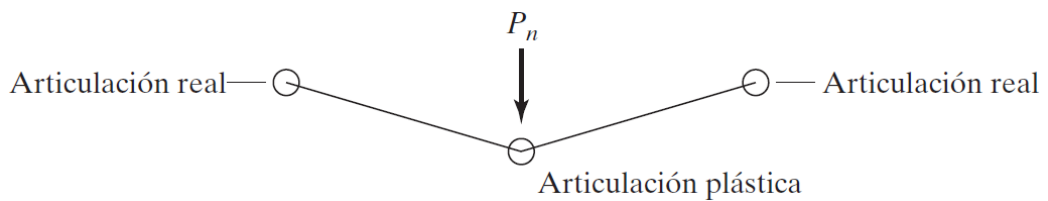
### 2.4.1. Articulaciones plásticas

En la Figura 10 se muestra una viga de sección transversal constante, en la mitad del claro hay una carga concentrada, si se incrementa la carga hasta producir una articulación plástica en el punto de momento máximo, se puede originar una estructura inestable como se ve en la Figura 11. Cualquier incremento que se adicione la carga puede causar falla.  $P_n$  representa la carga máxima nominal o teórica que la viga puede soportar. (McCormac, 2013).



**Figura 10. Viga solicitada por 1 carga sección transversal constante**

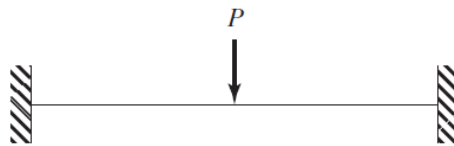
Fuente: (McCormac, 2013)



**Figura11. Articulación plástica en la viga sometida a una carga.**

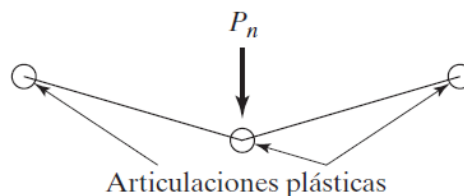
Fuente: (McCormac, 2013)

Una estructura estáticamente indeterminada, como la mostrada en la Figura 12, falla al producirse más de una articulación plástica (ver Figura13), el número de articulaciones plásticas que provoca falla en una estructura estáticamente indeterminada, puede variar de estructura a estructura, pero jamás será menos de dos articulaciones. (McCormac, 2013).



**Figura 12. Viga estáticamente indeterminada, aplicada una carga.**

Fuente: (McCormac, 2013)

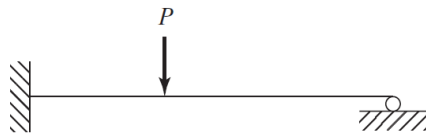


**Figura13. Articulaciones plásticas en una viga.**

Fuente: (McCormac, 2013)

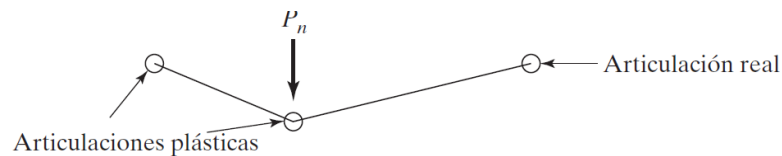
En la Figura 14 hay una viga empotrada en un extremo y apoyada en el otro, fallará después de la aparición de dos articulaciones plásticas. Para que exista falla se necesitarían tres articulaciones; se tiene una real en el extremo derecho (ver Figura 15). El mayor momento elástico causado por la carga concentrada en la viga de la Figura 14 se encuentra en el empotramiento, mientras la magnitud de la carga se incrementase va formando una articulación plástica en dicho punto. (McCormac, 2013).





**Figura 14. Viga empotrada en un extremo y apoyada en el otro.**

Fuente: (McCormac, 2013)



**Figura 15. Articulaciones plásticas en una viga empotrada y apoyada.**

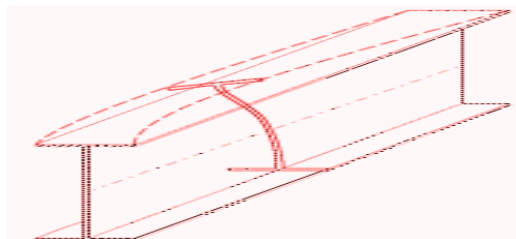
Fuente: (McCormac, 2013)

## 2.4.2. Fallas por flexión

Cuando una viga es sometida a flexión puede producirse en ella fallas, las más comunes son: pandeo lateral, pandeo local de ala, abolladura del alma. A continuación, se describe a cada uno.

### 2.4.2.1. Pandeo lateral

Cuando un ala está sometida a grandes momentos flectores da lugar a la deformación por pandeo lateral; los esfuerzos de flexión provocan una compresión muy fuerte del ala, dando lugar al pandeo; sucederá normalmente en vigas de gran luz, las cuales poseen una sección con poca rigidez en el sentido perpendicular al de aplicación del momento flector, por ejemplo, vigas en I (ver Figura 16). (Estructuras-Acero, 2013).



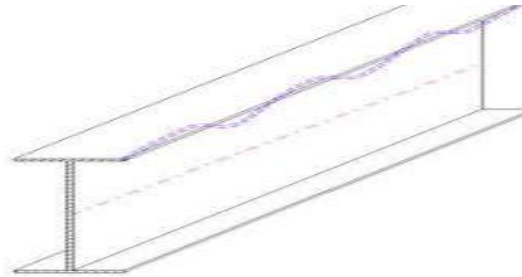
**Figura 16. Pandeo lateral en una viga.**

Fuente: (Estructuras-Acero, 2013)

### 2.4.2.2. Pandeo local del ala

Produce el alabeo del ala (ver Figura17), está relacionado con el pandeo lateral, con las tensiones de compresión en el ala. Para contrarrestar este

pandeo, se puede colocar una serie de arriostramientos en la viga que reduzcan la esbeltez de las alas, que harán el trabajo de rigidizadores verticales, que unen las alas entre sí. (Estructuras-Acero, 2013).

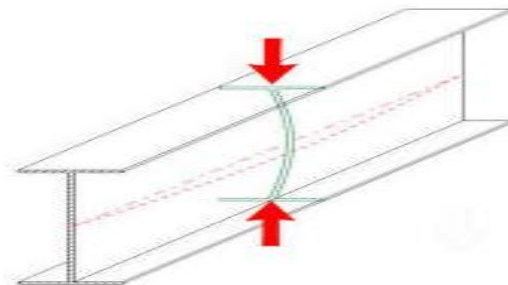


**Figura17. Pandeo local del ala.**

Fuente: (Estructuras-Acero, 2013)

#### 2.4.2.3. Abolladura del alma

Este fenómeno de pandeo es producido a nivel del alma (ver Figura 18). Puede lograrse por la acción de un cortante de alto valor, o por la acción de las tensiones normales; es de importancia en vigas armadas, la esbeltez del alma puede reducirse con rigidizadores verticales. (Estructuras-Acero, 2013).



**Figura 18. Abolladura del alma.**

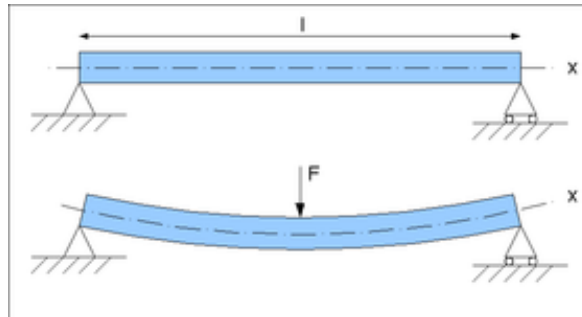
Fuente: (Estructuras-Acero, 2013)

### 2.5. Flexión en vigas

Flexión es el tipo de deformación que presenta un elemento estructural alargado en una dirección perpendicular a su eje longitudinal. El término "alargado" implica cuando una dimensión es dominante frente a las otras, un caso típico son las vigas. (Medina, 2015).

Los miembros estructurales sujetos a fuerzas transversales a su eje longitudinal, son miembros que resultan sometidos a flexión, el caso más común es la viga (ver Figura 19); soportan cargas transversales, se usan

generalmente en posición horizontal y también para soportar cargas gravitacionales. (Homsí, 2013).



**Figura 19. Viga sometida a flexión.**

Fuente: (Homsí, 2013)

El esfuerzo de flexión, se obtiene al aplicar sobre un cuerpo pares de fuerza perpendiculares a su eje longitudinal, provocando así el giro de las secciones transversales con respecto a los inmediatos (Medina, 2015).

## **2.6. Diseño de vigas**

Las vigas como cualquier otro elemento estructural se deben diseñar de acuerdo con las normas de construcción vigentes en el país. En este caso la norma pertinente es la Norma Ecuatoriana de la Construcción – Estructuras de Acero (NEC-SE-AC). En este documento se brindan lineamientos y recomendaciones a cerca de las combinaciones de carga, factores de seguridad, requerimientos de los materiales, límites en los diseños, etc. Para garantizar el adecuado desempeño de dichos elementos.

Generalmente los esfuerzos más significativos en las vigas son provocados por la flexión. Para el diseño de la viga existen dos métodos que se explican a continuación:

### **2.6.1. Diseño elástico**

La teoría elástica sostiene que la carga máxima que puede soportar un elemento, en este caso la viga, es la que genere un esfuerzo igual al esfuerzo de fluencia del material dividido para un factor de seguridad en cualquier fibra de la viga, que si está sometida a flexión es la fibra más alejada del eje neutro elástico.

El diseño elástico no toma en cuenta que los materiales dúctiles sufren una grande plastificación antes de la falla, lo que significa que se podría estar sobredimensionando demasiado los elementos.

### 2.6.1.1 Momento de fluencia

El momento de fluencia  $M_y$  se utiliza en la teoría elástica para calcular las cargas máximas que puede soportar la viga y se calcula de la siguiente manera:

$$M_y = S_y \cdot S_x$$

Donde:

$S_y$  : Esfuerzo de fluencia del material

$S_x$ : Modulo elástico de la sección

El módulo elástico depende de la sección transversal de la viga y se calcula mediante la fórmula:

$$S_x = \frac{I_x}{c}$$

Donde:

$I_x$ : Inercia respecto al eje mayor

$c$ : Distancia del eje neutro elástico a la fibra más lejana

El eje neutro elástico (ENE) es aquel eje imaginario que pasa por el centro de gravedad de la sección transversal de la viga en dirección a su eje mayor y separa las zonas que se encuentran sometidas a tracción de las zonas a compresión.

### 2.6.2. Diseño plástico

Según la teoría plástica, cuando una fibra del elemento alcanza el límite de fluencia está ya no resiste más esfuerzos hasta que las demás fibras también alcancen el límite de fluencia, lo cual provoca una especie de distribución de la carga entre toda la sección transversal ya que los esfuerzos

son transferidos hacia las zonas que todavía se encuentran en el rango elástico.

Esta distribución de esfuerzos depende las propiedades del material, la geometría y las condiciones de carga y apoyo de la viga.

Este fenómeno ocasiona que las cargas que soporta la viga con el criterio plástico sean considerablemente mayores a las del criterio elástico.

### **2.6.2.1. Momento plástico**

El momento plástico  $M_p$  se utiliza para calcular las cargas máximas que puede soportar la viga y se calcula de la siguiente manera:

$$M_p = S_y \cdot Z_x$$

Donde:

$S_y$  : Esfuerzo de fluencia del material

$Z_x$ : Módulo plástico de la sección

El módulo plástico se calcula sumando los momentos estáticos de las áreas a tensión y compresión con respecto al eje neutro plástico (ENP).

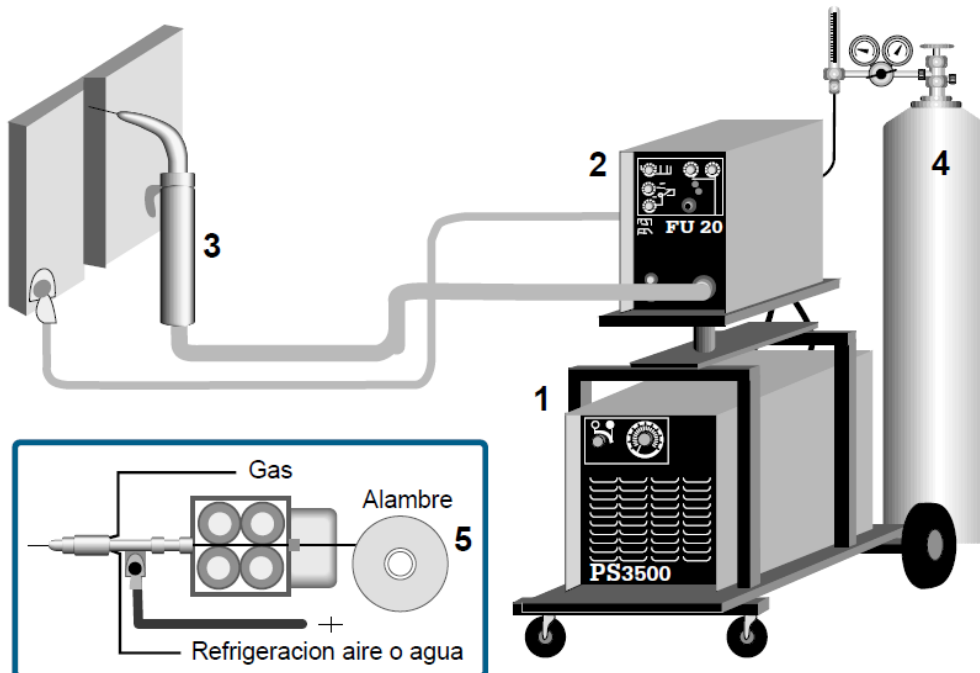
El ENP se calcula al igualar el área a tensión con el área a compresión, y solo es igual al ENE cuando la sección de la viga presenta simetría en sus dos ejes.

## **2.7. Soldadura GMAW**

La soldadura GMAW es un método que emplea un alambre para soldar el cual se alimenta automáticamente a una velocidad constante, generando así un arco entre el metal base y el alambre, el calentamiento resultante funde el material y de esta manera se produce la unión entre placas, este proceso es conocido como soldadura por arco semiautomático, mientras se realiza el proceso un gas protector se encarga de proteger la soldadura de la atmósfera.

### **2.7.1. Equipo**

Se compone de una pistola, una unidad de alimentación del alambre, un suministrador de alambre, una fuente de alimentación, un suministrador de gas protector con regulador de caudal, un circuito de control y las mangueras, forros interiores y cables asociados.



**Figura 20. Equipo para soldadura GMAW.**

Fuente: (INDURA, 2015)

1. Máquina soldadora
2. Alimentador controlador del avance del alambre
3. Pistola de soldar
4. Gas protector
5. Carrete de alambre

### 2.7.2. Gas protector

Se utilizan principalmente para proteger el metal fundido de la atmósfera, evitando así la oxidación y contaminación del metal fundido. Mientras avanza la soldadura un protector gaseoso se dirige hacia la zona de la soldadura por la boquilla de la pistola, de esta manera se realiza la protección hasta que el baño de fusión se solidifique.

Los gases más utilizados en este proceso son: dióxido de carbono CO<sub>2</sub>, argón (Ar) y helio (He), también se puede utilizar una mezcla de estos para obtener un mejor rendimiento de la soldadura.

Para seleccionar el mejor gas protector es necesario considerar algunos factores, a continuación, se muestran los principales:

- Método de transferencia del metal.
- Forma del cordón de soldadura, penetración y anchura de la zona de fusión.
- Velocidad de soldadura.
- Discontinuidades de la soldadura.
- Salpicaduras de la soldadura.
- Eficiencia de la transferencia del metal.
- Tipo de metal base y aportación.
- Posición de la soldadura.
- Coste del gas.
- Coste total de la soldadura.
- Metal de aportación

El electrodo utilizado en GMAW es un hilo sólido (alambre), es de acero al carbono y se alimenta por una bobina adjunta a la unidad de alimentación de hilo, al tocar el hilo con el metal base, se establece un arco el cual produce el cordón de soldadura. (Rowe & Jeffus, 2008).

Las especificaciones de la AWS para electrodos utilizados con GMAW se encuentran en la publicación A 5.18 para aceros al carbono y A 5.28 para aceros de baja aleación.

La AWS tiene un método estandarizado de identificación de electrodos de soldadura GMAW, en este método se utiliza una serie de letras y números para agrupar metales de aportación en clasificaciones específicas. La identificación empieza con las letras ER de donde la E significa que el hilo es clasificado como un electrodo y la R indica la longitud de la varilla cuando se utiliza en otro proceso de soldadura, seguido de ER va un número en miles,

el cual designa la resistencia de tensión mínima del metal de soldadura depositado, seguido de los números va una S indicando que el electrodo es de alambre sólido, para finalizar hay un número (1, 2, 3, 4, 5 o 6) o la letra G, este sistema indica la composición del metal de aporte del electrodo y las recomendaciones del fabricante para asignación de corriente y gas protector del proceso de soldadura. (Rowe & Jeffus, 2008).

## 2.8. Galgas extensométricas

Es un elemento electromecánico de presión, estos elementos utilizan un elemento mecánico elástico combinado de un transductor eléctrico que genera la señal eléctrica correspondiente.

Una galga extensométrica (Strainage), se basa en la variación de longitud y diámetro, y por lo tanto de resistencia, que tiene lugar cuando un hilo de resistencia se encuentra sometido a una tensión mecánica por la acción de una presión. (Creus, 1997).

Existen dos tipos de galgas extensométricas: galgas cementadas y galgas sin cementar. Las cementadas se forman de varios bucles de hilo muy fino pegados a una hoja base de cerámica, papel o plástico, y las galgas sin cementar los hilos de resistencia descansan entre un armazón fijo y otro móvil bajo una ligera tensión inicial. (Creus, 1997).

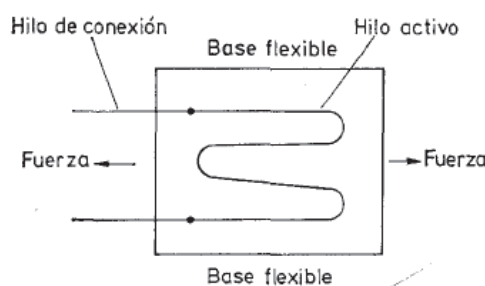


Fig. 3.9 Galga cementada.

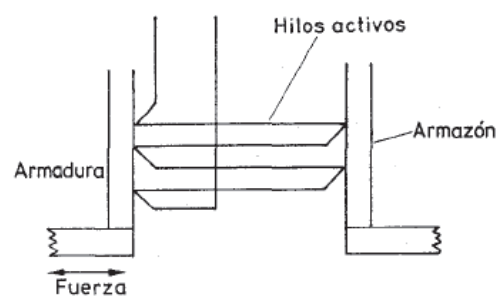


Fig. 3.10 Galga sin cementar.

### Figura 21. Tipos de galga, cementada y sin cementar.

Fuente: (Creus, 1997)

En cualquiera de las dos galgas, cuando se aplica una presión, los hilos se estiran o comprimen según la disposición que el fabricante haya adoptado, así se modifica la resistencia de los mismos.



El principio de funcionamiento de una galga extensométrica se basa en el efecto piezo-resistivo de metales y semiconductores, es decir, su resistividad varía en función de la deformación a la que están sometidos, el material de que está hecho y el diseño adoptado.

Al considerar un hilo metálico con longitud  $l$ , resistividad  $p$  y sección transversal  $A$ , se tiene que su resistencia eléctrica es:

$$R = p * \frac{l}{A}$$

Si el hilo es sometido a un esfuerzo en dirección longitudinal, cada una de las magnitudes que intervienen en el cálculo de  $R$  cambia. El cambio de longitud resultante de aplicar una fuerza a una pieza unidimensional está dado por la conocida ley de Hooke:  $E$  es el módulo de elasticidad del material que se lo denomina Módulo de Young,  $\sigma$  esfuerzo uniaxial y  $\epsilon$  es la deformación unitaria.

$$\sigma = \frac{F}{A} = E * \epsilon$$

Cuando el hilo es estirado en dirección axial, el área de la sección transversal disminuye, la razón de la deformación lateral a la axial es también una propiedad del material, llamada razón de Poisson.

El cambio de resistencia de una galga extensométrica o medidor de deformación, por lo general, se expresa en términos de un parámetro determinado por el fabricante que se lo llama factor de galga  $GF$ , este factor de galga depende de la razón de Poisson para el material del medidor y su piezo-resistividad.

Mediante el adecuado acondicionamiento de la señal resultante, las galgas extensométricas permiten obtener, una lectura directa de la deformación longitudinal producida en un punto de la superficie de un material dado, donde se ha adherido el sensor. (Alazate, Montes, & Silva, 2007)

## CAPÍTULO III

### 3. DISEÑO Y SIMULACIÓN

#### 3.1. Diseño de la viga

##### 3.1.1. Normativa

El diseño se basó en la Norma Ecuatoriana de la Construcción para estructuras de acero NEC-SE-AC y para los requerimientos que no se contemplen en este código se utilizó la especificación ANSI/AISC 360-10 para construcciones de acero.

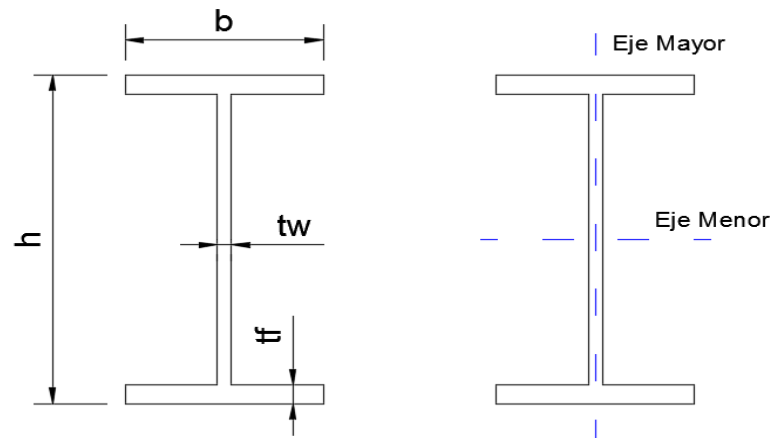
##### 3.1.2. Requisitos de diseño

Las vigas cumplirán los siguientes requisitos de diseño:

- Tendrá una sección tipo I compacta.
- Se debe procurar que el modo de fallo sea por flexión.
- La carga crítica será puntual y estará aplicada en la mitad de la viga con un valor entre 6 y 7 toneladas debido a la capacidad de la máquina de ensayos a flexión disponible.
- La viga estará simplemente apoyada.
- El material será acero estructural A36.
- Una longitud máxima de 3 metros.

##### 3.1.3. Diseño geométrico de la viga

En la Figura 22 se muestra la sección de la viga I.



**Figura 22. Sección de una viga I.**

Para calcular el peralte se utilizó la recomendación del libro de McCorman pag.618 de relación largo – peralte:

$$10 \leq \frac{L}{h} \leq 12$$

Se estableció una longitud de 3 metros, por lo cual se tiene:

$$0,25 \leq h \leq 0,3$$

Se escogió 0.25 m como peralte es decir 250 milímetros.

$$h = 250 \text{ mm}$$

El ancho de la sección transversal para que sea compacta se puede estimar entre:

$$h/5 \leq b \leq h/3$$

$$250/5 \leq b \leq 250/3$$

$$50 \leq b \leq 83,3$$

Se estableció un ancho de 75 milímetros.

$$b = 75 \text{ mm}$$

Los espesores de los patines y del alma serán 6 y 4 milímetros respectivamente. Estos valores deben cumplir con la relación de esbeltez para que la viga sea compacta, en caso de no satisfacer la relación serán cambiados.

### 3.1.4. Comprobación relaciones de esbeltez

Para que un miembro sea compacto debe cumplir la siguiente relación

$$\lambda \leq \lambda_p \quad \rightarrow \quad \text{miembro compacto}$$

Las fórmulas para calcular  $\lambda$  y  $\lambda_p$  se especifican en la tabla B4.1b de la norma ANSI/AISC 360-10 (Ver Anexo 1).

#### 3.1.4.1. Patines

$$\lambda = \frac{b}{2t_f}$$

$$\lambda = \frac{75 \text{ mm}}{2(6 \text{ mm})}$$

$$\lambda = 6,25$$

$$6,25 \leq 10,785 \quad \rightarrow \quad \text{los patines si son compactos}$$

$$\lambda_p = 0.38 \sqrt{\frac{E}{S_y}}$$

$$\lambda_p = 0.38 \sqrt{\frac{29000000 \text{ psi}}{36000 \text{ psi}}}$$

$$\lambda_p = 10,785$$

Donde:

$E$ : Módulo de elasticidad del acero

$S_y$ : Esfuerzo de fluencia del material

#### 3.1.4.2. Alma

$$\lambda = \frac{h - 2t_f}{t_w}$$

$$\lambda = \frac{(250 - 2 * 6) \text{ mm}}{4 \text{ mm}}$$

$$\lambda = 59,5$$

$$59,5 \leq 106,72 \quad \rightarrow \quad \text{los patines si son compactos}$$

$$\lambda_p = 3.76 \sqrt{\frac{E}{S_y}}$$

$$\lambda_p = 3.76 \sqrt{\frac{29000000 \text{ psi}}{36000 \text{ psi}}}$$

$$\lambda_p = 106,72$$

### 3.1.5. Propiedades geométricas de la sección

Se calculó el área, las inercias de la sección y los radios de giro

**3.1.5.1. Área**

$$A = 2 * b * t_f + [t_w * (h - 2t_f)]$$

$$A = 2 * 75 * 6 + [4 * (250 - 2 * 6)][mm^2]$$

$$A = 1852mm^2$$

**3.1.5.2. Inercia respecto al eje mayor:**

$$I_x = \left[ \left( \frac{t_w * (h - 2t_f)^3}{12} \right) + 2 \left( \frac{b * t_f^3}{12} + \left( b * t_f * \left( \frac{h - t_f}{2} \right)^2 \right) \right) \right]$$

$$I_x = \left[ \left( \frac{4 * (250 - 2 * 6)^3}{12} \right) + 2 \left( \frac{75 * 6^3}{12} + \left( 75 * 6 * \left( \frac{250 - 6}{2} \right)^2 \right) \right) \right] [mm^4]$$

$$I_x = 17892057 mm^4$$

**3.1.5.3 Inercia respecto al eje menor:**

$$I_y = \left[ \left( \frac{(h - 2t_f) * t_w^3}{12} \right) + 2 \left( \frac{t_f * b^3}{12} \right) \right]$$

$$I_y = \left[ \left( \frac{(250 - 2 * 6) * 4^3}{12} \right) + 2 \left( \frac{6 * 75^3}{12} \right) \right] [mm^4]$$

$$I_y = 423144 mm^4$$

**3.1.5.4 Radio de giro respecto al eje menor:**

$$r_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}}$$

$$r_y = \sqrt{\frac{423144 mm^4}{1852 mm^2}}$$

$$r_y = 15,12 mm$$

**3.1.5.5 Radio de giro respecto al eje mayor:**

$$r_x = \sqrt{\frac{I_x}{A}}$$

$$r_x = \sqrt{\frac{417892057 \text{ mm}^4}{1852 \text{ mm}^2}}$$

$$r_x = 475,02 \text{ mm}$$

### 3.1.6. Peso de la viga

El peso de la viga se calculó con la densidad del acero ( $\delta = 7850 \text{ kg/m}^3$ ) mediante la siguiente fórmula

$$W = \delta * A * L$$

$$W = 7850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 1852 \text{ mm}^2 * 3 \text{ m}$$

$$W = 43,61 \text{ kg} \approx 427,38 \text{ N}$$

### 3.1.7. Módulo plástico de la sección

Para una sección I con dos ejes de simetría el módulo plástico se puede aproximar a la siguiente expresión:

$$Z_x = b * t_f * (h - t_f) + \frac{1}{4} * t_w * (h - 2t_f)^2$$

Reemplazando los valores de la sección I de estudio se tiene:

$$Z_x = 75 * 6 * (250 - 6) + \frac{1}{4} * 4 * (250 - 12)^2 [\text{mm}^3]$$

$$Z_x = 166444 \text{ mm}^3$$

### 3.1.8. Carga crítica

Según la norma NEC-SE-AC el momento máximo que puede soportar la viga utilizando la metodología de diseño por factores de carga y resistencia (DFCR) es:

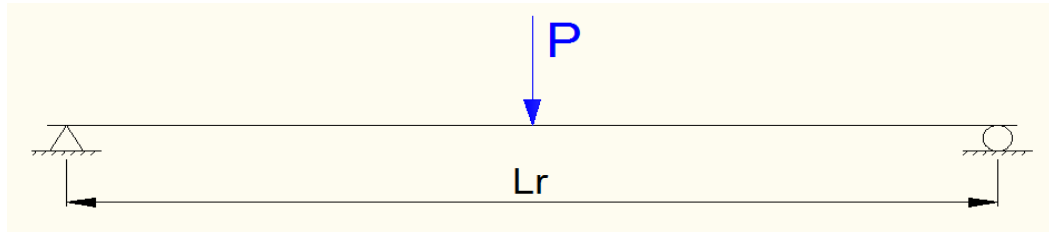
$$M_n = R_y * S_y * Z_x$$

Donde  $R_y$  es el factor de seguridad que para este caso será 1.

$$M_n = S_y * Z_x$$

$$M_n = 248,211 \text{ MPa} * 166444 \text{ mm}^3$$

$$M_n = 41313,2 \text{ N} - \text{m}$$



**Figura23. Viga simplemente apoyada con carga puntual en la mitad.**

La viga estará simplemente apoyada (Ver Figura23) y con su carga puntual en la mitad, el análisis estático da la siguiente ecuación para calcular el momento:

$$M_{max} = \frac{P_t L_R}{4}$$

Por cuestiones prácticas para el ensayo se consideró una distancia entre apoyos real ( $L_R$ ) de 2.8 metros.

$$P_t = \frac{4 M_n}{L_R}$$

$$P_t = \frac{4 (41313,2 \text{ N} - \text{m})}{2,8 \text{ m}}$$

$$P_t = 59018,9 \text{ N}$$

Para obtener la fuerza ( $P$ ) que se debe aplicar a la viga, hay que restar el peso ( $W$ ) de la fuerza total ( $P_t$ )

$$P = P_t - W$$

$$P = 59018,9 \text{ N} - 427,38 \text{ N}$$

$$P = 58590,60 \text{ N} \approx 5978,63 \text{ kg}$$

La carga a la que la viga se plastifica por completo se tomará como 6 toneladas, por lo que el diseño de la viga cumple con todos los requisitos establecidos.

### 3.1.9. Deformación máxima

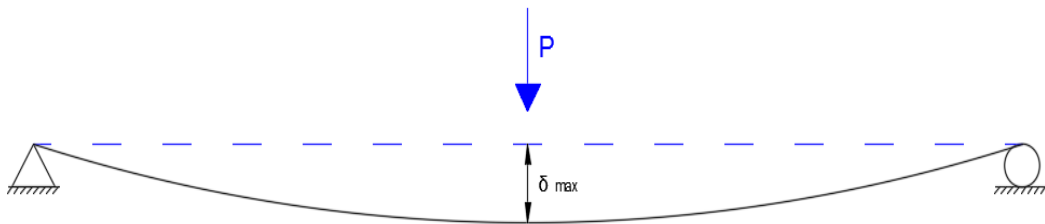
Para las condiciones de apoyo y carga a la que se encuentra sometida la viga según la estática, la fórmula para la deformación máxima se presenta a continuación:

$$\delta_{max} = \frac{P * L_r^3}{48 * E * I_x}$$

$$\delta_{max} = \frac{59018,9 \text{ N} * (2800 \text{ mm})^3}{48 * 210000 \text{ MPa} * 17892057 \text{ mm}^4}$$

$$\delta_{max} = 7,28 \text{ mm}$$

La deformación máxima se ubica en el punto en el que se aplicó la carga.



**Figura 24. Deflexión máxima de la viga.**

### 3.1.10. Esfuerzo cortante en la unión alma - patín

Según el inciso 2.6.4.1 del código AWS D1.1 el esfuerzo en la soldadura de filete debe considerarse como cizallamiento. Por lo cual se debe calcular el esfuerzo cortante a la altura del cordón de soldadura

$$\tau = \frac{VQ}{I_x b}$$

Donde

$\tau$ : Esfuerzo cortante

$V$ : Fuerza cortante

$Q$ : Momento estático de primer orden

$I_x$ : Inercia respecto al eje mayor



$b$ : Ancho de la sección

Para la condición de carga y apoyo de la viga, la fuerza cortante se obtiene mediante la siguiente fórmula:

$$V = \frac{P}{2}$$

$$V = \frac{6000 \text{ Kgf}}{2}$$

$$V = 3000 \text{ Kgf} \approx 29400 \text{ N}$$

El momento estático de primer orden se obtiene mediante la expresión:

$$Q = A' * y'$$

$$Q = b * t_f * y'$$

$$Q = 75 \text{ mm} * 6 \text{ mm} * 122 \text{ mm}$$

$$Q = 54900 \text{ mm}^3$$

La inercia ya se calculó y el ancho es el espesor del alma, por lo que la soldadura tendrá un esfuerzo cortante igual a:

$$\tau = \frac{VQ}{I_x b}$$

$$\tau = \frac{29400 \text{ N} * 54900 \text{ mm}^3}{17892057 \text{ mm}^4 * 4 \text{ mm}}$$

$$\tau = 22,55 \text{ MPa}$$

### 3.1.11. Esquema de la sección de la viga

En la Figura25 se muestra la sección de la viga con sus respectivas medidas.

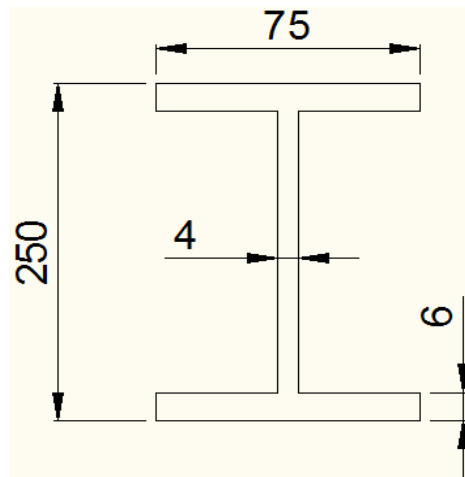


Figura25. Geometría de la viga.

### 3.1.12. Arriostramiento o apoyos laterales

Los apoyos laterales garantizan que el modo de fallo del elemento sea por flexión y no por pandeo lateral torsional. Estos elementos deben ser lo bastante rígidos para soportar el momento que provoca la torsión de la sección.

#### 3.1.12.1. Distancia entre apoyos

La distancia entre apoyos, para que el pandeo lateral torsional no sea tomado en cuenta entre los modos de falla, se calculó mediante la fórmula F2-5 de la norma ANSI/AISC 360-10.

$$L_{p \max} = 1,76 * r_y * \sqrt{\frac{E}{S_y}}$$

$$L_{p \max} = 1,76 * 15.12 \text{ mm} * \sqrt{\frac{29000000 \text{ psi}}{36000 \text{ psi}}}$$

$$L_{p \max} = 755 \text{ mm} \approx 0,75 \text{ m}$$

La distancia debe ser 0.75 metros como máximo.

### 3.1.12.2. Resistencia requerida

Según el método de diseño por factores de carga y resistencia (DFCR) la resistencia torsional requerida ( $M_{ap}$ ) del arriostramiento se calcula con la fórmula:

$$M_{ap} = 0.06 * S_y * Z_x$$

$$M_{ap} = 0,06 * 248,211 \text{ MPa} * 166444 \text{ mm}^3$$

$$M_{ap} = 2478,79 \text{ N} - \text{m}$$

### 3.2. Diseño de la soldadura

La junta será a tope, con soldadura de filete en las cuatro uniones alma-patín sin ranuras, ni refuerzo.

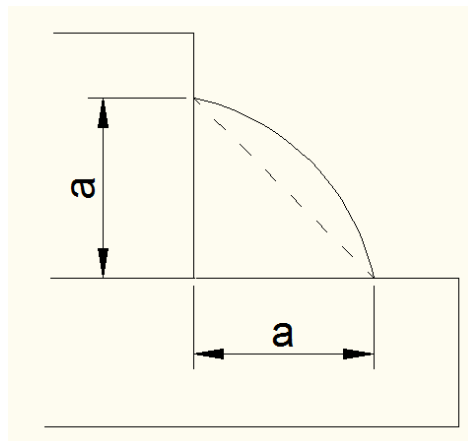


Figura26. Junta a tope, soldadura de filete.

#### 3.2.1. Normativa

La Norma Ecuatoriana de la Construcción para estructuras de acero NEC-SE-AC especifica que las conexiones soldadas deben cumplir con el código AWS D1.1 Código de Soldadura Estructural –Acero.

#### 3.2.2. Selección del proceso de soldadura

Para este caso de estudio, se tomó en cuenta ciertos criterios que facilitarían el armado de la viga y garantizarían la mayor aproximación a los procesos que manejan las empresas en el país.

- Las vigas son armadas en talleres o galpones industriales que brindan condiciones apropiadas para garantizar los parámetros geométricos y de resistencia de la viga.
- Se utilizan procesos semiautomáticos o automáticos para la optimización del tiempo.
- En este caso de estudio, donde los espesores son relativamente delgados, se necesita un proceso con poco aporte de calor para evitar la distorsión en el alma y otros defectos geométricos.

Considerando los criterios antes mencionados, el proceso más adecuado es un proceso GMAW, ya que es un proceso semiautomático, utilizado en la industria ecuatoriana y con poco aporte de calor.

### **3.2.3. Selección de consumibles**

#### **3.2.3.1. Electrodo**

Al elegir los electrodos es necesario tomar en cuenta: su resistencia, composición química y la posición de soldadura, de esta manera se podrá garantizar si es apto para la aplicación.

Según la tabla 3.1 del código AWS D1.1(Ver Anexo 2) para un acero ASTM A36 con un espesor menor a 20 mm usando un proceso de soldadura GMAW recomienda un electrodo ER70S-X.

Tomando en cuenta los productos disponibles en el mercado nacional se escogió un electrodo de denominación AWS ER70S-6 que posee un esfuerzo de fluencia mínimo de 58000 psi según la especificación AWS A5.18, es aplicable para todas las posiciones de soldadura y se recomienda para aceros al carbón (Ver ficha técnica en Anexo 4)

#### **3.2.3.2. Gas de protección**

Según las recomendaciones del fabricante del electrodo, se pueden utilizar como gas protector dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) o una mezcla de Argón y dióxido de carbono (Ar-CO<sub>2</sub>).

Utilizando solo CO2 se obtiene una mayor penetración, pero la velocidad de depósito de material es menor y existe más salpicadura, por lo tanto y tomando en cuenta que el espesor del alma es de 4 milímetros se opta por utilizar la mezcla de 80% Ar y 20% CO2 que disminuye notoriamente la salpicadura y mejora la estabilidad del arco. (Ver ficha técnica en Anexo 5)

### 3.2.4. Fuerza cortante en la soldadura

El esfuerzo cortante producido por la flexión, provocará una fuerza horizontal que será la que deba soportar los filetes de soldadura, esta fuerza se calcula mediante:

$$F_h = \tau * A_w$$

De donde:

$F_h$ : Fuerza horizontal

$\tau$  : Esfuerzo cortante en la unión alma-patín

$A_w$ : Área longitudinal del alma (espesor del alma multiplicado por el largo de la viga)

$$F_h = \tau * t_w * L$$

$$F_h = 22,55 \text{ MPa} * 4 \text{ mm} * 3000 \text{ mm}$$

$$F_h = 270632,94 \text{ N}$$

Esta fuerza horizontal ( $F_h$ ) se traslada al cordón de soldadura como una fuerza cortante, pero como se tiene dos filetes en cada unión alma-patín la fuerza se reparte equitativamente entre cada filete por lo cual se tiene fuerza cortante ( $V_s$ ) del cordón:

$$V_s = \frac{F_h}{2}$$

$$V_s = \frac{270632,94 \text{ N}}{2}$$

$$V_s = 135316,47 \text{ N}$$

### 3.2.5. Geometría del cordón de soldadura

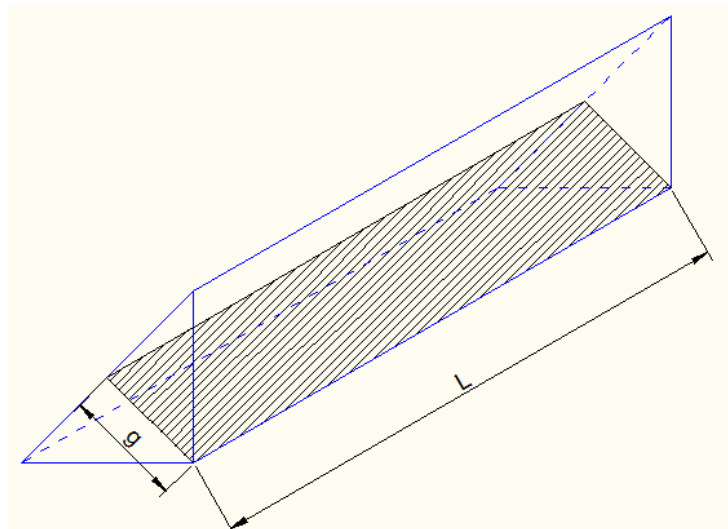
#### 3.2.5.1. Pie de cordón

En la tabla 5.8 del código AWS D1.1 (ver Anexo 3) se especifican los valores mínimos de tamaño del pie de cordón de soldadura, para espesores menores a 6 milímetros es de 3 milímetros.

Con estas recomendaciones y tomando en cuenta que los espesores del alma y de los patines son 4 y 6 milímetros respectivamente; el tamaño del cordón será de 5 milímetros de pie.

#### 3.2.5.2. Longitud de los cordones

La longitud mínima debe procurar resistir el esfuerzo al que está sometido el cordón de soldadura y cumplir con lo estipulado en la sección 2.3.2.4 del código AWS D1.1 que dice: La longitud mínima de los filetes de una soldadura de filete intermitente deberá ser de 1-1/2 pulgadas (38 mm).



**Figura 27. Geometría del cordón de soldadura.**

#### 3.2.5.3. Longitud mínima

Para obtener la longitud mínima del cordón se calculará la fuerza cortante utilizando el esfuerzo permisible máximo que especifica la tabla 2.3 del código AWS D1.1

$$V_s = 0,4 * S_y * 0.707 * a * l_{min}$$

Donde:

$S_y$ : Esfuerzo de fluencia del material base (acero A36)

$$S_u = 250 \text{ MPa}$$

$a$ : Pie del cordón de soldadura

$l_{min}$ : Longitud mínima del cordón

Al despejar la longitud mínima tenemos:

$$l_{min} = \frac{V_s}{0,4 * S_y * 0,707 * a}$$

$$l_{min} = \frac{135316,47 \text{ N}}{0,4 * 250 \text{ MPa} * 0,707 * 5 \text{ mm}}$$

$$l_{min} = 382.79 \text{ mm}$$

Esta es la longitud total mínima que deberían sumar todos los cordones de soldadura en una sola unión alma patín para soportar los esfuerzos a los que se encuentra sometida la viga.

Podemos obtener el porcentaje de longitud de la viga que debe estar soldada para resistir la carga.

$$\% \text{ soldadura} = \frac{l_{min} * 100 \%}{L}$$

$$\% \text{ soldadura} = \frac{382.79 \text{ mm} * 100 \%}{3000 \text{ mm}}$$

$$\% \text{ soldadura} = 12.76 \%$$

#### 3.2.5.4. Intermitencia de los cordones

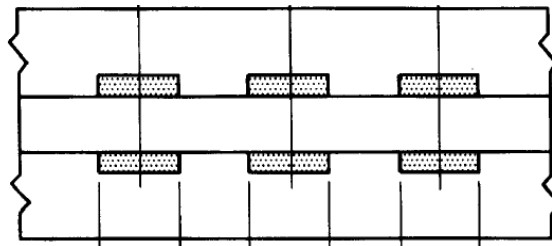
Aplicando lo establecido en el punto 2.12.2.2 del código AWS D1.1 “el máximo espacio longitudinal de las soldaduras intermitentes que conecten una placa a otros componentes no deberá exceder 24 veces el espesor de la placa más delgada, ni exceder 12 pulgadas [300mm].”

En el caso de este estudio el espesor de la placa más delgada es de 4mm, por lo que, el espacio máximo entre soldaduras calculado es:

$$e_{\max} = 24 * (4\text{mm}) = 96\text{mm} \text{ (aproximado a } 100 \text{ mm por construcción)}$$

Como uno de los objetivos es optimizar al máximo los recursos utilizados en la fabricación de vigas de acero, se decidió mantener el parámetro  $e_{\max}$  como constante.

Para que una soldadura se considere intermitente debe tener por lo menos dos cordones de soldadura y por ende un espacio entre ellos, por este motivo el primer caso tiene un espacio y posteriormente se va aumentando de uno en uno los espacios para encontrar la longitud del cordón de soldadura necesario. La disposición de los cordones de soldadura va a ser opuesta como se muestra en la Figura 28.



**Figura 28. Soldadura intermitente opuesta.**

Fuente: (ANSI/AWS, AWS A2.4 Símbolos normalizados para soldeo, soldeo fuerte y examen no destructivo., 1993)

La unión alma-patín empezará y terminará con cordón de soldadura, de esta manera se puede calcular la longitud del cordón, usando la ecuación:

$$L_c = \frac{L - (Es * \#e)}{\#e + 1}$$

Donde:

$L_c$ : Longitud del cordón de soldadura

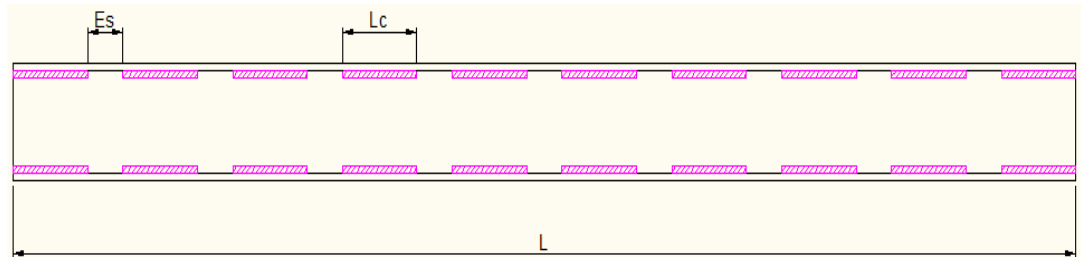
$L$ : Longitud de la viga

$Es$ : Espacio entre soldaduras

$\#e$ : Número de espacios



En la Tabla 1 se puede apreciar los datos de los 21 casos que serán simulados.



**Figura 29. Disposición de la soldadura.**

**Tabla 1.**

***Datos de la intermitencia de soldadura en cada caso de estudio.***

Espacio entre soldaduras (Es) [mm]	Número espacios (#e)	Número de cordones (#c)	Longitud del cordón (Lc) [mm]	Porcentaje de soldadura [%]
100	1	2	1450	97
100	2	3	933	93
100	3	4	675	90
100	4	5	520	87
100	5	6	417	83
100	6	7	343	80
100	7	8	288	77
100	8	9	244	73
100	9	10	210	70
100	10	11	182	67
100	11	12	158	63
100	12	13	138	60
100	13	14	121	57
100	14	15	107	53
100	15	16	94	50
100	16	17	82	47
100	17	18	72	43
100	18	19	63	40
100	19	20	55	37
100	20	21	48	33
100	21	22	41	30

No se puede iterar con más número de espacios ya que la longitud del cordón sería menor a 38 milímetros y no cumpliría con la longitud mínima estipulada en el código AWS D1.1.

### 3.2.6. Esfuerzo cortante en la soldadura

El esfuerzo cortante para cada caso de intermitencia de soldadura será calculado con la formula,

$$\tau_s = \frac{V_s}{0.707 * a * l_{e,s}}$$

Dónde:

$\tau_s$ : Esfuerzo cortante en la soldadura

$l_{e,s}$ : Longitud efectiva de soldadura

Tomando en cuenta el inciso 2.4.2.5 del código AWS D1.1 que dice “cuando la longitud de las soldaduras de filete exceda las 100 pero no más de 300 veces el tamaño de la soldadura, la longitud efectiva debe determinarse multiplicando la longitud real por el coeficiente de reducción

$$\beta = 1.2 - 0.2 \left( \frac{l_s}{100 * a} \right) \leq 1.0$$

Dónde:

$\beta$ : Coeficiente de reducción.

$l_s$ : Longitud total de soldadura

Cuando la longitud exceda 300 veces el tamaño de la pierna, la longitud efectiva debe tomarse como 180 veces el tamaño de la pierna.”

Para determinar la longitud real total de soldadura se debe multiplicar el tamaño de los cordones por el número de cordones.

$$l_s = l_c * \#c$$

Exclusivamente para este caso de estudio donde conocemos que el tamaño de soldadura es 5 milímetros podemos establecer que para valores

de longitud real total de entre 500 y 1500 milímetros se debe aplicar el coeficiente de reducción y para valores mayores a 1500 milímetros la longitud efectiva será directamente 900 milímetros.

Los valores de los esfuerzos cortantes se resumen en la siguiente tabla:

**Tabla 2.**  
***Esfuerzos cortantes de la soldadura en cada caso de estudio.***

(Es) [mm]	(#e)	(#c)	(Lc) [mm]	Longitud total de soldadura (Ls) [mm]	Coeficiente de reducción (B)	Longitud máxima efectiva (Le.s) [mm]	Esfuerzo cortante [Mpa]
100	1	2	1450	2900	-	900	42,53
100	2	3	933	2799	-	900	42,53
100	3	4	675	2700	-	900	42,53
100	4	5	520	2600	-	900	42,53
100	5	6	417	2502	-	900	42,53
100	6	7	343	2401	-	900	42,53
100	7	8	288	2304	-	900	42,53
100	8	9	244	2196	-	900	42,53
100	9	10	210	2100	-	900	42,53
100	10	11	182	2002	-	900	42,53
100	11	12	158	1896	-	900	42,53
100	12	13	138	1794	-	900	42,53
100	13	14	121	1694	-	900	42,53
100	14	15	107	1605	-	900	42,53
100	15	16	94	1504	-	900	42,53
100	16	17	82	1394	0,64	895,51	42,75
100	17	18	72	1296	0,68	883,35	43,33
100	18	19	63	1197	0,72	863,28	44,34
100	19	20	55	1100	0,76	836	45,79
100	20	21	48	1008	0,8	803,17	47,66
100	21	22	41	902	0,84	756,96	50,57

### 3.2.7. Selección de los casos para experimentación

Para elegir las vigas a ser construidas, se tendrán en consideración los siguientes criterios:

- Porcentaje de soldadura.

- Relación entre intermitencia de soldadura y esfuerzos resultantes teóricos.

Analizando estos parámetros se decidió construir 3 vigas para los ensayos que tendrán las siguientes características:

- Viga 1: La longitud del cordón es la mitad del espaciamiento entre cordones
- Viga 2: Longitud del cordón igual al espaciamiento entre cordones
- Viga 3: La longitud del cordón es el doble del espaciamiento entre cordones

En la siguiente tabla se muestran los casos reales que más se acercan a los criterios ya mencionados:

**Tabla 3.**  
**Casos de experimentación, medidas de soldadura.**

Dimensiones Soldadura			
	Espacio entre soldaduras (Es) [mm]	Longitud del cordón (Lc) [mm]	Porcentaje de soldadura
VIGA 1	100	55	37 %
VIGA 2	100	121	57 %
VIGA 3	100	210	70 %

### 3.2.8. Parámetros de la soldadura

Se elaboró un WPS (ver Anexo 8) en el que se establecieron todos los parámetros necesarios para realizar el proceso de soldadura.

### 3.3. Diseño del experimento

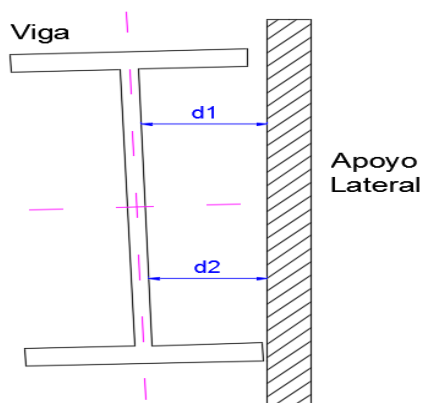
Se definirá las variables a medir en el desarrollo del ensayo a flexión y el procedimiento para medirlas.

#### 3.3.1. Variables a medir

Se medirán las siguientes variables:

- Deformación máxima.
- Deformación unitaria, con la cual se calculará posteriormente los esfuerzos normales en cada viga.

- Desplazamientos laterales de la viga respecto a los apoyos laterales como se muestra en la Figura 30.



**Figura 30. Esquema de medición desplazamiento laterales.**

### 3.3.2. Instrumentación y procedimiento de medición

En la siguiente tabla se resumirá los equipos e instrumentos de medición para cada variable y el procedimiento general para la medición

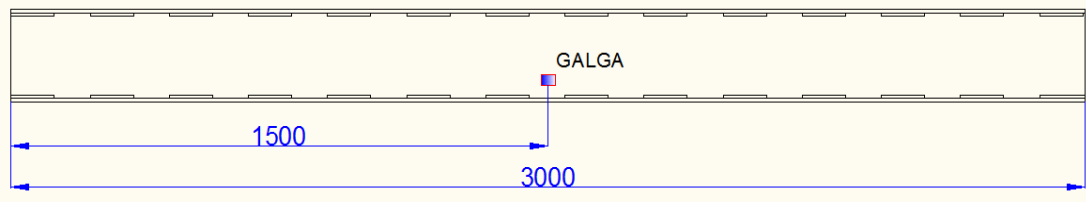
**Tabla 4.**  
***Instrumentación y proceso de medición.***

Variable	Instrumentación	Procedimiento de medición
<b>Deflexión</b>	-Comparador de reloj analógico de resolución 0.01 mm -Base universal del comparador	El comparador será ubicado lo más cerca posible al punto medio de la viga en contacto con el patín superior, antes de que se aplique la carga se encerara y una vez se empiece el ensayo se tomaran los datos
<b>Deformación unitaria</b>	-Galgas extensométricas lineales de 120 ohmios -Lector de deformación unitaria digital de 120 ohmios,	Las galgas extensométricas serán colocadas sobre plano medio de la viga en el alma, lo más cercano posible a las uniones alma-patín. Las vigas con los esfuerzos cortantes más críticos llevaran más sensores. Los sensores se conectarán mediante cables multipar al lector de deformación unitaria.
<b>Desplazamientos laterales</b>	-Calibrador de 150 mm con resolución de 0.02 mm	Los desplazamientos serán medidos en referencia a los apoyos laterales. Se tomarán datos sin carga y posteriormente a la carga máxima.

### 3.3.2.1 Ubicación de las galgas extensométricas

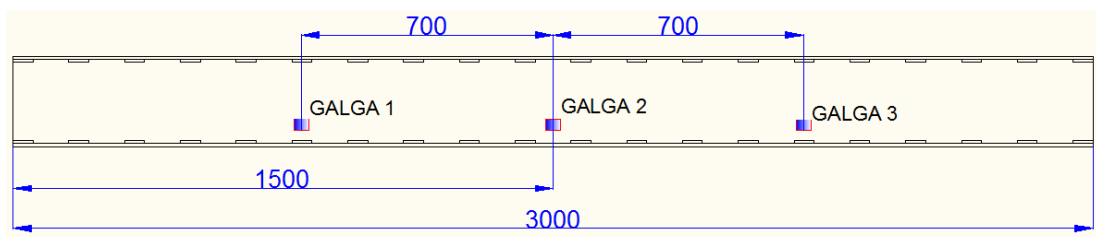
Para determinar la posición de los sensores en la viga, se consideró que el área de interés para el estudio se encuentra cerca de los cordones de soldadura y en los puntos donde teóricamente se presentarían los mayores esfuerzos.

Según la condición de carga y apoyos, los puntos más críticos estarán ubicados en el plano del centro longitudinal de la viga, por esto se decidió que en cada viga se colocará una galga extensométrica en el alma a unos 5 milímetros por encima del cordón de soldadura inferior sobre este plano.



**Figura 31. Esquema de ubicación de las galgas extensométricas.**

Adicionalmente en la viga que presenta el esfuerzo cortante teórico más alto se colocaran dos galgas extensométricas adicionales ubicadas a la misma altura de la galga del centro, pero separadas longitudinalmente 700 milímetros (punto medio entre el centro y el apoyo) hacia la derecha la primera y hacia la izquierda la segunda, como se muestra en la figura 32.



**Figura 32. Esquema de ubicación de las galgas viga 37%.**

### 3.3.3. Registro de datos

Todos los datos obtenidos se tomarán de forma manual, se tabularán mediante hojas de cálculo para su posterior análisis en el presente trabajo.

### 3.3.4. Variables a controlar

Los resultados del ensayo se podrían ver afectados por las siguientes variables

- Carga descentrada: La carga se debe aplicar en la mitad de la viga para garantizar que los puntos críticos y de interés no cambien su posición, para lo cual una vez montada la viga en la máquina de ensayos, se procederá a medir con fluxómetro las distancias entre el cilindro que aplicará la carga y los extremos de la viga.
- Distancia entre apoyos: Esta distancia influye en la deflexión y resistencia de la viga por lo cual se constatará su medida antes de iniciar la prueba.
- Defectos geométricos en la viga: Se pueden producir desviaciones o defectos en la sección de la viga producto del proceso de fabricación, lo que podría causar esfuerzos residuales, cambios en la resistencia y fallos por pandeo local, por lo cual una vez acabado el proceso de construcción se verificará la geometría de la viga según los estándares de la normativa.
- Defectos en la soldadura: Cualquier defecto fuera de los límites permisibles reduce la resistencia de la soldadura, por lo cual se realizará una inspección visual y una verificación de la geometría del cordón una vez terminado el proceso de fabricación

### 3.4. Simulación en software CAD/CAE

Luego de conocer la geometría de la viga, se procedió a realizar el modelo CAD de todos los casos presentados en la Tabla 1.

La simulación fue realizada en un software CAD/CAE, fue necesario establecer las propiedades tanto del material de aporte como del material base y de esta manera obtener resultados más próximos a la realidad.

### 3.4.1. Ejemplo de simulación

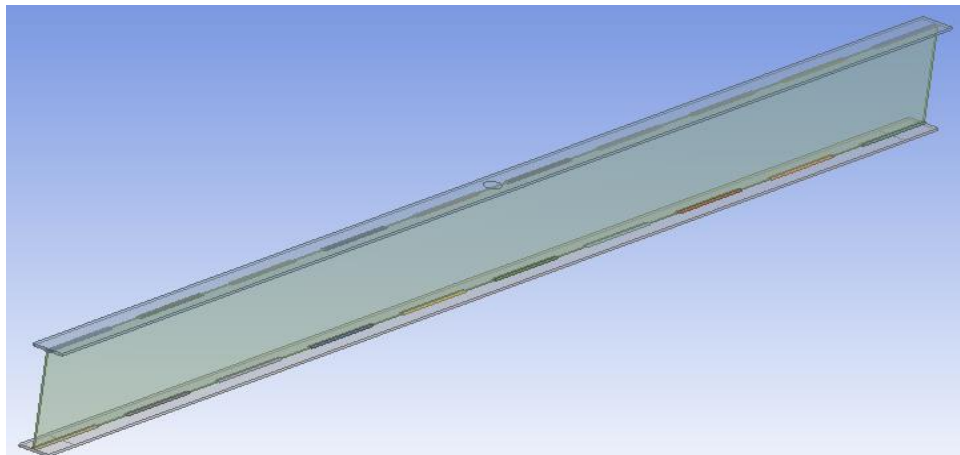
A continuación, se presenta un ejemplo de simulación completa de la viga 3 (70% soldada), cuyos parámetros de soldadura se pueden observar en la Tabla 1.

El procedimiento de este ejemplo fue aplicado en cada simulación.

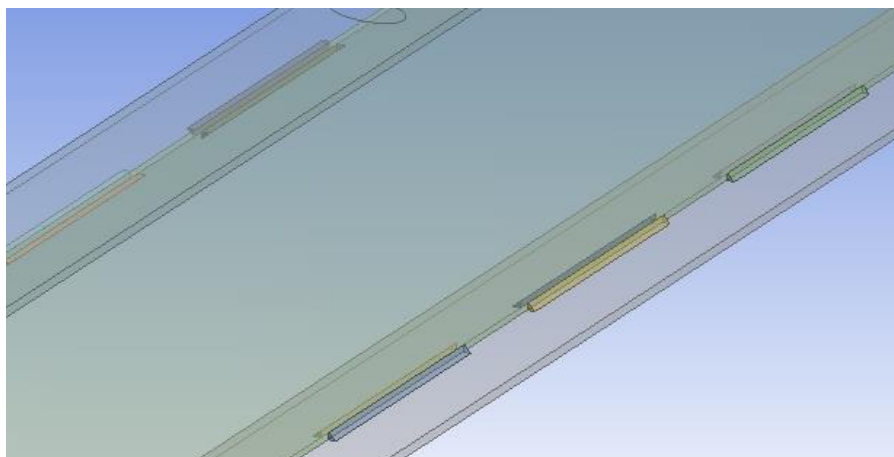
#### 3.4.1.1. Modelo CAD de la viga

Una vez definida la geometría, se procedió a dibujar la viga en un software CAD, para posteriormente exportar el modelo al simulador.

En las figuras 33 y 34 se puede observar la viga dibujada y los cordones de soldadura respectivamente:



**Figura 33. Dibujo de la viga en un software CAD.**



**Figura 34. Longitud de cordón 210 mm y espacio de 100 mm (viga 3).**



### 3.4.1.2. Asignación de materiales

Se estableció las propiedades mecánicas del material de aporte ER 70S-6y del material base acero ASTM A36, las cuales se detallan a continuación:

**Tabla 5.**  
**Propiedades mecánicas del acero ASTM A36.**

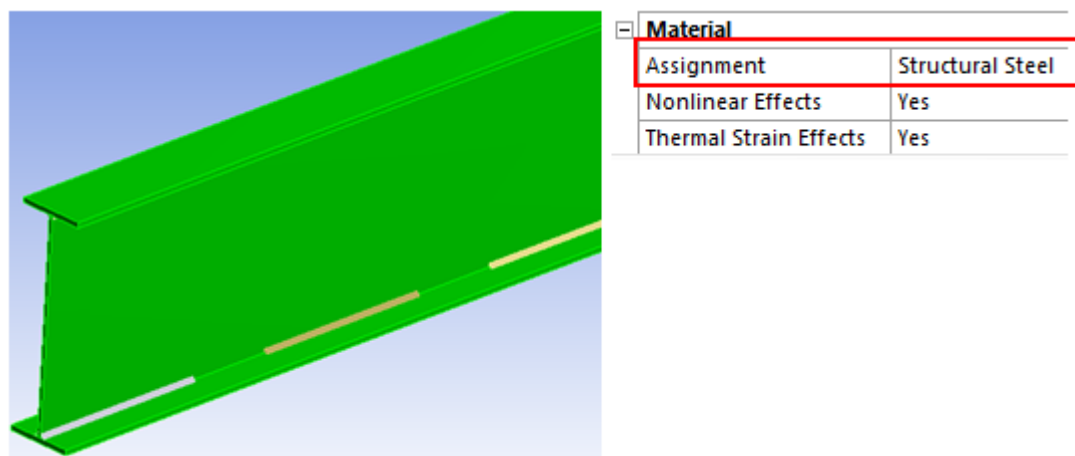
ASTM A36		
Propiedades	Valor	Unidades
<b>Densidad</b>	7850	kg/m <sup>3</sup>
<b>Resistencia fluencia (Sy)</b>	2,5 x 10 <sup>8</sup>	Pa
<b>Resistencia a la tracción (Fu)</b>	4,6 x 10 <sup>8</sup>	Pa

**Tabla 6.**  
**Propiedades mecánicas del electrodo ER 70S-6.**

ELECTRODO ER 70S-6		
Propiedades	Valor	Unidades
<b>Densidad</b>	7850	kg/m <sup>3</sup>
<b>Resistencia fluencia (Sys)</b>	4 x 10 <sup>8</sup>	Pa
<b>Resistencia a la tracción (Fu)</b>	4,8 x 10 <sup>8</sup>	Pa

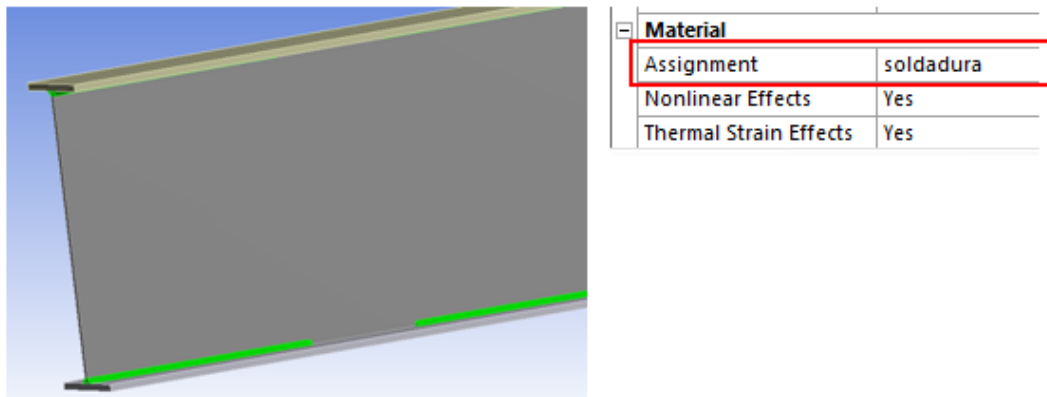
Se exportó el modelo CAD al software de simulación y a cada elemento de la viga se le asignó el material correspondiente.

Como se muestra en la Figura 35, los elementos que se muestran de color verde: patines y alma, se les asignó el material acero estructural (ASTM A36).



**Figura 35. Asignación de material a elementos de la viga.**

De la misma manera se asignó el material a los cordones de soldadura, como se muestra en la Figura 36, los elementos que se muestran de color verde, se les asignó el material soldadura.

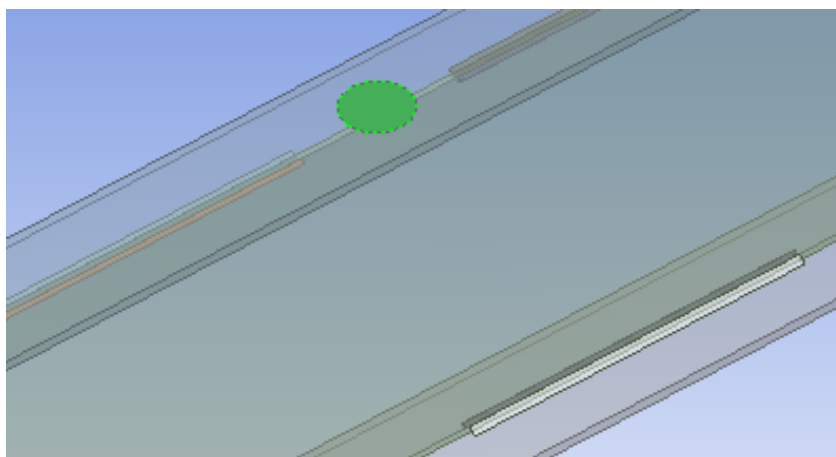


**Figura 36. Asignación de material a los cordones de soldadura.**

#### 3.4.1.3. Condiciones de carga y apoyos en la viga

En el diseño se estableció que la viga estará simplemente apoyada con una carga concentrada en la mitad de la longitud.

Para la aplicación de la carga, se dibujó en la mitad del patín superior el área del pistón de la prensa que aplicará la fuerza, como se ve en la Figura 37.



**Figura 37. Área en la que se aplicará la carga (zona verde).**

En el patín inferior se dibujaron dos áreas que representan el contacto con los apoyos como muestra la Figura 38.

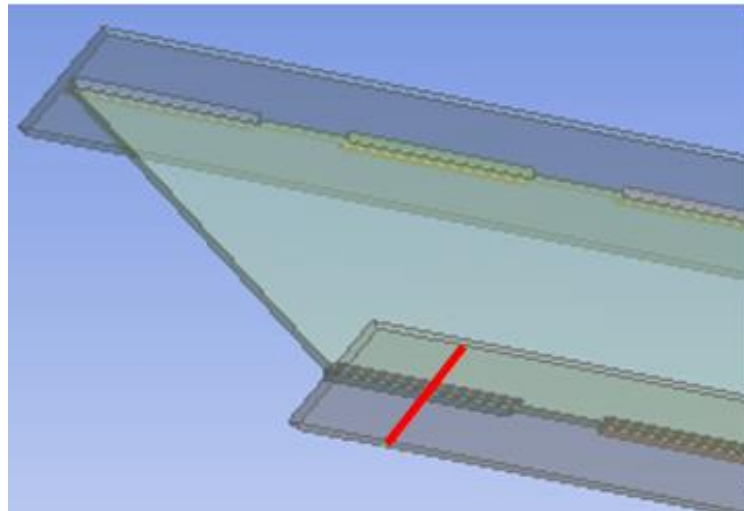


Figura 38. Área en la que se pondrá el apoyo (Línea roja).

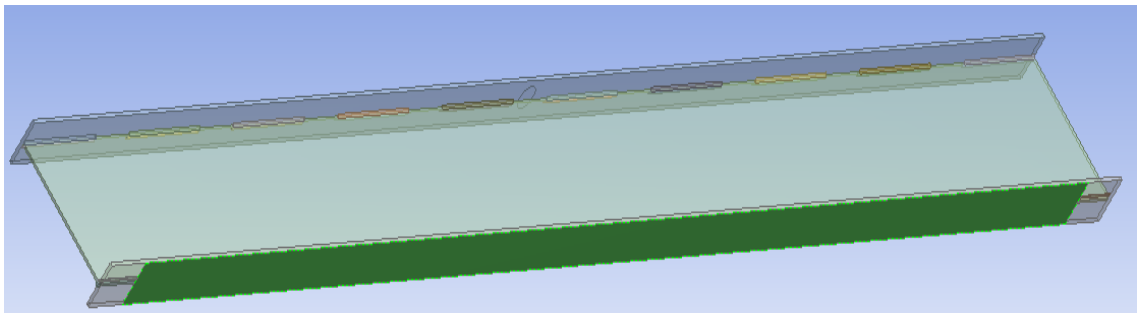


Figura 39. Espacio entre apoyos (zona verde).

La viga fue sometida a una carga de 58800 N en el área establecida además se consideró el peso de la viga para la simulación.

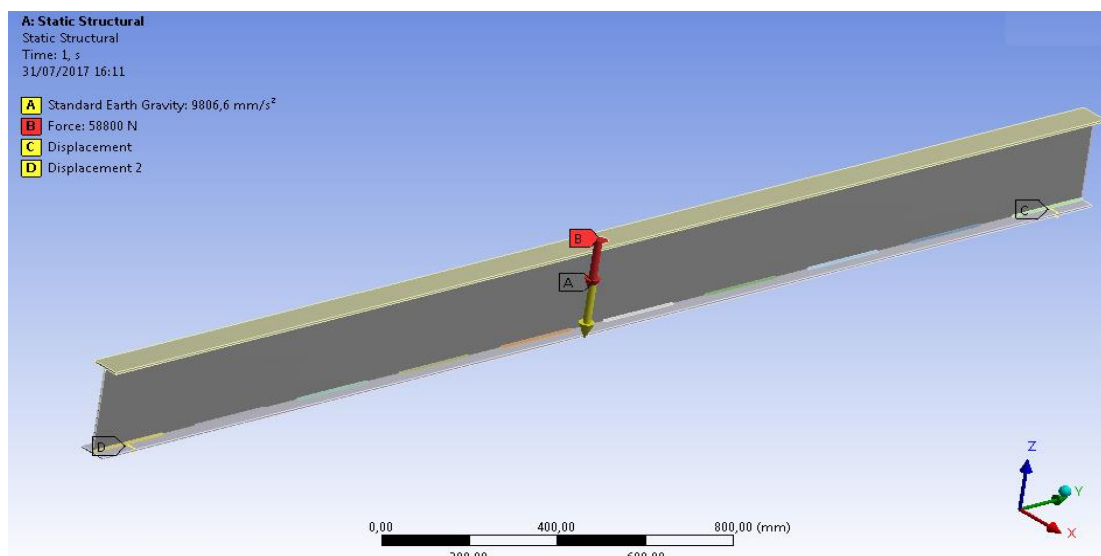


Figura 40. Aplicación de la carga.

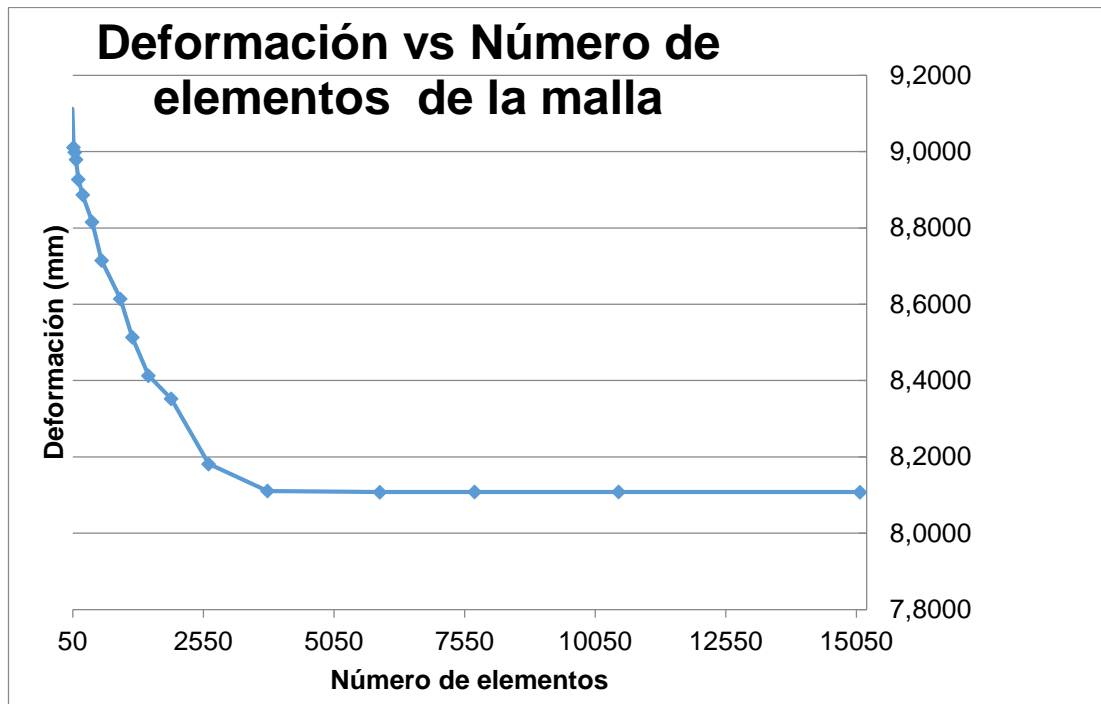
#### 3.4.1.4. Convergencia de la malla

Al tener una malla con mayor número de elementos los resultados de la simulación tienden ser más exactos, para estimar el número adecuado de elementos se hizo una convergencia de malla. En la Tabla 7 se presentan los valores de deformación, esfuerzo normal y esfuerzo cortante obtenidos de la simulación al variar el número de elementos de la malla.

**Tabla 7.**  
**Convergencia de malla.**

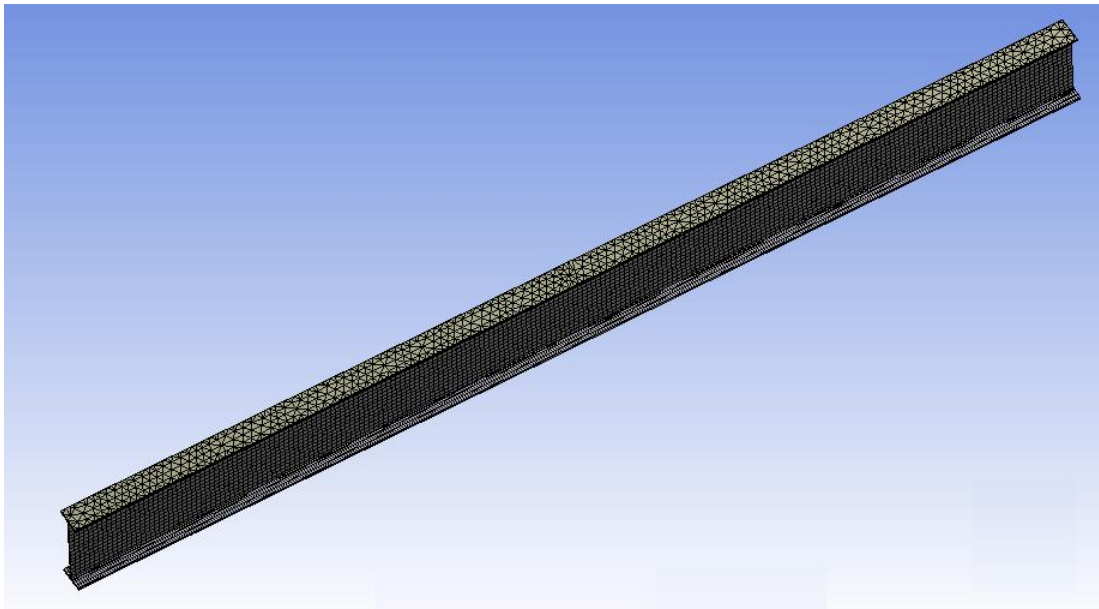
Número De Elementos	Deformación (mm)	Esfuerzo Normal (MPa)	Esfuerzo Cortante (MPa)
15120	8,1078	263,64	24,78
10500	8,1081	263,28	24,75
7740	8,1084	263,98	24,89
5925	8,1079	263,88	24,88
3780	8,1109	263,89	24,55
2650	8,1816	274,32	25,27
1935	8,3523	278,49	25,78
1500	8,4130	282,23	26,34
1190	8,5137	285,97	27,42
960	8,6144	289,71	27,98
600	8,7151	295,23	28,45
420	8,8158	299,24	29,78
240	8,8865	300,93	29,99
156	8,9272	304,67	31,02
110	8,9790	308,41	33,08
90	8,9986	309,15	35,24
64	9,0110	310,89	37,33
42	9,1120	312,63	38,41

Se presenta una convergencia en los resultados al tener más de 3780 elementos, para visualizar mejor esta convergencia se graficó los resultados la deformación en la Figura 41.



**Figura 41. Convergencia de la malla.**

Tomando en cuenta la tendencia presentada en la Figura 41 se escogió una malla con 5925 elementos para realizar la simulación. En la Figura 42 se puede observar la viga mallada



**Figura 42. Viga mallada.**

### 3.4.2. Resultados de las simulaciones

Una vez realizada la simulación, en las siguientes imágenes se muestran los resultados obtenidos para la viga 3.

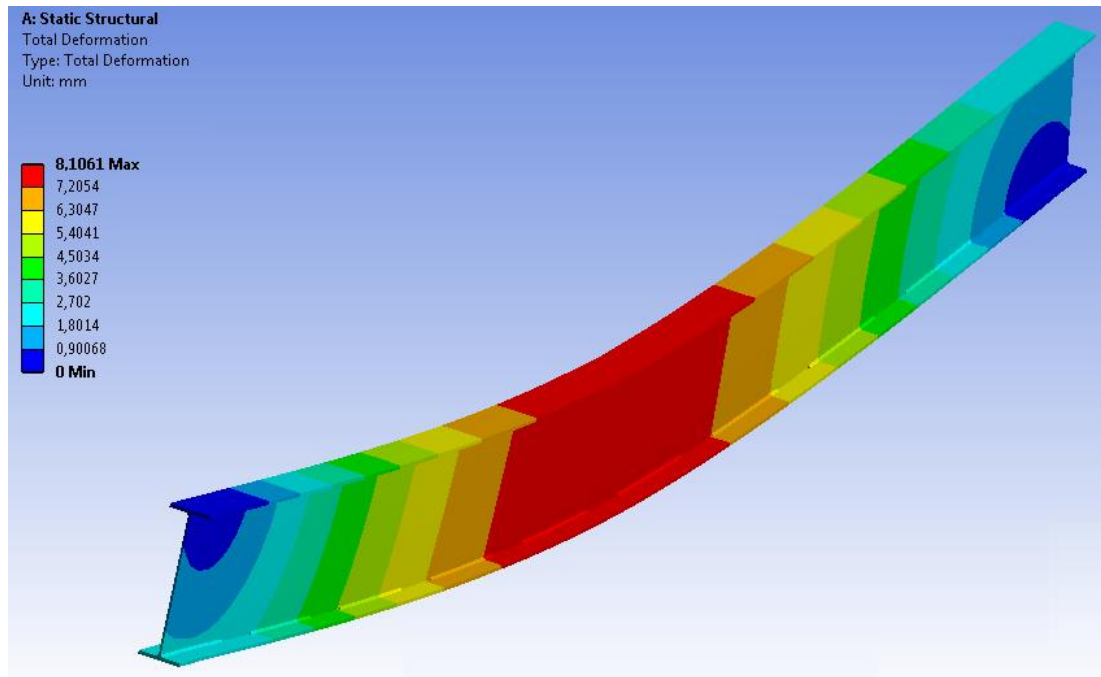


Figura 43. Deformación total.

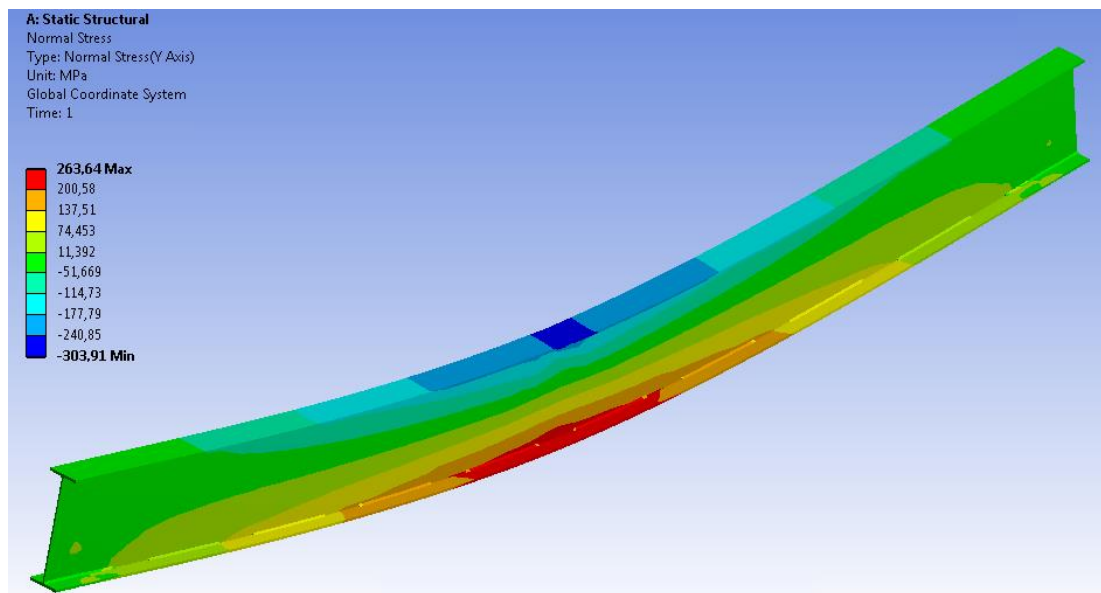
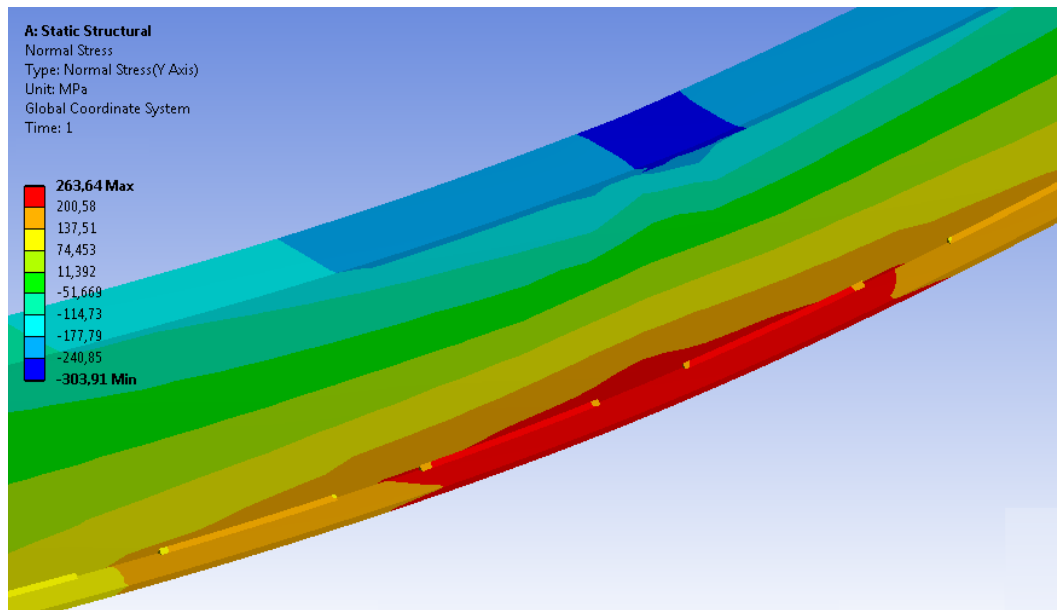
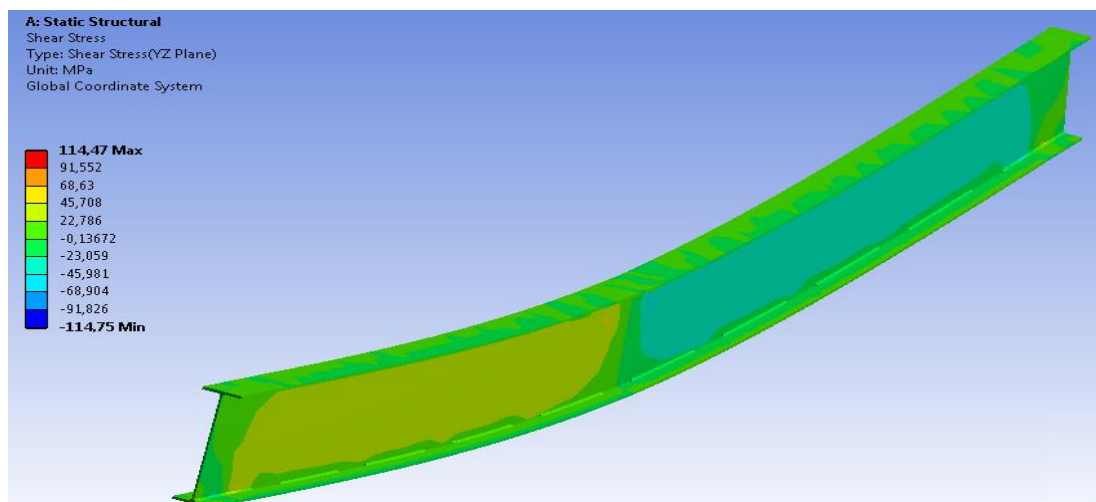


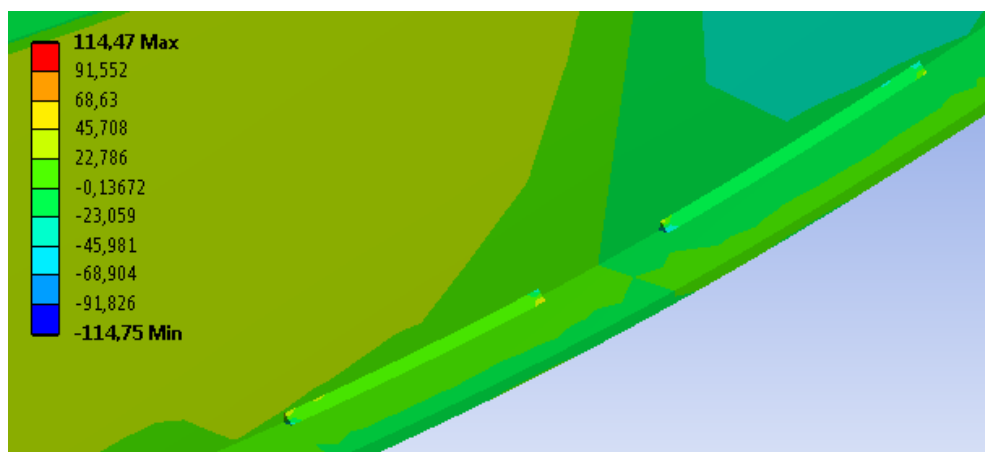
Figura 44. Esfuerzos normales de la viga.



**Figura 45. Esfuerzos normales de los cordones centrales.**



**Figura 46. Esfuerzos cortantes.**



**Figura 47. Esfuerzos cortantes de los cordones centrales.**

En la Tabla 8 se presenta los valores del esfuerzo normal máximo, esfuerzo cortante en la unión alma-patín y deflexión de cada viga simulada:

**Tabla 8.**  
**Resultados de las simulaciones.**

Porcentaje de soldadura [%]	Longitud Total de Soldadura (Lc) [mm]	Deformación Máxima [mm]	Esfuerzo Normal Máximo [MPa]	Esfuerzo Cortante en la Unión Alma-Patín [MPa]
97	2900	8,06	259,51	23,66
93	2799	8,06	258,77	22,88
90	2700	8,07	259,91	23,71
87	2600	8,07	260,96	24,55
83	2502	8,08	261,92	23,04
80	2401	8,08	261,68	24,31
77	2304	8,09	263,74	23,81
73	2196	8,10	262,54	24,83
70	2100	8,11	263,64	24,78
67	2002	8,11	264,59	23,42
63	1896	8,11	263,31	24,82
60	1794	8,13	264,71	24,56
57	1694	8,14	263,81	24,02
53	1605	8,15	264,82	24,63
50	1504	8,15	264,99	24,14
47	1394	8,16	265,22	23,96
43	1296	8,17	264,83	24,45
40	1197	8,18	265,59	23,51
37	1100	8,18	265,27	24,35
33	1008	8,18	265,72	25,16
30	902	8,19	265,88	24,43

En la Tabla 9 se presenta los resultados de las vigas a ser construidas:



**Tabla 9.**  
**Valores de esfuerzos y deformación de las vigas.**

	Porcentaje de soldadura	Deformación Máxima [mm]	Esfuerzo Normal Máximo [MPa]	Esfuerzo Cortante en la Unión Alma-Patín [MPa]
VIGA 1	37 %	8,18	265,27	24,35
VIGA 2	57 %	8,14	263,81	24,02
VIGA 3	70 %	8,11	263,64	24,78

### 3.5. Planos según norma INEN

Los planos de construcción de los 3 casos de experimentales se dibujaron bajo la norma CPE INEN 003 y se presentan en el Anexo 9.

## CAPÍTULO IV

### 4. EJECUCIÓN DEL EXPERIMENTO

#### 4.1. Construcción de las vigas

A partir del diseño establecido en el capítulo III, se construyeron las 3 vigas, siguiendo los pasos que se mencionan a continuación:

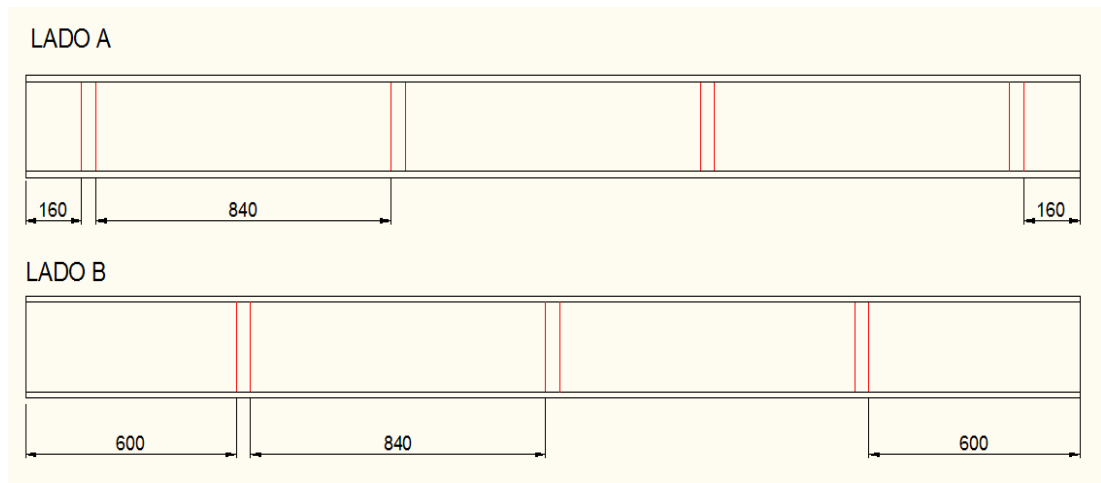
##### 4.1.1. Selección de materiales de construcción

- 3 platinas acero ASTM A36 de 6000 mm de longitud y 6 mm de espesor para los patines.
- 1 plancha de acero ASTM A36 de 1220 x 3000 x 4 mm para las almas.
- Tubo rectangular ASTM A36 20 x 40 x 2 mm para el armado de las vigas.
- Electrodo 6011 para el armado de las vigas.
- Alambre ER70S-6 diámetro de 0.8 mm para los cordones en las uniones alma – patín.

##### 4.1.2. Armado de las vigas

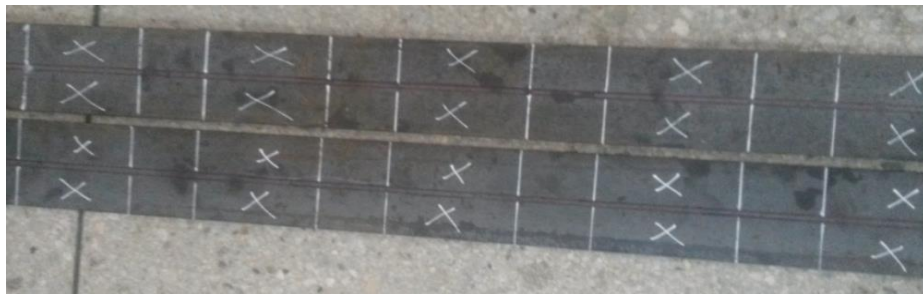
El armado de las vigas fue un proceso muy importante en el desarrollo del proyecto, ya que la geometría y, por tanto, la resistencia de cada viga depende de una correcta construcción, para ello se realizó el siguiente proceso:

- a) Corte de las platinas en dos partes de 3000 mm cada una para los patines.
- b) Corte de la plancha de acero en tres partes de 238 mm de ancho por 3000 mm de longitud para las almas.
- c) Corte del tubo rectangular en pedazos de 238 mm (altura del alma), los cuales fueron colocados en el alma como refuerzos temporales en cada viga, para controlar la distorsión producto de la temperatura del proceso de soldadura. En la Figura 48 se muestra la distribución de los refuerzos en la viga.



**Figura48. Distancias entre refuerzos de cada lado de la viga.**

- d) Se delimitó en cada patín las zonas soldadas y las zonas libres, diferenciando a las últimas con una X como muestra la Figura49.



**Figura49. Delimitación de las zonas soldadas y libres.**

- e) Se verificó la rectitud de los patines y en los casos donde estos se encontraban flejados, se los enderezo con una prensa hidráulica.
- f) En un patín se soldaron perpendicularmente los pedazos de tubo rectangular, usando puntos de soldadura SMAW con electrodo E6011 como se muestra en la Figura50.



**Figura 50. Refuerzos soldados en el patín**

- g) Con todos los refuerzos soldados, se procedió a colocar el almay posteriormente sobre ésta, se colocó el otro patín, finalizando así con el armado.



**Figura 51. Vigas armadas.**

#### **4.1.3. Proceso de soldadura en las vigas**

A continuación, se detalla el proceso de soldadura el mismo que fue aplicado para las 3 vigas.

- a) Secado y limpieza de las uniones alma-patín.
- b) Se estableció el orden en que se realizarían los cordones, ya que debían alternarse las soldaduras para evitar la distorsión por concentración de calor en zonas específicas de la viga.
- c) Un soldador calificado realizó los cordones, bajo los parámetros establecidos en el WPS, utilizando la soldadora MILLER, Millermatic 300.

- d) Limpieza de los cordones de soldadura

En la Tabla 10 se muestra el material de aporte y gas utilizados en el proceso.

**Tabla 10.**  
***Material de aporte y gas de protección.***

Material de aporte	ER 70S-6 de 0.8 mm de diámetro, INDURA
Gas de protección	80 % Argón- 20% CO2 mix, INDURMIG 20



**Figura 52. Vigas Soldadas con Refuerzo.**

#### **4.1.4. Proceso de remoción de refuerzos**

- a) Se dejó enfriar completamente las vigas
- b) Se removieron los refuerzos y los puntos de soldadura que existían entre los elementos de la viga, utilizando una amoladora con disco de corte y cincel.
- c) Limpieza de cada viga con una grata, para eliminar la escoria de la soldadura.

En la Figura 53 se muestra las vigas construidas.

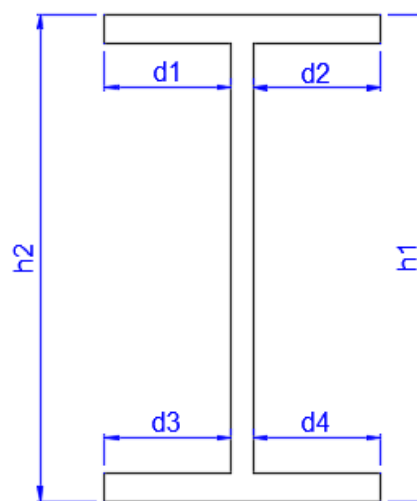


**Figura53. Vigas construidas.**

#### **4.2. Verificación de la geometría de la viga**

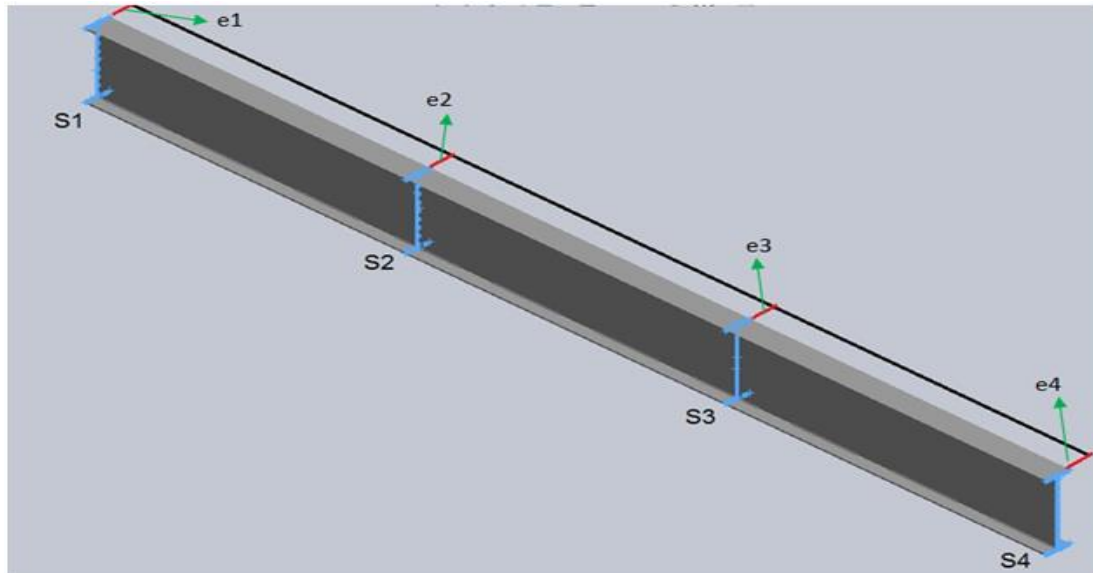
Antes de proceder con el ensayo se realizó la verificación geométrica de las vigas.

Para verificar que no existan pandeos locales en el alma o los patines de la viga se tomó a cada metro las medidas que se señalan en la Figura54.



**Figura54. Verificación geométrica de la sección de la viga.**

También se controló la rectitud de la viga, tomando una línea como referencia se midieron las distancias mostradas en la Figura55 por cada metro.



**Figura55. Verificación de la rectitud de la viga.**

Las medidas esperadas en la viga son:

- Longitud ( $L$ ) =  $3000 \pm 10 \text{ mm}$
- $h_{1,2} = 250 \pm 6 \text{ mm}$
- $d_{1,2,3,4} = 35,5 \pm 3 \text{ mm}$
- $e_{1,2,3,4} = \pm 3 \text{ mm}$

Para determinar las tolerancias se tomó en cuenta las restricciones de la sección 5.23 del código AWS D1.1.

Los instrumentos de medición que se utilizó en la comprobación fueron:

- Para la longitud un flexómetro de 5 m. con una resolución de 1 mm
- Para las demás distancias un calibrador de 150 mm con resolución de 0.02 mm

Los resultados de cada viga se presentan en las siguientes tablas:

**Tabla 11.**  
**Verificación de la geometría viga 1.**

VIGA 1								
Longitud: 2998 mm								
Sección	Distancia de la Sección (mm)	h1 (mm)	h2 (mm)	d1 (mm)	d2 (mm)	d3 (mm)	d4 (mm)	e (mm)
S1	0	251,3	249,2	36,6	34,4	34,1	36,8	0,0
S2	1000	252,1	247,9	36,4	34,6	34,6	36,5	2,3
S3	2000	252,8	247,6	36,0	35,1	34,9	36,2	2,2
S4	3000	253,2	246,8	36,3	34,2	35,1	35,9	0,8

**Tabla 12.**  
**Verificación de la geometría viga 2.**

VIGA 2								
Longitud: 2997 mm								
Sección	Distancia de la Sección (mm)	h1 (mm)	h2 (mm)	d1 (mm)	d2 (mm)	d3 (mm)	d4 (mm)	e (mm)
S1	0	250,6	250,3	35,8	35,0	36,1	35,2	0,0
S2	1000	251,0	250,5	35,4	35,4	35,2	35,3	-1,0
S3	2000	250,6	249,0	35,3	35,6	35,5	35,3	-1,4
S4	3000	250,8	250,3	35,1	35,9	35,1	35,8	-0,2

**Tabla 13.**  
**Verificación de la geometría viga 3.**

VIGA 3								
Longitud: 2997 mm								
Sección	Distancia de la Sección (mm)	h1 (mm)	h2 (mm)	d1 (mm)	d2 (mm)	d3 (mm)	d4 (mm)	e (mm)
S1	0	248,8	251,2	36,4	34,7	33,7	37,0	0,0
S2	1000	250,0	250,4	36,0	34,9	34,0	36,8	1,9
S3	2000	249,8	251,0	35,8	35,0	34,4	36,4	2,3
S4	3000	250,2	250,6	35,8	35,0	34,9	36,3	0,5

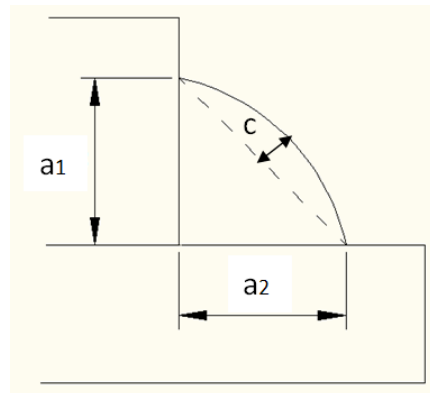
Todas las medidas se encuentran dentro de las restricciones de la norma citada anteriormente, por lo cual la geometría de cada viga es aceptada para realizar el ensayo a flexión.

#### 4.3. Verificación de la geometría de los cordones de soldadura

Según la tabla 5.10 del código AWS D1.1. Los cordones de filete en una junta T a tope deben tener una convexidad (c) máxima de 2 mm y el tamaño



del pie de la soldadura ( $a$ ) no puede ser menor al tamaño nominal que en el diseño se definió en 5 mm.



**Figura56. Esquema de la geometría del cordón de soldadura.**

Para la verificación se tomó una muestra de 8 cordones por cada viga, ubicados en el centro debido a que esta es la zona que presenta mayores esfuerzos en la soldadura.

Los instrumentos utilizados para la medición fueron:

- Galga de inspección de soldadura bridge cam para la convexidad y los pies del cordón, con una resolución de 1mm.
- Para la longitud del cordón un calibrador de 250 mm con resolución de 0.02 mm.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en cada viga:

**Tabla 14.**

***Verificación de la geometría de la soldadura en la viga 1.***

VIGA 1				
Cordón	a1 (mm)	a2 (mm)	c (mm)	Ls (mm)
1	6	6	0	55,5
2	6	6	1	55,4
3	7	5	0	55,4
4	5	5	2	55,0
5	7	6	0	56,2
6	7	6	1	55,8
7	6	6	2	56,0
8	6	5	0	56,2

**Tabla 15.**  
**Verificación de la geometría de la soldadura en la viga 2.**

VIGA 2				
Cordón	a1 (mm)	a2 (mm)	c (mm)	Ls (mm)
1	5	7	1	121,0
2	6	7	1	121,4
3	7	5	0	121,7
4	6	7	1	122,0
5	6	7	1	122,2
6	7	7	1	121,9
7	5	6	2	121,6
8	7	5	0	121,7

**Tabla 16.**  
**Verificación de la geometría de la soldadura en la viga 3.**

VIGA 3				
Cordón	a1 (mm)	a2 (mm)	c (mm)	Ls (mm)
1	7	5	2	210,1
2	5	6	0	210,4
3	7	7	2	210,4
4	6	5	0	210,5
5	7	7	1	211,2
6	5	6	2	211,3
7	6	7	1	210,9
8	6	6	2	210,9

Todos los cordones cumplen con los requerimientos establecidos en la norma, por lo cual la geometría del cordón es aceptable para realizar el ensayo.

#### **4.4. Instrumentación de la viga**

Se utilizó galgas extensométricas de tipo lineal y con una resistencia de 120 Ohmios para que sea compatible con el lector disponible en el laboratorio. (Ver ficha técnica en Anexo 6)

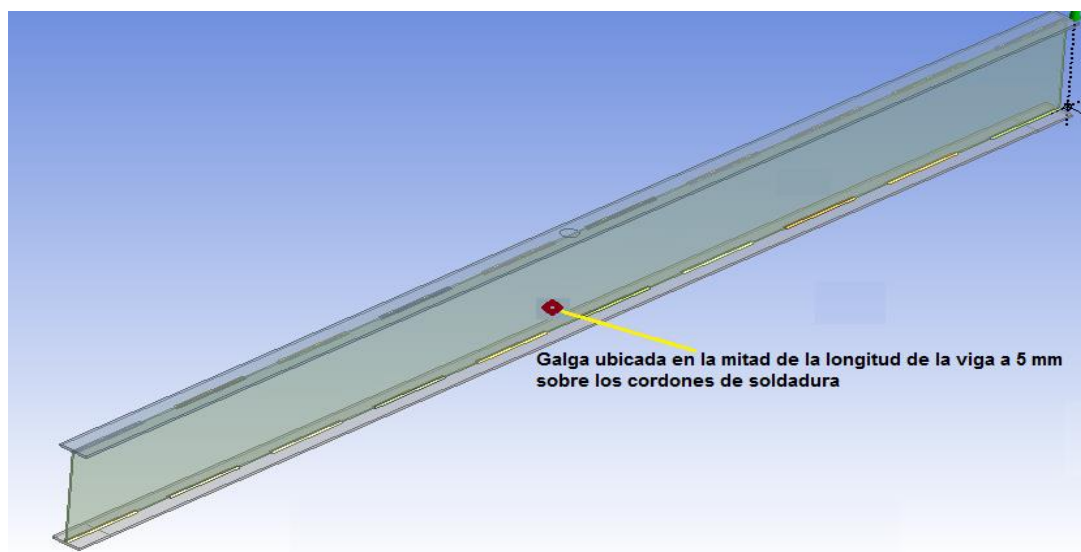
##### **4.4.1. Colocación de las galgas extensométricas**

Para colocar los sensores en las vigas se utilizó el siguiente procedimiento:

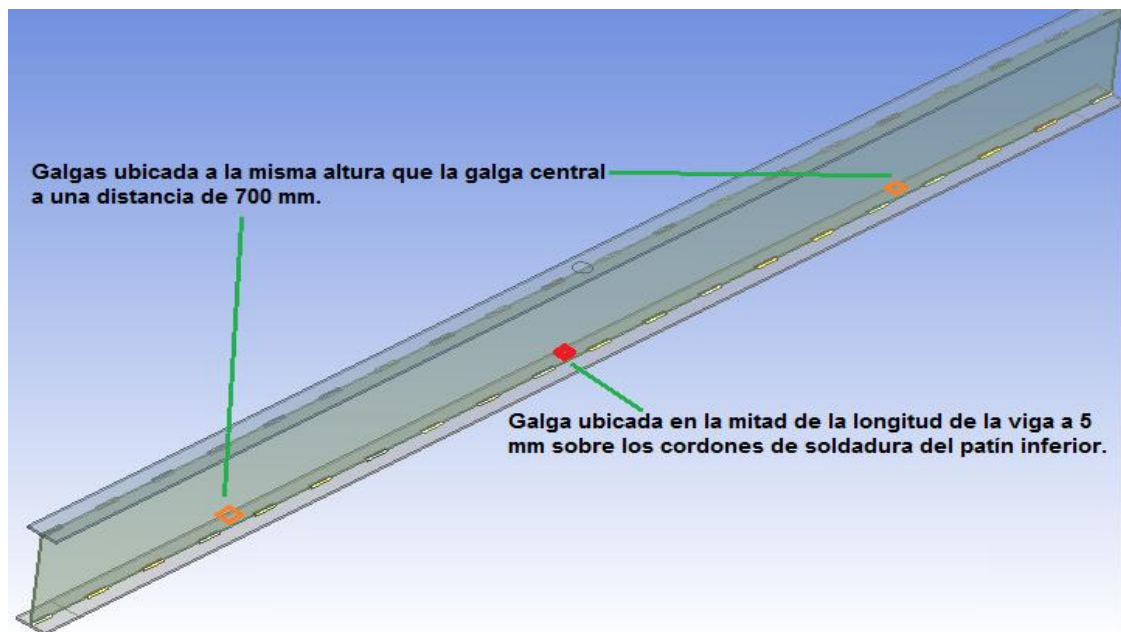
- a) Se marcó las zonas donde se colocaron las galgas
- b) Limpieza de las zonas para eliminar cualquier tipo de residuo que impida la adecuada adhesión del sensor al material.

- c) Se soldaron los terminales a las galgas extensiométricas, los cuales facilitan la conexión de las galgas con el cable que transmitió los datos al lector de deformaciones.
- d) Se pegaron los sensores en los puntos marcados con anterioridad utilizando pegamento industrial.
- e) Se soldaron los cables de transmisión de datos a los terminales de sensores procurando que estén fijos.
- f) Por último, se recubrió el sensor con pegamento epóxico para la protección y fijación de cada galga extensométrica.

A continuación, se muestran los esquemas de las vigas con su instrumentación:



**Figura57. Esquema instrumentación viga 2 y 3.**



**Figura58. Esquema instrumentación viga 1.**

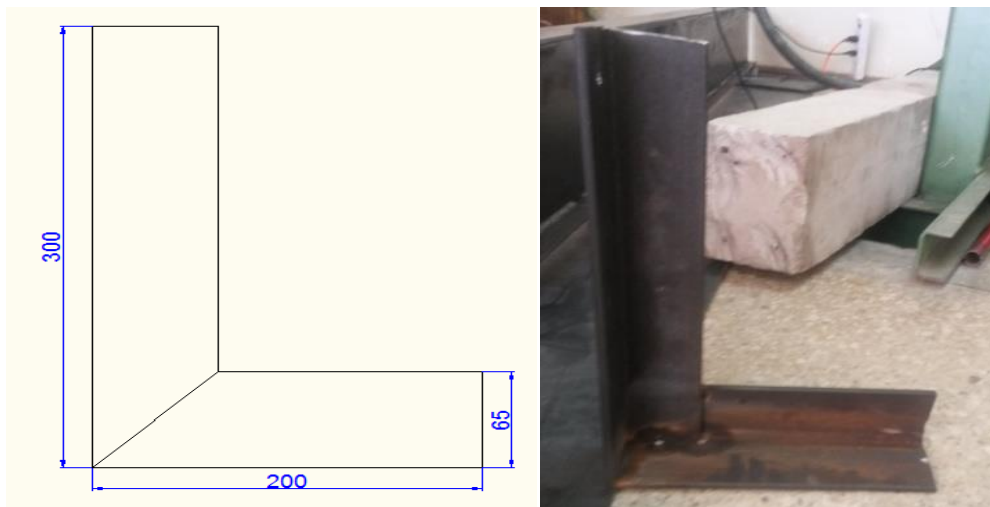
## **4.5. Preparación para el ensayo a flexión**

### **4.5.1. Soportes laterales**

Debido a que las vigas no tienen arriostramiento se construyó una estructura externa que sirvió como apoyo lateral al realizar el ensayo de flexión.

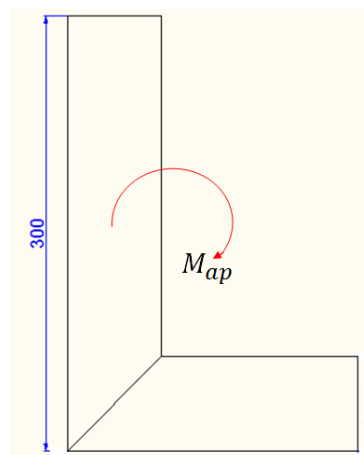
La estructura se formó de dos partes:

- a) Una base hecha de una plancha de acero de 3000 x 460 x 4 milímetros que estuvo anclada a la base de la prensa mediante puntos de soldadura.
- b) Escuadras a 90 grados construidas a partir de ángulos de 65 x 6 milímetros con las medidas mostradas en la Figura 59.



**Figura59. Medidas de los apoyos laterales.**

Cada apoyo debe soportar un momento de 2478,79  $N - m$  calculado en el inciso 3.1.12.2 del presente trabajo. Por lo cual se estimará la deflexión máxima que producirá este requerimiento para determinar si los apoyos poseen rigidez suficiente.



**Figura60. Diagrama de cuerpo libre del apoyo lateral**

$$\delta_a = \frac{M_{ap} L_a^2}{2EI_x}$$

Donde:

$\delta_a$ : Deflexión máxima del apoyo

$M_{ap}$ : Momento en el apoyo (2478,79  $N - m$ )

$L_a$ : Longitud del apoyo (300 mm)

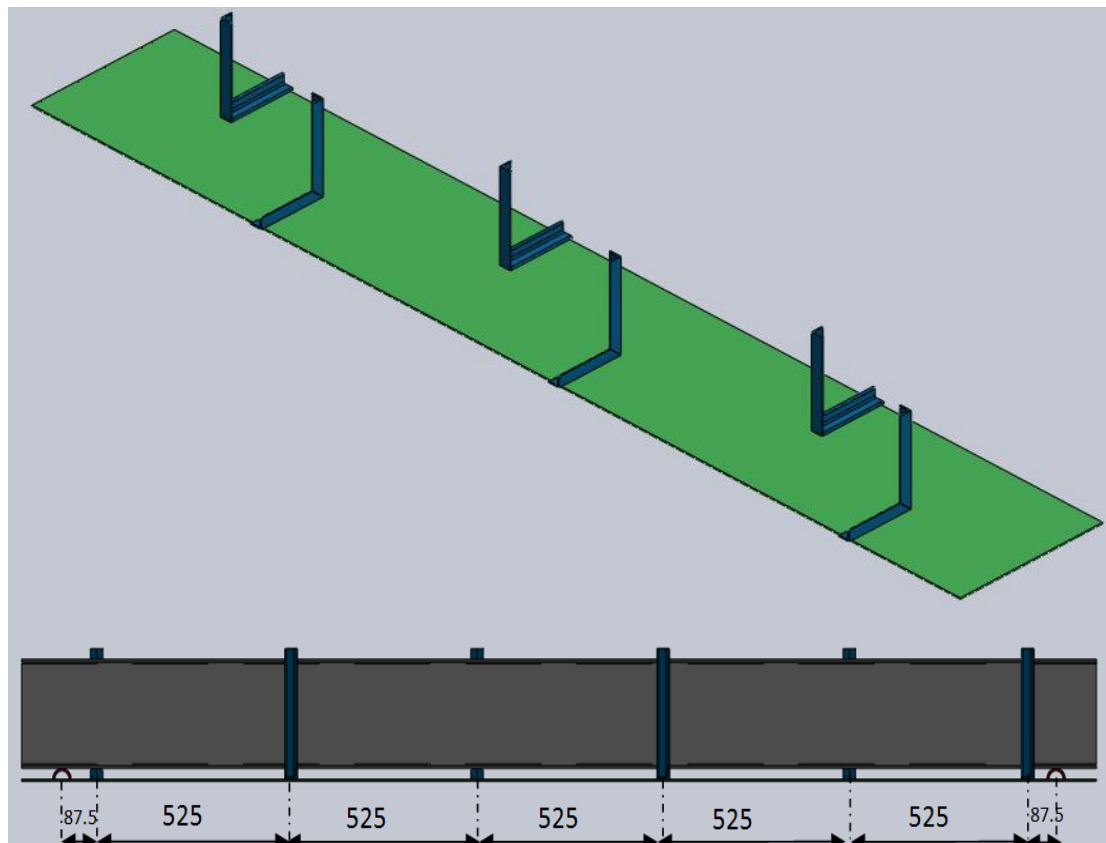
$I_x$ : Inercia respecto al eje mayor (299862,02 mm<sup>4</sup>)

$$\delta_a = \frac{2478,79 \text{ N} - \text{m} * (300 \text{ mm})^2}{2 * 210000 \text{ MPa} * 299862,02 \text{ mm}^4}$$

$$\delta_a = 0,00177 \text{ m} \approx 1,77 \text{ mm}$$

Debido a la mínima deformación que sufre el apoyo, se considera que su rigidez es suficiente para soportar las cargas solicitadas.

Los apoyos fueron soldados a la plancha base de manera alternada con una separación entre sí de 525 milímetros como se muestra en la Figura 61.



**Figura 61. Estructura de soporte lateral.**

El primer apoyo lateral se colocará a 187,5 milímetros del extremo de la plancha base.

#### 4.5.2. Condiciones de apoyo

La viga se asentó sobre dos medios rodillos que sirvieron de apoyos y se ubicaron a 100 milímetros de cada extremo.



**Figura 62. Apoyos de la viga**

#### **4.5.3. Condiciones de carga**

La carga fue aplicada en la mitad de la longitud de la viga, entre el pistón de la prensa y la viga, se colocó una barra prismática y un disco de acero para medir la deformación y garantizar una distribución uniforme de la carga, así evitar fallos locales en el patín.

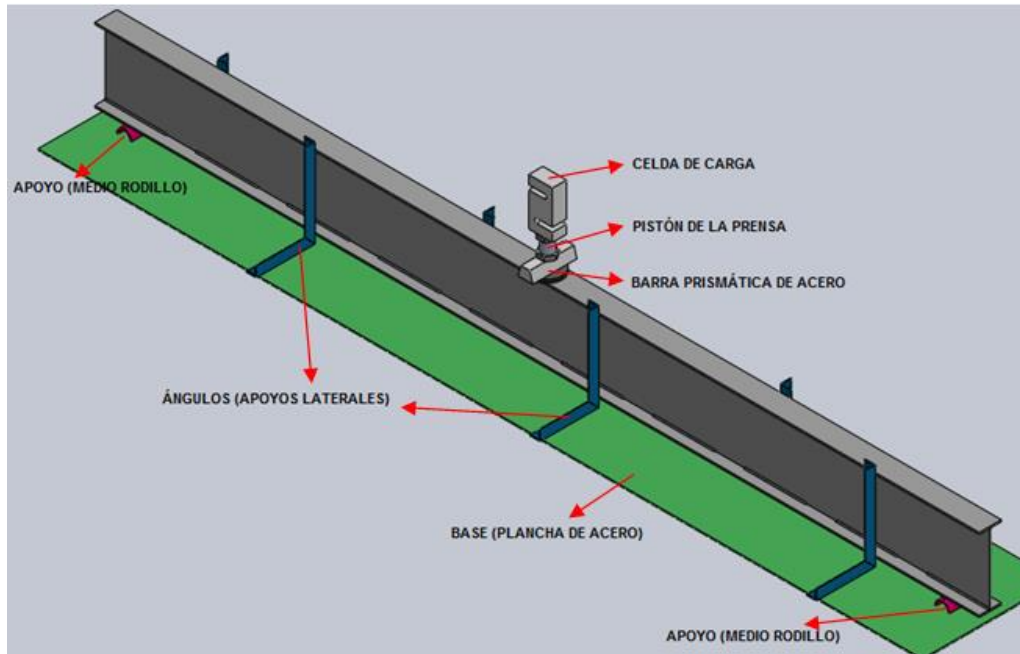


**Figura 63. Aplicación de la carga en la viga**

#### **4.6. Ensayo a flexión de viga**

Las tres vigas se ensayaron bajo las mismas condiciones, durante el ensayo se midió la deformación unitaria y la deformación máxima de la viga como se definió en el diseño del experimento.

Se aplicó una precarga de 150 kilogramos y se tomó datos cada 500 kilogramos. En la Figura 64 se muestra la esquematización del ensayo realizado.



**Figura 64. Esquema del ensayo a flexión.**

En la Figura 65 se muestra una imagen tomada antes del ensayo a flexión real.



**Figura65. Ensayo a flexión real.**



En la siguiente tabla se muestran los datos obtenidos del ensayo a flexión en cada viga.

**Tabla 17.**  
**Deflexión y deformaciones unitarias.**

Carga [Kg]	Viga 3		Viga 2		Viga 1			
	$\delta$ [mm]	$\varepsilon$ [ $\times 10^{-6}$ ]	$\delta$ [mm]	$\varepsilon$ [ $\times 10^{-6}$ ]	$\delta$ [mm]	$\varepsilon_1$ [ $\times 10^{-6}$ ]	$\varepsilon_2$ [ $\times 10^{-6}$ ]	$\varepsilon_3$ [ $\times 10^{-6}$ ]
<b>500</b>	0,16	64	0,68	66	0,53	76	30	29
<b>1000</b>	0,84	178	1,30	177	1,48	169	63	63
<b>1500</b>	1,56	279	2,04	270	2,32	274	113	110
<b>2000</b>	2,28	386	2,82	363	3,13	391	173	168
<b>2500</b>	3,03	488	3,48	451	3,74	478	205	203
<b>3000</b>	3,73	598	4,12	538	4,55	593	262	257
<b>3500</b>	4,40	698	4,72	626	5,18	689	307	304
<b>4000</b>	5,08	803	5,56	713	5,68	795	353	348
<b>4500</b>	5,72	911	6,38	806	6,25	892	400	398
<b>5000</b>	6,39	1017	6,98	921	6,82	987	435	429
<b>5500</b>	7,04	1098	7,42	1027	7,52	1102	480	483
<b>6000</b>	7,81	1195	8,29	1193	8,39	1223	533	530

Se midió los desplazamientos laterales en el alma con respecto a cada apoyo, para estimar los efectos del pandeo lateral torsional que sufrió la viga. Se tomó los datos cuando la viga estuvo pre-cargada y con carga máxima.

Los desplazamientos se midieron en 3 diferentes alturas del alma con respecto a cada apoyo lateral, la Figura 66 muestra un esquema de la nomenclatura utilizada para tabular estos datos.

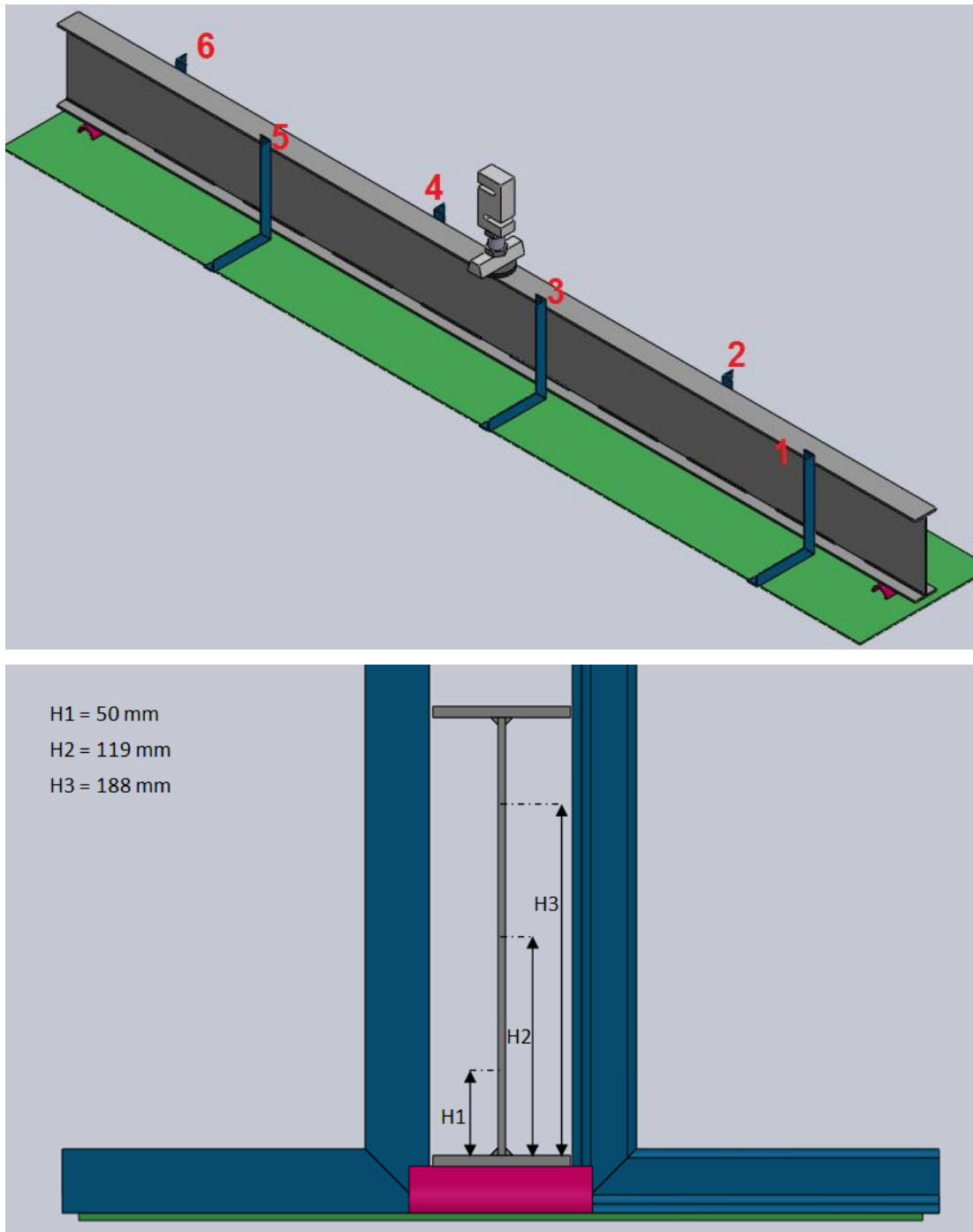


Figura 66. Numeración de apoyos y puntos de medición.

En las siguientes tablas se muestran los datos obtenidos:

**Tabla 18.**  
**Desplazamientos laterales viga 1.**

VIGA 1						
N° de apoyo	SIN CARGA			CON CARGA		
	H1	H2	H3	H1	H2	H3
1	102,22	100,60	98,62	103,42	101,92	99,72
2	98,94	100,20	101,28	99,59	100,92	102,14
3	98,64	98,58	99,12	100,46	99,81	100,70
4	101,44	103,74	106,38	100,48	102,52	104,64
5	99,92	99,24	99,12	101,84	100,76	100,38
6	99,42	103,00	106,48	98,44	101,61	105,24

**Tabla 19.**  
**Desplazamientos laterales viga 2.**

VIGA 2						
N° de apoyo	SIN CARGA			CON CARGA		
	H1	H2	H3	H1	H2	H3
1	100,30	99,98	99,20	103,62	101,92	99,12
2	98,56	99,44	100,60	98,88	100,10	102,64
3	99,90	101,00	102,70	102,12	102,60	100,76
4	100,50	101,10	101,90	100,40	101,76	104,90
5	98,76	101,30	103,60	98,61	99,78	101,90
6	99,80	100,70	102,12	103,28	103,24	102,88

**Tabla 20.**  
**Desplazamientos laterales viga 3.**

VIGA 3						
N° de apoyo	SIN CARGA			CON CARGA		
	H1	H2	H3	H1	H2	H3
1	100,78	100,88	100,88	105,42	103,64	101,20
2	98,82	100,64	98,38	98,20	99,24	100,12
3	101,72	102,06	102,90	106,02	106,54	104,22
4	100,78	100,08	102,10	92,72	100,34	102,42
5	100,58	100,08	100,32	94,36	99,64	99,42
6	100,34	102,36	104,02	104,1	104,08	104,82

## CAPÍTULO V

### 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Realizado el ensayo de flexión en cada viga, se obtuvieron los datos de deformación unitaria ( $\epsilon$ ), deformación ( $\delta$ ) y desplazamiento lateral como se muestra en la Tabla 17, Tabla 18, Tabla 19 y Tabla 20 del capítulo IV.

#### 5.1. Resultados de los modelos computacional, experimental y teórico.

##### 5.1.1. Modelo teórico

El esfuerzo normal, esfuerzo cortante y la deformación teórica se calcularon en el capítulo III y son los mismos para las tres vigas:

$$\sigma_n = 248,11 \text{ MPa}$$

$$\tau = 22,55 \text{ MPa}$$

$$\delta = 7,28 \text{ mm}$$

##### 5.1.2. Modelo computacional

En la siguiente tabla se muestran los valores de esfuerzos y deformación máximos obtenidos de la simulación de cada viga.

**Tabla 21.**  
**Resultados obtenidos de la simulación.**

Nº DE VIGA	$\sigma_n$ (MPa)	$\tau$ (Mpa)	$\delta$ (mm)
1	265,27	24,35	8,18
2	263,81	24,02	8,14
3	263,64	24,78	8,11

##### 5.1.3. Modelo experimental

A continuación, se presenta el ejemplo de cálculo en la viga 3 para la obtención de los esfuerzos normal y cortante.

### Cálculo esfuerzo normal

Con los datos obtenidos en la Tabla 17, se calcularon los esfuerzos normales máximos.

**Tabla 22.**  
**Datos para ejemplo cálculo esfuerzo normal.**

VIGA 3			
Carga (Kg)	$\delta$ (mm)	$\varepsilon$ [ $\times 10^{-6}$ ]	E (MPa)
6000	7,81	1195	210000

$$\sigma_n = E * \varepsilon$$

De donde:

$\sigma_n$ :Esfuerzo normal

E:Módulo de elasticidad del acero

$\varepsilon$ :Deformación unitaria

$$\sigma_n = 210000 \text{ MPa} * 1195 \times 10^{-6}$$

$$\sigma_n = 250,95 \text{ MPa}$$

### Cálculo esfuerzo cortante

Los datos presentados en la Tabla 23 fueron calculados en el capítulo III

**Tabla 23.**  
**Datos para ejemplo cálculo esfuerzo cortante.**

VIGA 3						
Q (mm <sup>3</sup> )	Zx (mm <sup>3</sup> )	Ix (mm <sup>4</sup> )	b (mm)	Lr (mm)	$\varepsilon$ [ $\times 10^{-6}$ ]	E (MPa)
54900	166444	17892057	4	2800	1195	210000

$$\tau = \frac{2 * Q * Z_x * E * \varepsilon}{I_x * b * L_r}$$

De donde:

$\tau$ : Esfuerzo cortante

$Q$ : Momento estático de primer orden

$I_x$ : Inercia respecto al eje mayor

$b$ : Ancho de la sección

$Z_x$ : Módulo plástico de la sección

$L_r$ : Longitud entre apoyos.

$$\tau = \frac{2 * 54900 \text{ mm}^3 * 166444 \text{ mm}^3 * 210000 \text{ MPa} * 1195 * 10^{-6}}{17892057 \text{ mm}^4 * 4 \text{ mm} * 2800 \text{ mm}}$$

$$\tau = 22,89 \text{ MPa}$$

En la siguiente tabla se muestran los resultados de los esfuerzos normales y cortantes de cada viga.

**Tabla 24.**

***Esfuerzos y deformaciones obtenidos experimentalmente.***

Nº DE VIGA	Carga (Kg)	$\delta$ (mm)	$\epsilon$	E (MPa)	$\sigma_n$ (MPa)	$\tau$ (Mpa)
1	6000	8,39	1223	210000	256,83	23,42
2		8,29	1193		250,53	22,85
3		7,81	1195		250,95	22,89

## 5.2. Comparación de los resultados de los modelos computacional, experimental y teórico.

Para realizar la comparación, se tomó como valor referencial los resultados del modelo experimental, es decir, del ensayo a flexión de cada viga; obteniendo como resultado la variación entre los modelos: experimental vs computacional y experimental vs teórico.

**Tabla 25.**  
**Comparación resultados experimental vs computacional.**

N° DE VIGA	EXPERIMENTAL			COMPUTACIONAL			VARIACIÓN		
	$\delta$ (mm)	$\sigma_n$ (MPa)	$\tau$ (Mpa)	$\delta$ (mm)	$\sigma_n$ (MPa)	$\tau$ (MPa)	$\delta$ (%)	$\sigma_n$ (%)	$\tau$ (%)
1	8,39	256,83	23,42	8,18	265,27	24,35	2,50	3,18	5,81
2	8,29	250,53	22,85	8,14	263,81	24,02	1,81	5,03	5,12
3	7,81	250,95	22,89	8,11	263,64	24,78	3,84	4,81	6,38

**Tabla 26.**  
**Comparación resultados experimental vs teórico.**

N° DE VIGA	EXPERIMENTAL			TEÓRICO			VARIACIÓN		
	$\delta$ (mm)	$\sigma_n$ (MPa)	$\tau$ (Mpa)	$\delta$ (mm)	$\sigma_n$ (MPa)	$\tau$ (MPa)	$\delta$ (%)	$\sigma_n$ (%)	$\tau$ (%)
1	8,39	256,83	23,42	7,28	248,11	22,55	15,25	3,51	3,86
2	8,29	250,53	22,85	7,28	248,11	22,55	13,87	0,98	1,33
3	7,81	250,95	22,89	7,28	248,11	22,55	7,28	1,14	1,51

Analizando las tablas 25 y 26 se observa que:

- Para esfuerzos normales y cortantes las variaciones están por debajo del 10%, lo que se considera un rango aceptable.
- La deformación teórica respecto a la experimental alcanza hasta una variación del 15.25% en la viga 1, sobrepasando el rango aceptable, pero si se comparan los valores presentados en la Tabla 26 se observa que se tiene una diferencia de alrededor de 1 mm entre la deformación teórica y experimental, por lo cual, para fines prácticos se podría considerar aceptable dicha variación y esta se podría deber a que teóricamente se considera una unión continua que transmite los esfuerzos de forma ideal, mientras que en el experimento la viga tiene una unión intermitente en la cual los esfuerzos solo se transmiten por las partes soldadas, provocando que la distribución de esfuerzos no sea uniforme, cargando en mayor proporción ciertos puntos y produciendo más deformación en los mismos.

**Tabla 27.**  
**Comparación resultados teórico vs computacional.**

N° DE VIGA	COMPUTACIONAL			TEÓRICO			VARIACIÓN		
	$\delta$ (mm)	$\sigma_n$ (MPa)	$\tau$ (Mpa)	$\delta$ (mm)	$\sigma_n$ (MPa)	$\tau$ (MPa)	$\delta$ (%)	$\sigma_n$ (%)	$\tau$ (%)
1	8,18	265,27	24,35	7,28	248,11	22,55	12,36	6,47	9,89
2	8,14	263,81	24,02	7,28	248,11	22,55	11,68	5,95	6,52
3	8,11	263,64	24,78	7,28	248,11	22,55	11,40	5,89	7,98

En la Tabla 27 se observa que se repite el patrón de la Tabla 26 en la variación de los esfuerzos y deformación estando estos por debajo y sobre el 10% respectivamente, considerando que en el modelo computacional la viga tiene una unión intermitente entre sus elementos, se puede validar el argumento mencionado en el análisis de las deformaciones de la Tabla 26.

Debido a que los valores de deformación obtenidos en los casos experimentales tienen variaciones de hasta un 15 % con respecto a los valores teóricos, no se puede afirmar que el modelo teórico prediga el comportamiento de la deformación en la viga, por lo cual para disminuir esta variación se sugiere utilizar un factor de corrección ( $f_c$ ) en modelo teórico.

Este factor será el promedio de las razones entre los valores experimentales y teóricos de las tres vigas a las cuales se les practicó el ensayo de flexión:

$$f_c = \frac{\delta_{experimental}}{\delta_{teorica}}$$

En la siguiente tabla se presenta los factores de corrección individuales de cada caso de estudio y su promedio:



**Tabla 28.**  
**Factor de corrección para la deformación**

Nº DE VIGA	$\delta$ experimental (mm)	$\delta$ teórico (mm)	Factor de corrección
1	8,39	7,28	1,15
2	8,29	7,28	1,14
3	7,81	7,28	1,07
<b>Factor de corrección promedio</b>			1,12

El factor de corrección promedio se utilizará como un valor general para cualquier caso que tenga soldadura intermitente en la unión alma patín de una viga como se indica a continuación:

$$\delta_{exp. corregido} = f_c * \delta_{experimental}$$

$$\delta_{exp. corregido} = f_c * \frac{P * L_r^3}{48 * E * I_x}$$

Aplicando esta ecuación se puede observar las nuevas variaciones del modelo experimental vs modelo teórico corregido en la Tabla 29.

**Tabla 29.**  
**Comparación deformación experimental vs teórica corregida.**

Nº DE VIGA	$\delta$ experimental (mm)	$\delta$ teórico corregido(mm)	Variación (%)
1	8,39	8,15	2,30
2	8,29	8,15	1,72
3	7,81	8,15	4,35

Utilizando el factor de corrección las variaciones son menores al 10%, aunque cabe aclarar que los tres datos con los que se obtuvo el valor del factor podrían ser insuficientes para considerar el factor de corrección aplicable a cualquier caso de estudio.

### 5.3. Validación del modelo computacional

En la Tabla 25 se puede observar que las variaciones entre el modelo computacional y experimental están por debajo del 10%, por lo que, el modelo

computacional es apto para ser utilizado en otros casos de estudio, a partir de este modelo se puede predecir los resultados de someter una viga a flexión.

#### 5.4. Comparación de esfuerzo normal, esfuerzo cortante y deformación entre casos experimentales

Los datos de esfuerzo normal, esfuerzo cortante y deformación máxima, mostrados en la Tabla 30, fueron obtenidos del ensayo a flexión. En la comparación se toma como base los datos de la viga 3 que presenta mayor porcentaje de soldadura.

**Tabla 30.**  
***Esfuerzos y deformación máxima modelo experimental.***

N° de viga	% de soldadura	$\sigma_n$ (Mpa)	$\tau$ (MPa)	$\delta$ (mm)
1	37	256,83	23,42	8,39
2	57	250,53	22,85	8,29
3	70	250,95	22,89	7,81

**Tabla 31.**  
***Comparación entre casos experimentales.***

Comparación	Variación de $\sigma_n$ (%)	Variación de $\delta$ (%)	Variación de $\tau$ (%)
VIGA 1- VIGA 3	2,29	6,91	2,34
VIGA 2-VIGA 3	0,17	5,79	0,17

Al comparar los esfuerzos y deformaciones máximas entre las vigas experimentadas se observa que los parámetros presentan las siguientes tendencias:

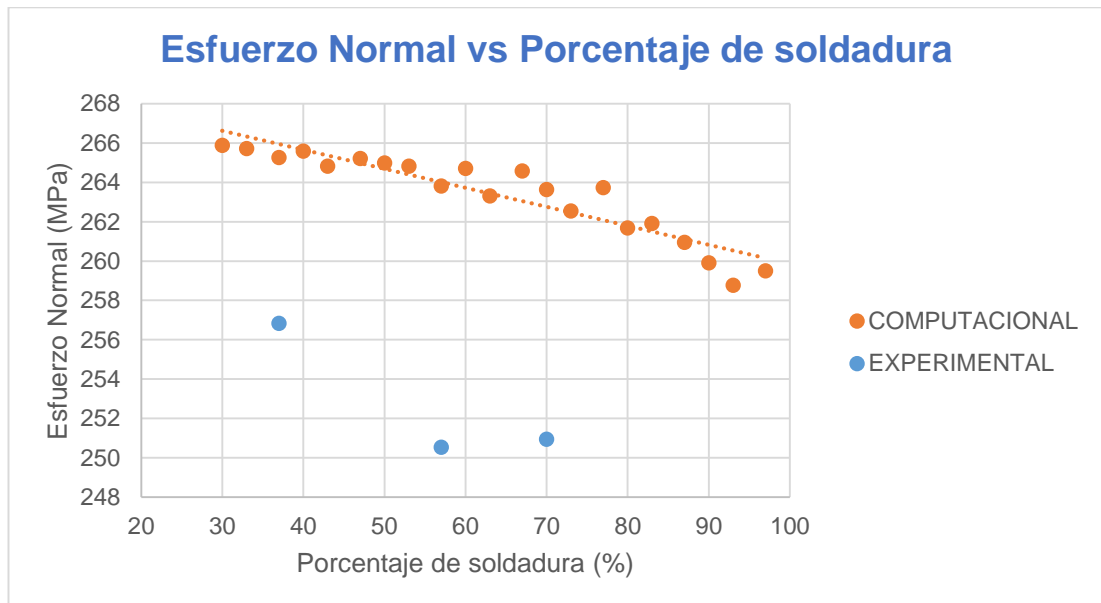
- A mayor porcentaje de soldadura menor es la deformación.
- A menor porcentaje de soldadura mayor es el esfuerzo cortante.
- A menor porcentaje de soldadura mayor es el esfuerzo normal.

#### 5.5. Relación entre intermitencia de soldadura y esfuerzos en la viga

Conociendo que el modelo computacional es válido, se utilizó los resultados obtenidos de las 21 simulaciones para visualizar de mejor manera

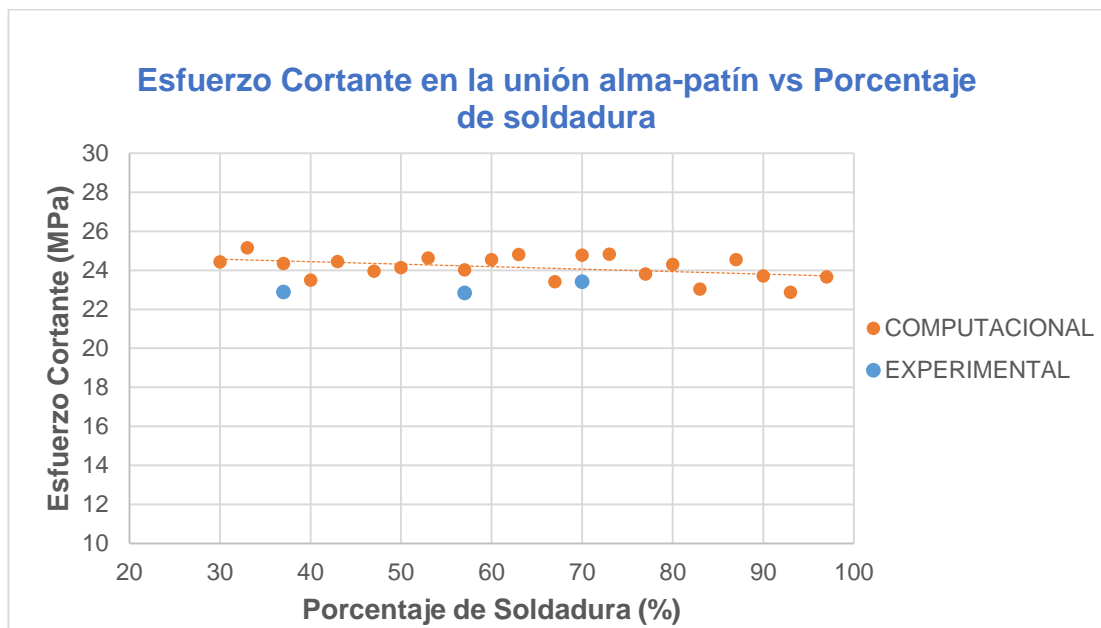
la tendencia presentada en el modelo experimental y así poder deducir las relaciones entre esfuerzos e intermitencia de soldadura.

Las gráficas mostradas en la Figura 67 y Figura 68, se elaboraron a partir de los resultados de las simulaciones y los datos experimentales, los cuales se encuentran en la Tabla 8 y Tabla 24 respectivamente.



**Figura 67. Esfuerzo Normal vs Porcentaje de soldadura.**

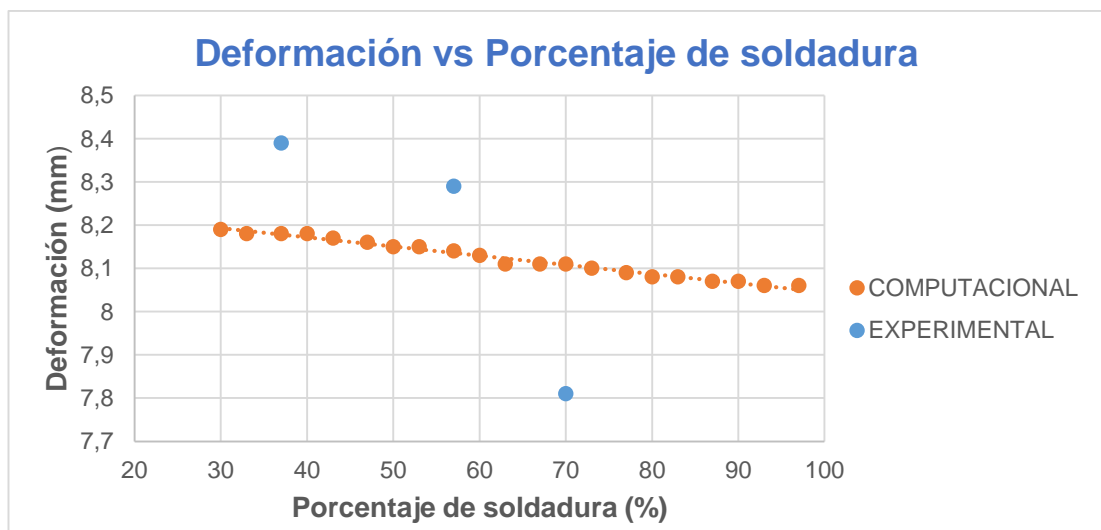
Teóricamente los esfuerzos normales en las vigas deberían ser iguales, pero como se aprecia en la Figura 67 se corrobora la tendencia encontrada en los datos experimentales que a mayor porcentaje de soldadura el esfuerzo normal disminuye.



**Figura 68. Esfuerzo Cortante en la unión vs % de soldadura.**

El esfuerzo cortante en la unión de los elementos de la viga también presenta la misma tendencia del modelo experimental, de esta manera se puede afirmar que el esfuerzo cortante disminuye mientras que el porcentaje de soldadura aumente.

#### 5.6. Relación entre intermitencia de soldadura y deformación máxima



**Figura 69. Deformación máxima vs Porcentaje de soldadura.**

En la Figura 69 se observa que mientras menor es el porcentaje de soldadura la deformación aumenta, siendo este el parámetro que indica una tendencia y una variación más notoria.

### 5.7. Relación entre intermitencia de soldadura y esfuerzo cortante en el cordón de soldadura

Como se mencionó en el capítulo III el esfuerzo cortante en la unión alma patín de la viga genera una fuerza que debe ser soportada por los cordones de soldadura y se calcula mediante:

$$V_s = \frac{\tau * t_w * L}{2}$$

Donde:

$V_s$  : Fuerza cortante en la soldadura

$\tau$ : Esfuerzo cortante en la viga

$t_w$ : Espesor del alma (4 mm)

$L$ : Longitud de la viga (3000 mm)

Esta fuerza cortante si se la divide para el área efectiva del cordón se obtiene el esfuerzo de la soldadura como se indica a continuación:

$$\tau_s = \frac{V_s}{0.707 * a * l_s}$$

Dónde:

$\tau_s$ : Esfuerzo cortante en la soldadura

$l_{e.s}$ : Longitud de soldadura

$a$  : Pie del cordón (5 mm)

**Utilizando estas dos fórmulas justificadas en el capítulo III, se presenta en las Tabla 32 y**

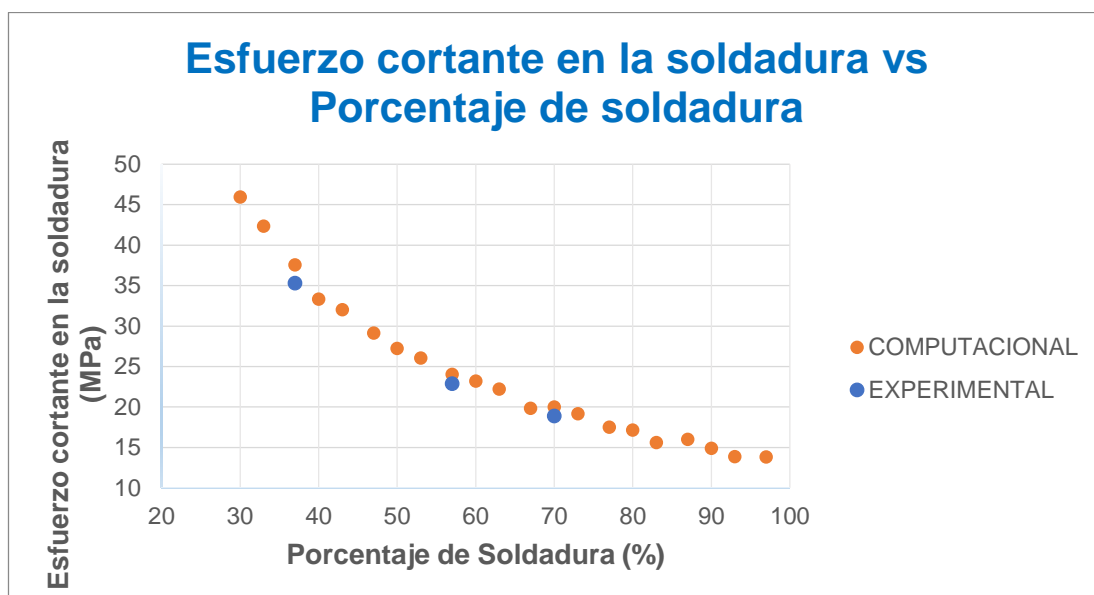
Tabla 33 los esfuerzos en los cordones de soldadura para los casos computacionales y experimentales respectivamente.

**Tabla 32.**  
***Esfuerzo cortante en la soldadura casos computacionales***

Porcentaje de soldadura [%]	Esfuerzo Cortante en la Unión Alma-Patín [MPa]	Fuerza Cortante en la Soldadura [N]	Longitud Total de Soldadura (Lc) [mm]	Esfuerzo Cortante en la soldadura ( $\tau_s$ ) [MPa]
97	23,66	141960	2900	13,85
93	22,88	137280	2799	13,87
90	23,71	142260	2700	14,90
87	24,55	147300	2600	16,03
83	23,04	138240	2502	15,63
80	24,31	145860	2401	17,19
77	23,81	142860	2304	17,54
73	24,83	148980	2196	19,19
70	24,78	148680	2100	20,03
67	23,42	140520	2002	19,86
63	24,82	148920	1896	22,22
60	24,56	147360	1794	23,24
57	24,02	144120	1694	24,07
53	24,63	147780	1605	26,05
50	24,14	144840	1504	27,24
47	23,96	143760	1394	29,17
43	24,45	146700	1296	32,02
40	23,51	141060	1197	33,34
37	24,35	146100	1100	37,57
33	25,16	150960	1008	42,37
30	24,43	146580	902	45,97

**Tabla 33.**  
***Esfuerzo cortante en la soldadura casos experimentales***

Porcentaje de soldadura [%]	Esfuerzo Cortante en la Unión Alma-Patín [MPa]	Fuerza Cortante en la Soldadura ( $V_s$ ) [N]	Longitud Total de Soldadura (Lc) [mm]	Esfuerzo Cortante en la Soldadura ( $\tau_s$ ) [MPa]
70	23,42	140520	2100	18,92
57	22,85	137100	1694	22,89
37	22,89	137340	1100	35,31



**Figura 70. Esfuerzo cortante en la soldadura vs porcentaje de soldadura.**

En la Figura 70, se puede observar que el esfuerzo en los cordones de soldadura disminuye cuando la longitud de los cordones aumenta, y esto era de esperarse debido a que el área efectiva de la garganta depende de la longitud soldada.

**Tabla 34.**

***Comparación esfuerzo cortante experimental-computacional.***

N° DE VIGA	$\tau_s$ experimental (MPa)	$\tau_s$ computacional (MPa)	Variación (%)
1	35,31	37,57	6,02
2	22,89	24,07	4,90
3	18,92	20,03	5,54

En la Tabla 34 se observa que las variaciones entre los esfuerzos cortantes en la soldadura entre los modelos experimental y computacional no superan el 10%, por lo cual se tiene otro parámetro de demostración para validar el modelo computacional.

Conociendo que el electrodo utilizado en los cordones fue ER70S-6 con una resistencia a la fluencia de 400 MPa se puede determinar su resistencia al cortante siguiendo lo especificado en la norma ANSI/AISC 360-10:

$$\tau_{permisible} = 0,6 * S_y$$

$$\tau_{permisible} = 0,6 * 400 MPa$$

$$\tau_{permisible} = 240 MPa$$

Si se compara esta resistencia al cortante de 240 MPa con el esfuerzo cortante máximo en la soldadura de la Tabla 32 de 45,97 MPa, se puede concluir que los cordones tienen la capacidad suficiente para soportar las cargas requeridas, por lo tanto, en ningún caso de este estudio van a fallar.

### 5.8. Análisis de pandeo lateral

En la Tabla 18, Tabla 19 y Tabla 20 se muestran los datos del pandeo lateral que fueron medidos durante el ensayo de flexión, a continuación se presenta la variación en la posición tomada en cada punto de medición que se obtuvo restando la distancia con carga de la sin carga:

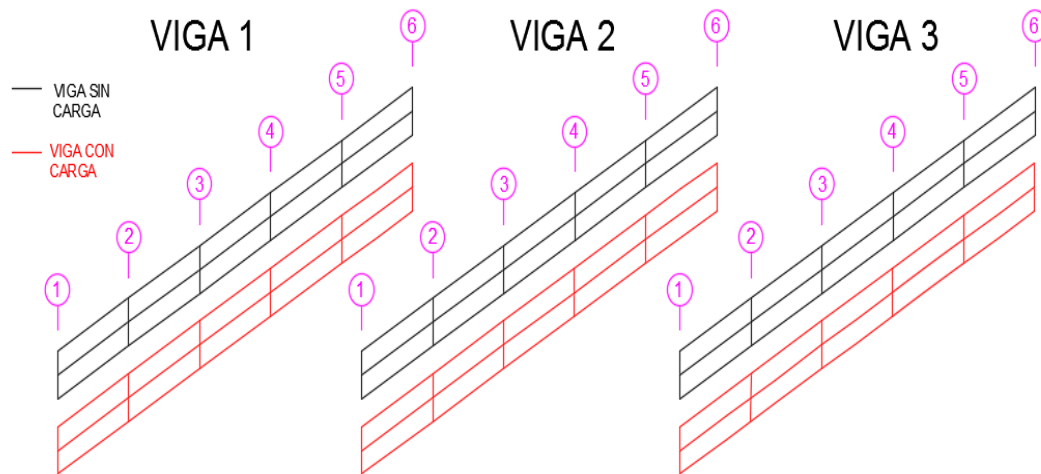
**Tabla 35.**  
**Variación del desplazamiento lateral**

N° de apoyo	Variación de la Distancia (mm)								
	Viga 1			Viga 2			Viga 3		
	H1	H2	H3	H1	H2	H3	H1	H2	H3
1	1,20	1,32	1,10	2,32	1,94	1,92	2,64	2,76	2,32
2	1,65	1,72	1,86	1,32	1,66	1,54	-1,62	-1,40	0,74
3	-1,18	-0,77	-1,42	2,22	1,60	-1,94	2,30	2,48	1,32
4	-0,96	-1,22	-1,74	-0,74	-0,54	-1,28	-3,06	-1,94	-1,68
5	2,92	2,52	2,26	-1,16	-1,52	-1,70	-3,22	-2,44	-2,90
6	-0,98	-1,39	-1,24	2,48	2,34	2,06	3,76	1,72	1,80

Estas variaciones representan el desplazamiento lateral de los puntos durante el ensayo, y como se puede apreciar en la Tabla 35 estos valores son relativamente pequeños para la longitud de 3 metros de la viga.

En la Figura 71 se realizó un esquema de los desplazamientos laterales en las vigas antes del ensayo (negro) y las vigas con la máxima carga (rojo), en la que se observa que los desplazamientos en los apoyos, que fueron los puntos de medición, son apenas perceptibles.





**Figura 71. Esquema del pandeo lateral de las vigas.**

El experimento no fue diseñado para medir el pandeo lateral, ya que la estructura de los soportes laterales fue diseñada únicamente para restringir este movimiento, por lo tanto, los datos obtenidos no son confiables ni presentan algún tipo de patrón que permita deducir una relación entre intermitencia y pandeo lateral.

Las vigas secundarias soportan losas o pisos, las cuales se asientan sobre el patín a compresión, esta losa funciona como un soporte continuo en toda la longitud de la viga que restringe el pandeo lateral torsional de la viga, por lo cual este análisis no resulta de mucha importancia para aplicaciones prácticas.

## CAPÍTULO VI

### 6. EVALUACIÓN ECONÓMICA

En este capítulo se realizó un análisis económico del proyecto y una comparación entre la fabricación de cada viga para poder estimar la variación de costo al fabricar una viga soldada al 100% con las soldadas al 70, 57 y 37% en la unión alma – patín.

#### 6.1. Comparación de costos entre vigas con cordón continuo e intermitente

En este análisis se tomó en cuenta únicamente los parámetros de variación en la fabricación:

- Mano de obra
- Consumibles para soldadura

**Tabla 36.**  
**Longitudes soldadas en cada viga.**

Número de Viga	Uniones soldadas	Cordones	Longitud cordones (cm)	Longitud total (cm)
<b>Viga 3</b>	4	10	21,00	8400
<b>Viga 2</b>	4	14	12,10	6776
<b>Viga 1</b>	4	20	5,50	4400

##### 6.1.1. Mano de obra

Para obtener el costo de mano de obra en cada viga, se calculó el tiempo de fabricación, en el que se incluye tiempos muertos y de producción medidos durante el proceso.

Los tiempos de producción son los empleados en los procesos de limpieza y soldadura, mientras que los tiempos muertos son los periodos de receso entre cada cordón y cambio de la posición de la viga.

Para obtener el tiempo de producción se escogió de cada viga 3 cordones aleatoriamente y se tomó el tiempo de soldadura, con los cuales se obtuvo un promedio para calcular el tiempo total empleado en realizar los cordones de soldadura, los resultados se muestran en las tablas 36 y 37.

**Tabla 37.**  
**Velocidades de avance en cada viga.**

Número de Viga	Longitud del cordón (cm)	Tiempo				Velocidad de avance (cm/min)
		t1 (s)	t2 (s)	t3 (s)	Tiempo promedio (s)	
<b>Viga 3</b>	21,00	30,30	29,60	29,20	29,70	42,42
<b>Viga 2</b>	12,10	17,10	17,90	18,25	17,75	40,90
<b>Viga 1</b>	5,50	8,45	9,10	8,20	8,59	38,42
<b>Promedio</b>						40,57

El tiempo de limpieza se estableció en 6 minutos para todas las vigas. Adicionalmente se estimó el tiempo de producción de una viga completamente soldada con la velocidad de avance promedio de las 3 vigas.

**Tabla 38.**  
**Tiempo de producción para cada viga.**

Número de Viga	Longitud soldada (cm)	Velocidad de avance (cm/min)	Tiempo en soldadura (min)	Tiempo de limpieza (min)	Tiempo de producción aprox. (min)
<b>Viga completamente soldada</b>	1200,0	40,57	29,58	6,0	37,00
<b>Viga 3</b>	840,0	42,42	19,80	6,0	26,00
<b>Viga 2</b>	677,6	40,90	16,57	6,0	23,00
<b>Viga 1</b>	440,0	38,42	11,45	6,0	18,00

Cada viga tuvo un tiempo muerto común de 5 minutos que se debe a los cambios de posición para facilitar el proceso de soldadura y un tiempo promedio entre cada cordón de 20 segundos. Para la viga completamente soldada se tomó 8 minutos como tiempo muerto ya que se añaden 3 minutos de descanso del soldador.

En la siguiente tabla se presentan los resultados del cálculo para cada viga.

**Tabla 39.**  
***Tiempo muerto de fabricación para cada viga.***

Número de Viga	Número de espacios	Tiempo por espacio (s)	Tiempo total de intermitencia (min)	Tiempo descanso (min)	Tiempo muerto (min)
<b>Viga completamente soldada</b>	0	20,0	0	8,0	8,00
<b>Viga 3</b>	36	20,0	12,00	5,0	17,00
<b>Viga 2</b>	52	20,0	18,00	5,0	23,00
<b>Viga 1</b>	76	20,0	26,00	5,0	31,00

El tiempo total de fabricación para cada viga se presenta en la siguiente tabla.

**Tabla 40.**  
***Tiempo total de fabricación para cada viga.***

Número de Viga	Tiempo de producción (min)	Tiempo muerto (min)	Tiempo de fabricación (min)
<b>Viga completamente soldada</b>	37,00	8,00	44,00
<b>Viga 3</b>	26,00	17,00	43,00
<b>Viga 2</b>	23,00	23,00	46,00
<b>Viga 1</b>	18,00	31,00	49,00

El costo de mano de obra del proyecto fue de 80 USD, que representa un tiempo de fabricación total de 138 min. para las 3 vigas. Se estimó el costo de cada viga ponderando los tiempos individuales de fabricación y multiplicándolos por el costo de mano de obra, como se muestra en la tabla 40.

**Tabla 41.**  
***Costos de mano de obra en cada viga.***

Número de Viga	Viga 1	Viga 2	Viga 3
Tiempo de Fabricación (min)	49	46	43
Ponderación tiempo (%)	35,5%	33,3%	31,2%
Costo por viga (USD)	<b>28,40</b>	<b>26,64</b>	<b>24,96</b>

Los costos de una viga soldada el 70%, 57% y 37% son respetivamente 24,96 USD, 26,64 USD y 28,40 USD.

En el caso de una viga completamente soldada se calculó un tiempo de fabricación de 44 min., siguiendo el mismo procedimiento se obtuvo un costo de mano de obra de 25,61 USD.

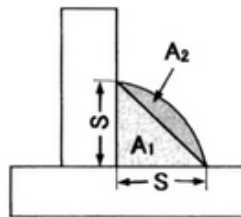
### 6.1.2. Consumibles para soldadura

Se utilizó como electrodo alambre ER70S-6 de 0.8 mm de diámetro y como gas de protección Ar+CO<sub>2</sub>.

A continuación, se estimó las cantidades utilizadas en cada viga:

#### 6.1.2.1. Electrodo

Para el cálculo de costo del alambre ER70S-6, se utilizó la Tabla 42y la gráfica que se muestra en la Figura 73, las cuales presentan una aproximación de consumo de alambre de soldadura en kg/m, para lo cual es necesario conocer el tamaño del cordón de soldadura y el tipo de junta.



**Figura72. Tipo de junta soldada.**

Fuente: (KOBÉ STEEL, 2015)

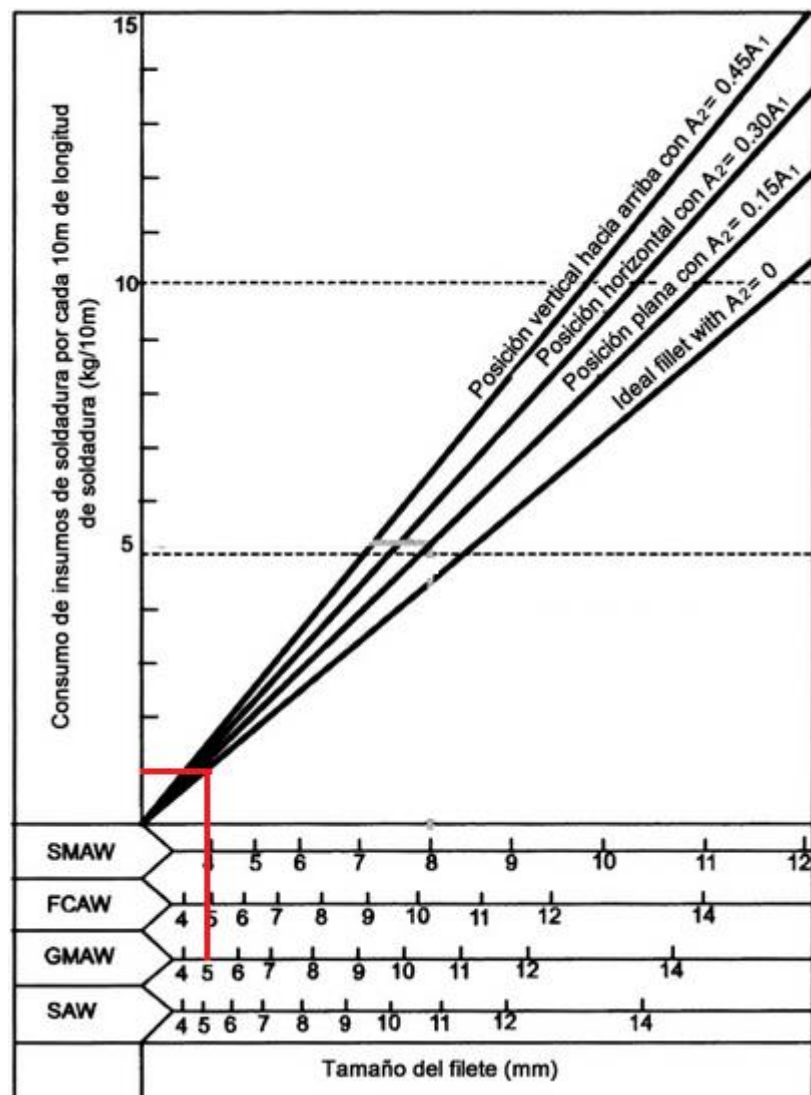
En la Figura72 se muestra el tipo de junta utilizada en este experimento, siendo  $S=5\text{mm}$  y donde  $A_2$  tiende a 0.

**Tabla 42.**  
***Cantidad estimada de consumibles para soldadura de filete.***

Longitud del pie (mm)	Protección de la soldadura de arco eléctrico	CO2 soldadura de arco
	Cantidad necesaria de electrodo recubierto por 1-m longitud de soldadura (kg/m)	Cantidad necesaria de alambre sólido por 1-m longitud de soldadura (kg/m)
3	0.077	0.044
4	0.137	0.079
5	<b>0.214</b>	<b>0.124</b>
6	0.308	0.179
7	0.419	0.243
8	0.548	0.317
9	0.693	0.402
10	0.856	0.496
11	1.036	0.600
12	1.232	0.714

Fuente: (KOBE STEEL, 2015)

Sabiendo que el tamaño de pierna de los cordones de soldadura es de 5 mm y el proceso utilizado fue GMAW se puede observar en la Tabla 42 se utilizó aproximadamente 0.124 kg/m de alambre ER70S-6.



**Figura 73. Consumo de insumos de soldadura vs tamaño de filete.**

Fuente: (KOBÉ STEEL, 2015)

Para confirmar la información de la Tabla 42, se utilizó la gráfica que se muestra en la Figura 73 y se encontró como resultado que se necesita 1 kg de alambre de soldadura por cada 10 m soldados o 0.1 kg/m.

El consumo de alambre es:  $C=0.124$  kg/m

En la Tabla 43 se muestran las longitudes soldadas en las diferentes variantes de vigas.

**Tabla 43.**  
**Cantidad depositada de alambre de soldadura.**

Número de Viga	Longitud soldada (m)	Consumo (kg/m)	Cantidad depositada (kg)
<b>Viga completamente soldada</b>	12,00	0,124	1,49
<b>Viga 3</b>	8,40	0,124	1,04
<b>Viga 2</b>	6,77	0,124	0,84
<b>Viga 1</b>	4,44	0,124	0,55

Las tres vigas construidas suman un total de 19.62 metros lineales de longitud de soldadura, aproximando este valor a 20 m, a continuación, se presenta un cálculo para conocer cuántos kilogramos de alambre de soldadura se utilizó en la fabricación de las 3 vigas.

$$Ct = 20m * C$$

Donde:

$Ct \rightarrow$  consumo total

$C \rightarrow$  consumo de kg por cada metro

$$Ct = 20 m * 0.124 kg/m$$

$$Ct = 2.48 kg$$

El costo del alambre consumible de 5 kg fue de 28 USD, es decir de 5,60 USD/kg, por tanto:

**Tabla 44.**  
**Costo total de alambre de soldadura utilizado en cada viga.**

Número de Viga	Cantidad depositada (kg)	Costo por kilogramo (USD/kg)	Costo Total (USD)
<b>Viga completamente soldada</b>	1,49	5,60	8,33
<b>Viga 3</b>	1,04	5,60	5,83
<b>Viga 2</b>	0,84	5,60	4,71
<b>Viga 1</b>	0,55	5,60	3,08



### 6.1.2.2. Gas en la soldadura

El gas empleado en el proceso de soldadura fue INDURMIG 20 (80% Ar – 20% CO<sub>2</sub>), volumen del cilindro de 9 m<sup>3</sup> y peso de 14.9 kg.

El costo de recargar un cilindro de 9 metros cúbicos de gas es de 162,90 USD.

Para calcular el costo del gas protector por kilogramo de material depositado se necesita ciertos parámetros, los cuales son:

- Costo del gas protector por volumen (USD/m<sup>3</sup>)
- Velocidad de flujo del gas protector (m<sup>3</sup>/h)
- Velocidad de deposición (kg/h)

**Densidad:**

$$\rho = \frac{m}{v}$$

$$\rho = \frac{14,9 \text{ kg}}{9 \text{ m}^3}$$

$$\rho = 1.65 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

**Costo del gas protector por volumen (CGV):**

$$CGV = \frac{162.90 \text{ USD}}{9 \text{ m}^3}$$

$$CGV = 18,1 \frac{\text{USD}}{\text{m}^3}$$

**Velocidad de flujo del gas protector:**

La velocidad de flujo promedio (Vf) utilizada fue de  $10 \frac{\text{lt}}{\text{min}}$ , transformando esto a las unidades necesarias se obtuvo un flujo de  $0.6 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ .

**Velocidad de deposición:**

La velocidad de alimentación ( $V_a$ ) del alambre es  $400 \frac{in}{min}$  transformando a  $\frac{mm}{min}$  se tiene  $10320 \frac{mm}{min}$ .

Volumen de deposición ( $V_d$ )

$$V_d = A_a * V_a$$

$$V_d = \frac{\pi * (0.8)^2}{4} mm^2 * 10320 \frac{mm}{min}$$

$$V_d = 5187.4 \frac{mm^3}{min}$$

Para obtener la velocidad de avance ( $V$ ) se divide el volumen de deposición para el área del cordón:

$$V = \frac{5187.4 \frac{mm^3}{min}}{\left(\frac{5*5}{2}\right) mm^2}$$

$$V = \frac{5187.4 \frac{mm^3}{min}}{\left(\frac{5*5}{2}\right) mm^2}$$

$$V \approx 415 \frac{mm}{min}$$

$$V \approx 25.2 \frac{m}{h}$$

La velocidad de deposición se calcula multiplicando la velocidad de avance por el consumo de alambre ( $C$ ) obtenido de la Tabla 42.

$$V_{deposición} = 25.2 \frac{m}{H} * 0.124 \frac{kg}{m}$$

$$V_{deposición} = 3.12 \frac{kg}{h}$$

### Costo de gas protector por kilogramo de material depositado:

Para calcular el costo del gas por kilogramo de material depositado se utiliza la siguiente fórmula:

$$CG = \frac{CGV * V_f}{V_{deposición}}$$

$$CG = \frac{18,1 \left(\frac{USD}{m^3}\right) * 0.6 \left(\frac{m^3}{hr}\right)}{3.12 \left(\frac{kg}{hr}\right)}$$

$$CG = 3.48 \left(\frac{USD}{kg}\right)$$

**Tabla 45.**  
**Costo total de gas de soldadura utilizado en cada viga.**

Número de Viga	Cantidad depositada (kg)	Costo parcial (USD/kg)	Costo total (USD)
<b>Viga completamente soldada</b>	1,49	3,48	5,18
<b>Viga 3</b>	1,04	3,48	3,62
<b>Viga 2</b>	0,84	3,48	2,92
<b>Viga 1</b>	0,55	3,48	1,92

### 6.1.3. Costo total de los parámetros variables de fabricación

Luego de haber realizado el análisis de costos, se obtuvo como resultado la siguiente tabla en la que se muestra el costo total de los parámetros variables en la fabricación de cada viga incluida una viga totalmente soldada.

**Tabla 46.**  
**Costo total de cada viga.**

Número de Viga	Viga completamente soldada	Viga 3	Viga 2	Viga 1
Mano de Obra (USD)	25,51	24,96	26,54	28,40
Electrodo ER70S-6 (USD)	8,33	5,83	4,71	3,08
Gas de protección Ar+CO2 (USD)	5,18	3,62	2,92	1,92
<b>COSTO TOTAL (USD)</b>	<b>39,02</b>	<b>34,41</b>	<b>34,17</b>	<b>33,40</b>

Los costos totales presentados en la Tabla 46 son para vigas de 3 metros de longitud, para realizar un mejor análisis en la Tabla 47 se presentan los costos por metro de viga.

**Tabla 47.**  
**Costo total por metro.**

Número de Viga	Costo total por metro (USD/m)
<b>Viga completamente soldada</b>	13,01
<b>Viga 3</b>	11,47
<b>Viga 2</b>	11,39
<b>Viga 1</b>	11,13

Con estos valores se puede afirmar que, al usar soldadura intermitente en lugar de una continua, existe una variación de costos de fabricación que va de 1,54 a 1,88 USD por cada metro de viga armada. Con lo cual en proyectos con un alto volumen de producción de este tipo de vigas se podría tener un significativo ahorro en costos de fabricación.

Si se compara el costo por metro entre las 3 vigas construidas, se puede apreciar que los valores no varían significativamente, pero presentando una ventaja económica en la viga con menos porcentaje de soldadura (37 %) de 0.34 USD/m., respecto a la de mayor porcentaje (70%).

## **6.2. Costos de fabricación**

El costo total de fabricación es la suma de costos directos e indirectos de fabricación, en las tablas 48 y 49 se muestra a detalle estos costos.

### 6.2.1. Costos directos

**Tabla 48.**

***Costos directos de fabricación.***

CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	PRECIO UNITARIO (\$)	PRECIO TOTAL (\$)
<b>0,5uni.</b>	Plancha 4 x 1220 x 6000 mm	200,00	100,00
<b>3uni.</b>	Platinas de 75 x 6 mm	21,60	64,80
<b>1uni.</b>	Tubo rectangular de 40 x 20 x 2 mm	12,01	12,01
<b>1 kg.</b>	Electrodo 6011	4,80	4,80
<b>2uni.</b>	Disco de corte para acero	2,20	4,40
<b>5 kg</b>	Alambre Mig Mag INDURA, ER 70S-6	28,00	28,00
<b>1uni.</b>	Boquilla para soldadora	16,00	16,00
<b>3uni.</b>	contactines	2,00	6,00
<b>5uni.</b>	Galga extensométrica	15,00	75,00
<b>10 m.</b>	Cable multipar	0,30	3,00
<b>1uni.</b>	Silicón epoxy	3,50	3,50
<b>1uni.</b>	Brujita blonder	2,00	2,00
<b>1uni.</b>	Disco para pulir	2,00	2,00
<b>1uni.</b>	Lija para metal Bosch	1,05	1,05
<b>1uni.</b>	Ángulo 65 x 6 mm	39,74	39,74
	<b>TOTAL</b>		<b>362,30</b>

### 6.2.2. Costos indirectos

**Tabla 49.**

***Costos indirectos de fabricación.***

CANTIDAD	SERVICIO	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL
<b>10,22 m</b>	Corte con guillotina plancha de 4 mm	0,40	4,09
<b>3,00 m</b>	Corte tronzadora platinas de 6 mm	0,45	1,35
<b>4 cortes</b>	Corte tubo rectangular	0,25	0,75
<b>3 cortes</b>	Ángulo	0,25	0,75
-	Traslado plancha y platinas	35,00	35,00
-	Soldador certificado	80,00	80,00
	<b>TOTAL</b>		<b>122,94</b>

**6.2.3. Costo total****Tabla 50.*****Costo total de fabricación.***

<b>Costos Directos</b>	<b>362,30 \$</b>
<b>Costos Indirectos</b>	<b>122,94 \$</b>
<b>TOTAL</b>	<b>485,24 \$</b>

## CAPÍTULO VII

### 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 7.1. Conclusiones

- Se concluye que el diseño de la viga es aceptable, ya que en el ensayo a flexión las vigas soportaron la carga solicitada de 6 toneladas sin sufrir ningún tipo de falla, ni sobrepasar el rango elástico.
- Al comparar los valores del esfuerzo normal, esfuerzo cortante y deformación entre los modelos experimental y teórico existe una variación del 3,51%, 3,86% y 15,25% respectivamente, por lo que se concluye que el modelo teórico predice acertadamente los valores de los esfuerzos, y aunque la variación de la deformación sobrepasa el límite aceptable del 10%, la diferencia entre los valores es aproximadamente 1 mm, por lo cual para fines prácticos se podría aceptar esta variación o se sugiere utilizar un factor de corrección, el cual se calculó en 1,12 para este estudio.
- Los resultados de los ensayos a flexión de las vigas construidas con 70, 57 y 37% de soldadura fueron comparados con los resultados de sus respectivas simulaciones, presentando una variación máxima 5,03% para esfuerzo normal, 5,81% para esfuerzo cortante y 3,84% para deformación, tomando en consideración que estas variaciones se encuentran debajo del 10%, se podría afirmar que el modelo computacional es válido para ser utilizado en el diseño de otros casos de estudio de vigas de sección armada tipo I sometidas a flexión.
- Al comparar los 21 casos simulados en el modelo computacional entre sí, se obtuvo que el esfuerzo normal, el esfuerzo cortante y la deformación tienen una relación inversamente proporcional al porcentaje de soldadura en la unión alma-patín, estas relaciones fueron validadas con los resultados de los 3 casos del modelo experimental que presentaron las mismas relaciones. Estas tendencias presentan variaciones del 2,28% en el esfuerzo normal, 9,06% en el esfuerzo cortante y 1,59% en la deformación, comparando entre las

simulaciones de vigas con el 97% y 30% de soldadura, en base a esto se establece que la variación en la longitud de los cordones de soldadura que unen alma y patín en una viga secundaria tipo I, no provoca una afectación significativa a la capacidad de carga y rigidez de la viga al ser sometida a cargas estáticas.

- Las vigas fabricadas con cordón de soldadura intermitente en comparación con las de cordón continuo presentaron una variación en costo de construcción de 11,83% , 12,45%, 14,44% por cada metro de soldadura en vigas fabricadas con 37%, 57% y 70% de soldadura respectivamente, para determinar esta variación se tomó en cuenta únicamente el costo de consumibles para soldadura y mano de obra, puesto que son los parámetros de que varían en la fabricación, ya que otros rubros como los costos de material base, montaje, transporte, etc., son iguales para vigas con soldadura continua o intermitente.
- En vigas secundarias sometidas a carga estática se podría reemplazar una soldadura continua por una intermitente en la unión de sus elementos, ya que según el estudio realizado, esto no afectara al funcionamiento estructural de la viga.

## **7.2. Recomendaciones**

- Debido a que el factor de corrección para la deformación fue calculado con los 3 datos de modelo experimental, estos podrían ser insuficientes para determinar un valor confiable para cualquier aproximación y más si se varían parámetros geométricos o condiciones de carga y apoyo, se recomienda realizar un estudio sobre las deformaciones en vigas tipo I con soldadura intermitente en la unión alma patín, variando el tamaño de la sección I de las vigas para poder determinar si se debería aplicar un factor de corrección en todos los casos de estudio y el valor del mismo.
- En la industria de la construcción se utilizan diversas secciones armadas con soldadura en vigas secundarias y considerando que los resultados de este estudio son solo aplicables para vigas de sección I,



se podría realizar estudios sobre la intermitencia de cordones de soldadura en las uniones de vigas con diferentes secciones,

- Para optimizar recursos se debe utilizar el espaciamiento máximo entre cordones de soldadura permitido por el código AWS D1.1. y considerando que en la construcción se presentaron menores variaciones en la geometría de la sección de la viga soldada al 57%, se recomienda utilizar configuraciones de: espaciamiento entre soldaduras y longitud del cordón de igual medida.
- Para evitar la distorsión de la viga por el calor producido en la soldadura, es preferible realizar los cordones desde el centro de gravedad de la viga hacia los extremos y tener un control de temperatura entre cordones.
- Considerar las posibles variables que puedan afectar los ensayos de flexión como la distancia entre apoyos, la ubicación de la carga y la geometría de la sección, ya que estas afectan de manera considerable los resultados.
- Se puede utilizar CO<sub>2</sub> como gas de protección de la soldadura siempre y cuando se garantice un cordón de acuerdo con el código AWS D1.1. y considerando que este presenta un precio más bajo en comparación con INDURMIG 20, que fue la mezcla utilizada en este estudio.

## BIBLIOGRAFÍA

- Abarca, L. (Enero de 2016). *TEC|Tecnológico de Costa Rica*. Recuperado el 25 de Marzo de 2017, de TEC|Tecnológico de Costa Rica:  
<https://www.tec.ac.cr/en/proyectos/optimizacion-recursos-materiales-mano-obra-edificaciones>
- Alazate, E., Montes, J., & Silva, C. (2007). MEDIDORES DE DEFORMACION POR RESISTENCIA: GALGAS EXTENSIOMÉTRICAS. *Scientia et Technica*, 7-12.
- ANSI/AISC. (2010). *Especificaciones ANSI/AISC 360-10 para Construcciones de Acero*. Santiago de Chile: Asociación latinoamericana del Acero.
- ANSI/AWS. (1993). *AWS A2.4 Símbolos normalizados para soldeo, soldeo fuerte y examen no destructivo*. Miami.
- ANSI/AWS. (2002). *AWS D1.1 CÓDIGO DE SOLDADURA ESTRUCTURAL-ACERO (Español)*.
- Bresler, B., Lin, T., & Scalzi, J. (1990). *Diseño de Estructuras de Acero*. México: LIMUSA.
- Budynas, R., & Keith, N. (2008). *Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley*. México: Mc Graw Hill.
- Creus, A. (1997). *Instrumentación Industrial*. Barcelona: ALFAOMEGA.
- Estructuras-Acero. (- de - de 2013). *IMVENTA.COM*. Recuperado el 15 de MAYO de 2017, de IMVENTA.COM:  
<http://www.imventa.com/Ayuda/ESwin/Ayuda/Datos/Propiedades/ECAcero.html>
- Gómez, N. A. (11 de Febrero de 2012). *Construcciones Metálicas*. Obtenido de [http://cmetalicas.tripod.com/sitebuildercontent/T5\\_NAG.pdf](http://cmetalicas.tripod.com/sitebuildercontent/T5_NAG.pdf)
- Hernández, H. (28 de Enero de 2013). *Supervisión de Estructuras de Concreto y de Acero*. Recuperado el 27 de Septiembre de 2017, de Supervisión de Estructuras de Concreto y de Acero: <https://sites.google.com/site/construyetuingenio2013/5-procesos-de-soldadura-y-corte/5-2-soldadura-por-arco-de-metal-y-gas-gmaw>
- Homsí, A. (Marzo de 2013). *Diseño de Estructuras Metálicas*. Recuperado el 22 de Mayo de 2017, de Diseño de Estructuras Metálicas:  
<https://akramhomsih.files.wordpress.com/2013/03/presentacic3b3n-nc2b0-3.pdf>
- INDURA. (2015). *MANUAL DE SISTEMAS Y MATERIALES DE SOLDADURA*.
- KOBE STEEL, L. (2015). *Tehe ABC's of Arc Welding and Inspection*. Tokio: KOBE STEEL.
- Masubuchi, K. (1980). Analysis of Welded Structures. En K. Masubuchi, *Analysis of Welded Structures* (pág. 624). New York: Pergamos Press.
- McCormac, J. C. (2013). *Diseño de Estructuras Metálicas*. México DF: Alfaomega.
- Medina, E. (2015). *Universidad Distrital Francisco José de Caldas*. Recuperado el 15 de Mayo de 2017, de Universidad Distrital Francisco José de Caldas:  
<http://www.udistrital.edu.co:8080/documents/19625/239908/ENSAYO+DE+FLEXIO+N.pdf>

NEC. (2014). *Estructuras de acero*. Quito: Dirección de Comunicación Social, MIDUVI.

Reza, M., Rastani, M., & Ghavami, K. (2006). Numerical study on the permissible gap of intermittent fillet welds of longitudinally stiffened plates under in plane axial compression. *Journal of Constructional Steel Research* , 1415-1428.

Rowe, R., & Jeffus, L. (2008). *Manual de Soldadura GMAW (MIG-MAG)*. Madrid: PARANINFO CENGAGE Learning.

Toyoda, M., & Mochizuki, M. (2004). Control of mechanical properties in structural steel welds by numerical simulation of coupling among temperature, microstructure, and macro-mechanics. *Science and Technology of Advanced Materials* , 255-266.

Vinnakota, S. (2006). *Estructuras de acero: comportamiento y LRFD*. México: McGraw-Hill.