



# **ESPE**

**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA**

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE ENERGÍA Y  
MECÁNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

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

**TEMA:**

**ESTUDIO DE VIGAS DE SECCIÓN COMPACTA  
INCREMENTANDO SU CAPACIDAD A FLEXIÓN MEDIANTE  
ATIESADORES Y BLOQUES DE HORMIGÓN CON CUESCO**

**AUTORES:**

- **SÁNCHEZ LUNA DAVID ALEJANDRO**
- **ARROYO VACA CRISTIAN SEBASTIÁN**

**DIRECTOR: NARVÁEZ CHRISTIAN**

**SANGOLQUÍ**

**2016**



## DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

### CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

#### CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, “*ESTUDIO DE VIGAS DE SECCIÓN COMPACTA INCREMENTANDO SU CAPACIDAD A FLEXIÓN MEDIANTE ATIESADORES Y BLOQUES DE HORMIGÓN CON CUESCO*” realizado por los señores **CRISTIAN SEBASTIÁN ARROYO VACA** y **DAVID ALEJANDRO SÁNCHEZ LUNA**, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar a los señores **CRISTIAN SEBASTIÁN ARROYO VACA** y **DAVID ALEJANDRO SÁNCHEZ LUNA** para que lo sustente públicamente.

CHRISTIAN NARVÁEZ

DIRECTOR



## DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

### CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

#### AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, **CRISTIAN SEBASTIÁN ARROYO VACA**, con cédula de identidad N° 1003247812, declaro que este trabajo de titulación ***“ESTUDIO DE VIGAS DE SECCIÓN COMPACTA INCREMENTANDO SU CAPACIDAD A FLEXIÓN MEDIANTE ATIESADORES Y BLOQUES DE HORMIGÓN CON CUESCO”*** ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaro que este trabajo es de mi autoría, en virtud de ello me declaro responsable del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

**Sangolquí, 08 de agosto del 2016**

CRISTIAN ARROYO

C.C 1003247812



## DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

### CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

#### AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, **DAVID ALEJANDRO SÁNCHEZ LUNA**, con cédula de identidad N° 1719928895, declaro que este trabajo de titulación “*ESTUDIO DE VIGAS DE SECCIÓN COMPACTA INCREMENTANDO SU CAPACIDAD A FLEXIÓN MEDIANTE ATIESADORES Y BLOQUES DE HORMIGÓN CON CUESCO*” ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaro que este trabajo es de mi autoría, en virtud de ello me declaro responsable del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

**Sangolquí, 08 de agosto del 2016**

---

DAVID SANCHEZ

C.C 1719928895



## DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

### CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

#### AUTORIZACIÓN

Yo, **CRISTIAN SEBASTIÁN ARROYO VACA**, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en la biblioteca Virtual de la institución el presente trabajo de titulación ***“ESTUDIO DE VIGAS DE SECCIÓN COMPACTA INCREMENTANDO SU CAPACIDAD A FLEXIÓN MEDIANTE ATIESADORES Y BLOQUES DE HORMIGÓN CON CUESCO”*** cuyo contenido, ideas y criterios son de mi autoría y responsabilidad.

**Sangolquí, 08 de agosto del 2016**

CRISTIAN ARROYO

C.C 1003247812



## DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

### CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

#### AUTORIZACIÓN

Yo, **DAVID ALEJANDRO SÁNCHEZ LUNA**, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en la biblioteca Virtual de la institución el presente trabajo de titulación ***“ESTUDIO DE VIGAS DE SECCIÓN COMPACTA INCREMENTANDO SU CAPACIDAD A FLEXIÓN MEDIANTE ATIESADORES Y BLOQUES DE HORMIGÓN CON CUESCO”*** cuyo contenido, ideas y criterios son de mi autoría y responsabilidad.

**Sangolquí, 08 de agosto del 2016**

---

DAVID SANCHEZ

C.C 1719928895

## **DEDICATORIA**

El pilar fundamental de la vida es la familia, los padres que por entregarnos un mejor porvenir lleno de oportunidades han transcurrido un duro pero admirable camino, por eso dedico este proyecto a ellos, quienes cada día me han demostrado y me siguen demostrando el valor de la familia, del trabajo duro, del respeto y sobre todo del amor. A mi hermano Andrés que es y siempre será mi compañero en este maravilloso camino que es la vida.

**David Sánchez**

## **DEDICATORIA**

Dedico este proyecto de grado a mi madre Anita, por su ejemplo de perseverancia, lucha constante e incondicional amor, a mi padre Víctor por su ejemplo de trabajo duro, su apoyo constante y gran amor, a mi hermana Andrea por ser mi ejemplo de éxito y superación, a mi mejor amigo, mi hermano Esteban por su lealtad e incondicional apoyo.

**Sebastián Arroyo**



## **AGRADECIMIENTO**

A mis padres que cada día con una palabra de motivación, su amor incondicional, su guía y su gran esfuerzo me han demostrado el valor de la vida y la importancia del aprendizaje y el trabajo duro. Gracias por ayudarme a llegar a ser lo que soy.

A mi hermano que siempre ha estado allí en cada momento de felicidad y tristeza, quien ha sido y seguirá siendo una motivación para mejorar cada día.

A mis amigos Edison, Sebastián y Stefy quienes se han convertido en personas incondicionales y confidentes de mi vida.

**David Sánchez**

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a mis padres por su apoyo incondicional, en mi formación como profesional, a mis hermanos por ser un soporte esencial a lo largo de toda la carrera.

Agradezco también a mis amigos y compañeros, con quienes he compartido inolvidables momentos, y experiencias únicas. Especialmente a David, por su amistad y constante apoyo para lograr el propósito de culminar exitosamente la carrera.

**Sebastián Arroyo**

## ÍNDICE

1	CAPÍTULO 1 GENERALIDADES .....	1
1.1	Antecedentes de la investigación .....	1
1.2	Objetivos .....	3
1.2.1	Objetivo General: .....	3
1.2.2	Objetivos Específicos: .....	3
1.3	Definición del Problema.....	4
1.4	Justificación del Problema.....	5
2	CAPITULO 2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	6
2.1	Comportamiento elástico y plástico. ....	6
2.1.1	Sección Armada .....	10
2.2	Soldadura de arco. ....	13
2.2.1	Soldadura de filete.....	13
2.2.2	Requisitos del AISC. ....	14
2.3	Atiesadores .....	16
2.3.1	Tipos de atiesadores .....	18
2.3.2	Geometría de atiesadores.....	20
2.3.3	Consideraciones de diseño .....	22
2.3.4	Estado del arte. ....	24
2.4	Vigas compuestas. ....	25

2.4.1	Consideraciones de diseño de conectores tipo cortante. ....	26
2.4.2	Cálculo del eje neutro de la sección compuesta. ....	28
2.4.3	Estado del arte. ....	28
3	CAPITULO 3 DISEÑO DEL ESTUDIO .....	30
3.1	Vigas.....	30
3.1.1	Viga de sección tipo I armada. ....	30
3.1.2	Viga de sección tipo I laminada. ....	37
3.2	Modelo de elementos finitos .....	40
3.2.1	Viga de sección tipo I armada. ....	42
3.2.2	Viga de sección tipo I laminada. ....	46
3.3	Incremento de la capacidad de las vigas. ....	49
3.3.1	Atiesadores .....	49
3.3.2	Viga compuesta. ....	51
4	CAPÍTULO 4 ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	56
4.1	Viga de sección tipo I armada .....	56
4.2	Viga de sección tipo I laminada .....	61
4.3	Estudio de Atiesadores .....	67
4.3.1	Primera configuración. ....	67
4.3.2	Segunda configuración .....	82
4.3.3	Tercera configuración.....	122

4.3.4	Modelo computacional final.....	124
4.4	Viga de sección tipo I compuesta.....	131
4.4.1	Ensayo de cilindros a compresión.....	131
4.4.2	Incremento de la capacidad a flexión.....	133
5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	136
5.1	Conclusiones.....	136
5.2	Recomendaciones.....	138
6	BIBLIOGRAFÍA.....	139

**LISTA DE TABLAS**

Tabla 1. Dimensiones de sección viga tipo I armada.....	33
Tabla 2. Calculo de inercia de la sección de la viga armada.....	34
Tabla 3. Propiedades de sección de viga tipo I laminada .....	38
Tabla 4. Dimensiones de sección de la viga compuesta. ....	52
Tabla 5. Dimensiones de la sección equivalente.....	54
Tabla 6. Compresión en cilindros de hormigón .....	131

**LISTA DE FIGURAS**

Figura 1. Viga simplemente apoyada.....	6
Figura 2. Distribución de esfuerzos. ....	8
Figura 3. Distribución de esfuerzos. ....	8
Figura 4. Articulación plástica. ....	9
Figura 5. Secciones de vigas compacta, no compacta y esbelta. ....	11
Figura 6. Circuito de soldadura de arco .....	13
Figura 7. Junta tipo te.....	14
Figura 8. Superficie del cordón de soldadura .....	14
Figura 9. Tamaño mínimo del pierna del cordón de soldadura de filete.....	15
Figura 10, Resistencia nominal de soldadura de filete.....	15
Figura 11. Atiesadores utilizados como conectores.....	17
Figura 12. Distribución de tensiones viga con atiesadores .....	18
Figura 13. Atiesador con chaflán. ....	21
Figura 14. Atiesador con chaflán. ....	21
Figura 15. Agujero de ratón. ....	22
Figura 16. Sección de viga tipo I armada.....	32
Figura 17. Sección viga tipo I armada. ....	33
Figura 18. Dimensiones viga laminada.....	39

Figura 19. Convergencia del mallado viga armada.....	42
Figura 20. Diagrama Esfuerzo - Deformación Unitaria ensayo 1000 [kg].....	44
Figura 21. Deformación Unitaria – Carga 2300 [kg].....	45
Figura 22. Convergencia del mallado viga laminada.....	46
Figura 23. Diagrama Esfuerzo - Deformación Unitaria ensayo 2000 [kg].....	48
Figura 24. Deformación Unitaria – Carga 8000 [kg].....	49
Figura 25. Sección viga compuesta.....	52
Figura 26. Sección equivalente del concreto.....	53
Figura 27. Diagrama esfuerzo - deformación unitaria simulación.....	56
Figura 28. Diagrama Esfuerzo - Deformación Unitaria, ensayo 1 viga de sección tipo I armada. ....	57
Figura 29. Deformación Unitaria – Carga, ensayo 2 viga de sección tipo I armada.	58
Figura 30. Esfuerzo – Carga, ensayo 2 viga de sección tipo I armada. ....	58
Figura 31. Diagrama Esfuerzo – Carga, ensayo 3 viga de sección tipo I armada.....	59
Figura 32. Diagrama efecto P – Delta.....	60
Figura 33. Resultados análisis por elementos finitos. ....	62
Figura 34. Diagrama Esfuerzo – Deformación Unitaria simulación viga laminada. .	63
Figura 35. Deformación Unitaria – Carga ensayo 1 viga laminada.....	64
Figura 36. Esfuerzo – Carga ensayo 1 viga laminada.....	64



Figura 37. Diagrama Deformación unitaria – Carga ensayo 2 viga laminada. ....	65
Figura 38. Diagrama Esfuerzo – Carga ensayo 2 viga laminada. ....	66
Figura 39. Diagrama Deflexión – Carga simulación viga laminada. ....	67
Figura 40. Modelo de elementos finitos carga coincidente al atiesador. ....	68
Figura 41. Mallado espesor 3 [mm] – Separación 160 [mm] ....	69
Figura 42. Diagrama Esfuerzo – Separación, simulación atiesadores carga coincidente 1. ....	70
Figura 43. Diagrama Esfuerzo – Separación simulación atiesadores carga coincidente 2. ....	71
Figura 44. Diagrama Deflexión – Separación simulación atiesadores carga no coincidente 1. ....	73
Figura 45. Diagrama Deflexión – Separación simulación atiesadores carga coincidente 2. ....	75
Figura 46. Modelo de elementos finitos carga no coincidente al atiesador 1. ....	76
Figura 47. Diagrama Esfuerzo – Separación simulación atiesadores carga no coincidente 1. ....	77
Figura 48. Diagrama Esfuerzo – Separación simulación atiesadores carga no coincidente 2. ....	79
Figura 49. Diagrama Deflexión – Separación simulación atiesadores carga no coincidente 1. ....	80

Figura 50. Diagrama Deflexión – Separación simulación atiesadores carga no coincidente 2. ....	81
Figura 51. Modelo de elementos finitos carga no coincidente al atiesador 2. ....	83
Figura 52. Diagrama Esfuerzo – Separación simulación atiesadores carga no coincidente 1. ....	84
Figura 53. Diagrama Esfuerzo – Separación simulación atiesadores carga no coincidente 2. ....	85
Figura 54. Diagrama Deflexión – Separación simulación atiesadores carga no coincidente 1. ....	87
Figura 55. Diagrama Deflexión – Separación simulación atiesadores carga no coincidente 2. ....	88
Figura 56. Modelo de elementos finitos carga no coincidente al atiesador 3. ....	90
Figura 57. Diagrama Esfuerzo – Separación simulación atiesadores carga no coincidente 1. ....	91
Figura 58. Diagrama Esfuerzo – Separación simulación atiesadores carga no coincidente 2. ....	92
Figura 59. Diagrama Deflexión – Separación simulación atiesadores carga no coincidente 1. ....	94
Figura 60. Diagrama Deflexión – Separación simulación atiesadores carga no coincidente 2. ....	95
Figura 61. Modelo de elementos finitos carga no coincidente y altura de atiesador de 150 mm.....	97

Figura 62. Diagrama Esfuerzo – Separación, simulación atiesadores carga no coincidente 1, con altura de 150mm. ....	98
Figura 63. Diagrama Esfuerzo – Separación, simulación atiesadores carga no coincidente 2, con altura de 150mm. ....	99
Figura 64. Diagrama Deflexión – Separación, simulación atiesadores carga no coincidente 1, con altura de 150mm. ....	100
Figura 65. Diagrama Deflexión – Separación, simulación atiesadores carga no coincidente 2, con altura de 150mm. ....	101
Figura 66. Modelo de elementos finitos carga no coincidente y altura de atiesador de 160 mm.....	103
Figura 67. Diagrama Esfuerzo – Separación, simulación atiesadores carga no coincidente 1, con altura de 160mm. ....	104
Figura 68. Diagrama Esfuerzo – Separación, simulación atiesadores carga no coincidente 2, con altura de 160mm. ....	105
Figura 69. Diagrama Deflexión – Separación, simulación atiesadores carga no coincidente 1, con altura de 160mm. ....	106
Figura 70. Diagrama Deflexión – Separación, simulación atiesadores carga no coincidente 2, con altura de 160mm. ....	107
Figura 71. Modelo de elementos finitos carga no coincidente y altura de atiesador de 170 mm.....	109
Figura 72. Diagrama Esfuerzo – Separación, simulación atiesadores carga no coincidente 1, con altura de 170mm. ....	110

Figura 73. Diagrama Esfuerzo – Separación, simulación atiesadores carga no coincidente 2, con altura de 170mm. ....	111
Figura 74. Diagrama Deflexión – Separación, simulación atiesadores carga no coincidente 1, con altura de 170mm. ....	112
Figura 75. Diagrama Deflexión – Separación, simulación atiesadores carga no coincidente 2, con altura de 170mm. ....	113
Figura 76. Modelo de elementos finitos carga no coincidente y altura de atiesador de 200 mm.....	115
Figura 77. Diagrama Esfuerzo – Separación, simulación atiesadores carga no coincidente 1, con altura de 200mm. ....	116
Figura 78. Diagrama Esfuerzo – Separación, simulación atiesadores carga no coincidente 2, con altura de 200mm. ....	117
Figura 79. Diagrama Deflexión – Separación, simulación atiesadores carga no coincidente 1, con altura de 200mm. ....	118
Figura 80. Diagrama Deflexión – Separación, simulación atiesadores carga no coincidente 2, con altura de 200mm. ....	119
Figura 81. Diagrama Deflexión – Separación simulación atiesadores carga no coincidente 2. ....	121
Figura 82. Diagrama Esfuerzo – Separación simulación atiesadores 7 [mm]. ....	122
Figura 83. Modelo de elementos finitos con 8 atiesadores. ....	123
Figura 84. Diagrama Esfuerzo – Número de atiesadores con un espesor de 7 [mm]. ....	124

Figura 85. Modelo de elementos finitos con 8 atiesadores. ....	125
Figura 86. Diagrama Deflexión – Carga simulación atiesadores carga no coincidente. ....	125
Figura 87. Diagrama Esfuerzo – Número de atiesadores con un espesor de 6 [mm].....	126
Figura 88. Diagrama Deflexión – Separación simulación atiesadores carga no coincidente 2. ....	127
Figura 89. Diagrama Deflexión – Separación simulación atiesadores carga no coincidente. ....	129
Figura 90. Deformación Unitaria – Carga ensayos con y sin atiesadores.....	130
Figura 91. Esfuerzo – Carga ensayos con y sin atiesadores.....	130
Figura 92. Ensayo viga compuesta con precarga de 4000 [kg].....	133
Figura 93. Ensayo viga compuesta con carga de 8000 [kg].....	134
Figura 94. Comparación de ensayos con carga de 8000 [kg]. ....	135

## **RESUMEN**

En el presente proyecto se desarrolla el estudio a través de un análisis de elementos finitos, del uso de atiesadores en vigas de sección tipo I compacta en el rango elástico, y se realiza un análisis de cómo éstos influyen en la capacidad a flexión y en la deflexión de las mismas. Se presenta una comparación en el uso de vigas de sección armada y laminada respectivamente. A partir de esto se realiza el estudio de la geometría óptima de los atiesadores utilizando tres diferentes configuraciones en las que se varía altura, espesor, separación y número de atiesadores para incrementar su capacidad a flexión, y se analiza el comportamiento de la deflexión y la influencia del momento de la viga para la distribución de los mismos. Se determina la mejor configuración y se validan los resultados con la mayor cantidad de datos posibles obtenidos con ensayos de laboratorio. Adicionalmente se estudia el uso de cuesco como reemplazo del agregado grueso en el concreto con diferentes porcentajes de reemplazo para obtener los parámetros mínimos establecidos por la especificación AISC 360. Se realiza el análisis del comportamiento del cuesco, en la compactación del concreto, para una viga de sección compuesta, determinando el incremento de su capacidad a flexión.

## **PALABRAS CLAVE**

- **VIGAS**
- **SECCIÓN**
- **COMPACTA**
- **CUESCO**
- **ATIESADORES**

## **ABSTRACT**

This study was developed to analyze the behavior of transverse stiffeners in compact section beams through a finite element method in the elastic range to increase its flexure capability. It has a comparison about uses of plate girders and rolled sections, and study the optimal configuration with three different configurations changing thickness, height, separation and number of stiffeners. The best configuration is determined and the results are validated with laboratory tests. Additionally, it is studied uses of “cuesco” as replacement of gravel in concrete with different percentages to obtain the minimum value specified in AISC 360.

## **KEY WORDS**

- **BEAM**
- **SECTION**
- **COMPACT**
- **STIFFENERS**
- **CUESCO**

## **CAPÍTULO 1**

### **GENERALIDADES**

#### **1.1 Antecedentes de la investigación.**

En la última década, los estudios realizados dentro de la industria de la construcción se centraron en la optimización de materiales y en la reducción de costos, lo que conlleva al estudio no solo de nuevas formas de construcción de estructuras mixtas (acero y concreto), sino también a encontrar nuevos materiales que sirvan como sustitutos y proporcionen menor impacto ambiental.

En este sentido las construcciones mixtas son una solución muy válida aportando con reducción de material en la construcción y obteniendo muy buenos resultados de resistencia. Zamora y Molina de la Universidad Nacional de Colombia en su estudio “Comportamiento de vigas de sección compuesta con perfiles de acero laminado y losa de concreto empleando conectores de cortante tipo tornillo grado dos” realizan un análisis teórico-experimental para determinar los parámetros de diseño que rigen el comportamiento de las vigas compuestas de perfiles de acero y losa de concreto empleando conectores de cortante tipo tornillo. En dicha investigación se estudió el deslizamiento producido tanto por la degradación del concreto como por las deformaciones en el perfil de acero y los conectores. Según Zamora y Molina “Se concluye que es necesario plantear una separación mínima en la normatividad colombiana para los tornillos debido a que la separación planteada para los espigos no permitió en los ensayos, el desarrollo de toda la capacidad de los conectores”.

La tendencia a nivel mundial en cuanto al uso de agregados para hormigón se centra en el reciclaje y el uso de desechos de otros procesos, o los mismos desechos de construcción. Los residuos en la industria de la construcción son mayoritariamente provenientes de la demolición de edificios. Suárez et al., (2006) en su artículo “Estudio De Hormigones Elaborados Con Residuos De Ladrillerías y De Demolición” buscan



determinar si dichos desechos pueden ser utilizados como agregados para el hormigón mediante análisis granulométricos, determinaciones de densidad al granel, absorción de agua y densidad relativa.

A los hormigones elaborados con dichos desechos se efectuaron pruebas de densidad, resistencia a compresión, módulo de elasticidad, tracción por compresión diametral, contracción por secado, absorción de agua, profundidad de penetración de carbonatación, capacidad y velocidad de succión capilar, a fin de evaluar sus prestaciones resistentes y durables.

Los resultados indican, que si bien no es posible obtener con estos residuos hormigones para uso estructural, existen oportunidades para su utilización, además de las aplicaciones tradicionales, en la fabricación de elementos constructivos tales como bloques de hormigón para mampostería y bloques para forjados (Suarez, 2006).

El desarrollo de las nuevas tecnologías en la construcción ha impulsado la creación de nuevos materiales, la necesidad de obtener mejores cualidades mecánicas, la reducción de peso, reducción de costos, la reutilización de materiales de desecho, etc. Estos han sido factores que han ayudado a la creación de materiales compuestos y al desarrollo de la industria de la construcción.

Jorge Buzón Ojeda en su investigación “Uso del cuesco de la palma africana en la fabricación de adoquines y bloques de mampostería”, plantea como objetivo el sustituir parcialmente el consumo de materias primas convencionales (agregado grueso y fino), haciendo énfasis en la reducción de costos de los proyectos de ingeniería donde el hormigón es el principal insumo. Dentro de su investigación se resalta, “la razón principal de utilizar este tipo de agregado en la composición de la mezcla de concreto es que, actúe como material de relleno haciendo más económica la mezcla y que proporcione su resistencia como elemento esencial a la compresión, además que controle el cambio volumétrico en el fraguado al pasar de un estado plástico ha endurecido”.

Los resultados obtenidos para adoquines de mortero y cuesco presentan 6.71 MPa de resistencia a compresión con 10% de cuesco, siendo este valor superior al promedio de 4.5 MPa exigido por la norma colombiana NTC INCONTEC. De la misma forma, para los bloques de mampostería de mortero y cuesco se menciona, “la resistencia obtenida en los bloques con adición de cuesco es mayor que la de los bloques convencionales” (Ojeda, 2009).

Este proyecto presenta la utilización del material de desecho (cuesco) del proceso de la extracción de aceite de palma africana, como agregado grueso para la fabricación de concreto. Con la finalidad de insertar un material no convencional en la construcción, y aportar con la reducción de la contaminación ambiental, generada por las extractoras de palma.

Además, este proyecto analiza el comportamiento de atiesadores transversales en vigas de sección compacta, con una carga puntual en su centro y simplemente apoyada. Con la finalidad de aumentar su capacidad a flexión, se determina el número de atiesadores, la separación entre éstos y su geometría.

## **1.2 Objetivos.**

### **1.2.1 Objetivo General:**

Determinar si el uso de atiesadores y bloques de hormigón con cuesco incrementan la capacidad de resistencia a la flexión de una viga de sección compacta.

### **1.2.2 Objetivos Específicos:**

- Determinar las dimensiones de una viga compacta.
- Determinar la distancia óptima entre atiesadores simulando en un programa de elementos finitos.
- Comparar los resultados teóricos con los experimentales.

- Comparar los resultados de resistencia a la flexión de los diferentes casos ensayados.
- Determinar si la sección compuesta aumenta o no la resistencia de la viga a flexión y en qué proporción.

### **1.3 Definición del Problema.**

Según la Federación Interamericana de la Industria de la Construcción (FIIC), dentro del Ecuador la industria de la construcción movió 8029 millones de dólares en el 2014, generando empleo para miles de trabajadores a nivel nacional. En el país la industria de la construcción realiza principalmente obras de construcción tradicional debido al alto costo del acero y por consiguiente de la construcción liviana. Esta última tiene grandes ventajas como la rapidez de edificación y su mayor resistencia a cargas laterales que se pueden presentar en sismos.

Dentro de la industria de la construcción existen dos principales sistemas constructivos tradicionales y livianos. El primero posee una gran acogida por ser el más utilizado y brindando a las personas una sensación de mayor solidez, mientras que para el segundo se continúa incrementando su uso por sus numerosas ventajas como la alta resistencia, uniformidad, elasticidad, durabilidad, ductilidad, su facilidad y rapidez de edificación que presenta un punto decisivo al momento de realizar obras de gran tamaño o para prestaciones inmediatas. La construcción liviana dado el incremento en el costo del acero en nuestro país, no siempre puede competir frente al precio de la construcción tradicional lo que disminuye su demanda en el sector.

Los atiesadores presentan varias aplicaciones principalmente en la edificación de obras de gran envergadura, donde es necesario el uso de vigas construidas de gran peralte debido a los requerimientos de cargas, sin embargo, no se posee información acerca de su uso en prestaciones de menor tamaño ni en vigas de sección compacta. Por otra parte el proceso de extracción de aceite del fruto de palma africana (cuesco),

produce miles de toneladas de desecho al año lo que genera contaminación ambiental a gran escala.

#### **1.4 Justificación del Problema.**

A nivel mundial los avances en la industria de la construcción se centran en el uso de materiales reciclables y la optimización de los mismos. Según un informe presentado por la Food and Agriculture Organization (FAO), el Ecuador es uno de los mayores productores a nivel mundial de aceite de palma africana produciendo 289 900 toneladas al año, lo que generaría alrededor de 100 000 toneladas de desecho. La posibilidad de utilizar este desecho como agregado en la construcción contribuiría de forma directa con el ambiente reduciendo el desecho producido por el proceso de extracción de palma, y así también reduciendo el material de agregado grueso. Por otro lado, la utilización de atiesadores es común en la construcción especialmente en puentes y estructuras de gran tamaño. El American Institute of Steel Construction (AISC) en su normativa para la construcción “AISC 360 Structural Steel Buildings” menciona el uso y diseño de atiesadores en perfiles armados de alto peralte para evitar el pandeo lateral, sin embargo no proporciona ninguna información acerca del uso de los atiesadores en vigas de sección compacta, ni del fenómeno que se presenta en las vigas al utilizarlos como refuerzos. En este sentido la investigación analizará si el uso de los mismos incrementa la capacidad a flexión en vigas de sección compacta dentro de la zona elástica.

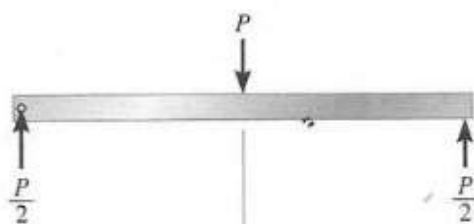
## CAPÍTULO 2

### REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

El presente capítulo presenta la fundamentación teórica necesaria para el desarrollo del estudio, abarcando las consideraciones de diseño propuestas por diferentes autores y normas, y considerando los conceptos básicos de mecánica de materiales.

#### 2.1 Comportamiento elástico y plástico.

Una viga es un elemento estructural diseñado para soportar cargas aplicadas transversalmente a su eje longitudinal y para transferir esas cargas a puntos designados en la viga denominados apoyos (Vinnakota, 2006). Una viga simplemente apoyada consiste en una fuerza aplicada sobre ésta, lo que genera dos reacciones perpendiculares a la misma, ubicadas en sus apoyos. La configuración más común en estructuras, es cuando la carga se aplica en la mitad de su longitud como se muestra en la figura 1.



**Figura 1.** Viga simplemente apoyada.

Fuente: (Hibbeler R. , 2006)

Debido a las cargas transversales aplicadas en la viga, se desarrollan fuerza cortante y momento flexionante internos. Esta fuerza y momento, generalmente varían por toda

la longitud de la viga. Para el diseño de vigas se toman en cuenta la fuerza cortante y momento máximos a los que se encuentra sometido el elemento (Hibbeler R. , 2006). Su fuerza cortante y un momento flexionante máximos se encuentran en la mitad de su longitud y están definidos por las ecuaciones 1 y 2 respectivamente, tomadas de la tabla 3 -23 del Manual de la AISC.

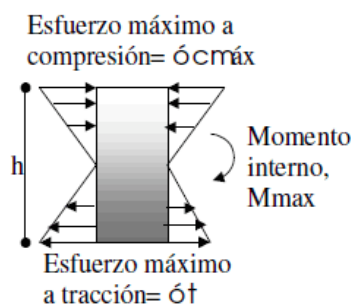
$$V_{max} = \frac{P}{2} \quad (1)$$

$$M_{max} = \frac{P L}{4} \quad (2)$$

En el mismo sentido la ecuación 3 define el esfuerzo máximo de una viga a flexión, el cual depende de su inercia  $I$ , de su momento máximo  $M_{max}$  y de la distancia desde el eje neutro hasta la fibra más alejada  $c$ .

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max} c}{I} \quad (3)$$

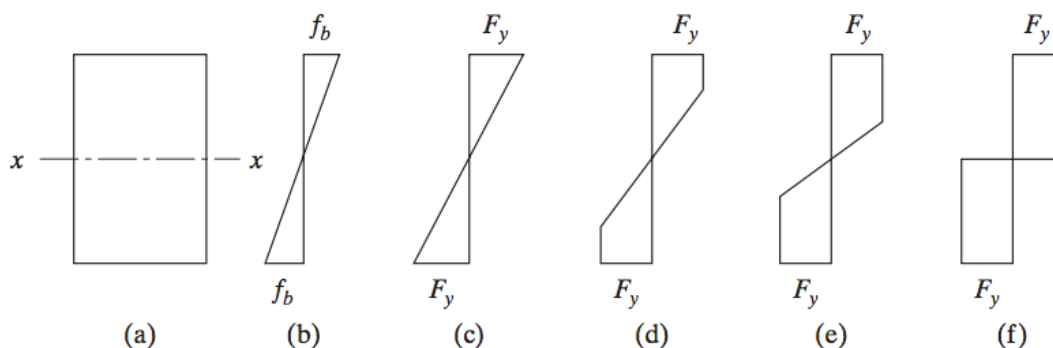
Las fibras ubicadas sobre el eje neutro se encuentran a compresión, es decir se acortan. De manera contraria las fibras ubicadas debajo del eje neutro se encuentran a tracción, es decir se alargan. Las fibras que se encuentran en el plano del eje neutro no sufren deformación. Esto genera una distribución de esfuerzos como se muestra en la figura 2. El eje neutro se encuentra en el centro de gravedad de la sección.



**Figura 2.** Distribución de esfuerzos.

Fuente: (Duque, 2003)

Todos los materiales estructurales presentan un grado de elasticidad o límite elástico, la deformación desaparece al suprimir las fuerzas externas aplicadas (Timoshenko, 1968). Si a una viga se ejerce un momento de flexión determinado, su esfuerzo varía linealmente a partir del eje neutro hasta las fibras extremas como se muestra en la parte (b) de la figura 3.

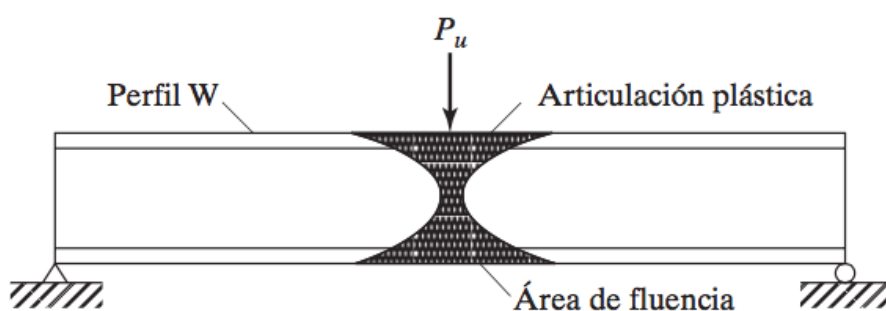


**Figura 3.** Distribución de esfuerzos.

Fuente: (Williams, 2011)

A medida que se incrementa el momento, se mantiene la variación lineal del esfuerzo hasta alcanzar el límite de fluencia en las fibras extremas (figura 3 parte (c)). El momento necesario para alcanzar el límite de fluencia en dichas fibras se lo denomina *Momento de Fluencia*. Al incrementar el momento más allá de su valor de

fluencia las fibras más alejadas del eje neutro comienzan a plastificarse, es decir alcanzan el esfuerzo de fluencia, hasta llegar a plastificarse totalmente (figura 3 parte (f)). En este punto se alcanza la distribución plástica total y se forma una articulación plástica (figura 4), a este valor de momento se denomina *momento plástico*. Cualquier momento adicional aplicado causará la rotación de la viga (McCormac & Csernak, 2013).



**Figura 4.** Articulación plástica.

Fuente: (McCormac, 2013)

La fuerza que es capaz de soportar la viga está influida directamente por la forma de la sección y el esfuerzo de fluencia que posee el material. El módulo elástico por su parte relaciona el momento de inercia de la viga con la distancia del eje neutro hasta las fibras más alejadas como se muestra en la ecuación 4.

$$S = \frac{I}{c} \quad (4)$$

El momento de fluencia depende directamente del esfuerzo de fluencia  $F_y$  del material y del módulo elástico con respecto al eje mayor de la sección  $S_x$  como se muestra en la ecuación 5.

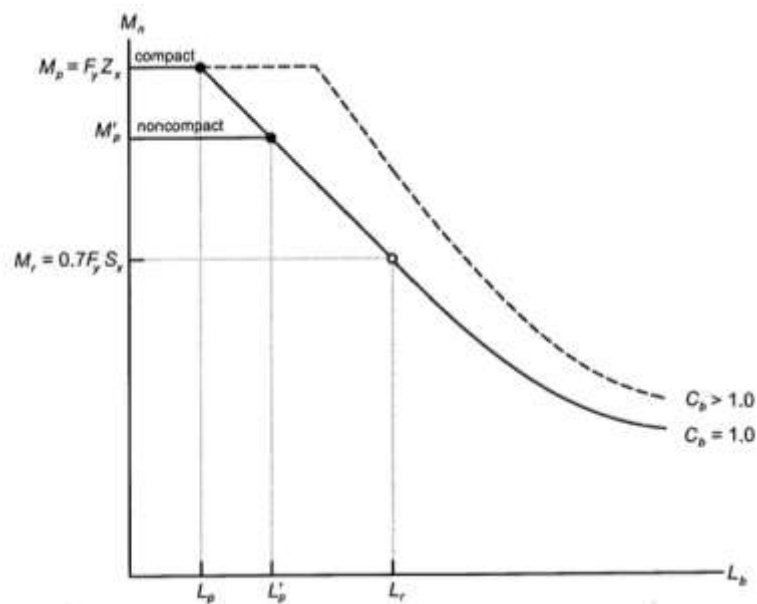


$$M_y = F_y S_x \quad (5)$$

### 2.1.1 Sección Armada.

Para el diseño de vigas armadas se especifica que el peralte  $d$  de la viga debe encontrarse entre los valores de  $L/10$  y  $L/12$ , donde  $L$  es la distancia entre apoyos. De la misma manera, el ancho del patín  $b_f$  debe estar entre  $h/3$  y  $h/5$ , donde  $h$  es la altura del alma de la viga (Williams, 2011).

Los patines o almas delgadas de un miembro pueden llegar a pandearse localmente, mucho antes de que el pandeo total del miembro ocurra (McCormac & Csernak, 2013). La especificación AISC 360 clasifica a las secciones como compactas para valores menores a  $L_p$ , no compactas para valores entre  $L_p$  y  $L_r$ , y esbeltas para valores mayores a  $L_r$ , como se indica en la figura 5. Una sección compacta puede desarrollar una articulación plástica antes de que el miembro falle por pandeo local.



**Figura 5.** Secciones de vigas compacta, no compacta y esbelta.

Fuente: (AISC, 2011)

Para que una sección se clasifique como compacta sus patines deben estar conectados totalmente al alma de forma continua, o las relaciones de esbeltez del alma y los patines deben ser menores a los presentados en la tabla B4.1b del Manual de la AISC (Anexo A) enlistadas a continuación. La relación de esbeltez de patines se determina a partir de la ecuación 6.

$$\lambda_f = \frac{b_f}{t_f} \quad (6)$$

Para patines simétricos de secciones tipo I el patín es compacto si cumple la relación de la ecuación 7.

$$\lambda_f \leq 0,38 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (7)$$

De forma similar el patín se considera no compacto si se cumple la relación de la ecuación 8.

$$0,38 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \leq \lambda_f \leq 1 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (8)$$

En el mismo sentido, si la relación de esbeltez de un patín es mayor al valor de la ecuación 9 se lo considera esbelto.

$$\lambda_f \geq 1 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (9)$$

Por otro lado, la esbeltez de almas según la especificación AISC está definida por la ecuación 10. Para que un alma se considere como compacta, no compacta y esbelta deben cumplir las relaciones enlistadas a continuación tomadas de la tabla B4.1b del Manual de la AISC (Anexo B), donde  $h$  es la altura del alma y  $t_w$  es el espesor de la misma.

$$\lambda_w = \frac{h}{t_w} \quad (10)$$

Para vigas de patines simétricos de sección tipo I, el alma es compacta si cumple la relación de la ecuación 11.

$$\lambda_w \leq 3,76 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (11)$$

De forma similar el alma se considera no compacta si se cumple la relación de la ecuación 12.

$$3,76 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \leq \lambda_w \leq 5,70 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (12)$$

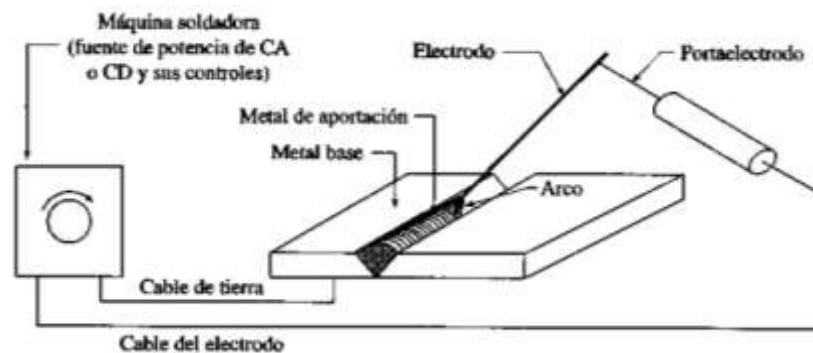
En el mismo sentido, si la relación de esbeltez del alma es mayor al valor de la ecuación 13 se lo considera esbelto.

$$\lambda_w \geq 5,70 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (13)$$

## 2.2 Soldadura de arco.

El proceso de soldadura de arco es imprescindible para el actual estudio ya que se lo utilizará en la fabricación de vigas de sección armada, y vigas con atiesadores transversales.

La unión permanente entre dos metales se consigue a partir del calor aportado por el arco eléctrico, la figura 6 muestra el esquema de un circuito de soldadura de arco. El calor aportado por el arco sobrepasa los 3000°F, lo que es suficiente para cambiar al metal a su estado líquido, y también aportar material desde el electrodo. Al enfriarse se obtiene una mezcla de los dos metales (Vinnakota, 2006).

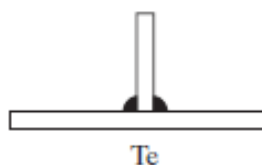


**Figura 6.** Circuito de soldadura de arco

Fuente: (Vinnakota, 2006)

### 2.2.1 Soldadura de filete.

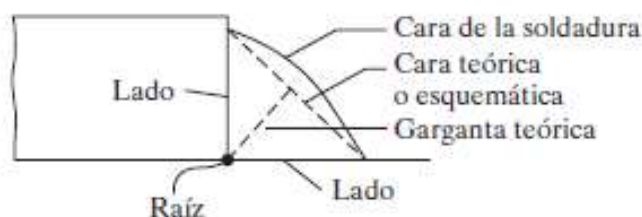
Son aquellas que se traslapan una sobre otra, además se utiliza en juntas “te” como se muestra en la figura 7. Esta soldadura es de uso económico ya que necesita poca preparación de sus partes a conectar.



**Figura 7.** Junta tipo te

Fuente: (McCormac, 2013)

Las pruebas han demostrado que la soldadura de filete resiste más a tensión y a compresión, es por esto que los esfuerzos determinantes en estas soldaduras se estipulan a partir de sus esfuerzos de corte. Las soldaduras de filete llevadas a la ruptura, con cargas paralelas fallan con cortes de aproximadamente  $45^\circ$ , es por esta razón que se supone su resistencia igual al esfuerzo de corte por el área teórica de la garganta de soldadura. Para un filete de  $45^\circ$  o de lados iguales, el grueso de la garganta es 0.707 veces el tamaño de la soldadura (McCormac, 2013). Ver figura 8.



**Figura 8.** Superficie del cordón de soldadura

Fuente: (McCormac, 2013)

### 2.2.2 Requisitos del AISC.

Para el diseño de juntas soldadas la especificación AISC toma los requerimientos del código AWS D1.1 con ligeras modificaciones especificadas en la sección J2. El

tamaño de filete mínimo recomendado según el espesor del material base más delgado de la junta se presenta en la figura 9.

Espesor del material de la parte unida más delgada, plg (mm)	Tamaño mínimo de las soldaduras de filete, <sup>[a]</sup> plg (mm)
Hasta $\frac{1}{4}$ (6) inclusive	$\frac{1}{8}$ (3)
Mayor de $\frac{1}{4}$ (6) hasta $\frac{1}{2}$ (13)	$\frac{3}{16}$ (5)
Mayor de $\frac{1}{2}$ (13) hasta $\frac{3}{4}$ (19)	$\frac{1}{4}$ (6)
Mayor de $\frac{3}{4}$ (19)	$\frac{5}{16}$ (8)

**Figura 9.** Tamaño mínimo de la pierna del cordón de soldadura de filete.

Fuente: (AISC, 2011)

Para determinar la resistencia nominal del cordón de soldadura se utiliza la Tabla J2-5 de la especificación AISC. La figura 10 muestra la resistencia nominal de soldaduras de filete incluyendo filetes en los agujeros y ranuras.

Tipo y dirección de la carga en relación con el eje de la soldadura	Metal pertinente	$\phi$ y $\Omega$	Resistencia nominal ( $F_{nBM}$ o $F_{nw}$ ) klb/plg <sup>2</sup> (MPa)	Área efectiva ( $A_{BM}$ o $A_{we}$ ) plg <sup>2</sup> (mm <sup>2</sup> )	Nivel de resistencia requerido del metal de aportación <sup>[a][b]</sup>
<b>SOLDADURAS DE FILETE INCLUYENDO FILETES EN LOS AGUJEROS Y RANURAS ASÍ COMO JUNTAS ESVIAJADAS</b>					
<b>Cortante</b>	Base	Regido por J4			Se permite metal de aportación con un nivel de resistencia igual o menor que el metal de aportación compatible.
	Soldadura	$\phi = 0.75$ $\Omega = 2.00$	$0.60 F_{EXX}$	Véase J2.1a	
<b>Tensión o compresión</b> Paralela al eje de la soldadura	No es necesario considerar tensión o compresión en partes unidas en sentido paralelo a la soldadura para el diseño de las soldaduras que unen a las partes.				

**Figura 10,** Resistencia nominal de soldadura de filete

Fuente: (AISC, 2011)

McCormac recomienda que para aceros con valores de  $F_y$  entre  $[36 - 60] \frac{klb}{in^2}$ , se utilice un electrodo de resistencia mínima de  $70 \frac{klb}{in^2}$ . La resistencia de diseño de una

soldadura, se determina de acuerdo al estado límite de fractura mediante la ecuación 14 obtenida de la ecuación J2-3 de la especificación AISC.

$$R_n = F_{nw} * A_{we} \quad (14)$$

Donde:

$F_{nw}$ : Esfuerzo nominal de soldadura,  $in^2$

$A_{we}$ : Área efectiva de la soldadura,  $in^2$

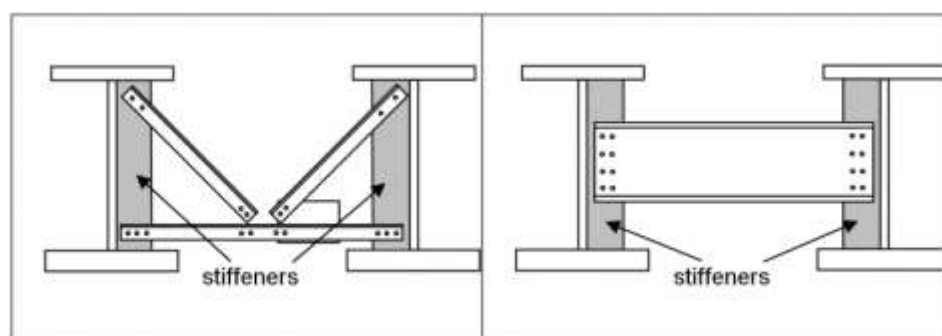
### 2.3 Atiesadores.

Los atiesadores son placas soldadas al alma y al patín de una viga, usualmente utilizados en puentes, en prestaciones donde se requieren altas cargas, lo que representa un gran peralte en las vigas (Hendy & Iles, 2015). Desde los años 30 se conoce que los atiesadores realizan un aporte a partir de la zona crítica de cortante del alma, sin embargo, no fue sino hasta los años 50 que este fenómeno fue investigado apropiadamente. A partir de allí se realizaron múltiples estudios lo que provocó la aparición de dos teorías, la teoría de tensión de Rockey y la teoría de rotación de campo de Höglunds. La teoría de Rockey coloca una mayor demanda en los atiesadores de lo que lo hace la de Höglunds (Hendy & Presta, 2008).

La teoría de Rockey sugiere que los atiesadores transversales cumplen dos funciones principales. La primera, incrementar la resistencia crítica al cortante en la zona elástica del alma. La segunda, actuar como armadura creando una tensión diagonal, generada en el alma, al ésta exceder la carga crítica (momento plástico). La teoría de Höglunds por su parte no requiere que el atiesador soporte ninguna carga adicional a la carga de tensión generada en el colapso de los patines (Hendy & Presta, 2008). Según Hendy la teoría de Rockey describe de mejor manera el comportamiento

y las fuerzas ejercidas no solo de los atiesadores sino también del conjunto, por esto que se va a utilizarla como base para el estudio.

Existen dos aplicaciones principales para los atiesadores. La primera, como lo especifica el manual de la AISC, es evitar el pandeo lateral torsional y el pandeo local provocado en patines y almas esbeltas. La segunda es la conexión de vigas transversales como se muestra en la figura 11.

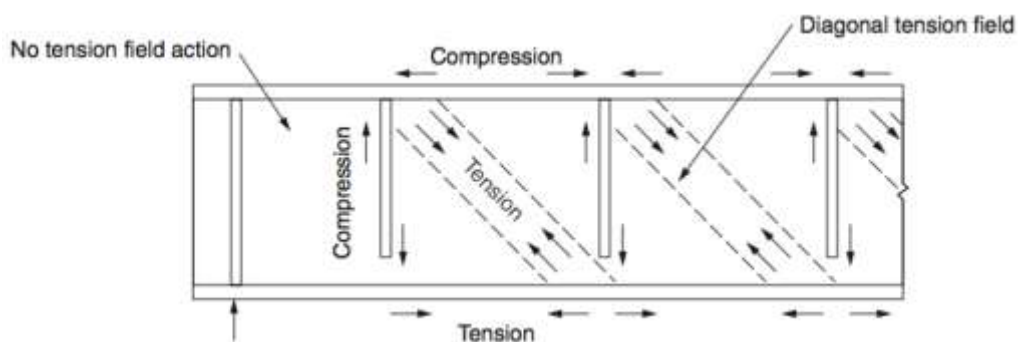


**Figura 11.** Atiesadores utilizados como conectores.

Fuente: (Hendy & Iles, 2015)

Para el diseño de perfiles armados, la AISC y el Eurocode consideran que los patines trabajan puramente a compresión, mientras que el alma trabaja puramente a cortante y que los atiesadores aportan solamente en la resistencia al cortante del alma. Según Williams, una sección con atiesadores al alcanzar el límite de cortante que soporta el alma, se comporta similar a una armadura. Esto genera tensiones diagonales similares a las celosías, como se muestra en la figura 12. De esta forma se obtiene una mejor distribución de esfuerzos en el alma, evitando el pandeo lateral torsional. Esta consideración es la de la teoría del campo de tensión de Rockey.





**Figura 12.** Distribución de tensiones viga con atiesadores.

Fuente: (Williams, 2011)

Las conexiones soldadas no son secciones críticas en el conjunto, por lo que una conexión de filete es suficiente para proporcionar la resistencia requerida. Para la conexión el Eurocode recomienda realizar primero la soldadura del alma al atiesador, seguido de la conexión a los patines. La conexión al patín superior es la que se encuentra mayormente cargada, si no existe conexión al patín inferior.

La máxima resistencia necesaria en el atiesador debe permitir que la viga llegue a plasticidad, aun cuando esto no es posible, el pandeo por cortante del alma logra un incremento. La falla final se produce por el arrugamiento del alma lo que transfiere ciertas cargas a los atiesadores, por lo que se obtiene un incremento en la resistencia al cortante (Hendy & Iles, 2015).

### 2.3.1 Tipos de atiesadores.

Existen atiesadores transversales y longitudinales. Los atiesadores transversales son placas soldadas de forma transversal al alma de las vigas, Hendy e Iles en su artículo “Guidance notes on best practice in steel bridge construction” señalan dos tipos de atiesadores transversales de soporte, que se encuentran ubicados en los apoyos e intermedios distribuidos a lo largo de la viga. Se especifica también que son generalmente utilizados a ambos lados del alma, sin embargo, esto no es restringido. Es importante considerar la excentricidad resultante en el conjunto al ser utilizados en un solo lado.

Por su parte, los atiesadores longitudinales son placas soldadas a lo largo del eje axial de la viga que al igual que los atiesadores transversales aportan resistencia al cortante del alma, sin embargo, no son comúnmente utilizados en la construcción salvo cuando se tiene una sección tipo cajón, en puentes de gran tamaño.

#### **2.3.1.1 Atiesadores de soporte.**

Los atiesadores de soporte son atiesadores transversales ubicados en los apoyos de la viga. Resisten las cargas en los apoyos y el momento flexionante provocado por las cargas axiales en las vigas. Para resistir estas cargas se debe tomar en consideración las conexiones de los mismos. De la misma manera, se debe considerar el incremento de las fuerzas axiales producidas por ejemplo por contracción o expansión térmica lo que incrementa los valores de momento flexionante en la viga. Los atiesadores de soporte son generalmente, soldados de patín a patín para que de esta forma se transfieran el mayor porcentaje de cargas posible.

#### **2.3.1.2 Atiesadores intermedios.**

Por otra parte los atiesadores intermedios son placas soldadas al alma a cierta distancia entre ellas, formando pequeños paneles, los cuales permiten la distribución de tensiones como se identificó en la figura 12. La distancia entre los atiesadores

depende del diseñador, sin embargo, en la práctica es común utilizar el valor de la altura del alma para su separación.

Estos atiesadores actúan en el momento que el alma llega a plastificarse evitando el pandeo lateral torsional y local del alma, generalmente en almas esbeltas, por lo que la AISC especifica, que no es necesario su uso en vigas donde la relación de esbeltez del alma es menor a la especificada en la ecuación 15, debido a que no se presentará pandeo lateral torsional en la viga, y llegará a plasticidad sin necesidad de éstos. Altas relaciones entre la distancia de atiesadores  $a$  y la altura del alma pueden provocar una baja resistencia del alma a cortante.

$$\frac{h}{t_w} \leq 2,46 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (15)$$

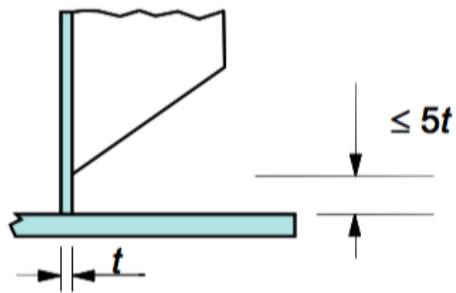
### 2.3.2 Geometría de atiesadores.

Una geometría generalmente utilizada en atiesadores intermedios es soldada al patín superior y al alma, con un chaflán en su parte inferior, como se muestra en las figuras 13 y 14, para facilitar tratamientos de protección del acero. Hendy e Iles especifican una distancia entre el borde inferior del atiesador y el patín inferior, menor o igual a 5 espesores del alma.



**Figura 13.** Atiesador con chaflán.

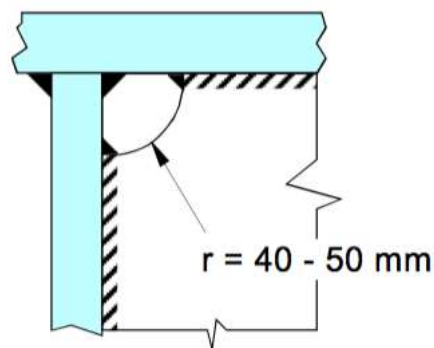
Fuente: (Hendy & Iles, 2015)



**Figura 14.** Atiesador con chaflán.

Fuente: (Hendy & Iles, 2015)

Para que las cargas sean transferidas de manera adecuada y se evite la concentración de esfuerzos, es necesario que el atiesador evite la soldadura, por lo que se utiliza un agujero con un radio no menor a 40mm como se muestra en la figura 15. Sin embargo, chaflanes a 45° son mayormente utilizados debido a su facilidad de fabricación y conexión.



**Figura 15.** Agujero de ratón.

Fuente: (Hendy & Iles, 2015)

### 2.3.3 Consideraciones de diseño.

Existen dos factores fundamentales a tomar en cuenta en el diseño de atiesadores, su geometría y su espaciamiento. Según la sección G.2 de la especificación AISC para que un atiesador no falle al aplicarse la carga crítica, su inercia debe ser mayor al factor especificado en la ecuación 16, donde  $b$  es el menor valor entre la altura del alma  $h$  y el espaciamiento entre atiesadores  $a$ , y  $t_{st}$  es el espesor del atiesador. El factor  $j$  se encuentra especificado en la ecuación 17 siendo  $a$ , la distancia entre atiesadores y  $h$  la

altura del alma. El valor de  $j$  debe ser mayor a 0.5. La inercia del atiesador depende de su espesor y de su altura.

$$I_{st} \geq b t_{st} j \quad (16)$$

$$j = \frac{2.5}{\left(\frac{a}{h}\right)^2} - 2 \quad (17)$$

Por su parte el Eurocode proporciona dos consideraciones a tomar en cuenta para garantizar su resistencia especificada en las ecuaciones 18 y 19, donde  $a$  es la distancia entre atiesadores,  $d$  es el peralte de la viga y  $t$  es el espesor del alma.

$$I_{st} \geq \frac{1.5 d^3 t^3}{a^2} \quad \text{si} \quad \frac{a}{d} < \sqrt{2} \quad (18)$$

$$I_{st} \geq 0.75 d t^3 \quad \text{si} \quad \frac{a}{d} \geq \sqrt{2} \quad (19)$$

Por otra parte el manual de la AISC utiliza la tabla 3.16a (Anexo B), para calcular la resistencia al cortante de atiesadores, en donde se restringen los valores a una relación de esbeltez  $h/t_w$  mayor a 60 y una relación, espaciamiento altura de atiesador  $a/h$  menor a 3.

### 2.3.4 Estado del arte.

Los últimos estudios realizados en atiesadores se centran en la verificación de las teorías existentes para su diseño ya que son elementos utilizados usualmente en la construcción, especialmente de puentes. Los estudios de su comportamiento no llegaron sino hasta los años 50. A partir de allí se consideraron dos teorías las cuales se aplican hasta el día de hoy.

Por esto que Hendy y Presta, en su artículo “Transverse web stiffeners and shear moment interaction for Steel plate girder bridge” proponen un estudio del comportamiento de vigas con atiesadores transversales a flexión y cortante mediante el análisis por elementos finitos. Consideran vigas simétricas de alma esbelta con y sin fuerzas axiales. Analizan también, el comportamiento del alma al incrementar la carga, a la carga de pandeo del alma y comparan las teorías antes mencionadas. De la misma forma, analizan las cargas que soportan los atiesadores y la relación de momento y cortante que son ejercidas en los mismos. Finalmente, compararan el comportamiento de estos. En esta investigación, se obtuvo que en ningún caso la falla se dio en el atiesador utilizando la resistencia del atiesador igual o mayor a la del alma. Las fallas se localizaron en los paneles del alma, mientras que la predicción proporcionada por el Eurocode fue segura. De la misma forma, la relación momento – fuerza cortante propuesta por EN 1993-1-5 resultaron ser muy conservadoras obteniendo una mayor resistencia en el atiesador de la esperada. Por último, se concluye que la teoría de Höglund para el cálculo de la resistencia del atiesador describe de mejor manera el comportamiento de éstos.

Otro estudio representativo sobre atiesadores fue realizado por Yoon, donde se investigó el comportamiento de atiesadores intermedios en vigas armadas horizontales y curvas mediante un método de elementos finitos. Yoon propone un estudio de FEA comparando los resultados con los de investigaciones anteriores en el campo, corroborando que la tensión de campo generada en los atiesadores es predominante en el diseño de estos frente a las cargas ejercidas por la deflexión lateral en el alma. Por

esto que el momento de inercia transversal del atiesador es un parámetro de diseño más importante que el área del atiesador.

El estudio en elementos finitos demostró que en ciertos casos es importante tener altos valores de rigidez ya que son necesarios para prevenir el desplazamiento lateral, lo que es consistente con los estudios revisados anteriormente. En este sentido se determinó que las curvas de cortante versus la inercia del atiesador son iguales para secciones con atiesadores a los dos lados del alma como en secciones que poseen el atiesador en un solo lado.

Finalmente, Yoon determina que las consideraciones de las normas de la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) para el diseño de atiesadores poseen una consideración conservadora. En la revisión de la bibliografía se encontró que no existe ningún estudio acerca del uso específico de atiesadores en vigas de sección compacta. Sin embargo, suponemos que el añadir atiesadores incrementa la resistencia de la viga, por lo que se formula la hipótesis de que la resistencia de la viga se vería incrementada.

## **2.4 Vigas compuestas.**

Una viga compuesta es una viga de dos materiales, generalmente acero y hormigón. El hormigón posee una resistencia alta a la compresión mientras que el acero proporciona una muy buena resistencia a las cargas a tracción, por lo que se coloca el hormigón sobre la zona a compresión de la viga. De esta manera, se incrementa la resistencia del conjunto.

Según, McCormac “Cuando una losa de concreto está apoyada sobre vigas de acero y no existen medios para transferir los esfuerzos cortantes entre ambos elementos, el resultado es una sección en la que éstos trabajan por separado”. Para que en una sección compuesta exista la transferencia de esfuerzos debido al alargamiento o compresión de las fibras debe utilizarse elementos externos que trabajen conectando



el conjunto, a éstos elementos se los denomina conectores. Existen diferentes tipos de conectores de canal, de espiral y pernos, siendo éstos últimos los más utilizados por sus buenas prestaciones, economía y su facilidad de adquisición (McCormac, 2013).

La principal ventaja es el incremento de la resistencia de la viga, aprovechando las propiedades de los materiales. De la misma manera contribuye disminuyendo los espesores de piso, un factor importante en edificios altos. En este sentido se obtiene la disminución del costo en muros, plomería, alambrado, ductos, elevadores y cimentaciones.

#### 2.4.1 Consideraciones de diseño de conectores tipo cortante.

Para el diseño de conectores el factor limitante es la fuerza cortante generada entre el hormigón y el acero. En este sentido el Manual de la AISC en la tabla 3-21a (Anexo C) especifica la resistencia de pernos conectores (McCormac, 2013). La AISC especifica que el espaciamiento mínimo entre conectores debe ser de 6 diámetros, mientras que el máximo deberá ser 8 veces el espesor total de la losa. Su recubrimiento de concreto lateral será no menor a 1 in, de la misma manera el espesor de la losa deberá sobresalir 2 in a partir de la cabeza del perno. Para su diseño se determina la resistencia nominal por cortante  $Q_n$  en kilolibras, determinada por la especificación I8.2a del AISC, para un conector embebido en la losa sólida de concreto, mostrada en la ecuación 20.

$$Q_n = 0.5 * A_{sc} * \sqrt{f_c * E_c} \leq A_{sc} * F_u \quad (20)$$

Donde  $f_c$  es la resistencia a la compresión del concreto,  $A_{sc}$  es el área de sección del conector,  $E_c$  es el módulo de elasticidad del concreto y  $F_u$  la resistencia a fluencia del acero del conector. Para calcular el número de conectores necesarios, se determina

la fuerza horizontal en los pernos y se divide para la resistencia de éstos. Según la AISC el espaciamiento entre éstos debe ser uniforme y el número debe ser suficiente para desarrollar el momento máximo.

### 2.4.2 Cálculo del eje neutro de la sección compuesta.

Según Hibbeler, para determinar el eje neutro se utiliza un factor  $n$ , que relaciona los módulos de elasticidad del acero y del concreto, como se muestra en la ecuación 21. Con el objetivo de determinar una sección equivalente del concreto respecto del acero.

$$n = \frac{E_{acero}}{E_{concreto}} \quad (21)$$

Esta transformación es posible dividiendo el área de sección del concreto para el factor  $n$ , sin embargo se debe mantener la altura de esta sección constante, por lo tanto únicamente se modifica la base de esta sección, como se muestra en la ecuación 22.

$$b_1 = \frac{b}{n} \quad (22)$$

Donde  $b$  es la base de la sección del concreto, y  $b_1$  es el nuevo valor de la base de la sección equivalente.

### 2.4.3 Estado del arte.

García y Molina en su estudio “Comportamiento de vigas de sección compuesta con perfiles de acero laminado y losa de concreto empleando conectores de cortante tipo tornillo grado dos” proponen un análisis teórico - experimental determinando características y parámetros de diseño que rigen el comportamiento de vigas compuestas. De la misma manera, estudian los efectos de deslizamiento producidos por la degradación del concreto y las deformaciones en perfiles y conectores, obteniendo como resultados que la inercia efectiva y el módulo elástico de la viga compuesta proporcionan valores menores a los enunciados en la normativa existente.

La resistencia de los conectores al cortante resultó ser 62% mayor a la planteada teóricamente para una distancia de 0,10 m y 13% mayor a con separaciones de 0,30 m. Por otro lado la resistencia de las vigas compuestas resultaron ser en promedio 23% mayor a las propuestas por la teoría. Por lo que se concluye que la metodología de diseño propuesta demuestra ser valedera, ya que proporciona una buena aproximación a la obtenida en los ensayos.

La industria de la construcción se encuentra en constante evolución buscando utilizar desechos como agregados en la misma, reduciendo de esta manera el impacto ambiental que genera. En este sentido, Buzón propone el uso de cuesco como agregado para el hormigón en adoquines, donde obtiene resultados favorables con un reemplazo del agregado del 10% por cuesco, con una resistencia de 6.71 MPa, la cual cumple las especificaciones mínimas necesarias para su aplicación en vías peatonales.

Este proyecto de investigación propone la utilización de atiesadores transversales en vigas tipo I de sección compacta, con la finalidad de determinar una distribución óptima de atiesadores la cual disminuya el esfuerzo generado a flexión por una carga puntual en el centro y simplemente apoyada. Modificando la geometría del atiesador, separación y número, mediante varias simulaciones utilizando herramientas de elementos finitos. Además el proyecto plantea la utilización del cuesco como agregado grueso, sustituyendo parcialmente al ripio, para la fabricación de concreto estándar. Con la finalidad de reutilizar el material de desecho de las plantas de extracción de palma, y así disminuir la contaminación generada, por estas industrias.

## **CAPÍTULO 3**

### **DISEÑO DEL ESTUDIO**

En este capítulo se presenta las consideraciones de diseño, de fabricación, ensayo y simulación para el desarrollo del estudio de las vigas de sección compacta.

#### **3.1 Vigas.**

Existen dos maneras de obtener una viga de sección compacta la primera es seleccionando un perfil laminado con dimensiones estandarizadas y la segunda es armarlo con planchas de acero a través de un proceso de soldadura. En este estudio se realizó el armado de una viga de sección compacta con las mínimas dimensiones propuestas por la norma AISC y también se seleccionó un perfil laminado con dimensiones estandarizadas para posteriormente determinar qué tipo de viga es la óptima para el desarrollo del estudio.

##### **3.1.1 Viga de sección tipo I armada.**

###### **3.1.1.1 Consideraciones de diseño.**

En este estudio, se analizó una viga tipo I de sección compacta, simplemente apoyada con carga puntual en el centro. Debido a que la configuración de esta viga es uno de los elementos más comunes en estructuras se seleccionó como caso de estudio.

El material más utilizado en la industria de la construcción es el acero estructural ASTM A-36, con un valor de esfuerzo de fluencia  $F_y = 250 \text{ MPa}$  y módulo de elasticidad  $E = 200 \text{ GPa}$ , por lo que seleccionó para el estudio. Considerando las dimensiones comerciales de las planchas y pletinas de acero existentes en el mercado, la facilidad de construcción y manipulación en el área de trabajo dentro del laboratorio de resistencia de materiales, se determinó como longitud entre apoyos  $L_b = 2.3 \text{ m}$  y

una longitud total de  $L_T = 2.44 \text{ m}$ , considerando la longitud de las planchas de acero normalizadas. Los ensayos se realizaron en el laboratorio de resistencia de materiales, de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, se utilizó apoyos cilíndricos para obtener el efecto de viga simplemente apoyada. Como elemento para aplicar la carga puntual se utilizó una barra de acero de 2 cm de lado. El pórtico que se utilizó posee una capacidad máxima de 8 Ton. Este utiliza una celda de carga tipo S de capacidad de 10 toneladas, para la toma de medidas de la fuerza que ejerce el pórtico se utilizó un multiplicador de señal marca Omega el que transforma la variación de resistencia presente en la celda de carga hasta un valor de resistencia que se transforma a través de una ecuación obtenida en dicho laboratorio. De manera similar para la toma de datos generados por el strain gauge (galga extensiométrica) de 120 ohmios, y factor de galga 2.02, se utilizó un equipo de medición de deformación unitaria marca Omega que utiliza un factor k de 2.02, estos equipos se muestran en el anexo D.

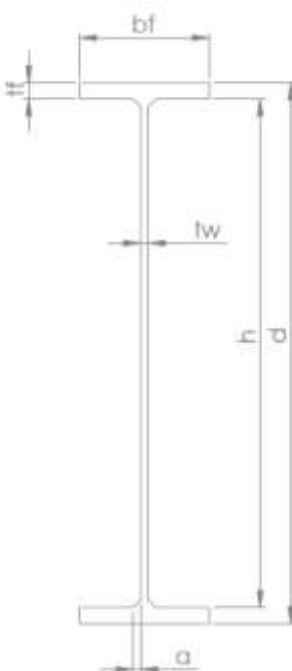
### 3.1.1.2 Sección.

A partir de las ecuaciones del capítulo 2, se determinó que el peralte de la viga debe encontrarse entre un límite superior  $d_s = 230 \text{ mm}$ , y un límite inferior  $d_i = 191.67 \text{ mm}$ . Partiendo de estos valores, se seleccionó una altura del alma  $h = 200 \text{ mm}$ . La relación máxima de esbeltez del alma para que la sección cumpla las condiciones de viga compacta, según la ecuación 10 del capítulo 2 es  $\lambda_{w,m} = 106.35$ . A partir de ésta relación y su altura antes seleccionada se determinó un espesor mínimo  $t_{w,n} = 1.88 \text{ mm}$ . Considerando el alcance de la norma AWS D1.1 y las dimensiones comerciales existentes en el mercado se seleccionó un espesor del alma  $t_w = 3 \text{ mm}$ , con lo que se obtuvo un valor de esbeltez de  $\lambda_w = 66.67$ , validando de esta manera que estas dimensiones corresponden a una sección compacta.

Del mismo modo la especificación de la AISC recomienda el límite superior de ancho del patín  $b_{f,s} = 66.67 \text{ mm}$ , y su límite inferior  $b_{f,i} = 40 \text{ mm}$  descritos en el capítulo 2. Se consideró estos valores y las dimensiones comerciales existentes, por lo

que se seleccionó un valor de  $b_f = 50.8 \text{ mm}$  (2 in). Según la ecuación 7, la relación máxima de esbeltez del patín es  $\lambda_{f,m} = 10.75$ , por consiguiente se determinó un espesor mínimo del patín  $t_{f,n} = 4.73 \text{ mm}$ , por lo que se optó por un espesor  $t_f = 6.35 \text{ mm}$  ( $\frac{1}{4}$  in). Con éstos parámetros, se obtuvo una relación de esbeltez del patín de  $\lambda_f = 8$ , validando que el patín posee una sección compacta.

Finalmente a partir de las dimensiones seleccionadas, se obtuvo un valor del peralte  $d = 212.70 \text{ mm}$  como se muestra en la figura 16, lo que ubicó al peralte dentro de las recomendaciones de la AISC para una viga compacta. (Anexo E).



**Figura 16.** Sección de viga tipo I armada.

En la tabla 1, se muestran los valores de las dimensiones finales de la sección de la viga tipo I armada.

**Tabla 1.**

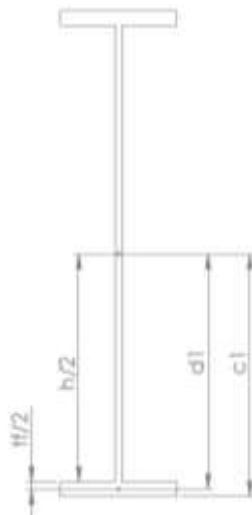
Dimensiones de sección viga tipo I armada.

**Viga tipo I armada**

Nomenclatura	Descripción	Valor	Unidades
$b_f$	Ancho del patín	50,8	mm
$t_f$	Espesor del patín	6,35	mm
$h$	Altura del alma	200	mm
$t_w$	Espesor del alma	3	mm
$d$	Peralte de la viga	212,70	mm

**3.1.1.3 Capacidad de la viga.**

A continuación, se determinó la resistencia máxima en la zona de fluencia la cual depende del material y de la geometría de la sección. Las propiedades de la sección se calcularon a partir de las dimensiones presentadas en la figura 17, cuyos valores están listados en la tabla 2.

**Figura 17.** Sección viga tipo I armada.



**Tabla 2.**

Calculo de inercia de la sección de la viga armada

Descripción	Nomenclatura	Valor	Unidades
Distancia desde el nivel de referencia hasta el centro de gravedad del patín	$d_1$	103,18	mm
Distancia desde el nivel de referencia hasta la fibra las alejada	$c_1$	106,35	mm
Área del patín	$A_f$	322,58	mm <sup>2</sup>
Área del alma	$A_w$	600	mm <sup>2</sup>
Inercia del alma	$I_1$	$2 * 10^6$	mm <sup>4</sup>
Inercia del patín	$I_2$	3,44 * 10 <sup>6</sup>	mm <sup>4</sup>
Inercia total de la sección de la viga	$I_x$	8,87 * 10 <sup>6</sup>	mm <sup>4</sup>

#### 3.1.1.4 Cálculos.

El módulo elástico  $S_x$  se calculó partiendo de la ecuación 4, obteniendo un valor de  $S_x = 8.34 * 10^4 \text{ mm}^3$ .

$$S_x = \frac{I_x}{c} = \frac{8.87 * 10^6 \text{ mm}^4}{106.35 \text{ mm}} = 8.34 * 10^4 \text{ mm}^3$$

En el mismo sentido, para el cálculo del momento de fluencia, se consideró la resistencia a fluencia del material  $F_y$ , y el modulo elástico  $S_x$ . En consecuencia, se obtuvo un valor de momento  $M_y = 20.70 \text{ kN} * \text{m}$ .

$$M_y = F_y \cdot S_x = 248 \text{ MPa} \cdot 8.34 \cdot 10^4 \text{ mm}^3 = 20.70 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Partiendo de la ecuación 2 para una viga simplemente apoyada, se determinó la carga necesaria para alcanzar la zona de fluencia del material, obteniendo un valor de  $P_y = 36 \text{ kN}$  ó (3.67 Ton).

$$P = \frac{M_y \cdot 4}{L} = \frac{20.70 \text{ kN} \cdot \text{m} \cdot 4}{2.3 \text{ m}} = 36 \text{ kN}$$

### 3.1.1.5 Soldadura.

Para el armado de la viga se seleccionó una soldadura de arco con un proceso GMAW debido a las prestaciones que nos brinda en la fabricación en taller, obteniendo un cordón de soldadura limpio ya que no produce excesiva escoria y optimizando los tiempos de fabricación.

Para el diseño del cordón se seleccionó el tipo de soldadura, el tamaño de la pierna y el electrodo adecuado, obteniendo la resistencia nominal del cordón. El tipo de soldadura seleccionado para el proceso, fue MIG por la economía que éste presenta. En cuanto al tamaño de la pierna la figura 9 muestra los tamaños mínimos para soldadura de filete, con respecto al menor espesor del material base. En consecuencia se determinó una pierna del cordón de soldadura con un valor de  $w = \frac{1}{8} \text{ in}$ , para un espesor del metal base de hasta 6 mm.

Finalmente se seleccionó un electrodo de alambre sólido ER-70S6, debido a que se obtiene una soldadura con menor salpicadura, el arco producido es más estable, se obtiene una óptima apariencia del cordón y proporciona alimentación y estabilidad de arco superior. La figura 9 muestra la fórmula para el cálculo de la resistencia nominal del cordón de soldadura dada por la ecuación 23.

$$R_n = 0.6 * F_{Exx} \quad (23)$$

Con el fin de reducir los esfuerzos residuales producidos por la soldadura se utilizó cordones intermitentes a lo largo de toda la junta tipo filete, ya que cumple con la sección 2.1.1 de este documento. Las dimensiones se establecieron según la especificación del AISC, sección E6.2, la cual recomienda el espaciamiento máximo entre soldaduras "a" mostrado en la ecuación 24, considerando las propiedades mecánicas, y el menor espesor del material base. A partir de la ecuación 24 se determinó que el espaciamiento máximo es de 64 mm.

$$a = 0.75 * (\text{espesor menor}) * \sqrt[2]{E/Fy} \quad (24)$$

De la misma manera la sección E6.2 del AISC establece que la longitud efectiva intermitente  $L_{iw}$ , no debe ser menor a cuatro veces el tamaño de la pierna  $w$  o un valor mínimo de 38 mm. Por lo tanto la longitud efectiva intermitente es  $L_{iw} \geq 38 \text{ mm}$ . Con estas consideraciones se determina que la junta tipo filete se conformó por 15 cordones intermitentes separados 64 mm entre ellos, con una longitud de 100 mm en los cordones intermedios y 122 mm en los cordones extremos, de tal manera que la longitud real de soldadura será la suma de todos los cordones intermitentes  $L = 1544 \text{ mm}$ .

La especificación (J2.2b) del AISC, establece que, si la longitud real de soldadura  $L$ , supera en 100 veces al tamaño de su pierna  $w$ , es necesario determinar una longitud efectiva  $L_e$ , debido a la variación de esfuerzos a lo largo de la soldadura. La longitud efectiva  $L_e$ , se determina multiplicando la longitud real  $L$ , por el término  $\beta$ , de acuerdo con la siguiente expresión:

$$\beta = 1.2 - 0.002 * (1/w) \leq 1.0.$$

A continuación se determinó que el valor de la longitud real  $L = 1544 \text{ mm}$  ( $60.8 \text{ in}$ ), es menor que 100 veces su pierna  $w = \frac{1}{8} \text{ in}$ . Partiendo de esta afirmación se determinó el valor de longitud efectiva.

$$L_e = L * \beta = 13.81 \text{ in} \text{ (350.77 mm)}.$$

La resistencia nominal del cordón de soldadura, aplicando LRFD, está dada por la siguiente expresión  $R_n = \phi * 0.6 * F_{nBM} * A_{BM}$ . Por consiguiente la resistencia en la soldadura es de 38.44klb (19.22Ton). Este valor asegura que la viga no fallará en la soldadura debido a que las cargas a las que se ensayó son menores. El Anexo F, muestra el plano de fabricación de la viga tipo I armada.

### **3.1.2 Viga de sección tipo I laminada.**

#### **3.1.2.1 Consideraciones de diseño.**

Se seleccionó una viga IPN 200 laminada en caliente por la disponibilidad en el mercado y por poseer un peralte similar al de la viga armada. El material para el estudio fue acero A36 con un valor de esfuerzo de fluencia de  $F_y = 285 \text{ MPa}$  y módulo de elasticidad  $E = 200 \text{ GPa}$ , valores proporcionados por el distribuidor. Con el objetivo de optimizar el uso de éste, se estableció una longitud de 2 m, con una longitud entre apoyos de 1.8 m, obteniendo de esta manera 3 probetas, la primera para validar los resultados obtenidos en las simulaciones de la viga sin elementos adicionales, la segunda para validar los resultados de la simulación de la mejor distribución obtenida tras realizar el estudio de atiesadores y la tercera para verificar el comportamiento de la viga compuesta con reemplazo de agregado grueso por cuesco.

### 3.1.2.2 Sección.

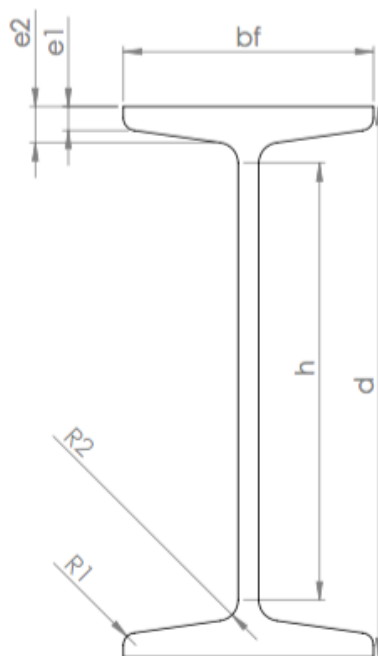
Las propiedades de la sección fueron proporcionadas por su distribuidor y presenta las características mostradas en la figura 18 y la tabla 3.

**Tabla 3.**

Propiedades de sección de viga tipo I laminada

#### Propiedades de la sección

Nomenclatura	Descripción	Valor	Unidades
$t_w$	Espesor del alma	7,5	mm
$t_f$	Espesor medio del patín	8,1	mm
$d$	Altura de la viga	200	mm
$b_f$	Ancho del patín	90	mm
$h$	Altura del alma	159	mm
$I_x$	Inercia en el eje x	2140	cm <sup>4</sup>
$I_y$	Inercia en el eje y	117	cm <sup>4</sup>
$A$	Área	33,4	cm <sup>2</sup>
$S_x$	Módulo elástico en el eje x	214	cm <sup>3</sup>
$r_x$	Radio de giro eje x	8	cm
$r_y$	Radio de giro eje y	1,87	cm
$J$	Módulo de torsión	11,2	cm <sup>3</sup>
$e_1$	Espesor menor del patín	7,5	mm
$e_2$	Espesor mayor del patín	11,3	mm
$r_1$	Radio inferior patín	4,5	mm
$r_2$	Radio superior patín	7,5	mm



**Figura 18.** Dimensiones viga laminada

La relación de esbeltez del alma que presenta la sección es  $\lambda_w = 21.2$  lo que demuestra que es una sección compacta al tener un valor inferior al de la ecuación 7 presentada en el capítulo 2. De manera similar, para el patín se determinó una esbeltez  $\lambda_f = 11.1$ , obteniendo una sección compacta. (Anexo G).

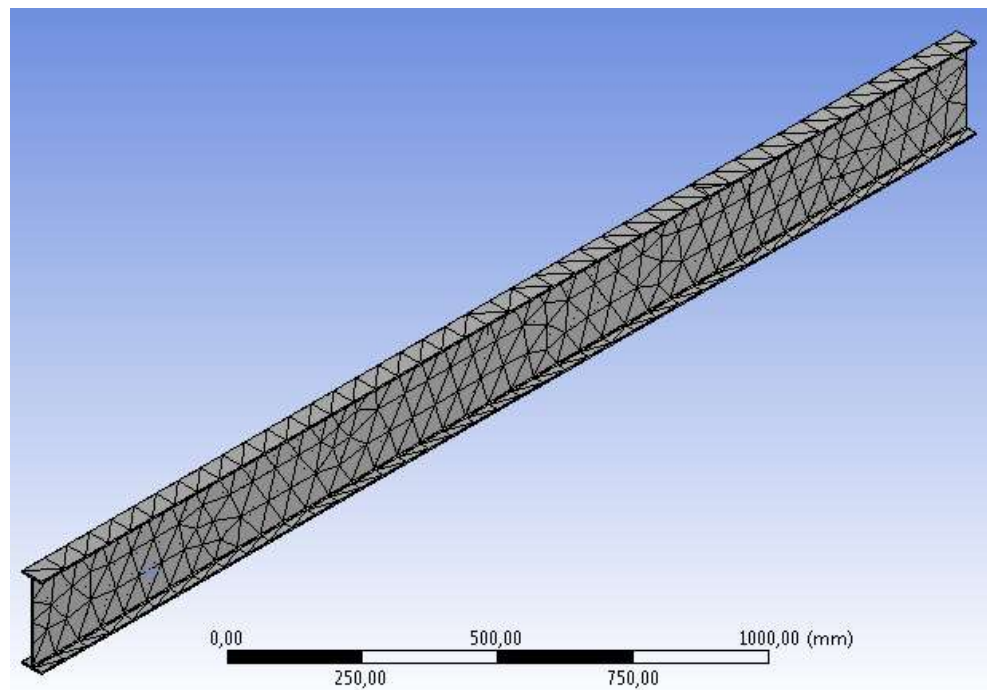
### 3.1.2.3 Capacidad de la viga.

Partiendo de la tabla 3, se obtuvo el módulo elástico en el eje “x”  $S_x$ , con un valor de  $S_x = 214 \text{ cm}^3$ . Considerando la resistencia a fluencia del material  $F_y$ , y el módulo elástico  $S_x$  como lo indica la ecuación (5). Se determinó el momento en la zona de fluencia  $M_y = 60.99 \text{ kN} \cdot \text{m}$ . La carga necesaria para llegar a la zona de fluencia  $P_y$ , se obtuvo a partir de la ecuación (2) presentada en el capítulo 2, con lo que se obtuvo un valor de  $P_y = 135.53 \text{ kN}$  ó (13.82 Ton).

### 3.2 Modelo de elementos finitos.

Para realizar el estudio se generó un modelo computacional en un programa de elementos finitos de una viga simplemente apoyada con carga puntual. Primero se realizó un modelo CAD con las mismas dimensiones que la viga armada y la viga laminada respectivamente, utilizando un software de modelado en 3D. Con la finalidad de posteriormente poder generar las diferentes fuerzas puntuales en el modelo se generaron líneas de partición en las caras superior e inferior de la viga: la primera para colocar la fuerza puntual sobre la cara superior de la viga, la segunda para seleccionar las restricciones de los apoyos puntuales y la última para crear una probeta en la mitad del patín inferior de la viga, en el punto en el que se realizará la medición de los datos con el strain gauge ya que en este punto se presenta el mayor esfuerzo.

Para generar el modelo de elementos finitos en el software inicialmente se cargó como material un acero estructural existente en el mismo y se modificó las propiedades del material a 248 MPa para la viga armada y 285 MPa para la viga laminada. Posteriormente, se importó el modelo CAD al software. Se realizó el mallado con dos restricciones; la primera una restricción del método del mallado lo que varía la geometría que tiene el elemento creado en la malla, en este caso se consideró como geometría un tetraedro. La segunda restricción fue de tamaño del elemento, para de esta manera controlar el número de elementos que se generan en la malla y obtener una malla uniforme en toda la viga, con lo que se obtuvo la malla mostrada en la figura 19.



**Figura 19.** Mallado viga armada

El primer elemento de fuerza que se insertó en el modelo fue la gravedad con una magnitud de  $9,81 \text{ m/s}^2$ . El segundo elemento fue la fuerza puntual sobre la línea de partición ubicada en el centro de la cara superior de la viga. De igual manera se insertó una restricción de desplazamiento en la que se restringe este en el eje transversal “y” y se permite el desplazamiento en los dos ejes restantes “x” y “z”, para de esta forma obtener un modelo de las mismas características del ensayo. Finalmente, para realizar el análisis de los resultados que produce el modelo de elementos finitos, se insertaron 3 probetas en la línea de partición ubicada en la parte inferior de la viga, una para el desplazamiento, la siguiente para el esfuerzo máximo y la última para la deformación unitaria.



### 3.2.1 Viga de sección tipo I armada.

#### 3.2.1.1 Convergencia del mallado.

Con la finalidad de reducir el error existente entre la simulación y los cálculos teóricos realizados al inicio de este capítulo, se determinó la convergencia del mallado simulando con la carga de diseño, disminuyendo el tamaño del elemento y por consiguiente incrementando el número de elementos presentes en el modelo computacional, como se muestra en la figura 20. Se inició con un tamaño de elemento de 120 mm con el que se obtuvo 1261 elementos y un esfuerzo de 235,83 MPa, lo que representa un error entre el programa y el valor teórico de 4,91%.

En este sentido, se obtuvo que a partir de un tamaño de elemento de 60 mm los valores presentan una diferencia no representativa, generando un costo computacional mayor, por lo que se seleccionó éste para realizar el estudio, con el que se obtuvo un valor en el esfuerzo de 241 MPa con 3167 elementos y un error de 2,82% frente a los 248 MPa del valor teórico del material. El error máximo permitido para la simulación es del 5% por lo que el modelo queda validado. La tabla de los valores obtenidos para cada tamaño de elemento se presenta en el Anexo H.

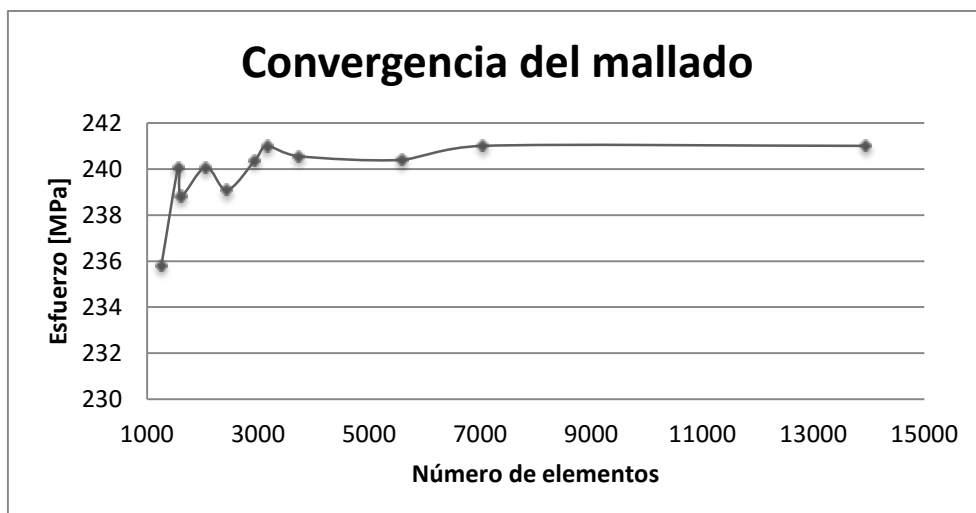
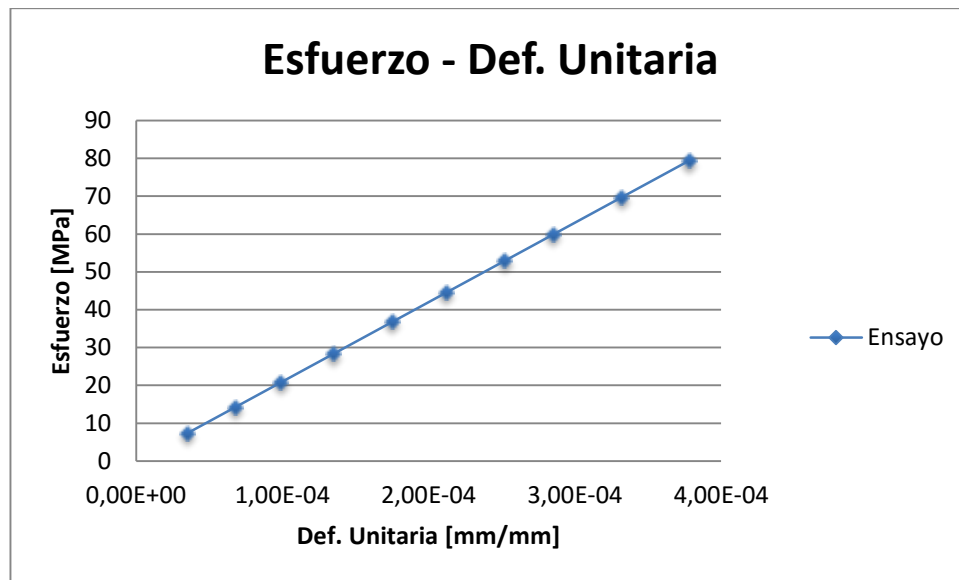


Figura 20. Convergencia del mallado viga armada.

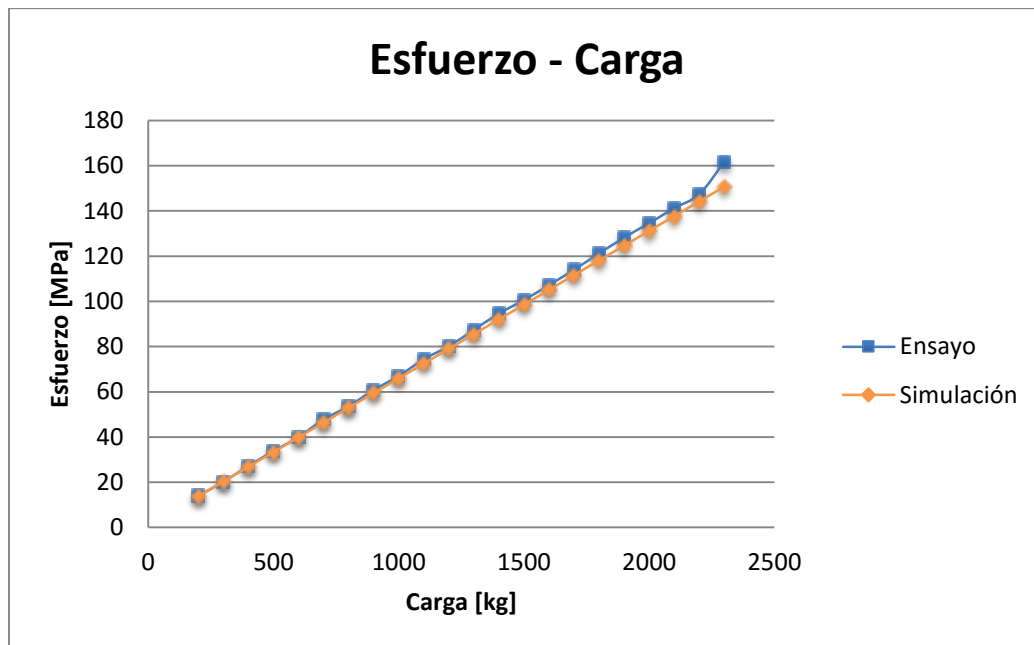
### 3.2.1.2 Validación simulación vs ensayo.

Con el fin de validar los datos obtenidos en la simulación se procedió con el ensayo a flexión de la viga simplemente apoyada y carga puntual en la zona elástica del material, el cual se llevó a cabo en una prensa hidráulica tipo pórtico, del laboratorio de Resistencia de Materiales. El pórtico está provisto de una capacidad máxima de 8 toneladas, además de una consola de control de caudal, para la regulación de potencia. También cuenta con una celda de carga tipo S de 20 klb, que transforma los pulsos eléctricos que genera durante su funcionamiento en valores numéricos que se interpretan mediante la siguiente ecuación:  $y = 1.3597 * x + 3.7605$ . Siendo la variable “x” el valor de la fuerza en amperios que emite la celda de carga, y la variable “y” el valor transformado de esta fuerza en kilogramos. Partiendo de la distribución de esfuerzos de la figura 2, se conoce que el máximo esfuerzo a tensión que sufre la viga se encuentra en el centro de su patín inferior. Por esta razón se colocó un sensor de tensión (strain gauge), para medir la deformación unitaria en esta zona. Para el ensayo se incrementó la carga cada 100 kg hasta alcanzar la carga crítica. En este sentido el ensayo se realizó con las mismas condiciones propuestas en la simulación, realizando la medición de la deformación unitaria en el mismo punto. Inicialmente se aplicó una precarga con un valor de 1000 kg, con la finalidad de que se tensen las fibras del material y se distribuyan mejor los esfuerzos. Se obtuvo una tendencia lineal del material como se muestra en el diagrama esfuerzo deformación unitaria de la figura 21.



**Figura 21.** Diagrama Esfuerzo - Deformación Unitaria ensayo 1000 [kg].

Adicionalmente se realizó un incremento de carga hasta 2300 kg como se muestra en la figura 22, donde se puede observar la validación del modelo computacional vs la prueba experimental realizada, ya que presenta un error promedio del 1,87% y un error máximo del 2,82% hasta los 2200 kg, por lo que se concluyó que el programa otorga valores acordes con la realidad.



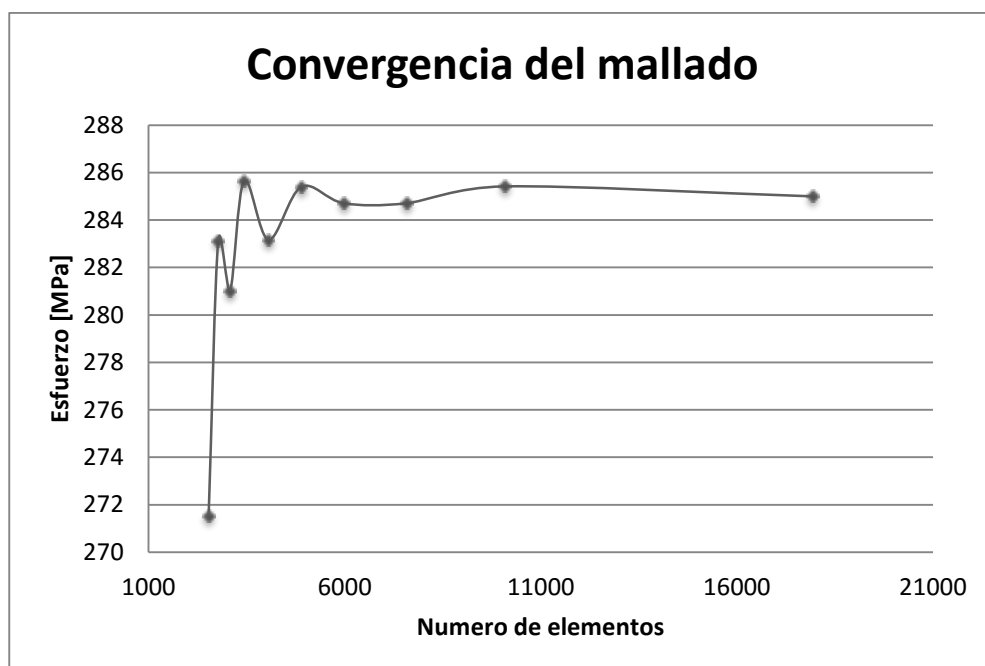
**Figura 22.** Diagrama Esfuerzo – Carga 2300 [kg]

El diagrama Esfuerzo - Carga de la figura 22 presenta una tendencia lineal hasta los 2200 kg, donde se observa un incremento en el esfuerzo y la falla de la viga con una carga mucho menor a la calculada lo que difiere de la simulación que presenta una tendencia lineal hasta el punto elástico del material. Este incremento se debe a una pre deformación en el alma por los esfuerzos residuales que deja el proceso de soldadura en su fabricación. Al existir una deformación inicial en el alma se genera un esfuerzo adicional al aplicar la carga, lo que conlleva a la falla de la viga por torsión, sin haber alcanzado a la carga de fluencia. Este efecto se conoce como  $P - \Delta$ . Tal efecto produce una deformación permanente por una sobrecarga lateral ejercida en un miembro estructural, generada debido a un ángulo de deformación inicial de dicho elemento, al aplicar una carga transversal.

### 3.2.2 Viga de sección tipo I laminada.

#### 3.2.2.1 Convergencia del mallado.

En éste modelo se utilizaron condiciones similares de mallado presentadas para la viga de sección tipo I armada ya que proporcionan una malla uniforme en toda la viga. Se utilizó un valor de esfuerzo de fluencia del material de 285 MPa, valor proporcionados por el fabricante. Con este valor se obtuvo la convergencia del mallado presentada en la figura 23.



**Figura 23.** Convergencia del mallado viga laminada.

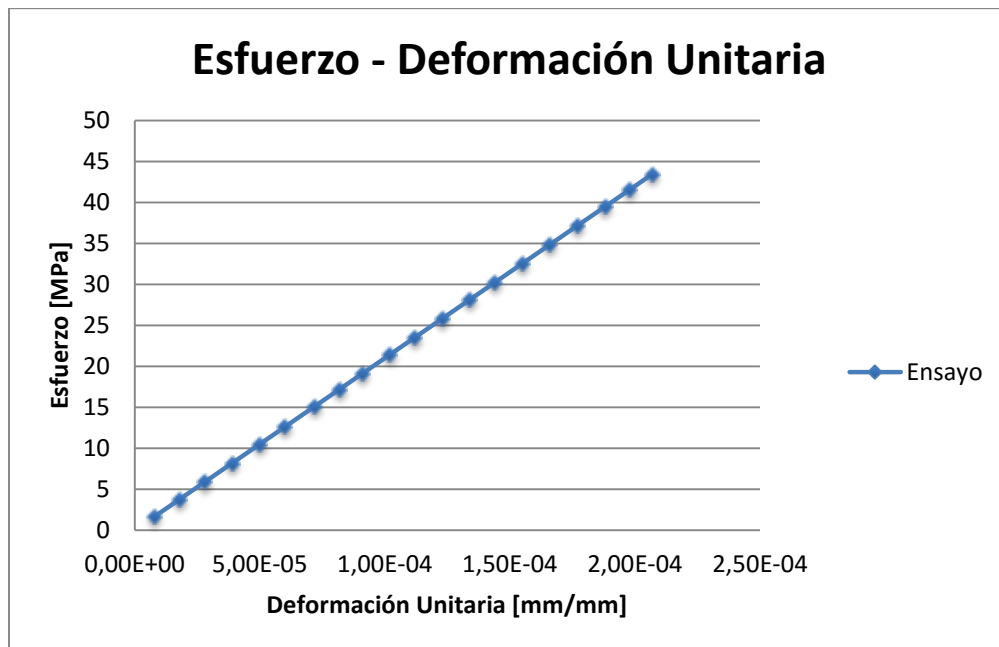
Con la finalidad de reducir el error existente entre la simulación y los cálculos teóricos realizados para la viga laminada, se determinó la convergencia del mallado disminuyendo el tamaño del elemento y por consiguiente incrementando el número de elementos presentes en el modelo computacional, como se muestra en la figura 22. Se inició con un tamaño de elemento de 130 mm con el que se obtuvo 2038 elementos y

un esfuerzo de 269,5 MPa, lo que representa un error entre el programa y el valor teórico de 4,73%.

En este sentido, se obtuvo que a partir de un tamaño de elemento de 60 mm los valores presentan una diferencia no representativa, generando un costo computacional mayor, por lo que se seleccionó éste para realizar el estudio, con el que se obtuvo un valor en el esfuerzo de 284,71 MPa con 4897 elementos y un error de 0,1% frente a los 285 MPa del valor teórico del material. El error máximo permitido para la simulación es del 5% por lo que el modelo queda validado. La tabla de los valores obtenidos para cada tamaño de elemento se presenta en el Anexo H.

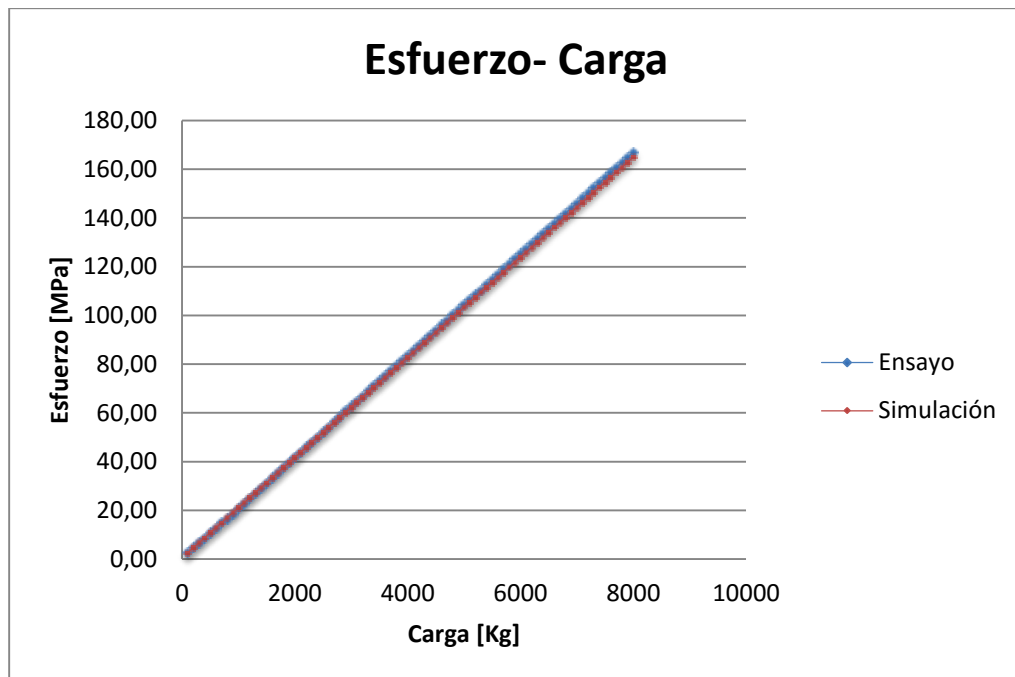
#### **3.2.2.2 Validación simulación vs ensayo.**

Para este ensayo se tomaron las mismas consideraciones de carga, apoyos y toma de datos que en la viga armada, con el objetivo de validar los resultados obtenidos por el modelo de elementos finitos. De la misma manera, se incrementó la carga cada 100kg, con lo que el ensayo se consolidó con las mismas condiciones de la simulación, tomando los valores de la deformación unitaria en el mismo punto. Se aplicó una precarga inicial de 2000 kg. Con lo que se obtuvo una tendencia lineal del material como se muestra en el diagrama esfuerzo – deformación unitaria de la figura 24.



**Figura 24.** Diagrama Esfuerzo - Deformación Unitaria ensayo 2000 [kg].

Además se realizaron 3 ensayos con una carga de 8000 kg obteniendo la figura 25 en donde se presenta el diagrama esfuerzo - carga. El diagrama presenta una tendencia lineal hasta los 8000 kg con variaciones muy pequeñas. Se comparó los valores del ensayo con los obtenidos en la simulación. Se obtuvo un error promedio del 1% y un error máximo entre todos los datos del 3,2% con lo que se comprobó que presentan un porcentaje de error menor al 5% por lo que el modelo computacional es validado y se puede realizar el estudio de los atiesadores partiendo del mismo.



**Figura 25.** Diagrama Esfuerzo – Carga 8000 [kg].

### 3.3 Incremento de la capacidad de las vigas.

En éste estudio para incrementar la capacidad de las vigas se tomaron en cuenta dos consideraciones, por una parte el uso de atiesadores y por otro lado la fundición de hormigón sobre el patín superior, obteniendo una viga de sección compuesta.

#### 3.3.1 Atiesadores.

La especificación AISC restringe el uso de atiesadores a almas esbeltas, cuya relación de esbeltez sea menor a 260. De la misma manera, la sección G2.2 de la especificación AISC afirma que los atiesadores transversales no son necesarios si la relación de esbeltez  $h/t_w$  es menor a 2,46, ya que es una sección compacta y el uso de atiesadores no influye en que la sección pueda o no alcanzar la plasticidad, tampoco aportaría a evitar el pandeo lateral torsional.



Tomando en cuenta estas consideraciones la viga en estudio no presenta las condiciones necesarias para el uso de atiesadores, sin embargo ya que no existe información acerca del uso de atiesadores en vigas de secciones compactas, éste proyecto pretende investigar cual es el comportamiento de éstas vigas dentro de la zona elástica y verificar si esto produce un incremento en su capacidad.

Con la finalidad de determinar una geometría óptima para el atiesador en vigas de sección compacta se tomó como variables el espesor y la altura del atiesador. Para la altura se partió de la consideración propuesta por Hendy e Iles que plantean una separación entre el patín inferior y el borde del atiesador igual a 5 espesores del alma para este caso de 120 mm, como se muestra en la figura 14, a partir de este valor se incrementó la altura del atiesador hasta finalmente obtener un atiesador conectado de patín a patín. De manera similar se seleccionó para el espesor un valor mínimo de 3 mm y un espesor máximo de 8 mm, incrementando su valor 1 mm en cada iteración.

De la misma manera a fin de hallar la mejor distribución entre atiesadores se seleccionó como variables la separación y el número de atiesadores. Las separaciones fueron variadas desde un valor máximo de 160 mm hasta alcanzar un valor mínimo de 20 mm con intervalos de 20mm. Del mismo modo el número de atiesadores fue disminuido a partir de los extremos de forma simétrica.

### **3.3.1.1 Capacidad de atiesador a compresión.**

Para la fabricación de los atiesadores, se seleccionó una pletina de acero estructural A-36. La especificación del AISC, recomienda que para aceros con valores de  $F_y$  entre  $[36 - 60] \frac{\text{klb}}{\text{plg}^2}$ , se utilice un electrodo de resistencia mínima de  $70 \frac{\text{klb}}{\text{plg}^2}$ . Por tal razón, se seleccionó un electrodo E7018, el cual indica que es apto para la soldadura en todas las posiciones, y su recubrimiento de bajo hidrógeno proporciona una penetración del arco mediana. Se utilizó un proceso de soldadura SMAW. Partiendo de la menor longitud de soldaduras en el atiesador, se determinó la resistencia de la junta tipo filete.

Se utilizó las consideraciones expuestas en la sección 3.1.4.1, y la figura 18, con lo que se determinó la resistencia nominal para una junta tipo filete. De la misma manera partiendo de la figura 17 se asignó un pierna  $w$ , del cordón de soldadura con valor de  $w = 5 \text{ mm}$  ( $\frac{3}{16} \text{ in}$ ), para un espesor del metal base de hasta  $12.7 \text{ mm}$  ( $\frac{1}{2} \text{ in}$ ). La longitud real de la soldadura es  $L = 29 \text{ mm}$  ( $1.1 \text{ in}$ ), por consiguiente la resistencia nominal del cordón de soldadura, aplicando LRFD, es de  $4.59 \text{ klb}$  ( $2.3 \text{ Ton}$ ) por cada cordón.

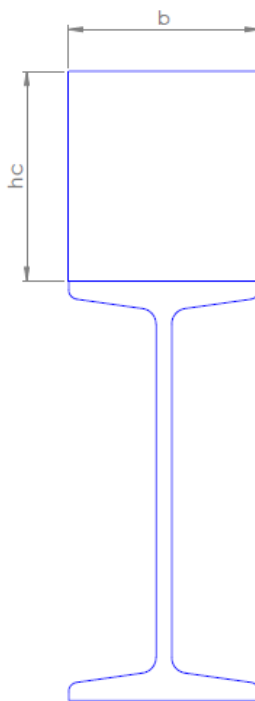
### **3.3.2 Viga compuesta.**

#### **3.3.2.1 Consideraciones de diseño.**

Con la finalidad de complementar el estudio a flexión de vigas de sección compacta se contempló, la utilización de una viga compuesta. Se desarrolló un estudio utilizando el desecho del proceso de extracción del aceite de palma africana (cuesco) como reemplazo del agregado grueso en el concreto, sustituyéndolo en 10, 20, 30 y 40% de peso en la mezcla. Considerando estos resultados, se seleccionó un concreto con resistencia a la compresión de  $21.8 \text{ MPa}$  para los cálculos de sección. De manera similar al estudio de la viga laminada, se seleccionó un perfil IPN 200, de acero estructural ASTM A-36, con un valor de esfuerzo de fluencia  $F_y = 285 \text{ MPa}$  y módulo de elasticidad  $E = 200 \text{ GPa}$ . Además, se estableció su longitud  $L_T = 2 \text{ m}$  considerando las dimensiones normalizadas del material comercial, y su longitud entre apoyos  $L_b = 1.8 \text{ m}$ .

#### **3.3.2.2 Dimensiones del patín de concreto.**

Se consideró las dimensiones mínimas, que cumplen la especificación AISC 360, mencionadas en la sección 2.4.1 del capítulo 2, para el patín de concreto como se muestra en la figura 26 y la tabla 4. (Anexo I).



**Figura 26.** Sección viga compuesta.

**Tabla 4.**

Dimensiones de sección de la viga compuesta.

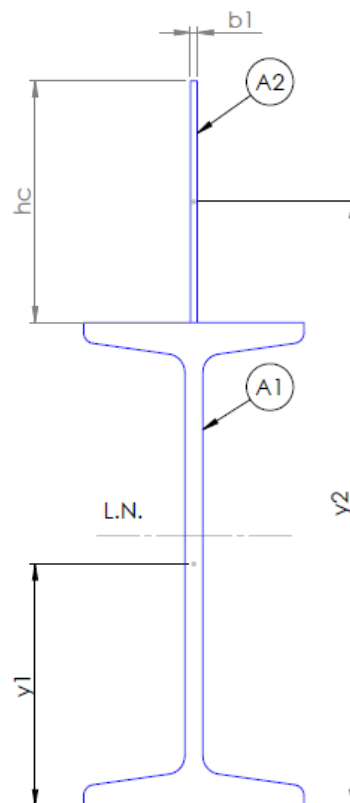
<b>Nomenclatura</b>	<b>Descripción</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidades</b>
<b>b</b>	Ancho sección concreto	90	mm
<b><math>h_c</math></b>	Altura sección concreto	100	mm

### 3.3.2.3 Cálculo del eje neutro.

Se determinó el eje neutro de la sección compuesta a partir de las consideraciones de la sección 2.4.2 del capítulo 2. Considerando como valor de módulo de elasticidad

del acero 200 GPa y del concreto 6433 MPa, como se indica en la ecuación 21. Se obtuvo un factor  $n$  de 31.09.

En este sentido, considerando la ecuación 22 y considerando que la altura de la sección permanece constante con un valor de 100mm, se determinó el ancho de la sección equivalente de concreto  $b_1$ , obteniendo un valor de 2.89 mm. A través del método de las áreas se determinó el nuevo eje neutro, el cual se desplazó 11.96 mm sobre el eje de la sección compacta como se indica en la figura 27. Las dimensiones para el cálculo se muestran en la tabla 5.



**Figura 27.** Sección equivalente del concreto.

**Tabla 5.**

Dimensiones de la sección equivalente.

Nomenclatura	Descripción	Valor	Unidades
$b_1$	Ancho sección concreto	2,89	$mm$
$h_c$	Altura sección concreto	100	$mm$
$y_1$	Distancia centro gravedad acero	100	$mm$
$y_2$	Distancia centro gravedad concreto	250	$mm$
$A_1$	Área sección concreto	289,5	$mm^2$
$A_2$	Área sección acero	3340	$mm^2$
$\bar{y}$	Línea neutra	111.96	$mm$

**3.3.2.4 Conectores tipo cortante.**

Con el objetivo de transferir las cargas a través de las fibras entre la secciones de concreto y acero se emplearon conectores, los que deben resistir las cartas a cortante generadas por las dos secciones. Se seleccionó como conectores, pernos de acero por las buenas prestaciones que brindan y la facilidad de adquisición. El diámetro del perno  $D$ , se determinó considerando la separación mínima desde el centro del conector a los extremos de la cara del patín, como se expuso en el capítulo 2. Por lo que se obtuvo un valor  $D = 12.7 \text{ mm} \left(\frac{1}{2} \text{ in}\right)$  y un área de la sección transversal del perno de  $A_{sc} = 126.67 \text{ mm}^2$ .

El concreto tiene una resistencia específica a la compresión  $f_c = 21.8 \text{ MPa}$  y un módulo de elasticidad de  $E_c = 6433 \text{ MPa}$ .

La especificación AISC 360, determina la resistencia nominal del conector tipo cortante  $Q_n$  embebido en la placa de concreto como se muestra en la ecuación 20 del capítulo 2. Donde ésta resistencia toma un valor de 23.72 kN (2.67 Ton), para cada conector (perno), además refiere que la resistencia nominal del conector tipo cortante  $Q_n$ , no debe exceder al producto de la resistencia mínima especificada a tensión del conector  $F_u$ , multiplicada por su área de sección transversal  $A_{sc}$ , generando este producto un valor de 56.77 kN (6.38Ton), para un acero de grado 8.8 de dureza y resistencia mínima a tensión  $F_u = 65 \text{ ksi}$ .

El número de conectores tipo cortante, se determinó mediante, el cálculo obtenido tras dividir dos veces la carga que genera el mayor momento  $P_y$ , y la resistencia nominal de cada conector  $Q_n$ , obteniendo un valor aproximado de 10 conectores tipo cortante (perno), a lo largo de toda la longitud del patín superior de la viga IPN 200, con una separación de 145mm los conectores extremos y una separación de 190 mm para los conectores intermedios, respetando las separaciones mínimas descritas en el capítulo 2. (Anexo J).

### **3.3.2.5 Fabricación.**

Los pernos fueron soldados mediante un proceso SMAW con un electrodo E 7018 y un cordón todo alrededor del conector, según las condiciones de diseño especificadas en la sección anterior. Para realizar el bloque de hormigón inicialmente se realizó el pesado de la arena, del agregado grueso, del cemento, del agua, el acelerante como aditivo en el peso del agua y finalmente el cuesco con un reemplazo sobre el agregado grueso del 10%, se utilizó una báscula y bandejas de metal para la determinación del peso de los agregados, tubos de ensayo para la determinación del peso del agua y del acelerante. Se realizó previamente un encofrado de madera sobre el patín superior de la viga, y se colocó la mezcla mediante un proceso de vibración manual para la compactación del concreto, como se muestra en las fotografías del Anexo K.

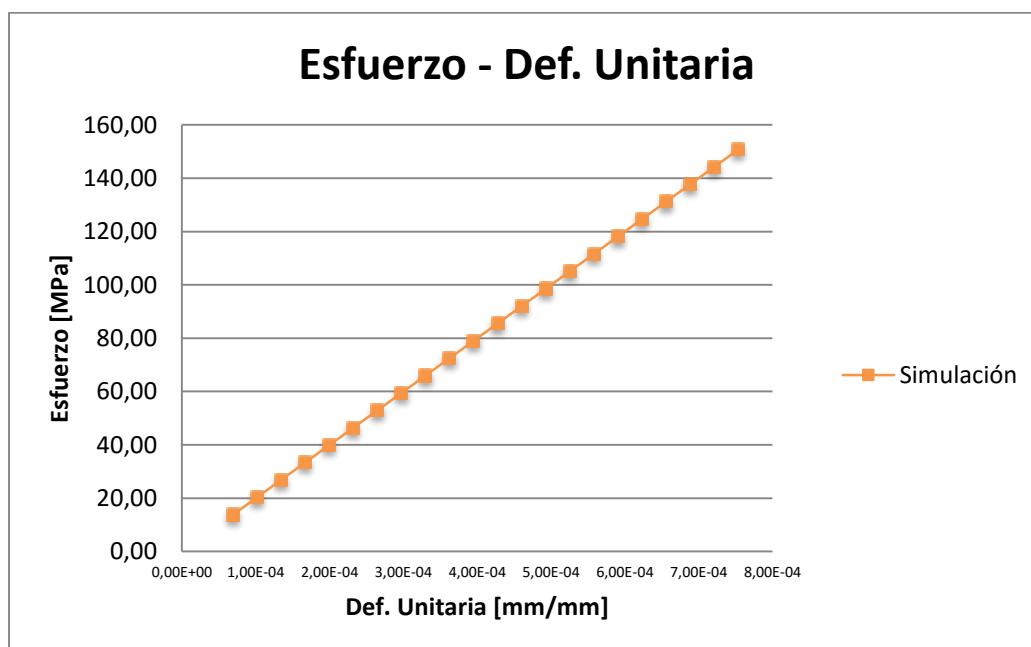
## CAPÍTULO 4

### RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el presente capítulo se muestra el análisis de los resultados obtenidos en la simulación por elementos finitos y su comparación y validación de sus datos a través de los respectivos ensayos experimentales.

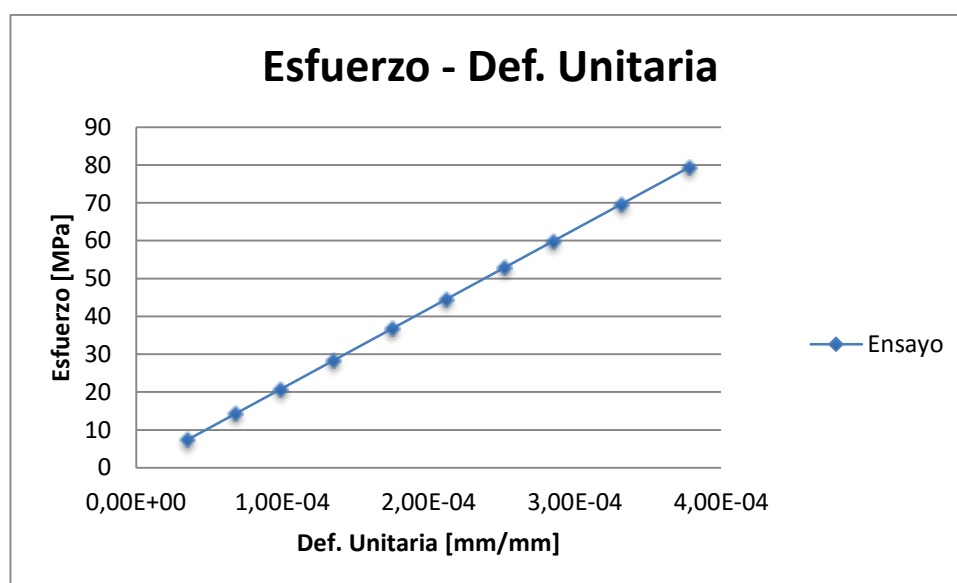
#### 4.1 Viga de sección tipo I armada.

El análisis del comportamiento de la viga de sección tipo I armada se inició con la simulación del modelo en un software de elementos finitos, como se enunció en el capítulo 3, se utilizó las herramientas de dicho software para optimizar el modelo obteniendo una convergencia de malla con un número de elementos de 3167 y un tamaño de elemento de 60 mm. Para el estudio se incrementó la carga cada 100kg hasta alcanzar una carga de 2300 kg de manera similar que para el ensayo. Se obtuvo el diagrama esfuerzo deformación que se muestra en la figura 28.



**Figura 28.** Diagrama esfuerzo - deformación unitaria simulación.

Se observó que el diagrama posee una tendencia perfectamente lineal, indicando que se encuentra en la zona elástica del material. Esto válida la linealidad del material para el análisis por FEA. En este sentido el ensayo de la viga de sección tipo I armada se realizó con las características descritas en el capítulo 3, incrementando la carga cada 100 kg. Inicialmente se aplicó una precarga con un valor de 1000 kg. Se obtuvo el diagrama esfuerzo - deformación ilustrado en la figura 29, el cual presenta una tendencia lineal del material, la curva es similar a la de la simulación.

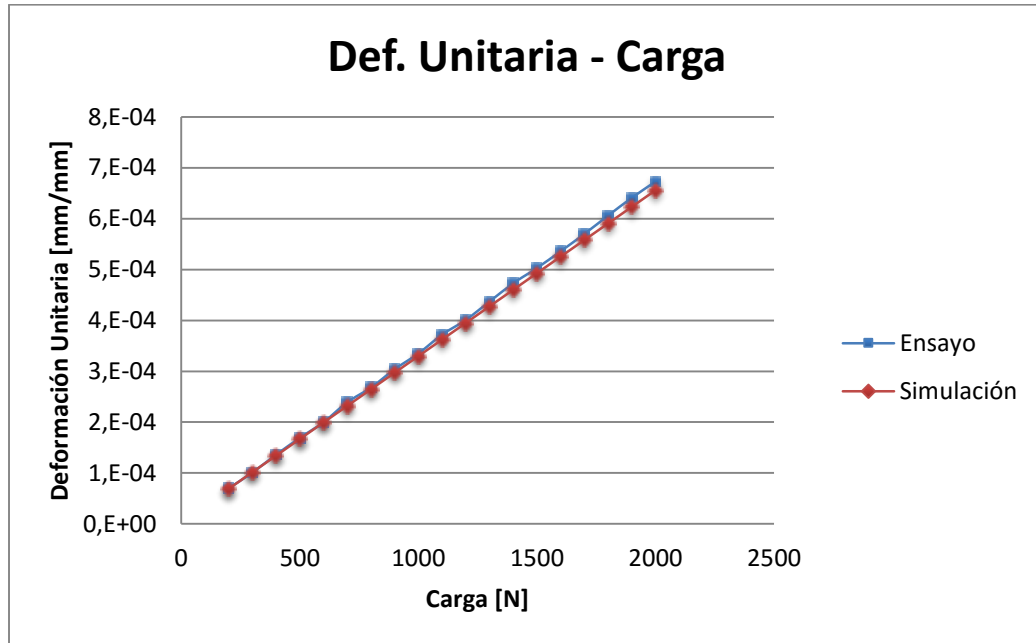


**Figura 29.** Diagrama Esfuerzo - Deformación Unitaria, ensayo 1 viga de sección tipo I armada.

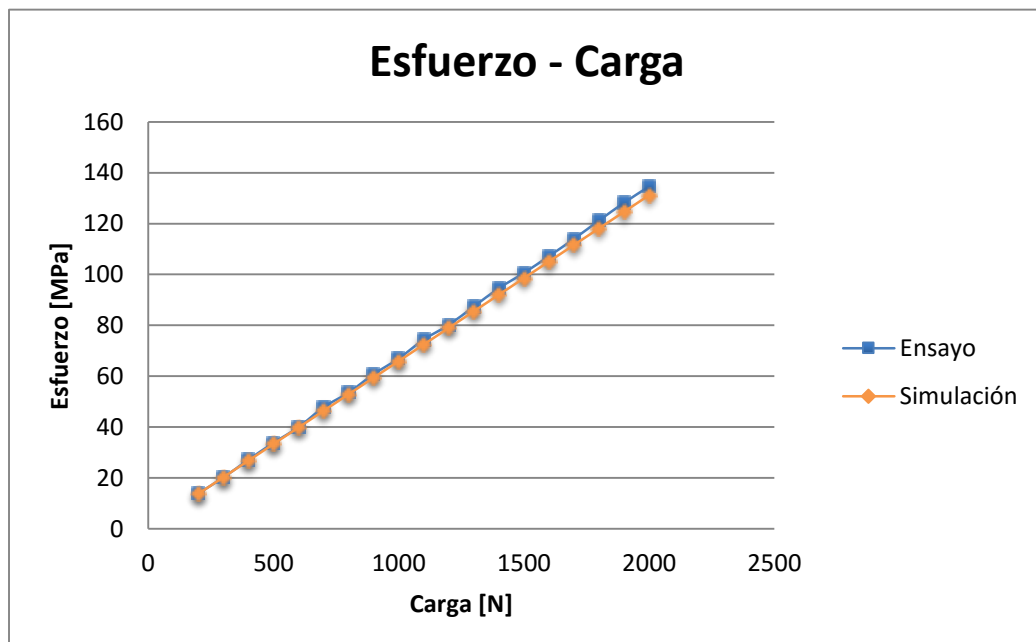
Posteriormente se realizaron 3 ensayos con una carga de 2000 kg obteniendo las figuras 30 y 31, que corresponden a los diagramas deformación unitaria - carga y esfuerzo - carga respectivamente. En éstas gráficas se comparan los datos de la simulación y del ensayo, validando el modelo computacional con un error promedio del 2% y un error máximo del 3%. En las dos figuras se observa una tendencia perfectamente lineal hasta alcanzar una carga de 1300 kg en donde los valores del



ensayo comienzan a fluctuar entre 2 y 3 % mayores a los de la simulación. Estos errores representan un muy buen porcentaje para la validación de los datos por FEA.

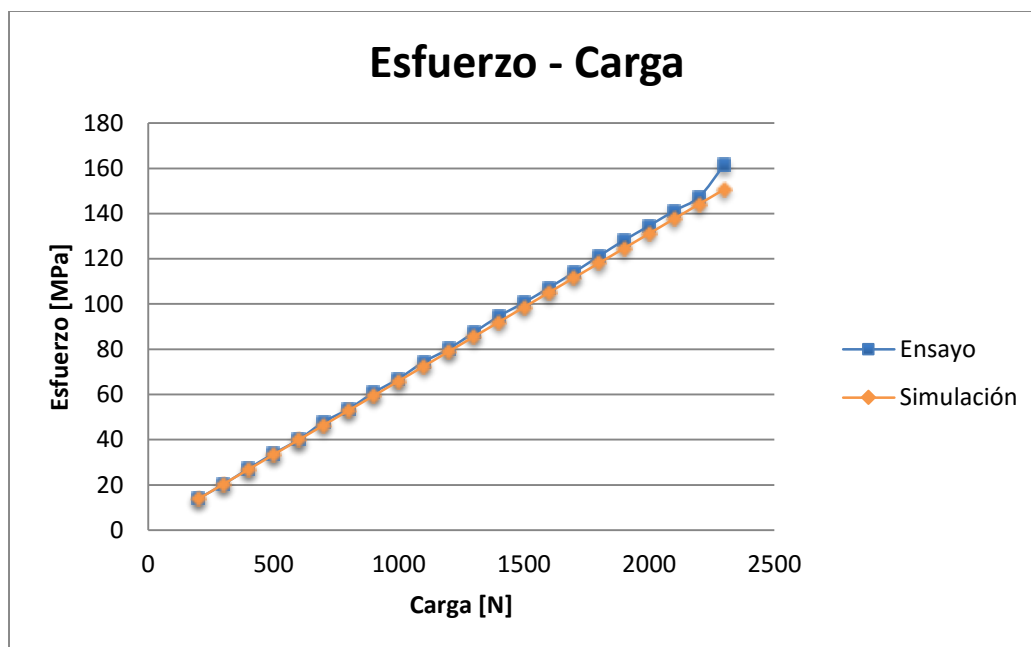


**Figura 30.** Deformación Unitaria – Carga, ensayo 2 viga de sección tipo I armada.



**Figura 31.** Esfuerzo – Carga, ensayo 2 viga de sección tipo I armada.

Adicionalmente se realizó un ensayo incrementando la carga hasta alcanzar los 2300 kg como se muestra en la figura 32.

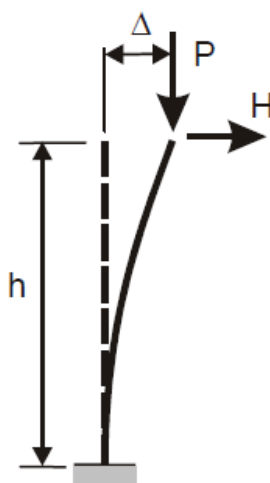


**Figura 32.** Diagrama Esfuerzo – Carga, ensayo 3 viga de sección tipo I armada.

El esfuerzo en la viga presenta un comportamiento lineal muy similar al de la simulación y al de los ensayos anteriores hasta los 2200 kg. Para una carga de 2300 kg se observa un incremento del esfuerzo hasta 161,60 MPa, el cual representa un error del 7,2% comparándolo con el valor de 150,74 MPa obtenido en la simulación. Aun cuando la carga de fluencia calculada para la viga es de 3670 kg se observó una falla por torsión a los 2300 kg lo que representa el 63 % de la carga calculada, obteniendo así una deformación unitaria permanente de  $40 \times 10^{-6}$  mm.

Al tener un alma con espesor delgado, ésta no soporta los esfuerzos residuales generados por el proceso de soldadura produciendo pandeo local en el alma por el proceso de fabricación. Esta deformación presente antes de realizar el ensayo, da lugar

al efecto P – delta, el cual estudia los sobreesfuerzos generados por una deformación de elementos reticulares, previo a aplicar una carga transversal (Abell, 2013). Este fenómeno describe que al existir un ángulo de deformación en el material se genera una carga lateral y por consiguiente un esfuerzo adicional en el elemento tipo columna como se muestra en la figura 33. En consecuencia al existir una deformación previa en el alma de la viga, se genera una carga lateral y por consiguiente un esfuerzo adicional provocando la torsión de la viga.



**Figura 33.** Diagrama efecto P – Delta.

Fuente: (Abell, 2013)

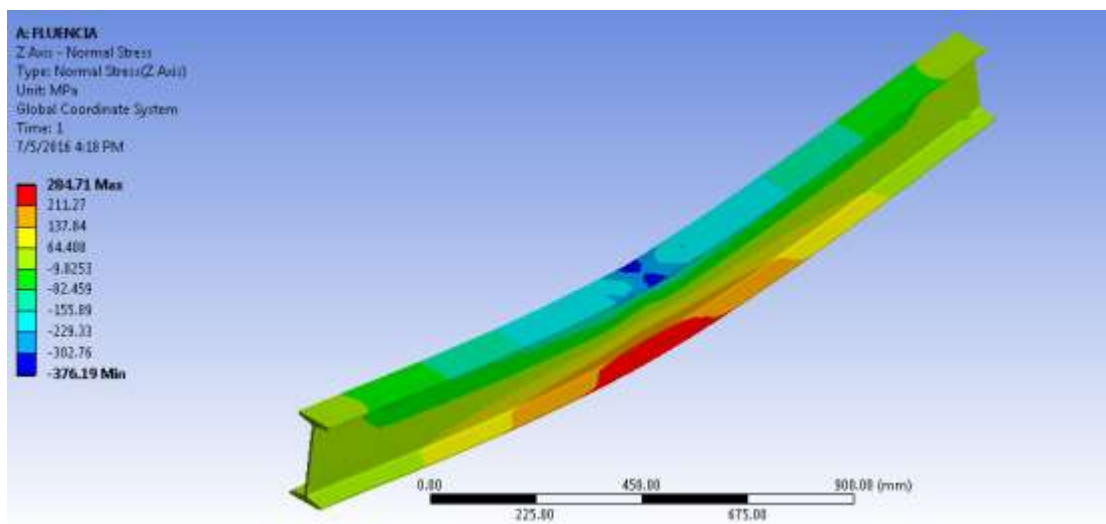
Aun cuando la viga en el ensayo falló antes de la carga prevista, se comprobó que el modelo computacional es válido con errores menores al 5%. Sin embargo se presentaron dificultades al momento de controlar los parámetros en el proceso de fabricación para evitar los esfuerzos residuales generados en el material. Con la

finalidad de obtener mejores resultados en el estudio de atiesadores se procedió al uso de una viga laminada en caliente que tiene una mejor distribución de esfuerzos y una geometría constante con dimensiones controladas.

#### **4.2 Viga de sección tipo I laminada.**

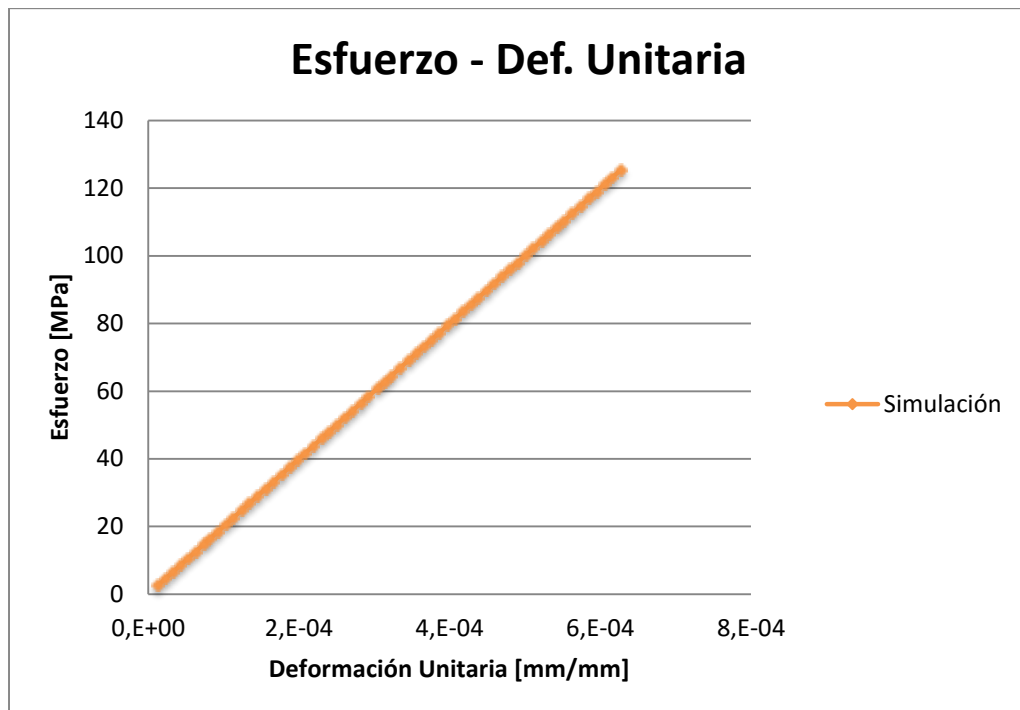
De manera similar a la viga armada, para la sección laminada en caliente se optó por la simulación mediante FEA de una viga IPN 200 de sección compacta y de acero A36 con una resistencia a la tracción de 285 MPa y una resistencia a la ruptura de 436 MPa. Las dimensiones y propiedades mecánicas del material fueron otorgadas por el distribuidor, a partir de las cuales se realizó el modelo de elementos finitos. Se utilizó las herramientas del software para optimizar el modelo, utilizando las mismas características y condiciones de frontera del modelo de la viga armada, con un tamaño de elemento de 50 mm.

Al aplicar la carga crítica de fluencia calculada en el capítulo 3 de 135,53 kN se obtuvo un valor de esfuerzo de 284,71 MPa como se muestra en la figura 34, lo que validó el modelo computacional frente a los cálculos teóricos con un error del 0,1%. Este valor se utilizó para realizar la comparación frente a las vigas del estudio de atiesadores.



**Figura 34.** Resultados análisis por elementos finitos.

Para la validación del modelo de elementos finitos frente al ensayo, se incrementó la carga cada 100 kg hasta alcanzar los 8000 kg, donde se obtuvo el diagrama esfuerzo – deformación unitaria mostrado en la figura 35. El diagrama esfuerzo deformación unitaria presenta una tendencia lineal comprobando la elasticidad del material en el modelo computacional, de la misma manera que en el modelo anterior. Con la finalidad que los esfuerzos se distribuyan a lo largo de las fibras del material se realizó una precarga de 2000 kg antes de realizar el ensayo. Posteriormente se realizaron dos ensayos, el primero con una carga de 3000 kg, el segundo con una carga de 8000 kg. Cada ensayo fue cargado y descargado 3 veces para garantizar la repetitividad de los datos, los resultados se condensan en los siguientes diagramas.



**Figura 35.** Diagrama Esfuerzo – Deformación Unitaria simulación viga laminada.

El primer ensayo como se indicó anteriormente se realizó con una carga de 3000 kg, en el cual se obtuvo una tendencia lineal tanto para el diagrama carga - deformación unitaria mostrado en la figura 36, como para el diagrama esfuerzo – carga mostrado en la figura 37, lo que corroboró la elasticidad del material y los datos obtenidos en el análisis por elementos finitos.

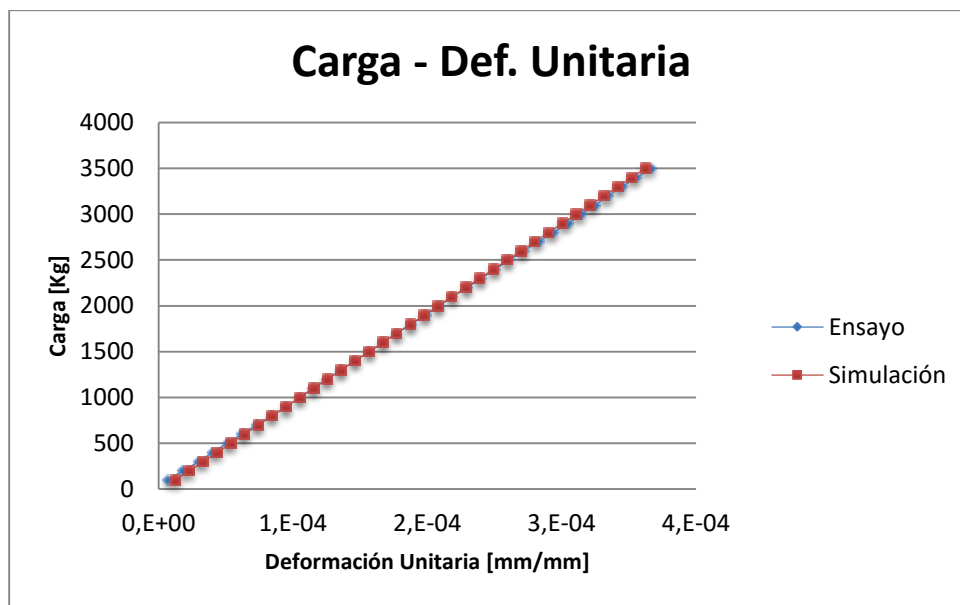


Figura 36. Carga - Deformación Unitaria 1 viga laminada.

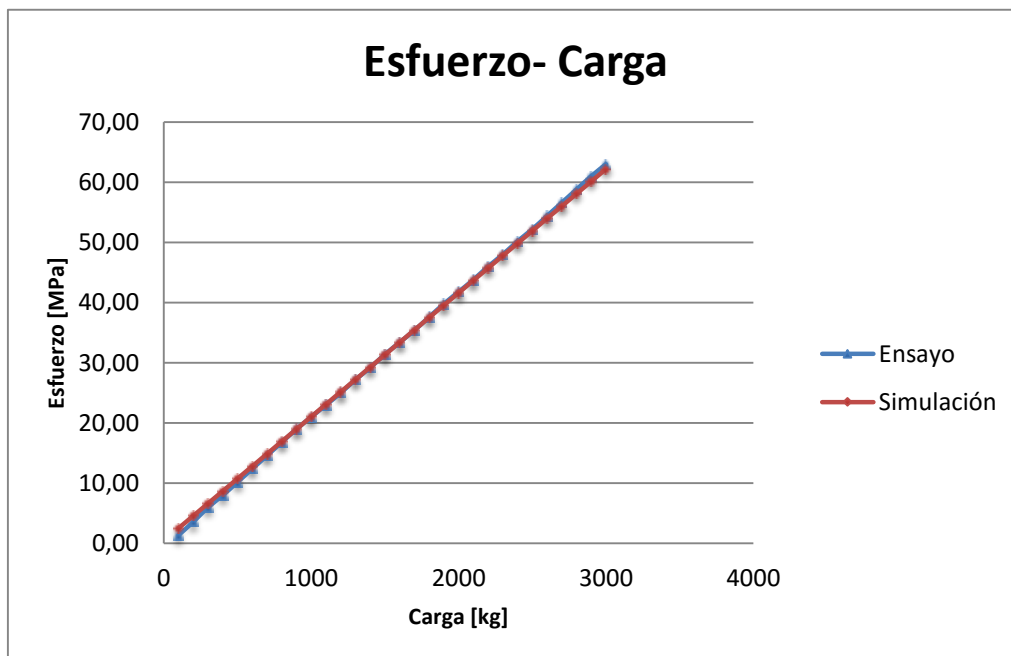
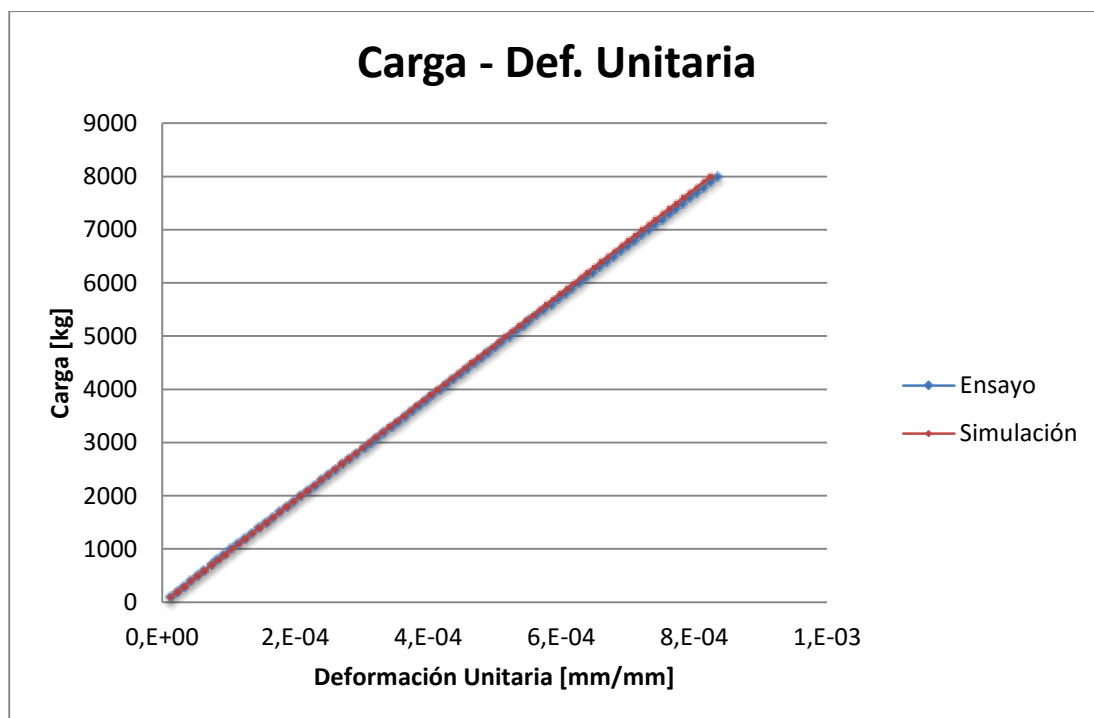


Figura 37. Esfuerzo - Carga ensayo 1 viga laminada.

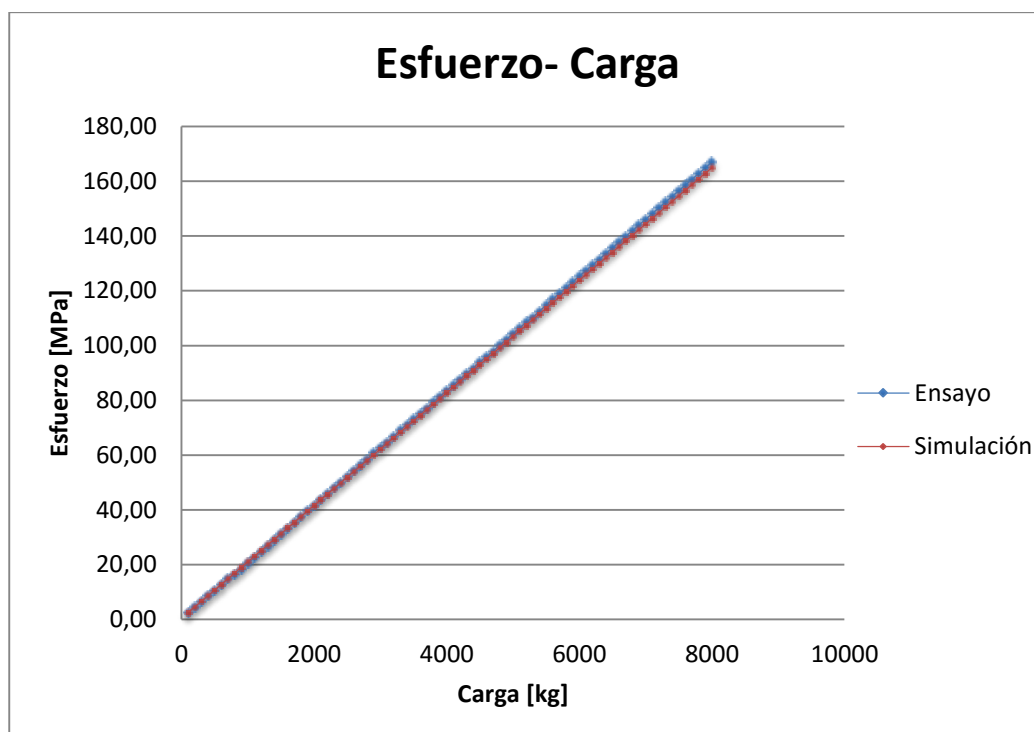
De ésta manera se obtuvo un error promedio entre la simulación y el ensayo de 0,7% y un error máximo del 1,9%. El programa otorga valores acordes con la realidad y se tiene porcentajes de error menores a los del caso anterior. En este sentido el modelo queda validado.

El segundo ensayo se realizó con un porcentaje de carga del 58 % de su resistencia a la fluencia, restringido por la capacidad del pórtico, con una carga de 8000 kg, obteniendo una tendencia lineal tanto para el diagrama carga - deformación unitaria mostrado en la figura 38, como para el diagrama esfuerzo – carga mostrado en la figura 39. Esto corroboró la elasticidad del material y los datos obtenidos en el análisis por elementos finitos. De ésta manera se obtuvo que el error promedio existente entre la simulación y ensayo es de 1 %. De manera similar el error máximo entre todos los datos es del 3,2 %, por lo que el modelo quedó validado al obtener un error menor al 5 %.



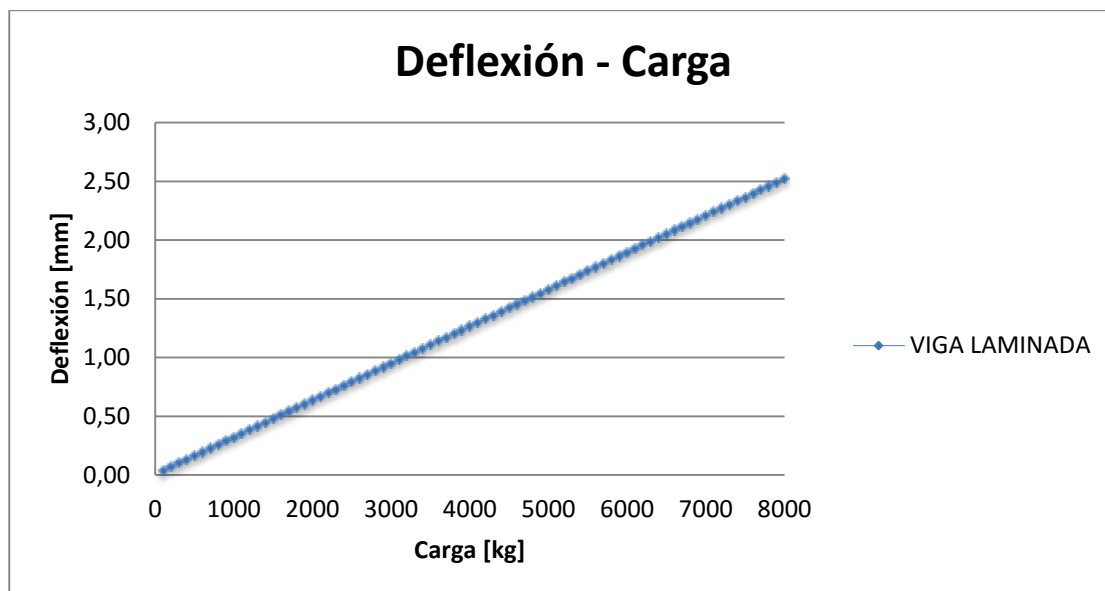
**Figura 38.** Diagrama Deformación unitaria – Carga ensayo 2 viga laminada.





**Figura 39.** Diagrama Esfuerzo – Carga ensayo 2 viga laminada.

La figura 40, muestra el diagrama deflexión vs carga, obtenido mediante simulación, se observa que la deflexión aumenta linealmente con el incremento de la carga, llegando a un valor máximo de 2,63 mm con una carga de 8000 kg, valor máximo del pórtico. Con la finalidad de validar los datos obtenidos en el programa de elementos finitos, se compara la deflexión máxima obtenida en el ensayo a 8000 kg que es de 2,554 mm, lo cual representa un error del 2,9%, por lo tanto se validan los valores de la simulación con el ensayo son validados con un porcentaje menor al 5%.



**Figura 40.** Diagrama Deflexión – Carga simulación viga laminada.

Se encontró que el programa otorga valores acordes con la realidad por lo que se puede realizar el estudio de atiesadores a través del modelo de elementos finitos.

### 4.3 Estudio de Atiesadores.

Con la finalidad de determinar si el uso de atiesadores aporta favorablemente al incremento de la capacidad a flexión en vigas de sección compacta, se realizó el estudio de diferentes distribuciones tomando en cuenta cinco variables fundamentales: espesor, altura, ancho, separación y número de atiesadores.

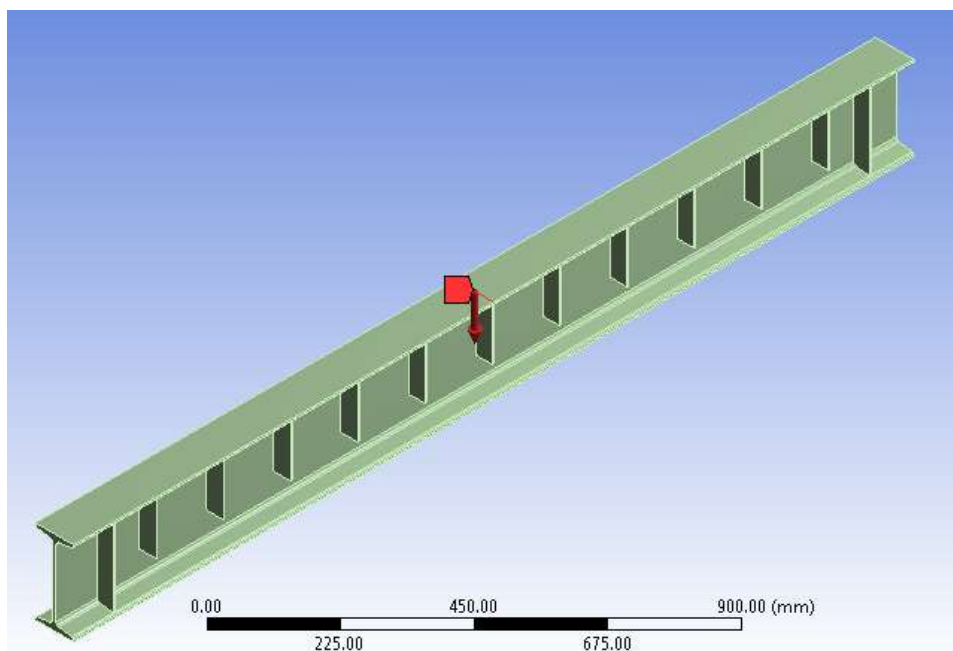
#### 4.3.1 Primera configuración.

Para el primer análisis de estudio se generó dos modelos computacionales principales en los que se utilizó una altura en el atiesador de 120 mm siguiendo las

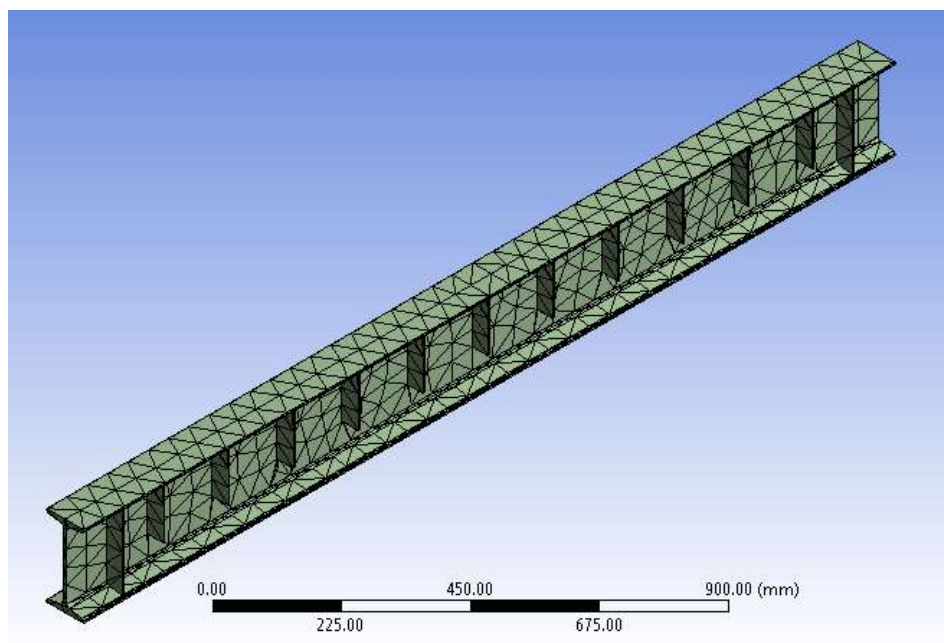
recomendaciones presentadas por Hendy e Iles expuestas en el capítulo 3. Se tomó como variables el espesor y la separación entre atiesadores y se analizó los resultados obtenidos para esfuerzo y deflexión.

#### 4.3.1.1 Primer modelo computacional.

En el primer modelo computacional mostrado en el Anexo L, el atiesador central coincide con la carga aplicada en la mitad de la longitud de la viga como se muestra en la figura 41. A partir de éste, se distribuyen los atiesadores en los dos sentidos con las distintas separaciones. En la figura 42, se muestra el mallado generado para un espesor de 3 mm y una separación entre atiesadores de 160 mm.



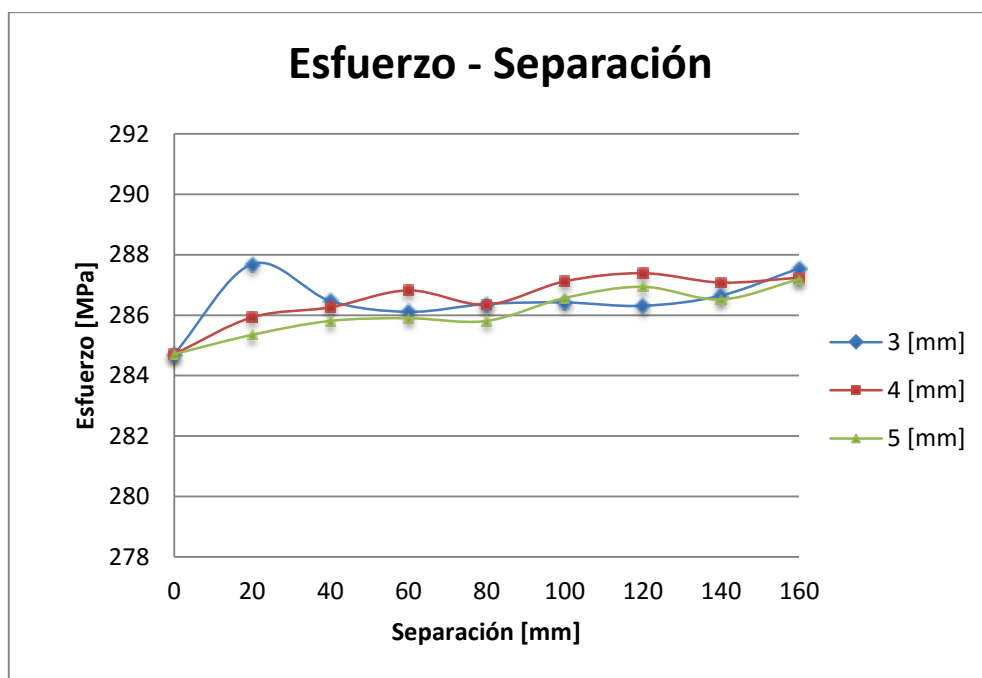
**Figura 41.** Modelo de elementos finitos carga coincidente al atiesador.



**Figura 42.** Mallado espesor 3 [mm] – Separación 160 [mm].

#### **4.3.1.1.1 Análisis del esfuerzo.**

Del estudio realizado se analizaron los resultados obtenidos de esfuerzo y deflexión. El diagrama Esfuerzo – Separación entre atiesadores que se muestra en la figura 43, muestra las curvas obtenidas tras las simulaciones de 3 mm, 4 mm y 5 mm. El valor del esfuerzo para la viga sin atiesadores se presenta en la gráfica con una separación de 0 mm únicamente para realizar la respectiva comparación.



**Figura 43.** Diagrama Esfuerzo – Separación, simulación atiesadores carga coincidente 1.

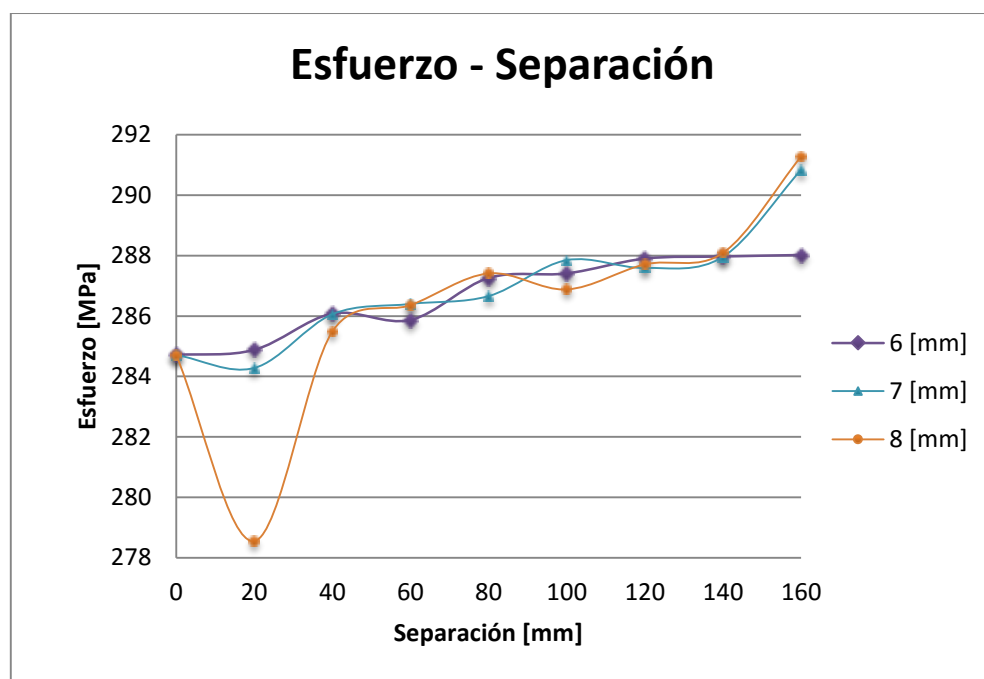
La curva azul muestra la distribución para un espesor de 3 mm, obteniendo que el esfuerzo es superior para todos los casos. Inicialmente se observa un incremento desde 284,71 MPa en la viga sin atiesadores hasta 287,69 MPa para una separación de 20 mm. Entre las separaciones de 40 a 140 mm se observa que los valores fluctúan entre 285 MPa y 287 MPa, para una separación de 160 mm se observa un incremento hasta 287,19 MPa.

La curva roja muestra la distribución para un espesor de 4 mm, en donde al igual que para 3 mm, se aprecia un incremento en el esfuerzo para todos los casos. El caso más crítico es con una separación entre atiesadores de 120 mm en el que se obtuvo un valor de 287,39 MPa.

Finalmente la curva verde muestra la distribución para un espesor de 5 mm en donde al igual que para los 3 y 4 mm, se aprecia un incremento en el esfuerzo para

todos los casos de estudio. El caso más crítico es con una separación entre atiesadores de 120 mm con la que se obtuvo un valor de 287,19 MPa.

El diagrama Esfuerzo – Separación que se muestra en la figura 44, muestra las curvas obtenidas tras las simulaciones de 6 mm, 7 mm y 8 mm.



**Figura 44.** Diagrama Esfuerzo – Separación simulación atiesadores carga coincidente 2.

La curva morada muestra la distribución para un espesor de 6 mm, en donde se obtuvo que el esfuerzo es superior para todos los casos al de la viga sin atiesadores. En ésta se observa que el esfuerzo tiende a incrementarse según se aumenta la separación entre atiesadores, alcanzando un valor máximo de 288,02 MPa con una separación de 160 mm.

La curva celeste muestra la distribución para un espesor de 7 mm, en la que se observa una ligera disminución para una separación de 20 mm, a partir de éste valor

el esfuerzo tiende a verse incrementado gradualmente hasta alcanzar un valor máximo de 290,84 MPa.

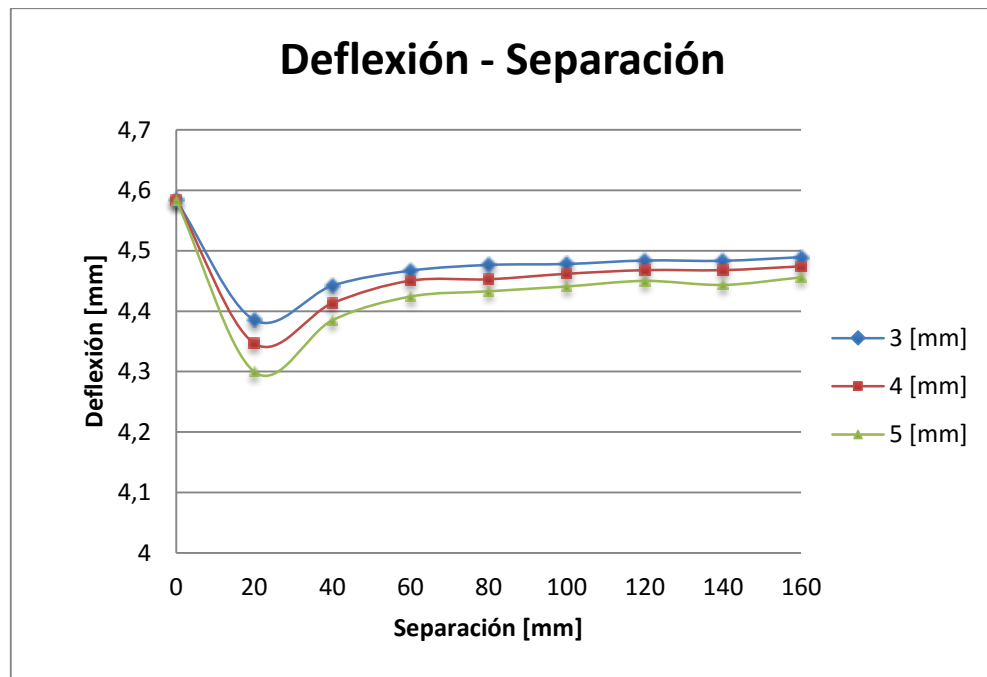
Finalmente, la curva naranja representa la distribución para 8 mm. En ésta se observa una disminución para una separación de 20 mm que alcanza los 278,55 MPa, lo que representa el 2,2% de incremento en la capacidad de la viga. A partir de este valor para el resto de separaciones el esfuerzo se ve incrementado gradualmente alcanzando un valor máximo de 291,28 MPa.

Como se observó en las curvas para los diferentes espesores exceptuando el caso con espesor de 8 mm, y separación de 20 mm, que muestra una disminución del 2.2% en el esfuerzo. Presentaron un incremento en el esfuerzo aun cuando la sección fue incrementada mediante los atiesadores. Esto muestra que los atiesadores no se encuentran transfiriendo las tensiones hacia el patín inferior, lo suficiente para incrementar su capacidad. De manera contraria estos aportan un peso extra a la viga por lo que se ve incrementado el esfuerzo en la misma.

#### **4.3.1.1.2 Análisis de la deflexión.**

El diagrama Deflexión – Separación entre atiesadores que se muestra en la figura 44, muestra las curvas obtenidas tras las simulaciones de 3 mm, 4 mm y 5 mm.

En este sentido se obtuvo un valor de deflexión de la viga sin atiesadores de 4,5839 mm y se lo presenta en la figura 45 con una separación de 0 mm, únicamente para su comparación en los diagramas.



**Figura 45.** Diagrama Deflexión – Separación simulación atiesadores carga no coincidente 1.

De esta manera, para un espesor de 3 mm mostrado en la curva azul se obtuvo una disminución en la deflexión de la viga para todos los casos. En la curva se observa una disminución máxima del 4,33% para una separación de 20 mm con un valor de 4,3854 mm. Conforme se incrementa la separación se observa un incremento gradual de los valores hasta estabilizarse a una separación de 80 mm, valor a partir del cual se obtuvo una disminución de entre 2 y 3%.

La curva roja representa la distribución para un espesor de 4 mm, la cual muestra una tendencia similar a la curva anterior, obteniendo valores de disminución en la deflexión mayores. Se observa un decrecimiento del 5,17 % hasta la separación de 20 mm, donde se obtuvo un valor de 4,3468 mm. A partir de este punto, los valores se incrementan gradualmente hasta estabilizarse a una separación de 80 mm, obteniendo una disminución de entre 2 y 3%.



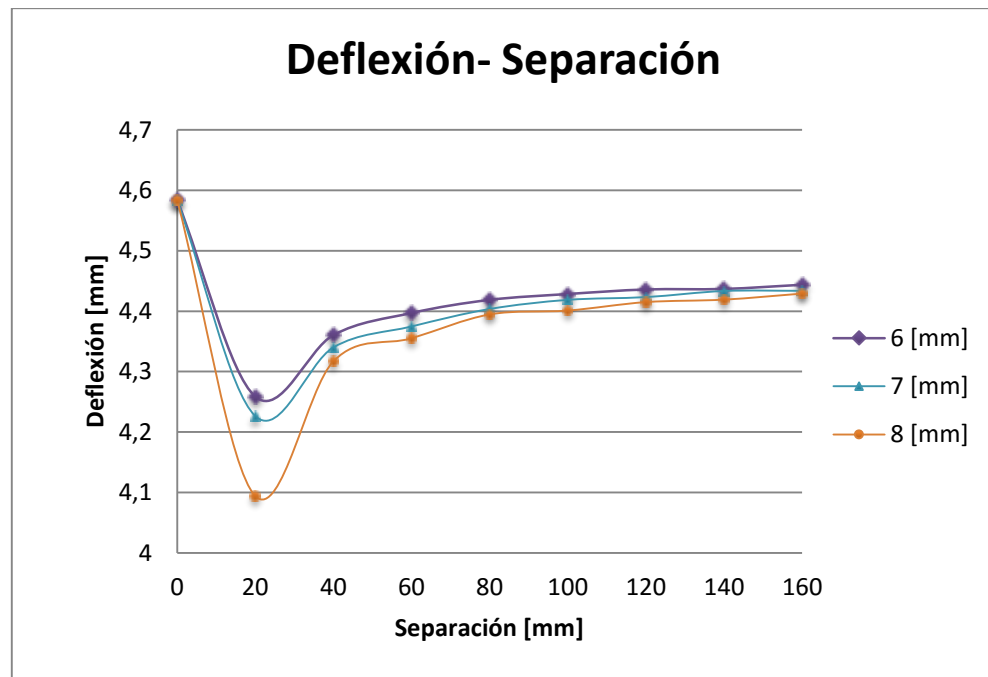
De igual manera la curva verde representa la distribución para un espesor de 5 mm, la cual muestra una tendencia similar a la curva anterior, obteniendo valores mayores en la disminución de la deflexión. Se observa un decrecimiento del 6,2 % hasta la separación de 20 mm, donde se obtuvo un valor de 4,2997 mm. A partir de este punto, los valores se incrementan gradualmente hasta estabilizarse a una separación de 80 mm, obteniendo una disminución de entre 2 y 3%.

Los diagramas obtenidos para los espesores de 6 mm, 7 mm y 8 mm, se presenta en la figura 46. En ésta se observa que para todos los espesores las vigas presentan una disminución en la deflexión.

La curva morada representa un espesor de 6 mm, de la cual se obtuvo una disminución en la deflexión de la viga para todos los casos. En la curva se observa una disminución máxima del 7,1% para una separación de 20 mm con un valor de 4,2586 mm. Conforme se incrementa la separación se observa un incremento gradual de los valores, que fluctúan entre el 3 y 5 % de disminución.

La curva celeste representa la distribución para un espesor de 7 mm, la cual muestra una tendencia similar a la curva anterior, obteniendo valores de disminución en la deflexión mayores. Se observa un decrecimiento del 7,8 % hasta la separación de 20 mm, donde se obtuvo un valor de 4,2264 mm. A partir de este punto, los valores se incrementan de manera gradual, obteniendo disminución en el esfuerzo entre el 3 y 5%.

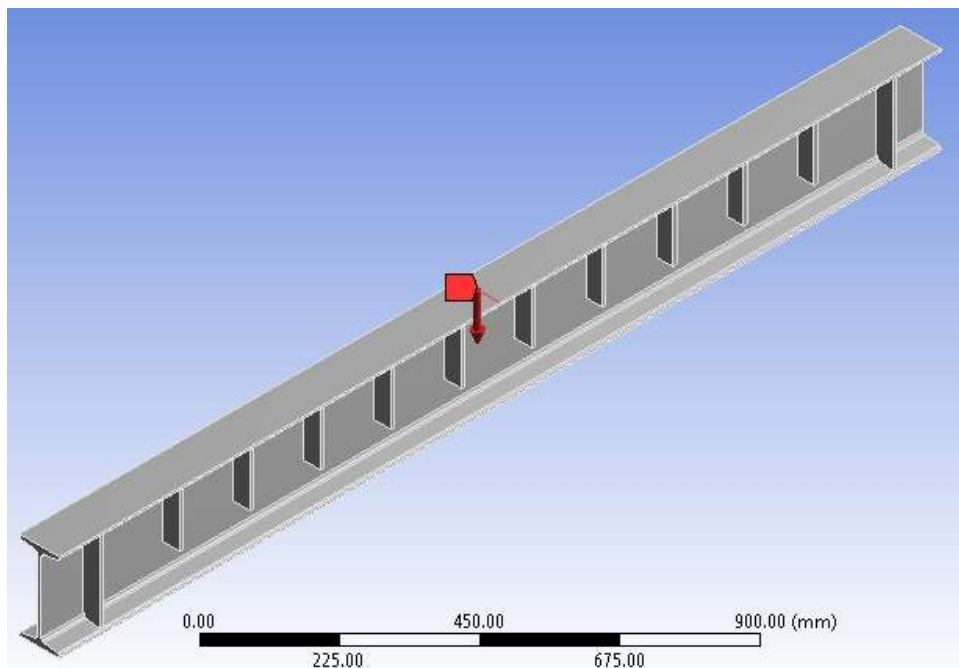
De igual manera la curva naranja representa la distribución para un espesor de 8 mm, la cual muestra una tendencia similar a las dos curvas anteriores. Se observa una disminución del 10,69 % para una separación de 20 mm, donde se obtuvo un valor de 4,094 mm. Se observa que la tendencia de estos valores tiene un incremento gradual, conservando una disminución de deflexión mínima del 3,38%, para la separación de 160 mm.



**Figura 46.** Diagrama Deflexión – Separación simulación atiesadores carga coincidente 2.

#### 4.3.1.2 Segundo modelo computacional.

Para el segundo estudio se consideró a los atiesadores centrales ubicados a la mitad de la carga aplicada como se muestra en la figura 47. Anexo M.



**Figura 47.** Modelo de elementos finitos carga no coincidente al atiesador 1.

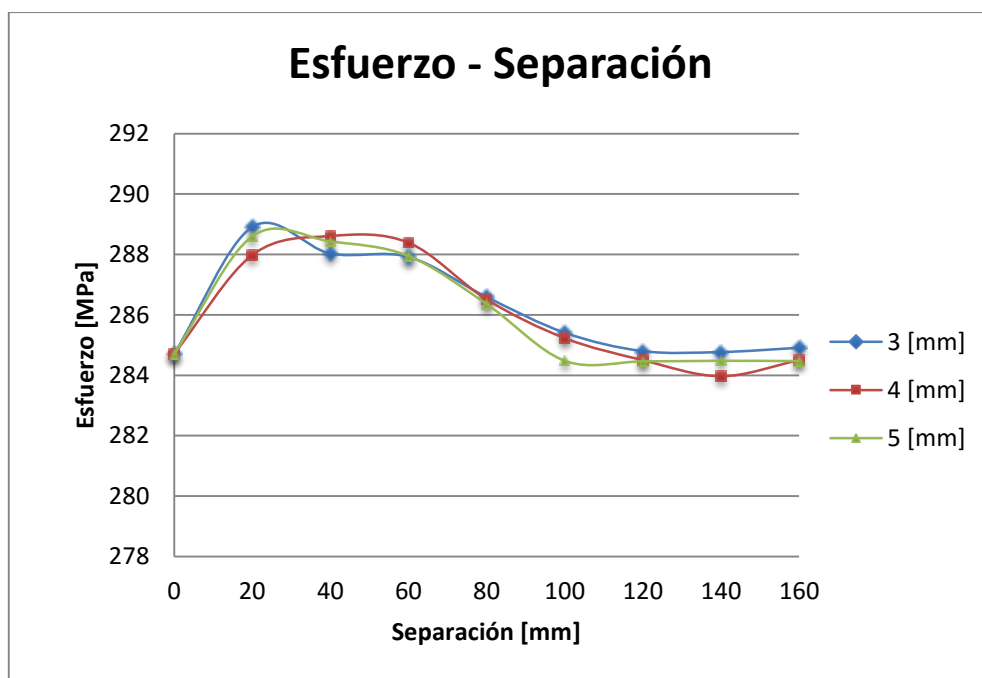
#### 4.3.1.2.1 Análisis del esfuerzo.

Del estudio realizado se analizaron los resultados obtenidos de esfuerzo y deflexión. El diagrama Esfuerzo – Separación entre atiesadores que se muestra en la figura 48, presenta las curvas obtenidas tras las simulaciones de 3 mm, 4 mm y 5 mm. El valor del esfuerzo para la viga sin atiesadores se presenta con una separación de 0 mm para realizar la comparación de los datos.

La curva azul muestra la distribución de datos para un espesor de 3 mm. A una separación de 20 mm, se observa un incremento en el esfuerzo hasta un valor máximo de 288,91 MPa. A partir de este punto, los valores presentan una disminución gradual hasta alcanzar una separación de 120 mm en donde la tendencia de la curva es lineal, los valores fluctúan alrededor de los 284 MPa. Para las separaciones de 100 y 120 mm se obtuvo una ligera disminución en el esfuerzo.

La curva roja muestra la distribución para un espesor de 4 mm. El valor del esfuerzo se ve incrementado hasta un valor máximo de 288,43 MPa al llegar a una separación de 40 mm. A partir de este punto los valores se ven disminuidos gradualmente, obteniendo el menor valor del esfuerzo a una separación de 140 mm, con 283,97 MPa, finalmente el esfuerzo aumenta con una separación de 160 mm a un valor de 284,5 MPa.

Finalmente la curva verde muestra la distribución para un espesor de 5 mm en donde al igual que para los espesores de 3 y 4 mm, se aprecia un incremento en el esfuerzo para la menor separación de 20 mm hasta un valor de 288,6 MPa. Para éste espesor los valores tienden a disminuir gradualmente, sin embargo nunca presentan una disminución representativa al compararlos con el valor del esfuerzo 284,71 MPa de la viga sin atiesadores.



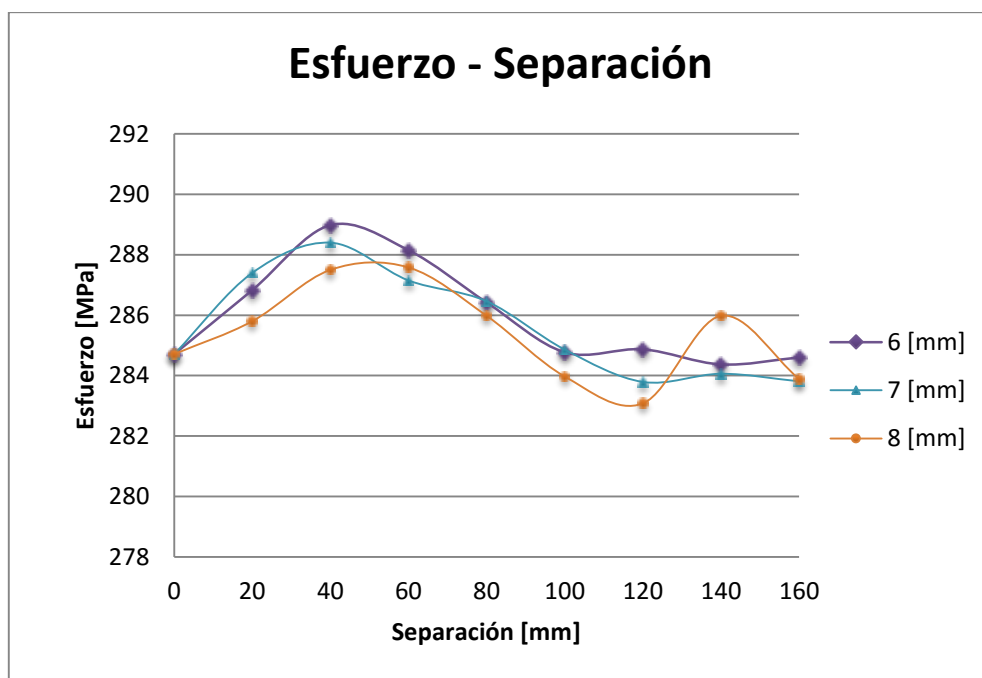
**Figura 48.** Diagrama Esfuerzo – Separación simulación atiesadores carga no coincidente 1.

El diagrama Esfuerzo – Separación que se observa en la figura 49, muestra las curvas obtenidas tras las simulaciones para los espesores de 6 mm, 7 mm y 8 mm y una altura del atiesador de 120 mm.

La curva morada muestra la distribución para un espesor de 6 mm, en donde se obtuvo que para las dos primeras separaciones de 20 y 40 mm respectivamente el valor del esfuerzo incrementa hasta alcanzar los 288,98 MPa para éste último. A partir de este punto se observa una disminución del esfuerzo. Se alcanza el menor valor a la separación de 140 mm, valor de esfuerzo no representativo.

La curva celeste muestra la distribución para un espesor de 7 mm, en la que se observa el incremento del esfuerzo para las separaciones de 20 y 40 mm, obteniendo en ésta última un esfuerzo de 288,44 MPa. El esfuerzo disminuye para separaciones mayores. Se obtuvo la mayor disminución de esfuerzo con 283,79 MPa a una separación de 120 mm.

Finalmente, la curva naranja representa la distribución para 8 mm. En ésta se observa un incremento para las separaciones de 20, 40 y 60 mm, alcanzando un valor de 287,58 MPa para ésta última. El esfuerzo disminuye hasta alcanzar una separación de 120 mm a 283,08 MPa. Con la separación de 140mm existe un súbito incremento hasta 285,98 MPa. Finalmente para la separación de 160 mm vuelve a disminuir a 283,89 MPa.

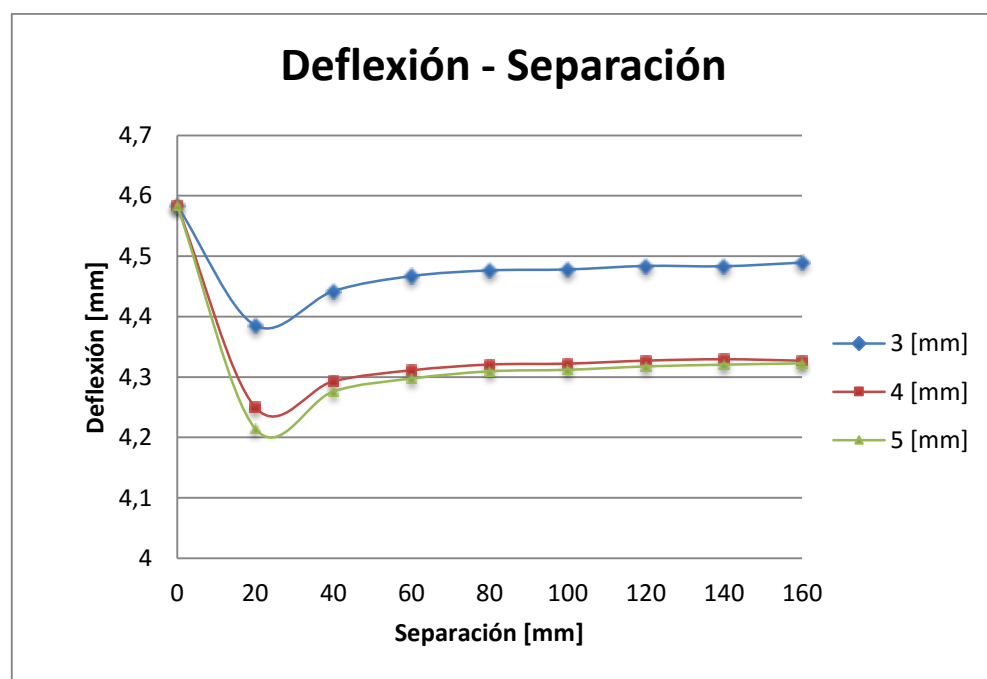


**Figura 49.** Diagrama Esfuerzo – Separación simulación atiesadores carga no coincidente 2.

En las figuras 48 y 49 se obtuvo un incremento para las primeras separaciones lo que indica que los atiesadores no se encuentran aportando a la distribución de cargas, de manera contraria ejercen una sobrecarga en la viga, por consiguiente su esfuerzo se incrementa. Para las siguientes separaciones el esfuerzo disminuye gradualmente debido a la disminución del número de atiesadores. En la figura 48 no se encontró una disminución representativa en el esfuerzo para ninguno de los casos. Por otra parte en la figura 49 se obtuvo una ligera disminución en el esfuerzo para un espesor de 8 mm y una separación de 120 mm.

#### 4.3.1.2.2 Análisis de la deflexión.

El diagrama Deflexión – Separación entre atiesadores que se muestra en la figura 50, muestra las curvas obtenidas tras las simulaciones de 3 mm, 4 mm y 5 mm con una carga no coincidente al atiesador central y una altura del mismo de 120 mm. El valor de deflexión de la viga sin atiesadores es de 4,5839 mm, representado con una separación de 0 mm.



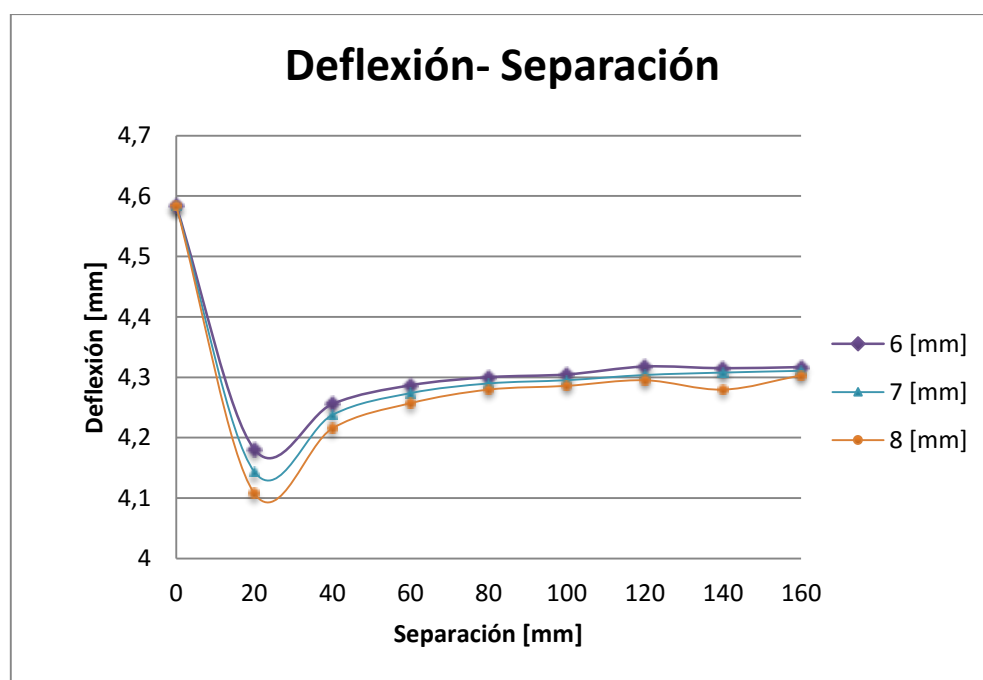
**Figura 50.** Diagrama Deflexión – Separación simulación atiesadores carga no coincidente 1.

Para un espesor de 3 mm representado en la curva azul se obtuvo una disminución en la deflexión de la viga para todos los casos. En ésta se observa una disminución del 4,3% a una separación de 20 mm. La deflexión se incrementa al aumentar la separación, obteniendo una tendencia lineal a partir de los 100 mm.

La curva roja muestra un espesor de atiesador de 4 mm, en donde se obtuvo una disminución del 7,3% en la deflexión para una separación de 20 mm. A partir de este punto los valores aumentan obteniendo una tendencia lineal al alcanzar un valor de separación de 80 mm. Estos valores de deflexión fluctúan entre 5 y 6%.

De igual manera la curva verde representa la distribución para un espesor de 5 mm, la cual muestra una tendencia similar a la curva anterior, obteniendo valores mayores en la disminución de la deflexión. Se observa una disminución del 8,1% para una separación de 20 mm. A partir de este punto, los valores se incrementan gradualmente hasta estabilizarse a una separación de 80 mm, adquiriendo una tendencia lineal. Estos valores fluctúan entre 5 y 6% de disminución.

Los diagramas obtenidos para los espesores de 6 mm, 7 mm y 8 mm, se presenta en la figura 51. En ésta se observa que para todos los espesores las vigas presentan una disminución en la deflexión.



**Figura 51.** Diagrama Deflexión – Separación simulación atiesadores carga no coincidente 2.



La curva morada representa un espesor de 6 mm de la cual, se obtuvo una disminución en la deflexión de la viga para todos los casos. En la curva se observa una disminución máxima del 8,8% para una separación de 20 mm con un valor de 4,2586 mm. Conforme se incrementa la separación se observa un incremento gradual de la deflexión, valores que fluctúan entre el 6 y 7 % de disminución.

La curva celeste representa la distribución para un espesor de 7 mm, la cual muestra una tendencia similar a la curva anterior. Para una separación de 20 mm se obtuvo una disminución del 9,6%. A partir de este valor, al aumentar la separación entre atiesadores se obtuvo un incremento en la deflexión, hasta adquirir una tendencia lineal con una separación de 80 mm. Con separaciones a partir de 100 mm se obtuvo una disminución que rodea el 6%.

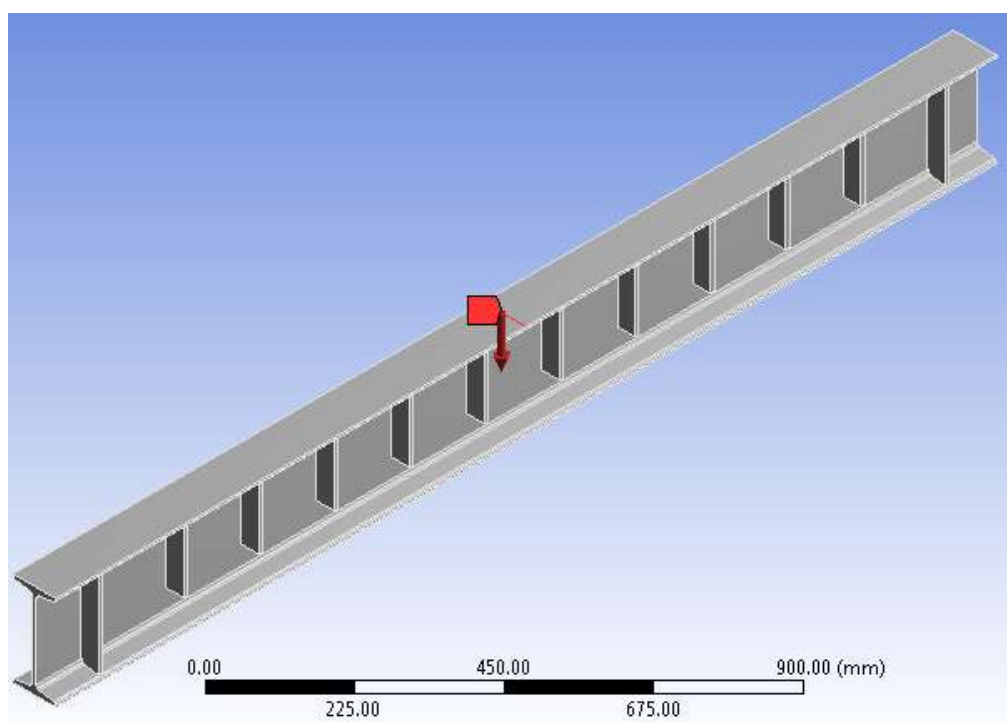
De igual manera la curva naranja representa la distribución para un espesor de 8 mm, la cual muestra una tendencia similar a las dos curvas anteriores. Se observa una disminución del 10,4 % para una separación de 20 mm, con un valor de 4,1079 mm. De manera similar que para los casos anteriores se obtuvo un incremento en los valores hasta alcanzar una separación de 80 mm en donde los valores fluctúan en proporciones muy pequeñas, obteniendo una disminución mínima con una separación de 160 mm del 6,1%.

#### **4.3.2 Segunda configuración.**

Para el segundo análisis del estudio se generó seis modelos computacionales principales, en los que se tomó como variables, la altura del atiesador, la separación entre atiesadores y el espesor de los mismos. Se analizó los resultados obtenidos para esfuerzo y deflexión, en cada caso.

#### 4.3.2.1 Primer modelo computacional.

En el primer modelo computacional se consideró a los atiesadores centrales separados a una distancia igual a la mitad de la separación del caso en estudio a partir de la carga aplicada como se muestra en la figura 52. Se utilizó una altura de 130 mm en el atiesador y se realizaron las simulaciones para todas las separaciones y espesores antes expuestos. Anexo N.

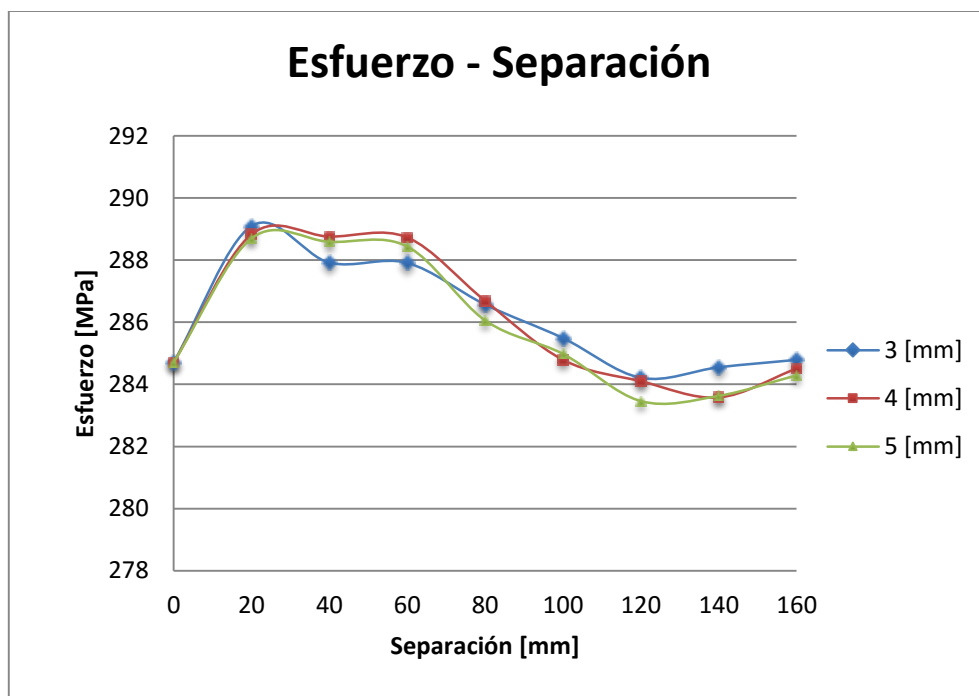


**Figura 52.** Modelo de elementos finitos carga no coincidente al atiesador 2.

##### 4.3.2.1.1 Análisis del esfuerzo.

Del estudio realizado se analizaron los resultados obtenidos de esfuerzo y deflexión. El diagrama Esfuerzo – Separación entre atiesadores que se muestra en la figura 53, muestra las curvas obtenidas tras las simulaciones de 3 mm, 4 mm y 5 mm. El valor

del esfuerzo para la viga sin atiesadores se presenta en el modelo con una separación de 0 mm para realizar la comparación de los datos.



**Figura 53.** Diagrama Esfuerzo – Separación simulación atiesadores carga no coincidente 1.

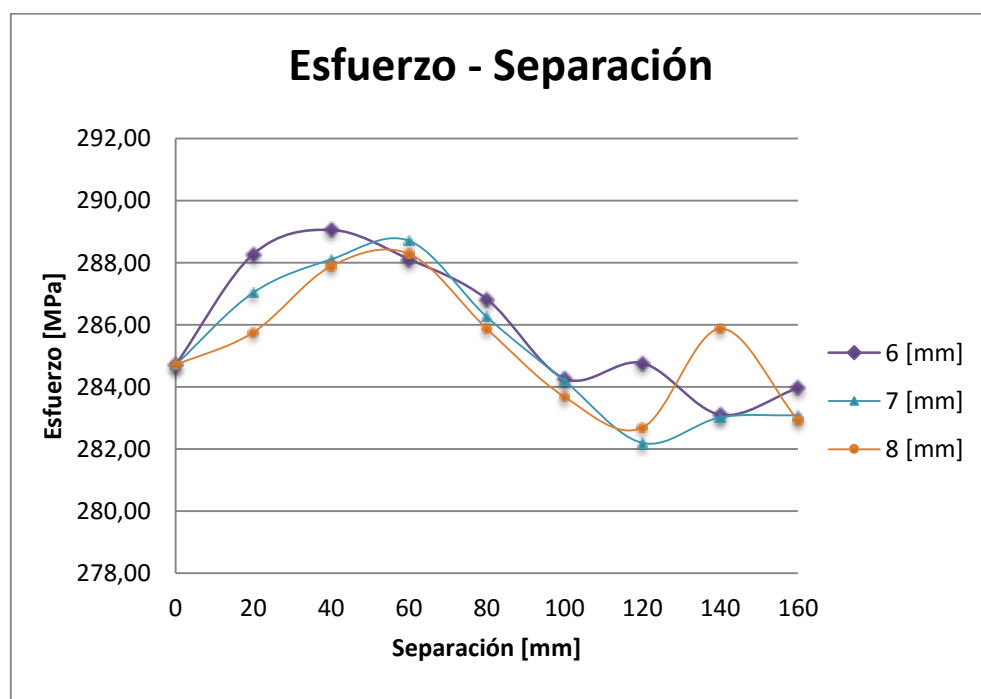
La curva azul muestra la distribución de datos para un espesor de 3 mm. A una separación de 20 mm, se observa un incremento en el esfuerzo hasta un valor máximo de 289,1 MPa. A partir de este punto, los valores presentan una disminución gradual hasta alcanzar una separación de 120 mm, en donde los valores de esfuerzo se ven incrementados en un mínimo porcentaje. Para la separación de 120 mm, se obtuvo una ligera disminución en el esfuerzo, mas no es considerable.

La curva roja muestra la distribución para un espesor de 4 mm. El valor del esfuerzo se ve incrementado hasta un valor máximo de 288,83 MPa al alcanzar una separación

de 20 mm. A partir de este punto los valores se ven disminuidos gradualmente, obteniendo el menor valor del esfuerzo de 283,58 MPa a una separación de 140 mm. Finalmente el esfuerzo aumenta a 284,51 MPa a una separación de 160 mm.

La curva verde muestra la distribución para un espesor de 5 mm en donde al igual que para los 3 y 4 mm, se aprecia un incremento en el esfuerzo para la mínima separación de 20 mm donde se obtuvo un valor de 288,7 MPa. Para éste espesor los valores tienden a disminuir gradualmente, hasta alcanzar el valor mínimo de 283,46 MPa a una separación de 120 mm. A partir de este punto el esfuerzo se incrementó hasta alcanzar los 284,29 MPa a la separación de 160 mm.

El diagrama Esfuerzo – Separación que se observa en la figura 54, muestra las curvas obtenidas tras las simulaciones para los espesores de 6 mm, 7 mm y 8 mm.



**Figura 54.** Diagrama Esfuerzo – Separación simulación atesadores carga no coincidente 2.

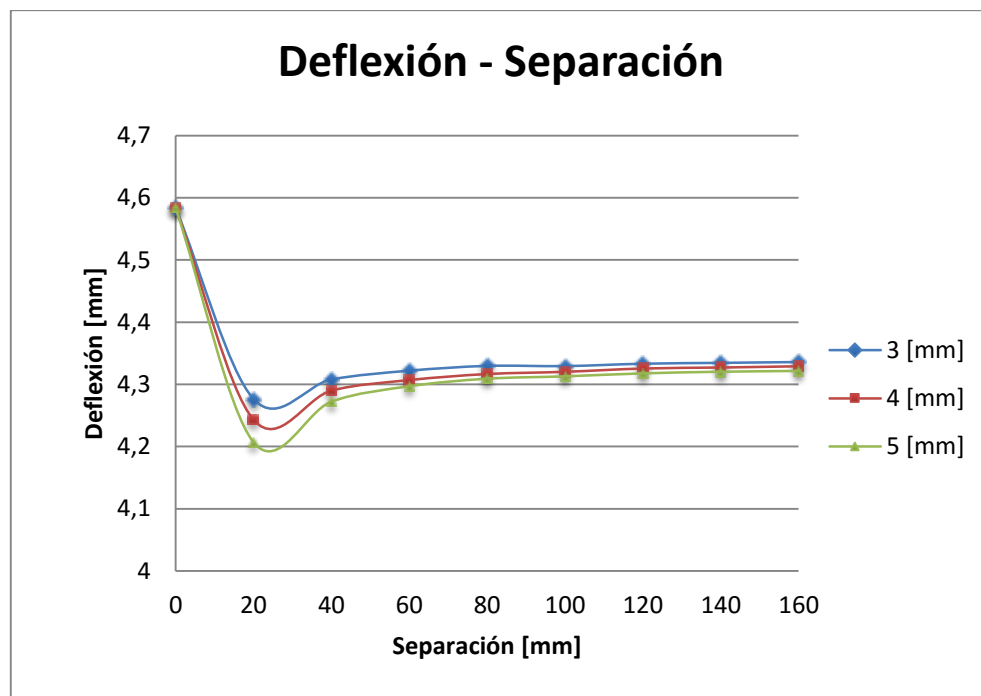
La curva morada muestra la distribución de datos para un espesor de 6 mm, en donde se obtuvo que para las dos primeras distribuciones de 20 y 40 mm el valor del esfuerzo incrementa hasta alcanzar los 289,06 MPa, para éste último. A partir de este punto se observa una disminución gradual del esfuerzo, alcanzando el valor de 283,11 MPa a la separación de 140 mm y teniendo un incremento a la separación de 160 mm, con un valor de 283,97 MPa.

La curva celeste muestra la distribución para un espesor de 7 mm, en la que se observa el incremento del esfuerzo para las separaciones de 20, 40 y 60 mm, obteniendo en ésta última un esfuerzo de 288,71 MPa. El esfuerzo disminuye para separaciones mayores. Para la separación de 140 mm se obtuvo un esfuerzo de 282,20 MPa, después de este punto el esfuerzo es incrementado hasta alcanzar los 283,09 MPa a una separación de 160 mm.

Finalmente, la curva naranja representa la distribución para 8 mm. En ésta se observa un incremento para las separaciones de 20, 40 y 60 mm, alcanzando un valor de 288,29 MPa para ésta última. El esfuerzo disminuye hasta alcanzar una separación de 120 mm obteniendo 282,69 MPa, a partir de este punto el esfuerzo es incrementado hasta alcanzar los 285,88 MPa a una separación de 140 mm. Finalmente el esfuerzo disminuye a 282,93 MPa con una separación de 160 mm.

#### **4.3.2.1.2 Análisis de la deflexión.**

El diagrama Deflexión – Separación entre atiesadores que se muestra en la figura 55, muestra las curvas obtenidas tras las simulaciones de 3 mm, 4 mm y 5 mm.



**Figura 55.** Diagrama Deflexión – Separación simulación atiesadores carga no coincidente 1.

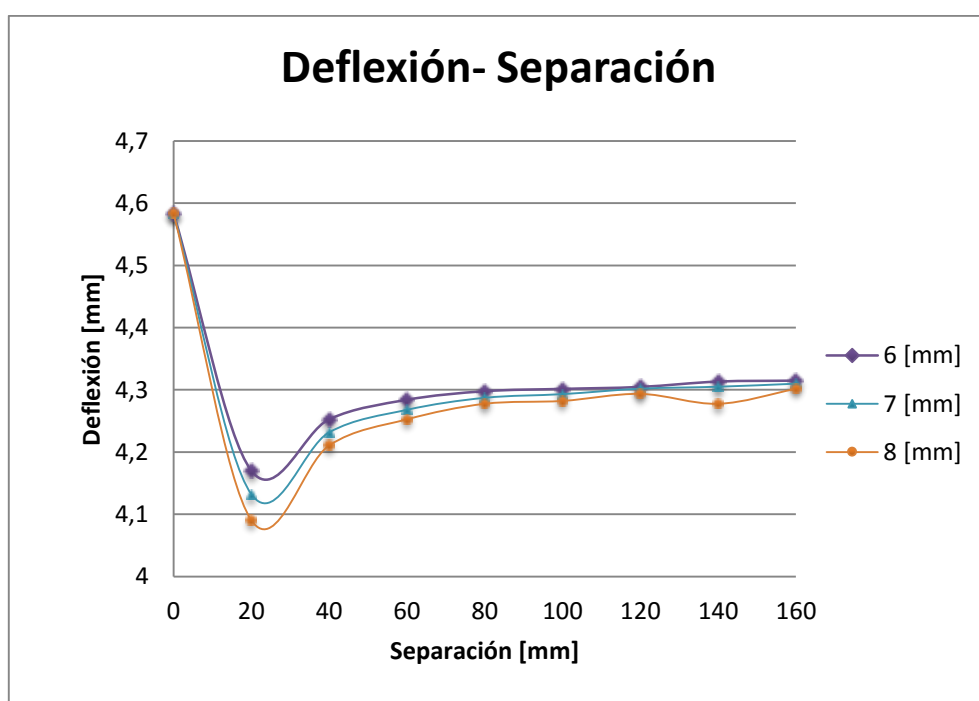
De esta manera, para un espesor de 3 mm mostrado en la curva azul se obtuvo una disminución en la deflexión de la viga para todos los casos. En ésta se observa una disminución del 6,7% a una separación de 20 mm. La deflexión se incrementa al aumentar la separación, obteniendo una tendencia lineal a partir de los 60 mm.

La curva roja muestra un espesor de atiesador de 4 mm, en donde se obtuvo una disminución del 7,4% en la deflexión para una separación de 20 mm. A partir de este punto los valores aumentan obteniendo una tendencia lineal al alcanzar un valor de separación de 80 mm. Estos valores de deflexión fluctúan entre 5,6% y 6,4%.

De igual manera la curva verde representa la distribución para un espesor de 5 mm, la cual muestra una tendencia similar a la curva anterior, obteniendo valores de disminución en la deflexión mayores. Se observa una disminución del 8,2% para una

separación de 20 mm. A partir de este punto, los valores se incrementan gradualmente hasta estabilizarse a una separación de 80 mm, adquiriendo una tendencia lineal. Estos valores fluctúan entre 5,7% y 6,8% de disminución.

Los diagramas obtenidos para los espesores de 6 mm, 7 mm y 8 mm, se presenta en la figura 56. En ésta se observa que para todos los espesores las vigas presentan una disminución en la deflexión.



**Figura 56.** Diagrama Deflexión – Separación simulación atesadores carga no coincidente 2.

La curva morada representa un espesor de 6 mm de la cual, se obtuvo una disminución en la deflexión de la viga para todos los casos. En ésta se observa una disminución máxima del 9% para una separación de 20 mm con un valor de 4,17 mm.

La deflexión se incrementa al aumentar la separación, obteniendo una tendencia lineal a partir de los 60 mm, valores que fluctúan entre el 6% y 7 % de disminución.

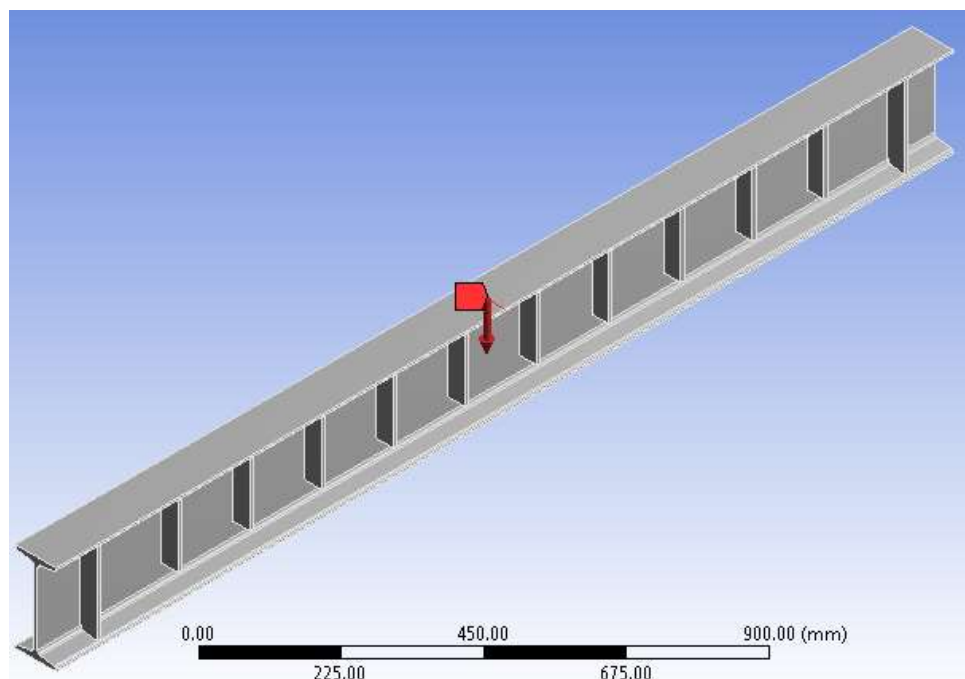
La curva celeste representa la distribución para un espesor de 7 mm, la cual muestra una tendencia similar a la curva anterior, obteniendo valores mayores en la disminución de la deflexión. Para una separación de 20 mm se obtuvo una disminución del 9,9%. A partir de este valor, al aumentar la separación entre atiesadores se obtuvo un incremento en la deflexión, hasta adquirir una tendencia lineal con una separación de 80 mm. Con separaciones mayores a 80 mm se obtuvo una disminución entre 6% y 7%.

De igual manera la curva naranja representa la distribución para un espesor de 8 mm, la cual muestra una tendencia similar a las dos curvas anteriores. Se observa una disminución del 10,8% para una separación de 20 mm, con un valor de 4,09 mm. De manera similar que para los casos anteriores se obtuvo un incremento en los valores hasta alcanzar una separación de 80 mm en donde los valores fluctúan en proporciones muy pequeñas, obteniendo una disminución mínima con una separación de 160 mm del 6,2%.

#### **4.3.2.2 Segundo modelo computacional.**

En el segundo modelo computacional se consideró a los atiesadores centrales ubicados a la mitad de la carga aplicada al igual que el caso anterior como se muestra en la figura 57. Se utilizó una altura de 140 mm y se realizaron las simulaciones para todas las separaciones y espesores antes expuestos. Anexo O.

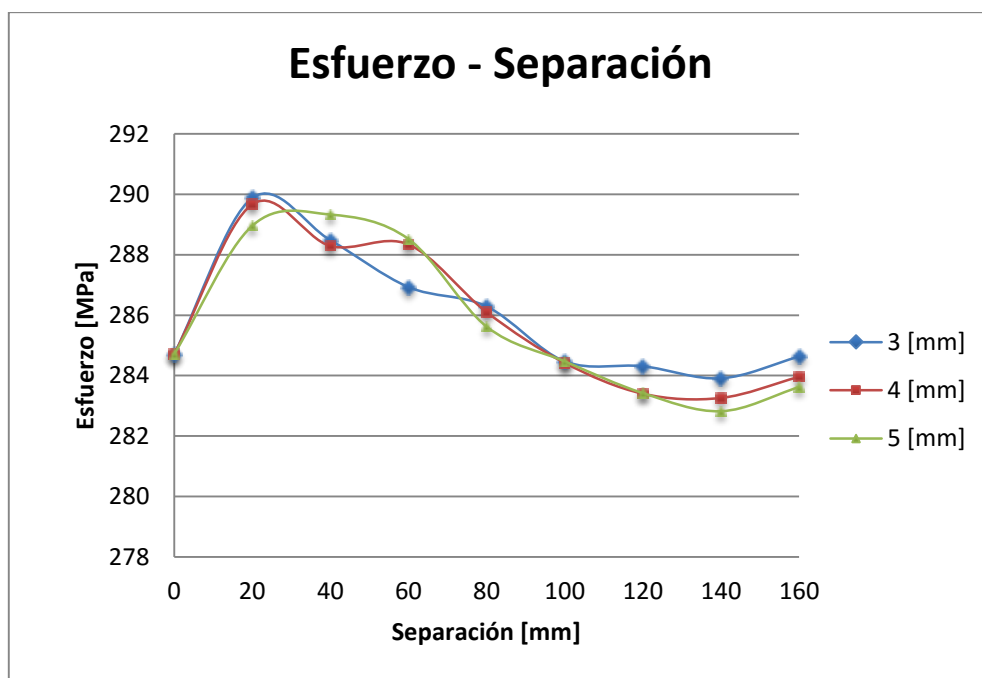




**Figura 57.** Modelo de elementos finitos carga no coincidente al atiesador 3.

#### **4.3.2.2.1 Análisis del esfuerzo.**

Del estudio realizado se analizaron los resultados obtenidos de esfuerzo y deflexión. El diagrama Esfuerzo – Separación entre atiesadores que se muestra en la figura 58, muestra las curvas obtenidas tras las simulaciones de 3 mm, 4 mm y 5 mm. El valor del esfuerzo para la viga sin atiesadores se presenta con una separación de 0 mm para realizar la comparación de los datos.



**Figura 58.** Diagrama Esfuerzo – Separación simulación atiesadores carga no coincidente 1.

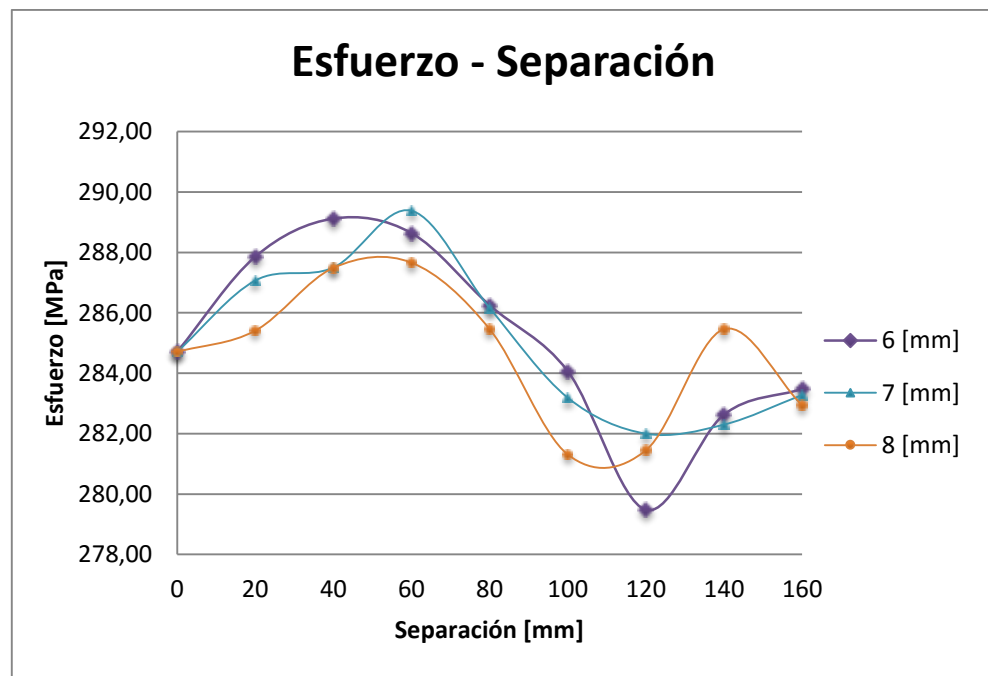
La curva azul muestra la distribución de datos para un espesor de 3 mm. A una separación de 20 mm, se observa un incremento en el esfuerzo hasta un valor máximo de 289,88 MPa. A partir de este punto, los valores presentan una disminución gradual, hasta alcanzar una separación de 140 mm obteniendo un esfuerzo de 283,91 MPa. Para una separación de 160 mm se obtuvo un incremento en el esfuerzo de 284,63 MPa.

La curva roja muestra la distribución para un espesor de 4 mm. El valor del esfuerzo se ve incrementado hasta un valor máximo de 289,67 MPa al alcanzar una separación de 20 mm. A partir de este punto los valores se ven disminuidos gradualmente, obteniendo el menor valor del esfuerzo de 283,26 MPa a una separación de 140 mm. Finalmente el esfuerzo aumenta a 283,96 MPa a una separación de 160 mm.

La curva verde muestra la distribución para un espesor de 5 mm, en donde se obtuvo que para la distribución de 40 mm el valor del esfuerzo incrementa hasta alcanzar los

289,33 MPa. A partir de esta separación los valores tienden a disminuir gradualmente, hasta alcanzar el valor mínimo de 282,82 MPa a una separación de 140 mm. Finalmente el esfuerzo se incrementó hasta alcanzar los 283,62 MPa a la separación de 160 mm.

El diagrama Esfuerzo – Separación que se observa en la figura 59, muestra las curvas obtenidas tras las simulaciones para los espesores de 6 mm, 7 mm y 8 mm.



**Figura 59.** Diagrama Esfuerzo – Separación simulación atiesadores carga no coincidente 2.

La curva morada muestra la distribución para un espesor de 6 mm, en donde se obtuvo que para las dos primeras distribuciones de 20 y 40 mm, el valor del esfuerzo incrementa hasta alcanzar los 289,12 MPa, para éste último. A partir de este punto se

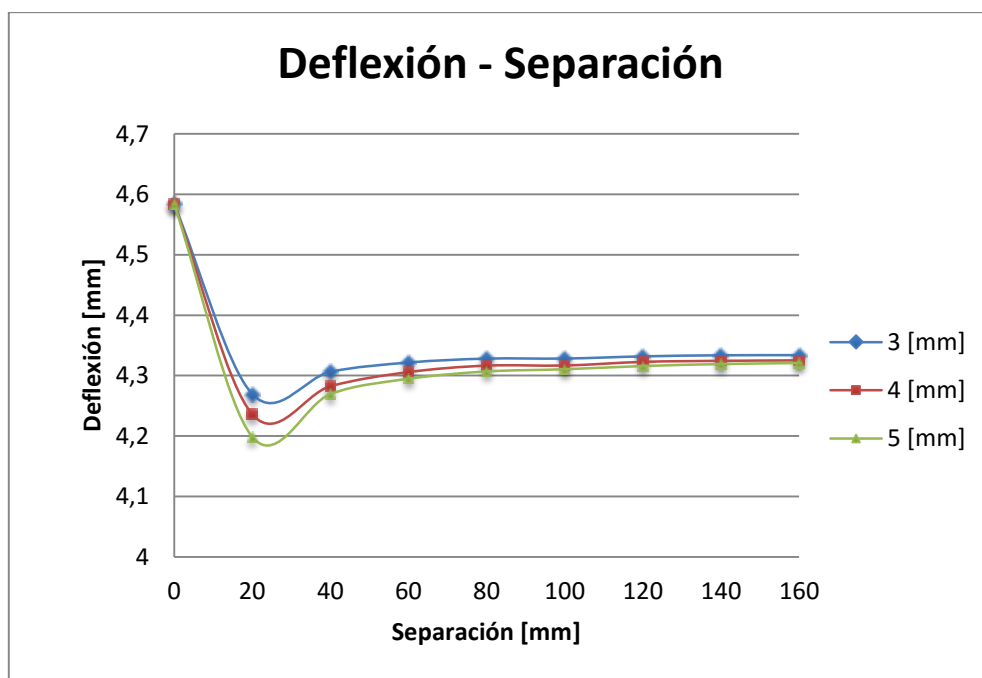
observa una disminución del esfuerzo. El esfuerzo disminuye hasta alcanzar una separación de 120 mm a 279,48 MPa. Con la separación de 140 mm existe un incremento hasta 282,03 MPa, finalmente para la separación de 160 mm vuelve a disminuir a 283,48 MPa.

La curva celeste muestra la distribución para un espesor de 7 mm, en la que se observa el incremento del esfuerzo para las separaciones de 20, 40 y 60 mm, obteniendo en ésta última un esfuerzo de 289,38 MPa. El esfuerzo disminuye para separaciones mayores, donde se obtuvo la mayor disminución para una separación de 120 mm con un valor de esfuerzo 282 MPa.

Finalmente, la curva naranja representa la distribución para 8 mm. En ésta se observa un incremento para las separaciones de 20, 40 y 60 mm, alcanzando un valor de 287,66 MPa para ésta última. El esfuerzo disminuye a 281,31 MPa, con una separación de 100 mm. Para la separación de 140 mm existe un incremento hasta 285,46 MPa. Finalmente para la separación de 160 mm vuelve a disminuir a 282,94 MPa.

#### **4.3.2.2.2 Análisis de la deflexión.**

El diagrama Deflexión – Separación entre atiesadores que se muestra en la figura 60, muestra las curvas obtenidas tras las simulaciones de 3 mm, 4 mm y 5 mm con una carga no coincidente al atiesador y una altura de atiesador de 140 mm.



**Figura 60.** Diagrama Deflexión – Separación simulación atiesadores carga no coincidente 1.

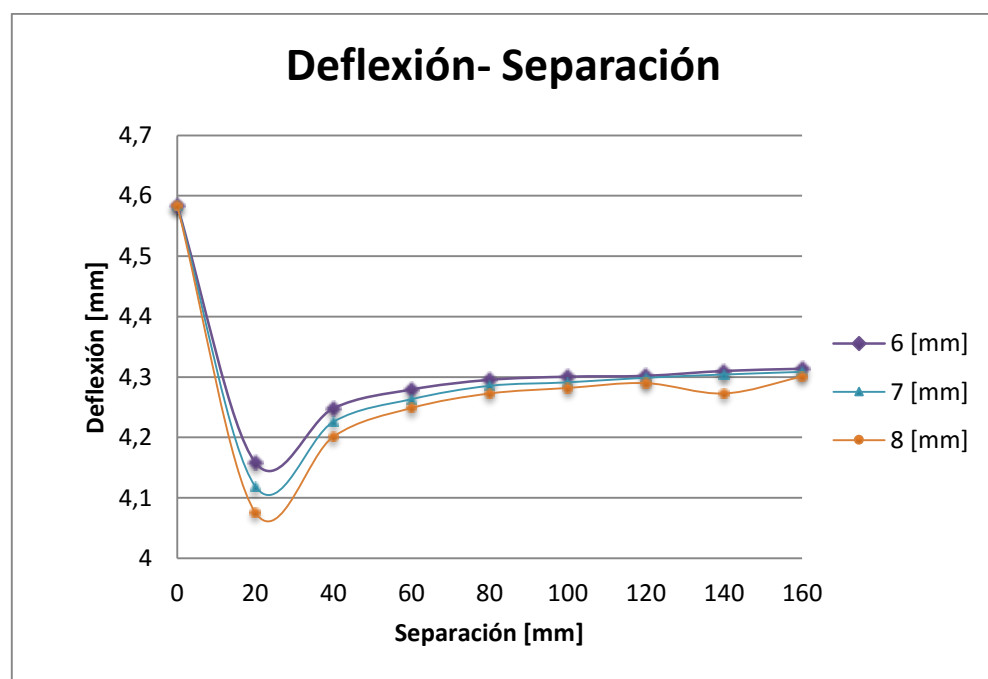
De esta manera, para un espesor de 3 mm mostrado en la curva azul se obtuvo una disminución en la deflexión de la viga para todos los casos. En ésta se observa una disminución del 6,9% a una separación de 20 mm. La deflexión se incrementa al aumentar la separación, obteniendo una tendencia lineal a partir de los 60 mm, con valores entre 5,5% y 6%.

La curva roja muestra un espesor de atiesador de 4 mm, en donde se obtuvo una disminución del 7,6% en la deflexión para una separación de 20 mm. A partir de este punto los valores aumentan obteniendo una tendencia lineal al alcanzar un valor de separación de 80 mm. Estos valores de deflexión fluctúan entre 5,7% y 6,6%.

De igual manera la curva verde representa la distribución para un espesor de 5 mm, la cual muestra una tendencia similar a la curva anterior, obteniendo valores de disminución en la deflexión mayores. Se observa una disminución del 8,4% para una

separación de 20 mm. A partir de este punto, los valores se incrementan gradualmente hasta estabilizarse a una separación de 80 mm, adquiriendo una tendencia lineal. Estos valores fluctúan entre 5,7% y 6,9% de disminución.

Los diagramas obtenidos para los espesores de 6 mm, 7 mm y 8 mm, se presenta en la figura 61. En ésta se observa que para todos los espesores las vigas presentan una disminución en la deflexión.



**Figura 61.** Diagrama Deflexión – Separación simulación atiesadores carga no coincidente 2.

La curva morada representa un espesor de 6 mm, de la cual se obtuvo una disminución en la deflexión de la viga para todos los casos. En la curva se observa una disminución máxima del 9,3% para una separación de 20 mm con un valor de 4,16

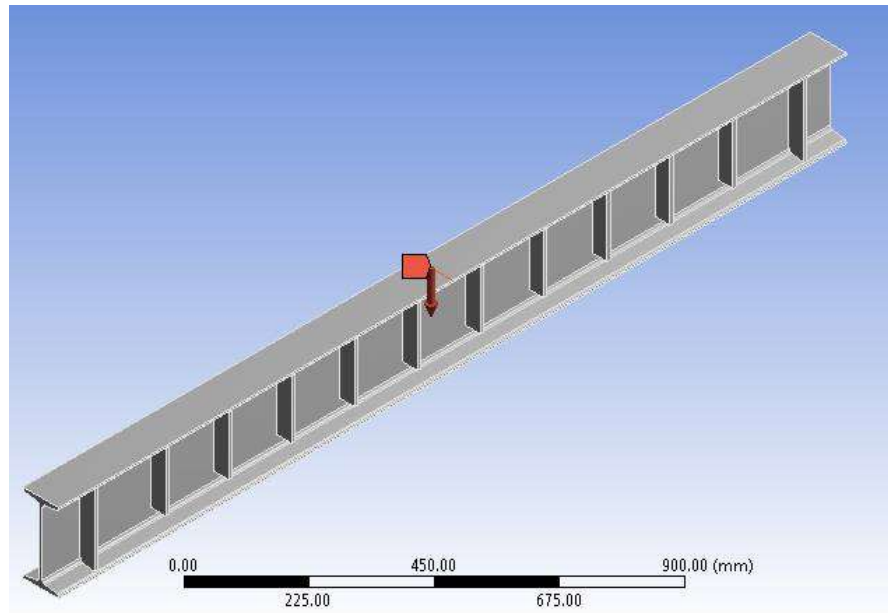
mm. Conforme se incrementa la separación se observa un incremento gradual, valores que fluctúan entre el 6% y 7,3 % de disminución.

La curva celeste representa la distribución para un espesor de 7 mm, la cual muestra una tendencia similar a la curva anterior. Para una separación de 20 mm se obtuvo una disminución del 10,1%. A partir de este valor, al aumentar la separación entre atiesadores se obtuvo un incremento en la deflexión, hasta adquirir una tendencia lineal con una separación de 80 mm. Con separaciones mayores a 80 mm se obtuvo una disminución que rodea el 6%.

De igual manera la curva naranja representa la distribución para un espesor de 8 mm, la cual muestra una tendencia similar a las dos curvas anteriores. Se observa una disminución del 11,1% para una separación de 20 mm, con un valor de 4,08 mm. De manera similar que para los casos anteriores se obtuvo un incremento en los valores, hasta alcanzar una separación de 80 mm en donde los valores fluctúan en proporciones muy pequeñas, obteniendo una disminución mínima del 6,2% con una separación de 160 mm.

#### **4.3.2.1 Tercer modelo computacional.**

En este modelo computacional, se tomó como variables el espesor y la separación entre atiesadores. Se utilizó una altura en el atiesador de 150 mm (Anexo P). El eje neutro del atiesador central, se encuentra desplazado la mitad de la separación correspondiente de la carga aplicada en la mitad de la longitud de la viga, como se muestra en la figura 62. A partir de éste, se distribuyen los atiesadores en los dos sentidos con las distintas separaciones.

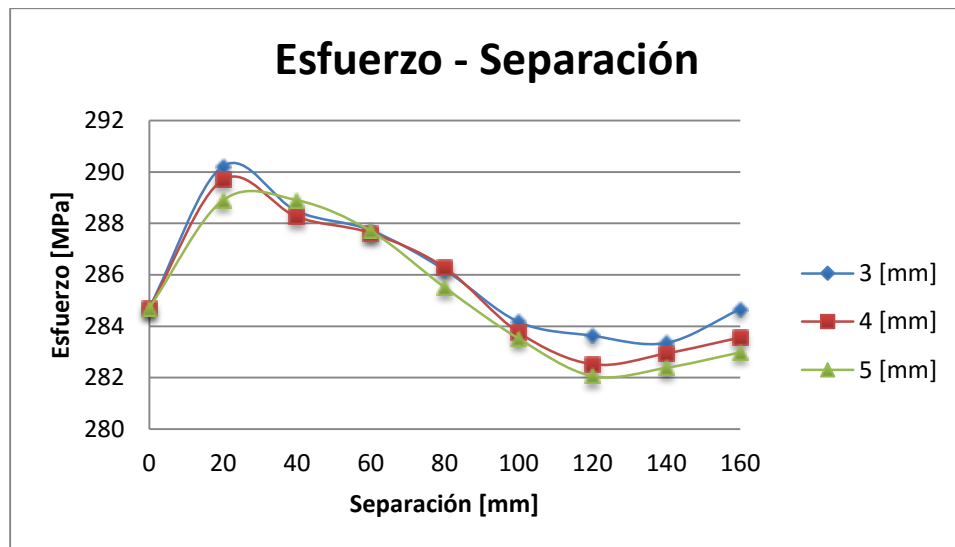


**Figura 62.** Modelo de elementos finitos carga no coincidente y altura de atiesador de 150 mm.

#### 4.3.2.1.1 Análisis del esfuerzo.

En la figura 63 se representa el diagrama Esfuerzo – Separación. Donde se muestra las simulaciones realizadas para los espesores de 3, 4 y 5 mm, tomando la separación de cero como el valor del esfuerzo de la viga sin atiesadores, para representar el origen de las curvas. Además éste análisis fue realizado para una altura de atiesador de 150 mm.





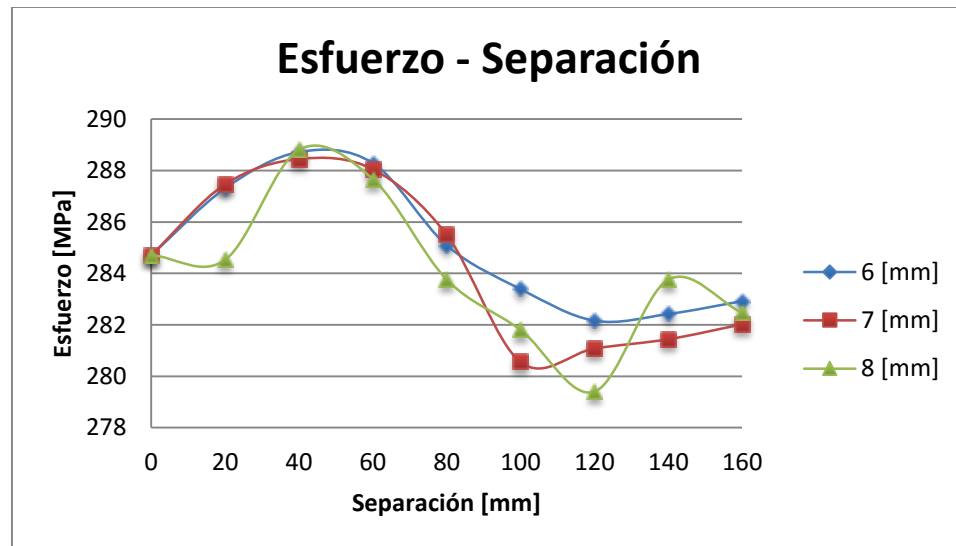
**Figura 63.** Diagrama Esfuerzo – Separación, simulación atiesadores carga no coincidente 1.

En este diagrama se observa que la curva azul representa el espesor del atiesador de 3 mm, la curva es fluctuante a lo largo de cada separación. Las separaciones desde 20 a 80 mm, presentan un mayor valor de esfuerzo que la viga sin atiesadores, lo cual no es representativo para el actual estudio. A partir de los 100 mm de separación se obtienen valores menores de esfuerzo, alcanzando 283.35 MPa para una separación de 140 mm.

De igual manera, en el diagrama se observa la curva roja que muestra un espesor de 4 mm, en donde sus valores para el esfuerzo empiezan a disminuir a partir de una separación de 100 mm, obteniendo para este espesor un valor menor de esfuerzo de 282.52 MPa, con una separación de 120 mm.

También se observa la curva de color verde, que representa el espesor de 5 mm, donde los valores de esfuerzo empiezan a disminuir a partir de 100 mm de separación, su menor esfuerzo es de 282.06 MPa, con una separación de 120 mm.

Continuando con el análisis del diagrama Esfuerzo – Separación, como se ilustra en la figura 64, se analizó el fenómeno para espesores de 6, 7, y 8 mm.



**Figura 64.** Diagrama Esfuerzo – Separación, simulación atiesadores carga no coincidente 2.

Se observa que la curva azul representa el espesor del atiesador de 6 mm, los valores de 20 hasta 80 mm de separación, tienen un esfuerzo mayor al de la viga sin atiesadores por lo tanto no son significativos para el estudio. A partir de los 100 mm hasta 160 mm de separación se obtienen valores menores de esfuerzo, alcanzando 282.16 MPa, para una separación de 120 mm.

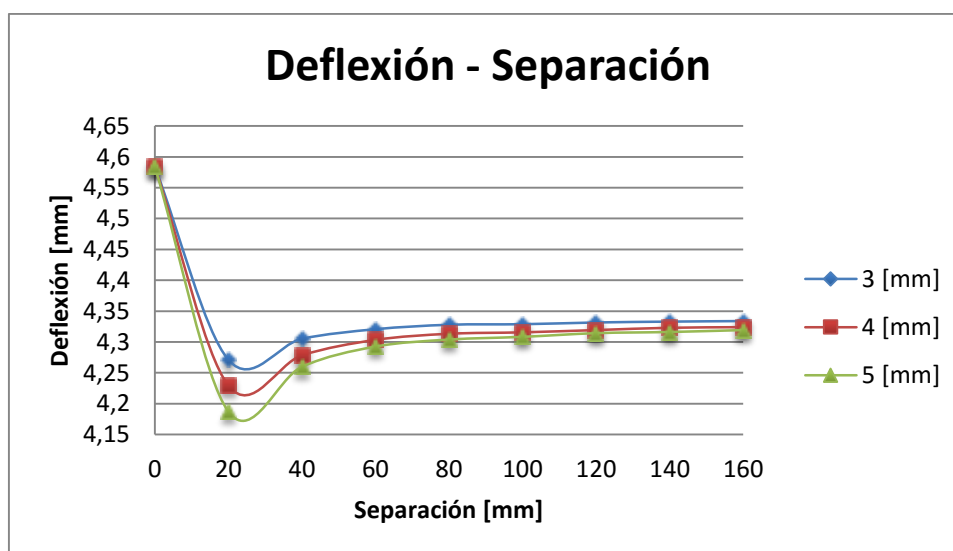
El espesor de 7 mm, está representado por la curva de color rojo, obteniendo su menor esfuerzo de 280.55 MPa para una separación de 100 mm.

De la misma manera se observa la curva de color verde, que representa el espesor de 8 mm, la cual mantiene una distribución de esfuerzos fluctuantes, inicialmente se observa una disminución del esfuerzo de 284.53 MPa, para una separación de 20 mm, luego presenta un incremento considerable del esfuerzo para los valores de 40 y 60

mm de separación. Se observa que sus menores valores de esfuerzo están a partir de 80 mm de separación, donde su menor esfuerzo es de 279.4 MPa para una separación de 120 mm.

#### 4.3.2.1.2 Análisis de la deflexión.

Dentro del estudio también se analizó la deflexión de la viga, y el fenómeno que causan los atiesadores para éste. La figura 65, muestra el diagrama Deflexión – Separación para una altura de atiesador de 150 mm, tomando la separación de cero con un valor de 4.584 mm de deflexión de la viga sin atiesadores.



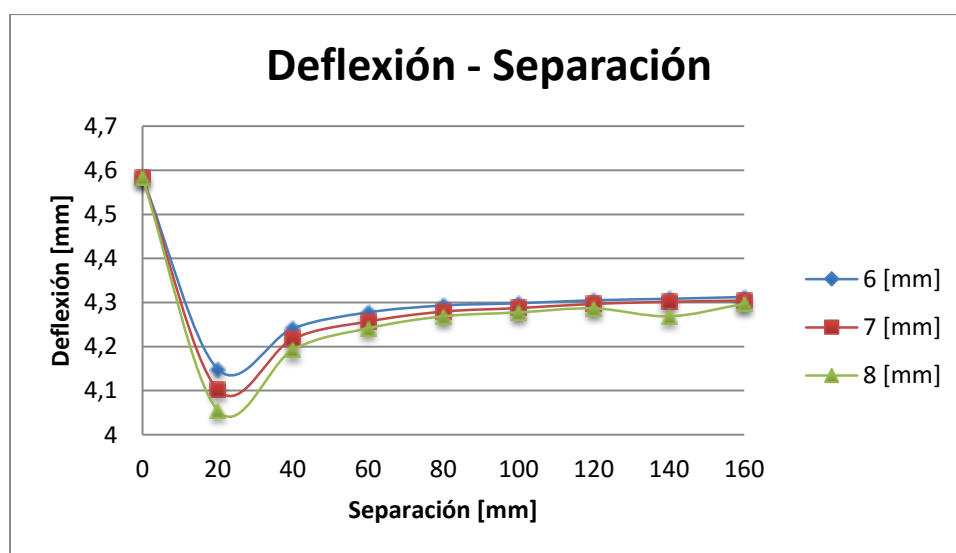
**Figura 65.** Diagrama Deflexión – Separación, simulación atiesadores carga no coincidente 1.

La curva azul muestra un espesor de atiesador de 3 mm, para la separación de 20 mm, ésta muestra una drástica disminución en su deflexión alcanzando un valor de 4.271 mm, lo que representa el 7%. Las separaciones desde 40 hasta 100 mm, muestran

una disminución de la deflexión del 6%, y a partir de 120 hasta 160 mm existe una disminución entre 5% y 6% de la deflexión.

Del mismo modo, la curva de color rojo representa un espesor de 4 mm, al igual que la curva anterior presenta una considerable disminución de deflexión de 4.229 mm, para la separación de 20 mm, lo que representa un valor del 8%. A partir de la separación de 40 mm hasta 160 mm se muestra una disminución de deflexión de entre 6% y 7%.

La curva de color verde, representa el espesor de 5 mm, con una disminución del 9% de su deflexión representando un valor de 4.187 mm, para una separación de 20 mm. También muestra una disminución de entre 6% y 7% de la deflexión a partir de una separación de 40 hasta 160 mm. Complementando el análisis de la deflexión se ilustra la figura 66, la cual representa el diagrama Deflexión – Separación, para espesores de 6, 7 y 8 mm.



**Figura 66.** Diagrama Deflexión – Separación, simulación atiesadores carga no coincidente 2.

Se observa que la curva azul muestra un espesor de atiesador de 6 mm, para una separación de 20 mm, ésta muestra una disminución en su deflexión alcanzando un valor de 4.149 mm, lo que representa el 9%. Las separaciones desde 40 mm hasta 100

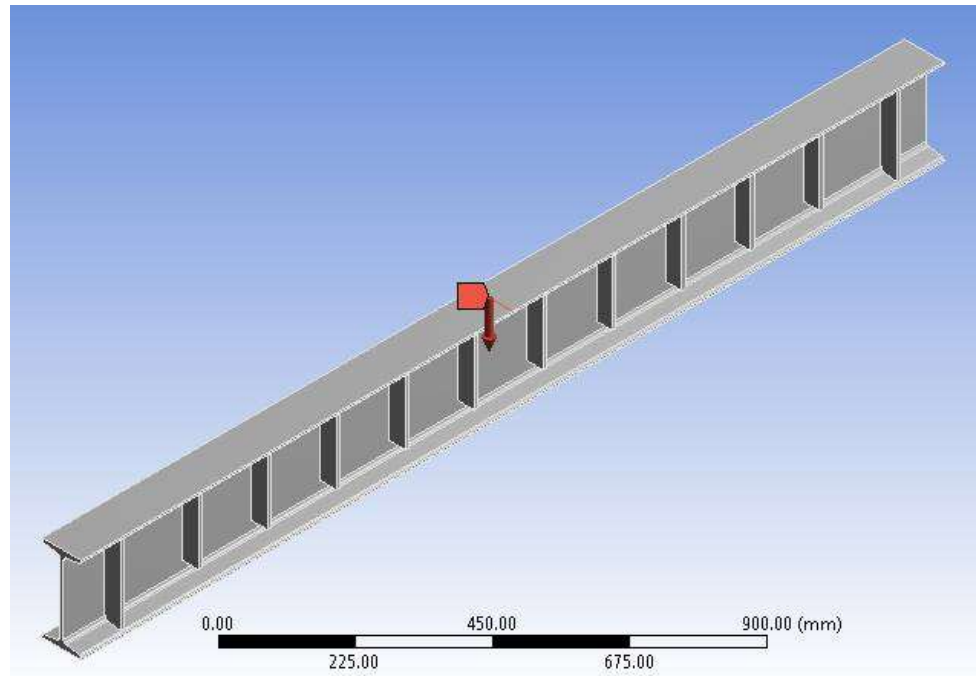
mm, muestran una disminución de la deflexión del 6% y 7%, y a partir de 120 mm hasta 160 mm existe una disminución del 6% en su deflexión.

La curva de color rojo representa un espesor de 7 mm, al igual que la curva anterior presenta una considerable disminución de deflexión de 4.102 mm, lo que representa un valor del 11%. A partir de la separación de 40 mm hasta 80 mm se muestra una disminución de deflexión de valores entre 7% y 8%, las separaciones desde 100 mm hasta 160 mm muestran una disminución del 6%.

También se observa que la curva de color verde, representa el espesor de 8 mm, con una disminución del 12% de su deflexión representando un valor de 4.055 mm, para una separación de 20 mm. También muestra una disminución de entre 7% y 9% de la deflexión a partir de una separación de 40 mm hasta 100 mm. Finalmente su disminución es de 6% y 7% desde 120 mm hasta 160 mm de separación.

#### **4.3.2.2 Cuarto modelo computacional.**

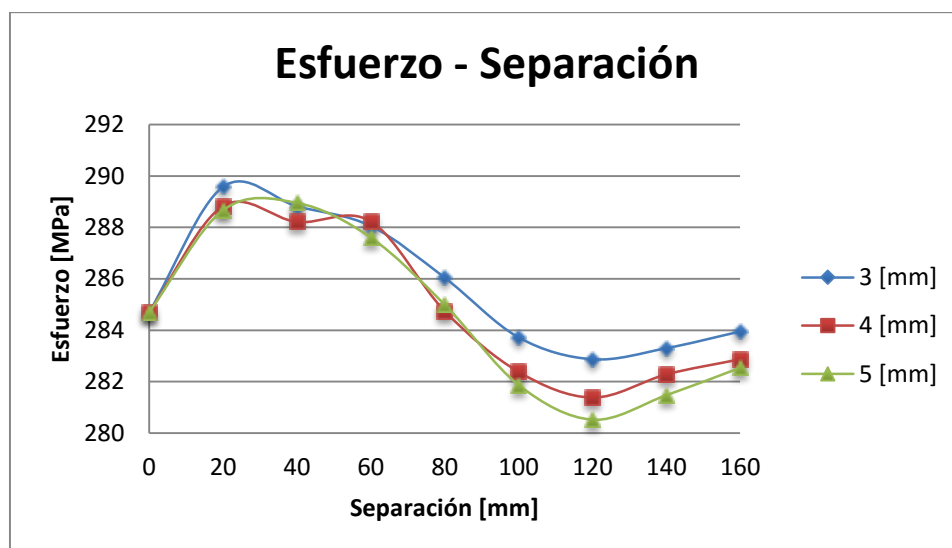
En este modelo computacional, se tomó como variables el espesor y la separación entre atiesadores. Se utilizó una altura en el atiesador de 160 mm (Anexo Q). El eje neutro del atiesador central, se encuentra desplazado la mitad de la separación correspondiente de la carga aplicada en la mitad de la longitud de la viga, como se muestra en la figura 67. A partir de éste, se distribuyen los atiesadores en los dos sentidos con las distintas separaciones.



**Figura 67.** Modelo de elementos finitos carga no coincidente 5.

#### **4.3.2.2.1 Análisis del esfuerzo.**

En la figura 68 se representa el diagrama Esfuerzo – Separación. Donde se muestra las simulaciones realizadas para los espesores de 3, 4 y 5 mm, tomando la separación de cero como el valor del esfuerzo sin atiesadores, para representar el origen de las curvas. Además éste análisis fue realizado para una altura de atiesador de 160 mm.

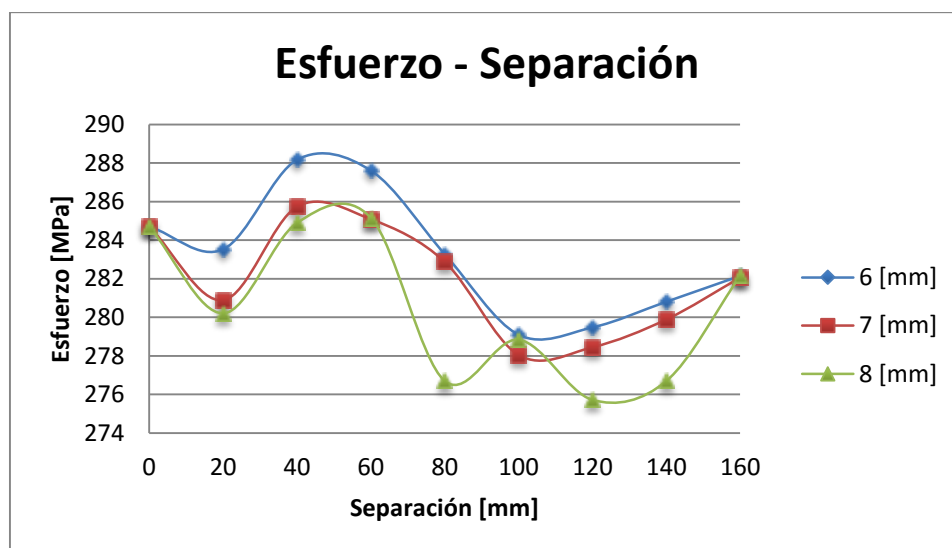


**Figura 68.** Diagrama Esfuerzo – Separación, simulación atiesadores carga no coincidente 1.

La curva azul representa el espesor del atiesador de 3 mm, la curva es fluctuante a lo largo de cada separación. Las separaciones desde 20 a 80 mm, presentan un mayor valor de esfuerzo que la viga sin atiesadores, lo cual no es representativo para el actual estudio. A partir de los 100 mm de separación se obtienen valores menores de esfuerzo, alcanzando 282.87 MPa para una separación de 120 mm, disminuyendo el 0.6% del esfuerzo.

Se observa la curva roja que representa un espesor de 4 mm, en donde sus valores para el esfuerzo empiezan a disminuir a partir de una separación de 100 mm, obteniendo para este espesor un valor menor de esfuerzo de 281.38 MPa, con una separación de 120 mm. Además la curva de color verde, que representa el espesor de 5 mm, donde los valores de esfuerzo empiezan a disminuir a partir de 100 mm de separación, su menor esfuerzo es de 280.52 MPa, con una separación de 120 mm, alcanzando una disminución del 1.5%.

Complementando el análisis del diagrama Esfuerzo – Separación, como se ilustra en la figura 69, se analizó los datos para los espesores de 6, 7, y 8 mm.



**Figura 69.** Diagrama Esfuerzo – Separación, simulación atiesadores carga no coincidente 2.

La curva azul representa el espesor del atiesador de 6 mm, la curva mantiene una distribución no uniforme a lo largo del eje de las abscisas, los valores de 40 y 60 mm de separación, tienen un esfuerzo mayor al de la viga sin atiesadores por lo tanto no son significativos para el estudio. A partir de los 80 mm hasta 160 mm de separación se obtienen valores menores de esfuerzo, alcanzando 279.1 MPa, para una separación de 100 mm, alcanzando un valor del 2% de disminución del esfuerzo.

El espesor de 7 mm, está representado por la curva de color rojo, que también muestra una distribución no uniforme, obteniendo su menor esfuerzo de 278.05 MPa para una separación de 100 mm, alcanzando un valor del 2.3% en su disminución de esfuerzo.

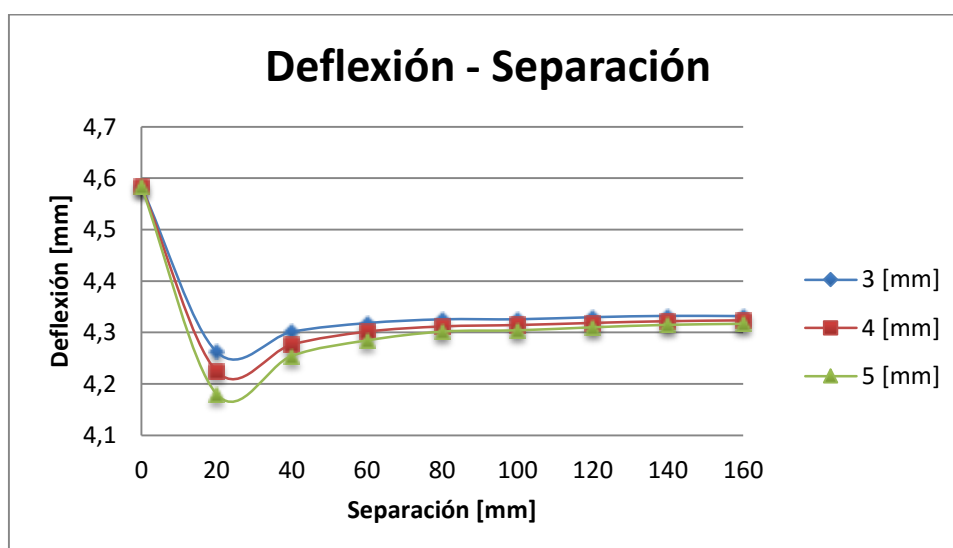
De la misma manera se observa la curva de color verde, que representa el espesor de 8 mm, la cual mantiene una distribución de esfuerzos fluctuante, inicialmente se observa una disminución del esfuerzo de 280.21 MPa, para una separación de 20 mm, luego presenta un incremento del esfuerzo para los valores de 40 y 60 mm de separación. Estos valores de esfuerzos no son significativos para el estudio. Se observa



que sus menores valores de esfuerzo están a partir de 80 mm de separación, donde su menor esfuerzo es de 275.72 MPa para una separación de 120 mm, alcanzando así una disminución del 3.2%.

#### 4.3.2.2.2 Análisis de la deflexión.

La figura 70, muestra el diagrama Deflexión – Separación para una altura de atiesador de 160 mm, tomando la separación de cero con un valor de 4.584 mm de deflexión de la viga sin atiesadores.



**Figura 70.** Diagrama Deflexión – Separación, simulación atiesadores carga no coincidente 1, con altura de 160mm.

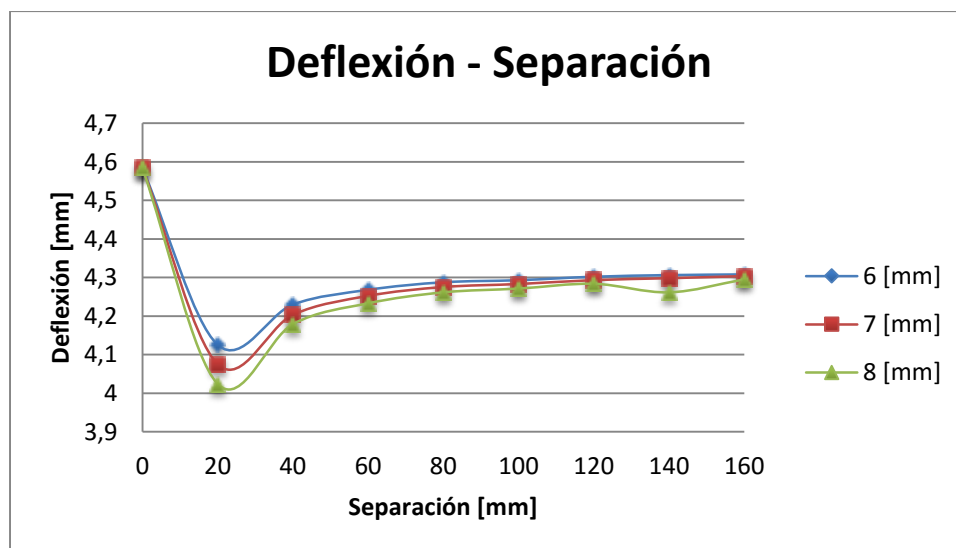
La curva azul muestra un espesor de atiesador de 3 mm, para la separación de 20 mm, ésta muestra una disminución en su deflexión alcanzando un valor de 4.262 mm, lo que representa el 7%. Las separaciones desde 40 hasta 100 mm, muestran una

disminución de la deflexión del 6%, y a partir de 120 hasta 160 mm existe una disminución entre 5% y 6% de la deflexión.

Además la curva de color rojo, representa un espesor de 4 mm, al igual que la curva anterior presenta una considerable disminución de deflexión de 4.225 mm, con 20 mm de separación, lo que representa un valor del 8%. A partir de la separación de 40 mm hasta 160 mm se muestran una disminución de deflexión de valores entre 6% y 7%.

La curva de color verde, representa el espesor de 5 mm, con una disminución del 9% de su deflexión representando un valor de 4.180 mm, para una separación de 20 mm.

La disminución de la deflexión a partir de 40 mm hasta 160 mm varía con valores del 6% y 7%. Continuando con el análisis de la deflexión se ilustra la figura 71, ésta representa el diagrama Deflexión – Separación, para espesores de 6, 7 y 8 mm.

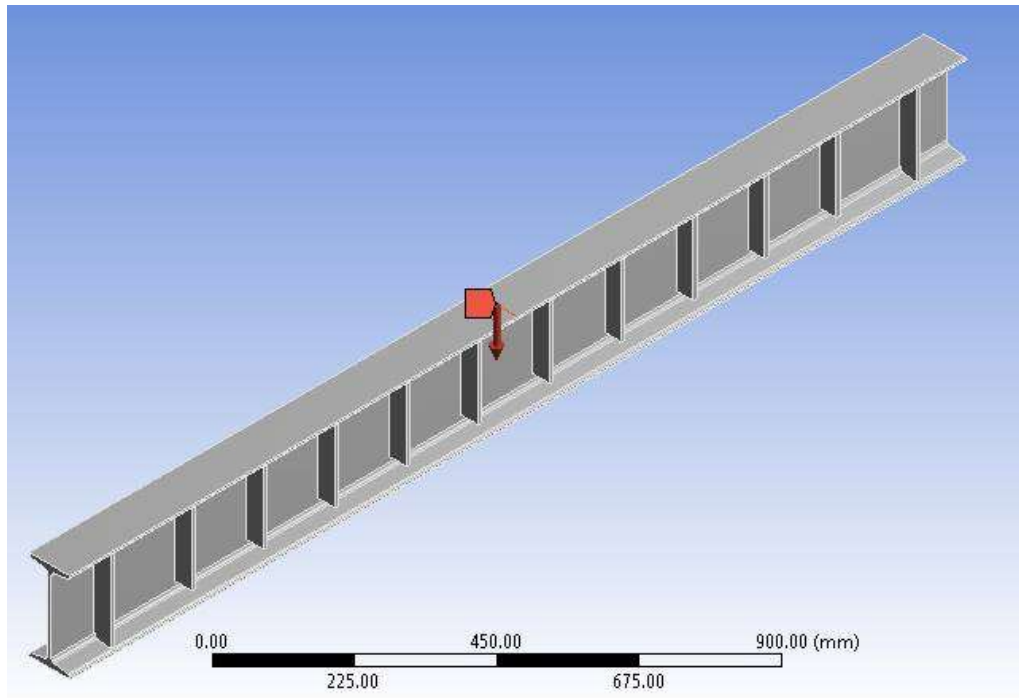


**Figura 71.** Diagrama Deflexión – Separación, simulación atiesadores carga no coincidente 2.

La curva azul representa un espesor de 6 mm para atiesadores. Para la primera separación de 20 mm el valor de la deflexión disminuye a un valor de 4.126 mm siendo éste un 10% menor que la deflexión de la viga sin atiesadores. Los valores de separación de 40 y 60 mm, indican una disminución del 7% y 8%, mientras que para el resto de valores la disminución es del 6%. La curva de color rojo representa un espesor de 7 mm, al igual que la curva anterior presenta una considerable disminución de deflexión de 4.075 mm, para una separación de 20 mm, lo que representa un valor del 11%. A partir de la separación de 40 hasta 80 mm se muestran una disminución de deflexión de valores entre 7% y 8%, las separaciones desde 100 mm hasta 160 mm muestran una disminución de entre el 6% y 7%. También se observa que la curva de color verde, representa el espesor de 8 mm, con una disminución del 12% de su deflexión representando un valor de 4.024 mm, para una separación de 20 mm. También muestra una disminución de entre 8% y 9% de la deflexión a partir de una separación de 40 y 60 mm. Finalmente para las separaciones de 120 mm hasta 160 mm su disminución varía entre 6% y 7%.

#### **4.3.2.3 Quinto modelo computacional.**

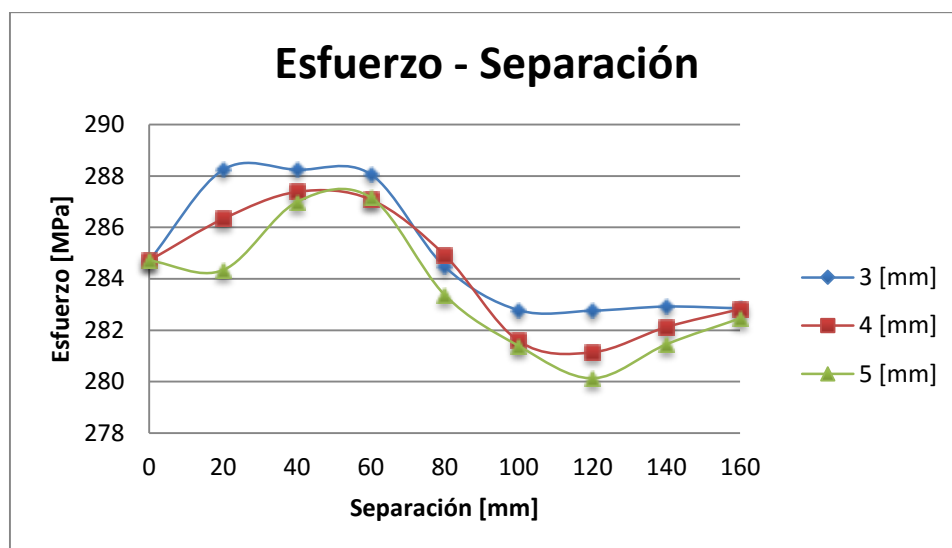
En este modelo computacional, se tomó como variables el espesor y la separación entre atiesadores. Se utilizó una altura en el atiesador de 170 mm (Anexo R). El eje neutro del atiesador central, se encuentra desplazado la mitad de la separación correspondiente de la carga aplicada en la mitad de la longitud de la viga, como se muestra en la figura 72. A partir de éste, se distribuyen los atiesadores en los dos sentidos con las distintas separaciones.



**Figura 72.** Modelo de elementos finitos carga no coincidente 6.

#### **4.3.2.3.1 Análisis del esfuerzo.**

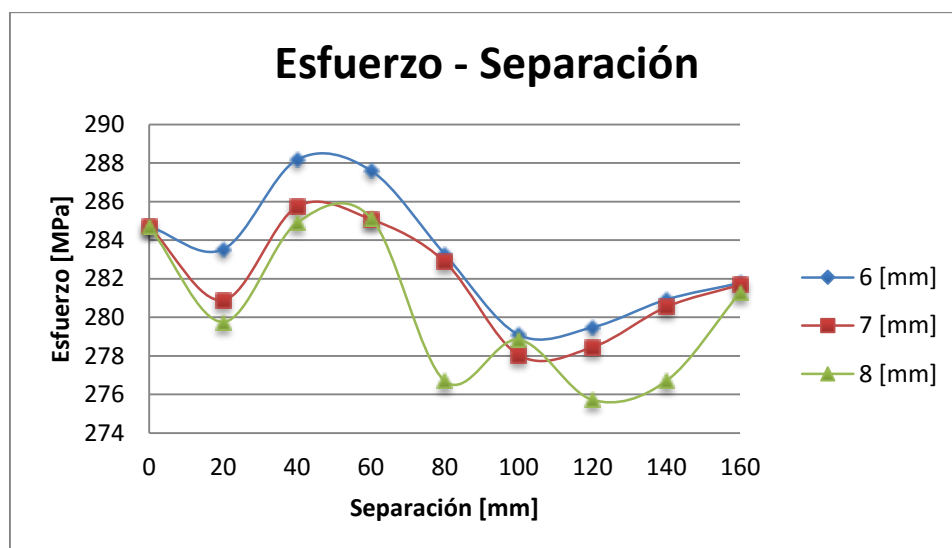
En la figura 73 se representa el diagrama Esfuerzo – Separación. Donde se muestra las simulaciones realizadas para los espesores de 3, 4 y 5 mm, tomando la separación de cero como el valor del esfuerzo sin atesadores, para representar el origen de las curvas. Además éste análisis fue realizado para una altura de atiesador de 170 mm.



**Figura 73.** Diagrama Esfuerzo – Separación, simulación atiesadores carga no coincidente 1.

Se observa que la curva azul representa el espesor del atiesador de 3 mm, la curva es fluctuante a lo largo de cada separación. Las separaciones desde 20 a 60 mm, presentan un mayor valor de esfuerzo que la viga sin atiesadores, lo cual no es representativo para el actual estudio. A partir de los 80 mm de separación se obtienen valores menores de esfuerzo, alcanzando 282.76 MPa para una separación de 120 mm.

La curva roja muestra un espesor de 4 mm, en donde sus valores para el esfuerzo empiezan a disminuir a partir de una separación de 100 mm, obteniendo para este espesor un valor menor de esfuerzo de 281.14 MPa, con una separación de 120 mm. También se observa la curva de color verde, que representa el espesor de 5 mm, donde los valores de esfuerzo empiezan a disminuir a partir de 80 mm de separación, su menor esfuerzo es de 280.13 MPa, con una separación de 120 mm. El análisis continúa con el diagrama Esfuerzo – Separación, como se ilustra en la figura 74, se analizó los datos con espesores de 6, 7, y 8 mm.



**Figura 74.** Diagrama Esfuerzo – Separación, simulación atiesadores carga no coincidente 2.

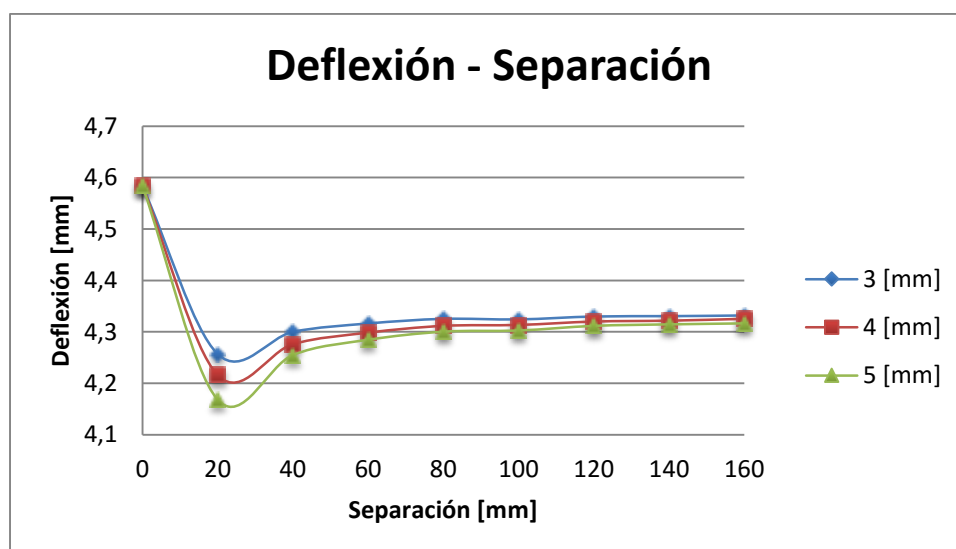
La curva azul representa el espesor del atiesador de 6 mm, la curva mantiene una distribución no uniforme a lo largo del eje de las abscisas, los valores de 40 y 60 mm de separación, tienen un esfuerzo mayor al de la viga sin atiesadores por lo tanto no son significativos para el estudio. A partir de los 80 hasta 160 mm de separación se obtienen valores menores de esfuerzo, alcanzando 279.1 MPa, para una separación de 100 mm, alcanzando un valor del 2% de disminución del esfuerzo.

El espesor de 7 mm, está representado por la curva de color rojo, que también muestra una distribución no uniforme, obteniendo su menor esfuerzo de 278.05 MPa para una separación de 100 mm, alcanzando un valor del 2.3% en su disminución de esfuerzo. De la misma manera se observa la curva de color verde, que representa el espesor de 8 mm, la cual mantiene una distribución de esfuerzos fluctuante, inicialmente se observa una disminución del esfuerzo de 279.76 MPa, para una separación de 20 mm, luego presenta un incremento del esfuerzo para los valores de 40 y 60 mm de separación. Estos valores de esfuerzos no son significativos para el

estudio. Se observa que sus menores valores de esfuerzo están a partir de 80 mm de separación, donde su menor esfuerzo es de 275.72 MPa para una separación de 120 mm, alcanzando así una disminución del 3.2%.

#### 4.3.2.3.2 Análisis de la deflexión.

La figura 75, muestra el diagrama Deflexión – Separación para una altura de atiesador de 170 mm, tomando la separación de cero con un valor de 4.584 mm de deflexión de la viga sin atiesadores.

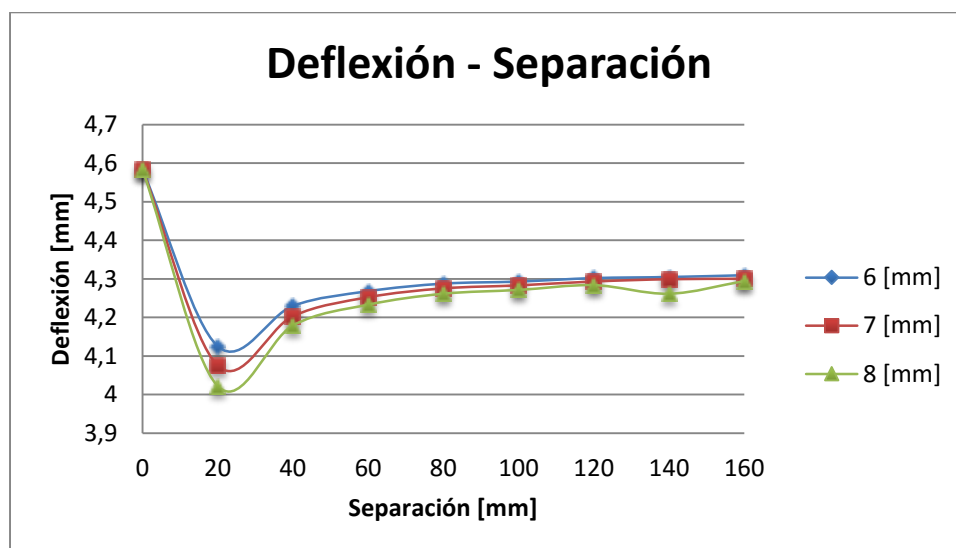


**Figura 75.** Diagrama Deflexión – Separación, simulación atiesadores carga no coincidente 1.

La curva azul muestra un espesor de atiesador de 3 mm, para la separación de 20 mm, ésta muestra una disminución en su deflexión alcanzando un valor de 4.257 mm, lo que representa el 7%. Las separaciones desde 40 mm hasta 100 mm, muestran una disminución de la deflexión del 6%, y a partir de 120 mm hasta 160 mm existe una disminución entre 5% y 6% de la deflexión.

Además la curva de color rojo, representa un espesor de 4 mm, al igual que la curva anterior presenta una considerable disminución de deflexión de 4.216 mm, con 20 mm de separación, lo que representa un valor del 8%. A partir de la separación de 40 mm hasta 160 mm se muestran una disminución de deflexión de valores entre 6 y 7%.

La curva de color verde, representa el espesor de 5 mm, con una disminución del 9% de su deflexión representando un valor de 4.168 mm, para una separación de 20 mm. La disminución de la deflexión a partir de 40 mm hasta 160 mm varía con valores del 6% y 7%. Continuando con el análisis de la deflexión se ilustra la figura 76, esta representa el diagrama Deflexión – Separación, para espesores de 6, 7 y 8 mm.



**Figura 76.** Diagrama Deflexión – Separación, simulación atiesadores carga no coincidente 2.

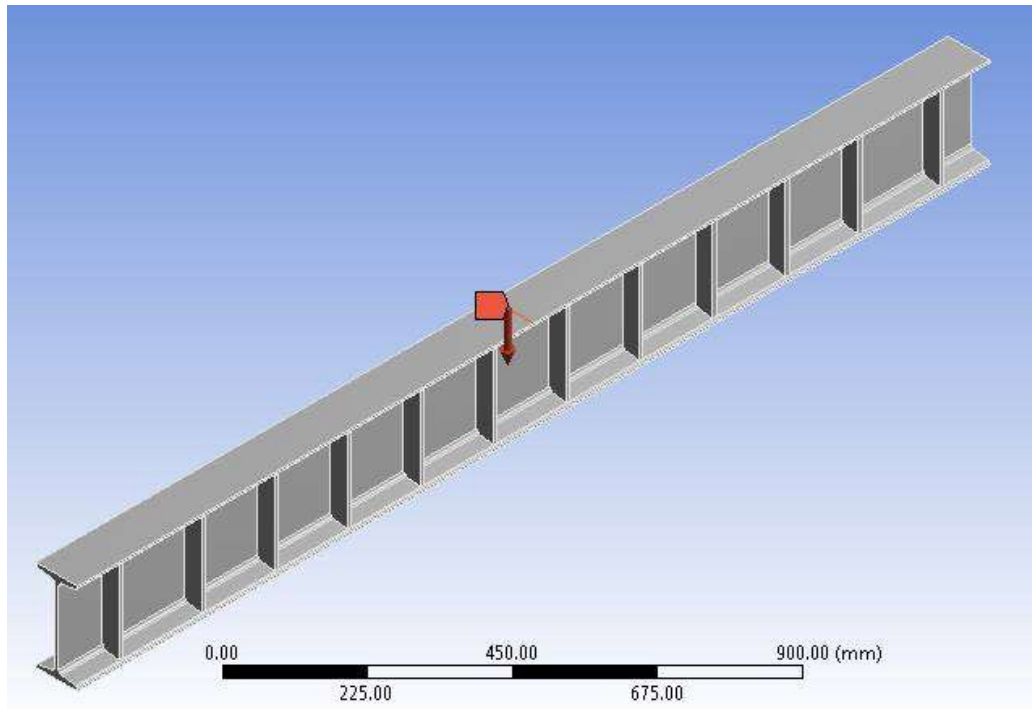
La curva azul representa un espesor de 6 mm para atiesadores. Para la primera separación de 20 mm el valor de la deflexión disminuye a un valor de 4.126 mm siendo



éste un 10% menor que la deflexión de la viga sin atiesadores. Los valores de separación de 40 y 60 mm, indican una disminución del 7% y 8%, mientras que para el resto de valores la disminución es del 6%. La curva de color rojo representa un espesor de 7 mm, al igual que la curva anterior presenta una considerable disminución de deflexión de 4.075 mm, para una separación de 20 mm, lo que representa un valor del 11%. A partir de la separación de 40 mm hasta 80 mm se muestra una disminución de deflexión de valores entre 7% y 8%, las separaciones desde 100 mm hasta 160 mm muestran una disminución de entre el 6% y 7%. También se observa que la curva de color verde, representa el espesor de 8 mm, con una disminución del 12% de su deflexión representando un valor de 4.022 mm, para una separación de 20 mm. También muestra una disminución de entre 8% y 9% de la deflexión a partir de una separación de 40 y 60 mm. Finalmente para las separaciones de 120 hasta 160 mm su disminución varía entre 6% y 7%.

#### **4.3.2.4 Sexto modelo computacional.**

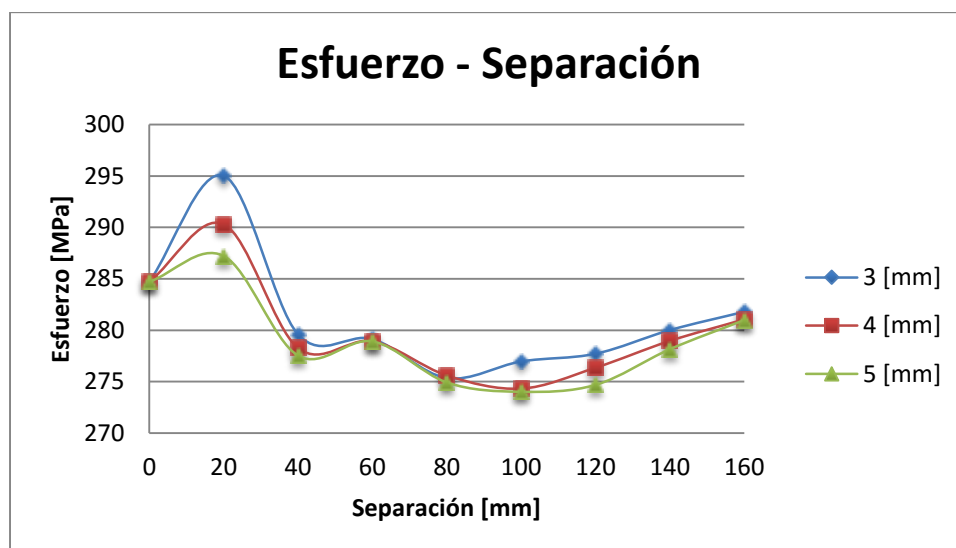
En este modelo computacional, se tomó como variables el espesor y la separación entre atiesadores. Se consideró 200 mm la altura del atiesador, que va del patín superior al patín inferior (Anexo S). El eje neutro del atiesador central, se encuentra desplazado la mitad de la separación correspondiente, de la carga aplicada en la mitad de la longitud de la viga como se muestra en la figura 77, a partir de éste, se distribuyen los atiesadores en los dos sentidos con las distintas separaciones.



**Figura 77.** Modelo de elementos finitos carga no coincidente 7.

#### **4.3.2.4.1 Análisis del esfuerzo.**

En la figura 78 se representa el diagrama Esfuerzo – Separación. Donde se muestra las simulaciones realizadas para los espesores de 3, 4 y 5 mm, tomando la separación de cero como el valor del esfuerzo de la viga sin atiesadores, para representar el origen de las curvas. Además éste análisis fue realizado para una altura de atiesador de 200 mm.

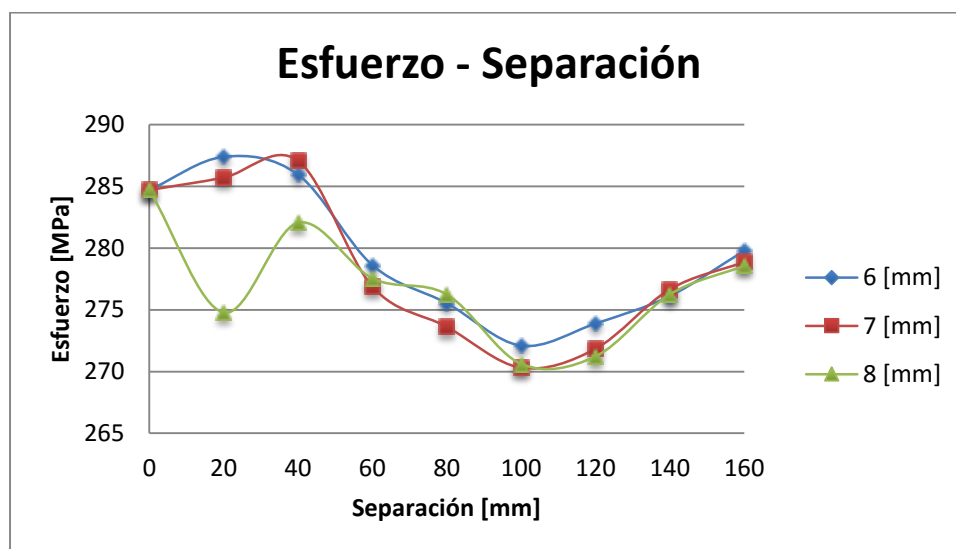


**Figura 78.** Diagrama Esfuerzo – Separación, simulación atiesadores carga no coincidente 1.

La curva azul representa el espesor del atiesador de 3 mm, la curva es fluctuante a lo largo de cada separación. La separación de 20 mm, presenta un mayor valor de esfuerzo que la viga sin atiesadores, lo cual no es representativo para el actual estudio. A partir de 40 mm de separación se obtienen valores menores de esfuerzo, alcanzando 275.35 MPa para una separación de 80 mm, disminuyendo el 3.3% del esfuerzo sin atiesadores.

La curva roja que representa un espesor de 4 mm, en donde sus valores para el esfuerzo empiezan a disminuir a partir de una separación de 40 mm, obteniendo para este espesor un valor menor de esfuerzo de 274.32 MPa, con una separación de 100 mm.

La curva de color verde, representa el espesor de 5 mm, donde los valores de esfuerzo empiezan a disminuir a partir de 40 mm de separación, su menor esfuerzo es de 274.01 MPa, con una separación de 100 mm, alcanzando una disminución del 3.8%. Complementando el análisis del diagrama Esfuerzo – Separación, como se ilustra en la figura 79, se analizó los datos para los espesores de 6, 7, y 8 mm.



**Figura 79.** Diagrama Esfuerzo – Separación, simulación atiesadores carga no coincidente 2.

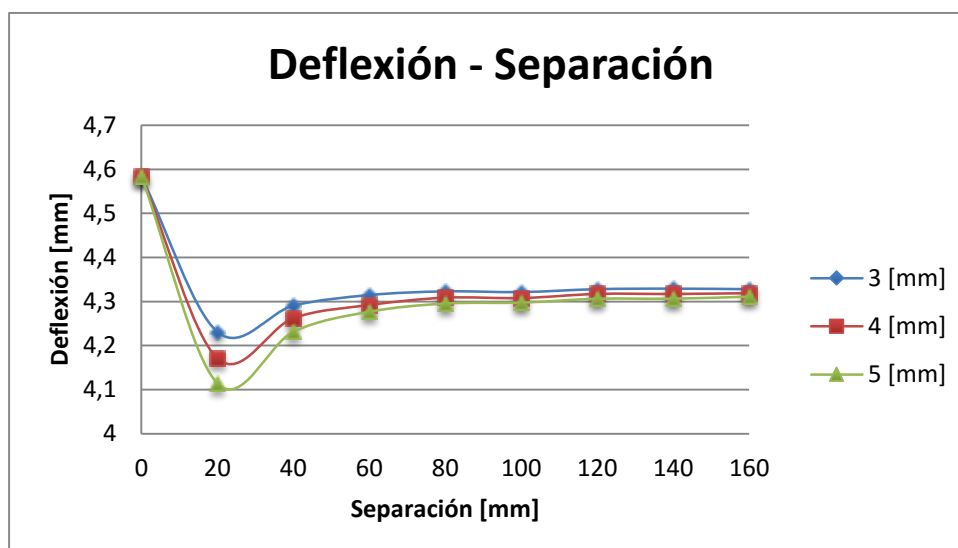
La curva azul representa el espesor del atiesador de 6 mm, la curva mantiene una distribución no uniforme a lo largo del eje de las abscisas, los valores de 20 y 40 mm de separación, tienen un esfuerzo mayor al de la viga sin atiesadores por lo tanto no son significativos para el estudio. A partir de los 60 mm hasta 160 mm de separación se obtienen valores menores de esfuerzo, alcanzando 272.1 MPa, para una separación de 100 mm, alcanzando un valor del 4.4% de disminución del esfuerzo.

El espesor de 7 mm, está representado por la curva de color rojo, que también muestra una distribución no uniforme, obteniendo su menor esfuerzo de 270.31 MPa para una separación de 100 mm, alcanzando un valor del 5.1% en su disminución de esfuerzo. De la misma manera se observa la curva de color verde, que representa el espesor de 8 mm, la cual mantiene una distribución de esfuerzos fluctuante, inicialmente se observa una disminución del esfuerzo de 274.78 MPa, para una separación de 20 mm, luego presenta valores fluctuantes a partir de 40 mm, donde su

menor esfuerzo es de 270.62 MPa para una separación de 100 mm, alcanzando así una disminución del 4.9%.

#### 4.3.2.4.2 Análisis de la deflexión.

La figura 80, muestra el diagrama Deflexión – Separación para una altura de atiesador de 200 mm, tomando la separación de cero con un valor de 4.584 mm de deflexión de la viga sin atiesadores.

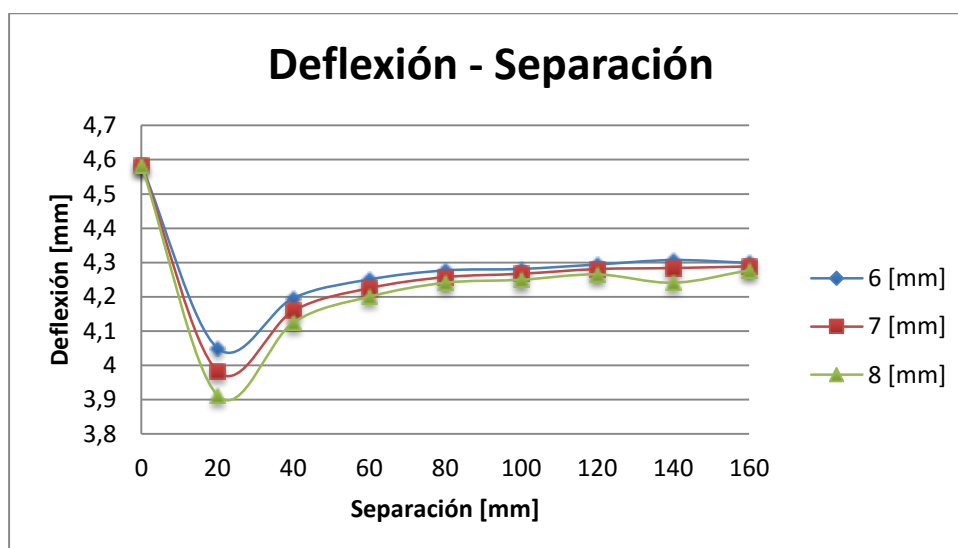


**Figura 80.** Diagrama Deflexión – Separación, simulación atiesadores carga no coincidente 1.

La curva azul muestra un espesor de atiesador de 3 mm. Para la separación de 20 mm, ésta muestra una disminución en su deflexión alcanzando un valor de 4.231 mm, lo que representa el 8%. Las separaciones desde 40 mm hasta 160 mm, muestran una disminución de la deflexión del 6%. Además la curva de color rojo, representa un espesor de 4 mm, al igual que la curva anterior presenta una considerable disminución

de deflexión de 4.171 mm, con 20 mm de separación, lo que representa un valor del 9%. A partir de la separación de 40 mm hasta 160 mm se muestran una disminución de deflexión de valores entre 6% y 7%.

La curva de color verde, representa el espesor de 5 mm, con una disminución del 10% de su deflexión representando un valor de 4.114 mm, para una separación de 20 mm. La disminución de la deflexión a partir de 40 mm hasta 160 mm varía con valores del 6% al 8%. Continuando con el análisis de la deflexión se ilustra la figura 81, esta representa el diagrama Deflexión – Separación, para espesores de 6, 7 y 8 mm.



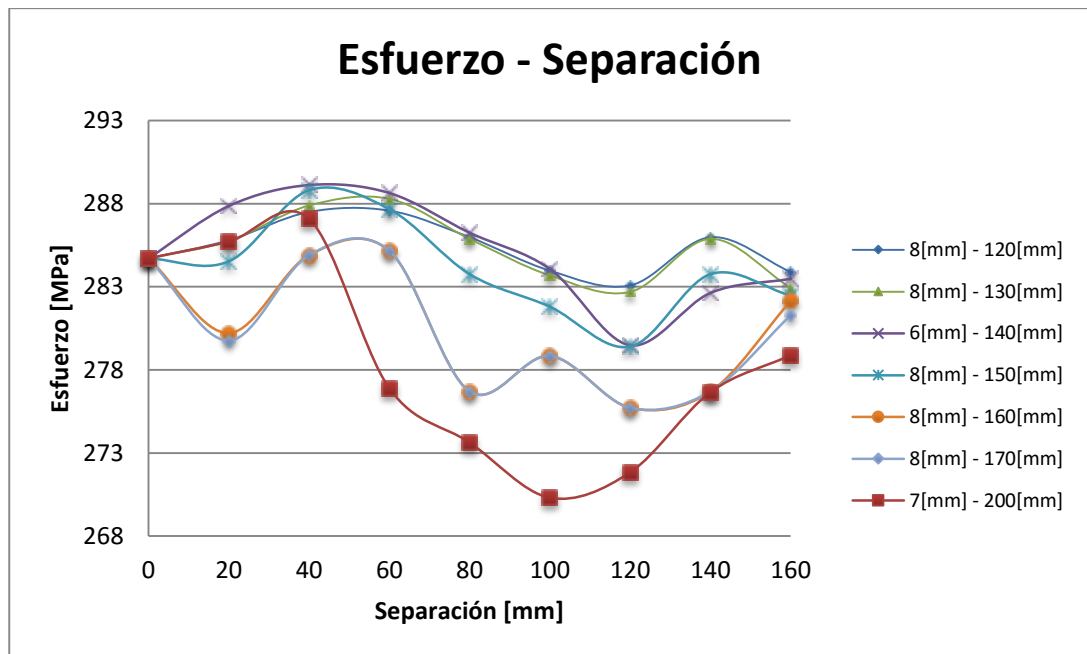
**Figura 81.** Diagrama Deflexión – Separación, simulación atiesadores carga no coincidente 2.

La curva azul representa un espesor de 6 mm para atiesadores. Para la primera separación de 20 mm el valor de la deflexión disminuye a un valor de 4.051 mm siendo éste un 12% menor que la deflexión de la viga sin atiesadores. Los valores de separación de 40 y 60 mm, indican una disminución del 7% y 8%, mientras que para el resto de valores la disminución es del 6% y 7%.

La curva de color rojo representa un espesor de 7 mm, al igual que la curva anterior presenta una considerable disminución de deflexión de 3.983 mm, para una separación de 20 mm, lo que representa un valor del 13%. A partir de la separación de 40 mm hasta 80 mm se muestran una disminución de deflexión de valores entre 7% y 9%, las separaciones desde 100 mm hasta 160 mm muestran una disminución de entre el 6% y 7%. También se observa que la curva de color verde, representa el espesor de 8 mm, con una disminución del 15% de su deflexión representando un valor de 3.913 mm, para una separación de 20 mm. También muestra una disminución de entre 8% y 10% de la deflexión a partir de una separación de 40 y 60 mm. Finalmente para las separaciones de 120 mm hasta 160 mm su disminución es del 7%.

#### **4.3.2.5 Análisis segunda configuración.**

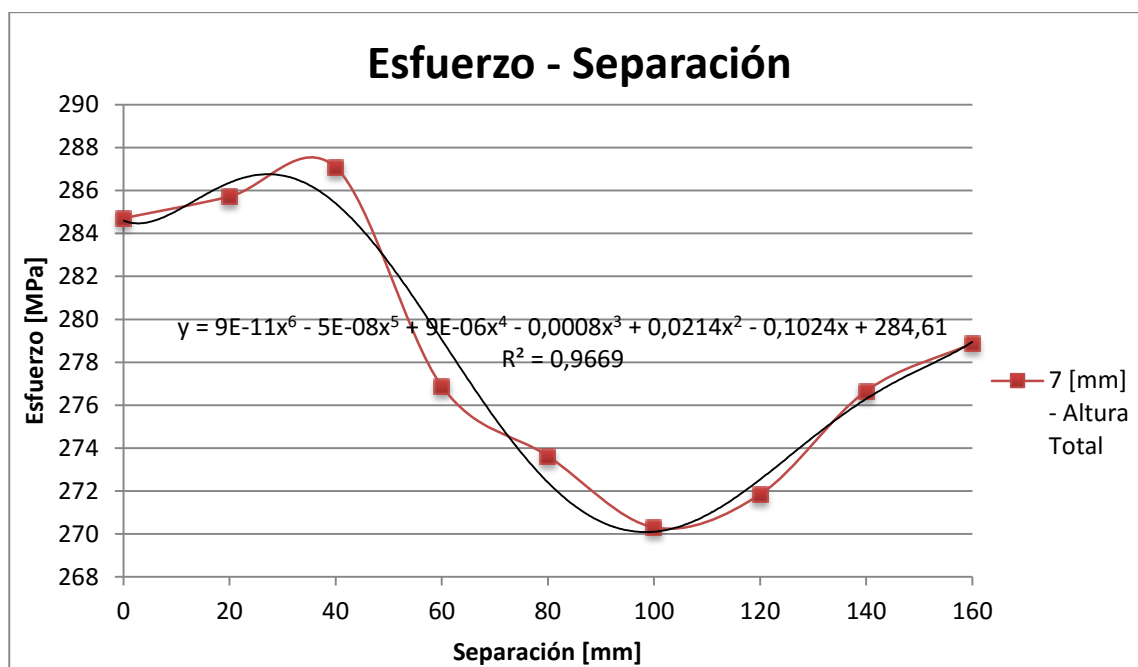
Se analizó las curvas que presentaron la mayor disminución en el esfuerzo para cada altura de atiesador obteniendo la figura 82. Se observa claramente que la mejor distribución es para el caso de la curva roja, la que representa los datos obtenidos con un espesor de 7 mm y una altura del atiesador que va desde el patín superior hasta el patín inferior. En este caso en específico se obtuvo que la mejor distribución es con una separación de 100 mm obteniendo una disminución del esfuerzo del 5,1% y una disminución en la deflexión del 6,9%.



**Figura 82.** Diagrama Deflexión – Separación simulación atiesadores carga no coincidente.

Se obtuvo que la curva roja presenta la mejor distribución de esfuerzo y obteniendo los mejores resultados. Se determinó la ecuación aproximada que rige la curva a través del método de regresión lineal obteniendo como resultado la ecuación que se muestra en la figura 83.

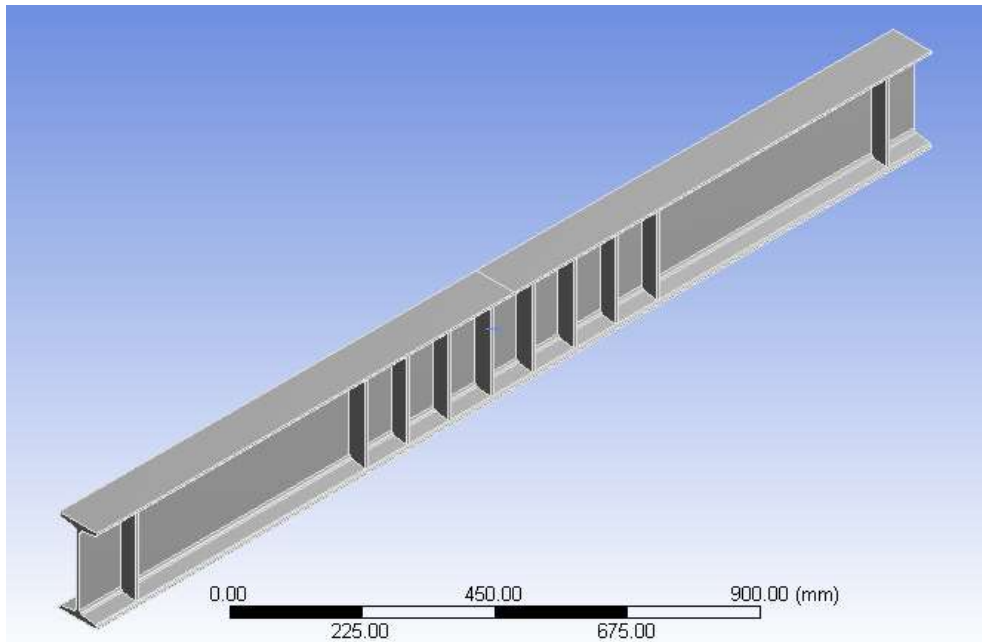




**Figura 83.** Diagrama Esfuerzo – Separación simulación atiesadores 7 [mm].

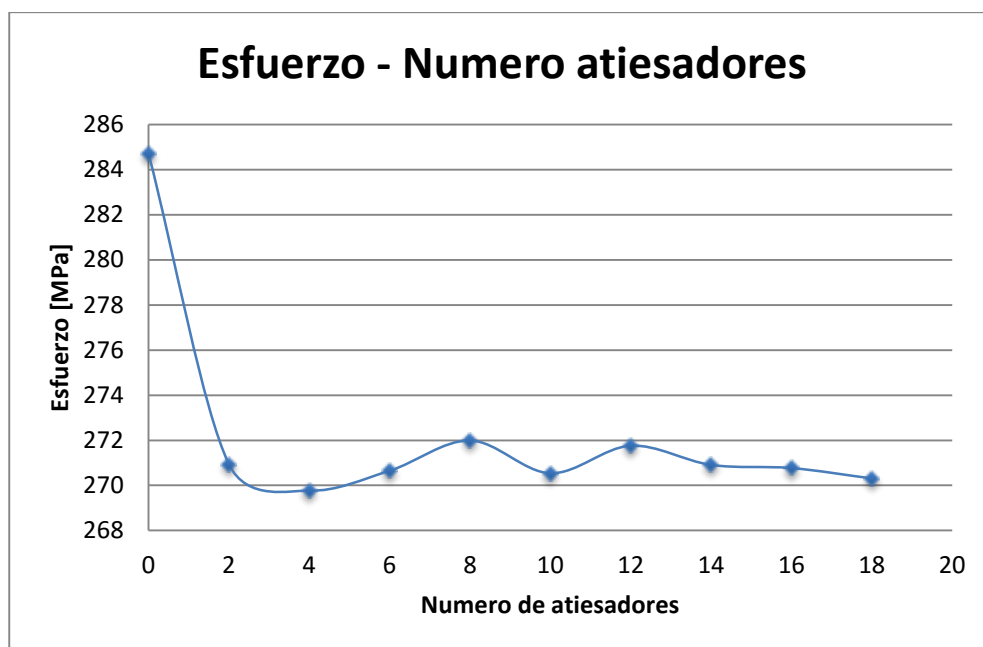
### 4.3.3 Tercera configuración.

Para el tercer análisis de estudio, se partió de la mejor configuración obtenida con la altura, espesor y separación de atiesadores, se determinó como variable el número de atiesadores. Considerando que el diagrama del momento, para el caso en estudio tiene un valor mayor donde la carga es aplicada, se formuló la hipótesis de que los atiesadores de los extremos no aportan al incremento de la capacidad de la viga. Se continuó con el estudio retirando progresivamente los atiesadores desde los extremos, salvo los atiesadores de apoyo como se muestra en la figura 84. Se disminuyó el número de atiesadores, de 18 atiesadores que se tenía para una separación de 100 mm hasta 2 atiesadores como mínimo. Disminuyendo progresivamente a partir de los extremos de la viga.



**Figura 84.** Modelo de elementos finitos con 8 atiesadores.

En la figura 85 se muestra el esfuerzo obtenido tras simular para los diferentes números de atiesadores. En ésta se muestra que para 2 atiesadores la disminución del esfuerzo llega a 270,94 MPa, esto representa una disminución en el esfuerzo del 4,8%. Para 4 atiesadores el esfuerzo disminuye hasta 269,77 MPa siendo este el mínimo valor obtenido, con un porcentaje del 5,2%. Para las demás distribuciones los valores fluctúan con porcentajes entre 4,9 y 5,1%.

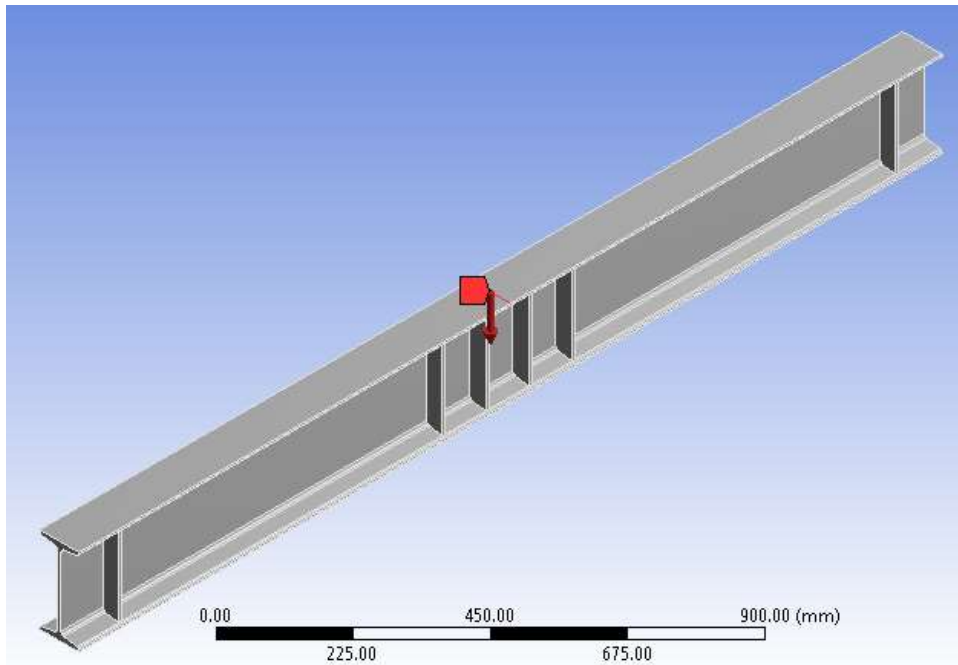


**Figura 85.** Diagrama Esfuerzo – Número de atiesadores con un espesor de 7 [mm].

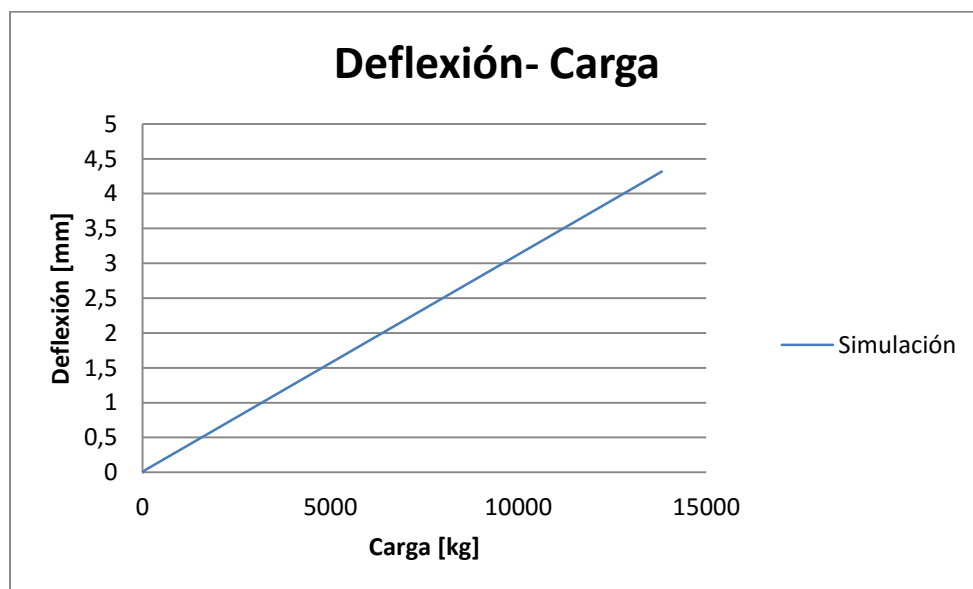
De esta manera se comprueba la hipótesis formulada anteriormente que los atiesadores influyen solamente en la zona en la que el momento tiene su valor máximo. Se obtuvo que la mejor distribución fue con 4 atiesadores como se muestra en la figura 86 los que influyen en una longitud de 150 mm medidos a partir de la carga aplicada en sus dos sentidos axiales.

#### 4.3.4 Modelo computacional final.

Se obtuvo que la mejor configuración de atiesadores es al tener 4 atiesadores en el centro de la viga como se muestra en la figura 86 (Anexo T). La figura 87, muestra el diagrama deflexión vs carga, obtenida mediante simulación, donde se observa que la deflexión aumenta linealmente con el incremento de la carga, llegando a un valor máximo de 4,3169 mm con una carga de 13,8 Ton.



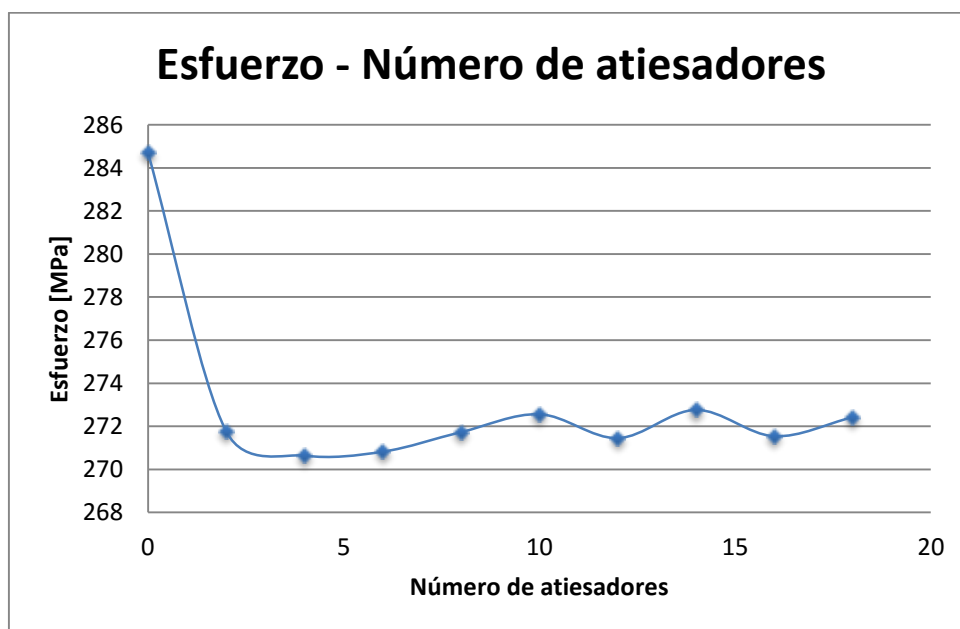
**Figura 86.** Modelo de elementos finitos con 8 atiesadores.



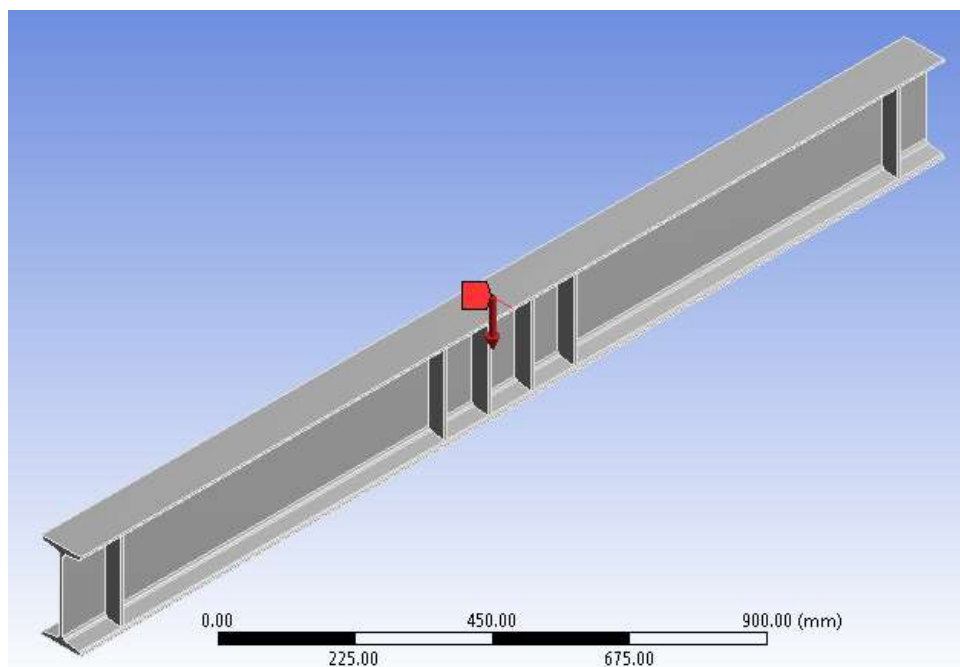
**Figura 87.** Diagrama Deflexión – Carga simulación atiesadores carga no coincidente.

#### 4.3.4.1 Validación del modelo.

En el orden de comprobar que los valores obtenidos en el estudio, van acorde a la realidad se realizó la validación del modelo mediante la construcción, y el ensayo de la mejor distribución. Debido a la falta de existencia en el mercado nacional del espesor de 7 mm para el cual se obtuvo el mejor resultado, se optó por el uso de un espesor de 6 mm con el objetivo de validar los datos obtenidos en la simulación. En la figura 88 se muestra el esfuerzo obtenido tras simular los diferentes números de atiesadores con un espesor de 6 mm. En ésta se muestra la disminución gradual del esfuerzo, donde para 2 atiesadores se alcanzó un esfuerzo de 271,76 MPa, esto representa una disminución del 4,5%. Para 4 atiesadores el esfuerzo disminuye hasta 270,64 MPa, con un porcentaje del 4,9%. Para las demás distribuciones los valores fluctúan con porcentajes entre 4,3 y 4,6%.



**Figura 88.** Diagrama Esfuerzo – Número de atiesadores con un espesor de 6 [mm].



**Figura 89.** Diagrama Deflexión – Separación simulación atiesadores carga no coincidente 2.

Se comprobó la hipótesis formulada, la cual enuncia que los atiesadores influyen solamente en la zona en la que el momento tiene su valor máximo. Se obtuvo que la mejor distribución fue con 4 atiesadores como se muestra en la figura 89, los que influyen en una longitud de 150 mm, medidos a partir de la carga aplicada en sus dos sentidos axiales.

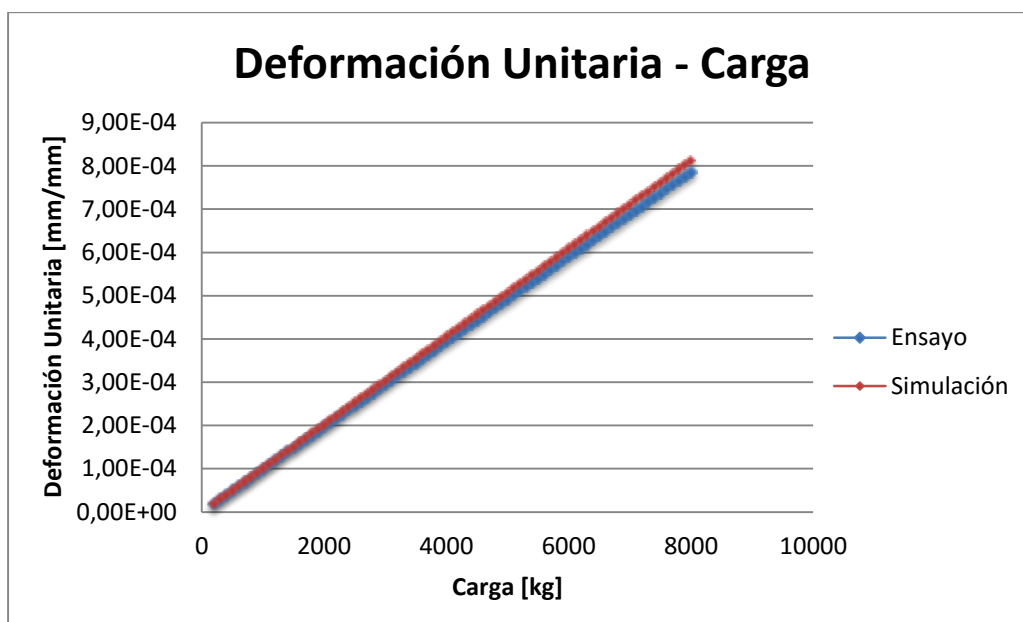
#### 4.3.4.2 Ensayo.

A partir de la simulación con diferentes configuraciones, presentadas anteriormente se concluyó que la configuración que proporciona mejores resultados, es con una separación de 100 mm, con una altura igual a la distancia, del patín superior al patín inferior y un espesor de 7 mm, con cuatro atiesadores en el centro de la viga, donde se presenta el mayor momento. Sin embargo al no existir en existencia en el mercado

nacional de este espesor se optó por utilizar atiesadores de 6 mm con el objetivo de validar los datos obtenidos a través de las simulaciones. En este sentido, se realizó la validación de estos datos a través de un ensayo con atiesadores con una separación de 100 mm, con una altura igual a la distancia del patín superior al patín inferior y un espesor de 6 mm.

Para la validación del modelo de elementos finitos frente al ensayo, se realizaron ensayos con un incremento de la carga cada 100 kg hasta alcanzar los 8000 kg, de manera similar que para el ensayo sin atiesadores. Con la finalidad de que los esfuerzos se distribuyan a lo largo de las fibras del material se realizó una precarga de 2000 kg antes de realizar el ensayo. Posteriormente se realizó el ensayo para una carga de 8000 kg, siendo cargado y descargado 3 veces para garantizar la repetitividad de los datos, obteniendo los siguientes resultados. En la figura 90 se muestra el diagrama Deformación Unitaria – Carga obtenido tras realizar el ensayo y la simulación. En las dos curvas se presenta una tendencia lineal como es lo esperado obteniendo un error promedio de 2,7% y un error máximo del 3,2%. Se demostró que los datos del estudio obtenidos mediante el análisis de elementos finitos son validados con un porcentaje de error menor al 5%.

Se comparó la deflexión máxima obtenida en la simulación con una carga de 8000 kg, siendo esta un valor de 2.505 mm, y la deflexión obtenida en el ensayo a la misma carga, donde se obtuvo un valor de 2.581 mm, lo cual representa un error del 3%, por lo tanto se validó los valores de la simulación con el ensayo ya que este porcentaje es menor al 5%.



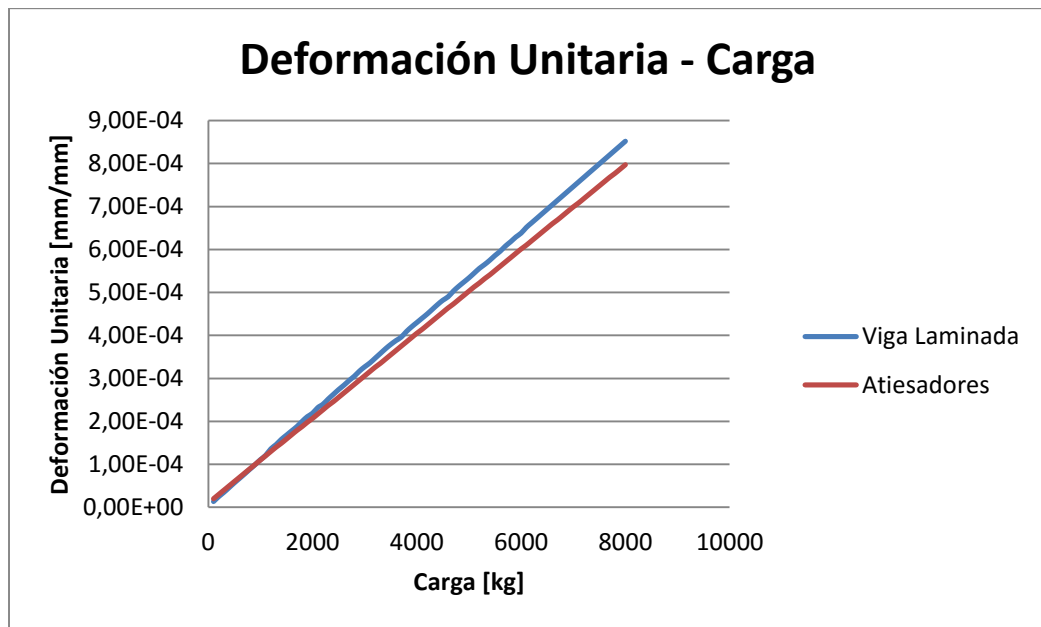
**Figura 90.** Diagrama Deflexión – Separación simulación atiesadores carga no coincidente.

#### 4.3.4.3 Comparación ensayos sin atiesadores y con atiesadores

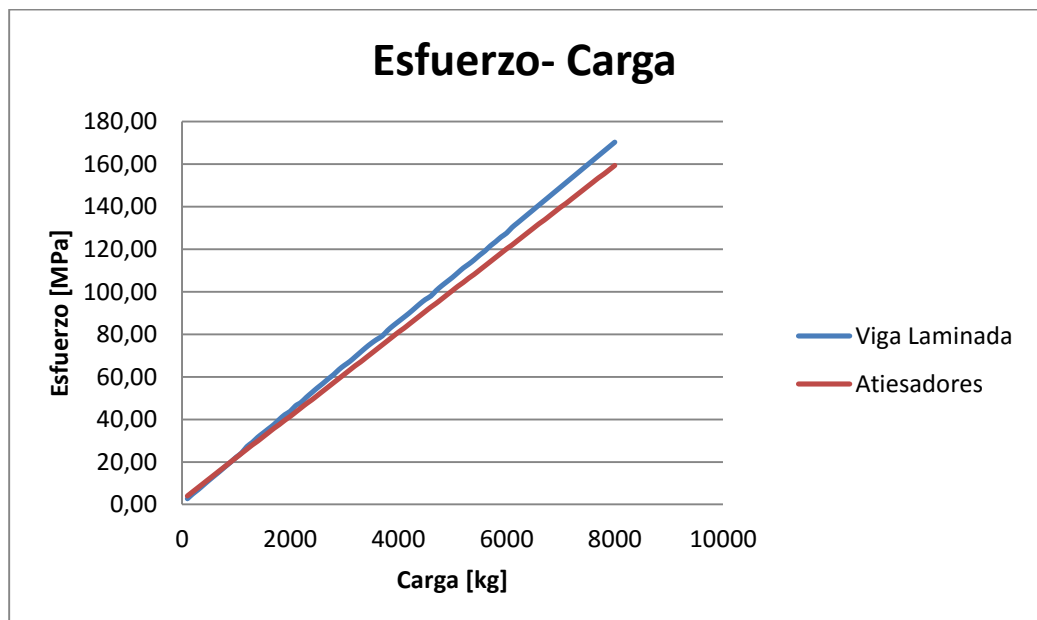
Al comparar los ensayos realizados en las vigas laminada con atiesadores y sin atiesadores se obtuvo un porcentaje de disminución en el esfuerzo del 6,5%, desde 170,31 MPa de la viga sin atiesadores hasta 159,42 MPa para la viga con atiesadores, como se muestra en las figuras 91 y 92. Este porcentaje produce un incremento en la capacidad de la viga de 0,9 Ton desde 13,82 Ton de la viga sin atiesadores hasta 14,72 Ton de la viga con 4 atiesadores en el centro. Todos los datos obtenidos en los ensayos y las simulaciones se encuentran en el Anexo U.

Se determinó que la viga sin atiesadores presenta una deflexión de 2,63 mm y la viga laminada con 4 atiesadores distribuidos en el centro presenta una deflexión de 2,505 mm lo que representa una disminución del 5%.





**Figura 91.** Deformación Unitaria – Carga ensayos con y sin atiesadores.



**Figura 92.** Esfuerzo – Carga ensayos con y sin atiesadores.

#### 4.4 Viga de sección tipo I compuesta.

Para el estudio de la viga de sección tipo I compuesta, se utilizó el mismo perfil IPN 200, de los anteriores estudios, con los valores de sus propiedades antes mencionados.


##### 4.4.1 Ensayo de cilindros a compresión

Al realizar el ensayo a compresión de los cilindros de concreto, con la sustitución del cuesco por el 10, 20, 30 y 40%, del agregado grueso, se obtuvieron los valores mostrados en la tabla 6. (Anexo V).

**Tabla 6.**

Compresión en cilindros de hormigón

No.	Descripción	Edad			Resistencia
		Días	kN	Mpa	
1	Patrón	7	184,27	23	
2	10%	7	174,53	21,8	
3	20%	7	144,78	17,7	
4	30%	7	119,63	14,6	
5	40%	7	100,57	12,3	
6	Patrón	28	227,22	28,4	

Continua 

<b>7</b>	10%	28	250,81	31,9
<b>8</b>	20%	28	193,47	24,1
<b>9</b>	30%	28	184,62	23
<b>10</b>	40%	28	160,63	20

Inicialmente se muestra una resistencia a compresión de 23 MPa para el cilindro patrón de 7 días de curado, aplicado una carga de 184.27 kN. Con un reemplazo del 10% de su volumen por cuesco, se obtiene una resistencia de 21.8 MPa, siendo ésta menor en un 5% de la resistencia del cilindro patrón. De la misma manera se determinó que para un reemplazo del 20% se obtiene una resistencia de 17.7 MPa, siendo esta 23% menor que la resistencia del cilindro patrón, así también se obtuvo un valor de 14.6 MPa de resistencia siendo menor un 37% de la resistencia del cilindro patrón, finalmente se obtuvo un valor de 12.3 MPa para un reemplazo del 40% del volumen por cuesco, disminuyendo su resistencia a compresión un 47%.

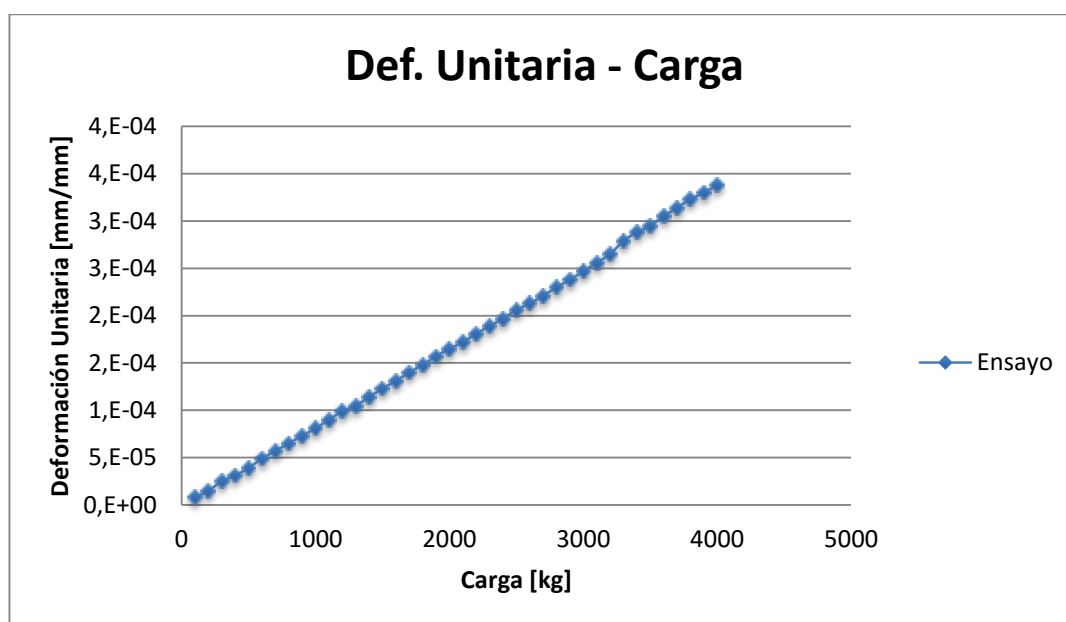
De la misma forma se realizó el ensayo para los cilindros de 28 días de curado, donde el cilindro patrón tiene una resistencia a compresión de 28.4 MPa, aplicado una carga de 227.22 kN. Con un reemplazo del 10% se obtuvo un incremento del 12% en la resistencia a compresión. También se presenta una disminución del 30% de la resistencia con un reemplazo del 40% de su volumen por cuesco.

La especificación del AISC, determina que la menor resistencia a compresión de un concreto de peso normal debe ser de 3 ksi (20.68 MPa). Por lo tanto se determinó la construcción del patín de concreto con las dimensiones especificadas en el capítulo 3, y un concreto de 21.8 MPa, con una sustitución en su volumen por cuesco del 10%, obteniendo una resistencia superior a la indicada por la especificación del AISC, al término de 7 días de curado.

#### 4.4.2 Incremento de la capacidad a flexión.

Con el objetivo de verificar si la viga de sección compuesta incrementa la capacidad a flexión de la viga laminada, se realizó un ensayo a flexión con las mismas condiciones que se utilizaron para los casos de estudio anteriores.

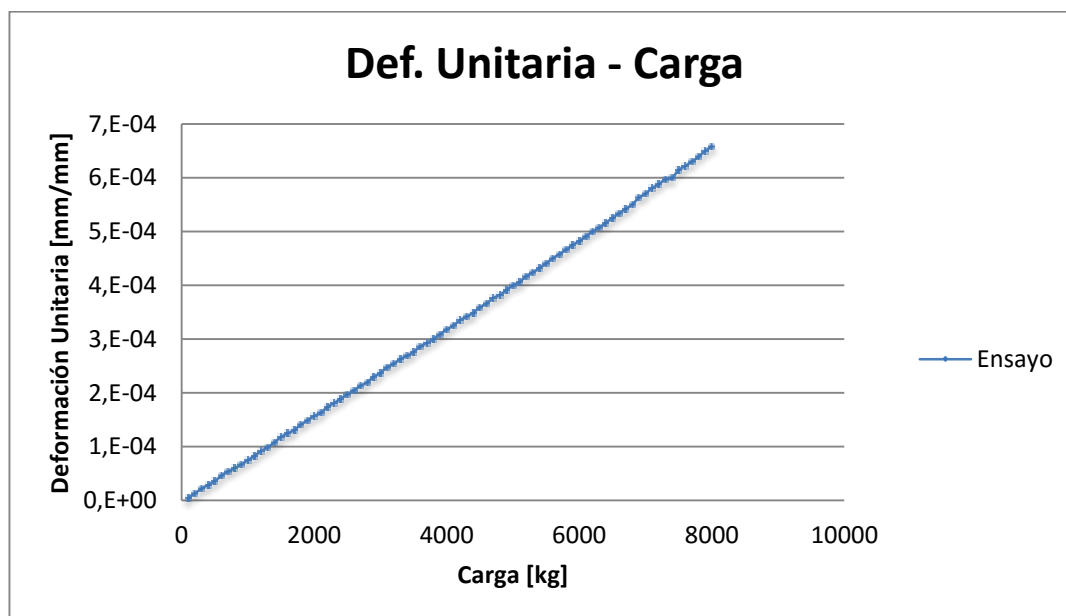
Para este ensayo se tomó las mismas consideraciones de carga, apoyos y toma de datos que en la viga laminada. De la misma manera, se incrementó la carga cada 100kg, se aplicó una precarga inicial de 4000 kg, como se muestra en la figura 93.



**Figura 93.** Ensayo viga compuesta con precarga de 4000 [kg].

El diagrama Deformación unitaria – Carga, representa los datos obtenidos en el ensayo a flexión de la viga de sección tipo I compuesta, este muestra una tendencia lineal para todos sus valores.

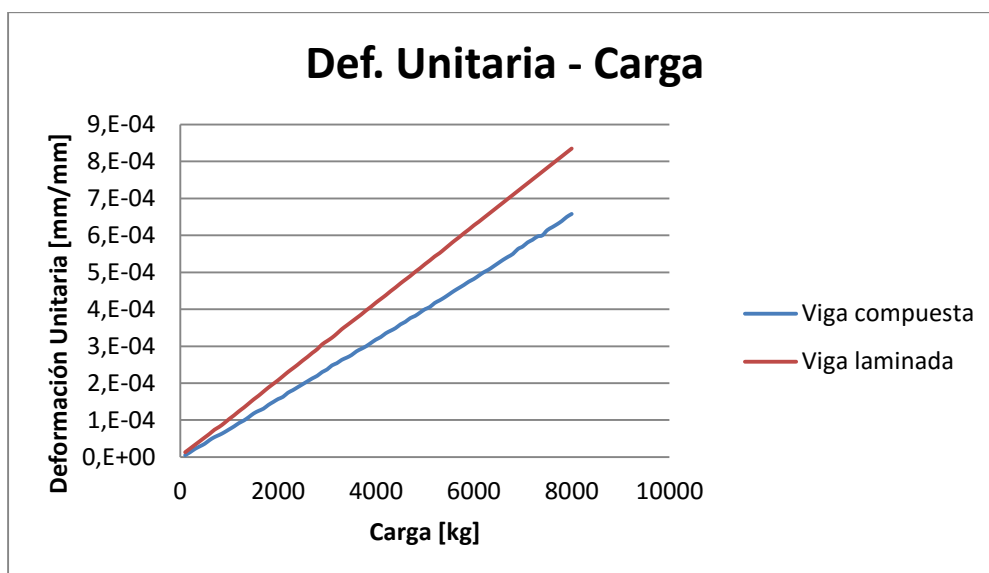
Además se realizaron 3 ensayos con una carga de 8000 kg obteniendo la figura 94 en donde se presenta el diagrama Deformación unitaria – Carga.



**Figura 94.** Ensayo viga compuesta con carga de 8000 [kg]

El diagrama deformación unitaria – carga, presenta una tendencia lineal para todas las cargas aplicadas hasta los 8000 kg, lo que nos indicó que el ensayo fue realizado satisfactoriamente en la zona elástica de la viga compuesta.

La figura 95 muestra los ensayos realizados en las vigas de sección laminada y de sección compuesta.



**Figura 95.** Comparación de ensayos con carga de 8000 [kg].

El diagrama Deformación unitaria – Carga, presenta los datos obtenidos en los ensayos a flexión de las dos vigas, se observa que para una carga de 1000 kg, la deformación unitaria de la viga compuesta, disminuye un 27% en relación a la viga laminada.

Para las cargas entre 1000 y 2000 kg, existe una disminución de la deformación unitaria de entre el 25% y 26%. También se observa que para las cargas entre 2000 y 4000 kg, la deformación unitaria disminuye un 25% comparada con la deformación unitaria de la viga laminada, además las cargas entre 4000 y 6000 kg muestran una disminución del 23% y 24%. Finalmente con las cargas desde 6000 kg hasta 8000 kg, muestra una disminución de la deformación unitaria del 21% y 22%.

Por lo tanto se observa que para una carga de 8000 kg, en el ensayo a flexión, la viga de sección tipo I compuesta, tiene una menor deformación unitaria con un promedio del 25%, comparada con la deformación unitaria de la viga de sección tipo I laminada.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### Conclusiones.

1. Como resultado de la investigación se encontró, que una viga armada de sección compacta con las dimensiones mínimas propuestas por la especificación AISC 360 para edificaciones de acero son: 3 mm de espesor en su alma, 6.35 mm de espesor para los patines y 212.7 mm de peralte. La viga presentó una restricción de fabricación, debido al esfuerzo residual generado por la soldadura, el mismo que provoca una deformación en el alma. Esto da lugar al efecto P-delta el cual explica los sobre esfuerzos generados al aplicar una carga transversal sobre un elemento reticular, es por esto que se presentó una falla por pandeo lateral torsional, en el ensayo a flexión, disminuyendo la capacidad de la viga en un 40%. En consecuencia, se halló que una sección laminada provee una mejor distribución de esfuerzos y un mejor comportamiento que la sección armada, ya que posee esfuerzos residuales mínimos los que no influyen en la capacidad de la viga.
2. Se comprobó que los atiesadores trabajan únicamente en la zona donde existe el mayor momento aplicado en la viga, para este caso se utilizó 4 atiesadores distribuidos simétricamente influyendo estos en una longitud de 300 mm, lo que representa el 15% de la longitud total de la viga.. La separación óptima entre atiesadores, para disminuir el esfuerzo generado por el ensayo a flexión con una carga puntual, y apoyos cilíndricos es la mitad del peralte de la viga, específicamente para la viga de sección tipo I laminada IPN 200 es de 100 mm. Se utilizó un atiesador con agujero de ratón, un espesor 6 mm y una altura igual a la distancia entre el patín superior e inferior con la que se obtuvo un incremento en la capacidad de la viga del 6,5% desde 13,82 Ton de su capacidad a fluencia de la viga sin atiesadores hasta 14,72 Ton que soporta la viga con atiesadores. La viga presentó una disminución en la deflexión desde 4.5839 mm hasta 4.3199 mm que representa el 5,8%.

3. Se determinó que todas las configuraciones con atiesadores estudiadas presentan una disminución en la deflexión, siendo la más representativa una distribución de separación entre atiesadores de 100 mm distribuidos a lo largo de toda la viga con un porcentaje de 7%. El tipo de atiesador utilizado fue con agujero de ratón, espesor 7 mm, altura igual a la distancia entre el patín superior e inferior y ancho desde el alma hasta el borde del patín.
4. Se determinó que el incremento en peso de los atiesadores en la viga para la mejor distribución es del 4,7%, considerando que el peso de un atiesador es de 0,31 kg, y utilizando 8 atiesadores en el centro.
5. Se determinó que el agregado grueso para realizar la mezcla de concreto puede ser reemplazado por el desecho de palma africana (cuesco) hasta en un 30%, porcentaje con el cual cumple los parámetros mínimos establecidos por la especificación AISC 360, con una resistencia de 23 MPa a los 28 días.
6. Se encontró que los conectores tipo cortante embebidos en concreto para una viga de sección compuesta, son eficaces al transmitir la carga, ya que se comporta como un miembro sólido.
7. Al analizar el comportamiento de la viga de sección compuesta durante el ensayo, se encontró que el cuesco no presenta problemas uniformidad al momento de realizar el ensayo a flexión. La sección compuesta presenta una mayor resistencia a la flexión en un 25%.



**Recomendaciones.**

1. Se recomienda no fabricar vigas de sección tipo I de alma delgada, ya que la afectación térmica del proceso de soldadura genera altos esfuerzos residuales, los que producen pre deformaciones a lo largo de la viga.
2. Se recomienda estudiar el comportamiento de vigas de sección compacta con atiesadores en la zona plástica de la viga y el estudio del uso de cuesco como agregado grueso en losas y columnas de hormigón.
3. Se recomienda utilizar un cuesco seco y limpio en la fabricación del concreto, ya que esta característica produce una mejor consistencia al momento de sustituir el cuesco por el agregado grueso.
4. Se recomienda realizar una precarga inicial del 10% de la carga de fluencia, antes de realizar el ensayo a flexión, con la finalidad de poner a punto los equipos y obtener una mejor distribución de esfuerzos a lo largo de todas las fibras de la viga.

**BIBLIOGRAFÍA**

- Abell, M. (15 de 05 de 2013). *P - Delta effect*. Recuperado el 29 de 06 de 2016, de Csi Knowledge Base: <https://wiki.csiamerica.com/display/kb/P-Delta+effect>
- AISC. (2011). *Steel Construction Manual*.
- Beer, F. P. (2010). *Mecánica de Materiales*. México: McGRAW/HILL INTERAMERICANA EDITORES S.A. de C.V.
- Duque, M. (8 de 10 de 2003). *Revista Escuela de Ingeniería de Antioquía*. Recuperado el 14 de 05 de 2016, de Revista Escuela de Ingeniería de Antioquía: [http://www.sci.unal.edu.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1794-12372004000100002&lng=es&nrm=iso](http://www.sci.unal.edu.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-12372004000100002&lng=es&nrm=iso)
- El Universo. (23 de 02 de 2015). Ecuador movió \$ 8.029 millones en construcción, según gremio latinoamericano. *El Universo*.
- Hendy, C. R., & Iles, D. C. (2015). *Guidance notes on best practice in steel bridge construction*. Berkshire: SCI.
- Hendy, C., & Presta, F. (Noviembre de 2008). Transverse web stiffeners and shear moment interaction for steel plate girder bridges. *Structural Engineer*.
- Hernandez, R. (2016). *Metodología de la Investigación*. Mexico, 1991: McGraw - Hill.
- Hibbeler, R. (2006). *Mecánica de materiales*. Mexico: Pearson.
- Hibbeler, R. C. (2011). *Mécanica de Materiales*. México D.F.: Pearson Educación.
- McCormac. (2013). *Diseño de Estructuras de Acero Método LRFD*. México D.F.: ALFAOMEGA GRUPO EDITOR, S.A. de C.V.
- McCormac, J., & Csernak, S. (2013). *Diseño de Estructuras Metálicas*. New Jersey: Alfa Omega.

- Menasce, D. (2002). LOAD TESTING, BENCHMARKING, AND APPLICATION PERFORMANCE MANAGEMENT FOR THE WEB.
- Pascual, U. (2006). *Construcción de estructuras metálicas*. San Vicente: Club Universitario.
- Rojas, M., & Arenas, J. (2007). Comparación Técnico-Financiera Del Acero Estructural Y El Hormigón Armado .
- Sampieri. (1991). *Metodología de la Investigación*. Mexico: Mcgraw-Hill.
- Suarez, M. (2006). Estudio De Hormigones Elaborados Con Residuos De Ladrillerías Y De Demolición . *Centro de Investigación y Desarrollo para la Construcción y la Vivienda*.
- Timoshenko, S. (1968). *Teoría de Elasticidad*. Bilbao, España: Urmo Ediciones.
- Vinnakota, S. (2006). *Estructuras de acero: comportamiento y LRFD*. Mexico: McGraw-Hill.
- Williams, A. (2011). *Steel Structures Design*. New York: McGraw-Hill.
- Yoon, D. (2004). Transverse stiffeners requirements in straight and horizontally curved steel I-Girders.
- Zamora, A., & Molina , M. (2008). Comportamiento de vigas de sección compuesta con perfiles de acero laminado y losa de concreto empleando conectores de cortante tipo tornillo grado dos. *Revista de Ingeniería e Investigación*.