

**CARACTERIZACIÓN MECÁNICA A FLEXIÓN Y COMPRESIÓN DE ELEMENTOS
CAJÓN ARMADOS CON LÁMINAS AGLOMERADAS DE TETRA PAK®
CONSIDERANDO LOS BENEFICIOS AMBIENTALES DE SU USO POTENCIAL**



**MARTHA LUCIA QUINTERO RUEDA
PAULA ANDREA RODRÍGUEZ ROMERO**

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ, D.C.
2015**

**CARACTERIZACIÓN MECÁNICA A FLEXIÓN Y COMPRESIÓN DE ELEMENTOS
CAJÓN ARMADOS CON LÁMINAS AGLOMERADAS DE TETRA PAK®
CONSIDERANDO LOS BENEFICIOS AMBIENTALES DE SU USO POTENCIAL**

**MARTHA LUCIA QUINTERO RUEDA
PAULA ANDREA RODRÍGUEZ ROMERO**

**TRABAJO DE GRADO
PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERAS CIVILES**

**DIRECTOR:
ING. FEDERICO NUÑEZ MORENO**

**CO-DIRECTOR:
ING. LUIS ALBERTO JARAMILLO GÓMEZ**

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ, D.C.
2015**

AGRADECIMIENTOS

Queremos expresar nuestro más profundo agradecimiento a nuestras familias por su confianza en nosotras, su apoyo incondicional y su guía constante a lo largo de nuestra formación profesional y personal.

A nuestros Directores de Trabajo de Grado, los Ingenieros Federico Alejandro Nuñez y Luis Alberto Jaramillo por su orientación y colaboración en todo el proceso del desarrollo de esta investigación.

Al Ingeniero Daniel Mauricio Ruiz por su contribución en el avance y satisfactoria finalización de este trabajo.

Al Ingeniero Yesid Alvarado por su cooperación en la ejecución de los ensayos.

Al grupo de laboratoristas de la Universidad Javeriana por su colaboración y buena disposición al momento de realizar la etapa experimental de este trabajo.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	12
2. JUSTIFICACIÓN Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	13
3. OBJETIVOS.....	15
3.1 General.....	15
3.2 Específicos.....	15
4. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE.....	16
4.1 Ecoplak.....	16
4.1.1 Historia de las láminas aglomeradas de Tetra Pak® en Colombia y en el mundo.....	16
4.1.2 Proceso de producción de las láminas de Ecoplak.....	18
4.1.3 Impactos ambientales de los componentes de las láminas de Ecoplak.....	23
4.1.4 Impactos ambientales del proceso de producción del Ecoplak.....	26
4.1.5 Usos actuales y potenciales de las láminas de Ecoplak en Colombia y otros países.....	29
4.2 Madera.....	35
4.2.1 Proceso de producción de las láminas de madera.....	35
4.2.2 Impactos ambientales del proceso de producción de las láminas de madera.....	37
5. PROCEDIMIENTO Y METODOLOGÍA.....	39
5.1 Predimensionamiento y diseño.....	40
5.1.1 Cálculo de la carga última para vigas.....	40
5.1.2 Cálculo de la carga crítica para columnas.....	44
5.1.3 Modelación en elementos finitos.....	47
5.1.3.1 Modelo viga y aplicación de carga.....	47
5.1.3.2 Modelo columna y aplicación de carga.....	51
5.1.4 Determinación del espesor más adecuado para la fabricación de vigas.....	56
5.1.4.1 Esfuerzos máximos en vigas.....	57
• Flexión.....	57
• Cortante.....	57

5.1.4.2	Deflexión máxima en vigas.....	59
5.1.5	Determinación del espesor más adecuado para la fabricación de columnas.....	60
5.1.5.1	Esfuerzos máximos en Columnas.....	61
•	Flexión.....	61
•	Cortante.....	61
5.1.5.2	Acortamiento máximo en columnas.....	63
5.1.5.3	Desplazamiento lateral de las columnas.....	64
5.1.6	Determinación de la cantidad de refuerzo a cortante para vigas y columnas.....	71
•	Vigas.....	71
•	Columnas.....	74
5.2	Descripción del montaje.....	78
5.2.1	Proceso de fabricación de vigas y columnas de Ecoplak.....	78
5.2.2	Descripción del equipo.....	79
5.2.3	Montaje de vigas en el marco.....	80
5.2.4	Montaje de columnas en el marco.....	81
5.3	Determinación de la unidad funcional entre madera y Ecoplak.....	82
6.	RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	83
6.1	Vigas.....	83
6.1.1	Determinación de las deflexiones y carga máximas.....	83
6.1.2	Determinación del módulo de elasticidad aproximado del Ecoplak.....	86
6.1.3	Determinación de las deformaciones permanentes.....	88
6.1.4	Determinación de la ductilidad del material.....	92
6.1.5	Determinación de la tenacidad aproximada.....	93
6.1.6	Comparación del comportamiento de vigas con diferente tipo de unión.....	94
6.2	Columnas.....	94
6.2.1	Determinación del acortamiento y carga máxima.....	94
6.2.2	Identificación de pandeo.....	96
6.2.3	Determinación de deformaciones permanentes.....	97
6.3	Comparación de propiedades mecánicas de los elementos en Ecoplak y en madera.....	101

6.4 Comparación del impacto ambiental de los procesos de producción de las láminas de Ecoplak y de madera.....	102
6.5 Comparación del impacto ambiental de la unidad funcional en madera y en Ecoplak.....	104
7. CONCLUSIONES.....	106
8. RECOMENDACIONES.....	107
9. BIBLIOGRAFÍA.....	108
10. ANEXOS.....	111

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estructura del envase Tetra Pak®.....	16
Figura 2. Hidropulper de alta disgregación.....	18
Figura 3. Zaranda vibratoria.....	19
Figura 4. Empaques pos-industriales almacenados.....	20
Figura 5. Fragmentos de polialuminio.....	20
Figura 6. Molino triturador.....	21
Figura 7. Prensado en caliente.....	22
Figura 8. Mesa de recorte.....	22
Figura 9. Proceso de fabricación del Tektan.....	23
Figura 10. Proceso de refinamiento del aluminio con entradas y salidas.....	24
Figura 11. Proceso de fundición del aluminio con entradas y salidas.....	24
Figura 12. Proceso final de refinado del aluminio con entradas y salidas.....	25
Figura 13. Proceso de producción del Polietileno de baja densidad con entradas y salidas.....	25
Figura 14. Proceso con líneas de producción y sub-productos.....	27
Figura 15. Vivienda elaborada con Ecoplak.....	29
Figuras 16 y 17. Oficina modular elaborada con Ecoplak.....	30
Figura 18. Mesa escolar modular.....	30
Figura 19. Escritorio de oficina.....	30
Figura 20. Teja Termo acústica.....	31
Figura 21. Teja ártica.....	31
Figura 22. Teja ártica kraf.....	31
Figura 23. Piso de tráfico liviano, aplicado en vivienda.....	31
Figura 24. Puerta entamborada y lisa.....	32
Figura 25. Cielorraso de Ecoplak.....	32
Figura 26. Formaleta en Ecoplak.....	33
Figura 27. Mesón de cocina hecho en Ecoplak, combinado con madera.....	33
Figura 28. Parque infantil combinado con metal.....	34
Figura 29. Campamento de obra construido en Ecoplak.....	34
Figura 30. Punto de reciclaje de basuras.....	35
Figura 31. Proceso de producción de las láminas aglomeradas de madera.....	36
Figura 32. Modelo viga en elementos finitos.....	47

Figura 33. Nodos de aplicación de carga última.....	47
Figura 34. Aplicación de carga última.....	48
Figura 35. Viga deformada sin rigidizadores.....	48
Figura 36. Esfuerzos de compresión en viga sin rigidizadores.....	49
Figura 37. Viga con rigidizadores.....	49
Figura 38. Viga deformada con rigidizadores.....	50
Figura 39. Esfuerzos de compresión en viga con rigidizadores.....	50
Figura 40. Modelo de columna en elementos finitos.....	51
Figura 41. Nodos de aplicación de carga crítica (Tapa superior).....	52
Figura 42. Aplicación de carga crítica.....	52
Figura 43. Columna deformada sin rigidizadores.....	53
Figura 44. Columna con rigidizadores.....	54
Figura 45. Deformaciones columna con rigidizadores.....	55
Figura 46. Nodos de aplicación de carga lateral unitaria (Tapa superior).....	56
Figura 47. Nodos tapa superior columna.....	65
Figura 48. Sección transversal vigas.....	72
Figura 49. Plano tapas vigas.....	73
Figura 50. Rigidizadores.....	73
Figura 51. Plano caras Este-Oeste vigas.....	73
Figura 52. Plano caras Norte-Sur vigas.....	74
Figura 53. Plano caras Norte-Sur Columnas.....	76
Figura 54. Plano caras Este-Oeste Columnas.....	77
Figura 55. Vigas y columnas armadas.....	79
Figura 56. Brazo hidráulico MTS.....	80
Figura 57. Montaje de viga simplemente apoyada.....	80
Figura 58. Montaje de columna con apoyos de rótula.....	81
Figura 59. Esquema viga.....	82
Figura 60. Falla en el ensamble de los rigidizadores.....	85
Figura 61. Esfuerzos máximos a cortante en vigas.....	86
Figura 62. Falla de la viga por cortante.....	86
Figura 63. Viga simplemente apoyada con carga en los tercios medios.....	87
Figura 64. Pandeo local de la columna.....	97

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Función de las capas de un envase de Tetra Pak®.....	16
Tabla 2. Empresas recicladoras de Tetra Pak® en Europa.....	17
Tabla 3. Cantidades procesadas de los componentes del Ecoplak.	26
Tabla 4. Insumos requeridos para la fabricación de 125 kg de Ecoplak.....	28
Tabla 5. Factores de emisión en términos de CO ₂	28
Tabla 6. Cantidades de material requeridas para producir 1 m ³ de tablero aglomerado.....	37
Tabla 7. Insumos que requieren los equipos para el funcionamiento de la planta según los sub-procesos de producción.....	37
Tabla 8. Cantidades totales de insumos requeridos en el proceso de producción del tablero aglomerado para 1m ³	38
Tabla 9. Carga última viga con lámina de 4mm.....	42
Tabla 10. Carga última viga con lámina de 6mm.....	42
Tabla 11. Carga última viga con lámina de 9mm.....	42
Tabla 12. Carga última viga con lámina de 12mm.....	42
Tabla 13. Carga última viga con lámina de 15mm.....	43
Tabla 14. Carga última viga con lámina de 20mm.....	43
Tabla 15. Carga crítica columna con lámina de 4mm.....	45
Tabla 16. Carga crítica columna con lámina de 6mm.....	45
Tabla 17. Carga crítica columna con lámina de 9mm.....	46
Tabla 18. Carga crítica columna con lámina de 12mm.....	46
Tabla 19. Carga crítica columna con lámina de 15mm.....	46
Tabla 20. Carga crítica columna con lámina de 20mm.....	46
Tabla 21. Esfuerzos máximos a flexión de las vigas.....	57
Tabla 22. Esfuerzos de cortante máximos vigas.....	57
Tabla 23. Precios de láminas.....	58
Tabla 24. Deflexiones máximas.....	59
Tabla 25. Esfuerzos de flexión máximos columnas.....	61
Tabla 26. Esfuerzos cortantes máximos en columnas.....	61
Tabla 27. Acortamiento máximo de las columnas.....	63
Tabla 28. Desplazamiento lateral de columna con lámina de 4mm.....	65
Tabla 29. Desplazamiento lateral de columna con lámina de 6mm.....	65

Tabla 30. Desplazamiento lateral de columna con lámina de 9mm.....	66
Tabla 31. Desplazamiento lateral de columna con lámina de 12mm.....	66
Tabla 32. Desplazamiento lateral de columna con lámina de 15mm.....	66
Tabla 33. Desplazamiento lateral de columna con lámina de 20mm.....	66
Tabla 34. Desplazamiento lateral de las columnas.....	70
Tabla 35. Cantidad de refuerzo a cortante para la fabricación de vigas.....	72
Tabla 36. Cantidad de refuerzo a cortante para la fabricación de columnas.....	75
Tabla 37. Ensayos a flexión.....	81
Tabla 38. Ensayos a Compresión.....	82
Tabla 39. Carga Máxima y Deflexión Vigas Sin Pegante.....	84
Tabla 40. Carga Máxima y Deflexión Vigas Con Pegante.....	85
Tabla 41. Módulo de elasticidad Vigas Sin Pegante.....	87
Tabla 42. Módulo de elasticidad Vigas Con Pegante.....	88
Tabla 43. Límite de Proporcionalidad Vigas Sin Pegante.....	91
Tabla 44. Límite de Proporcionalidad Vigas Con Pegante.....	92
Tabla 45. Ductilidad Vigas Sin Pegante.....	92
Tabla 46. Ductilidad Vigas Con Pegante.....	93
Tabla 47. Tenacidad Vigas Sin Pegante.....	93
Tabla 48. Tenacidad Vigas Con Pegante.....	93
Tabla 49. Cuadro Comparativo Vigas con diferente tipo de conexión.....	94
Tabla 50. Carga máxima y Acortamiento Columnas Sin Pegante.....	96
Tabla 51. Carga máxima y Acortamiento Columnas Con Pegante.....	96
Tabla 52. Límite de Proporcionalidad Columnas Sin Pegante.....	100
Tabla 53. Límite de Proporcionalidad Columnas Con Pegante.....	101
Tabla 54. Ensayos de calidad de aglomerados ECOPLAK® CITEC – Laboratorio de materiales Universidad de los Andes.....	101
Tabla 55. Comparación de propiedades mecánicas en vigas de los dos tipos de material.....	102
Tabla 56. Comparación de propiedades mecánicas en columnas de los dos tipos de material.....	102
Tabla 57. Insumos totales para la unidad funcional de cada material.....	103
Tabla 58. Huellas de carbono totales generadas por una lámina.....	104
Tabla 59. Insumos totales para la unidad funcional de cada material.....	104
Tabla 60. Huellas de carbono totales generadas por las unidades funcionales.....	105

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Esfuerzo máximo a flexión y precio de las láminas vs. Espesor en vigas.....	58
Gráfica 2. Esfuerzo cortante máximo y precio de las láminas vs. Espesor en vigas.....	59
Gráfica 3. Deflexión máxima y precio de las láminas vs. Espesor	60
Gráfica 4. Esfuerzo máximo a flexión y precio de las láminas vs. Espesor en columnas.....	62
Gráfica 5. Esfuerzo máximo cortante y precio de las láminas vs. Espesor en columnas.....	63
Gráfica 6. Acortamiento columnas y precio vs. Espesor de las láminas.....	64
Gráfica 7. Desplazamiento lateral de la columna de lámina de 4mm.....	67
Gráfica 8. Desplazamiento lateral de la columna de lámina de 6mm.....	67
Gráfica 9. Desplazamiento lateral de la columna de lámina de 9mm.....	68
Gráfica 10. Desplazamiento lateral de la columna de lámina de 12mm.....	68
Gráfica 11. Desplazamiento lateral de la columna de lámina de 15mm.....	69
Gráfica 12. Desplazamiento lateral de la columna de lámina de 20mm.....	69
Gráfica 13. Desplazamiento lateral de las columnas y precio vs. Espesor de las láminas.....	70
Gráfica 14. Carga Vs. Deflexión Vigas Sin Pegante.....	83
Gráfica 15. Carga Vs. Deflexión Vigas Con Pegante.....	84
Gráfica 16. Deformaciones Permanentes vg-01.....	88
Gráfica 17. Deformaciones Permanentes vg-02.....	89
Gráfica 18. Deformaciones Permanentes vg-05.....	89
Gráfica 19. Deformaciones Permanentes vg-03P.....	90
Gráfica 20. Deformaciones Permanentes vg-04P.....	90
Gráfica 21. Deformaciones Permanentes vg-06P.....	91
Gráfica 22. Carga Vs. Acortamiento Columnas Sin Pegante.....	95
Gráfica 23. Carga Vs. Acortamiento Columnas Con Pegante.....	95
Gráfica 24. Deformaciones Permanentes C-01.....	97
Gráfica 25. Deformaciones Permanentes C-04.....	98
Gráfica 26. Deformaciones Permanentes C-05.....	98
Gráfica 27. Deformaciones Permanentes C-02P.....	99
Gráfica 28. Deformaciones Permanentes C-03P.....	99
Gráfica 29. Deformaciones Permanentes C-06P.....	100

1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de grado se desarrolla para la carrera de Ingeniería Civil de la Pontificia Universidad Javeriana, bajo el marco de la investigación del Ingeniero Federico Nuñez llamada "Ecolego".

Uno de los retos de la Ingeniería Civil es encontrar materiales que además de ser buenos estructuralmente, favorezcan el desarrollo sostenible mitigando los impactos ambientales generados por la industria de la construcción. Por este motivo, se decidió investigar el material Ecoplak como alternativa estructural, determinando las propiedades elastoplásticas de vigas y columnas fabricadas con éste, ya que además de contar con buenas propiedades mecánicas y físicas es un material reciclado a partir de envases de Tetra Pak®.

Actualmente, el Ecoplak es usado con fines no estructurales, debido a las escasas investigaciones existentes sobre sus propiedades. Uno de estos estudios (Ecoplak, 2005) demuestra que el material posee características similares a los tableros aglomerados de madera, por lo tanto se hace pertinente la realización de investigaciones comparativas entre los dos, que permitan determinar la viabilidad de utilizar el Ecoplak en la construcción de elementos estructurales. De manera complementaria, en este trabajo se ha realizado una comparación entre ciertas propiedades mecánicas del Ecoplak y la madera; así como también se ha determinado el impacto ambiental generado por la fabricación de vigas y columnas hechas con Ecoplak y madera, usando la metodología de Huella Ecológica.

El uso estructural de este material disminuiría la demanda de madera en el ámbito de la construcción mediante la utilización de un subproducto residual aprovechable, con beneficio para el medio ambiente.

2. JUSTIFICACIÓN Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Diariamente la población mundial aumenta y con ella también lo hace la demanda de materias primas y recursos. La madera es empleada en Colombia para la fabricación de viviendas de interés social y viviendas de recreación para las clases sociales más pudientes principalmente (Murillo, 2003). Aunque es un material con buenas propiedades mecánicas y físicas solo representa el 4% en la industria de los sistemas constructivos en Colombia. Sin embargo su demanda descontrolada no solo no es sostenible, sino que genera un impacto directo en los bosques y selvas de donde proviene.

En Colombia, el área forestal ha disminuido un 0.7% en los últimos 10 años (Banco Mundial, 2014); por otra parte, de 2004 a 2010, las emisiones de CO₂ aumentaron 20609 kt y siguen en aumento (Banco Mundial, 2014). El cambio climático y los desastres naturales representan desafíos cada vez más grandes para los gobiernos, y estos no están preparados para atender las emergencias adecuadamente. Un ejemplo claro es la emergencia invernal ocurrida en el año 2010-2011 en Colombia, donde hubo 557.377 hogares con afectación de vivienda (DANE, 2011), lo que generó 7.447 solicitudes de obras menores (reparación viviendas) de las cuales solo 3.008 fueron aprobadas (Colombia Humanitaria, 2014)

Los datos anteriores invitan a la utilización de materiales reciclados que cuenten con buenas características físicas y mecánicas, para reducir el impacto ambiental y fomentar la construcción sostenible como es el caso del polialuminio. La compañía Tetra Pak® ha venido desarrollando e invirtiendo en campañas globales para incrementar el reciclaje de sus productos. Solo en el 2010 en Colombia se generaron 13920 t de residuos de Tetra Pak® (Betancur, 2009), los que siendo reciclados disminuirían la tala de árboles y el consumo de agua, ya que por cada tonelada reciclada de Tetra Pak® se dejan de talar 17 árboles y se ahorran 26.500 l de agua (Riorion S.A., 2012). En 2013, la tasa de reciclaje de sus envases fue de 24.5% (Tetra Pak S.A., 2014), y ellos esperan incrementar esta tasa a 40% para 2020.

Riorion® es una empresa colombiana que fabrica láminas aglomeradas con residuos de envases de Tetra Pak®, llamadas Ecoplak. El 60% de los envases reciclados de Tetra Pak® en Bogotá es usado para este fin. El Ecoplak se fabrica por medio de presión en caliente, sin ningún tipo de pegante o resina (Tetra Pak S.A, 2014). Posee características similares a la madera aglomerada. Presenta favorables propiedades físicas y mecánicas, aunque estas varían según el porcentaje de envases adicionados (Sanchez et al, 2013). Se caracteriza por su alta resistencia a la humedad y al impacto, es un retardante del fuego, ya que su primera fase de degradación térmica se encuentra entre 200 y 400 °C (Figen, 2013), es termo-acústico, termo-formable y se puede aserrar, modelar, pegar o atornillar (Riorion S.A., 2012).

Determinar la contribución que un producto genera al medio ambiente es esencial hoy en día ya que esto crea un parámetro de comparación con otros productos similares y los posiciona en el mercado según su desempeño ambiental. Comparando el desempeño ambiental del Ecoplak con el de la madera se obtendrán herramientas para mostrar las ventajas o desventajas de la utilización de este material en el mercado. El empleo de estas láminas en la construcción de elementos estructurales disminuiría en gran medida el consumo de materiales de construcción vírgenes como la madera y aumentaría la tasa de reciclaje de Tetra Pak®, contribuyendo así a disminuir la huella ambiental del país.

La evaluación de estos elementos hechos a partir de láminas de Ecoplak se hará como contribución al Proyecto “Ecolego” creado por el Ingeniero Federico Núñez (Profesor de Ingeniería de la Universidad Javeriana) durante el desarrollo de un proyecto de innovación en construcción llevado a cabo y socializado con la facultad de Arquitectura del Illinois Institute of Technology, durante el 2014. Éste contempla la posibilidad de construir casas modulares de dos pisos totalmente fabricadas en Ecoplak con piezas prediseñadas que se armen de una manera fácil y rápida (pre-fabricación). Así, el tiempo de construcción se reduciría notablemente y las casas serían más amigables con el ambiente. La implementación de estas casas permitiría mejorar el proceso constructivo de viviendas de interés social, refugios para los damnificados por desastres naturales, campamentos de obra, entre otros.

3. OBJETIVOS

3.1 General

Determinar las características elastoplásticas de vigas y columnas cajón armadas con láminas aglomeradas de material reciclado de Tetra Pak® evaluando la contribución ambiental generada por su uso.

3.2 Específicos

- Establecer el espesor más adecuado de las láminas con las que se fabricarán las vigas cajón.
- Establecer el espesor más adecuado de las láminas con las que se fabricarán las columnas.
- Determinar las propiedades mecánicas a cortante y flexión de las vigas cajón armadas con 2 tipos de conexión, para el rango elasto-plástico.
- Determinar las propiedades mecánicas a compresión de columnas armadas con 2 tipos de conexión, para el rango elasto-plástico.
- Evaluar los impactos ambientales del uso potencial del Ecoplak en la construcción de vigas y columnas comparándolos con los generados por estos mismos elementos hechos en madera.

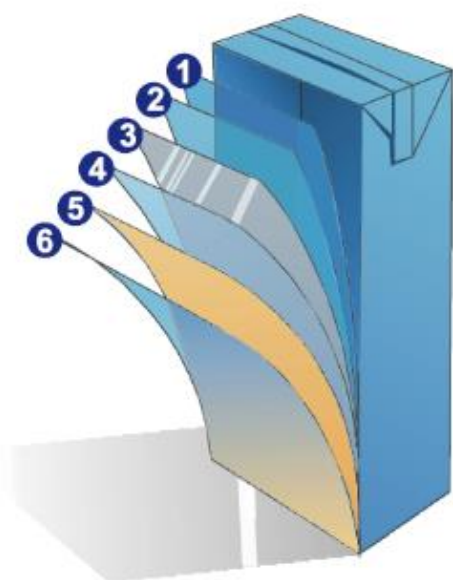
4 MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

4.1 Ecoplak

4.1.1 Historia de las láminas aglomeradas de Tetra Pak® en Colombia y en el mundo

El Tetra Pak® es un material utilizado para elaborar envases de alimentos y bebidas. Es fabricado por la empresa sueca Tetra Pak®, la cual le da su nombre. Fue inventado por el Dr. Ruben Rausig en 1951, como solución a la difícil tarea de transportar leche en Europa y que esta se conservara por más tiempo. Este material está compuesto por 75% cartón, 20% polietileno y 5% aluminio (Tetra Pak®, 2003), dispuestos en varias capas con el fin de proteger los alimentos de la temperatura y la luz, como se observa en la Figura 1. La Tabla 1 describe la función de cada capa:

Tabla 1. Función de las capas de un envase de Tetra Pak®



CAPAS QUE CONSTITUYEN UN ENVASE TETRA PAK

#	NOMBRE CAPA	FUNCIÓN
1	Polietileno de baja densidad (LDPE)	Protege el producto de la humedad y el polvo exterior.
2	Papel	Da rigidez al envase.
3	Polietileno de baja densidad (LDPE)	Actúa como adhesivo.
4	Aluminio	Protege el producto de la luz, el oxígeno y los microorganismos.
5	Polietileno de baja densidad (LDPE)	Actúa como adhesivo.
6	Polietileno de baja densidad (LDPE)	Evita la migración de contaminantes del envase hacia el producto.

Recuperado de:
http://proyecto1reciclaje.blogspot.com/2012_02_01_archive.html

Figura 1. Estructura del envase Tetra Pak®

Recuperado de: http://proyecto1reciclaje.blogspot.com/2012_02_01_archive.html

Estos empaques al requerir 30 años para degradarse (Colmena Golden Cross, 2013), están catalogados como residuos especiales. Por esta razón, al final de su ciclo de vida demandan costos operativos para su disposición final y reducen la vida útil de los rellenos sanitarios ya que deben ser llevados a celdas de seguridad.

Desde la década de los 90's se empezaron a reciclar estos empaques triturándolos y convirtiéndolos en láminas aglomeradas. Éstas han sido fabricadas y utilizadas a nivel mundial y tienen características muy similares a los aglomerados de madera.

La empresa Tetra Pak® ha impulsado el uso de estas láminas aglomeradas en Europa, especialmente en Alemania, en donde se ha logrado reciclar el 69% de los envases. Allí las láminas son fabricadas por la empresa EVD de Limburg. En España existen alrededor de 20 plantas de reciclaje de Tetra Pak® (Barreno, Yáñez, 2006). La Tabla 2 muestra algunas empresas que procesan empaques de Tetra Pak® para fabricar aglomerados y otros productos.

Tabla 2. Empresas recicladoras de Tetra Pak® en Europa

País	Nombre	Comienzo
Alemania	Duales System Deutschland-DSD (MM) www.gruener-punkt.de	1990
Austria	Ara (MM) Öko-box GmbH (C)	1991
Bélgica	Fost Plus (MM) www.fostplus.be	1994
España	EcoEmbalajes España (MM) www.ecoembes.com	1998
Finlandia	Suomen NP-Kierrätys Oy (C)	1995
Francia	Eco-Emballages (MM) www.ecoemballages.fr	1992
Irlanda	Repak (MM)	1997
Italia	Conai (MM)	1997
Noruega	Norsk Returkartong (C)	1994
Países Bajos	Hedra Foundation (C)	1994
Portugal	Sociedade Ponto Verde (MM) www.pontoverde.pt	1997
Reino Unido	Valpak (MM)	1997
Suecia	Svensk Kartongäterving (papel+C)	1996
Nota: (C) = cartones para bebidas, (MM) = multimaterial		

Fuente: Chung, A., (2003)

En Turquía existen fábricas de este material al cual llaman Tektan, que para 2003 reciclaba el 20% de los empaques consumidos en ese país y tenía una capacidad de 1350 t/año (Tetra Pak, 2003). En Pakistán y China el producto se denomina Chiptec. En este último país existen 4 plantas de producción que logran una capacidad mayor a 20000 t/año y la Agencia China de protección ambiental reconoció al material en 1997 como una tecnología recomendable, a nivel nacional, para la protección del medio ambiente (Tetra Pak®, 2003). Así mismo, el siguiente año Chiptec pasó las pruebas realizadas por el Comité estatal para

la Ciencia y la Tecnología, la Agencia Estatal de Protección Ambiental y la Oficina de Materiales de Construcción, según las cuales es apto para usarse como material de construcción seguro y ambientalmente amigable (Betancourt, 2009).

En América latina se conoce mayormente como Tektan y ya son varios los países que comercializan el producto, como Argentina, donde lo llaman T-plak y lo fabrica la empresa Rezagos Industriales.

En Chile se han construido aldeas enteras de Tektan, gracias a CONAMA, con el programa “Un techo para Chile” y en Perú Tetra Pak® ha desarrollado campañas para incrementar la utilización del material (Inche Mitma, J., Vergiu Canto, J., Mayila Hinojosa, D., Godoy Martinez, M. Y Chung Pinzas, A. 2004)

Para 2004, en Brasil disponían de un porcentaje de recolección de empaques del 22%, y para el 2006 contaban con una capacidad de 700 t/mes para la producción de aglomerados y tejas (Barreno, Yáñez, 2006).

En Colombia, la empresa RIORION trabaja desde hace 11 años implementando la utilización de empaques de Tetra Pak® como materia prima para fabricar láminas aglomeradas y termocubiertas conocidas como Ecoplak. Las láminas vienen en presentación de 1.22 x 2.44m con calibres de 4, 6, 9, 12, 15 y 20mm. El material tiene un módulo de rotura de 20N/mm² y un módulo de elasticidad de 1489 N/mm² (Ecoplak, 2005).

4.1.2 Proceso de producción de las láminas de Ecoplak

El siguiente proceso corresponde a la planta de la empresa Riorion en Bogotá. Esta tiene una capacidad de procesar 50 t/mes.

1. Despulpado: Para que las láminas cumplan con las condiciones óptimas, los empaques se someten a un proceso de despulpado, en el cual se les retira todo el cartón y se separa en forma de pulpa. Con ésta se fabrican otros productos posteriormente.



Figura 2. Hidropulper de alta disgregación

Tomado de Becerra y Villabona, (2009).

El proceso de disgregación se hace mediante un equipo llamado hidropulper, como el que se muestra en la Figura 2, el cual se llena de agua hasta $\frac{3}{4}$ de su capacidad y se le agregan los envases de Tetra Pak®. Puede tomar de 15 a 60 minutos hasta que salga el material disgregado. Posteriormente el material es evacuado por bombeo hacia la unidad de cribado para separar completamente el cartón de los demás componentes. Mediante el cribado, la mezcla es colada y zarandeada de forma que la parte más fina (cartón) pasa y la parte más gruesa (Polialuminio) queda retenida como muestra la Figura 3 (Becerra, Villabona, 2009). Estos trozos de polialuminio salen cortados en fragmentos de 10 a 20 cm aproximadamente.



Figura 3. Zaranda vibratoria.

Tomado de Becerra y Villabona, (2009).

Este proceso no es realizado por la empresa Riorion, sino por otras empresas especializadas en reciclaje de cartón. Una de ellas se llama Cartonall S.A.

2. Recepción de materia prima: A la planta de Ecoplak llegan los empaques en diferentes formas y de diferentes lugares de procedencia

- **Empaques pos-industriales:** Son empaques limpios, residuos de rotura de empresas envasadoras. Deben llegar secos. Pueden llegar en forma de pacas o de rollos. Estos rollos, como los que se observan en la Figura 4, son láminas que no han sido transformadas en envases por llegar a su fecha de caducidad. Los residuos pos-industriales representan una buena productividad para la planta ya que evitan el consumo de energía y recursos para el lavado.



Figura 4. Empaques pos-industriales almacenados

Tomado de Becerra y Villabona, (2009).

Estos empaques llegan con todos sus componentes, es decir, capas de polietileno, aluminio y cartón. Con ellos se fabrican láminas para interiores, las cuales son menos resistentes a la humedad y tienen una menor dureza.

- Residuos de poli-aluminio: Estos son los residuos que llegan del despulpado, por lo que solo contienen aluminio y polietileno. Llegan secos, limpios y cortados en trozos de 10 a 20 cm, como se observa en la Figura 5. Con ellos se fabrican las láminas objeto de esta investigación.



Figura 5. Fragmentos de polialuminio

Tomado de Becerra y Villabona, (2009).

3. Selección del material: Los fragmentos de polialuminio que llegan a la planta son seleccionados manualmente separando los fragmentos de aluminio y plástico, para así introducir en el molino las proporciones adecuadas para generar una lámina de alta calidad, las cuales son 75% polietileno y 25% aluminio (Riorion, 2015).

4. Triturado: Los envases de polialuminio se llevan a un molino que los transforma en pequeños trozos de 3 a 5mm. El equipo cuenta con dos tolvas, una de entrada para alimentación y una de salida para captación del material, como lo ilustra la Figura 6. Posee cuchillas de acero transversales en forma de tijeras.



Figura 6. Molino triturador
Tomado de Becerra y Villabona, (2009).

5. Compactación: En este paso, el material molido se extiende en capas sobre unas bandejas. La cantidad de material depende del espesor de la lámina (por ejemplo, para un espesor de 1 cm se requiere una capa de 10 cm de material molido (Becerra y Villabona, 2009)). Las capas se someten a un proceso térmico de prensado que se lleva a cabo en la maquina mostrada en la Figura 7 mediante la cual se calientan a 230°C por 40 minutos aproximadamente con una presión de 150 toneladas. El polietileno actúa como aglomerante uniendo las partículas de aluminio en una matriz elástica formando así las láminas.



Figura 7. Prensado en caliente
Tomado de Becerra y Villabona, (2009).

6. Enfriamiento: Con el fin de rigidizarlas, se enfrían las láminas a -4°C durante 10 minutos, formando un duro aglomerado con una superficie impermeable.

7. Cortado: Una vez enfriadas, las láminas se cortan con las medidas requeridas (Figura 8). Las láminas comercializadas tienen unas medidas de $2.44 * 1.22\text{m}$ y vienen en espesores de: 4, 6, 9, 12, 15 y 20mm.



Figura 8. Mesa de recorte
Tomado de: Tetra Pak, (2009).

La Figura 9 esquemiza el proceso de producción descrito

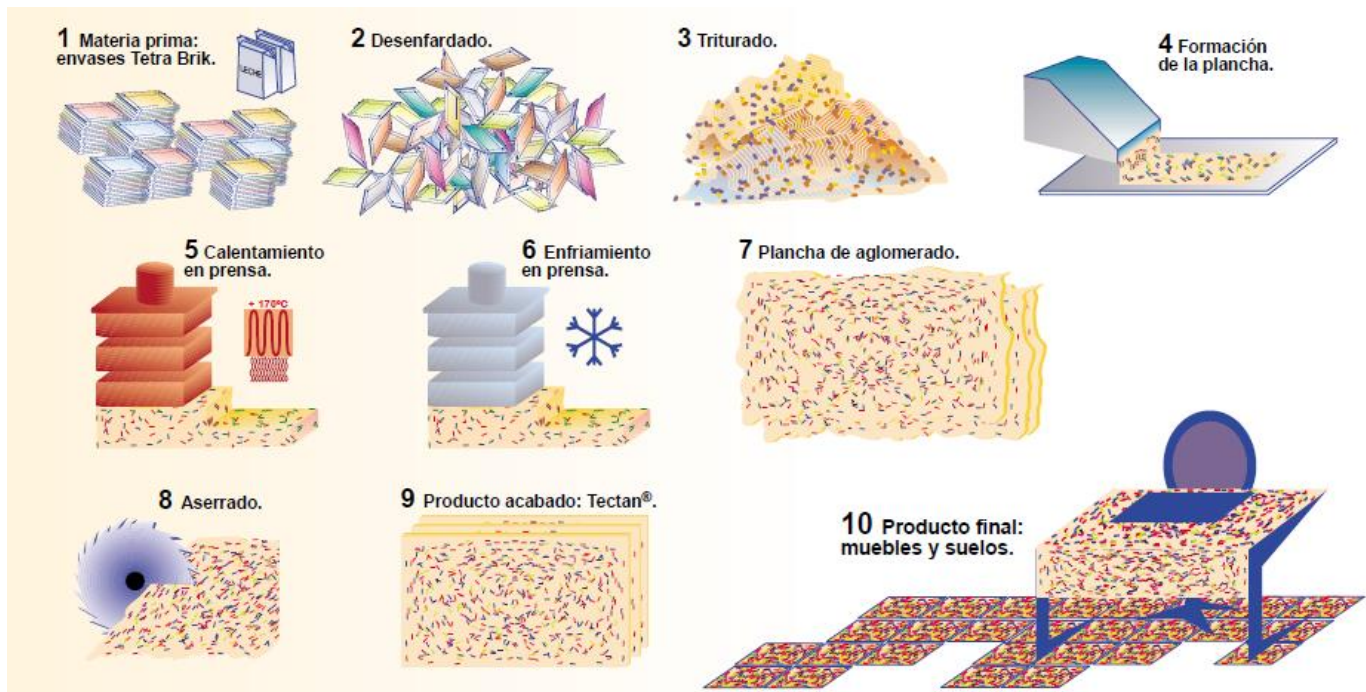


Figura 9. Proceso de fabricación del Tektan.

Tomado de: <http://jair-camila.blogspot.com/>

4.1.3 Impactos ambientales de los componentes de las láminas de Ecoplak

Los impactos ambientales del aluminio y del polietileno se mostrarán cualitativamente, ya que para efectos del trabajo se comparan cuantitativamente los efectos de las láminas de Ecoplak directamente con los de las láminas de madera.

Producción de aluminio

La materia prima del aluminio es la bauxita (Al_2O_3), un mineral que se extrae y se procesa a óxido de aluminio o alúmina. Este óxido se convierte en metal (Aluminio) por un proceso electrolítico. El aluminio se moldea en lingotes para laminarlo. Estas láminas son transportadas a las fábricas de conversión en camiones.

La producción de aluminio incluye inevitablemente emisiones al agua, como "barro rojo" y altos niveles de emisiones de CO_2 al aire. La cadena de producción consta de una refinera, un horno de fundición y una planta de colado. La bauxita se excava generalmente a cielo abierto y se procesa en refineras cercanas. En la refinera, la bauxita se convierte en alúmina por el proceso Bayer, el cual se describe en la siguiente figura:

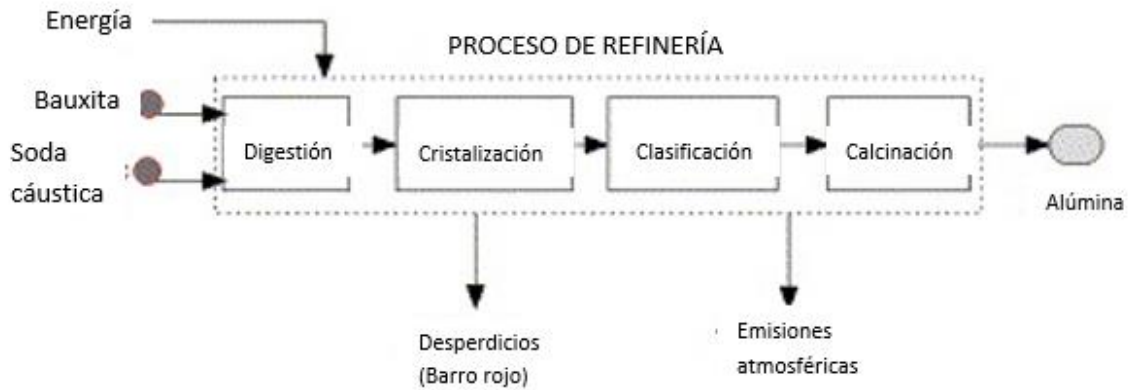


Figura 10. Proceso de refinamiento del aluminio con entradas y salidas.
Tomado de: Reginald, Hsien (2005)

Se producen 2 toneladas de residuos por cada tonelada de alúmina (Reginald, Hsien, 2005).

La Figura 11 representa el horno de fundición, en donde se recibe la alúmina y se convierte en losas de gran tamaño.

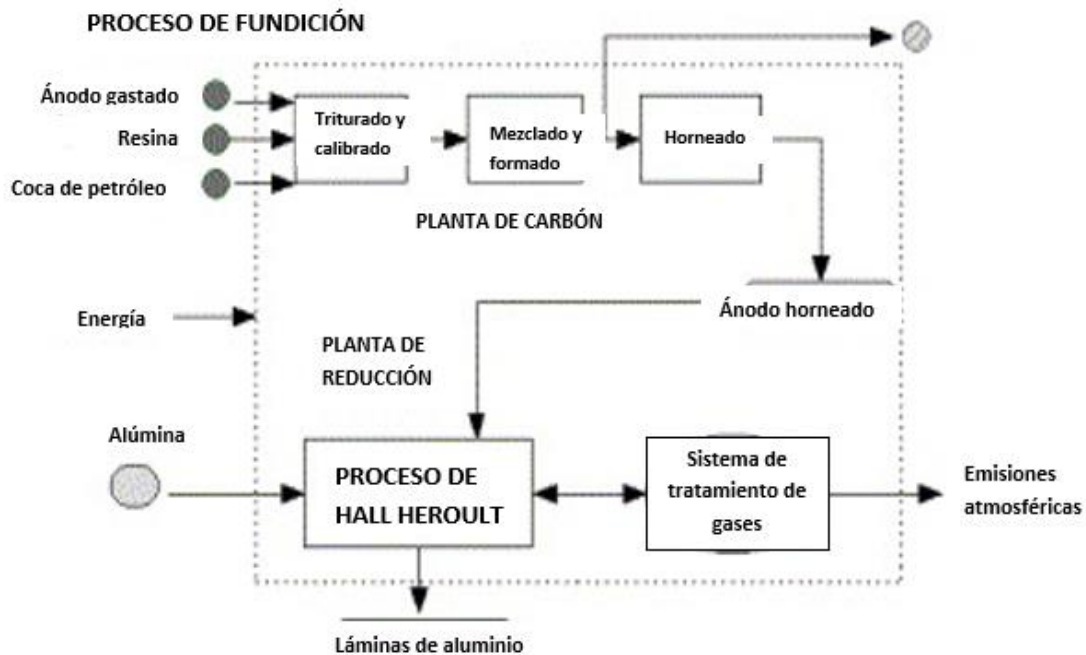


Figura 11. Proceso de fundición del aluminio con entradas y salidas.
Tomado de: Reginald, Hsien (2005)

Este proceso requiere como entradas: Coque de petróleo, resinas y energía, por lo cual genera el 90% del total de emisiones de CO₂ de todo el proceso. Se hace por el método de Hall Heroult, el más usado para la fundición de aluminio.

Por último, la planta de colado recibe las losas y las convierte en pequeñas láminas, como se muestra en la Figura 12. Este paso no genera emisiones pero sí desperdicios de metal.

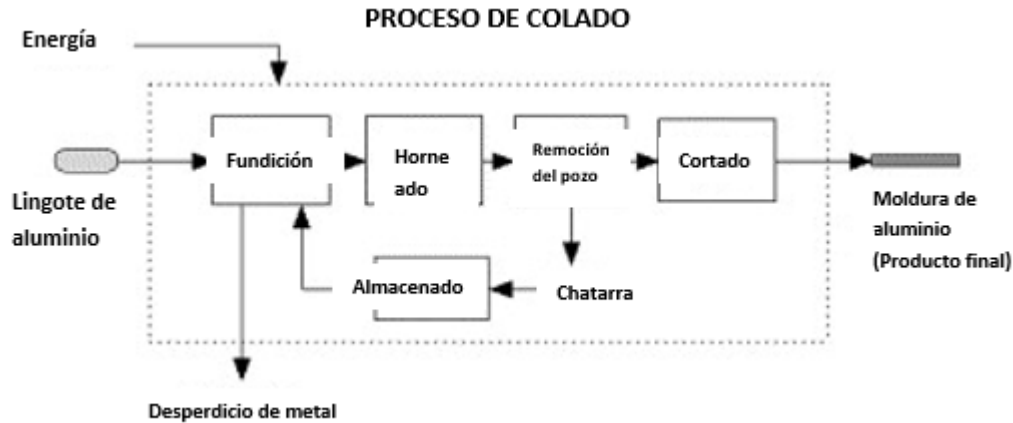


Figura 12. Proceso final de refinado del aluminio con entradas y salidas.
Tomado de: Reginald, Hsien (2005)

Producción de polietileno

Las materias primas para producir etileno son el petróleo y el gas natural. Estos son sometidos a procesos de refinado y cracking (reacciones catalíticas).

Posteriormente, el etileno debe polimerizarse para generar polietileno de baja densidad (LDPE). Este proceso requiere como entradas: Etileno como monómero, energía eléctrica, agua, vapor, etileno y solventes. Como salidas genera emisiones de CO₂, metano y etano al aire, emisiones de DBO y sulfuros al agua y emisiones de residuos al suelo, como se ilustra en la siguiente figura.

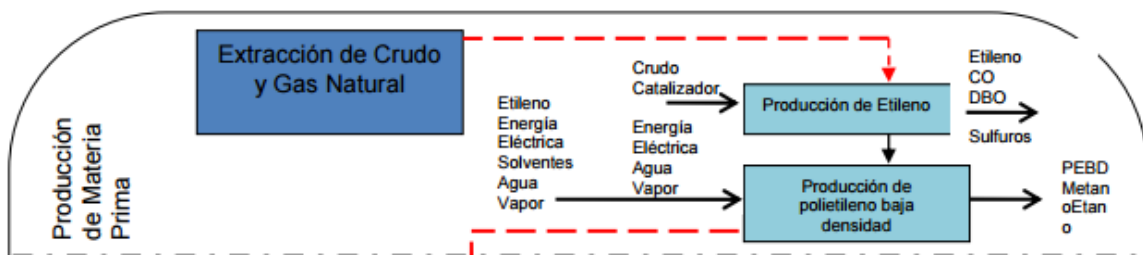


Figura 13. Proceso de producción del Polietileno de baja densidad con entradas y salidas. Instituto Nacional de Ecología (2009)

4.1.4 Impactos ambientales del proceso de producción del Ecoplak

El análisis ambiental llevado a cabo en este trabajo se basó en hallar los consumos de energía eléctrica, gas natural y agua requeridos en los procesos de producción de los dos diferentes materiales, así como la huella de carbono derivada de estos consumos.

La huella de carbono es un indicador que mide la producción de gases de efecto invernadero (GEI) generados por diferentes actividades humanas, cotidianas o comerciales. Para el caso de una empresa u organización, la huella de carbono corresponde a las emisiones de CO₂ de sus operaciones diarias; para una persona corresponde a las emisiones de CO₂ de sus actividades diarias; para un producto o material, corresponde a las emisiones de CO₂ integradas en el ciclo de vida del mismo. Este parámetro se mide en kg de CO₂ equivalente. (Huella de Carbono, S.F)

La medición de esta huella aporta beneficios para las organizaciones porque identifica las fuentes de emisiones de GEI de los productos. Con esto, se puede redefinir objetivos, políticas de reducción de emisiones que sean más efectivas y crear planes de ahorro, los cuales pueden incrementar el rendimiento de las empresas y posicionarlas mejor en el ámbito ambiental. (Qué es la huella de Carbono, 2009).

El análisis realizado se centra en determinar las cantidades de agua, energía eléctrica y gas requeridos para la fabricación de las láminas.

En 2014 se recolectaron para reciclaje 712 toneladas de envases de Tetra Pak®, de las cuales 412 se recuperaron para Bogotá. Cerca del 60% de los envases recolectados es pos-industrial. Riorion recibió 80 toneladas en ese año por parte de la empresa Tetra Pak® (Tetra Pak®, 2015). El material de entrada proviene exclusivamente de residuos pos-industriales, ya que los residuos generados en esta fuente son recolectados selectivamente y facilitan el proceso de recepción de materia prima. La planta de Ecoplak tiene la capacidad de procesar 50 t/mes de envases de Tetra Pak. De estas 50 toneladas se procesan solo 20 de polialuminio, lo que se traduce en 240 t/año.

Como el polialuminio compone solo el 25% de los envases, las empresas despulpadoras deben procesar 80 t de envases al mes para generar las 20 que van a Ecoplak.

En la Tabla 3 se resumen las cifras, basadas en 20 días laborales al mes y jornadas diarias de 8 horas.

Tabla 3. Cantidades procesadas de los componentes del Ecoplak.

Producto	t/año	t/mes	kg/día	kg/h
Total	960	80	4000	500
Polialuminio	240	20	1000	125
Cartón	720	60	3000	375

En el proceso de compactación, el polialuminio se convierte en láminas cambiando su densidad y volumen, pero conservando su masa. Por este motivo, 1 tonelada de polialuminio equivale a 1 tonelada de Ecoplak. Se tomaron como referencia los datos de consumos de la Tabla 6 de Becerra y Villabona (2009, p.54,) para crear la Tabla 4, en la cual, por proporción directa se hallaron los consumos correspondientes para producir 125 kg/h de polialuminio que equivalen a 20 t/mes.

La Figura 14 esquematiza el proceso con líneas de producción y los sub-productos generados en cada una.

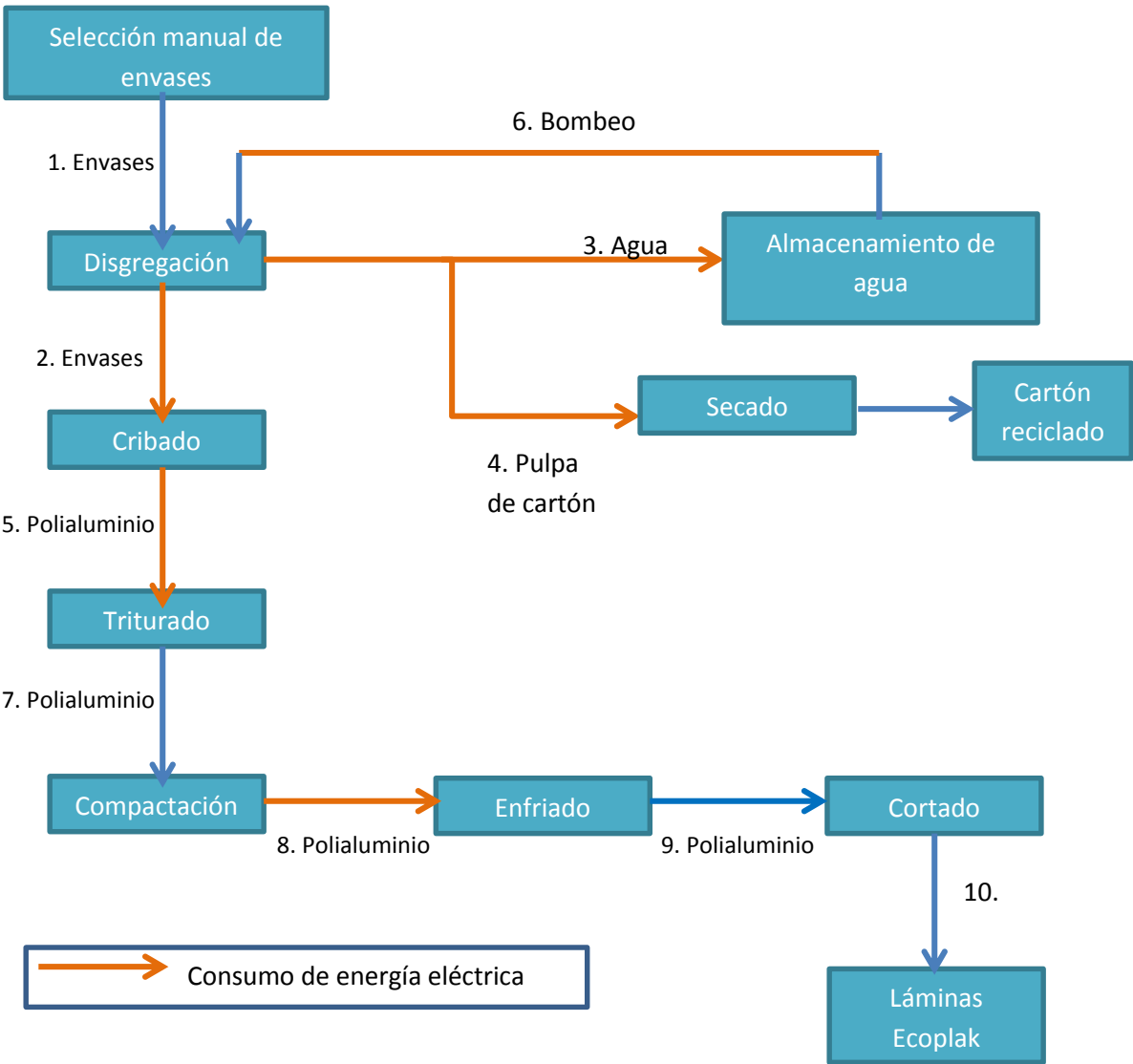


Figura 14. Proceso con líneas de producción y sub-productos

La Tabla 4 muestra las cantidades de insumos que requieren los equipos para el funcionamiento de la planta.

- Consumo de agua: Por el proceso de hidropulpeo de los envases.
- Consumo de energía eléctrica: Para funcionamiento de la maquinaria
- Consumo de gas natural: Para funcionamiento del molino triturador

Tabla 4. Insumos requeridos para la fabricación de 125 kg de Ecoplak

Línea	Envases (kg/h)	Cartón (kg/h)	Polialuminio (kg/h)	Agua (m ³ /h)	Electricidad (kWh)	Gas (m ³)
1	500	375	125	0		0
2	500	375	125	5	14.86	0
3	0	0	0	4.73	0.85	0
4	0	375	0	0.25	4.57	0
5	0	0	125	0	25	0
6	0	0	0	-5	0.85	0
7	0	0	125	0	0	1.64
8	0	0	125	0	3.41	0
9	0	0	125	0	0	0
10	0	0	125	0	0.86	0
Total				4.98	50.39	1.64

Según Riorion, para una producción de 100 láminas de 6 mm se utilizan 25 m³ de gas. Sacando volúmenes y posteriormente pesos, se estima el volumen de gas utilizado para producir 125 kg de Ecoplak.

Según los factores de emisión, tomados de la Universidad de Santander (2012) y consignados en la Tabla 5, se calculó la huella de carbono generada por los consumos de energía eléctrica y gas:

Tabla 5. Factores de emisión en términos de CO₂

Insumo	Cantidad de insumo	Factor de emisión (kg de CO ₂)
Gas (m ³)	1	1.88
Electricidad (kW/h)	1	0.29

Fuente: UDES, 2012.

Gas:

Por 125 kg de Ecoplak se generan 3.09 kg de CO₂

Por 20 t de Ecoplak se generan 494.62 kg de CO₂

Electricidad:

Por 125 kg de Ecoplak se generan 14.71 kg de CO₂

Por 20 t de Ecoplak se generan 2354.53 kg de CO₂

La huella total de carbono corresponde a la suma de la de gas y la de electricidad:

- Huella total de carbono generada por 125 kg de Ecoplak: 17.81 kg de CO₂
- Huella total de carbono generada por 20 t de Ecoplak: 2849.16 kg de CO₂

4.1.5 Usos actuales y potenciales de las láminas de Ecoplak en Colombia y otros países

Actualmente en Colombia, con Ecoplak se fabrica mobiliario interior para aplicaciones como: escolar, de oficina, de cocina; y mobiliario exterior como campamentos (contenedores) y material P.O.P, muros, tejas, pisos y puertas. A continuación se hace una descripción de los productos fabricados por la empresa Riorion hechos con Ecoplak:

Viviendas: Para vivienda, se elaboran en Ecoplak los siguientes elementos: paneles, puertas, pisos, cielorrasos, guarda escobas, mobiliario de baños, closets y cocinas. La estructura es metálica.

Las siguientes figuras muestran la fachada de una casa construida con paneles, techo y pisos de Ecoplak.



Figura 15. Vivienda elaborada con Ecoplak
Tomado de Riorion S.A. (S.F)

Oficinas: Se fabrican oficinas modulares como las observadas en las Figuras 16 y 17.



Figura 16. Oficina modular elaborada con Ecoplak (vista trasera)
Tomado de Riorion S.A. (S.F)



Figura 17. Oficina modular elaborada con Ecoplak (vista frontal)
Tomado de Riorion S.A. (S.F)

Muebles de oficina y escolares: Como se aprecia en las Figuras 18 y 19, se fabrican diferentes tipos de muebles en Ecoplak.



Figura 18. Mesa escolar modular
Tomado de Ecoplak, (2012).



Figura 19. Escritorio de oficina.
Tomado de Ecoplak, (2012).

Tejas: Riorion fabrica tres tipos de tejas, dependiendo de la necesidad del cliente, las cuales se muestran en las Figuras 20, 21 y 22.



Figura 20. Teja Termo acústica.
Tomado de Riorion S.A. (S.F)



Figura 21. Teja ártica
Tomado de Riorion S.A. (S.F)



Figura 22. Teja ártica kraf.
Tomado de Riorion S.A. (S.F)

Pisos: Riorion fabrica cuatro tipos de pisos laminados: Tráfico liviano, tráfico mediano, tráfico pesado y tráfico extra pesado. En la Figura 23 se observa el piso de tráfico liviano.



Figura 23. Piso de tráfico liviano, aplicado en vivienda.
Tomado de Riorion S.A. (S.F)

Puertas: Fabrican puertas entamboradas y entableradas. La Figura 24 ilustra una puerta entamborada.



Figura 24. Puerta entamborada y lisa
Tomado de Riorion S.A. (S.F)

Cielorrasos: Cielorrasos resistentes a la humedad, aislantes térmicos y acústicos, como se observa en la Figura 25.



Figura 25. Cielorraso de Ecoplak
Tomado de Riorion S.A. (S.F)

Formaletas: Formaletas que se acomodan a diferentes geometrías ya que el material es moldeable. En la Figura 26 se muestra una formaleta curva:



Figura 26. Formaleta en Ecoplak
Tomado de Riorion S.A. (S.F)

Muebles de cocina: Los cuales incluyen: mesones, gabinetes de pared, esquineros, muebles auxiliares y diseños solicitados. La Figura 27 muestra una cocina semi-integral elaborada enteramente con Ecoplak.



Figura 27. Mesón de cocina hecho en Ecoplak, combinado con madera.
Tomado de Riorion S.A. (S.F)

Parques infantiles: Se han desarrollado juegos de parques infantiles con estructura metálica, como se muestra en la Figura 28.



Figura 28. Parque infantil combinado con metal.
Tomados de Ecoplak, (2012)

Campamentos: En la Figura 29 se observa un campamento de obra construido con paneles de Ecoplak estructura metálica.



Figura 29. Campamento de obra construido en Ecoplak
Tomados de Ecoplak, (2012).

Puntos ecológicos: Se fabrican puntos de recolección de basuras para incentivar el reciclaje. La Figura 30 muestra un punto ecológico estándar. También hay unos especiales para recolección de pilas y baterías.



Figura 30. Punto de reciclaje de basuras.
Tomados de Ecoplak, (2012).

Estas láminas podrían usarse también para campamentos militares y refugios para los damnificados por desastres naturales o emergencias, ya que son de fácil armado y colocación rápida.

En este momento, Riorion está desarrollando pruebas para fabricar postes de Ecoplak. Debido a su maleabilidad y elasticidad, este material ofrece muchas posibilidades para ser trabajado.

4.2 MADERA

4.2.1 Proceso de producción de las láminas de madera

Tablex Pizano® es un tablero compuesto de tres capas y aglomerado con resina. A continuación se describe el proceso de fabricación de este aglomerado de madera:

1. Tala de bosques: La madera utilizada para el Tablex Pizano® proviene del árbol cativo, aunque también se requiere la madera en otras presentaciones provenientes de aserraderos: Aserrín, ribetes y astillas.
2. Recepción de materia prima: Una vez en la planta, los troncos se seleccionan y se disponen los diferentes formatos de la madera para empezar el proceso de fabricación.
3. Astillado y viruteado: Las astillas que entran se procesan y se cortan en unos tamaños específicos. Los troncos son descortezados y posteriormente se someten a un proceso de viruteado, el cual los convierte en partículas más pequeñas que las

astillas. Las dos capas exteriores se conforman con virutas y la capa interna, con astillas, las cuales gracias a su volumen proporcionan excelentes condiciones para agarre del tornillo.

4. Secado: Se secan las astillas y virutas en la secadora.
5. Fabricación de la resina: Esta funciona como matriz aglomerante para las partículas de madera.
6. Prensado: Se prensan las partículas junto con la resina para formar las láminas según el espesor deseado. Debe hacerse un colchón de astillas de 6 cm de espesor para crear una lámina de 15mm. Se cierra la prensa con una carga de 2276 t. Este proceso se hace a alta temperatura para garantizar el adecuado fraguado del pegante.
7. Cortado y lijado: Se cortan las láminas según el tamaño requerido y se liján para darles un acabado terso.

El siguiente esquema muestra el proceso de producción de una lámina de chipwood, también llamada particleboard, la cual es el equivalente al Tablex Pizano® en otros países.

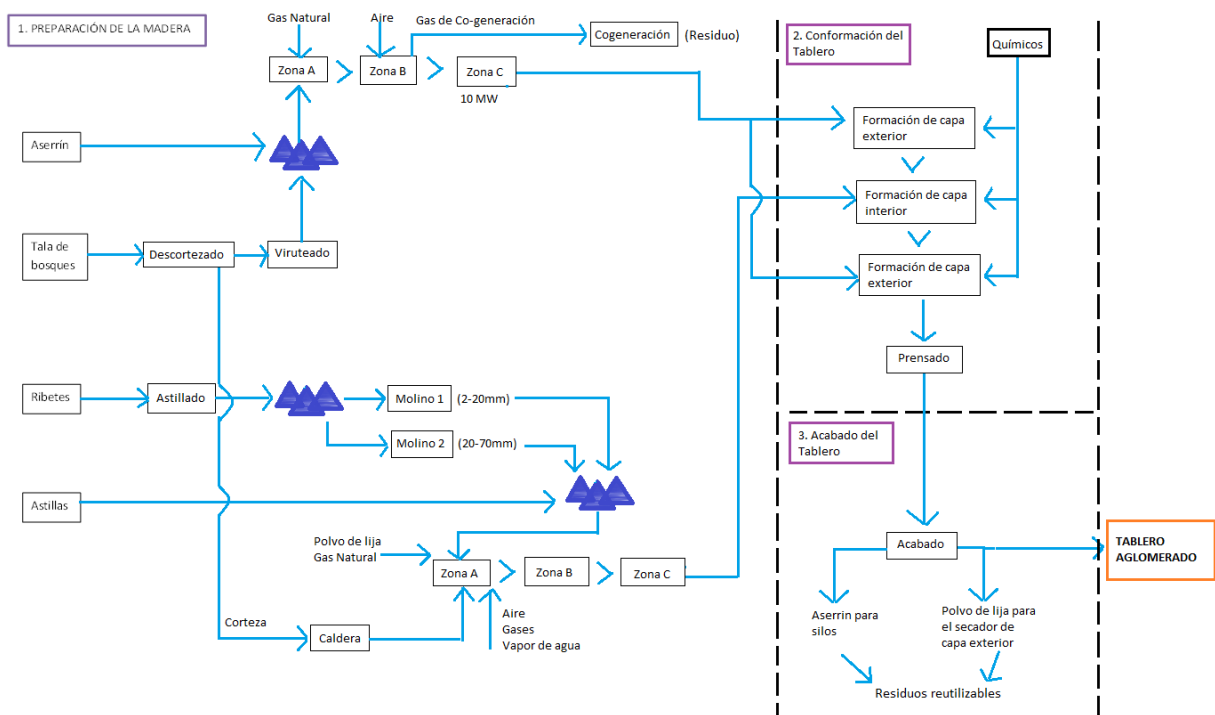


Figura 31. Proceso de producción de las láminas aglomeradas de madera.

Tomado de: Rivela, B., Admundela, H., Moreira, M. y Feijoo, G. (2006).

4.2.2 Impactos ambientales del proceso de producción de las láminas de madera

Este análisis ambiental tiene el mismo enfoque descrito anteriormente para el proceso de producción del Ecoplak.

Las Tablas 6 y 7 muestran las cantidades de insumos requeridas para producir 1m³ de tablero aglomerado. Los datos fueron tomados del inventario del ciclo de vida de un tablero aglomerado de Rivela et al. (2006)

Tabla 6. Cantidades de material requeridas para producir 1 m³ de tablero aglomerado

Material	Cantidad (kg)
Tala de arboles	892.82
Aserrín	257.03
Ribetes	125.57
Astillas	40.58
Total madera	1316

Tomado de: Rivela et al. 2006.

Tabla 7. Insumos que requieren los equipos para el funcionamiento de la planta según los sub-procesos de producción.

Sub-proceso	Electricidad de la red (KWh)	Electricidad de cogeneración (KWh)	Gas natural (m ³)	Gas de cogeneración (m ³)	Vapor de agua (m ³ de gas)	Agua (m ³)
Funcionamiento de la máquina	16.38	25.62	0	0	0	0
Secador de capa exterior	0	0	8.70	23.98	0	0
Secador de capa interior	0	0	17.67	0	12.29	0
Conformación del tablero	4.09	6.40	0	0	22.83	16.69
Acabado del tablero	20.47	32.02	0	0	0	0
Total	40.95	64.05	26.38	23.98	35.12	16.69

El vapor de agua es generado por calderas a gas, por lo cual su cantidad se expresa en m³ de gas.

Se presenta el consumo total de energía eléctrica, gas natural y agua para el proceso en la Tabla 8.

Tabla 8. Cantidades totales de insumos requeridos en el proceso de producción del tablero aglomerado para 1m³

Insumo	Cantidad total
Energía eléctrica (KWh)	105
Gas natural (m ³)	85.47
Agua (m ³)	16.69

Según los factores de emisión consignados en la Tabla 5, se calculó la huella de carbono generada por los consumos de energía eléctrica y gas:

Gas:

Por 1 m³ de tablero aglomerado se generan 161.12 kg de CO₂.

Electricidad:

Por 1 m³ de tablero aglomerado se generan 30.66 kg de CO₂.

La huella total de carbono corresponde a la suma de la de gas y la de electricidad:

- Huella total de carbono generada por 1 m³ de tablero aglomerado: 191.7819 kg de CO₂.

5 PROCEDIMIENTO Y METODOLOGÍA

Se pretende fabricar seis (6) vigas y seis (6) columnas con sección hueca hechas en Ecoplak para determinar sus propiedades elastoplásticas, a través de ensayos a flexión y compresión. Para la selección del espesor más adecuado de lámina entre los calibres existentes (4, 6, 9, 12, 15 ó 20mm) con el que se fabricarían los elementos se hizo el procedimiento descrito a continuación.

En primer lugar, se calculó una carga última para las vigas y una carga crítica para las columnas; estas cargas varían según el espesor de lámina a tener en cuenta para el armado de los elementos. Posteriormente, se elaboraron modelos en elementos finitos en el programa SAP-2000 de cada uno de los elementos (vigas y columnas cajón) con los distintos espesores de lámina existentes, a los cuales se les aplicó la carga correspondiente.

Seguido a esto, se tuvieron en cuenta ciertos criterios de selección para el espesor más adecuado de estudio para la fabricación de las vigas y las columnas. Para las vigas se consideraron los esfuerzos máximos a flexión, a cortante y las deflexiones máximas producidas en los modelos de elementos finitos debido a la carga última aplicada. En el caso de las columnas, se tuvieron en cuenta los esfuerzos máximos a flexión, a cortante y el acortamiento máximo producidos por la carga crítica aplicada; además del desplazamiento máximo generado por la carga lateral unitaria. Con los resultados obtenidos, se realizaron las gráficas de cada criterio contra el espesor de las láminas. A estas gráficas se les adicionó la curva de precio contra espesor. Para la congruencia de las gráficas se hizo una normalización de los datos; se aclara que este método es solo una aproximación para determinar el espesor de lámina más adecuado para la fabricación de los elementos. El punto de intersección entre las dos (2) curvas de cada gráfica sugiere un espesor para la fabricación de los elementos. Se tomó el valor comercial más cercano al valor crítico sugerido por las gráficas.

Conociendo el espesor de lámina con el que se fabricarían los elementos, se procedió a determinar la cantidad de tornillos necesarios para el armado de vigas y columnas, con la cual se hicieron los planos de armado. Con éstos se fabricaron los elementos tipo cajón y se hizo el montaje correspondiente para los ensayos a flexión y compresión, que fueron realizados con el equipo de la MTS.

Por último, se determinó la unidad funcional entre madera y Ecoplak. Ésta se entiende como un parámetro de la función del sistema estudiado y da una referencia de cuáles son las entradas y las salidas relacionadas. Esto permite la comparación de dos materiales diferentes (European commission, s.f.)

5.1 PREDIMENSIONAMIENTO Y DISEÑO

Para el diseño tanto de las vigas como de las columnas, se hizo una modelación en elementos finitos en el programa SAP-2000.

Para las tablas de carga última para vigas y carga crítica para columnas, se definen las siguientes abreviaturas:

e: espesor

be: Borde externo sección transversal

bi: Borde interno sección transversal

La longitud de las vigas y altura de las columnas se estableció como 2 m debido a limitaciones en las dimensiones existentes de las láminas que son de 2.44x1.22m. El esfuerzo máximo del material, se refiere al módulo de rotura dado por el fabricante.

5.1.1 Cálculo de la carga última para vigas

El cálculo de la carga última aplicada a los modelos de elementos finitos de las vigas se calculó en base a las siguientes ecuaciones:

Esfuerzo

$$\sigma = \frac{M \times Y}{I} \quad Ec. 1$$

Donde,

σ : Esfuerzo (N/mm²)

M: Momento último (N*mm)

Y: Distancia al eje neutro (mm)

I: Inercia (mm⁴)

Módulo de sección

$$S = \frac{I}{Y} \quad Ec. 2$$

Donde,

S: Módulo de sección (mm³)

Reemplazando Ec.2 en Ec.1 se tiene que:

$$\sigma_{max} = \frac{Mu}{S} \quad Ec. 3$$

Despejando Mu se obtiene:

$$Mu = \sigma_{max} \times S \quad Ec. 4$$

Sabiendo que el momento último de una viga simplemente apoyada con carga aplicada en los tercios medios es:

$$Mu = \frac{Pu \times L}{3} \quad Ec. 5$$

Donde,

Mu: Momento último (N*mm)

Pu: Carga última (N)

L: Longitud (mm)

Igualando la Ec.4 y la Ec.5 y despejando la carga última (Pu) se obtiene la siguiente ecuación:

$$Pu = \frac{3 \times \sigma_{max} \times S}{L} \quad Ec. 6$$

Empleando las ecuaciones mencionadas anteriormente se obtuvieron los resultados para cada una de las vigas armadas con las láminas de 4mm, 6mm, 9mm, 12mm, 15mm y 20mm de espesor (e), como se muestra en las Tablas No. 9, 10, 11, 12 13 y 14, respectivamente.

Tabla 9. Carga última viga con lámina de 4mm

Lámina 4mm	
Base (mm)	200
Altura (mm)	200
e (mm)	4
be (mm)	200
bi (mm)	192
σ máx. Ecoplak(N/mm ²)	20
Longitud (mm)	2000
y (mm)	100
I (mm ⁴)	2.009E+07
S (mm ³)	2.009E+05
Pu (N)	6026
#Nodos	7
Pdistribuida (N)	861

Tabla 10. Carga última viga con lámina de 6mm

Lámina 6mm	
Base (mm)	200
Altura (mm)	200
e (mm)	6
be (mm)	200
bi (mm)	188
σ máx. Ecoplak(N/mm ²)	20
Longitud (mm)	2000
y (mm)	100
I (mm ⁴)	2.923E+07
S (mm ³)	2.923E+05
Pu (N)	8770
#Nodos	7
Pdistribuida (N)	1253

Tabla 11. Carga última viga con lámina de 9mm

Lámina 9mm	
Base (mm)	200
Altura (mm)	200
e (mm)	9
be (mm)	200
bi (mm)	182
σ máx. Ecoplak(N/mm ²)	20
Longitud (mm)	2000
y (mm)	100
I (mm ⁴)	4.190E+07
S (mm ³)	4.190E+05
Pu (N)	12570
#Nodos	7
Pdistribuida (N)	1796

Tabla 12. Carga última viga con lámina de 12mm

Lámina 12mm	
Base (mm)	200
Altura (mm)	200
e (mm)	12
be (mm)	200
bi (mm)	176
σ máx. Ecoplak(N/mm ²)	20
Longitud (mm)	2000
y (mm)	100
I (mm ⁴)	5.337E+07
S (mm ³)	5.337E+05
Pu (N)	16012
#Nodos	7
Pdistribuida (N)	2287

Tabla 13. Carga última viga con lámina de 15mm

Lámina 15mm	
Base (mm)	200
Altura (mm)	200
e (mm)	15
be (mm)	200
bi (mm)	170
σ máx. Ecoplak(N/mm ²)	20
Longitud (mm)	2000
y (mm)	100
I (mm ⁴)	6.373E+07
S (mm ³)	6.373E+05
Pu (N)	19120
#Nodos	7
Pdistribuida (N)	2731

Tabla 14. Carga última viga con lámina de 20mm

Lámina 20mm	
Base (mm)	200
Altura (mm)	200
e (mm)	20
be (mm)	200
bi (mm)	160
σ máx. Ecoplak(N/mm ²)	20
Longitud (mm)	2000
y (mm)	100
I (mm ⁴)	7.872E+07
S (mm ³)	7.872E+05
Pu (N)	23616
#Nodos	7
Pdistribuida (N)	3374

5.1.2 Cálculo de la carga crítica para columnas

La carga crítica de pandeo es la carga máxima que se le puede aplicar a un elemento sometido a compresión sin que se produzca inestabilidad del mismo. Ésta se usó como una herramienta teórica comparativa.

La carga crítica aplicada en los modelos en elementos finitos de las columnas con diferentes espesores (e) de lámina (4mm, 6mm, 9mm, 12mm, 15mm y 20mm), se halló en base a las siguientes ecuaciones:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 \times E \times A}{\lambda^2} \quad Ec. 7$$

Donde,

P_{cr}: Carga crítica (N)

E: Módulo de elasticidad de las láminas aglomeradas (N/mm²)

A: Área de la sección transversal de la columna (mm²)

λ: Coeficiente de esbeltez

El coeficiente de esbeltez (λ) se calcula según la siguiente fórmula:

$$\lambda = \frac{K \times L}{r} \quad Ec. 8$$

Donde,

K: Coeficiente de empotramiento de nudo

L: Longitud de la columna (mm)

r: Radio de giro (mm)

El radio de giro (r) se halla en base a la siguiente ecuación:

$$r = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad Ec. 9$$

Donde,

I: Inercia (mm⁴)

A: Área de la sección transversal de la columna (mm²)

Empleando las ecuaciones mencionadas anteriormente se obtuvieron los siguientes resultados para cada una de las columnas armadas con las láminas de 4mm, 6mm, 9mm, 12mm, 15mm y 20mm, como se muestra en las Tablas 15, 16, 17, 18, 19 y 20 respectivamente.

Tabla 15. Carga crítica columna con lámina de 4mm

Base (mm)	200
Altura (mm)	200
e (mm)	4
be (mm)	200
bi (mm)	192
σ max(N/mm ²)	20
Longitud (mm)	2000
y (mm)	100
I (mm ⁴)	2.009E+07
K	1
A (mm ²)	3136
R (mm)	80.033
E (N/mm ²)	1489.27
λ	24.99
Pcr (N)	73812.57
#Nodos	24
PcrDistribuida (N)	3076

Tabla 16. Carga crítica columna con lámina de 6mm

Base (mm)	200
Altura (mm)	200
e (mm)	6
be (mm)	200
bi (mm)	188
σ max(N/mm ²)	20
Longitud (mm)	2000
y (mm)	100
I (mm ⁴)	2.923E+07
K	1
A (mm ²)	4656
R (mm)	79.238
E (N/mm ²)	1489.27
λ	25.24
Pcr (N)	107421.92
#Nodos	24
PcrDistribuida (N)	4476

Tabla 17. Carga crítica columna con lámina de 9mm

Base (mm)	200
Altura (mm)	200
e (mm)	9
be (mm)	200
bi (mm)	182
σ max(N/mm ²)	20
Longitud (mm)	2000
y (mm)	100
I (mm ⁴)	4.190E+07
K	1
A (mm ²)	6876
R (mm)	78.062
E (N/mm ²)	1489.27
λ	25.62
Pcr (N)	153966.80
#Nodos	24
PcrDistribuida (N)	6415

Tabla 18. Carga crítica columna con lámina de 12mm

Base (mm)	200
Altura (mm)	200
e (mm)	12
be (mm)	200
bi (mm)	176
σ max(N/mm ²)	20
Longitud (mm)	2000
y (mm)	100
I (mm ⁴)	5.337E+07
K	1
A (mm ²)	9024
R (mm)	76.907
E (N/mm ²)	1489.27
λ	26.01
Pcr (N)	196129.03
#Nodos	24
PcrDistribuida (N)	8172

Tabla 19. Carga crítica columna con lámina de 15mm

Base (mm)	200
Altura (mm)	200
e (mm)	15
be (mm)	200
bi (mm)	170
σ max(N/mm ²)	20
Longitud (mm)	2000
y (mm)	100
I (mm ⁴)	6.373E+07
K	1
A (mm ²)	11100
R (mm)	75.774
E (N/mm ²)	1489.27
λ	26.39
Pcr (N)	234192.77
#Nodos	24
PcrDistribuida (N)	9758

Tabla 20. Carga crítica columna con lámina de 20mm

Base (mm)	200
Altura (mm)	200
e (mm)	20
be (mm)	200
bi (mm)	160
σ max(N/mm ²)	20
Longitud (mm)	2000
y (mm)	100
I (mm ⁴)	7.872E+07
K	1
A (mm ²)	14400
R (mm)	73.937
E (N/mm ²)	1489.27
λ	27.05
Pcr (N)	289266.15
#Nodos	24
PcrDistribuida (N)	12053

5.1.3 Modelación en elementos finitos

5.1.3.1 Modelo viga y aplicación de carga

La carga resultante descrita en el numeral 5.1.1 se aplicó en el modelo de las vigas en elementos finitos que se muestra en la Figura 32.

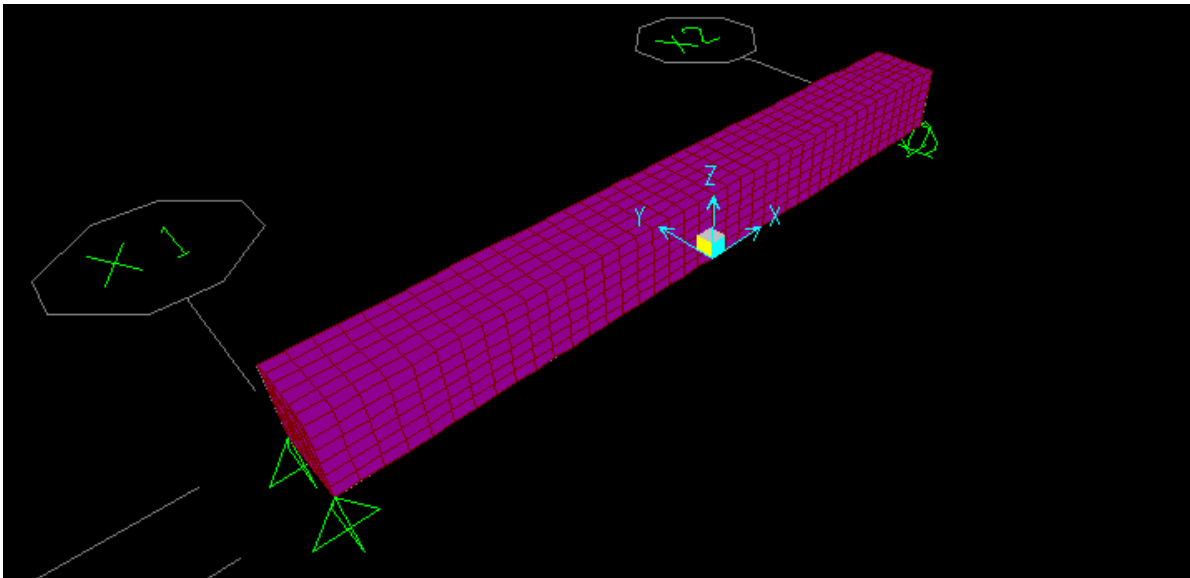


Figura 32. Modelo viga en elementos finitos

La carga última se distribuyó uniformemente en los tercios medios de la viga, teniendo en cuenta el número de nodos presentes, que para el caso del modelo mostrado es siete (7), como se muestra en las Figuras 33 y 34.

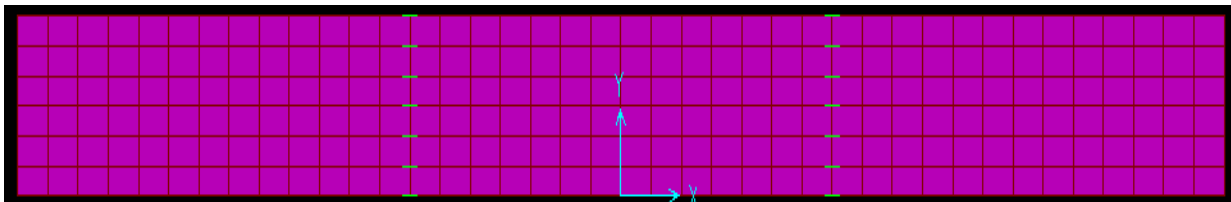


Figura 33. Nodos de aplicación de carga última

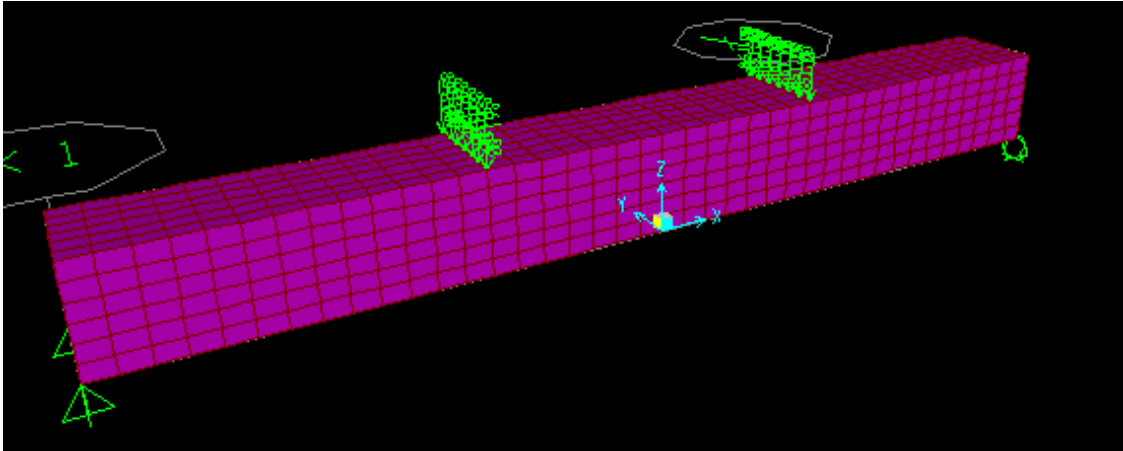


Figura 34. Aplicación de carga última

Las cargas aplicadas generan grandes deformaciones localizadas en el área de su aplicación, como se muestra en la Figura 35.

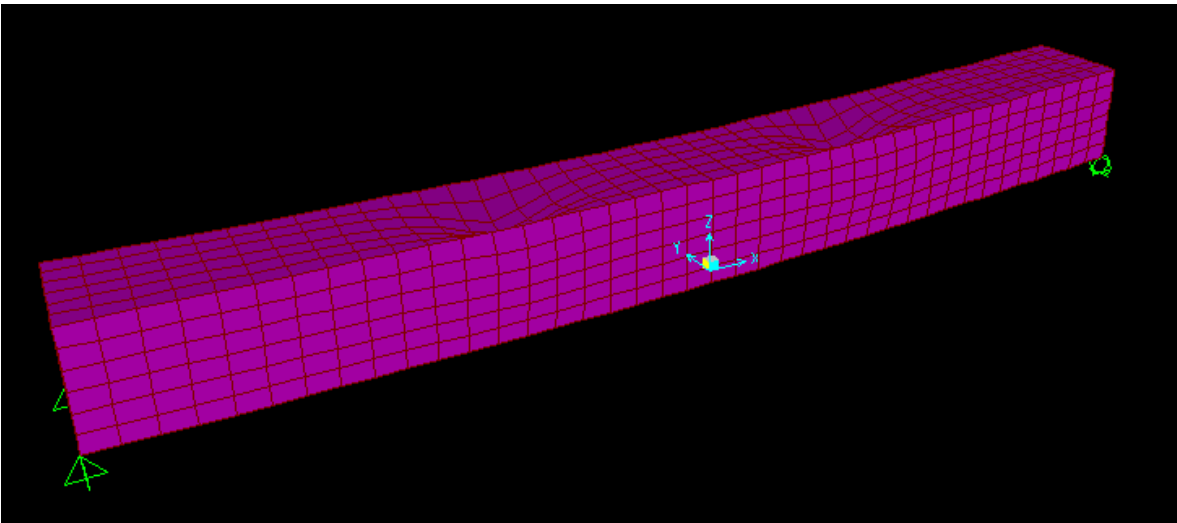


Figura 35. Viga deformada sin rigidizadores

Los esfuerzos a compresión generados en la zona de aplicación de carga llegan hasta un valor de 206 N/mm^2 , para el caso de la viga armada con lámina de 4 mm , el cual sobrepasa el esfuerzo máximo del material que es de 20 N/mm^2 . Por esta razón, se decidió poner 2 rigidizadores en el área de aplicación de las cargas, los cuales tienen el mismo espesor y magnitud de la sección transversal de la viga. A continuación, en la Figura 36, se muestran la concentración de esfuerzos en el área de aplicación de la carga.

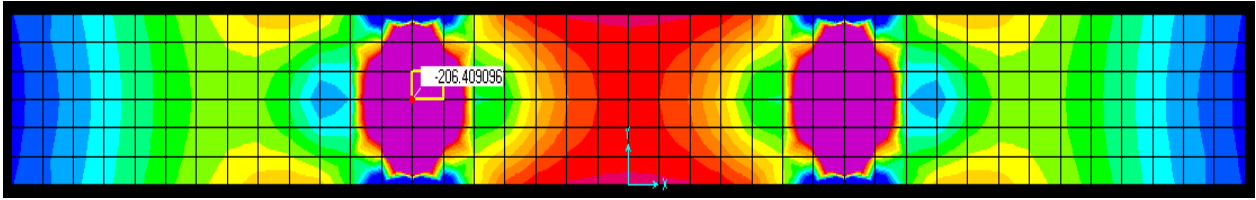


Figura 36. Esfuerzos de compresión en viga sin rigidizadores

En la Figura 37 se muestra un corte de la viga donde se muestra la ubicación de los dos (2) rigidizadores.

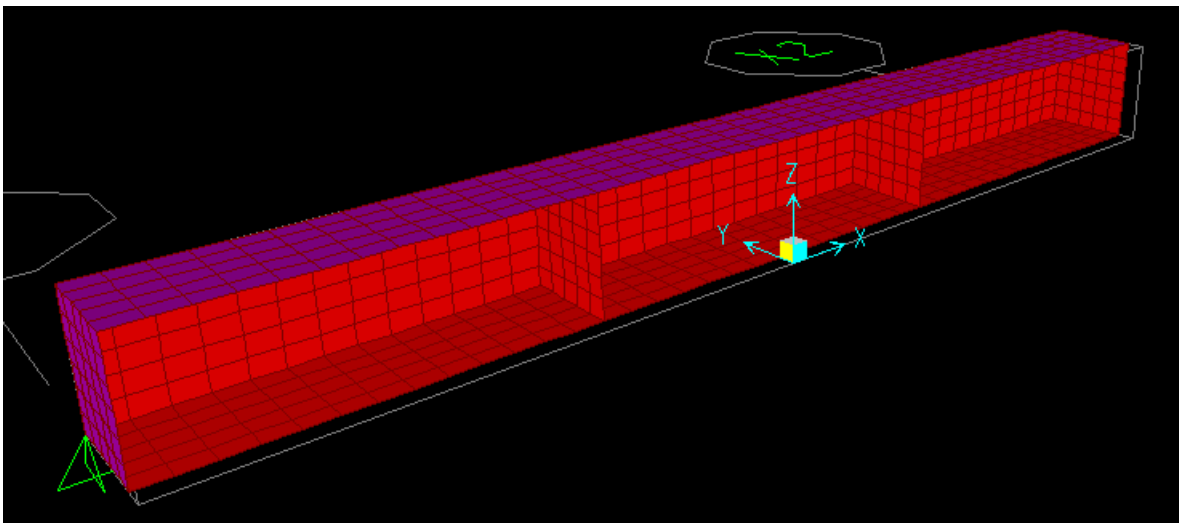


Figura 37. Viga con rigidizadores

Con los rigidizadores, las deformaciones localizadas en el área de aplicación de carga disminuyen y se observan mejor las deformaciones globales, como se evidencia en la Figura 38.

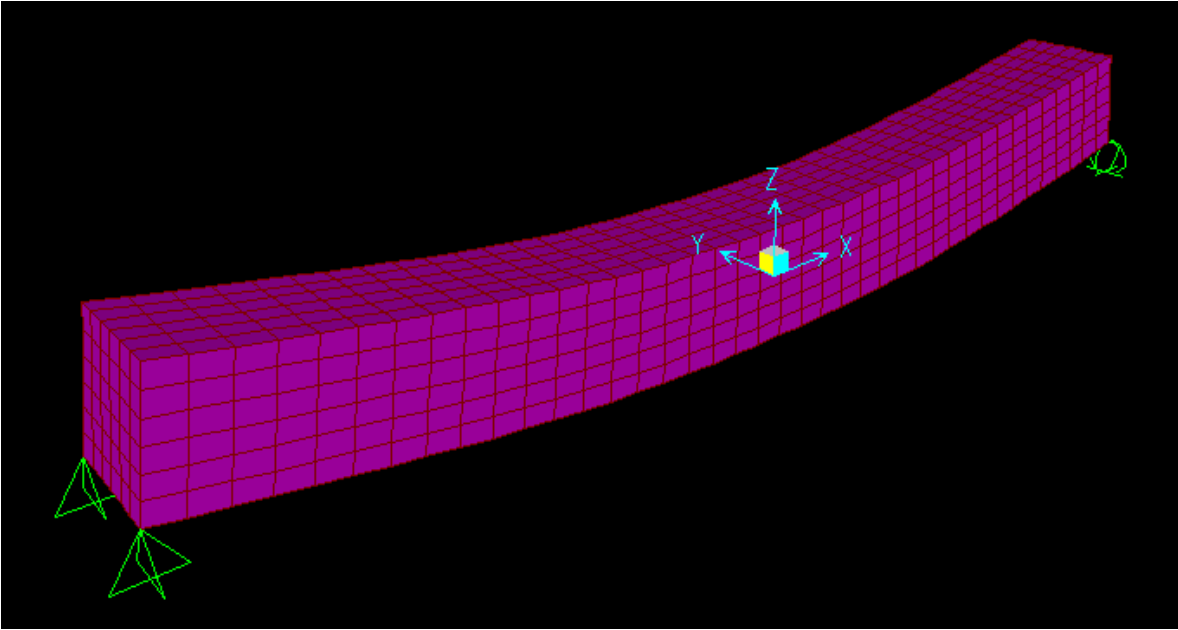


Figura 38. Viga deformada con rigidizadores

Los esfuerzos a compresión en la viga con rigidizadores llegan hasta un valor máximo de 18.71 N/mm², tal como se observa en la Figura 39 lo que representa una gran diferencia respecto a los generados en la viga sin rigidizadores.

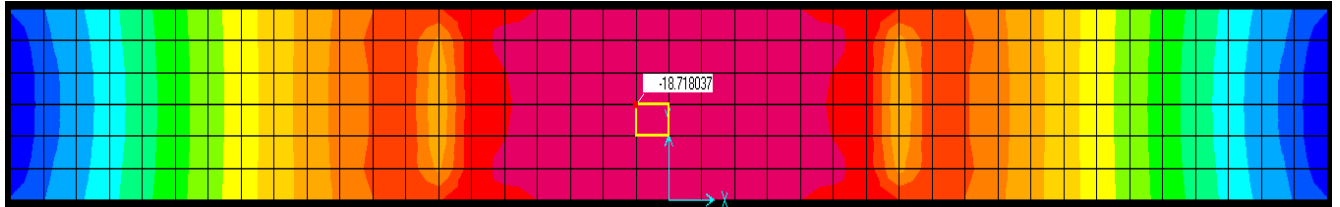


Figura 39. Esfuerzos de compresión en viga con rigidizadores

5.1.3.2 Modelo columna y aplicación de carga

La carga crítica obtenida descrita en el numeral 5.1.2 se aplicó en el modelo en elementos finitos que se muestra en la Figura 40.

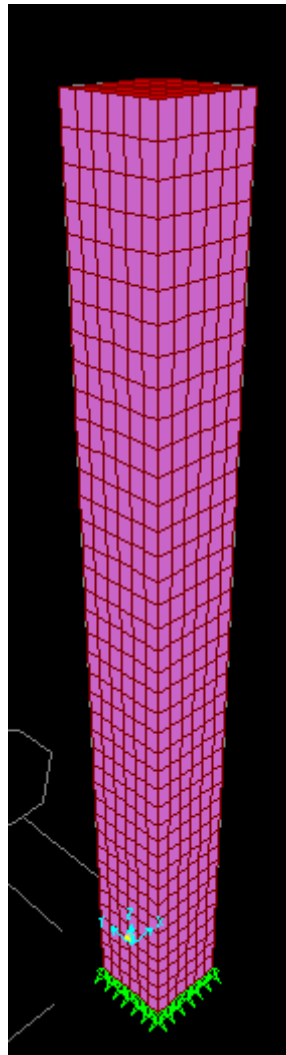


Figura 40. Modelo de columna en elementos finitos

La carga crítica se distribuyó de manera uniforme en el número de nodos presentes en el contorno de la tapa superior de la columna, veinticuatro (24), como se muestra en las Figuras 41 y 42. La carga no se aplicó en todos los nodos contenidos en la tapa superior de la columna debido a limitaciones físicas del equipo con el que se harán los ensayos.

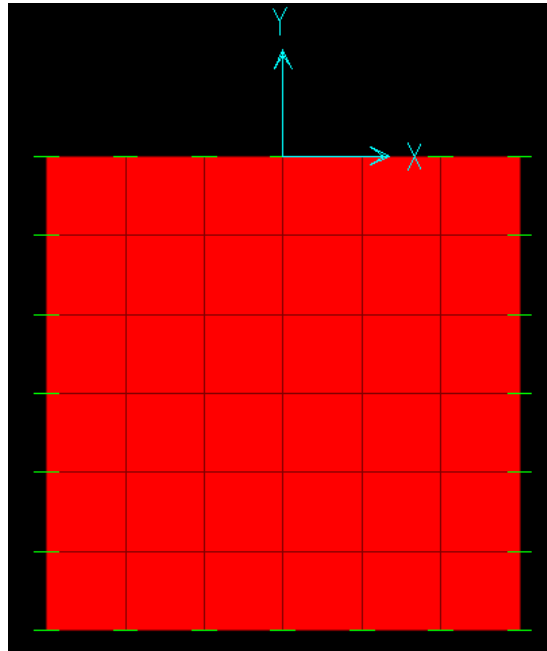


Figura 41. Nodos de aplicación de carga crítica (Tapa superior)

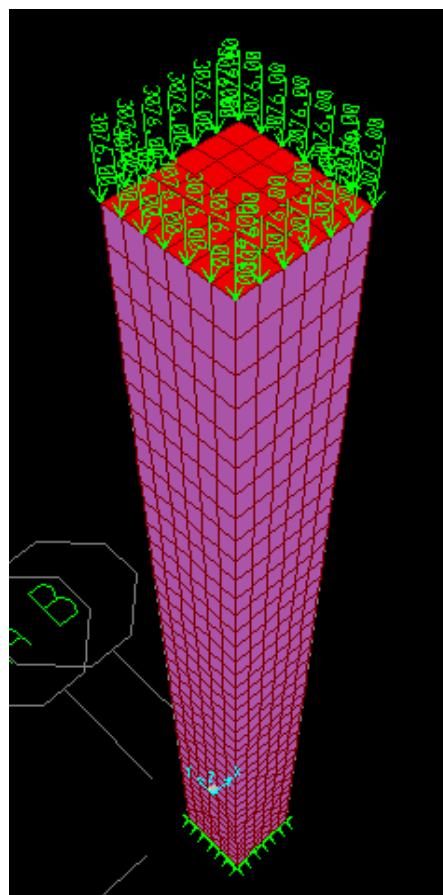


Figura 42. Aplicación de carga crítica

La carga aplicada en el modelo de la columna sin rigidizadores genera grandes deformaciones como se muestra en la Figura 43.

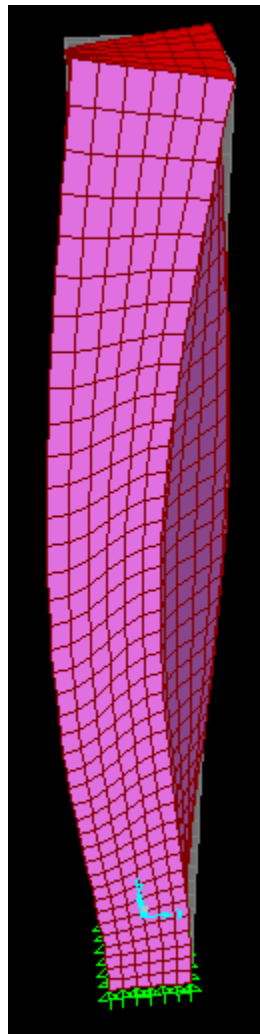


Figura 43. Columna deformada sin rigidizadores

Debido a la esbeltez de la columna se presentan deformaciones localizadas y pandeo. Por esta razón las columnas fueron reforzadas con dos (2) rigidizadores en los tercios medios, como se muestra en la Figura 44. Estos tienen el mismo espesor y las mismas dimensiones de la sección transversal de la columna.

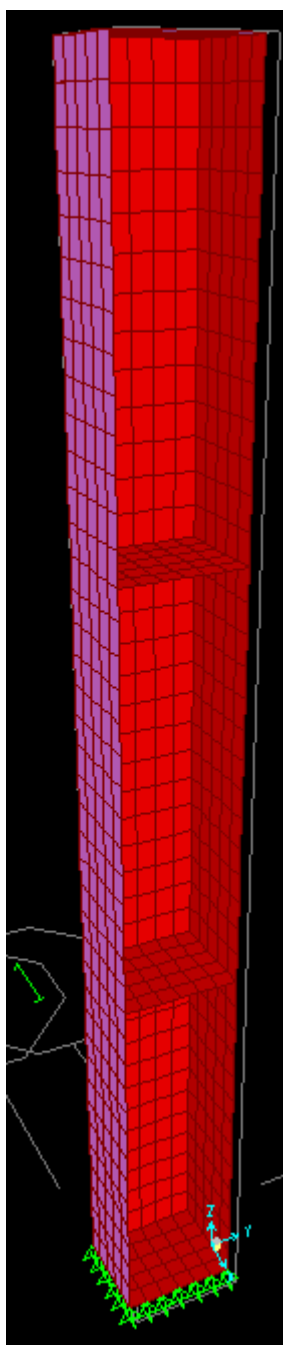


Figura 44. Columna con rigidizadores

En la Figura 45 se muestran las deformaciones de la columna con rigidizadores.

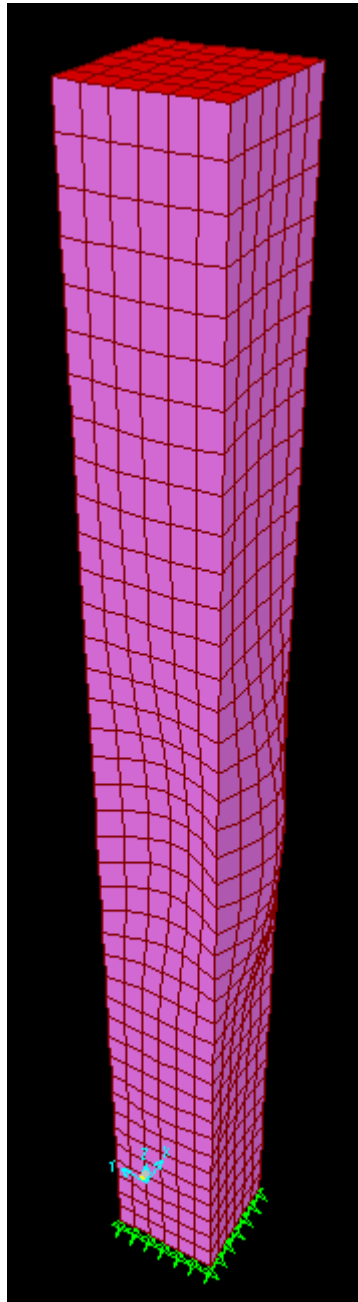


Figura 45. Deformaciones columna con rigidizadores

En la figura 45, se observa un modo de pandeo 3. En el modelo de columna con rigidizadores se producen menores deformaciones locales y se observan mejor las globales.

Se aplicó además una carga lateral unitaria distribuida en el número de nodos presentes en el borde de la tapa superior de la columna, los cuales son siete (7) como se muestra en la Figura 46, para determinar el desplazamiento lateral de la columna.

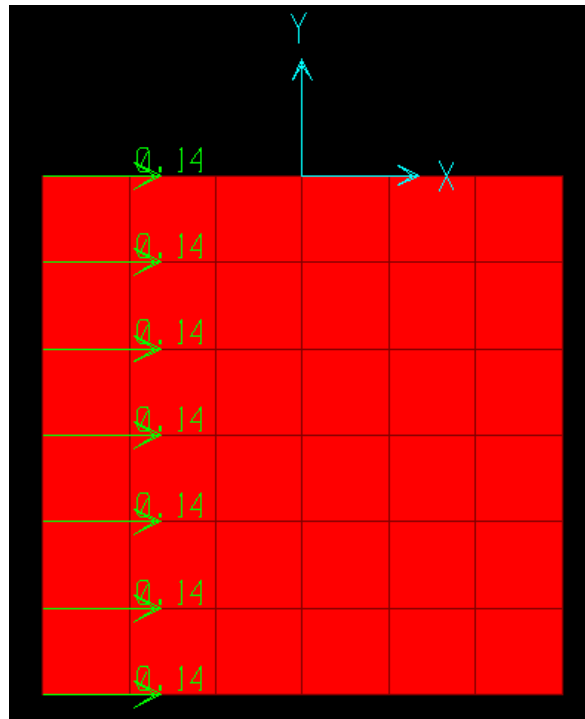


Figura 46. Nodos de aplicación de carga lateral unitaria (Tapa superior)

5.1.4 Determinación del espesor más adecuado para la fabricación de vigas

Para determinar el espesor más adecuado de las láminas con las que se fabricaron las vigas se tuvieron en cuenta los siguientes criterios: esfuerzos máximos generados, a flexión y cortante y deflexiones máximas.

Los esfuerzos máximos se hallaron respecto a la carga última aplicada y se graficaron contra el espesor de las láminas. Las deflexiones máximas se hallaron respecto a la misma carga y se generó la misma gráfica.

A las gráficas mencionadas anteriormente se les adicionó la gráfica del precio de las láminas contra su espesor. Para la congruencia de los ejes verticales de las gráficas, se hizo una normalización de los datos; ésta es solo una aproximación para la determinación del espesor más adecuado para la fabricación de las vigas. El punto de intersección de cada una de las gráficas proyectado en el eje x, sugiere un espesor de lámina. De los criterios tenidos en cuenta se elegirá el que sugiera el espesor más crítico, es decir el mayor.

5.1.4.1 Esfuerzos máximos en vigas

- Flexión

Para cada una de las vigas se determinó el esfuerzo máximo a flexión (positivo o negativo). Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 21.

Tabla 21. Esfuerzos máximos a flexión de las vigas

Espesor lámina (mm)	σ Flexión máx. (N/mm²)
4	19.66
6	19.45
9	18.24
12	18.15
15	17.29
20	15.76

- Cortante

De la misma manera se tomó la lectura del esfuerzo máximo a cortante (positivo o negativo) en cada una de las vigas, obteniendo los resultados que se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 22. Esfuerzos de cortante máximos vigas

Espesor lámina (mm)	σ Cortante máx. (N/mm²)
4	0.12
6	0.25
9	0.25
12	0.176
15	0.245
20	0.799

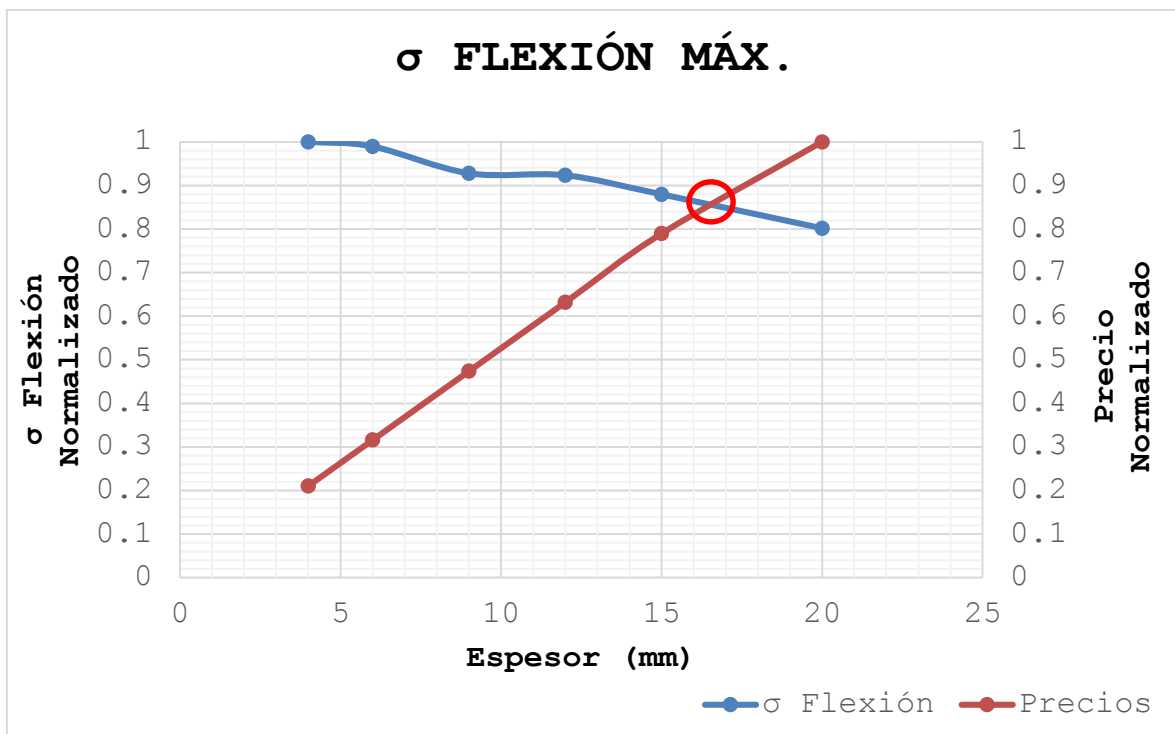
Los diagramas obtenidos de SAP-2000 en donde se hizo la lectura de los esfuerzos mostrados anteriormente, flexión y cortante, en las Tablas 21 Y 22 se encuentran en los anexos en el numeral 10.1.

Teniendo en cuenta los precios de cada una de las láminas (Tabla 23) junto con los resultados descritos anteriormente (Tablas 21 y 22) se obtienen las Gráficas 1 y 2.

Tabla 23. Precios de láminas

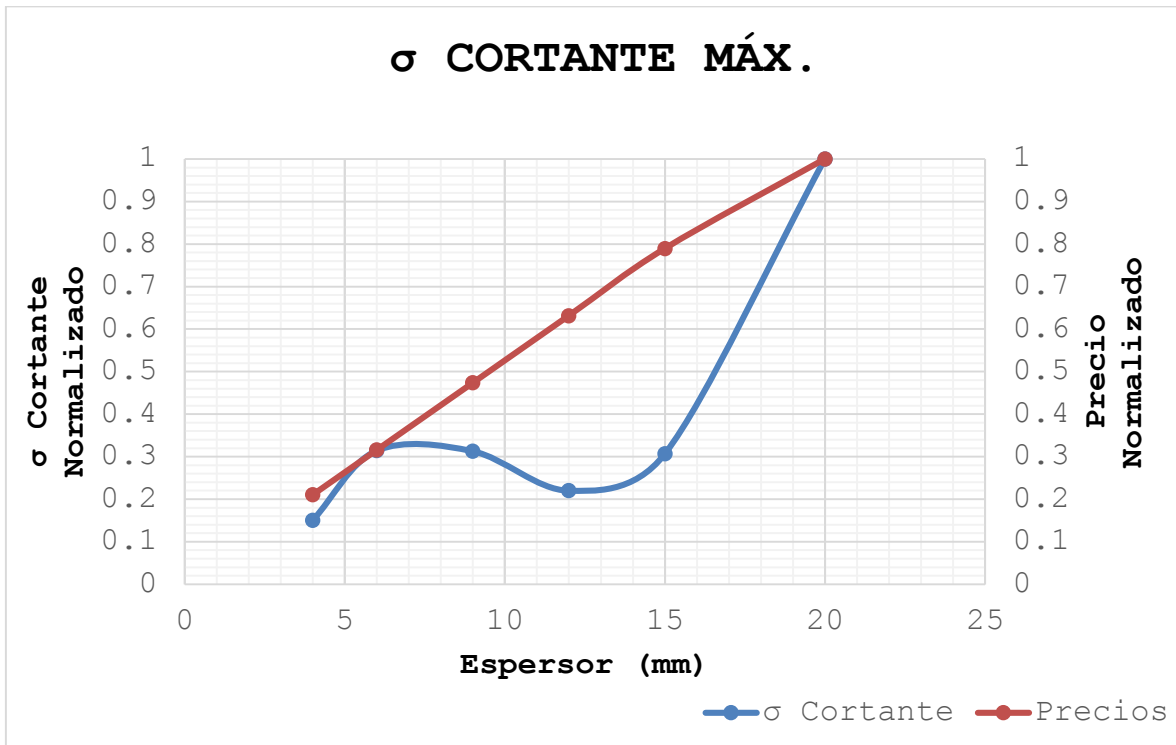
Espesor lámina (mm)	Precio (\$)
4	\$ 50,112
6	\$ 75,168
9	\$ 112,752
12	\$ 150,336
15	\$ 187,920
20	\$ 238,032

Gráfica 1. Esfuerzo máximo de flexión actuante y precio de las láminas vs. Espesor en vigas



Esta gráfica sugiere que el espesor más adecuado para la fabricación de las vigas es de 16.5mm. Aproximando este valor al espesor comercial más cercano, se utilizaría la lámina de 15mm.

Gráfica 2. Esfuerzo cortante máximo y precio de las láminas vs. Espesor en vigas



En la Gráfica 2 se observa que cuando el espesor se hace muy grande el cortante aumenta debido al peso propio del elemento. Sin embargo, si se hace más pequeño, el espesor no es suficiente y el cortante también aumenta. Entre estos dos puntos existe un espesor que controla el cortante tanto por la capacidad de la sección del material como por el peso propio que no es tan alto. En esta gráfica se evidencia que no existe intersección entre el esfuerzo cortante monitoreado y la variación del precio por espesor. Debido a esto se observa que los esfuerzos a cortante no son determinadores del espesor más adecuado para la fabricación de las vigas.

5.1.4.2 Deflexión máxima en vigas

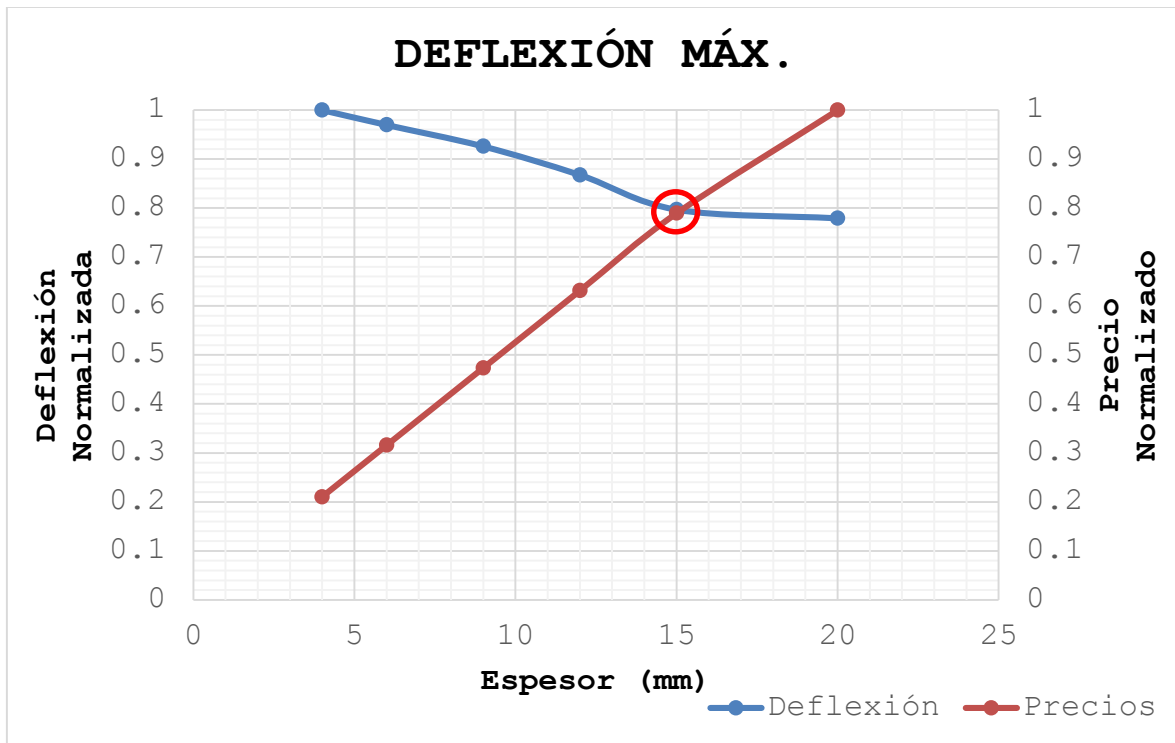
Las deflexiones máximas producidas por la carga última se muestran en la Tabla 24.

Tabla 24. Deflexiones máximas

Espesor lámina (mm)	Deflexión máx. (mm)
4	58.47
6	56.70
9	54.14
12	50.73
15	46.59
20	45.56

Con los datos de la Tabla 23 (Precios) y la Tabla 24 se genera la siguiente gráfica:

Gráfica 3. Deflexión máxima y precio de las láminas vs. Espesor



De acuerdo con la gráfica anterior el espesor de lámina más adecuado según las deflexiones máximas es de aproximadamente 15mm. Teniendo en cuenta los criterios de escogencia se eligió el espesor comercial más cercano al valor más crítico encontrado que es de 15mm para la fabricación de las vigas.

5.1.5 Determinación del espesor más adecuado para la fabricación de columnas

Para la determinación del espesor más adecuado de las láminas con las que se fabricaron las columnas se tuvieron en cuenta los siguientes criterios: esfuerzos máximos generados a flexión y cortante, acortamientos máximos y desplazamiento lateral.

Los esfuerzos máximos y los acortamientos se hallaron respecto a la carga crítica aplicada y se graficaron contra el espesor de las láminas. El desplazamiento lateral se determinó respecto a una carga lateral unitaria y de igual manera se graficó contra el espesor de las láminas.

A las gráficas mencionadas anteriormente se les adicionó la curva de precios. Para la congruencia de los ejes verticales de las gráficas se hizo una normalización de los datos; ésta es solo una aproximación para la determinación del espesor más adecuado para la fabricación de las columnas. El punto de intersección de cada curva proyectado en el eje x,

sugiere un espesor de lámina. De los criterios tenidos en cuenta se elegirá el que sugiera el espesor más crítico, es decir el mayor.

5.1.5.1 Esfuerzos máximos en columnas

- Flexión

Se determinó el esfuerzo máximo a flexión generado en cada una de las columnas. En la Tabla 25 se sintetizan los resultados obtenidos:

Tabla 25. Esfuerzos de flexión máximos columnas

Espesor lámina (mm)	σ Flexión máx. (N/mm²)
4	24.71
6	24.58
9	24.23
12	23.7
15	23.04
20	21.20

- Cortante

A continuación se muestran los esfuerzos máximos a cortante (positivos y negativos) generados en cada una de las columnas, Tabla 26.

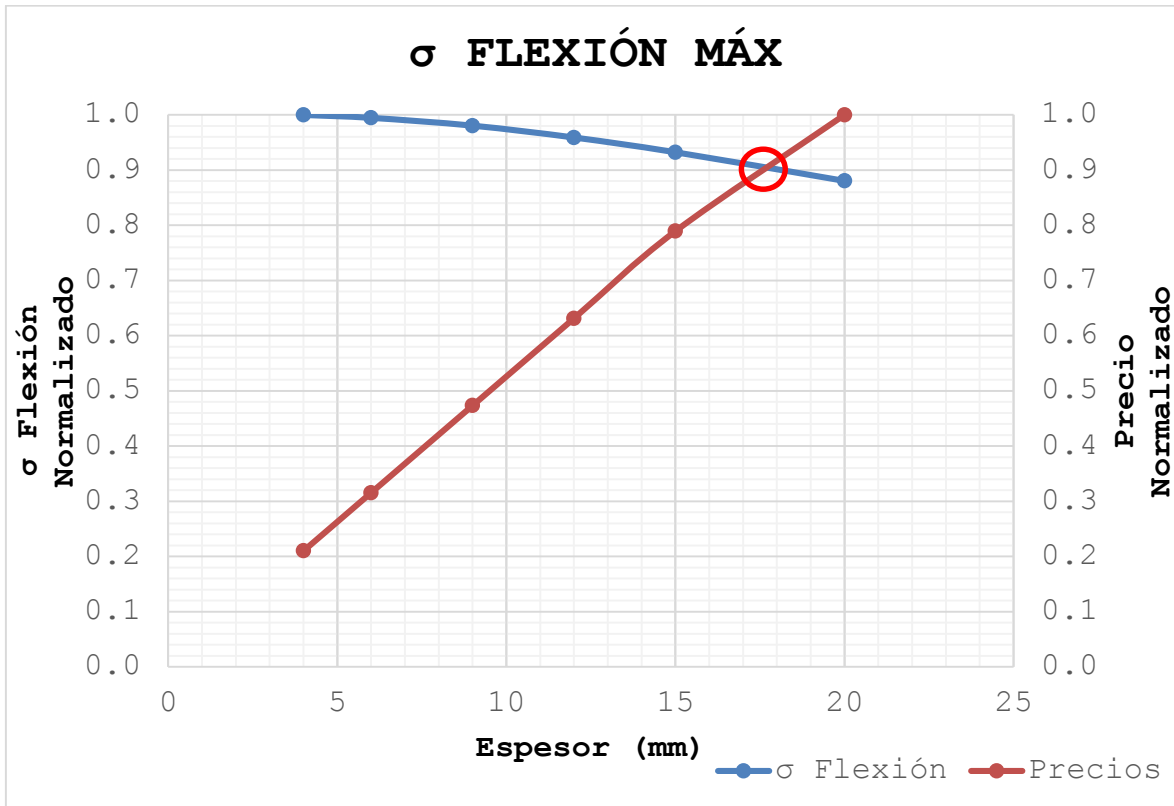
Tabla 26. Esfuerzos cortantes máximos en columnas

Espesor lámina (mm)	σ Cortante máx. (N/mm²)
4	0.098
6	0.106
9	0.185
12	0.303
15	0.432
20	0.654

Los diagramas obtenidos del programa SAP-2000 en donde se hizo la lectura de los esfuerzos mostrados anteriormente, flexión y cortante, en las Tablas 25 y 26 se encuentran en los anexos en el numeral 10.2.

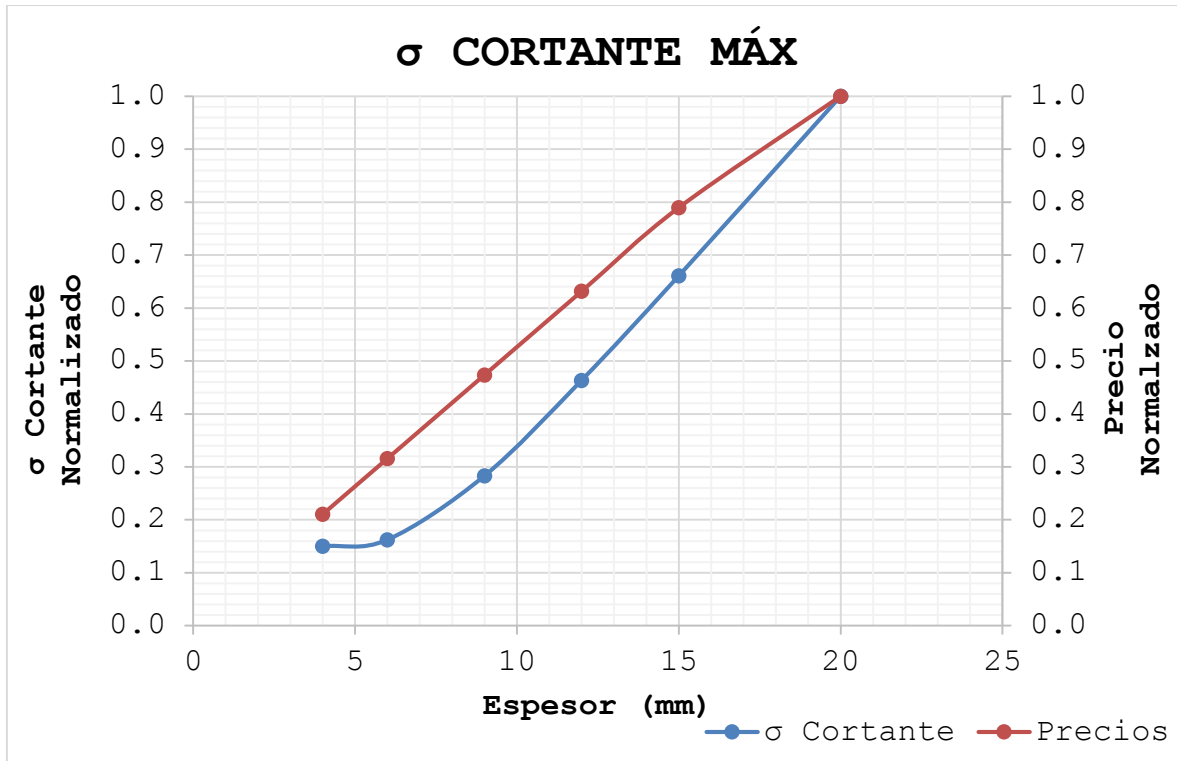
De acuerdo a los resultados mostrados en las Tablas 25 y 26, junto con los precios de cada una de las láminas, Tabla 23, se obtienen las Gráficas 4 y 5, de esfuerzos a flexión y cortante máximo, respectivamente.

Gráfica 4. Esfuerzo máximo a flexión actuante y precio de las láminas vs. Espesor en columnas



La gráfica anterior sugiere un espesor de lámina de 17.4 mm aproximadamente para la fabricación de las columnas.

Gráfica 5. Esfuerzo máximo cortante y precio de las láminas vs. Espesor en columnas



Al igual que con los esfuerzos a cortante de las vigas, la gráfica anterior muestra que no existe intersección entre el esfuerzo cortante monitoreado y la variación del precio por espesor. Debido a esto se observa que los esfuerzos a cortante no son determinadores del espesor más adecuado para la fabricación de las columnas.

5.1.5.2 Acortamiento máximo en columnas

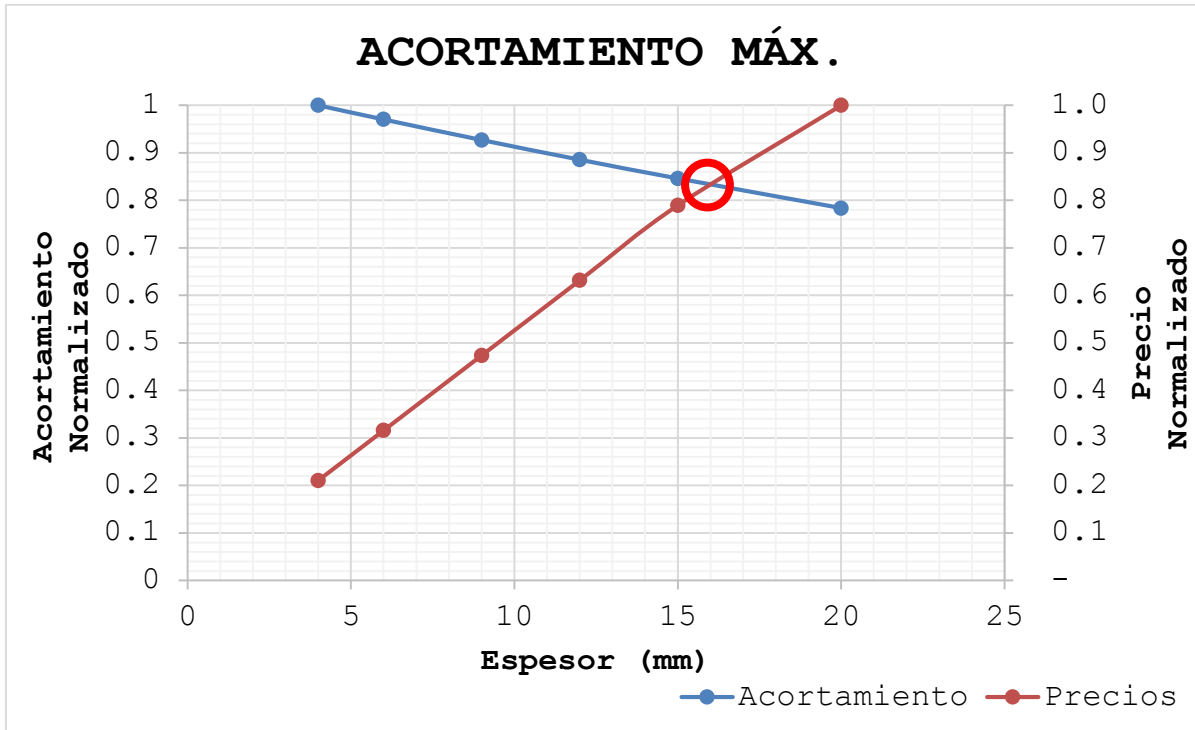
Los acortamientos máximos obtenidos en cada una de las columnas debido a la carga crítica aplicada se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 27. Acortamiento máximo de las columnas

Espesor lámina (mm)	Acortamiento (mm)
4	30.88
6	29.96
9	28.62
12	27.34
15	26.12
20	24.19

Con la información presentada anteriormente junto con los precios de cada una de las láminas (Tabla 23), se genera la Gráfica 6.

Gráfica 6. Acortamiento columnas y precio vs. Espesor de las láminas



La gráfica anterior sugiere un espesor de lámina de 16mm para la construcción de las columnas.

5.1.5.3 Desplazamiento lateral de las columnas

El desplazamiento lateral se determinó de acuerdo a la deformación generada en cada uno de los nodos laterales de la tapa superior de la columna. Esta deformación es la producida en el eje x. La numeración de estos se muestra en la Figura 47.

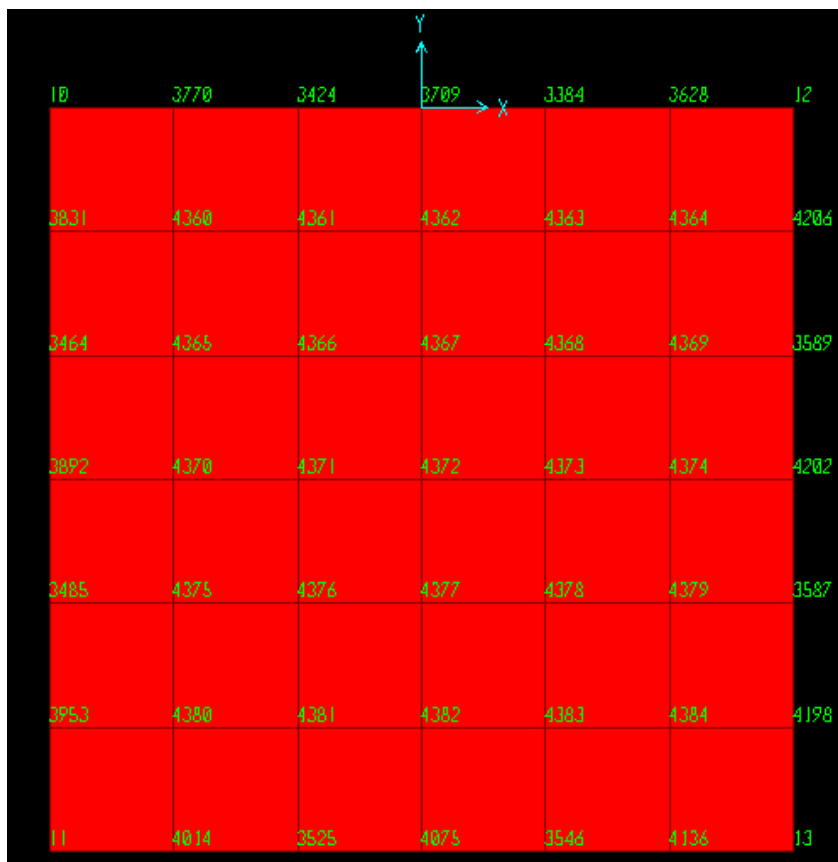


Figura 47. Nodos tapa superior columna

En las siguientes seis (6) tablas se muestran los resultados obtenidos para el desplazamiento lateral de cada una de las columnas.

Tabla 28. Desplazamiento lateral de columna con lámina de 4mm

Columna lámina 4mm		
NODOS	JOINT	DESPLAZAMIENTO
1	10	0.086045
2	3831	0.086089
3	3464	0.086114
4	3892	0.086122
5	3485	0.086114
6	3953	0.086089
7	11	0.086045

Tabla 29. Desplazamiento lateral de columna con lámina de 6mm

Columna lámina 6mm		
NODOS	JOINT	DESPLAZAMIENTO
1	10	0.057352
2	3831	0.057380
3	3464	0.057397
4	3892	0.057402
5	3485	0.057397
6	3953	0.057380
7	11	0.057352

Tabla 30. Desplazamiento lateral de columna con lámina de 9mm

Columna lámina 9mm		
NODOS	JOINT	DESPLAZAMIENTO
1	10	0.038217
2	3831	0.038236
3	3464	0.038247
4	3892	0.038251
5	3485	0.038247
6	3953	0.038236
7	11	0.038217

Tabla 31. Desplazamiento lateral de columna con lámina de 12mm

Columna lámina 12mm		
NODOS	JOINT	DESPLAZAMIENTO
1	10	0.028646
2	3831	0.028659
3	3464	0.028668
4	3892	0.028670
5	3485	0.028668
6	3953	0.028659
7	11	0.028646

Tabla 32. Desplazamiento lateral de columna con lámina de 15mm

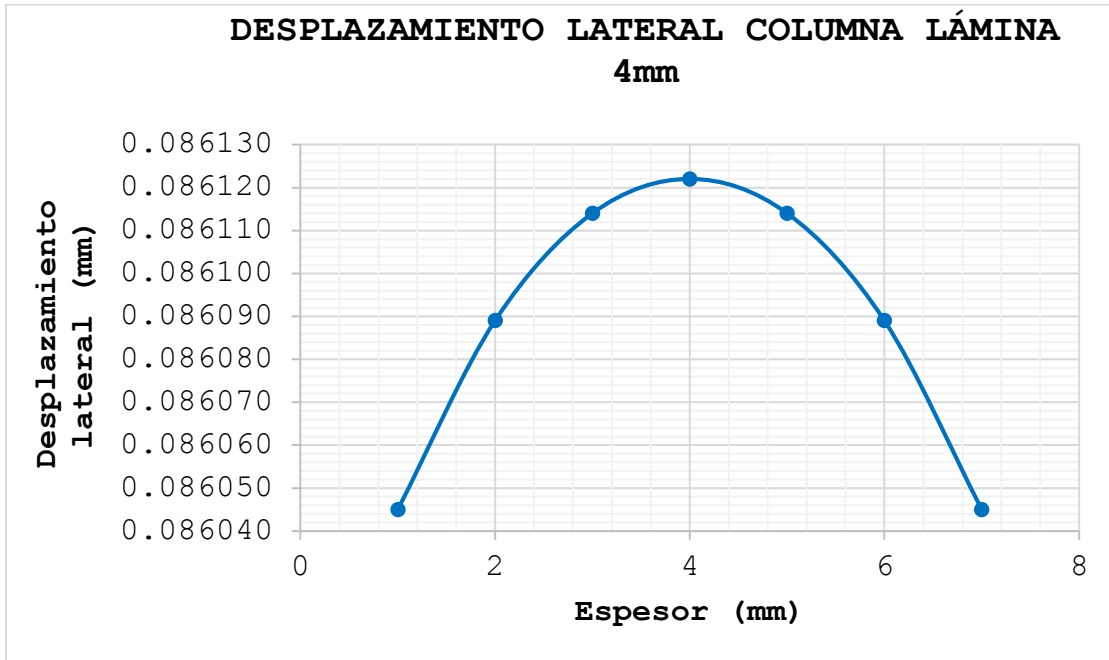
Columna lámina 15mm		
NODOS	JOINT	DESPLAZAMIENTO
1	10	0.022900
2	3831	0.022910
3	3464	0.022917
4	3892	0.022919
5	3485	0.022917
6	3953	0.022910
7	11	0.022900

Tabla 33. Desplazamiento lateral de columna con lámina de 20mm

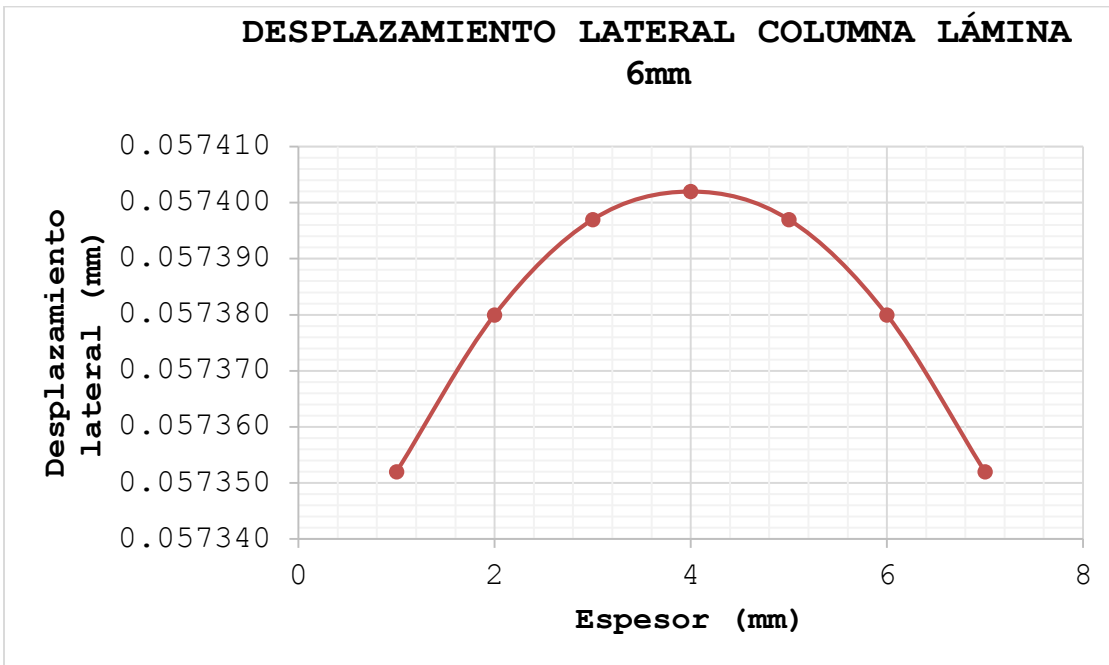
Columna lámina 20mm		
NODOS	JOINT	DESPLAZAMIENTO
1	10	0.017149
2	3831	0.017156
3	3464	0.017161
4	3892	0.017162
5	3485	0.017161
6	3953	0.017156
7	11	0.017149

La información presentada en las tablas anteriores se visualiza en las siguientes seis (6) gráficas:

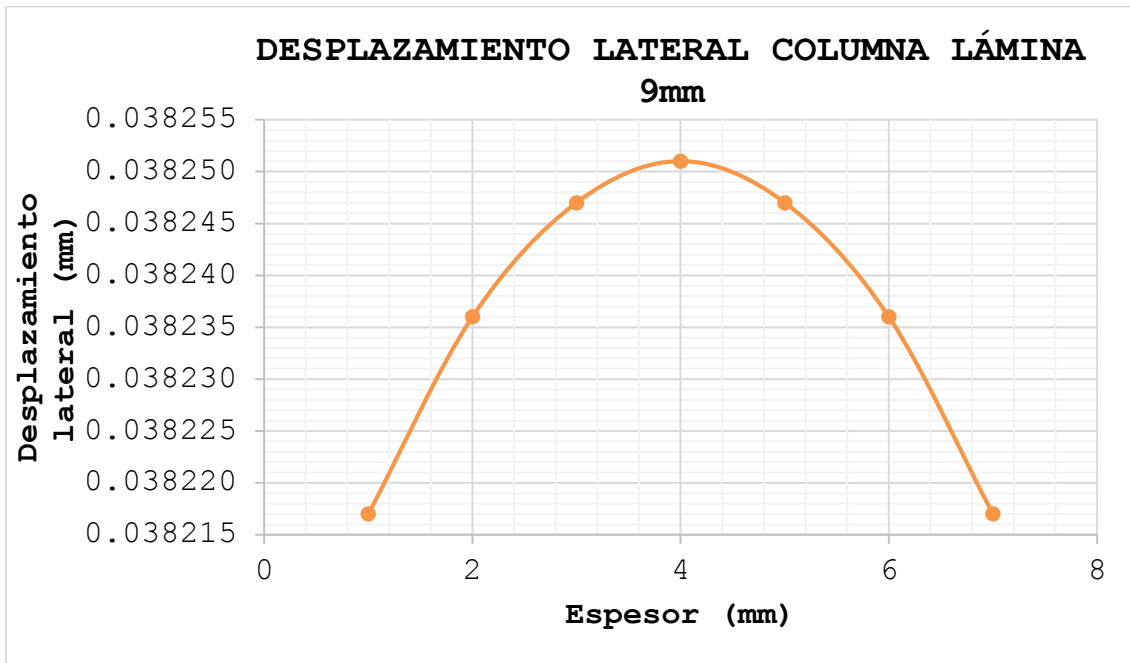
Gráfica 7. Desplazamiento lateral de la columna de lámina de 4mm



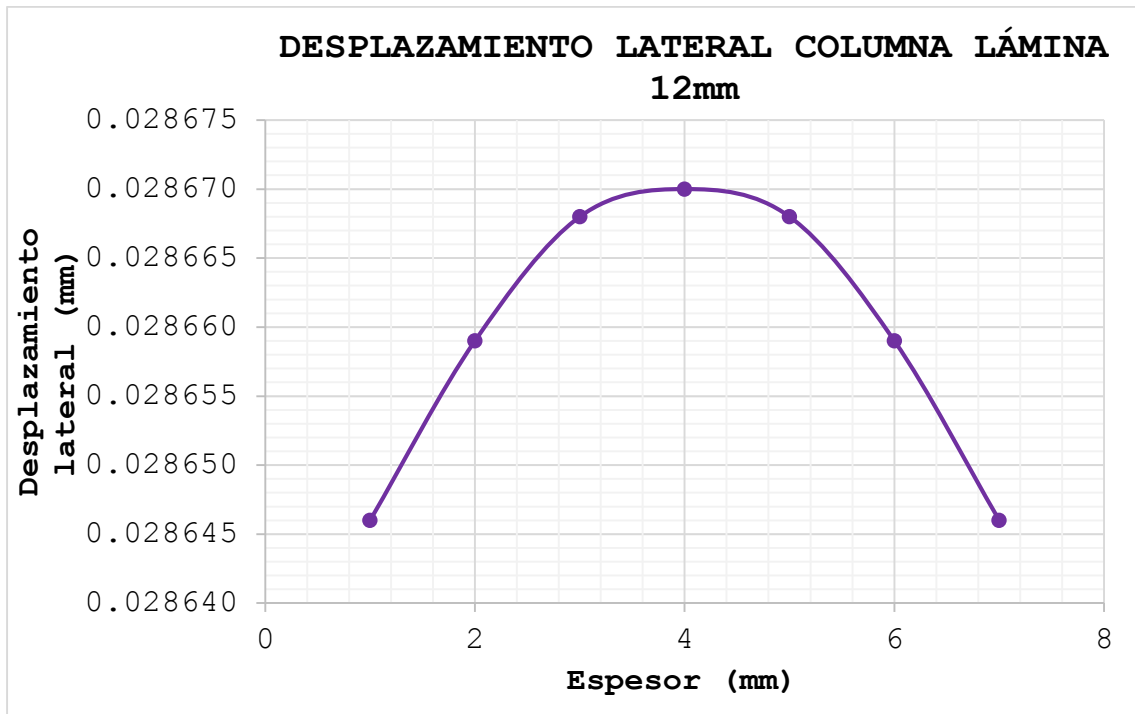
Gráfica 8. Desplazamiento lateral de la columna de lámina de 6mm



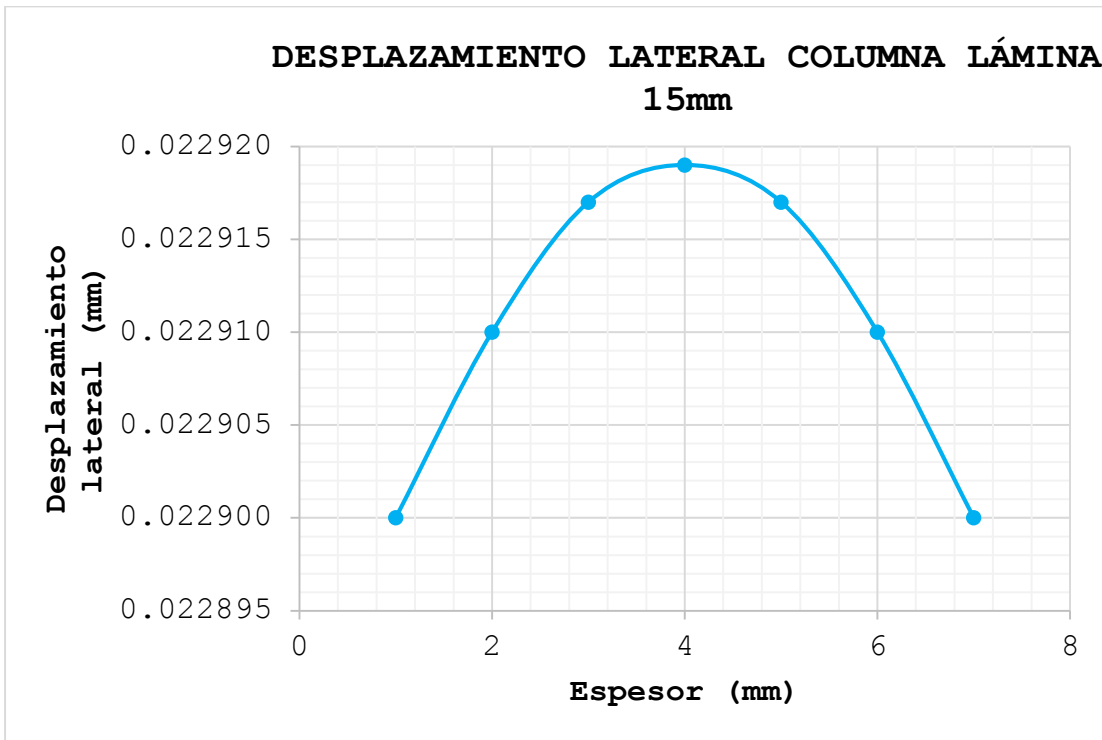
Gráfica 9. Desplazamiento lateral de la columna de lámina de 9mm



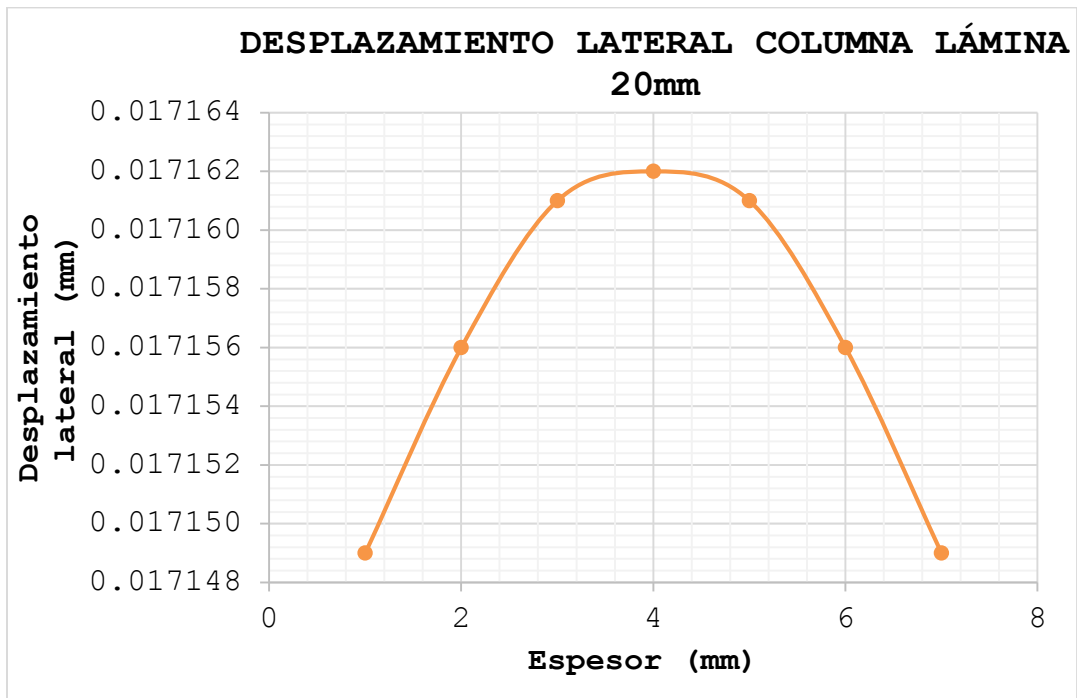
Gráfica 10. Desplazamiento lateral de la columna de lámina de 12mm



Gráfica 11. Desplazamiento lateral de la columna de lámina de 15mm



Gráfica 12. Desplazamiento lateral de la columna de lámina de 20mm



Como es evidente, según las gráficas mostradas anteriormente, la deformación generada en los nodos de aplicación de carga lateral unitaria no es uniforme, esto debido a que no es una columna maciza si no hueca. Esta gráfica da cuenta de que la deformación lateral tiene zonas de rigidez preferencial, siendo mayor en las esquinas y menor en el centro.

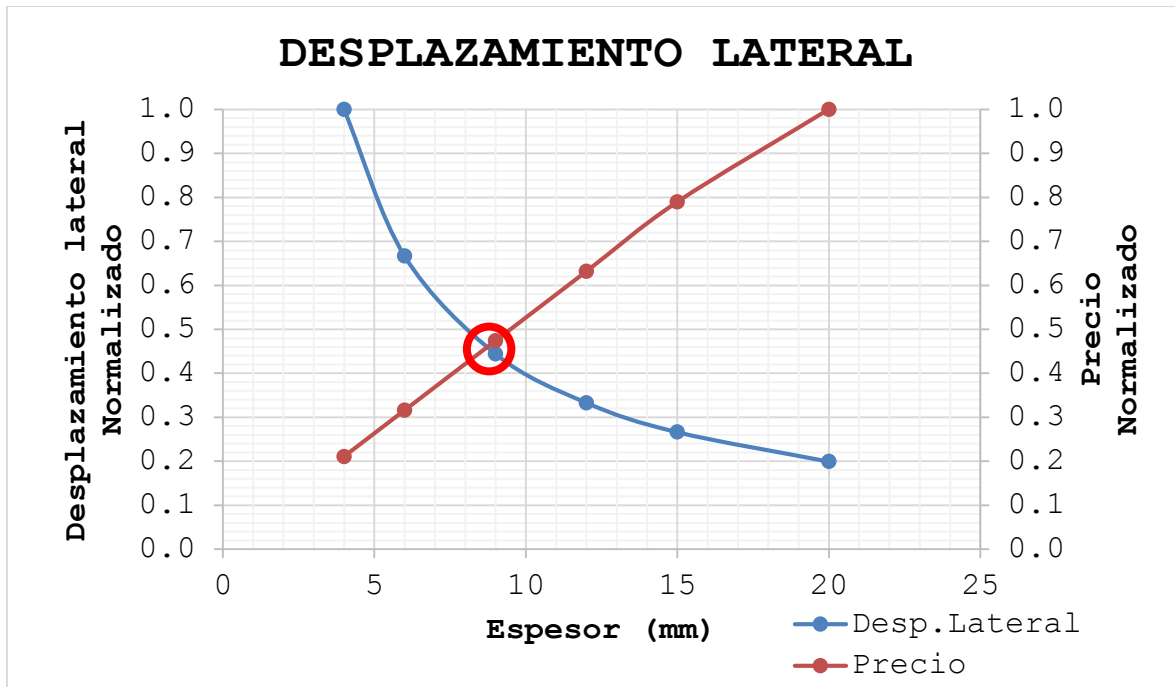
Los desplazamientos laterales máximos de cada columna se resumen en la Tabla 34.

Tabla 34. Desplazamiento lateral de las columnas

Espesor lámina (mm)	Desplazamiento Lateral (mm)
4	8.61E-02
6	5.74E-02
9	3.83E-02
12	2.87E-02
15	2.29E-02
20	1.72E-02

Con la Tabla 34 y el precio de las láminas (Tabla 23) se generó la siguiente gráfica:

Gráfica 13. Desplazamiento lateral de las columnas y precio vs. Espesor de las láminas



La Gráfica 13, de desplazamiento lateral sugiere un valor de 8.8mm aproximadamente de espesor de lámina.

Teniendo en cuenta los criterios para la escogencia del espesor más adecuado para la fabricación de las columnas, se eligió el valor comercial más cercano al crítico, sugerido por la Gráfica 4 de esfuerzos de flexión máximos, que es de 15mm.

5.1.6 Determinación de la cantidad de refuerzo a cortante para vigas y columnas

- **Vigas**

Para el refuerzo a cortante de las vigas se utilizaron tornillos negros para aglomerado de 1 ½" de longitud con cabeza de 8mm. Para determinar la cantidad de tornillos a utilizar para la fabricación de las vigas se hizo necesario conocer el cortante máximo generado por la carga última aplicada. Para esto se tuvieron en cuenta las siguientes ecuaciones:

Área Total tornillos

$$\text{ÁreaTotal}_{\text{tornillos}} = \frac{V_{\text{máx}}}{F_{\text{adm}}} \quad \text{Ec. 10}$$

Donde,

Área tornillos: área total de los tornillos que serán usados en la fabricación de las vigas (mm²)

V_{máx}: cortante máximo generado por la carga última aplicada (N)

F_{adm}: 60% del esfuerzo máximo del Ecoplak (N/mm²). Este porcentaje es un valor asumido.

Número tornillos

$$\text{No. Tornillos} = \frac{\text{ÁreaTotalTornillos}}{\text{ÁreaTornillo}} \quad \text{Ec. 11}$$

Para el resultado obtenido de la ecuación No.11 se redondea al entero mayor más cercano.

Los resultados obtenidos haciendo uso de las ecuaciones descritas anteriormente se muestran en la Tabla 35.

Tabla 35. Cantidad de refuerzo a cortante para la fabricación de vigas

VIGAS	
σ max Ecoplak(N/mm ²)	20
Fadm (N/mm ²)	12
Cortante máx. (N/mm)	22.95
Espesor lámina (mm)	15
Cortante máx. (N)	344.27
Área Total Tornillos (mm ²)	28.69
Diám. Tornillos (mm)	2
Área Tornillo (mm ²)	3.14
Número Tornillos	9.13
Número Tornillos final	10
Longitud viga (mm)	2000
Separación entre Tornillos (mm)	181.82
Separación final (mm)	182

De acuerdo con los datos de la tabla anterior se realizaron los planos de las vigas con su refuerzo correspondiente como se ilustra en las Figuras 48, 49, 50, 51 y 52. En cada una de estas se especifica el número de piezas utilizadas para la fabricación de una (1) viga. Las dimensiones mostradas se encuentran en mm.

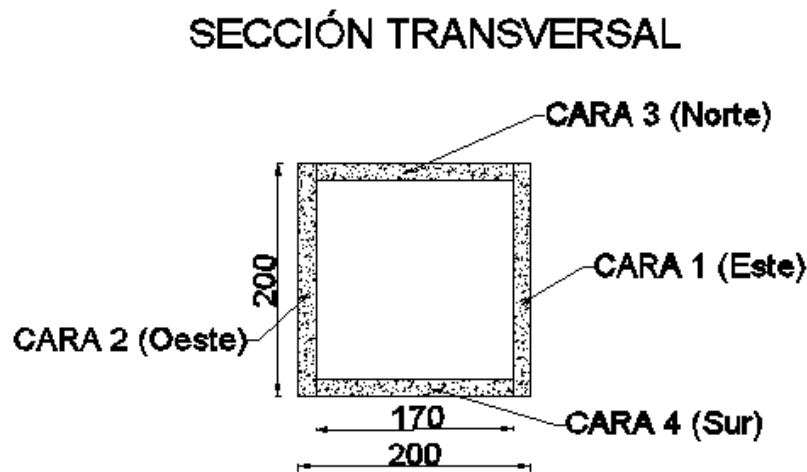


Figura 48. Sección transversal vigas

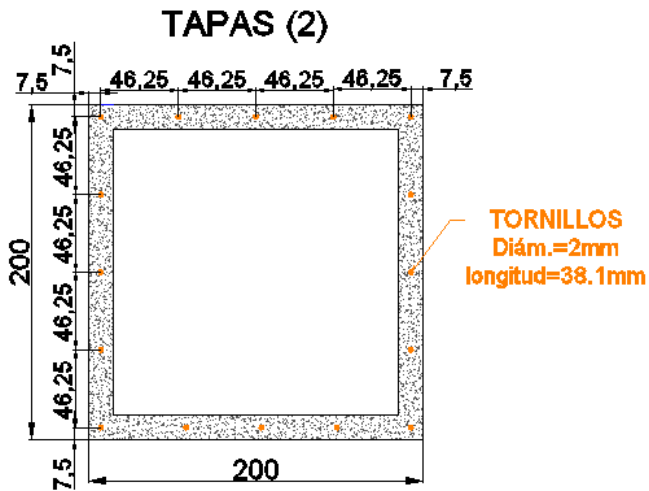


Figura 49. Plano tapas vigas

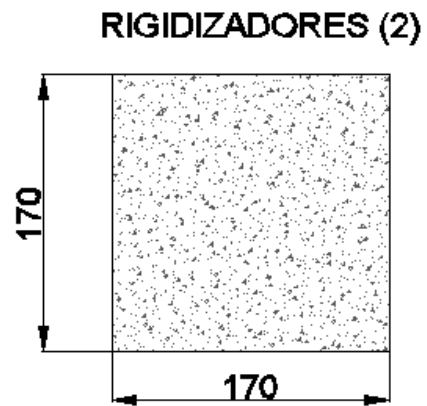


Figura 50. Rigidizadores

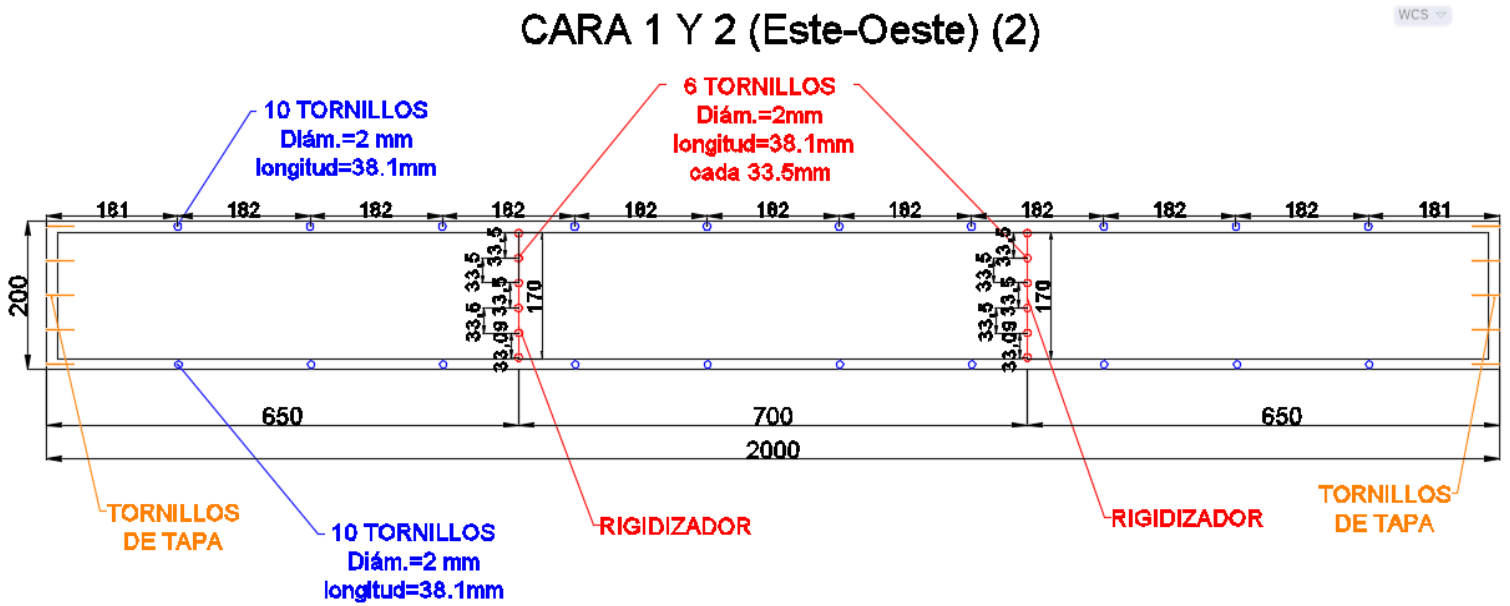


Figura 51. Plano caras Este-Oeste vigas

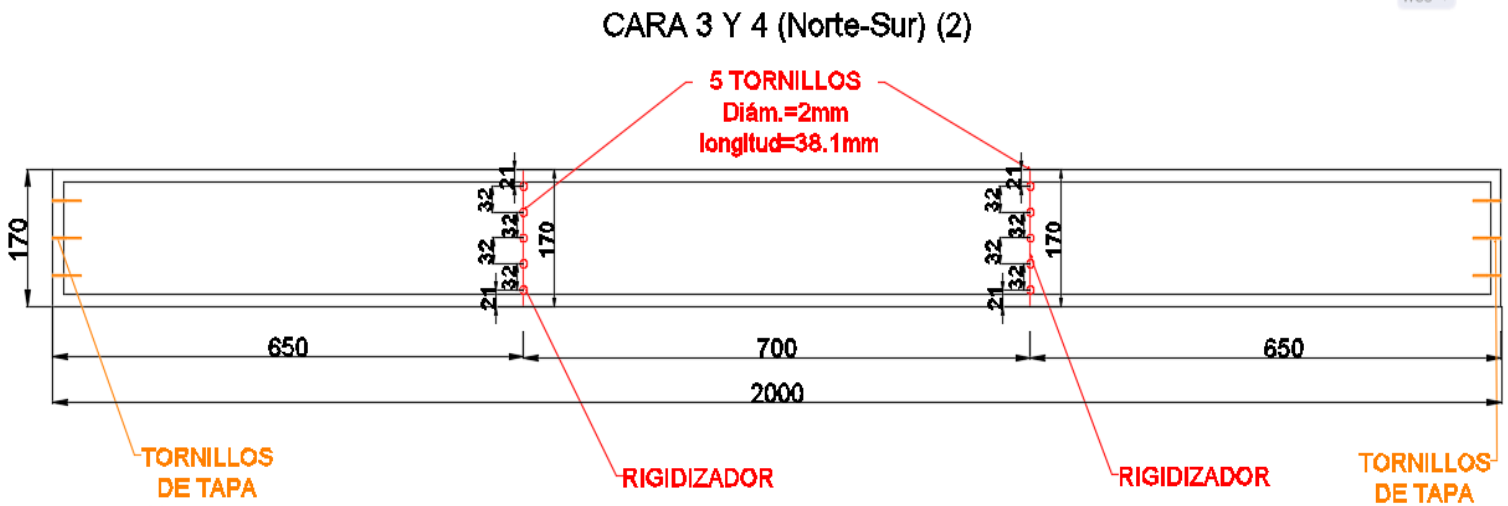


Figura 52. Plano caras Norte-Sur vigas

- **Columnas**

Al igual que para las vigas se utilizaron tornillos negros para aglomerado de 1 ½" de longitud con cabeza de 8mm para la fabricación de las columnas. Además de determinar el cortante máximo se tuvo en cuenta la carga axial máxima generada por la aplicación de la carga crítica. La carga final tenida en cuenta para la determinación del área total de tornillos se halló de acuerdo a la ecuación 12.

$$CargaFinal (N) = 0.2CargaAxial + CortanteMáximo \quad Ec. 12$$

El área total de refuerzo se determinó según la siguiente ecuación:

$$ÁreaTotalTornillos (mm^2) = \frac{CargaFinal (N)}{F_{adm} \left(\frac{N}{mm^2} \right)} \quad Ec. 13$$

El número de tornillos se determinó según la ecuación 11, redondeando este valor al siguiente mayor entero.

De acuerdo a lo anterior se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 36.

Tabla 36. Cantidad de refuerzo a cortante para la fabricación de columnas

COLUMNAS	
σ máx(N/mm ²)	20
Fadm (N/mm ²)	12
Cortante máx. (N/mm)	8.94
Carga axial máx (N/mm)	104.56
Espesor (mm)	15
Cortante máx. (N)	134.10
Carga axial máx (N)	1568.4
Cortante + 0.2Carga axial (N)	447.78
ÁreaTotal Tornillos (mm ²)	37.32
Diám. Tornillo (mm)	2
Área Tornillo (mm ²)	3.14
Número Tornillos	11.88
Número Tornillos final	12
Longitud Columna (mm)	2000
Separación entre Tornillos (mm)	153.85
Separación final (mm)	154

Según los datos mostrados en la Tabla 36, se realizaron los planos para la fabricación de las columnas con su refuerzo correspondiente como se ilustra en las Figuras 53 y 54. Las dimensiones mostradas se encuentran en mm. Para este caso las Figuras 48 (sección transversal), 49 (tapas) y 50 (rigidizadores) mostradas anteriormente para las vigas, son iguales para las columnas.

CARA 1 Y 2 (Norte-Sur) (2)

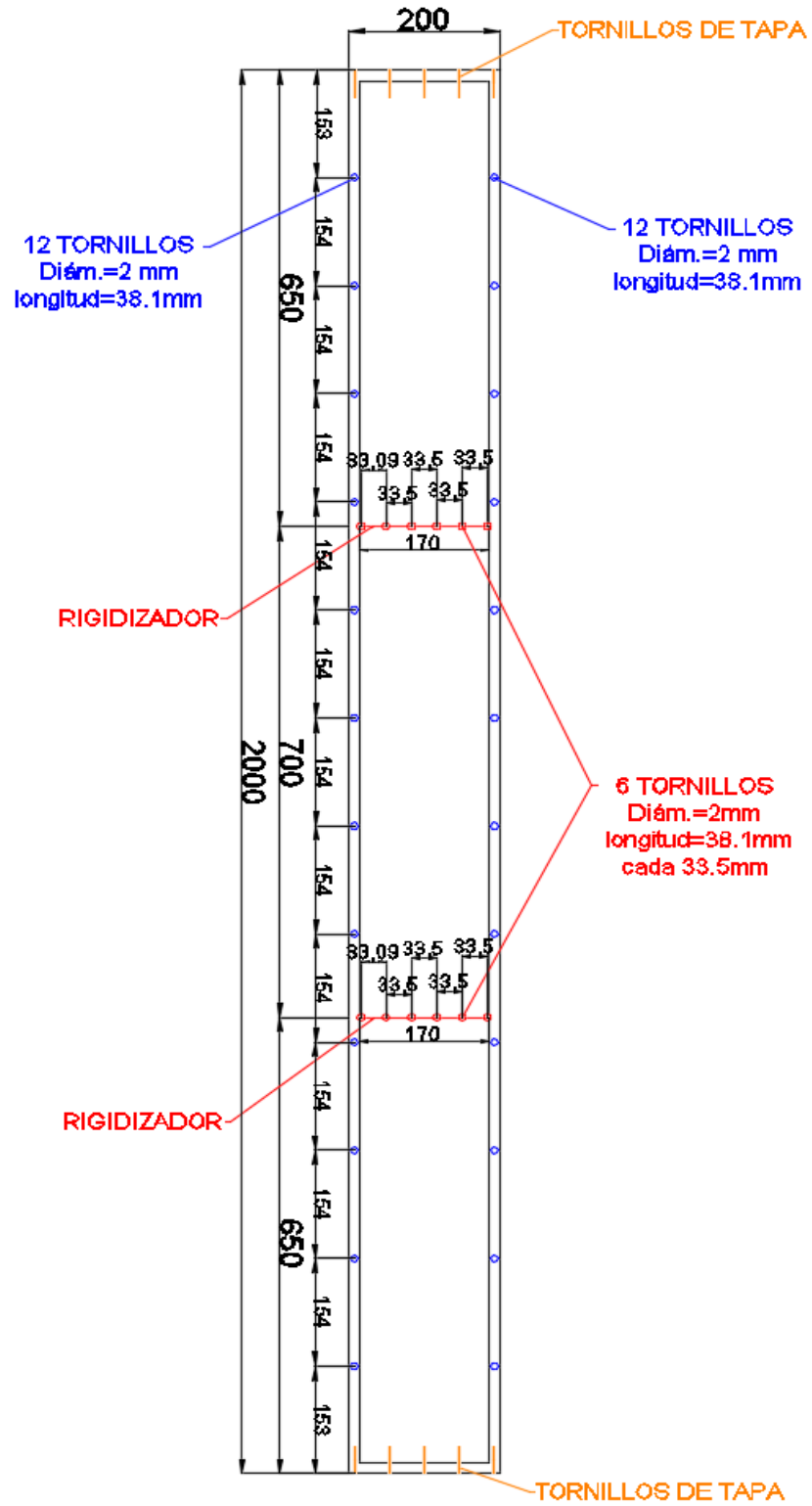


Figura 53. Plano caras Norte-Sur Columnas

CARA 3 Y 4 (Este-Oeste) (2)

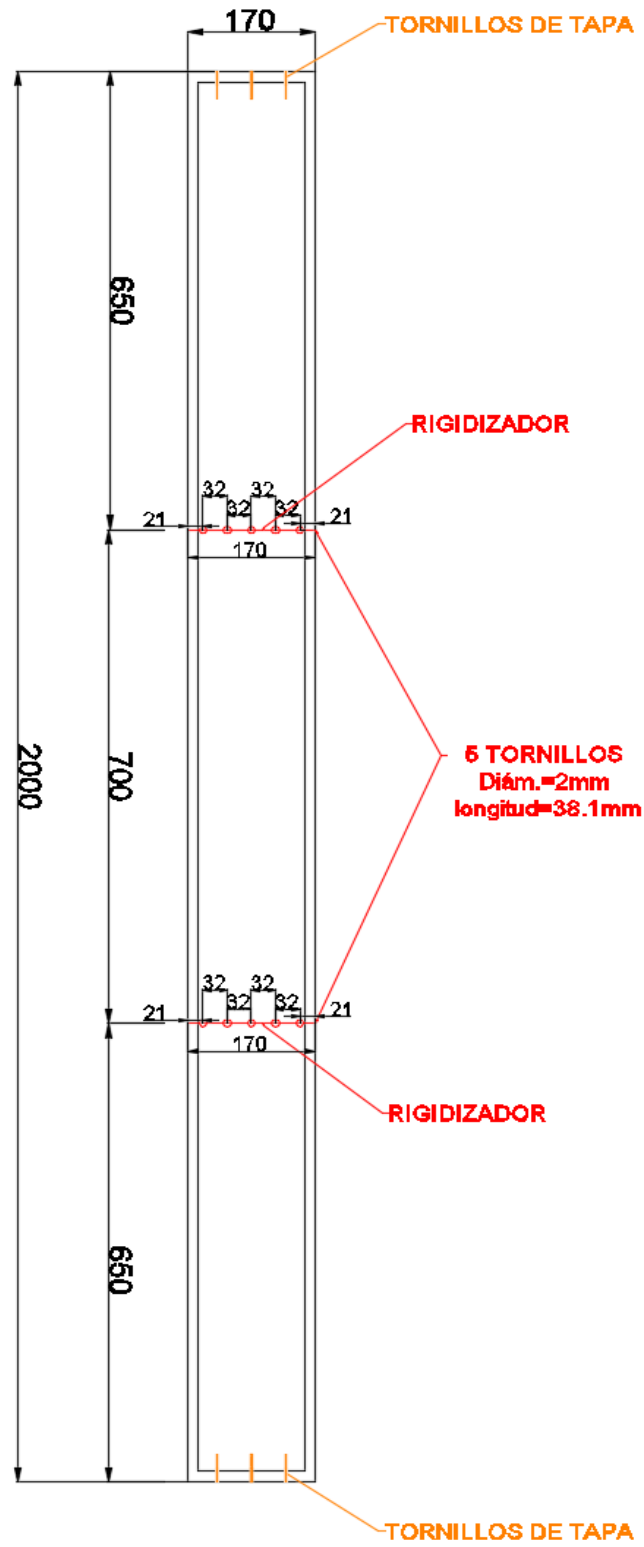


Figura 54. Plano caras Este-Oeste Columnas

Para el armado de vigas y columnas se usaron dos tipos de conexiones. El primero es el mostrado en las figuras anteriores, solo con tornillos. Para el segundo además de los tornillos se uso pegante PL285, especial para aglomerados.

5.2 DESCRIPCIÓN DEL MONTAJE

En este ítem se describe el proceso de fabricación de los elementos tipo cajón con los diferentes tipos de conexión. Posteriormente, se hace una breve descripción del equipo utilizado para la realización de los ensayos a flexión y compresión. Seguido a esto, se explica el sistema de apoyo utilizado para las vigas y columnas.

5.2.1 Proceso de fabricación de vigas y columnas de Ecoplak

Se diseñó el modelo de las vigas en SAP 2000 y según el cortante máximo se definió la cantidad de tornillos necesaria para reforzarlas.

De la misma forma, se diseñó el modelo de las columnas en SAP 2000 y según el cortante y la carga axial máximos, se halló la cantidad de tornillos necesaria para reforzarlas.

Se decidió utilizar dos tipos de conexión:

1. Tornillos
2. Tornillos + pegante: Para reforzar las uniones

Se fabricaron 6 vigas, 3 por cada tipo de conexión. De igual manera fueron armadas 6 columnas, 3 por cada tipo de conexión.

El pegante utilizado fue PL285, el cual es un pegante de contacto a base de cloropreno, que contiene resinas y aditivos. Es muy común en la industria de los tableros aglomerados en procesos de laminación y conformado y se usa para unir diversos materiales como cuero, fórmica, caucho sintético, entre otros.

Los modelos de las vigas y columnas se fabricaron de 2m de largo por 0.2 m de ancho, con una sección transversal cuadrada. Se decidió utilizar rigidizadores en los tercios medios para disminuir las deformaciones locales generadas por las cargas aplicadas.

1. Cortado: Las láminas se cortan en las secciones correspondientes. No se puede utilizar un disco cortador de madera convencional ya que las partículas de aluminio dañan sus cuchillas. Debe usarse un disco cortador de aluminio.
2. Armado: Se arman los elementos manualmente insertando los tornillos y aplicando el pegante en las uniones de las correspondientes vigas y columnas. Los elementos quedan como se ilustran en la Figura 55.



Figura 55. Vigas y columnas armadas

5.2.2 Descripción del equipo

Para esta investigación se utilizó el sistema de ensayo del laboratorio de estructuras de la Universidad Javeriana, el cual consiste en un gato hidráulico MTS con capacidad de aplicar 10 Ton de fuerza. El brazo es manejado a control remoto o desde el cuarto de sistemas, variando la carga y la velocidad de aplicación. El sistema toma los datos de carga aplicada, tiempo y deformación del elemento. Dependiendo de la configuración, con este sistema se pueden realizar ensayos estáticos y dinámicos a flexión, a compresión, fatiga y simulación de sismos entre otros, para materiales, elementos estructurales y modelos de estructuras. El brazo del gato hidráulico se muestra en la Figura 56.

Measuring Testing System (MTS) es una compañía que ofrece equipos especializados de alto rendimiento para proveer soluciones de sistemas de ensayos líderes en la industria. Éstos permiten un control preciso de las fuerzas y movimientos, así como información en tiempo real que optimiza el rendimiento. MTS posee una amplia gama de productos y materiales para la evaluación de diferentes estructuras como edificios, aviones, puentes, entre otros. Ingenieros de todo el mundo la reconocen como una solución eficiente para probar sus diseños y enfrentar desafíos en sus respectivas industrias (MTS, 2004).



Figura 56. Brazo hidráulico MTS.

5.2.3 Montaje de vigas en el marco

Para el caso del ensayo a flexión se hizo un sistema de viga simplemente apoyada con aplicación de carga en los tercios medios. Una ilustración del montaje se muestra a continuación:



Figura 57. Montaje de viga simplemente apoyada

En total se realizaron seis (6) ensayos de resistencia a la flexión, para determinar la carga máxima soportada por las vigas con su deflexión asociada. Se ensayaron tres (3) vigas por cada tipo de conexión y se les asignó un código como se muestra en la Tabla 37.

Tabla 37. Ensayos a flexión

Ítem	Tipo Conexión	
	Tornillos	Tornillos + pegante
Vigas	3	3
Código	vg-01, vg-02, vg-05	vg-03P, vg-04P y vg-06P

5.2.4 Montaje de columnas en el marco

El ensayo realizado a las columnas consiste en la aplicación de una carga axial de compresión al elemento estructural, obteniendo las cargas soportadas por el mismo con su deflexión correspondiente. Para estos ensayos a compresión se hizo un sistema de apoyos de rótula deslizante en la parte superior de la columna y fija en la parte inferior. En la Figura 58 se muestra una ilustración de dicho montaje.



Figura 58. Montaje de columna con apoyos de rótula

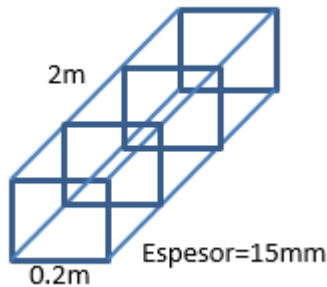
En total fueron ensayadas seis (6) columnas; tres (3) por cada tipo de conexión. La información del código asignado a las columnas se resume en la Tabla 38.

Tabla 38. Ensayos a Compresión

Ítem	Tipo Conexión	
	Tornillos	Tornillos + pegante
Columnas	3	3
Código	C-01, C-04 Y C-05	C-02P, C-03P Y C-06P

5.3 DETERMINACIÓN DE LA UNIDAD FUNCIONAL ENTRE MADERA Y ECOPLAK

Se definió como unidad funcional una viga de las armadas anteriormente con las dimensiones que se muestran en la Figura 59.



El volumen total de la viga es 0.0264 m³.

Se define la masa que corresponde a este volumen para los dos tipos de material según su densidad (ecuación 14).

$$\rho = \frac{m}{v} \quad Ec. 14$$

Figura 59. Esquema viga

Ecoplak:

Densidad= 1070 kg/m³ (Riorion, 2009)

Masa=1070 kg/m³ x 0.0264 m³ = 28.248 kg

Tablero aglomerado de madera:

Densidad= 600 kg/m³ (Riorion, 2009)

Masa=600 kg/m³ x 0.0264 m³ = 15.84 kg

Es decir que según esta unidad funcional, 28.248 kg de Ecoplak equivalen a 15.84 kg de madera.

6. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

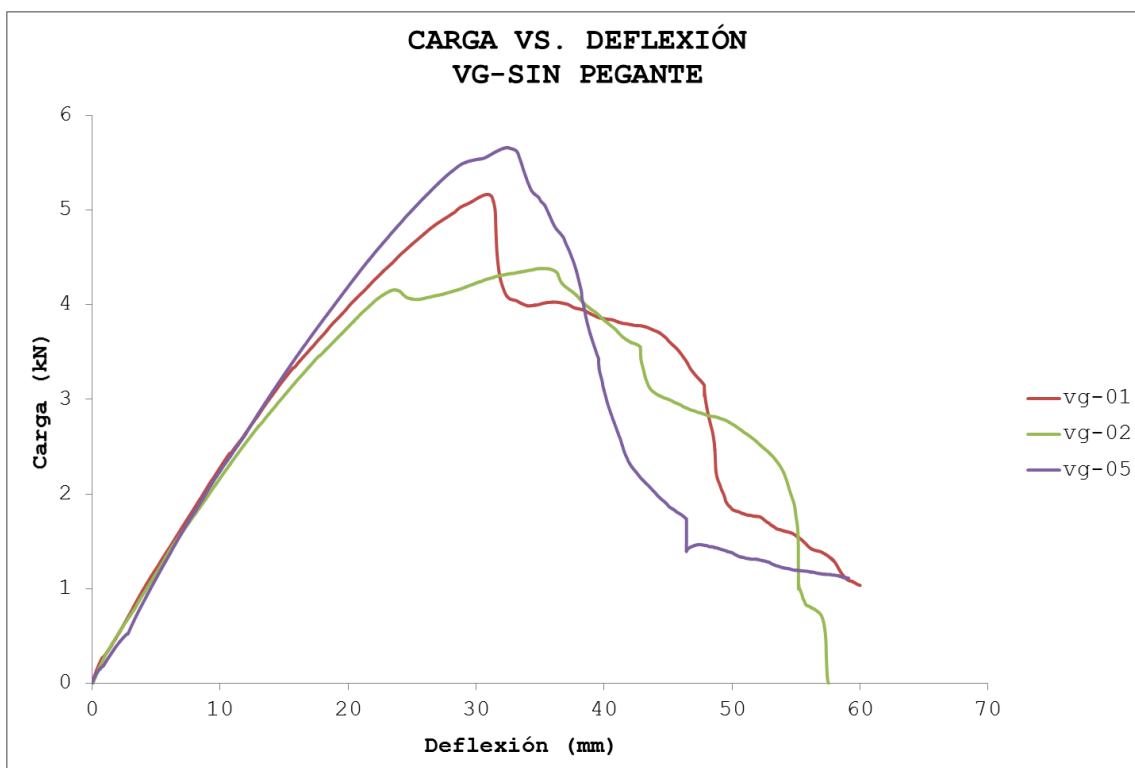
6.1 VIGAS

6.1.1 Determinación de las deflexiones y carga máximas

Se entiende por deflexión a la deformación que se genera en dirección perpendicular al eje longitudinal de un elemento estructural (Flexión mecánica, 2015).

Con la carga aplicada por la MTS se determinaron las deflexiones máximas generadas junto con la carga máxima soportada por las vigas. En la gráfica a continuación se muestran los resultados obtenidos para las vigas sin pegante.

Gráfica 14. Carga Vs. Deflexión Vigas Sin Pegante



La Gráfica 14 da cuenta de que las tres (3) vigas ensayadas con un mismo tipo de conexión presentan un comportamiento similar en el rango elástico del material, es decir su rigidez se mantiene constante. Se evidencia que en la viga vg-02 después de alcanzada su carga máxima, esta disminuye de forma paulatina. En cambio, las vigas vg-01 y vg-05 presentan una caída de carga más abrupta después de alcanzar su resistencia máxima.

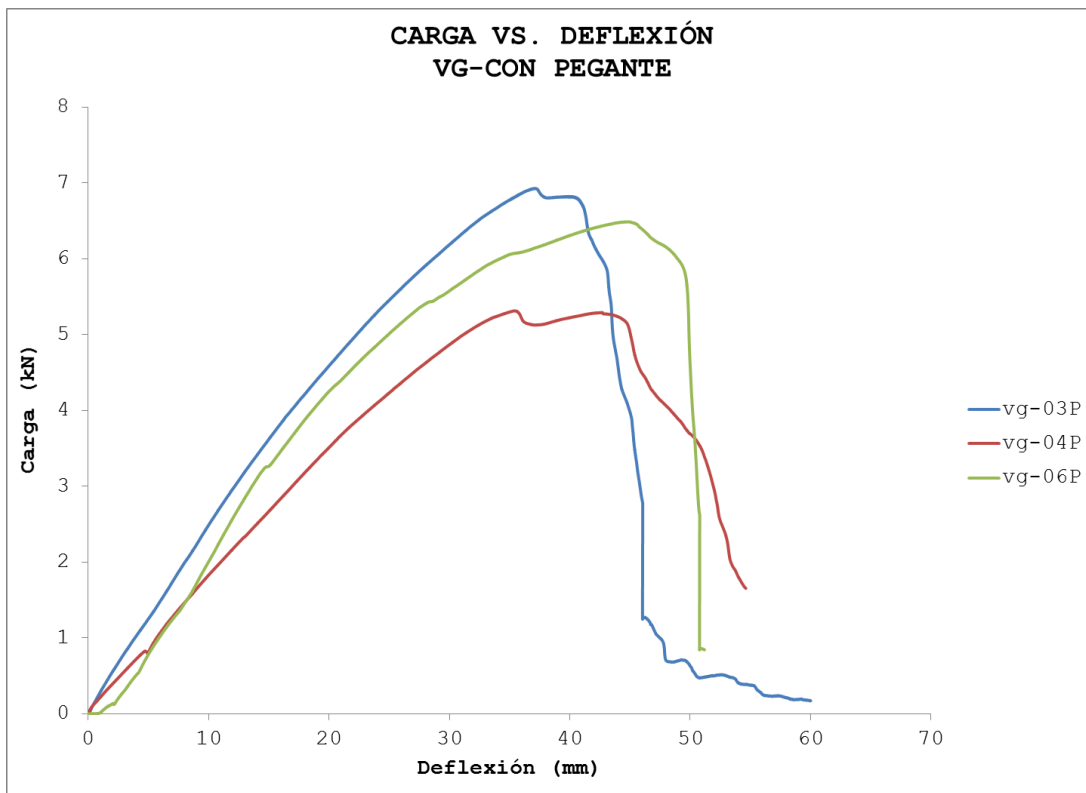
Las cargas máximas obtenidas de la Gráfica 14 junto con su deflexión correspondiente se muestran en la Tabla 39.

Tabla 39. Carga Máxima y Deflexión Vigas Sin Pegante

Vigas Sin Pegante			
No.	Carga máx. (kN)	Carga máx. (t)	Deflexión (mm)
vg-01	5.17	0.52	30.88
vg-02	4.39	0.44	35.04
vg-05	5.66	0.57	32.44
Promedio	5.07	0.51	32.78

En la Gráfica 15 se muestran los resultados obtenidos del ensayo a flexión para las vigas con pegante.

Gráfica 15. Carga Vs. Deflexión Vigas Con Pegante



En la gráfica anterior se constata que la relación lineal de la viga vg-04P difiere del comportamiento de las otras dos, presentando una menor pendiente. Esto puede deberse a fallas en el proceso de fabricación de la viga como se denota en la Figura 60.



Figura 60. Falla en el ensamble de los rigidizadores

Las cargas máximas obtenidas de la Gráfica 15 junto con su deflexión correspondiente se muestran en la Tabla 40.

Tabla 40. Carga Máxima y Deflexión Vigas Con Pegante

Vigas Con Pegante			
No.	Carga máx. (kN)	Carga máx. (t)	Deflexión (mm)
vg-03P	6.93	0.69	37.045
vg-04P	5.32	0.53	35.39
vg-06P	6.49	0.65	44.89
Promedio	6.25	0.62	39.11

En las Tablas 39 y 40 el coeficiente de variación para los datos de carga máxima es del 13% aproximadamente, para las vigas sin y con pegante. Esto sugiere la realización de un mayor número de ensayos para que la variabilidad de los datos sea menor.

De acuerdo con la información de la Tabla 40, para las vigas con pegante, se evidencia que su resistencia aumenta en un 20% aproximadamente en comparación a la de las vigas sin pegante. De igual manera como aumenta la capacidad de carga en las vigas con pegante, aumentan sus deflexiones.

Conforme a la modelación en elementos finitos de las vigas, los esfuerzos máximos a cortante se presentan en el área adyacente a los rigidizadores (Figura 61); de igual manera ocurrió en los ensayos realizados a flexión, donde se observa que todas las vigas (con y sin pegante) fallan por cortante en un tornillo adyacente a uno de los rigidizadores como se observa en la Figura 62.

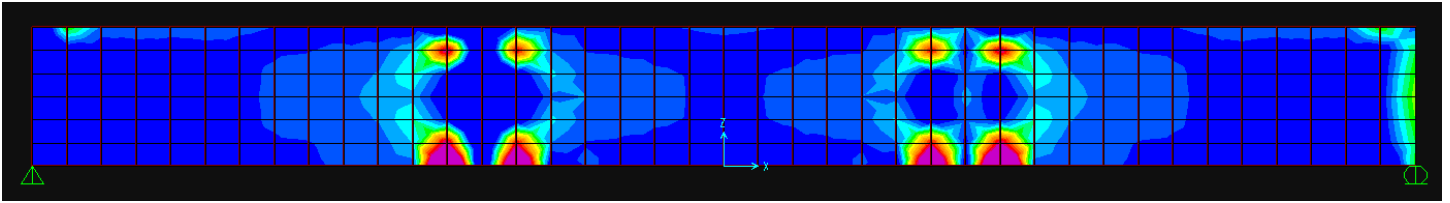


Figura. 61 Esfuerzos máximos a cortante para vigas



Figura 62. Falla de la viga por cortante

En los ensayos a flexión no se presentaron deformaciones laterales en ninguna de las vigas.

6.1.2 Determinación del módulo de elasticidad aproximado del Ecoplak

El módulo de elasticidad (E) es un parámetro característico de cada material que indica su rigidez. Este es la razón de incremento de esfuerzo y el cambio correspondiente a la deformación unitaria (Martínez & Azuaga, 1997). El módulo de elasticidad aproximado se calculó en base a la ecuación de deflexión máxima (Ec.15) de una viga simplemente apoyada con aplicación de carga en los tercios medios (Figura 63).

$$\Delta_{m\acute{a}x.} = \frac{Pa}{24EI}(3L^2 - 4a^2) \quad Ec. 15$$

Donde,

$\Delta_{m\acute{a}x.}$: deflexi3n máxima (mm)

P: Carga máxima aplicada (N)

E: M3dulo de elasticidad (N/mm²)

I: Inercia (mm⁴)

L: Longitud viga (mm)

a: Distancia desde la carga aplicada hasta el apoyo (mm)

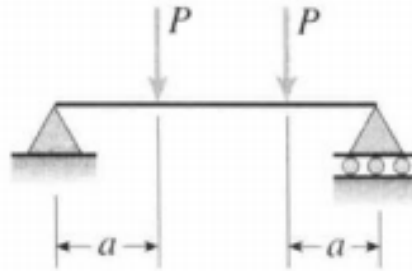


Figura 63. Viga simplemente apoyada con carga en los tercios medios

Recuperado de: Tabla de Deflexiones en Vigas Simplemente Apoyadas

Para la determinaci3n del m3dulo de la elasticidad, despejando de la Ec.15 se obtiene la siguiente ecuaci3n:

$$E = \frac{Pa}{24I\Delta_{m\acute{a}x.}}(3L^2 - 4a^2) \quad \text{Ec. 16}$$

De acuerdo a la ecuaci3n 16 se calcul3 el m3dulo de elasticidad aproximado con la carga máxima del rango elástico para cada una de las vigas ensayadas, y se hall3 un valor promedio por tipo de conexi3n. Los resultados obtenidos para vigas sin y con pegante se muestran en las Tablas 41 y 42, respectivamente.

Tabla 41. M3dulo de elasticidad Vigas Sin Pegante

	vg-01	vg-02	vg-05	Promedio
$\Delta_{m\acute{a}x}$ (mm)	10.33	8.430	11.18	9.98
P (N)	2349.71	1862.88	2476.66	2229.75
L (mm)	2000	2000	2000	2000
a (mm)	666.67	666.67	666.67	666.67
I (mm⁴)	6.37E+07	6.37E+07	6.37E+07	6.37E+07
E (N/mm²)	1013.43	984.59	986.88	994.97

Tabla 42. Módulo de elasticidad Vigas Con Pegante

	vg-03P	vg-04P	vg-06P	Promedio
$\Delta_{\text{máx}}$ (mm)	13.08	17.44	14.66	15.06
P (N)	3210.55	3089.85	3244.57	3181.66
L (mm)	2000	2000	2000	2000
a (mm)	666.67	666.67	666.67	666.67
I (mm ⁴)	6.37E+07	6.37E+07	6.37E+07	6.37E+07
E (N/mm ²)	1093.52	789.26	986.10	956.29

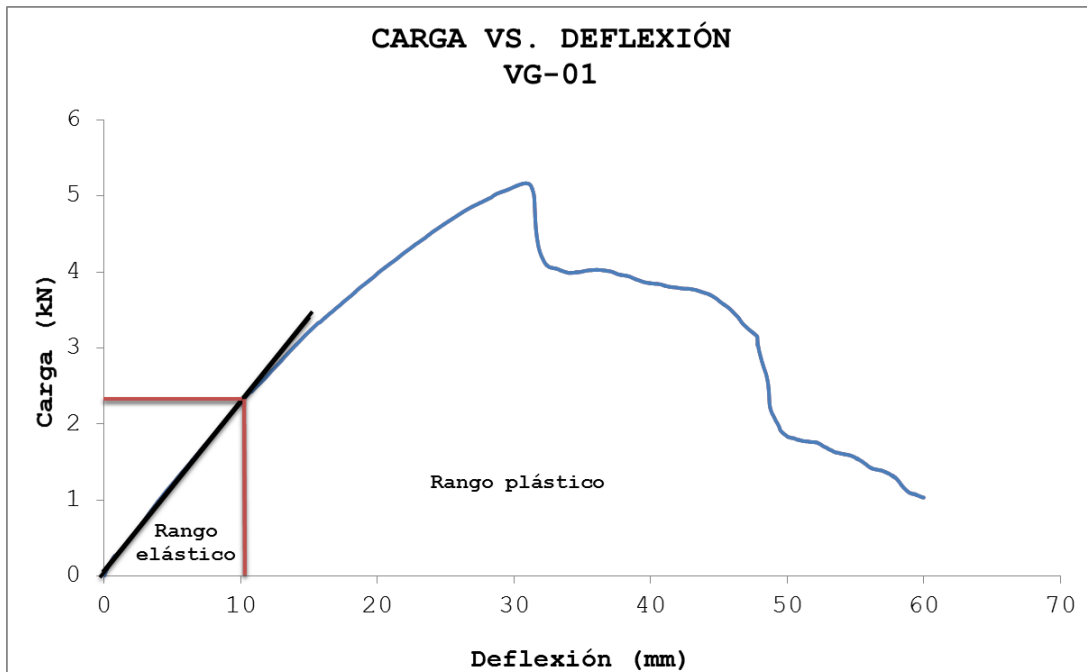
Los valores obtenidos de módulo de elasticidad para las vigas con diferente tipo de conexión, son similares entre sí, corroborando su congruencia.

6.1.3 Determinación de las deformaciones permanentes

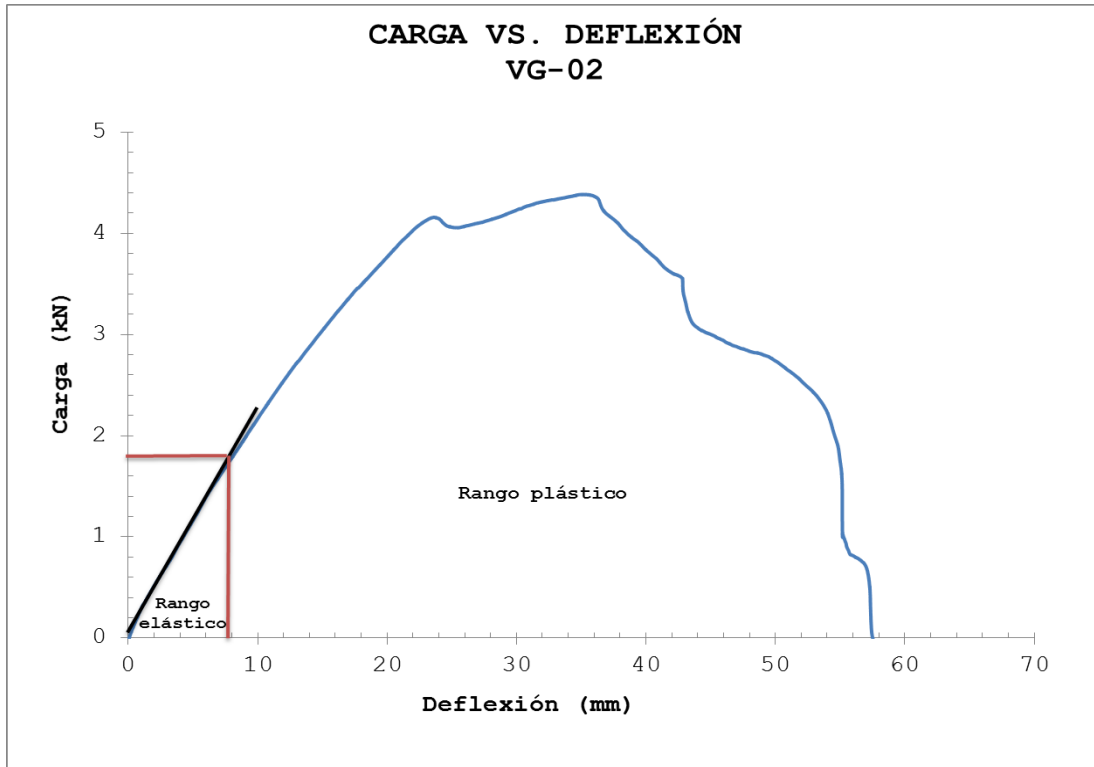
Las deformaciones permanentes o deformaciones plásticas ocurren cuando el material es forzado más allá de su punto de fluencia (Hibbeler, 2006). En este punto el material no recupera su forma original al ser retirada la carga que provoca dicha deformación.

En los ensayos a flexión realizados para las seis (6) vigas se determinó la zona en donde se producen las deformaciones permanentes (rango plástico) como se muestra en las Gráficas 16, 17, 18, 19, 20 y 21.

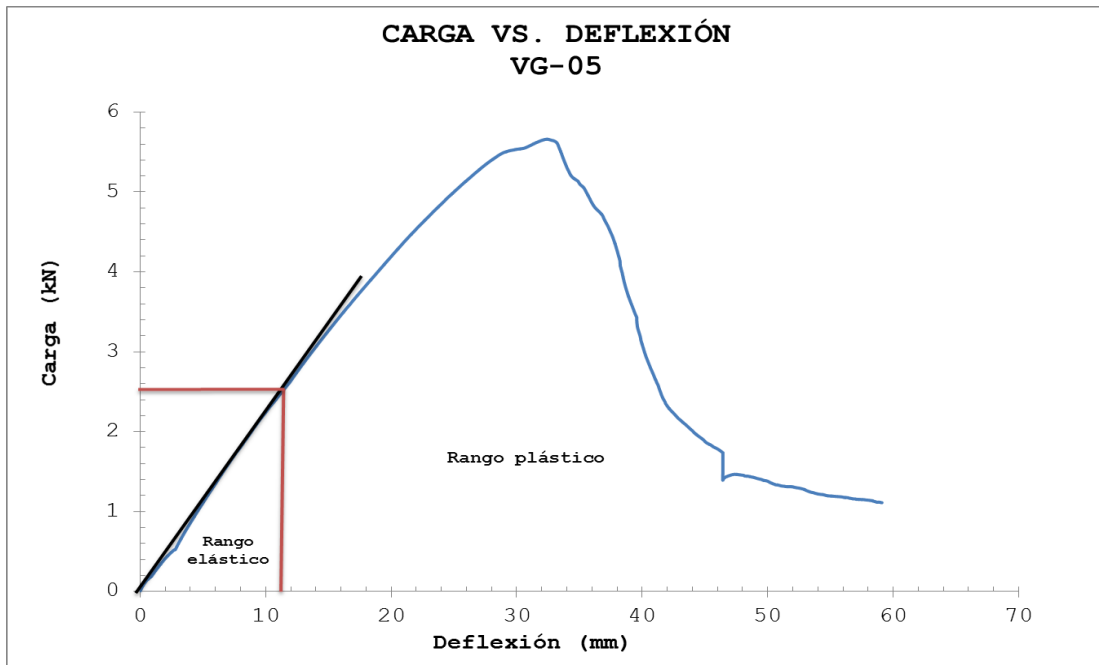
Gráfica 16. Deformaciones Permanentes vg-01



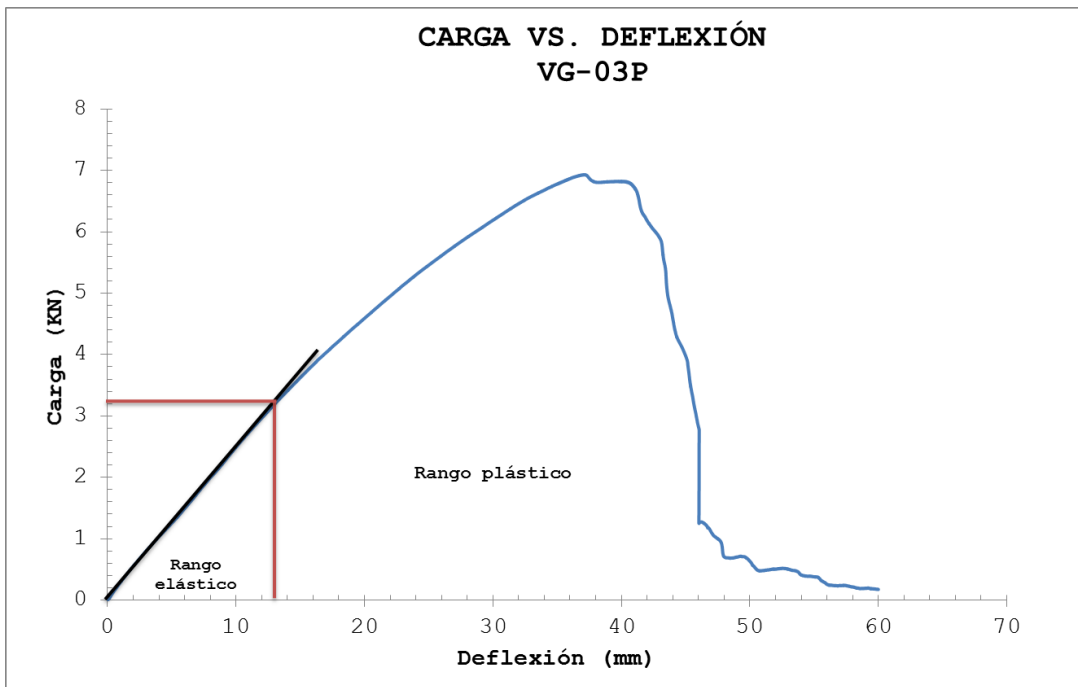
Gráfica 17. Deformaciones Permanentes vg-02



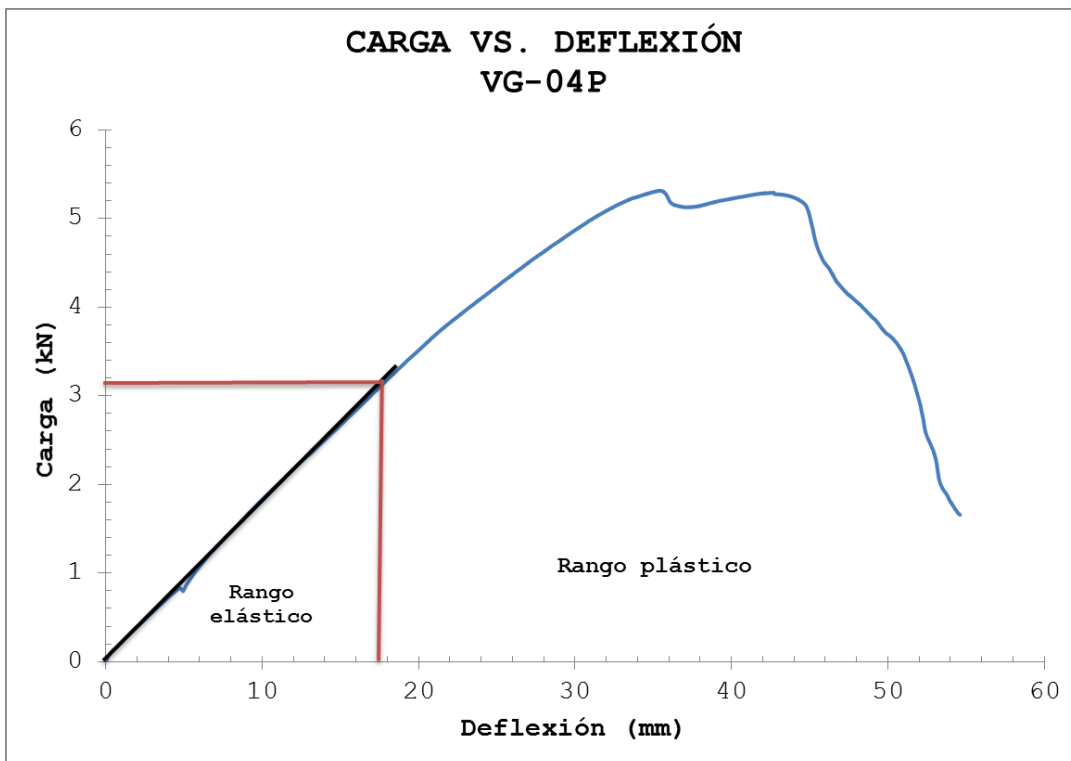
Gráfica 18. Deformaciones Permanentes vg-05



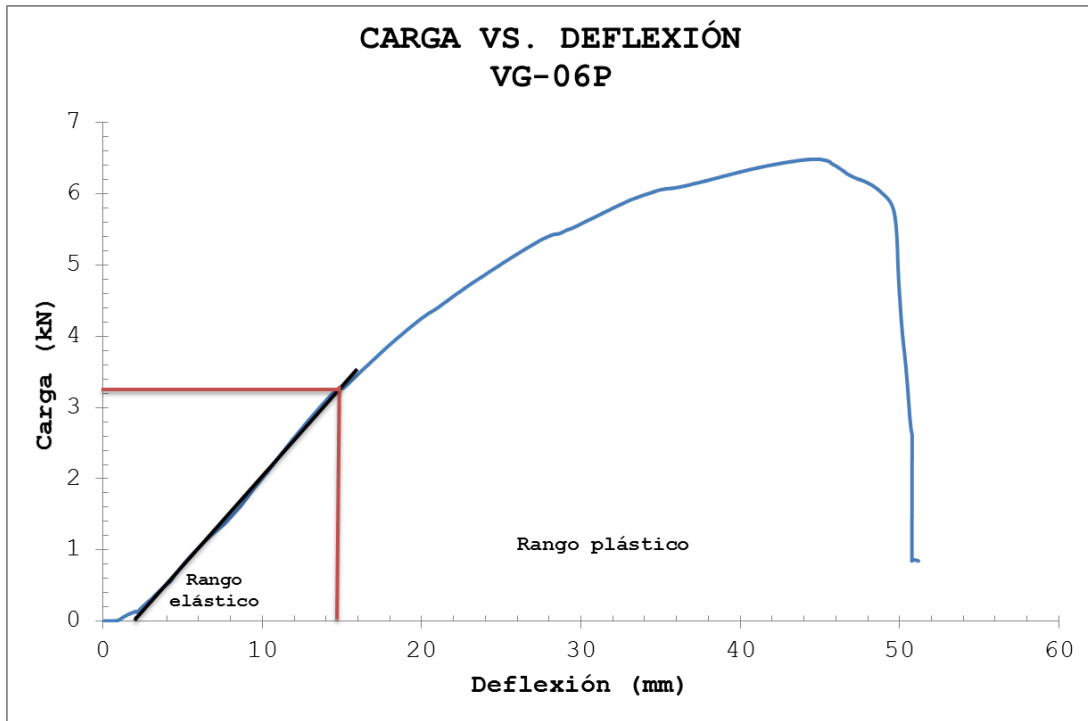
Gráfica 19. Deformaciones Permanentes vg-03P



Gráfica 20. Deformaciones Permanentes vg-04P



Gráfica 21. Deformaciones Permanentes vg-06P



Después de que el material sobrepasa el límite elástico, tiene la capacidad de deformarse sin producir fallas súbitas, presentando una ductilidad representativa. Luego de alcanzada la carga máxima aún existe capacidad de disipación de carga hasta cierto punto donde la falla si se hace súbita y la pérdida de carga es considerable.

Los valores del límite de proporcionalidad para cada una de las vigas mostrados en las gráficas anteriores se resumen en las Tablas 43 y 44.

Tabla 43. Límite de Proporcionalidad Vigas Sin Pegante

No.	Carga (kN)	Carga (t)	Deflexión (mm)
vg-01	2.350	0.235	10.33
vg-02	1.863	0.186	8.43
vg-05	2.477	0.248	11.18

La carga del límite de proporcionalidad de la viga vg-02 difiere en un 23% de la carga de los otros dos elementos; representando una variación significativa en el comportamiento elástico de las vigas sin pegante.

Tabla 44. Límite de Proporcionalidad Vigas Con Pegante

No.	Carga (kN)	Carga (t)	Deflexión (mm)
vg-03P	3.211	0.321	13.081
vg-04P	3.09	0.31	17.442
vg-06P	3.245	0.324	14.659

La carga del límite de proporcionalidad de la viga vg-04P que es las que más se aleja del promedio solo difiere en un 4%, lo que no representa una variación significativa que altere el análisis elástico del comportamiento de las vigas con pegante.

6.1.4 Determinación de la ductilidad del material

La ductilidad se entiende como la capacidad que tiene un material estructural de resistir, sin fallar, deformaciones que lleven al material más allá del límite elástico, o limite donde las deformaciones son linealmente proporcionales al esfuerzo o fuerza aplicada (Fajardo, 2013).

La ductilidad se determinó según la siguiente ecuación:

$$\mu = \frac{\epsilon_u}{\epsilon_p} \quad Ec. 17$$

Donde,

μ : Ductilidad

ϵ_u : Deformación última

ϵ_p : Deformación del límite elástico

Con la ecuación No.17 se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 45 para vigas sin pegante y en la Tabla 46 para vigas con pegante.

Tabla 45. Ductilidad Vigas Sin Pegante

No.Vg	ϵ_p	ϵ_u	Ductilidad
vg-01	10.33	30.88	2.99
vg-02	8.43	35.04	4.16
vg-05	11.18	32.44	2.90
		Promedio	3.35

Tabla 46. Ductilidad Vigas Con Pegante

No.Vg	ϵ_p	ϵ_u	Ductilidad
vg-03P	13.08	37.04	2.83
vg-04P	17.44	35.39	2.03
vg-06P	14.66	44.89	3.06
		Promedio	2.64

De acuerdo a los valores de ductilidad mostrados en las tablas anteriores, las vigas sin pegante resisten una carga menor, al ser más dúctiles que las vigas con pegante, las cuales soportan una carga mayor.

6.1.5 Determinación de la tenacidad aproximada

La tenacidad es una medida de la cantidad de energía por unidad de volumen que puede absorber o disipar un elemento hasta la falla. Se define como el área bajo la curva esfuerzo-deformación de un material que se lleva hasta la falla (Fajardo, 2013).

Debido a que en los ensayos de flexión realizados con la MTS no se obtuvieron valores de esfuerzo sino de carga soportada por las vigas con su deflexión asociada, la tenacidad calculada es solo una aproximación de la tenacidad real del material. El área bajo la curva de la gráfica carga vs. deflexión se halló por el método de los trapecios. En la Tablas 47 y 48 se muestran los resultados de la tenacidad de cada una de las vigas ensayadas y una tenacidad promedio por tipo de conexión.

Tabla 47. Tenacidad Vigas Sin Pegante

No.	Tenacidad Aprox. (kN-mm)
Vg-01	149.04
vg-02	171.62
vg-05	139.88
Promedio	160.33

Tabla 48. Tenacidad Vigas Con Pegante

No.	Tenacidad Aprox. (kN-mm)
Vg-03P	203.79
vg-04P	144.19
vg-06P	194.76
Promedio	180.91

La Tabla 48 muestra que las vigas con pegante tienen una mayor tenacidad que las vigas sin pegante (Tabla 47), lo cual las hace más resistentes al poseer una mayor capacidad de absorción de energía.

6.1.6 Comparación del comportamiento de vigas con diferente tipo de unión

Para realizar una comparación del comportamiento entre vigas con y sin pegante, se realizó un cuadro comparativo con las propiedades halladas anteriormente. Este es mostrado a continuación:

Tabla 49. Cuadro Comparativo Vigas con diferente tipo de conexión

Ítem	Vigas Sin Pegante	Vigas Con Pegante
Carga máx. (N)	5071.67	6246
Deflexión (mm)	32.78	39.11
Módulo de Elasticidad (N/mm²)	994.97	956.29
Ductilidad	3.35	2.64
Tenacidad (kN-mm²)	160.33	180.91

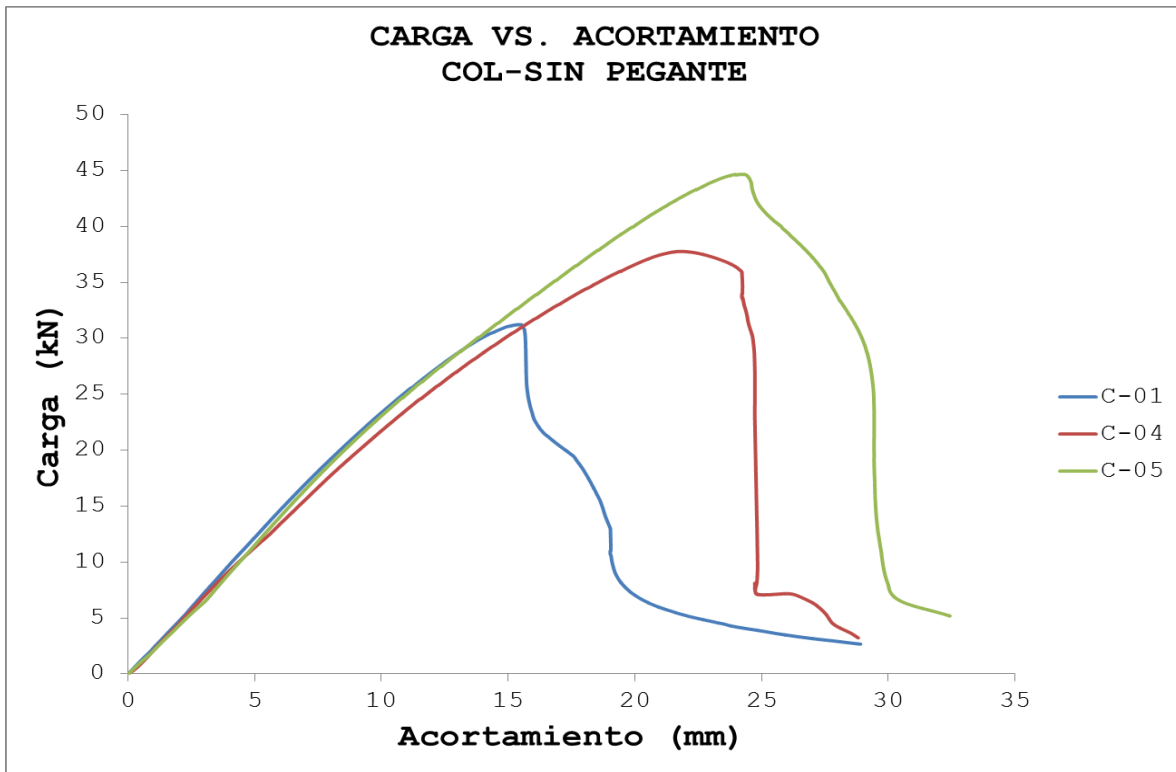
Los valores mostrados en la Tabla 49 demuestran que las vigas con pegante tienen un mejor comportamiento de resistencia que las vigas sin pegante al presentar una mayor tenacidad y capacidad de carga. Sin embargo, se observa que las vigas con pegante presentan una menor ductilidad que las vigas sin pegante; este comportamiento obedece a que los materiales más resistentes tienden a ser menos dúctiles.

6.2 COLUMNAS

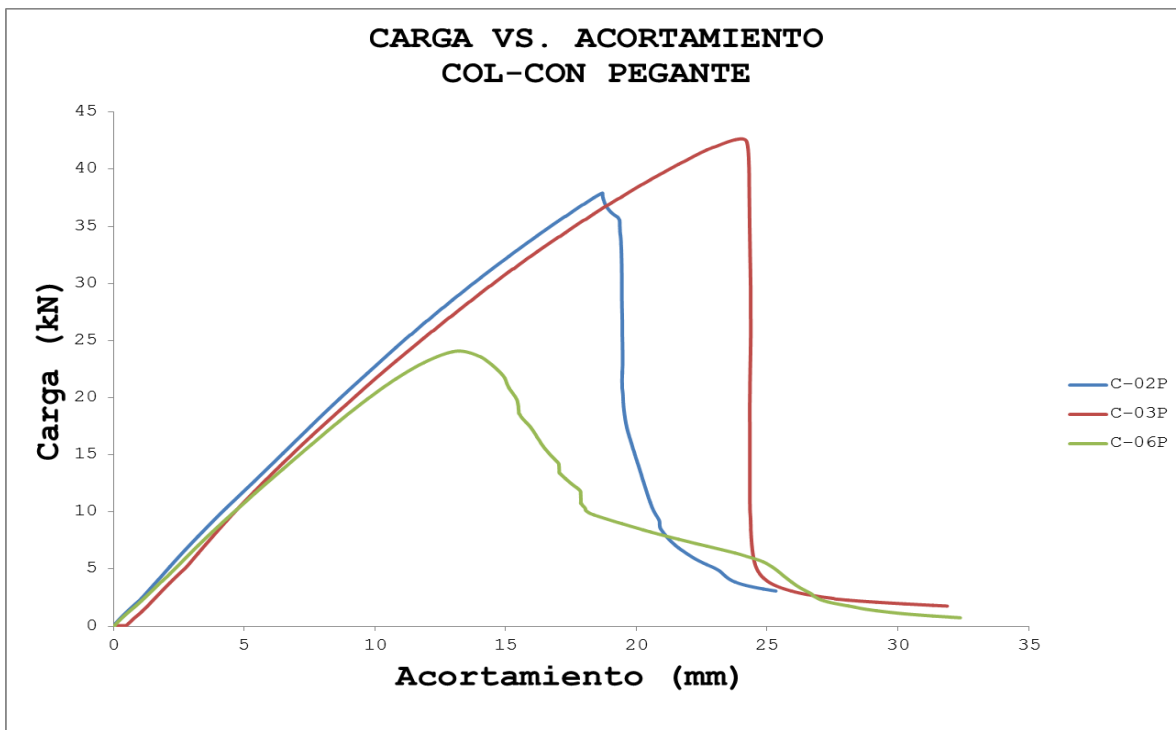
6.2.1 Determinación del acortamiento y carga máxima

En los ensayos a compresión se obtuvo la carga soportada por el elemento y la deformación producida por la misma. En las Gráficas 22 y 23 se observan los resultados para columnas sin y con pegante, respectivamente.

Gráfica 22. Carga Vs. Acortamiento Columnas Sin Pegante



Gráfica 23. Carga Vs. Acortamiento Columnas Con Pegante



De acuerdo a los ensayos de compresión de las columnas se determinó la carga máxima soportada por la misma y su acortamiento asociado. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 50 para columnas sin pegante y en la Tabla 51 para vigas con pegante.

Tabla 50. Carga máxima y Acortamiento Columnas Sin Pegante

Columnas Sin Pegante			
No.	Carga máx. (kN)	Carga máx. (t)	Acortamiento (mm)
C-01	31.225	3.122	15.459
C-04	37.760	3.776	21.769
C-05	44.657	4.466	24.258
Promedio	37.88	3.79	20.50

Tabla 51. Carga máxima y Acortamiento Columnas Con Pegante

Columnas Con Pegante			
No.	Carga máx. (kN)	Carga máx. (t)	Acortamiento (mm)
C-02P	37.916	3.792	18.703
C-03P	42.662	4.266	24.029
C-06P	24.085	2.409	13.231
Promedio	34.89	3.49	18.65

En las Tabla 50 y 51 el coeficiente de variación para los datos de carga máxima es del 17% y 28% para las columnas sin y con pegante, respectivamente. Esto sugiere realizar una muestra de ensayos más representativa para disminuir la dispersión de los datos.

A diferencia de las vigas, para el caso de las columnas, como se evidencia en las Tablas 50 Y 51 de carga máxima, el pegante no representa ningún tipo de aumento en la resistencia de las mismas, por el contrario tienen un comportamiento similar de capacidad de carga. Además se observa que en las columnas a diferencia de las vigas tienden a haber fallas súbitas después de alcanzada la carga máxima con poca capacidad de disipación de carga.

6.2.2 Identificación de pandeo

El pandeo es un fenómeno de inestabilidad elástica que puede darse en elementos comprimidos esbeltos, y que se manifiesta por la aparición de desplazamientos importantes transversales a la dirección principal de compresión (Pandeo, 2015).

Las columnas ensayadas mostraron un comportamiento similar a las modeladas en SAP 2000 (Figura 45), presentando pandeo en el centro de las mismas, como muestra la Figura 64.

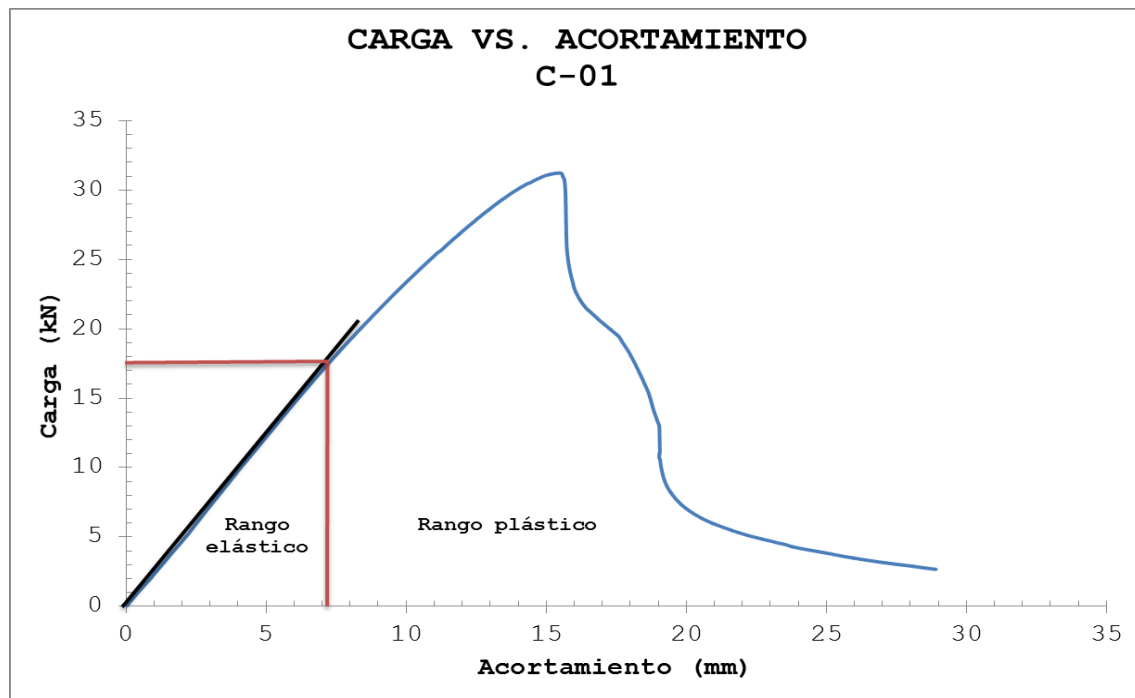


Figura 64. Pandeo local de la columna

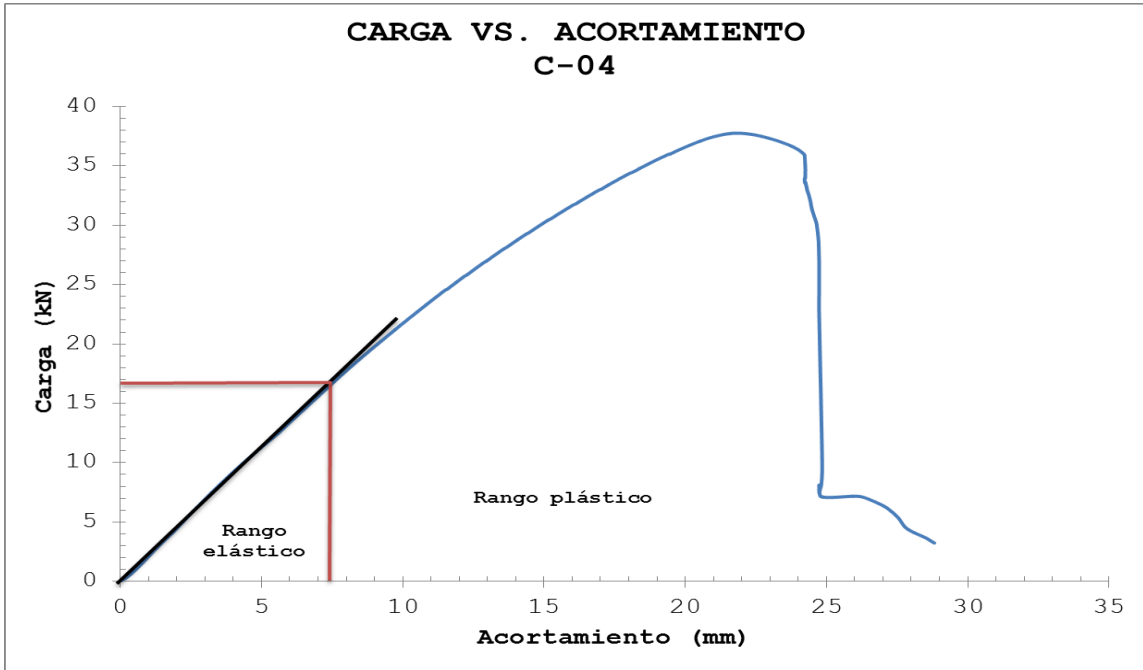
6.2.3 Determinación de deformaciones permanentes

En los ensayos a compresión realizados para las seis (6) columnas se determinó la zona en donde se producen las deformaciones permanentes (rango plástico) como se muestra en las gráficas 24, 25, 26, 27, 28 y 29.

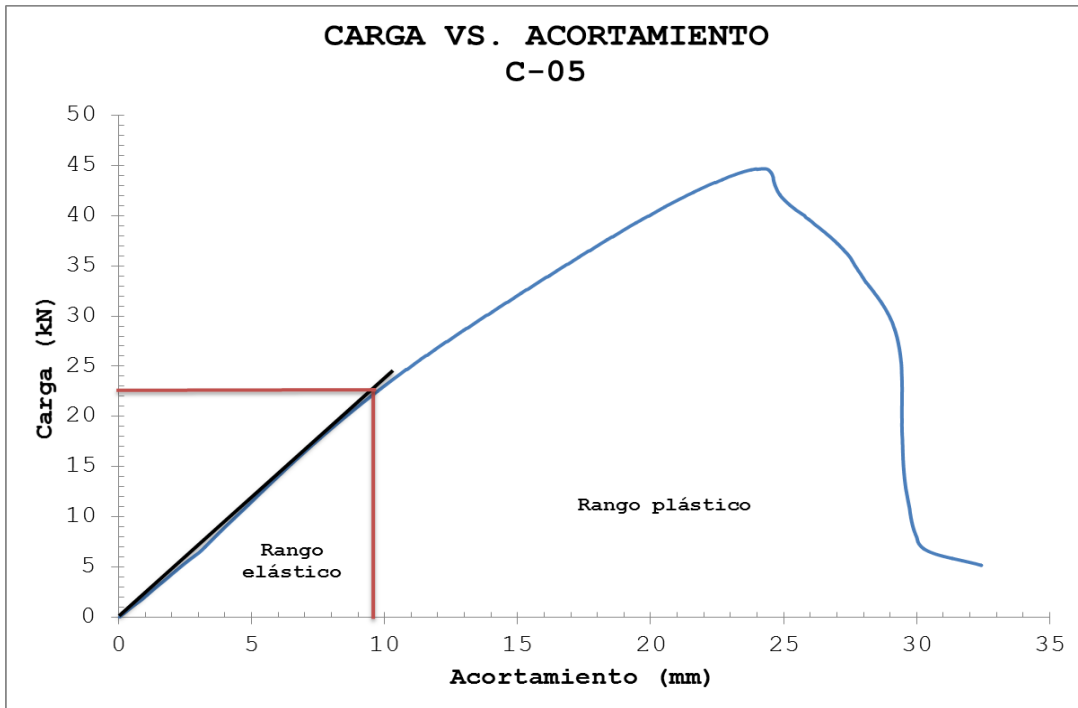
Gráfica 24. Deformaciones Permanentes C-01



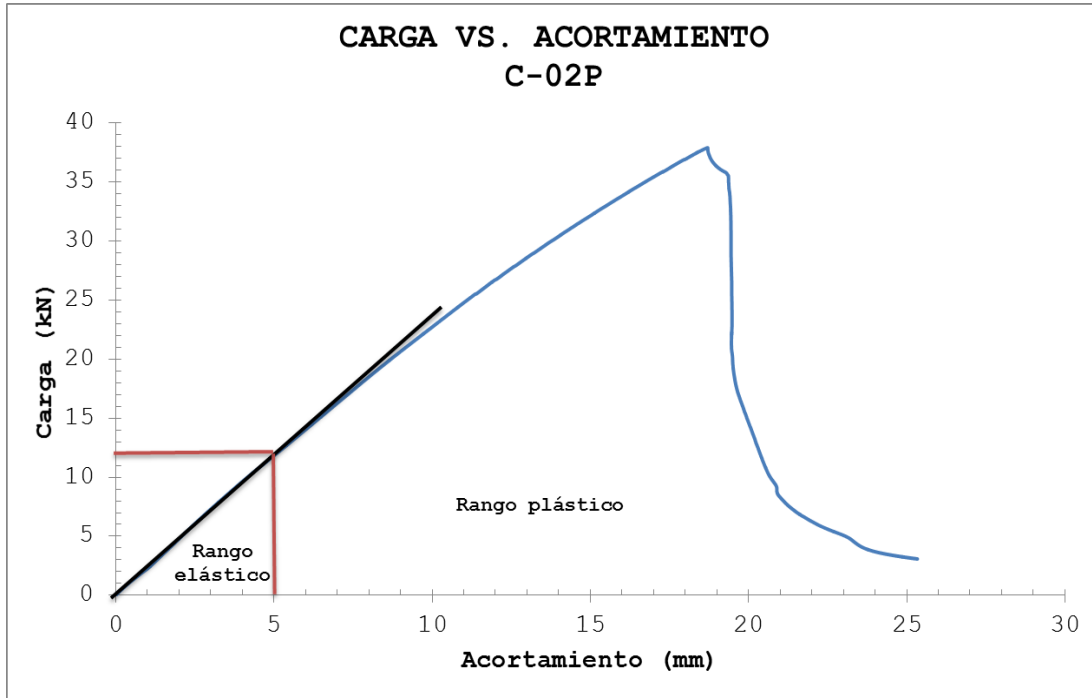
Gráfica 25. Deformaciones Permanentes C-04



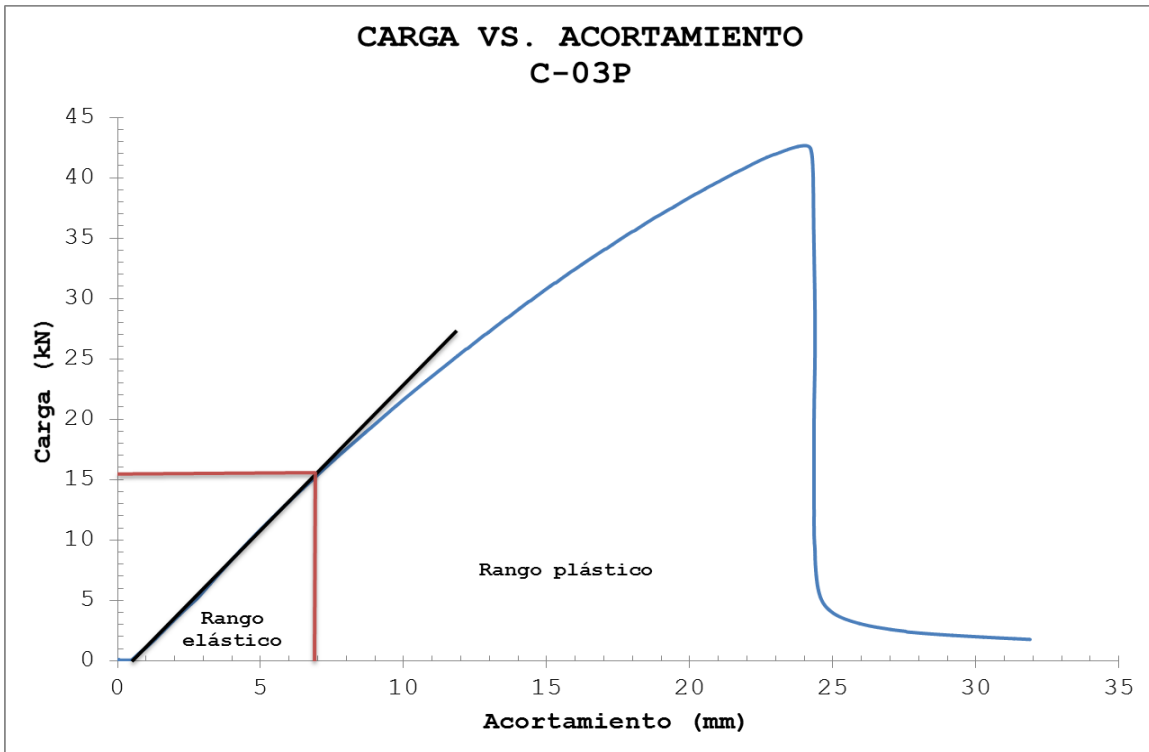
Gráfica 26. Deformaciones Permanentes C-05



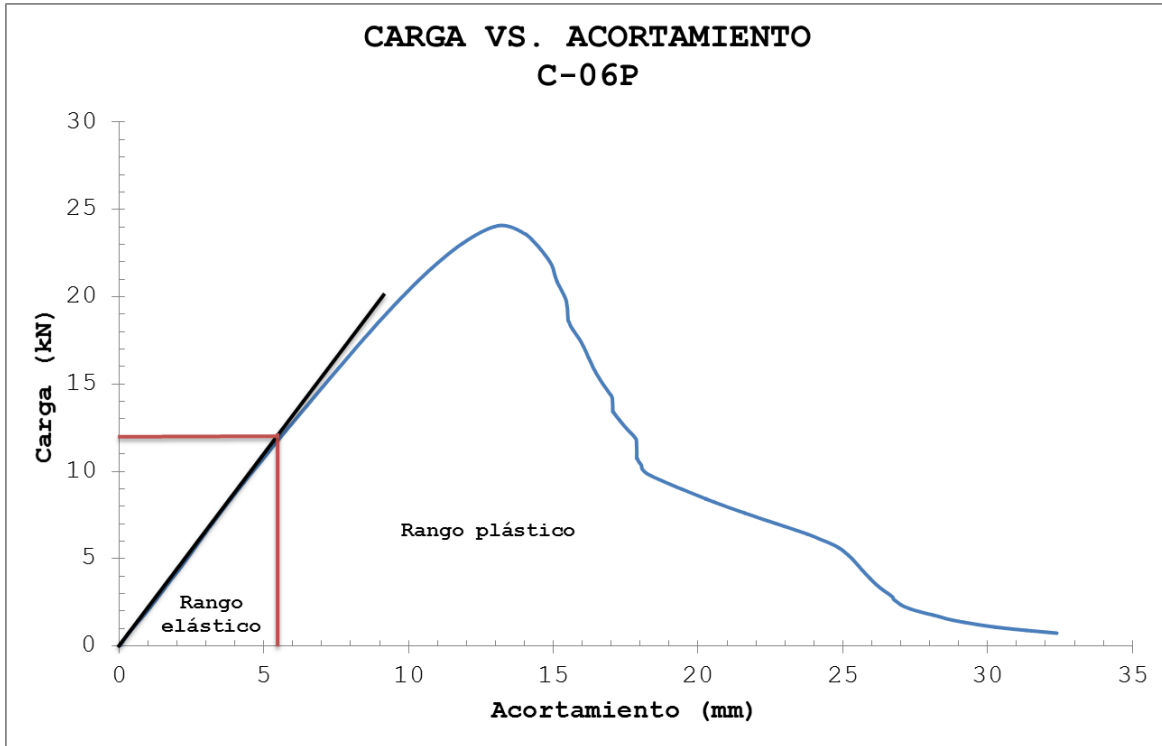
Gráfica 27. Deformaciones Permanentes C-02P



Gráfica 28. Deformaciones Permanentes C-03P



Gráfica 29. Deformaciones Permanentes C-06P



En la mayoría de las columnas, se observan comportamientos de fallas súbitas luego de alcanzada la carga máxima debido a pandeo local de estos elementos, fallas por cortante y desgarramiento de la lámina.

Los valores del límite de proporcionalidad para cada una de las columnas mostradas en las gráficas anteriores se resumen en las Tablas 52 y 53.

Tabla 52. Límite de Proporcionalidad Columnas Sin Pegante

Columnas Sin Pegante			
No.	Carga (kN)	Carga (t)	Acortamiento (mm)
C-01	17.70	1.77	7.32
C-04	16.81	1.68	7.57
C-05	22.58	2.26	9.76

Tabla 53. Límite de Proporcionalidad Columnas Con Pegante

Columnas Con Pegante			
No.	Carga (kN)	Carga (t)	Acortamiento (mm)
C-02P	12.03	1.20	5.09
C-03P	15.58	1.56	7.08
C-06P	12.13	1.21	5.67

De acuerdo a los datos de las tablas 52 y 53, se demuestra que el pegante no es un factor que influya favorablemente en el rango elástico de las columnas, ya que la carga del límite de proporcionalidad de los elementos con pegante es menor en comparación a la de los elementos sin pegante. Esto se debe a que el pegante no es suficientemente resistente en las superficies de los elementos sometidos a carga axial, y no genera un factor representativo a cortante.

6.3 Comparación de propiedades mecánicas de los elementos en Ecoplak y en madera.

Para determinar si la unidad funcional es factible, debe hacerse una comparación de los elementos estructurales en los dos tipos de material, esto determinará si los dos elementos son aptos para cumplir la misma función.

La Tabla 54 muestra los parámetros de calidad para los tableros de Ecoplak y de Tablex Pizano.

Según la norma NTC 2261 para tableros aglomerados, el Ecoplak se clasifica como grado medio especial, MGS y de alta densidad (Riorion, 2009).

Tabla 54. Ensayos de calidad de aglomerados ECOPLAK® CITEC – Laboratorio de materiales Universidad de los Andes.

Parámetro	Unidad	ECOPLAK®	Tablex Pizano	NTC 2261- MGS
Modulo de Rotura	N/mm ²	20	17.6	14.5
Modulo de Elasticidad	N/mm ²	1489	2000	1500
Arranque Tornillo Cara	N	726	1100	550
Arranque Tornillo Canto	N	852	700	650
Humedad Máxima	%	4	5-6	6
Densidad	Kg/m ³	1070	600	AD>800

Fuente: Ecoplak, 2005.

La Tabla 54 muestra que el módulo de rotura del Ecoplak es mayor que el del Tablex Pizano®, sin embargo, el módulo de elasticidad es menor. Esto significa que aunque son materiales similares, la madera presenta menores deformaciones ante la misma carga

aplicada y tiene mayor rigidez. El Ecoplak requiere una fuerza mayor que la madera para arrancar un tornillo de su canto pero la fuerza que requiere para arrancarlo de su cara es menor.

Se realizó la modelación por elementos finitos de los elementos estructurales en madera (Tablex Pizano®), aplicando las mismas cargas y se obtuvieron los siguientes resultados (Tablas 55 y 56):

Tabla 55. Comparación de propiedades mecánicas en vigas de los dos tipos de material

Material Viga	σ Flexión máx (N/mm ²)	σ Cortante máx. (N/mm ²)	Deflexión máx. (mm)
Tablex Pizano	26.98	0.60	34.91
Ecoplak	15.76	0.79	45.56

Tabla 56. Comparación de propiedades mecánicas en columnas de los dos tipos de material

Material Columna	σ Flexión máx (N/mm ²)	σ Cortante máx. (N/mm ²)	Acortamiento (mm)
Tablex Pizano	27.56	0.59	19.45
Ecoplak	21.76	0.65	24.19

Estos datos comprueban que las deflexiones de los elementos en madera son 25% menores que las de los elementos en Ecoplak. Gracias a este análisis se verifica que los dos materiales son funcionales para el propósito deseado en este trabajo, es decir, que soportan de manera similar las cargas aplicadas, y esto permite compararlos.

6.4 Comparación del impacto ambiental de los procesos de producción de las láminas de Ecoplak y de madera

El proceso de fabricación del Ecoplak es más sencillo que el de los tableros aglomerados de madera, en la cantidad de insumos que necesita y el número de sub-procesos que se llevan a cabo para su terminación.

El Ecoplak no requiere el uso de resinas fenólicas, como lo hace el tablero de madera. Esto representa una ventaja ambientalmente ya que estas sustancias generan emisiones al agua y al suelo y han sido clasificadas como contaminantes por varias entidades internacionales como la USEPA (Agencia de Protección Medioambiental de los Estados Unidos) y la CEE (Consejo de la Unión Europea) (Conrado et al).

El Ecoplak proviene de los envases de Tetra Pak®, que fueron fabricados con otro fin, lo que lo convierte en un producto generado a partir de un material reciclable, a diferencia de los tableros aglomerados de madera, cuya materia prima es directamente recolectada para este fin.

En Colombia se recolectaron 712 t de envases de Tetra Pak® para reciclaje en 2014, lo cual significa que Ecoplak tiene una capacidad de recuperar el 33.7% del total de estos residuos, disminuyendo este porcentaje de los empaques dispuestos en rellenos sanitarios y alargando la vida útil de los mismos. Los tableros aglomerados de madera tienen una capacidad de recuperación de residuos de 0%, por lo cual no disminuyen la cantidad de residuos dispuestos en rellenos sanitarios ni prolongan su vida útil.

La madera no puede ser usada en exteriores ya que su baja resistencia a la humedad y su alto porcentaje de hinchamiento (20-25%) la convierten en un material no favorable para estar expuesta a este tipo de ambiente sin ningún tipo de protección. El Ecoplak por el contrario es apto para usarse en exteriores, debido a su alta resistencia a la humedad y su bajo porcentaje de hinchamiento (1.7%) (Ecoplak, 2005).

Realizando los cálculos correspondientes por proporción directa para las diferentes masas, se calculan las cantidades totales de insumos requeridas para la fabricación de una lámina de cada material. Estas se muestran en la Tabla 57.

Tabla 57. Insumos totales para una lámina de cada material.

Material	Masa de una lámina (kg)	INSUMOS TOTALES PARA UNA LÁMINA		
		Gas (m ³)	Electricidad (KWh)	Agua (m ³)
Madera	26.79	3.82	5.02	0.74
Ecoplak	47.78	0.63	19.59	1.90

La tabla anterior muestra que una lámina de Ecoplak requiere solo una sexta parte del gas consumido por una lámina de madera. Sin embargo, consume casi 4 veces más energía eléctrica 1.5 veces más agua.

En la Tabla 58 se muestran las respectivas huellas de carbono del consumo de gas, de electricidad y total, generadas en la fabricación de una lámina para los dos tipos de materiales. Éstas fueron calculadas según los datos de la Universidad de Santander consignados en la Tabla 5.

Tabla 58. Huellas de carbono totales generadas por una lámina.

Material	HUELLA DE CARBONO (kg CO ₂)		
	Gas	Electricidad	Total
Madera	7.19	1.46	8.66
Ecoplak	1.18	5.72	6.90

Según la Tabla 58, la huella de carbono de una lámina de madera es 1.25 veces más grande que la huella de una lámina de Ecoplak.

6.5 Comparación del impacto ambiental de la unidad funcional en madera y en Ecoplak

El proceso de fabricación de la unidad funcional en madera es exactamente igual al de la unidad funcional en Ecoplak, por esta razón no se describe.

Se debe tener en cuenta el consumo de energía eléctrica generado en el corte de los elementos. Según N. Dos Santos et al. (2013), el consumo de energía de una sierra eléctrica es 0.11 KWh/m². El área de una viga es 1.76 m². Entonces la energía gastada por la sierra eléctrica para cortar una viga sería 0.1936 KWh

Convirtiendo 1 m³ de tablero aglomerado de madera en masa, se obtiene que éste equivale a 600 kg.

Realizando los cálculos correspondientes por proporción directa para las diferentes masas, se calculan las cantidades totales de insumos requeridas en los dos procesos de producción para la unidad funcional, las cuales se muestran en la Tabla 59.

Tabla 59. Insumos totales para la unidad funcional de cada material.

INSUMOS TOTALES PARA LA UNIDAD FUNCIONAL			
Material	Gas (m ³)	Electricidad (KWh)	Agua (m ³)
Ecoplak (28.248 kg)	0.37	11.58	1.12
Madera (15.84 kg)	2.26	2.96	0.44

La fabricación de una viga cajón hecha en tablero aglomerado de madera consume un 83.57% más de gas natural que la fabricación de la misma viga hecha en Ecoplak, pero el consumo de energía eléctrica es un 74.39% menor, al igual que el consumo de agua, el cual es un 60.9% más bajo.

Como se dijo anteriormente, por cada tonelada de Tetra Pak reciclada se ahorran 26500 l de agua. Lo que quiere decir que por cada 28.248 kg (masa de la unidad funcional) de Ecoplak se ahorran 748 l. Disminuyendo esta cantidad del consumo requerido en el proceso de producción, se obtiene que por cada viga se utilizan 377 l (0.377m³) de agua.

En la Tabla 60 se muestran las respectivas huellas de carbono del consumo de gas, de electricidad y la total, generadas por la unidad funcional para los dos tipos de materiales, las cuales fueron calculadas según los datos de la Universidad de Santander consignados en la Tabla 5.

Tabla 60. Huellas de carbono totales generadas por las unidades funcionales.

HUELLAS DE CARBONO TOTALES (kg CO₂)			
Material	Gas	Electricidad	Total
Ecoplak	0.70	3.38	4.08
Madera	4.25	0.87	5.11

Una viga de Ecoplak genera 1.0388 kg de CO₂ (20.29%) menos que una viga de madera, en términos de gas natural y energía eléctrica.

7 CONCLUSIONES

- El espesor de lámina más adecuado para la fabricación tanto de las vigas como de las columnas es de 15mm; el cual es el valor comercial más cercano a los valores críticos sugeridos por los criterios de escogencia, que en ambos casos fue, el de esfuerzos de flexión máximos.
- Las vigas cajón armadas con tornillos más pegante PL285 demuestran una mayor tenacidad y capacidad de carga que las armadas solo con tornillos, al presentar una mayor resistencia a la flexión. Sin embargo, al ser más resistentes son menos dúctiles, como se evidencia en los resultados de ductilidad que presentan un valor promedio de 2.64, mientras que para las vigas fabricadas solo con tornillos este valor aumenta a 3.35.
- Con los ensayos realizados tanto a compresión como a flexión se prueba que el Ecoplak es un material principalmente plástico con un rango pequeño de elasticidad. Presenta fallas más frágiles en las columnas y fallas más dúctiles con un remanente de deformación en las vigas, las cuales tienen una capacidad mayor de resistir carga más allá del límite elástico.
- El uso de pegante en las uniones de las columnas no representa ningún factor determinante para el aumento en su capacidad de carga; por el contrario, las columnas con diferente tipo de unión presentan una resistencia a la compresión similar.
- Aunque el módulo de elasticidad hallado para el Ecoplak es un 34% menor que el dado por el fabricante, no se puede afirmar que el material sea menos rígido que lo esperado inicialmente, debido a que el método de cálculo es aproximado y por ende su resultado.
- Los rigidizadores generan zonas de distribución efectiva de carga, disminuyendo las deformaciones locales y zonas de alto cortante de los elementos.
- De acuerdo a la evaluación estructural, el Ecoplak se comporta de manera similar a los aglomerados de madera para el mismo nivel de carga, aunque presenta mayores deformaciones.
- La utilización del Ecoplak representa una disminución en la cantidad de residuos dispuestos en rellenos sanitarios, prolongando así su vida útil.
- El empleo del Ecoplak en los usos comerciales de la madera generaría una disminución en la demanda de ésta como materia prima y un aumento en el porcentaje de reciclaje de envases de Tetra Pak®.
- El proceso de producción de una viga de Ecoplak requiere un 61% más de agua que el proceso de fabricación de una viga de aglomerado de madera; sin embargo, al ser un material reciclado, por cada viga de Ecoplak fabricada se ahorran indirectamente 748 l de agua, lo que representa un consumo total de agua 25% menor en su proceso de producción que en el de la madera.
- La huella de carbono generada por el proceso de producción del Ecoplak es un 20% menor a la huella de carbono del proceso de producción de un tablero aglomerado de madera lo que confirma que el Ecoplak es un material más amigable con el medio ambiente.

8 RECOMENDACIONES

- Se recomienda utilizar un mayor número de rigidizadores para evitar que los elementos fallen en las zonas de alto cortante.
- Se hace preferible el uso de arandelas en la unión de tornillos con las láminas de Ecoplak para disminuir el desgarre que se pueda producir del material ante la actuación de fuerzas externas.
- Para aumentar la rigidez del Ecoplak se recomienda realizar estudios de posibles adiciones de diferentes materiales durante su proceso de producción, como caucho reciclado, mallas electrosoldadas o fibras.
- Debe mejorarse el proceso de calibración de las láminas ya que estas presentan grandes variaciones en su espesor.
- Se sugiere una serie adicional de ensayos donde se caractericen las propiedades dinámicas del material.

9. BIBLIOGRAFÍA

- Banco Mundial (2014). Datos globales, ambiente. Recuperado de: <http://data.worldbank.org/indicator#topic-6>
- Barcelo, J y Hernandez, C. (2008). Materiales que componen el Tetra-Brick. Tomado de <http://jair-camila.blogspot.com/>
- Barreno Gilbert, D. y Yanez, Naupay, N. (2006) Proyecto de inversión para la elaboración de aglomerado a partir del reciclaje de Tetra Pak. Escuela superior politécnica del litoral. Guayaquil, Ecuador.
- Barrera, J. (2010). La madera laminada: Una alternativa estructural y ambiental. Revista el mueble y la madera, 70, 10-16.
- Becerra Arroyo, M. y Villabona Valencia, C. (2009). Diseño conceptual de una planta de tratamiento para el aprovechamiento de residuos de envases asépticos (envases de Tetra Pak®) en Bogotá D.C. Universidad de la Salle. Bogotá, Colombia.
- Betancourt, H.E. (2009). *Plan de negocios para la creación de una planta de procesamiento de envases usados y desechos posindustriales de tetrapak, para la producción de láminas aglomeradas de tektan*. Tesis de pregrado. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá, Colombia.
- Chung, A. (2003). Tectan. Reciclando Tetra Pak. Industrial Data, Vol. 6 p.83-85
- Colmena Golden Cross (2013). Cuide el medio ambiente. Recuperado de: http://www.colmena.cl/newsletter/news_colmena_abr_2013/reciclaje.html
- Colombia Humanitaria (2014). Estudio de caso Colombia Humanitaria. Recuperado de: http://www.colombiahumanitaria.gov.co/FNC/Documents/2014/estudio_caso.pdf
- Construdata (2012). *Los materiales de construcción: Ciclo de vida, aplicaciones e impacto en el país*. Recuperado de: http://www.construdata.com/Bc/Otros/Archivos/como_se_construye_en_colombia.asp
- Ecoplak. (2005). Láminas Ecoplak. Características técnicas. Riorion. Recuperado de: <http://www.riorion.com.co/descargas/Ecoplak%20Ficha%20Tecnica%20Laminas%202009.pdf>
- Ecoplak. (2012). Ecoproductos. Recuperado de: <http://www.ecoplak.com/ecoproductos.php?id=18&nivel=2&padre=6&c=0>
- Estructura del envase Tetra Pak® [Figura]. Recuperado de: http://proyecto1reciclaje.blogspot.com/2012_02_01_archive.html
- European commission (s.f.). Análisis del Ciclo de Vida (ACV). Recuperado de: http://ec.europa.eu/environment/life/project/Projects/index.cfm?fuseaction=home.showFile&rep=file&fil=ECOIL_Ciclo_de_Vida.pdf
- Fajardo, W. (2013). Método de la resistencia última. Teoría de la flexión. Bogotá, Colombia: Pontificia Universidad Javeriana.
- Figen, A.K. et al (2013). Thermal degradation characteristic of Tetra Pak panel boards under inert atmosphere. Korean Journal of Chemical Engineering, 30, 878-890.

- Flexión mecánica. (2015). Recuperado de: https://es.wikipedia.org/wiki/Flexi3n_mec3nica
- Funci3n de las capas de un envase de Tetra Pak® [Figura]. Recuperado de: http://proyecto1reciclaje.blogspot.com/2012_02_01_archive.html
- Gottron et al. (2014). Creep behavior of bamboo. *Construction and building materials*, 66, 79-88.
- Hibbeler, R. (2006). Mec3nica de materiales. Propiedades mec3nicas de los materiales(pp.110-115). M3xico DF, M3xico: Pearson EducationTetra Pak (2003)
- Huella de Carbono. (S.F). Recuperado de: <http://www.soyecolombiano.com/site/nuestra-huella/huella-de-carbono.aspx>
- Inche Mitma, J., Vergiu Canto, J., Mayila Hinojosa, D., Godoy Martinez, M. Y Chung Pinzas, A. (2004). Dise1o y evaluaci3n de una planta de reciclaje de envases Tetra Pak a peque1a escala. Revista de la Facultad de Ingenier'ia Industrial. Vol.7 p.07-17.
- Instituto Nacional de Ecolog'ia (2009). Estudio comparativo de bolsas de pl3stico degradables versus convencionales mediante la herramienta de An3lisis de Ciclo de Vida. Secretar'ia de medio ambiente y recursos naturales.
- Mart'inez, P., y Azuaga, M. (1997). Medici3n del m3dulo de elasticidad de Young. Recuperado de: http://www.fisicarecreativa.com/informes/infor_mecanica/young97.pdf
- MTS (2004). Accurate, Repeatable Measurement and Simulation. Recuperado de: <http://www.mts.com/en/about/Test/index.htm>
- Murillo, S. (2003). Construir con madera. Alternativa para resolver necesidades habitacionales. *Revista el mueble y la madera*, 39.
- N. dos Santos, M., Battistelle, R., Stole Bezerra, B. y Varum, H. (2013). Comparative study of the life cycle assessment of particleboards made of residues from sugarcane bagasse and pine wood shavings. Universidad Estadual Paulista, Sao Paulo, Brasil.
- Nebel et al. (2006). Life Cycle Assessment of Wood Floor Coverings. *The international Journal of Life Cycle Assessment*, 11. 172-182.
- Pandeo. (2015). Recuperado de: <https://es.wikipedia.org/wiki/Pandeo>
- Qu3 es la huella de carbono. (2009) Recuperado de: <http://www.huellacarbono.es/apartado/general/huella-de-carbono.html>
- Reginald B.T. y Hsien H. K. (2005). An LCA study of a primary aluminum supply chain. *Journal of Cleaner Production*. Vol. 13 p. 607-618.
- Rep3blica de Colombia. Departamento Administrativo Nacional de Estad'istica (2011). Registro de damnificados por emergencia invernal 2010-2011. Recuperado de: <https://www.dane.gov.co/index.php/poblacion-y-demografia/registro-unico-de-damnificados-por-la-emergencia-invernal-reunidos>
- Rivela, B., Admundela, H., Moreira, M. y Feijoo, G. (2006). Life Cycle Inventory of Particleboard: A Case Study in the Wood Sector. Universidad de Santiago de Compostela. Espa1a. Riorion S.A. (2012). L3minas Ecoplak. Recuperado de: <http://es.slideshare.net/payala/laminas-ecoplak-especificaciones-tnicas>

- Riorion S.A. (2012) Catálogo de vivienda Ecoplak. Recuperado de: <http://www.slideshare.net/payala/catalogo-vivienda-ecoplak-para-web-presentation>
- Sanchez et al. (2013). Hot-pressed bards based on recycled high-density polyethylene tetrapack: Mechanical properties and fracture behavior. *Journal of reinforced plastics and composites*, 32, 1779-1792.
- Tabla de Deflexiones en Vigas Simplemente Apoyadas. Viga simplemente apoyada con carga en los tercios medios [Figura]. Recuperado de https://eva.fing.edu.uy/pluginfile.php/65866/mod_resource/content/1/tabla_deflexiones_vigas_simpl_apoyadas.pdf
- Tetra Pak. (2003) ¿Qué sucede con los cartones para bebidas usados? Recuperado de: www.cartonbebidas.com
- Tetra Pak, (2009). Reciclaje de envases de Tetra Pak. [Archivo de video]. Recuperado de: <https://www.youtube.com/watch?v=Qsxt9Qqz60o>
- Tetra Pak S.A.(2014). Tetra Pak® and the environment. Recuperado de: <http://www.tetrapak.com/environment>
- Universidad de Santander. (2012). Reporte Huella de Carbono año 2012. Colombia.

10. ANEXOS

10.1 ESFUERZOS MÁXIMOS EN VIGAS

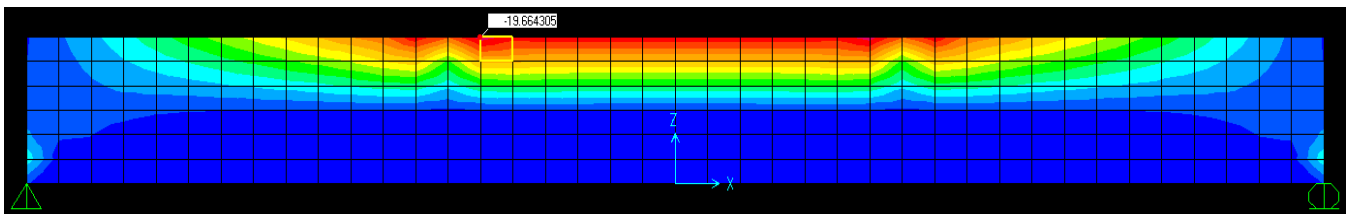
10.1.1 Esfuerzos máximos a flexión

A continuación se muestran los esfuerzos máximos a flexión (positivos y negativos) generados en cada una de las vigas, y la pared en la que se producen.

- **Esfuerzo máximo a flexión en Viga con lámina de 4mm**

El mayor esfuerzo a flexión es generado por compresión (S11) en la cara lateral, con un valor de 19.66 N/mm²:

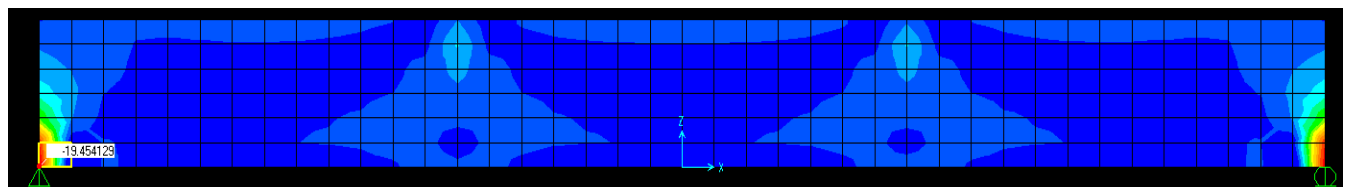
Esfuerzo máximo en la viga de 4mm



- **Esfuerzo máximo a flexión en Viga con lámina de 6mm**

El mayor esfuerzo a flexión es generado por compresión (S22) en la cara lateral, con un valor de 19.45 N/mm²:

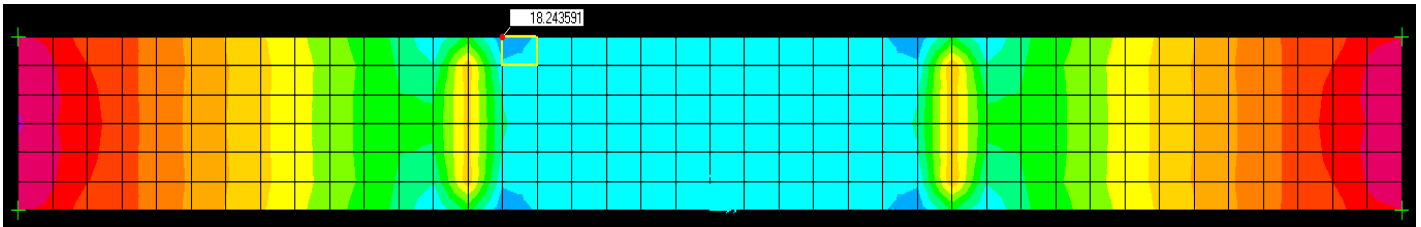
Esfuerzo máximo en la viga de 6mm



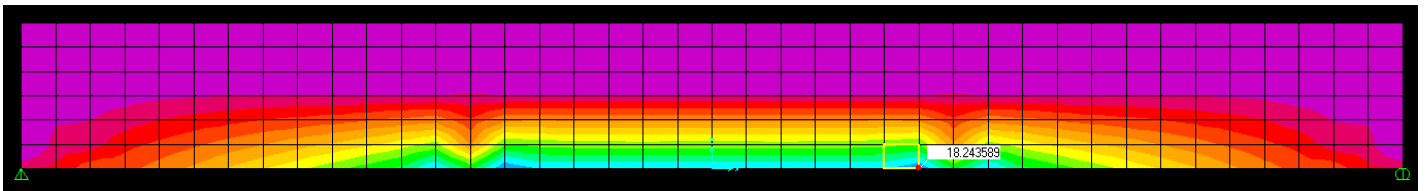
- **Esfuerzo máximo a flexión en Viga con lámina de 9mm**

El mayor esfuerzo a flexión es generado por tensión (S11) en las caras lateral e inferior, con un valor de 18.24 N/mm²:

Esfuerzo máximo en la viga de 9mm cara inferior



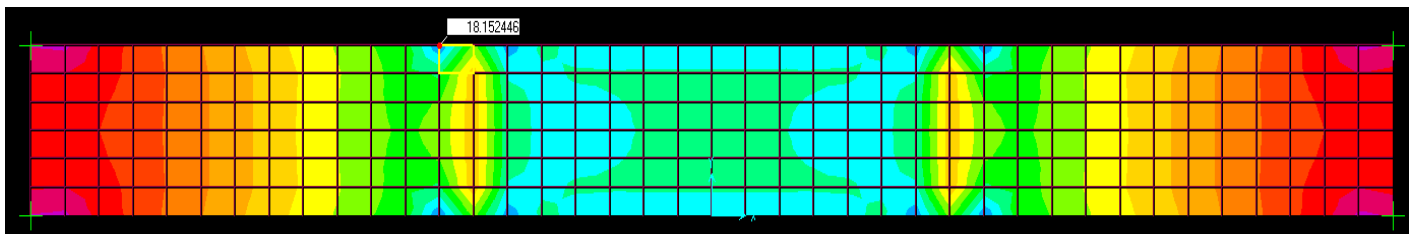
Esfuerzo máximo en la viga de 9mm cara lateral



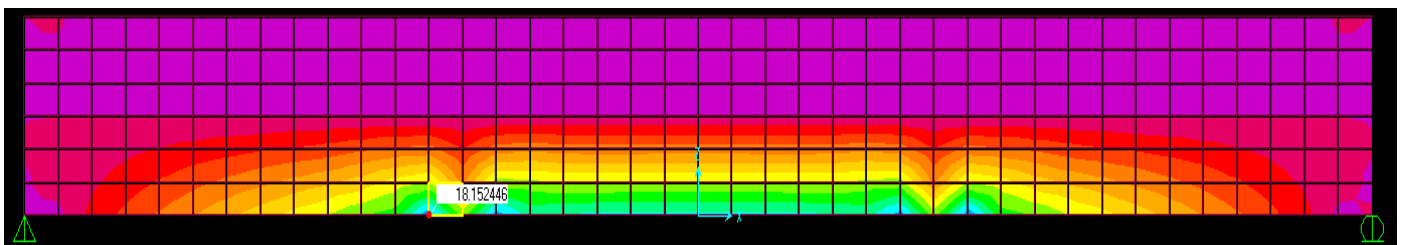
- **Esfuerzo máximo a flexión en Viga con lámina de 12mm**

El mayor esfuerzo a flexión es generado por tensión (S11) en las caras lateral e inferior, con un valor de 18.15 N/mm²:

Esfuerzo máximo en la viga de 12mm cara inferior



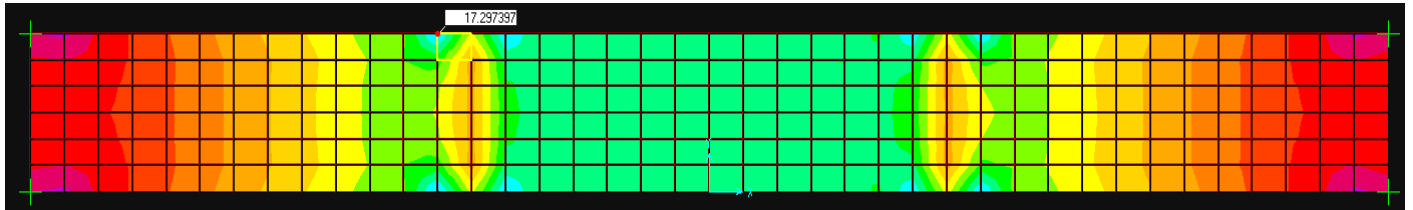
Esfuerzo máximo en la viga de 12mm cara lateral



- **Esfuerzo máximo a flexión en Viga con lámina de 15mm**

El mayor esfuerzo a flexión es generado por tensión (S11) en la cara inferior, con un valor de 17.29 N/mm²:

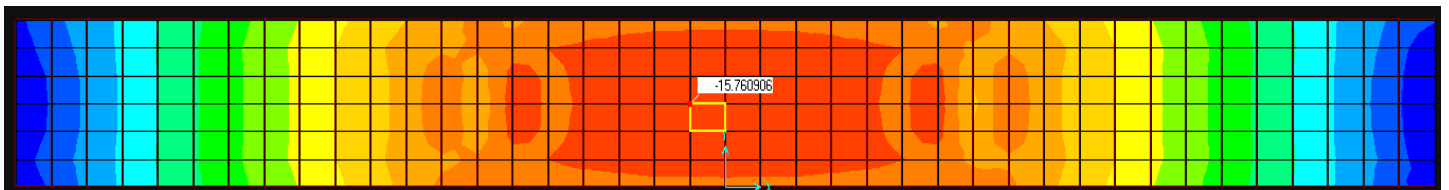
Esfuerzo máximo en la viga de 15 mm cara inferior



- **Esfuerzo máximo a flexión en Viga con lámina de 20mm**

El mayor esfuerzo a flexión es generado por compresión (S11) en la cara superior, con un valor de 15.76 N/mm²:

Esfuerzo máximo en la viga de 20 mm cara superior



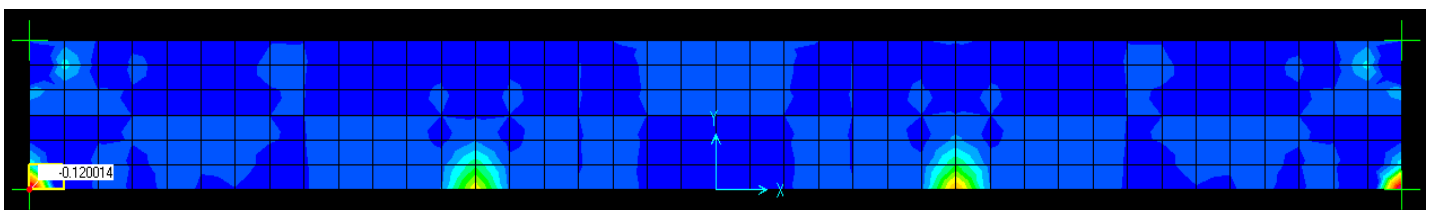
10.1.2 Esfuerzos máximos a cortante

A continuación se muestran los esfuerzos máximos a cortante (positivos y negativos) generados en cada una de las vigas y la pared en la que se produce.

- **Esfuerzo máximo a cortante en Viga con lámina de 4mm**

El mayor cortante se da por compresión (S23) en la cara inferior, con un valor de 0.12 N/mm²:

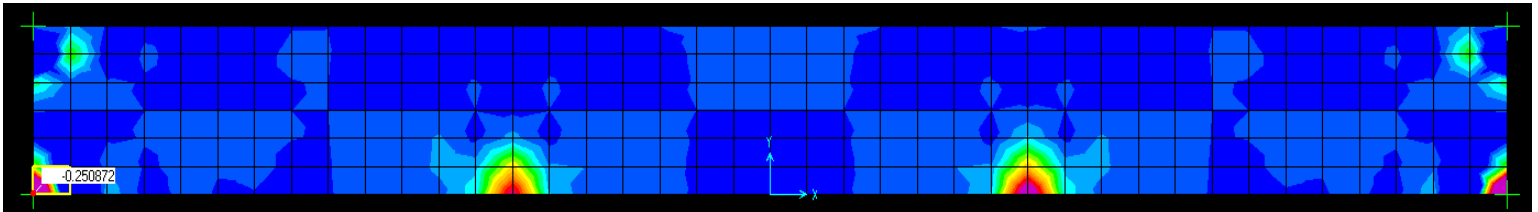
Cortante máximo en la viga de 4 mm cara inferior



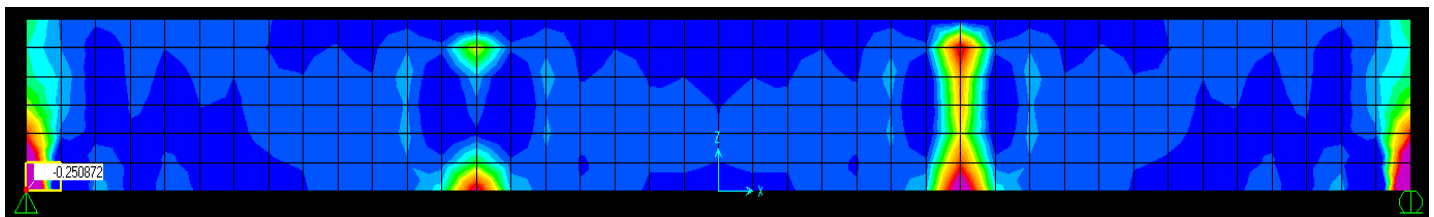
- **Esfuerzo máximo a cortante en Viga con lámina de 6mm**

El mayor cortante se da por compresión (S23) en las caras inferior y lateral, con un valor de 0.251 N/mm²:

Cortante máximo en la viga de 6 mm cara inferior



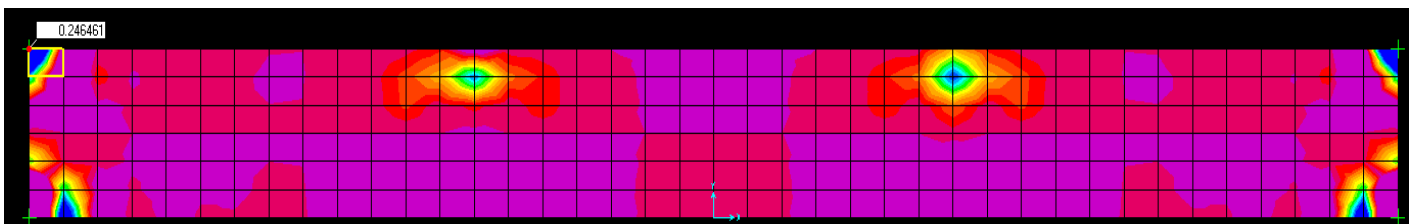
Cortante máximo en la viga de 6 mm cara lateral



- **Esfuerzo máximo a cortante en Viga con lámina de 9mm**

El mayor cortante se da por tensión (S23) en la cara inferior, con un valor de 0.25 N/mm²:

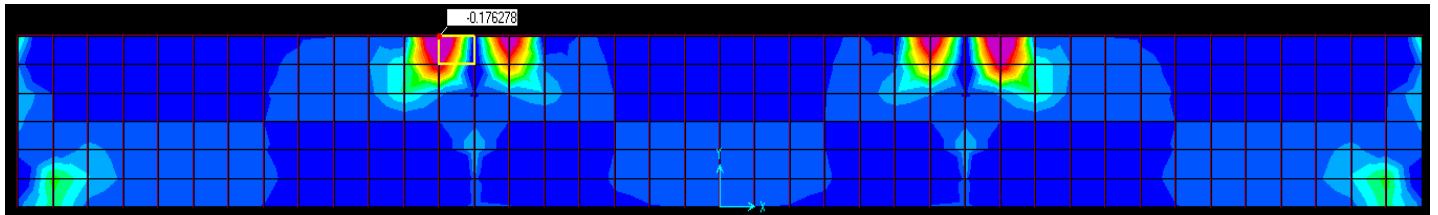
Cortante máximo en la viga de 9 mm cara inferior



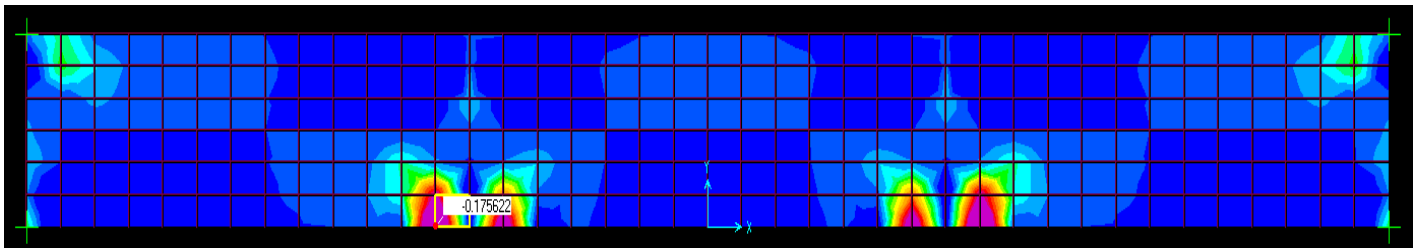
- **Esfuerzo máximo a cortante en Viga con lámina de 12mm**

El mayor cortante se da por compresión (S23) en las tres caras, con un valor de 0.176 N/mm²:

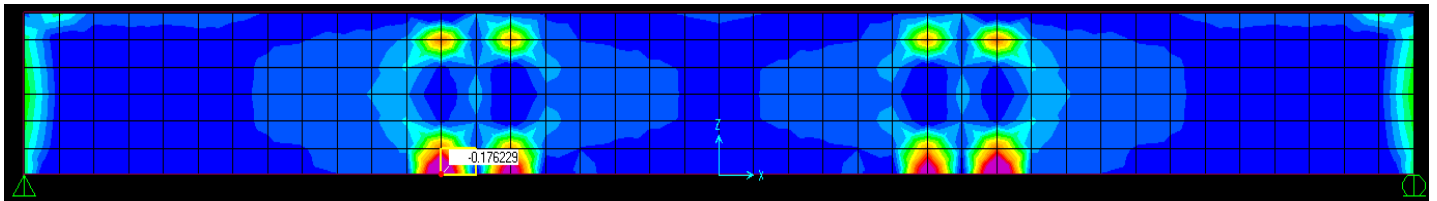
Cortante máximo en la viga de 12 mm cara superior



Cortante máximo en la viga de 12 mm cara inferior



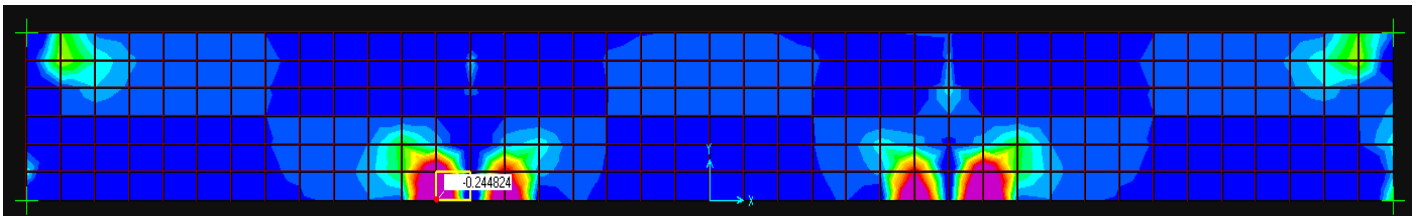
Cortante máximo en la viga de 12 mm cara lateral



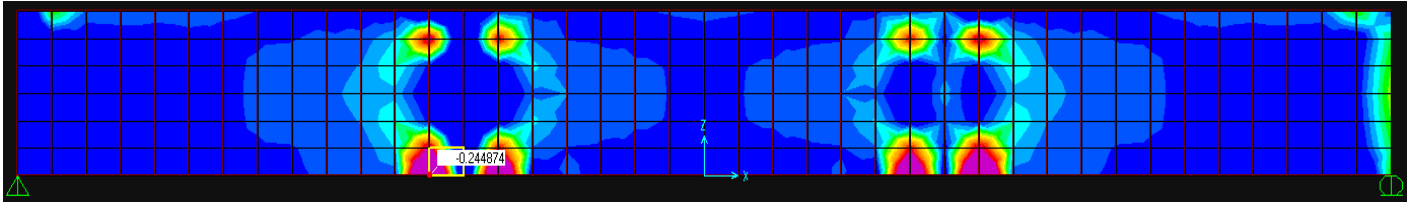
- **Esfuerzo máximo a cortante en Viga con lámina de 15mm**

El mayor cortante se da por compresión (S23) en las caras inferior y lateral, con un valor de 0.245 N/mm²:

Cortante máximo en la viga de 15 mm cara inferior



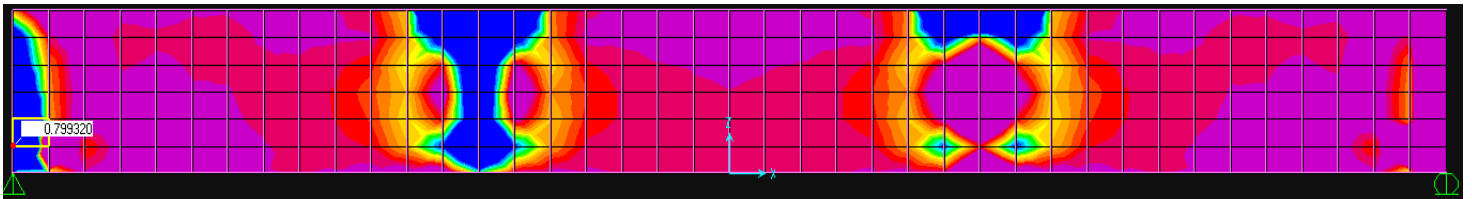
Cortante máximo en la viga de 15 mm cara lateral



- **Esfuerzo máximo a cortante en Viga con lámina de 20mm**

El mayor cortante se da por tensión (S23) en la cara lateral, con un valor de 0.799 N/mm²:

Cortante máximo en la viga de 20 mm cara lateral



10.2 ESFUERZOS MÁXIMOS EN COLUMNAS

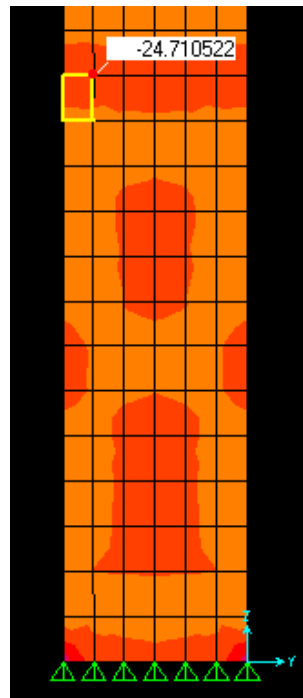
10.2.1 Esfuerzos máximos a flexión

A continuación se muestran los esfuerzos máximos a flexión generados en cada una de las columnas y el tipo de esfuerzo, a compresión o tensión. Se asume que los esfuerzos producidos en las cuatro (4) caras de la columna son iguales por simetría de la sección y de la carga aplicada.

- **Esfuerzo máximo a flexión en columna con lámina de 4mm**

El mayor esfuerzo a flexión es generado por compresión (S22) en la cara lateral, con un valor de 24.71 N/mm².

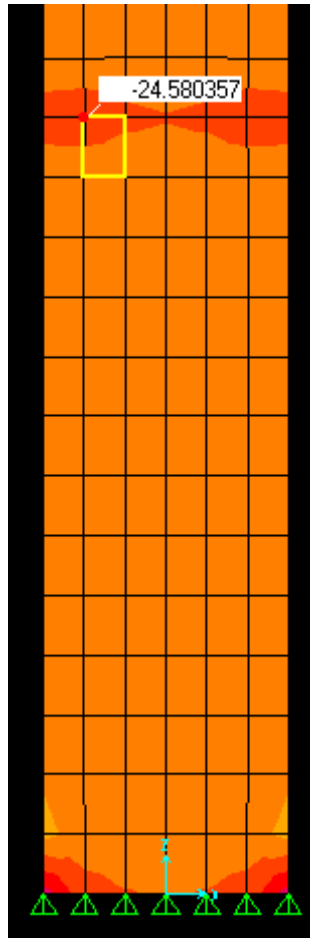
Esfuerzo máximo en la columna de 4mm



- **Esfuerzo máximo a flexión en columna con lámina de 6mm**

El mayor esfuerzo a flexión es generado por compresión (S22) en la cara lateral, con un valor de 24.58 N/mm²:

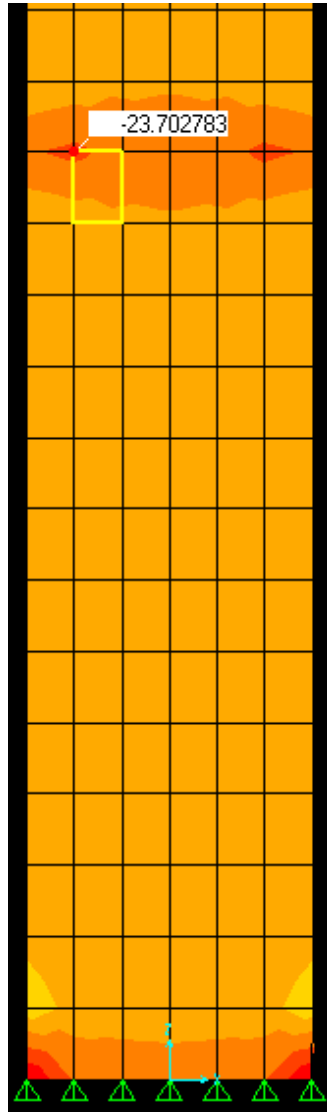
Esfuerzo máximo en la columna de 6mm



- **Esfuerzo máximo a flexión en columna con lámina de 12mm**

El mayor esfuerzo a flexión es generado por compresión (S22) en la cara lateral, con un valor de 23.7 N/mm²:

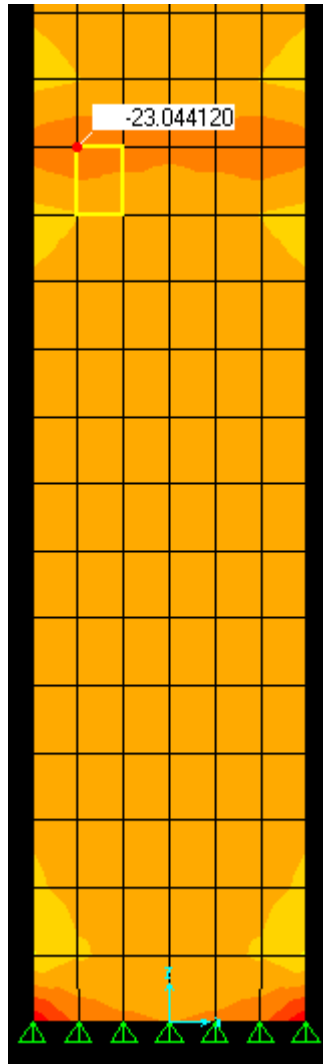
Esfuerzo máximo en la columna de 12mm



- **Esfuerzo máximo a flexión en columna con lámina de 15mm**

El mayor esfuerzo a flexión es generado por compresión (S22) en la cara lateral, con un valor de 23.04 N/mm²:

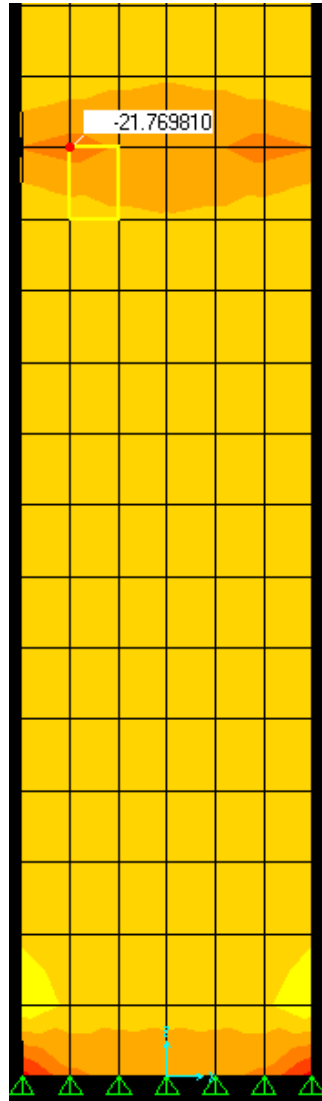
Esfuerzo máximo en la columna de 15mm



- **Esfuerzo máximo a flexión en columna con lámina de 20mm**

El mayor esfuerzo a flexión es generado por compresión (S22) en la cara lateral, con un valor de 21.76 N/mm²:

Esfuerzo máximo en la columna de 20mm



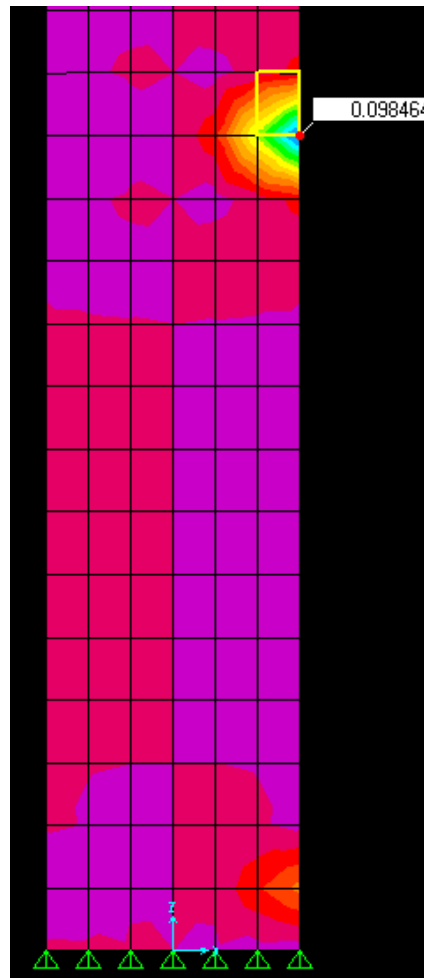
10.2.2 Esfuerzos máximos a cortante

A continuación se muestran los esfuerzos máximos a cortante (positivos y negativos) generados en cada una de las columnas. Se asume que los esfuerzos producidos en las cuatro (4) caras de la columna son iguales.

- **Esfuerzo máximo a cortante en columna con lámina de 4mm**

El mayor esfuerzo cortante es generado por tensión (S13) en la cara lateral, con un valor de 0.098 N/mm²:

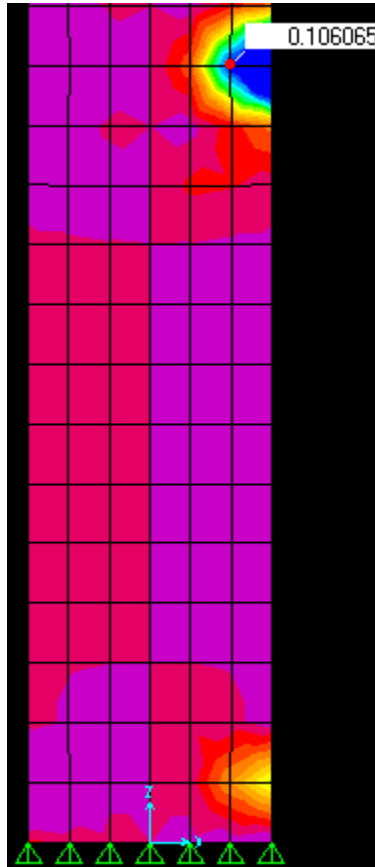
Esfuerzo máximo cortante en la columna de 4mm



- **Esfuerzo máximo a cortante en columna con lámina de 6mm**

El mayor esfuerzo cortante es generado por tensión (S13) en la cara lateral, con un valor de 0.106 N/mm²:

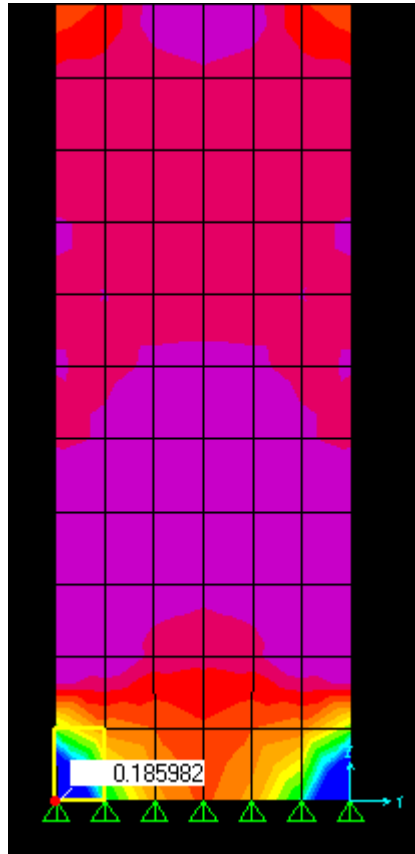
Esfuerzo máximo cortante en la columna de 6mm



- **Esfuerzo máximo a cortante en columna con lámina de 9mm**

El mayor esfuerzo cortante es generado por tensión (S23) en la cara lateral, con un valor de 0.185 N/mm²:

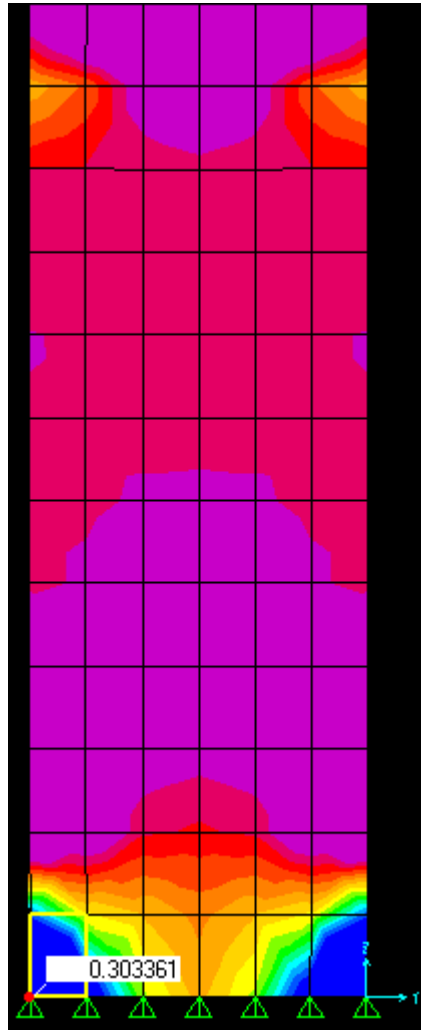
Esfuerzo máximo cortante en la columna de 9mm



- **Esfuerzo máximo a cortante en columna con lámina de 12mm**

El mayor esfuerzo cortante es generado por tensión (S23) en la cara lateral, con un valor de 0.303 N/mm²:

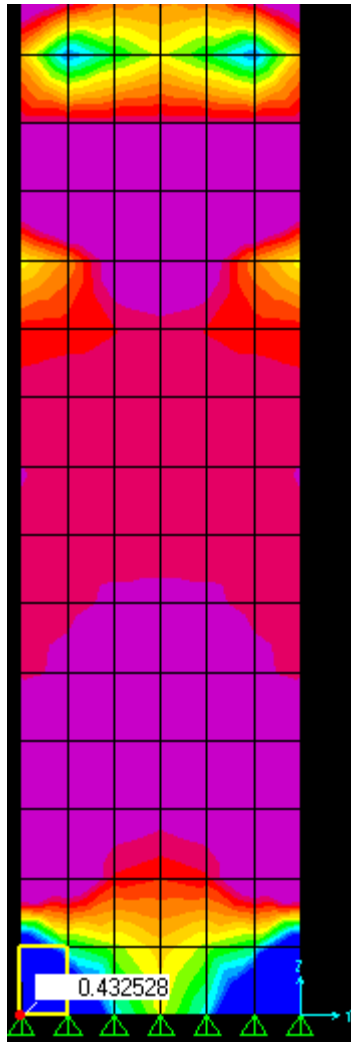
Esfuerzo máximo cortante en la columna de 12mm



- **Esfuerzo máximo a cortante en columna con lámina de 15mm**

El mayor esfuerzo cortante es generado por tensión (S23) en la cara lateral, con un valor de 0.432 N/mm²:

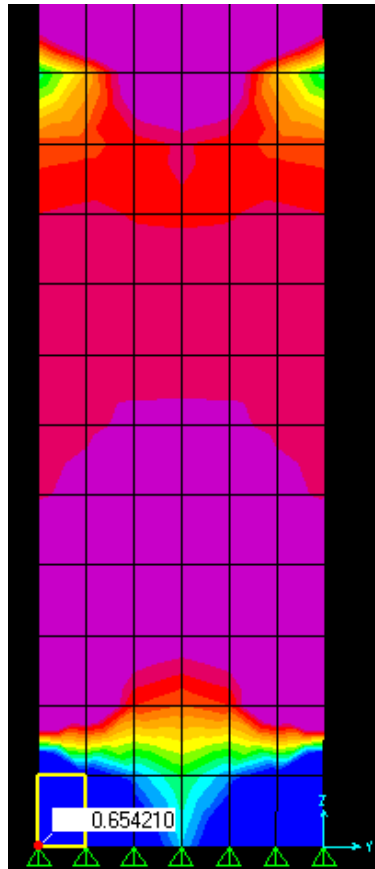
Esfuerzo máximo cortante en la columna de 15mm



- **Esfuerzo máximo a cortante en columna con lámina de 20mm**

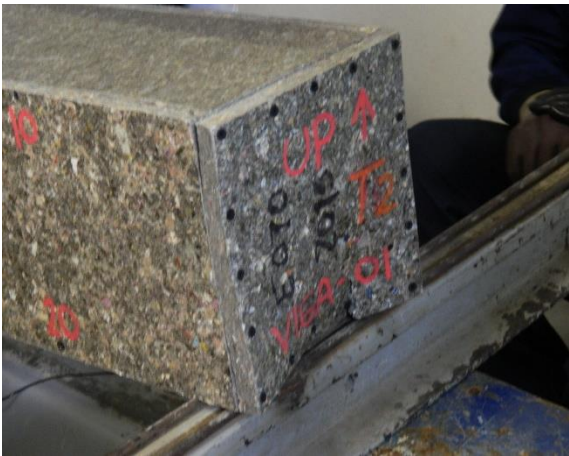
El mayor esfuerzo cortante es generado por tensión (S23) en la cara lateral, con un valor de 0.654N/mm²:

Esfuerzo máximo cortante en la columna de 20mm



10.3 REGISTRO FOTOGRÁFICO

Fallas Vigas



Fallas columnas

