

Estimación de la resistencia de las uniones cubierta-muro en paneles METECNO de bajo peso para cargas de viento

Juan Carlos Burbano García



Pontificia Universidad Javeriana

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Civil

Bogotá

2012

Estimación de la resistencia de las uniones cubierta-muro en paneles METECNO de bajo peso para cargas de viento

Juan Carlos Burbano García

Trabajo presentado para la obtención del título de ingeniero civil

Daniel Ruiz valencia

Ingeniero Civil

(IC, MSc)



Pontificia Universidad Javeriana

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Civil

Bogotá

2012

Nota de aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá, Enero de 2012

Dedicatoria

Dedico este proyecto principalmente a mi familia y amigos quienes han sido parte de mi formación personal y profesional.

A Ricardo Burbano y Ana García, mis padres, quienes han depositado en mí toda su confianza y me han apoyado a lo largo de mi carrera. Me siento orgulloso de haber recibido sus enseñanzas y su sabiduría y espero que siempre se sientan orgullosos de mí.

A mi hermana Marcela Burbano y demás familiares por haber estado presentes y siempre pendientes a lo largo de mis estudios universitarios.

A mis amigos que siempre me han demostrado su apoyo y acompañamiento en las diferentes etapas de mi vida.

Juan Carlos Burbano García

Agradecimientos

Agradezco de manera personal y sincera al Ingeniero Daniel Ruiz Valencia por haber sido un excelente director y guía a lo largo del desarrollo de este proyecto de grado. Su apoyo fue vital para lograr el objetivo de este proyecto y para mi formación personal como profesional y como ciudadano.

Agradezco a la Ing. Mónica Riveros por haber sido parte activa y representante de la empresa METECNO de Colombia en el desarrollo de este trabajo

Quisiera agradecer al Ingeniero José Antonio Magallón por su colaboración, aporte y participación en el desarrollo de este proyecto de grado. Su conocimiento y su cooperación le dieron un desarrollo más integral a este trabajo.

Al Laboratorio de Pruebas y Ensayos de la Pontificia Universidad Javeriana de Bogotá y a su personal quienes hicieron posible la realización de esta labor.

Al Taller Industrial Bolívar que realizó de manera ágil la ejecución y adecuación de elementos adicionales para la realización de los ensayos de este trabajo.

Y a los demás profesores del departamento de ingeniería civil que realizaron aportes valiosos que contribuyeron al desarrollo de mi formación como profesional y del trabajo de grado

Tabla de contenido

1	Introducción.....	16
1.1	Justificación.....	19
1.2	Objetivo General.....	20
1.3	Objetivos Específicos	20
2	Marco teórico	21
2.1	Sistema METECNO	21
2.2	Investigaciones previas	24
3	Diseño experimental.....	30
3.1	Diseño del montaje	30
3.2	Tipos de uniones evaluadas.....	37
3.3	Montaje experimental	42
4	Modelos numéricos	47
4.1	Vivienda Tipo Sistema METECNO.....	47
4.2	Modelación pruebas experimentales	48
5	Pruebas y ensayos	50
5.1	Construcción del montaje.....	50
5.2	Tipología de ensayos realizados	52
5.2.1	Sistema tradicional.....	52
5.2.2	Sistema tradicional y tornillos con capelote	53
5.2.3	Sistema tornillo pasante y tornillos con capelote	54
5.2.4	Sistema remache pop.....	54
5.2.5	Sistema remache pop y tornillos con capelote	55
6	Resultados y discusión.....	56
6.1	Análisis del comportamiento de la unión.....	56
6.1.1	Resultados de ensayos cíclicos con desplazamientos de 2mm.....	56
6.1.2	Resultados de ensayos cíclicos con desplazamientos de 4mm.....	62
6.1.3	Resultados de ensayos cíclicos con desplazamientos de 8mm.....	67
6.1.4	Resultados de ensayos estáticos	72

6.2	Tipología de falla	75
6.3	Comparación con requerimientos de NSR – 10.....	78
7	Conclusiones	91
8	Recomendaciones de uso y fabricación de las uniones para la empresa METECNO.....	92
9	Bibliografía.....	94
10	Anexos	96

Figuras

Figura 1. Panel Monowall (METECNO de Colombia)	22
Figura 2. Panel Techmet (METECNO de Colombia).....	23
Figura 3. Perfil de doble aleta para cimentación del sistema METECNO.....	23
Figura 4. Detalle perfil de doble aleta del sistema METECNO	23
Figura 5. Perfil de doble aleta con pendiente para uniones de cubierta-muro del sistema METECNO.....	23
Figura 6. Detalle perfil de doble aleta con pendiente del sistema METECNO.....	23
Figura 7. Viviendas de interés social construidas con el sistema METECNO	24
Figura 8. Disposición del ensayo de desgarramiento realizado por (Ruiz <i>et al</i> , 2009).....	26
Figura 9. Ciclos de histéresis para ensayos cíclicos de la referencia (Ruiz <i>et al</i> , 2009) a 2mm de amplitud.....	27
Figura 10. Ciclos de histéresis para ensayos cíclicos de la referencia (Ruiz <i>et al</i> , 2009) a 4mm de amplitud.....	27
Figura 11. Ensayo monotónico de la unión panel-remate de la referencia (Ruiz <i>et al</i> , 2009)	27
Figura 12. Mecanismo de falla de los ensayos monotónicos de las conexiones panel-remate.....	28
Figura 13. Modelación por elementos finitos de los ensayos de la referencia (Ruiz <i>et al</i> , 2007).....	28
Figura 14. Plano arquitectónico de la vivienda tipo e imagen de la vivienda con el sistema METECNO de Colombia.....	30
Figura 15. Diseño experimental de las probetas a evaluar	31
Figura 16. Vista frontal diseño probetas.....	31
Figura 17. Vista lateral izquierda diseño probetas.....	31
Figura 18. Vista superior diseño probetas.....	31
Figura 19. Vista lateral derecha diseño probetas.....	31
Figura 20. Plano esquemático del montaje (Vista frontal).....	32
Figura 21. Plano esquemático del montaje (Vista superior).....	33
Figura 22. Plano esquemático del montaje de cimentación (Corte A-A).....	33
Figura 23. Plano esquemático del montaje (Corte B-B)	34
Figura 24. Plano esquemático del montaje.....	35
Figura 25. Plano esquemático del montaje (Corte A-A)	36
Figura 26. Esquema de unión tornillo autoperforante	37
Figura 27. Detalle unión tornillo autoperforante	37
Figura 28. Esquema tornillo con capelote	38
Figura 29. Esquema de unión tornillo autoperforante con tornillo con capelote (METECNO de Colombia).....	38

Figura 30. Detalle unión tornillo autoperforante con tornillo con capelote	38
Figura 31. Detalle tornillo pasante (METECNO de Colombia).....	39
Figura 32. Esquema de unión tornillo autoperforante con tornillo pasante (METECNO de Colombia)	39
Figura 33. Detalle unión tornillo pasante con tornillo con capelote.....	40
Figura 34. Esquema de remache pop (METECNO de Colombia)	40
Figura 35. Detalle unión remache pop.....	40
Figura 36. Esquema de unión remache pop con tornillo con capelote (METECNO de Colombia)	41
Figura 37. Detalle unión remache pop con tornillo con capelote.....	41
Figura 38. Aseguramiento del montaje al marco de reacción.....	42
Figura 39. Unión de los remates en U con canales en acero	42
Figura 40. Montaje de las probetas por parte del personal de METECNO de Colombia...	43
Figura 41. Montaje de las probetas por parte del personal de METECNO de Colombia..	43
Figura 42. Ubicación del montaje	44
Figura 43. Aseguramiento del montaje	44
Figura 44. Esquema explicativo aplicación de la carga	45
Figura 45. Detalle aplicación de la carga	45
Figura 46. Esquema del montaje experimental.....	46
Figura 47. Modelación de la vivienda tipo (Ruiz et al. 2007)	48
Figura 48. Montaje experimental desarrollado	50
Figura 49. Canales de sujeción y perfiles de doble aleta	51
Figura 50. Inicio del montaje experimental	51
Figura 51. Montaje listo para evaluar.....	52
Figura 52. Montaje sistema tradicional	53
Figura 53. Falla típica sistema tradicional.....	53
Figura 54. Sistema tradicional con tornillo con capelote.....	53
Figura 55. Falla típica sistema tradicional con tornillo con capelote.....	53
Figura 56. Sistema tornillo pasante y tornillo con capelote	54
Figura 57. Falla típica sistema tornillo pasante y tornillo con capelote	54
Figura 58. Montaje sistema remache pop	54
Figura 59. Falla típica sistema remache pop.....	54
Figura 60. Montaje sistema remache pop con tornillo con capelote.....	55
Figura 61. Falla típica sistema remache pop con tornillo con capelote.....	55
Figura 62. Ensayo de esfuerzo de adherencia de la referencia (Cimoc, 2000)	76
Figura 63. Falla del ensayo de adherencia de la referencia (Cimoc, 2000)	76
Figura 64. Esfuerzos de adherencia sobre las probetas ante la aplicación de la fuerza promedio (4.78 kN)	77
Figura 65. Mapa de zonas de amenaza eólica (NSR - 10)	83
Figura 66. Esquemas de aplicación de fuerzas de viento (NSR - 10).....	84

Figura 67. Aplicación de fuerzas de viento de la NSR-10 al modelo de la cubierta (kN/m ²).	87
Figura 68. Zonas de sobrecarga de la conexión para separación de 300mm.	88
Figura 69. Zonas de sobrecarga de la conexión para separación de 150mm	89
Figura 70. Zonas de sobrecarga de la conexión para separación de 100mm	89

Tablas

Tabla 1. Propiedades del acero galvanizado del sistema METECNO	21
Tabla 2. Propiedades de la pintura de recubrimiento de los paneles del sistema METECNO.....	21
Tabla 3. Propiedades poliuretano de alta densidad del sistema METECNO	22
Tabla 4. Revisión de resultados experimentales de ensayos realizados al sistema METECNO. (Ruiz <i>et al.</i> , 2007).....	25
Tabla 5. Propiedades del acero galvanizado para la modelación (Ruiz <i>et al.</i> , 2007)	47
Tabla 6. Propiedades del poliuretano para la modelación (Ruiz <i>et al.</i> , 2007)	47
Tabla 7. Resultados y comparación de ensayos cíclicos realizados.	75
Tabla 8. Resultados de ensayos de adherencia de la referencia (Ruiz <i>et al.</i> , 2007)	76
Tabla 9. Resultados ensayos estáticos realizados a cada uno de los tipos de conexión. .	77
Tabla 10. Parámetros de aumento de velocidad para Kzt (NSR – 10)	81
Tabla 11. Factores para la determinación de Kzt (NSR - 10)	81
Tabla 12. Factor por ajuste de la altura de la edificación (NSR - 10)	82
Tabla 13. Factores de importancia para análisis de viento (NSR - 10)	84
Tabla 14. Parámetros de diseño fuerzas de viento (NSR - 10)	85
Tabla 15. Valores de presión del viento básica (NSR - 10).....	85
Tabla 16. Valores de Presiones básicas de diseño según NSR – 10	86
Tabla 17. Fuerzas promedio y máximas por perno utilizado.....	87
Tabla 18. Fuerza resistente por tornillo	88
Tabla 19. Comparación de pernos que exceden la resistencia estimada para cada tipo de conexión.	89
Tabla 20. Presiones resultantes en cada dirección de diseño.....	90
Tabla 21. Tablas de diseño de luces admisibles de la referencia (Metecno, 2011).....	90

Gráficas

Gráfica 1. Ciclos de histéresis para un desplazamiento de 2mm en la conexión normal (Prueba 1).....	57
Gráfica 2. Ciclos de histéresis para un desplazamiento de 2mm en la conexión normal (Prueba 2).....	57
Gráfica 3. Ciclos de histéresis para un desplazamiento de 2mm en la conexión normal (Prueba 3).....	57
Gráfica 4. Ciclos de histéresis para un desplazamiento de 2mm en la conexión normal + tornillo con capelote. (Prueba 4).....	58
Gráfica 5. Ciclos de histéresis para un desplazamiento de 2mm en la conexión normal + tornillo con capelote. (Prueba 5).....	58
Gráfica 6. Ciclos de histéresis para un desplazamiento de 2mm en la conexión normal + tornillo con capelote. (Prueba 6).....	58
Gráfica 7. Ciclos de histéresis para un desplazamiento de 2mm en la conexión tornillo pasante + tornillo con capelote. (Prueba 7)	59
Gráfica 8. Ciclos de histéresis para un desplazamiento de 2mm en la conexión tornillo pasante + tornillo con capelote. (Prueba 8)	59
Gráfica 9. Ciclos de histéresis para un desplazamiento de 2mm en la conexión tornillo pasante + tornillo con capelote. (Prueba 9)	59
Gráfica 10. Ciclos de histéresis para un desplazamiento de 2mm en la conexión remache pop. (Prueba 10).....	60
Gráfica 11. Ciclos de histéresis para un desplazamiento de 2mm en la conexión remache pop. (Prueba 11).....	60
Gráfica 12. Ciclos de histéresis para un desplazamiento de 2mm en la conexión remache pop. (Prueba 12).....	60
Gráfica 13. Ciclos de histéresis para un desplazamiento de 2mm en la conexión remache pop. (Prueba 13).....	61
Gráfica 14. Ciclos de histéresis para un desplazamiento de 2mm en la conexión remache pop. (Prueba 14).....	61
Gráfica 15. Ciclos de histéresis para un desplazamiento de 2mm en la conexión remache pop. (Prueba 15).....	61
Gráfica 16. Ciclos de histéresis para un desplazamiento de 4mm en la conexión normal. (Prueba 16)	62
Gráfica 17. Ciclos de histéresis para un desplazamiento de 4mm en la conexión normal. (Prueba 17)	62
Gráfica 18. Ciclos de histéresis para un desplazamiento de 4mm en la conexión normal. (Prueba 18)	62
Gráfica 19. Ciclos de histéresis para un desplazamiento de 4mm en la conexión normal + tornillo con capelote. (Prueba 19).....	63

Gráfica 20. Ciclos de histéresis para un desplazamiento de 4mm en la conexión normal + tornillo con capelote. (Prueba 20).....	63
Gráfica 21. Ciclos de histéresis para un desplazamiento de 4mm en la conexión normal + tornillo con capelote. (Prueba 21).....	63
Gráfica 22. Ciclos de histéresis para un desplazamiento de 4mm en la conexión tornillo pasante + tornillo con capelote. (Prueba 22).....	64
Gráfica 23. Ciclos de histéresis para un desplazamiento de 4mm en la conexión tornillo pasante + tornillo con capelote. (Prueba 23).....	64
Gráfica 24. Ciclos de histéresis para un desplazamiento de 4mm en la conexión tornillo pasante + tornillo con capelote. (Prueba 24).....	64
Gráfica 25. Ciclos de histéresis para un desplazamiento de 4mm en la conexión remache pop. (Prueba 25).....	65
Gráfica 26. Ciclos de histéresis para un desplazamiento de 4mm en la conexión remache pop. (Prueba 26).....	65
Gráfica 27. Ciclos de histéresis para un desplazamiento de 4mm en la conexión remache pop. (Prueba 27).....	65
Gráfica 28. Ciclos de histéresis para un desplazamiento de 4mm en la conexión remache pop + tornillo con capelote. (Prueba 28).....	66
Gráfica 29. Ciclos de histéresis para un desplazamiento de 4mm en la conexión remache pop + tornillo con capelote. (Prueba 29).....	66
Gráfica 30. Ciclos de histéresis para un desplazamiento de 4mm en la conexión remache pop + tornillo con capelote. (Prueba 30).....	66
Gráfica 31. Ciclos de histéresis para un desplazamiento de 8mm en la conexión normal. (Prueba 31)	67
Gráfica 32. Ciclos de histéresis para un desplazamiento de 8mm en la conexión normal. (Prueba 32)	67
Gráfica 33. Ciclos de histéresis para un desplazamiento de 8mm en la conexión normal. (Prueba 33)	67
Gráfica 34. Ciclos de histéresis para un desplazamiento de 8mm en la conexión con tornillo con capelote normal. (Prueba 34)	68
Gráfica 35. Ciclos de histéresis para un desplazamiento de 8mm en la conexión con tornillo con capelote normal. (Prueba 35)	68
Gráfica 36. Ciclos de histéresis para un desplazamiento de 8mm en la conexión con tornillo con capelote normal. (Prueba 36)	68
Gráfica 37. Ciclos de histéresis para un desplazamiento de 8mm en la conexión con tornillo pasante y tornillo con capelote. (Prueba 37)	69
Gráfica 38. Ciclos de histéresis para un desplazamiento de 8mm en la conexión con tornillo pasante y tornillo con capelote. (Prueba 38)	69
Gráfica 39. Ciclos de histéresis para un desplazamiento de 8mm en la conexión con tornillo pasante y tornillo con capelote. (Prueba 39)	69

Gráfica 40. Ciclos de histéresis para un desplazamiento de 8mm en la conexión con remache pop. (Prueba 40).....	70
Gráfica 41. Ciclos de histéresis para un desplazamiento de 8mm en la conexión con remache pop. (Prueba 41).....	70
Gráfica 42. Ciclos de histéresis para un desplazamiento de 8mm en la conexión con remache pop. (Prueba 42).....	70
Gráfica 43. Ciclos de histéresis para un desplazamiento de 8mm en la conexión con remache pop y tornillo con capelote. (Prueba 43)	71
Gráfica 44. Ciclos de histéresis para un desplazamiento de 8mm en la conexión con remache pop y tornillo con capelote. (Prueba 44)	71
Gráfica 45. Ciclos de histéresis para un desplazamiento de 8mm en la conexión con remache pop y tornillo con capelote. (Prueba 45)	71
Gráfica 46. Ensayos monotónicos para las probetas tipo 1	72
Gráfica 47. Ensayos monotónicos para las probetas tipo 2	72
Gráfica 48. Ensayos monotónicos para las probetas tipo 3	73
Gráfica 49. Ensayos monotónicos para las probetas tipo 4	73
Gráfica 50. Ensayos monotónicos para las probetas tipo 5	74
Gráfica 51. Consolidación de los datos obtenidos de los ensayos estáticos	74

Anexos

- 1. Registro fotográfico de instalación del sistema METECNO.**
- 2. Planos esquemáticos del montaje experimental**

1 Introducción

Las fuerzas ocasionadas por el viento al igual que las fuerzas sísmicas son los factores ambientales dominantes en el análisis estructural de cualquier edificación. Estos tipos de fuerza producen por igual diferentes ejemplares de daño sobre las estructuras; sin embargo las fuerzas de viento tienen una mayor presencia a lo largo del tiempo que las fuerzas sísmicas, cuya ocurrencia es menos frecuente. (Holmes, 2008)

Dichas fuerzas de viento se encuentran condicionadas en mayor parte por la meteorología de la zona donde se ubica la estructura. De esta manera, la dinámica de las fuerzas de viento se encuentra determinada directamente a diferenciales de presión en la atmósfera terrestre, los cuales a su vez se producen por diferenciales de temperatura localizados en la superficie de la tierra. Así mismo las fuerzas generadas por la rotación de la tierra que generan sistemas de circulación de aire en la atmósfera son significativas. Sus componentes verticales y horizontales resultan en la dirección del viento en la superficie terrestre. (Riera, 1998)

Por otra parte, la localización de la estructura en la superficie terrestre es un factor fundamental en el análisis de las fuerzas de viento presentes en las estructuras. Vientos fuertes localizados que se originan por tormentas fuertes o por el flujo de masas de viento originadas en valles profundos son variables que se deben analizar y tener en cuenta. De esta manera la propensión de ciclones tropicales, vendavales, huracanes o tifones, los cuales ocasionan vientos locales por fuera de los rangos esperados, son características fundamentales a tener en cuenta en cuanto al análisis y aplicación de metodologías que permitan un análisis aproximado de las fuerzas de viento sobre las edificaciones. (Gosch, 2003).

Teniendo en cuenta los factores anteriormente mencionados se ve la necesidad de realizar un análisis detallado de las fuerzas de viento que se encuentran presentes en las edificaciones. Las edificaciones de concreto, metálicas, de madera y materiales compuestos tienen diferentes respuestas ante estas cargas y se hace explícita la aproximación a un valor que permita tener en cuenta estas cargas. (Williams, 2003)

Para realizar una aproximación más exacta a la realidad en materiales compuestos es pertinente la realización de diferentes tipos de pruebas y ensayos que permitan observar y analizar diversos comportamientos estructurales y de respuesta ante las cargas de viento presentes en la estructura teniendo en cuenta los factores anteriormente mencionados, así como la normatividad vigente para la zona.

En Colombia, el sistema estructural prefabricado de la empresa METECNO de Colombia requiere del análisis de resistencia del sistema ante fuerzas de viento en el territorio colombiano. Para ello se ha tenido en cuenta el código colombiano de construcción sismo resistente NSR – 10, el cual establece en su título B una normatividad y unos códigos pertinentes para el análisis de estas cargas presentes en las estructuras.

El sistema prefabricado de METECNO de Colombia está siendo evaluado según los requerimientos de la normatividad colombiana (NSR – 10) con el fin de ser certificado

como un material apto para la construcción de viviendas de un solo nivel. Dicha certificación es otorgada por la comisión asesora permanente del régimen de construcción sismo resistente.

De esta manera múltiples esfuerzos han sido realizados por la empresa productora de la mano de expertos en el análisis de sistemas estructurales y materiales de construcción de manera que se tenga certeza y evidencia científica de las bondades del sistema estructural y de su buen desempeño para las condiciones tanto sísmicas como de fuerzas de viento en el territorio Colombiano.

Para cumplir con los requerimientos exigidos por la comisión asesora permanente del régimen de construcción sismo resistente se han realizado diversos ensayos que certifiquen las características propias del material de construcción. Muchas de esas pruebas han tenido lugar en el laboratorio de pruebas y ensayos de la Pontificia Universidad Javeriana en Bogotá. Teniendo en cuenta que dicho establecimiento cuenta con las locaciones, las herramientas, los equipos y el recurso humano adecuado para la realización de las pruebas; la empresa METECNO de Colombia ha trabajado de la mano con el laboratorio para la obtención de la aprobación de la comisión.

En el laboratorio de pruebas y ensayos de la Pontificia universidad Javeriana en Bogotá se han realizado numerosos ensayos en los cuales el sistema estructural prefabricado de la empresa METECNO ha demostrado buenas características. Cabe anotar que propiedades intrínsecas del material como porcentaje de absorción, resistencia a la compresión, resistencia al esfuerzo cortante, ensayos de impacto, ensayos de flexión entre otros fueron realizados sobre los paneles.

Así mismo, se ha evaluado el sistema a través de ensayos cíclicos y estáticos con el fin de evaluar la interacción entre las conexiones y los muros del sistema estructural, así como la resistencia a la extracción de elementos de sujeción a la cimentación, resistencia de uniones entre muros y remates de fijación entre otros, con el fin de evaluar la posible respuesta sísmica del sistema estructural ya constituido.

Revisando la necesidad de certificar el material como apropiado para la construcción se ve necesaria la evaluación de nuevos aspectos del sistema estructural, ahora interactuando entre los elementos que lo componen. Para ello se ha realizado la modelación de una vivienda tipo de un solo nivel que permita evaluar el comportamiento en conjunto del sistema estructural. Es así como la necesidad de la evaluación de las uniones entre los elementos tipo muro con los perfiles de anclaje, así como las uniones entre la cubierta y el muro tienen su justificación y se hace explícita para la evaluación del sistema estructural.

Para la revisión de las uniones entre la cubierta y el muro es necesario el estudio del comportamiento mecánico de la unión de manera que sea más apreciable el trabajo que realiza este elemento en el sistema estructural así como el tipo de falla que presenta ante la aplicación de cargas de viento. Para ello se ha realizado un planteamiento de montaje, el cuál reproduzca de una manera fiel y acertada las condiciones de viento a las cuales se somete el sistema estructural. Dicho montaje corresponde a las características y patrones de instalación utilizados por la empresa METECNO de Colombia.

El montaje experimental consta de un elemento panel tipo cubierta (TECHMET) unido en sus extremos a dos elementos panel tipo muro (MONOWALL). La unión entre los elementos tipo cubierta y tipo muro serán las utilizadas por METECNO de Colombia. Dicha unión brindará una pendiente del 10% de manera que se reproduzca la condición de la vivienda tipo que se modeló previamente.

Los muros se han asegurado al perfil de anclaje a la cimentación de la vivienda. A su vez los perfiles de anclaje se encuentran unidos firmemente a dos elementos metálicos en cada lado asegurando la condición de apoyo firme hacia la superficie. De esta forma el montaje experimental reproduce las condiciones de viento aplicadas sobre las uniones.

Para la realización de la prueba se ubicó las probetas a evaluar en el marco de reacción para que sobre este se utilice el sistema MTS y reproduzca la acción dinámica y estática del viento sobre el sistema estructural. Teniendo en cuenta que la acción del sistema MTS reproduce una fuerza puntual, se diseñó un aditamento rígido que transmite la carga de manera perpendicular al plano de la cubierta al 10% de pendiente de inclinación. Dicho aditamento consiste en perfiles de acero tipo canal lo suficientemente rígidos para distribuir una carga uniforme sobre los paneles tipo cubierta. Además se utilizaron bolsas de arena para contribuir a dicho fin.

Paralelo a la realización de las pruebas experimentales se realizó la modelación de la vivienda tipo en el software estructural SAP2000. A través de ello se evaluó las pruebas experimentales y los mecanismos de falla que se presentaron en el montaje. De esta manera se obtuvo valores de fuerzas de viento resistentes por el sistema estructural. Por otra parte se realizó la modelación del sistema estructural de la vivienda tipo con el fin de realizar la aplicación de las fuerzas de viento estipuladas por el código colombiano de construcción sismo resistente NSR – 10 para comparar la magnitud de las fuerzas actuantes en el sistema con las resistentes obtenidas en el Laboratorio de Pruebas y Ensayos de la Pontificia Universidad Javeriana a través de las pruebas mencionadas anteriormente.

De esta manera se logró, a través de la realización de este trabajo, la estimación de la resistencia de la unión entre cubierta y muro para el sistema estructural desarrollado por la empresa METECNO de Colombia. Para ello se revisó el comportamiento mecánico de las uniones en el laboratorio, se modeló las condiciones de viento y se comparó los resultados en el laboratorio con dicha modelación.

Este trabajo consta de las siguientes partes: El capítulo 2 que contiene una revisión del sistema estructural prefabricado de la empresa METECNO de Colombia, así como otras investigaciones realizadas que se asemejan a la evaluación realizada. El capítulo 3 que establece el proceso de diseño y establecimiento del montaje. El capítulo 4 en el que se da a conocer la modelación del sistema estructural de la vivienda tipo, así como el montaje experimental de las pruebas. El capítulo 5 que muestra la construcción del montaje y su ubicación en el marco de reacción y el sistema MTS. Así mismo se dan a conocer los diferentes ensayos realizados. El capítulo 6 que contiene los resultados resumidos de los ensayos y su respectivo análisis. El capítulo 7 incluye las conclusiones de la realización del trabajo. Finalmente en el capítulo 8 se dan a conocer las recomendaciones a partir de los resultados del trabajo realizado.

1.1 Justificación

El acceso a una vivienda es una necesidad prioritaria en la mayoría de los países del mundo, principalmente en Latinoamérica y el Caribe. Según datos y estadísticas del Banco Mundial, la pobreza ha descendido continuamente en los últimos 20 años en la zona, sin embargo aún hay mucho por hacer en relación con este problema. (Departamento de investigación del banco mundial, 2010)

En Colombia, donde el 45.1% de la totalidad de su población (45 millones de habitantes) es de bajos recursos económicos (Banco Mundial, 2011), el acceso a un techo es un privilegio que no tienen la mayoría, dado que tan solo el 44.9% de la población tiene vivienda propia. (DANE, 2005)

Teniendo en cuenta las anteriores características de la población colombiana, múltiples esfuerzos se han realizado para encontrar alternativas de vivienda digna. La implementación de proyectos de diseño y ejecución de proyectos urbanos para la construcción de viviendas de interés social que benefician a las familias más necesitadas son algunos de los propósitos del plan nacional de desarrollo impulsado por el gobierno nacional. (DNP, 2011)

Según algunos estudios económicos realizados en nuestro país, las dificultades los hogares para aprovechar los subsidios brindados por el gobierno radican en la incapacidad de los hogares de lograr un cierre financiero, contribuyendo a la desviación de los recursos hacia otras necesidades. (CAMACOL, 2010)

Con el fin de encontrar una alternativa de vivienda para la población vulnerable, se han realizado diversos estudios de sistemas estructurales, los cuales tienen como objetivo plantear nuevas opciones que contribuyan a la construcción de edificaciones en gran cantidad que suplan más necesidades y tengan buenas características y condiciones de habitabilidad.

Revisando el anterior objetivo se ha presentado una nueva opción de sistema estructural liviano y de bajo costo, la cual es desarrollada por la empresa METECNO de Colombia. Dicha organización implementó y efectuó la fabricación de paneles compuestos autoportantes, los cuales consisten en láminas de acero como recubrimiento y poliuretano en su interior. El sistema estructural ha sido evaluado y examinado según el código colombiano de construcción sismo resistente NSR – 10 en la medida que brinda los parámetros necesarios para un buen desempeño que le permita ser certificado estructuralmente por la normatividad (AIS, 2010).

Hoy en día aún existe la necesidad de estudiar nuevas alternativas de sistemas estructurales para viviendas de un solo nivel que sean capaces de responder eficazmente ante fuerzas sísmicas y al mismo tiempo garanticen la seguridad de sus habitantes a un bajo costo. Por tal razón se han realizado pruebas y ensayos con el fin de certificar dichas características experimentales y analíticas las cuales han sido realizadas en laboratorios certificados, como el laboratorio de pruebas y ensayos de la Pontificia Universidad Javeriana, donde se han realizados ensayos de resistencia sísmica del sistema estructural de bajo peso. (Ruiz et al, 2007)

De igual manera, la realización de ensayos cíclicos y estáticos han sido indispensables para evaluar la resistencia sísmica de los elementos muros y las conexiones de paneles (Ruiz et al, 2009). Estos ensayos han arrojado resultados interesantes que permiten considerar el sistema estructural propuesto por METECNO de Colombia como un sistema sismo resistente para viviendas de un piso; teniendo en cuenta varias de sus características tales como (i) bajo peso, (ii) rigidez relativa, (iii) capacidad de disipación de energía en el rango inelástico, (iv) ciclos de histéresis estables entre otros.

El sistema estructural brinda las anteriores características en cuanto al análisis de sismo resistencia respecta; sin embargo la evaluación detallada ante cargas de viento en los elementos de conexión entre muros y cubiertas aún no ha sido desarrollada. A partir de ello se ve la necesidad de efectuar una evaluación experimental de su resistencia, la cual responda los requisitos de funcionamiento apropiado para las condiciones extremas de viento en el territorio colombiano. Por lo anterior; es indispensable realizar un estudio del comportamiento de las uniones entre muro y cubierta de los paneles de bajo peso con el fin de comparar dicha resistencia de la conexión con las demandas de fuerza de viento establecidas código colombiano de construcción sismo resistente NSR – 10 en su capítulo B.

1.2 Objetivo General

- ✓ Estimar la resistencia de la unión entre la cubierta y los muros del sistema estructural prefabricado de bajo peso fabricado por la empresa METECNO ante la aplicación de fuerzas de viento

1.3 Objetivos Específicos

- ✓ Establecer en el laboratorio el comportamiento mecánico de las conexiones entre muro y cubierta (sistema METECNO) ante cargas perpendiculares al plano de la cubierta.
- ✓ Evaluar numéricamente el comportamiento de las uniones entre muros y cubierta del sistema estructural de la empresa METECNO ante cargas de viento.
- ✓ Comparar la resistencia ante fuerzas de viento del sistema estructural con las demandas de fuerza del código colombiano de construcción sismo resistente NSR – 10.

2 Marco teórico

2.1 Sistema METECNO

El sistema constructivo de la empresa METECNO es un sistema innovador de última tecnología en el campo de la construcción, el cual consiste en paneles inyectados con poliuretano de alta densidad para utilizarse como cubiertas, fachadas, muros, cuartos fríos, cámaras de sonido entre otras aplicaciones.

Los paneles METECNO han garantizado buenas propiedades térmicas, acústicas y estructurales con su sistema de paneles compuestos tipo sándwich. Su núcleo de poliuretano de alta densidad (38kg/m³), el cual se encuentra cubierto por dos láminas de acero galvanizado y pintado le garantiza ser un elemento autoportante, liviano, fácil de instalar entre otras características.

Las características de los principales componentes del panel sándwich de METECNO se dan a conocer a continuación.

Acero	
Lámina exterior e interior de acero al carbono galvanizada por el proceso de inmersión en caliente según Normas ASTM A653 y A625	
Fe E 280	Según ASTM A755 Gr C
Espesores nominales	0.4mm, 0.5mm, 0.6mm, 0.8mm
Límite de fluencia	320 N/mm ²
Elongación	33%
Propiedades Químicas	Carbono: 0.11% Magnesio: 0.44% Fósforo: 0.012% Aluminio: 0.023%
Galvanizado	El recubrimiento de Zinc es por el proceso de inmersión en caliente para obtener una capa G-90 conforme con la norma A525

Tabla 1. Propiedades del acero galvanizado del sistema METECNO

Pintura exterior de revestimiento	
Recubrimiento con base de poliéster. Resistente a agentes agresivos del ambiente.	
Espesores nominales	25µm
Dureza	>F
Grado de polimerización	>100M.E.K.
Adhesión	>95
Resistencia al dobléz	Adhesión 1T – Fisuración
Brillo	20 gloss
Resistencia a la salinidad	>500 horas

Tabla 2. Propiedades de la pintura de recubrimiento de los paneles del sistema METECNO

Poliuretano de alta densidad	
Mezcla de compuestos polioles polioxipropilénicos formulados con tensoactivos y agente espumante. En su mezcla tienen reacciones exotérmicas.	
Conductividad térmica	0.018 W/m°K +/-0.002
Absorción de agua	8.6%
Límite de fluencia del acero	320 N/mm ²
Densidad	38 Kg/m ³
Temperaturas de servicio	Mínima: -40°C Máxima: 80°C
Porcentaje celda cerrada	90%

Tabla 3. Propiedades poliuretano de alta densidad del sistema METECNO

Así mismo, la disposición correcta de los materiales mencionados anteriormente hace parte del panel tipo sándwich de la empresa METECNO de Colombia. A continuación se muestran los paneles utilizados para uso en muros y cubiertas por la organización. En la figura 1. Se aprecia la sección típica del panel tipo muro, el cual es denominado por la empresa como MONOWALL.

El panel MONOWALL estándar tiene una longitud total y una altura de 1000mm. Por otra parte el espesor del panel puede ser entre 30mm hasta 60mm. Así mismo se presentan a lo largo del panel unas hendiduras cada 62.5mm. Para la realización de este trabajo se establecieron paneles de un espesor de 50mm. A continuación en la Figura 1 se presenta la sección típica de este panel.

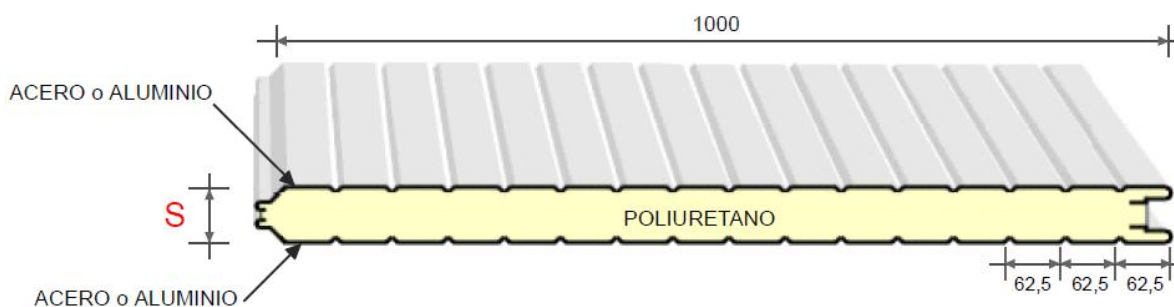


Figura 1. Panel Monowall (METECNO de Colombia)

A su vez el panel utilizado para la cubierta se denomina panel cubierta TECHMET, el cual tiene dimensiones longitudinales y transversales de 1000mm. Además este tipo de panel posee una sección transversal acanalada la cual le permite evacuar y conducir el agua. En la Figura 2 es posible apreciar la sección típica del panel tipo cubierta. Vale la pena destacar que el espesor producible por la empresa oscila entre los 25mm y los 80mm. Para la realización de este trabajo se escogió el panel con un espesor de 50mm.

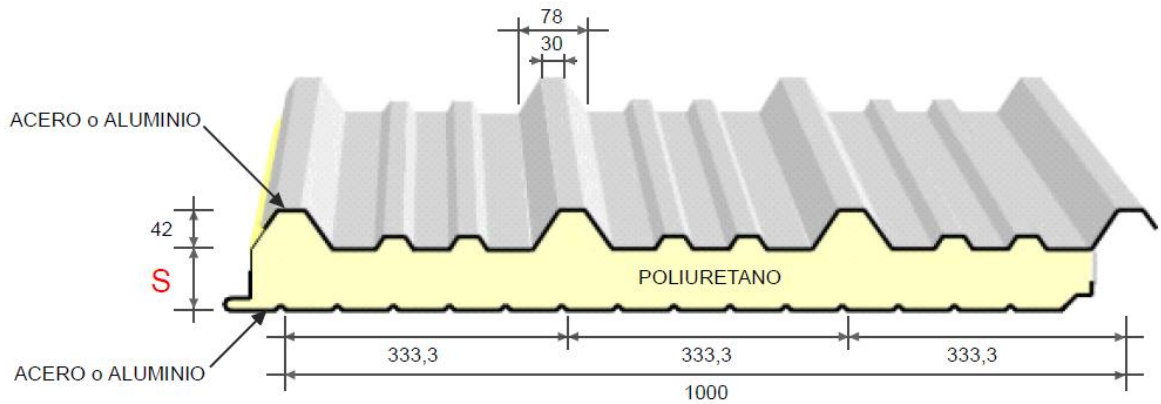


Figura 2. Panel Techmet (METECNO de Colombia)

Por otra parte, la empresa METECNO de Colombia tiene productos relacionados con la fijación y el anclaje de los elementos tanto a la cimentación como entre los mismos elementos tipo sándwich. Las uniones o fijaciones pertinentes para el anclaje a piso se dan a conocer en la Figura 3 y Figura 4. Por otra parte la unión entre la cubierta y el muro se muestran en la Figura 5 y la Figura 6.

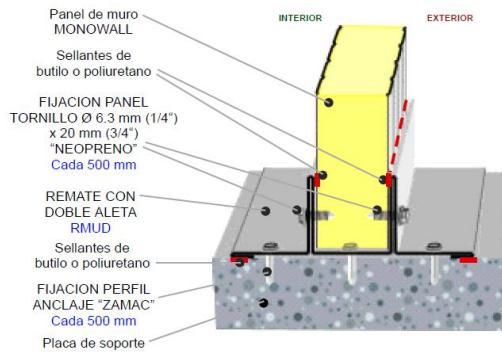


Figura 3. Perfil de doble aleta para cimentación del sistema METECNO

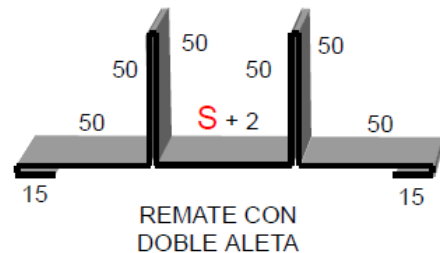


Figura 4. Detalle perfil de doble aleta del sistema METECNO

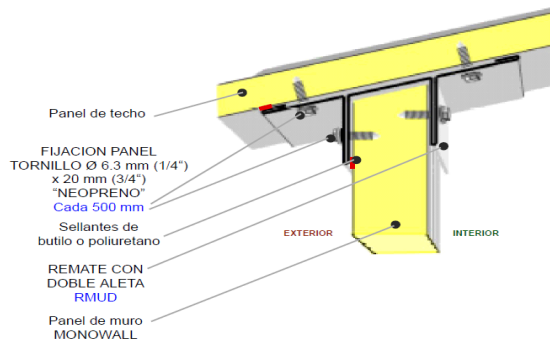


Figura 5. Perfil de doble aleta con pendiente para uniones de cubierta-muro del sistema METECNO

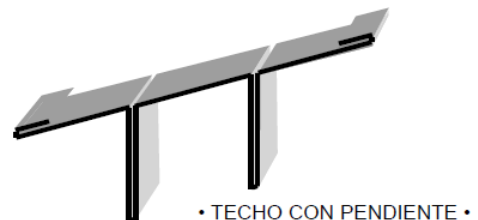


Figura 6. Detalle perfil de doble aleta con pendiente del sistema METECNO

De igual forma se realizaron entrevistas con el personal técnico con el fin de recibir un conocimiento más amplio de las condiciones de trabajo que ofrece el sistema estructural, así como las facilidades que este posee. Dichos encuentros se realizaron en las instalaciones de la Pontificia Universidad Javeriana, mientras el personal de la empresa METECNO realizaba la construcción de los módulos y probetas correspondientes a la realización de los ensayos de este trabajo. En el anexo 1 se da a conocer un registro fotográfico de dichas entrevistas.

La idea principal a futuro de la empresa METECNO de Colombia es disponer de todas las herramientas e información para generalizar el sistema y construir viviendas de interés social a lo largo del territorio colombiano. Para ello se han establecido como ejemplo modelos de vivienda de interés social edificadas en el Departamento del Cauca. Estas casas de un solo nivel, con un área de 36m², están enteramente construidas en el sistema de METECNO de Colombia y se encuentran en perfecto estado después de varios años de haber sido construidas.



Figura 7. Viviendas de interés social construidas con el sistema METECNO

2.2 Investigaciones previas

Tomando en cuenta la necesidad de evaluar el sistema estructural de la empresa METECNO de Colombia se ha llevado una caracterización del sistema basada en ensayos mecánicos de resistencia a través de evaluaciones experimentales. Estos ensayos incluyen pruebas de laboratorio sobre probetas del material compuestos así como de paneles completos. Los ensayos realizados por la referencia (Ruiz *et al*, 2007) y (Ruiz *et al*, 2009) son correspondientes a dichas pruebas de laboratorio, las cuales se resumen a continuación.

- ✓ Absorción agua
- ✓ Acústico
- ✓ Adherencia de platinas y poliuretano
- ✓ Cíclicos y estáticos de las conexiones panel-remate
- ✓ Compresión excéntrica
- ✓ Compresión paralela
- ✓ Compresión perpendicular
- ✓ Cortante y flexión probetas pequeñas

- ✓ Corte y extracción de tornillos de anclaje
- ✓ Flexión en Monowall
- ✓ Densidad
- ✓ Flexión en Techmet
- ✓ Ensayos de carga paralela al panel tipo muro
- ✓ Impacto
- ✓ Penetración
- ✓ Tensión en platinas

Teniendo en cuenta el listado de los ensayos anteriormente realizados se ha construido la siguiente tabla, la cual resume los principales resultados de las pruebas mencionadas. (Tabla 4)

Ensayo	Parámetro	Resultado
<i>Absorción agua(Panel 50mm) Acústico(Monowall)</i>	<i>Porcentaje de absorción</i>	<i>8.5%</i>
	<i>Máximo nivel de reducción del ruido</i>	<i>28.8dB</i>
<i>Adherencia de platinas y poliuretano(Panel 50mm)</i>	<i>Esfuerzo promedio</i>	<i>1.097Kg/cm2</i>
<i>Compresión paralela a las láminas</i>	<i>Esfuerzo promedio</i>	<i>429KPa</i>
<i>Compresión perpendicular a las láminas de acero</i>	<i>Esfuerzo promedio</i>	<i>9.1MPa</i>
<i>Compresión en el poliuretano</i>	<i>Esfuerzo promedio</i>	<i>9.1MPa</i>
<i>Concentración de esfuerzos en las esquinas</i>	<i>Esfuerzo promedio</i>	<i>37MPa</i>
<i>Cortante en el poliuretano</i>	<i>Esfuerzo promedio</i>	<i>159 KPa</i>
<i>Corte en tornillos de fijación</i>	<i>Esfuerzo promedio</i>	<i>565MPa</i>
<i>Corte y extracción de tornillos de anclaje</i>	<i>Resistencia promedio</i>	<i>3.4KN</i>
<i>Densidad</i>	<i>Densidad promedio</i>	<i>0.168g/cm3</i>
<i>Extracción de anclajes</i>	<i>Resistencia promedio</i>	<i>3.45KN</i>
<i>Fluencia en platinas</i>	<i>Esfuerzo promedio</i>	<i>324MPa</i>
<i>Ensayos de carga paralela al panel tipo muro (separación de 150mm)</i>	<i>Resistencia promedio</i>	<i>4.39KN/m</i>
<i>Ensayos de carga paralela al panel tipo muro (separación de 290mm)</i>	<i>Resistencia promedio</i>	<i>2.75KN/m</i>
<i>Flexión en Monowall (e:50mm)</i>	<i>Esfuerzo promedio</i>	<i>134MPa</i>
<i>Flexión en Techmet (2:40mm; L:2.95m)</i>	<i>Resistencia última promedio</i>	<i>641.2kg</i>
<i>Impacto (e:40mm; h:75cm; carga:33kg)</i>	<i>Deformación</i>	<i>7.5cm</i>
<i>Penetración (carga: 450kg; e:50mm)</i>	<i>Deformación promedio</i>	<i>14.5mm</i>
<i>Tensión en platinas</i>	<i>Esfuerzo promedio</i>	<i>425MPa</i>

Tabla 4. Revisión de resultados experimentales de ensayos realizados al sistema METECNO. (Ruiz et al., 2007)

Revisando la metodología utilizada por la referencia (Ruiz et al, 2009) se tienen varios aspectos relacionados con el objetivo de este trabajo, en tanto que se refieren al

desempeño de la conexión atornillada entre paneles y remates de fijación ante la aplicación de fuerzas que simulen el efecto sísmico.

Para ello se realizaron pruebas sobre las principales conexiones implementadas por el sistema METECNO de Colombia. Los elementos objeto de ensayo consisten en tornillos autoperforantes de alta resistencia, con un diámetro de 6 mm (1/4”), remates tipo “U” y paneles Monowall de 50mm de espesor nominal. Las características de los paneles corresponden a las especificadas en la Tabla 4.

El primer ensayo realizado por la referencia (Ruiz *et al*, 2009) corresponde a la evaluación mediante ensayos cíclicos de conexiones entre muros y remates de fijación. De esta manera se logró establecer un valor aproximado de la capacidad resistente de la lámina colaborante de acero galvanizado del sistema METECNO en las uniones de los respectivos paneles con los remates de fijación.

Para ello se diseñó un montaje experimental consistente en la disposición de dos ángulos confrontados por la parte exterior de sus aletas, los cuales a su vez estaban sujetos al marco de reacción del sistema estructural. Teniendo en cuenta que la referencia (Ruiz *et al*, 2007) estableció que el mecanismo de falla está dominado por el desgarramiento de la lámina, se estableció que el elemento de sujeción del panel debía ser muy rígido.

Por su parte, los tornillos autoperforantes atravesarían el panel a ensayar de lado a lado según la Figura 8, de esta manera es que dicho tornillo ocasionaría la falla.

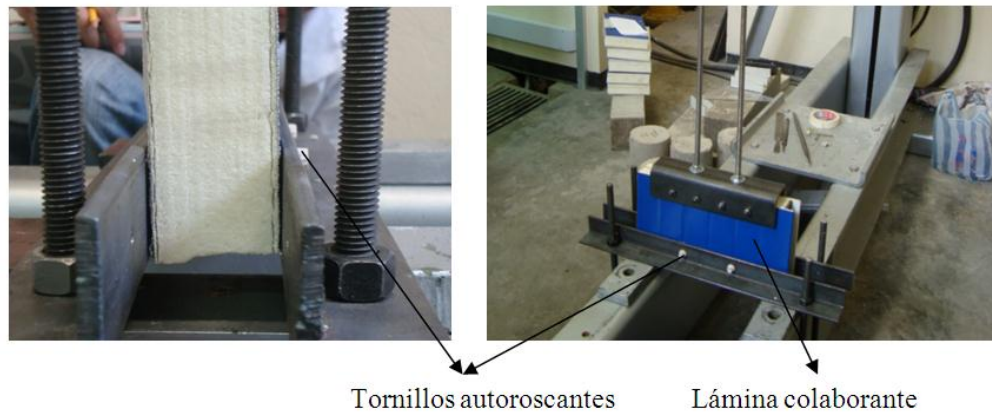


Figura 8. Disposición del ensayo de desgarramiento realizado por (Ruiz *et al*, 2009)

La primera fase del ensayo se realizó con un control de desplazamientos, estableciendo una prueba cíclica de señales sinusoidales con amplitud entre 0.1mm y 4. Así mismo una frecuencia de movimiento entre 0.5Hz y 1Hz. De esta manera se aplica una fuerza vertical paralela al plano de la lámina.

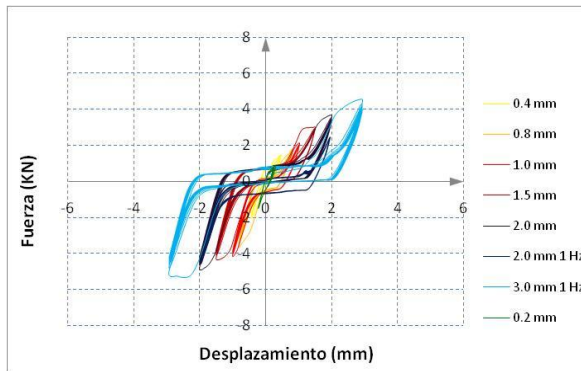


Figura 9. Ciclos de histéresis para ensayos cíclicos de la referencia (Ruiz et al, 2009) a 2mm de amplitud

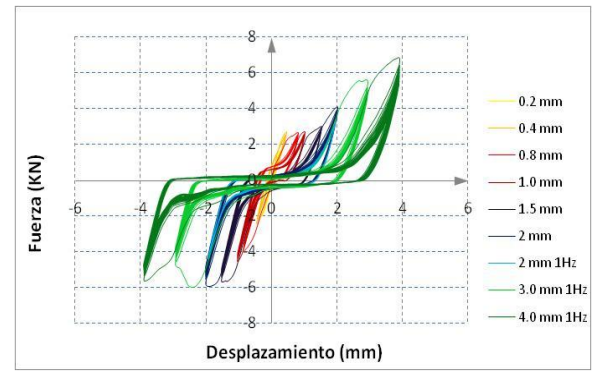


Figura 10. Ciclos de histéresis para ensayos cíclicos de la referencia (Ruiz et al, 2009) a 4mm de amplitud

Teniendo en cuenta los resultados de estos ensayos se concluye que el tipo de conexión utilizado por la empresa METECNO de Colombia es capaz de disipar energía en el rango inelástico, con lo que se atribuye un buen comportamiento ante la aplicación de fuerzas sísmicas en el sistema estructural.

Posterior a la realización de los ensayos cíclicos se efectuaron ensayos estáticos, para los cuales una aplicación monotónica de una fuerza paralela al plano de las láminas haría llegar a la falla por desgarramiento al panel.

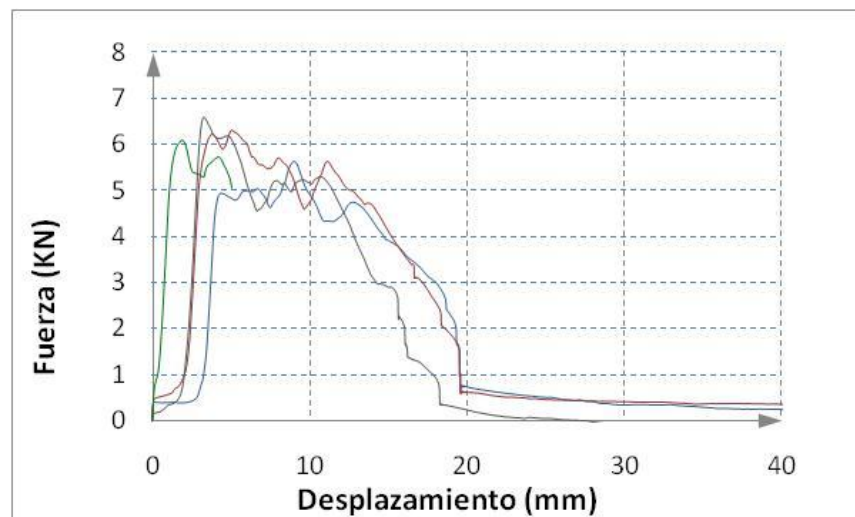


Figura 11. Ensayo monotónico de la unión panel-remate de la referencia (Ruiz et al, 2009)

Como resultado a este ensayo se obtuvo una gráfica de fuerza aplicada (kN) contra desplazamiento del panel (mm) a lo largo del ensayo hasta lograr la falla del mismo (Figura 12).



Figura 12. Mecanismo de falla de los ensayos monotónicos de las conexiones panel-remate.

De esta forma el mecanismo de falla que se presenta en el ensayo se da en la zona donde el tornillo autopercutor hace contacto con el panel. El orificio redondo donde el tornillo autopercutor atraviesa el panel termina convertido un óvalo y la trayectoria de falla, tanto de la lámina como del poliuretano, tiene una geometría cónica.

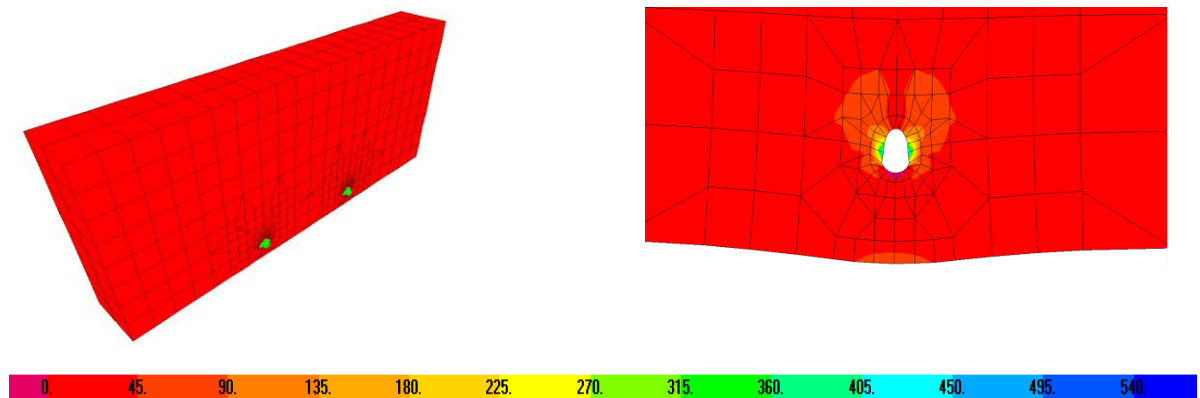


Figura 13. Modelación por elementos finitos de los ensayos de la referencia (Ruiz et al, 2007).

Observando la información de la Figura 11, donde los valores máximos resistentes del sistema estructural en sus tres pruebas no superan los 6.5 KN, se comprueba la alta resistencia del remate y el muro gracias a la disposición empleada por el sistema estructural de METECNO de Colombia

A partir de los resultados y análisis realizados a esta prueba se desarrollaron modelos computarizados a través del análisis mediante elementos finitos del montaje experimental.

Dicha modelación tuvo en cuenta todas las propiedades físicas y mecánicas obtenidas de la referencia (Ruiz *et al*, 2007).

Revisando la aplicación en el modelo de una fuerza de 6.5 KN en la zona de contacto del panel se observan los esfuerzos actuantes en el panel. Se establece que el esfuerzo de 405MPa que se contempla en la modelación es muy similar al esfuerzo de rotura de la platina que se reporta en la bibliografía (425MPa).

3 Diseño experimental

3.1 Diseño del montaje

Con el fin de evaluar de una manera más profunda el desempeño y el comportamiento de las uniones remate (Figura 6) entre el panel tipo muro (Monowall, (Figura 1)) y el panel tipo cubierta (Techmet, (Figura 2)) sometidos a cargas de viento se realizó inicialmente la observación de las características de las viviendas tipo, las cuales han sido construidas por la empresa METECNO de Colombia. En la Figura 14 se muestra el plano de la casa tipo construida por la organización, así como un proyecto completado por parte de la misma.



Figura 14. Plano arquitectónico de la vivienda tipo e imagen de la vivienda con el sistema METECNO de Colombia

A partir de dicha observación y del análisis de la edificación se estableció que la conexión que se da a conocer en la Figura 5 trabaja sobre el perímetro de la casa. Además existe una proyección del muro desde el nivel de la cimentación hasta el caballete, el cual permite otra longitud de apoyo.

Teniendo en cuenta la disposición de la cubierta a dos aguas se establece que la condición es crítica dado que existen componentes tanto verticales como horizontales de viento. De esta forma se tiene un parámetro de diseño de los modelos experimentales.

Para la modelación experimental se estableció que el montaje debería reproducir diferentes alturas de muro, así como una pendiente de cubierta que garantice las condiciones reales de uso. Por lo tanto se asume en las probetas una pendiente de 10° la cual corresponde al parámetro de pendiente de la vivienda tipo. Partiendo de un diseño de cubierta con estas características se optó por ubicar en los extremos del panel las conexiones entre muro y cubierta a evaluar. A partir de las conexiones ubicadas se realizará la proyección a piso de los muros, garantizando diferentes alturas de los mismos.

De esta manera se observa en la Figura 15 el diseño experimental de las probetas a evaluar teniendo en cuenta las condiciones y características necesarias descritas anteriormente. Además las siguientes figuras muestran el esquema de las vistas principales del diseño experimental

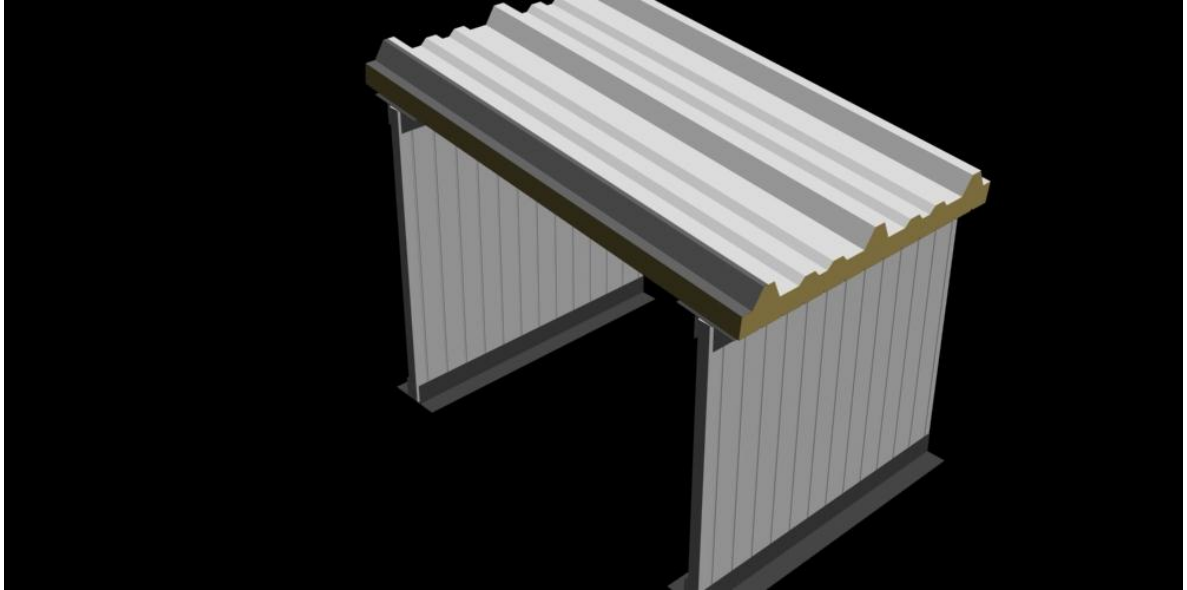


Figura 15. Diseño experimental de las probetas a evaluar

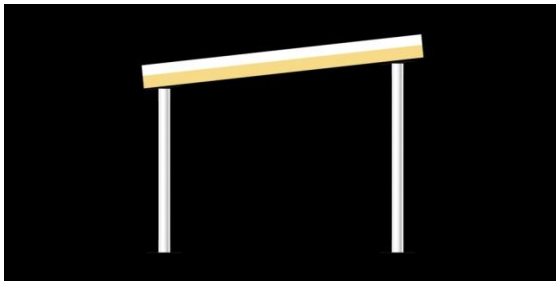


Figura 16. Vista frontal diseño probetas



Figura 18. Vista superior diseño probetas

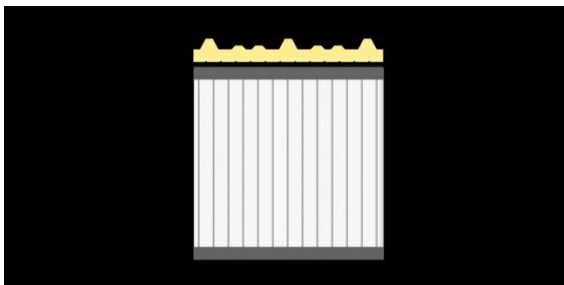


Figura 17. Vista lateral izquierda diseño probetas

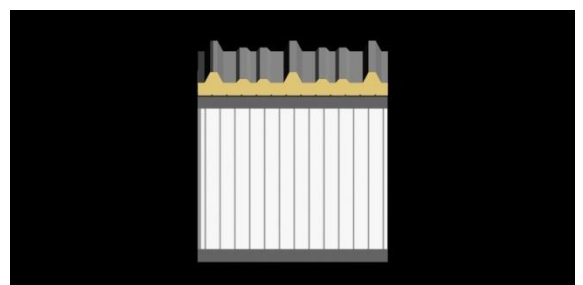


Figura 19. Vista lateral derecha diseño probetas

Revisando los manuales de instalación y manejo de los paneles del sistema estructural se encontró que la ubicación de los tornillos a lo largo del sistema estructural para el perfil de unión entre cubierta y muro al 10% de inclinación se debe hacer cada 300mm.

De esta forma se diseñaron planos esquemáticos que permitieron la observación detallada de la ubicación de los elementos, así como sus diferentes condiciones de apoyo. Las medidas que se dieron a los elementos que hacen parte de las probetas corresponden a una medida que permitiera el desarrollo de una prueba en el marco de reacción donde posteriormente serían evaluadas.

Con el fin de garantizar el análisis detallado y correcto del desempeño de la conexión entre la cubierta y el muro se optó por buscar una alternativa que evitara de alguna manera una falla en una zona diferente de la probeta. De esta manera se revisó el remate doble aleta (Figura 4), encontrando que los pernos que sujetan dicho elemento con el panel y a su vez el panel a la cimentación se encuentran ubicados cada 300mm; tanto en las aletas exteriores como en el canal interior. Es así como se opta por reducir esta distancia hasta los 120mm entre cada tornillo, asegurando un óptimo desempeño de este elemento de sujeción. De esta manera se evitó que la falla se presentara en dicha zona y se garantiza que la unión se diera a nivel de la cubierta.

A continuación se dan a conocer los esquemas que ayudaron a una mejor comprensión del desempeño de las conexiones, así como de los paneles muro y cubierta. En la Figura 20 se da a conocer la vista frontal del diseño experimental de las probetas a evaluar. Además la Figura 21 muestra la vista superior del montaje donde se aprecia la disposición de los tornillos que unen el remate entre panel tipo muro y panel tipo cubierta.

Por otra parte la Figura 22 muestra la disposición de los tornillos utilizados para sujetar el montaje sobre el marco de reacción. Así mismo se muestra la ubicación de los tornillos autoperforantes a lo largo del remate de conexión entre la base y el panel tipo muro. A su vez la Figura 23 muestra la sección transversal del panel cubierta (Techmet).

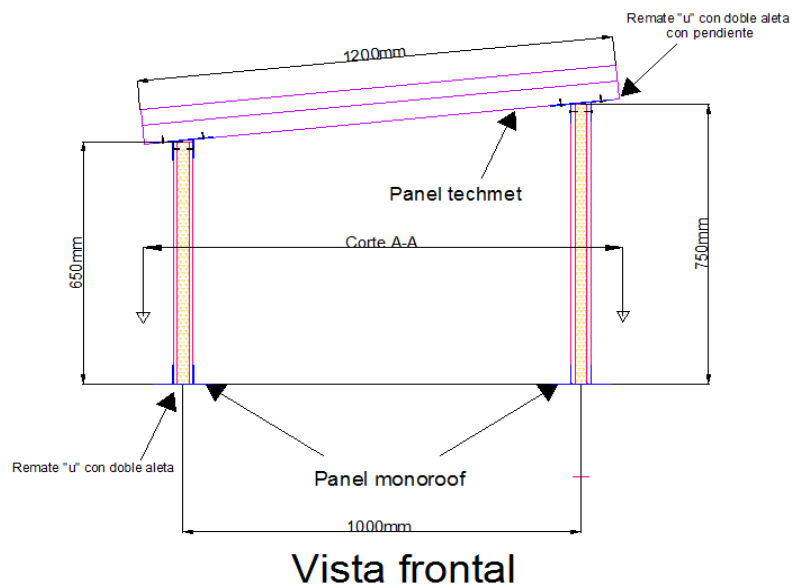
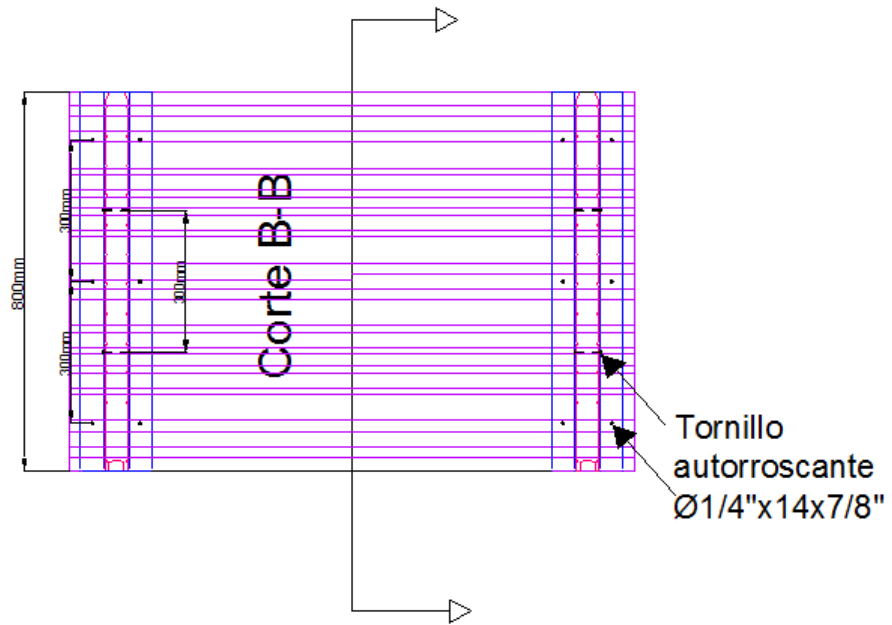


Figura 20. Plano esquemático del montaje (Vista frontal)



Vista superior

Figura 21. Plano esquemático del montaje (Vista superior)

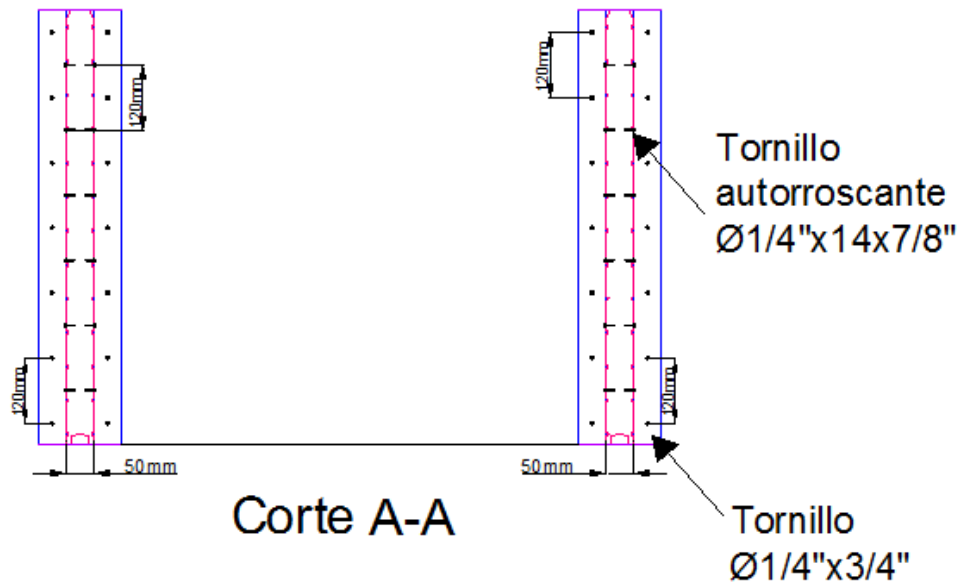
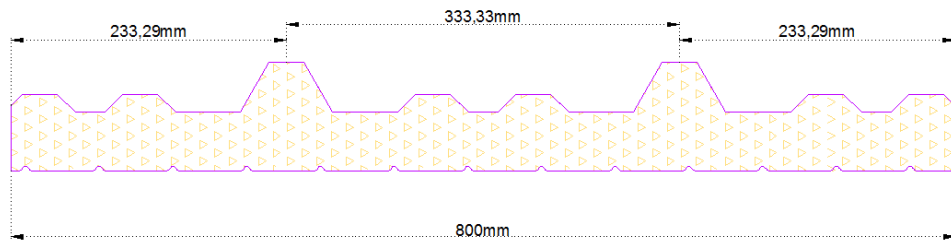


Figura 22. Plano esquemático del montaje de cimentación (Corte A-A)



Corte B-B

×

Figura 23. Plano esquemático del montaje (Corte B-B)

A partir de los anteriores planos y esquemas del montaje experimental se permitió una observación detallada de la ubicación de los diferentes elementos que hacen parte del sistema estructural. Teniendo en cuenta dichas observaciones fue posible la aproximación a una tipología de ensayo siguiendo los requerimientos y condiciones propias, tanto de las cargas de viento como de la manera de reproducirlas.

Para complementar la información se estableció que la manera más adecuada de aplicar una fuerza que reproduzca el efecto del viento sería un actuador dinámico. Dicho mecanismo realizaría la aplicación de una carga cíclica que simule el efecto del viento, así como una carga estática que nos permita determinar una resistencia. De esta manera se establecerían parámetros como el comportamiento de la conexión entre los muros y la cubierta del sistema estructural de la empresa METECNO de Colombia, así como su resistencia ante la aplicación de una fuerza estática.

Es así como se realizó el análisis de los elementos que aplican el efecto del viento a las probetas. De esta forma el principal inconveniente encontrado consistió en la aplicación de la carga de manera perpendicular al plano de la cubierta, teniendo en cuenta que el actuador dinámico solo aplica su carga de manera perpendicular al eje del marco.

Para resolver este inconveniente se optó por el diseño de un elemento de transmisión de la carga, el cual consistió en un perfil de transición que trasladaría la fuerza del sentido perpendicular a la superficie a un sentido perpendicular al plano del panel tipo cubierta. Dicho elemento consiste en un perfil armado en acero, consistente en una lámina de acero A-50 ($e=3\text{mm}$) con una geometría en cajón desigual que permita el acomodamiento al plano de la cubierta. El aditamento posee perforaciones localizadas estratégicamente para la sujeción con elementos que le permitan distribuir la carga. De esta manera se garantiza la aplicación de una fuerza que simule el viento en una cubierta del sistema estructural de la empresa METECNO de Colombia.

A partir del diseño de este aditamento la contrariedad existente residió en la manera de aplicar una carga distribuida a la superficie del panel. Entonces se optó por extender el elemento de transición mencionado anteriormente en la parte inferior hasta el borde del panel tipo cubierta. Por otra parte se requirió de la ubicación de arena almacenada en bolsas para llenar los espacios y canales vacíos que presenta el panel Techmet, tal y como se aprecia en la Figura 25.

De igual manera se optó por utilizar un elemento metálico tipo canal, consistente en una lámina de acero A-50 ($e=3\text{mm}$) en la parte inferior del panel. Dicho elemento sujetaría desde la parte inferior el panel asegurando la aplicación de la fuerza tanto hacia afuera del panel como hacia adentro. Así como el elemento aplicador de la carga, este canal tiene las mismas perforaciones con el fin de brindar la misma superficie de contacto tanto arriba como abajo del panel tipo cubierta. Para ilustrar mejor el aditamento de carga se han realizado planos esquemáticos del montaje experimental, los cuales se muestran en la Figura 24 y la Figura 25, las cuales se muestran a continuación

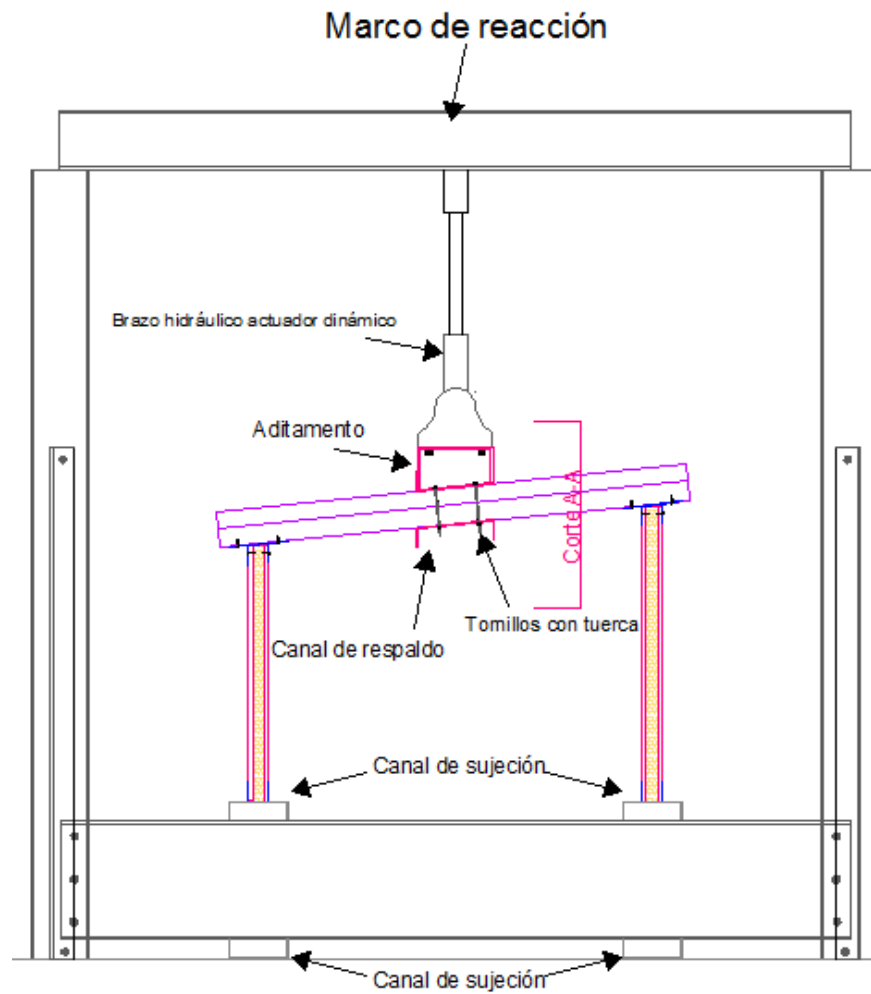


Figura 24. Plano esquemático del montaje

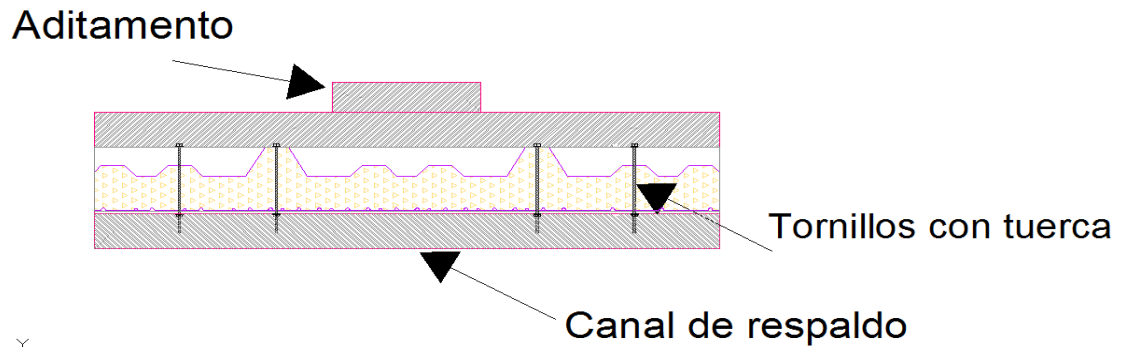


Figura 25. Plano esquemático del montaje (Corte A-A)

Finalmente teniendo en cuenta la necesidad de asegurar el montaje experimental al marco de reacción, tal y como se ve en la Figura 24 se dispuso de cuatro canales metálicos fabricados en acero A-50 ($e=3\text{mm}$). Dichos perfiles sujetarían la base del marco de reacción a través de un tornillo que una a cada uno de los dos perfiles y sea ajustado de manera que estos elementos actúen como prensas sobre la base.

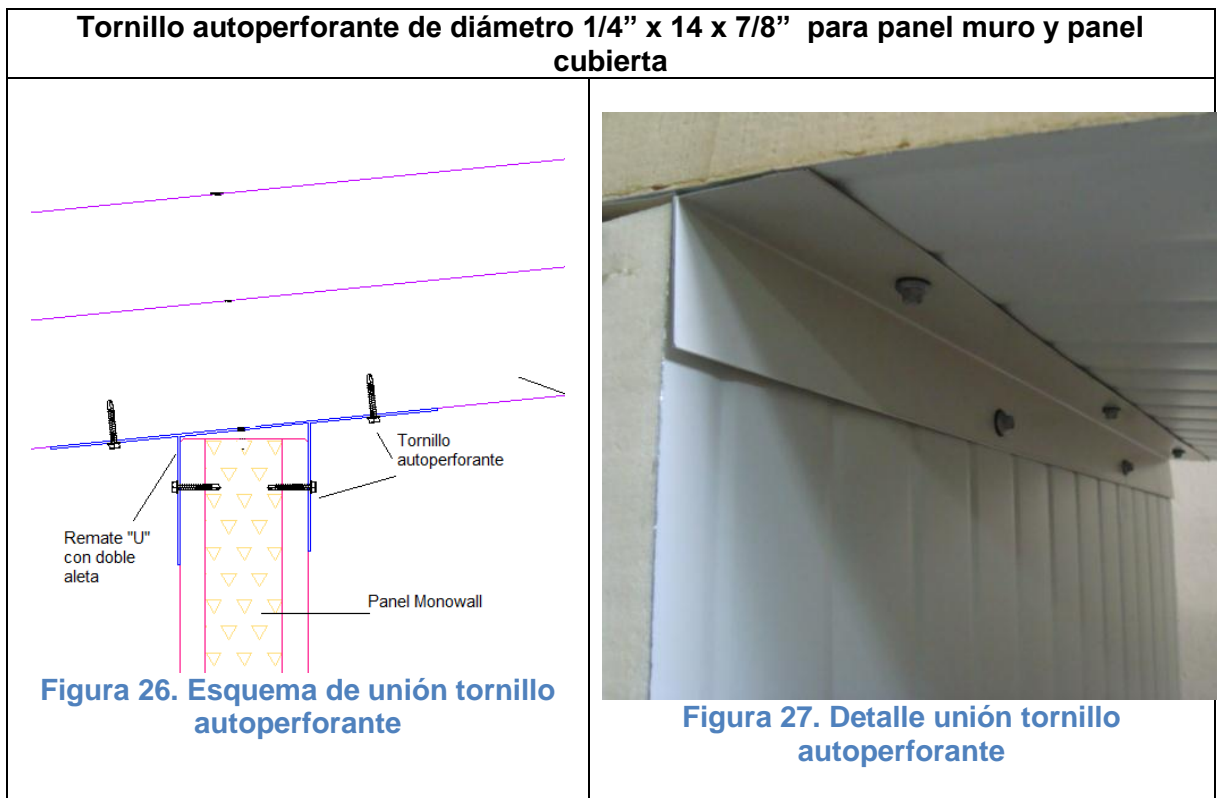
A su vez, los dos canales de sujeción superiores estarán espaciados desde sus ejes 1000mm, tal y como se especifica en la Figura 20. Así mismo contarán con perforaciones de diámetro $5/16''$ a lo largo de su longitud en los puntos especificados en la Figura 22 y por los planos esquemáticos elaborados de manera que coincidan con los orificios. A través de ellos se ubicarán tornillos de diámetro $1/4''$ los cuales servirán para sujetar el perfil de doble aleta con el marco de reacción tal y como se muestra en la Figura 22. Las medidas y las especificaciones técnicas de los perfiles de sujeción, así como del aditamento se encuentran contenidas en el anexo 2 de este trabajo.

Posteriormente se realizó el diseño del montaje experimental de la probeta del sistema estructural de la empresa METECNO de Colombia. Para ello se ha tomado como referencia el manual de instalación de la organización. Según la información contenida en dicho documento existen cinco diferentes tipos de uniones, en cuanto a los pernos respecta, las cuales permiten la unión entre el panel tipo muro y el panel tipo cubierta. Dichas uniones se explican a continuación:

3.2 Tipos de uniones evaluadas

1. Tornillo auto perforante de diámetro 1/4" x 14 x 7/8" para panel muro y panel cubierta

Para la elaboración de las probetas con este tipo de unión se requiere el empleo de un atornillador eléctrico de alta potencia que permita que el tornillo auto perforante de 1/4" x 14 x 7/8" sea capaz de perforar tanto la lámina de la unión como la lámina del panel tipo muro y del panel tipo cubierta. A continuación, en la Figura 26 es apreciable el esquema explicativo en el cual se ilustra la manera como se disponen los tornillos y el panel en el sistema estructural. Así mismo la Figura 27 muestra la instalación de este tipo de unión



2. Tornillo auto perforante de diámetro con capelote de diámetro 1/4" x 120mm para panel cubierta

Para la construcción de este tipo de probetas no existe mayor variación que el descrito anteriormente. Sin embargo la inclusión en el montaje del tornillo con capelote se muestra en la Figura 28. De igual manera la Figura 29 muestra el esquema de instalación y la Figura 30 la conexión instalada.

Tornillo auto perforante de diámetro 1/4" x 14 x 7/8" con capelote de diámetro 1/4" x 120mm para panel cubierta

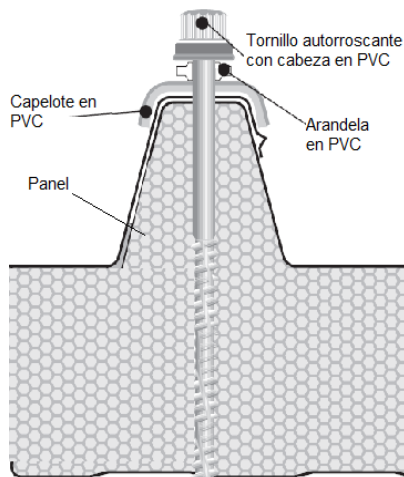


Figura 28. Esquema tornillo con capelote

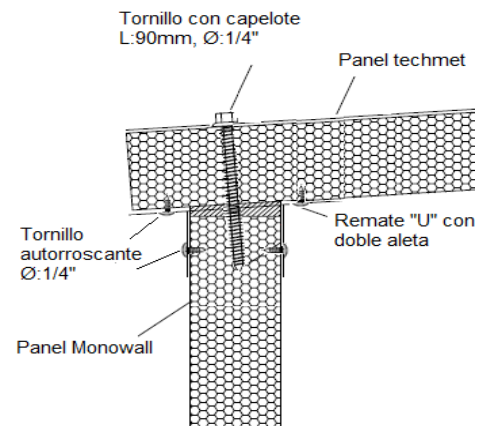


Figura 29. Esquema de unión tornillo auto perforante con tornillo con capelote (METECNO de Colombia)



Figura 30. Detalle unión tornillo auto perforante con tornillo con capelote

A partir del esquema mostrado en la Figura 29 se puede apreciar la modificación planteada al incluir el tornillo autoperforante con capelote en la construcción de las probetas a evaluar

3. Tornillo pasante con capelote de diámetro 1/4" x 120mm para panel cubierta

Este tipo de probeta, al igual que la anteriormente mencionada, partirá con la base del esquema de ensayos inicial; el cual incluía solo tornillos con diámetro 1/4". Sin embargo la modificación radica en la sustitución de los dos tornillos autoperforantes de diámetro 1/4" por uno solo, del mismo diámetro que atraviese el panel tipo muro, así como el remate de unión (Figura 31). Cabe resaltar que existe un desfase entre el tornillo pasante y el autoperforante de alrededor de 55mm tal y como se aprecia en la Figura 21, de esta manera, la Figura 32 y su esquema es netamente explicativo. La Figura 33 muestra el tipo de instalación de esta conexión.

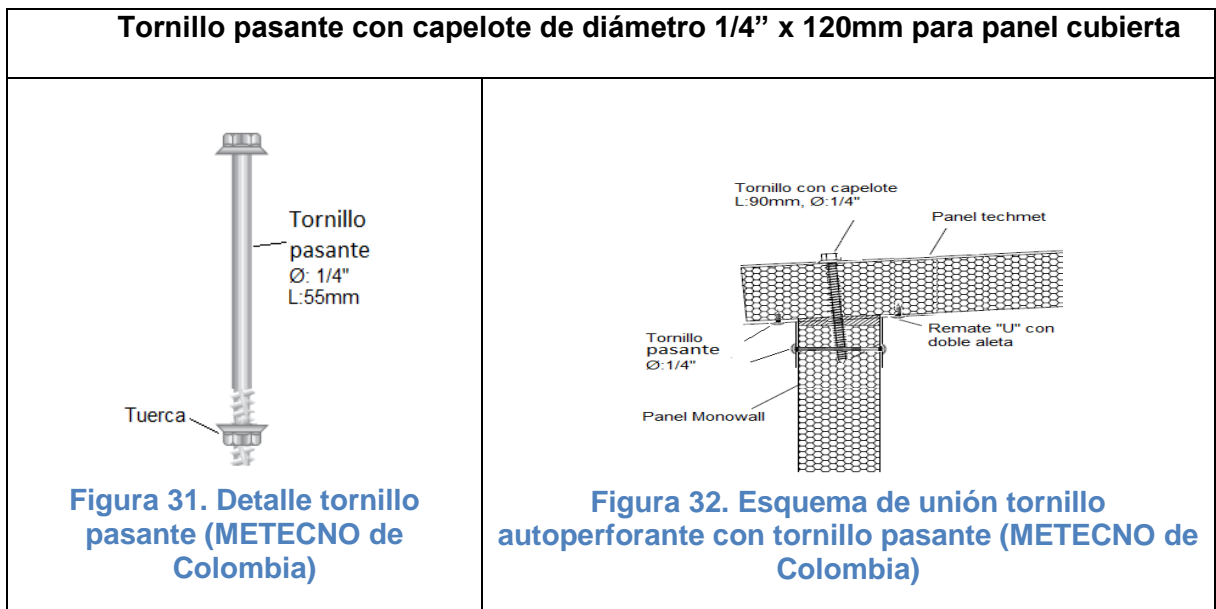




Figura 33. Detalle unión tornillo pasante con tornillo con capelote

4. Remache pop para panel muro y panel cubierta sin tornillo superior

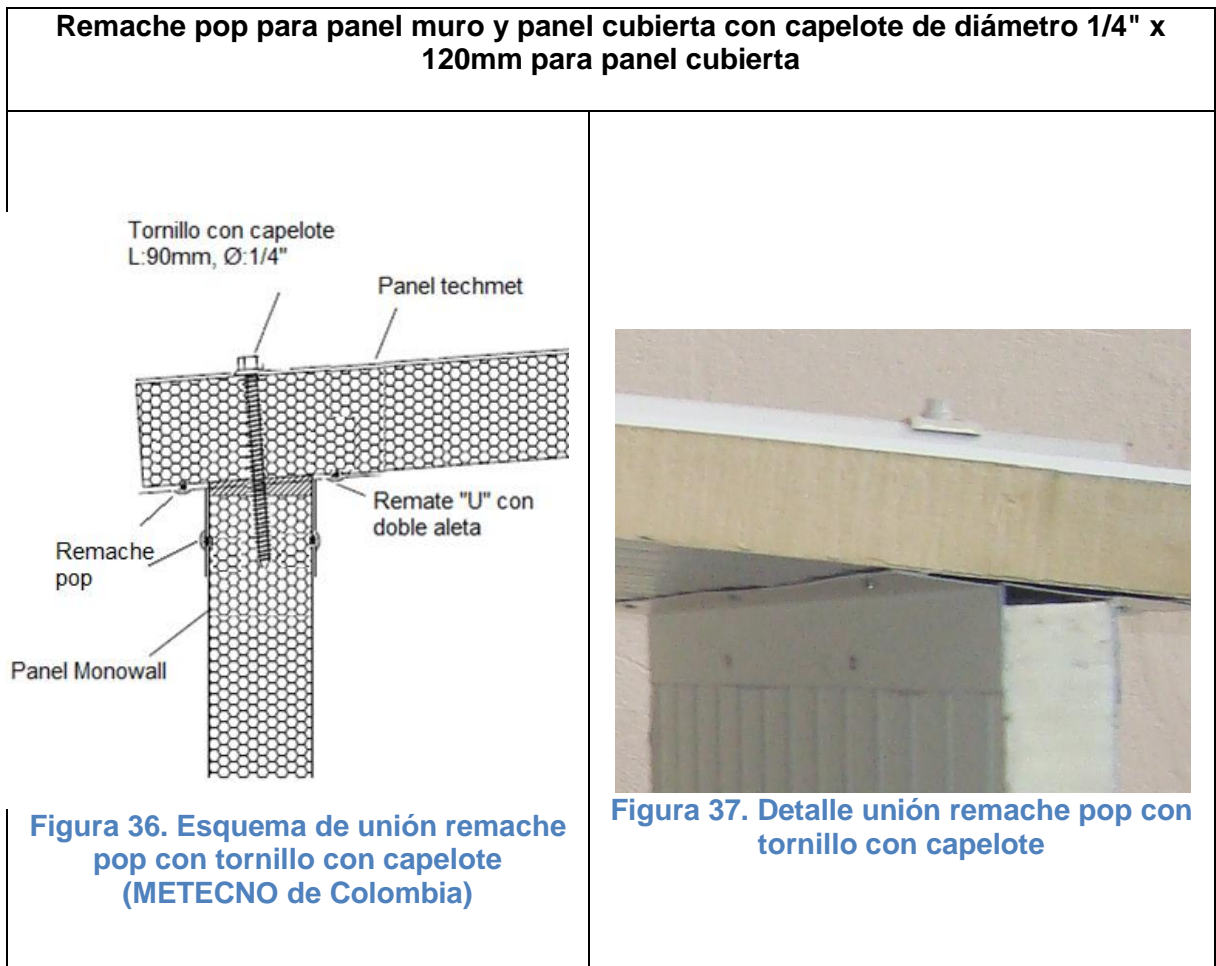
Este tipo de sistema empleado difiere bastante de los tres mencionados anteriormente. La principal diferencia radica en los pernos utilizados en este tipo de probeta, los cuales consisten en remaches que unen el remate de unión y la lámina de acero del panel tipo muro y del panel tipo cubierta.

El remache pop hace las veces de tornillo en el sistema estructural, con la diferencia que el área de contacto se reduce. La Figura 34 muestra el esquema explicativo de la conexión y a su vez la Figura 35 muestra la conexión ya instalada.

Remache pop para panel muro y panel cubierta sin tornillo superior	
<p>Figura 34. Esquema de remache pop (METECNO de Colombia)</p>	<p>Figura 35. Detalle unión remache pop</p>

5. Remache pop para panel muro y panel cubierta con capelote de diámetro 1/4" x 120mm para panel cubierta

Al igual que en los anteriores sistemas empleados para la construcción de las probetas, éste último consiste en el empleo de los anteriormente utilizados remaches pop con una adición del tornillo con capelote de diámetro 1/4" para unir el panel cubierta con el remate y el panel muro. La Figura 36 muestra el esquema de unión para el remache pop con tornillo con capelote, y la Figura 37 muestra la instalación ya ejecutada.



NOTA:

Según el manual de la empresa METECNO de Colombia, las anteriores referencias de tornillería utilizadas para la construcción de las probetas no varían en su espaciado a lo largo de la conexión entre muro y cubierta. De esta forma y siguiendo los planos esquemáticos elaborados previamente la ubicación de cualquiera de estos tipos de tornillo corresponderá con las medidas especificadas en la Figura 21 y la Figura 22.

3.3 Montaje experimental

A partir de las descripciones dadas en el capítulo 3.1 se realizó el montaje experimental para la realización de las pruebas en el Laboratorio de Pruebas y Ensayos de la Pontificia Universidad Javeriana. Para ello se efectuó la ubicación de los perfiles tipo canal en el marco de reacción, donde posteriormente se ubicarían las probetas para sus respectivos ensayos (Figura 21).

Posteriormente se ubicaron inicialmente los remates en U de doble aleta sobre dichos canales para asegurar estos elementos al marco de reacción. Dicha unión se realizó a través de tornillos de 1/4" x 14 x 7/8" ubicados estratégicamente en las perforaciones destinadas para este fin (Figura 39). De esta forma se sujetaría la totalidad del montaje a una base rígida; dicha unión se aprecia en la Figura 38



Figura 38. Aseguramiento del montaje al marco de reacción



Figura 39. Unión de los remates en U con canales en acero

Teniendo en cuenta que la evaluación de las uniones para la cubierta y el muro en el sistema estructural de METECNO de Colombia debe ser lo más aproximada posible a las condiciones de trabajo reales, la empresa a través de sus operarios realizaron las conexiones entre los muros y la cubierta según las especificaciones dadas en la Figura 20, Figura 21 y Figura 22. Todo esto con el objetivo de reproducir condiciones de operación fieles a las de servicio.



Figura 40. Montaje de las probetas por parte del personal de METECNO de Colombia



Figura 41. Montaje de las probetas por parte del personal de METECNO de Colombia

De esta manera y teniendo en cuenta la tipología de ensayos definida en el capítulo 3.1 de este trabajo se construyeron tres probetas por cada tipología de modelo definida, teniendo un total de 15 probetas para ensayar en el Laboratorio de Pruebas y Ensayos de la Pontificia Universidad Javeriana.

Las probetas serían posteriormente ubicadas en el marco de reacción, donde los remates estarían previamente asegurados y listos para soportar el montaje. De esta manera se ubicaba sobre los perfiles las probetas y se procedía a asegurar el panel tipo muro con el remate a través de tornillos autoperforantes de diámetro 1/4" x 14 x 7/8", tal y como se usan en el sistema estructural de la empresa METECNO de Colombia. Dicho aseguramiento se realizaba ubicando tornillos en la mitad de la longitud entre los tornillos ya ubicados entre el remate y el panel. De esta manera se asegura la distancia establecida previamente.



Figura 42. Ubicación del montaje



Figura 43. Aseguramiento del montaje

Teniendo las probetas ubicadas en el marco de referencia se inicia el procedimiento de ubicación de los aditamentos de carga sobre las probetas. Para ello se hace necesario unir el brazo hidráulico del actuador dinámico con el aditamento diseñado para repartir la carga sobre los paneles. La unión se realiza a través de tornillos de 5/8" los cuales pertenecen al sistema del actuador. Las perforaciones para dichos tornillos fueron realizadas previamente en taller para asegurar la perfecta unión entre los elementos.

Posteriormente se realiza el aseguramiento del brazo hidráulico junto con el aditamento de carga con el panel tipo cubierta y el canal de respaldo. Para ello se realiza el desplazamiento del aditamento de carga lo más próximo posible al plano superior del panel tipo cubierta. En este momento se realizan perforaciones en la superficie del panel siguiendo los orificios establecidos previamente por el aditamento. Así se garantiza que las perforaciones se realicen de manera perpendicular al plano (Figura 44).

En las perforaciones se ubicó tornillos con tuerca de diámetro 1/4" con una longitud de 120mm, de manera que logran atravesar tanto el aditamento como el panel cubierta y el canal de respaldo con una holgura considerable. Dichos tornillos permitirían sujetar a su vez el canal de respaldo ubicado en la parte inferior del panel cubierta. De esta manera se sujeta firmemente el panel y se asegura la adición de la carga con un área de aplicación de la carga considerable (Figura 45). Así se logra una representación aproximada de la aplicación de fuerzas de viento que permita la realización de ensayos experimentales con el fin de determinar la resistencia de las uniones entre la cubierta y el muro para paneles del sistema estructural de la empresa METECNO de Colombia.

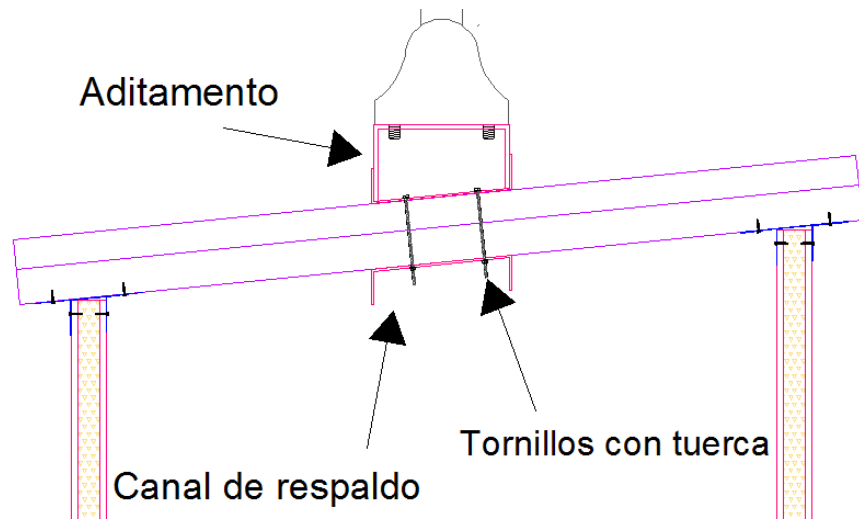


Figura 44. Esquema explicativo aplicación de la carga

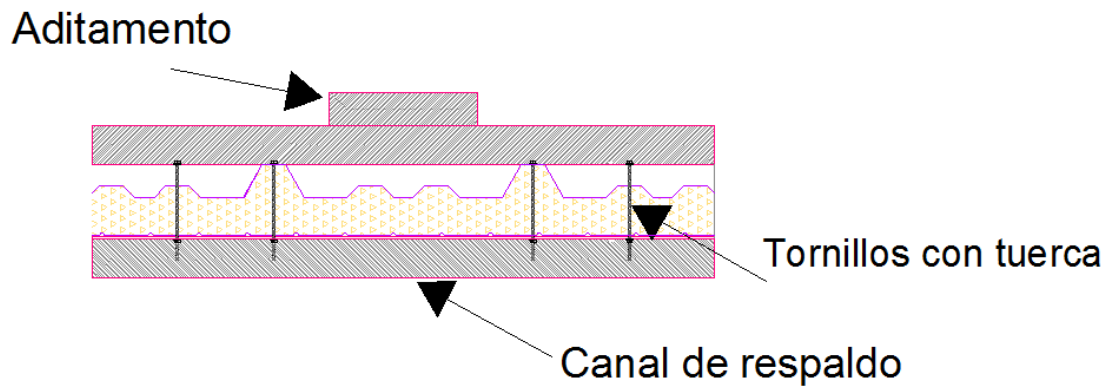


Figura 45. Detalle aplicación de la carga

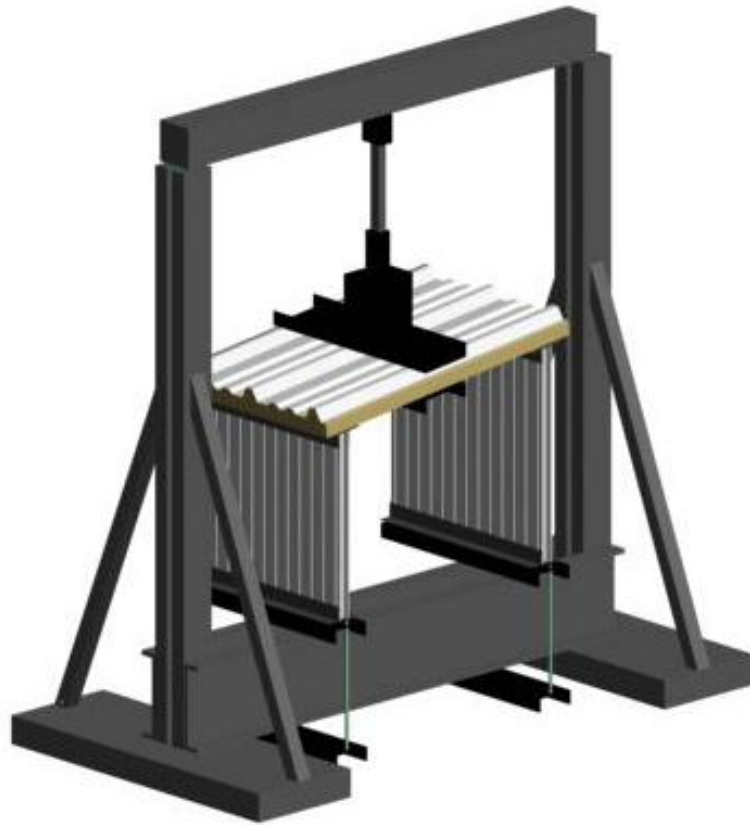


Figura 46. Esquema del montaje experimental

A partir de los esquemas y figuras explicativas del montaje experimental se dan a conocer las condiciones con las que se representó la acción del viento sobre las construcciones del sistema estructural de la empresa METECNO de Colombia.

4 Modelos numéricos

Con el fin de efectuar un análisis detallado de la acción de las fuerzas del viento sobre el sistema estructural de la empresa METECNO de Colombia se han realizado modelaciones numéricas en el software SAP2000 con el fin de revisar la acción de las fuerzas del viento. De esta manera se busca realizar una aproximación de los esfuerzos a los cuales se ve sometida la unión entre la cubierta y el muro.

4.1 Vivienda Tipo Sistema METECNO

Con el fin de estudiar el efecto de las diferentes cargas y fuerzas establecidas por el código colombiano de construcción sismo resistente (NSR-10) se realizó la modelación a través de elementos finitos de la vivienda de un solo piso. Teniendo en cuenta dicho fin se han establecido parámetros propios del material y de sus componentes como dato de entrada a la modelación. Dichas propiedades se dan a conocer a continuación.

Acero galvanizado	
Propiedad	Valor
Densidad	7.85 Ton/m ³
Módulo de elasticidad	2038,9 Ton/m ²
Esfuerzo de fluencia	2,53 Ton/m ²
Esfuerzo último	4,08 Ton/m ²

Tabla 5. Propiedades del acero galvanizado para la modelación (Ruiz et al., 2007)

Poliuretano	
Propiedad	Valor
Densidad	38 kg/m ³
Módulo de elasticidad	362846.1 kN/m ²

Tabla 6. Propiedades del poliuretano para la modelación (Ruiz et al., 2007)

Vale la pena recordar que la vivienda tipo de un solo nivel se compone de elementos tipo muro (Monowall) y cubierta (Techmet), ambos de un espesor nominal de 50mm. La asignación de propiedades se hizo de acuerdo a la Tabla 5 y la Tabla 6. Dichas tablas especifican las propiedades encontradas en los múltiples ensayos realizados sobre los materiales y sobre el sistema estructural por parte de la referencia (Ruiz *et al.*, 2007)

En el modelo numérico, se establecieron los materiales del sistema estructural de METECNO de Colombia como parte de los elementos tipo panel, los cuales se modelaron

a partir de diferentes alternativas del software. Los elementos de remate de doble aleta y las paredes de los paneles fueron modelados de acuerdo a las propiedades de la Tabla 5. Por su parte el poliuretano de alta densidad fue modelado con las propiedades de la Tabla 6.

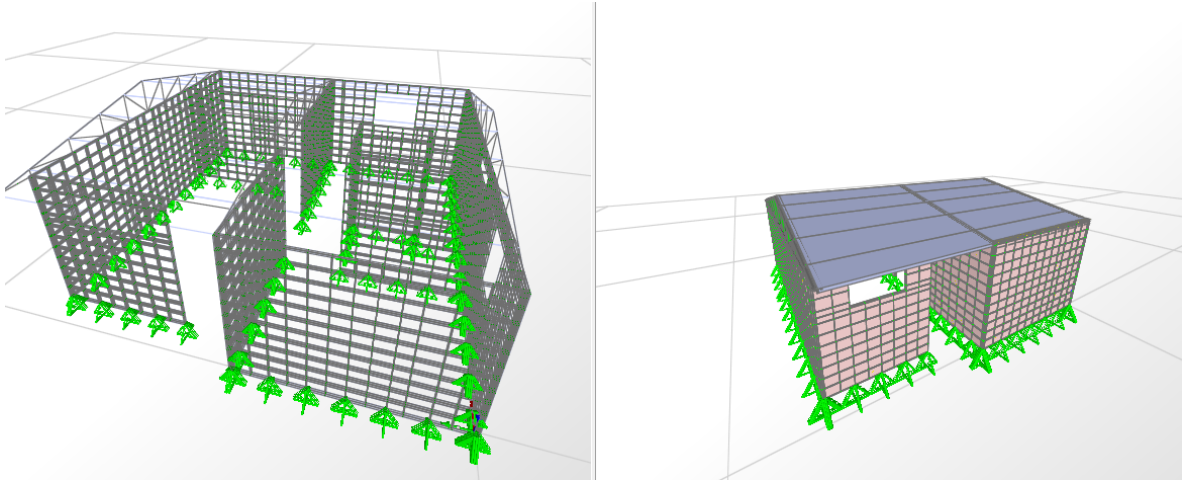


Figura 47. Modelación de la vivienda tipo (Ruiz et al. 2007)

Para la modelación de la lámina del poliuretano se emplearon elementos tipo cascarón (Shell). Así mismo el remate de U con doble aleta fue modelado con esta característica. Por su parte se utilizaron los elementos tipo sólido (Solid) para la simulación del poliuretano en la parte interna de los paneles.

Cabe la aclaración que todas las conexiones utilizadas hacia la base de la vivienda fueron soportadas por apoyos de segundo grado. Este tipo de apoyo restringe los desplazamientos en sentido vertical y horizontal.

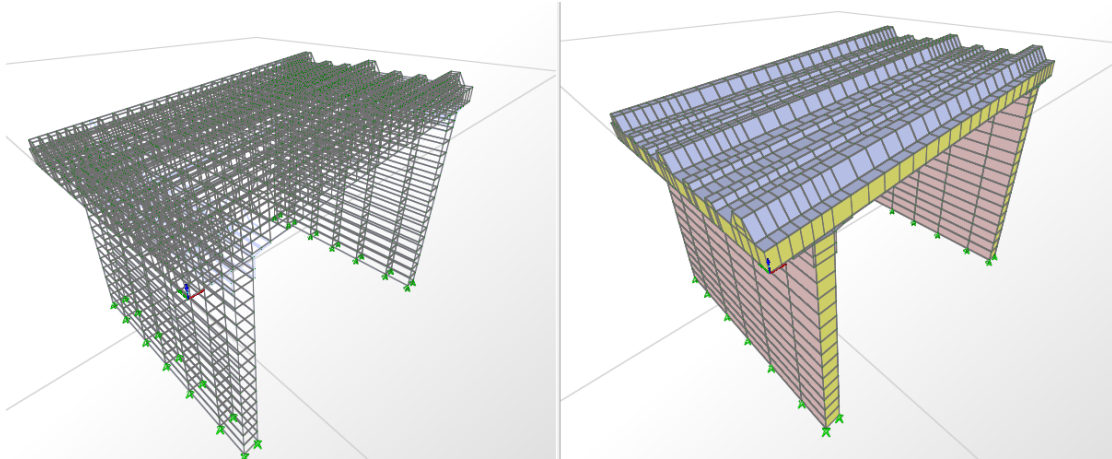
A su vez el modelo fue analizado dividiendo sus elementos en una configuración de malla que le permita al software realizar y analizar de una manera más acertada la transmisión de esfuerzos y el comportamiento de los elementos en el sistema estructural.

Dicho modelo fue sometido a cargas estipuladas por la norma NSR – 10 con el fin de determinar la magnitud de las fuerzas de viento que actúan sobre los elementos de conexión de las cubiertas de la edificación.

4.2 Modelación pruebas experimentales

Teniendo en cuenta la metodología de modelación de la estructura de la vivienda tipo a través de los elementos finitos se estableció que las pruebas experimentales deben ser igualmente modeladas.

Para ello se determinó una geometría establecida previamente establecida en el inicio de este capítulo. De esta manera se reproducirá las condiciones de aplicación de la carga establecidas en el capítulo 3.1 de este trabajo.



Para la modelación de las pruebas experimentales se utilizaron las propiedades de los materiales establecidas en la Tabla 5 y Tabla 6 de este trabajo. Así mismo se estableció un apoyo de segundo grado para los elementos tipo muro con el fin de reproducir las condiciones reales de funcionamiento y restricción al desplazamiento que se tienen en el sistema estructural de la empresa METECNO de Colombia.

5 Pruebas y ensayos

En esta etapa se realizó la construcción y adecuación de los elementos del montaje con el fin de efectuar la simulación de las fuerzas de viento mediante mecanismos mecánicos diseñados en el capítulo 3.1 y 3.3. Así mismo se ejecutaron las pruebas y ensayos correspondientes a cada tipo de ensayo que permita analizar el desempeño del sistema estructural de la empresa METECNO de Colombia ante la simulación de fuerzas de viento.

5.1 Construcción del montaje

Tal y como se observó en el capítulo 3, se estableció un montaje experimental basado en la necesidad de explorar alternativas que permitan la evaluación de las uniones entre cubierta y muro para el sistema estructural de METECNO.



Figura 48. Montaje experimental desarrollado

Teniendo en cuenta la Figura 48 y los planos esquemáticos del montaje experimental del capítulo 3 se dio inicio a la construcción del montaje experimental en el Laboratorio de Pruebas y Ensayos de la Pontificia Universidad Javeriana.

Inicialmente se ubicaron los canales de sujeción del montaje experimental en la parte inferior y superior de las vigas dispuestas para el soporte de elementos a ensayar; las cuales hacen parte del marco de reacción.

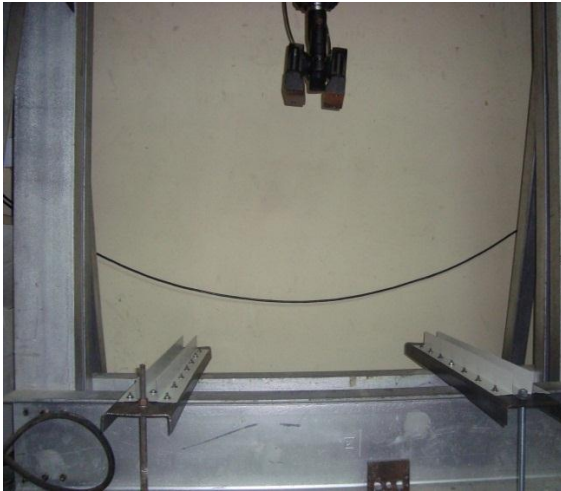


Figura 49. Canales de sujeción y perfiles de doble aleta



Figura 50. Inicio del montaje experimental

Posteriormente se ubicaron las probetas previamente construidas sobre el remate de doble aleta dispuesto como se observa en la Figura 49. De esta manera se procedió a sujetarlas y asegurarlas mediante tornillos de 1/4" con ayuda de un taladro. De esta manera se restringe algún tipo de desplazamiento para el montaje. Por otra parte la sujeción del panel tipo cubierta y el aditamento de carga se realizaron siguiendo el procedimiento explicado en el capítulo 3.3. Finalmente se realizaron las perforaciones y ajustes necesarios para la aplicación de una carga uniforme sobre la cubierta del espécimen a evaluar, tal y como se observa en la Figura 44 y Figura 45. Cabe resaltar que el mecanismo de aplicación de la carga denominado como actuador dinámico, fabricado por la empresa MTS, la cual se especializa en sistemas de evaluación mecánicas y simulaciones.

En la Figura 51 se muestra el montaje general listo para evaluar. De esta forma se da inicio a la realización de las pruebas y ensayos que permitirán realizar una evaluación del comportamiento entre la unión entre el panel tipo muro y el panel tipo cubierta de la empresa METECNO de Colombia. Para ello la aplicación de cargas cíclicas y estáticas aplicadas por el sistema MTS de actuador dinámico fue indispensable en la medida que nos permito obtener datos y elaborar gráficas que nos permiten comprender y evaluar el

comportamiento de dichas uniones ante la aplicación de una fuerza que simula el efecto del viento

A continuación se encontrará la descripción de la realización de cada uno de los tipos de ensayos propuestos en el capítulo 3. Para cada tipo de ensayo se realizaron tres diferentes pruebas en la medida que la evaluación de múltiples pruebas nos permita elaborar un análisis más detallado y elaborado del comportamiento de las uniones



Figura 51. Montaje listo para evaluar.

5.2 Tipología de ensayos realizados

5.2.1 Sistema tradicional

Para este tipo de ensayos se emplearon las conexiones remate en U con doble aleta, la cual trabaja sujetándose de los paneles tipo muro y tipo cubierta con tornillos autoperforantes de 1/4" x 14 x 7/8"

La Figura 52 muestra el montaje listo para ser ejecutado sobre el marco de reacción con ayuda del sistema de aplicación de fuerzas MTS. La falla que se aprecia en la Figura 53

corresponde a un desgarramiento por adherencia entre la lámina de acero galvanizada y el poliuretano de alta densidad en el panel tipo cubierta (Techmet).

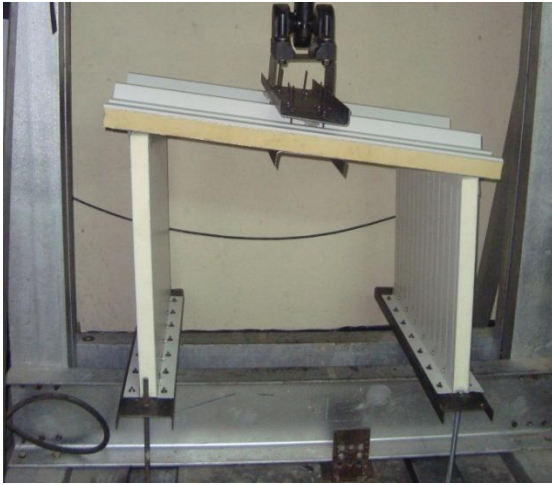


Figura 52. Montaje sistema tradicional

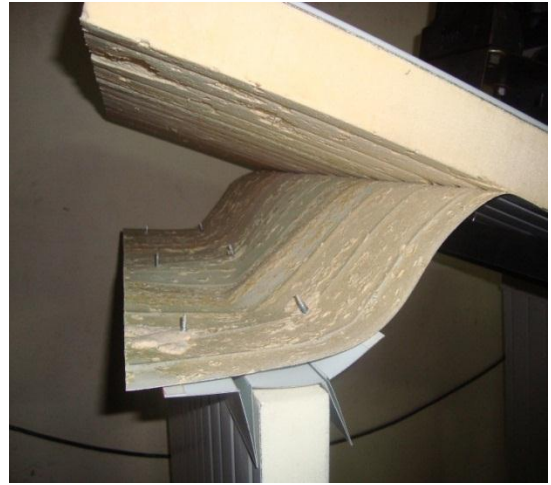


Figura 53. Falla típica sistema tradicional

5.2.2 Sistema tradicional y tornillos con capelote

Tal y como se mostró anteriormente, la Figura 54 muestra el montaje listo para ser probado. A su vez la Figura 55 corresponde a la falla típica del sistema tradicional con tornillo con capelote, la cual se ocasionó por desprendimiento de la lámina del poliuretano, excediendo la resistencia a la adherencia entre estos dos componentes del panel tipo cubierta.



Figura 54. Sistema tradicional con tornillo con capelote



Figura 55. Falla típica sistema tradicional con tornillo con capelote

5.2.3 Sistema tornillo pasante y tornillos con capelote

La Figura 56 muestra el montaje del sistema de tornillo pasante y tornillo con capelote previa a ser ejecutada la prueba. Así mismo la Figura 57 muestra la falla por adherencia que se ocasionó, al igual que en los dos sistemas anteriores.

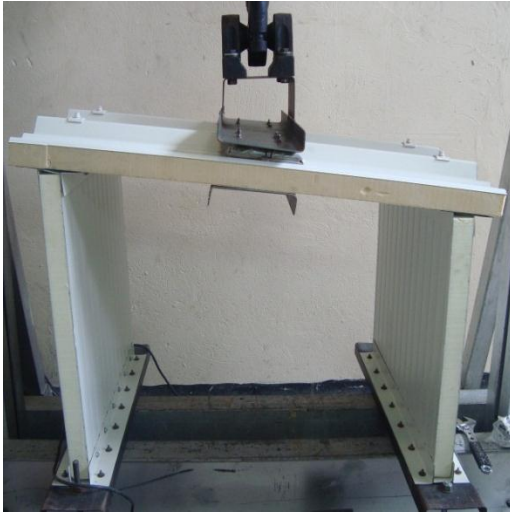


Figura 56. Sistema tornillo pasante y tornillo con capelote



Figura 57. Falla típica sistema tornillo pasante y tornillo con capelote

5.2.4 Sistema remache pop

La Figura 58 muestra el montaje típico ejecutado para el sistema de conexión con remache pop. A su vez la Figura 59 muestra la falla típica del sistema la cual se presentó por desprendimiento de la lámina con el poliuretano.

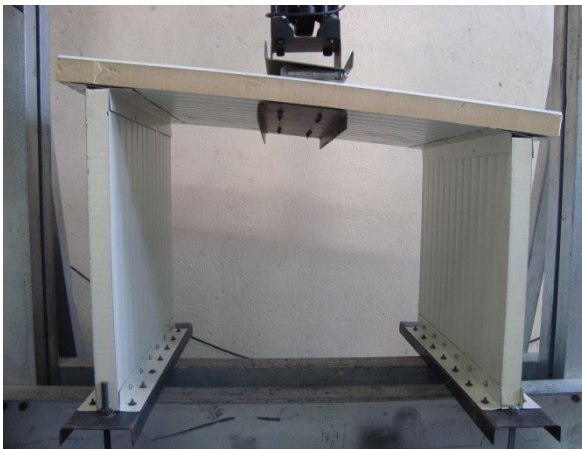


Figura 58. Montaje sistema remache pop



Figura 59. Falla típica sistema remache pop

5.2.5 Sistema remache pop y tornillos con capelote

Finalmente la Figura 60 muestra el montaje del sistema remache pop con tornillo con capelote previa a la ejecución del ensayo. Posteriormente la Figura 61 muestra la falla típica del sistema la cual se presentó por superación de la resistencia a la adherencia entre el poliuretano y las láminas de acero galvanizado.

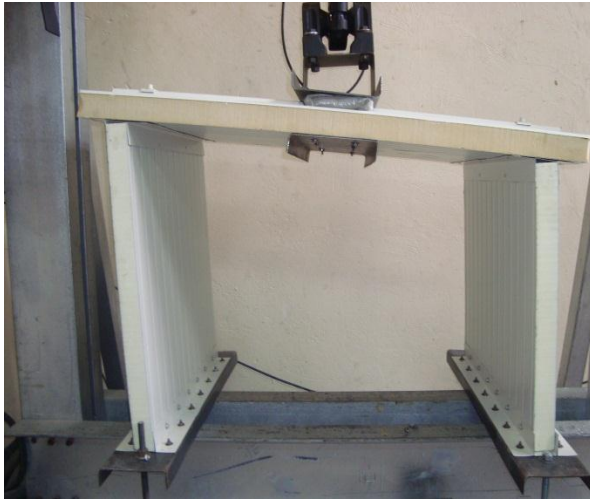


Figura 60. Montaje sistema remache pop con tornillo con capelote



Figura 61. Falla típica sistema remache pop con tornillo con capelote

6 Resultados y discusión

A partir de la realización de los múltiples ensayos realizados con ayuda del marco de reacción y el sistema de actuador dinámico MTS en el Laboratorio de Pruebas y Ensayos de la Pontificia Universidad Javeriana se elaboraron gráficas representativas del comportamiento de la conexión cubierta muro, teniendo en cuenta tanto ensayos dinámicos como ensayos estáticos. Dicha representación se da a conocer en este capítulo, así como valores promedio de las cargas de falla, mecanismos de colapso. Finalmente se realiza un análisis y comparación de los valores de esfuerzo obtenidos por los modelos numéricos con de los modelos numéricos con comparaciones.

6.1 Análisis del comportamiento de la unión

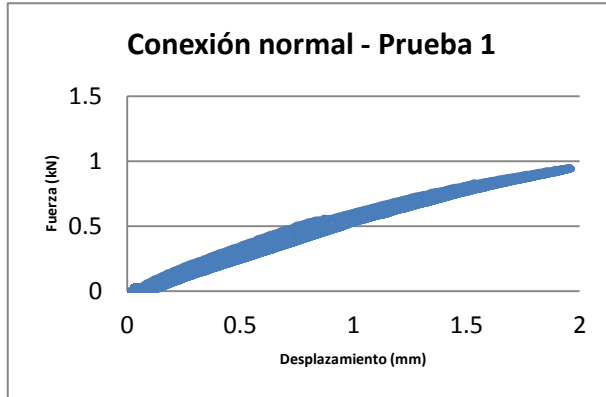
En este apartado se dan a conocer las gráficas elaboradas para el comportamiento de la unión sometida a ensayos cíclicos y estáticos que permitan elaborar y obtener datos que hagan una aproximación al efecto del viento en el sistema estructural de la empresa METECNO de Colombia. Las gráficas que se muestran a continuación hacen referencia al tipo de ensayo que se ejecutó para cada caso. Así mismo referencian la amplitud máxima de la señal aportada por el actuador dinámico y el valor de la fuerza necesaria para desplazarla dicho valor.

Cabe resaltar que se efectuaron ensayos cíclicos controlando los desplazamientos a 2mm, 4mm y 8 mm.

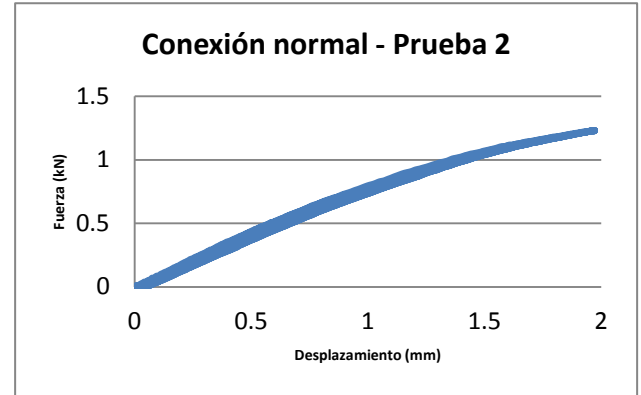
6.1.1 Resultados de ensayos cíclicos con desplazamientos de 2mm

En las siguientes imágenes se muestran los ciclos de histéresis que se obtuvieron a través del análisis de datos obtenidos de los ensayos del laboratorio. A partir de los valores máximos de fuerza aplicada encontrados para un desplazamiento de 2mm se establece que el promedio es de **1.037kN**. En la Gráfica 1, Gráfica 2 y la Gráfica 3 se presenta el comportamiento de la primera conexión evaluada, la cual fue denominada conexión normal.

- Conexión normal



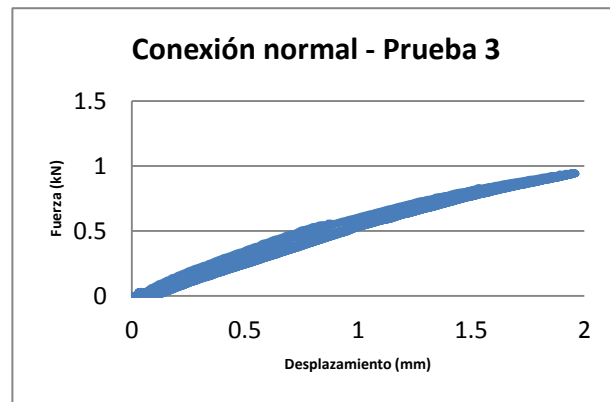
Max kN 0.93 kN



Max kN 1.23 kN

Gráfica 1. Ciclos de histéresis para un desplazamiento de 2mm en la conexión normal (Prueba 1)

Gráfica 2. Ciclos de histéresis para un desplazamiento de 2mm en la conexión normal (Prueba 2)

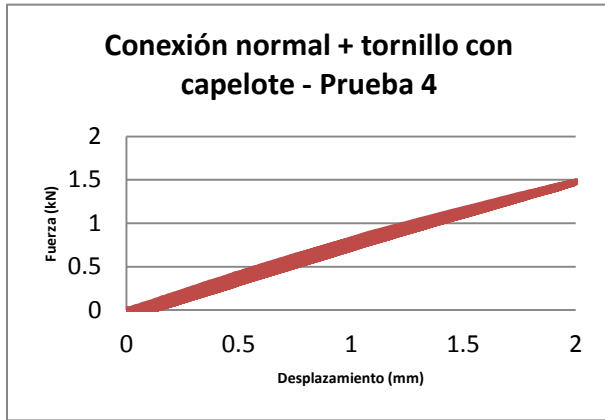


Max kN 0.95 kN

Gráfica 3. Ciclos de histéresis para un desplazamiento de 2mm en la conexión normal (Prueba 3)

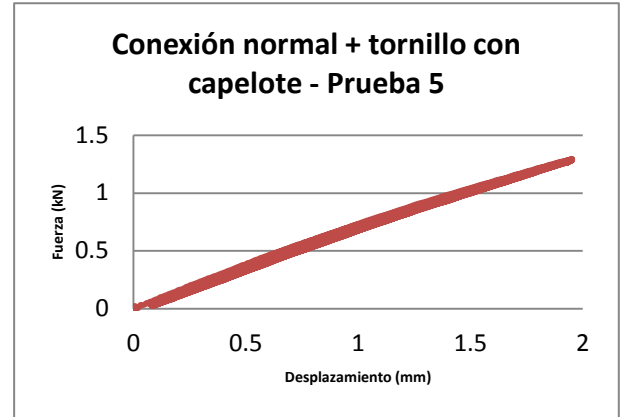
Posteriormente en la Gráfica 4, Gráfica 5 y Gráfica 6 se muestran los ciclos de histéresis que se obtuvieron a través del análisis de datos obtenidos de los ensayos del laboratorio para la conexión normal con tornillo con capelote. A partir de los valores máximos de fuerza aplicada encontrados para un desplazamiento de 2mm se obtuvo que el promedio es de **1.33 kN**.

- Conexión normal y tornillos con capelote



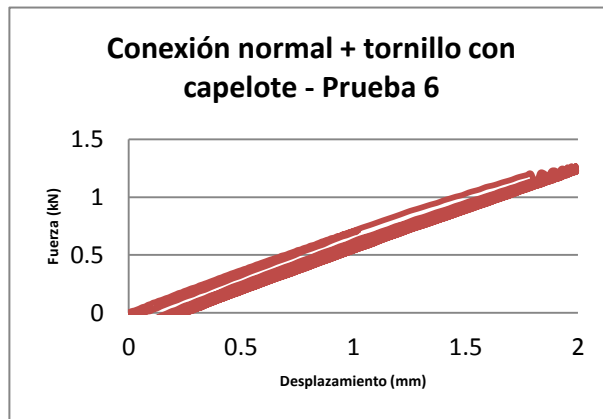
Max 1.4 kN

Gráfica 4. Ciclos de histéresis para un desplazamiento de 2mm en la conexión normal + tornillo con capelote. (Prueba 4)



Máx. 1.30 kN

Gráfica 5. Ciclos de histéresis para un desplazamiento de 2mm en la conexión normal + tornillo con capelote. (Prueba 5)

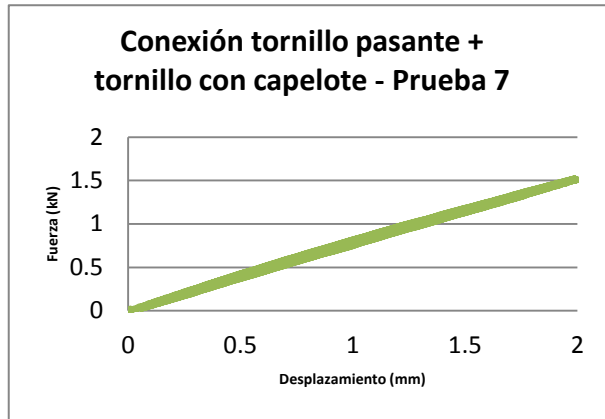


Máx. 1.27 kN

Gráfica 6. Ciclos de histéresis para un desplazamiento de 2mm en la conexión normal + tornillo con capelote. (Prueba 6)

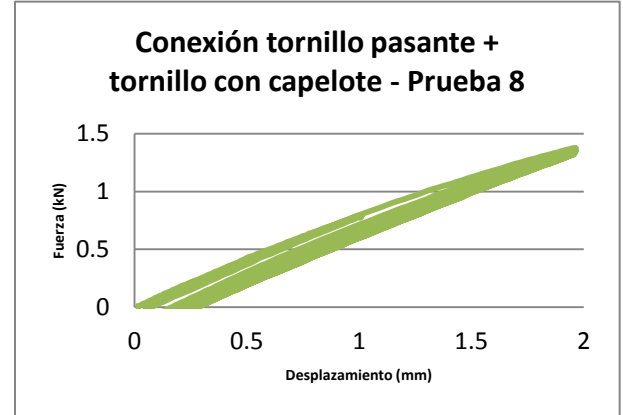
A continuación se muestran los ciclos de histéresis que se obtuvieron a través del análisis de datos obtenidos de los ensayos del laboratorio para la conexión de tornillo pasante con tornillo con capelote. A partir de los valores máximos de fuerza aplicada encontrados para un desplazamiento de 2mm encontramos que el promedio es de **1.50kN**.

- Conexión tornillo pasante y tornillos con capelote



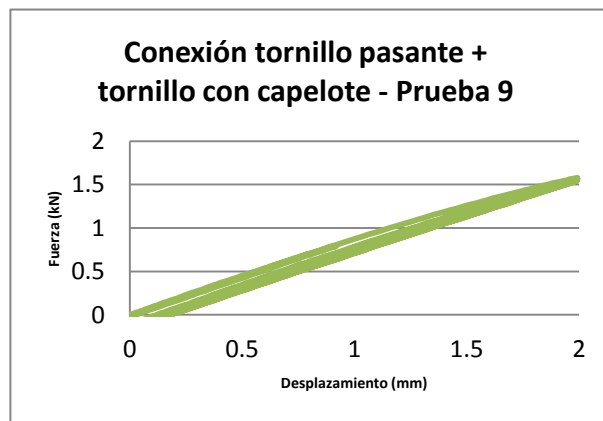
Máx. 1.53 kN

Gráfica 7. Ciclos de histéresis para un desplazamiento de 2mm en la conexión tornillo pasante + tornillo con capelote. (Prueba 7)



Máx. 1.38 kN

Gráfica 8. Ciclos de histéresis para un desplazamiento de 2mm en la conexión tornillo pasante + tornillo con capelote. (Prueba 8)

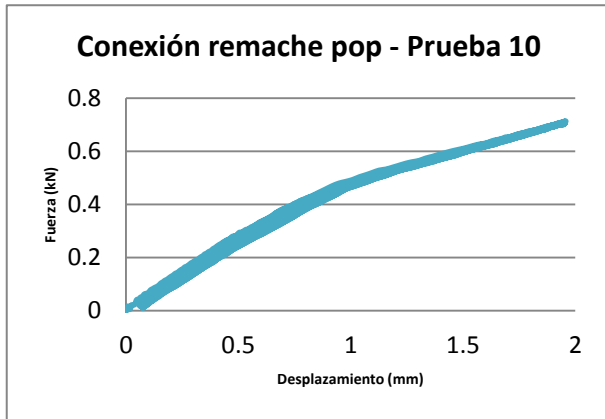


Máx. 1.58 kN

Gráfica 9. Ciclos de histéresis para un desplazamiento de 2mm en la conexión tornillo pasante + tornillo con capelote. (Prueba 9)

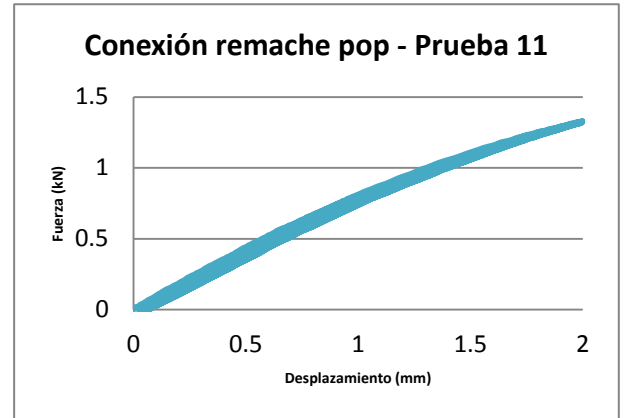
En esta parte del trabajo se muestran los ciclos de histéresis que se obtuvieron a través del análisis de datos obtenidos de los ensayos del laboratorio para la conexión con remaches pop. A partir de los valores máximos de fuerza aplicada encontrados para un desplazamiento de 2mm encontramos que el promedio es de **0.91 kN**.

- Conexión remache pop



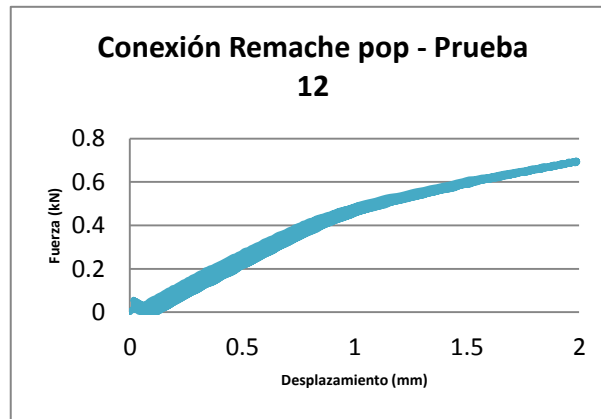
Máx. 0.71 kN

Gráfica 10. Ciclos de histéresis para un desplazamiento de 2mm en la conexión remache pop. (Prueba 10)



Máx. 1.33 kN

Gráfica 11. Ciclos de histéresis para un desplazamiento de 2mm en la conexión remache pop. (Prueba 11)

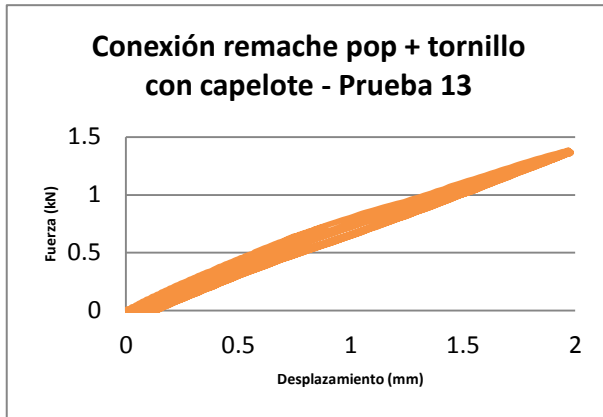


Máx. 0.70 kN

Gráfica 12. Ciclos de histéresis para un desplazamiento de 2mm en la conexión remache pop. (Prueba 12)

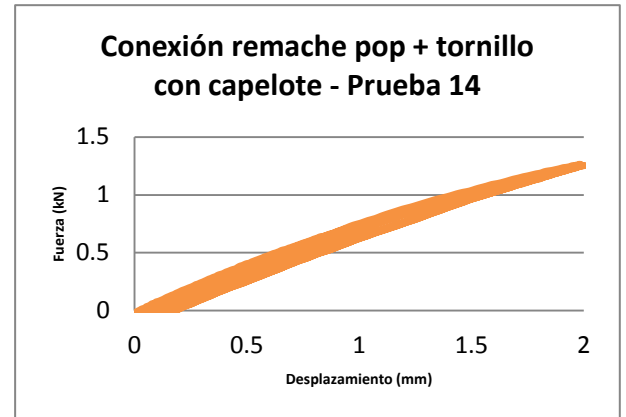
En esta sección se muestran los ciclos de histéresis que se obtuvieron a través del análisis de datos obtenidos de los ensayos del laboratorio para la conexión con remaches pop. A partir de los valores máximos de fuerza aplicada encontrados para un desplazamiento de 2mm encontramos que el promedio es de **1.32 kN**.

- Conexión remache pop y tornillos con capelote



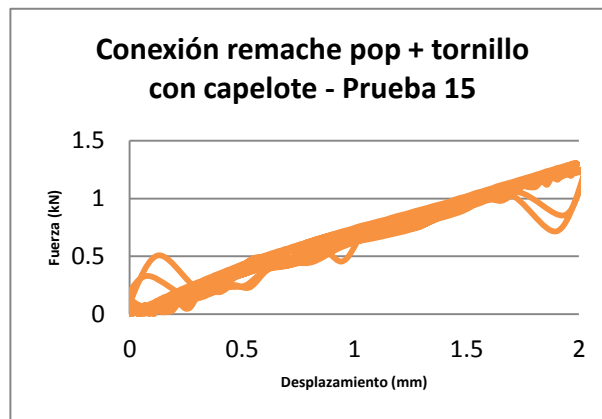
Máx. 1.38 kN

Gráfica 13. Ciclos de histéresis para un desplazamiento de 2mm en la conexión remache pop. (Prueba 13)



Máx. 1.27 kN

Gráfica 14. Ciclos de histéresis para un desplazamiento de 2mm en la conexión remache pop. (Prueba 14)



Máx. 1.31 kN

Gráfica 15. Ciclos de histéresis para un desplazamiento de 2mm en la conexión remache pop. (Prueba 15)

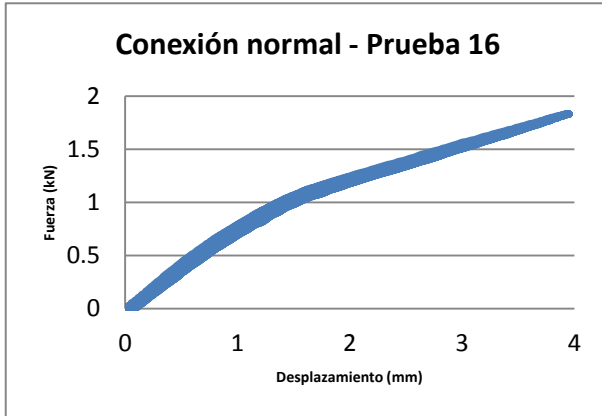
En la realización de los ensayos cíclicos sobre las probetas que utilizan el capelote en su sistema es apreciable la existencia de variaciones en la gráfica de fuerza sobre desplazamiento. Esto se debe a movimientos o desprendimientos del capelote, sin embargo estas acciones no repercuten de manera nociva el desempeño de la unión.

A su vez cabe destacar que el mejor comportamiento para estos ciclos es el de la conexión de tornillo pasante con tornillo con capelote.

6.1.2 Resultados de ensayos cíclicos con desplazamientos de 4mm

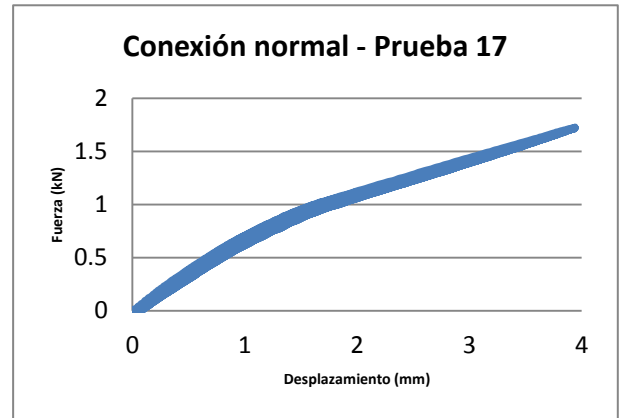
- Conexión normal

A continuación se muestran los ciclos de histéresis que se obtuvieron a través del análisis de datos obtenidos de los ensayos del laboratorio. A partir de los valores máximos de fuerza aplicada a los especímenes de conexión normal para un desplazamiento de 4mm encontramos que el promedio es de **1.79 kN**.



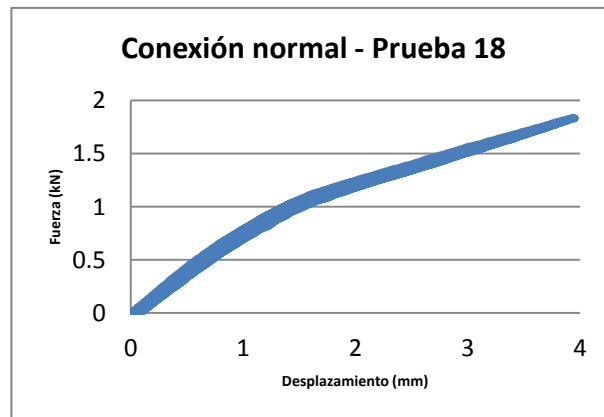
Máx. 1.84 kN

Gráfica 16. Ciclos de histéresis para un desplazamiento de 4mm en la conexión normal. (Prueba 16)



Máx. 1.73 kN

Gráfica 17. Ciclos de histéresis para un desplazamiento de 4mm en la conexión normal. (Prueba 17)

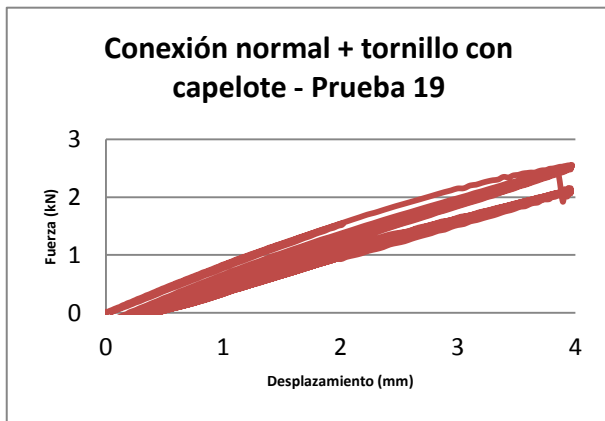


Máx. 1.79 kN

Gráfica 18. Ciclos de histéresis para un desplazamiento de 4mm en la conexión normal. (Prueba 18)

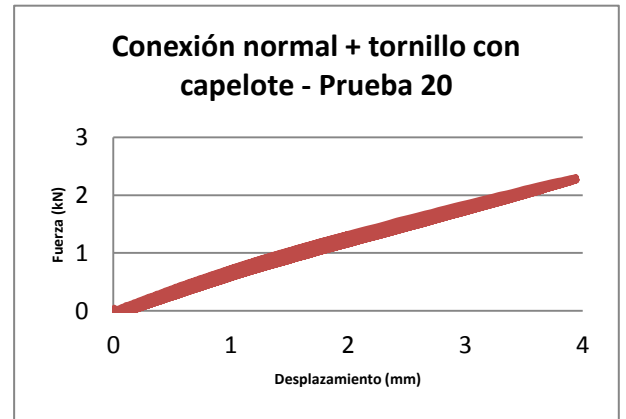
- Conexión normal y tornillos con capelote

Posteriormente se dan a conocer los ciclos de histéresis que se obtuvieron a través del análisis de datos obtenidos de los ensayos del laboratorio. A partir de los valores máximos de fuerza aplicada sobre las probetas de tornillo normal más tornillo con capelote, con un desplazamiento de 4mm, encontramos que el promedio es de **2.40 kN**.



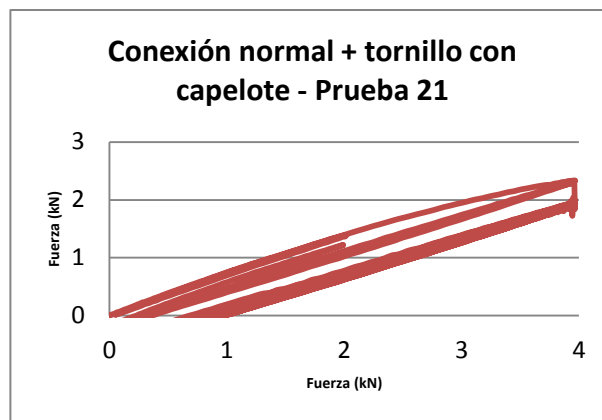
Máx. 2.56 kN

Gráfica 19. Ciclos de histéresis para un desplazamiento de 4mm en la conexión normal + tornillo con capelote. (Prueba 19)



Máx. 2.31 kN

Gráfica 20. Ciclos de histéresis para un desplazamiento de 4mm en la conexión normal + tornillo con capelote. (Prueba 20)

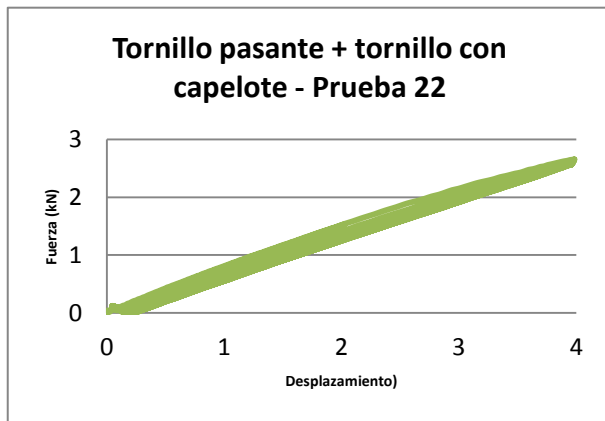


Máx. 2.34 kN

Gráfica 21. Ciclos de histéresis para un desplazamiento de 4mm en la conexión normal + tornillo con capelote. (Prueba 21)

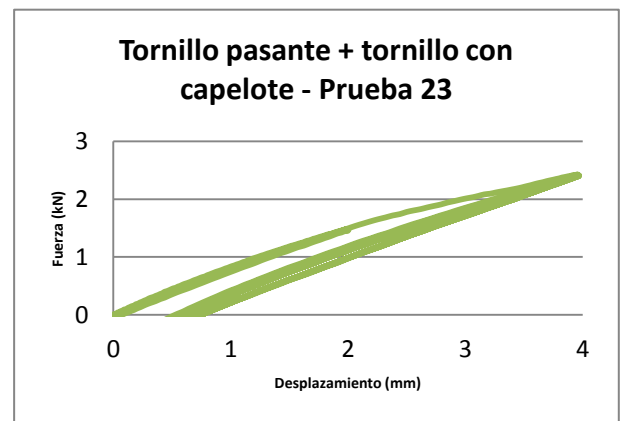
- Conexión tornillo pasante y tornillos con capelote

A continuación se dan a conocer los ciclos de histéresis que se obtuvieron a través del análisis de datos obtenidos de los ensayos del laboratorio. A partir de los valores máximos de fuerza aplicada sobre las probetas de tornillo pasante más tornillo con capelote, con un desplazamiento de 4mm, se estableció que el promedio es de **2.66 kN**.



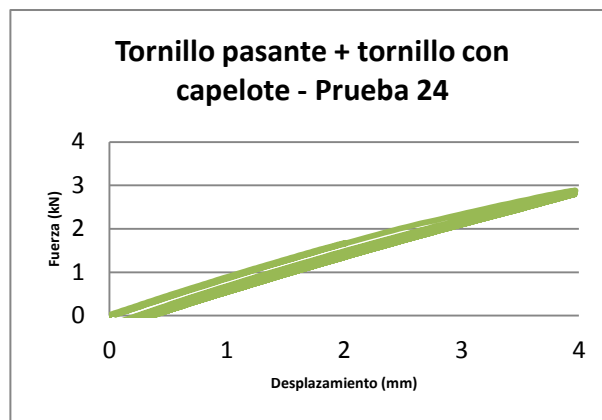
Máx. 2.66 kN

Gráfica 22. Ciclos de histéresis para un desplazamiento de 4mm en la conexión tornillo pasante + tornillo con capelote. (Prueba 22)



Máx. 2.43 kN

Gráfica 23. Ciclos de histéresis para un desplazamiento de 4mm en la conexión tornillo pasante + tornillo con capelote. (Prueba 23)

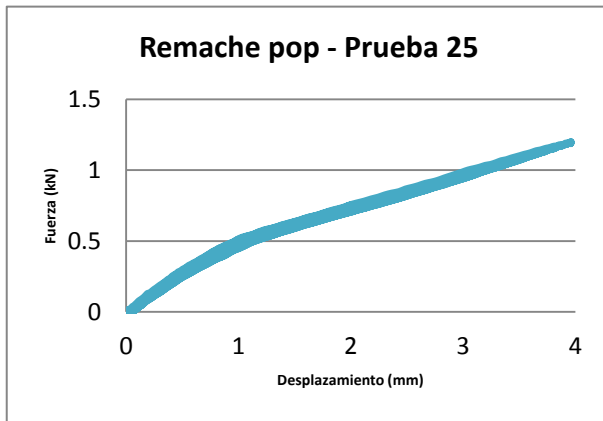


Máx. 2.88 kN

Gráfica 24. Ciclos de histéresis para un desplazamiento de 4mm en la conexión tornillo pasante + tornillo con capelote. (Prueba 24)

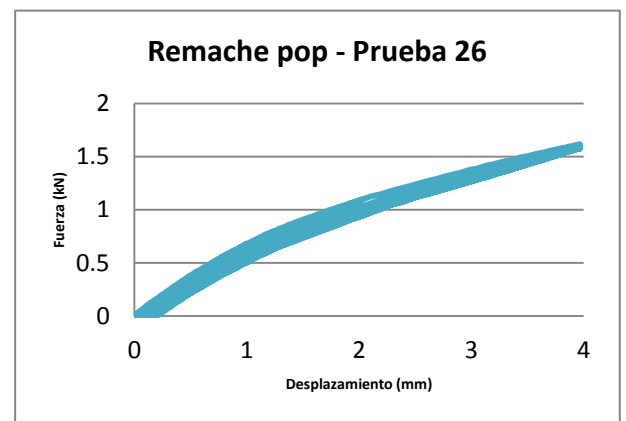
- Conexión remache pop

Posteriormente se desarrollan gráficas de los ciclos de histéresis que se obtuvieron a través del análisis de datos obtenidos de los ensayos del laboratorio. A partir de los valores máximos de fuerza aplicada sobre las probetas con una conexión de remache pop, con un desplazamiento de 4mm, se estableció que el promedio es de **1.32 kN**.



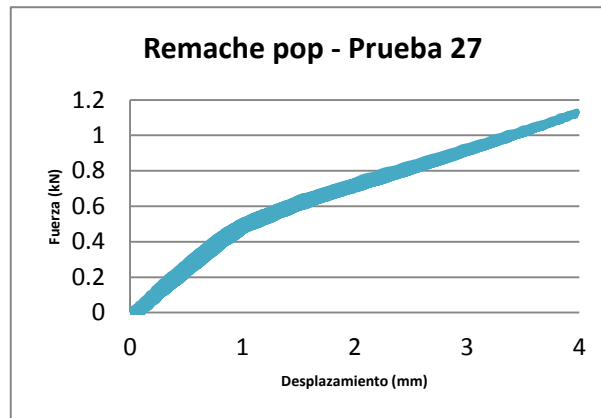
Máx. 1.21 kN

Gráfica 25. Ciclos de histéresis para un desplazamiento de 4mm en la conexión remache pop. (Prueba 25)



Máx. 1.62 kN

Gráfica 26. Ciclos de histéresis para un desplazamiento de 4mm en la conexión remache pop. (Prueba 26)

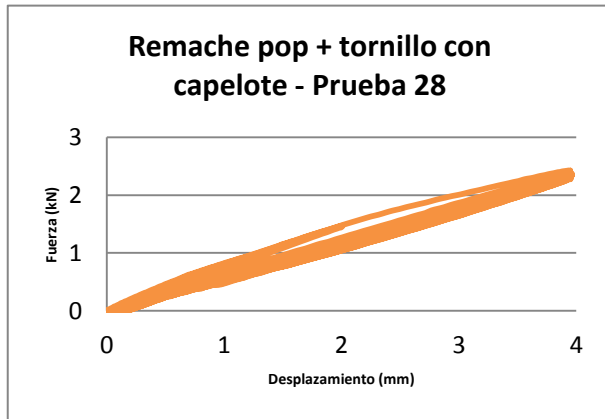


Máx. 1.13 kN

Gráfica 27. Ciclos de histéresis para un desplazamiento de 4mm en la conexión remache pop. (Prueba 27)

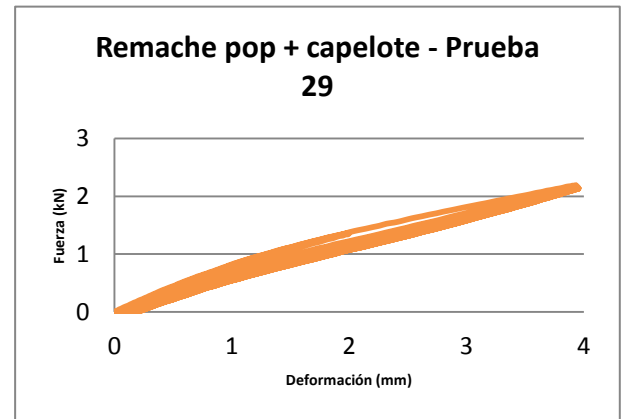
- Conexión remache pop y tornillos con capelote

Finalmente se desarrollan gráficas de los ciclos de histéresis que se obtuvieron a través del análisis de datos obtenidos de los ensayos del laboratorio. A partir de los valores máximos de fuerza aplicada sobre las probetas con una conexión de remache pop además de un tornillo con capelote, con un desplazamiento de 4mm, se estableció que el promedio es de **2.31 kN**.



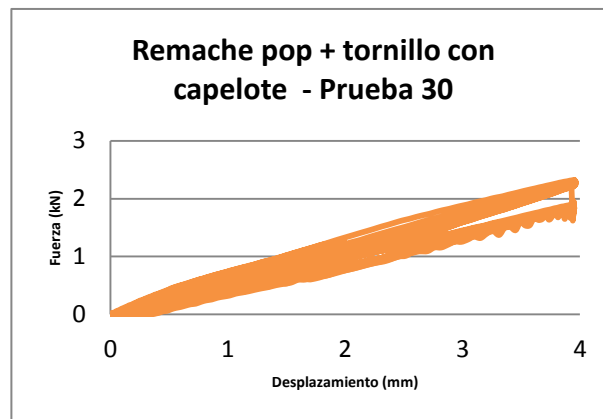
Máx. 2.43 kN

Gráfica 28. Ciclos de histéresis para un desplazamiento de 4mm en la conexión remache pop + tornillo con capelote. (Prueba 28)



Máx. 2.19 kN

Gráfica 29. Ciclos de histéresis para un desplazamiento de 4mm en la conexión remache pop + tornillo con capelote. (Prueba 29)



Máx. 2.32 kN

Gráfica 30. Ciclos de histéresis para un desplazamiento de 4mm en la conexión remache pop + tornillo con capelote. (Prueba 30)

En las gráficas concernientes a los ensayos que tienen la adición de un tornillo con capelote cabe destacar la existencia de desfases en las gráficas de histéresis, las cuales

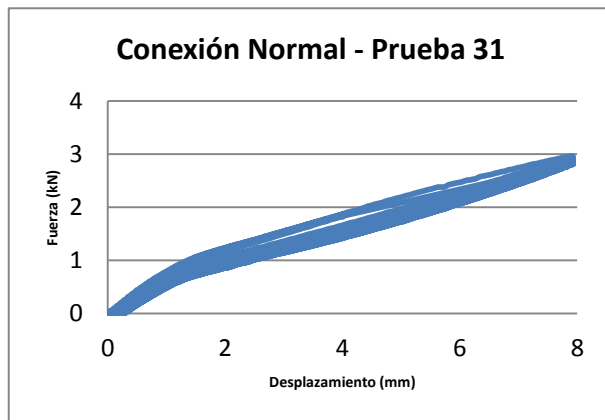
corresponden a un desprendimiento de este tornillo de la lámina de la conexión. Sin embargo se aprecia que la variación no es muy significativa.

Por otra parte encontramos que a partir de los anteriores resultados el mejor comportamiento lo tiene nuevamente la conexión de tornillo pasante con tornillo con capelote.

6.1.3 Resultados de ensayos cíclicos con desplazamientos de 8mm

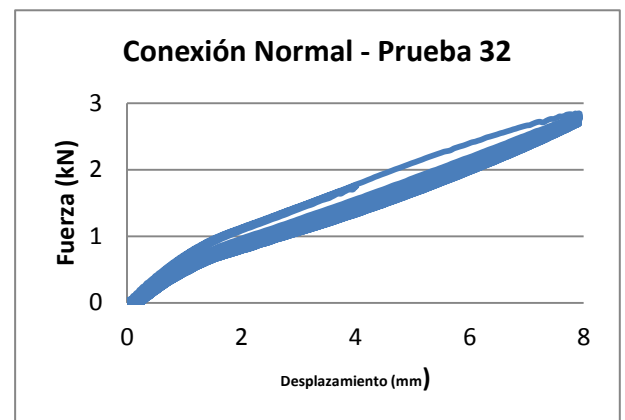
- Conexión normal

A continuación se muestran los ciclos de histéresis que se obtuvieron a través del análisis de datos obtenidos de los ensayos del laboratorio. A partir de los valores máximos de fuerza aplicada a los especímenes de conexión normal para un desplazamiento de 8mm encontramos que el promedio es de **2.88 kN**.



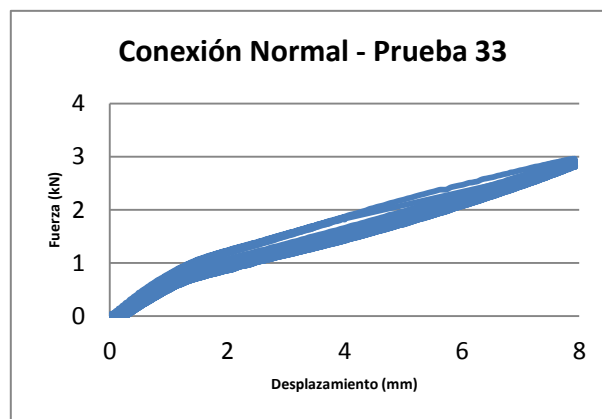
MAX 2.96 kN

Gráfica 31. Ciclos de histéresis para un desplazamiento de 8mm en la conexión normal. (Prueba 31)



MAX 2.73 kN

Gráfica 32. Ciclos de histéresis para un desplazamiento de 8mm en la conexión normal. (Prueba 32)

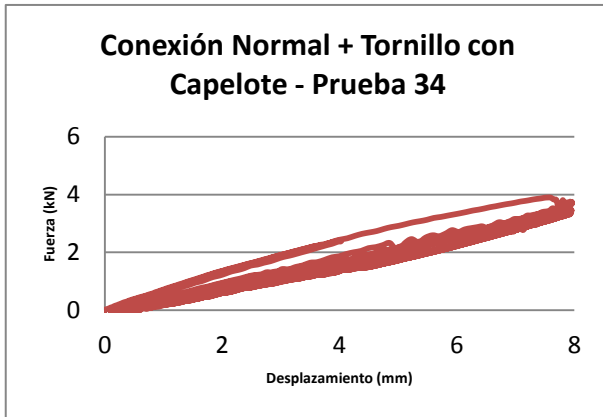


MAX 2.96 kN

Gráfica 33. Ciclos de histéresis para un desplazamiento de 8mm en la conexión normal. (Prueba 33)

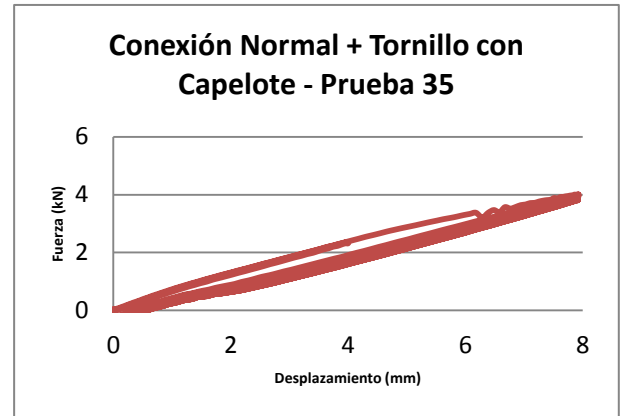
- Conexión normal y tornillos con capelote

En estas a conocer los ciclos de histéresis que se obtuvieron a través del análisis de datos obtenidos de los ensayos del laboratorio. A partir de los valores máximos de fuerza aplicada sobre las probetas de tornillo normal más tornillo con capelote, con un desplazamiento de 4mm, encontramos que el promedio es de 3.99 kN.



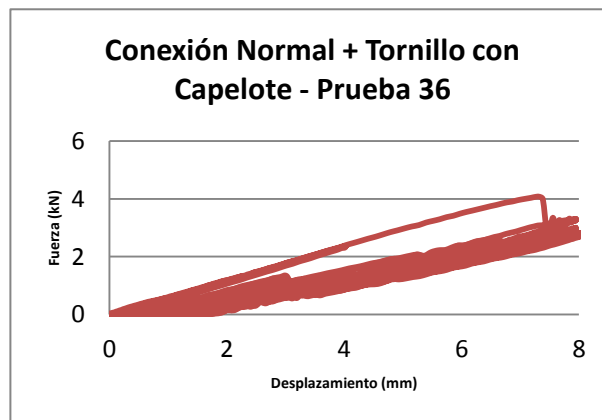
MAX 3.90 kN

Gráfica 34. Ciclos de histéresis para un desplazamiento de 8mm en la conexión con tornillo con capelote normal. (Prueba 34)



MAX 4.01 kN

Gráfica 35. Ciclos de histéresis para un desplazamiento de 8mm en la conexión con tornillo con capelote normal. (Prueba 35)

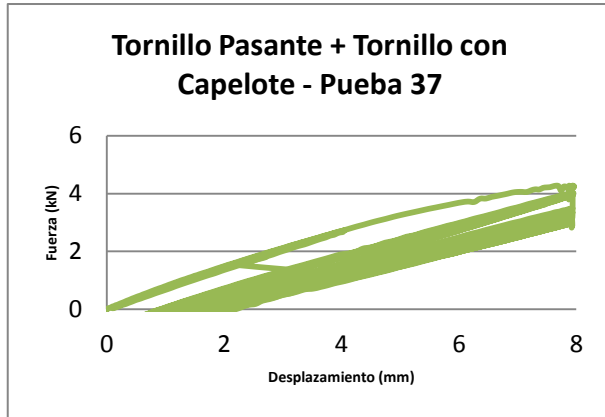


MAX 4.07 kN

Gráfica 36. Ciclos de histéresis para un desplazamiento de 8mm en la conexión con tornillo con capelote normal. (Prueba 36)

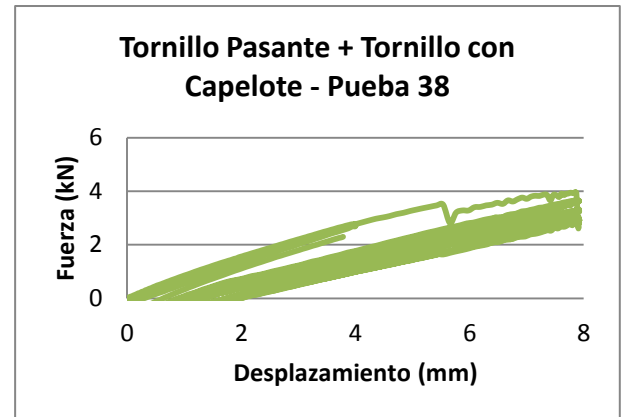
- Conexión tornillo pasante y tornillos con capelote

A continuación se dan a conocer los ciclos de histéresis que se obtuvieron a través del análisis de datos obtenidos de los ensayos del laboratorio. A partir de los valores máximos de fuerza aplicada sobre las probetas de tornillo pasante más tornillo con capelote, con un desplazamiento de 8mm, se estableció que el promedio es de **4.28 kN**.



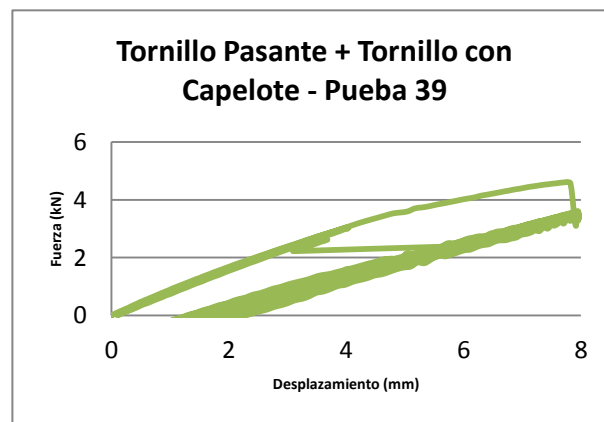
MAX 4.28 kN

Gráfica 37. Ciclos de histéresis para un desplazamiento de 8mm en la conexión con tornillo pasante y tornillo con capelote. (Prueba 37)



MAX 3.97 kN

Gráfica 38. Ciclos de histéresis para un desplazamiento de 8mm en la conexión con tornillo pasante y tornillo con capelote. (Prueba 38)

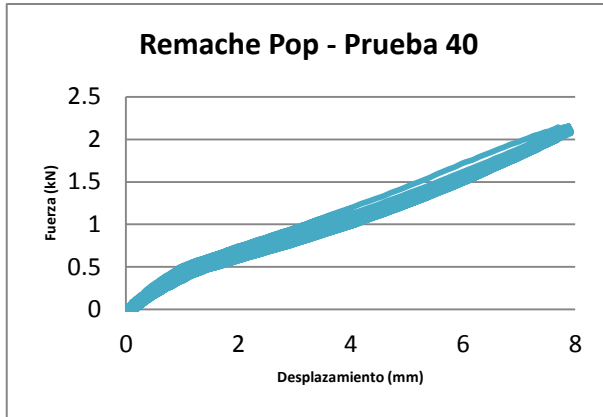


MAX 4.61 kN

Gráfica 39. Ciclos de histéresis para un desplazamiento de 8mm en la conexión con tornillo pasante y tornillo con capelote. (Prueba 39)

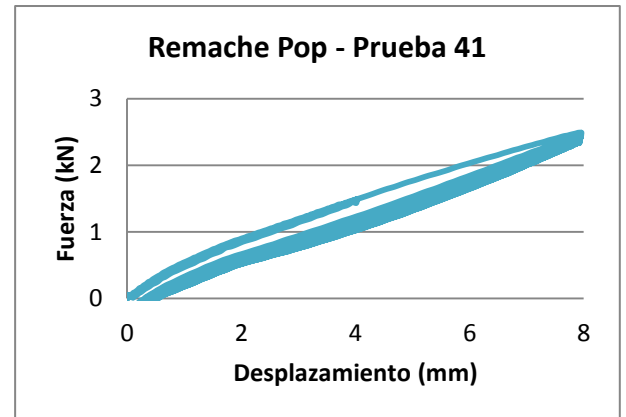
- Conexión remache pop

En esta sección se muestran los ciclos de histéresis que se obtuvieron a través del análisis de datos obtenidos de los ensayos del laboratorio para la conexión con remaches pop. A partir de los valores máximos de fuerza aplicada encontrados para un desplazamiento de 8mm encontramos que el promedio es de **2.23 kN**.



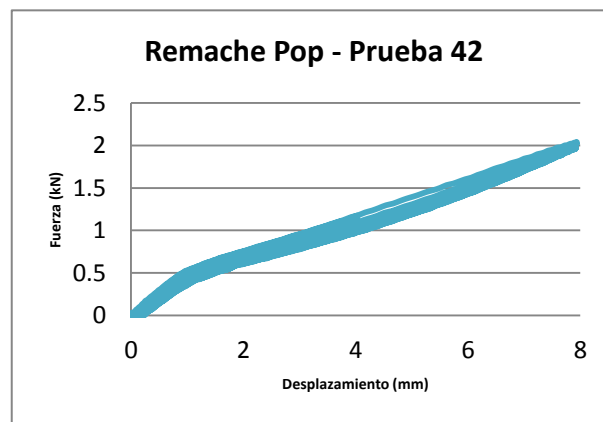
MAX 2.16 kN

Gráfica 40. Ciclos de histéresis para un desplazamiento de 8mm en la conexión con remache pop. (Prueba 40)



MAX 2.49 kN

Gráfica 41. Ciclos de histéresis para un desplazamiento de 8mm en la conexión con remache pop. (Prueba 41)

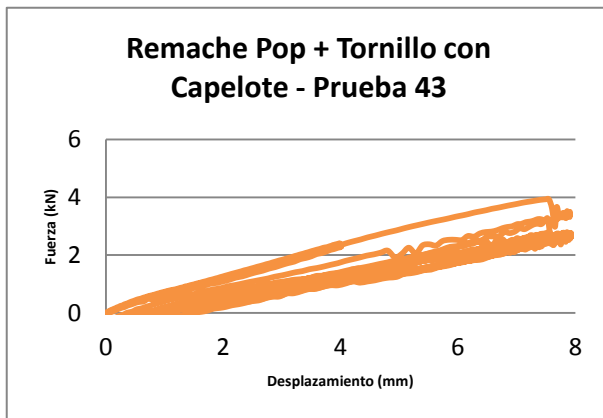


MAX 2.04 kN

Gráfica 42. Ciclos de histéresis para un desplazamiento de 8mm en la conexión con remache pop. (Prueba 42)

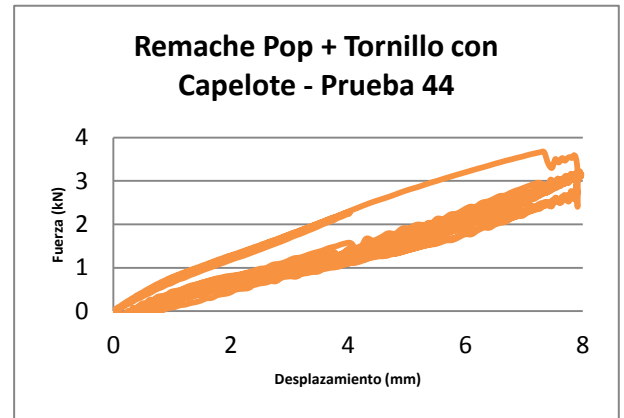
- Conexión remache pop y tornillos con capelote

Finalmente se desarrollan gráficas de los ciclos de histéresis que se obtuvieron a través del análisis de datos obtenidos de los ensayos del laboratorio. A partir de los valores máximos de fuerza aplicada sobre las probetas con una conexión de remache pop además de un tornillo con capelote, con un desplazamiento de 4mm, se estableció que el promedio es de **2.31 kN**.



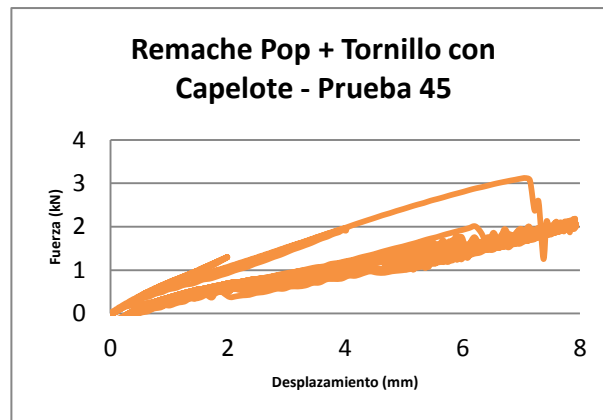
MAX 3.93 kN

Gráfica 43. Ciclos de histéresis para un desplazamiento de 8mm en la conexión con remache pop y tornillo con capelote. (Prueba 43)



MAX 3.66 kN

Gráfica 44. Ciclos de histéresis para un desplazamiento de 8mm en la conexión con remache pop y tornillo con capelote. (Prueba 44)



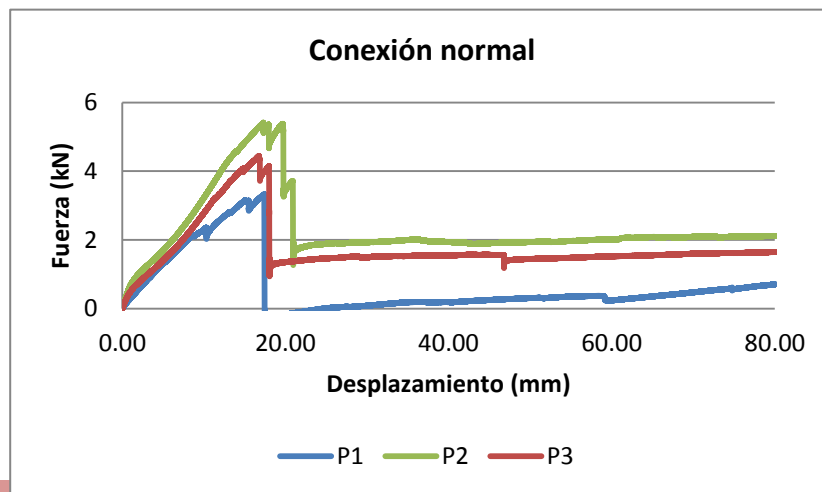
MAX 3.12 kN

Gráfica 45. Ciclos de histéresis para un desplazamiento de 8mm en la conexión con remache pop y tornillo con capelote. (Prueba 45)

6.1.4 Resultados de ensayos estáticos

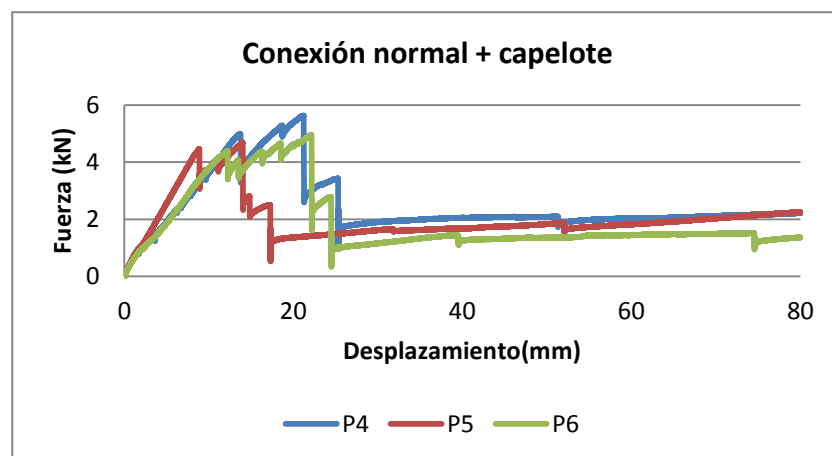
Así como se realizaron ensayos cíclicos fue necesario realizar ensayos estáticos de desplazamiento controlado a lo largo del tiempo (Monotónicos). De esta manera se logró estimar la resistencia a partir del máximo valor de fuerza aplicada para la cual las probetas fallan.

De esta forma se hicieron pruebas con un desplazamiento controlado de 80 mm en un tiempo de 120 s. Es así como se obtuvieron los datos de fuerza aplicada y desplazamiento sobre las probetas. Posteriormente se determinó la desviación estándar y el valor promedio del máximo aplicado para cada una de las pruebas (P1, P2 y P3)



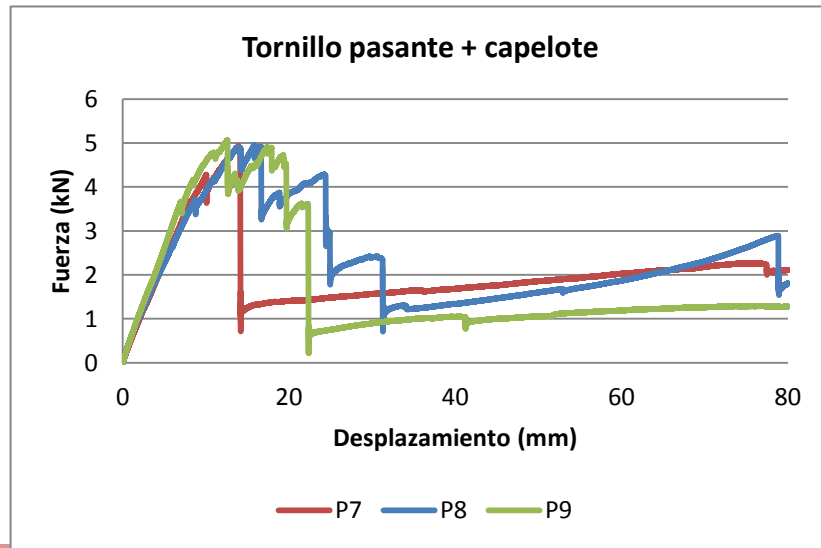
Prom 4.40 kN Desv. Est 0.84 Tipo 1

Gráfica 46. Ensayos monotónicos para las probetas tipo 1

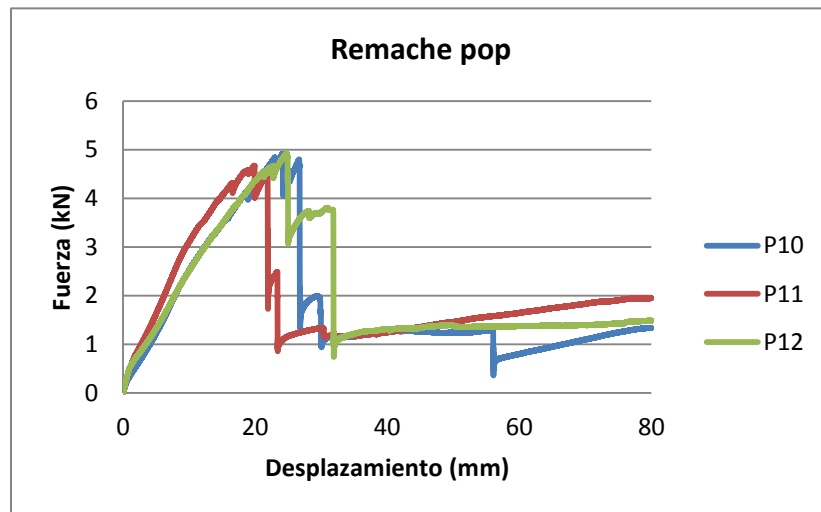


Prom 5.09 kN Desv. Est 1.40 Tipo 2

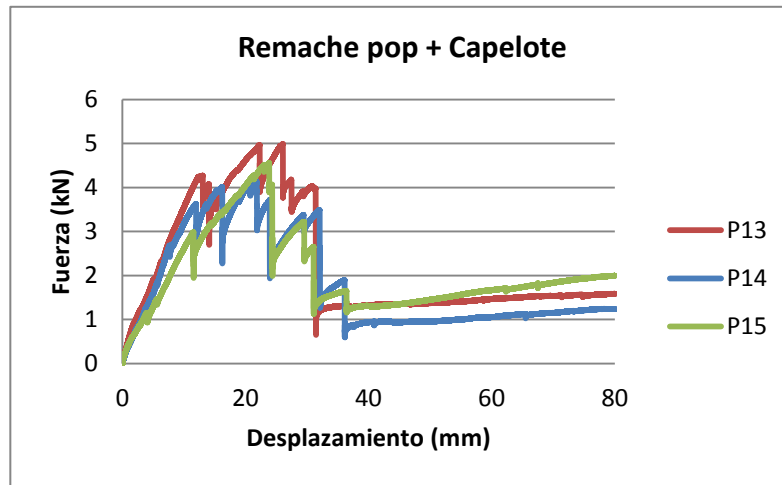
Gráfica 47. Ensayos monotónicos para las probetas tipo 2



Prom 4.98 kN Desv. Est 1.05 Tipo 3
Gráfica 48. Ensayos monotónicos para las probetas tipo 3

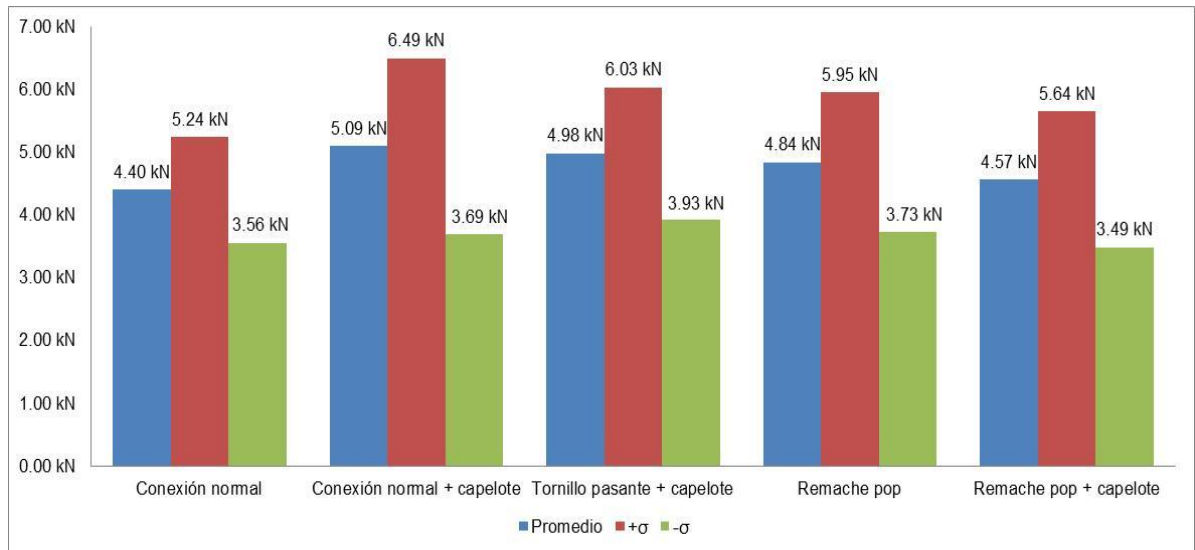


Prom 4.84 kN Desv. Est 1.11 Tipo 4
Gráfica 49. Ensayos monotónicos para las probetas tipo 4



Prom 4.57 kN Desv. Est 1.08 kN Tipo 5
Gráfica 50. Ensayos monotónicos para las probetas tipo 5

A partir de la información contenida en las anteriores gráficas se ha elaborado un nuevo gráfico el cual contiene los valores promedio de resistencia ante la aplicación de una carga estática. De igual manera se contempla en el siguiente gráfico el valor de la desviación estándar para tener en cuenta la dispersión de los datos obtenidos en los ensayos.



Gráfica 51. Consolidación de los datos obtenidos de los ensayos estáticos

Así mismo se ha elaborado la siguiente tabla, la cual resume el resultado de las fuerzas promedio requeridas por las probetas para los desplazamientos aplicados por los ensayos cíclicos realizados. De esta forma se observa los valores con íconos en color verde, los cuales muestran un desempeño superior al 67% del promedio en comparación a las otras conexiones. Por otra parte los íconos en rojo expresan fuerzas requeridas por debajo del

33% del promedio de la fuerza entre las conexiones. Así mismo los íconos amarillos muestran valores cercanos al promedio.

Tipo de conexión	Desplazamiento		
	2 mm	4 mm	8 mm
Tornillo autoperforante	◆ 1.04 kN	▲ 1.79 kN	◆ 2.88 kN
Tornillo autoperforante + capelote	● 1.33 kN	● 2.40 kN	● 3.99 kN
Tornillo pasante + capelote	● 1.50 kN	● 2.66 kN	● 4.29 kN
Remache pop	◆ 0.91 kN	◆ 1.32 kN	◆ 2.23 kN
Remache pop + capelote	● 1.32 kN	● 2.31 kN	▲ 3.57 kN

Tabla 7. Resultados y comparación de ensayos cíclicos realizados.

6.2 Tipología de falla

A partir de las figuras del capítulo 5.2, se observa claramente que la falla típica en todos los tipos de ensayos realizados consiste en el desprendimiento de la lámina de acero galvanizado del núcleo de poliuretano de alta densidad. De esta manera se estima que la adherencia de la sección compuesta se ve superada en el momento de la falla.

De esta forma se revisó la referencia (Ruiz *et al.*, 2007) donde se han establecido a través de ensayos en laboratorio el parámetro de esfuerzo máximo de adherencia. A continuación se dan a conocer los ensayos realizados por la referencia, así como los resultados obtenidos.

En la Figura 62 se muestra el ensayo de esfuerzo de adherencia realizado por la referencia (Ruiz *et al.*, 2007). Para este ensayo se aplicó una carga perpendicular al plano de las láminas con el fin de determinar el esfuerzo necesario para desgarrar el poliuretano de las láminas. Para ello se emplearon probetas de alrededor de 50mm de arista con el fin de establecer fuerzas máximas y esfuerzos admisibles aplicables a los paneles de bajo peso de la empresa METECNO de Colombia. Dichos resultados se muestran en la Tabla 8. Resultados de ensayos de adherencia de la referencia (Ruiz *et al.*, 2007)



Figura 62. Ensayo de esfuerzo de adherencia de la referencia (Cimoc, 2000)

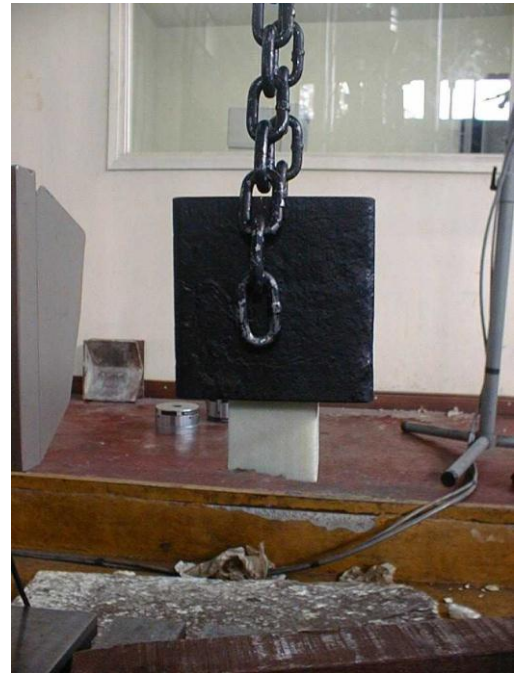


Figura 63. Falla del ensayo de adherencia de la referencia (Cimoc, 2000)

Ensayo	Fuerza máxima	Esfuerzo máximo
1	24.66 kg	1.066 kg/m ²
2	25.25 kg	1.092 kg/m ²
3	27.11 kg	1.132 kg/m ²
Promedio	25.67 kg	1.097 kg/m²

Tabla 8. Resultados de ensayos de adherencia de la referencia (Ruiz et al., 2007)

De esta forma se hace evidente la necesidad de evaluar la el comportamiento numérico de las probetas en las condiciones especificadas por los ensayos. Para ello se han aplicado en los modelos numéricos realizados y mostrados en el capítulo 4.2 el promedio de falla que se encontraron en el capítulo 6.1.4. Y se muestran en la Tabla 9. De esta forma se busca comparar los esfuerzos actuantes sobre los paneles con los esfuerzos admisibles de adherencia. A continuación se establecen los valores promedio de fuerza aplicados a cada modelo.

Tipo de prueba	Fuerza aplicada promedio
Conexión normal	4.40 kN
Conexión normal y tornillo con capelote	5.09 kN
Tornillo pasante y tornillo con capelote	4.98 kN
Remache pop	4.84 kN
Remache pop y tornillo con capelote	4.57 kN
Promedio	4.78 kN

Tabla 9. Resultados ensayos estáticos realizados a cada uno de los tipos de conexión.

Es apreciable en las siguientes imágenes que el valor de los esfuerzos del análisis estático lineal al cual se sometió las probetas supera ampliamente la resistencia a la adherencia establecida la Tabla 8. A continuación se dan a conocer los resultados de la modelación numérica de las probetas sometidas a las cargas establecidas por las pruebas de laboratorio. La escala numérica mostrada en la parte inferior de los modelos corresponde a valores de esfuerzo en kg-f/cm^2

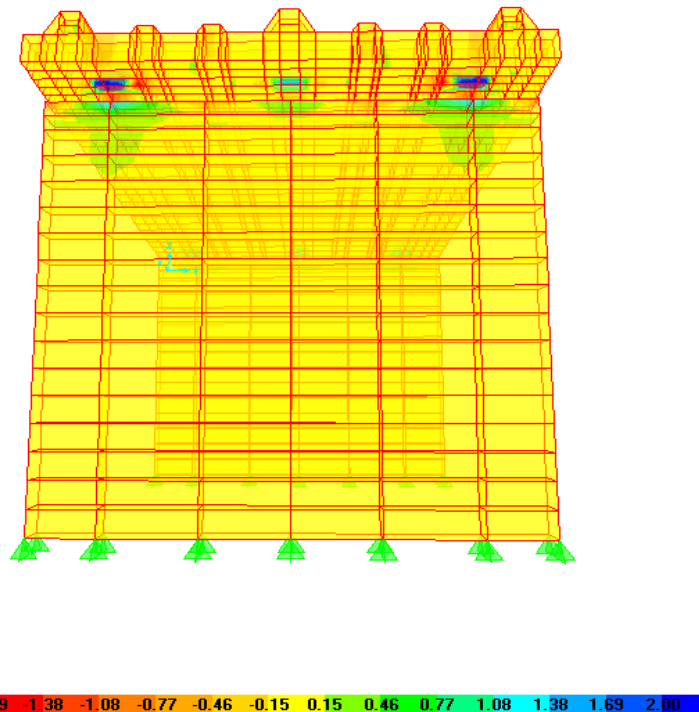


Figura 64. Esfuerzos de adherencia sobre las probetas ante la aplicación de la fuerza promedio (4.78 kN)

A partir de la revisión de los valores de las figuras mostradas anteriormente se observa que los esfuerzos que se dan en el poliuretano por acción de las cargas que simulan la

acción del viento son mayores a los esfuerzos admisibles de adherencia encontrados en la Tabla 8, que relaciona el promedio de esfuerzos admisibles por adherencia de los paneles METECNO. Así mismo las áreas con contorno azul muestran una concentración de esfuerzos debida a la unión con el perno empleado. Valores obtenidos que varían desde 1kg-f/cm^2 hasta 2kg-f/cm^2 son aplicados en dichas zonas, lo que ocasiona una falla predecible por desprendimiento en el panel tipo cubierta.

De esta manera es apreciable que ante la aplicación de dichas cargas la unión de la cubierta y el muro no sufre ninguna consecuencia negativa ni algún daño permanente. Así mismo los tornillos no tienen ningún tipo de falla ni la fuerza aplicada hace que se tenga algún tipo de falla en ellos.

De esta forma se tiene que la falla ante la aplicación de estas cargas límite se da exclusivamente por la adherencia del poliuretano, en la medida que los esfuerzos observados en los modelos numéricos coinciden en cierta medida con los encontrados por la referencia (Ruiz *et al.*, 2007).

6.3 Comparación con requerimientos de NSR – 10

Con el fin de verificar el funcionamiento y el desempeño de las uniones entre la cubierta y el muro del sistema estructural de la empresa METECNO de Colombia se ha realizado la aplicación de la carga de viento según la normatividad y los parámetros establecidos por el código colombiano de construcción sismo resistente NSR – 10. De esta manera se logrará tener un valor más aproximado de la acción del viento sobre el sistema estructural y si este debe ser replanteado en la medida de su comportamiento frente a estas fuerzas.

Para la comparación entre los valores actuantes establecidos por la norma se evaluaron los requerimientos establecidos por el título B de la Norma Sismo Resistente 10 en su capítulo 6. En este documento oficial se definen dos clases de procedimientos aceptados para determinar las cargas de diseño para edificaciones y otras estructuras. Para la realización de este trabajo se determinó evaluar el método simplificado de determinación de cargas de viento

El método simplificado establece que para el cálculo de las fuerzas de diseño del sistema principal de resistencia ante fuerzas de viento a través de este procedimiento la edificación en análisis debe cumplir con las siguientes características

1. Diafragma rígido
2. Pocas aberturas (Edificación cerrada)
3. Geometría regular
4. No sea flexible
5. Sección transversal simétrica
6. Carga torsional nula

De esta forma se define como viable la aplicación del sistema estructural teniendo en cuenta las características de la vivienda tipo (Figura 14) planteada por METECNO de Colombia.

El capítulo 6 del título B de la Norma Sismo Resistente NSR-10 se define la ecuación

$$P_s = \lambda \times K_{zt} \times I \times P_{s10} \quad \text{(Ecuación 1)}$$

Donde

λ : Factor de ajuste por altura y exposición

K_{zt} : Factor topográfico evaluado a la altura promedio de la cubierta (h)

I: Factor de importancia

P_{s10} : Presión de viento de diseño simplificada

Vale la pena recalcar es que la necesidad del certificar el material como apto para la construcción y que sea avalado en Colombia es necesario probar las condiciones más extremas en el territorio. De esta manera y con el fin de determinar los parámetros de evaluación del procedimiento simplificado se ha establecido que las condiciones y los parámetros de las ecuaciones deben ser los más estrictos y elevados tanto como sea posible.

Para ello se hace necesario establecer la exposición del terreno, así como su categoría, tal y como se establece en el parágrafo B.6.5.6. De esta manera se definen los siguientes tipos de rugosidad de terreno

- ✓ Rugosidad tipo B: Áreas urbanas y suburbanas, boscosas o terrenos con numerosas obstrucciones de tamaño igual o mayor al de una vivienda unifamiliar.
- ✓ Rugosidad tipo C: Terreno abierto con pocas obstrucciones y con alturas inferiores a los 9.0 m
- ✓ Rugosidad tipo D: Áreas planas y no obstruidas.

Así mismo se han establecido diferentes categorías de exposición, la cual se encuentra en función de la rugosidad. De esta forma se tienen las siguientes categorías

- ✓ Exposición B: Cuando la rugosidad del terreno de exposición B prevalece por una distancia de al menos 800m o 20 veces la altura del edificio
- ✓ Exposición C: Demás casos
- ✓ Exposición D: Cuando la rugosidad del terreno tipo D prevalece por una distancia mayor a 1500 m o 20 veces la altura del edificio.

A partir de la información consignada en este segmento de la norma se han considerado como críticas la rugosidad del terreno tipo D en la medida que no se experimenta ningún tipo de obstrucción al flujo del viento si se tienen en cuenta dichas condiciones. Además la fuerza de diseño aplicada sobre la edificación es más considerable que en los demás casos.

Por otra parte la exposición escogida para generar las condiciones más adversas es la Exposición D, dado que considera que la rugosidad crítica se mantiene en la distancia, lo que perjudicaría el comportamiento de una edificación y para su diseño las fuerzas de viento llegarían a ser iguales o más críticas que las sísmicas.

Así mismo se estableció el parámetro K_{zt} a partir del capítulo B.6.4.2.2., el cual se calcula a partir de la siguiente ecuación.

$$K_{zt} = (1 + K1xK2xK3)^2$$

Donde,

K1: Factor de características topográficas

K2: Factor de reducción en el aumento de la velocidad con la distancia desde la cresta a barlovento

K3: Factor de reducción en el aumento de la velocidad sobre el nivel del terreno.

A partir de la anterior información se realizó el cálculo de los factores teniendo en cuenta la formulación establecida en el código colombiano de construcción sismo resistente NSR – 10. Las ecuaciones planteadas por la norma son las siguientes

K1 = Tabla 10. Parámetros de aumento de velocidad para K_{zt} (NSR – 10)

$$K2 = \left(1 - \frac{|x|}{\mu \times Lh}\right)$$

Ecuación 2. Fórmula para determinar k2 (Nsr – 10)

$$K3 = e^{-\gamma z/Lh}$$

Ecuación 3. Fórmula para determinar k3 (NSR – 10)

En la Tabla 10, que referencia a la tabla B.6.5.1 de la NSR – 10 se muestran algunos parámetros de aumento de velocidad así como la manera de determinarlos, de esta manera se realiza la determinación del parámetro k_1 , tal y como se menciona previamente.

Forma de la Colina	$K_1 / (H / L_h)$			γ	μ	
	Exposición				Hacia barlovent o desde la cresta	Hacia sotavent o desde la cresta
	B	C	D			
Lomas bidimensionales (2D) o valles con H negativa en $K_1 / (H / L_h)$	1.30	1.45	1.55	3	1.5	1.5
Escarpes bidimensionales (2D)	0.75	0.85	0.95	2.5	1.5	4
Colina tridimensional axialsimétrica	0.95	1.05	1.15	4	1.5	1.5

Tabla 10. Parámetros de aumento de velocidad para K_{zt} (NSR – 10)

De esta forma se determinó el parámetro K_{zt} construyendo y aplicando la información contenida en la siguiente tabla, la cual incluye valores estimados de altura sobre el nivel del terreno y factores topográficos de una zona donde podrían presentarse los mayores inconvenientes dado el caso que una vivienda con el sistema estructural de la empresa METECNO de Colombia se construyera. Los parámetros estimados para el análisis de condiciones extremas sobre la vivienda son los siguientes:

- ✓ K_{zt} : Factor topográfico de aumento de velocidad sobre colinas o escarpes
- ✓ z : Altura sobre el nivel del terreno local
- ✓ u : Factor de atenuación horizontal
- ✓ x : Distancia a barlovento o sotavento desde la cresta hasta el lugar del edificio
- ✓ L_h : Distancia hacia barlovento desde la cresta hasta el punto en que la diferencia de elevación del terreno es la mitad de la colina
- ✓ H : Altura de la colina o escarpe referida al terreno ubicado en barlovento.

De esta manera se establecieron las siguientes condiciones para la evaluación.

z	2.20 m
u	1.50 m
x	1.00 m
L_h	0.50 m
H	10.00 m
k₁	1.15
k₂	0.967
k₃	0.644
K_{zt}	2.9445

Tabla 11. Factores para la determinación de K_{zt} (NSR - 10)

Así mismo se determinó el factor λ el cual se obtuvo de la siguiente tabla ubicada en el código colombiano de construcción sismo resistente NSR – 10 (B.6.4-2) la cual se referencia en este trabajo en la Tabla 12

**Factor de Ajuste por
Altura del Edificio y Exposición, λ**

Altura Media del Edificio (m)	Exposición		
	B	C	D
4,5	1.00	1.21	1.47
6,0	1.00	1.29	1.55
7,5	1.00	1.35	1.61
9,0	1.00	1.40	1.66
10,5	1.05	1.45	1.70
12,0	1.09	1.49	1.74
13,5	1.12	1.53	1.78
15,0	1.16	1.56	1.81
16,5	1.19	1.59	1.84
18,0	1.22	1.62	1.87

Tabla 12. Factor por ajuste de la altura de la edificación (NSR - 10)

De igual manera se determinó el factor de importancia I, para ello fue indispensable revisar el mapa de velocidades del viento básico de Colombia. Dicha figura relaciona zonas del país con velocidades del viento presentadas en la zona. De esta manera se ha escogido la condición más desfavorable para mantener el objetivo de estimar las condiciones de aplicación de carga más adversas para las fuerzas de viento. Vale la pena resaltar que se ha escogido la zona 5 de la Figura 65 de manera que coincida con la peor condición sobre el terreno.

Finalmente se determinó la importancia de la edificación según dicha velocidad. Según la Tabla 13. Factores de importancia para análisis de viento (NSR - 10) se tiene que la zona con velocidades de viento mayores a 45m/s y propensas a huracanes adquieren un factor de 1.15, ocasionando al análisis un grupo de importancia IV.

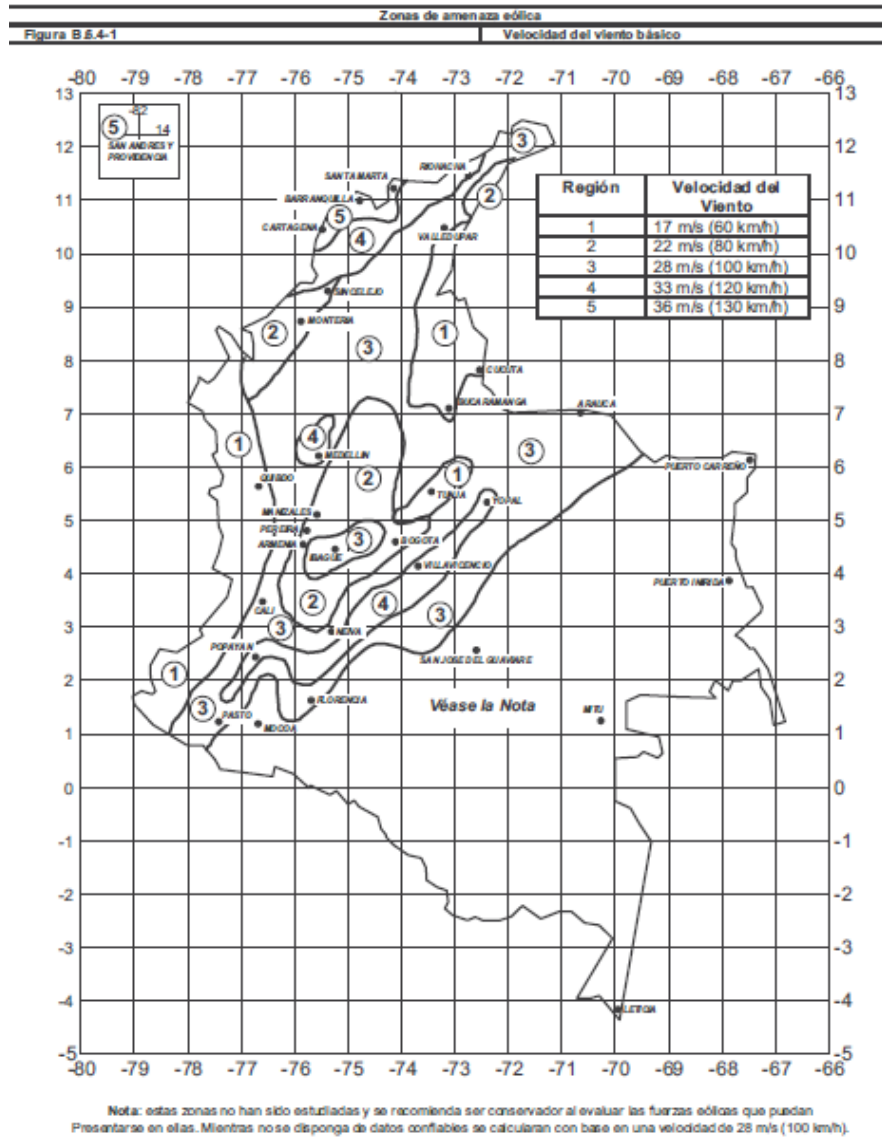


Figura 65. Mapa de zonas de amenaza eólica (NSR - 10)

Categoría	Regiones no propensas a huracanes, y regiones con posibilidad de huracanes de $V = 40 - 45$ m/s	Regiones con posibilidades de huracanes y $V > 45$ m/s
I	0.87	0.77
II	1.00	1.00
III	1.15	1.15
IV	1.15	1.15

Tabla 13. Factores de importancia para análisis de viento (NSR - 10)

De esta manera se establecieron los criterios de cálculo de presiones de viento para aplicar sobre edificaciones según el método simplificado del código colombiano de construcción sismo resistente NSR - 10.

Dicho método establece dos direcciones de aplicación de la fuerza de viento. El componente longitudinal y el componente transversal. Así mismo establece zonas y áreas donde se aplica dichas fuerzas, tanto en la cubierta de la edificación como en los muros en cada una de las direcciones. De esta forma y con el fin de explicar mejor se debe analizar la Figura 66 en donde se aclaran las diferentes zonas y la nomenclatura utilizada para dichos valores.

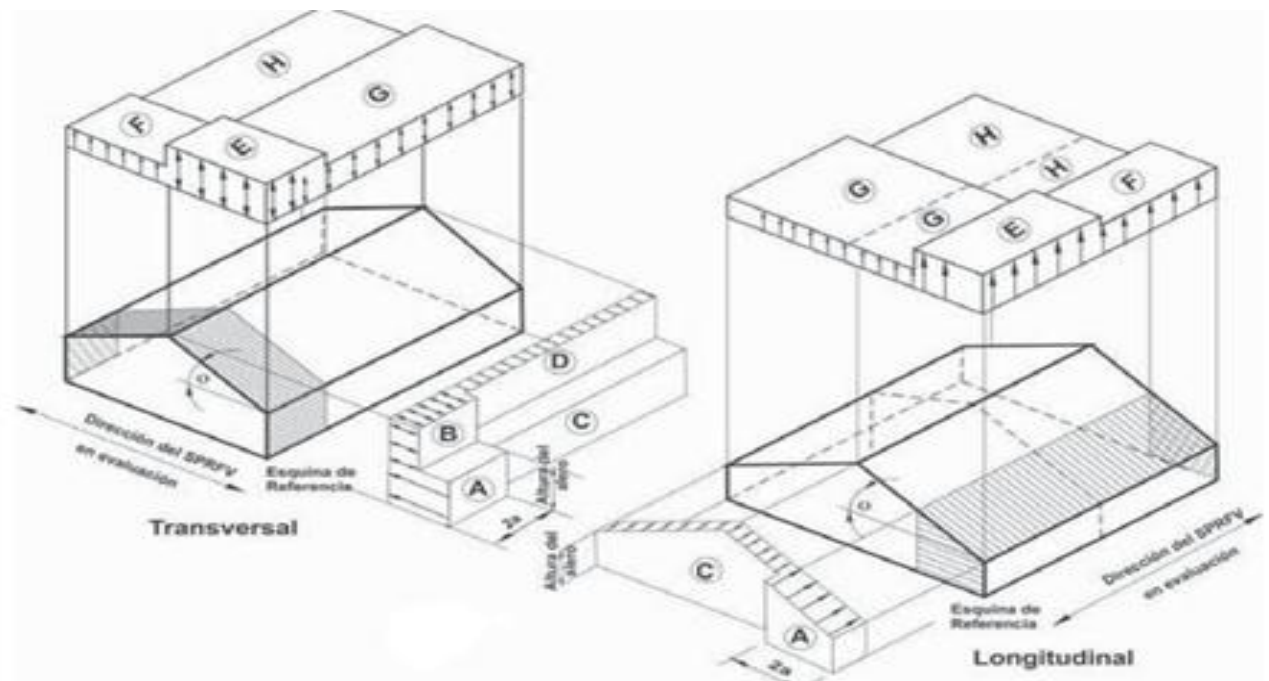


Figura 66. Esquemas de aplicación de fuerzas de viento (NSR - 10)

Con el fin de resumir la metodología se ha elaborado la siguiente tabla que resume los valores a emplear en este procedimiento simplificado para la determinación de las fuerzas de viento de diseño para edificaciones en Colombia.

Parámetro	Valor
V básica	130 km/h
Importancia	1.15
Región	IV
Rugosidad	D
Exposición	D
λ	1.47
Kzt	2.945

Tabla 14. Parámetros de diseño fuerzas de viento (NSR - 10)

Posteriormente se revisó la figura B.6.4-2 del código colombiano de construcción sismo resistente NSR – 10 la cual contiene los valores de presión (Ps10) para determinar la presión del viento sobre edificaciones. Dicha tabla tiene en cuenta parámetros de entrada como ángulo de la cubierta y velocidad del viento básica de la zona para encontrar dicho valor.

Velocidad Básica de Viento m/s (km/h)	Ángulo de inclinación de la cubierta (grados)	Caso de Carga	Zonas									
			Presiones Horizontales				Presiones Verticales				Aleros	
			A	B	C	D	E	F	G	H	E _{ext}	G _{ext}
36 (130)	0 a 5	1	0.50	-0.26	0.33	-0.15	-0.60	-0.34	-0.41	-0.26	-0.83	-0.65
	10	1	0.56	-0.23	0.37	-0.13	-0.60	-0.36	-0.41	-0.28	-0.83	-0.65
	15	1	0.62	-0.21	0.41	-0.12	-0.60	-0.39	-0.41	-0.30	-0.83	-0.65
	20	1	0.69	-0.18	0.46	-0.10	-0.60	-0.41	-0.41	-0.32	-0.83	-0.65
	25	1	0.62	0.10	0.45	0.10	-0.28	-0.38	-0.20	-0.30	-0.51	-0.44
		2	-	-	-	-	-0.10	-0.20	-0.03	-0.13	-	-
	30 a 45	1	0.56	0.38	0.44	0.30	0.04	-0.34	0.01	-0.29	-0.19	-0.22
		2	0.56	0.38	0.44	0.30	0.22	-0.17	0.19	-0.12	-0.19	-0.22

Tabla 15. Valores de presión del viento básica (NSR - 10)

Posterior a la obtención de dicho valor se efectuó el análisis y la determinación de las fuerzas actuantes de viento sobre una superficie. A continuación, en la Tabla 16 se muestra el resultado obtenido posterior al cálculo de las presiones de diseño establecidas por la normatividad.

Diseño transversal			Diseño longitudinal		
Presiones Horizontales	PS10 PS - D		Presiones Horizontales	PS10 PS - D	
	A	0.56 kN/m ²		2.79 kN/m ²	A
B	-0.23 kN/m ²	-1.14 kN/m ²	B	-0.26 kN/m ²	-1.29 kN/m ²
C	0.37 kN/m ²	1.84 kN/m ²	C	0.33 kN/m ²	1.64 kN/m ²
D	-0.13 kN/m ²	-0.65 kN/m ²	D	-0.15 kN/m ²	-0.75 kN/m ²
Presiones Verticales	PS10 PS - D		Presiones Verticales	PS10 PS - D	
	E	-0.60 kN/m ²		-2.99 kN/m ²	E
F	-0.36 kN/m ²	-1.79 kN/m ²	F	-0.34 kN/m ²	-1.69 kN/m ²
G	-0.41 kN/m ²	-2.04 kN/m ²	G	-0.41 kN/m ²	-2.04 kN/m ²
H	-0.28 kN/m ²	-1.39 kN/m ²	H	-0.26 kN/m ²	-1.29 kN/m ²
Aleros	PS10 PS - D		Aleros	PS10 PS - D	
	EOH	-0.83 kN/m ²		-4.13 kN/m ²	EOH
GOH	-0.65 kN/m ²	-3.24 kN/m ²	GOH	-0.65 kN/m ²	-3.24 kN/m ²

Tabla 16. Valores de Presiones básicas de diseño según NSR – 10

Teniendo en cuenta que existen valores tanto positivos como negativos en la tabla anterior se ha establecido el desarrollo de una evaluación en la dirección del viento a Sotavento y otra a Barlovento.

A partir de los valores mencionados previamente en la Tabla 16 se realizó la aplicación de valores de presión de viento a sotavento en un modelo numérico de elementos finitos de la cubierta de la vivienda tipo (Figura 67), el cual fue realizado en SAP2000. De esta manera se estimó, a través de la aplicación de dichos valores, una fuerza sobre cada perno que hace parte del perfil longitudinal de la conexión. Así se obtuvo valores demandados de fuerza sobre cada uno de ellos teniendo en cuenta las condiciones estimadas de la vivienda según la normatividad vigente.

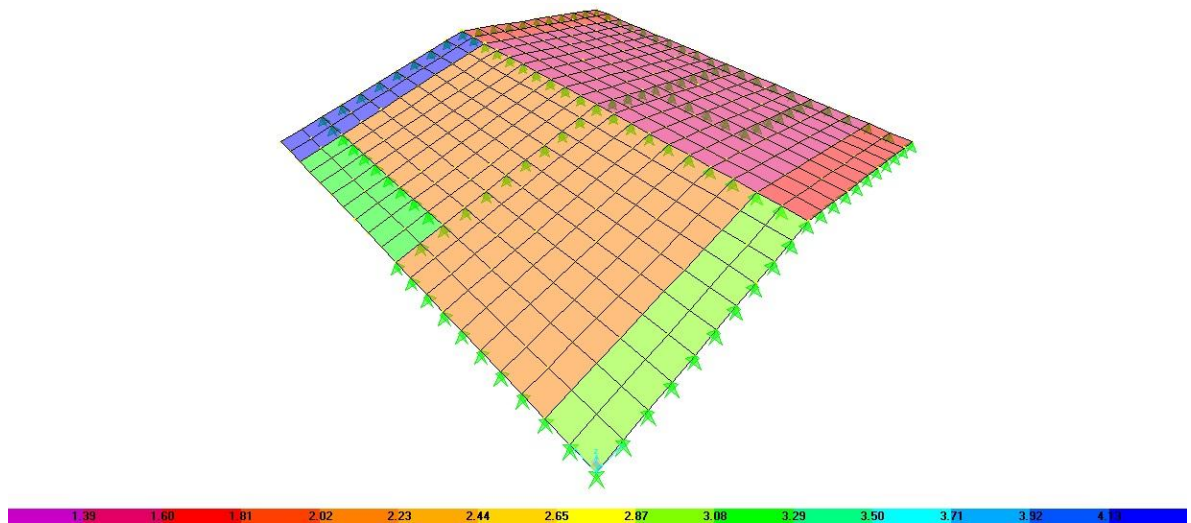


Figura 67. Aplicación de fuerzas de viento de la NSR-10 al modelo de la cubierta (kN/m²).

De esta manera y posterior a la obtención de los resultados de la modelación numérica de la aplicación de la carga de viento a la cubierta se determinó la fuerza promedio por perno en la conexión, así como la fuerza máxima a la cual se ve sometida en dichas condiciones. La Tabla 17 hace referencia a dichos valores.

Fuerza por punto de conexión promedio	58.53 kg
Fuerza por punto de conexión máxima	202.45 kg

Tabla 17. Fuerzas promedio y máximas por perno utilizado

Es así como se hace pertinente la comparación de los anteriores resultados obtenidos experimentalmente con los resultados obtenidos en el laboratorio. En la Tabla 18 se genera un valor estimativo de fuerza resistente por perno según los ensayos de laboratorio.

Fuerza aplicada promedio	Fuerza aplicada promedio	Número de pernos en la probeta	Fuerza por perno
4.78 kN	487.26 kg-f	6	81.21 kg-f

Tabla 18. Fuerza resistente por tornillo

A la luz de los resultados de la Tabla 18 se tiene que la fuerza promedio por perno obtenida de la modelación numérica es menor que la obtenida a través de los ensayos de laboratorio, lo cual brinda una garantía de desempeño en la conexión. Sin embargo revisando los datos obtenidos por el software SAP2000 alrededor del 32% de las zonas donde se presenta la conexión presentan valores de sobrecarga para la edificación

De esta manera se generó la Figura 68, la cual muestra las zonas de sobrecarga de la conexión. De esta manera es claro apreciar que las zonas próximas a los aleros de la vivienda son más propensas a presentar fallas de acuerdo con la modelación establecida en la Figura 67. Así mismo la sección transversal de panel que parte desde el alero hasta el caballete se encuentra más expuesta a la falla generada por desgarramiento de la lámina de acero galvanizada con el poliuretano.

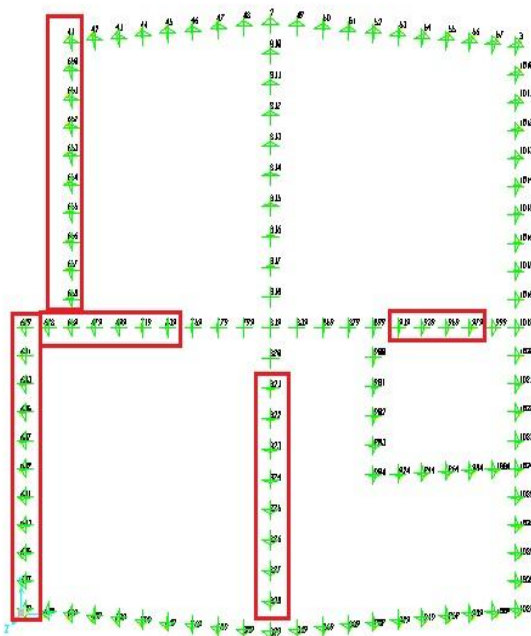


Figura 68. Zonas de sobrecarga de la conexión para separación de 300mm.

Es así como se evidencia la necesidad de realizar una evaluación de diferentes distancias de separación entre los pernos de las conexiones. De esta manera y basándose en el supuesto que la fuerza por perno es de 81.21 kg-f tal y como se expresa en la Tabla 18 se efectuaron diferentes comparaciones de fuerza por cada par de pernos en las conexiones sobre la vivienda.

Para ello se realizó la modelación en el software SAP2000 de manera que permita una aproximación a los resultados. De esta manera en la Tabla 19 se resumen los resultados obtenidos para cada una de las anteriores modelaciones. A la luz de dicha tabla es apreciable que la reducción de la distancia repercute directamente en el desempeño del sistema estructural, sin embargo se ve necesaria la verificación de estos resultados con ensayos en laboratorio para obtener valores comparativos de fuerza resistente para cada tipo de conexión.

	Número de conectores a lo largo de la vivienda	Porcentaje de pernos que exceden la resistencia
Separación cada 30cm	125	32%
Separación cada 15cm	250	5%
Separación cada 10cm	375	2%

Tabla 19. Comparación de pernos que exceden la resistencia estimada para cada tipo de conexión.

De esta forma y con el fin de realizar un comparativo de las zonas de la vivienda propensas a la falla teniendo en cuenta las modelaciones realizadas se tiene en la Figura 69. Zonas de sobrecarga de la conexión para separación de 150mm y en la Figura 70.

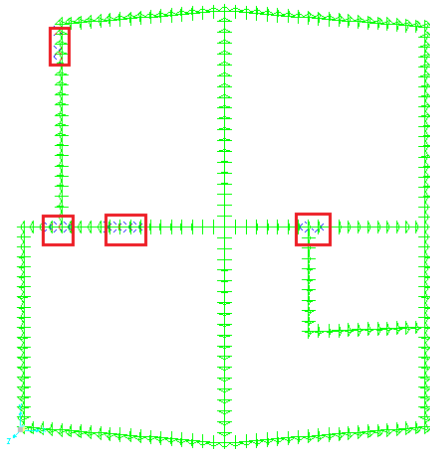


Figura 69. Zonas de sobrecarga de la conexión para separación de 150mm

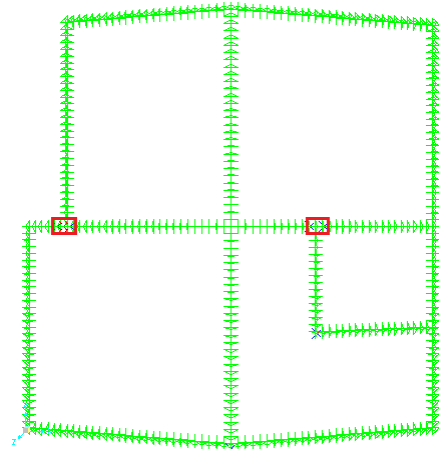


Figura 70. Zonas de sobrecarga de la conexión para separación de 100mm

Posteriormente teniendo en cuenta los valores de la Tabla 16 de presiones a barlovento se realizó una aproximación a una fuerza resultante máxima sobre la vivienda. Dichos valores se consignan en la Tabla 20 de presiones resultantes en cada dirección de diseño.

Diseño longitudinal	
Zona F	
Presión vertical	-1.69 kN/m ²
Presión horizontal	2.49 kN/m ²
Resultante	3.01 kN/m²
Zona E	
Presión vertical	-2.99 kN/m ²
Presión horizontal	2.49 kN/m ²
Resultante	3.89 kN/m²

Tabla 20. Presiones resultantes en cada dirección de diseño

Para el análisis de las fuerzas resultantes sobre la superficie del panel que contienen componentes a barlovento se extrajeron cargas de diseño a flexión de la referencia (Metecno, 2011). De esta manera se tiene que para una carga uniformemente distribuida de 250 kg/m² la longitud libre del panel tipo cubierta es de 2.3 metros con un factor de seguridad de 3 (Tabla 21).

Comparando los 250 kg/m² de carga máxima distribuida de la Tabla 21 con el valor de 389 kN/m² de la Tabla 20 de este trabajo se encuentra que la carga de viento excede el valor permisible de diseño, sin embargo el factor de seguridad de 3 establecido por METECNO de Colombia permite que dicha presión sobre el panel no afecte el desempeño ni la funcionalidad del panel tipo cubierta.

S	K			R			Peso Panel Kg/m ² 0,5-0,4	W							W							
	Kcal	Watt	Btu	m ² h °C	m ² h °C	Hr pie ² F ²																
	m ² h °C	m ² h °C	Hr pie ² F ²	Kcal	Watt	Btu		W = Kg/m ²	60	80	100	120	150	200	250	60	80	100	120	150	200	250
1"	0,52	0,60	0,11	1,96	1,67	9,56	9,23	f =	4,40	3,85	3,40	3,10	2,70	2,35	2,10	3,90	3,45	2,95	2,65	2,35	2,05	1,80
1 1/2"	0,36	0,42	0,07	2,78	2,38	13,55	9,80	f =	5,00	4,40	3,90	3,10	3,20	2,75	2,45	4,50	3,90	3,50	3,20	2,85	2,45	2,20
2"	0,31	0,36	0,06	3,23	2,78	15,74	10,18	f =	5,30	4,60	4,10	3,75	3,35	2,90	2,60	4,75	4,10	3,65	3,35	3,00	2,60	2,30

Tabla 21. Tablas de diseño de luces admisibles de la referencia (Metecno, 2011)

7 Conclusiones

- ✓ A partir de los ensayos efectuados en el Laboratorio de Pruebas y Ensayos de la Pontificia Universidad Javeriana se estableció que los pernos conectores de las diferentes uniones establecidas entre la cubierta y el muro para el sistema estructural de METECNO de Colombia tienen una resistencia promedio de 80kg-f, obtenidos de una aplicación perpendicular sobre el plano del panel tipo cubierta.
- ✓ Teniendo en cuenta la evaluación numérica mediante elementos finitos de la aplicación de las cargas de falla sobre las probetas, se obtuvieron resultados de esfuerzos en el poliuretano que oscilan entre 1kg-f/cm² y 2kg-f/cm². Dichos esfuerzos exceden los esfuerzos resistentes de adherencia entre las láminas de acero y el poliuretano, el cual es de 1.097kg-f/cm². De esta manera se verifica que la falla en las probetas se da por adherencia en el panel tipo cubierta.
- ✓ Según el análisis de las cargas de diseño establecidas por el código colombiano de construcción sísmo resistente NSR – 10, existen valores de presión de viento demandados por el sistema estructural sobre las conexiones las cuales exceden la resistencia promedio de estas. De esta forma alrededor del 32% de las conexiones de la vivienda con una separación de 30cm superan valores promedio de fuerza resistente por par de pernos de 82.82kg-f.
- ✓ A partir de la modelación de las diferentes separaciones evaluadas en la modelación numérica de la cubierta de la vivienda sometida a fuerzas de viento se tiene que el 32% de las conexiones separadas cada 15cm en la vivienda exceden la resistencia de 80kg-f. Por otra parte una separación para cada 15cm presenta un 5% de exceso de la resistencia. Finalmente una separación de 10cm presenta un 2% de exceso ante la fuerza resistente.

8 Recomendaciones de uso y fabricación de las uniones para la empresa METECNO.

A partir de las observaciones y análisis realizados a los ensayos cíclicos y estáticos de la conexión entre cubierta y muro del sistema estructural de la empresa METECNO de Colombia se han establecido las siguientes bondades:

- Los materiales del sistema estructural y sus características hacen que el comportamiento ante la aplicación de fuerzas de viento sea adecuado ante las solicitaciones especificadas por la normatividad vigente
- Los sistemas de conexión evaluados son coherentes y adecuados al sistema estructural prefabricado en la medida que su comportamiento se transmite de buena manera entre los elementos.
- Las conexiones y los pernos utilizados para las conexiones son acordes a las necesidades de resistencia de los mismos, brindando buen desempeño ante la aplicación de fuerzas de viento

Sin embargo, dichas características son muy sensibles ante la modificación de parámetros que cambien el comportamiento del sistema estructural. De esta forma se ve necesario dar a conocer las siguientes recomendaciones planteadas a partir de la experiencia de experimentar y evaluar el comportamiento de la unión entre cubierta y muro del sistema estructural de la empresa METECNO de Colombia.

- La separación entre los pernos utilizados en las conexiones entre los paneles tipo cubierta y tipo muro se debe reducir a un valor menor a 150mm, teniendo en cuenta la disminución considerable del porcentaje de pernos que exceden la resistencia encontrada en el laboratorio. De esta forma se busca que el factor de seguridad respecto a la carga de ruptura sea mayor. Esto con el fin de mejorar y procurar que el comportamiento de la conexión en zonas críticas de la vivienda sea más adecuado para las solicitaciones de viento del territorio colombiano.
- La mala manipulación de las conexiones y su mala instalación al sistema estructural vuelve vulnerable la conexión, bajando el desempeño y aumentando la propensión a la falla de la cubierta de las edificaciones. De esta manera se recomienda que el personal utilizado para instalaciones reciba capacitación e instrucción acerca de las mejores prácticas para realizar las conexiones.

- Teniendo en cuenta que todas las conexiones evaluadas tienen un buen desempeño en promedio cabe resaltar que la conexión de tornillo autoperforante con tornillo con capelote tiene un mejor comportamiento a la luz de los resultados obtenidos en el laboratorio. Sin embargo la dispersión de los resultados reduce la confiabilidad del desempeño de dicha conexión y la poca variación entre el promedio de las fuerzas máximas aplicadas sobre las probetas permitiría evitar el uso del tornillo con capelote en el sistema estructural.
- Revisando las necesidades y la aplicación de la conexión de remaches pop en la construcción de vivienda se encontró que dicho sistema brinda las mejores condiciones de habitabilidad y seguridad en las edificaciones, además de mejores y más seguros procesos constructivos. De esta forma y teniendo en cuenta dichos aspectos se propone el empleo de la conexión con remaches pop a una distancia de 150mm entre sí y de 100mm para zonas esquineras. Para una evaluación más detallada se sugiere la realización de ensayos que permitan obtener un comparativo de la fuerza resistente por perno ante esta modificación.
- Así mismo realizando una comparación de beneficios económicos entre la conexión de tornillo autoperforante con tornillo con capelote y la conexión de remache pop se tiene que ésta última representa menores costos de producción. De esta manera y con el fin de mejorar el desempeño de la unión de remaches pop se apoya la iniciativa del anterior apartado, la cual contempla una reducción de la separación de los pernos.

9 Bibliografía

AIS. *Reglamento Colombiano de construcción sismo resistente NSR-10* (2010). Comisión asesora permanente para el régimen de construcciones sismo resistentes. Bogotá, Colombia.

CAMACOL. (2010) *¿Y dónde están los subsidios? Un balance sobre el subsidio familiar de vivienda en Colombia*. En: Estudios económicos CAMACOL. Bogotá, Colombia.

CIMOC (CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES Y OBRAS CIVILES), 2000. *Informe final: ensayos de resistencia en paneles prefabricados para la construcción de cubiertas y muros en viviendas*. Preparado para METECNO de Colombia. Bogotá, Colombia.

DANE. (2005). Datos censo general de población y vivienda 2005 (nivel nacional). Departamento nacional de estadísticas DANE. Bogotá, Colombia.

Departamento de investigación del banco mundial. (2011). *Colombia | Data. The migration and remittances factbook*. Washington D.C. EE.UU.

Departamento de investigación del banco mundial. (2011). *Poverty - Topic Brief*. Washington D.C. EE.UU.

DNP. (2011). *Plan Nacional de Desarrollo 2010 - 2014*. Dirección nacional de planeación, Bogotá, Colombia.

Ghosch S.K. y Fanella D. (2003). *Seismic and wind design of concrete buildings: (2000 IBC, ASCE 7-98, ACI 318-99)*. Illinois, Estados Unidos. ICC.

Holmes, J. D. (2007), *Wind loading of structures*, Abingdon - Oxfordshire (UK), Taylor & Francis

METECNO de Colombia, (2011). *Manual técnico panel MONOWALL*, Bogotá, Colombia.

METECNO de Colombia, (2011). *Manual técnico panel TECHMET*, Bogotá, Colombia.

Riera, J. D. y Davenport A.G. (1998), *Wind effects on buildings and structures*, Rotterdam, Países Bajos. Balkema.

Ruiz, Ochoa, Castillo y Robles. (2007). Análisis de la resistencia sísmica de un sistema estructural prefabricado de bajo peso para la construcción de viviendas. En: *Ingeniería y universidad*. Ed. Pontificia Universidad Javeriana. Vol. 11, No. 2. p.169 - 192.

Ruiz, Riveros, Martínez y Herrera. (2009). Ensayos cíclicos y estáticos para evaluar la resistencia sísmica de los muros y las conexiones de paneles livianos prefabricados para la construcción de viviendas. En: *Revista de la Escuela colombiana de ingeniería* (Bogotá)

Ed. Escuela Colombiana de Ingeniería. Versión 75 fascículo 3, p. 35-38.

Williams A. (2003). Seismic and Wind Forces: Structural Design Examples, Illinois, Estados Unidos. ICC

10 Anexos

Anexo 1. Registro fotográfico de instalación del sistema METECNO.





Anexo 2. Planos esquemáticos del montaje experimental

