



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE MECÁNICA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

**“SÍNTESIS Y EVALUACIÓN MECÁNICA DE PANELES TIPO
SÁNDWICH COMPUESTOS POR FIBRA DE VIDRIO Y
POLIURETANO REFORZADO CON MICROPARTÍCULAS DE
CAUCHO”**

TRABAJO DE TITULACIÓN

TIPO: PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERO MECÁNICO

AUTOR: WILVENDER JESÚS FREIRE LESCANO

DIRECTOR: CARLOS OSWALDO SERRANO AGUIAR

RIOBAMBA-ECUADOR
2020

©2020 Wilvender Jesus Freire Lescano

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Yo, Wilvender Jesus Freire Lescano, declaro que el presente trabajo de titulación es de mi autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

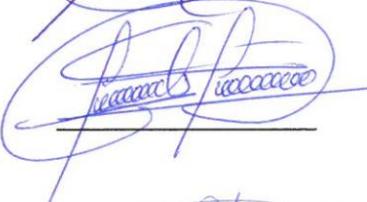
Como autor asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación; El patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 20 de enero de 2020

Wilvender Jesus Freire Lescano
180367808-3

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

El Tribunal del trabajo de titulación certifica que: El trabajo de titulación: Tipo: Investigación, **SÍNTESIS Y EVALUACIÓN MECÁNICA DE PANELES TIPO SÁNDWICH COMPUESTOS POR FIBRA DE VIDRIO Y POLIURETANO REFORZADO CON MICROPARTÍCULAS DE CAUCHO**, realizado por el señor: **WILVENDER JESUS FREIRE LESCANO**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del trabajo de titulación, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

| | FIRMA | FECHA |
|---|--|--------------|
| Ing. Edwin Viteri Núñez PRESIDENTE DEL TRIBUNAL |  | 2020-01-20 |
| Ing. Carlos Serrano Aguiar DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN |  | 2020-01-20 |
| Ing. Miguel Aquino Arroba MIEMBRO DE TRIBUNAL |  | 2020-01-20 |

DEDICATORIA

Quiero dedicar este trabajo a mis queridos padres Segundo Freire y Nancy Lescano quienes con su gran amor, sabiduría, tolerancia y ayuda incondicional supieron inculcarme valores y me enseñaron a levantarme y siempre ser fuerte en cada situación difícil de mi vida. A mi hermano Andrés y a mi hermana Nahomi que con su gran amor, compañía y carisma supieron siempre animarme para seguir luchando por mis sueños. A Vladimir que además de ser mi primo es como mi hermano, su compañía en la universidad fue de gran ayuda para mantenerme fuerte y enfocado en cumplir mis metas. A mi tía Cecilia quien considero como mi segunda madre y supo ayudarme en mis momentos más difíciles de la universidad.

A mis amigos con quienes pasamos alegrías, tristezas y gratos momentos en toda esta etapa universitaria.

Wilvender Jesús Freire Lescano

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por haberme permitido cumplir mi mayor meta en la vida que es lograr obtener mi título universitario. A mis padres cuya ayuda fue un pilar fundamental para lograr obtener un logro más en mi vida. A la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo y en particular a los profesores de la Escuela de Ingeniería Mecánica por impartir sus conocimientos y experiencias que serán de suma importancia para mi futuro laboral.

Wilvender Jesús Freire Lescano

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|-------------------------|-------|
| ÍNDICE DE TABLAS..... | vii |
| ÍNDICE DE FIGURAS..... | xiv |
| ÍNDICE DE GRÁFICOS..... | xvii |
| ÍNDICE DE ANEXOS..... | xviii |
| RESUMEN..... | xxii |
| ABSTRACT..... | xxiii |
| INTRODUCCIÓN..... | 1 |

CAPÍTULO I

| | | |
|--------|--|---|
| 1. | MARCO TEÓRICO REFERENCIAL | 2 |
| 1.1. | Problematización..... | 2 |
| 1.2. | Justificación | 2 |
| 1.2.1. | <i>Justificación teórica</i> | 2 |
| 1.2.2. | <i>Justificación metodológica</i> | 3 |
| 1.2.3. | <i>Justificación práctica</i> | 3 |
| 1.3. | Alcance | 3 |
| 1.4. | Objetivos | 3 |
| 1.4.1. | <i>Objetivo General</i> | 3 |
| 1.4.2. | <i>Objetivos Específicos</i> | 4 |
| 1.5. | MARCO TEORICO | 4 |
| 1.6. | Marco teórico conceptual | 4 |
| 1.6.1. | <i>Historia del origen del poliuretano</i> | 4 |
| 1.6.2. | <i>¿Qué es el poliuretano?</i> | 6 |

| | | |
|----------|---|----|
| 1.6.3. | Química básica del poliuretano | 7 |
| 1.6.3.1. | <i>Poliols</i> | 7 |
| 1.6.3.2. | <i>Isocianatos</i> | 9 |
| 1.6.4. | Materia prima | 11 |
| 1.6.5. | Tipos de poliuretanos | 11 |
| 1.6.5.1. | <i>Espuma de poliuretano rígida</i> | 11 |
| 1.6.5.2. | <i>Espuma de poliuretano flexible</i> | 12 |
| 1.6.5.3. | <i>Poliuretanos termoplásticos</i> | 12 |
| 1.6.5.4. | <i>Ionómeros de poliuretano</i> | 13 |
| 1.6.6. | Propiedades de la espuma de poliuretano | 14 |
| 1.6.6.1. | <i>Densidad</i> | 14 |
| 1.6.6.2. | <i>Estructura molecular</i> | 14 |
| 1.6.6.3. | <i>Conductividad térmica</i> | 14 |
| 1.6.6.4. | <i>Estabilidad y resistencia</i> | 15 |
| 1.6.6.5. | <i>Propiedades eléctricas</i> | 15 |
| 1.6.6.6. | <i>Propiedades acústicas</i> | 15 |
| 1.6.7. | Proceso de formación de la espuma de poliuretano | 15 |
| 1.6.7.1. | <i>Dosificación de los ingredientes de la espuma y mezclado</i> | 15 |
| 1.6.7.2. | <i>Cremado</i> | 16 |
| 1.6.7.3. | <i>Crecimiento</i> | 16 |
| 1.6.7.4. | <i>Crecimiento completo</i> | 16 |
| 1.6.7.5. | <i>Gelificación</i> | 17 |
| 1.6.7.6. | <i>Curado</i> | 17 |
| 1.6.8. | Sistemas de producción de espumas de poliuretano | 17 |
| 1.6.8.1. | <i>Poliuretano proyectado</i> | 17 |
| 1.6.8.2. | <i>Poliuretano inyectado</i> | 18 |
| 1.6.9. | Aplicaciones de la espuma de poliuretano | 19 |
| 1.6.9.1. | <i>Aplicaciones en edificación y construcción</i> | 19 |
| 1.6.9.2. | <i>Fachadas</i> | 20 |

| | | |
|-----------|--|----|
| 1.6.9.3. | <i>Cubiertas planas e inclinados</i> | 21 |
| 1.6.9.4. | <i>Pisos</i> | 22 |
| 1.6.10. | <i>Historia de la fibra de vidrio</i> | 23 |
| 1.6.11. | <i>Composición química</i> | 23 |
| 1.6.12. | <i>Tipos de fibra de vidrio</i> | 24 |
| 1.6.13. | <i>Propiedades de la fibra de vidrio</i> | 24 |
| 1.6.14. | <i>Fabricación</i> | 26 |
| 1.6.15. | <i>Estructuras sándwich</i> | 28 |
| 1.6.15.1. | <i>Características de un panel sándwich</i> | 28 |
| 1.6.15.2. | <i>Componentes de una estructura sándwich</i> | 28 |
| 1.6.15.3. | <i>Láminas</i> | 29 |
| 1.6.15.4. | <i>Núcleo</i> | 31 |
| 1.6.15.5. | <i>Adhesivo</i> | 32 |
| 1.6.15.6. | <i>Conformación de paneles sándwich</i> | 33 |
| 1.6.16. | <i>Comportamiento mecánico</i> | 35 |
| 1.6.16.1. | <i>Materiales compuestos reforzados con partículas</i> | 37 |
| 1.6.16.2. | <i>Materiales compuestos reforzados con fibras</i> | 38 |
| 1.6.17. | <i>Materiales compuestos reforzados con fibras</i> | 39 |
| 1.6.17.1. | <i>Influencia de la longitud de fibra</i> | 39 |
| 1.6.17.2. | <i>Influencia de la orientación y de la concentración de la fibra</i> | 40 |
| 1.6.17.3. | <i>Evaluación de la resistencia de la lámina</i> | 41 |
| 1.6.18. | <i>Modos de fallo</i> | 42 |
| 1.6.18.1. | <i>Rotura por tensión plana</i> | 43 |
| 1.6.18.2. | <i>Rotura por cortadura interlaminar</i> | 43 |
| 1.6.18.3. | <i>Cizallamiento del núcleo</i> | 44 |
| 1.6.18.4. | <i>Despegue de la unión piel-núcleo</i> | 44 |
| 1.6.18.5. | <i>Aplastamiento del núcleo</i> | 44 |
| 1.6.18.6. | <i>Fallo del núcleo por tensión o compresión plana en zonas de rampa</i> | 45 |
| 1.6.18.7. | <i>Fallo por pandeo</i> | 46 |

CAPÍTULO II

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 2. | MARCO METODOLÓGICO..... | 47 |
| 2.1. | Elaboración del panel tipo sándwich..... | 47 |
| 2.1.1. | <i>Introducción</i> | <i>47</i> |
| 2.1.2. | <i>Descripción del proceso para la elaboración del panel tipo sándwich.....</i> | <i>47</i> |
| 2.2. | Normas y metodología para los ensayos..... | 49 |
| 2.2.1. | <i>Normas</i> | <i>49</i> |
| 2.2.2. | <i>Materiales a ensayar</i> | <i>50</i> |
| 2.2.3. | <i>Metodología para los ensayos mecánicos.....</i> | <i>51</i> |
| 2.2.3.1. | <i>Ensayo de compresión plana – ASTM C365.....</i> | <i>51</i> |
| 2.2.3.2. | <i>Ensayo de compresión de borde – ASTM C364.....</i> | <i>53</i> |
| 2.2.3.3. | <i>Ensayo de cortante del poliuretano – ASTM C393.....</i> | <i>58</i> |
| 2.2.4. | <i>Metodología para los ensayos físicos.....</i> | <i>61</i> |
| 2.2.4.1. | <i>Ensayo de densidad – ASTM C271.....</i> | <i>61</i> |
| 2.2.4.2. | <i>Ensayo de inflamabilidad – ISO 3795</i> | <i>62</i> |

CAPÍTULO III

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 3. | MARCO DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS..... | 66 |
| 3.1. | Ensayos mecánicos | 66 |
| 3.1.1. | <i>Compresión plana</i> | <i>66</i> |
| 3.1.1.1. | <i>Resistencia a la compresión plana.....</i> | <i>71</i> |
| 3.1.1.2. | <i>Módulo de elasticidad y límite convencional de fluencia</i> | <i>72</i> |
| 3.1.1.3. | <i>Discusión de resultados para el ensayo de compresión plana según ASTM C365 ...</i> | <i>74</i> |
| 3.1.2. | <i>Compresión de borde.....</i> | <i>77</i> |
| 3.1.2.1. | <i>Resistencia a la compresión máxima en el borde</i> | <i>81</i> |

| | | |
|----------|--|------------|
| 3.1.2.2. | <i>Esfuerzo máximo de pandeo</i> | 83 |
| 3.1.2.3. | <i>Discusión de resultados para el ensayo de CB según ASTM C364</i> | 85 |
| 3.1.3. | <i>Flexión en tres puntos</i> | 87 |
| 3.1.3.1. | <i>Resistencia final al cizallamiento del núcleo</i> | 93 |
| 3.1.3.2. | <i>Esfuerzo de enfrentamiento o en la cara</i> | 95 |
| 3.1.3.3. | <i>Discusión de resultados para el ensayo de flexión según ASTM C393</i> | 97 |
| 3.2. | Ensayos físicos | 100 |
| 3.2.1. | <i>Densidad</i> | 100 |
| 3.2.1.1. | <i>Discusión de resultados para el ensayo de densidad según ASTM C271</i> | 101 |
| 3.2.2. | <i>Inflamabilidad</i> | 102 |
| 3.2.2.1. | <i>Discusión de resultados para el ensayo de inflamabilidad según ISO 3795</i> | 106 |
| | CONCLUSIONES | 108 |
| | RECOMENDACIONES | 111 |
| | BIBLIOGRAFÍA | |
| | ANEXOS | |

ÍNDICE DE TABLAS

| | | |
|--------------------|---|----|
| Tabla 1-1: | Ventajas y desventajas de los diferentes polioles | 9 |
| Tabla 2-1: | Propiedades de diferentes tipos de fibra de vidrio..... | 25 |
| Tabla 3-1: | Valores geométricos característicos | 29 |
| Tabla 1-2: | Porcentajes de caucho utilizados en las probetas | 48 |
| Tabla 2-2: | Distribución de probetas para ensayos | 50 |
| Tabla 1-3: | Probetas ensayadas a compresión plana, serie 1..... | 68 |
| Tabla 2-3: | Probetas ensayadas a compresión plana, serie 2..... | 69 |
| Tabla 3-3: | Probetas ensayadas a compresión plana, serie 3..... | 70 |
| Tabla 4-3: | Datos para el cálculo de Resistencia a la compresión plana, serie 1 | 71 |
| Tabla 5-3: | Datos para el cálculo de Resistencia a la compresión plana, serie 2 | 71 |
| Tabla 6-3: | Datos para el cálculo de Resistencia a la compresión plana, serie 3 | 72 |
| Tabla 7-3: | Resumen de Resistencia a la compresión plana | 72 |
| Tabla 8-3: | Módulo de Elasticidad y Límite Convencional de Fluencia, serie 1 | 73 |
| Tabla 9-3: | Módulo de Elasticidad y Límite Convencional de Fluencia, serie 2 | 73 |
| Tabla 10-3: | Módulo de Elasticidad y Límite Convencional de Fluencia, serie 3 | 73 |
| Tabla 11-3: | Tabla resumen de Módulo de Elasticidad y Límite de Fluencia de cada serie ... | 74 |
| Tabla 12-3: | Probetas ensayadas a compresión de borde, serie 1 | 78 |
| Tabla 13-3: | Probetas ensayadas a compresión de borde, serie 2 | 79 |
| Tabla 14-3: | Probetas ensayadas a compresión de borde, serie 3 | 80 |
| Tabla 15-3: | Cálculo de Resistencia a la compresión en el borde, serie 1 | 81 |
| Tabla 16-3: | Cálculo de Resistencia a la compresión en el borde, serie 2 | 82 |
| Tabla 17-3: | Cálculo de Resistencia a la compresión en el borde, serie 3 | 82 |
| Tabla 18-3: | Resumen de la Resistencia compresión de borde..... | 83 |
| Tabla 19-3: | Cálculo de esfuerzo máximo de pandeo, serie 1..... | 83 |
| Tabla 20-3: | Cálculo de esfuerzo máximo de pandeo, serie 2..... | 83 |
| Tabla 21-3: | Cálculo de esfuerzo máximo de pandeo, serie 3..... | 84 |
| Tabla 22-3: | Resumen del esfuerzo máximo de pandeo | 84 |
| Tabla 23-3: | Probetas ensayadas a flexión, serie 1..... | 88 |
| Tabla 24-3: | Probetas ensayadas a flexión, serie 2..... | 89 |
| Tabla 25-3: | Probetas ensayadas a flexión, serie 3..... | 90 |
| Tabla 26-3: | Deflexión final de las probetas, serie 1..... | 92 |
| Tabla 27-3: | Deflexión final de las probetas, serie 2..... | 92 |
| Tabla 28-3: | Deflexión final de las probetas, serie 3..... | 92 |

| | | |
|--------------------|--|-----|
| Tabla 29-3: | Tabla resumen de deflexión final para cada serie..... | 93 |
| Tabla 30-3: | Datos para el cálculo de Resistencia final al cizallamiento del núcleo, serie 1 .. | 93 |
| Tabla 31-3: | Datos para el cálculo de Resistencia final al cizallamiento del núcleo, serie 2 .. | 94 |
| Tabla 32-3: | Datos para el cálculo de Resistencia final al cizallamiento del núcleo, serie 3 .. | 94 |
| Tabla 33-3: | Resistencia final al cizallamiento | 95 |
| Tabla 34-3: | Datos de las probetas para el cálculo del esfuerzo en la cara, serie 1 | 95 |
| Tabla 35-3: | Datos de las probetas para el cálculo del esfuerzo en la cara, serie 2..... | 96 |
| Tabla 36-3: | Datos de las probetas para el cálculo del esfuerzo en la cara, serie 3..... | 96 |
| Tabla 37-3: | Resumen del esfuerzo en la cara..... | 97 |
| Tabla 38-3: | Resultados de la densidad del panel | 101 |
| Tabla 39-3: | Resultados de los ensayos sin caucho..... | 102 |
| Tabla 40-3: | Resultados de los ensayos con 20% de contenido en caucho | 104 |
| Tabla 41-3: | Velocidad de quemado promedio, sin caucho | 106 |
| Tabla 42-3: | Velocidad de quemado promedio, 20 % de caucho..... | 106 |
| Tabla 43-3: | Normas ecuatorianas para la comparación del índice de llama | 106 |
| Tabla 44-3: | Índice máximo de toxicidad del poliuretano | 107 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | | |
|---------------------|--|----|
| Figura 1-1. | Otto Bayer | 5 |
| Figura 2-1. | Ecuación de reacción de formación de un poliuretano..... | 7 |
| Figura 3-1. | Comparación de estructuras básicas de polioli..... | 8 |
| Figura 4-1. | Mecanismos de polarización de enlace del catalizador..... | 10 |
| Figura 5-1. | Formación de espuma de poliuretano..... | 11 |
| Figura 6-1. | Poliuretano proyectado..... | 18 |
| Figura 7-1. | Áreas de aplicación del poliuretano proyectado..... | 18 |
| Figura 8-1. | Poliuretano inyectado | 19 |
| Figura 9-1. | Sistema de aislamiento | 20 |
| Figura 10-1. | Planchas de poliuretano en fachadas internas y externas | 21 |
| Figura 11-1. | Planchas de poliuretano en cubiertas..... | 22 |
| Figura 12-1. | Aplicación de planchas para aislar pisos | 23 |
| Figura 13-1. | Fibrado de vidrio por fusión directa | 27 |
| Figura 14-1. | Fabricación de la fibra de vidrio..... | 27 |
| Figura 15-1. | Panel tipo sándwich..... | 29 |
| Figura 16-1. | Material compuesto | 30 |
| Figura 17-1. | Rollo de tejido | 30 |
| Figura 18-1. | Núcleo de espuma de poliuretano | 32 |
| Figura 19-1. | Disposición de poliuretano sobre lámina inferior | 34 |
| Figura 20-1. | Prensa superior hermetizando ambas láminas..... | 34 |
| Figura 21-1. | Proceso de inyección de la mezcla | 35 |
| Figura 22-1. | Sección transversal de un panel mixto con núcleo de poliuretano | 35 |
| Figura 23-1. | Viga con carga aplicada | 36 |
| Figura 24-1. | Esfuerzo normal, cortante y momento flector | 36 |
| Figura 25-1. | Clasificación de materiales compuestos reforzados con fibras. | 39 |
| Figura 26-1. | Patrón deformación de fibra-matriz sometida a tracción | 40 |
| Figura 27-1. | Longitud de fibra y sus esfuerzos..... | 40 |
| Figura 28-1. | Compuestos reforzados con fibras | 41 |
| Figura 29-1. | Fallos a nivel micro mecánico de un material compuesto reforzado | 42 |
| Figura 30-1. | Fallo por rotura en tensión plana..... | 43 |
| Figura 31-1. | Fallo por cortadura interlaminar | 43 |

| | | |
|---------------------|--|----|
| Figura 32-1. | Fallo por cizallamiento del núcleo | 44 |
| Figura 33-1. | Aplastamiento del núcleo | 45 |
| Figura 34-1. | Fallo por flexión del núcleo..... | 45 |
| Figura 35-1. | Tensión en las zonas de cambio de dirección..... | 45 |
| Figura 36-1. | Fallo por pandeo..... | 46 |
| Figura 37-1. | Fallo por pandeo interior | 46 |
| Figura 1-2. | Esquema de fabricación del panel tipo sándwich..... | 48 |
| Figura 2-2. | Proceso gráfico de la fabricación del panel tipo sándwich..... | 49 |
| Figura 3-2. | Ensayo de compresión plana | 52 |
| Figura 4-2. | Probetas cúbicas | 52 |
| Figura 5-2. | Superficie de la probeta | 53 |
| Figura 6-2. | Probeta ubicada en la máquina universal | 53 |
| Figura 7-2. | Soportes laterales (utillajes) | 54 |
| Figura 8-2. | Ensayo de compresión de borde | 55 |
| Figura 9-2. | Probetas rectangulares | 56 |
| Figura 10-2. | Superficie de la probeta..... | 56 |
| Figura 11-2. | Probeta ubicada en los utillajes | 56 |
| Figura 12-2. | Probeta ubicada en la máquina universal | 57 |
| Figura 13-2. | Ubicación del reloj comparador | 57 |
| Figura 14-2. | Ensayo de flexión | 59 |
| Figura 15-2. | Probetas de fibra de vidrio, poliuretano y caucho | 59 |
| Figura 16-2. | Superficie de la probeta..... | 60 |
| Figura 17-2. | Puntos de apoyos y de aplicación de carga | 60 |
| Figura 18-2. | Probeta ubicada en la máquina universal | 61 |
| Figura 19-2. | Esquema de las probetas | 62 |
| Figura 20-2. | Ensayo de densidad | 62 |
| Figura 21-2. | Probetas para el ensayo de inflamabilidad | 63 |
| Figura 22-2. | Acondicionamiento de probetas | 63 |
| Figura 23-2. | Probeta ubicada en el porta muestras | 64 |
| Figura 24-2. | Llama estabilizada..... | 64 |
| Figura 25-2. | Combustión de la probeta..... | 64 |
| Figura 26-2. | Propagación de la llama | 65 |
| Figura 27-2. | Zona quemada de la probeta..... | 65 |
| Figura 1-3. | Probetas después del ensayo de compresión plana, serie 1 | 75 |
| Figura 2-3. | Probetas después del ensayo de compresión plana, serie 2 | 75 |

| | | |
|---------------------|--|-----|
| Figura 3-3. | Probetas después del ensayo de compresión plana, serie 3 | 75 |
| Figura 4-3. | Fallos predominantes del ensayo de compresión de borde | 86 |
| Figura 5-3. | Serie 1 después del ensayo de flexión | 99 |
| Figura 6-3. | Serie 2 después del ensayo de flexión | 99 |
| Figura 7-3. | Serie 3 después del ensayo de flexión | 99 |
| Figura 8-3. | Probeta 1 después del ensayo de inflamabilidad | 103 |
| Figura 9-3. | Probeta 2 después del ensayo de inflamabilidad | 103 |
| Figura 10-3. | Probeta 3 después del ensayo de inflamabilidad | 103 |
| Figura 11-3. | Probeta 4 después del ensayo de inflamabilidad | 103 |
| Figura 12-3. | Probeta 5 después del ensayo de inflamabilidad | 104 |
| Figura 13-3. | Probeta 1 con 20 % de caucho..... | 104 |
| Figura 14-3. | Probeta 2 con 20 % de caucho..... | 104 |
| Figura 15-3. | Probeta 3 con 20 % de caucho..... | 105 |
| Figura 16-3. | Probeta 4 con 20 % de caucho..... | 105 |
| Figura 17-3. | Probeta 5 con 20 % de caucho..... | 105 |

ÍNDICE DE GRÁFICOS

| | | |
|----------------------|--|----|
| Gráfico 1-3. | Diagrama Esfuerzo vs Deformación a compresión plana, serie 1 | 68 |
| Gráfico 2-3. | Diagrama Esfuerzo vs Deformación a compresión plana, serie 2 | 69 |
| Gráfico 3-3. | Diagrama Esfuerzo vs Deformación a compresión plana, serie 3 | 70 |
| Gráfico 4-3. | Diagrama de comportamiento de la prueba a compresión plana | 74 |
| Gráfico 5-3. | Diagrama de Esfuerzo vs Deformación a compresión de borde, serie 1 | 78 |
| Gráfico 6-3. | Diagrama de Esfuerzo vs Deformación a compresión de borde, serie 2 | 79 |
| Gráfico 7-3. | Diagrama de Esfuerzo vs Deformación a compresión de borde, serie 3 | 80 |
| Gráfico 8-3. | Diagrama Carga vs Deflexión, serie 1 | 89 |
| Gráfico 9-3. | Diagrama Carga vs Deflexión, serie 2 | 90 |
| Gráfico 10-3. | Diagrama Carga vs Deflexión, serie 3 | 91 |

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A: Reporte del ensayo de compresión plana

ANEXO B: Reporte del ensayo de compresión de borde

ANEXO C: Reporte del ensayo de flexión

SIMBOLOGÍA

| | |
|---------------|---|
| e_p | Espesor de la piel (lámina) |
| e_n | Espesor del núcleo |
| e_a | Espesor del adhesivo |
| ρ_n | Densidad del núcleo |
| E_p | Módulo de elasticidad de las pieles |
| G_n | Módulo de elasticidad a cortadura del núcleo |
| σ | Esfuerzo normal en la piel |
| M | Momento flector |
| L | Altura |
| t | Espesor del panel |
| t_{fs} | Espesor de una sola lámina |
| σ_c | Esfuerzo de Compresión Plana |
| A | Área de la sección transversal de la probeta |
| ε | Deformación Unitaria |
| l | Espesor de deformación |
| l_o | Espesor inicial de la probeta |
| E | Módulo de elasticidad a compresión del núcleo |
| S | Pendiente de la parte lineal de la curva Carga vs Deformación |
| $Sy_{0,2}$ | Límite Convencional de Fluencia |
| σ_b | Esfuerzo de Compresión en los bordes |
| P_{max} | Fuerza máxima aplicada |
| w | Ancho del panel sándwich |
| t_{fs} | Espesor de una sola lámina |
| σ_p | Esfuerzo máximo de pandeo |
| τ | Resistencia final al cizallamiento del núcleo |
| d | Espesor del panel sándwich |
| c | Espesor del núcleo |
| σ_F | Esfuerzo de flexión en las caras |
| S_L | Longitud de tramo |
| D | Densidad de la probeta |
| P_p | Peso de la probeta |
| V | Volumen de la probeta |
| e | Espesor de la probeta |

| | |
|-------|-------------------------------------|
| b | Ancho de la probeta |
| a | Longitud de la probeta |
| B | Tasa de combustión |
| s | Distancia quemada |
| t_q | Tiempo para quemar la distancia s |

LISTA DE ABREVIACIONES

| | |
|------|---|
| ASTM | Sociedad Americana de Ensayos de Materiales |
| CB | Compresión de borde |
| EPS | Poliestireno expandido |
| FPU | Espuma flexible de poliuretano |
| FRP | Polímero reforzado con fibra |
| GFRP | Polímero reforzado con fibra de vidrio |
| ISO | Organización Internacional de Normalización |
| PIR | Poliisocianurato |
| PP | Polipropileno |
| PU | Poliuretano |
| PUI | Ionómero de poliuretano |
| PUR | Espuma rígida de poliuretano |
| PVC | Cloruro de polivinilo |
| SME | Efecto de memoria de forma |
| SMPU | Poliuretano con memoria de forma |
| TPU | Poliuretano termoplástico |
| UNE | Una Norma Española |
| XPS | Poliestireno extruido |

RESUMEN

El presente trabajo de titulación tuvo como objetivo estudiar el efecto de la presencia de micropartículas de caucho en un núcleo de espuma de poliuretano para un panel sándwich con láminas de fibra de vidrio (GFRP) mediante ensayos tanto físicos como mecánicos. La metodología usada para la fabricación del panel fue por un proceso de cocurado, donde, primero se fabricó la fibra de vidrio con un tiempo de curado de 2 días para que la resina aplicada alcance sus óptimas condiciones de trabajo, luego fueron cortados en dimensiones de 200 x 400 mm y ubicadas sobre un soporte de madera teniendo una separación de 50 mm, por vertido o colado se aplica la mezcla de polioli e isocianato en la separación existente entre las láminas de fibra de vidrio para su expansión y formación del panel sándwich, el proceso de cocurado no necesita una capa de adhesivo extra para fijar las láminas con el núcleo. El espesor total de los paneles sándwich se mantiene constante a 50 mm, mientras que el contenido de caucho varía en 0%, 20% y 30 % del peso del núcleo de la espuma. Se realizan pruebas de compresión plana, compresión de borde, flexión en tres puntos y de densidad de acuerdo con los estándares ASTM, además, de pruebas de inflamabilidad según ISO. Los resultados se han analizado dando lugar que la incorporación de las micropartículas de caucho brindan al núcleo una mayor flexibilidad, reduciendo el límite de fluencia y el índice de propagación de llama, además incrementando la densidad del núcleo. Para lograr una mayor uniformidad de la mezcla entre el polioli, isocianato y las micropartículas de caucho se recomienda el uso de una máquina de mezclado, la misma que facilitará el proceso de producción del panel.

Palabras clave: <INGENIERÍA MECÁNICA>, <PANEL SÁNDWICH>, <ESPUMA DE POLIURETANO (PUR)>, <POLÍMERO REFORZADO CON FIBRA DE VIDRIO (GFRP)>, <MICROPARTÍCULAS DE CAUCHO>, <FLEXIÓN>, <FLAMEABILIDAD>.



ABSTRACT

The present the titling work aimed to study the effect of the presence of rubber microparticles in a polyurethane foam core for a sandwich panel with fiberglass sheets (GFRP) through both physical and mechanical tests. The methodology used for the manufacture of the panel was by a co-curing process, where, first, the fiberglass was manufactured with a curing time of 2 days so that the resin applied reaches its optimal working conditions, then they were cut in dimensions of 200 x 400 mm and located on a wooden support having a separation of 50 mm, by pouring or casting the mixture of polyol and isocyanate is applied in the existing separation between sheets of fiberglass for its expansion and formation of the sandwich panel, the Co-curing process does not need an extra layer of adhesive to fix the sheets with the core. The total thickness of the sandwich panels remains constant at 50 mm, while the rubber content varies by 0%, 20% and 30% of the weight of the foam core Flat compression, edge compression, three-point bending and density tests are performed according to ASTM standards, in addition to ISO flammability tests. The results have been analyzed resulting in the incorporation of rubber microparticles providing the core with greater flexibility, reducing the creep limit and flame propagation rate, as well as increasing the density of the core. In order to achieve greater uniformity of the mixture between polyol, isocyanate and rubber microparticles, the use of a mixing machine is recommended, which will facilitate the panel production process.

KEY WORDS: <MECHANICAL ENGINEERING>, <SANDWICH PANEL>, <POLYURETHANE FOAM (PUR)>, <FIBERGLASS REINFORCED POLYMER (GFRP)>, <RUBBER MICROPARTICLES>, <BENDING>, <FLAMMABILITY>



INTRODUCCIÓN

El avance tecnológico e industrial obliga el desarrollo de nuevos materiales y a la mejora de las propiedades en los materiales ya existentes. Tal es el caso de los materiales compuestos cuyas propiedades físicas, químicas y mecánicas son mejoradas a medida que pasa el tiempo con el fin de ampliar su campo de aplicación. Un material compuesto es la combinación de dos o más materiales similares o diferentes unidos por sus superficies mediante cementación, unión de revestimiento, soldadura, adhesivos, etc. que no se disuelven ni fusionan entre sí (ISO 3795, 1989, p.5), en donde su diseño y composición inciden directamente en las propiedades finales del material como: resistencia, rigidez, estabilidad térmica, densidad y índice de combustión. El panel tipo sándwich es un material compuesto que se fabrica apilando capas sucesivas de material pre impregnado y curado bajo condiciones de temperatura y presión adecuadas (Otero, 2012, p.18). La composición del panel sándwich se basa principalmente en dos láminas frontales rígidas y fuertes que forman un compuesto resistente y están separadas por un núcleo o alma gruesa y liviano, pueden diseñarse para que posean una alta rigidez y resistencia a la flexión a baja longitud. Para una buena aproximación, las láminas frontales llevan la flexión y en cargas planas, mientras que el núcleo lleva el corte transversal. Los materiales utilizados comúnmente para paneles sándwich son láminas metálicas o compuestas, con un núcleo hecho de espuma polimérica, metálica o madera (Fleck and Sridhar, 2002, p1). Allen (Allen, 1969, pp.235-241) y Zenkert (Zenkert, 1995, pp.426-449) detallan los fundamentos para la construcción de paneles sándwich y los métodos de diseño.

El presente trabajo de titulación tiene como objetivo fabricar los paneles sándwich compuestos por un núcleo de espuma de poliuretano al cual se añaden micropartículas de caucho en variaciones de 20 y 30% en peso del mismo y láminas frontales que comprenden polímero reforzado con fibra de vidrio (GFRP). La evaluación de sus propiedades mecánicas se realizará en base a las normativas ASTM C365, ASTM C364 y ASTM C393, mientras que las propiedades físicas serán evaluadas por las normas ASTM C271 e ISO 3795 con el fin de identificar la variación de las propiedades que ocasiona el caucho en la estructura del panel sándwich. Un contraste de valores bibliográficos con estudios semejantes validará los resultados obtenidos en esta investigación. El objetivo del estudio es obtener paneles laminados sándwich livianos que se utilizan cada vez más como materiales estructurales para una amplia variedad de aplicaciones en los sectores de embalaje marítimo, aeroespacial, automotriz, de transporte, construcciones y electrónica.

CAPÍTULO I

1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

1.1. Problematización

En la actualidad la mayoría de las cubiertas, paredes de edificios y casas están construidas de concreto reforzado con acero. La vida útil de dichos materiales puede reducirse significativamente por las condiciones ambientales combinadas con el desgaste del tráfico, los productos químicos para deshielo y el mantenimiento insuficiente. Además, dichos materiales son costosos, pesados y no prestan funciones como aislantes térmicos ni aislantes acústicos. Como resultado, las agencias de transporte y empresas constructoras se han esforzado por encontrar nuevos materiales de construcciones confiables y rentables que puedan solventar estos inconvenientes de una forma rápida y poco costosa.

1.2. Justificación

1.2.1. *Justificación teórica*

Con el fin de proporcionar a la ESPOCH un estudio confiable que genere un material útil para aprendizaje e investigación; previamente se realizará el estudio del arte mediante el análisis de artículos de alto impacto en su mayoría, para generar un conocimiento previo de la teoría y condiciones necesarias para la síntesis de los paneles tipo sándwich de poliuretano reforzado. Posteriormente ya sintetizados estos paneles se procederá a realizar ensayos mecánicos con el fin de conocer sus propiedades y ser aplicados como materiales prefabricados para la industria de la construcción.

1.2.2. Justificación metodológica

Por parte del tesista y del tutor, se desarrollará la síntesis y los ensayos respectivos de los paneles tipo sándwich compuestos por fibra de vidrio y poliuretano reforzado con micropartículas de caucho. Una vez evaluado sus propiedades y calidad, los paneles tipo sándwich sintetizados podrán ser usados en posteriores trabajos de investigación de la misma Facultad de Ingeniería Mecánica o en el ámbito laboral como materiales prefabricados y aplicados en área de la construcción (mampostería, paredes, etc.).

1.2.3. Justificación práctica

El trabajo de investigación se realizará para profundizar el conocimiento ingenieril en lo que respecta a la fabricación de nuevos materiales, conociendo sus características y propiedades físicas brindando así altas prestaciones, tanto mecánicas como aislantes.

1.3. Alcance

El presente trabajo de tesis tiene como alcance estudiar y generar un panel tipo sándwich con fibra de vidrio y espuma de poliuretano reforzado mediante micropartículas de caucho con el cual, se realizará ensayos mecánicos que permitirá conocer la factibilidad de ser aplicados en autopartes, techos de cubierta o en construcciones prefabricadas. Además de su uso en divisiones de oficinas para edificios de la Institución.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Realizar el análisis, síntesis y evaluación de las propiedades mecánicas del panel tipo sándwich compuesto por fibra de vidrio y poliuretano reforzado con micropartículas de caucho.

1.4.2. *Objetivos Específicos*

- Sintetizar el panel tipo sándwich con fibra de vidrio y espuma de poliuretano con micropartículas de caucho.
- Reforzar las espumas de poliuretano mediante el uso de micropartículas de caucho para la obtención de probetas.
- Evaluar las propiedades mecánicas de los paneles tipo sándwich mediante ensayos de compresión y flexión.
- Evaluar el índice de inflamabilidad de la espuma de poliuretano con y sin refuerzo de micropartículas de caucho.
- Analizar los resultados obtenidos mediante técnicas estadísticas.
- Analizar los tipos de falla predominantes en los paneles sándwich bajo ciertas condiciones de carga.

1.5. MARCO TEORICO

1.6. Marco teórico conceptual

1.6.1. *Historia del origen del poliuretano*

En el año 1849 se reportó la primera reacción entre el isocianato y un compuesto hidroxilado por Wurtz y Hofmann. En 1937 Otto Bayer encontró un uso comercial al resultado de esta reacción comenzando su desarrollo en la década de los 50 debido a que no existían hasta ese entonces máquinas para procesarlo. (Tuwair *et al.*, 2015, p.1)

La industria de los uretanos a base de poliéster llegó a tal magnitud que pudo competir con el nylon. La llegada de la segunda Guerra Mundial y la escasez de materiales promovieron el uso y desarrollo de materiales de poliuretano para fibras, recubrimientos o espumas. Después de la Segunda Guerra Mundial Estados Unidos, Alemania y Gran Bretaña, comenzaron grandes investigaciones sobre el poliuretano y su desarrollo en la industria. Al inicio el trabajo se enfocaba en el estudio de diisocianatos y poliols de poliéster, sin embargo inconvenientes como costos

elevados, procesamiento difícil y propiedades inadecuadas de la espuma ocasiono que la industria de poliuretanos se enfocara en otros compuestos hidroxilados. (Tuwair *et al.*, 2015, p.1)



Figura 1-1. Otto Bayer

Fuente: (Europe 2011)

Normalmente, un material compuesto tipo sándwich consta de dos láminas delgadas, rígidas y fuertes, que están separadas por un núcleo grueso, ligero y más débil. Las láminas están unidas por la adhesión al núcleo para una mejor distribución de cargas entre los componentes. Este concepto de usar dos caras separadas por un núcleo se remonta al año 1849.(Tuwair *et al.*, 2015, p.1)

Existen varias formas propuestas por investigadores sobre los paneles tipo sándwich. Potluri P. con su grupo de investigación propusieron un panel tipo sándwich convencional donde las caras superior e inferior estaban separadas mediante un núcleo de espuma. En su estudio colocaron puntos de polímero reforzado con fibra (FRP) con el fin de mejorar el rendimiento del núcleo de espuma. Estos puntos de FRP también actuaron como un elemento de adhesión entre el núcleo y las caras. Pudieron comprobar que el comportamiento estructural estático y el de fatiga mejoraron al unir las caras superior e inferior. (Tuwair *et al.*, 2015, p.2)

Hassan, Reis y Rizkalla propusieron un sistema alternativo para plataformas de puentes. El sistema propuesto usó fibras tridimensionales (puntos a través de núcleos de espuma) con el fin de conectar las caras superior e inferior. Observaron que la falla por delaminación fue superada con éxito y el módulo de corte del núcleo aumento significativamente. (Tuwair *et al.*, 2015, p.2)

Dawood, Taylor, Ballew y Rizkalla estudiaron el comportamiento a la fatiga de paneles sándwich con núcleos rígidos y flexibles. Encontraron que los núcleos flexibles presentaron menos

degradación que los núcleos rígidos debido a las altas tensiones inducidas en el mismo nivel de tensión de corte aplicada.(Tuwair *et al.*, 2015, p.2)

Zureick, Shih y Munley utilizaron el análisis de elementos finitos para estudiar diferentes secciones transversales de FRP simplemente compatibles. Este estudio comparó cuatro secciones transversales diferentes obteniendo como resultado que los núcleos en forma de caja y en forma de V se comportan mucho mejor que las otras secciones.(Tuwair *et al.*, 2015, p.2)

1.6.2. ¿Qué es el poliuretano?

A diferencia de la mayoría de los polímeros como el polietileno, el poliestireno y el cloruro de polivinilo que son polímeros de las unidades monoméricas etileno, estireno 4 y cloruro de vinilo respectivamente, los poliuretanos no son polímeros con unidades repetidas de uretano en forma regular y carecen por lo general de una fórmula empírica que los represente a todos. Estos son básicamente productos de la reacción de polímeros polihidroxilados, tales como polioles, poliéster e isocianato. En resumen son polímeros que contienen el enlace (-NH-CO-O-), que no es en forma alguna el enlace químico predominante en los polímeros.(Akindoyo *et al.*, 2016, p.2)

La espuma de poliuretano es un material sintético, duroplástico y altamente reticulado que se lo obtiene al mezclar dos componentes, el polioliol y el isocianato provenientes de procesos químicos a partir del petróleo y del azúcar. La estructura resultante, sólida y uniforme es ideal para su uso como aislante o generalmente como impermeabilizante.

Las ventajas que presenta este material son:

- Su capacidad aislante es elevada, puede aislar lo mismo que otro material con un menor espesor.
- Debido a que la espuma de poliuretano tiene una buena resistencia al fuego, estabilidad física y química, posee adherencia y permeabilidad es usado ampliamente como un revestimiento continuo en construcciones.
- Es un material impermeable y permite la transpiración del elemento recubierto previniendo patologías de higiene y salubridad.

1.6.3. Química básica del poliuretano

La química de los poliuretanos permite que estos puedan agruparse con otros compuestos denominados polímeros de reacción. Estos polímeros de reacción pueden ser fenólicos, poliésteres insaturados y epoxis. De forma general la espuma de poliuretano se sintetiza por la reacción que se produce entre una molécula de isocianato con una molécula de poliol mediante un catalizador o luz ultravioleta. Las moléculas de isocianato y poliol necesariamente deben contener dos o más grupos isocianato ($R' - (N = C = O)_{n \geq 2}$) y grupos hidroxilo ($R' - (OH)_{n \geq 2}$) respectivamente. Las propiedades de los PU dependen del tipo de polioles e isocianatos a partir de los cuales se elaboraron. (Akindoyo *et al.*, 2016, pp.2-4)

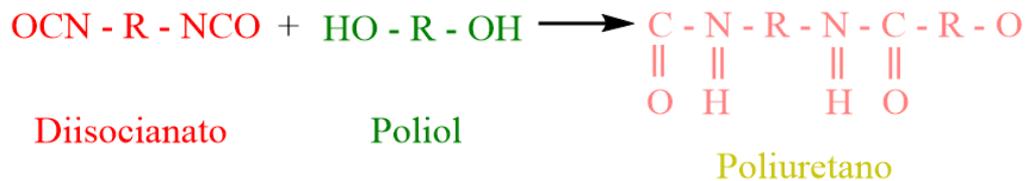


Figura 2-1. Ecuación de reacción de formación de un poliuretano

Fuente: (González Acevedo and Rivada Vázquez, 2016, p.5)

Los polímeros elásticos blandos son producidos por cadenas largas y flexibles de polioles, con baja reticulación, mientras que los polímeros rígidos y resistentes se obtienen mediante cadenas más cortas con una mayor cantidad de reticulación. Además, una combinación de cadenas largas con una reticulación promedio produciría polímeros adecuados para la fabricación de espuma. (Akindoyo *et al.*, 2016, p.3)

La incorporación de aditivos junto con los isocianatos y polioles, al igual como las modificaciones en las condiciones de procesamiento permiten obtener una amplia gama de características haciéndolos adecuados para diversas aplicaciones.

1.6.3.1. Polioles

Los polioles utilizados en la síntesis de espumas de poliuretano consisten en dos o más grupos $-OH$. La variedad de polioles que pueden ser preparados en laboratorio es muy amplia. Son una mezcla de agentes espumantes y aditivos como aminas, siliconas, agua y catalizadores ignífugos. Su unión permite condicionar la reacción influyendo en la apariencia, coloración

final y permitiendo obtener una estructura con más del 90% de celdas cerradas. (Akindoyo *et al.*, 2016, p.3)

Los polioles se usan a menudo como mezclas de moléculas de naturaleza similar pero con pesos moleculares diferentes. Sus moléculas poseen diferentes números de grupos -OH. Por lo tanto, a menudo es necesario establecer la funcionalidad promedio de los polioles. A pesar de la complejidad de la mezcla de los polioles, los polioles de grado industrial tienen composiciones que se han controlado cuidadosamente para obtener propiedades consistentes, que son necesarias para producir PU con propiedades específicas. Por ejemplo, las PU rígidas están hechas de polioles de bajo peso molecular (unos pocos cientos de unidades), mientras que las PU flexibles se obtienen de polioles de alto peso molecular (alrededor de diez mil unidades y más). Diferentes estructuras de varios polioles se presentan en la Figura 3-1. (Akindoyo *et al.*, 2016, p.3)

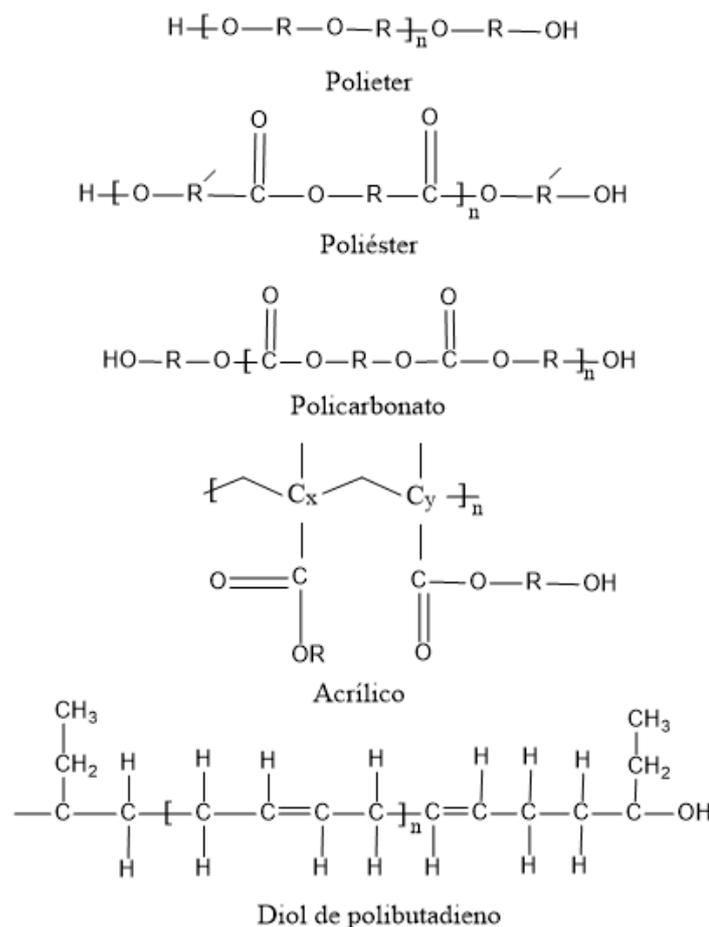


Figura 3-1. Comparación de estructuras básicas de polioliol

Fuente: (Akindoyo *et al.*, 2016, p.3)

En la Tabla 1-1 se presenta una comparación de las ventajas y desventajas de diferentes polioles.

Tabla 1-1: Ventajas y desventajas de los diferentes polioles

| Tipo de polioliol | Ventajas | Desventajas |
|--|---|---|
| Polioles poliéter basados en óxido de propileno y óxido de etileno | Estabilidad hidrolítica, coste, viscosidad, flexibilidad. | Estabilidad oxidativa, módulo / resistencia, inestabilidad térmica, inflamabilidad. |
| Polioliol poliéster alifático | Estabilidad oxidativa, módulo / resistencia. | Viscosidad, estabilidad hidrolítica. |
| Polioliol poliéster aromático | Retraso de llama, modulo / rigidez. | Viscosidad, baja flexibilidad. |
| Poliéter polioles a base de tetrahidrofurano | Estabilidad hidrolítica, módulo / resistencia. | Estabilidad oxidativa, viscosidad, coste. |
| Polioles de policarbonato | Estabilidad hidrolítica, estabilidad oxidativa, módulo / resistencia. | Viscosidad, costo. |
| Polioles acrílicos | Estabilidad hidrolítica / oxidativa, dureza. | Viscosidad, coste, baja flexibilidad. |
| Polioliol de Polibutadieno | Flexibilidad a baja temperatura, resistencia a disolventes. | Viscosidad, termo oxidable (a menos que esté hidrogenado), costo. |

Fuente: (Akindoyo *et al.*, 2016, p.3)

Realizado por: Freire W. 2019

1.6.3.2. Isocianatos

Los isocianatos se incorporan a la síntesis de PU a través de sus grupos funcionales NCO entre el 18-35% en funcionalidad. Posee una alta reactividad pero la reacción es lenta a temperatura ambiente, esta reacción lenta puede deberse a la incompatibilidad de fase de la fase de polioliol polar (hidrofílica o que es soluble en agua) y menos densa y la fase de isocianato relativamente no polar (hidrofóbica o rechaza el agua) y más densa. Por lo tanto, se requiere catalizadores adecuados para obtener una velocidad de reacción más rápida entre ellos. Las acciones de los catalizadores

basados en la polarización del compuesto de isocianato o hidroxilo a través de interacciones polares se muestran en la Figura 4-1. (Akindoyo *et al.*, 2016, pp.3-4)

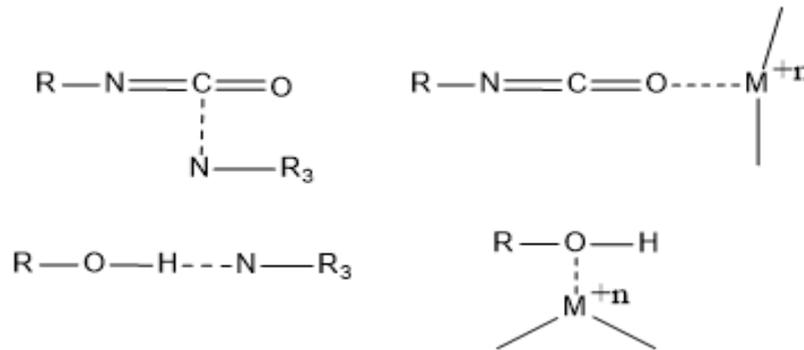


Figura 4-1. Mecanismos de polarización de enlace del catalizador

Fuente: (Akindoyo *et al.*, 2016, p.4)

Según el modelo, la mejora de la naturaleza electrofílica del isocianato se puede realizar mediante la eliminación de la densidad electrónica del nitrógeno u oxígeno del grupo NCO. Las modificaciones y los cambios en los tipos de materias primas y en las rutas de síntesis de PU determinan las propiedades mostradas por el producto final. (Akindoyo *et al.*, 2016, p.4)

Debido a que el isocianato tiene propiedades adhesivas, es usado ampliamente como aglomerantes en la fabricación de bloques poli-material. Un ejemplo práctico es aquel donde se aglomera piedras con el fin de crear rompeolas que protegen las costas. Además, el isocianato contribuye en la reacción química, en la adherencia de la espuma y aporta tanto resistencia a la combustión como estabilidad térmica.

Al momento de mezclar el isocianato con el polioli se produce una gran variedad de reacciones químicas (alrededor de 17 reacciones químicas) generando enlaces uretanos, poliuretanos, alofanatos, ureas modificadas, cianatos y prepolímeros. (González Acevedo and Rivada Vázquez, 2016, p.4)

La presencia de catalizadores en la mezcla provoca una reacción exotérmica elevando la temperatura a más de 100 °C. Esta energía hace que el agente de expansión se evapore expandiendo la mezcla y rellenando las celdas cerradas formadas después del cremado. Su volumen puede llegar a ser hasta 20 veces más que el volumen inicial de la mezcla. Si el agente de expansión llega a ser agua, por efecto de la elevada temperatura este se evapora expandiendo la mezcla y llenando las pequeñas celdas producidas en el proceso. La reacción entre isocianato y agua produce dióxido de carbono, el mismo que se incorpora dentro de las celdas dando características aislantes de temperatura, acústicas, resistencia, etc.

1.6.4. *Materia prima*

La base principal para la elaboración de la espuma de poliuretano radica en dos sustancias principales. Estas son:

- Un poliol
- Un isocianato
- Agua

Los aditivos se los emplea para mejorar el procesamiento de la espuma de poliuretano, ya sea la velocidad de reacción o el tamaño de la celda de la espuma. Entre los más comunes se tiene:

- Agentes físicos de expansión
- Amina
- Catalizador orgánico metálico
- Surfactantes de silicona



Figura 5-1. Formación de espuma de poliuretano

Fuente: (Bozano and Vera, 2014, p.37)

1.6.5. *Tipos de poliuretanos*

1.6.5.1. *Espuma de poliuretano rígida*

La preparación de espumas rígidas de PU se puede realizar utilizando polioles a base de petróleo, así como con polioles a base biológica de aceites vegetales o lignina a base de plantas. Las propiedades de las PU formuladas dependen de la categoría del grupo hidroxilo presente en los polioles. Por ejemplo, la glicerina, que es un poliol a base de petróleo, contiene un grupo hidroxilo

primario. Por otro lado, los polioles basados en aceite vegetal (por ejemplo, aceite de ricino) contienen grupos hidroxilos secundarios. Por lo tanto, las PU sintetizadas a partir de estas dos categorías de polioles exhiben diferentes propiedades físicas y mecánicas. Además, la reacción entre un poliol que contiene un grupo hidroxilo secundario y un isocianato es más lenta en comparación con la reacción entre un poliol que contiene un grupo hidroxilo primario y un isocianato. Por lo tanto, una mezcla de polioles primarios y secundarios que contienen grupos hidroxilo se usa a menudo para reducir el consumo de poliol a base de petróleo. Por ejemplo, las espumas de PU rígidas con altas propiedades físicas y mecánicas se han producido a través de una mezcla de glicerina y aceites de ricino. (Akindoyo *et al.*, 2016, pp.4-5)

1.6.5.2. Espuma de poliuretano flexible

Las espumas flexibles de PU (FPU) comprenden algunos copolímeros de bloques cuya flexibilidad se basa en las separaciones de fase entre los segmentos blandos y duros. Por lo tanto, las espumas de PU pueden modificarse mediante el control deliberado de las relaciones de composición individuales de estos segmentos. Dependiendo de algunas características físicas, pueden clasificarse como PU flexibles; por ejemplo, en términos de densidad, durabilidad, firmeza, resistividad al rasgado, combustibilidad, elasticidad de la superficie, etc., donde una combinación de estas propiedades puede garantizar una buena flexibilidad en el compuesto de PU. (Akindoyo *et al.*, 2016, pp.5-6)

Estos tipos de PU flexibles son químicamente resistentes debido al alto grado de reticulación y la cristalinidad adecuada, pero son débiles en términos de sus propiedades de tracción y desgarre. Para superar estos inconvenientes, se preparó y analizó una espuma de PU altamente flexible, laminada e híbrida. Luego se sugirió que la espuma de poliuretano flexible debía reforzarse con fibras textiles, como aramida, carbono, basalto y vidrio. Además, debido a las altas propiedades combustibles de las FPU, pueden liberarse al medio ambiente grandes volúmenes y gases tóxicos, como el CO, NOx y HCN, durante su combustión. Por lo tanto, las propiedades anti inflamables deben incorporarse en su formulación durante la producción. (Akindoyo *et al.*, 2016, p.6)

1.6.5.3. Poliuretanos termoplásticos

Los poliuretanos termoplásticos (TPU) revelan grandes combinaciones de propiedades físicas y aplicaciones de procesamiento. Por lo general, son flexibles y elásticos con buena resistencia al

impacto, a la abrasión y a la intemperie. Con los TPU, existe la posibilidad de colorear y fabricar utilizando una amplia gama de técnicas. Por lo tanto, la incorporación de TPU podría mejorar la durabilidad general de muchos productos. Los TPU son procesables por fusión, como otros elastómeros termoplásticos. Se pueden fabricar utilizando equipos de extrusión, soplado, compresión y moldeo por inyección. También pueden estar recubiertos con solución o formados al vacío, lo que los hace adecuados para su fabricación mediante una amplia gama de técnicas de fabricación. Las diversas combinaciones de propiedades de los TPU los hacen adecuados para muchas aplicaciones, como en automoción, calzado y construcción. (Akindoyo *et al.*, 2016, p.6)

La síntesis de TPU incluye a partir de nuevos diisocianatos basados en ácidos grasos, donde se informó que el material sintetizado mostró una estabilidad térmica considerable sin ninguna pérdida significativa de peso a temperaturas inferiores a 235 °C. También se ha informado de la síntesis exitosa de termoplásticos renovables basados en restos espiroacetal rígidos, con los materiales correspondientes producidos con un rendimiento muy alto. (Akindoyo *et al.*, 2016, p.6)

1.6.5.4. Ionómeros de poliuretano

La presencia de grupos iónicos en la cadena principal del poliuretano tiene muchas ventajas, como una mejor dispersión en disolventes polares debido a su mayor hidrofobicidad y mejores propiedades térmicas y mecánicas. En particular, la memoria de forma y las características biocompatibles proporcionan a los materiales las instalaciones que se utilizarán en dispositivos biomédicos. Las PU con memoria de forma (SMPU) poseen un efecto de memoria de forma termo-sensible (SME) y, en consecuencia, exhiben diferentes propiedades mecánicas que las otras PU. La presencia de segmentos duros (responsables de la fase congelada) y blandos (responsables de la fase reversible) permite a las PU "memorizar" la forma permanente. La forma permanente se puede recuperar de la forma temporal después de calentar los materiales por encima de la temperatura del interruptor. El segmento blando y su temperatura de transición vítrea están relacionados con la temperatura del interruptor y la deformación temporal, mientras que el segmento duro es responsable de la memoria de forma permanente. El contenido de segmentos duros y blandos en las moléculas de PU y su estructura molecular tiene un efecto en la SME de la PU. La variación de la temperatura de transición vítrea del segmento blando y la cristalización del segmento duro tienen efectos importantes en la SME. Esas propiedades se pueden cambiar debido a la presencia de ionómeros en las PU. La incorporación de grupos iónicos se puede realizar usando dioles iónicos o grupos iónicos que contienen diisocianato durante la preparación de PU. (Akindoyo *et al.*, 2016, pp.6-7)

1.6.6. Propiedades de la espuma de poliuretano

El poliuretano es un material muy versátil utilizado en una infinidad de aplicaciones alrededor del mundo. Las propiedades de la espuma de poliuretano se basan en su estructura molecular.

1.6.6.1. Densidad

Se la expresa en kilos por metro cubico y es la cantidad de masa por unidad de volumen. La densidad de la espuma rígida de poliuretano para aislamiento térmico normalizada por UNE 92120-1 y 92120-2 varía entre 30 y 55 kg/m^3 , pudiéndose incrementar para casos especiales hasta de 100 -200 kg/m^3 o más bajas 10,12-15 kg/m^3 siendo espumas acústicas. (Grau 2009)

1.6.6.2. Estructura molecular

La espuma rígida de poliuretano tiene una estructura celular esencialmente cerrada situada por encima del 90%.

1.6.6.3. Conductividad térmica

La elevada capacidad de aislamiento térmico de la espuma rígida de poliuretano se debe a la baja conductividad térmica que posee el gas espumante dentro de las celdas cerradas. La PUR producida in situ alcanza un valor de conductividad térmica de $10^{\circ}C = 0,022 W/m.K$, según la norma UNE 92202. Ya que los gases se difunden parcialmente a través de las celdas, el valor de conductividad va aumentando hasta estabilizarse. El valor envejecido de la conductividad térmica luego de 9 meses según UNE 92120 es de $0,028 W/m.K$.(Construmática 2018)

1.6.6.4. Estabilidad y resistencia

La espuma de poliuretano rígida es resistente en gran medida a los disolventes de adhesivos, pinturas, conservantes para la madera, resistente al envejecimiento contra la acción de mohos, resistente a los gases de escape y gases de la industrial. Es estable a los carburantes, ácidos, álcalis diluidos y aceite mineral.

1.6.6.5. Propiedades eléctricas

Debido a la baja pérdida dieléctrica y baja constante dieléctrica la espuma rígida de poliuretano es apropiada para el uso en recubrimientos de antenas y cúpulas de radar.

1.6.6.6. Propiedades acústicas

Ya que la espuma de poliuretano rígida es de baja densidad y está compuesto por celdas cerradas por encima del 90% se comporta como un material de pésimas características absorbentes acústicas. (Construmática 2018)

1.6.7. Proceso de formación de la espuma de poliuretano

A continuación se presentan las etapas del proceso de formación de la espuma de poliuretano.

1.6.7.1. Dosificación de los ingredientes de la espuma y mezclado

Los ingredientes se dosifican en cantidades y proporciones adecuadas por medio de un instrumento medidor y son mezclados en un recipiente manualmente o en la cabeza mezcladora de una máquina. Durante el proceso de mezclado se generan pequeñas burbujas que actúan como

agentes iniciadores de la espumación. Al realizarse la mezcla en máquinas de espuma, el aire se inyecta directamente en la cámara de mezclado.(Pérez, 2015, p.14)

1.6.7.2. Cremado

Luego de un corto tiempo de inducción, los gases de expansión (dióxido de carbono y cloruro de metileno) empieza a expandirse dentro de las burbujas de aire agrandándolas y dándoles una apariencia cremosa. El tiempo desde que se comienza la mezcla hasta que aparece la crema se conoce como “Tiempo de crema” que fluctúa entre 6 – 15 segundos en las espumas flexibles.(Pérez, 2015, p.14)

1.6.7.3. Crecimiento

Según se genera más gases de expansión, la espuma sigue creciendo y simultáneamente se hace más viscosa con la polimerización en la fase líquida. El número de burbujas no varía según crece la espuma.(Pérez, 2015, pp.14-15)

1.6.7.4. Crecimiento completo

A medida que los refuerzos de las celdas llenas de gas se consolidan, las paredes delgadas de las mismas no pueden resistir más la presión del gas. Cuando la espuma sube completamente, estas paredes delgadas se revientan y se desprenden los gases a través de la espuma, que está lo suficiente gelificada y compacta para mantenerse firme. Pasados unos 100–200 segundos después de empezada la mezcla, la reacción de expansión cesa, mientras la reacción de gelificación continúa. El tiempo transcurrido desde el inicio hasta que la espuma sube completamente se denomina tiempo de crecimiento.(Pérez, 2015, p.15)

1.6.7.5. Gelificación

La reacción de gelificación o polimerización continúa hasta el punto conocido con el nombre de tiempo de gelificación, cuando la mezcla ha gelificado, (por lo general, 20-120 segundos después del tiempo de crecimiento). Para comprobar si un bloque de espuma se ha gelificado o no, se inserta varias veces una espátula de madera unos 2-4 centímetros dentro de la masa que está gelificando hasta que se note que ofrece alguna resistencia. Cuando la capa exterior de la espuma no es pegajosa al tacto, se ha llegado al tiempo libre de adhesividad. Aunque generalmente el tiempo de gelificación ocurre después del tiempo de crecimiento, en la fabricación de espuma flexible; es posible lograr lo contrario, en el caso de las espumas rígidas. (Pérez, 2015, p.15)

1.6.7.6. Curado

Los bloques de espuma se llevan luego al área de curado donde deben permanecer por lo menos 24 horas para asegurar una reacción de gelificación total. (Pérez, 2015, p.15)

1.6.8. Sistemas de producción de espumas de poliuretano

Existen dos sistemas de producción que se describe a continuación.

1.6.8.1. Poliuretano proyectado

Poliuretano proyectado o poliuretano aplicado in situ por proyección, este proceso se basa en la pulverización de la mezcla previamente realizada sobre una superficie denominada sustrato. El material aplicado forma una capa consistente y continua, sin juntas ni huecos, eliminando de esta forma cualquier puente térmico. (Asociación Técnica de Poliuretano Aplicado, 2010, p.7)

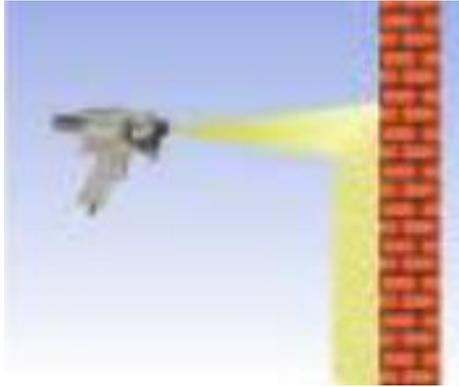


Figura 6-1. Poliuretano proyectado

Fuente: (Asociación Técnica de Poliuretano Aplicado, 2010, p.7)

La espuma de poliuretano proyectado es una forma económica y versátil de aislar todo tipo de espacios incluyendo los de difícil acceso como se muestra en la figura 7-1.



Figura 7-1. Áreas de aplicación del poliuretano proyectado

Fuente: (Europe, 2011, p.15)

1.6.8.2. Poliuretano inyectado

Poliuretano inyectado o espuma de poliuretano rígida aplicada in situ mediante colada, donde los dos componentes son mezclados mediante batido y se introducen en una cavidad donde se realiza la expansión.(Asociación Técnica de Poliuretano Aplicado, 2010, p.7)

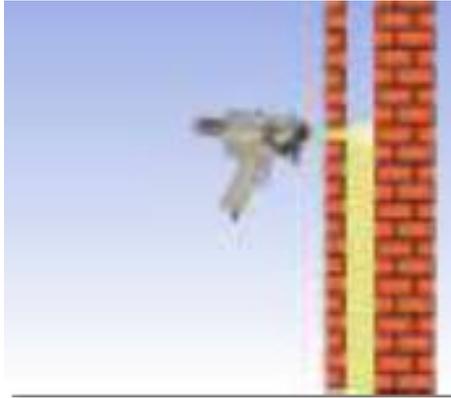


Figura 8-1. Poliuretano inyectado

Fuente: (Asociación Técnica de Poliuretano Aplicado, 2010, p.7)

Al inyectar la mezcla en una cavidad no solo actúa como aislante térmico de alta eficiencia sino que mediante su proceso de expansión permite unir las dos láminas que conforman la cavidad ofreciendo una mayor estabilidad a la construcción. Además, permite el sellado de todos los huecos proporcionando hermeticidad a la construcción. Es ideal para aplicaciones de espacios estrechos donde los materiales comunes para aislamiento no se pueden utilizar.

1.6.9. Aplicaciones de la espuma de poliuretano

En los últimos años el uso de la espuma rígida de poliuretano ha crecido sustancialmente gracias a sus excelentes propiedades como aislante térmico, su impermeabilidad hacia el agua y a los combustibles, además de sus excepcionales características físicas.

El mercado de mayor alcance para la espuma de poliuretano rígida es en las industrias de aislamiento térmico usado en mayor porcentaje para refrigeradores, mientras que la espuma de poliuretano flexible es ampliamente utilizada en colchones, asientos, básicamente en industrias orientadas hacia la ergonomía y confort.

1.6.9.1. Aplicaciones en edificación y construcción

La espuma de poliuretano por ser un excelente aislante térmico y acústico se la puede aplicar en techos, paredes y pisos. Gracias a su gran versatilidad, la espuma de poliuretano se usa en una gran variedad de formas:

- Planchas aislantes
- Paneles sándwich
- Proyectado
- Inyectado



Figura 9-1. Sistema de aislamiento

Fuente: (Europe, 2011, p.5)

Las espumas de poliuretano se pueden usar en casi cualquier parte de la casa, como para pisos en forma de almohadillas de un cojín flexible, para alfombras, o para techos en forma de aislante térmico y material reflectante de luz. En la aplicación para techos, las cubiertas de plástico en la superficie de espuma de poliuretano pueden ayudar a mantener la casa fresca y reduce el consumo de energía. En general, los paneles con núcleo de espuma también proporcionan una gran variedad de colores y perfiles para techos y paredes.

1.6.9.2. Fachadas

La espuma de poliuretano facilita el aislamiento térmico independientemente del tipo de fachada que se esté construyendo. La facilidad de aislar con pequeños espesores permite un aumento del espacio habitable y una reducción en costos constructivos, como las dimensiones de carpintería. En la figura 10-1 se puede observar la forma de cómo aplicar las planchas de poliuretano en paredes.



Figura 10-1. Planchas de poliuretano en fachadas internas y externas

Fuente: (Europe, 2011, pp.6-7)

No solo se limita a las fachadas interiores, también son ampliamente utilizadas en fachadas exteriores como acabado, teniendo así aislante con enlucido. Si se va a usar internamente cuanto más delgado mejor, de esta forma el PU tiene una gran ventaja sobre otros tipos de aislamiento cuando se trata de aprovechar al máximo el espacio vital disponible. Otro beneficio claro del aislamiento de PU es que no se doblará o desplomará con el tiempo, y es fácil de instalar, lo que reduce la probabilidad de brechas o puentes térmicos y brinda una mayor garantía de rendimiento durante la vida útil del edificio. También es un trabajo sencillo sellar juntas, lo que permite alcanzar niveles mucho más altos de hermeticidad, lo que a su vez proporciona un rendimiento térmico aún mejor. (Europe, 2011, p.7)

1.6.9.3. Cubiertas planas e inclinados

El uso de aislamiento en cubiertas con el fin de crear un espacio cálido y habitable ha ido incrementando con el paso de los años. Los tableros de espumas de poliuretano aportan con flexibilidad y rigidez en la cubierta, normalmente se las instala sobre vigas, entre vigas o debajo de vigas para luego colocar un acabado como teja, eternit, etc.

Para cubiertas planas, o con inclinaciones inferiores a 30° no es necesario tomar precaución en lo relativo a la adherencia con otros productos. Para cubiertas inclinadas más de 30° será necesario tomar las siguientes precauciones:

- Para mejorar la adherencia de la capa a colocar sobre la espuma se deberá aplicar una resina básica sobre la misma.
- Añadir resina básica con cemento con el fin de crear una pintura de cemento con la capacidad de adherirse con mayor facilidad y eficiencia.
- Al colocar arena suelta sobre la resina básica todavía fresca se pretende mejorar el anclaje mecánico con otros materiales.

- Una forma económica de mejorar el anclaje mecánico de la espuma de poliuretano con otros materiales es raspar la superficie de la espuma con un cepillo de alambres, cambiando así la superficie y mejorando el anclaje. (IPUR 2019)



Figura 11-1. Planchas de poliuretano en cubiertas

Fuente: (Europe, 2011, p.8)

Los aislantes de poliuretano ofrecen buena resistencia a la compresión y estabilidad dimensional siendo un material liviano y fácil de manipular que otros aislantes. Una de las características esenciales del aislamiento de poliuretano es que puede soportar el tránsito peatonal, especialmente cuando se lo utiliza en cubiertas planas modernas impermeabilizadas por membranas. A diferencia de algunos materiales aislantes de fibra o lana, el aislamiento de poliuretano no se hunde bajo el peso de las personas, lo que evita que se genere charcos de agua, falla de la membrana y penetración de agua lluvia.

1.6.9.4. Pisos

Una aplicación que puede aportar en el ahorro del consumo de energía, pero muchas veces no se lo considera, es el aislamiento del piso. Aunque la pérdida de calor por el piso sin aislamiento se genera en los bordes, un edificio sin aislamiento del piso posee un rendimiento térmico bajo, por lo que el aislamiento del piso tiene una gran ventaja frente al aislamiento del perímetro teniendo en cuenta las dimensiones del piso de un edificio típico. (Europe, 2011, p.7)

Por ejemplo, si se aísla un piso de madera suspendido en el aire con material fibroso desde abajo, debido a las corrientes de aire y a la humedad este material tiende a deteriorarse, siendo este método muy poco fiable.



Figura 12-1. Aplicación de planchas para aislar pisos

Fuente: (Europe, 2011, p.7)

1.6.10. Historia de la fibra de vidrio

Los egipcios fueron los primeros en descubrir la fibra de vidrio mediante la elaboración de vasos y ánforas para las tumbas de los faraones. El sistema de fibras tejidas se da a inicios del siglo XVIII en la ciudad de Francia, mientras que la producción en masa de la fibra de vidrio comenzó en los Estados Unidos a partir del año 1938, dando inicio a la compañía Owens-Corning Fiberglass la cual fue la encargada de la experimentación de la fibra de vidrio como un material de refuerzo para una matriz polimérica. A finales de los años cincuenta, su utilización incremento exponencialmente en la construcción naval produciendo una reducción de costes en la materia prima y mejorando los proceso de fabricación (Besednjak, D. A. 2005, p.39).

1.6.11. Composición química

Las fibras de vidrio están constituidas fundamentalmente por sílice, que se combina con diferentes óxidos (alúmina, alcalinos y alcalinotérreos), que en función de sus respectivos porcentajes permiten modificar las características de la fibra resultante. La elevada resistencia que poseen las fibras de vidrio es producida por los enlaces covalentes entre el silicio y los radicales de oxígeno. Los átomos integran una retícula tridimensional con estructura amorfa; es debido a esta razón que posean características isotrópicas (Besednjak, D. A. 2005, p.40).

1.6.12. Tipos de fibra de vidrio

Al elevar la temperatura del vidrio, este puede pasar por una operación de fibrado, considerando su composición química. Esta composición se basa en sílice con un contenido en disolución de al menos dos silicatos, un alcalino como el silicato de sodio y un alcalinotérreo como el silicato de calcio.

Como material fundente se utiliza el óxido de sodio, el mismo que facilita el proceso reduciendo la temperatura de fusión y la viscosidad de la sílice. Sin embargo, el óxido de sodio afecta en la resistencia química del vidrio por lo que es necesario la adición de un alcalinotérreo para contrarrestar este efecto (Materiales compuestos I, 2012, p.20).

Los tipos de fibra de vidrio más importante son:

- Vidrio E (Eléctrico): Su principal aplicación en la industria fue como un aislante eléctrico en elementos sometidos a elevadas temperaturas.
- Vidrio A (Alto contenido en álcali): Posee una elevada resistencia química, sin embargo en presencia del álcali su resistencia disminuye, además posee un módulo bajo en comparación al Vidrio E.
- Vidrio AR (Álcali resistente): Este tipo de fibra es el único usado en combinación con el hormigón y el cemento debido a que no es atacado por el álcali generado en el proceso de hidratación del cemento.
- Vidrio C (Químico): Es usado como capa superficial anticorrosivo en estructuras. Posee una elevada resistencia química y se encuentra entre el vidrio A y el vidrio E.
- Vidrio R ó S (Resistencia): Posee una resistencia a la tracción y módulo de elasticidad muy superior a los demás tipos de vidrio. Su principal aplicación es en la industria aeronáutica donde se demanda materiales de elevadas características mecánicas.
- Vidrio D (Boro): Su composición consta de borosilicato de calcio con un bajo contenido de álcali, posee gran durabilidad y buenas propiedades eléctricas.

1.6.13. Propiedades de la fibra de vidrio

La base principal para la producción de la fibra de vidrio es el sílice, este en combinación con otros óxidos como el alcalino, alúmina y alcalinotérreo son fundidos para luego pasar por un proceso de hilado y estirado (Materiales compuestos I, 2012, p.20).

Entre las propiedades más importantes de la fibra de vidrio se tiene:

- Elevada adherencia fibra-matriz: La mayoría de matrices orgánicas necesariamente utilizan recubrimientos específicos para cumplir con esta propiedad.
- Resistencia mecánica: su resistencia específica es superior a la del acero.
- Características eléctricas: Aun con bajos espesores es un buen aislante eléctrico y es permeable ante ondas electromagnéticas.
- Incombustibilidad: La fibra de vidrio es incombustible ya que es un mineral y no propaga el fuego evitando así, la generación de humos tóxicos.
- Estabilidad dimensional: Debido a su bajo coeficiente de dilatación es poco sensible a cambios de temperaturas.
- Compatibilidad con las materias orgánicas: Posee una gran aptitud para cualquier tipo de recubrimientos ya sean estas, resinas sintéticas o matrices minerales, como el yeso o cemento.
- Imputrescibilidad: No sufre deterioro alguno en presencia de roedores, humedad o insectos.
- Baja conductividad térmica: Su baja conductividad térmica permite ser usado en el ahorro de energía para calefacción.
- Elevada flexibilidad
- Coste bajo

Tabla 2-1: Propiedades de diferentes tipos de fibra de vidrio

| Tipo | Vidrio A | Vidrio E | Vidrio S | Vidrio R |
|--|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Diámetro de hilo (μm) | 5-13 | 10-20 | 10 | 10 |
| Densidad (kg/m^3) | 2500 | 2580 | 2480 | 2590 |
| Módulo de elasticidad (GPa) | 69 | 72,5 | 86 | 85 |
| Resistencia a la tracción (GPa) | 3,1 | 3,4 | 4,59 | 3,4 – 4,4 |
| Módulo específico | 28 | 28 | 34 | 33 |
| Coeficiente expansión térmica ($10^{-6}/^{\circ}\text{K}$) | 8,6 | 5 | 5,1 | 5 |

Fuente: (Materiales compuestos I, 2012, p.21)

Realizado por: Freire W. 2019

1.6.14. Fabricación

Existen varios procesos para la obtención de la fibra de vidrio, sin embargo, su principio es el mismo. El estiramiento se lo realiza de una vena de vidrio fundido a elevada temperatura mediante un esfuerzo de tracción o por un fluido en movimiento para luego solidificarse.

Entre los procesos más comunes se producen las siguientes fases:

- **Composición-Fusión:** La materia prima es dosificada y mezclada homogéneamente para luego ser introducida en el horno de fusión a una determinada temperatura. En el caso del Vidrio E, debido a que posee bajo contenido de álcali pero es rico en sílice y alúmina, su temperatura de procesamiento es de 1550 °C. (Materiales compuestos I, 2012, p.22)
- **Fibrado:** Una vez fundido el vidrio, este es enviado a canales, donde se encuentran con un baño de platino/rodio para luego ser distribuidos a las hileras. Las hileras son agujeros ubicados en la base del canal, alrededor de 400 a 4000 agujeros con un diámetro entre 2 y 8 μm . El vidrio permanece en la hilera a una temperatura de 1250 °C permitiendo realizar la colada por gravedad y obteniendo barras de μm de diámetro. Después de la hilera el vidrio se estira a una velocidad comprendida entre 10 y 60 m/s , para luego ser enfriada por radiación y posteriormente por pulverización de agua (Figura 13-1) (Materiales compuestos I, 2012, p.22).
- **Ensimado:** Los filamentos obtenidos directamente de la hilera no son aplicables debido a la presencia de defectos como la falta de cohesión entre ellos, poca resistencia a la abrasión, presenta dificultad en la unión con la matriz, crea cargas electrostáticas, etc. Para obtener las propiedades que se necesita en función de su aplicación, a los filamentos se los recubre con una fina película (ensimaje) constituida por diversos compuestos químicos formando una dispersión acuosa. El ensimaje se lo realiza a la salida de la hilera, donde la temperatura del vidrio esta entre 80 y 120 °C. La cantidad de ensimaje que se coloca sobre el vidrio es muy baja, entre 0,3 y 3% (Figura 14-1) (Materiales compuestos I, 2012, pp.22-23).
- **Bobinado:** Los filamentos son agrupados en una o varias unidades para ser bobinados en diferentes formas y geometrías (Materiales compuestos I, 2012, p.25).
- **Secado:** El producto resultante del bobinado es pasado por diferentes dispositivos de secado para eliminar todo rastro de agua donde se disolvió el ensimaje (Materiales compuestos I, 2012, p.25).

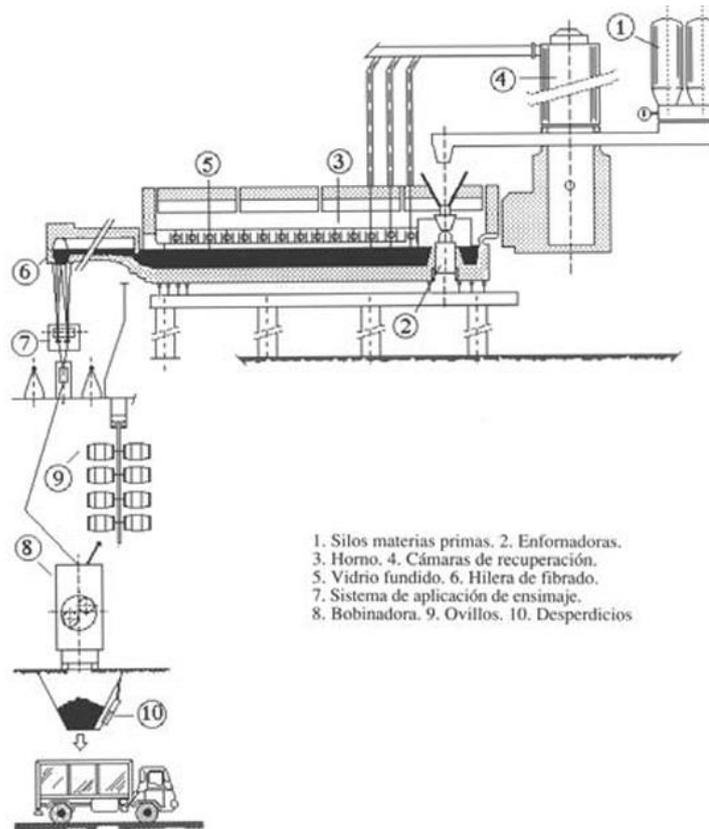


Figura 13-1. Fibrado de vidrio por fusión directa

Fuente: (Materiales compuestos I, 2012, p.24)

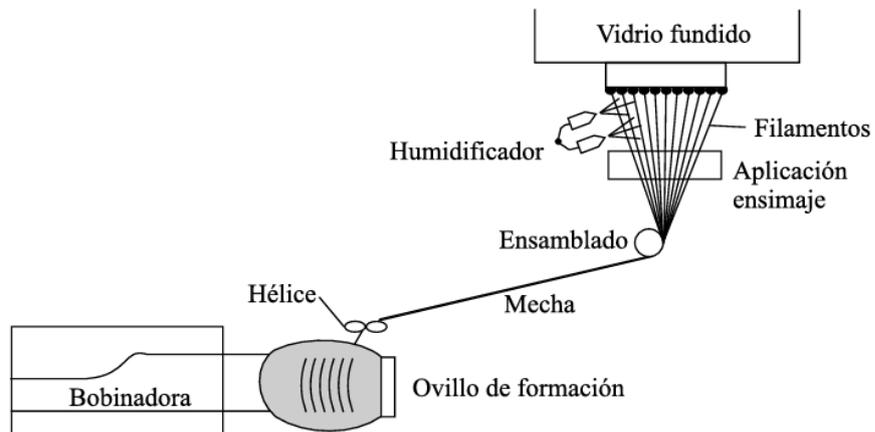


Figura 14-1. Fabricación de la fibra de vidrio

Fuente: (Materiales compuestos I, 2012, p.24)

1.6.15. Estructuras sándwich

1.6.15.1. Características de un panel sándwich

Los paneles sándwich fueron los primeros materiales compuestos en ser ensamblados por pegado (o soldadura) dos láminas delgadas y de alta resistencia, y un núcleo grueso de baja densidad con propiedades mecánicas bajas.

Estos paneles sándwich pueden ser contruidos con una gran variedad de materiales y de diferentes formas, pero la mayoría de paneles sándwich para la industria aeronáutica y automovilista son hechos con láminas de material compuesto de fibra de carbono o fibra de vidrio, siendo estas las caras que se unen al núcleo.

El estudio del presente trabajo se basa en un panel tipo sándwich con núcleo de espuma de poliuretano reforzado con micropartículas de caucho y las caras contruidas de fibra de vidrio.

El material del núcleo tiene como objetivo aligerar el peso de la estructura, el mismo que debe ser compatible con el material de las láminas y con los procesos de fabricación al momento de unir las caras al núcleo. Si los materiales de las caras y del núcleo son seleccionados adecuadamente, el material compuesto puede llegar a tener propiedades incluso mejores que otros tipos de estructuras. Tanto su relación de rigidez como la resistencia al peso incrementan considerablemente(Otero, 2012, p.34).

1.6.15.2. Componentes de una estructura sándwich

Como se ha mencionado anteriormente, los paneles tipo sándwich están contruidos por dos láminas delgadas que encierran a un núcleo grueso y ligero. La geometría de un panel tipo sándwich se muestra en la figura 15-1:

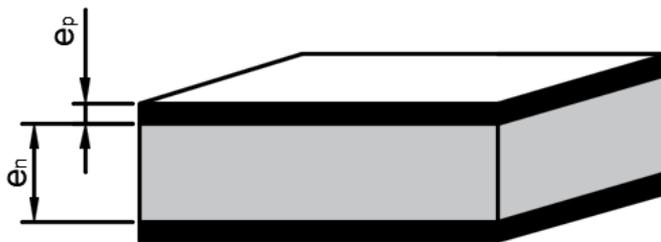


Figura 15-1. Panel tipo sándwich

Realizado por: Freire W. 2019

Donde:

e_p : *espesor de la piel (lámina)*

e_n : *espesor del núcleo*

e_a : *espesor del adhesivo*

ρ_n : *densidad del núcleo*

Las dimensiones características, así como los rangos típicos para la densidad del núcleo de este tipo de materiales son:

Tabla 3-1: Valores geométricos característicos

| Valor mínimo | | Valor máximo |
|---------------------|-----------|-----------------------|
| 10 | e_n/e_p | 100 |
| 0,25 mm | e_p | 12,7 mm |
| 20 kg/m^3 | ρ_n | 1000 kg/m^3 |
| 0,025 mm | e_a | 0,2 mm |

Fuente: (Otero, 2012, p.39)

Realizado por: Freire W. 2019

1.6.15.3. Láminas

Las láminas, revestimientos o pieles se los define como los materiales que encierran al núcleo formando un sándwich. De igual modo un material compuesto se lo define como la unión de una resina constituyendo la matriz con un material resistente como fibras.

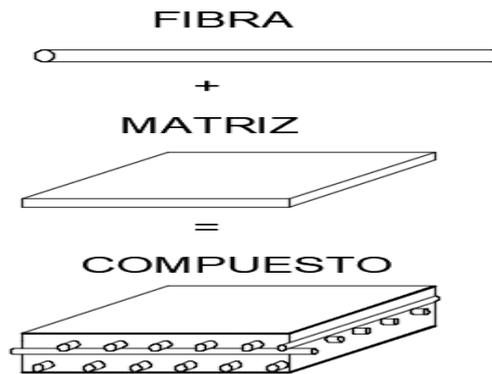


Figura 16-1. Material compuesto

Realizado por: Freire W. 2019

El material compuesto se suele definir como la combinación a escala macroscópica de dos o más materiales con interfaces de separación entre ellos para formar un nuevo material (Otero, 2012, p.40).

Este trabajo se enfoca en el estudio de paneles tipo sándwich, cuyas láminas están construidas de material compuesto de fibra de vidrio con resina. Estas laminas con refuerzo bidireccional entrelazados perpendicularmente se denomina tejidos. En la figura 17-1 se muestra un rollo de material tejido, donde la fibra en dirección de la trama permanece recta mientras la fibra que va en dirección de la urdimbre se entrelaza y se curva.

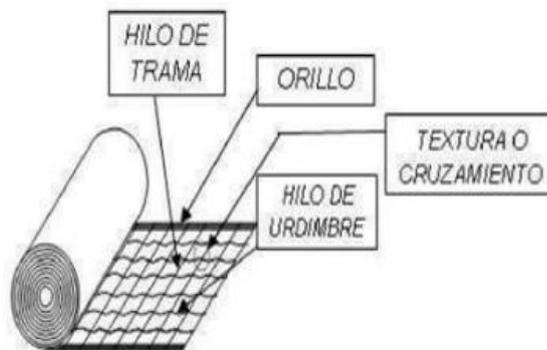


Figura 17-1. Rollo de tejido

Fuente: (Otero, 2012, p.42)

Las propiedades mecánicas de las láminas compuestas se definen en función de la dirección de sus fibras (trama y urdimbre). Al tener un material compuesto con una distribución de fibras bidireccional las propiedades mecánicas son elevadas en comparación con las de un material compuesto con fibras unidireccionales.

Los materiales compuestos cuyas fibras sean continuas, tienden a soportar mayor carga de trabajo. El tipo de falla en estos materiales compuestos está gobernado por las fibras, a excepción de materiales con fracciones volumétricas de fibra muy bajas (Otero, 2012, p.42).

Las fibras comúnmente utilizadas en estos tipos de materiales son las de carbono, vidrio y orgánicas conocidas como Kevlar. En la matriz se suele usar resinas epoxi y poliéster, además de la resina fenólica que es ampliamente utilizada en aplicaciones de automoción gracias a sus ventajas frente al fuego y a la baja toxicidad de los humos en caso de incendio (Otero, 2012, p.43).

Las características que prestan estas fibras en materiales compuestos son:

- Elevada resistencia mecánica
- Elevada rigidez específica
- Baja densidad
- Aislantes eléctricos
- Aislamiento térmico y acústico
- Amortiguan vibraciones
- Resistentes a la corrosión y abrasión
- Debido a su anisotropía se puede diseñar y modificar las propiedades mecánicas

Los inconvenientes en el desarrollo de estos materiales compuestos son:

- Alto coste del material
- Propiedades mecánicas sensibles a la temperatura y humedad
- Equipos e instalaciones de fabricación costosos
- Vida limitada antes de la polimerización

1.6.15.4. Núcleo

Al núcleo se lo define como un elemento de baja densidad y bajas propiedades mecánicas que se encarga de separar los revestimientos (laminas o pieles) formando una estructura tipo sándwich (Otero, 2012, p.45).



Figura 18-1. Núcleo de espuma de poliuretano

Fuente: (Monge, 2016, p.25)

El material utilizado en el núcleo puede ser clasificado en dos grupos: tipo panal de abeja o Honeycomb que puede ser de Aluminio, Nylon o Nomex y los materiales sintéticos como las espumas (Otero, 2012, p.46).

Entre los aislantes más comunes que conforman el núcleo con propiedades térmicas- acústicas encontramos:

- Espuma de poliuretano (PUR)
- Poliisocianurato (PIR)
- Poliestireno expandido (EPS)
- Poliestireno extruido (XPS)

La espuma de poliuretano posee una elevada resistencia a la absorción de agua, dificultando de esta forma el crecimiento de hongos y bacterias. Además, posee buena resistencia al ataque de ácidos, álcalis, agua dulce y salada, y tiene una excelente adherencia a materiales usados normalmente en construcción (Monge, 2016, p.25).

1.6.15.5. Adhesivo

La finalidad del adhesivo en una estructura tipo sándwich es unir las láminas o pieles al núcleo para evitar o reducir el riesgo de falla por delaminación. Dependiendo del procedimiento para la fabricación del panel sándwich se puede usar una película de adhesivo o no. Si se realiza un proceso de precurado, donde se procede a la síntesis de la espuma de poliuretano en una primera fase y luego se une al núcleo, es necesario la aplicación de una capa adhesiva entre el núcleo y cada lámina. Si el panel sándwich se fabrica por cocurado no se ve en la necesidad de aplicar una capa de adhesivo, debido a que la resina de las láminas de fibra actúa como medio de unión entre el núcleo y los revestimientos (Otero, 2012, pp.52-53).

1.6.15.6. Conformación de paneles sándwich

En los materiales compuestos inyectados con espuma de poliuretano, la lámina superior es la encargada de brindar toda la resistencia mecánica al material compuesto, mientras que la lámina inferior se encarga de brindar el acabado final para la obra a la cual sea destinado el panel sándwich.

Se da comienzo cuando las bobinas de acero llegan a la planta, estas bobinas son conformadas por rolado en frío con el fin de obtener espesores reducidos para ser aplicados en los paneles sándwich.

Las matrices que se dispone en las máquinas de conformado para paneles varían según se requiera. Las matrices constan de un par de rodillos. Con geometrías establecidas y están ubicados en la línea de conformado.

Una máquina de conformado de lámina superior puede llegar a procesar entre 1 y 1,5 toneladas diariamente, mientras que para la lámina inferior es más delicado ya que la geometría resultante lo hace frágil. Debido a esto su producción es más lenta y solo se puede procesar entre 200 a 500 kg al día.

En el proceso de inyectado se debe tener en cuenta que la mezcla de los componentes se debe determinar mediante estequiometría. El tiempo para la reactividad de la mezcla debe ser el ideal con el fin de lograr mezclar y verter el producto en el molde. En un proceso de mezclado manual se recomienda alrededor de 10 a 15 segundos de mezclado y el vertido no debe exceder los 15 segundos. Al tener máquinas de inyección, este tiempo de vertido depende de la máquina.

El proceso consiste en ubicar la lámina inferior sobre una prensa larga, sobre ella se coloca trozos de espuma de poliuretano uniformes con el fin de sujetar la lámina superior y adquirir el espesor deseado entre láminas.



Figura 19-1. Disposición de poliuretano sobre lámina inferior

Fuente: (Bozano and Vera, 2014, p.47)

Luego se coloca la lámina superior y la prensa es ajustada (Figura 20-1). Finalmente la mezcla es inyectada en el panel mediante agujeros que se encuentran ubicados en la prensa (Figura 21-1). Mientras se inyecta la mezcla de poliuretano esta se expande, pero la prensa evita que el panel se expanda o se deforme, teniendo así un espesor uniforme en el producto terminado.



Figura 20-1. Prensa superior hermetizando ambas láminas

Fuente: (Bozano and Vera, 2014, p.47)



Figura 21-1. Proceso de inyección de la mezcla

Fuente: (Bozano and Vera, 2014, p.48)

El producto final, luego de desmontar el panel de la prensa se indica en la Figura 22-1.

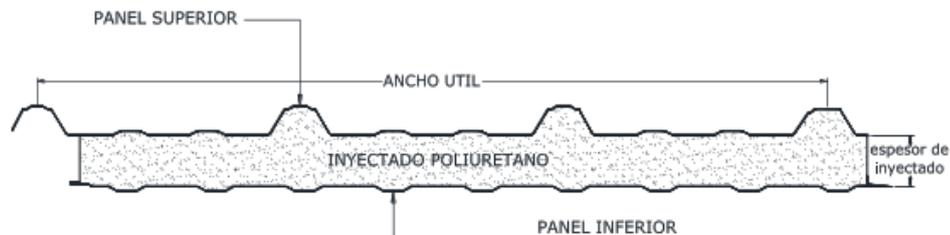


Figura 22-1. Sección transversal de un panel mixto con núcleo de poliuretano

Fuente: (Bozano and Vera, 2014, p.48)

1.6.16. Comportamiento mecánico

En las estructuras tipo sándwich es importante identificar las formas de trabajo tanto de las láminas (pieles) y el núcleo. Las láminas son las encargadas de soportar las cargas producidas por la flexión, esto gracias a que su módulo de elasticidad es más alto que del núcleo. Mientras que el núcleo se encarga de soportar el esfuerzo cortante que actúa sobre el panel, además de proporcionar una distancia entre las caras transmitiéndoles el esfuerzo cortante como una flexión alrededor del eje neutro del material. El espesor del núcleo suministra la rigidez a cortante y estabiliza las cargas en las caras permitiéndoles soportar cargas más altas en comparación a cualquier placa delgada sometida a pandeo.

Para comprender a profundidad el comportamiento de un panel sándwich se analiza una viga en voladizo sometida a una carga P perpendicular al plano del panel. En la figura 23-1 se observa el momento flector M y el esfuerzo cortante P .

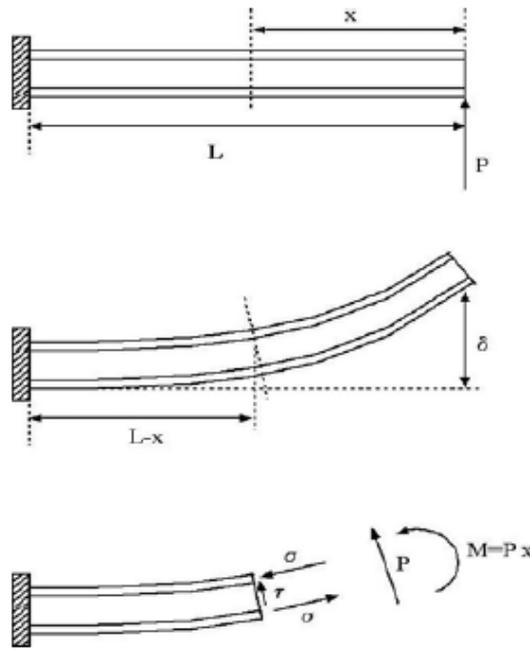


Figura 23-1. Viga con carga aplicada

Fuente: (Otero, 2012, p.55)

Las láminas actúan de forma similar a las alas de una viga en I, soportan cargas de flexión sometiendo a la lámina superior a compresión y a la inferior a tracción. El núcleo actúa de forma similar al alma de la viga, resistiendo cargas transversales de corte.

El esfuerzo normal σ permanece constante en toda la sección transversal de la lámina y no se produce cizalladura a lo largo de la misma. El núcleo soporta esfuerzos de corte sin sufrir deformación por flexión. Ya que la sección transversal del núcleo no varía conforme se aplica la fuerza, el esfuerzo cortante τ que atraviesa por el núcleo es constante. Los valores el esfuerzo normal σ y del esfuerzo cortante τ se pueden calcular en función de los esfuerzos actuantes.

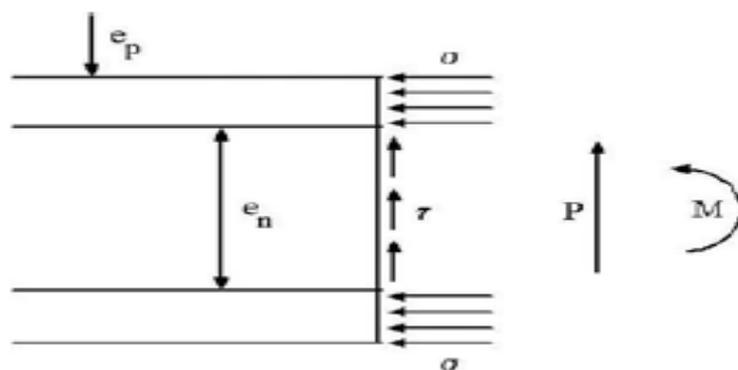


Figura 24-1. Esfuerzo normal, cortante y momento flector

Fuente: (Otero, 2012, p.56)

$$\sigma = M \div (e_p \times e_n) \tag{1}$$

$$\tau = \frac{P}{e_n} \quad (2)$$

El cálculo de la deformación de la viga δ se realiza haciendo equivalencias por medio de ecuaciones de Resistencia de Materiales teniendo:

$$E.I = E_p \cdot e_p \cdot \frac{(e_n + e_p)^2}{2} \quad (3)$$

$$G.Q = G_n \cdot (e_n + 2 \cdot e_p) \quad (4)$$

$$\delta = \frac{P.L^3}{3.E.I} + \frac{P.L}{G.Q} \quad (5)$$

Donde:

E_p = Módulo de elasticidad de las pieles

G_n = Módulo de elasticidad a cortadura del núcleo

σ = Esfuerzo normal en la piel

τ = Esfuerzo cortante en el núcleo

M = Momento flector

P = Carga aplicada

L = Longitud de la viga

$E.I$ = Rigidez a flexión equivalente de la viga

$G.Q$ = Rigidez a cortante equivalente de la viga

1.6.16.1. Materiales compuestos reforzados con partículas

Los materiales compuestos reforzados con partículas tienen una subdivisión en reforzados con partículas grandes y consolidadas por dispersión. Esta subdivisión se basa en el mecanismo de reforzamiento. En los materiales reforzados con partículas grandes las interacciones entre la matriz y la partícula no se pueden describir a nivel atómico, sino mediante la mecánica continua. En los materiales compuestos consolidados por dispersión, la fase dispersa tiende a ser más dura y resistente que la matriz, en estos materiales las partículas de refuerzo restringen el movimiento de la matriz en las proximidades de cada partícula. Parte del esfuerzo soportado por la matriz es transferido hacia las partículas, soportando así una parte de la carga aplicada. La capacidad de

mejora o de reforzamiento del comportamiento mecánico depende de la fuerza de cohesión entre la matriz y la partícula.

Un ejemplo de material compuesto reforzado con partículas grandes es el hormigón, está formado por cemento que se establece como la matriz y arena o grava que actúa como las partículas.

El reforzamiento de un material depende inversamente del tamaño de las partículas utilizadas, el comportamiento mecánico aumenta al usar partículas mucho más pequeñas y viceversa. Cuando mejor están distribuidas las partículas en la matriz más efectiva es el reforzamiento, además, el volumen de ambas fases influye directamente en el comportamiento, al incrementar el contenido de partículas las propiedades mecánicas aumentan.

Las partículas consolidadas por dispersión en materiales compuestos son mucho más pequeñas llegando a tener diámetros de 10 a 100 nm. Este tipo de consolidación entre matriz y partícula ocurre a nivel atómico o molecular. Este tipo de consolidación por dispersión permite que la matriz soporte la mayor parte de la carga, mientras que las partículas impiden o dificultan el movimiento de dislocaciones. Esto ocasiona una restricción en la deformación plástica permitiendo el aumento del límite elástico, la resistencia a la tracción y la dureza.

1.6.16.2. Materiales compuestos reforzados con fibras

Los materiales compuestos reforzados con fibras son diseñados con la finalidad de conseguir una alta resistencia y rigidez con una densidad baja. Estas características se las conocen como resistencia específica y módulo específico correspondiendo respectivamente, a la relación entre la resistencia a la tracción con el peso específico y el módulo de elasticidad con el peso específico.

A los materiales reforzados con fibras se los clasifican por:

- Porción de fibra
- Tamaño de fibra
- Forma de fibra
- Distribución de la fibra
- Orientación de la fibra

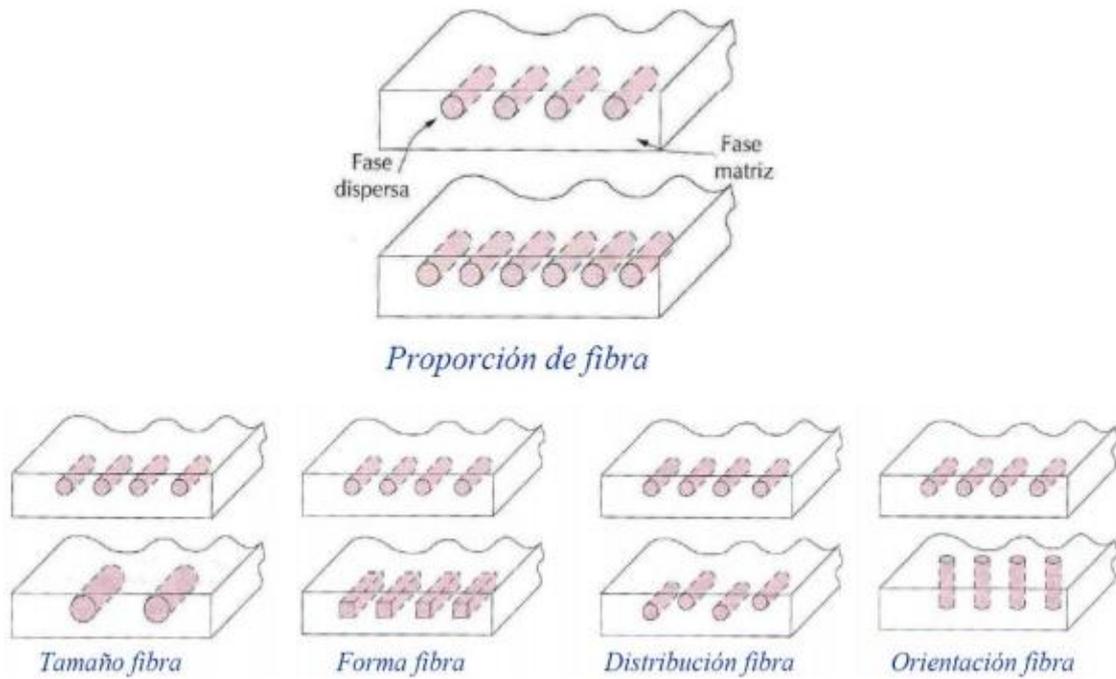


Figura 25-1. Clasificación de materiales compuestos reforzados con fibras.

Fuente: (Borque and López, 2007, p.8)

1.6.17. Materiales compuestos reforzados con fibras

1.6.17.1. Influencia de la longitud de fibra

Las características mecánicas de materiales reforzados no solo dependen de las propiedades de las fibras, sino de la capacidad de la matriz en transferir a la fibra la carga aplicada. La magnitud de unión entre las fibras y la matriz es importante en el instante de transmisión de la carga.

Al aplicar una fuerza de tracción en la unión fibra-matriz, los extremos de la fibra cesan produciendo un patrón de deformación en la matriz, es decir, no existe trasmisión de carga en los extremos de la fibra.

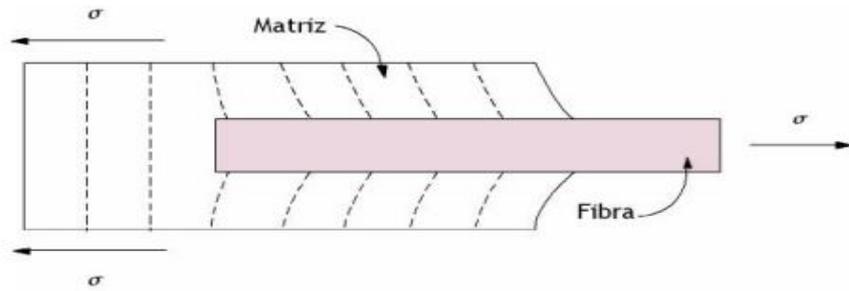


Figura 26-1. Patrón deformación de fibra-matriz sometida a tracción

Fuente: (Borque and López, 2007, p.9)

Para aumentar la resistencia y la rigidez del material compuesto se considera una longitud de fibra crítica. La longitud crítica l_c depende del diámetro de la fibra, resistencia a la tracción y resistencia al corte que está determinado por la fuerza de unión entre fibra-matriz.

La longitud crítica de fibra-matriz para algunas combinaciones como fibra de vidrio y de carbono es de 1 mm, equivalente a 20-150 veces el diámetro de la fibra. A las fibras con una longitud mayor a la crítica ($l > l_c$) se las conoce como continuas y las fibras con longitud menor se denominan fibras cortas o discontinuas. En las fibras de longitud menor a l_c , la matriz se deforma alrededor de la fibra existiendo poca transmisión de carga, siendo insignificante el efecto de refuerzo.

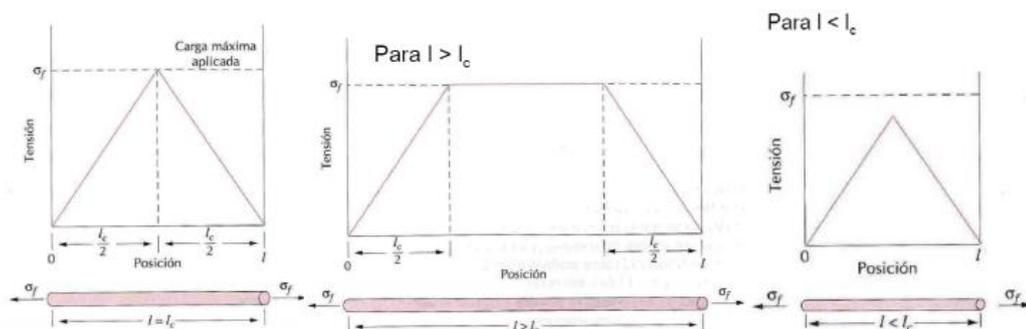


Figura 27-1. Longitud de fibra y sus esfuerzos

Fuente: (Borque and López, 2007, p.9)

1.6.17.2. Influencia de la orientación y de la concentración de la fibra

La orientación, concentración y distribución de las fibras influyen directamente en la resistencia y otras propiedades de un material compuesto reforzado con fibra. Existe dos formas de orientar las fibras en un material compuesto dependiendo de su longitud, al trabajar con fibras continuas, estas se alinean paralelamente al eje longitudinal de la fibra. Al trabajar con fibras discontinuas, estas pueden ser alineadas paralelamente al eje longitudinal o están orientadas al azar.

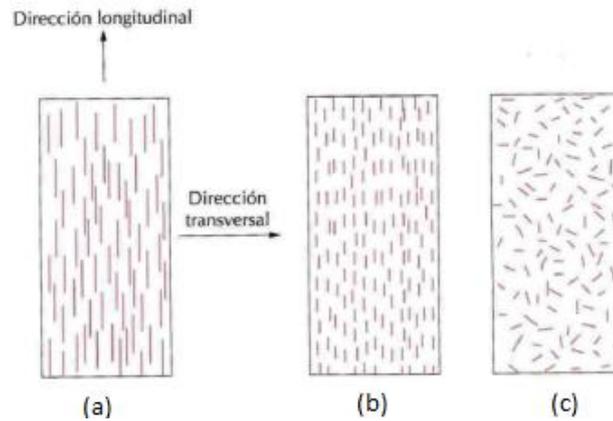


Figura 28-1. Compuestos reforzados con fibras

Fuente: (Borque and López, 2007, p.10)

En la figura 28-1 se puede observar que existen tres formas diferentes de reforzar una matriz, (a) mediante fibras continuas y alineadas, (b) por fibras discontinuas y alineadas y (c) con fibras discontinuas y orientadas al azar.

1.6.17.3. Evaluación de la resistencia de la lámina

El fallo de materiales laminados fibrosos es un problema complejo que sigue siendo fuente de interés y que promueve una intensa labor de investigación. Vista la preponderancia de una dirección de refuerzo, está claro que la resistencia de la lámina dependerá de una relación entre las cargas aplicadas y la dirección de las fibras. Por otro lado, dada la naturaleza heterogénea, este tipo de materiales exhiben una multiplicidad de modos de fallos locales antes de la rotura final, y es por ello por lo que la iniciación del daño no necesariamente coincide con la resistencia última (Pérez and Sánchez, 2014, p.34).

Un paso previo a analizar el fenómeno de fallo y resistencia de la lámina, es entender los mecanismos intrínsecos de fallo a nivel micromecánico y su efecto en el comportamiento macroscópico último. En la Figura 29-1 se han representado esquemáticamente varios de los mecanismos de fallo a nivel micromecánico en un polímero reforzado con fibra (FRP) (Orifici, Herszberg y Thomson 2008) unidireccional sometido a un estado de tensión plana. En éste, el fallo puede sobrevenir principalmente por (a) la rotura a tracción de las fibras, (b) el pandeo o el aplastamiento de las fibras a compresión, (c) el agrietamiento o (d) el aplastamiento de la matriz, el fallo en la interface fibra-matriz, o por una combinación de varios de ellos. Esta multiplicidad de modos de fallo confiere unas propiedades anisótropas a la resistencia de la lámina. De manera análoga al análisis realizado para la rigidez, la resistencia de la lámina se caracteriza en base a

unos parámetros de resistencia referenciados en los ejes principales del material, dando lugar a la definición de los denominados criterios de rotura (Pérez and Sánchez, 2014, p.35).

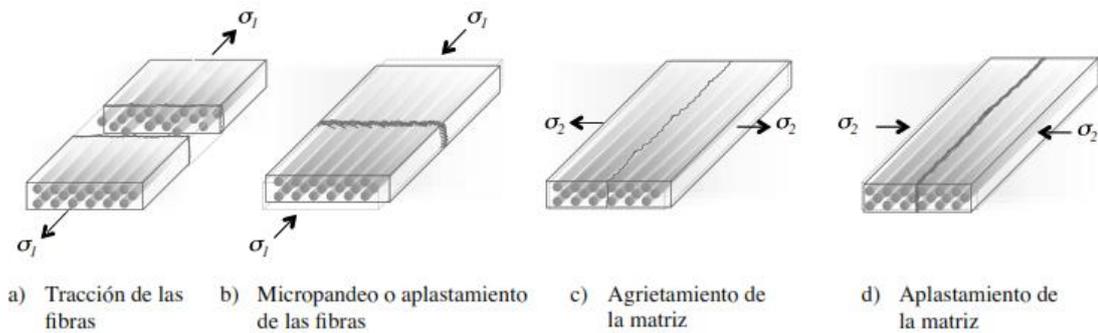


Figura 29-1. Fallos a nivel micro mecánico de un material compuesto reforzado

Fuente: (Pérez and Sánchez, 2014, p.35)

Las primeras propuestas de teorías y criterios de fallo aplicables a los materiales compuestos, se basaron en adaptaciones y generalizaciones de las teorías de fallo establecidas para los materiales homogéneos, atendiendo básicamente a la naturaleza anisótropa de las propiedades de rigidez y resistencia del compuesto (Pérez and Sánchez, 2014, p.35).

1.6.18. Modos de fallo

En este campo se analizará los modos de fallo en materiales tipo sándwich, los cuales, se producen cuando se supera el valor máximo de resistencia última del material.

Los tipos de fallo que se producen en las pieles pueden ser:

- Rotura tensión plana
- Cortadura interlaminar

Los tipos de fallo que se producen en el núcleo pueden ser:

- Fallo por cortadura transversal: cizallamiento del núcleo o despegue de la unión núcleo-piel.
- Aplastamiento del núcleo
- Tensión o compresión plana en zonas de rampa

1.6.18.1. Rotura por tensión plana

La rotura de las pieles se produce ya sea en la cara sometida a compresión o en la cara a tracción, que puede ser provocada por un espesor bajo del núcleo, espesor o resistencia última de las pieles insuficientes. La falla de las pieles ocurre cuando el esfuerzo actuante supera al esfuerzo admisible ya sea en tensiones de compresión o tracción.

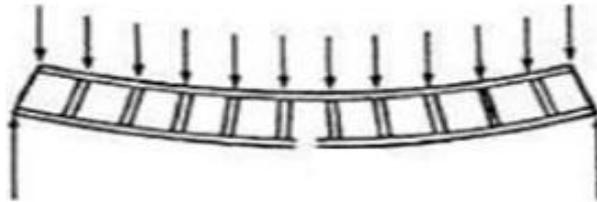


Figura 30-1. Fallo por rotura en tensión plana

Fuente: (Galera, 2010, p.24)

1.6.18.2. Rotura por cortadura interlaminar

La ruptura interlaminar de las fibras que conforman las pieles no suele ser crítica, por lo tanto, el fallo por cizallamiento en las caras que conforma el panel sándwich es bajo. Es en esta zona donde existe más probabilidad que se produzca cizallamiento del núcleo.

La lámina de adhesivo es la encargada de transferir las tensiones de corte que se producen en la piel hacia el núcleo.

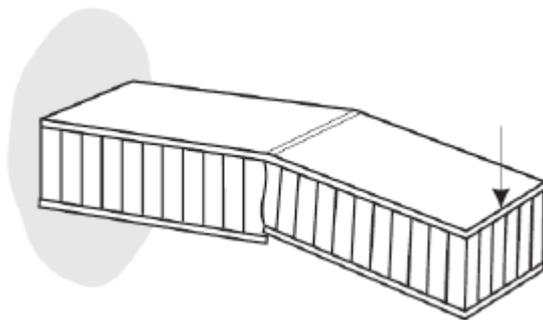


Figura 31-1. Fallo por cortadura interlaminar

Fuente: (Otero, 2012, p.61)

1.6.18.3. Cizallamiento del núcleo

Este fallo se produce por una baja resistencia a corte o por un espesor bajo del núcleo. El fallo por cizallamiento del núcleo se puede dar en la rampa o en zonas adyacentes a la misma, además, puede ser ocasionada por concentradores de esfuerzos provocados por herrajes, insertos, etc.

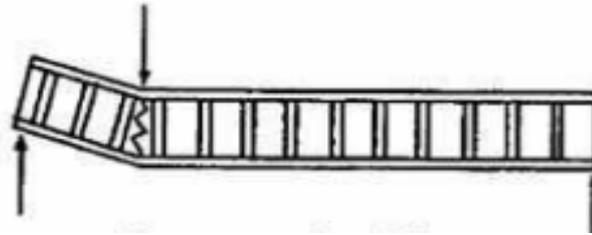


Figura 32-1. Fallo por cizallamiento del núcleo

Fuente: (Galera, 2010, p.27)

1.6.18.4. Despegue de la unión piel-núcleo

El fallo por despegue entre la piel y el núcleo se puede producir solo por la presencia de tensiones de corte. Debido a que la resistencia al despegue entre la piel y el núcleo es superior a la resistencia admisible por esfuerzo cortante del núcleo, este tipo de fallo no suele ser determinante en los paneles tipo sándwich.

1.6.18.5. Aplastamiento del núcleo

El aplastamiento del núcleo se produce por una baja resistencia del núcleo a la compresión transversal. El aplastamiento del núcleo puede ser un fallo localizado provocado por una carga puntual de compresión.

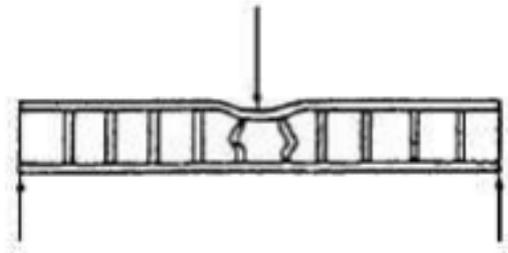


Figura 33-1. Aplastamiento del núcleo

Fuente: (Galera, 2010, p.29)

Al tener un panel sándwich sometido a flexión, el núcleo es el encargado de soportar la flexión de ambas caras, induciéndose en él cargas de compresión.

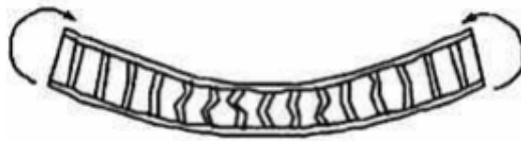


Figura 34-1. Fallo por flexión del núcleo

Fuente: (Galera, 2010, p.30)

1.6.18.6. Fallo del núcleo por tensión o compresión plana en zonas de rampa

Si las cargas son muy elevadas, el fallo por tracción y compresión se puede producir en cualquier punto del núcleo, los extremos del núcleo son los puntos más críticos a producirse este tipo de fallo. Esto se debe a que las fibras de los revestimientos cambian de dirección provocando una componente normal al núcleo.



Figura 35-1. Tensión en las zonas de cambio de dirección

Fuente: (Galera, 2010, p.32)

1.6.18.7. Fallo por pandeo

El fallo por pandeo se produce cuando las cargas de compresión aplicadas transversalmente en los extremos del núcleo son superiores a las admisibles por el mismo. Depende directamente del espesor del núcleo y del módulo de cizallamiento.



Figura 36-1. Fallo por pandeo

Fuente: (Otero, 2012, p.62)

Si las celdas del núcleo no son lo suficientemente pequeñas o reforzadas con partículas, el panel sándwich falla por pandeo interior de la piel.

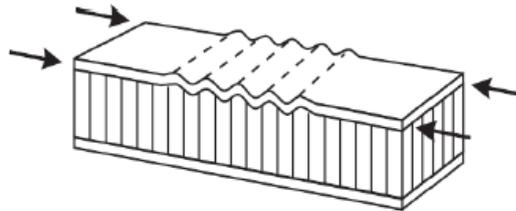


Figura 37-1. Fallo por pandeo interior

Fuente: (Otero, 2012, p.64)

CAPÍTULO II

2. MARCO METODOLÓGICO

2.1. Elaboración del panel tipo sándwich

2.1.1. *Introducción*

La recolección de información para determinar experimentalmente las propiedades mecánicas del panel sándwich, dimensiones de las probetas según las normas correspondientes, características semejantes al utilizar porciones diferentes de caucho tamizado ya definido, tiempos de curado tanto para la fibra de vidrio como para la espuma de poliuretano y costos de fabricación, son la base para el desarrollo del presente trabajo de investigación.

Los resultados a ser analizados en este trabajo serán adquiridos de forma experimental en el laboratorio del Centro de Fomento Productivo Metalmecánico Carrocero, ubicado en la ciudad de Ambato, en lo referente a las propiedades mecánicas; para la adquisición de las propiedades físicas como densidad y inflamabilidad, se lo realizará en el laboratorio de fundición de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH).

El análisis cuantitativo se realizará de los resultados obtenidos en cada ensayo, los mismos que son primordiales para la generación de la curva característica tanto para el ensayo de compresión como para el de flexión, permitiendo de esta manera realizar un análisis y comparación con curvas de estudios previos de diferentes materiales.

2.1.2. *Descripción del proceso para la elaboración del panel tipo sándwich*

El proceso para la elaboración de los paneles tipo sándwich con fibra de vidrio y espuma de poliuretano es similar al proceso industrial, donde se usa prensas para fijar las planchas de acero y obtener el espesor deseado al inyectar la espuma de poliuretano, la espuma de poliuretano se la obtiene con la mezcla de polioliol e isocianato en una relación de 1:1, a la misma que se incorpora caucho tamizado en distintos porcentajes de peso.

En la tabla 1-2 se muestra detallado la composición y porcentajes de caucho.

Tabla 1-2: Porcentajes de caucho utilizados en las probetas

| Fibra vidrio (%) | Tipo | Contenido de resina (g) | Contenido de catalizador (gotas) | Relación Polioli/Isocianato | Contenido de caucho (% w) (g) | Temperatura de Curado (°C) |
|------------------|---------|-------------------------|----------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|----------------------------|
| 100 | Serie 1 | 200 | 15-20 | 1:1 | 0 | Temperatura ambiente |
| | Serie 2 | 200 | 15-20 | 1:1 | 20 | Temperatura ambiente |
| | Serie 3 | 200 | 15-20 | 1:1 | 30 | Temperatura ambiente |

Realizado por: Freire W. 2019

Para cada serie se realiza el mismo procedimiento de fabricación detallado a continuación.

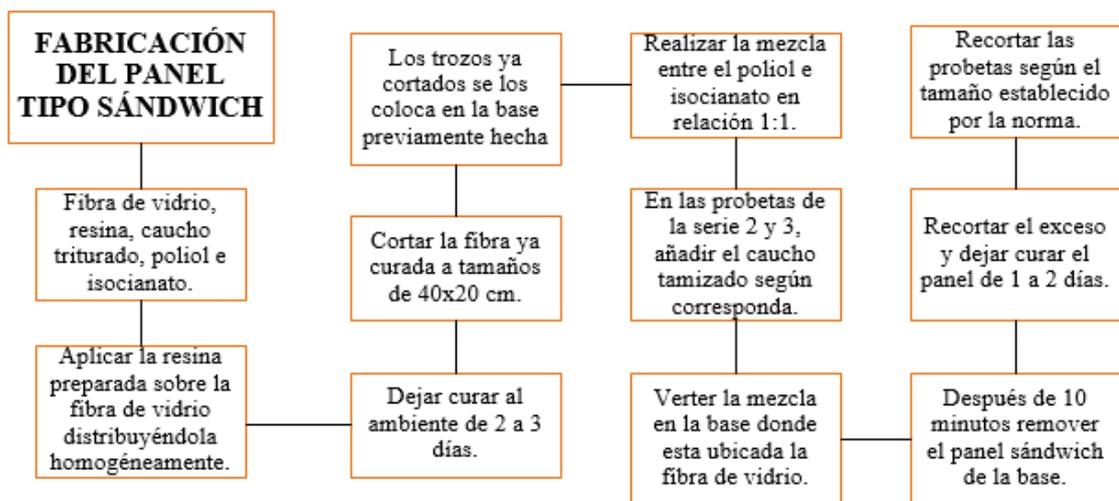


Figura 1-2. Esquema de fabricación del panel tipo sándwich

Realizado por: Freire W. 2019

Se logró identificar que el costo de producción de un panel sándwich compuesto por fibra de vidrio y espuma de poliuretano de un metro cuadrado se encuentra evaluado pro alrededor de \$15, mientras que un metro cuadrado de concreto reforzado con acero esta evaluado por \$190 a \$210, un metro de divisores de aluminio alrededor de \$32 y el metro cuadrado de Gypsum a \$10. En conclusión se observa que el panel sándwich es fiable económicamente para su producción y distribución, además brindado mejores propiedades mecánicas, acústicas y térmicas a las construcciones.



Figura 2-2. Proceso gráfico de la fabricación del panel tipo sándwich

Realizado por: Freire W. 2019

2.2. Normas y metodología para los ensayos

2.2.1. Normas

Para la elaboración de ensayos en el presente proyecto se tomara en cuenta las siguientes normas:

- **American Society for Testing and Materials (ASTM C365); Standard Test Method for Flatwise Compressive Properties of Sandwich Cores:** Trata sobre los métodos para determinar propiedades a compresión en dirección normal al plano de núcleos tipo sándwich.
- **American Society for Testing and Materials (ASTM C364); Standard Test Method for Edgewise Compressive Strength of Sandwich Constructions:** Hace referencia al método para determinar propiedades a compresión en dirección paralela al plano de las láminas del panel sándwich de una construcción.

- **American Society for Testing and Materials (ASTM C393); Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Constructions by Beam Flexure:** Establece los métodos para determinar propiedades de materiales compuestos tipo sándwich sometidos a flexión en dirección perpendicular al plano. Además, en función a las deflexiones obtenidas es posible determinar el módulo de corte del núcleo.
- **American Society for Testing and Materials (ASTM C271); Standard Test Method for Density of Sandwich Core Materials:** Esta normativa establece los métodos para determinar la densidad de materiales para construcción tipo sándwich.
- **International Standard (ISO 3795); Road vehicles, and tractors and machinery for agriculture and forestry – Determination of burning behavior of interior materials:** Trata sobre el cálculo de la velocidad de combustión horizontal de materiales utilizados en interiores de vehículos, tractores y maquinaria para la agricultura.

2.2.2. *Materiales a ensayar*

Las propiedades de los materiales compuestos tipo sándwich dependen principalmente de su geometría y de los materiales que los constituyen. En este trabajo de investigación se pretende analizar tres variaciones diferentes de paneles tipo sándwich como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 2-2: Distribución de probetas para ensayos

| Serie | Caucho (% w) | Norma | | | | |
|----------|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|
| | | ASTM C635 | ASTM C364 | ASTM C393 | ASTM C271 | ISO 3795 |
| 1 | 0 | 3 | 3 | 3 | 9 | 5 |
| 2 | 20 | 3 | 3 | 3 | 9 | 5 |
| 3 | 30 | 3 | 3 | 3 | 9 | - |
| e = 13mm | | - | - | - | 1 | - |

Realizado por: Freire W. 2019

Cabe recalcar que cada norma recomienda utilizar datos estadísticos de los ensayos, por lo tanto se realiza 3 ensayos para cada probeta. Debido a la necesidad de utilizar tres normas para identificar las propiedades mecánicas de los paneles sándwich, en total se realizaran 27 ensayos de todas las probetas identificadas. Para los ensayos de densidad y flameabilidad se realizaran 28 y 10 ensayos respectivamente.

2.2.3. Metodología para los ensayos mecánicos

2.2.3.1. Ensayo de compresión plana – ASTM C365

Consiste en aplicar la carga, de tal manera que el cabezal móvil de la máquina universal distribuya la carga lo más uniforme posible sobre toda la superficie de la probeta registrando la carga de rotura y el área de contacto para determinar el esfuerzo de compresión máximo.

Condiciones de ensayos establecidos por la norma:

Este ensayo se realizará con probetas de poco tamaño, cuya sección transversal es cuadrada y se encuentra en el rango de $625 - 10000 \text{ mm}^2$. Las dimensiones de las probetas a ensayar tanto de aristas como espesor son de 50 mm. La probeta debe ser ubicada de manera que las láminas de fibra de vidrio estén perpendicularmente a la dirección en que la carga va a ser aplicada (ASTM C365, 2003, p.1).

Debido a que la norma no establece un número fijo de probetas porque no existe una regla general para cubrir todos los casos, con el fin de obtener una muestra estadística, se realizará 3 ensayos de este tipo.

La norma proporciona un método estándar para obtener la resistencia a la compresión plana y el módulo de elasticidad a compresión.

La falla de la probeta se debe producir entre los 3 y 6 minutos de aplicar la carga. Esto se lo controla con la velocidad de aplicación de la carga, la misma que recomienda la norma de $0,50 \text{ mm}/\text{min}$. Se realizó dos ensayos pilotos para establecer la velocidad según el tiempo de falla de la probeta, la velocidad aplicada fue de $10 \text{ mm}/\text{min}$.

El esquema del ensayo (Figura 3-2) se muestra la ubicación de la probeta y como la carga es aplicada uniformemente por toda su superficie.

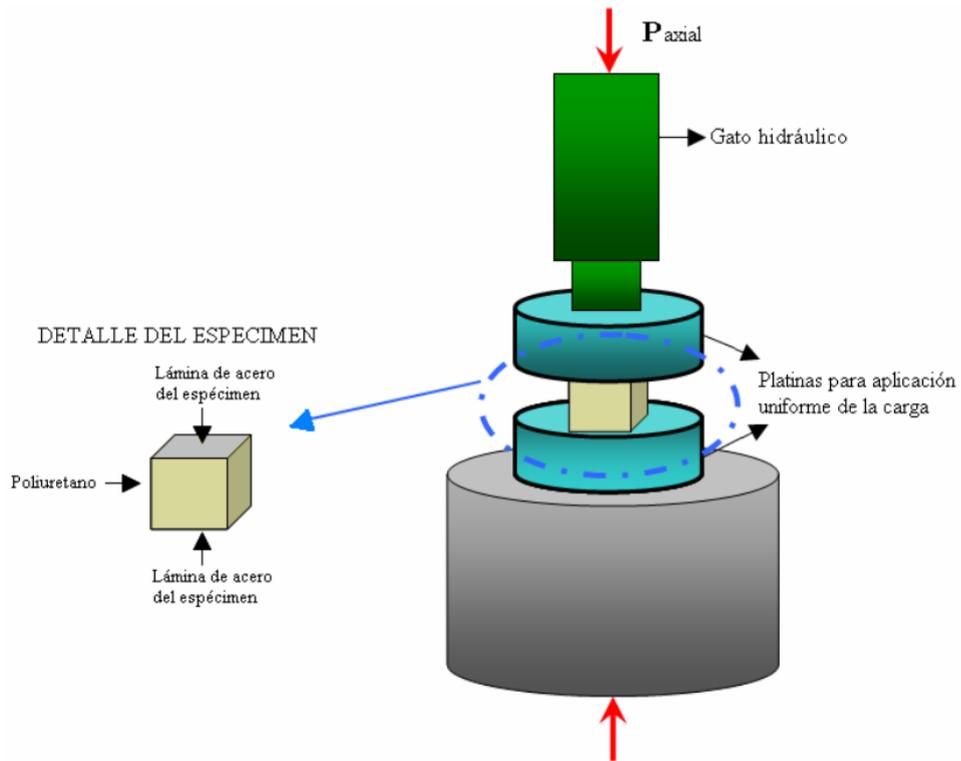


Figura 3-2. Ensayo de compresión plana

Fuente: (Robles and Castillo, 2005, p.66)

El procedimiento para desarrollar este ensayo es:

Se selecciona las probetas con las dimensiones correspondientes según la norma.



Figura 4-2. Probetas cúbicas

Realizado por: Freire W. 2019

Asegurar que las caras de las probetas sean paralelas y planas.



Figura 5-2. Superficie de la probeta

Realizado por: Freire W. 2019

Al momento de ensayar se determina el peso y las dimensiones de las muestras.

La probeta es ubicada en el centro de la máquina universal con una precarga de 0,01N, el cabezal móvil superior desciende hasta entrar en contacto con la superficie de la probeta.

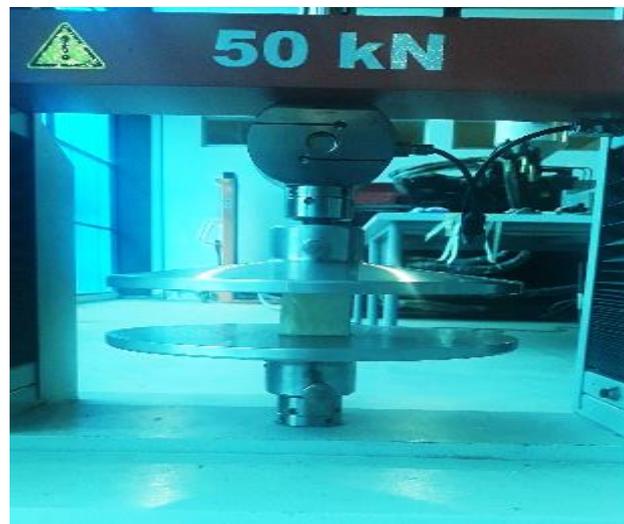


Figura 6-2. Probeta ubicada en la máquina universal

Realizado por: Freire W. 2019

2.2.3.2. *Ensayo de compresión de borde – ASTM C364*

Este método de prueba consiste en someter un panel sándwich a una fuerza de compresión paralela al plano de sus caras. La fuerza se transmite al panel a través de soportes finales fijos (utillajes). Los extremos de la probeta deben estar rectificadas y paralelos. La norma ASTM C634 exige una medición continua de la carga de compresión aplicada y la deformación de la probeta, de igual manera la distancia en al cual se mide la deformación de la probeta (ASTM C364, 2012, p.2).

Condiciones de ensayos establecidos por la norma:

Los utillajes se realizan en madera cumpliendo con las dimensiones especificadas en la norma (Figura 7-2).



Figura 7-2. Soportes laterales (utillajes)

Realizado por: Wilvender Freire. 2019

La geometría correspondiente a este ensayo viene a ser rectangular cuyas dimensiones se las da en función de las siguientes relaciones matemáticas:

$$L \leq 8t$$

$$50 \leq W \leq L$$

$$W \geq 2t$$

Donde:

L: altura (cm)

W: ancho (cm)

t: espesor del panel (cm)

Este ensayo se realizará con probetas de dimensiones: 50 mm de espesor, 400 mm de altura y 200 mm de ancho. La probeta será ubicada de tal forma que las láminas estén paralelas a la dirección en la que la carga es aplicada.

La norma establece el uso de al menos cinco probetas a menos que se obtenga resultados validos mediante el uso de menos probetas, en este trabajo se realizó 3 ensayos de este tipo.

Esta norma proporciona un método estándar para obtener resistencias a la compresión de borde sándwich para propiedades de diseño de paneles.

La falla de la probeta se debe producir entre los 3 y 6 minutos de aplicar la carga. Esto se lo controla con la velocidad de aplicación de la carga, la misma que recomienda la norma de

0,50 *mm/min*. Se realizó dos ensayos pilotos para establecer la velocidad según el tiempo de falla de la probeta, la velocidad aplicada fue de 5 *mm/min*.

En la figura 8-2 se aprecia la ubicación y montaje de la probeta a ser ensayada.

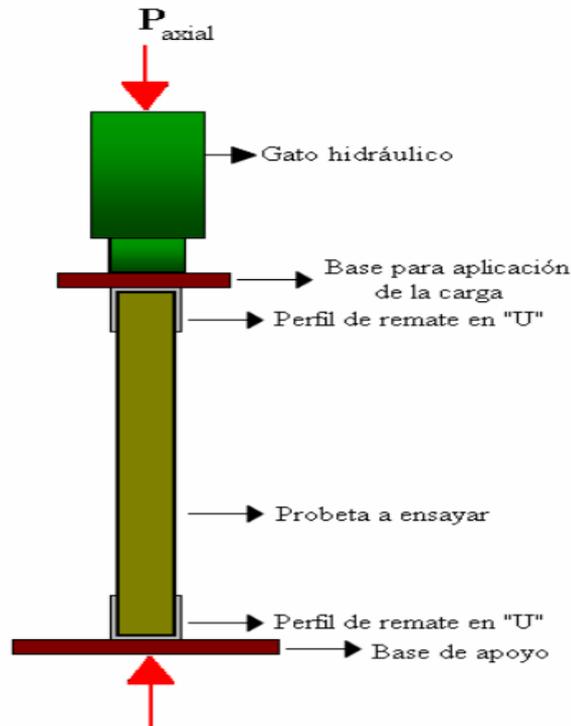


Figura 8-2. Ensayo de compresión de borde

Fuente: (Robles and Castillo, 2005, p.68)

Los únicos modos de falla aceptables para la resistencia a la compresión en el borde de las construcciones en sándwich son aquellos que ocurren lejos de los extremos soportados. La falla de los revestimientos se manifiesta al arrugarse el revestimiento, en el cual el núcleo se deforma a la forma ondulada de los revestimientos.

El procedimiento para desarrollar este ensayo es:

Se selecciona las probetas con las dimensiones correspondientes según la norma.

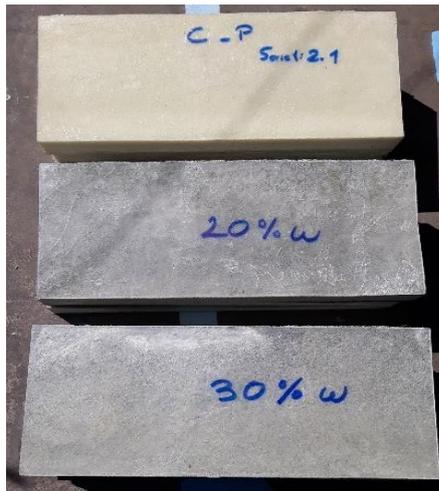


Figura 9-2. Probetas rectangulares

Realizado por: Freire W. 2019

Asegurar que las caras de las probetas sean paralelas y planas.



Figura 10-2. Superficie de la probeta

Realizado por: Freire W. 2019

Al momento de ensayar se determina el peso y las dimensiones de las probetas.

La probeta es ubicada perpendicularmente sobre los utillajes de madera.



Figura 11-2. Probeta ubicada en los utillajes

Realizado por: Freire W. 2019

Los utillajes y la probeta son ubicados en el centro de la máquina universal con una precarga de 0,01N, el cabezal móvil superior desciende hasta entrar en contacto con el utillaje superior.

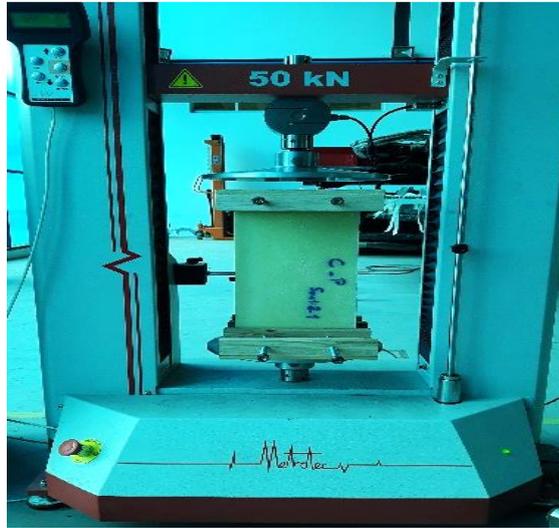


Figura 12-2. Probeta ubicada en la máquina universal

Realizado por: Freire W. 2019

Con el uso de un soporte magnético se coloca un reloj comparador en el centro de la probeta para medir el desplazamiento radial al momento de producirse el pandeo.

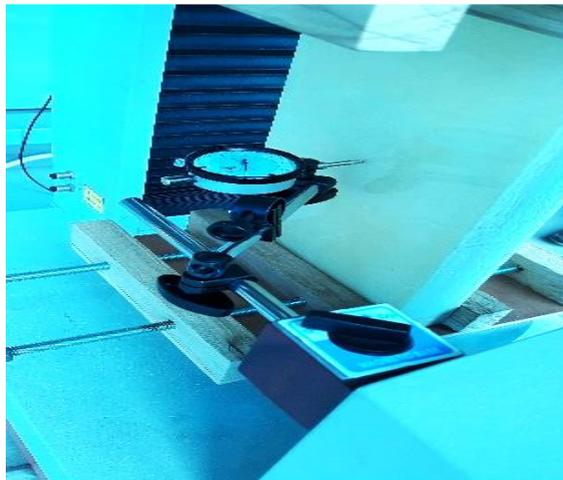


Figura 13-2. Ubicación del reloj comparador

Realizado por: Freire W. 2019

2.2.3.3. Ensayo de cortante del poliuretano – ASTM C393

Este ensayo consiste en someter una viga de construcción sándwich a un momento de flexión normal al plano del mismo. Se registran las medidas de fuerza versus desviación.

Condiciones de ensayos establecidos por la norma:

Este ensayo se realizará con probetas de configuración estándar, cuyas dimensiones son dadas directamente por la norma a utilizar. Las dimensiones de las probetas son: 50 mm de espesor, 75 mm de ancho y 200 mm de longitud (ASTM C393, 2015, p.3).

La norma establece el uso de al menos cinco probetas a menos que se obtenga resultados válidos mediante el uso de menos muestras, en este trabajo se realizará 3 ensayos de este tipo.

Este método de prueba se limita a para determinar la rigidez de flexión del emparedado, la resistencia al corte del núcleo y el módulo de corte, o las resistencias a la compresión y a la tracción. Las pruebas para evaluar la resistencia al corte del núcleo también se pueden utilizar para evaluar las uniones de núcleo a revestimiento. El esfuerzo cortante máximo se lo obtiene dividiendo la carga máxima aplicada entre el área de corte, el área de corte resulta de multiplicar el espesor por el ancho de la probeta. Si se tiene dos puntos de aplicación de carga al esfuerzo cortante máximo se lo divide para dos.

La falla de la probeta se debe producir entre los 3 y 6 minutos de aplicar la carga. Esto se lo controla con la velocidad de aplicación de la carga, la misma que recomienda la norma de $0,50 \text{ mm/min}$. Se realizó dos ensayos pilotos para establecer la velocidad según el tiempo de falla de la probeta, la velocidad aplicada fue de 10 mm/min .

En la figura 14-2 se aprecia la ubicación y montaje de la probeta a ser ensayada utilizando el método de los 3 puntos.

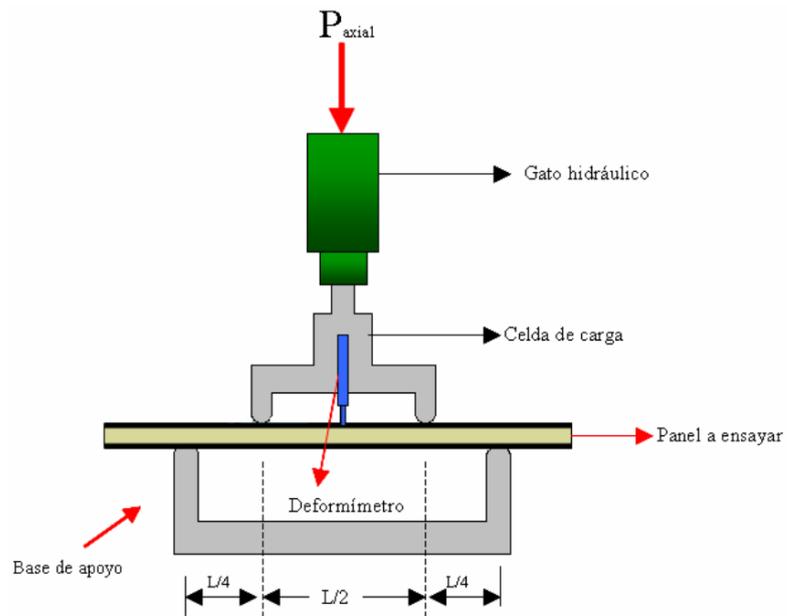


Figura 14-2. Ensayo de flexión

Fuente: (Robles and Castillo, 2005, p.64)

El procedimiento para desarrollar este ensayo es:

Se selecciona las probetas con las dimensiones correspondientes según la norma.



Figura 15-2. Probetas de fibra de vidrio, poliuretano y caucho

Realizado por: Wilvender Freire. 2019

Asegurar que las caras de las muestras sean paralelas y planas.



Figura 16-2. Superficie de la probeta

Realizado por: Freire W. 2019

Al momento de ensayar se determina el peso y las dimensiones de las muestras.

Se define la separación entre apoyos teniendo como referencia el instrumento disponible en el laboratorio. Se realizará el ensayo de flexión en 3 puntos, donde la separación entre apoyos máxima disponible es de 140 mm.

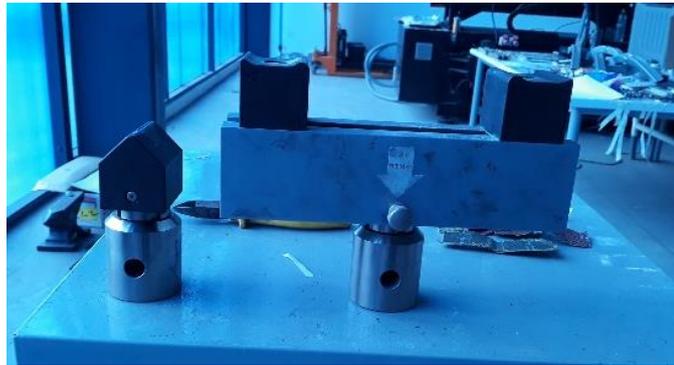


Figura 17-2. Puntos de apoyos y de aplicación de carga

Realizado por: Freire W. 2019

Una vez ubicado los puntos de apoyo y el punto de aplicación de carga en la máquina universal, se coloca la probeta considerando que debe estar centrada sobre los puntos de apoyo, el cabezal móvil superior desciende hasta que la punta de aplicación de carga entre en contacto con la probeta con una precarga de 0,01N.

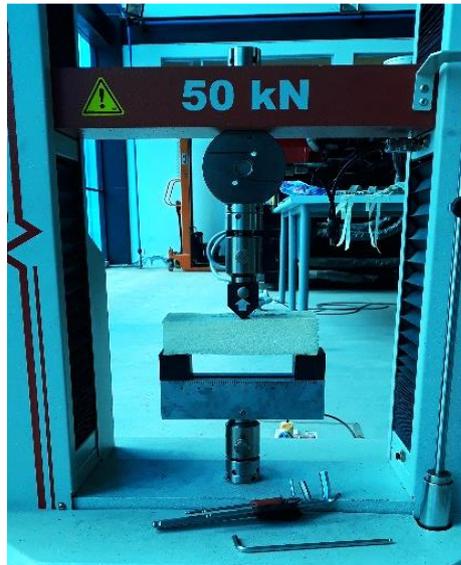


Figura 18-2. Probeta ubicada en la máquina universal

Realizado por: Freire W. 2019

2.2.4. Metodología para los ensayos físicos

2.2.4.1. Ensayo de densidad – ASTM C271

Este ensayo consiste en determinar el peso y volumen de una probeta con el fin de obtener el valor de densidad para control de calidad, pruebas de aceptación de especificación e investigación y desarrollo.

Condiciones de ensayos establecidos por la norma:

Las probetas pueden tener cualquier tamaño de espesor que pueda medirse con precisión y según lo acordado con el comprador o vendedor. Las dimensiones recomendadas para cada probeta son de 300 mm de largo y 300 mm de ancho (ASTM C271, 1916, p.1).

La norma recomienda analizar al menos tres probetas con el fin de obtener datos estadísticos.

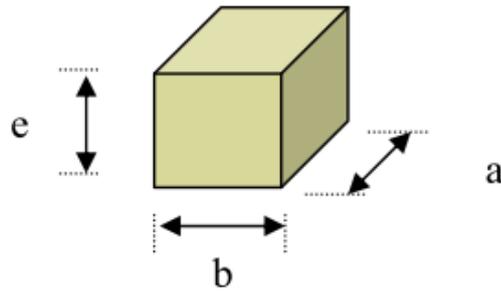


Figura 19-2. Esquema de las probetas

Fuente: (Robles and Castillo, 2005, p.48)

Fueron ensayadas tres probetas para cada serie con el fin de verificar la variación de densidad con la adición de bajos contenido de caucho tamizado. Las probetas ensayadas fueron pesadas en una balanza electrónica y medidas con un calibrador de tolerancia 0,05 mm.



Figura 20-2. Ensayo de densidad

Realizado por: Freire W. 2019

2.2.4.2. Ensayo de inflamabilidad – ISO 3795

Este ensayo consiste en determinar la velocidad de combustión o el índice de inflamabilidad de materiales utilizados para el diseño de interiores de vehículos de carretera, tractores y maquinaria agrícola mediante la exposición a una llama pequeña.

La norma específica que si se tiene un material compuesto, es decir, el material está compuesto por varias capas de materiales similares o diferentes unidos por sus superficies, en la preparación de las probetas no se les considerará como materiales compuestos.

A la probeta se la sujeta horizontalmente en un soporte y se la expone a una llama de baja energía durante 15 segundos en su extremo libre dentro de una cámara de combustión.

El espesor de la probeta está en función del producto a analizar, siendo este no mayor a 13 mm, además, la probeta debe tener una sección constante en toda su longitud. Las dimensiones estándar dadas por la norma son 100 mm de ancho, 356 mm de largo y 13mm de espesor (ISO 3795, 1989, p.9).



Figura 21-2. Probetas para el ensayo de inflamabilidad

Realizado por: Freire W. 2019

Se ensayaran 5 probetas como mínimo con el fin de obtener una muestra estadística, para materiales cuya tasa de combustión sea variable en diferentes direcciones, la probeta se colocará en la dirección donde se produzca la mayor tasa de combustión.

El acondicionamiento de las probetas se las realizó durante 24 horas a una temperatura de $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ y con una humedad relativa del $50\% \pm 5\%$, las probetas se les mantiene en estas condiciones justo antes de realizar el ensayo.



Figura 22-2. Acondicionamiento de probetas

Realizado por: Freire W. 2019

El procedimiento para desarrollar este ensayo es:

Se coloca la probeta en el porta muestras teniendo en consideración que el lado expuesto debe estar debajo de la llama.



Figura 23-2. Probeta ubicada en el porta muestras

Realizado por: Freire W. 2019

Se ajusta la llama del gas a una altura aproximada de 38 mm y se la deja arder durante 1 minuto para lograr una estabilización.



Figura 24-2. Llama estabilizada

Realizado por: Freire W. 2019

Se coloca el porta muestras dentro de la cámara de combustión dejando un extremo de la probeta expuesto a la llama, se le da un tiempo de permanecía de 15 segundos y se corta el flujo de gas.



Figura 25-2. Combustión de la probeta

Realizado por: Freire W. 2019

El tiempo de combustión se comienza a tomar cuando la llama pasa por el primer punto de medición. Se debe observar la propagación de la llama e identificar en qué lado es mayor, ya sea en el superior o inferior.



Figura 26-2. Propagación de la llama

Realizado por: Freire W. 2019

El tiempo de combustión termina cuando la llama se extingue o cuando llega al último punto de medición. Si la llama no llega al punto final de medición, se tomará una medida de la distancia quemada hasta el punto donde la llama se extinguió. La distancia quemada se refiere a la zona donde la probeta se descompone, es decir, se destruye tanto la superficie superior como el interior por efecto de la combustión.



Figura 27-2. Zona quemada de la probeta

Realizado por: Freire W. 2019

A media que se realiza una determinada cantidad de ensayos, se debe controlar que la temperatura de la cámara de combustión y del porta muestras tenga 30 °C como máximo.

Si la probeta no llega a encenderse, o no continúa ardiendo luego de cortar el flujo de gas o se extingue antes de llegar al primer punto de medición, en el informe se toma en cuenta una velocidad de combustión de 0 *mm/min*.

CAPÍTULO III

3. MARCO DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

En el presente trabajo experimental se realiza un proceso de selección y eliminación de probetas, enfocado en la síntesis de paneles tipo sándwich compuestos por fibra de vidrio y poliuretano reforzado con micropartículas de caucho, se han cuantificado la resistencia a la compresión plana, el módulo de elasticidad a compresión, resistencia a la compresión de borde, la rigidez de flexión del emparedado, la resistencia al corte del núcleo y el módulo de corte en paneles sándwich cuya relación entre polioliol e isocianato corresponde a 1:1.

El tipo de dosificación utilizada fue por el método de densidades, una vez determinado e identificado el porcentaje de caucho que será utilizado para reemplazar una porción del poliuretano, se añade el 0, 20 y 30 % del peso total de polioliol más isocianato en cada probeta.

3.1. Ensayos mecánicos

Las probetas fueron sometidas a compresión plana, compresión de borde y flexión en tres puntos según las normas detalladas con anterioridad.

3.1.1. *Compresión plana*

El ensayo de compresión plana en el compuesto sándwich se realizó con la finalidad de obtener la resistencia a la compresión plana y el módulo de elasticidad a compresión, aplicando una carga sobre toda la superficie de la probeta registrando la carga de rotura y el área de contacto.

Para el ensayo de compresión plana se utilizaron 3 probetas, donde la gráfica representa la variación del Esfuerzo vs Deformación.

De acuerdo con ASTM C365, el diagrama de Esfuerzo vs Deformación se la calcula mediante el Esfuerzo de compresión plana con la ecuación (6) y la Deformación Unitaria con la ecuación (7). En el caso de los núcleos que no alcanzan la fuerza máxima, es decir, cuando el núcleo continúa

a compresión y la carga tiende a aumentar, esto debe considerarse al 2% de la deformación. El Módulo de Elasticidad a la compresión se calcula con la ecuación (8), o alternativamente por la pendiente de la porción inicial de la curva de Esfuerzo vs Deformación.

$$\sigma_c = \frac{P}{A} \quad (6)$$

Donde:

σ_c = Esfuerzo de Compresión Plana, MPa;

P = Carga aplicada, N, y

A = Área de la sección transversal de la probeta, mm^2

$$\varepsilon = \frac{l}{l_o} \quad (7)$$

Donde:

ε = Deformación Unitaria;

l = Espesor de deformación, mm , y

l_o = Espesor inicial de la probeta, mm

$$E = \frac{S.t}{A} \quad (8)$$

Donde:

E = Módulo de elasticidad a compresión del núcleo, MPa;

S = $(\Delta P/\Delta U)$ pendiente de la parte lineal de la curva Carga vs Deformación, N/mm , y

t = Espesor del panel, mm .

- Serie 1

A continuación se detalla los resultados de los ensayos realizados para probetas con un contenido de caucho del 0%.

Tabla 1-3: Probetas ensayadas a CP, serie 1

| Datos de las probetas | |
|----------------------------------|-----------|
| Dimensiones [mm] | 50*50*50 |
| Peso promedio [kg] | 0,011 |
| Área promedio [mm ²] | 2482,6421 |
| Caucho [%] | 0 |

Realizado por: Freire W. 2019

Los datos arrojados por la máquina universal de Polímeros Metrotest del Centro de Fomento Productivo Metalmecánico Carrocero son los siguientes:

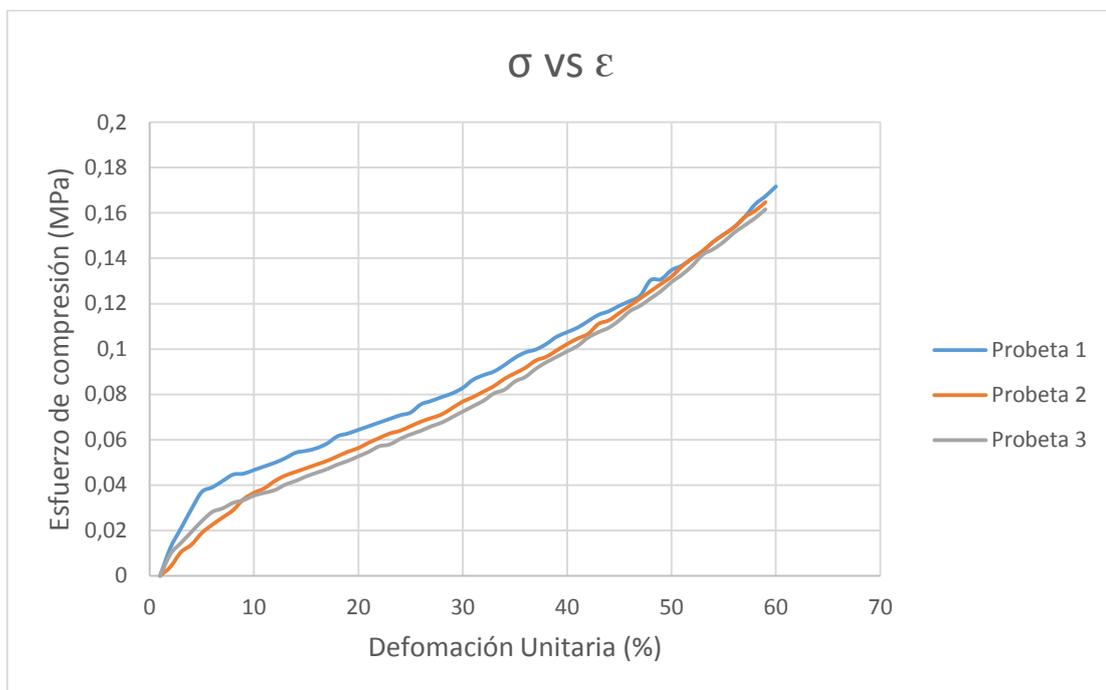


Gráfico 1-3. Diagrama Esfuerzo vs Deformación a compresión plana, serie 1

Realizado por: Freire W. 2019

- Serie 2

Para probetas con un contenido de caucho del 20%, los resultados obtenidos a partir de los ensayos son los siguientes.

Tabla 2-3: Probetas ensayadas a CP, serie 2

| Datos de las probetas | |
|----------------------------------|-----------|
| Dimensiones [mm] | 50*50*50 |
| Peso promedio [kg] | 0,01033 |
| Área promedio [mm ²] | 2470,7621 |
| Caucho [%] | 20 |

Realizado por: Freire W. 2019

Los datos arrojados por la máquina universal de Polímeros Metrotest del Centro de Fomento Productivo Metalmeccánico Carrocero son los siguientes:



Gráfico 2-3. Diagrama Esfuerzo vs Deformación a compresión plana, serie 2

Realizado por: Freire W. 2019

- Serie 3

Para probetas con un contenido de caucho del 30%, los resultados obtenidos a partir de los ensayos son los siguientes.

Tabla 3-3: Probetas ensayadas a CP, serie 3

| Datos de las probetas | |
|----------------------------------|-----------|
| Dimensiones [mm] | 50*50*50 |
| Peso promedio [kg] | 0,012 |
| Área promedio [mm ²] | 2452,7321 |
| Caucho [%] | 30 |

Realizado por: Freire W. 2019

Los datos arrojados por la máquina universal de Polímeros Metrotest del Centro de Fomento Productivo Metalmeccánico Carrocero son los siguientes:

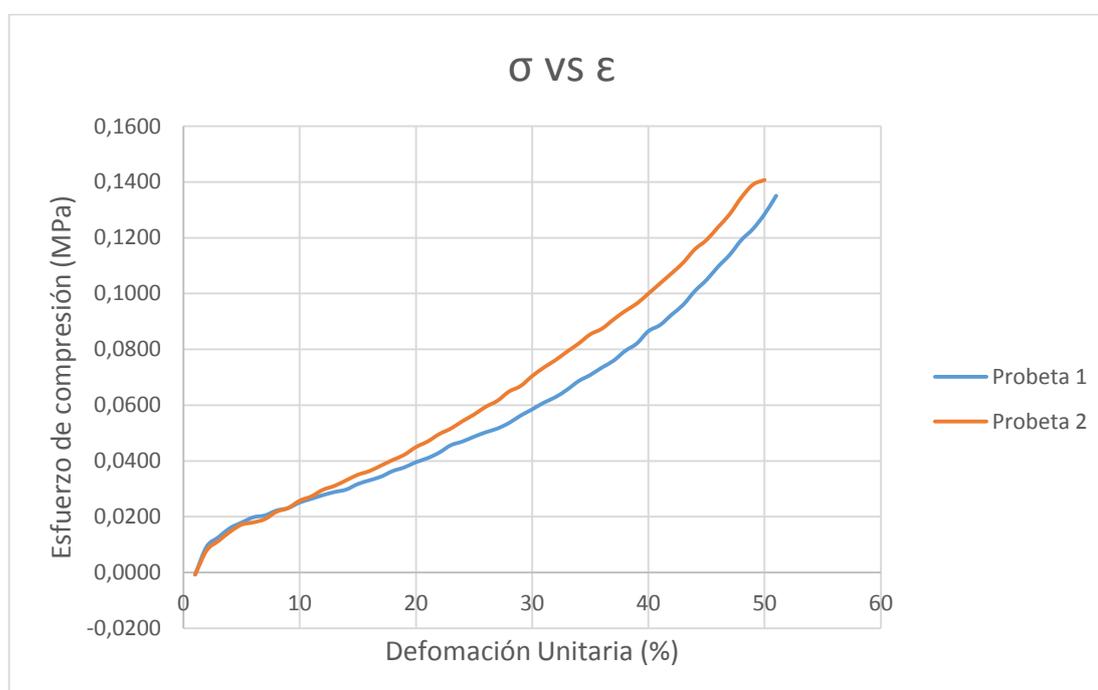


Gráfico 3-3. Diagrama Esfuerzo vs Deformación a compresión plana, serie 3

Realizado por: Freire W. 2019

Los diagramas obtenidos a partir del ensayo de compresión plana indican el incremento del esfuerzo de compresión según se aplica un valor de carga creciente, la carga llega a un punto donde es máxima y la curva tiende a decrecer instantáneamente, esto se debe a que la probeta ensayada ya no ofrece resistencia alguna a la carga aplicada.

El comportamiento de los diagramas Esfuerzo vs Deformación muestran una semejanza notoria en cada una de las series ensayadas, indicando la ausencia de datos atípicos y sin verse en la necesidad de discriminar los mismos.

3.1.1.1. Resistencia a la compresión plana

El cálculo de la resistencia a la compresión plana se lo realizó mediante la ecuación (6):

Tabla 4-3: Datos para el cálculo de Resistencia a la CP, serie 1

| Probeta | Carga final (P) [N] | Área transversal (A) [mm ²] | Resistencia a la compresión del núcleo [MPa] |
|---------|---------------------|---|--|
| 1 | 429,16 | 2521,1302 | 0,1702 |
| 2 | 411,81 | 2473,0826 | 0,1665 |
| 3 | 403,92 | 2453,7138 | 0,1646 |

Realizado por: Freire W. 2019

$$\sigma_{prom} = \frac{\sum_{i=1}^n P}{n}$$

$$\sigma_{prom} = \frac{0,1702 + 0,1665 + 0,1646}{3}$$

$$\sigma_{prom} = 0,1671 \text{ MPa}$$

Tabla 5-3: Datos para el cálculo de Resistencia a la CP, serie 2

| Probeta | Carga final (P) [N] | Área transversal (A) [mm ²] | Resistencia a la compresión del núcleo [MPa] |
|---------|---------------------|---|--|
| 1 | 389,72 | 2508,1749 | 0,1554 |
| 2 | 389,72 | 2465,9657 | 0,1580 |
| 3 | 359,74 | 2438,1458 | 0,1475 |

Realizado por: Freire W. 2019

$$\sigma_{prom} = \frac{\sum_{i=1}^n P}{n}$$

$$\sigma_{prom} = \frac{0,1554 + 0,1580 + 0,1475}{3}$$

$$\sigma_{prom} = 0,1536 \text{ MPa}$$

Tabla 6-3: Datos para el cálculo de Resistencia a la CP, serie 3

| Probeta | Carga final (P) [N] | Área transversal (A) [mm²] | Resistencia a la compresión del núcleo [MPa] |
|----------------|----------------------------|--|---|
| 1 | 337,65 | 2484,0277 | 0,1359 |
| 2 | 351,85 | 2416,1991 | 0,1456 |

Realizado por: Freire W. 2019

$$\sigma_{prom} = \frac{\sum_{i=1}^n P}{n}$$

$$\sigma_{prom} = \frac{0,1359 + 0,1456}{2}$$

$$\sigma_{prom} = 0,1407 \text{ MPa}$$

Tabla 7-3: Resumen de Resistencia a la CP

| Serie | Resistencia a la compresión plana del núcleo [MPa] |
|--------------|---|
| 1 | 0,1671 |
| 2 | 0,1536 |
| 3 | 0,1407 |

Realizado por: Freire W. 2019

3.1.1.2. Módulo de elasticidad y límite convencional de fluencia

El cálculo del Módulo de Elasticidad se lo realiza mediante la ecuación (8) detallada con anterioridad. Debido a que la zona de cedencia o fluencia no es notoria en este tipo de materiales compuestos, es necesario determinar un Límite Convencional de Fluencia, el mismo que se lo define como la carga que produce en el material una deformación permanente del 0,2%. A partir de esta definición se realiza el trazado de líneas con el fin de determinar el Límite Convencional de Fluencia.

Tabla 8-3: Módulo de Elasticidad y Límite Convencional de Fluencia, serie 1

| Probeta | Módulo de elasticidad E (MPa) | Límite convencional de fluencia $Sy_{0,2}$ (MPa) | Deformación Unitaria en $Sy_{0,2}$ (%) |
|-----------------|-------------------------------|--|--|
| 1 | 1,02387 | 0,038 | 4,375 |
| 2 | 0,43279 | 0,0375 | 6,1934 |
| 3 | 0,68490 | 0,029 | 5,6 |
| Promedio | 0,71385 | 0,0348 | 5,3895 |

Realizado por: Freire W. 2019

Tabla 9-3: Módulo de Elasticidad y Límite Convencional de Fluencia, serie 2

| Probeta | Módulo de elasticidad E (MPa) | Límite convencional de fluencia $Sy_{0,2}$ (MPa) | Deformación Unitaria en $Sy_{0,2}$ (%) |
|-----------------|-------------------------------|--|--|
| 1 | 0,44468 | 0,019 | 6,175 |
| 2 | 0,51197 | 0,021 | 6 |
| 3 | 0,37961 | 0,018 | 6,4 |
| Promedio | 0,44542 | 0,0193 | 6,1917 |

Realizado por: Freire W. 2019

Tabla 10-3: Módulo de Elasticidad y Límite Convencional de Fluencia, serie 3

| Probeta | Módulo de elasticidad E (MPa) | Límite convencional de fluencia $Sy_{0,2}$ (MPa) | Deformación Unitaria en $Sy_{0,2}$ (%) |
|-----------------|-------------------------------|--|--|
| 1 | 0,43505 | 0,0205 | 6,75 |
| 2 | 0,43511 | 0,0180 | 6,6 |
| Promedio | 0,43508 | 0,0193 | 6,6750 |

Realizado por: Freire W. 2019

Tabla 11-3: Tabla resumen de Módulo de Elasticidad y Límite de Fluencia de cada serie

| Serie | Módulo de elasticidad E (MPa) | Límite convencional de fluencia $Sy_{0,2}$ (MPa) | Deformación Unitaria en $Sy_{0,2}$ (%) |
|-------|-------------------------------|--|--|
| 1 | 0,71385 | 0,0348 | 5,3895 |
| 2 | 0,44542 | 0,0193 | 6,1917 |
| 3 | 0,43508 | 0,0193 | 6,6750 |

Realizado por: Freire W. 2019

3.1.1.3. Discusión de resultados para el ensayo de compresión plana según ASTM C365

Al comparar los diagramas, se observa que el comportamiento del núcleo del panel frente a la compresión plana no se ve afectado significativamente por los materiales de revestimiento de la cara. La pequeña variación observada entre probetas de la misma serie puede atribuirse al proceso de producción, ya que variables como: homogeneidad de la mezcla y el proceso de expansión de la espuma de poliuretano influyen en las propiedades finales de la probeta. Esta prueba se realizó para identificar posibles fallos resultantes de la fabricación de los paneles. Sin embargo, como los resultados no mostraron datos muy dispersos, se puede esperar que los núcleos se comporten de manera similar en todos los ensayos de panel sándwich. Además, dado que el material de la cara no influye en el comportamiento del panel, este simple ensayo se puede utilizar para el control de calidad del núcleo.

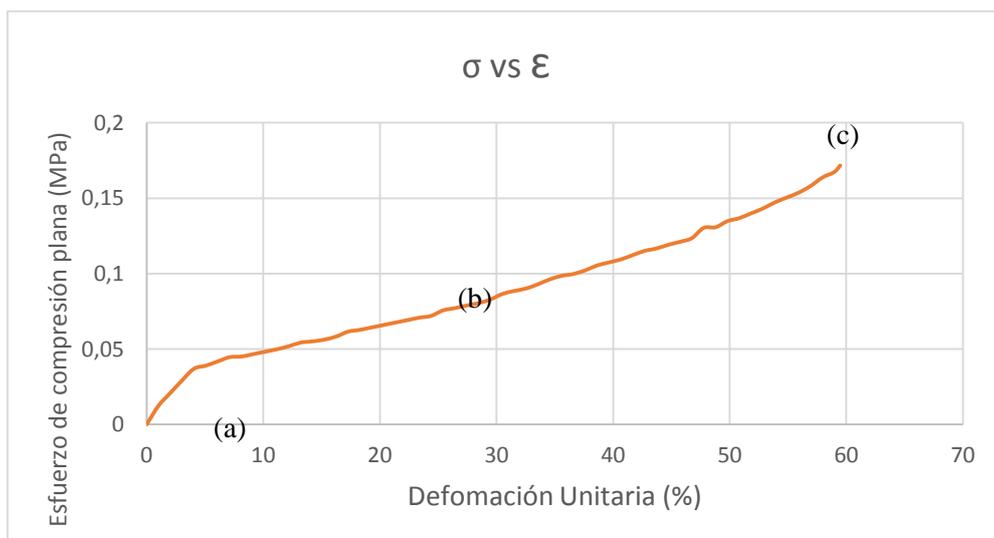


Gráfico 4-3. Diagrama de comportamiento de la prueba a compresión plana

Realizado por: Freire W. 2019

Los diagramas de Esfuerzo vs Deformación obtenidas en las pruebas de compresión plana del núcleo de poliuretano tienen la misma forma que el Gráfico 4-3, teniendo así una curva calibrada para su uso en futuros estudios permitiendo el desarrollo de nuevos paneles sándwich. Esta es la curva característica de un panel sándwich con núcleo de espuma de poliuretano sometido a una prueba de compresión plana, con las tres regiones bien definidas como se muestra en el Gráfico 4-3. En la zona (a) el régimen es predominantemente elástico, no lineal y las paredes del núcleo están flexionadas. La primera fase termina después del límite elástico, donde comienza la deformación total de la probeta dando lugar a la zona (b), hasta aproximadamente el 60% de la longitud. A partir de ahí, en la zona (c), las láminas externas tienden a unirse mientras que en el núcleo se presenta un fenómeno de abarrilamiento, hasta un punto en donde este ya no pueda retomar sus dimensiones originales.



Figura 1-3. Probetas después del ensayo de compresión plana, serie 1

Realizado por: Freire W. 2019



Figura 2-3. Probetas después del ensayo de compresión plana, serie 2

Realizado por: Freire W. 2019



Figura 3-3. Probetas después del ensayo de compresión plana, serie 3

Realizado por: Freire W. 2019

Los resultados obtenidos en el ensayo de compresión plana del panel sándwich en el presente trabajo muestran datos por debajo a los obtenidos en el trabajo titulado “Modelación de un sistema estructural alternativo, prefabricado de bajo peso, para una vivienda de dos pisos (paneles metálicos con inyección de poliuretano de alta densidad)” en lo que concierne a la resistencia de la compresión plana. La Escuela Politécnica Nacional obtuvo una resistencia a la compresión plana de 0,85 MPa que corresponde a una carga que oscila entre el 10% al 12%, mientras que en el presente estudio se obtuvo 0,1671 MPa, siendo este valor de resistencia correspondiente a la serie 1, la misma que no posee una adición de partículas de caucho en la mezcla de polioli e isocianato. La variación existente entre ambos estudios se debe al proceso de fabricación del núcleo, el mismo que influye directamente en la densidad y sucesivamente en el valor de resistencia a la compresión plana. A una baja densidad de núcleo, la resistencia del núcleo tiende a decrecer, siendo el efecto contrario para densidades altas.

El módulo de elasticidad más alto obtenido a partir del ensayo de compresión plana corresponde a las probetas de la serie 1, seguido de manera decreciente la serie 2 y la serie 3 como se indica en la tabla 11-3. Un valor elevado del módulo de elasticidad indica que el material es rígido, siendo este el caso para la serie 1 teniendo en consideración como datos de comparación la serie 2 y la serie 3. Se nota que a medida que el porcentaje de las partículas de caucho contenidas en el núcleo de poliuretano aumenta el módulo de elasticidad disminuye, esto se debe a que el caucho posee una propiedad que lo caracteriza, siendo esta un material flexible, brindándole ductilidad al núcleo de poliuretano. Entonces, se puede decir que el módulo de elasticidad es inversamente proporcional al contenido de las partículas de caucho en el núcleo.

En la tabla 11-3 se observa que el máximo valor del límite convencional de fluencia se da en las probetas de la serie 1, mientras que para la serie 2 y la serie 3 se evidencia una disminución de esta propiedad. La deformación plástica en las probetas de la serie 1 sin caucho es más tardía en comparación al de las series 2 y 3. Esto se debe a que la presencia de las micropartículas de caucho en el núcleo de poliuretano aumenta la zona elástica, dando lugar a un incremento de la deformación unitaria y una disminución del límite convencional de fluencia. Entonces, se dice que el límite convencional de fluencia es inversamente proporcional al contenido de las partículas de caucho en el núcleo mientras que la deformación unitaria en $Sy_{0,2}$ es directamente proporcional al contenido de las partículas de caucho en el núcleo.

3.1.2. Compresión de borde

El ensayo de compresión de borde consiste en someter un panel sándwich a una fuerza de compresión paralela al plano de sus caras. La fuerza se transmite al panel a través de soportes finales fijos (utilajes) obteniendo la resistencia a la compresión de borde sándwich para propiedades de diseño de paneles.

Para el ensayo de compresión de borde se utilizaron 3 probetas, donde la gráfica representa la variación de la fuerza vs deformación.

De acuerdo con ASTM C364, el diagrama de Esfuerzo vs Deformación se la calcula mediante la resistencia a la compresión máxima de los bordes con la ecuación (9), mientras que el esfuerzo máximo de pandeo se lo determina con la ecuación (10).

$$\sigma_b = \frac{P_{max}}{w(2t_{fs})} \quad (9)$$

Donde:

σ_b = Esfuerzo de Compresión en los bordes, *MPa*;

P_{max} = Fuerza máxima aplicada, *N*,

w = Ancho del panel sándwich, *mm*, y

t_{fs} = Espesor de una sola lámina, *mm*.

$$\sigma_p = \frac{P}{A} \quad (10)$$

Donde:

σ_p = Esfuerzo máximo de pandeo, *MPa*;

P = Carga de rotura, *N*, y

A = Área de la sección transversal de la probeta, *mm²*

- Serie 1

A continuación se detalla los resultados de los ensayos realizados para probetas con un contenido de caucho del 0%.

Tabla 12-3: Probetas ensayadas a CB, serie 1

| Datos de las probetas | |
|----------------------------------|------------|
| Dimensiones [mm] | 200*400*50 |
| Peso promedio [kg] | 0,3366 |
| Área promedio [mm ²] | 79836,5493 |
| Caucho [%] | 0 |

Realizado por: Freire W. 2019

Los datos arrojados por la máquina universal de Polímeros Metrotest del Centro de Fomento Productivo Metalmecánico Carrocero son los siguientes:

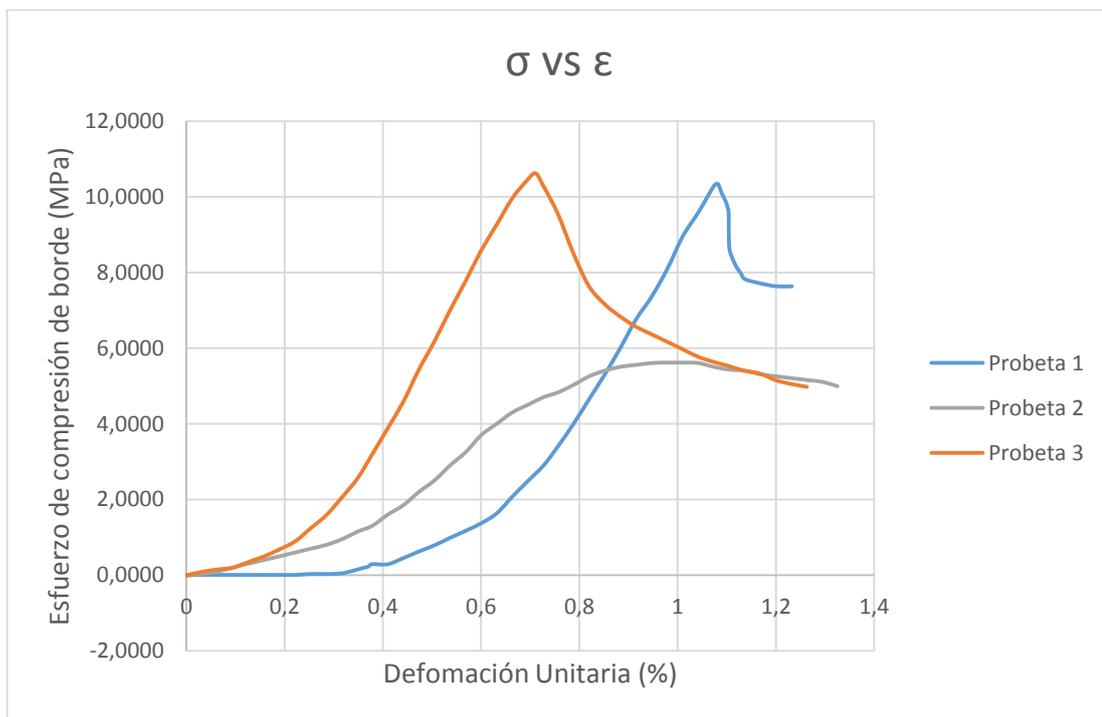


Gráfico 5-3. Diagrama de Esfuerzo vs Deformación a compresión de borde, serie 1

Realizado por: Freire W. 2019

- Serie 2

A continuación se detalla los resultados de los ensayos realizados para probetas con un contenido de caucho del 20%.

Tabla 13-3: Probetas ensayadas a CB, serie 2

| Datos de las probetas | |
|----------------------------------|------------|
| Dimensiones [mm] | 200*400*50 |
| Peso promedio [kg] | 0,3603 |
| Área promedio [mm ²] | 80201,7283 |
| Caucho [%] | 20 |

Realizado por: Freire W. 2019

Los datos arrojados por la máquina universal de Polímeros Metrotest del Centro de Fomento Productivo Metalmecánico Carrocero son los siguientes:

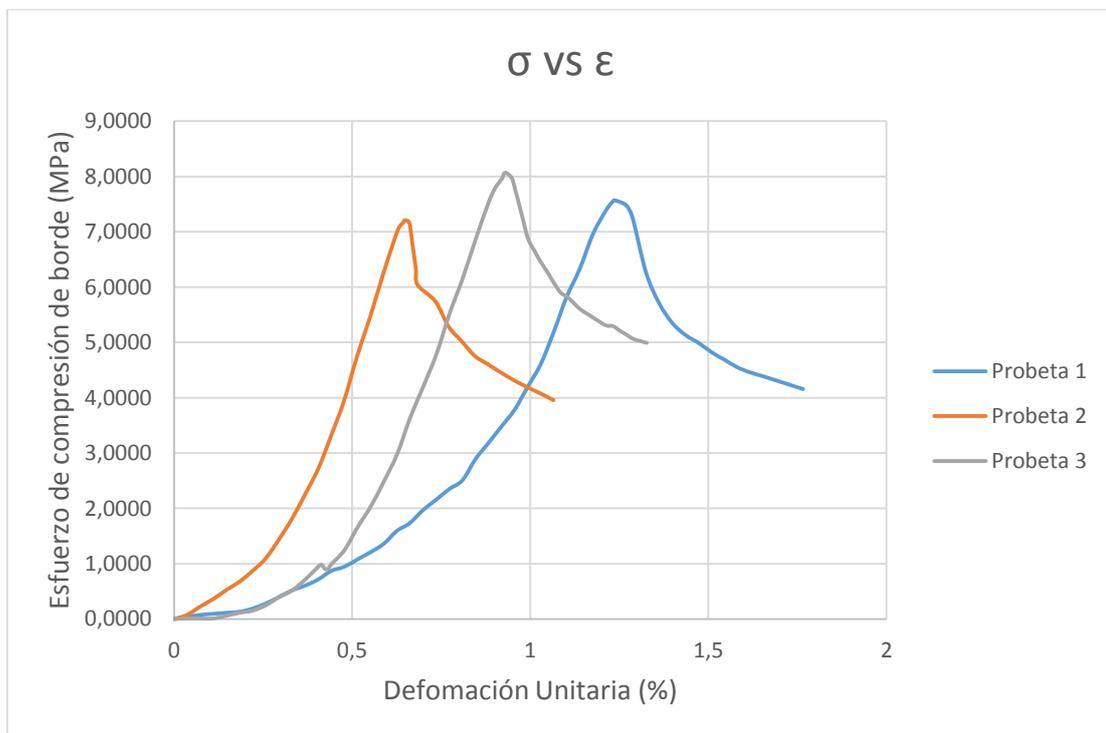


Gráfico 6-3. Diagrama de Esfuerzo vs Deformación a compresión de borde, serie 2

Realizado por: Freire W. 2019

- Serie 3

A continuación se detalla los resultados de los ensayos realizados para probetas con un contenido de caucho del 30%.

Tabla 14-3: Probetas ensayadas a CB, serie 3

| Datos de las muestras | |
|----------------------------------|------------|
| Dimensiones [mm] | 200*400*50 |
| Peso promedio [kg] | 0,357 |
| Área promedio [mm ²] | 80036,8036 |
| Caucho [%] | 30 |

Realizado por: Freire W. 2019

Los datos arrojados por la máquina universal de Polímeros Metrotest del Centro de Fomento Productivo Metalmecánico Carrocero son los siguientes:

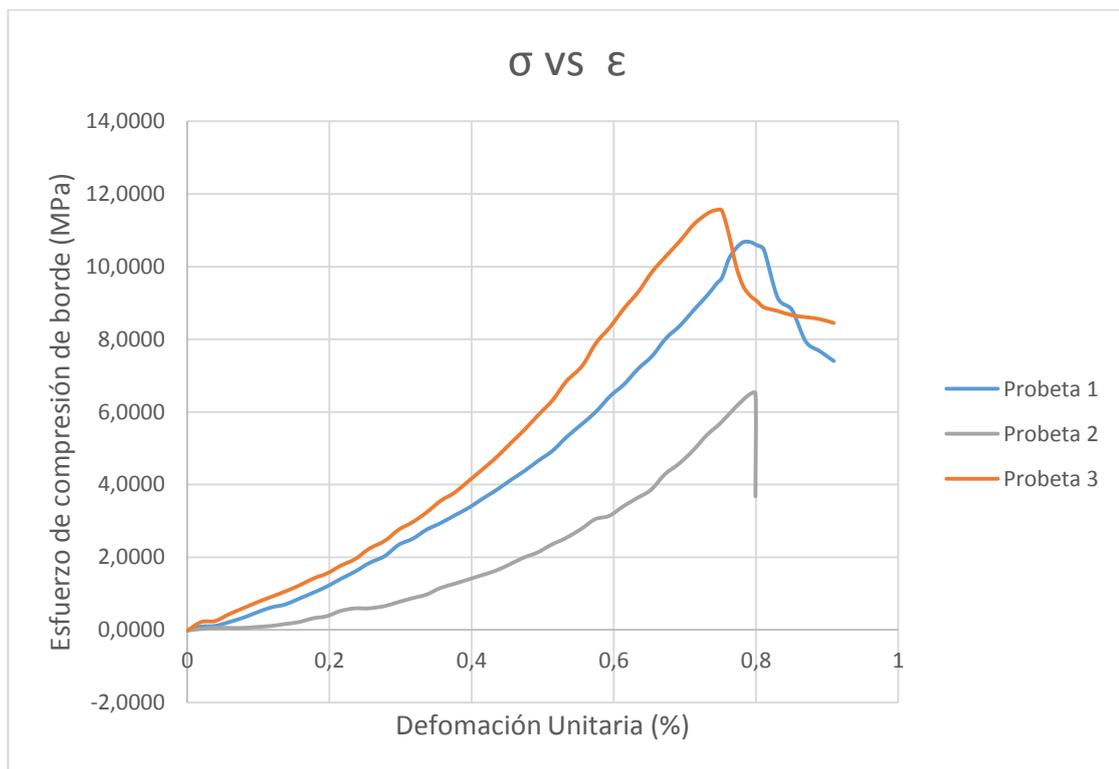


Gráfico 7-3. Diagrama de Esfuerzo vs Deformación a compresión de borde, serie 3

Realizado por: Freire W. 2019

Las gráficas obtenidas a partir del ensayo de compresión de borde indican el incremento del desplazamiento axial según se aplica un valor de carga creciente, la carga llega a un punto donde es máxima produciendo la falla de la muestra.

El comportamiento de las gráficas Fuerza vs Desplazamiento muestran una semejanza notoria a excepción de la probeta 2 en la serie 1 y de la probeta 2 en la serie 3, debido a que la variación del esfuerzo final de compresión de borde es muy notoria en comparación a las demás probetas se los considera como valores atípicos.

En las probetas cuyos valores son atípicos, se pudo identificar que al momento de ensayar estos fallaron por desprendimiento de las láminas y por compresión del panel.

3.1.2.1. Resistencia a la compresión máxima en el borde

El cálculo de la resistencia a la compresión máxima en el borde se lo realiza mediante la ecuación (9):

Tabla 15-3: Cálculo de Resistencia a la compresión en el borde, serie 1

| Probeta | Fuerza máxima (P_{max}) [N] | Ancho del sándwich (w) [mm] | Espesor de una sola cara (t_{fs}) [mm] | Resistencia a la compresión en el borde [MPa] |
|---------|------------------------------------|-----------------------------------|--|---|
| 1 | 4121,23 | 199,08 | 1 | 10,3507 |
| 2 | 2237,33 | 200,51 | 1 | 5,5791 |
| 3 | 4255,34 | 200,20 | 1 | 10,6277 |

Realizado por: Freire W. 2019

Para el cálculo de la resistencia a la compresión de borde promedio, se discrimina los datos de la probeta 2 debido a que son datos atípicos.

$$\sigma_{prom} = \frac{\sum_{i=1}^n P}{n}$$

$$\sigma_{prom} = \frac{10,3507 + 10,6277 + 5,5791}{3}$$

$$\sigma_{prom} = 8,8525 \text{ MPa}$$

Tabla 16-3: Cálculo de Resistencia a la compresión en el borde, serie 2

| Probeta | Fuerza máxima (P_{max}) [N] | Ancho del sándwich (w) [mm] | Espesor de una sola cara (t_{fs}) [mm] | Resistencia a la compresión en el borde [MPa] |
|---------|---------------------------------|-----------------------------|--|---|
| 1 | 3040,43 | 200,90 | 1 | 7,56702 |
| 2 | 2898,43 | 201,08 | 1 | 7,2072 |
| 3 | 3239,24 | 200,79 | 1 | 8,0662 |

Realizado por: Freire W. 2019

$$\sigma_{prom} = \frac{\sum_{i=1}^n P}{n}$$

$$\sigma_{prom} = \frac{7,56702 + 7,2072 + 8,0662}{3}$$

$$\sigma_{prom} = 7,6135 \text{ MPa}$$

Tabla 17-3: Cálculo de Resistencia a la compresión en el borde, serie 3

| Probeta | Fuerza máxima (P_{max}) [N] | Ancho del sándwich (w) [mm] | Espesor de una sola cara (t_{fs}) [mm] | Resistencia a la compresión en el borde [MPa] |
|---------|---------------------------------|-----------------------------|--|---|
| 1 | 4285,32 | 200,65 | 1 | 10,6786 |
| 2 | 2611,27 | 200,87 | 1 | 6,45 |
| 3 | 4597,73 | 198,85 | 1 | 11,5608 |

Realizado por: Freire W. 2019

Para el cálculo de la resistencia a la compresión de borde promedio, se discrimina los datos de la probeta 2 debido a que son datos atípicos.

$$\sigma_{prom} = \frac{\sum_{i=1}^n P}{n}$$

$$\sigma_{prom} = \frac{10,6786 + 11,5608 + 6,45}{3}$$

$$\sigma_{prom} = 9,5631 \text{ MPa}$$

Tabla 18-3: Resumen de la Resistencia CB

| Serie | Resistencia a la compresión en el borde [MPa] |
|-----------------|---|
| 1 | 8,8525 |
| 2 | 7,6135 |
| 3 | 9,5631 |
| Promedio | 8,6764 |

Realizado por: Freire W. 2019

3.1.2.2. Esfuerzo máximo de pandeo

El cálculo del esfuerzo máximo de pandeo se lo realiza mediante la ecuación (10):

Tabla 19-3: Cálculo de esfuerzo máximo de pandeo, serie 1

| Probeta | Carga de rotura [N] | Área transversal [mm ²] | Esfuerzo máximo de pandeo [MPa] |
|---------|---------------------|-------------------------------------|---------------------------------|
| 1 | 4121,23 | 10373,8851 | 0,3973 |
| 2 | 2237,33 | 10256,257 | 0,2181 |
| 3 | 4255,34 | 10232,222 | 0,4159 |

Realizado por: Freire W. 2019

Para el cálculo del esfuerzo máximo de pandeo promedio, se discrimina los datos de la probeta 2 debido a que son datos atípicos.

$$\sigma_{pandeo} = \frac{\sum_{i=1}^n P}{n}$$

$$\sigma_{pandeo} = \frac{0,3973 + 0,4159 + 0,2181}{3}$$

$$\sigma_{pandeo} = 0,3438 \text{ MPa}$$

Tabla 20-3: Cálculo de esfuerzo máximo de pandeo, serie 2

| Probeta | Carga de rotura [N] | Área transversal [mm ²] | Esfuerzo máximo de pandeo [MPa] |
|---------|---------------------|-------------------------------------|---------------------------------|
| 1 | 3040,43 | 10248,5787 | 0,2967 |
| 2 | 2898,43 | 10131,2486 | 0,2861 |
| 3 | 3239,24 | 10142,4038 | 0,3194 |

Realizado por: Freire W. 2019

$$\sigma_{pandeo} = \frac{\sum_{i=1}^n P}{n}$$

$$\sigma_{pandeo} = \frac{0,2967 + 0,2861 + 0,3194}{3}$$

$$\sigma_{pandeo} = 0,3007 \text{ MPa}$$

Tabla 21-3: Cálculo de esfuerzo máximo de pandeo, serie 3

| Probeta | Carga de rotura [N] | Área transversal [mm^2] | Esfuerzo máximo de pandeo [MPa] |
|---------|---------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| 1 | 4285,32 | 9981,5028 | 0,4293 |
| 2 | 2611,27 | 9673,8992 | 0,2699 |
| 3 | 4597,73 | 10033,14 | 0,4583 |

Realizado por: Freire W. 2019

Para el cálculo del esfuerzo máximo de pandeo promedio, se discrimina los datos de la probeta 2 debido a que son datos atípicos.

$$\sigma_{prom} = \frac{\sum_{i=1}^n P}{n}$$

$$\sigma_{prom} = \frac{0,4293 + 0,4583 + 0,2699}{3}$$

$$\sigma_{prom} = 0,3858 \text{ MPa}$$

Tabla 22-3: Resumen del esfuerzo máximo de pandeo

| Serie | Esfuerzo máximo de pandeo [MPa] |
|-----------------|---------------------------------|
| 1 | 0,3438 |
| 2 | 0,3007 |
| 3 | 0,3858 |
| Promedio | 0,3434 |

Realizado por: Freire W. 2019

3.1.2.3. Discusión de resultados para el ensayo de CB según ASTM C364

A diferencia de la compresión plana, la prueba de compresión de borde espera una variación en las propiedades mecánicas relacionadas con las propiedades de la cara. La carga de compresión del emparedado, así como la resistencia a la compresión y al pandeo aumentan con la elasticidad creciente de las caras (Yeh y Wu 1991).

Al comparar los diagramas, se observa que el comportamiento de las láminas del panel frente a la compresión de borde no se ve afectado significativamente por los materiales ni la composición del núcleo. La pequeña variación observada entre probetas de la misma serie se atribuye al proceso de producción, ya que variables como: espesor, disposición de la fibra de vidrio, homogeneidad del secado y cantidad de catalizar en la resina influyen en las propiedades finales de la probeta.

Los resultados obtenidos en el ensayo de compresión de borde realizado en el presente estudio muestran datos por debajo a los obtenidos en el trabajo de “Modelación de un sistema estructural alternativo, prefabricado de bajo peso, para una vivienda de dos pisos (paneles metálicos con inyección de poliuretano de alta densidad)” de la Escuela Politécnica Nacional en lo que concierne al esfuerzo máximo de pandeo (Iza 2012). La Escuela Politécnica Nacional obtuvo un esfuerzo máximo de pandeo de 0,55 MPa, mientras que en el presente estudio se obtuvo un valor máximo de 0,3434 MPa, siendo este valor de resistencia correspondiente a la serie 3, la misma que posee un contenido de partículas de caucho en la mezcla de polioliol e isocianato del 30% en peso. Esta diferencia de datos se debe al tipo de recubrimiento utilizado por la Escuela Politécnica Nacional siendo este una plancha de acero. Debido a que el rango de diferencia del esfuerzo máximo de pandeo entre ambos estudio es aproximadamente del 37,6%, se concluye que la lámina de fibra de vidrio puede competir con la lámina de acero en ensayos de compresión de borde teniendo en consideración su espesor. Cabe recalcar que esta variación de datos no se debe a las dimensiones de las probetas utilizadas en los ensayos.

Para paneles sándwich, la adhesión entre el núcleo y las caras es tan importante como las propiedades de los materiales del núcleo y las caras mismas. Por lo tanto, el comportamiento estructural de este tipo de panel solo puede evaluarse completamente si se evalúa esta adhesión, como en las pruebas de compresión sándwich, que se extiende ampliamente porque es fácil de realizar y proporciona resultados confiables. Mediante los resultados obtenidos en este ensayo se puede observar que la adhesión entre la fibra de vidrio y el núcleo de poliuretano es relativamente buena ya que el esfuerzo máximo de pandeo no varía mucho en comparación con los resultados obtenidos de la Escuela Politécnica Nacional.

En la prueba de compresión de la estructura sándwich, la determinación del tipo de falla es muy importante para la evaluación del comportamiento de la estructura y puede indicar su región más frágil. Por lo tanto, es posible desarrollar soluciones para evitar este tipo de comportamiento (Vadakke y Carlsson 2004). Además de la delaminación o desprendimiento de la cara del núcleo, puede ocurrir durante la flexión del panel, corte del núcleo, corte de la cara y prueba de aplastamiento de la cara. Para los núcleos de poliuretano, estos otros modos de falla son menos comunes pero no menos perjudiciales para el rendimiento del panel (Fleck y Sridhar 2002).

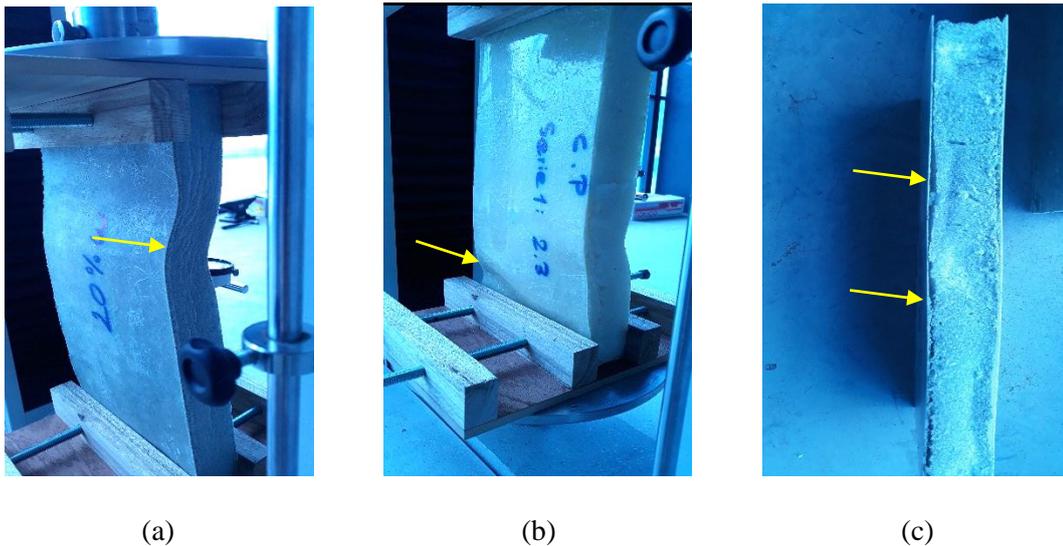


Figura 4-3. Fallos predominantes del ensayo de compresión de borde

Realizado por: Freire W. 2019

En la figura 4-3 se puede observar que los fallos predominantes al someter este tipo de panel sándwich a un ensayo de compresión de borde son: deformación por pandeo de las láminas sin ruptura del núcleo (figura 4-3 a), un comportamiento muy diferente al de las otras probetas, que es el aplastamiento por compresión de la zona inferior del panel sándwich (figura 4-3 b) y el desprendimiento o delaminación de las caras (figura 4-3 b).

Los diagramas de las series 1, 2 y 3 mostraron comportamientos completamente diferentes. En las probetas 1 y 3 de la serie 1 (gráfico 5-3), el diagrama comienza a mostrar linealidad alrededor de los 2 MPa, alcanzando su máximo en 8,8525 MPa, luego el pandeo es característica del material dúctil. El diagrama de la probeta 2 (gráfico 5-3) no tiene linealidad, ni se observó un pico característico al alcanzar la fuerza máxima, el comportamiento de este diagrama se debe al tipo de falla por compresión de la zona inferior mostrada en la figura 4-3 b.

En las probetas de la serie 2 (gráfico 6-3), el diagrama comienza a mostrar linealidad alrededor de los 2 MPa, alcanzando su máximo en 7,6135 MPa, luego el pandeo es característica del material dúctil.

En las probetas 1 y 3 de la serie 3 (gráfico 7-3), el diagrama comienza a mostrar linealidad alrededor de los 1,5 MPa, alcanzando su máximo en 9,5631 MPa, luego el pandeo es característica del material dúctil. El diagrama de la probeta 2 (gráfico 7-3) no tiene linealidad, ni se observó un pico característico al alcanzar la fuerza máxima, el comportamiento de este diagrama se debe al tipo de falla por delaminación de las caras como se muestra en la figura 4-3 c. Esta delaminación sugiere una interacción débil entre las caras y el núcleo de espuma de poliuretano, lo que resulta en una baja resistencia a la compresión longitudinal. De hecho, en los núcleos de poliuretano, es común observar la delaminación de la cara del sándwich, porque la diferencia en la deformidad de las caras y el núcleo es significativa. Este efecto es perjudicial para el rendimiento del panel y se deben adoptar dispositivos de ingeniería para resolver este problema (Branco et al. 2012).

3.1.3. Flexión en tres puntos

El ensayo de flexión en tres puntos consiste en someter una viga de construcción sándwich a un momento de flexión normal al plano del mismo. Se registran las medidas de fuerza versus deformación.

Para el ensayo de flexión en tres puntos se utilizaron 3 probetas, donde la gráfica representa la variación de la fuerza vs deflexión.

De acuerdo con ASTM C393, la ecuación (11) calcula los esfuerzos de corte que actúan sobre el núcleo, mientras que la ecuación (12) permite determinar los esfuerzos de flexión en las caras. Sus valores máximos se obtienen cuando P es igual a la carga máxima.

$$\tau = \frac{P}{(d+c)b} \quad (11)$$

Donde:

τ = Resistencia final al cizallamiento del núcleo, *MPa*;

P = Fuerza, *N*,

d = Espesor del panel sándwich, *mm*,

c = Espesor del núcleo, *mm*, y

b = Ancho del sándwich, *mm*.

$$\sigma_F = \frac{P \cdot S}{2t(d+c)b} \quad (12)$$

Donde:

σ_F = Esfuerzo de flexión en las caras, *MPa*;

P = Fuerza, *N*,

S = Longitud de tramo, *mm*,

t = Espesor de la lamina, *mm*,

d = Espesor del panel sándwich, *mm*,

c = Espesor del núcleo, *mm*, y

b = Ancho del sándwich, *mm*.

- Serie 1

A continuación se detalla los resultados de los ensayos realizados para probetas con un contenido de caucho del 0%.

Tabla 23-3: Probetas ensayadas a flexión, serie 1

| Datos de las probetas | |
|--|------------|
| Dimensiones [<i>mm</i>] | 200*75*50 |
| Peso promedio [<i>kg</i>] | 0,06467 |
| Área promedio [<i>mm</i> ²] | 14938,5644 |
| Caucho [%] | 0 |

Realizado por: Freire W. 2019

La máquina universal de Polímeros Metrotest del Centro de Fomento Productivo Metalmecánico Carrocero arroja el diagrama Carga vs Deflexión como se muestra a continuación:

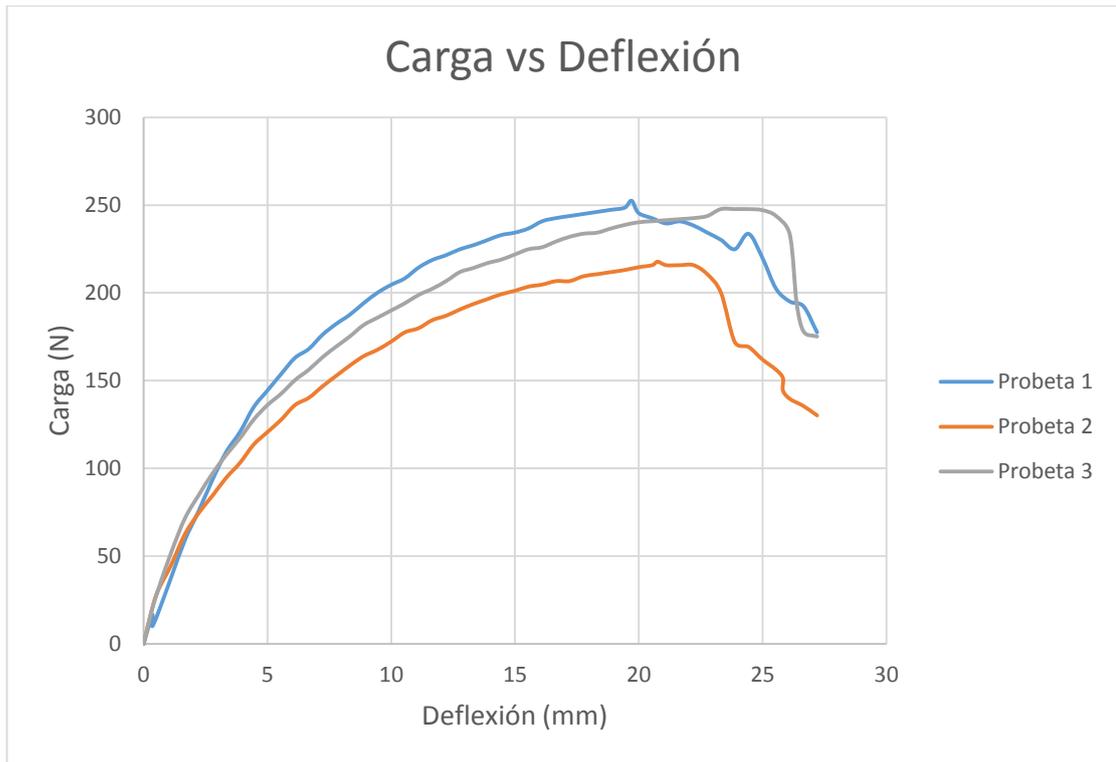


Gráfico 8-3. Diagrama Carga vs Deflexión, serie 1

Realizado por: Freire W. 2019

- Serie 2

A continuación se detalla los resultados de los ensayos realizados para probetas con un contenido de caucho del 20%.

Tabla 24-3: Probetas ensayadas a flexión, serie 2

| Datos de las probetas | |
|----------------------------------|------------|
| Dimensiones [mm] | 200*75*50 |
| Peso promedio [kg] | 0,071 |
| Área promedio [mm ²] | 15031,8717 |
| Caucho [%] | 20 |

Realizado por: Freire W. 2019

La máquina universal de Polímeros Metrottest del Centro de Fomento Productivo Metalmeccánico Carrocero arroja el diagrama Carga vs Deflexión como se muestra a continuación:

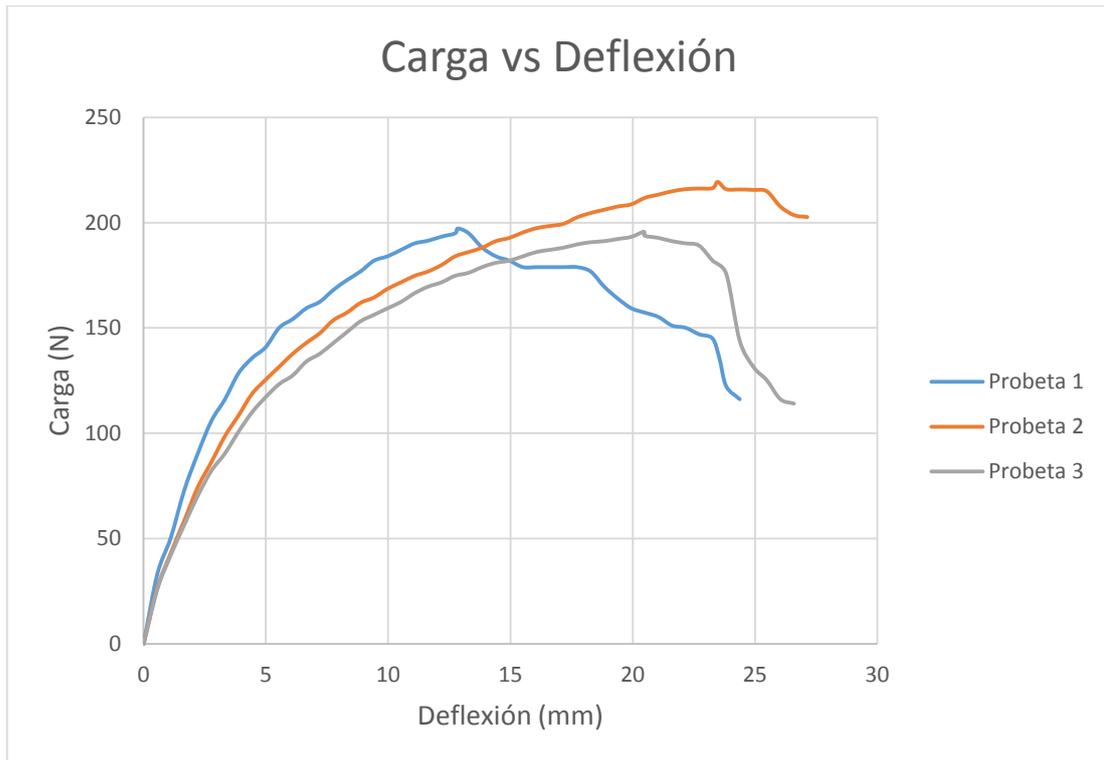


Gráfico 9-3. Diagrama Carga vs Deflexión, serie 2

Realizado por: Freire W. 2019

- Serie 3

A continuación se detalla los resultados de los ensayos realizados para probetas con un contenido de caucho del 30%.

Tabla 25-3: Probetas ensayadas a flexión, serie 3

| Datos de las probetas | |
|----------------------------------|------------|
| Dimensiones [mm] | 200*75*50 |
| Peso promedio [kg] | 0,06867 |
| Área promedio [mm ²] | 14886,5034 |
| Caucho [%] | 30 |

Realizado por: Freire W. 2019

La máquina universal de Polímeros Metrottest del Centro de Fomento Productivo Metalmeccánico Carrocero arroja el diagrama Carga vs Deflexión como se muestra a continuación:

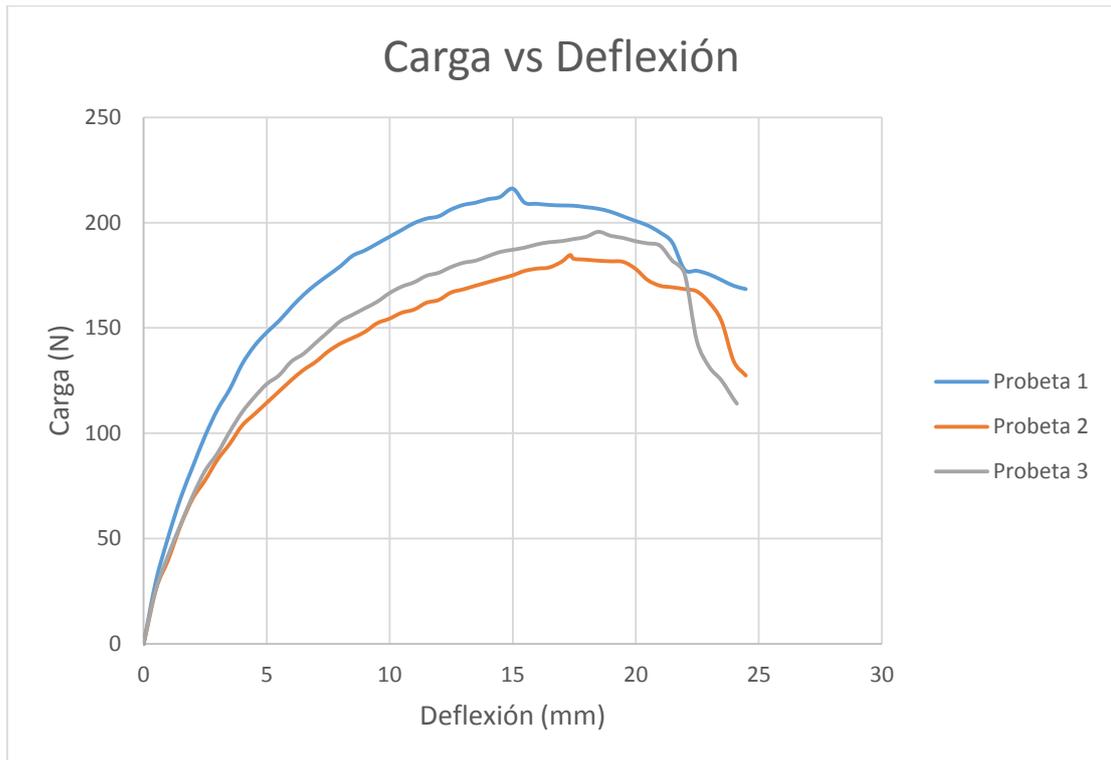


Gráfico 10-3. Diagrama Carga vs Deflexión, serie 3

Realizado por: Freire W. 2019

Los diagramas obtenidos del ensayo de flexión realizado sobre la superficie superior del panel sándwich indican como va incrementando la deflexión final según se aplica un valor de carga creciente, la carga llega a un punto donde es máxima produciendo la fractura de la probeta.

El comportamiento de las gráficas Fuerza vs Deflexión muestran que hay puntos en común donde se entrecruzan las curvas de cada muestra ensayada, según avanza el tiempo e incrementa la carga, la deflexión de la probeta comienza a ser más notoria conllevando a la fractura y permitiendo determinar su carga de ruptura.

En las probetas se puede observar que la curva característica es semejante entre cada una de ellas, sin embargo, la deflexión y la carga aplicada varían en cada una, como indica las tablas y graficas correspondientes.

Para establecer la deflexión final de cada serie ensayada se toma el valor promedio de los 3 ensayos.

Tabla 26-3: Deflexión final de las probetas, serie 1

| Probeta | Deflexión (mm) |
|---------|----------------|
| 1 | 19,709 |
| 2 | 20,758 |
| 3 | 23,312 |

Realizado por: Freire W. 2019

$$Deflexión_{prom} = \frac{\sum_{i=1}^n P}{3}$$

$$Deflexión_{prom} = \frac{19,709 + 20,758 + 23,312}{3}$$

$$Deflexión_{prom} = 21,26 \text{ mm}$$

Tabla 27-3: Deflexión final de las probetas, serie 2

| Probeta | Deflexión (mm) |
|---------|----------------|
| 1 | 12,854 |
| 2 | 23,482 |
| 3 | 20,456 |

Realizado por: Freire W. 2019

$$Deflexión_{prom} = \frac{\sum_{i=1}^n P}{3}$$

$$Deflexión_{prom} = \frac{12,854 + 23,482 + 20,456}{3}$$

$$Deflexión_{prom} = 18,93 \text{ mm}$$

Tabla 28-3: Deflexión final de las probetas, serie 3

| Probeta | Deflexión (mm) |
|---------|----------------|
| 1 | 14,999 |
| 2 | 17,326 |
| 3 | 24,108 |

Realizado por: Freire W. 2019

$$Deflexión_{prom} = \frac{\sum_{i=1}^n P}{3}$$

$$Deflexión_{prom} = \frac{14,999 + 17,326 + 24,108}{3}$$

$$Deflexión_{prom} = 18,811 \text{ mm}$$

Tabla 29-3: Resumen de deflexión final para cada serie

| Serie | Deflexión (mm) |
|-------|----------------|
| 1 | 21,26 |
| 2 | 18,93 |
| 3 | 18,811 |

Realizado por: Freire W. 2019

3.1.3.1. Resistencia final al cizallamiento del núcleo

El cálculo de la resistencia final al cizallamiento del núcleo se lo realiza mediante la ecuación (11):

Tabla 30-3: Datos para el cálculo de Resistencia final al cizallamiento del núcleo, serie 1

| Probeta | P_{max} | Dimensiones [mm] | | | Resistencia final al cizallamiento del núcleo [MPa] |
|---------|-----------|------------------|-------|-------|---|
| | [N] | d | c | b | |
| 1 | 252,45 | 49,64 | 47,64 | 74,52 | 0,03487 |
| 2 | 217,74 | 50,08 | 48,08 | 74,48 | 0,02978 |
| 3 | 247,71 | 50,71 | 48,71 | 74,36 | 0,03351 |

Realizado por: Freire W. 2019

$$F_s^{ult}_{prom} = \frac{\sum_{i=1}^n P}{3}$$

$$F_s^{ult}_{prom} = \frac{0,03487 + 0,02978 + 0,03351}{3}$$

$$F_s^{ult}_{prom} = 0,03272 \text{ MPa}$$

Tabla 31-3: Datos para el cálculo de Resistencia final al cizallamiento del núcleo, serie 2

| Probeta | P_{max} | Dimensiones [mm] | | | Resistencia final al cizallamiento del núcleo [MPa] |
|---------|-----------|------------------|-------|-------|---|
| | [N] | d | c | b | |
| 1 | 197,22 | 50,27 | 48,27 | 74,48 | 0,02687 |
| 2 | 219,31 | 49,76 | 47,76 | 74,83 | 0,03005 |
| 3 | 195,65 | 50,32 | 48,32 | 75,35 | 0,02632 |

Realizado por: Freire W. 2019

$$F_s^{ult}_{prom} = \frac{\sum_{i=1}^n P}{3}$$

$$F_s^{ult}_{prom} = \frac{0,02687 + 0,03005 + 0,02632}{3}$$

$$F_s^{ult}_{prom} = 0,02775 \text{ MPa}$$

Tabla 32-3: Datos para el cálculo de Resistencia final al cizallamiento del núcleo, serie 3

| Probeta | P_{max} | Dimensiones [mm] | | | Resistencia final al cizallamiento del núcleo [MPa] |
|---------|-----------|------------------|-------|-------|---|
| | [N] | d | c | b | |
| 1 | 216,16 | 49,96 | 47,96 | 74,25 | 0,02973 |
| 2 | 184,60 | 49,81 | 47,81 | 74,59 | 0,02535 |
| 3 | 230,36 | 48,66 | 46,66 | 74,47 | 0,03245 |

Realizado por: Freire W. 2019

$$F_s^{ult}_{prom} = \frac{\sum_{i=1}^n P}{3}$$

$$F_s^{ult}_{prom} = \frac{0,02973 + 0,02535 + 0,03245}{3}$$

$$F_s^{ult}_{prom} = 0,02918 \text{ MPa}$$

Tabla 33-3: Resistencia final al cizallamiento

| Serie | Resistencia final al cizallamiento del núcleo [MPa] |
|-------|---|
| 1 | 0,03272 |
| 2 | 0,02775 |
| 3 | 0,02918 |

Realizado por: Freire W. 2019

3.1.3.2. Esfuerzo de enfrentamiento o en la cara

El cálculo del esfuerzo en la cara se lo realiza utilizando la ecuación (12):

Tabla 34-3: Datos de las probetas para el cálculo del esfuerzo en la cara, serie 1

| Probeta | P_{max} | Dimensiones [mm] | | | | | Esfuerzo en la cara [MPa] |
|---------|-----------|------------------|---|-------|-------|-------|---------------------------|
| | [N] | S | t | d | c | b | |
| 1 | 252,45 | 140 | 1 | 49,64 | 47,64 | 74,52 | 2,4409 |
| 2 | 217,74 | 140 | 1 | 50,08 | 48,08 | 74,48 | 2,0846 |
| 3 | 247,71 | 140 | 1 | 50,71 | 48,71 | 74,36 | 2,3457 |

Realizado por: Freire W. 2019

$$\sigma_{prom} = \frac{\sum_{i=1}^n P}{3}$$

$$\sigma_{prom} = \frac{2,4409 + 2,0846 + 2,3457}{3}$$

$$\sigma_{prom} = 2,2904 \text{ MPa}$$

Tabla 35-3: Datos de las probetas para el cálculo del esfuerzo en la cara, serie 2

| Probeta | P_{max} | Dimensiones [mm] | | | | | Esfuerzo en la cara [MPa] |
|---------|-----------|------------------|---|-------|-------|-------|---------------------------|
| | [N] | S | t | d | c | b | |
| 1 | 197,22 | 140 | 1 | 50,27 | 48,27 | 74,48 | 1,8810 |
| 2 | 219,31 | 140 | 1 | 49,76 | 47,76 | 74,83 | 2,1035 |
| 3 | 195,65 | 140 | 1 | 50,32 | 48,32 | 75,35 | 1,8424 |

Realizado por: Freire W. 2019

$$\sigma_{prom} = \frac{\sum_{i=1}^n P}{3}$$

$$\sigma_{prom} = \frac{1,8810 + 2,1035 + 1,8424}{3}$$

$$\sigma_{prom} = 1,9423 \text{ MPa}$$

Tabla 36-3: Datos de las probetas para el cálculo del esfuerzo en la cara, serie 3

| Probeta | P_{max} | Dimensiones [mm] | | | | | Esfuerzo en la cara [MPa] |
|---------|-----------|------------------|---|-------|-------|-------|---------------------------|
| | [N] | S | t | d | c | b | |
| 1 | 216,16 | 140 | 1 | 49,96 | 47,96 | 74,25 | 2,0811 |
| 2 | 184,60 | 140 | 1 | 49,81 | 47,81 | 74,59 | 1,7745 |
| 3 | 230,36 | 140 | 1 | 48,66 | 46,66 | 74,47 | 2,2715 |

Realizado por: Freire W. 2019

$$\sigma_{prom} = \frac{\sum_{i=1}^n P}{3}$$

$$\sigma_{prom} = \frac{2,0811 + 1,7745 + 2,2715}{3}$$

$$\sigma_{prom} = 2,0424 \text{ MPa}$$

Tabla 37-3: Resumen del esfuerzo en la cara

| Serie | Esfuerzo en la cara [MPa] |
|-------|---------------------------|
| 1 | 2,2904 |
| 2 | 1,9423 |
| 3 | 2,0424 |

Realizado por: Freire W. 2019

3.1.3.3. Discusión de resultados para el ensayo de flexión según ASTM C393

En el ensayo de flexión para 3 puntos, las propiedades de los materiales y las caras centrales influyen directamente en el comportamiento del panel. Esta prueba también permite verificar el comportamiento de la interfaz entre el núcleo y las caras del panel.

Los gráficos 8-3, 9-3 y 10-3 muestran que los resultados obtenidos en los ensayos de flexión no son totalmente homogéneos para todas las series ensayadas ya que se observa que el aumento de la carga con respecto a la deflexión es no lineal hasta que el núcleo comienza a fallar bajo compresión y especialmente esfuerzos de corte. Una vez que se alcanza este punto, el panel comienza a comportarse de manera viscoelástica, cambiando la pendiente de la curva hasta que esté horizontal. Esta zona viscoelástica es muy corta debido a que el fallo de la lámina es instantáneo y la carga comienza a decrecer rápidamente.

En la tabla 33-3 se puede observar que la resistencia final al cizallamiento del núcleo de la serie 1 es mucho mayor al de las series 2 y 3 en un 15,2% y 10,8% respectivamente, esto se puede atribuir a la composición del panel ya que las series 2 y 3, que contiene un porcentaje del 20 y 30% de micropartículas de caucho respectivamente, muestran un núcleo más flexible ocasionando una reducción de la resistencia al corte mediante el fallo prematuro por aplastamiento.

Los resultados de resistencia final al cizallamiento del núcleo obtenidos para la serie 1, 2 y 3 son comparados con los expuestos por Marco Antonio Iza Alomoto en su trabajo titulado como “Modelación de un sistema estructural alternativo, prefabricado de bajo peso, para una vivienda de dos pisos (paneles metálicos con inyección de poliuretano de alta densidad)” de la Escuela Politécnica Nacional, donde el panel tipo sándwich que ensaya es fabricado industrialmente bajo un proceso de inyección con el control directo de la presión en el momento de la expansión de la espuma, mientras que los paneles utilizados en esta investigación se obtuvieron tras un proceso artesanal de colado. Entonces el valor de resistencia a cizallamiento que muestra Marco Antonio

Iza Alomoto es de 0,09 MPa, mientras que en nuestro caso es de 0,03272 MPa, indicando una variación del 75%. Esta variación se la puede atribuir al proceso de fabricación del panel; ya que en el proceso de colado como es en nuestro caso la densidad disminuye y junto con ello el valor de resistencia.

La comparación del esfuerzo en la cara del panel se la realiza con los resultados obtenidos por Daniel Fernando Garbín en su trabajo titulado “Efecto del material de la cara sobre las propiedades mecánicas de los paneles sándwich para aplicación en carretera” de la Universidad Federal de Rio Grande Do Sul, donde el esfuerzo de enfrentamiento obtenido fue de 4,97 MPa, mientras que en nuestro caso es de 2,2904 MPa, indicando una variación del 54%. Esta variación se debe a que el espesor de la lámina (1,9 mm) de la Universidad Federal de Rio Grande Do Sul es aproximadamente el doble que el espesor de la lámina de este estudio (1 mm). Esto indica que el esfuerzo de enfrentamiento está ligado directamente al espesor de la lámina, es decir, el esfuerzo de enfrentamiento es directamente proporcional al espesor de la lámina del panel.

En la tabla 29-3 se observa que el valor de deflexión máxima va disminuyendo según se va incrementando el contenido de micropartículas de caucho en el núcleo de poliuretano. Este efecto se debe a dos variables ocasionadas por el proceso de fabricación: por la poca uniformidad que se obtiene en el espesor al momento de fabricar las láminas de fibra de vidrio, esta diferencia del espesor entre cada probeta provoca que la deflexión sea variable y por el contenido de caucho presente en el núcleo, esto ocasiona un aumento de la densidad y por consiguiente una reducción en su capacidad de compresión, produciendo la falla de la lámina superior prematuramente por fractura sin ocasionar la falla completa del núcleo y así disminuyendo el valor de la deflexión.

La deflexión hallada de la serie 1, 2 y 3 es comparada con los resultados expuestos por Daniel Fernando Garbín de la Universidad Federal de Rio Grande Do Sul, donde el resultado obtenido fue de 28 mm para un espesor de probetas de 64 mm, mientras que en nuestro caso la deflexión máxima es de 21,26 mm para un espesor de 50mm. La diferencia existente entre ambos estudios no es muy elevada ya que su deflexión corresponde a la mitad del espesor de la probeta, es decir, los datos obtenidos en esta investigación van de acorde con los datos de la Universidad Federal de Rio Grande Do Sul.



Figura 5-3. Serie 1 después del ensayo de flexión

Realizado por: Freire W. 2019

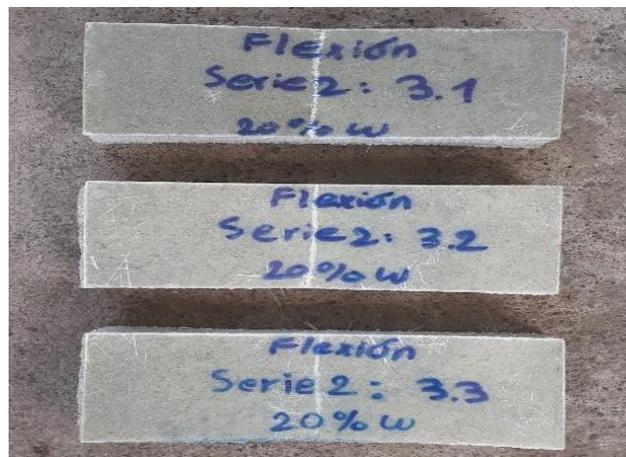


Figura 6-3. Serie 2 después del ensayo de flexión

Realizado por: Freire W. 2019



Figura 7-3. Serie 3 después del ensayo de flexión

Realizado por: Freire W. 2019

Cabe recalcar que el tipo de falla que se generó en todas las probetas ensayadas a flexión fue por fractura de la lámina superior y por aplastamiento del núcleo, dando lugar a la reducción de la resistencia final al cizallamiento. Esto indica que la capacidad de adhesión que posee el isocianato viene a ser excelente para la fabricación de este tipo de materiales compuestos.

3.2. Ensayos físicos

Las probetas fueron sometidas a pruebas de densidad e inflamabilidad según las normas ASTM C271 e ISO 3795 respectivamente para diferentes porcentajes de caucho.

3.2.1. Densidad

El valor de la densidad se la calcula mediante la ecuación:

$$D = \frac{P_p}{V} \quad (13)$$

Donde:

D = Densidad de la probeta, g/cm^3 ;

P_p = Peso de la probeta, g , y

V = Volumen de la probeta, cm^3 .

El volumen se calcula con la siguiente ecuación:

$$V = e \times b \times a \quad (14)$$

Donde:

e = Espesor de la probeta, mm ;

b = Ancho de la probeta, mm , y

a = Longitud de la probeta, mm .

Se trabajó con tres probetas de iguales dimensiones por cada serie. La densidad se la determinó tomando valores de masa y las dimensiones de las probetas (espesor, ancho y longitud). En la siguiente tabla se muestra los resultados obtenidos del valor de densidad para las diferentes series analizadas con anterioridad, además, se realizó la toma de densidad para probetas con un espesor de 13 mm.

Tabla 38-3: Resultados de la densidad del panel

| Tipo | Densidad | | Peso del panel por m^2 |
|-----------|------------|------------|--------------------------|
| | (g/cm^3) | (kg/m^3) | (kg/m^2) |
| Serie 1 | 0,08544 | 85,44 | 4,3249 |
| Serie 2 | 0,08897 | 88,97 | 4,4664 |
| Serie 3 | 0,09405 | 94,05 | 4,6551 |
| e = 13 mm | 0,2385 | 238,5 | 3,3774 |

Realizado por: Freire W. 2019

3.2.1.1. Discusión de resultados para el ensayo de densidad según ASTM C271

En el ensayo de densidad se puede notar que el contenido de micropartículas de caucho en la espuma de poliuretano influye directamente en el valor de densidad, en las probetas que poseen un mayor contenido de caucho, como son las series 2 y 3, se observa un aumento de la densidad del panel en un 4,13% para la serie 2 y 10,07% para la serie 3, esto se debe a que el caucho ocupa los espacios de aire que se genera al momento de la expansión de la espuma de poliuretano haciéndola más sólida y más pesada.

El cambio del valor de densidad para un menor espesor de panel es muy notorio, se observa que para un espesor de 13 mm la densidad aumenta en un 153,6 %. Esto se debe a que en el momento de verter la mezcla de polioliol e isocianato entre las láminas de fibra de vidrio, esta comienza a expandirse con dificultad debido a la poca disponibilidad de espacio que hay entre las láminas. Ya que el espesor es muy reducido la expansión de la espuma de poliuretano llega a tener una restricción, ocasionando un aumento de la presión y la expulsión del gas CO₂ producto de la reacción química entre el polioliol y el isocianato, debido a la expulsión de CO₂ la expansión tiende a ser más sólida dando lugar a un mayor peso y por ende una mayor densidad.

Los resultados de densidad obtenidos para la serie 1, 2 y 3 son comparados con los expuestos en el trabajo titulado “Modelación de un sistema estructural alternativo, prefabricado de bajo peso, para una vivienda de dos pisos (paneles metálicos con inyección de poliuretano de alta densidad)” de la Escuela Politécnica Nacional, donde se obtuvo un valor de densidad de $185,93 kg/m^3$, la variación existente entre ambos estudios se encuentra alrededor del 98%. Esta variación se debe al proceso de fabricación del panel sándwich, como se detalló en el capítulo 1 existen dos sistemas de producción de la espuma de poliuretano, por inyección y por proyectado o colado. En el

proceso por inyección se tiene un control nato de la presión en el momento que se produce la expansión de la espuma, teniendo así un núcleo más sólido y con menos contenido de CO2. Mientras que en el proceso por colado la expansión de la espuma se produce al ambiente sin tener un control de la presión, esto permite un mayor contenido de gases CO2 en el producto final y una reducción de su peso al igual que su densidad. Ya que en el presente estudio se realizó un proceso por colado, la reducción de la densidad es notoria en comparación con el trabajo realizado en la Escuela Politécnica Nacional.

3.2.2. Inflamabilidad

El ensayo de inflamabilidad tiene como objetivo determinar la tasa de combustión que posee un material determinado bajo ciertas condiciones de llama.

La tasa de combustión se la calcula mediante la ecuación:

$$B = \frac{s}{t_q} \times 60 \quad (15)$$

Donde:

B = Tasa de combustión, mm/min ;

s = Distancia quemada, mm , y

t_q = Tiempo para quemar la distancia s , seg .

En las siguientes tablas se detallan los valores obtenidos del ensayo de inflamabilidad y la tasa de combustión para 5 probetas sin caucho y 5 probetas con 20 % en peso de contenido de caucho.

Tabla 39-3: Resultados de los ensayos sin caucho

| Probeta | Distancia quemada (mm) | Tiempo de llama (s) | Velocidad de quemado (mm/min) | Aprueba (SI - NO) | |
|---------|----------------------------|-------------------------|-----------------------------------|-------------------|--|
| 1 | 98 | 325 | 18,0923 | x | |
| 2 | 286 | 854 | 20,0937 | x | |
| 3 | 269 | 793 | 20,3531 | x | |
| 4 | 267 | 786 | 20,3817 | x | |
| 5 | 264 | 949 | 16,6913 | x | |

Realizado por: Freire W. 2019



Figura 8-3. Probeta 1 después del ensayo de inflamabilidad

Realizado por: Freire W. 2019



Figura 9-3. Probeta 2 después del ensayo de inflamabilidad

Realizado por: Freire W. 2019



Figura 10-3. Probeta 3 después del ensayo de inflamabilidad

Realizado por: Freire W. 2019



Figura 11-3. Probeta 4 después del ensayo de inflamabilidad

Realizado por: Freire W. 2019



Figura 12-3. Probeta 5 después del ensayo de inflamabilidad

Realizado por: Freire W. 2019

Tabla 40-3: Resultados de los ensayos con 20% de contenido en caucho

| Probeta | Distancia quemada (mm) | Tiempo de llama (s) | Velocidad de quemado (mm/min) | Aprueba (SI - NO) | |
|---------|------------------------|---------------------|-------------------------------|-------------------|--|
| 1 | 251 | 1144 | 13,1643 | x | |
| 2 | 264 | 939 | 16,8690 | x | |
| 3 | 264 | 1079 | 14,6803 | x | |
| 4 | 268 | 994 | 16,1771 | x | |
| 5 | 262 | 1224 | 12,8431 | x | |

Realizado por: Freire W. 2019



Figura 13-3. Probeta 1 con 20 % de caucho

Realizado por: Freire W. 2019



Figura 14-3. Probeta 2 con 20 % de caucho

Realizado por: Freire W. 2019



Figura 15-3. Probeta 3 con 20 % de caucho

Realizado por: Freire W. 2019



Figura 16-3. Probeta 4 con 20 % de caucho

Realizado por: Freire W. 2019



Figura 17-3. Probeta 5 con 20 % de caucho

Realizado por: Freire W. 2019

Para determinar la tasa de combustión promedio se sumará todos los tiempos de quemado de las 5 o más probetas y se dividirá para el número de probetas.

Tabla 41-3: Velocidad de quemado promedio, sin caucho

| Probeta | Velocidad de quemado (mm/min) |
|----------|-------------------------------|
| 1 | 18,0923 |
| 2 | 20,0937 |
| 3 | 20,3531 |
| 4 | 20,3817 |
| 5 | 16,6913 |
| Promedio | 19,1224 |

Realizado por: Freire W. 2019

Tabla 42-3: Velocidad de quemado promedio, 20 % de caucho

| Probeta | Velocidad de quemado (mm/min) |
|----------|-------------------------------|
| 1 | 13,1643 |
| 2 | 16,8690 |
| 3 | 14,6803 |
| 4 | 16,1771 |
| 5 | 12,8431 |
| Promedio | 14,7468 |

Realizado por: Freire W. 2019

El promedio de la tasa de combustión del panel sándwich será comparada con las normas que se detallan en la siguiente tabla:

Tabla 43-3: Normas ecuatorianas para la comparación del índice de llama

| | |
|---|-------------------------------|
| Numeral 5.3.7 del RTE 041, Numeral 4.2.12 literal e del RTE 043 Numeral 5.1.2.7 literal d de la NTE 2205. | $(B \leq 250 \text{ mm/min})$ |
|---|-------------------------------|

Realizado por: Freire W. 2019

3.2.2.1. Discusión de resultados para el ensayo de inflamabilidad según ISO 3795

En la tabla 41-3 se puede observar que la velocidad de quemado promedio para el material compuesto tipo sándwich sin la presencia de partículas de caucho en el núcleo es de 19,1224 mm/min, muy inferior a la mínima requerida por las normas ecuatorianas especificadas en la tabla 43-3. Dando como resultado una baja tasa de combustión y permitiendo al material compuesto ser usado en autopartes. En la tabla 42-3 se observa que la velocidad de quemado para probetas con un 20% de contenido de caucho en el núcleo es de 14,7468 mm/min, siendo esta inferior a las probetas ensayadas sin contenido de caucho en un 22,88 %, dando a entender que la presencia

de contenido de micropartículas de caucho en el núcleo de espuma retardan la propagación de la flama ya que tienden a ocupar los espacios vacíos y eliminan así la presencia de oxígeno, el cual es el causante de la propagación de llama. Ya que la espuma de poliuretano es un material termo endurecedor, es decir, bajo condiciones de fuego este se carboniza y se endurece, forma una capa protectora de los extractos internos de la espuma.

Los resultados obtenidos en la presente investigación son comparados con los resultados del ensayo de inflamabilidad del trabajo de titulación “Diseño y Construcción del Equipo para Ensayos de inflamabilidad Aplicado a Materiales de Autopartes Según la Norma ISO 3795” de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, teniendo en cuenta los materiales utilizados en la conformación del panel tipo sándwich. Para la comparación se consideró el damasco de 2mm (100% algodón) + esponja de 2mm (poliuretano) y la fibra de vidrio + capa de pintura con una velocidad de combustión de 130,60 mm/min y 15,35 mm/min respectivamente (Padilla y Serrano 2013). Es muy notoria la variación de la velocidad de combustión entre el damasco + la espuma con el panel sándwich, se tiene una variación mayor del 100%, dando como resultado que el panel sándwich posee una menor tasa de combustión, ya sea con o sin la presencia de micropartículas de caucho en el núcleo. La variación de la tasa de combustión entre la fibra de vidrio + capa de pintura con el panel sándwich es muy pequeña, siendo esta menor del 4%.

La emanación de humos en las probetas con un contenido de micropartículas de caucho es mayor en comparación a las que no poseen caucho. Cabe recalcar que los humos productos de la combustión del poliuretano tipo PIR son menores a las del poliestireno como se indica en la siguiente tabla.

Tabla 44-3: Índice máximo de toxicidad del poliuretano

| ÍNDICE MÁXIMO DE TOXICIDAD CON COMBUSTIÓN A 800°C | | |
|--|-------------------------------------|-----------------------------|
| MATERIAL | ÍNDICE DE TOXICIDAD DEBIDO A | |
| | (Monóxido de Carbono) | (Dióxido de Carbono) |
| | CO | CO2 |
| POLIURETANO | 0,05 | <0,01 |
| MADERA (PINO) | 0,09 | 0,003 |
| POLIESTIRENO | 0,09 | 0.01 |

Fuente: (Iza, 2012, p.137)

Realizado por: Freire W. 2019

CONCLUSIONES

La síntesis de los paneles tipo sándwich se realizó mediante un proceso de colado para la producción de la espuma de poliuretano y cocurado para la unión entre el núcleo y las láminas de fibra de vidrio sin verse en la necesidad de usar un adhesivo entre estas, aprovechando la capacidad adhesiva misma del isocianato, teniendo así un producto final resistente tanto a cargas de compresión como de corte. Su fácil producción y factibilidad como aislante acústico permite un amplio campo de aplicación, ya sea desde estudios de sonido hasta en coliseos con el fin de direccionar el sonido y reducir el efecto del eco, además al darle un acabado superficial a la resina con la fibra de vidrio, el panel puede ser un sustituto del GYPSUM (cielo raso) con un bajo peso y costo reducido.

Ya que en el proceso de expansión de la espuma de poliuretano se tiene CO_2 como producto de la reacción química entre el polioliol y el isocianato, el mismo que se encarga de generar la estructura porosa, la adición de micropartículas de caucho tienden a rellenar estos pequeños espacios formando un núcleo más sólido, incrementando su densidad e impidiendo o dificultando el movimiento de dislocaciones.

El módulo de elasticidad se encuentra ampliamente relacionada con el contenido de micropartículas de caucho en el núcleo, a medida que el contenido de caucho aumenta el módulo de elasticidad disminuye brindando así flexibilidad al núcleo y reduciendo las probabilidades de falla por fragilidad. Para porcentajes de 20 y 30% de contenido en caucho el módulo de elasticidad se reduce en 37,6% y 39,06% respectivamente.

La adición de micropartículas de caucho en el núcleo en diferentes porcentajes produce una reducción del límite convencional de fluencia. Esto se debe a que se varía la densidad del núcleo, conllevando a una reducción de la pendiente del módulo de elasticidad y por consiguiente el límite convencional de fluencia. Para porcentajes de 20 y 30% de contenido en caucho se tiene una reducción del 44,5% para ambos casos.

El aumento de las micropartículas de caucho ocasionan que la deformación unitaria en $Sy_{0,2}$ se incremente, dando lugar a una reducción del valor de la pendiente y así brindando ductilidad al núcleo. Para porcentajes de 20 y 30% de contenido en caucho la deformación unitaria aumenta en 15% y 24% respectivamente.

Mediante el ensayo de compresión de borde se observó que la lámina de fibra de vidrio puede competir con la lámina de acero teniendo en consideración un espesor mayor o igual a 2 mm.

Mediante el ensayo de flexión en tres puntos se pudo determinar que la resistencia final al cizallamiento del núcleo de la serie 1 es mucho mayor al de las series 2 y 3 en un 15,2% y 10,8% respectivamente, esto se atribuye a la composición del panel ya que las series 2 y 3, que contiene un porcentaje del 20% y 30% de micropartículas de caucho respectivamente, muestran un núcleo más flexible ocasionando una reducción de la resistencia al corte mediante el fallo prematuro por aplastamiento. En conclusión, el valor de la resistencia final al cizallamiento esta netamente ligado a la composición del núcleo.

La diferencia que se visualiza en el esfuerzo de enfrentamiento entre cada serie se debe a la variación del espesor de la lámina que se obtiene en el proceso de fabricación, es decir, para tener una mayor valor del esfuerzo de enfrentamiento se debe incrementar el espesor de las láminas del panel.

La deflexión máxima obtenida en la serie 1 es muy superior a las obtenidas en las series 2 y 3 en 11% y 11,5% respectivamente, las mismas que poseen un contenido de micropartículas de caucho en el núcleo del 20% y 30%. Este efecto se debe a dos variables ocasionadas por el proceso de fabricación: una por la poca uniformidad que se obtiene en el espesor al momento de fabricar las láminas de fibra de vidrio, esta diferencia del espesor entre cada probeta provoca que la deflexión sea variable, y por el contenido de caucho presente en el núcleo ocasionado un aumento de la densidad, produciendo la falla de la lámina superior prematuramente por fractura sin ocasionar la falla completa del núcleo.

El valor de deflexión que se obtuvo en el presente estudio fue de 21,26 mm correspondiente al 42,52% de su espesor total, mientras que en el estudio realizado por Daniel Fernando Garbín en su trabajo titulado “Efecto del material de la cara sobre las propiedades mecánicas de los paneles sándwich para aplicación en carretera” fue de 28 mm que corresponde al 43,75% para un espesor de probetas de 64 mm. La deflexión de ambos estudios se encuentra alrededor del 42% y 43%, es decir, la deflexión total de las probetas ensayadas en esta investigación son muy semejantes a los datos obtenidos de la Universidad Federal de Rio Grande Do Sul.

Mediante el ensayo de densidad se observa que el contenido de micropartículas de caucho en el núcleo de espuma de poliuretano influye directamente en el valor de densidad, para las probetas que poseen un mayor contenido de caucho, como son las series 2 y 3, se observa un aumento de la densidad del panel en un 4,13% y 10,07% respectivamente.

Se identificó la influencia que tiene el proceso de producción de la espuma de poliuretano en su valor de densidad. Para un proceso de inyección, ya que se trabaja en un ambiente cerrado donde por efecto de la presión los gases de CO_2 productos de la reacción química entre el polioliol y el isocianato se escapan hacia el ambiente forman un núcleo más sólido y así el valor de la densidad

aumenta, mientras que en un proceso de colado se obtiene densidades bajas debido a la expansión al ambiente que tiene la espuma donde conserva la mayor cantidad de gases de CO_2 .

Debido a que la velocidad de quemado del panel tipo sándwich sin contenido de micropartículas de caucho en el núcleo es de 19,1224 mm/min, muy inferior a la mínima requerida por las normas ecuatorianas, se concluye que el panel posee una baja tasa de combustión permitiendo al material compuesto ser usado en vehículos de carretera, tractores, y maquinaria para la agricultura.

La velocidad de quemado para probetas con un 20% de contenido de caucho en el núcleo es de 14,7468 mm/min, siendo esta inferior a las probetas ensayadas sin contenido de caucho en un 22,88 %, esta reducción sucede ya que las micropartículas de caucho ocupan los espacios vacíos del núcleo de poliuretano eliminando así la presencia de pequeñas cantidades de oxígeno, el cual es el causante de la propagación de llama. Cabe recalcar que la adición de caucho en el panel sándwich incrementa la emisión de gases tóxicos.

La variación de la velocidad de combustión entre el damasco + la espuma con el panel sándwich es mayor del 100%, dando como resultado que el panel sándwich posee una menor tasa de combustión, ya sea con o sin la presencia de micropartículas de caucho en el núcleo. La variación de la tasa de combustión entre la fibra de vidrio + capa de pintura con el panel sándwich es muy pequeña, siendo esta menor del 4%. Ya que la espuma de poliuretano es un material termo endurecedor, es decir, bajo condiciones de fuego este se carboniza y se endurece, forma una capa protectora de los elementos a la cual la espuma recubre siendo así un material que no contribuye a la propagación del fuego.

El fallo predominante que se visualiza en el ensayo de compresión plana es por aplastamiento del núcleo sin tener ningún efecto en las caras del panel, mientras que en el ensayo de compresión de borde se observa fallos por compresión de la zona inferior, pandeo total del panel y por delaminación de las caras. En el ensayo de flexión en tres puntos se pudo notar que el fallo ocasionado fue por fractura de la lámina superior y por aplastamiento del núcleo.

RECOMENDACIONES

Se recomienda el uso de una máquina de mezclado para lograr una mayor uniformidad de la mezcla entre el polioli, isocianato y las micropartículas de caucho.

Al realizar el corte con la sierra vertical para la obtención de probetas en dimensiones establecidas por la norma, se recomienda realizar el corte con una sobremedida de al menos 2mm con el fin de evitar reducir sus dimensiones.

Se recomienda que la máquina universal esté calibrada antes de realizar los ensayos con el fin de obtener datos cercanos a la realidad.

Realizar ensayos de granulometría a las micropartículas de caucho para asegurar un tamaño uniforme y mejorar sus parámetros de dosificación para lograr mejores propiedades.

Estudiar la posibilidad de usar otros elementos compatibles como sustitutos para el caucho en el núcleo de espuma de poliuretano y nuevos materiales como láminas para conformar el panel tipo sándwich.

Se propone el estudio de nuevos métodos y procesos para la fabricación de la espuma de poliuretano donde se obtenga una mejora en sus propiedades tanto físicas como mecánicas.

La construcción o adquisición de una máquina trituradora de caucho para mayor capacidad con distintos tamaños de malla facilitaría el procesamiento y la obtención de micropartículas de caucho.

Se propone para una futura investigación la utilización de zeolita en combinación de las láminas de GFRP y comprobar sus propiedades mecánicas y físicas mediante los ensayos realizados en el presente estudio.

BIBLIOGRAFÍA

AKINDOYO, J.O. et al. "Polyurethane types, synthesis and applications-a review". *RSC Advances*, vol. 6, nº 115 (2016), pp. 114453-114482.

ALLEN, H.G. *Analysis and Design of Structural Sandwich Panels* [en línea]. London-Francia: University of Southampton, 1969. [Consulta: 20 septiembre 2019]. Disponible en: https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=2Z44BQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR1&dq=analysis+and+design+of+strutural+sandwich+panels&ots=vFoDqtf_3E&sig=OOBID0uvxCEuTo38cD5x9z3e_wo#v=onepage&q=analysis%20and%20design%20of%20strutural%20sandwich%20panels&f=false

ASOCIACIÓN TÉCNICA DE POLIURETANO APLICADO. *Libro Blanco del Poliuretano Proyectado* [en línea]. Madrid-España: Atepa, 2009. [Consulta: 20 Junio 2019]. Disponible en: http://www.construmecum.com/docsnormativa/4597_692.pdf.

ASTM C271. *Standard Test Method for Density of Sándwich Core Materials.*

ASTM C364. *Standard Test Method for Edgewise Compressive Strength of Sandwich Constructions.*

ASTM C365. *Standard Test Method for Flatwise Compressive Properties of Sandwich Cores.*

ASTM C393. *Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Constructions by Beam Flexure.*

BORQUE, A.M.; & LÓPEZ, M.N. "Materiales Compuestos - Composites" . *Universidad de Alcalá* [en línea], (2007), (España), pp. 1-17. [Consulta: 13 Julio 2019]. Disponible en: https://portal.uah.es/portal/page/portal/GP_EPD/PD-GP-MA-ASIG/PD-GP-ASIG-200637/TAB42359/Introducci%F3n%20Composites%20%28Alberto%20Moral%20%2B%20Marar%20Nogueira%29.pdf.

BOZANO, A.; & VERA, J.M. Análisis y método constructivo del panel metálico mixto con aislamiento termo-acústico en cubiertas [en línea] (Trabajo de titulación). (Tercer nivel) Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil-Ecuador. 2014. pp. 1-123. [Consulta: 23 Julio 2019]. Disponible en: <https://www.dspace.espol.edu.ec/retrieve/91585/D-68994.pdf>

BRANCO, F.A., et al. "GFRP sandwich panels with PU foam and PP Honeycomb cores for civil engineering structural applications". *Emerald* [en línea], 2012, (Lisbon-Portugal) vol. 3, pp. 127-147. [Consulta: 23 Julio 2019]. Disponible en: <https://sci-hub.tw/10.1108/17579861211235165>

CONSTRUMÁTICA. *Espuma de Poliuretano* [en línea]. 2018. [Consulta: 20 Julio 2019]. Disponible en: https://www.construmatica.com/construpedia/Espuma_de_Poliuretano#Propiedades_Ac.C3.BAsticas_de_la_Espuma_de_Poliuretano.

EUROPE, P. *Applications for polyurethane insulation* [en línea]. Bélgica: 2011. [Consulta: 20 Julio 2019]. Disponible en: https://www.pu-europe.eu/fileadmin/documents/Factsheets_public/Applications_for_polyurethane_insulation_-_Today_s_solution_for_tomorrow_s_needs__version_2011_.pdf.

FLECK, N.A.; & SRIDHAR, I. "End compression of sandwich columns". *Elsevier*, vol. 33, (2002), (Inglaterra) pp. 353-359.

ROMERO GALERA, Luisa. Estudio del comportamiento estructural de paneles sándwich empleados en el carenado de aviones comerciales [en línea] (Trabajo de titulación). (Tercer nivel) Universidad de Sevilla, Andalucía-España. 2010. pp. 4-144. [Consulta: 23 Julio 2019]. Disponible en: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/4860/direccion/VOLUMEN+1%252F>

GONZÁLEZ ACEVEDO, M.; & RIVADA VÁZQUEZ, M.L. "Caracterización de la espuma rígida de poliuretano expandido como impermeabilizante de cubiertas". *Revista de Arquitectura e Ingeniería*, vol. 10, no. 3 (2016), (Cuba) pp. 1-13.

GRAU, M. *Propiedades de la espuma de poliuretano* [en línea]. 06 de Septiembre, 2009. [Consulta: 23 Julio 2019]. Disponible en: <https://monikagrau2.blogspot.com/2009/09/propiedades-de-la-espuma-de-poliuretano.html>.

IPUR. *¿Se pueden aplicar otros materiales sobre el poliuretano proyectado?* [en línea]. 19 de Febrero, 2019. [Consulta: 23 Julio 2019]. Disponible en: <https://aislaconpoliuretano.com/se-pueden-aplicar-otros-materiales-directamente-sobre-el-poliuretano-proyectado.htm>.

ISO 3795. *Vehículos de carretera y tractores y maquinaria para la agricultura y silvicultura: determinación de los comportamientos de combustión de los materiales interiores.*

IZA ALOMOTO, Marco Antonio. Modelación de un sistema estructural alternativo, prefabricado de bajo peso, para una vivienda de dos pisos. (Paneles metálicos con inyección de poliuretano de alta densidad) [en línea] (Trabajo de titulación). (Tercer nivel) Escuela Politécnica Nacional, Quito-Ecuador. 2012. pp. 1-277. [Consulta: 23 Julio 2019]. Disponible en: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/5986/1/CD-4765.pdf>

MONGE PONTON, Alex Guillermo. Diseño de un panel sándwich semi-ligero con aislamiento de fibra natural proveniente del Ecuador que supere las prestaciones de los paneles existentes actualmente en el mercado, en base a parámetros térmicos, acústicos y de respeto por el medio ambiente [en línea] (Trabajo de titulación) (Maestría). Universidad de Cuenca, Cuenca-Ecuador.

2016. pp. 1-136. [Consulta: 23 Julio 2019]. Disponible en: <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/23944/1/tesis%2015-03-16final.pdf>

ORIFICI, A.C. et al. "Review of methodologies for composite material modelling incorporating failure". *Elsevier*, vol. 86, (2008), (Australia) pp. 194-210.

MALAVIA OTERO, Juan Maria. Caracterización de paneles sandwich híbridos frp con alma de nido de abeja de aluminio [en línea] (Trabajo de titulación) (Maestría). Universidad Politécnica de Valencia, Valencia-España. 2012. pp. 1-146. [Consulta: 23 Julio 2019]. Disponible en: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/18052/Tesis.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

PADILLA PORRAS, Diego Mauricio, & SERRANO AGUIAR, Carlos Oswaldo. Diseño y Construcción del Equipo para Ensayos de Inflamabilidad Aplicado a Materiales de Autopartes Según la Norma ISO 3795 (Trabajo de titulación) (Tercer nivel). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba-Ecuador. 2013. pp. 1-136.

PÉREZ ESPARZA, Diego Fabricio. Estudio de factibilidad para la producción y comercialización de espumas flexibles de poliuretano en la ciudad de Ambato (Trabajo de titulación) (Tercer nivel). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba-Ecuador. 2015. pp. 1-107.

PÉREZ, Marco Antonio, & SÁNCHEZ, Montserrat. "Fundamentos de la mecánica de los materiales compuestos". *Omnia* [en línea], 2014, (España), pp. 19-50. [Consulta: 23 Agosto 2019]. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/23648/200-663-1-PB.pdf>

ROBLES ROMERO, Andrés Leonardo, & CASTILLO CASTILLO, Germán Daniel. Modelación de un sistema estructural prefabricado de bajo peso sometido a cargas sísmicas para la construcción de viviendas [en línea] (Trabajo de titulación) (Tercer nivel). Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá-Colombia. 2005. pp. 1-140. [Consulta: 13 Junio 2019]. Disponible en: <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/7449/tesis121.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

TUWAIR, H. et al. "Evaluation of sandwich panels with various polyurethane foam-cores and ribs". *Elsevier* [en línea], 2015, (United State of America) vol. 79, pp. 262-276. [Consulta: 24 Junio 2019]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.04.023>

VADAKKE, V.; & CARLSSON, L.A. "Experimental investigation of compression failure of sandwich specimens with face/core debond". *Elsevier*, vol. 35, (2004), (United State of America) pp. 583-590.

YEH, W. ; & WU, Y. "Enhancement of buckling characteristics for sandwich structure with fiber

reinforced composite skins and core made of aluminum honeycomb and polyurethane foam".
Elsevier, vol. 15, (1991), (Taiwan) pp. 63-74.

ZENKERT, D. *An introduction to sandwich construction* [en línea]. Segunda edición. London-Francia: Engineering Materials Advisory Services, 1995. [Consulta: 18 Junio 2019]. Disponible en: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1366182/FULLTEXT01.pdf>