

**ESTUDIO DE VIABILIDAD PARA LA ELABORACIÓN DE TEJA ECOLÓGICA,  
OBTENIDO A BASE DE MATERIAL GRANULADO RECICLADO DE LLANTA.**



**AUTOR**

LISFAVER CASTRO DÍAZ  
NANCY RUTH QUIROZ SÁNCHEZ

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:

**INGENIERO CIVIL**

Director:

**MIGUEL ANGEL OSPINA GARCIA**

**UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA**

**FACULTAD DE ESTUDIOS A DISTANCIA**

**PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL**

**BOGOTÁ, 10 MAYO 2021**

**Dedicatoria**

*Con la promesa viva, siempre a la  
voluntad de nuestro padre Dios de  
cumplir los sueños, junto a mis seres  
amados en el camino de la vida en busca  
de la felicidad.*

*Lisfaver Castro Díaz.*

*A todas aquellas personas que me  
acompañaron a realizar este sueño.*

*Dios los bendiga.*

*Nancy Quiroz Sánchez*

**Agradecimientos**

A Miguel Ángel Ospina García, ingeniero civil, especialista en Gerencia de la Calidad, Magister en Construcción, docente de la Universidad Militar Nueva Granada, por su dedicación y especial contribución en la dirección de este proyecto.

A los docentes de la facultad de estudios a distancia FAEDIS, de la Universidad Militar Nueva Granada, por la dedicación y el esfuerzo que hacen continuamente en la formación de futuros profesionales de la Ingeniería Civil.

## Resumen

Los neumáticos que se encuentran fuera de uso, se convierten en un producto altamente contaminante debido a la dificultad que ocasiona su degradación, esto afecta el medio ambiente y la salud pública; sin embargo existen en Colombia empresas dedicadas a su aprovechamiento, las cuales a partir de procesos de recolección, almacenamiento, trituración, granulación, separación del acero, clasificación y molienda, obtienen el granulo de caucho que es utilizado en la producción de pavimento asfáltico, láminas aislantes de vibración, césped artificial para campos de juegos, pistas de atletismo, cubiertas, pisos antideslizantes y materiales para fabricación de cubiertas en construcciones.

El presente trabajo de investigación, tiene como finalidad determinar una alternativa de aprovechamiento y reutilización del gránulo de caucho reciclado en la elaboración de un material de construcción tipo teja para cubiertas en edificaciones de baja altura, que contribuya a la preservación del medio ambiente y el desarrollo sostenible como aporte al campo de la Ingeniería Civil, utilizando como referente la teja elaborada en cerámica que se distribuye y se utiliza en el país, con la documentación técnica y las leyes que la regulan.

La selección de la alternativa que muestra la viabilidad del material, se basa en el análisis de resultados obtenidos en laboratorio, para el ensayo de resistencia, aplicado a los prototipos elaborados en la prueba número 10, fabricados con material granulado de caucho reciclado (GCR) mezclado con catalizador (Mek) y resina poliéster, con un acabado de capa de resina adicional y capa de pintura base de aceite, cuyos valores oscilaron entre 10,16 kPa y 13,54 kPa, los cuales comparados con los análisis entregados en la misma prueba realizada a tejas de cerámica curva, que se comportan como un material convencional y funcional, presentaron resultados entre 10,83 kPa y 79,26 kPa.

Finalmente, el estudio para la elaboración del material se considera viable, por los resultados obtenidos en cuanto a resistencia del material, peso y durabilidad y disminución de emisiones contaminantes que inciden en el medio ambiente.

Palabras clave: Reutilización, residuos sólidos, material de construcción, desarrollo sostenible, medio ambiente.

## **Abstract**

Tires that are out of use, become a highly polluting product due to the difficulty caused by their degradation, this affects the environment and public health; However, there are companies in Colombia dedicated to its use, which from the collection, storage, crushing, granulation, steel separation, classification and grinding processes, obtain the rubber granule that is used in the production of asphalt pavement, sheets vibration isolators, artificial grass for playgrounds, athletics tracks, roofs, non-slip floors and materials for the manufacture of roofs in buildings.

The purpose of this research work is to determine an alternative for the use and exploitation of the recycled rubber granule in the elaboration of a tile-type construction material for roofs in low-rise buildings, which contributes to the preservation of the environment and development sustainable as a contribution to the field of Civil Engineering, using as a reference the ceramic tile that is distributed and used in the country, with the technical documentation and laws that regulate it.

The selection of the alternative that shows the viability of the material is based on the analysis of results obtained in the laboratory, for the resistance test, applied to the prototypes elaborated in test number 10, manufactured with granulated recycled rubber material (GCR) mixed with catalyst (Mek) and polyester resin, with an additional resin layer finish and an oil-based paint layer, whose values ranged between 10.16 kPa and 13.54 kPa, which compared to the analyzes provided in the same test carried out on curved ceramic tiles, which behave as a conventional and functional material, showed results between 10.83 kPa and 79.26 kPa.

Finally, the study for the elaboration of the material is considered viable, due to the results obtained in terms of resistance of the material, weight and durability and reduction of polluting emissions that affect the environment.

Keywords: Reuse, solid waste, construction material, sustainable development, environment.

## Tabla de contenido

<b>Introducción.....</b>	<b>17</b>
<b>Objetivos.....</b>	<b>19</b>
Objetivo General .....	19
Objetivos Específicos.....	19
<b>Problema .....</b>	<b>20</b>
Planteamiento del problema .....	20
Antecedentes del problema .....	20
Pregunta de Investigación.....	21
<b>Marco Teórico.....</b>	<b>22</b>
Antecedentes del Reciclado de Caucho de Llanta.....	22
Granulo de Caucho Reciclado (GCR) .....	23
Resinas .....	26
Resina de Poliuretano .....	26
Resina de Poliestireno Expandido .....	27
Resina de Poliéster.....	27
Xilol.....	27
Metil Etil Cetona (MEK).....	28
<b>Metodología.....</b>	<b>30</b>
<b>Elaboración de Teja Ecológica a Base de material Granulado Reciclado de llanta Fase 1</b>	<b>34</b>
Procedimiento .....	34
Observaciones realizadas .....	39
<b>Elaboración de Teja Ecológica a Base de material Granulado Reciclado de llanta Fase 2</b>	<b>43</b>
Procedimiento .....	43

Observaciones realizadas .....	46
Prueba de resistencia .....	50
<b>Elaboración de Teja Ecológica a Base de material Granulado Reciclado de llanta Fase 3</b>	<b>57</b>
Procedimiento prueba No 9 .....	57
Observaciones realizadas .....	59
Procedimiento prueba No 10 .....	60
Observaciones realizadas .....	63
Prueba de resistencia .....	64
Datos Obtenidos en la prueba de resistencia .....	67
<b>Cálculos .....</b>	<b>70</b>
Calculo del esfuerzo (T) .....	80
Resistencia al impacto .....	114
Absorción y Permeabilidad .....	115
Análisis de resultados .....	119
Conclusiones .....	122
Recomendaciones .....	123
Bibliografía .....	124
Anexos .....	127

**Lista de Tablas**

<b>Tabla 1</b> Dosificación de materiales .....	38
<b>Tabla 2</b> Proporción de materiales .....	38
<b>Tabla 3</b> Tiempos de Fraguado .....	39
<b>Tabla 4</b> Observaciones, pruebas 1-4 .....	39
<b>Tabla 5</b> Dosificación de materiales .....	45
<b>Tabla 6</b> Proporción de materiales .....	45
<b>Tabla 7</b> Tiempo de fraguado .....	46
<b>Tabla 8</b> <i>Observaciones – pruebas 5-8</i> .....	46
<b>Tabla 9</b> Prueba de resistencia .....	51
<b>Tabla 10</b> Datos - deformación.....	55
<b>Tabla 11</b> Dosificación de materiales .....	59
<b>Tabla 12</b> Proporción de materiales .....	59
<b>Tabla 13</b> Observaciones prueba No. 9 .....	59
<b>Tabla 14</b> Dosificación de materiales .....	61
<b>Tabla 15</b> Observaciones, prueba No.10 .....	63
<b>Tabla 16</b> Prototipo 1-5 .....	67
<b>Tabla 17</b> Prototipo 6-10 .....	68
<b>Tabla 18</b> Prototipo 11.....	68
<b>Tabla 19</b> Prototipo 12.....	68
<b>Tabla 20</b> Prototipo 13-15 .....	69
<b>Tabla 21</b> Prototipo 16-18 .....	69
<b>Tabla 22</b> Datos software AutoCAD .....	72
<b>Tabla 23</b> <i>Variación del peso</i> .....	112
<b>Tabla 24</b> Observaciones realizadas.....	115

<b>Tabla 25</b> Observaciones ensayo absorción .....	116
<b>Tabla 26</b> Observaciones realizadas.....	118

**Lista de Figuras**

<b>Figura 1</b> Asfalto modificado con caucho por vía húmeda .....	24
<b>Figura 2</b> Asfalto modificado con caucho por vía seca .....	24
<b>Figura 3</b> Carretera Ecológica.....	25
<b>Figura 4</b> Recubrimiento para superficies .....	25
<b>Figura 5</b> Tejas con caucho Reciclado de Neumático.....	26
<b>Figura 6</b> Materia prima .....	34
<b>Figura 7</b> Elaboración formaleta .....	36
<b>Figura 8</b> Proceso de mezcla.....	36
<b>Figura 9</b> Formaleta y vaciado de mezcla.....	38
<b>Figura 10</b> Prueba 1.....	41
<b>Figura 11</b> Prueba 2.....	41
<b>Figura 12</b> Prueba 3.....	41
<b>Figura 13</b> Prueba 4.....	42
<b>Figura 14</b> <i>Materia prima</i> .....	43
<b>Figura 15</b> Proceso de mezcla.....	45
<b>Figura 16</b> Vaciado y fraguado de mezcla .....	46
<b>Figura 17</b> Prueba No. 5 .....	48
<b>Figura 18</b> Prueba No. 6 .....	49
<b>Figura 19</b> Prueba No.7 .....	49
<b>Figura 20</b> Prueba No.8 .....	49
<b>Figura 21</b> Máquina Universal de Ensayos .....	50
<b>Figura 22</b> Prueba No.1, vista frontal .....	52
<b>Figura 23</b> Prueba No.1, vista lateral .....	52
<b>Figura 24</b> Reporte de datos.....	53

<b>Figura 25</b> Prueba No.2 .....	53
<b>Figura 26</b> Prueba No.3, cargas controladas .....	54
<b>Figura 27</b> Prueba No.3, cargas controladas .....	54
<b>Figura 28</b> Gráfica Peso vs Deformación.....	55
<b>Figura 29</b> Grafica Deformación vs Tiempo .....	56
<b>Figura 30</b> Resina de poliestireno expandido .....	57
<b>Figura 31</b> Formaleta .....	60
<b>Figura 32</b> Prototipo obtenido .....	60
<b>Figura 33</b> Mezcla, prueba No.10 .....	61
<b>Figura 34</b> Formaleta con mezcla .....	61
<b>Figura 35</b> Prototipo obtenido .....	63
<b>Figura 36</b> Prototipo con pintura .....	64
<b>Figura 37</b> Prototipo a la intemperie.....	64
<b>Figura 38</b> Prototipo con acabado resina poliéster y pintura.....	66
<b>Figura 39</b> Prototipo con acabado resina poliéster .....	66
<b>Figura 40</b> Teja de cerámica curva .....	66
<b>Figura 41</b> Prototipo fallado .....	67
<b>Figura 42</b> Esfuerzo aplicado.....	70
<b>Figura 43</b> Diagrama de fuerza cortante.....	70
<b>Figura 44</b> Diagrama de momento flector .....	71
<b>Figura 45</b> Representación sección transversal.....	72
<b>Figura 46</b> Momento vs sección.....	81
<b>Figura 47</b> Tensión vs sección.....	82
<b>Figura 48</b> Momento vs sección.....	83
<b>Figura 49</b> Tensión vs sección.....	83

<b>Figura 50</b> Momento vs sección.....	85
<b>Figura 51</b> Tensión vs sección.....	85
<b>Figura 52</b> Momento vs sección.....	86
<b>Figura 53</b> Tensión vs sección.....	87
<b>Figura 54</b> Momento vs sección.....	88
<b>Figura 55</b> Tensión vs sección.....	88
<b>Figura 56</b> Momento vs sección.....	90
<b>Figura 57</b> Tensión vs sección.....	90
<b>Figura 58</b> Momento vs sección.....	91
<b>Figura 59</b> Tensión vs sección.....	92
<b>Figura 60</b> Momento vs sección.....	93
<b>Figura 61</b> Tensión vs sección.....	93
<b>Figura 62</b> Momento vs sección.....	95
<b>Figura 63</b> Tensión vs sección.....	95
<b>Figura 64</b> Momento vs sección.....	97
<b>Figura 65</b> Tensión vs sección.....	97
<b>Figura 66</b> Tensión vs sección.....	99
<b>Figura 67</b> Movimiento vs sección.....	101
<b>Figura 68</b> Tensión vs sección.....	101
<b>Figura 69</b> Momento vs sección.....	102
<b>Figura 70</b> Tensión vs sección.....	103
<b>Figura 71</b> Momento vs sección.....	104
<b>Figura 72</b> Tensión vs sección.....	104
<b>Figura 73</b> Momento vs sección.....	106
<b>Figura 74</b> Tensión vs sección.....	106

<b>Figura 75</b> Momento vs sección.....	107
<b>Figura 76</b> Tensión vs sección.....	108
<b>Figura 77</b> Momento vs sección.....	109
<b>Figura 78</b> Tensión vs sección.....	109
<b>Figura 79</b> Prototipo 3.....	110
<b>Figura 80</b> Prototipo 11.....	110
<b>Figura 81</b> Prototipo 12.....	111
<b>Figura 82</b> Resistencia máxima Obtenida.....	111
<b>Figura 83</b> Variación del peso.....	112
<b>Figura 84</b> Resistencia máxima obtenida.....	113
<b>Figura 85</b> Variación del peso.....	113
<b>Figura 86</b> Montaje prueba de resistencia al impacto.....	114
<b>Figura 87</b> Prototipo después del ensayo.....	114
<b>Figura 88</b> Ensayo absorción y permeabilidad.....	115
<b>Figura 89</b> Porcentaje de absorción.....	116
<b>Figura 90</b> Montaje ensayo de permeabilidad.....	117
<b>Figura 91</b> Porcentaje de permeabilidad.....	117

**Lista de Diagramas**

<b>Diagrama 1</b> Metodología Fase I .....	31
<b>Diagrama 2</b> Metodología Fase II .....	32
<b>Diagrama 3</b> Metodología Fase III .....	33
<b>Diagrama 5</b> Diseño de mezcla .....	37
<b>Diagrama 6</b> Diseño de mezcla .....	44
<b>Diagrama 7</b> Diseño de mezcla .....	58
<b>Diagrama 8</b> Diseño de mezcla .....	62
<b>Diagrama 9</b> Prueba de resistencia .....	65

**Lista de cuadro de cálculos**

<b>Cuadro de cálculo 1</b> Prototipo 1 - $P=0,15$ kN .....	80
<b>Cuadro de cálculo 2</b> Prototipo 2 y 3 - $P= 0,18$ kN .....	82
<b>Cuadro de cálculo 3</b> Prototipo 4 - $P= 0,20$ kN .....	84
<b>Cuadro de cálculo 4</b> Prototipo 5 - $P=0,19$ kN .....	85
<b>Cuadro de cálculo 5</b> <i>Prototipo 6 - <math>P=0,16</math> kN</i> .....	87
<b>Cuadro de cálculo 6</b> Prototipo 7 - $P=0,57$ kN .....	89
<b>Cuadro de cálculo 7</b> Prototipo 8 - $P=1,17$ kN .....	90
<b>Cuadro de cálculo 8</b> Prototipo 9 - $P=0,22$ kN .....	92
<b>Cuadro de cálculo 9</b> Prototipo 10 - $P=0,49$ kN .....	93
<b>Cuadro de cálculo 10</b> Prototipo 11 - $P=0,18$ kN .....	95
<b>Cuadro de cálculo 111</b> Prototipo 12 - $P=0,20$ kN .....	98
<b>Cuadro de cálculo 122</b> Prototipo 13 - $P=0,51$ kN .....	100
<b>Cuadro de cálculo 133</b> Prototipo 14 - $P=0,81$ kN .....	101
<b>Cuadro de cálculo 144</b> Prototipo 15 - $P=0,65$ kN .....	103
<b>Cuadro de cálculo 155</b> Prototipo 16 - $P=1,23$ kN .....	105
<b>Cuadro de cálculo 16</b> Prototipo 17 - $P=1,88$ kN .....	106
<b>Cuadro de cálculo 17</b> Prototipo 18 - $P=1,40$ kN .....	108

**Lista de Anexos**

**Anexo A** Norma Técnica NTC 2086 ..... 127

## Introducción

La presente investigación hace referencia al uso del granulo reciclado de llanta, material sustentable, con excelentes características de maleabilidad y polivalencia, obtenido a partir del proceso de trituración mecánica de neumáticos en desuso y materia prima para la elaboración de un tipo de teja que será utilizada como cubierta para construcciones de baja altura, su viabilidad lo constituye como un material de construcción con características ecológicas, amigable con el medio ambiente, de calidad y elaborado mediante un proceso de fácil implementación.

En relación al tema, existen estudios realizados por el Centro Experimental de Vivienda Económica (CEVE, CONOCET-AVE) a cerca de la elaboración de una teja con caucho y polietileno reciclados, fabricada a través de un proceso de termo-moldeo con compactación, utilizando un equipo de prensa con temperatura; para ser utilizadas en la construcción de cubiertas inclinadas con estructura de madera, las cuales presentan ventajas ecológicas por el uso de residuos, y ventajas técnicas por ser tejas más livianas y resistentes a la flexión (Peisino, Gaggino, Kreiker, Sánchez, & Arguello, 2017).

Otro aporte al estudio, está relacionado con la investigación realizada por Pamela Hidalgo, estudiante de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Las Américas UDLA en Quito, quien ha elaborado un tipo de teja que contiene polvo de caucho proveniente de llantas usadas, (El Universo, 2018).

La viabilidad de obtener la teja con éste material constituye un aporte para disminuir la contaminación ambiental, reducir el costo en la construcción de vivienda al impactar el valor de inversión de la cubierta, el incremento en el aprovechamiento del gránulo de caucho reciclado, la creación de empresas de economía autosustentable y la generación de empleo.

Entre las causas que impulsaron la realización de este proyecto, se encuentra la implementación de un material de construcción a partir del uso de material reciclado, reemplazando aquellos cuyo origen se establece en recursos naturales no renovables, el incremento de la contaminación ambiental que genera la disposición final de las llantas en desuso, afectando cuerpos de agua como ríos, quebradas, caños, humedales, baldíos, que se convierten en el lugar apto para la reproducción de vectores transmisores de enfermedades que desmejoran la salud pública.

La investigación se realizó por el interés de obtener un material ecológico innovador a partir del granulo reciclado de caucho, mezclado con el producto químico Mek (Metil, etil acetona) solvente orgánico que pertenece a la familia de las acetonas, de presentación líquida, incoloro y olor similar a la acetona (Brugues, 2016) y resina poliéster, con la finalidad de elaborar un tipo de teja de dimensiones similares a las de la teja cerámica curva convencional y con base en la normatividad existente para su elaboración.

Es una investigación de tipo exploratorio comparativo, en la primera fase se obtiene la mezcla adecuada a partir de la realización de varias pruebas en las cuales se modifica la dosificación y la proporción del granulo de caucho reciclado y el solvente, la mezcla ideal se obtiene cuando al desmoldar el prototipo, éste es completamente sólido, compacto y resistente, la segunda fase corresponde al desarrollo de pruebas de laboratorio, el análisis de resultados respecto al comportamiento de las propiedades físicas del prototipo, ventajas y desventajas del material obtenido.

La finalidad del proyecto está encaminada a estudiar la viabilidad del uso del residuo sólido producto del reciclaje de llanta, en la elaboración de un material de construcción ecológico para la fabricación de elementos de cubiertas más conocido como tipo teja, que cumpla con características funcionales similares o superiores al de la teja cerámica curva convencional.

El informe consta de cinco capítulos, el primero contiene el marco teórico donde se referencian antecedentes históricos correspondientes al estudio del granulo de caucho reciclado y se dan a conocer aspectos generales de los productos industriales empleados como solvente en el proceso de mezcla.

El segundo capítulo (fase uno) corresponde al procedimiento, observaciones, análisis y resultados de los ensayos realizados en los prototipos elaborados con granulo de caucho reciclado, producto químico xilol y resina de poliuretano, obteniendo muestras no aptas para pruebas de laboratorio.

El tercer capítulo (fase dos) hace referencia al procedimiento, observaciones, análisis de resultados obtenidos en laboratorio, en los prototipos elaborados con granulo de caucho reciclado, producto químico xilol y resina de poliuretano, en dosificación modificada, con relación a la fase uno, aquí los resultados obtenidos determinan la necesidad de realizar modificaciones en el uso de productos químicos solventes y la variación en la proporción de los materiales, haciéndose necesaria la realización de una tercera fase.

El cuarto capítulo hace referencia al procedimiento, observaciones, análisis de resultados obtenidos en la prueba de resistencia, realizada a los prototipos elaborados en la fase tres, a partir de la mezcla de granulo reciclado de caucho, Mek y resina poliéster, obteniendo resultados favorables, comparados con los resultados obtenidos con las tejas de cerámica curvas, elaboradas con material convencional que se sabe funciona.

El quinto capítulo corresponde al cálculo de la resistencia del material, basado en los datos obtenidos en las pruebas de la fase tres, apoyados con el software AutoCAD y las hojas de cálculo Excel, así mismo, los resultados obtenidos en los ensayos de resistencia al impacto, absorción y permeabilidad, en los cuales se obtuvo resultados favorables del material elaborado, con base en la norma técnica NTC 2086, finalmente se establecen conclusiones, basadas en el cumplimiento de los objetivos trazados.

## **Objetivos**

### **Objetivo General**

Estudiar la viabilidad del uso del residuo sólido producto del reciclaje de llanta vehicular, en la elaboración de un material de construcción ecológico tipo teja, sometido a prueba de resistencia mecánica, resistencia al impacto, absorción y permeabilidad, para ser implementado como cubierta en construcciones de baja altura y aporte a la reducción de los niveles de contaminación ambiental.

### **Objetivos Específicos**

Realizar mezcla del granulo de caucho reciclado con solvente, en condiciones ambientales normales, para minimizar la propagación de vapores contaminantes con el medio ambiente.

Obtener la mezcla ideal en dosificación y proporción del granulo reciclado caucho, solvente resina poliéster y catalizador Mek en la elaboración de teja tipo ecológica y determinar la viabilidad de su implementación como material de construcción amigable con el medio ambiente.

Evaluar el material de construcción obtenido, mediante pruebas mecánicas en laboratorio y establecer su funcionalidad, respecto a materiales de construcción convencionales con características similares de acuerdo a la normatividad vigente.

## **Problema**

### **Planteamiento del problema**

El índice de contaminación ambiental se incrementa con el paso del tiempo, una de las causas que lo origina, esta relaciona con las malas prácticas en la disposición final de los neumáticos fuera de uso (NFU) esta situación, genera la necesidad de desarrollar alternativas encaminadas al aprovechamiento de productos como el granulo de caucho reciclado (GCR) obtenido a partir del proceso de trituración mecánica del neumático, para ser utilizado como materia prima en la fabricación de nuevos productos de calidad, que aporten en la industria de la construcción y sean amigables con el medio ambiente.

### ***Antecedentes del problema***

De acuerdo con (Meza Rodriguez, 2018) al año el mundo genera 1000 millones de neumáticos y existen 4000 millones en vertederos, según señala el “Informe de Gestión de neumáticos al final de su vida útil”, realizado por el Consejo Empresarial Mundial para el Desarrollo Sostenible; citando además que países como Estados Unidos, Corea del Sur y algunos de Europa, tienen una tasa de aprovechamiento de neumáticos fuera de uso (NFU) del 85%, mientras que en países como México se aprovecha solo el 10% de las 40 millones que produce al año.

En Colombia según (Patiño & Rodriguez Ramos, 2017) se generan 6,5 millones de neumáticos fuera de uso al año, de los cuales la tasa de aprovechamiento corresponde al 30%, realizado éste, mediante la implementación de mecanismos efectivos que permitan disminuir la contaminación ambiental y reglamentado por resolución 1457 de 2010, expedida por el ministerio del Medio Ambiente, Vivienda, Desarrollo y Territorio, “por la cual se establecen los Sistemas de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de llantas usadas”.

El granulo de caucho reciclado (GCR) es aprovechado en el país, como relleno de fibra sintética y como capa de base la superficie del césped artificial para campos deportivos o como piso para parques infantiles, pistas de atletismo, bandas de retención de tráfico, pisos antideslizantes, fabricación de suelas para el calzado, adoquines, asfalto modificado para pavimento flexible, entre otros.

Con el desarrollo de éste proyecto se busca establecer la viabilidad del uso del GCR, para obtener un material, que a través de una mezcla ideal, permita la elaboración de una teja ecológica, que cumpla con la norma técnica vigente y que aporte a la reducción de los niveles de contaminación ambiental.

**Pregunta de Investigación**

¿Es viable el uso del material granulado, producto del reciclaje de llanta en desuso, para la elaboración de teja ecológica, que permita ser utilizada en cubiertas para construcciones de baja altura, cumpliendo la norma técnica vigente y que aporte a la reducción de los niveles de contaminación ambiental?

## Marco Teórico

### Antecedentes del Reciclado de Caucho de Llanta

El uso de partículas de granulo de caucho reciclado de llanta en la elaboración de elementos constructivos a nivel nacional e internacional es relativamente reciente, entre los antecedentes más relevantes se consideran los citados en artículos académicos que dan a conocer las ventajas de utilizar neumáticos en desuso para proyectos de ingeniería en zonas de inundación y de defensa costera, considerando el tema de la lixiviación de los compuestos de las llantas (Collins, Limbachilla, & Roberts, 2015).

Posteriormente en la Conferencia Internacional de Desarrollo de Bajo Impacto realizada en el año 2010 se trató el tema del uso de migas de caucho, producto de los neumáticos, con el cual se buscaba mejorar la porosidad en el lleno de aire en los sustratos que hacen parte de los techos verdes empleados en las cubiertas (Ristvey, Solano, Wharton, Cohan, & Lea-Cox, 2010).

Según Naser (2015) el Centro Experimental de Vivienda Económica (CEVE, CONOCET-AVE) detalla, como a partir del granulo de caucho de neumáticos en desuso fusionado con plástico actuando como ligante, sometido a un proceso de mezcla y compactación realizado en una máquina extrusora y una prensa para comprimir, se elabora un tipo de teja de calidad, componente principal del programa “un proyecto sin techo”, que se realiza en Argentina.

Posteriormente, se ratifica en el artículo “Tejas con caucho reciclado de neumáticos” (Ecomundo, 2018) que el CEVE, CONOCET-AVE ha desarrollado un método para fabricación de tejas con caucho reciclado, producto que ha resultado ser más liviano, flexible, resistente al granizo y con gran capacidad de aislamiento e impermeabilidad, además de la construcción de un prototipo de vivienda con éste tipo de teja que hace parte de la fase experimental y se encuentran realizando trámites para obtener en Argentina el certificado de aptitud técnica.

Según Castro (2008) la complejidad de los materiales que componen la llanta dependen del uso para el cual es diseñada, sin embargo en términos generales los componentes se distribuyen de la siguiente forma para vehículo tipo automóvil, cauchos (48%) negro humo (22%) óxido de zinc (1,2%) material textil (5%) acero (15 %) azufre (1%) otros (12%) mientras que para vehículo tipo camión la distribución está dada por (45%) cauchos, (22%) negro humo, (2,1%) óxido de zinc, (0%) material textil, (25 %) acero, (1%) azufre, el material más utilizado en el proceso de reciclaje es el caucho, el cual después de pasar por los procesos de molienda y criogénesis es utilizado en asfaltos, vertederos, mezclas bituminosas, membranas SAMI, membranas impermeabilizantes, modificador de ligante asfálticos, entre otros usos.

En Colombia mediante “Resolución 1457 de 2010” (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010) se reglamenta el post-consumo de las llantas usadas y se establece que los productores de llantas que se comercializan en el país

deben implementar planes pos-consumo, para mantener los sistemas de recolección selectiva y gestión ambiental de las llantas en desuso con el propósito de disminuir la degradación ambiental, posteriormente a través de la “Resolución 1326 del 2017” (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017) avala el uso del Grano Reciclado de Caucho en concreto asfáltico, cumpliendo las especificaciones establecidas por el Instituto Nacional de Vías INVIAS (artículo 413-13) canchas sintéticas y pistas deportivas.

Otro aporte es el realizado a través de la Facultad de Ingeniería Ambiental de la Universidad de las Américas UDLA, en Quito Ecuador por la estudiante Pamela Hidalgo quien mediante un estudio que realizo durante cuatro meses, obtuvo la mezcla perfecta para la elaboración de un tipo de teja que contiene polvo de caucho proveniente de llantas usadas, mezclándolo en proporciones adecuadas con agua, cemento y arena, dando como resultado un producto altamente resistente, flexible y económico que cumple con los estándares de calidad del Servicio Ecuatoriano de Normalización, (El Universo, 2018).

### **Granulo de Caucho Reciclado (GCR)**

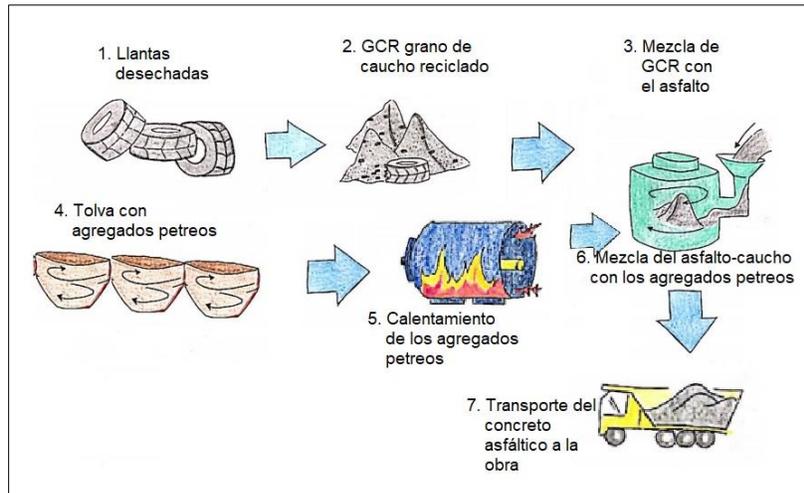
El caucho natural es una sustancia lechosa denominada látex extraída de plantas tropicales, mientras que el caucho sintético es obtenido por reacciones químicas conocidas como polimerización a partir de ciertos hidrocarburos insaturados, éste producto se caracteriza por ser elástico aislante impermeable y versátil. El caucho natural y el caucho sintético, son utilizados en la fabricación de los neumáticos acompañados de productos como el negro de humo para dar resistencia y color, agentes químicos (azufre, óxido de zinc, cadmio, aditivos), aceites minerales, hilos de acero y fibras textiles, en proporción de acuerdo al tipo de neumático que se éste fabricando, (Castro, 2008).

El alto porcentaje en la fabricación de neumáticos, el largo y lento proceso de descomposición han provocado que a nivel mundial se planteen diversas alternativas de reutilización y disminución de la degradación producida por las llantas al medio ambiente. Entre los métodos de aprovechamiento más comunes de los residuos de caucho proveniente de las llantas en desuso se encuentra el sistema mecánico y el sistema criogénico, en ambos es necesario triturar el caucho, hasta reducirlo a granulo de tamaño y forma regular, según la finalidad del producto para en cual vaya a ser empleado.

El usos más común del granulo reciclado de caucho obtenido de neumáticos en desuso se presenta en la elaboración de asfalto modificado para la fabricación de pavimento flexible, la mezcla asfáltica que puede ser obtenida a través de un proceso por vía húmeda como se observa en la figura1, donde el caucho actúa modificando al ligante o por vía seca como se presenta en la figura 2, en proporción de agregado fino, proceso avalado por la norma americana ASTM 6270-98 y regulado en Colombia por la normatividad establecida a través del Instituto Nacional de Vías INVIAS, el producto obtenido resulta menos susceptible al fisuramiento y a las deformaciones ocasionadas

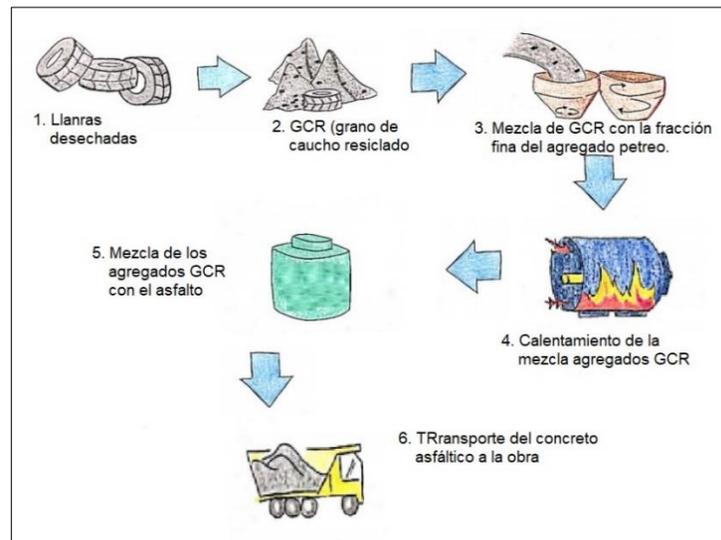
por altas y bajas temperaturas, provee mayor resistencia, es más segura y menos costoso, proporcionando un recorrido más confortable para los vehículos y mejoras en los impactos (Pascual, 2013).

**Figura 1**  
*Asfalto modificado con caucho por vía húmeda*



Fuente: Basado en (Fernández, 2010)

**Figura 2**  
*Asfalto modificado con caucho por vía seca*



Fuente: Basado en (Fernández, 2010)

A partir de la combinación de estos materiales se construyen carreteras ecológicas como la que se observar en la figura 3, se consideran más resistentes, más seguras y

más económicas, se rellenan terraplenes, se construye muros de contención, obras de infraestructura que hacen parte del desarrollo sostenible de las naciones y que han sido avaladas en países de Europa y Estados Unidos de acuerdo con Fernández (2010).

**Figura 3**  
*Carretera Ecológica*



Fuente: <https://elblogverde.com/neumaticos-recicladosp-asfalto-carreteras-ecologicas/>

El granulo reciclado de caucho también es empleado para la construcción de césped artificial, como relleno de fibra sintética y como capa de base la superficie del césped artificial para campos deportivos o como piso para parques infantiles (ver figura 4) pistas de atletismo, bandas de retención de tráfico, pisos antideslizantes, fabricación de suelas para el calzado, adoquines, cabe destacar que el granulo para esta aplicación debe estar libre de acero y de fibra textil, de ésta manera las llantas usadas pasan de ser desechos contaminantes a convertirse en materia útil en la fabricación de productos amigables con el medio ambiente.

**Figura 4**  
*Recubrimiento para superficies*

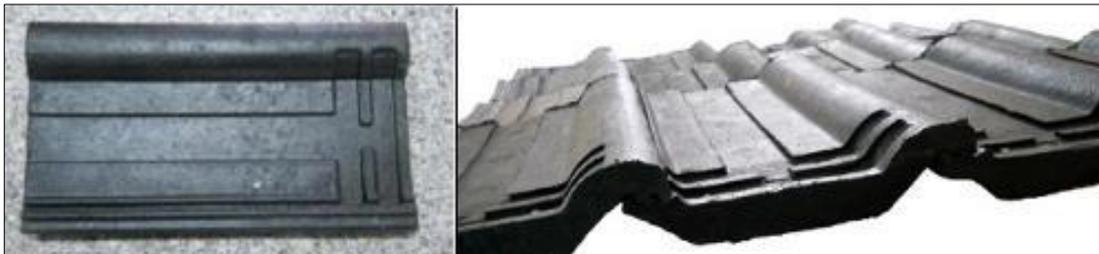


Fuente (Dracol, 2017) : <https://dracol.com/pisos-en-caucho-epdm-granulado/>

Con referencia a la elaboración de teja para cubierta de vivienda, ésta se obtiene a partir de la trituración de materiales provenientes de desechos industriales plásticos y de neumáticos en desuso, los cuales son sometidos al proceso de termo-moldeo con compactación, utilizando un equipo de prensa con temperatura, el producto obtenido se evaluó como resistente, flexible, liviano, aislante, requiere poco mantenimiento, no presenta corrosión, agrietamiento o ruptura, de fácil instalación, duradero e impermeable, (Ecomundo, 2018).

### **Figura 5**

*Tejas con caucho Reciclado de Neumático*



Fuente (Ecomundo, 2018): <https://www.conicet.gov.ar/cientificos-del-conicet-fabrican-tejas-con-caucho-reciclado/>

### **Resinas**

La resina es una sustancia sólida que puede ser obtenida de forma natural a través de la secreción orgánica de determinadas plantas, de acuerdo con su naturaleza puede hablarse de bálsamos (secreción utilizada como purificador o desodorizador), gomorresinas (emulsiona al mezclarse con el agua) y lacto-resinas (procedente del látex coagulado). También existen las resinas elaboradas de manera sintética como el acrílico, la resina epoxi, el poliéster, el poliuretano, entre otras (Definición de, s.f.).

#### ***Resina de Poliuretano***

La resina de poliuretano es un producto industrial de alta calidad, tiene rápido secado, excelentes propiedades físicas y estéticas, presenta buena resistencia a la abrasión, protección, anticorrosión y recubrimiento resistente a la intemperie, se utiliza para la producción de tintas, pinturas, compuestos para modelados, compuestos adhesivos, barnices u otras capas protectoras, es maleable y sus propiedades son fáciles de alterar. (Rube PRODUCTOS TÉCNICOS S.L., 2014).

De acuerdo con las propiedades de los compuestos líquidos de la resina de poliuretano esta se divide en isocianatos llamadas “resinas A” o “iso” y polioles llamados “resinas B” o “poli”, las dos se mezclan para obtener el compuesto deseado, el secado es rápido. En su mayoría ésta se obtiene a partir de una reacción entre un polialcohol y un disocianato, su forma final se obtiene después de añadir calor o un catalizador, la

resina es durable, resistente a aceites y grasas (Rube PRODUCTOS TÉCNICOS S.L., 2014).

### ***Resina de Poliestireno Expandido***

El poliestireno expandido es un material plástico espumado, derivado del estireno, obtenido a través de su polimerización, los compuestos de poliestireno que se encuentran en estado sólido se conocen con el nombre de resinas termoplásticas, es un material plástico celular que se fabrica a través del moldeo de perlas pre expandidas de poliestireno expandible que presenta una estructura celular cerrada y llena de aire.

Entre las características se destaca que es 100% reciclable, resistente al envejecimiento, presenta versatilidad y facilidad de conformado, es excelente aislador térmico (al calor y al frío), amortigua el impacto, de fácil manipulación e instalación, presenta resistencia química, resistencia mecánica, resistencia a la humedad (al agua y al vapor de agua) y ligereza.

El poliestireno expandido es imputrescible, no enmohece y no se descompone, pero se reblandece y contra lentamente al ser expuesto a temperaturas superiores a los 100°C, (Asociación Nacional de Poliestireno Expandido, 2020).

### ***Resina de Poliéster***

La resina de poliéster según Nieto (2018), es una resina de polímero insaturado termoendurecible, formada por la reacción entre ácidos orgánicos y alcoholes polihídricos, originando varios tipos dependiendo de las propiedades de los ácidos y alcoholes utilizados en el proceso, su presentación es en estado líquido viscoso de color ámbar y posterior a la aplicación se debe utilizar un catalizador que permita su solidificación, entre los usos se encuentra el plástico reforzado con fibra de vidrio, la reparación de carrocerías, moldes para fabricación de figuras, esculturas y manualidades.

Entre las propiedades más destacadas de la resina de poliéster se encuentra la resistencia a los rayos ultravioleta, resistencia al agua, termoestabilidad (maleables), viscosidad, dureza, solubilidad (alta) gran capacidad de resistencia a la tracción, a la torsión y a la abrasión química y se adhieren con gran facilidad. Comercialmente se encuentran los siguientes tipos: resina de poliéster Gel Coat, resina de poliéster 834, M-30, resina de poliéster 70x60, poliéster cristal y resina de poliéster Súper Tip (Nieto, 2018).

### ***Xilol***

El xilol denominado xileno o dimetilbenceno es un producto petroquímico líquido, que se obtiene a través de la refinación del petróleo crudo y por craking catalítico se

llega al benceno, posteriormente se realiza una secuencia de alquilaciones, es incoloro, de olor característico y producto inflamable, se utiliza como diluyente de pinturas, barnices, en la industria textil, como disolvente en la industria de las resinas para la producción de ácido tereftálico y componente principal en la obtención de poliésteres (Pochteca, s.f.)

El xilol es también empleado en la fabricación de productos como repelente, perfumes artificiales, industria del hule y del cuero, como disolvente en la fabricación de pinturas y en la fabricación de ciertos tipos de thinner, la presentación comercial es en botella, galón, garrafa o tambor, por la capacidad que presenta para disolver el poliestireno es el componente básico de los pegamentos utilizados en el plastimodelismo.

### ***Metil Etil Cetona (MEK)***

El metil etil cetona o MEK según Bruges (2016) es un solvente líquido, orgánico perteneciente a la familia de las cetonas, incoloro y de olor característico parecido al de la acetona, es un producto estable, de baja toxicidad, reacciona con agentes oxidantes fuertes, es altamente inflamable, entre los usos más comunes se encuentran ser solvente en pinturas, lacas, tintas e industrias de refinación, en preparaciones farmacéuticas y cosméticas.

La información consignada en el marco de referencia, robustece el desarrollo de las pruebas objeto del proyecto, constituyéndose en parte fundamental para la toma de decisiones que direccionan el cumplimiento de los objetivos trazados y de los resultados esperados.

Las pruebas realizadas para la elaboración de prototipos a partir de la mezcla de granulo de caucho reciclado (GCR) resina de poliuretano y solvente Xilol, no generan resultado favorable, debido a que la adherencia de los materiales presenta un nivel de porosidad importante y el modelo obtenido es bastante flexible, dificultando el análisis en laboratorio de las propiedades físicas.

Cabe resaltar, que se realizaron otras pruebas a partir de la mezcla de granulo de caucho reciclado (GCR) con resina de poliestireno expandido (Icopor y thinner) obteniendo un material con baja adherencia entre partículas y altamente susceptible a la rotura.

Basados en los procesos anteriormente enunciados, se determinó la realización de una mezcla de material granulado de caucho reciclado (GCR) catalizador (Mek) al 2% y resina poliéster, en la cual el catalizador actúa sobre la resina para alcanzar adherencia y rigidez necesaria, para que al momento de finalizar el fraguado se realice el análisis de las propiedades físicas en laboratorio.

Los resultados obtenidos determinaron que la mezcla seleccionada, permitió la realización de un prototipo de teja ecológica, a la que se le realizaron pruebas de

resistencia mecánica, resistencia al impacto, permeabilidad y absorción, dando cumplimiento a los objetivos trazados con el proyecto, dejando un derrotero para continuar la investigación, hasta obtener un resultado que cumpla con la totalidad de los parámetros establecidos en la norma técnica NTC 2086.

## **Metodología**

El proceso metodológico seleccionado, da cumplimiento a los objetivos trazados y se basa en el marco de referencia, permitiendo obtener resultados satisfactorios encaminados a dar solución a la problemática planteada.

Se realizó la recopilación, clasificación y selección de información a cerca los antecedentes relacionados con el uso del granulo de caucho reciclado (GCR) las aplicaciones en la industria de la construcción y particularmente en la fabricación de teja para cubierta.

Basados en referencias bibliográficas, se realizó el estudio de los materiales utilizados en la investigación, las posibles reacciones presentadas al interactuar en la mezcla y la incidencia en la calidad del producto final elaborado.

Realización de prototipos elaborados a base de granulo de caucho reciclado (GCR) componentes químicos (resina, solvente y catalizador) mediante el desarrollo secuencial de tres fases, cuyas tareas se desglosan en los diagramas 1, 2 y 3 respectivamente.

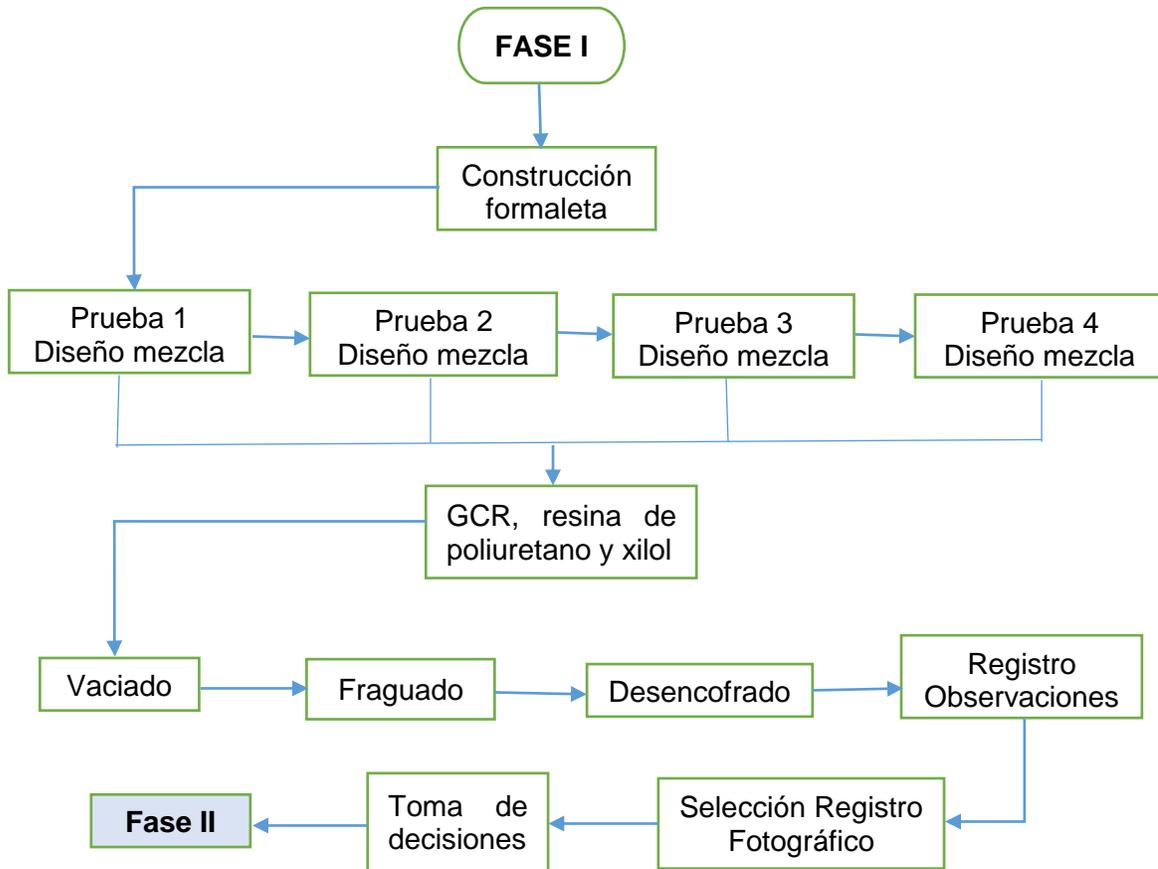
Realización de ensayos en el laboratorio de agregados y concretos de la universidad Militar Nueva Granada (UMNG) para análisis de propiedades físicas en los prototipos obtenidos y el correspondiente registro de información.

La información registrada, es procesada, para obtener nuevos datos que permiten calificar, evaluar y concluir la continuidad de los ensayos.

Análisis del comportamiento del material para determinar la viabilidad de elaborar teja ecológica, empleando como materia prima granulo reciclado de llanta (GCR) con base a los resultados obtenidos.

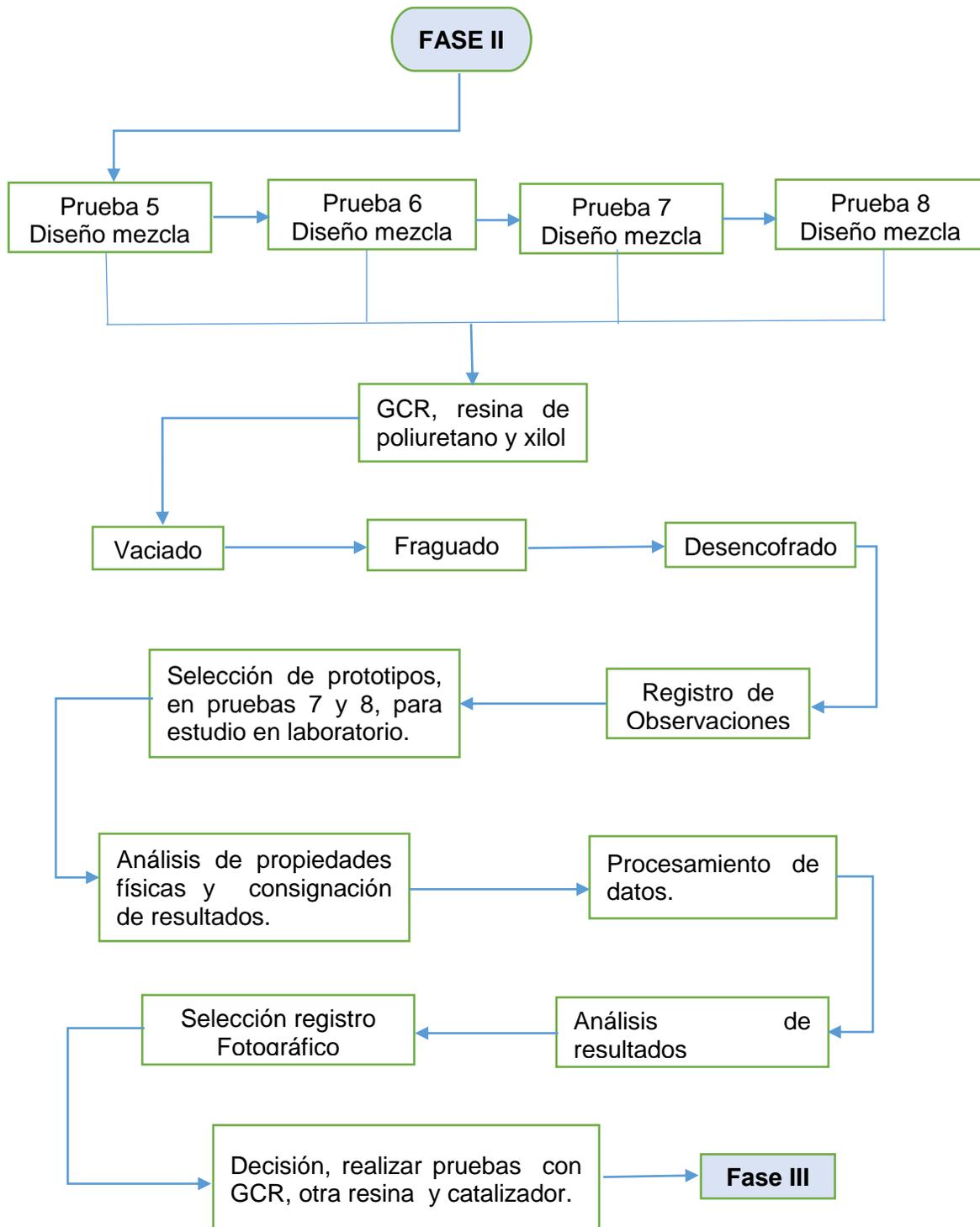
Desarrollo del documento en el cual se describe el proceso del estudio y se muestran los resultados obtenidos.

**Diagrama 1**  
*Metodología Fase I*



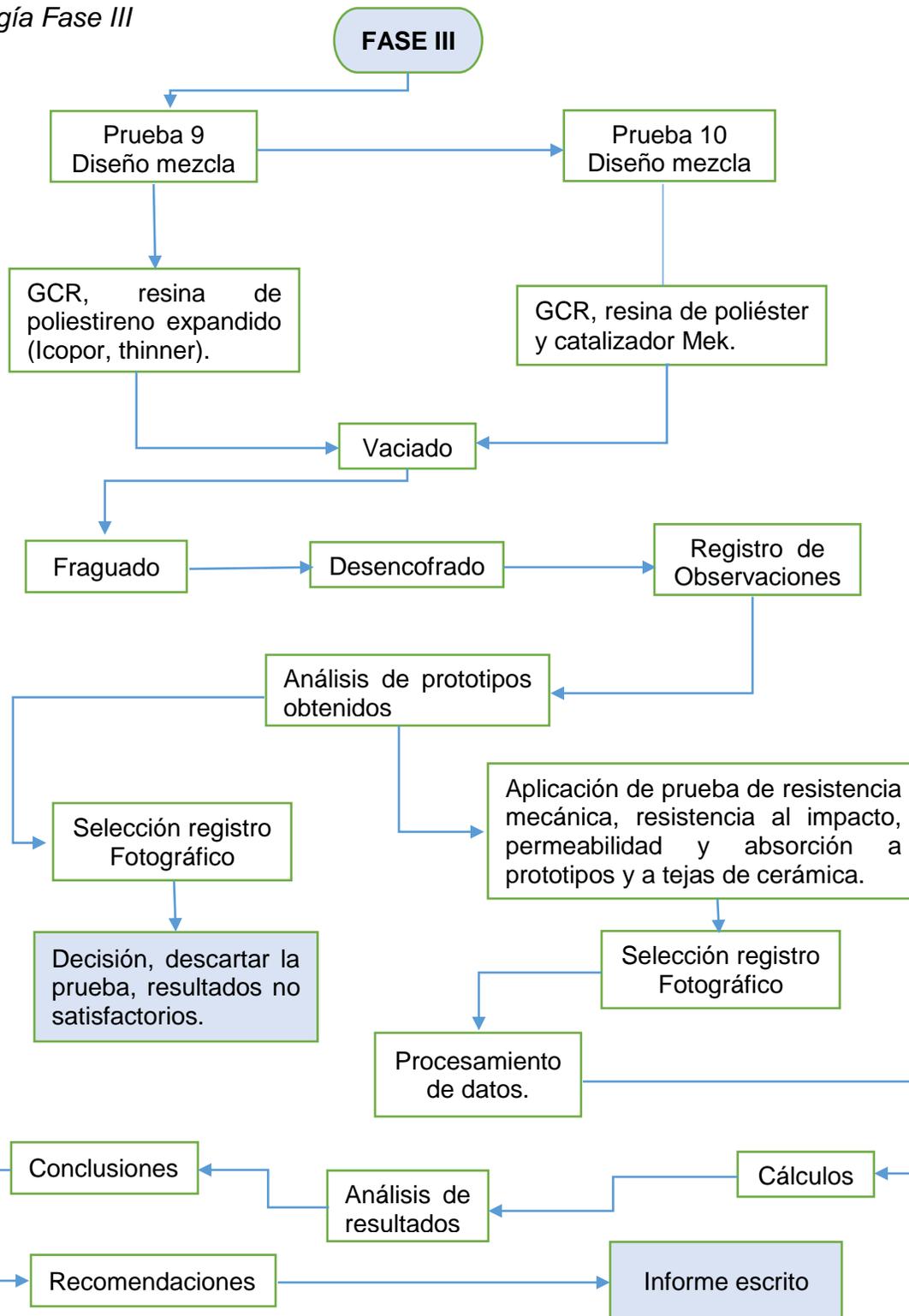
Fuente: elaboración propia.

**Diagrama 2**  
*Metodología Fase II*



Fuente: elaboración propia.

**Diagrama 3**  
Metodología Fase III



Fuente: elaboración propia.

## Elaboración de Teja Ecológica a Base de material Granulado Reciclado de llanta Fase 1

### Procedimiento

En ésta fase se describe el proceso de construcción de formaletas para la elaboración de los prototipos de teja ecológica según diagrama 1, basados en las dimensiones de la teja cerámica curva reglamentadas por la norma NTC 2086, utilizando los materiales granulado de caucho reciclado (GCR) producto industrial resina de poliuretano y solvente xilol (ver figura 6), en dosificación y proporción establecidos en la tabla 1 y la tabla 2 respectivamente, a través del desarrollo de cuatro pruebas, con las que se pretende obtener una muestra óptima que pueda ser sometida a ensayos de laboratorio para determinar el comportamiento de las propiedades físicas del prototipo obtenido.

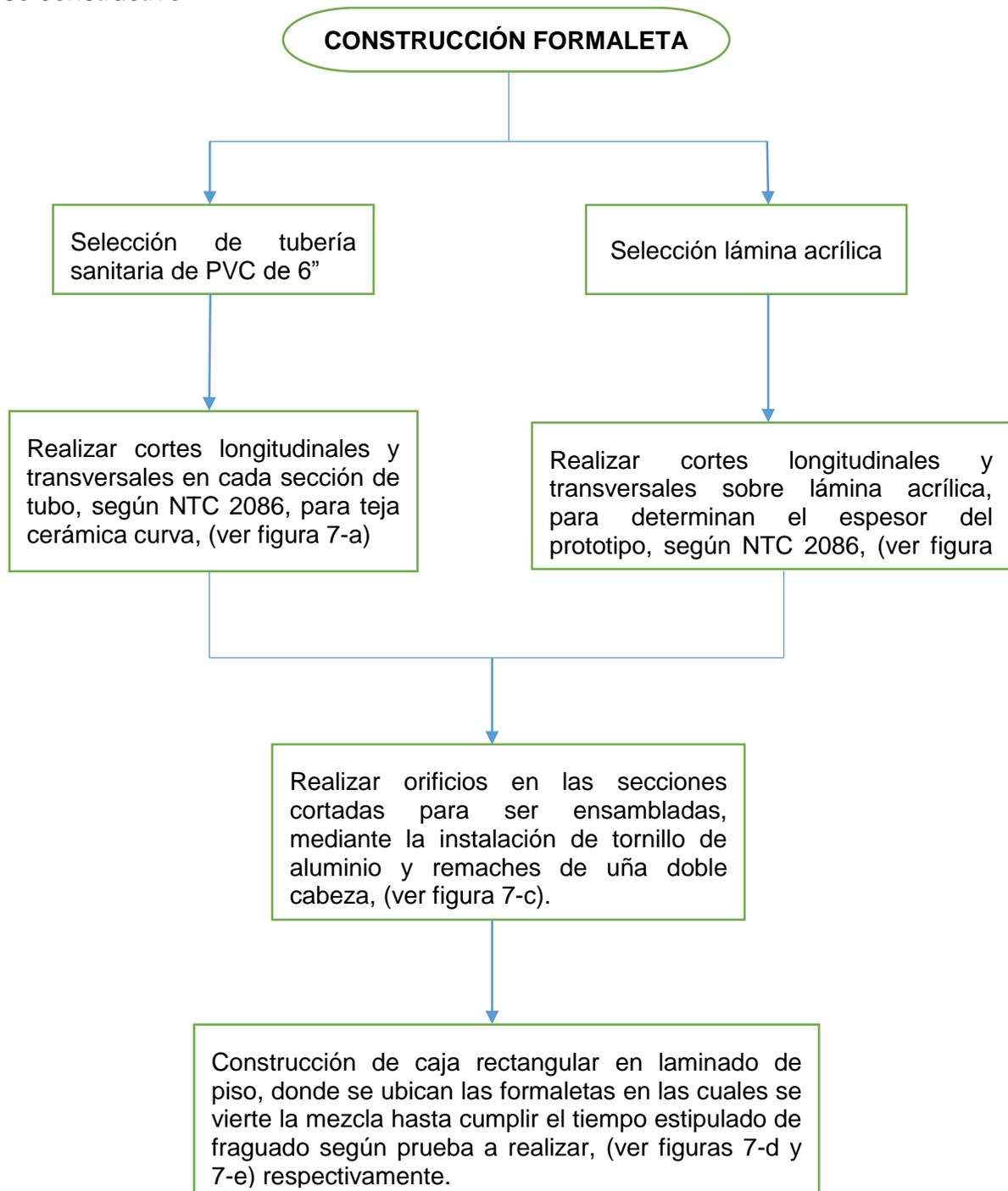
### Figura 6

*Materia prima*



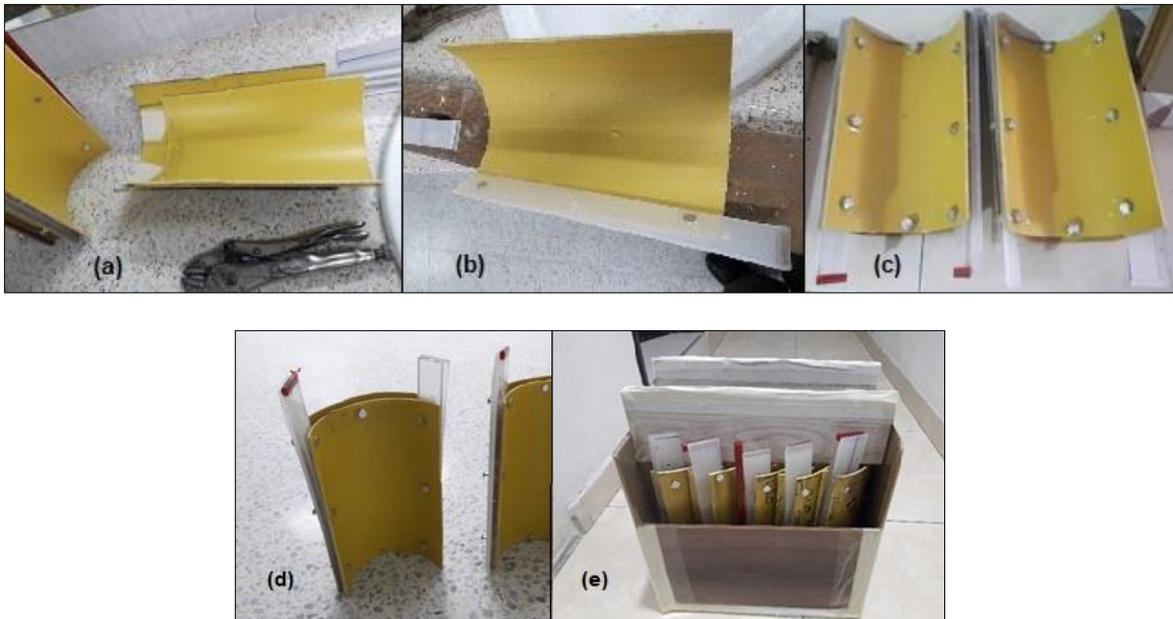
Fuente: elaboración propia. (a) GCR, (b) Resina de poliuretano (c) Solvente xilol.

**Diagrama 4**  
*Proceso constructivo*



Fuente: elaboración propia.

**Figura 7**  
*Elaboración formaleta*



Fuente: elaboración propia. Secuencia proceso constructivo de la formaleta.

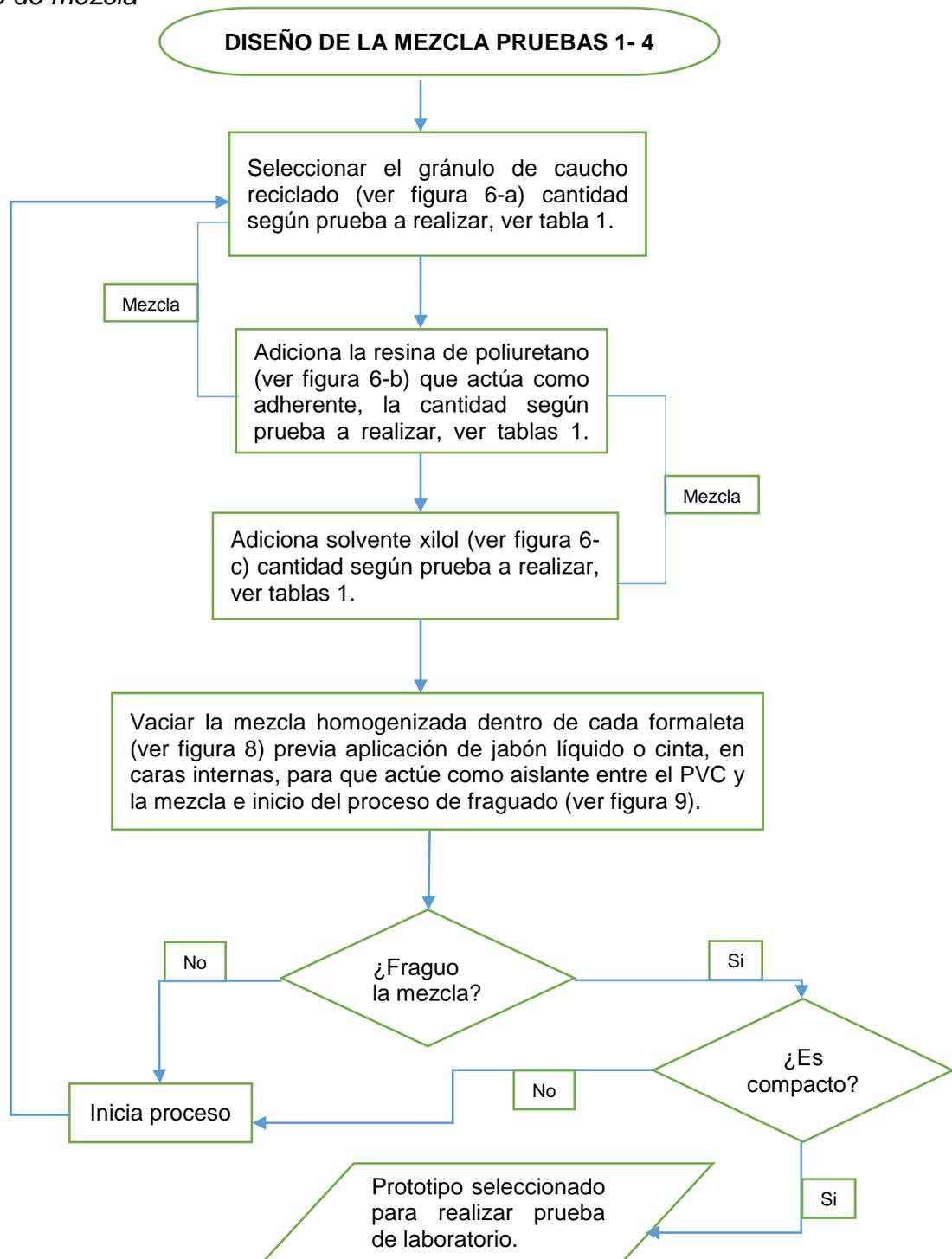
Construidas las formaletas, se procede con la elaboración de la mezcla de forma manual, en condiciones ambientales normales promedio para la ciudad de Bogotá temperatura 19° C, siguiendo el procedimiento establecido en el diagrama No 1, definiendo tiempos de fraguado a cada prueba, según lo estipulado en la tabla No 3, las observaciones se registran en la tabla 4.

**Figura 8**  
*Proceso de mezcla*



Fuente: elaboración propia. GCR, xilol y resina de poliuretano.

**Diagrama 4**  
Diseño de mezcla



Fuente: elaboración propia.

**Tabla 1**  
*Dosificación de materiales*

Prueba	Granulo de Caucho Reciclado (g)	Xilol (ml)	Resina Poliuretano (ml)
No. 1	200,00	111,50	1114,57
No. 2	300,00	101,50	1114,57
No. 3	400,00	91,50	914,57
No. 4	500,25	81,50	814,75

Fuente: elaboración propia.

**Tabla 2**  
*Proporción de materiales*

Prueba	Granulo de Caucho Reciclado	Xilol	Resina Poliuretano
No. 1	1	0,56	5,57
No. 2	1	0,34	3,38
No. 3	1	0,23	2,29
No. 4	1	0,16	1,63

Fuente: elaboración propia.

**Figura 9**  
*Formaleta y vaciado de mezcla*



Fuente: elaboración propia. (a) Formaleta con desmoldante jabón, (b) formaleta con desmoldante cinta transparente, (c) Vaciado de mezcla

**Tabla 3**  
*Tiempos de Fraguado*

Prueba	Prototipos (und)	Tiempo de Fraguado (día)
No. 1	5	30
No. 2	5	30
No. 3	5	30
No. 4	5	20

Fuente: elaboración propia.

### Observaciones realizadas

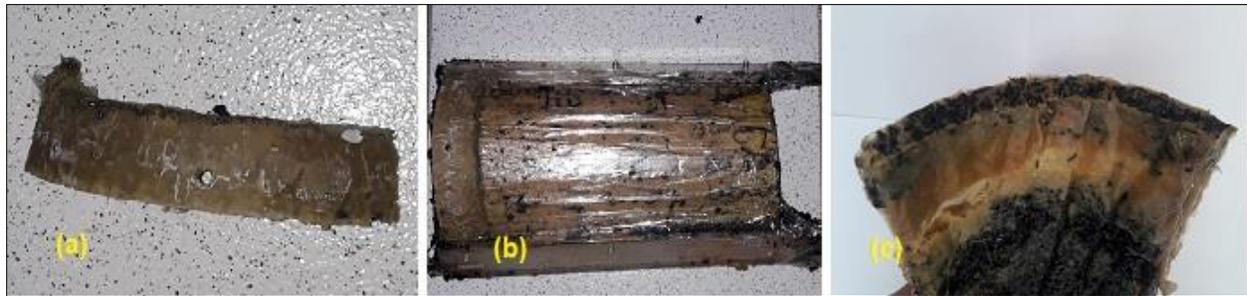
**Tabla 4**  
*Observaciones, pruebas 1-4*

Prueba	Observaciones
No. 1	<p>Obtenida la mezcla, es vaciada en las formaletas, se estima tiempo de fraguado de treinta días, al realizar el desmolde, el prototipo presenta alto nivel de porosidad, la compactación del material granulado de caucho es baja, el material aún conserva humedad, se evidencia el filtrado de la resina por las uniones de la formaleta, se presenta fácil resquebrajamiento del material y se concluye que la causa es exceso en la dosificación de los productos industriales utilizados.</p> <p>El prototipo obtenido no cumple con las condiciones óptimas para realizar pruebas de laboratorio (ver figura 10) se descarta y con éste resultado se plantea la prueba No. 2, modificando las proporciones de los materiales con el fin de lograr mejor adherencia entre ellos.</p>
No. 2	<p>Para éste ensayo se aumenta la dosificación del granulo de caucho en 50%, se reduce la dosificación de xilol y la resina en 9% con respecto al ensayo anterior, el tiempo de fraguado de la mezcla fue de treinta días en condiciones ambientales, al realizar el desmolde los prototipos obtenidos se fragmenta en pedazos de varios tamaños, presentan alto grado de porosidad, al ejercer presión sobre ellos, tienen la facilidad de resquebrajarse y aun se evidencia humedad en el material.</p>

Prueba	Observaciones
	<p>El prototipo obtenido no cumple con las condiciones óptimas para realizar pruebas de laboratorio (ver figura 11) y se descarta, a partir de este resultado se plantea la prueba No. 3, modificando nuevamente las proporciones de los materiales con el fin de lograr mejor adherencia entre ellos.</p>
No. 3	<p>En éste ensayo se aumenta la dosificación del granulo de caucho en un 33%, se reduce la dosificación de xilol en un 10% y de la resina en 10% con respecto al ensayo anterior, el tiempo de fraguado de la mezcla fue de treinta días en condiciones ambientales, los prototipos obtenidos presentan disminución en la porosidad comparado con los especímenes anteriores, al realizar el desmolde el prototipo se fragmenta en pedazos de gran tamaño, al ejercer presión sobre ellos continúan presentando facilidad al resquebrajamiento, aún se observa humedad en varias partes del material.</p> <p>El prototipo obtenido no cumple con las condiciones óptimas para realizar pruebas de laboratorio (ver figura 12) y se descarta, con base en el resultado se plantea la prueba No. 4, modificando las proporciones de los materiales con el fin de lograr mayor adherencia entre ellos.</p>
No. 4	<p>Respecto al ensayo anterior, se aumenta la dosificación del granulo de caucho en un 25%, se reduce la dosificación de xilol en un 11% y de la resina en 11%, el tiempo de fraguado a la mezcla fue veinte días en condiciones ambientales, al realizar el desmolde se observa que los prototipos obtenidos se fragmenta en dos partes, presentan disminución en la porosidad de acuerdo a los especímenes anteriores, al aplicar presión sobre los fragmentos, estos presentan bastante flexibilidad y resquebrajamiento, se conserva humedad en algunas partes del material,</p> <p>El prototipo obtenido no cumple con las condiciones óptimas para realizar pruebas de laboratorio (ver figura 13) y se descarta, con base en los resultados obtenidos se plantea la prueba No. 5 en la fase 2, modificando las proporciones de los materiales con el fin de lograr mejores resultados.</p>

Fuente: elaboración propia.

**Figura 10**  
*Prueba 1*



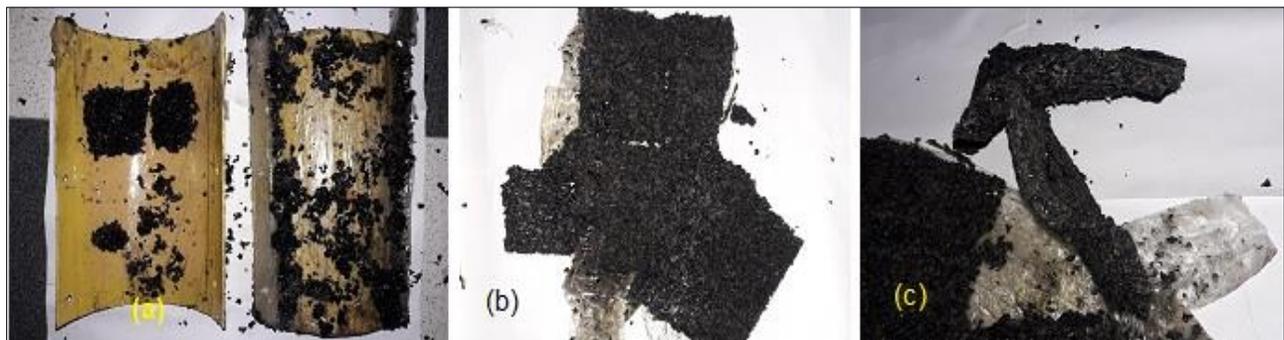
Fuente: elaboración propia. Prototipo obtenido.

**Figura 11**  
*Prueba 2*



Fuente: elaboración propia. Prototipo obtenido.

**Figura 12**  
*Prueba 3*



Fuente: elaboración propia. Prototipo obtenido

**Figura 13**  
*Prueba 4*



Fuente: elaboración propia. Prototipo obtenido

La dosificación empleada en las pruebas 1, 2, 3 y 4, no fue óptima para obtener el material ecológico a base de granulo de caucho reciclado de llanta, producto industrial resina de poliuretano y solvente xilol, razón por la cual se procede a llevar una segunda fase de pruebas, con el propósito de obtener mejor compactación del material, aumento de la resistencia y disminución el tiempo de fraguado. Además se considera pertinente cambia el jabón por cinta transparente, como desmoldante.

## Elaboración de Teja Ecológica a Base de material Granulado Reciclado de llanta Fase 2

### Procedimiento

En el desarrollo de la fase 2, se determinó la realización de cuatro pruebas, para las cuales se utilizan los materiales granulo de caucho reciclado (GCR) producto industrial xilol y resina de poliuretano (ver figura 14) de acuerdo con el procedimineto establecido en el diagrama 3, el proceso de mezcla se realiza de forma manual (ver figura 15) en condiciones ambientales normales promedio para la ciudad de Bogotá (temperatura 19° C) la dosificación y proporción para cada prueba se establecen en la tabla 5 y la tabla 6 respectivamente, finalmente se realiza el vaciado de la mezcla en cada una de las formaletas previamente preparadas (ver figura 17).

El propósito para cada prueba es obtener una muestra óptima, por lo tanto al variar las proporciones de los materiales también se estable variación en el tiempo que de fraguado (ver tabla 7) una vez se supera ésta etapa se procede a desmoldar, se registran las observaciones y se analiza el resultado obtenido (ver tabla 8) para determinar la viabilidad de someter el prototipo obtenido (ver figura 18) a ensayos de laboratorio y determinar el comportamiento de las propiedades físicas.

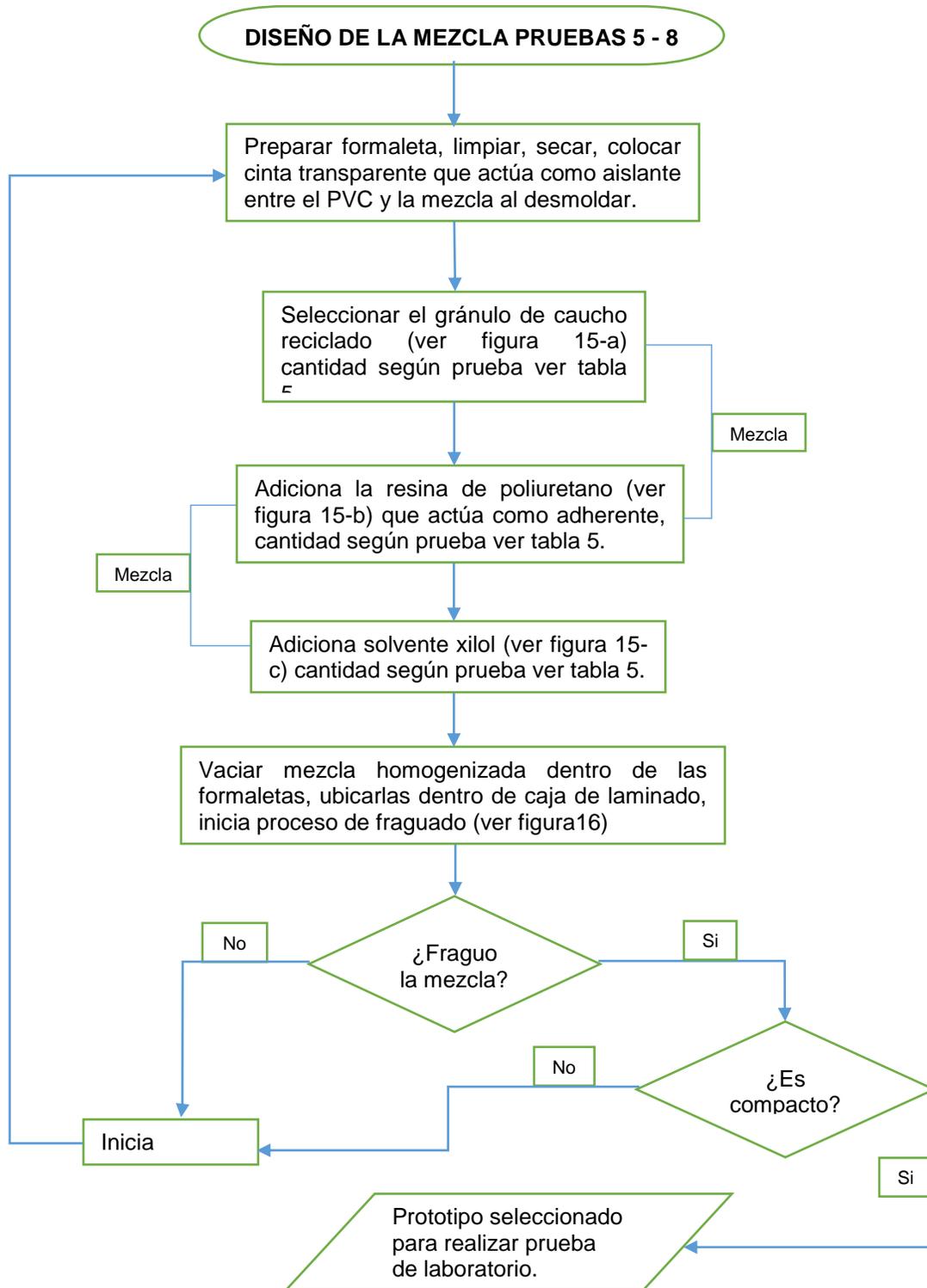
### Figura 14

*Materia prima*

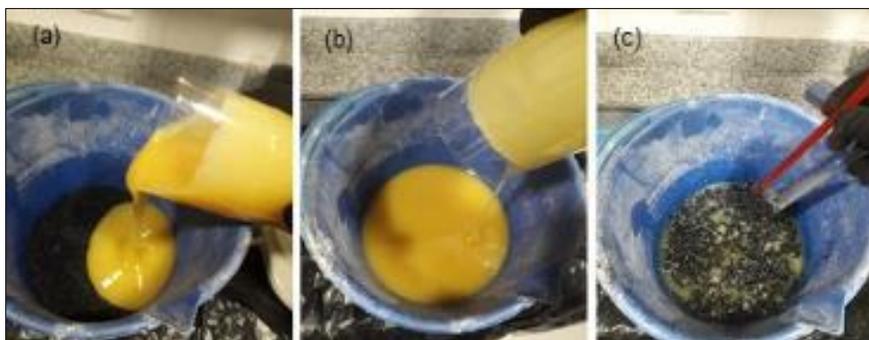


Fuente: elaboración propia. (a) GRC, (b) Resina de poliuretano (c) Solvente Xilol.

**Diagrama 5**  
*Diseño de mezcla*



Fuente: elaboración propia.

**Figura 15***Proceso de mezcla*

Fuente: elaboración propia. (a), (b) GRC, resina poliuretano, (c) resina poliuretano, GCR, xilol.

**Tabla 5***Dosificación de materiales*

Prueba	Granulo de Caucho Reciclado (g)	Xilol (ml)	Resina Poliuretano (ml)
No. 5	555,00	189,89	759,57
No. 6	555,00	100,00	1500,00
No. 7	555,00	100,00	1000,00
No. 8	1081,25	68,97	413,73

Fuente: elaboración propia.

**Tabla 6***Proporción de materiales*

Prueba	Granulo de Caucho Reciclado	Xilol	Resina Poliuretano
No. 5	1	0,34	1,36
No. 6	1	0,18	2,70
No. 7	1	0,18	1,80
No. 8	1	0,06	0,38

Fuente: elaboración propia.

**Figura 16**  
Vaciado y fraguado de mezcla



Fuente: elaboración propia. (a) Vaciado mezcla, (b) Proceso de fraguado

**Tabla 7**  
*Tiempo de fraguado*

Ensayo	Prototipos (und)	Tiempo de Fraguado (día)
No.5	5	20
No.6	5	20
No.7	5	15
No.8	5	5

Fuente: elaboración propia.

**Observaciones realizadas**

**Tabla 8**  
*Observaciones – pruebas 5-8*

Prueba	Observaciones
No. 5	Una vez vaciada la mezcla, el tiempo de fraguado a temperatura ambiente (19°C) se establecido en veinte días, al realizar el desmolde, se observa que buena parte del material quedó adherido al PVC, no se compacto totalmente produciendo resquebrajamiento del prototipo, este comportamiento se relaciona con el exceso en la dosificación de xilol y resina, se

Prueba	Observaciones
	<p>evidencia alto nivel de porosidad y un porcentaje considerable de aglutinante xilol filtrado en la base del prototipo debido al escurrimiento producido por la posición de fraguado de las formaletas.</p> <p>El prototipo obtenido no cumple con las condiciones óptimas para realizar pruebas de laboratorio y se descarta (ver figura 17) a partir de este resultado se plantea realizar la prueba No 6, modificando las proporciones de los materiales con el fin de lograr mejores resultados.</p>
No. 6	<p>En ésta prueba se reduce la dosificación de xilol en 48%, se aumenta la dosificación de la resina de poliuretano en 97% y se conserva la cantidad de granulo de caucho reciclado con relación al ensayo anterior, el tiempo de fraguado dado a la mezcla correspondió a veinte días, a temperatura ambiente (19°C) al realizar el desmolde del prototipo se evidencio una mínima cantidad de materia adherido a las paredes del PVC, se observa que hacia la parte inferior del modelo hay cierta cantidad de material aglutinante algo denso lo que indica que se requería mayor tiempo de fraguado, (ver figura 18).</p> <p>El prototipo obtenido es más consistentes, presenta porosidad en la cara interna y externa, conserva la opacidad, a pesar de que la calidad mejoro, no cumplen con las condiciones óptimas para realizarle prueba en laboratorio, por lo tanto se descarta y se proyecta realizar la prueba No 7.</p>
No. 7	<p>En ésta prueba se conserva la cantidad de gránulo de caucho reciclado y la dosificación del solvente xilol, mientras que la dosificación de la resina de poliuretano se disminuye en 33,33% respecto al ensayo anterior, el tiempo de fraguado para éste ensayo correspondió a 15 días, a temperatura ambiente (19°C).</p> <p>Al realizar el desmolde se observa mínima retención de material en las paredes de la formaleta, el prototipo obtenido presenta mayor consistencia, la porosidad que se presenta en la cara interior y exterior es menor y no se observa paso de luz a través de éste, no hay presencia de material aglutinante, como se aprecia en la figura 19. Se considera un producto óptimo, con propiedades elásticas favorables por lo tanto se selecciona para someterlo a pruebas en laboratorio.</p>

Prueba	Observaciones
No. 8	<p>De acuerdo con el comportamiento de la mezcla utilizada en la prueba anterior, se determina incrementar el granulo de caucho reciclado en 95%, disminuir en 31% el solvente xilol y en 58,6% la resina poliuretano, con relación a la dosificación empleada para la prueba anterior.</p> <p>El material vertido en cada formaleta es sometido a compresión manual con el objeto de minimizar el nivel de porosidad, el tiempo de fraguado considerado en este ensayo corresponde a cinco días a temperatura ambiente (19°C) además se considera cambiar la ubicación de fraguado de las formaletas, pasando de vertical a horizontal, de tal forma que permita un secado homogéneo del material.</p> <p>Al realizar el desmolde se observa que el material adherido a las paredes de la formaleta es mínimo, el prototipo es mucho más compacto, el nivel de porosidad disminuye, el material es opaco, no se observa presencia de aglutinante de forma líquida ni semilíquida (ver figura 20) la propiedad elástica del prototipo es favorable y se determina someterlo a pruebas de laboratorio.</p>

Fuente: Elaboración propia.

**Figura 17**  
Prueba No. 5



Fuente: elaboración propia, (a) mezcla, (b) retiro de formaleta (c) prototipo.

**Figura 18**  
Prueba No. 6



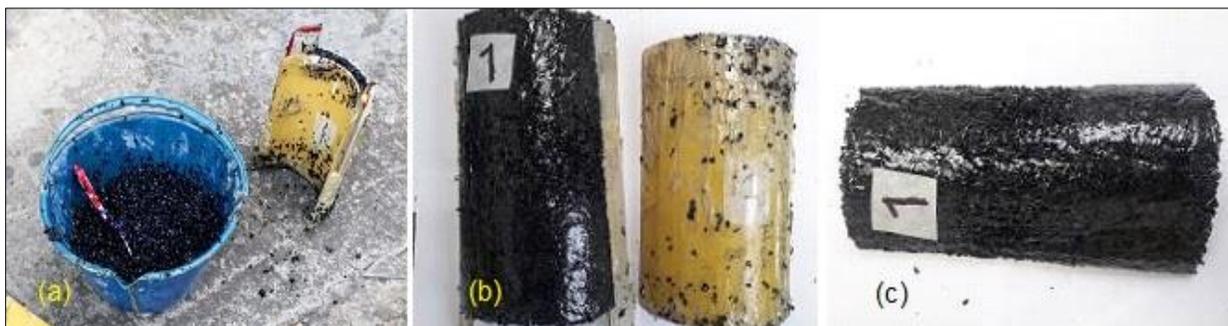
Fuente: elaboración propia, (a) mezcla, (b) retiro de formaleta (c) prototipo.

**Figura 19**  
Prueba No.7



Fuente: elaboración propia. (a) Mezcla, (b) retiro de formaleta (c) prototipo

**Figura 20**  
Prueba No.8



Fuente: elaboración propia. (a) Mezcla, (b) retiro de formaleta (c) prototipo

### Prueba de resistencia

Los prototipos seleccionados fueron sometidos a prueba de resistencia de materiales en el laboratorio de agregados y concretos de la Universidad Militar Nueva Granada (UMNG) donde se cuenta con la máquina universal de ensayos, a través de ésta se someten probetas de determinados materiales a pruebas de tracción, compresión o flexión para medir el comportamiento de sus propiedades, (ver figura 21).

La función principal de la máquina universal de ensayos es comprobar la resistencia del material de la probeta seleccionada, ésta se ubica sobre los apoyos, aplicando sobre ellas cargas controladas por medio de un rodillo que funciona a través de sistema hidráulico, registrando datos que miden en forma gráfica la deformación y la carga al momento de la rotura, por medio del software del equipo.

La fuerza mínima que se puede aplicar a una probeta a través de la máquina corresponde a 0,10 kN, el material a fallar es altamente flexible, razón por la cual se consideran dos métodos alternativos adicionales para medir la deformación que puede presentar el prototipo a medida que se le aplica determinada fuerza, las observaciones, los resultados obtenidos y las recomendaciones para realizar pruebas de laboratorios próximas con mayor efectividad están consignadas en la tabla 9.

### Figura 21

*Máquina Universal de Ensayos*



Fuente: Foto tomada en laboratorio UMNG

**Tabla 9***Prueba de resistencia*

Prueba No.	Observaciones
1	<p>Ubicada la teja sobre los apoyos, lentamente se acciona el rodillo, previa programación para ejercer una fuerza controlada de 0,10 kN, al momento en que la carga hace contacto con la superficie del prototipo se produce la deformación (se flecta).</p> <p>El prototipo recupera la forma una vez es retirada la fuerza aplicada, evidenciando que no presento cambio físico alguno, la secuencia se observa en las figuras 22 y 23 respectivamente, mientras que en la figura 24 se presentan todos los datos en ceros, lo que indica que no se puede obtener resultados por este método, por la flexibilidad del material.</p> <p>El prototipo no sufrió cambios en su forma original ni fractura del material.</p>
2	<p>En esta prueba, se simula el ambiente de instalación para el tejado utilizando una estructura de madera organizada con durmientes de 1" sobre los cuales se apoya el prototipo, el objetivo es medir la deformación que se produce a medida que se van colocando pesas de 0,5 kg una a una sobre éste, el punto de carga seleccionado es el centro del prototipo, como se observa en la figura 25.</p> <p>El peso máximo ubicado correspondió a 1 kg, la deformación producida no fue posible medirla por lo tanto se decide implementar otro método de prueba, es importante anotar que una vez retirados los pesos se revisa minuciosamente el prototipo y no se observan cambios en la forma original, ni fractura del material.</p>
3	<p>Teniendo en cuenta la flexibilidad del material de los prototipos, en esta prueba de laboratorio se procede a realizar un montaje manual utilizando pesas de 0,50 kg, deformímetro manual, formaletas metálicas para fundir cilindros de concreto empleados como apoyos para dar altura a los cilindros y poder ubicar el deformímetro, como se evidencia en la figura 26 (a) el objetivo con este procedimiento es determinar el nivel de deformación que presenta el material a medida que se van aplicando las cargas en un tiempo determinado.</p> <p>El tiempo de la prueba correspondió a 36 minutos, inició con un peso de 0,5 kg hasta llegar a 2,5 kg (ver figuras 26 y 27) los datos obtenidos son registrados en la tabla 10 y los resultados</p>

Prueba No.	Observaciones
	<p>gráficos se observan en las figuras 28, en la cual se concluye que la deformación es directamente proporcional al peso y en la figura 29, donde se observa el comportamiento de la deformación respecto al tiempo que transcurre con determinada carga.</p> <p>Con base en el resultado obtenido se plantea la elaboración de una estructura interna para el prototipo estilo encamisado de tal forma que sirva de apoyo y permita la realización de un ensayo en laboratorio que arroje resultados que permitan un análisis determinante en la viabilidad del proyecto .</p>

Fuente: Elaboración propia.

### Figura 22

*Prueba No.1, vista frontal*



Fuente: elaboración propia. Aplicando carga controlada

### Figura 23

*Prueba No.1, vista lateral*



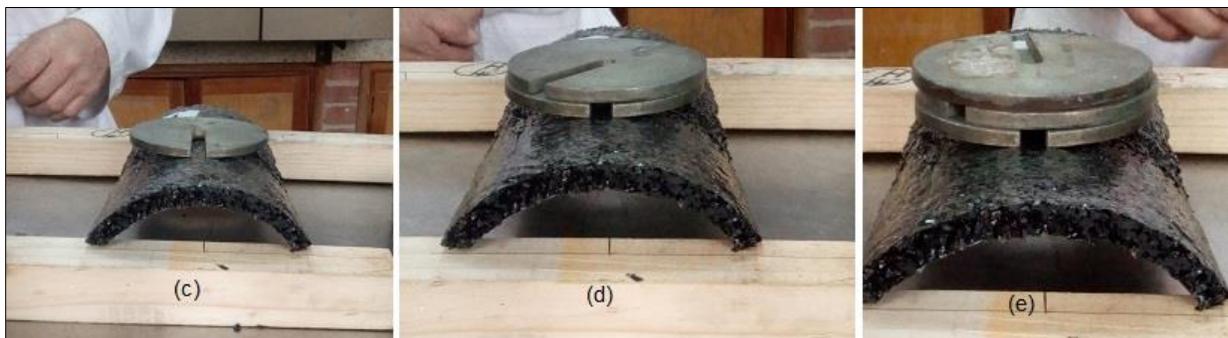
Fuente: elaboración propia. Aplicando carga controlada

**Figura 24**  
Reporte de datos



Fuente: elaboración propia. Datos obtenidos

**Figura 25**  
Prueba No.2



Fuente: elaboración propia. Secuencia según peso sobre prototipo

**Figura 26***Prueba No.3, cargas controladas*

Fuente: elaboración propia. (a) Montaje (b) peso No. 1 (c) peso No. 2

**Figura 27***Prueba No.3, cargas controladas*

Fuente: elaboración propia. (d) peso No. 3 (e) peso No. 4 (f) peso No.5

**Tabla 10**  
*Datos - deformación*

No.	Peso (kg)	Deformación (mm)	Deformación (%)	Tiempo (min)
1	0,5	1,37	1,89	8,4
2	1,0	3,26	1,74	7,8
3	1,5	5,00	2,0	7,1
4	2,0	7,00	2,38	6,8
5	2,5	9,38	8,01	6,2

Fuente: Elaboración propia

**Figura 28**  
*Gráfica Peso vs Deformación*



Fuente: elaboración propia. Deformación directamente proporcional al peso.

**Figura 29***Grafica Deformación vs Tiempo*

Fuente: elaboración propia. La deformación tiende a estabilizarse a través del tiempo, a medida que incrementa el peso.

De acuerdo con los resultados obtenidos en la prueba de resistencia realizada en laboratorio, a los prototipos elaborados con material Granulado Reciclado de llanta, resina de poliuretano y solvente xilol, pruebas 7 y 8 de la fase 2, es necesario elaborar nuevos prototipos, empleando otro tipo de resina y solvente, modificar las proporciones GCR, con el propósito de disminuir los espacios de vacío, aumentar la rigidez.

### Elaboración de Teja Ecológica a Base de material Granulado Reciclado de llanta Fase 3

En el desarrollo de ésta fase, se llevan a cabo las pruebas No. 9 y No. 10 respectivamente, en cada una de ellas se detalla la secuencia de elaboración del material para los prototipos y las observaciones realizadas desde el vaciado de la mezcla hasta el desmolde, es importa resaltar que para el fraguado del material las formaletas se ubican en posición horizontal, para evitar el escurrimiento del solvente y su acumulación en la base de apoyo.

#### Procedimiento prueba No 9

Para la prueba No. 9, el proceso de elaboración de mezcla de detalla en el diagrama No. 4 y contempla el uso de granulo de caucho reciclado (GCR) y resina de poliestireno expandido (ver figura 30) el propósito es obtener prototipos con características óptimas a los cuales se les realizan pruebas de laboratorio para determinar el comportamiento de las propiedades físicas, las observaciones realizadas durante el proceso de elaboración de los especímenes se consignan en la tabla No. 13.

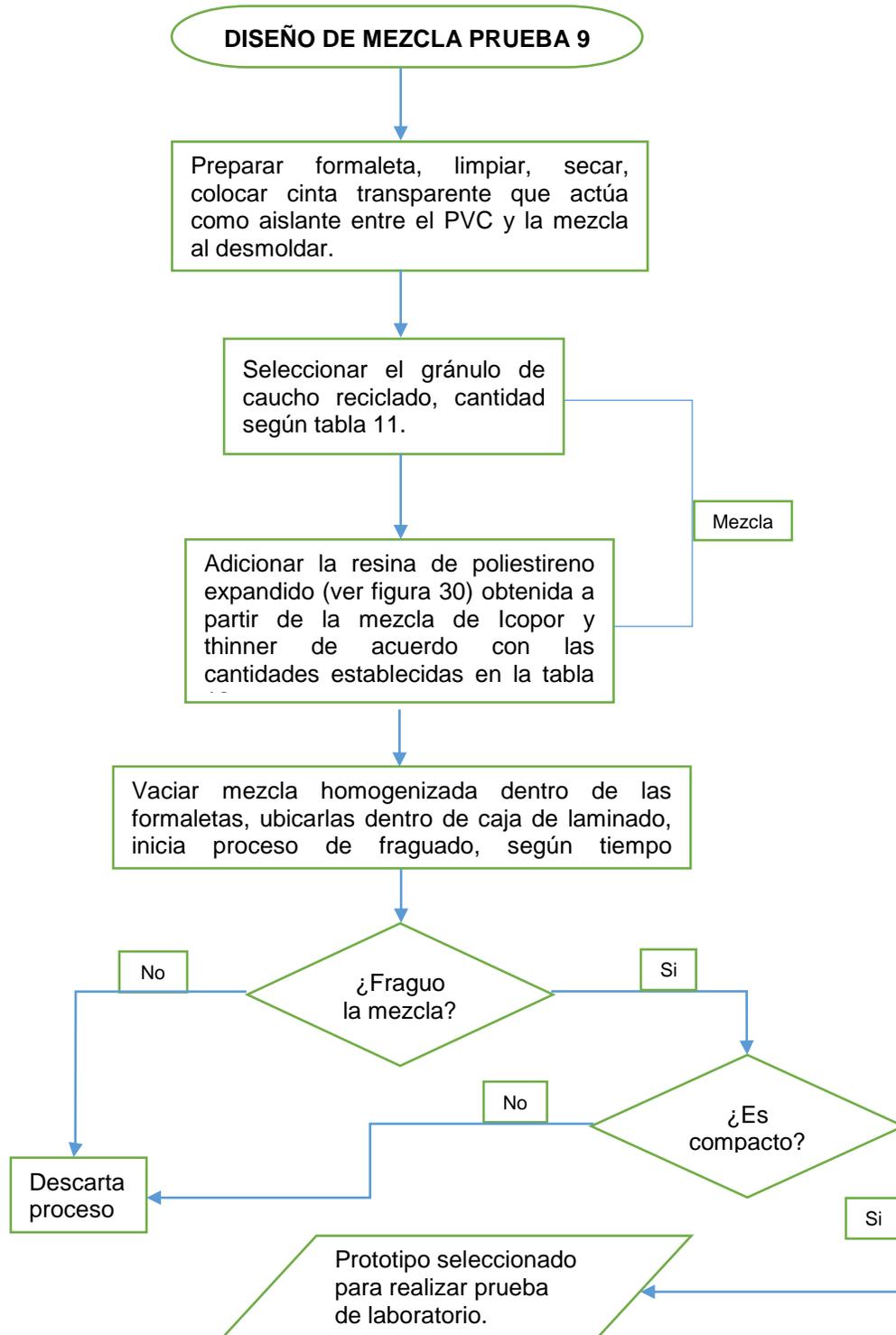
#### Figura 30

*Resina de poliestireno expandido*



Fuente: elaboración propia. (a) Icopor, (b) Thinner, (c) Resina obtenida.

**Diagrama 6**  
Diseño de mezcla



Fuente: elaboración propia.

**Tabla 11***Dosificación de materiales*

Ensayo	Granulo de Caucho Reciclado (g)	Resina Poliestireno (ml)
No.9	555,00	375,00

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 12***Proporción de materiales*

Prueba	Icopor (g)	Thinner (ml)	Resina Poliestireno Obtenida (ml)
No. 9	35	345	375

Fuente: Elaboración propia.

**Observaciones realizadas****Tabla 13***Observaciones prueba No. 9*

Prueba	Observaciones
No. 9	<p>La resina de poliestireno expandido (ver figura 30) de aspecto acuoso, color grisáceo, con propiedades adherentes, mezclada con el GRC y vaciada en las formaletas, es desmoldada pasados cinco días, una vez verificado el fraguado de la mezcla en condiciones ambientales (19°C).</p> <p>Se observa que un porcentaje de gránulo permanece adherido a la cinta de la formaleta (ver figura 31) el prototipo presenta gran rigidez y un salto grado de porosidad, lo que produce el resquebrajamiento del espécimen, no se observa presencia de resina en estado líquido y conserva la opacidad (ver figura 32).</p> <p>El material presenta consistencia de compactación cristalina, al ejercer presión sobre éste, retoma la forma de granulo suelto, el prototipo obtenido no cumple con las condiciones óptimas para realizar pruebas de laboratorio por lo tanto es descartado.</p>

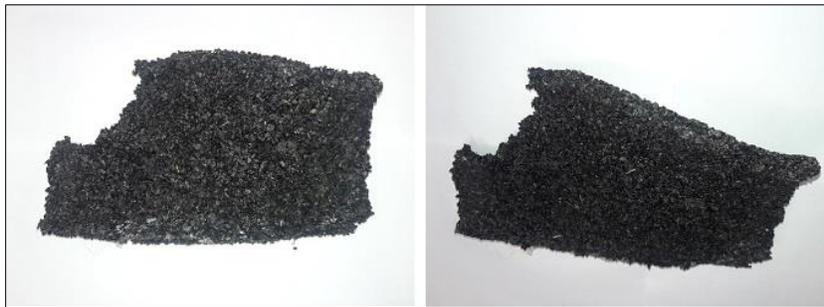
Fuente: Elaboración propia.

**Figura 31**  
*Formaleta*



Fuente: elaboración propia. Estado posterior al desmolde.

**Figura 32**  
*Prototipo obtenido*



Fuente: elaboración propia. Ensayo 9.

### **Procedimiento prueba No 10**

En la prueba No.10 se desarrolla el proceso de elaboración de prototipos de teja ecológica obtenida a base de material granulado de caucho reciclado (GCR) mezclado con catalizador (Mek) y resina poliéster, de acuerdo con la dosificación establecida en la tabla 14 y al procedimiento establecido en el diagrama 5.

Para el desarrollo de esta prueba se incrementó la cantidad de granulo de caucho reciclado (GCR) durante el proceso de vaciado la mezcla es acomodada con ayuda de una paleta de madera con el propósito de disminuir espacios de vacío, generados entre las partículas (ver figura 33 c) las formaletas para esta prueba fueron acomodadas en sentido horizontal durante el tiempo de fraguado, como se observa en la figura 34. El propósito de obtener una muestra óptima que permita ser sometida a pruebas en laboratorio, a los prototipos seleccionados se les aplica con brocha una capa de la mezcla Mek con resina poliéster, para dar mejor acabado, las observaciones se registran en la tabla 15.

**Tabla 14**  
*Dosificación de materiales*

Prueba	Granulo de Caucho Reciclado (g)	Resina Poliéster (ml)	Mek (catalizador) (ml)
No.10	640,00	150,00	3,00

Fuente: Elaboración propia.

**Figura 33**  
*Mezcla, prueba No.10*



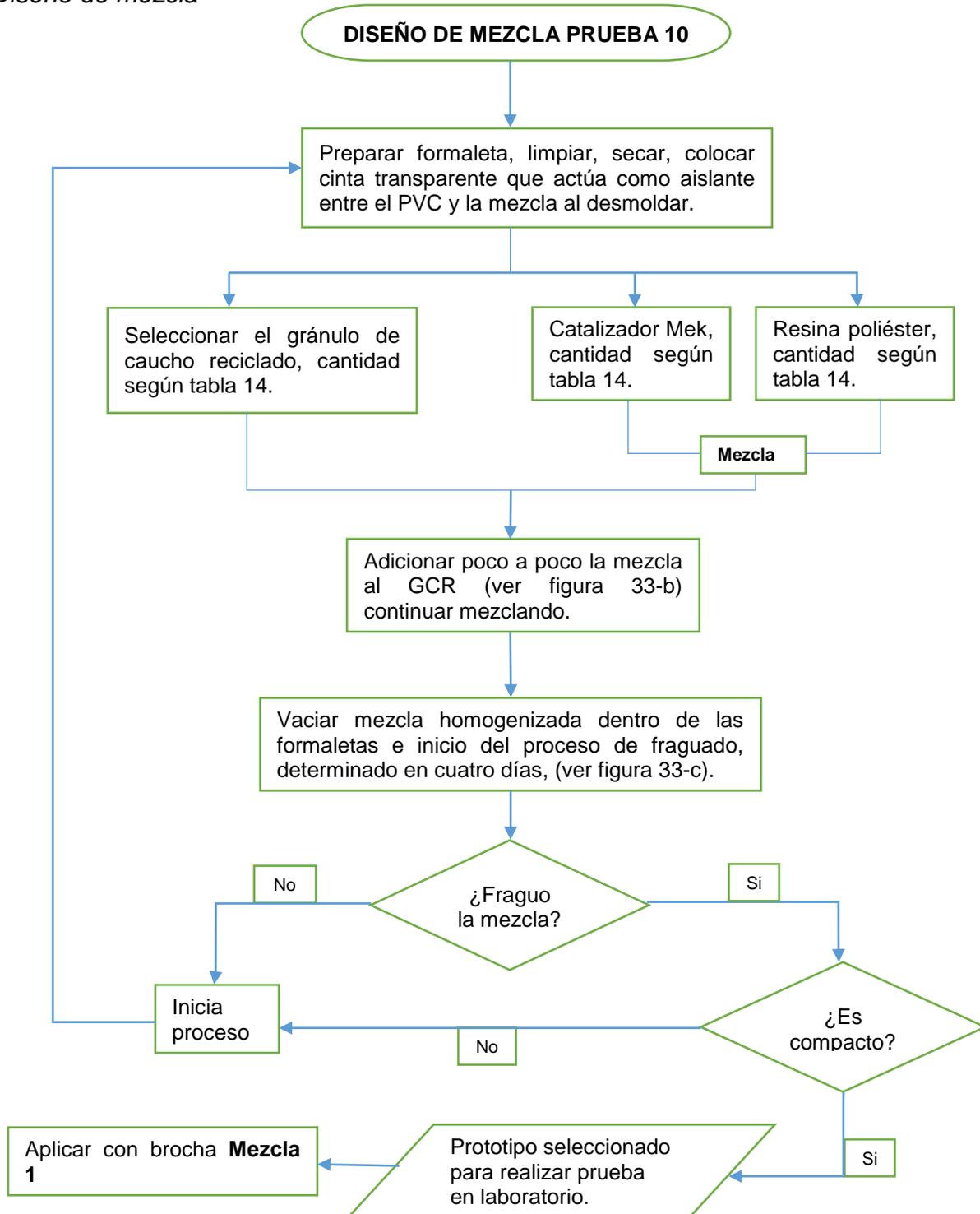
Fuente: elaboración propia. (a) Resina poliéster, Mek (b) Mezcla (c) Vaciado

**Figura 34**  
*Formaleta con mezcla*



Fuente: elaboración propia. Prototipos para desmolde

**Diagrama 7**  
*Diseño de mezcla*



Fuente: elaboración propia.

**Observaciones realizadas****Tabla 15***Observaciones, prueba No.10*

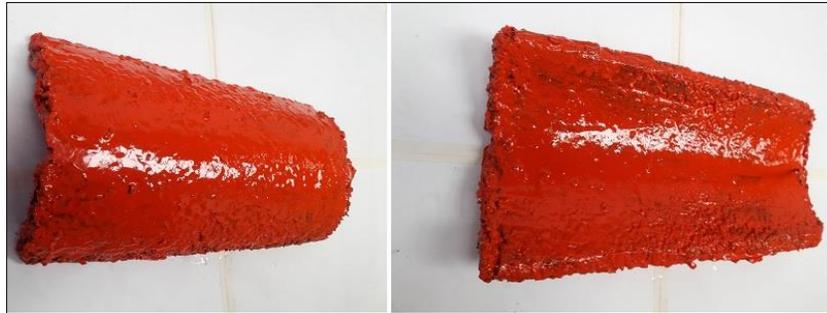
Prueba	Observaciones
No. 10	<p>La resina de poliéster mezclada con el Mek, desprende olor químico fuerte, al adicionar granulo de caucho reciclado presenta un nivel óptimo de adherencia y no genera cambio visible en las propiedades físicas.</p> <p>La mezcla se realiza en condición ambiente (19° C) es densa, el color predominante es el negro del granulo de caucho reciclado, el nivel de adherencia entre las partículas es bueno.</p> <p>El desmolde se realiza cuatro días después del vaciado, se observa un espécimen de apariencia compacta, de aspecto brillante, no permite el paso de luz, la presencia de porosidad es mínima, y se decide aplicar en ambas caras del prototipo una capa adicional de resina poliéster, obteniendo como resultado un prototipo con textura lisa, brillante (ver figura 35) por lo tanto es seleccionado para realizar pruebas en laboratorio.</p>

Fuente: Elaboración propia.

**Figura 35***Prototipo obtenido*

Fuente: elaboración propia. Prueba 10.

Considerando que el paso del tiempo provoca color amarillento en los objetos elaborados con resina poliéster, se aplica una capa de pintura base aceite a los prototipos como se observa en la figura 36.

**Figura 36***Prototipo con pintura*

Fuente: elaboración propia. Prototipo para prueba en laboratorio

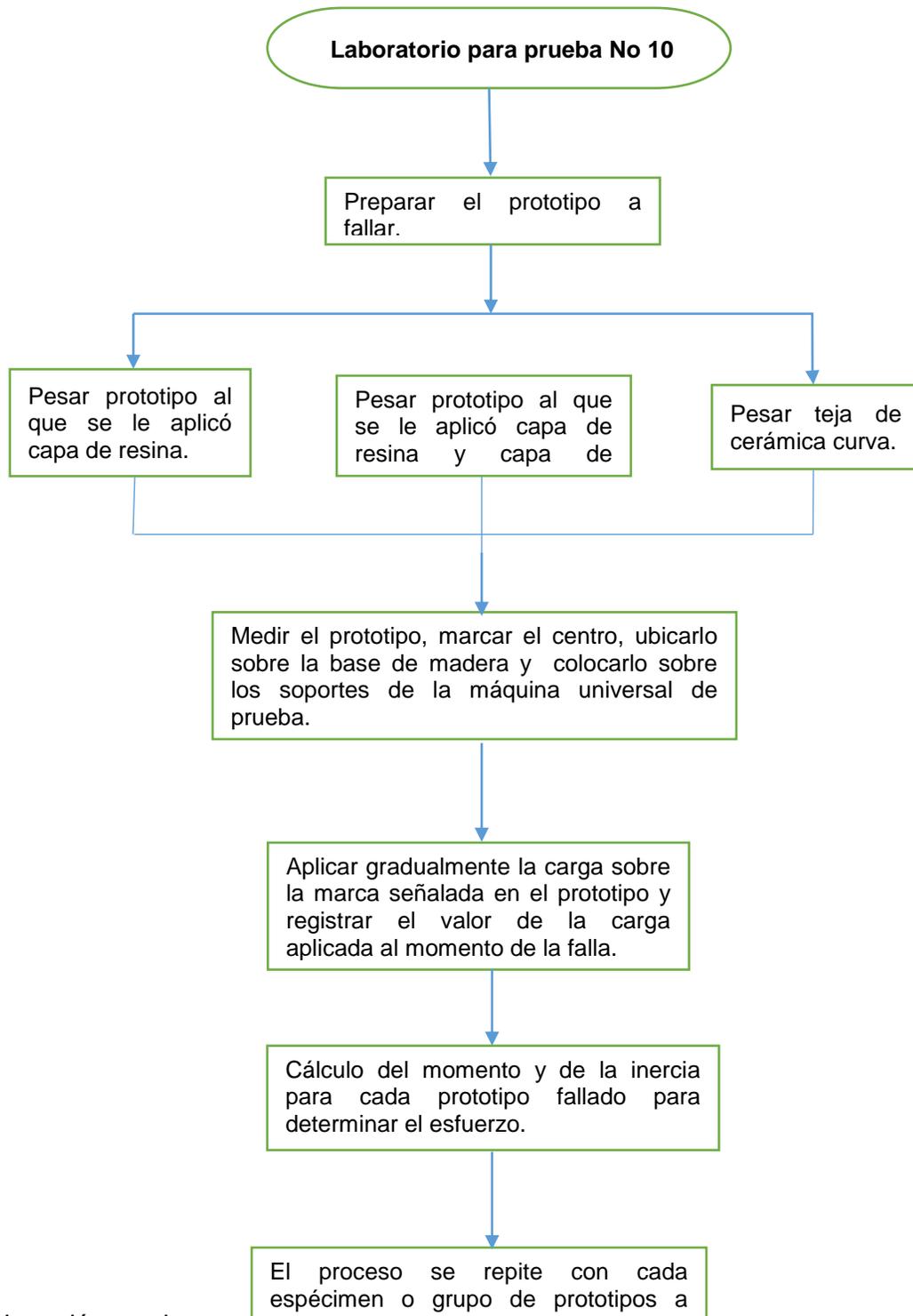
Para realizar un análisis comparativo, se determina exponer dos prototipos a la intemperie durante 90 días, como se observa en la figura 37 y posteriormente se realiza prueba de resistencia de materiales, como en la teja de cerámica curva.

**Figura 37***Prototipo a la intemperie*

Fuente: elaboración propia. Prototipo para prueba en laboratorio

**Prueba de resistencia**

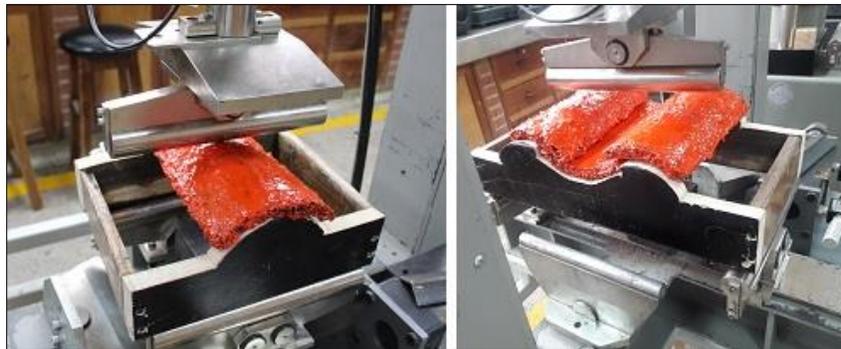
El desarrollo de la prueba de resistencia de materiales, a la que se someten los especímenes en la máquina universal de ensayos, se lleva a cabo utilizando una estructura en madera, que simula el apoyo del tejado, como se muestra en las figuras 38, 39 y 40, una vez determinado el centro del prototipo, se aplican cargas puntuales sobre este hasta lograr la falla del material, el procedimiento detallado se describe en el diagrama 6 y los datos obtenidos en el desarrollo de la prueba se registran en tablas, para ser utilizados en cálculos, gráficos y el respectivo análisis que determina la viabilidad del material, para la elaboración de la teja ecológica obtenida a base de material granulado reciclado de llanta.

**Diagrama 8***Prueba de resistencia*

Fuente: elaboración propia.

**Figura 38**

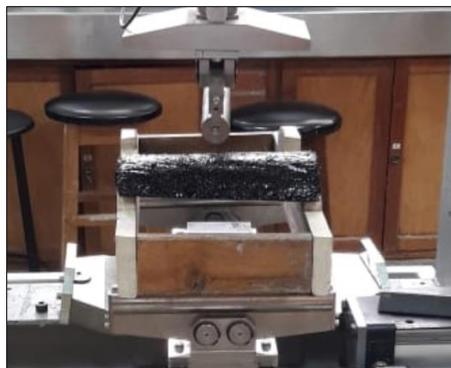
*Prototipo con acabado resina poliéster y pintura*



Fuente: elaboración propia. Prototipo sobre estructura de apoyo

**Figura 39**

*Prototipo con acabado resina poliéster*



Fuente: elaboración propia. Prototipo sobre estructura de apoyo

**Figura 40**

*Teja de cerámica curva*



Fuente: elaboración propia. Prototipo sobre estructura de apoyo

La figura 41, muestra el resultado de falla, para los prototipos elaborados y para la teja de cerámica curva en el desarrollo de la prueba de resistencia.

**Figura 41**  
*Prototipo fallado*



Fuente: elaboración propia.

### ***Datos Obtenidos en la prueba de resistencia***

Los datos obtenidos, registrados en la tabla 16 corresponden a los prototipos elaborados en la prueba No. 10, con acabado capa de resina y capa de pintura base aceite.

**Tabla 16**  
*Prototipo 1-5*

Prototipo	Cantidad (und)	Peso (g)	Carga de falla (kN)
1	1	671	0,15
2	1	716	0,18
3	1	594	0,18
4	1	589	0,20
5	1	662	0,19

Fuente: elaboración propia. Datos obtenidos en laboratorio

Los datos obtenidos, registrados en la tabla 17 corresponden a tejas de cerámica curva, adquiridas en sitios diferentes, fallados para realizar comparación respecto al comportamiento de la resistencia del material elaborado a base de granulo de caucho reciclado de llanta.

**Tabla 17**  
*Prototipo 6-10*

Teja	Cantidad (und)	Peso (g)	Carga de falla (kN)
6	1	875	0,16
7	1	760	0,57
8	1	797	1,17
9	1	846	0,22
10	1	900	0,49

Fuente: elaboración propia. Datos obtenidos en laboratorio

Los datos obtenidos, registrados en la tabla 18 corresponden al prototipo elaborado en la prueba No. 10, con acabado capa de resina y expuestos a la intemperie durante noventa días.

**Tabla 18**  
*Prototipo 11*

Prototipo	Cantidad (und)	Peso (g)	Carga de falla (kN)
11	1	620	0,18

Fuente: elaboración propia. Datos obtenidos en laboratorio

Los datos obtenidos y registrados en la tabla 19 corresponden al prototipo elaborado en la prueba No. 10, con acabado capa de resina, capa de pintura base aceite y sometidos a la intemperie durante noventa días.

**Tabla 19**  
*Prototipo 12*

Prototipo	Cantidad (und)	Peso (g)	Carga de falla (kN)
12	1	714	0,20

Fuente: elaboración propia. Datos obtenidos en laboratorio

Prototipos GCR, con acabado capa resina y capa de pintura base aceite en grupo de 3 unidades

**Tabla 20**  
*Prototipo 13-15*

Prototipo	Cantidad (und)	Peso (g)	Carga de falla (kN)
13	3	1950	0,51
14	3	2115	0,81
15	3	1806	0,65

Fuente: elaboración propia. Datos obtenidos en laboratorio

Prototipos teja cerámica, en grupo de 3 unidades, las cuales fueron adquiridas en sitios diferentes.

**Tabla 21**  
*Prototipo 16-18*

Prototipo	Cantidad (und)	Peso (g)	Carga de falla (kN)
16	3	2670	1,23
17	3	2340	1,88
18	3	2685	1,40

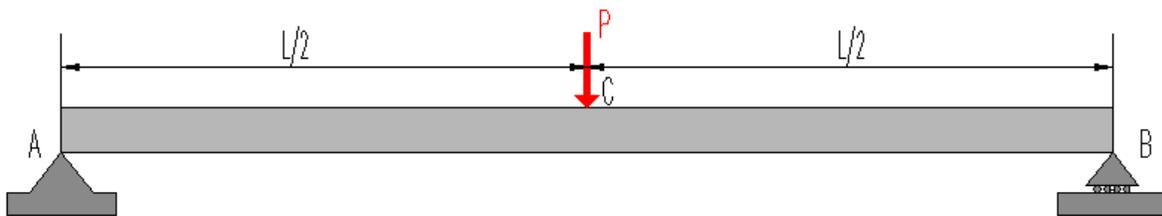
Fuente: elaboración propia. Datos obtenidos en laboratorio

### Cálculos

El proceso realizado con los prototipos en la maquina universal de prueba son considerados como una viga simplemente apoyada en los extremos AB, con longitud definida  $L$  y sometida a una carga puntual  $P$ , que actúa en su punto medio  $C$ , como se observa en la figuras 42.

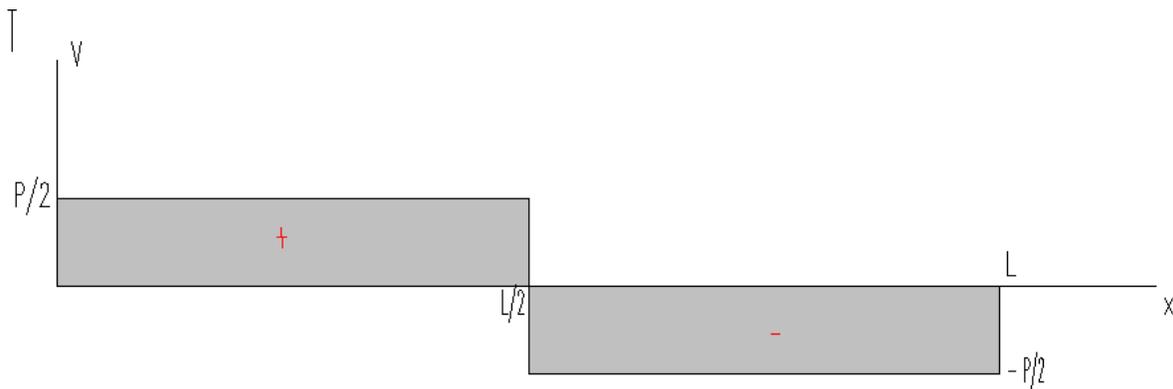
La figura 43 y 44, representa los diagramas de fuerza cortante y momento flector respectivamente, para la viga en consideración.

**Figura 42**  
*Esfuerzo aplicado*

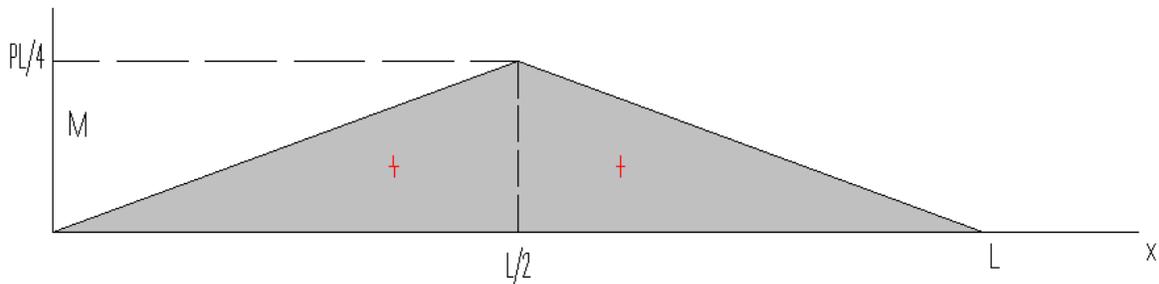


Fuente: Adaptada de (Beer & Russell Johnston, Jr., 1999).

**Figura 43**  
*Diagrama de fuerza cortante*



Fuente: Adaptada de (Beer & Russell Johnston, Jr., 1999)

**Figura 44***Diagrama de momento flector*

Fuente: Adaptada de (Beer &amp; Russell Johnston, Jr., 1999)

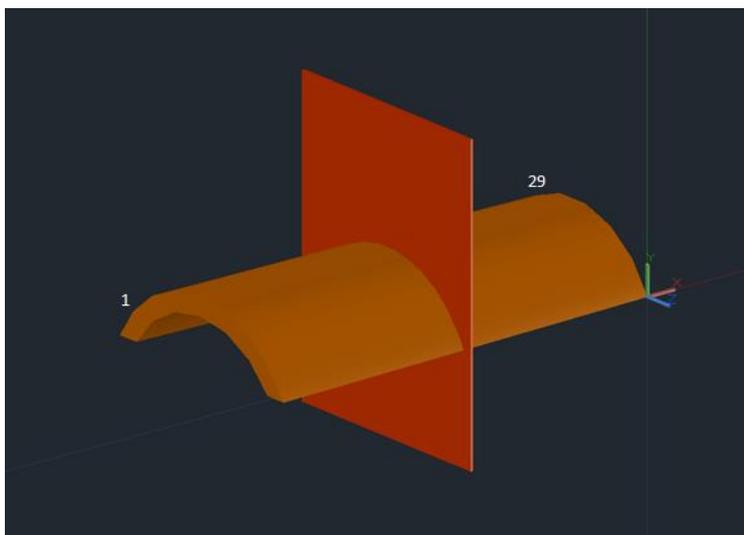
Reacciones:  $R_A = R_B = \frac{P}{2}$

Esfuerzos cortantes:  $V_{AC} = -V_{CB} = \frac{P}{2}$

Momentos Flectores:  $M_{AC} = \frac{Px}{2}$        $M_{CB} = \frac{P(L-x)}{2}$        $M_{m\acute{a}x} = M_C = \frac{PL}{4}$

El prototipo se dibuja con software AutoCAD, se determina longitudinalmente, sección transversal cada centímetro, iniciando la medida en la parte ancha (ver figura 45), cada sección es convertida en región y cada región a través del comando “massprop” o “propfis” del software, le es determina la inercia y el centroide, información que se registra en la tabla 22, elementos necesarios para calcular el esfuerzo.

**Figura 45**  
Representación sección transversal



Fuente: elaboración propia.

**Tabla 22**  
Datos software AutoCAD

Sección Transv.	Datos AutoCAD	Centro de gravedad/ Inercia
1	Área: 25.1295	
	Perímetro: 36.5060	
	Cuadro delimitador: X: -7.5000 -- 7.5000 Y: 0.0000 -- 5.2059	
	Centro de gravedad: X: 0.0000 Y: 3.0524	3,05E-04
	Momentos de inercia: X: 276.3334 Y: 469.1019	
	Producto de inercia: XY: 0.0000	
	Radios de giro: X: 3.3161 Y: 4.3206	4,21954E-07
	Momentos principales y direcciones X-Y alrededor del centro de gravedad: I: 42.1954 a lo largo de [1.0000 0.0000] J: 469.1019 a lo largo de [0.0000 1.0000]	
	<hr/>	
	2	Área: 24.8476 Perímetro: 36.1301 Cuadro delimitador: X: -7.5000 -- 7.4060 Y: 0.0000 -- 5.1291 Centro de gravedad: X: -0.0470 Y: 3.0067 Momentos de inercia: X: 264.7596 Y: 456.1073 Producto de inercia: XY: 3.5113

	Radios de giro: X: 3.2643 Y: 4.2844 Momentos principales y direcciones X-Y alrededor del centro de gravedad: I: 40.1352 a lo largo de [1.0000 0.0000] J: 456.0524 a lo largo de [0.0000 1.0000]	4,01352E-07
3	Área: 24.7074 Perímetro: 35.9433 Cuadro delimitador: X: -7.4295 -- 7.4295 Y: 0.0000 -- 5.0908 Centro de gravedad: X: 0.0000 Y: 2.9839 Momentos de inercia: X: 259.1139 Y: 449.6517 Producto de inercia: XY: 0.0000 Radios de giro: X: 3.2384 Y: 4.2660 Momentos principales y direcciones X-Y alrededor del centro de gravedad: I: 39.1340 a lo largo de [1.0000 0.0000] J: 449.6517 a lo largo de [0.0000 1.0000]	2,98E-04       3,91340E-07
4	Área: 24.5708 Perímetro: 35.7611 Cuadro delimitador: X: -7.4065 -- 7.4065 Y: 0.0000 -- 5.0533 Centro de gravedad: X: 0.0000 Y: 2.9616 Momentos de inercia: X: 253.6781 Y: 443.4665 Producto de inercia: XY: 0.0000 Radios de giro: X: 3.2132 Y: 4.2484 Momentos principales y direcciones X-Y alrededor del centro de gravedad: I: 38.1726 a lo largo de [1.0000 0.0000] J: 443.4665 a lo largo de [0.0000 1.0000]	2,96E-04       3,91726E-07
5	Área: 24.4318 Perímetro: 35.5758 Cuadro delimitador: X: -7.3830 -- 7.3830 Y: 0.0000 -- 5.0151 Centro de gravedad: X: 0.0000 Y: 2.9388 Momentos de inercia: X: 248.2147 Y: 437.2274 Producto de inercia: XY: 0.0000 Radios de giro: X: 3.1874 Y: 4.2303 Momentos principales y direcciones X-Y alrededor del centro de gravedad: I: 37.2089 a lo largo de [1.0000 0.0000] J: 437.2274 a lo largo de [0.0000 1.0000]	2,93E-04       3,72089E-07
6	Área: 24.2934 Perímetro: 35.3912 Cuadro delimitador: X: -7.3830 -- 7.3360 Y: 0.0000 -- 4.9769	2,92E-04



	I: 33.5378 a lo largo de [1.0000 0.0000] J: 413.0737 a lo largo de [0.0000 1.0000]	
10	<p>Área: 23.7458            Perímetro: 34.6610            Cuadro delimitador: X: -7.2655 -- 7.2655                                      Y: 0.0000 -- 4.8249            Centro de gravedad: X: 0.0000                                      Y: 2.8255            Momentos de inercia: X: 222.2353                                      Y: 407.2332            Producto de inercia: XY: 0.0000            Radios de giro: X: 3.0592                                  Y: 4.1412            Momentos principales y direcciones X-Y alrededor del centro de gravedad:</p> <p>I: 32.6648 a lo largo de [1.0000 0.0000]            J: 407.2332 a lo largo de [0.0000 1.0000]</p>	2,83E-04            3,26648E-07
11	<p>Área: 23.4785            Perímetro: 34.3047            Cuadro delimitador: X: -7.2655 -- 7.1725                                      Y: 0.0000 -- 4.7500            Centro de gravedad: X: -0.0465                                      Y: 2.7808            Momentos de inercia: X: 212.5504                                      Y: 395.9568            Producto de inercia: XY: 3.0360            Radios de giro: X: 3.0088                                  Y: 4.1067            Momentos principales y direcciones X-Y alrededor del centro de gravedad:</p> <p>I: 30.9887 a lo largo de [1.0000 0.0000]            J: 395.9060 a lo largo de [0.0000 1.0000]</p>	2,78E-04            3,09887E-07
12	<p>Área: 23.3444            Perímetro: 34.1259            Cuadro delimitador: X: -7.2655 -- 7.1255                                      Y: 0.0000 -- 4.7122            Centro de gravedad: X: -0.0700                                      Y: 2.7583            Momentos de inercia: X: 207.7805                                      Y: 390.4109            Producto de inercia: XY: 4.5074            Radios de giro: X: 2.9834                                  Y: 4.0895            Momentos principales y direcciones X-Y alrededor del centro de gravedad:</p> <p>I: 30.1672 a lo largo de [1.0000 0.0000]            J: 390.2965 a lo largo de [0.0000 1.0000]</p>	2,76E-04            3,01672E-07
13	<p>Área: 23.2110            Perímetro: 33.9480            Cuadro delimitador: X: -7.2655 -- 7.0785                                      Y: 0.0000 -- 4.6745            Centro de gravedad: X: -0.0935                                      Y: 2.7358            Momentos de inercia: X: 203.0927                                      Y: 384.9663</p>	2,74E-04

	Producto de inercia: XY: 5.9374 Radios de giro: X: 2.9580 Y: 4.0725 Momentos principales y direcciones X-Y alrededor del centro de gravedad: I: 29.3626 a lo largo de [1.0000 0.0000] J: 384.7634 a lo largo de [0.0000 1.0000]	2,93626E-07
14	Área: 23.0782 Perímetro: 33.7709 Cuadro delimitador: X: -7.2655 -- 7.0315 Y: 0.0000 -- 4.6369 Centro de gravedad: X: -0.1170 Y: 2.7134 Momentos de inercia: X: 198.4862 Y: 379.6221 Producto de inercia: XY: 7.3265 Radios de giro: X: 2.9327 Y: 4.0558 Momentos principales y direcciones X-Y alrededor del centro de gravedad: I: 28.5745 a lo largo de [1.0000 0.0000] J: 379.3062 a lo largo de [0.0000 1.0000]	2,71E-04       2,85745E-07
15	Área: 22.9461 Perímetro: 33.5948 Cuadro delimitador: X: -7.2655 -- 6.9845 Y: 0.0000 -- 4.5992 Centro de gravedad: X: -0.1405 Y: 2.6909 Momentos de inercia: X: 193.9598 Y: 374.3773 Producto de inercia: XY: 8.6754 Radios de giro: X: 2.9074 Y: 4.0392 Momentos principales y direcciones X-Y alrededor del centro de gravedad: I: 27.8029 a lo largo de [1.0000 0.0000] J: 373.9243 a lo largo de [0.0000 1.0000]	2,69E-04       2,78029E-07
16	Área: 22.6839 Perímetro: 33.2452 Cuadro delimitador: X: -7.0780 -- 7.0780 Y: 0.0000 -- 4.5242 Centro de gravedad: X: 0.0000 Y: 2.6462 Momentos de inercia: X: 185.1435 Y: 363.3846 Producto de inercia: XY: 0.0000 Radios de giro: X: 2.8569 Y: 4.0024 Momentos principales y direcciones X-Y alrededor del centro de gravedad: I: 26.3081 a lo largo de [1.0000 0.0000] J: 363.3846 a lo largo de [0.0000 1.0000]	2,65E-04       2,63081E-07
17	Área: 22.5539 Perímetro: 33.0719 Cuadro delimitador: X: -7.0545 -- 7.0545	2,62E-04

	Y: 0.0000 -- 4.4867	
	Centro de gravedad: X: 0.0000	2,55844E-07
	Y: 2.6238	
	Momentos de inercia: X: 180.8515	
	Y: 358.2256	
	Producto de inercia: XY: 0.0000	
	Radios de giro: X: 2.8317	
	Y: 3.9854	
	Momentos principales y direcciones X-Y alrededor del centro de gravedad:	
	I: 25.5844 a lo largo de [1.0000 0.0000]	
	J: 358.2256 a lo largo de [0.0000 1.0000]	
	Área: 22.4273	
	Perímetro: 32.9031	
	Cuadro delimitador: X: -7.0315 -- 7.0315	
	Y: 0.0000 -- 4.4501	
	Centro de gravedad: X: 0.0000	
	Y: 2.6019	2,60E-04
	Momentos de inercia: X: 176.7245	
18	Y: 353.2472	
	Producto de inercia: XY: 0.0000	
	Radios de giro: X: 2.8071	2,48913E-07
	Y: 3.9687	
	Momentos principales y direcciones X-Y alrededor del centro de gravedad:	
	I: 24.8913 a lo largo de [1.0000 0.0000]	
	J: 353.2472 a lo largo de [0.0000 1.0000]	
	Área: 22.2987	
	Perímetro: 32.7316	
	Cuadro delimitador: X: -7.0080 -- 7.0080	
	Y: 0.0000 -- 4.4127	
	Centro de gravedad: X: 0.0000	
	Y: 2.5796	2,58E-04
	Momentos de inercia: X: 172.5821	
19	Y: 348.2326	
	Producto de inercia: XY: 0.0000	
	Radios de giro: X: 2.7820	2,41982E-07
	Y: 3.9518	
	Momentos principales y direcciones X-Y alrededor del centro de gravedad:	
	I: 24.1982 a lo largo de [1.0000 0.0000]	
	J: 348.2326 a lo largo de [0.0000 1.0000]	
	Área: 22.1708	
	Perímetro: 32.5611	
	Cuadro delimitador: X: -6.9845 -- 6.9845	
	Y: 0.0000 -- 4.3754	
	Centro de gravedad: X: 0.0000	
	Y: 2.5573	2,56E-04
	Momentos de inercia: X: 168.5137	
20	Y: 343.2901	
	Producto de inercia: XY: 0.0000	
	Radios de giro: X: 2.7569	
	Y: 3.9350	
	Momentos principales y direcciones X-Y alrededor del centro de gravedad:	
		2,35204E-07

---

	I: 23.5204 a lo largo de [1.0000 0.0000] J: 343.2901 a lo largo de [0.0000 1.0000]	
21	Área: 22.0437 Perímetro: 32.3916 Cuadro delimitador: X: -6.9610 -- 6.9610 Y: 0.0000 -- 4.3381 Centro de gravedad: X: 0.0000 Y: 2.5350	2,54E-04
	Momentos de inercia: X: 164.5185 Y: 338.4192 Producto de inercia: XY: 0.0000 Radios de giro: X: 2.7319 Y: 3.9182	2,28575E-07
	Momentos principales y direcciones X-Y alrededor del centro de gravedad: I: 22.8575 a lo largo de [1.0000 0.0000] J: 338.4192 a lo largo de [0.0000 1.0000]	
<hr/>		
22	Área: 21.9173 Perímetro: 32.2231 Cuadro delimitador: X: -6.9375 -- 6.9375 Y: 0.0000 -- 4.3009 Centro de gravedad: X: 0.0000 Y: 2.5128	2,51E-04
	Momentos de inercia: X: 160.5953 Y: 333.6195 Producto de inercia: XY: 0.0000 Radios de giro: X: 2.7069 Y: 3.9015	2,22093E-07
	Momentos principales y direcciones X-Y alrededor del centro de gravedad: I: 22.2093 a lo largo de [1.0000 0.0000] J: 333.6195 a lo largo de [0.0000 1.0000]	
<hr/>		
23	Área: 21.7917 Perímetro: 32.0556 Cuadro delimitador: X: -6.9375 -- 6.8905 Y: 0.0000 -- 4.2637 Centro de gravedad: X: -0.0235 Y: 2.4905	2,49E-04
	Momentos de inercia: X: 156.7433 Y: 328.9024 Producto de inercia: XY: 1.2754 Radios de giro: X: 2.6819 Y: 3.8850	2,15757E-07
	Momentos principales y direcciones X-Y alrededor del centro de gravedad: I: 21.5757 a lo largo de [1.0000 0.0000] J: 328.8903 a lo largo de [0.0000 1.0000]	
<hr/>		
24	Área: 21.6669 Perímetro: 31.8891 Cuadro delimitador: X: -6.8905 -- 6.8905 Y: 0.0000 -- 4.2265 Centro de gravedad: X: 0.0000 Y: 2.4683	2,47E-04
	Momentos de inercia: X: 152.9613 Y: 324.2312	

---

	Producto de inercia: XY: 0.0000 Radios de giro: X: 2.6570 Y: 3.8684 Momentos principales y direcciones X-Y alrededor del centro de gravedad: I: 20.9564 a lo largo de [1.0000 0.0000] J: 324.2312 a lo largo de [0.0000 1.0000]	2,09564E-07
25	Área: 21.4222 Perímetro: 31.5629 Cuadro delimitador: X: -6.8440 -- 6.8440 Y: 0.0000 -- 4.1531 Centro de gravedad: X: 0.0000 Y: 2.4243 Momentos de inercia: X: 145.6807 Y: 315.2165 Producto de inercia: XY: 0.0000 Radios de giro: X: 2.6078 Y: 3.8359 Momentos principales y direcciones X-Y alrededor del centro de gravedad: I: 19.7725 a lo largo de [1.0000 0.0000] J: 315.2165 a lo largo de [0.0000 1.0000]	2,42E-04  1,97725E-07
26	Área: 21.2997 Perímetro: 31.3996 Cuadro delimitador: X: -6.8205 -- 6.8205 Y: 0.0000 -- 4.1161 Centro de gravedad: X: 0.0000 Y: 2.4022 Momentos de inercia: X: 142.1017 Y: 310.7630 Producto de inercia: XY: 0.0000 Radios de giro: X: 2.5829 Y: 3.8197 Momentos principales y direcciones X-Y alrededor del centro de gravedad: I: 19.1948 a lo largo de [1.0000 0.0000] J: 310.7630 a lo largo de [0.0000 1.0000]	2,40E-04  1,91948E-07
27	Área: 21.1781 Perímetro: 31.2375 Cuadro delimitador: X: -6.7970 -- 6.7970 Y: 0.0000 -- 4.0791 Centro de gravedad: X: 0.0000 Y: 2.3800 Momentos de inercia: X: 138.5890 Y: 306.3775 Producto de inercia: XY: 0.0000 Radios de giro: X: 2.5581 Y: 3.8035 Momentos principales y direcciones X-Y alrededor del centro de gravedad: I: 18.6305 a lo largo de [1.0000 0.0000] J: 306.3775 a lo largo de [0.0000 1.0000]	2,38E-04  1,86305E-07
28	Área: 21.0573 Perímetro: 31.0764 Cuadro delimitador: X: -6.7735 -- 6.7735	2,36E-04

---

	Y: 0.0000 -- 4.0421	
	Centro de gravedad: X: 0.0000	
	Y: 2.3578	1,80797E-07
	Momentos de inercia: X: 135.1415	
	Y: 302.0595	
	Producto de inercia: XY: 0.0000	
	Radios de giro: X: 2.5333	
	Y: 3.7874	
	Momentos principales y direcciones X-Y alrededor del centro de gravedad:	
	I: 18.0797 a lo largo de [1.0000 0.0000]	
	J: 302.0595 a lo largo de [0.0000 1.0000]	

---

	Área: 20.9374	
	Perímetro: 30.9165	
	Cuadro delimitador: X: -6.7500 -- 6.7500	
	Y: 0.0000 -- 4.0052	
	Centro de gravedad: X: 0.0000	
	Y: 2.3356	2,34E-04
	Momentos de inercia: X: 131.7582	
29	Y: 297.8085	
	Producto de inercia: XY: 0.0000	
	Radios de giro: X: 2.5086	1,75420E-07
	Y: 3.7714	
	Momentos principales y direcciones X-Y alrededor del centro de gravedad:	
	I: 17.5420 a lo largo de [1.0000 0.0000]	
	J: 297.8085 a lo largo de [0.0000 1.0000]	

---

Fuente: Adaptada de reportes software AutoCAD

### Calculo del esfuerzo (T)

A partir de los elementos calculados (centroide e inercia) se determina la tensión, según la carga de falla del prototipo, los datos registrados en los cuadros de cálculo 1 a 4 corresponden a prototipos elaborados en el ensayo No. 10, con acabado capa de resina y capa de pintura base aceite.

#### Cuadro de cálculo 1

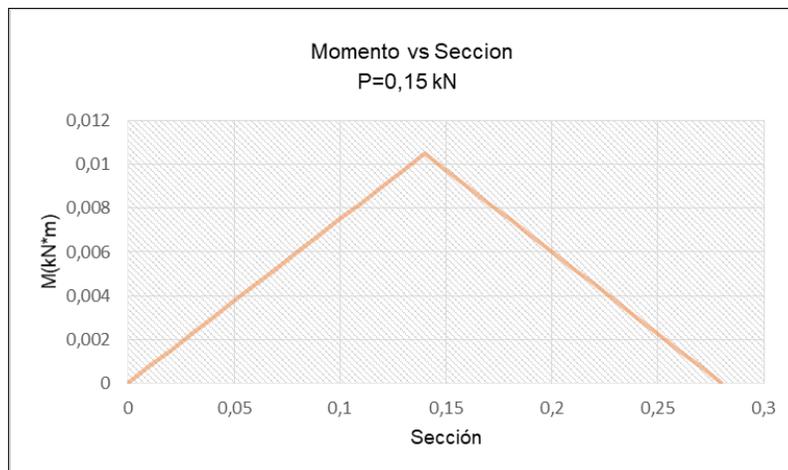
Prototipo 1 - P=0,15 kN

x (m)	M(x) (kN*m)	I(x) (m)	Y	T (kPa)
0	0	4,21954E-07	3,05E-04	0
0,01	0,00075	4,01352E-07	3,01E-04	0,56185717
0,02	0,00150	3,9134E-07	2,98E-04	1,14372413
0,03	0,00225	3,81726E-07	2,96E-04	1,74565002
0,04	0,00300	3,72089E-07	2,93E-04	2,36540183
0,05	0,00375	3,62638E-07	2,92E-04	3,01550720
0,06	0,00450	3,5337E-07	2,89E-04	3,68460820
0,07	0,00525	3,44284E-07	2,87E-04	4,37754151
0,08	0,00600	3,35378E-07	2,85E-04	5,09532527
0,09	0,00675	3,26648E-07	2,83E-04	5,83873925

0,1	0,00750	3,09887E-07	2,78E-04	6,73019520
0,11	0,00825	3,01672E-07	2,76E-04	7,54328377
0,12	0,00900	2,93626E-07	2,74E-04	8,38556531
0,13	0,00975	2,85745E-07	2,71E-04	9,25848221
0,14	0,01050	2,78029E-07	2,69E-04	10,1624111
0,15	0,00975	2,63081E-07	2,65E-04	9,80703662
0,16	0,00900	2,55844E-07	2,62E-04	9,22992136
0,17	0,00825	2,48913E-07	2,60E-04	8,62376614
0,18	0,00750	2,41982E-07	2,58E-04	7,99522279
0,19	0,00675	2,35204E-07	2,56E-04	7,33906524
0,2	0,00600	2,28575E-07	2,54E-04	6,65427103
0,21	0,00525	2,22093E-07	2,51E-04	5,93994408
0,22	0,00450	2,15757E-07	2,49E-04	5,19438535
0,23	0,00375	2,09564E-07	2,47E-04	4,41684879
0,24	0,00300	1,97725E-07	2,42E-04	3,67829056
0,25	0,00225	1,91948E-07	2,40E-04	2,81584075
0,26	0,00150	1,86305E-07	2,38E-04	1,91621266
0,27	0,00075	1,80797E-07	2,36E-04	0,97808592
0,28	0	1,7542E-07	2,34E-04	0

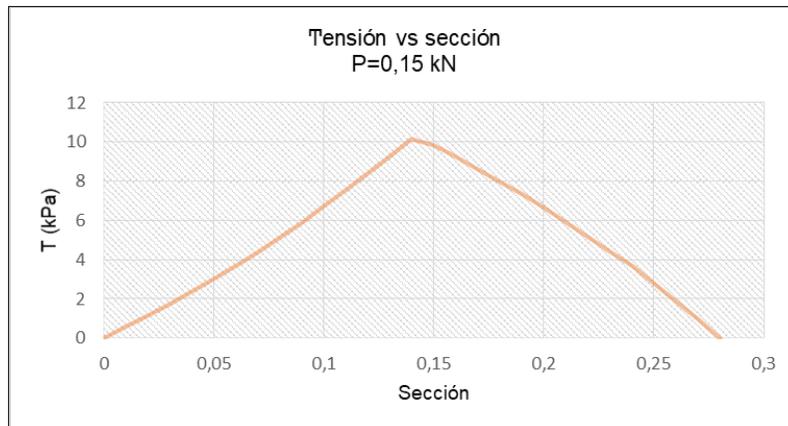
Fuente: Elaboración propia. Aplica para el prototipo 1

**Figura 46**  
Momento vs sección



Fuente: Elaboración propia

**Figura 47**  
Tensión vs sección



Fuente: Elaboración propia

**Cuadro de cálculo 2**  
Prototipo 2 y 3 -  $P= 0,18 \text{ kN}$

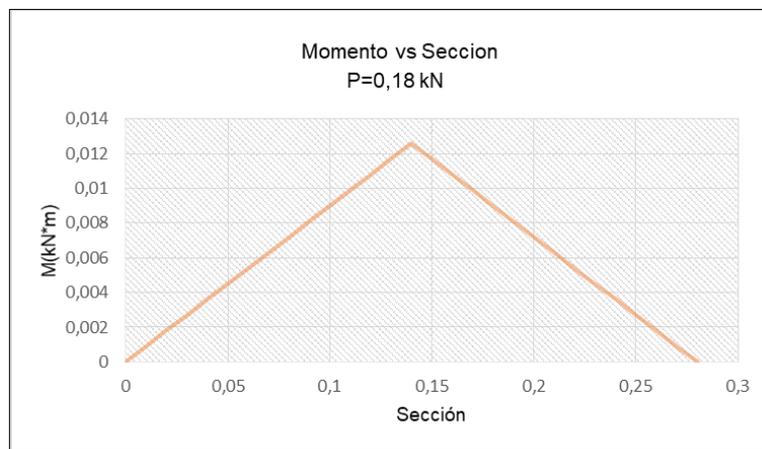
x (m)	M(x) (kN*m)	I(x) (m)	Y	T (kPa)
0	0	4,21954E-07	3,05E-04	0
0,01	0,0009	4,01352E-07	3,01E-04	0,67422861
0,02	0,0018	3,9134E-07	2,98E-04	1,37246895
0,03	0,0027	3,81726E-07	2,96E-04	2,09478003
0,04	0,0036	3,72089E-07	2,93E-04	2,83848219
0,05	0,0045	3,62638E-07	2,92E-04	3,61860864
0,06	0,0054	3,5337E-07	2,89E-04	4,42152984
0,07	0,0063	3,44284E-07	2,87E-04	5,25304981
0,08	0,0072	3,35378E-07	2,85E-04	6,11439033
0,09	0,0081	3,26648E-07	2,83E-04	7,00648711
0,1	0,009	3,09887E-07	2,78E-04	8,07623424
0,11	0,0099	3,01672E-07	2,76E-04	9,05194052
0,12	0,0108	2,93626E-07	2,74E-04	10,0626784
0,13	0,0117	2,85745E-07	2,71E-04	11,1101787
0,14	0,0126	2,78029E-07	2,69E-04	12,1948933
0,15	0,0117	2,63081E-07	2,65E-04	11,7684439
0,16	0,0108	2,55844E-07	2,62E-04	11,0759056
0,17	0,0099	2,48913E-07	2,60E-04	10,3485194
0,18	0,009	2,41982E-07	2,58E-04	9,59426734
0,19	0,0081	2,35204E-07	2,56E-04	8,80687828
0,2	0,0072	2,28575E-07	2,54E-04	7,98512523
0,21	0,0063	2,22093E-07	2,51E-04	7,12793289

0,22	0,0054	2,15757E-07	2,49E-04	6,23326242
0,23	0,0045	2,09564E-07	2,47E-04	5,30021855
0,24	0,0036	1,97725E-07	2,42E-04	4,41394867
0,25	0,0027	1,91948E-07	2,40E-04	3,3790089
0,26	0,0018	1,86305E-07	2,38E-04	2,29945519
0,27	0,0009	1,80797E-07	2,36E-04	1,1737031
0,28	0	1,7542E-07	2,34E-04	0

Fuente: Elaboración propia. Aplica para prototipo 2 y 3.

**Figura 48**

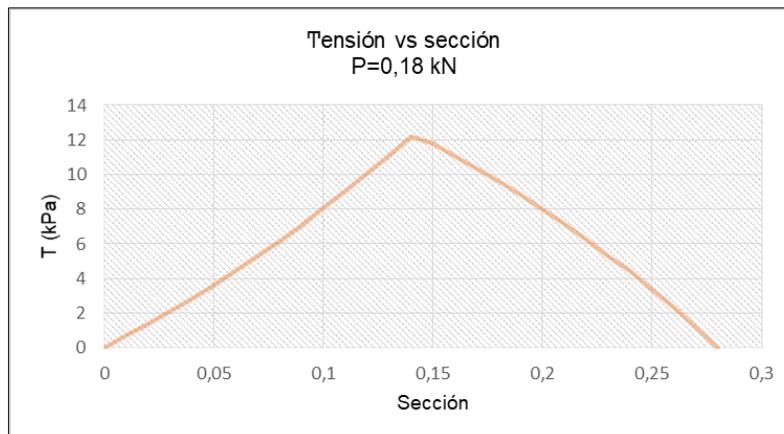
*Momento vs sección*



Fuente: Elaboración propia

**Figura 49**

*Tensión vs sección*



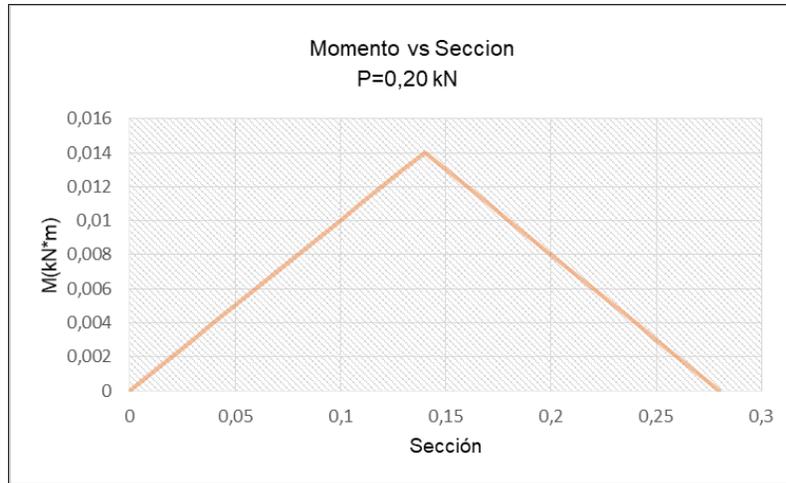
Fuente: Elaboración propia

**Cuadro de cálculo 3***Prototipo 4 - P= 0,20 kN*

x (m)	M(x) (kN*m)	I(x) (m)	Y	T (kPa)
0	0	4,21954E-07	3,05E-04	0
0,01	0,001	4,01352E-07	3,01E-04	0,7491429
0,02	0,00200	3,9134E-07	2,98E-04	1,5249655
0,03	0,003	3,81726E-07	2,96E-04	2,32753336
0,04	0,00400	3,72089E-07	2,93E-04	3,1538691
0,05	0,005	3,62638E-07	2,92E-04	4,02067627
0,06	0,00600	3,5337E-07	2,89E-04	4,91281093
0,07	0,007	3,44284E-07	2,87E-04	5,83672201
0,08	0,00800	3,35378E-07	2,85E-04	6,79376703
0,09	0,009	3,26648E-07	2,83E-04	7,78498567
0,1	0,01000	3,09887E-07	2,78E-04	8,97359360
0,11	0,011	3,01672E-07	2,76E-04	10,0577117
0,12	0,01200	2,93626E-07	2,74E-04	11,1807537
0,13	0,013	2,85745E-07	2,71E-04	12,344643
0,14	0,01400	2,78029E-07	2,69E-04	13,5498815
0,15	0,013	2,63081E-07	2,65E-04	13,0760488
0,16	0,01200	2,55844E-07	2,62E-04	12,3065618
0,17	0,011	2,48913E-07	2,60E-04	11,4983548
0,18	0,01000	2,41982E-07	2,58E-04	10,660297
0,19	0,009	2,35204E-07	2,56E-04	9,78542032
0,2	0,00800	2,28575E-07	2,54E-04	8,87236137
0,21	0,007	2,22093E-07	2,51E-04	7,91992544
0,22	0,00600	2,15757E-07	2,49E-04	6,92584713
0,23	0,005	2,09564E-07	2,47E-04	5,88913172
0,24	0,00400	1,97725E-07	2,42E-04	4,90438741
0,25	0,003	1,91948E-07	2,40E-04	3,75445433
0,26	0,00200	1,86305E-07	2,38E-04	2,55495022
0,27	0,001	1,80797E-07	2,36E-04	1,30411456
0,28	0	1,7542E-07	2,34E-04	0

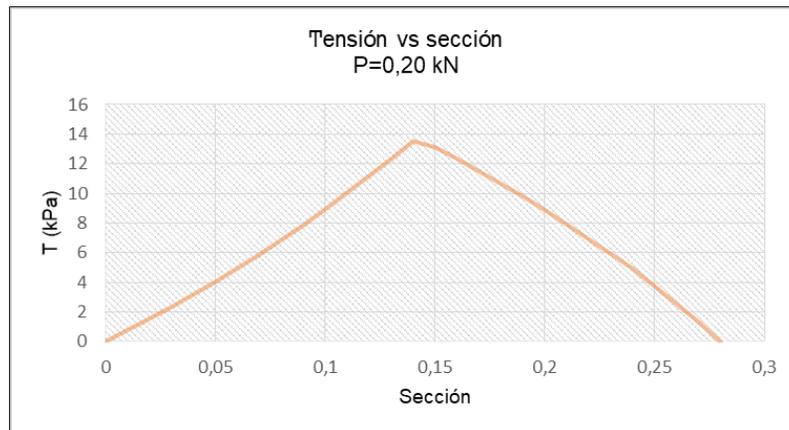
Fuente: Elaboración propia. Aplica para prototipo 4

**Figura 50**  
*Momento vs sección*



Fuente: Elaboración propia

**Figura 51**  
*Tensión vs sección*



Fuente: Elaboración propia

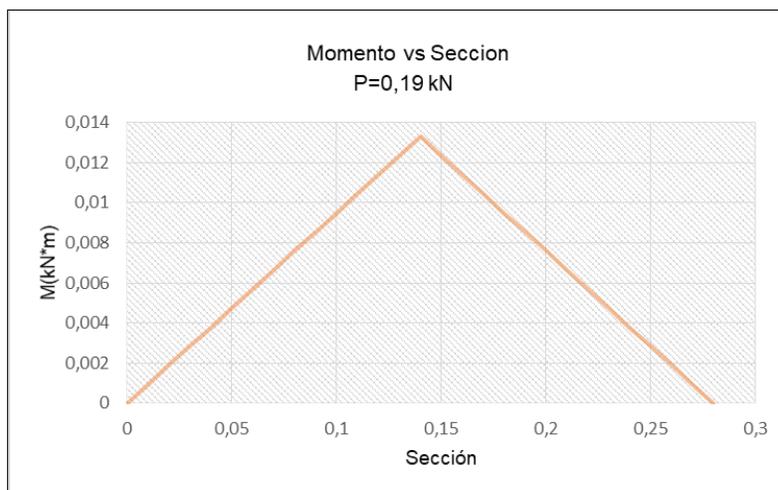
**Cuadro de cálculo 4**  
*Prototipo 5 - P=0,19 kN*

x (m)	M(x) (kN*m)	I(x) (m)	Y	T (kPa)
0	0	4,21954E-07	3,05E-04	0
0,01	0,00095	4,01352E-07	3,01E-04	0,71168575
0,02	0,00190	3,9134E-07	2,98E-04	1,44871723

0,03	0,00285	3,81726E-07	2,96E-04	2,21115669
0,04	0,00380	3,72089E-07	2,93E-04	2,99617565
0,05	0,00475	3,62638E-07	2,92E-04	3,81964245
0,06	0,00570	3,5337E-07	2,89E-04	4,66717039
0,07	0,00665	3,44284E-07	2,87E-04	5,54488591
0,08	0,00760	3,35378E-07	2,85E-04	6,45407868
0,09	0,00855	3,26648E-07	2,83E-04	7,39573639
0,1	0,00950	3,09887E-07	2,78E-04	8,52491392
0,11	0,01045	3,01672E-07	2,76E-04	9,5548261
0,12	0,01140	2,93626E-07	2,74E-04	10,6217161
0,13	0,01235	2,85745E-07	2,71E-04	11,7274108
0,14	0,01330	2,78029E-07	2,69E-04	12,8723874
0,15	0,01235	2,63081E-07	2,65E-04	12,4222464
0,16	0,01140	2,55844E-07	2,62E-04	11,6912337
0,17	0,01045	2,48913E-07	2,60E-04	10,9234371
0,18	0,00950	2,41982E-07	2,58E-04	10,1272822
0,19	0,00855	2,35204E-07	2,56E-04	9,2961493
0,2	0,00760	2,28575E-07	2,54E-04	8,4287433
0,21	0,00665	2,22093E-07	2,51E-04	7,52392916
0,22	0,00570	2,15757E-07	2,49E-04	6,57955478
0,23	0,00475	2,09564E-07	2,47E-04	5,59467514
0,24	0,00380	1,97725E-07	2,42E-04	4,65916804
0,25	0,00285	1,91948E-07	2,40E-04	3,56673161
0,26	0,00190	1,86305E-07	2,38E-04	2,42720271
0,27	0,00095	1,80797E-07	2,36E-04	1,23890883
0,28	0	1,7542E-07	2,34E-04	0

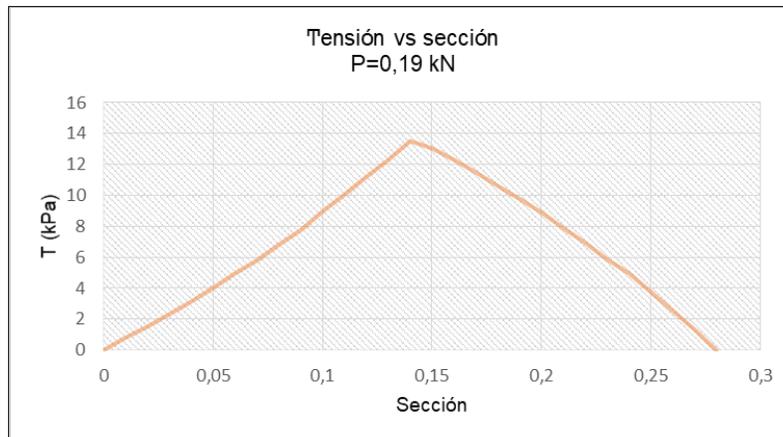
Fuente: Elaboración propia. Aplica para prototipo 5.

**Figura 52**  
*Momento vs sección*



Fuente: Elaboración propia

**Figura 53**  
Tensión vs sección



Fuente: Elaboración propia

Los datos registrados en los cuadros de cálculo 5 a 9 corresponden a las tejas de cerámica curva, falladas para realizar comparación respecto al comportamiento de la resistencia del material elaborado a base de granulo de caucho reciclado de llanta.

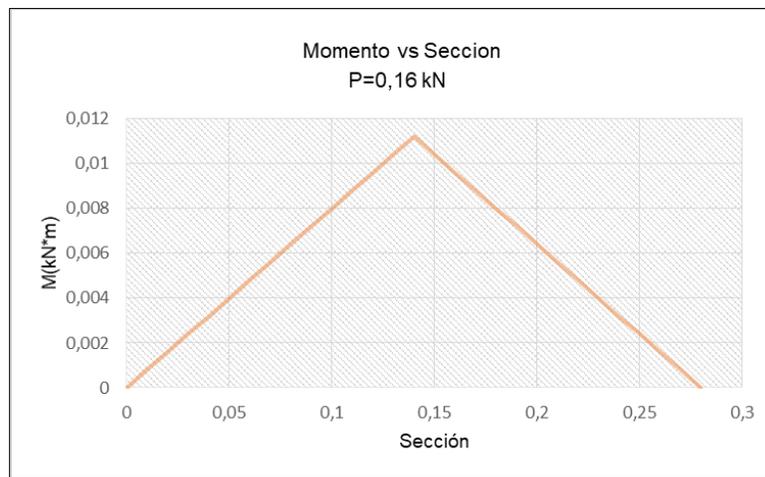
**Cuadro de cálculo 5**  
Prototipo 6 -  $P=0,16 \text{ kN}$

x (m)	M(x) (kN*m)	I(x) (m)	Y	T (kPa)
0	0	4,21954E-07	3,05E-04	0
0,01	0,0008	4,01352E-07	3,01E-04	0,59931432
0,02	0,00160	3,9134E-07	2,98E-04	1,2199724
0,03	0,0024	3,81726E-07	2,96E-04	1,86202669
0,04	0,00320	3,72089E-07	2,93E-04	2,52309528
0,05	0,004	3,62638E-07	2,92E-04	3,21654101
0,06	0,00480	3,5337E-07	2,89E-04	3,93024875
0,07	0,0056	3,44284E-07	2,87E-04	4,66937761
0,08	0,00640	3,35378E-07	2,85E-04	5,43501363
0,09	0,0072	3,26648E-07	2,83E-04	6,22798854
0,1	0,00800	3,09887E-07	2,78E-04	7,17887488
0,11	0,0088	3,01672E-07	2,76E-04	8,04616935
0,12	0,00960	2,93626E-07	2,74E-04	8,944603
0,13	0,0104	2,85745E-07	2,71E-04	9,87571436
0,14	0,01120	2,78029E-07	2,69E-04	10,8399052
0,15	0,0104	2,63081E-07	2,65E-04	10,4608391
0,16	0,00960	2,55844E-07	2,62E-04	9,84524945
0,17	0,0088	2,48913E-07	2,60E-04	9,19868388
0,18	0,00800	2,41982E-07	2,58E-04	8,52823764
0,19	0,0072	2,35204E-07	2,56E-04	7,82833625
0,2	0,00640	2,28575E-07	2,54E-04	7,0978891

0,21	0,0056	2,22093E-07	2,51E-04	6,33594035
0,22	0,00480	2,15757E-07	2,49E-04	5,54067771
0,23	0,004	2,09564E-07	2,47E-04	4,71130538
0,24	0,00320	1,97725E-07	2,42E-04	3,92350993
0,25	0,0024	1,91948E-07	2,40E-04	3,00356347
0,26	0,00160	1,86305E-07	2,38E-04	2,04396017
0,27	0,0008	1,80797E-07	2,36E-04	1,04329165
0,28	0	1,7542E-07	2,34E-04	0

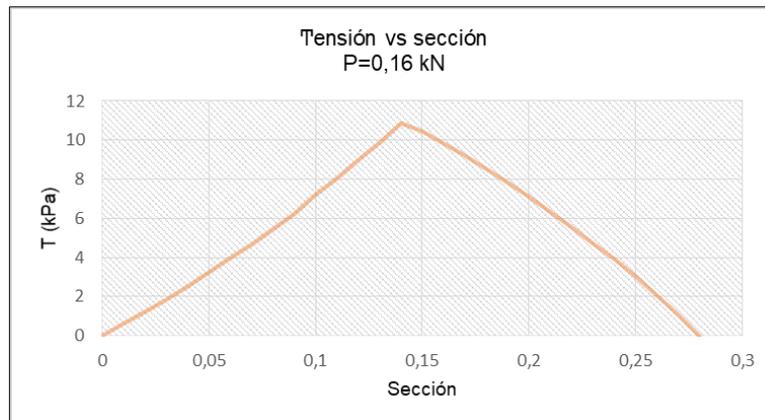
Fuente: Elaboración propia. Aplica para prototipo 6.

**Figura 54**  
*Momento vs sección*



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 55**  
*Tensión vs sección*



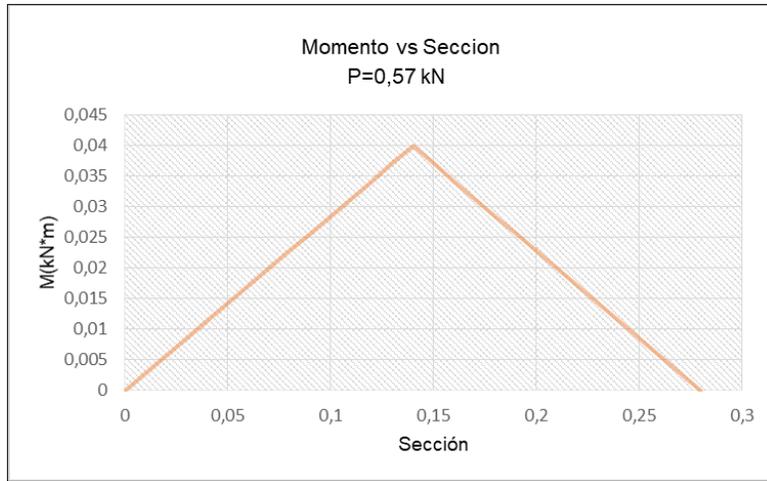
Fuente: Elaboración propia.

**Cuadro de cálculo 6***Prototipo 7 - P=0,57 kN*

x (m)	M(x) (kN*m)	I(x) (m)	Y	T (kPa)
0	0	4,21954E-07	3,05E-04	0
0,01	0,00285	4,01352E-07	3,01E-04	2,135057256
0,02	0,00570	3,9134E-07	2,98E-04	4,346151684
0,03	0,00855	3,81726E-07	2,96E-04	6,633470081
0,04	0,01140	3,72089E-07	2,93E-04	8,988526938
0,05	0,01425	3,62638E-07	2,92E-04	11,45892736
0,06	0,01710	3,5337E-07	2,89E-04	14,00151116
0,07	0,01995	3,44284E-07	2,87E-04	16,63465772
0,08	0,02280	3,35378E-07	2,85E-04	19,36223604
0,09	0,02565	3,26648E-07	2,83E-04	22,18720917
0,1	0,02850	3,09887E-07	2,78E-04	25,57474176
0,11	0,03135	3,01672E-07	2,76E-04	28,66447831
0,12	0,03420	2,93626E-07	2,74E-04	31,86514818
0,13	0,03705	2,85745E-07	2,71E-04	35,18223241
0,14	0,03990	2,78029E-07	2,69E-04	38,61716224
0,15	0,03705	2,63081E-07	2,65E-04	37,26673914
0,16	0,03420	2,55844E-07	2,62E-04	35,07370116
0,17	0,03135	2,48913E-07	2,60E-04	32,77031131
0,18	0,02850	2,41982E-07	2,58E-04	30,38184658
0,19	0,02565	2,35204E-07	2,56E-04	27,8884479
0,2	0,02280	2,28575E-07	2,54E-04	25,2862299
0,21	0,01995	2,22093E-07	2,51E-04	22,57178749
0,22	0,01710	2,15757E-07	2,49E-04	19,73866433
0,23	0,01425	2,09564E-07	2,47E-04	16,78402541
0,24	0,01140	1,97725E-07	2,42E-04	13,97750411
0,25	0,00855	1,91948E-07	2,40E-04	10,70019484
0,26	0,00570	1,86305E-07	2,38E-04	7,281608116
0,27	0,00285	1,80797E-07	2,36E-04	3,716726494
0,28	0	1,7542E-07	2,34E-04	0

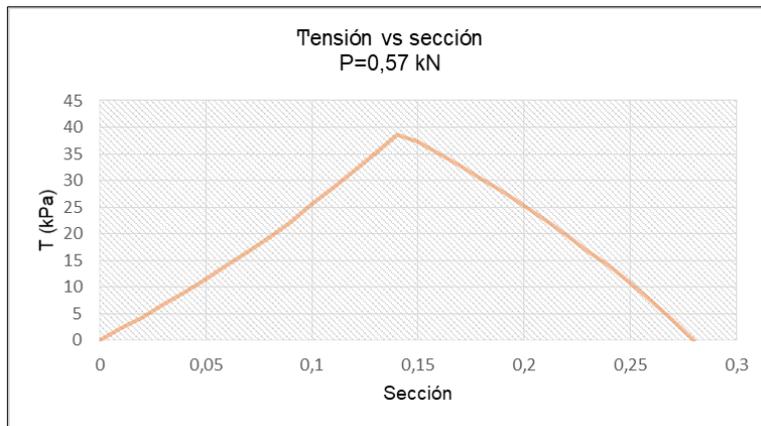
Fuente: Elaboración propia. Aplica para prototipo 7.

**Figura 56**  
*Momento vs sección*



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 57**  
*Tensión vs sección*



Fuente: Elaboración propia.

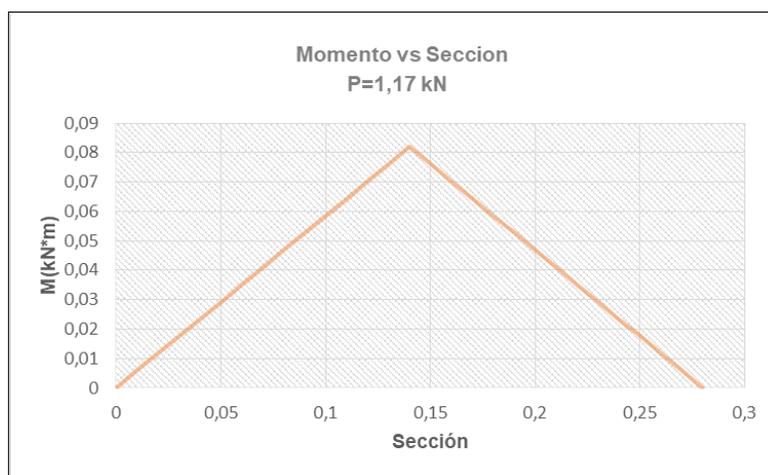
**Cuadro de cálculo 7**  
*Prototipo 8 - P=1,17 kN*

x (m)	M(x) (kN*m)	I(x) (m)	Y	T (kPa)
0	0	4,21954E-07	3,05E-04	0
0,01	0,00585	4,01352E-07	3,01E-04	4,382485947
0,02	0,01170	3,9134E-07	2,98E-04	8,921048193

0,03	0,01755	3,81726E-07	2,96E-04	13,61607017
0,04	0,02340	3,72089E-07	2,93E-04	18,45013424
0,05	0,02925	3,62638E-07	2,92E-04	23,52095616
0,06	0,03510	3,5337E-07	2,89E-04	28,73994397
0,07	0,04095	3,44284E-07	2,87E-04	34,14482375
0,08	0,04680	3,35378E-07	2,85E-04	39,74353714
0,09	0,05265	3,26648E-07	2,83E-04	45,54216619
0,1	0,05850	3,09887E-07	2,78E-04	52,49552256
0,11	0,06435	3,01672E-07	2,76E-04	58,83761337
0,12	0,07020	2,93626E-07	2,74E-04	65,40740943
0,13	0,07605	2,85745E-07	2,71E-04	72,21616126
0,14	0,08190	2,78029E-07	2,69E-04	79,2668067
0,15	0,07605	2,63081E-07	2,65E-04	76,49488561
0,16	0,07020	2,55844E-07	2,62E-04	71,99338659
0,17	0,06435	2,48913E-07	2,60E-04	67,26537585
0,18	0,05850	2,41982E-07	2,58E-04	62,36273772
0,19	0,05265	2,35204E-07	2,56E-04	57,24470885
0,2	0,04680	2,28575E-07	2,54E-04	51,90331401
0,21	0,04095	2,22093E-07	2,51E-04	46,3315638
0,22	0,03510	2,15757E-07	2,49E-04	40,51620573
0,23	0,02925	2,09564E-07	2,47E-04	34,45142057
0,24	0,02340	1,97725E-07	2,42E-04	28,69066633
0,25	0,01755	1,91948E-07	2,40E-04	21,96355784
0,26	0,01170	1,86305E-07	2,38E-04	14,94645876
0,27	0,00585	1,80797E-07	2,36E-04	7,629070173
0,28	0	1,7542E-07	2,34E-04	0

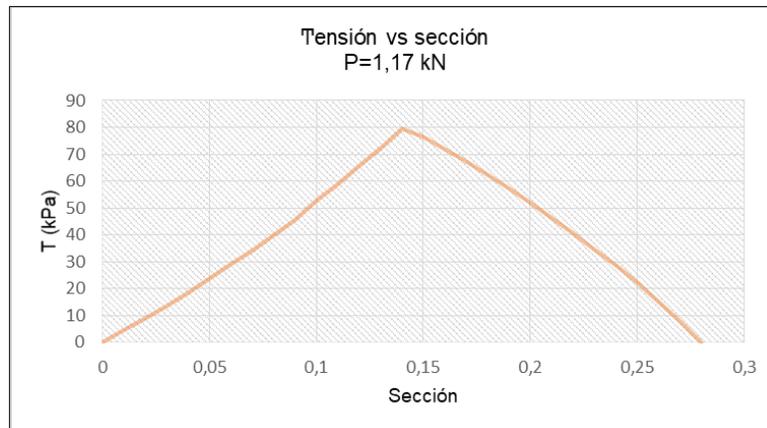
Fuente: Elaboración propia. Aplica para prototipo 8.

**Figura 58**  
*Momento vs sección*



Fuente: Elaboración propia

**Figura 59**  
*Tensión vs sección*



Fuente: Elaboración propia

**Cuadro de cálculo 8**  
*Prototipo 9 - P=0,22 kN*

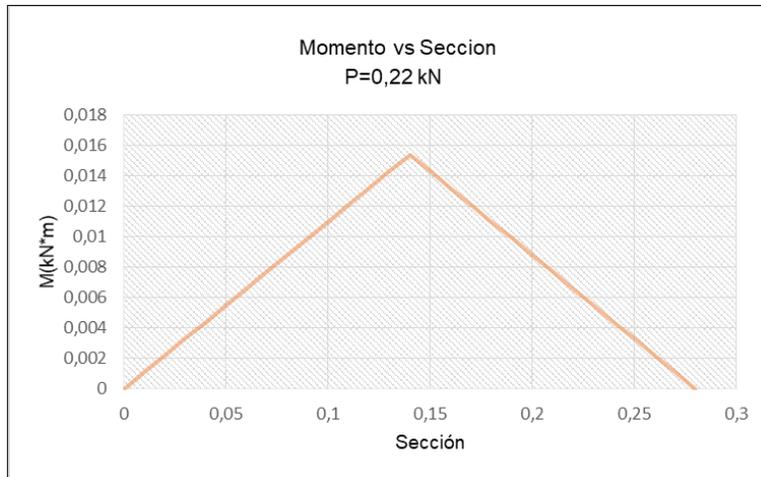
x (m)	M(x) (kN*m)	I(x) (m)	Y	T (kPa)
0	0	4,21954E-07	3,05E-04	0
0,01	0,0011	4,01352E-07	3,01E-04	0,824057187
0,02	0,00220	3,9134E-07	2,98E-04	1,677462053
0,03	0,0033	3,81726E-07	2,96E-04	2,560286698
0,04	0,00440	3,72089E-07	2,93E-04	3,469256011
0,05	0,0055	3,62638E-07	2,92E-04	4,42274389
0,06	0,00660	3,5337E-07	2,89E-04	5,40409203
0,07	0,0077	3,44284E-07	2,87E-04	6,420394209
0,08	0,00880	3,35378E-07	2,85E-04	7,473143736
0,09	0,0099	3,26648E-07	2,83E-04	8,56348424
0,1	0,01100	3,09887E-07	2,78E-04	9,87095296
0,11	0,0121	3,01672E-07	2,76E-04	11,06348286
0,12	0,01320	2,93626E-07	2,74E-04	12,29882912
0,13	0,0143	2,85745E-07	2,71E-04	13,57910725
0,14	0,01540	2,78029E-07	2,69E-04	14,90486964
0,15	0,0143	2,63081E-07	2,65E-04	14,3836537
0,16	0,01320	2,55844E-07	2,62E-04	13,53721799
0,17	0,0121	2,48913E-07	2,60E-04	12,64819033
0,18	0,01100	2,41982E-07	2,58E-04	11,72632675
0,19	0,0099	2,35204E-07	2,56E-04	10,76396235
0,2	0,00880	2,28575E-07	2,54E-04	9,759597506
0,21	0,0077	2,22093E-07	2,51E-04	8,71191798
0,22	0,00660	2,15757E-07	2,49E-04	7,618431847
0,23	0,0055	2,09564E-07	2,47E-04	6,478044893
0,24	0,00440	1,97725E-07	2,42E-04	5,394826147
0,25	0,0033	1,91948E-07	2,40E-04	4,129899765

0,26	0,00220	1,86305E-07	2,38E-04	2,810445238
0,27	0,0011	1,80797E-07	2,36E-04	1,434526015
0,28	0	1,7542E-07	2,34E-04	0

Fuente: Elaboración propia. Aplica para prototipo 9.

**Figura 60**

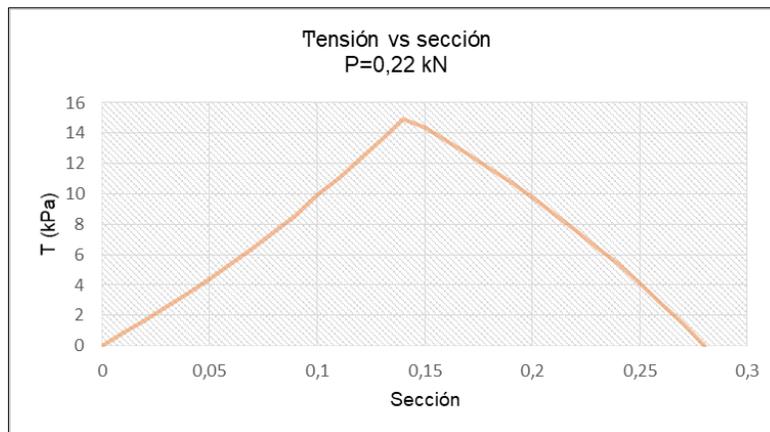
*Momento vs sección*



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 61**

*Tensión vs sección*



Fuente: Elaboración propia.

**Cuadro de cálculo 9**

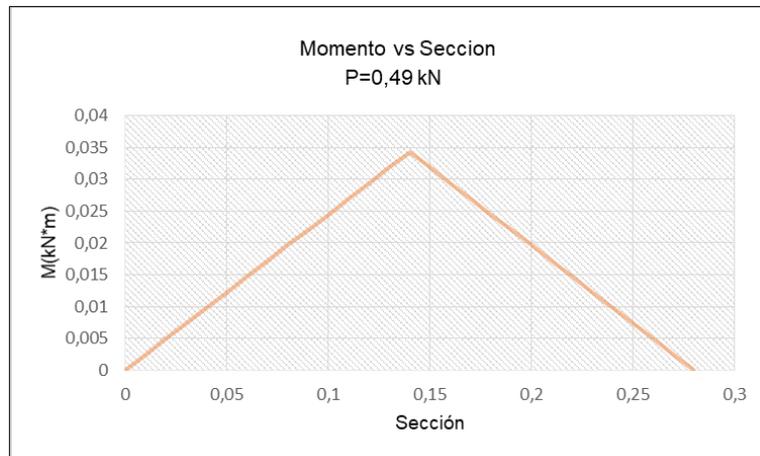
*Prototipo 10 - P=0,49 kN*

x	M(x)	I(x)	Y	T
---	------	------	---	---

(m)	(kN*m)	(m)	(kPa)
0	0	4,21954E-07	3,05E-04
0,01	0,00245	4,01352E-07	3,01E-04
0,02	0,00490	3,9134E-07	2,98E-04
0,03	0,00735	3,81726E-07	2,96E-04
0,04	0,00980	3,72089E-07	2,93E-04
0,05	0,01225	3,62638E-07	2,92E-04
0,06	0,01470	3,5337E-07	2,89E-04
0,07	0,01715	3,44284E-07	2,87E-04
0,08	0,01960	3,35378E-07	2,85E-04
0,09	0,02205	3,26648E-07	2,83E-04
0,1	0,02450	3,09887E-07	2,78E-04
0,11	0,02695	3,01672E-07	2,76E-04
0,12	0,02940	2,93626E-07	2,74E-04
0,13	0,03185	2,85745E-07	2,71E-04
0,14	0,03430	2,78029E-07	2,69E-04
0,15	0,03185	2,63081E-07	2,65E-04
0,16	0,02940	2,55844E-07	2,62E-04
0,17	0,02695	2,48913E-07	2,60E-04
0,18	0,02450	2,41982E-07	2,58E-04
0,19	0,02205	2,35204E-07	2,56E-04
0,2	0,01960	2,28575E-07	2,54E-04
0,21	0,01715	2,22093E-07	2,51E-04
0,22	0,01470	2,15757E-07	2,49E-04
0,23	0,01225	2,09564E-07	2,47E-04
0,24	0,00980	1,97725E-07	2,42E-04
0,25	0,00735	1,91948E-07	2,40E-04
0,26	0,00490	1,86305E-07	2,38E-04
0,27	0,00245	1,80797E-07	2,36E-04
0,28	0	1,7542E-07	2,34E-04

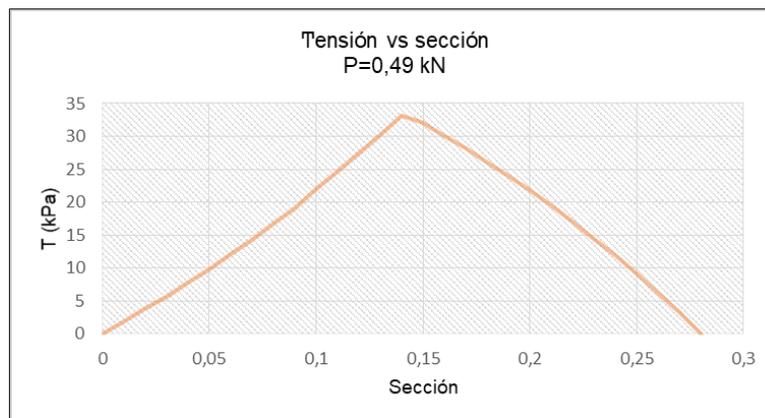
Fuente: Elaboración propia. Aplica para prototipo 10.

**Figura 62**  
*Momento vs sección*



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 63**  
*Tensión vs sección*



Fuente: Elaboración propia.

Fuente: elaboración propia. Datos obtenidos en laboratorio

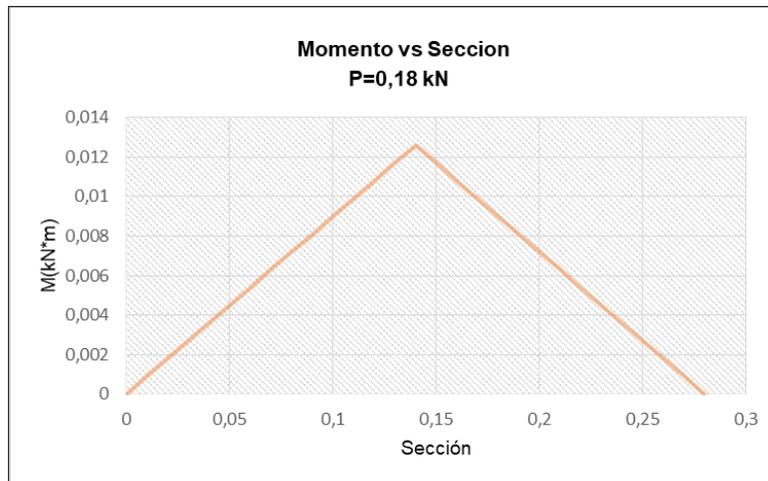
Los datos registrados en el cuadro de cálculo 10, corresponden al prototipo 11, elaborado en granulo reciclado de caucho, con acabado capa de resina y expuesto a la intemperie durante noventa días.

**Cuadro de cálculo 10**  
*Prototipo 11 - P=0,18 kN*

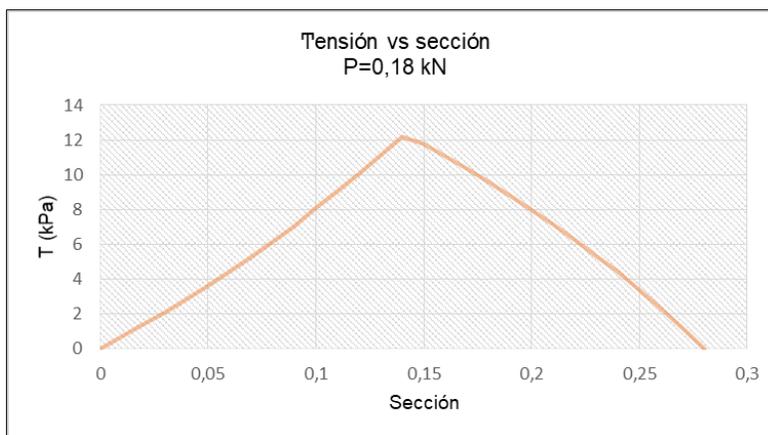
x	M(x)	I(x)	Y	T
(m)	(kN*m)	(m)		(kPa)

0	0	4,21954E-07	3,05E-04	0
0,01	0,0009	4,01352E-07	3,01E-04	0,67422861
0,02	0,0018	3,9134E-07	2,98E-04	1,37246895
0,03	0,0027	3,81726E-07	2,96E-04	2,09478003
0,04	0,0036	3,72089E-07	2,93E-04	2,83848219
0,05	0,0045	3,62638E-07	2,92E-04	3,61860864
0,06	0,0054	3,5337E-07	2,89E-04	4,42152984
0,07	0,0063	3,44284E-07	2,87E-04	5,25304981
0,08	0,0072	3,35378E-07	2,85E-04	6,11439033
0,09	0,0081	3,26648E-07	2,83E-04	7,00648711
0,1	0,009	3,09887E-07	2,78E-04	8,07623424
0,11	0,0099	3,01672E-07	2,76E-04	9,05194052
0,12	0,0108	2,93626E-07	2,74E-04	10,0626784
0,13	0,0117	2,85745E-07	2,71E-04	11,1101787
0,14	0,0126	2,78029E-07	2,69E-04	12,1948933
0,15	0,0117	2,63081E-07	2,65E-04	11,7684439
0,16	0,0108	2,55844E-07	2,62E-04	11,0759056
0,17	0,0099	2,48913E-07	2,60E-04	10,3485194
0,18	0,009	2,41982E-07	2,58E-04	9,59426734
0,19	0,0081	2,35204E-07	2,56E-04	8,80687828
0,2	0,0072	2,28575E-07	2,54E-04	7,98512523
0,21	0,0063	2,22093E-07	2,51E-04	7,12793289
0,22	0,0054	2,15757E-07	2,49E-04	6,23326242
0,23	0,0045	2,09564E-07	2,47E-04	5,30021855
0,24	0,0036	1,97725E-07	2,42E-04	4,41394867
0,25	0,0027	1,91948E-07	2,40E-04	3,3790089
0,26	0,0018	1,86305E-07	2,38E-04	2,29945519
0,27	0,0009	1,80797E-07	2,36E-04	1,1737031
0,28	0	1,7542E-07	2,34E-04	0

Fuente: Elaboración propia. Aplica para prototipo 13.

**Figura 64***Momento vs sección*

Fuente: Elaboración propia.

**Figura 65***Tensión vs sección*

Fuente: Elaboración propia.

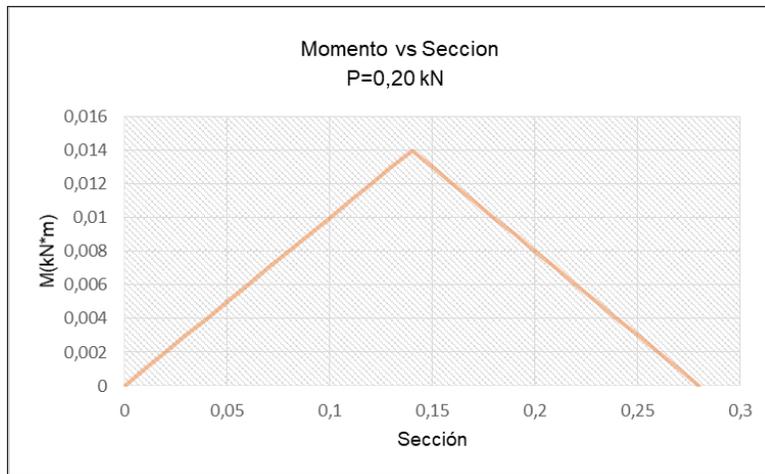
Los datos registrados en el cuadro de cálculo 11, corresponden al prototipo 12, elaborado con granulo de caucho reciclado, con acabado capa de resina, capa de pintura base aceite y sometidos a la intemperie durante noventa días.

**Cuadro de cálculo 111***Prototipo 12 - P=0,20 kN*

x (m)	M(x) (kN*m)	I(x) (m)	Y	T (kPa)
0	0	4,21954E-07	3,05E-04	0
0,01	0,001	4,01352E-07	3,01E-04	0,7491429
0,02	0,002	3,9134E-07	2,98E-04	1,5249655
0,03	0,003	3,81726E-07	2,96E-04	2,32753336
0,04	0,004	3,72089E-07	2,93E-04	3,1538691
0,05	0,005	3,62638E-07	2,92E-04	4,02067627
0,06	0,006	3,5337E-07	2,89E-04	4,91281093
0,07	0,007	3,44284E-07	2,87E-04	5,83672201
0,08	0,008	3,35378E-07	2,85E-04	6,79376703
0,09	0,009	3,26648E-07	2,83E-04	7,78498567
0,1	0,01	3,09887E-07	2,78E-04	8,9735936
0,11	0,011	3,01672E-07	2,76E-04	10,0577117
0,12	0,012	2,93626E-07	2,74E-04	11,1807537
0,13	0,013	2,85745E-07	2,71E-04	12,344643
0,14	0,014	2,78029E-07	2,69E-04	13,5498815
0,15	0,013	2,63081E-07	2,65E-04	13,0760488
0,16	0,012	2,55844E-07	2,62E-04	12,3065618
0,17	0,011	2,48913E-07	2,60E-04	11,4983548
0,18	0,01	2,41982E-07	2,58E-04	10,660297
0,19	0,009	2,35204E-07	2,56E-04	9,78542032
0,2	0,008	2,28575E-07	2,54E-04	8,87236137
0,21	0,007	2,22093E-07	2,51E-04	7,91992544
0,22	0,006	2,15757E-07	2,49E-04	6,92584713
0,23	0,005	2,09564E-07	2,47E-04	5,88913172
0,24	0,004	1,97725E-07	2,42E-04	4,90438741
0,25	0,003	1,91948E-07	2,40E-04	3,75445433
0,26	0,002	1,86305E-07	2,38E-04	2,55495022
0,27	0,001	1,80797E-07	2,36E-04	1,30411456
0,28	0	1,7542E-07	2,34E-04	0

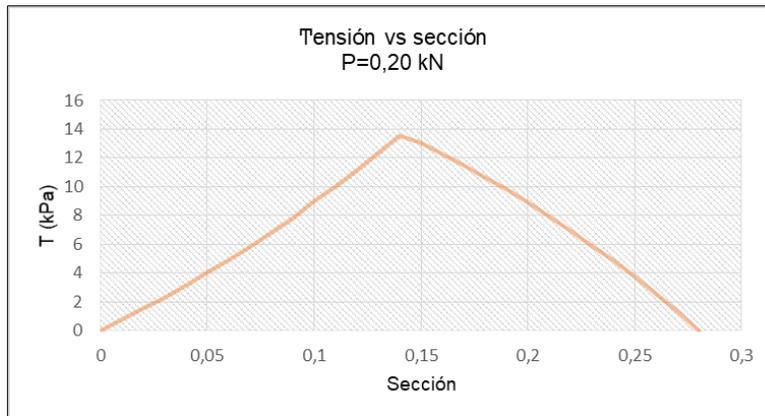
Fuente: Elaboración propia. Aplica para prototipo 13.

**Figura 66**  
*Momento vs sección*



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 66**  
*Tensión vs sección*



Fuente: Elaboración propia.

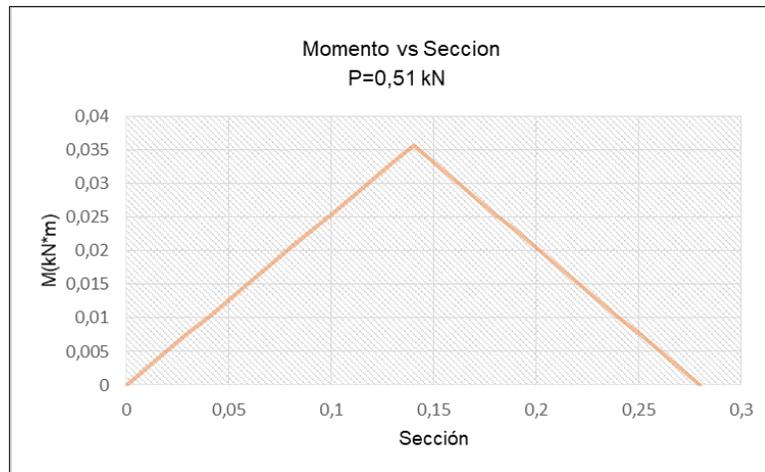
Los datos registrados en el cuadro de cálculo 12, 13 y 14, corresponden a los prototipo 13, 14 y 15 elaborados con granulo de caucho reciclado, con acabado capa de resina, capa de pintura base aceite, grupo de tres elementos.

**Cuadro de cálculo 122***Prototipo 13 - P=0,51kN*

x (m)	M(x) (kN*m)	I(x) (m)	Y	T (kPa)
0	0	4,21954E-07	3,05E-04	0
0,01	0,00255	4,01352E-07	3,01E-04	1,910314387
0,02	0,00510	3,9134E-07	2,98E-04	3,888662033
0,03	0,00765	3,81726E-07	2,96E-04	5,935210072
0,04	0,01020	3,72089E-07	2,93E-04	8,042366208
0,05	0,01275	3,62638E-07	2,92E-04	10,25272448
0,06	0,01530	3,5337E-07	2,89E-04	12,52766788
0,07	0,01785	3,44284E-07	2,87E-04	14,88364112
0,08	0,02040	3,35378E-07	2,85E-04	17,32410593
0,09	0,02295	3,26648E-07	2,83E-04	19,85171347
0,1	0,02550	3,09887E-07	2,78E-04	22,88266368
0,11	0,02805	3,01672E-07	2,76E-04	25,6471648
0,12	0,03060	2,93626E-07	2,74E-04	28,51092206
0,13	0,03315	2,85745E-07	2,71E-04	31,47883952
0,14	0,03570	2,78029E-07	2,69E-04	34,55219779
0,15	0,03315	2,63081E-07	2,65E-04	33,34392449
0,16	0,03060	2,55844E-07	2,62E-04	31,38173262
0,17	0,02805	2,48913E-07	2,60E-04	29,32080486
0,18	0,02550	2,41982E-07	2,58E-04	27,18375747
0,19	0,02295	2,35204E-07	2,56E-04	24,95282181
0,2	0,02040	2,28575E-07	2,54E-04	22,62452149
0,21	0,01785	2,22093E-07	2,51E-04	20,19580986
0,22	0,01530	2,15757E-07	2,49E-04	17,66091019
0,23	0,01275	2,09564E-07	2,47E-04	15,01728589
0,24	0,01020	1,97725E-07	2,42E-04	12,50618789
0,25	0,00765	1,91948E-07	2,40E-04	9,573858545
0,26	0,00510	1,86305E-07	2,38E-04	6,515123051
0,27	0,00255	1,80797E-07	2,36E-04	3,325492127
0,28	0	1,7542E-07	2,34E-04	0

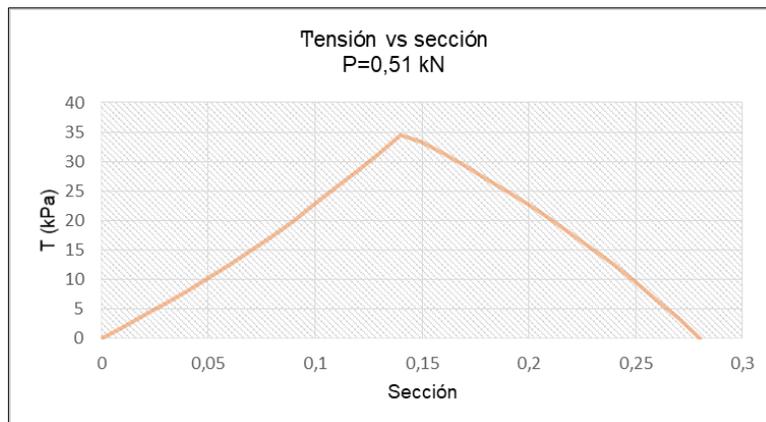
Fuente: Elaboración propia. Aplica para prototipo 13.

**Figura 67**  
*Movimiento vs sección*



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 68**  
*Tensión vs sección*



Fuente: Elaboración propia.

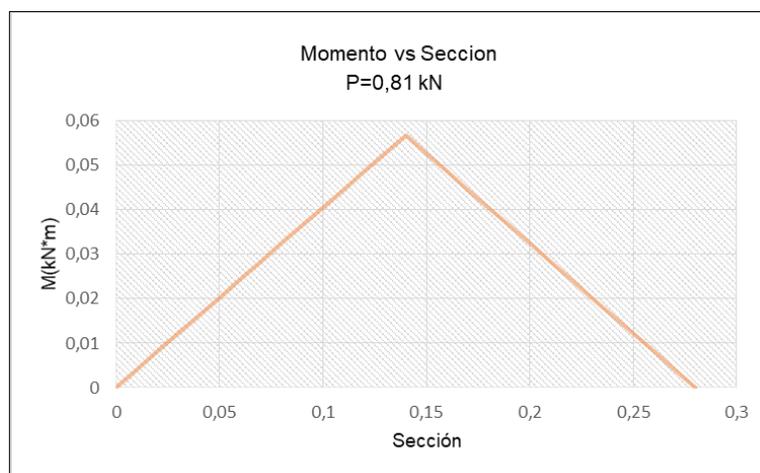
**Cuadro de cálculo 133**  
*Prototipo 14 - P=0,81kN*

x (m)	M(x) (kN*m)	I(x) (m)	Y	T (kPa)
0	0	4,21954E-07	3,05E-04	0
0,01	0,00405	4,01352E-07	3,01E-04	3,034028733
0,02	0,00810	3,9134E-07	2,98E-04	6,176110288
0,03	0,01215	3,81726E-07	2,96E-04	9,426510115
0,04	0,01620	3,72089E-07	2,93E-04	12,77316986
0,05	0,02025	3,62638E-07	2,92E-04	16,28373888

0,06	0,02430	3,5337E-07	2,89E-04	19,89688429
0,07	0,02835	3,44284E-07	2,87E-04	23,63872413
0,08	0,03240	3,35378E-07	2,85E-04	27,51475648
0,09	0,03645	3,26648E-07	2,83E-04	31,52919197
0,1	0,04050	3,09887E-07	2,78E-04	36,34305408
0,11	0,04455	3,01672E-07	2,76E-04	40,73373233
0,12	0,04860	2,93626E-07	2,74E-04	45,28205268
0,13	0,05265	2,85745E-07	2,71E-04	49,99580395
0,14	0,05670	2,78029E-07	2,69E-04	54,87702002
0,15	0,05265	2,63081E-07	2,65E-04	52,95799773
0,16	0,04860	2,55844E-07	2,62E-04	49,84157533
0,17	0,04455	2,48913E-07	2,60E-04	46,56833713
0,18	0,04050	2,41982E-07	2,58E-04	43,17420304
0,19	0,03645	2,35204E-07	2,56E-04	39,63095228
0,2	0,03240	2,28575E-07	2,54E-04	35,93306355
0,21	0,02835	2,22093E-07	2,51E-04	32,07569802
0,22	0,02430	2,15757E-07	2,49E-04	28,04968089
0,23	0,02025	2,09564E-07	2,47E-04	23,85098347
0,24	0,01620	1,97725E-07	2,42E-04	19,862769
0,25	0,01215	1,91948E-07	2,40E-04	15,20554004
0,26	0,00810	1,86305E-07	2,38E-04	10,34754837
0,27	0,00405	1,80797E-07	2,36E-04	5,281663966
0,28	0	1,7542E-07	2,34E-04	0

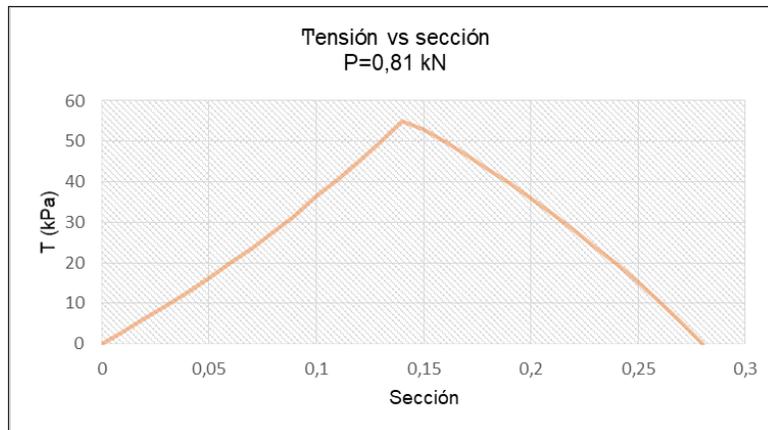
Fuente: Elaboración propia. Aplica para prototipo 14.

**Figura 69**  
*Momento vs sección*



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 70**  
Tensión vs sección



Fuente: Elaboración propia.

**Cuadro de cálculo 144**  
Prototipo 15 - P=0,65 kN

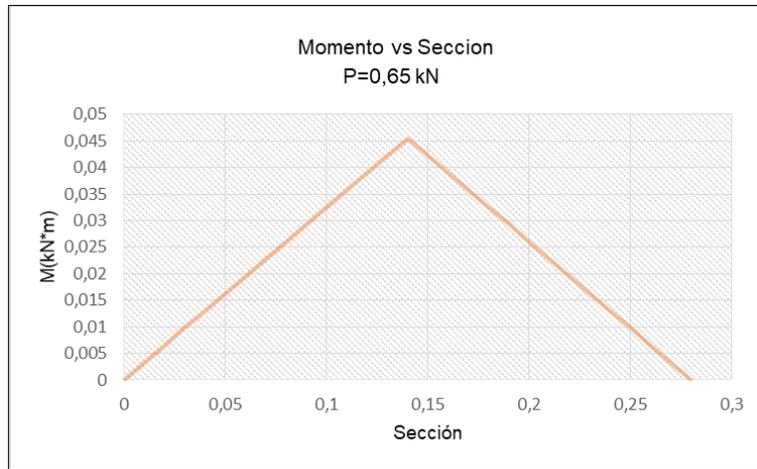
x (m)	M(x) (kN*m)	I(x) (m)	Y	T (kPa)
0	0	4,21954E-07	3,05E-04	0
0,01	0,00325	4,01352E-07	3,01E-04	2,434714415
0,02	0,00650	3,9134E-07	2,98E-04	4,956137885
0,03	0,00975	3,81726E-07	2,96E-04	7,564483425
0,04	0,01300	3,72089E-07	2,93E-04	10,25007458
0,05	0,01625	3,62638E-07	2,92E-04	13,06719787
0,06	0,01950	3,5337E-07	2,89E-04	15,96663554
0,07	0,02275	3,44284E-07	2,87E-04	18,96934653
0,08	0,02600	3,35378E-07	2,85E-04	22,07974286
0,09	0,02925	3,26648E-07	2,83E-04	25,30120344
0,1	0,03250	3,09887E-07	2,78E-04	29,16417920
0,11	0,03575	3,01672E-07	2,76E-04	32,68756298
0,12	0,03900	2,93626E-07	2,74E-04	36,33744968
0,13	0,04225	2,85745E-07	2,71E-04	40,12008959
0,14	0,04550	2,78029E-07	2,69E-04	44,03711483
0,15	0,04225	2,63081E-07	2,65E-04	42,49715867
0,16	0,03900	2,55844E-07	2,62E-04	39,99632589
0,17	0,03575	2,48913E-07	2,60E-04	37,36965325
0,18	0,03250	2,41982E-07	2,58E-04	34,6459654
0,19	0,02925	2,35204E-07	2,56E-04	31,80261603
0,2	0,02600	2,28575E-07	2,54E-04	28,83517445
0,21	0,02275	2,22093E-07	2,51E-04	25,73975767
0,22	0,01950	2,15757E-07	2,49E-04	22,50900318
0,23	0,01625	2,09564E-07	2,47E-04	19,13967809
0,24	0,01300	1,97725E-07	2,42E-04	15,93925907
0,25	0,00975	1,91948E-07	2,40E-04	12,20197658

0,26	0,00650	1,86305E-07	2,38E-04	8,303588202
0,27	0,00325	1,80797E-07	2,36E-04	4,238372318
0,28	0	1,7542E-07	2,34E-04	0

Fuente: Elaboración propia. Aplica para prototipo 15.

**Figura 71**

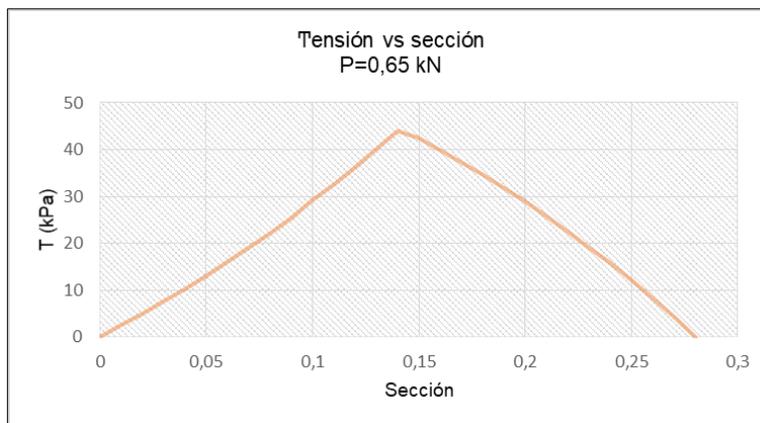
*Momento vs sección*



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 72**

*Tensión vs sección*



Fuente: Elaboración propia.

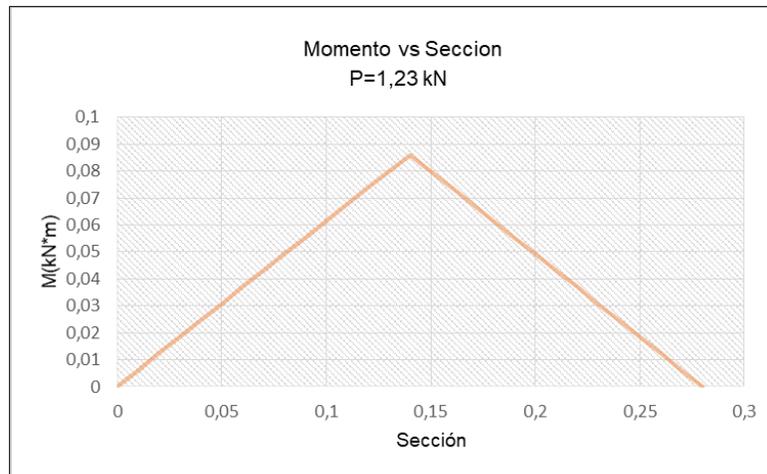
Los datos registrados en el cuadro de cálculo 15, 16 y 17, corresponden a los prototipos 16, 17 y 18, teja cerámica curva, grupo de 3 unidades

**Cuadro de cálculo 155***Prototipo 16 - P=1,23 kN*

<b>x</b> (m)	<b>M(x)</b> (kN*m)	<b>I(x)</b> (m)	<b>Y</b>	<b>T</b> (kPa)
0	0	4,21954E-07	3,05E-04	0
0,01	0,00615	4,01352E-07	3,01E-04	4,607228817
0,02	0,01230	3,9134E-07	2,98E-04	9,378537844
0,03	0,01845	3,81726E-07	2,96E-04	14,31433017
0,04	0,02460	3,72089E-07	2,93E-04	19,39629497
0,05	0,03075	3,62638E-07	2,92E-04	24,72715904
0,06	0,03690	3,5337E-07	2,89E-04	30,21378725
0,07	0,04305	3,44284E-07	2,87E-04	35,89584035
0,08	0,04920	3,35378E-07	2,85E-04	41,78166725
0,09	0,05535	3,26648E-07	2,83E-04	47,87766189
0,1	0,06150	3,09887E-07	2,78E-04	55,18760064
0,11	0,06765	3,01672E-07	2,76E-04	61,85492687
0,12	0,07380	2,93626E-07	2,74E-04	68,76163555
0,13	0,07995	2,85745E-07	2,71E-04	75,91955415
0,14	0,08610	2,78029E-07	2,69E-04	83,33177115
0,15	0,07995	2,63081E-07	2,65E-04	80,41770025
0,16	0,07380	2,55844E-07	2,62E-04	75,68535514
0,17	0,06765	2,48913E-07	2,60E-04	70,71488231
0,18	0,06150	2,41982E-07	2,58E-04	65,56082684
0,19	0,05535	2,35204E-07	2,56E-04	60,18033494
0,2	0,04920	2,28575E-07	2,54E-04	54,56502242
0,21	0,04305	2,22093E-07	2,51E-04	48,70754144
0,22	0,03690	2,15757E-07	2,49E-04	42,59395987
0,23	0,03075	2,09564E-07	2,47E-04	36,21816008
0,24	0,02460	1,97725E-07	2,42E-04	30,16198255
0,25	0,01845	1,91948E-07	2,40E-04	23,08989414
0,26	0,01230	1,86305E-07	2,38E-04	15,71294383
0,27	0,00615	1,80797E-07	2,36E-04	8,02030454
0,28	0	1,7542E-07	2,34E-04	0

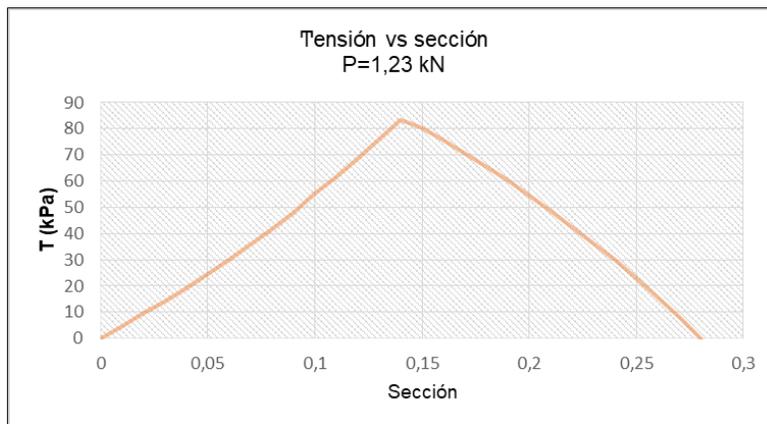
Fuente: Elaboración propia. Aplica para prototipo 16.

**Figura 73**  
*Momento vs sección*



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 74**  
*Tensión vs sección*



Fuente: Elaboración propia.

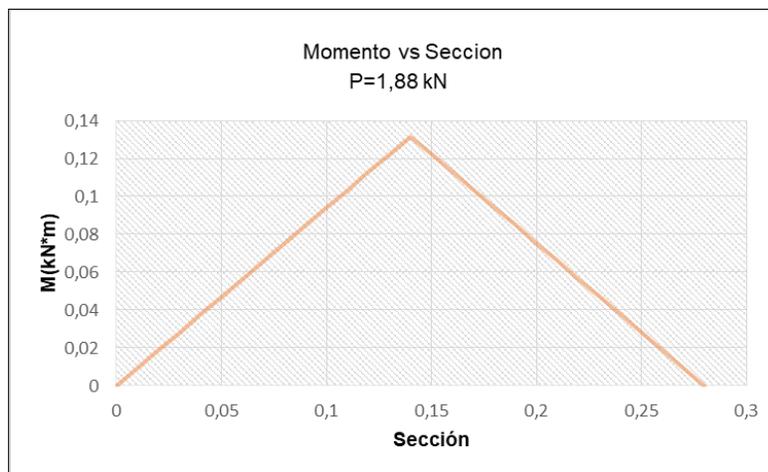
**Cuadro de cálculo 16**  
*Prototipo 17 - P=1,88 kN*

x (m)	M(x) (kN*m)	I(x) (m)	Y	T (kPa)
0	0	4,21954E-07	3,05E-04	0
0,01	0,0094	4,01352E-07	3,01E-04	7,041943232
0,02	0,01880	3,9134E-07	2,98E-04	14,33467573
0,03	0,0282	3,81726E-07	2,96E-04	21,8788136

0,04	0,03760	3,72089E-07	2,93E-04	29,64636955
0,05	0,047	3,62638E-07	2,92E-04	37,79435691
0,06	0,05640	3,5337E-07	2,89E-04	46,18042279
0,07	0,0658	3,44284E-07	2,87E-04	54,86518688
0,08	0,07520	3,35378E-07	2,85E-04	63,86141011
0,09	0,0846	3,26648E-07	2,83E-04	73,17886532
0,1	0,09400	3,09887E-07	2,78E-04	84,35177984
0,11	0,1034	3,01672E-07	2,76E-04	94,54248986
0,12	0,11280	2,93626E-07	2,74E-04	105,0990852
0,13	0,1222	2,85745E-07	2,71E-04	116,0396437
0,14	0,13160	2,78029E-07	2,69E-04	127,368886
0,15	0,1222	2,63081E-07	2,65E-04	122,9148589
0,16	0,11280	2,55844E-07	2,62E-04	115,681681
0,17	0,1034	2,48913E-07	2,60E-04	108,0845356
0,18	0,09400	2,41982E-07	2,58E-04	100,2067922
0,19	0,0846	2,35204E-07	2,56E-04	91,98295097
0,2	0,07520	2,28575E-07	2,54E-04	83,40019687
0,21	0,0658	2,22093E-07	2,51E-04	74,4472991
0,22	0,05640	2,15757E-07	2,49E-04	65,10296306
0,23	0,047	2,09564E-07	2,47E-04	55,35783818
0,24	0,03760	1,97725E-07	2,42E-04	46,10124162
0,25	0,0282	1,91948E-07	2,40E-04	35,29187071
0,26	0,01880	1,86305E-07	2,38E-04	24,01653203
0,27	0,0094	1,80797E-07	2,36E-04	12,25867686
0,28	0	1,7542E-07	2,34E-04	0

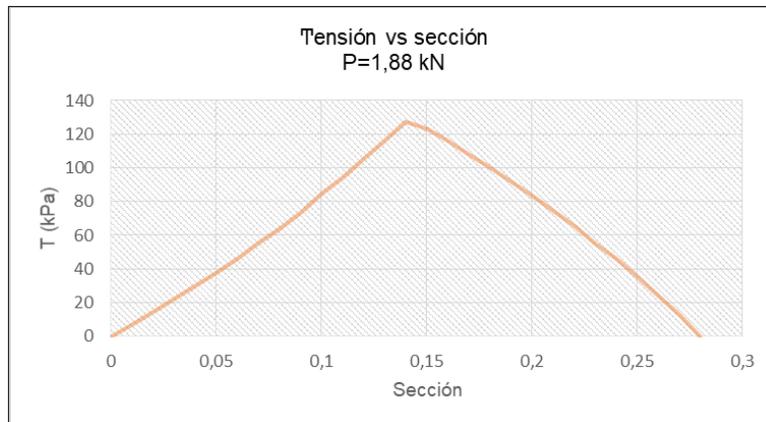
Fuente: Elaboración propia. Aplica para prototipo 17.

**Figura 75**  
*Momento vs sección*



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 76**  
Tensión vs sección



Fuente: Elaboración propia.

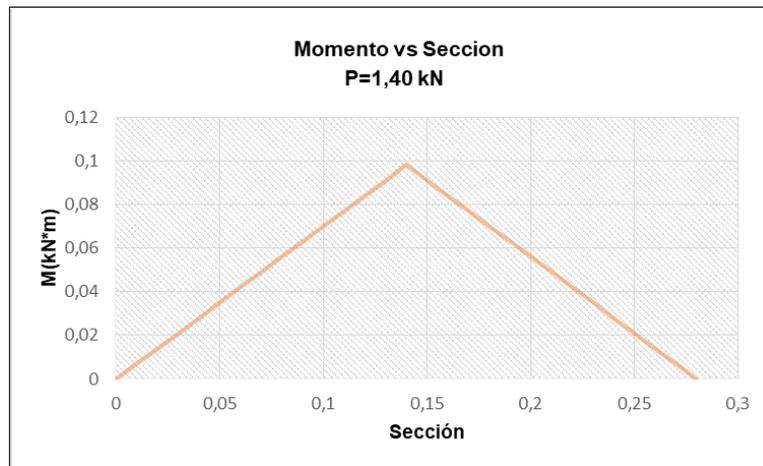
**Cuadro de cálculo 17**  
Prototipo 18 - P=1,40 kN

x (m)	M(x) (kN*m)	I(x) (m)	Y	T (kPa)
0	0	4,21954E-07	3,05E-04	0
0,01	0,007	4,01352E-07	3,01E-04	5,244000279
0,02	0,01400	3,9134E-07	2,98E-04	10,67475852
0,03	0,021	3,81726E-07	2,96E-04	16,29273353
0,04	0,02800	3,72089E-07	2,93E-04	22,07708371
0,05	0,035	3,62638E-07	2,92E-04	28,14473387
0,06	0,04200	3,5337E-07	2,89E-04	34,38967654
0,07	0,049	3,44284E-07	2,87E-04	40,85705406
0,08	0,05600	3,35378E-07	2,85E-04	47,55636923
0,09	0,063	3,26648E-07	2,83E-04	54,49489971
0,1	0,07000	3,09887E-07	2,78E-04	62,81515520
0,11	0,077	3,01672E-07	2,76E-04	70,40398181
0,12	0,08400	2,93626E-07	2,74E-04	78,26527624
0,13	0,091	2,85745E-07	2,71E-04	86,41250066
0,14	0,09800	2,78029E-07	2,69E-04	94,84917041
0,15	0,091	2,63081E-07	2,65E-04	91,53234175
0,16	0,08400	2,55844E-07	2,62E-04	86,14593268
0,17	0,077	2,48913E-07	2,60E-04	80,48848393
0,18	0,07000	2,41982E-07	2,58E-04	74,62207933
0,19	0,063	2,35204E-07	2,56E-04	68,49794221
0,2	0,05600	2,28575E-07	2,54E-04	62,10652959
0,21	0,049	2,22093E-07	2,51E-04	55,43947806
0,22	0,04200	2,15757E-07	2,49E-04	48,48092994
0,23	0,035	2,09564E-07	2,47E-04	41,22392205

0,24	0,02800	1,97725E-07	2,42E-04	34,33071185
0,25	0,021	1,91948E-07	2,40E-04	26,28118032
0,26	0,01400	1,86305E-07	2,38E-04	17,88465151
0,27	0,007	1,80797E-07	2,36E-04	9,128801916
0,28	0	1,7542E-07	2,34E-04	0

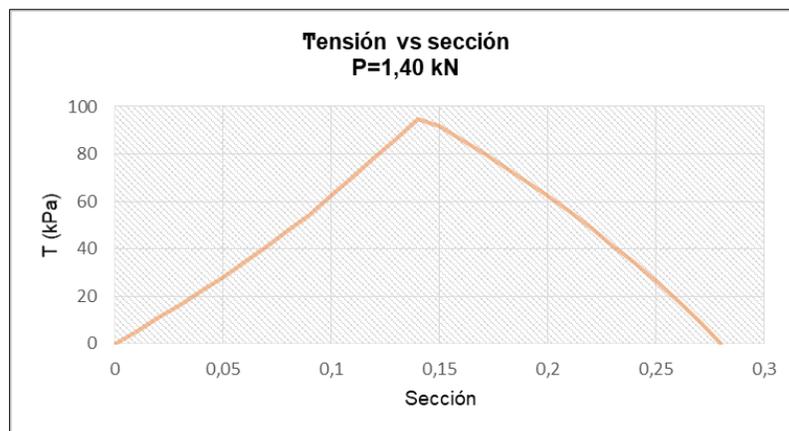
Fuente: Elaboración propia. Aplica para prototipo 18.

**Figura 77**  
*Momento vs sección*



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 78**  
*Tensión vs sección*

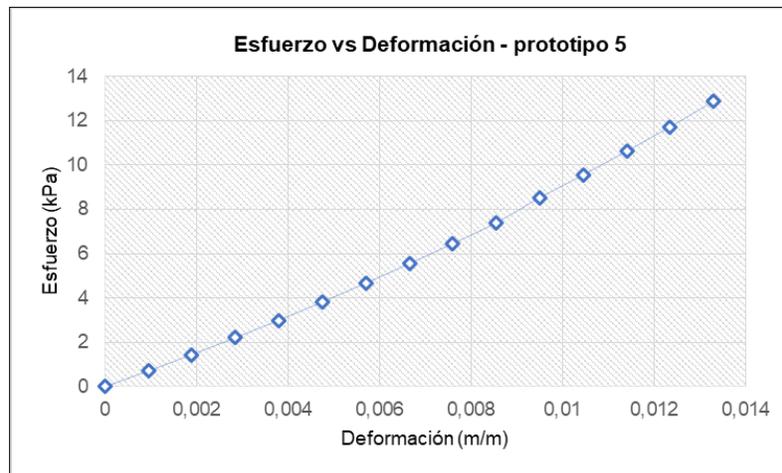


Fuente: Elaboración propia.

Para complementar el análisis de resultados, se realizan las comparaciones gráficas que relacionan la resistencia máxima versus la deformación, para determinar el comportamiento elástico del material con el cual se elaboraron los prototipos, para

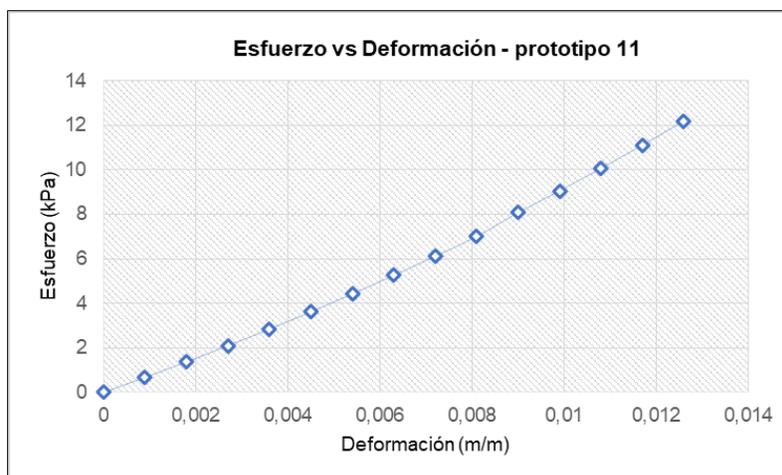
ello, se seleccionaron como muestra representativa, el prototipo No.5, con acabado capa de resina y los prototipos No.11 con acabados capa de resina y No.12 con acabado capa de resina más capa de pintura base aceite respectivamente, expuestos a la intemperie durante noventa días. La representación se realiza en las figuras 79, 80 y 81 respectivamente.

**Figura 79**  
*Prototipo 3*



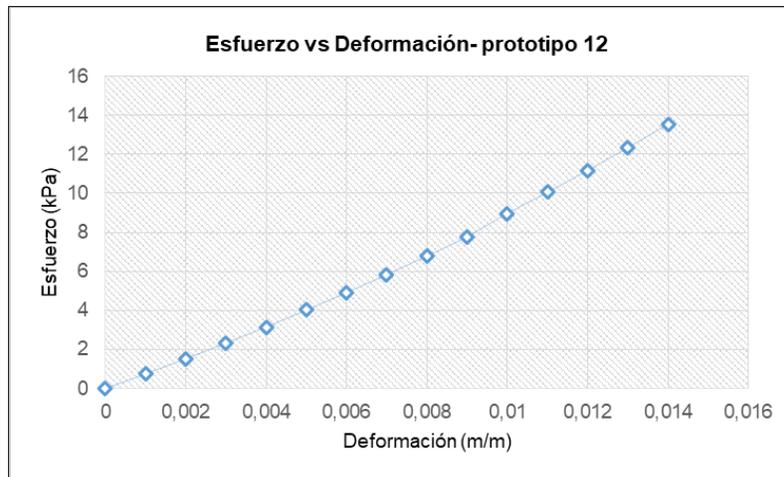
Fuente: Elaboración propia.

**Figura 80**  
*Prototipo 11*



Fuente: Elaboración propia.

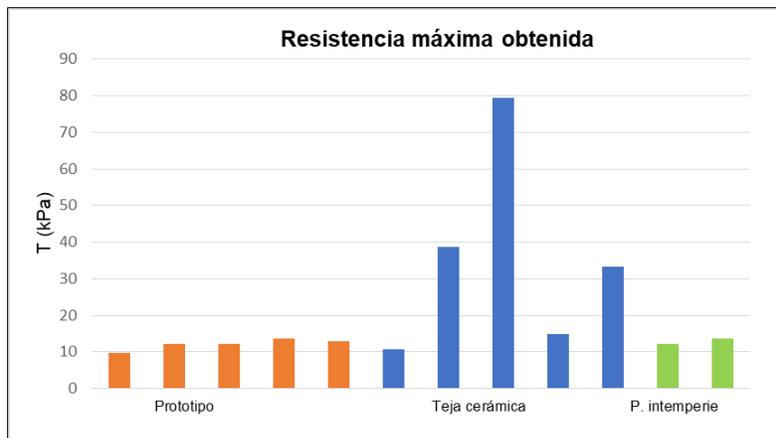
**Figura 81**  
*Prototipo 12*



Fuente: Elaboración propia.

La figura 82, representa la resistencia máxima obtenida en los prototipos No.1, No.2, No.3, No.4 y No.5, elaborados con GCR, con acabado capa de resina y capa de pintura base aceite, la resistencia máxima de tejas de cerámica No.6, No.7, No.8, No.9 y No.10, y la resistencia máxima de los prototipos con acabado capa de pintura base aceite y los prototipos No.11y No.12 que fueron expuestos a la intemperie.

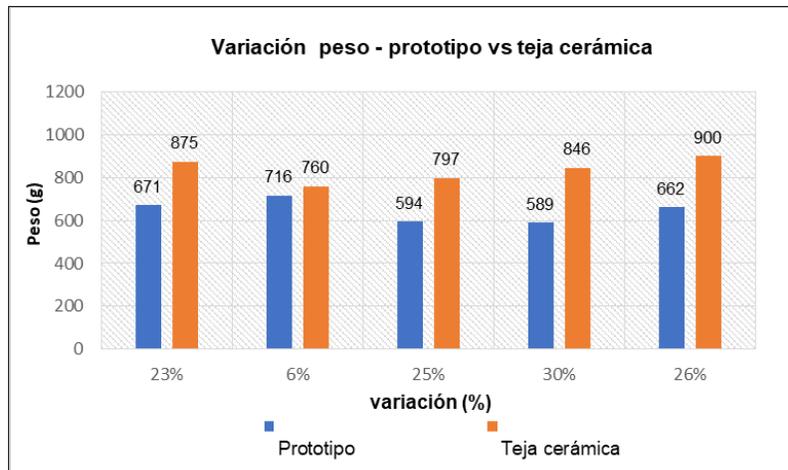
**Figura 82**  
*Resistencia máxima Obtenida*



Fuente: Elaboración propia.

La figura 83 representa la variación del peso en gramos y en porcentaje, de los prototipos No.1, No.2, No.3, No.4 y No.5, respecto al peso de la teja de cerámica curva No.6, No.7, No.8, No.9 y No.10.

**Figura 83**  
*Variación del peso*



Fuente: Elaboración propia.

La tabla 23, presenta la variación en porcentaje de la resistencia máxima obtenida en los prototipos seleccionados como referente para prototipo GCR, prototipo GCR sometido a la intemperie por 90 días, comparados con la resistencia máxima presentada por la teja de cerámica curva.

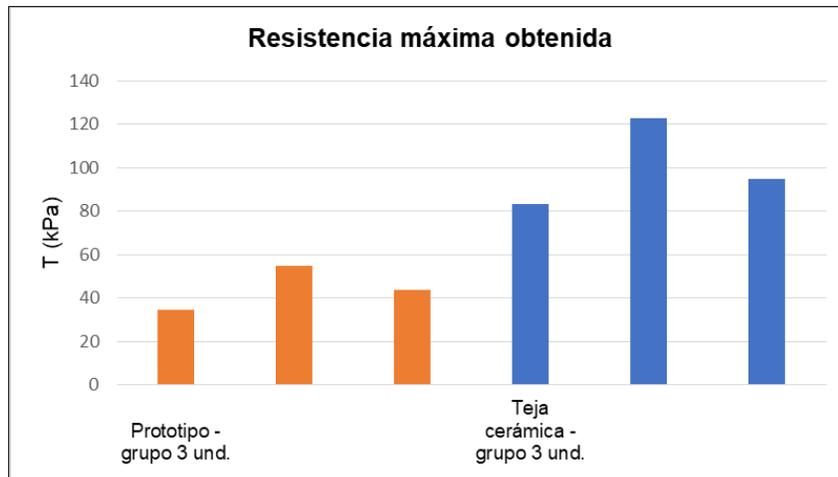
**Tabla 23**  
*Variación del peso*

Material	Resistencia (kPa)	Variación (%)
Teja cerámica	35,365191	100
GCR	12,123818	34,28
GCR-intemperie	12,872387	36,40

Fuente: Elaboración propia.

La figura 84, muestra la representación gráfica de la resistencia máxima obtenida en el grupo de tres unidades de prototipos los No.13, No.14 y No.15 comparada con la resistencia de los grupos de tres unidades de tejas de cerámica No. 16, No.17 y No.18 fallados en laboratorio.

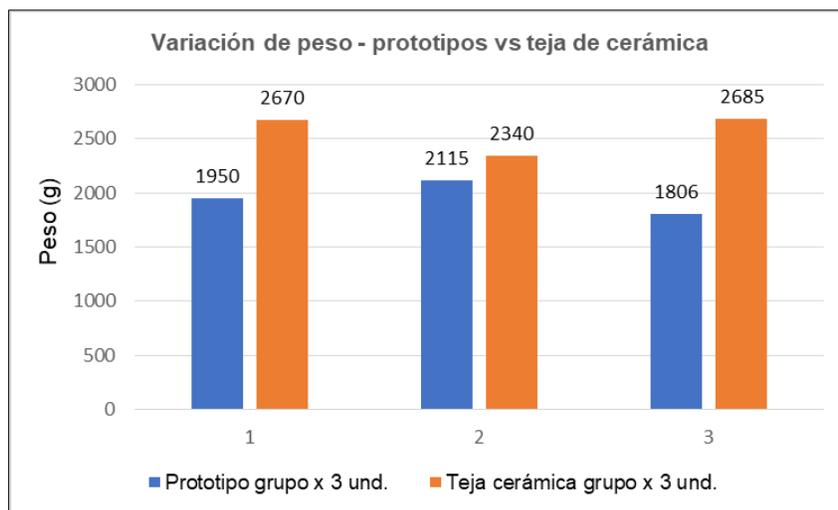
**Figura 84**  
*Resistencia máxima obtenida*



Fuente: Elaboración propia.

La figura 85, muestra la representación gráfica de la variación del peso obtenida en el grupo de tres unidades de prototipos los No.13, No.14 y No.15 comparada con la resistencia de los grupos de tres unidades de tejas de cerámica No. 16, No.17 y No.18 fallados en laboratorio.

**Figura 85**  
*Variación del peso*



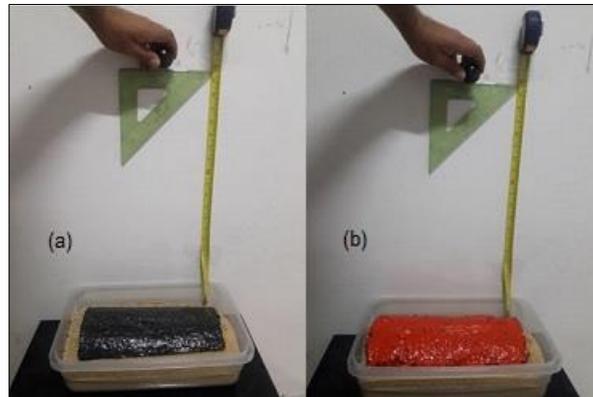
Fuente: Elaboración propia.

### Resistencia al impacto

Basados en la NTC 2086, ítem 3.3.2, se realizó la prueba de resistencia al impacto, siguiendo el procedimiento descrito en el ítem 7.3, en dos de los prototipos elaborados como se observa en la figura 86.

#### Figura 86

*Montaje prueba de resistencia al impacto*

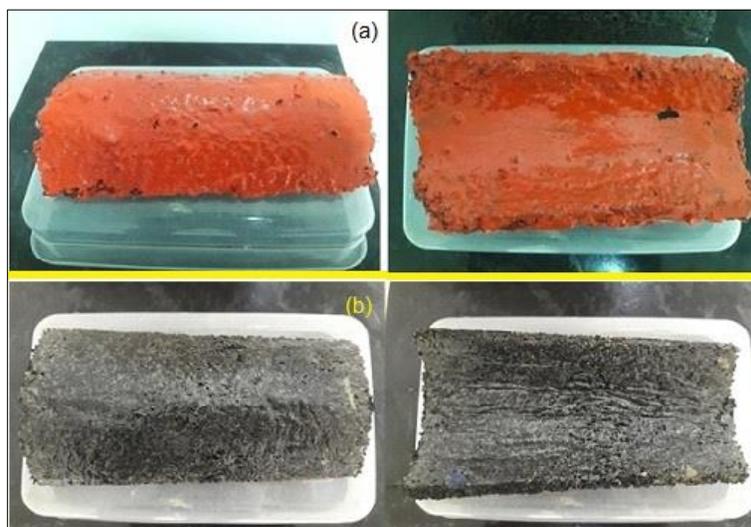


Fuente: elaboración propia. (a) Prototipo con acabado capa de resina (b) Prototipo con acabado capa de resina y capa de pintura base aceite.

Los resultados obtenidos en el ensayo, se observan en la figura 87 y se describen en la tabla No. 24.

#### Figura 87

*Prototipo después del ensayo*



Fuente: elaboración propia. (a) Prototipo con acabado capa de resina (b) Prototipo con acabado capa de resina y capa de pintura base aceite.

**Tabla 24**  
*Observaciones realizadas*

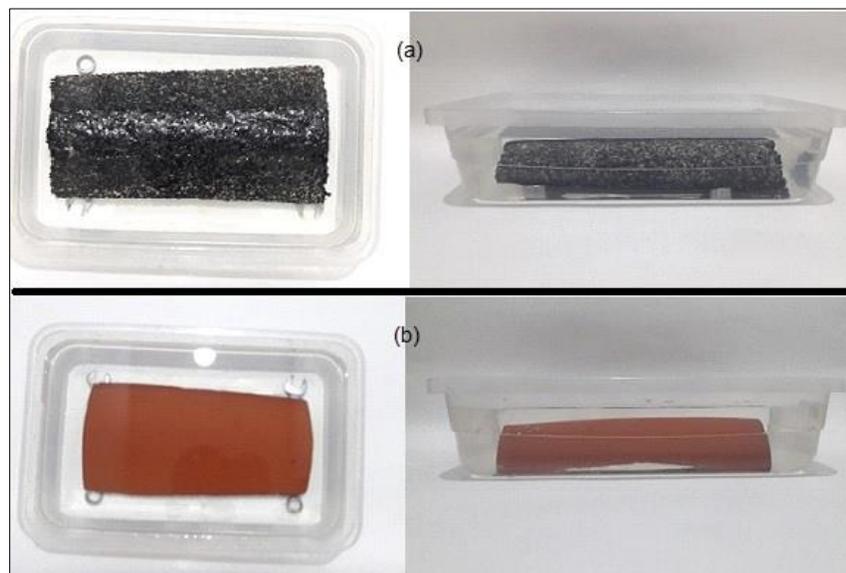
Prototipo	Observaciones
Con acabado capa de resina.	En el prototipo no se observaron roturas, desconchado, ni deformaciones, causadas por el impacto de la esfera de acero.
Con acabado capa de resina y capa de pintura base aceite.	En el prototipo no se observaron roturas, desconchado, ni deformaciones, causadas por el impacto de la esfera de acero.

Fuente: Elaboración propia.

### Absorción y Permeabilidad

El ensayo de absorción se realiza con base en la norma técnica NTC 2086, siguiendo el procedimiento descrito en los ítems 3.4 y 7.4, para dos prototipos elaborado con GCR, y dos teja de cerámica, como se observa en la figura 88.

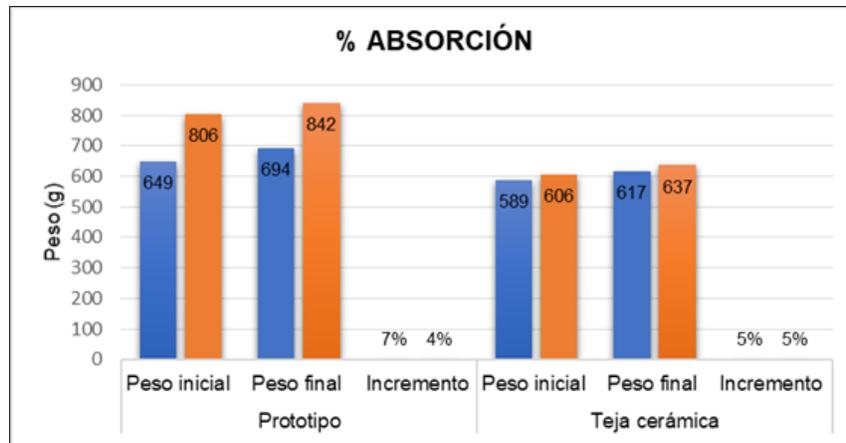
**Figura 88**  
*Ensayo absorción y permeabilidad*



Fuente: elaboración propia. (a) Prototipo con acabado capa de resina (b) Teja de cerámica

La diferencia en porcentaje obtenida una vez finalizado el ensayo de absorción, se representa gráficamente en la figura 89 y las observaciones realizadas se describen en la tabla 25.

**Figura 89**  
*Porcentaje de absorción*



Fuente: elaboración propia.

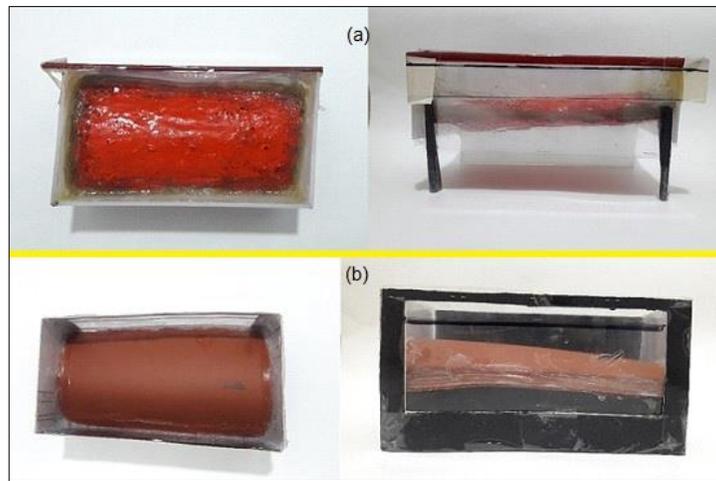
**Tabla 25**  
*Observaciones ensayo absorción*

Prototipo/Teja	Observaciones
Acabado capa de resina	Finalizado el ensayo, los prototipos de GCR presentaron variación en el peso en un rango del 4% al 7%, resultado que se encuentran dentro del rango permitido (10%) de la norma técnica NTC 2086.
Teja de cerámica	Finalizado el ensayo, las tejas de cerámica presentaron variación mínima constante alrededor del 5%, resultado que se encuentran dentro del rango permitido (10%) de la norma técnica NTC 2086.

Fuente: elaboración propia

El ensayo de permeabilidad se realiza con base en la norma técnica NTC 2086, siguiendo el procedimiento descrito en los ítems 3.4 y 7.5, para un prototipo elaborado con GCR, y una teja de cerámica, como se observa en la figura 90.

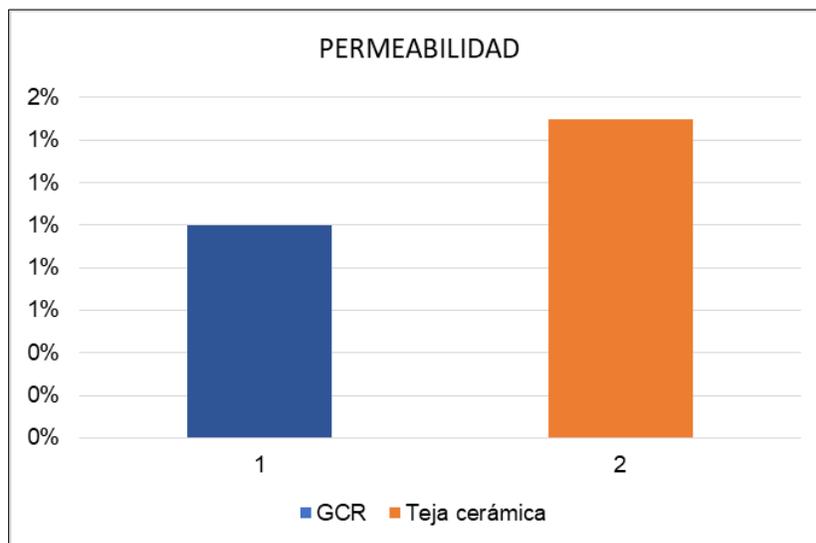
**Figura 90**  
*Montaje ensayo de permeabilidad*



Fuente: elaboración propia.

El porcentaje de permeabilidad obtenido una vez realizado el ensayo, se representa gráficamente en la figura 91.

**Figura 91**  
*Porcentaje de permeabilidad*



Fuente: elaboración propia.

Para el ensayo de permeabilidad, las observaciones realizadas se describen en la tabla 26.

**Tabla 26**  
*Observaciones realizadas*

Prototipo/Teja	Observaciones
Acabado capa de resina	Cumplidas las veinticuatro horas del ensayo de permeabilidad, se observa que la parte posterior del prototipo de GCR no evidencio goteo o filtraciones de agua, una vez realizada la verificación del área de agua absorbida esta equivale al 1%, encontrándose dentro del rango establecido de acuerdo a la norma técnica NTC 2086, que corresponde al 10%.
Teja de cerámica	Cumplidas las veinticuatro horas del ensayo de permeabilidad, se observa que la parte posterior de la teja de cerámica no evidencio goteo o filtraciones de agua, al realizar la verificación del área de agua absorbida esta equivale al 1.5% encontrándose dentro del rango establecido de acuerdo a la norma técnica NTC 2086, que corresponde al 10%.

Fuente: elaboración propia.

## **Análisis de resultados**

Las propiedades físicas de los prototipos obtenidos en la fase 1, elaborados con granulo de caucho reciclado (GCR) resina de poliuretano y solvente xilol, no pudieron ser analizadas debido a que dosificación empleada, dio como resultado prototipos con alto nivel de porosidad y baja compactación.

Los prototipos obtenidos en la fase 2, mejoraron su consistencia, como resultado de la modificación en la dosificación del granulo de caucho reciclado (GCR) la resina de poliuretano y el solvente xilol, sin embargo debido a la elasticidad que presentaron, solamente se determinó la deformación a partir de un procedimiento manual, donde se aplicaron cargas puntuales en tiempos determinados.

Los prototipos obtenidos en la fase 3, elaborados con granulo de caucho reciclado (GCR) y resina de poliestireno expandido (prueba 9) fueron descartados debido a la escasa adherencia presentada entre las partículas, sin embargo los prototipos obtenidos a partir de la mezcla de granulo de caucho reciclado (GCR) catalizador Mek y resina poliéster (prueba 10) fueron los seleccionaron para ser analizados y son determinadores del proceso de viabilidad del proyecto.

Los resultados obtenidos, establecen que el esfuerzo realizado por el prototipo elaborado con granulo reciclado de llantas (GCR) con acabado capa de resina y capa de pintura base aceite, aumenta proporcionalmente, al aumentar la carga de falla, comportamiento similar se observa con la teja de cerámica curva colapsada.

La mayoría de los prototipos, presentaron la falla en forma diagonal y extendiéndose con dirección al costado más angosto de la estructura, mientras que en las tejas de cerámica curva, la falla se presenta en los extremos de la parte más angosta, situación que se considera consecuencia de la geometría irregular y del material en que está elaborada.

La teja de cerámica es 65,72% más resistente que los prototipos elaborados con GCR acabado capa de resina y capa de pintura base aceite, es 63,6% más resistente que los prototipos elaborados con GCR con el mismo acabado, expuestos a la intemperie, esto debido a que el material base para la elaboración de las tejas de cerámica es la arcilla y que el proceso mediante el cual se fabrican, permite mayor adherencia entre las partículas.

El granulo de caucho reciclado (GCR) es de origen sintético, liviano, menos denso, características que inciden directamente en la variación del peso entre las tejas de cerámica y los prototipos, la cual se estableció con los resultados obtenidos, entre el 6% y el 30%.

El incremento de la tensión es directamente proporcional a la deformación, de acuerdo con lo observado en los diagramas correspondientes, la diferencia obtenida es mínima, lo que establece un comportamiento elástico similar entre los prototipos elaborados con GCR, acabado capa de resina más capa de pintura base aceite y los

prototipos con las mismas características expuestos a la intemperie, por un periodo de noventa días.

El prototipo elaborado posee propiedades elásticas, por lo tanto es importante considerar la adición o cambio del solvente o de la resina, para incrementar la rigidez.

El prototipo elaborado con granulo de caucho reciclado, mezclado con catalizador (Mek) y resina poliéster, en la proporción seleccionada, demostró comportamiento favorable en adherencia, reducción en el peso del producto terminado, resistencia a la falla, al ser comparado con el comportamiento de la teja de cerámica curva colapsada, que se sabe funciona, indica la viabilidad del producto obtenido.

El comportamiento de la resistencia de los prototipos elaborados y el de las tejas de cerámica, colapsadas en grupo de tres unidades, simulando el ambiente de una cubierta, incremento en 56%, con base en el análisis de los datos promedio obtenidos.

El producto final elaborado a base de granulo de caucho reciclado (GCR), presenta resistencia aceptable al ser comparada con la resistencia obtenida en las tejas de cerámica curva colapsadas, que se sabe funcionan, indicando que puede ser utilizado como material de construcción con características ecológicas amigables con el medio ambiente, aportando a la innovación de materiales nuevos en la industria de la construcción.

Los prototipos de GCR no sufrieron alteraciones (fisuras, desconchados, deformaciones) al ser sometidos al ensayo de resistencia al impacto, como respuesta de las propiedades elásticas del material con el que fueron elaborados.

En el ensayo de absorción, para los prototipos de GCR se obtuvo porcentajes entre el 5% y el 7%, lo cual indica que cumple con lo establecido en la norma técnica NTC 2086 "INGENIERÍA CIVIL Y ARQUITECTURA TEJAS DE CERÁMICA", que establece que éste debe ser inferior al 10%.

En el ensayo de permeabilidad realizado a los prototipos de granulo de caucho reciclado (GCR) y a las tejas de cerámica, no se evidencio goteo, de acuerdo con el requisito establecido en la norma técnica NTC 2086 "INGENIERÍA CIVIL Y ARQUITECTURA TEJAS DE CERÁMICA".

El uso de productos químicos como la resina poliéster y catalizador Mek, generó un impacto positivo en la elaboración del prototipo, ya que disminuyo el tiempo de fraguado e incremento la rigidez, permitiendo un proceso de fabricación más acelerado y de menor costo.

El proceso de elaboración desarrollado en la construcción de los prototipos, contribuye notablemente con la disminución de emisión de gas emanado al ambiente y su implementación garantiza el aprovechamiento del residuo sólido, producto del proceso de reciclaje de llantas en desuso.

Con base en los resultados obtenidos y logrando el cumplimiento de la norma que certifica su uso (en fase de estudio posteriores) incentivar el empleo del granulo de caucho reciclado (GCR) en la elaboración de teja para cubierta en construcciones de baja altura, considerando que es posible lograr un producto liviano, durable, resistente a condiciones climáticas de intemperie y que aporta a minimizar la contaminación ambiental disminuyendo la cantidad de llantas en desuso que generan gran impacto en la contaminación.

## Conclusiones

La mezcla obtenida, considerada óptima, en dosificación y proporción, permitió obtener prototipos que analizadas sus propiedades, destaca la adherencia entre partículas de GCR, bajo nivel de porosidad, peso liviano y elasticidad, comparado la teja de cerámica curva, que se sabe funciona, obtenida de diferentes proveedores.

El peso de los prototipos terminados, elaborados con granulo de caucho reciclado de llantas, se redujo en promedio en 22%, viabilizando la alternativa de ser utilizado como material para cubierta en construcciones de baja altura.

Los prototipos elaborados con GCR, catalizador Mek y resina poliéster, mostraron resultados favorables respecto a los ensayos de resistencia al impacto, absorción y permeabilidad, cumpliendo con lo estipulado en la norma técnica NTC 2086 “INGENIERÍA CIVIL Y ARQUITECTURA TEJAS DE CERÁMICA”, en la elaboración de un material de construcción ecológico tipo teja, lo que indica la viabilidad del uso del residuo sólido producto del reciclaje de llanta vehicular.

Los resultados obtenidos de la resistencia mecánica, para los prototipos elaborados a base de granulo reciclado de llanta (GCR), catalizador Mek y resina poliéster, no se encuentran cercanos a cumplir con lo estipulado en la NTC 2086 “INGENIERÍA CIVIL Y ARQUITECTURA TEJAS DE CERÁMICA”, comportamiento similar presentado en la misma prueba para las tejas de cerámica curva colapsadas.

El comportamiento de la resistencia mecánica mejoro en 56%, para prototipos elaborados a base de granulo reciclado de llanta (GCR), catalizador Mek y resina poliéster, al igual que en las tejas de cerámica curva, al realizar la prueba con tres unidades simulando el ambiente de una cubierta, resultado que sugiere continuar la investigación, incorporando a la mezcla un material que permita el incremento de esta propiedad.

El uso de la resina poliéster y el catalizador Mek proporcionó mayor rigidez a los prototipos, agilizó el proceso de fraguado reduciéndolo a 4 días y mejoro notablemente el acabado de la teja en construcción, importante destacar que son compuestos que se adquieren con facilidad en el comercio.

La mezcla del granulo de caucho reciclado (GCR), el catalizador Mek y la resina poliéster, así como el secado de los prototipos elaborados, en condiciones ambientales normales, disminuye el nivel de contaminación, respecto al generado cuando se emplean procesos térmicos.

El material granulo de caucho reciclado, es de fácil adquisición comercial, tiene bajo costo y alto rendimiento, al emplearse en grandes cantidades, impactaría incrementando el índice de aprovechamiento de productos generados por el reciclaje de llantas en desuso.

## **Recomendaciones**

Se recomienda mejorar el tipo de diseño de encofrados o moldes para facilitar el vertido de la mezcla, la compresión del material, con el propósito de mejorar las características del producto.

En estudios posteriores relacionados con el material objeto de este proyecto de investigación se sugiere, el uso de componentes químicos, que ocasionen el menor impacto ambiental y la realización de procedimientos que produzcan emisiones bajas de gases contaminantes, con el fin de cumplir la expectativa de la reutilización de residuos sólidos, que se enfoque en soluciones ambientales e incentive el uso de éstos materiales.

Al realizar continuidad a la presente investigación se recomienda estudiar el uso de otros componentes químicos e inclusive fibras de cualquier material que permitan mejor adherencia con la mezcla, disminuir el tamaño del granulo de caucho reciclado (CGR) con el fin de mejorar la porosidad y la resistencia de los prototipos, para cumplir con los parámetros establecidos en la norma técnica NTC 2086 “INGENIERÍA CIVIL Y ARQUITECTURA TEJAS DE CERÁMICA”.

## Bibliografía

- Asociación Nacional de Poliestireno Expandido. (2020). *PRODUCTO*. Obtenido de Asociación Nacional de Poliestireno Expandido: <http://www.anape.es/index.php?accion=producto>
- Beer, F. P., & Russell Johnston, Jr., E. (1999). *Mecánica vectorial para ingenieros, Estática*. Naucalpan de Juarez: McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V.
- Brugues. (10 de 03 de 2016). *Monográfico: Metil Etil Cetona (MEK)*. Obtenido de BRUGUÉS: <http://www.brugues.com/es/noticias/monogr%C3%A1fico-metil-etil-cetona-mek>
- Castro, G. (diciembre de 2008). *Materiales y Compuestos para la Industria del Neumático*. Obtenido de Departamento de Ingeniería Mecánica F.I.U.B.A.: [https://campus.fi.uba.ar/file.php/295/Material\\_Complementario/Materiales\\_y\\_Compuestos\\_para\\_la\\_Industria\\_del\\_Neumatico.pdf](https://campus.fi.uba.ar/file.php/295/Material_Complementario/Materiales_y_Compuestos_para_la_Industria_del_Neumatico.pdf)
- Castro., G. (diciembre de 2007). *Reutilización, Reciclado y Disposición Final de Neumáticos*. Obtenido de Departamento de Ingeniería Mecánica.: [https://campus.fi.uba.ar/file.php/295/Material\\_Complementario/Reutilizacion\\_Reciclado\\_y\\_Disposicion\\_final\\_de\\_Neumatico.pdf](https://campus.fi.uba.ar/file.php/295/Material_Complementario/Reutilizacion_Reciclado_y_Disposicion_final_de_Neumatico.pdf)
- Collins, K., Limbachilla, M., & Roberts, J. (7 de julio de 2015). *Sustainable Waste Management and Recycling: Used/Post-Consumer Tyres*. Obtenido de ICE, Virtual Library: <https://www.icevirtuallibrary.com/doi/abs/10.1680/upct.32866.0025>
- Definición de. (s.f.). *DEFINICIÓN DE RESINA*. Obtenido de Definición de: <https://definicion.de/resina/>
- Dracol. (2017). *Pisos en caucho EPDM granulado*. Obtenido de Dracol: <http://dracol.com/pisos-en-caucho-epdm-granulado/>
- Ecomundo. (15 de febrero de 2018). *Tejas con caucho reciclado de neumático*. Obtenido de Ecomundo: <http://www.ecomundo.com.ar/tejas-caucho-reciclado-neumaticos/>
- El Universo. (22 de julio de 2018). *Estudiante Ecuatoriana Pamela Hidalgo fabrica tejas con caucho reciclado*. Obtenido de El Universo: <https://www.eluniverso.com/vida/nota/6868337/estudiante-ecuatoriana-fabrica-tejas-caucho-reciclado>
- European Tyre & Rubber Industry. (2019). *Statistics*. Obtenido de ETMRA: <https://www.etrma.org/wp-content/uploads/2019/10/20200326-Statistics-booklet-2019-Final-for-web-upload.pdf>

- Fernández, R. B. (junio de 2010). *Llantas Usadas en Pavimentos*. Obtenido de Blogger.com: <http://ligante-asfaltico.blogspot.com/p/llantas-usadas-en-pavimentos.html>
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificaciones (ICONTEC). (30 de noviembre de 2005). *NORMA TÉCNICA COLOMIANA NTC 4017*. Obtenido de Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificaciones (ICONTEC): <https://www.icontec.org/>
- Meza Rodriguez, E. (diciembre de 2018). *Crean Artículos Sustentables con Llantas Usadas*. Obtenido de EL ECONOMISTA: <https://www.eleconomista.com.mx/empresas/Crean-articulos-sustentables-con-llantas-usadas-20181203-0056.html>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (06 de julio de 2017). *RESOLUCIÓN 1326 DE 2017 “Por la cual se establecen los sistemas de recolección selectiva y gestión ambiental de las llantas usadas y se dictan otras disposiciones”*. Obtenido de Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible: <https://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/d9-res%201326%20de%202017.pdf>
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (29 de julio de 2010). *Resolución 1457 de 2010: Por la cual se establecen los Sistemas de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de Llantas Usadas y se adoptan otras disposiciones*. Obtenido de Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial: [https://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/Programa\\_posconsumo\\_existente/RESOLUCION\\_1457\\_de\\_2010\\_llantas.pdf](https://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/Programa_posconsumo_existente/RESOLUCION_1457_de_2010_llantas.pdf)
- Naser, J. (16 de septiembre de 2015). *Científicos de CONICET fabrican tejas con caucho reciclado*. Obtenido de CONICET: <https://www.conicet.gov.ar/cientificos-del-conicet-fabrican-tejas-con-caucho-reciclado/>
- Nieto, M. (3 de mayo de 2018). *Usos y aplicaciones de la resina de poliéster*. Obtenido de Nazza: [https://www.nazza.es/blog/8\\_Usos-resina-poliester.html](https://www.nazza.es/blog/8_Usos-resina-poliester.html)
- Pascual, E. (11 de marzo de 2013). *Neumáticos Reciclados + Asfalto = Carreteras Ecológicas*. Obtenido de ELBLOGVERDE.COM: <https://elblogverde.com/neumaticos-reciclados-asfalto-carreteras-ecologicas/>
- Patiño, L. V., & Rodriguez Ramos, M. A. (15 de diciembre de 2017). *Llantas Usadas: materia prima para pavimentos y múltiples ecoaplicaciones*. Obtenido de Ontare 5, p 73 - 114: <file:///C:/Users/USUARIO/Downloads/2004-Texto%20del%20art%C3%ADculo-6400-2-10-20190717.pdf>

Peisino, L., Gaggino, R., Kreiker, J., Sánchez, M. P., & Arguello, R. (sf de noviembre de 2017). *Ensayo de Inflamabilidad de Tejas Elaboradas a Partir de Caucho y Polietileno Reciclados*. Obtenido de ARQUITECNO: <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/65375>

Pochteca . (s.f.). *XILOL*. Obtenido de Pochteca : <https://www.pochteca.com.mx/productosmp/xilol/>

Ristvey, A., Solano, L., Wharton, K., Cohan, S., & Lea-Cox, J. (11 de abril de 2010). *Effects of crumb rubber amendments on the porosity, water holding capacity and bulk density of three green roof substrates*. Obtenido de CAB Direct: <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20113098894>

Rube PRODUCTOS TÉCNICOS S.L. (27 de junio de 2014). *¿Qué es la resina de poliuretano?* Obtenido de Rube PRODUCTOS TÉCNICOS S.L.: <http://rubept.com/es/que-es-la-resina-de-poliuretano/#:~:text=Las%20resinas%20de%20poliuretano%20son,en%20pl%C3%A1sticos%20y%20materiales%20adhesivos.>

**Anexos**

**Anexo A**

*Norma Técnica NTC 2086*

**NORMA TÉCNICA  
COLOMBIANA**

**NTC  
2086**

1996-02-21

---

**INGENIERÍA CIVIL Y ARQUITECTURA.  
TEJAS DE ARCILLA**



MINISTERIO DE DESARROLLO ECONÓMICO

E: CLAY TILE

---

CORRESPONDENCIA:

---

DESCRIPTORES: teja de arcilla; teja.

---

ICS: 91.060.20

Edición por el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC)  
Apartado 14.221 Bogotá, D.C. - Tel. 6000000 - Fax 2271416

---

Prohibida su reproducción

Primera actualización

## PRÓLOGO

El Instituto Colombiano de Normas Técnicas, **ICONTEC**, es el organismo nacional de normalización, según el Decreto 2269 de 1993.

**ICONTEC** es una entidad de carácter privado, sin ánimo de lucro, cuya Misión es fundamental para brindar soporte y desarrollo al productor y protección al consumidor. Colabora con el sector gubernamental y apoya al sector privado del país, para lograr ventajas competitivas en los mercados interno y externo.

La representación de todos los sectores involucrados en el proceso de Normalización Técnica está garantizada por los Comités Técnicos y el periodo de Consulta Pública, este último caracterizado por la participación del público en general.

La NTC 2086 (Primera actualización) fue ratificada por el Consejo Directivo de 1996-02-21.

Esta norma está sujeta a ser actualizada permanentemente con el objeto de que responda en todo momento a las necesidades y exigencias actuales.

A continuación se relacionan las empresas que colaboraron en el estudio de esta norma a través de su participación en el Comité Técnico 369102 Ladrillo cerámico.

CÁMARA COLOMBIANA DE LA CONSTRUCCIÓN DE ANTIOQUIA  
LADRILLERA SAN CRISTÓBAL  
LADRILLERA SANTA FÉ S.A.  
LOSAS LTDA.  
LUNSA  
UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

**ICONTEC** cuenta con un Centro de Información que pone a disposición de los interesados normas internacionales, regionales y nacionales.

**DIRECCIÓN DE NORMALIZACIÓN**

---

**NORMA TÉCNICA COLOMBIANA 2086 ( Primera actualización)**

---

**INGENIERÍA CIVIL Y ARQUITECTURA.  
TEJAS DE ARCILLA****1. OBJETO**

**1.1** Esta norma establece los requisitos que deben cumplir y los ensayos a que deben someterse las tejas cerámicas esmaltadas o no para cubiertas, obtenidas por moldeado (prensado) o extrusión de una pasta de arcilla.

**1.2** Los valores se registrarán de acuerdo con el Sistema Internacional de Unidades (véase la NTC 1000).

**1.3** Esta norma no pretende señalar todos los problemas de seguridad asociados con su uso. Si los hay, es responsabilidad del usuario de esta norma establecer las prácticas de seguridad y salud para determinar la aplicabilidad de las regulaciones primordiales por usar.

**2. DEFINICIONES Y CLASIFICACIÓN****2.1 DEFINICIONES**

**2.1.1** Accesorios: elementos de arcilla cocida, complementarios de las tejas, que sirven para sitios o necesidades constructivas especiales, tales como el cabalote (limatón), las limalesas, los bordes, vértices o ventilación o adorno. Su geometría y color son de libre especificación por parte del fabricante, siempre y cuando garanticen, además de lo ofrecido, el cumplimiento de los requisitos de absorción, permeabilidad, traslapeo y enchule.

**2.1.2** Caliche: grano de óxido cálcico producido durante la cocción, que al meteorizarse se expande dando lugar a la aparición de desconchados o saltados.

**2.1.3** Cara exterior: parte visible de una pieza en la obra terminada.

**2.1.4** Cuarteo: rotura reticular del esmalte o superficie, debida a esfuerzos de tensión.

**2.1.5** Deformación: cambio de la forma que aparta a una pieza de la geometría de su modelo, y afecta las líneas de traslapeo.

**2.1.6** Desconchado: desprendimiento de una parte del material que hace aparecer un cráter más o menos profundo.

---

**NORMA TÉCNICA COLOMBIANA 2086 (Primera actualización)**

---

**2.1.7** Desportillamiento: discontinuidad producida por un desprendimiento de material que no sobrepasa los 40 mm de longitud y que se sitúa normalmente en las proximidades de las aristas.

**2.1.8** Eflorescencia: mancha blanquecina que se presenta en la cara exterior de la teja por el afloramiento a la superficie de las sales solubles (véase la NTC 4051).

**2.1.9** Esmaltado: proceso en el cual el esmalte se fija a la cara exterior de la teja, mediante la fusión de éste a la arcilla, produciendo un acabado vidriado en la parte externa de la teja.

**2.1.10** Exfoliación: defecto originado en el moldeo, de estructura foliacea, que puede manifestarse en cualquier etapa del proceso de fabricación.

**2.1.11** Fibura: hendidura más o menos irregular que afecta al espesor total de la teja.

**2.1.12** Grieta: hendidura que sobrepasa los 30 mm de longitud y que tiene en su parte más ancha 1 mm de abertura mínima.

**2.1.13** Laminación: defecto de estructura similar a la exfoliación; se presenta en las piezas prensadas.

**2.1.14** Lote: cantidad determinada de tejas con características similares, fabricadas en condiciones presumiblemente uniformes, que se someten a inspección como un conjunto unitario.

**2.1.15** Muestra: grupo de tejas de arcilla extraídas de un lote que sirve para obtener la información necesaria que permita apreciar una o más características de ese lote, para decidir sobre el mismo o sobre el proceso que lo produjo.

**2.1.16** Saldado: discontinuidad de aspecto cónico debida a golpes entre las piezas durante la manipulación o a esfuerzos de compresión en piezas esmaltadas.

**2.1.17** Teja: elemento de arcilla cocida esmaltada o no, usada en la construcción de techos y cubiertas mediante el traspaso de unidades individuales en todas las direcciones.

**2.1.18** Teja esmaltada: teja que contiene un vidriado cerámico en su cara exterior.

**2.1.19** Teja no esmaltada: teja cuya cara exterior es el resultado del proceso de formación y cocción, sin ninguna alteración.

## **2.2 CLASIFICACIÓN**

Las tejas de arcilla se clasifican según su perfil.

**Tipo I:** Tejas de alto perfil. Tejas con una proporción altura a ancho mayor de 1:5.

**Tipo II:** Tejas de bajo perfil. Tejas con una proporción altura a ancho igual o menor a 1:5.

**Tipo III:** Incluye todos los demás tipos de teja incluso las planas.

Las tejas de arcilla se fabrican en diversas formas las cuales se describen en la NTC 4051.

---

**NORMA TÉCNICA COLOMBIANA 2086 (Primera actualización)**


---

**3. REQUISITOS****3.1 APARIENCIA**

La teja no debe presentar fisuras, grietas, exfoliaciones, laminaciones, desconchados, que tengan una longitud mayor a la de traspaso.

La teja no debe presentar roturas imputables al proceso de fabricación.

**3.2 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS**

El diseño debe asegurar lo siguiente:

**3.2.1** Un traspaso longitudinal de 80 mm  $\pm$  20 mm por cada extremo de la teja, medido en dirección longitudinal.

**3.2.2** Un traspaso transversal de 30 mm mínimo, medido sobre la proyección horizontal.

**3.2.3 Enchufe**

Se debe asegurar que no exista una distancia mayor a 1 cm entre las superficies de dos tejas que se enchufan.

**3.2.4** El espesor mínimo en cualquier punto de la teja debe ser de 8 mm.

**3.2.5** Las dimensiones reales no deben diferir en más de 2 % de los valores nominales especificados por el fabricante.

**3.2.6** Las deformaciones en las aristas, generatrices o planos, no deben presentar flechas superiores al 2 % de la longitud total de la teja.

**3.3 RESISTENCIA MECÁNICA****3.3.1 Resistencia a la flexión**

Las tejas deben soportar una carga mínima de rotura de acuerdo con la Tabla 1, cuando se ensayen según el procedimiento establecido en el numeral 7.2. Los valores de la tabla se deben corregir para las dimensiones de cada teja, según la siguiente fórmula:

$$C.R.C = 0,85 \cdot CR \cdot (a/b)$$

Donde:

- $C.R.C$  = carga de rotura corregida, en N
- $CR$  = carga de rotura del ensayo, en N
- $a$  = ancho medio de la teja en cm
- $b$  = distancia entre apoyos en cm

---

**NORMA TÉCNICA COLOMBIANA 2006 ( Primera actualización)**


---

**3.3.2 Resistencia al impacto**

Las tejas totalmente apoyadas sobre un lecho de arena, deben soportar el impacto sin presentar roturas ni desmenuzados, cuando se ensayen de acuerdo con el procedimiento descrito en el numeral 7.3.

**3.4 ABSORCIÓN Y PERMEABILIDAD**

La absorción media de las tejas, medida de acuerdo con el ensayo descrito en el numeral 7.4 de esta norma, debe ser inferior al 10 %. En caso de que la absorción sea superior al 10 %, se debe realizar el ensayo de permeabilidad descrito en el numeral 7.5 de esta norma, verificando que no se presenten gotas en la superficie inferior de la teja.

Tabla 1. Propiedades físicas de las tejas de arcilla

TIPO	Carga de rotura mínima en N <sup>1</sup>	
	promedio 5 un	unidad
II y III	1 400	1 100
I <sup>2</sup>	1 800	1 600

<sup>1</sup> Sobre muestras secas

<sup>2</sup> Tejas en alto perfil en S y canal y redobles (véase la NTC 4051)

**3.5 EFLORESCENCIA**

Las tejas ensayadas de acuerdo con el método respectivo de la ASTM C 67, deben arrojar el resultado: "no eflorescido".

**4. TEXTURA Y COLOR**

El color y la textura de las tejas los debe especificar el comprador y se debe acordar mutuamente entre el comprador y proveedor con referencia a una muestra del grado y tipo especificado y representan el intervalo de tonalidades y texturas posibles.

**4.1 TEJA ESMALTADA**

La superficie expuesta de las tejas puede ir cubierta con un esmaltado del color y brillo acordado mutuamente entre comprador y proveedor, con referencia a una muestra del grado y tipo especificado que representan el intervalo de tonalidades de grado de brillo.

**4.2 ADHERENCIA DEL ESMALTADO**

La adherencia del esmaltado cerámico se deberá evaluar con el método del choque térmico de acuerdo con las secciones 2, 3 y 4 de la norma ASTM C 554, con la excepción de que cuatro ciclos de calentado y templado se deberán realizar a una temperatura de horno de 232 °C, después de estos cuatro ciclos se deberá evaluar la adherencia del esmaltado mediante ensayos de tensión realizados con cinco especímenes de acuerdo con la norma ASTM C 297. La resistencia de la adherencia no deberá ser inferior a 689 KPa.

**5. RECOMENDACIONES**

---

**NORMA TÉCNICA COLOMBIANA 2086 ( Primera actualización)**

---

**5.1 IDENTIFICACIÓN**

La teja puede tener en su cara inferior o en las áreas de traslape, la marca del fabricante y ciudad de origen, grabada en alto o bajo relieve.

**5.2 PROVISIÓN PARA AMARRE O SUJECCIÓN**

Las tejas pueden estar provistas de apoyos, perforaciones, o ambos, para garantizar tanto su correcta colocación en el techo como su fijación a este.

Los apoyos deben ubicarse en la cara inferior de la teja, deben tener una altura mínima de 8 mm, un ancho mínimo de 50 mm y en el sentido de la longitud de la teja mínimo 12 mm; deben estar colocados a 15 mm del borde.

Las perforaciones deben tener un diámetro de 5 mm y deben estar a 20 mm por lo menos, del borde. Pueden ser individuales, pares o según las necesidades específicas de colocación en caballetes y bordes.

Debe procurarse un alineamiento horizontal de los lomos de las tejas de caballete cuando son colocadas una sobre otra e instalarse un enchufe machihembrado o acanalado que evite el peso de agua entre ellas.

**5.3 PESO**

El fabricante debe informar el número de unidades de cubiertas requeridas por m<sup>2</sup> y el peso unitario del producto respetando las condiciones geométricas de los numerales 3.2.1 y 3.2.2, y el peso unitario del producto.

**5.4 CONGELAMIENTO Y DESCONGELAMIENTO**

Cuando el productor especifique su producto como resistente al congelamiento, debe cumplir con lo establecido en el numeral 5.1 y 5.2 de la norma ASTM C 1167.

5.5 Cualquier requisito o exigencia de calidad por encima de esta norma es de libre acuerdo entre productor y comprador.

**6. TOMA DE MUESTRA Y RECEPCIÓN DEL PRODUCTO**

6.1 La producción se divide en lotes de tejas de igual tipo y medidas semejantes, de acuerdo con la Tabla 2.

6.2 De cada lote constituido, se debe tomar la muestra indicada en la Tabla 2.

6.3 A cada unidad extraída debe comprobarse las características indicadas en el numeral 3. Si más de un tercio de la muestra no cumple, se debe tomar una segunda muestra de igual tamaño (igual número de unidades). Si ésta no cumple con lo estipulado, se debe rechazar el lote.

---

**NORMA TÉCNICA COLOMBIANA 2086 (Primera actualización)**


---

Tabla 2. Plan de muestreo

Tamaño del lote		Tamaño de la muestra (Unidades)
Hasta	5 000	10
5001 a	10 000	20
Mayor de	10 001	30

**6.4** Verificando el cumplimiento del numeral 6.3, se deben comprobar los requisitos de los numerales 3.4 y 3.5. Para cada ensayo se toman 3 unidades de la muestra, aplicando los siguientes criterios de aceptación.

**6.4.1** En cuanto a los requisitos de resistencia a la flexión y al impacto (véase el numeral 3.3), se debe tomar para cada caso el siguiente criterio:

6.4.1.1 Si dos o tres unidades cumplen, se debe aceptar el lote.

6.4.1.2 Si sólo una unidad cumple, se deben tomar 3 unidades adicionales y si todas éstas cumplen, se debe aceptar el lote. De no ser así, el lote se debe rechazar.

6.4.1.3 Si ninguna de las unidades cumple debe rechazarse el lote.

**6.4.2** Para el requisito de absorción (véase el numeral 3.4) se establece lo siguiente: si el valor medio obtenido de las 3 unidades tomadas para el ensayo no cumple, se debe verificar el requisito de permeabilidad con tres unidades adicionales. Si todas estas cumplen se debe aceptar el lote. De no ser así, debe rechazarse.

## 7. ENSAYOS

### 7.1 CARACTERÍSTICAS DIMENSIONALES

La verificación de las dimensiones se debe efectuar mediante instrumentos de capacidad y precisión adecuados.

### 7.2 RESISTENCIA A LA FLEXIÓN

#### 7.2.1 Aparatos

Una máquina o dispositivo de ensayo adecuado para la flexión con carga concentrada. Las piezas de carga y de apoyo del dispositivo deben ser barras lisas de acero, de aproximadamente 20 mm de diámetro.

#### 7.2.2 Procedimiento

En cada uno de los extremos transversales de la cara inferior de la teja se coloca un apoyo de 20 mm de ancho, hecho de cemento y yeso, que se ajuste al perfil de la teja de manera que sobresalgan por lo menos 25 mm en cada uno de los apoyos y garantice una luz de las 2/3 partes de su longitud. En el centro de la cara superior de la teja se coloca otro apoyo de 20 mm y del mismo material de los anteriores. Los apoyos deben estar ubicados en el mismo plano, con sus ejes paralelos. Una vez que los apoyos se hayan endurecido, se coloca la cara inferior de la teja sobre los apoyos de acero. A continuación y mediante una pieza de acero, se aplica la carga

---

**NORMA TÉCNICA COLOMBIANA 2086 (Primera actualización)**


---

sobre el eje del apoyo de la cara superior. La carga se va aumentando poco a poco sobre la parte convexa o la cara superior de la teja hasta la rotura a razón de 50 N/s (5 kgf/s). Véase la Figura 1.

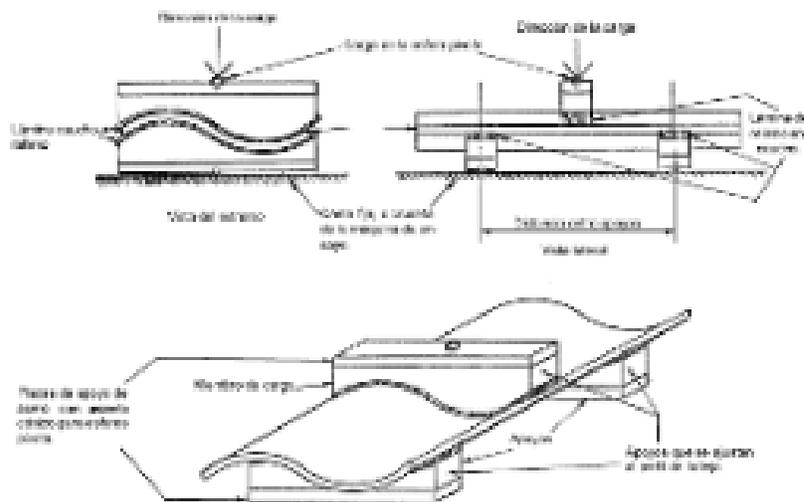


Figura 1. Esquema de montaje para el ensayo de resistencia a la flexión

### 7.2.3 Expresión de los resultados

La carga de rotura se expresa en N (kgf).

## 7.3 RESISTENCIA AL IMPACTO

7.3.1 Las tejas se deben apoyar sobre un lecho de arena.

7.3.2 Desde una altura de 500 mm se debe dejar caer una estera de acero de 100 g  $\pm$  1 g de masa.

## 7.4 ENSAYO DE ABSORCIÓN

Se debe realizar de acuerdo con la norma ASTM C 67.

## 7.5 ENSAYO DE PERMEABILIDAD

7.5.1 Sobre la teja de ensayo y en la proximidad de sus bordes, se deben construir paredes de material impermeable de 70 mm de altura mínima sobre el punto más alto de la teja, de forma que no permita el paso del agua a través de ellas, ni por los puntos de unión entre el material y la teja.

---

**NORMA TÉCNICA COLOMBIANA 2086 ( Primera actualización)**


---

**7.5.2** Se coloca en posición horizontal la parte inferior de la teja y se vierte en el cuenco formado una cantidad de agua suficiente, que debe estar a  $24\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 6\text{ }^{\circ}\text{C}$  para que ésta alcance un nivel de 50 mm por encima del punto más alto. Véase la Figura 2. No debe agregarse agua después de establecido este nivel.

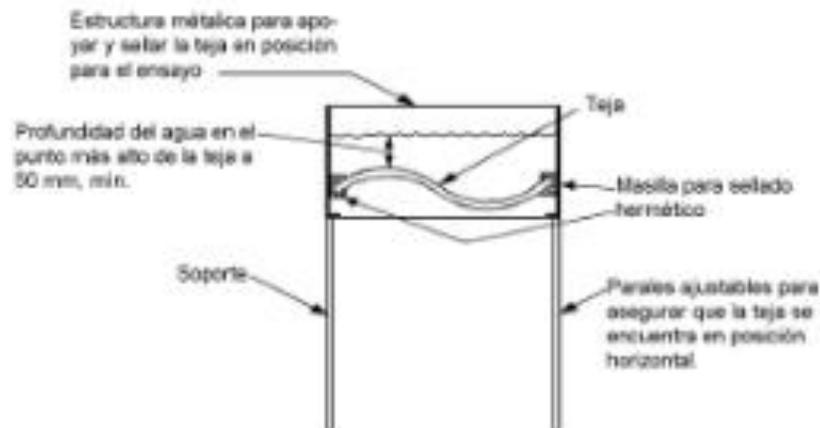


Figura 2. Montaje para el ensayo de permeabilidad

**7.5.3** Durante la realización del ensayo, las tejas deben mantenerse en la posición indicada y con su cara interior protegida de la evaporación, dentro de una habitación sin corriente de aire y donde la temperatura ambiente sea de  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ , y la humedad relativa del  $75\% \pm 10\%$ . La superficie inferior de la teja debe quedar situada en forma que esté a la vista.

**7.5.4** Después de 24 h de haberse agregado el agua, se debe verificar el requisito.

## **B. APÉNDICE**

### **NORMAS QUE DEBEN CONSULTARSE**

Las siguientes normas contienen disposiciones que, mediante la referencia dentro de este texto, constituyen la integridad del mismo. En el momento de la publicación eran válidas las ediciones indicadas. Todas las normas están sujetas a actualización; los participantes, mediante acuerdos basados en esta norma, deben investigar la posibilidad de aplicar las ediciones más recientes de las normas mencionadas a continuación.

NTC 4051: 1995 Ingeniería civil y arquitectura. Productos cerámicos para construcción. Definiciones y términos.

ASTM C 67: 1994 Standard Test Method of Sampling and Testing Brick and Structural Clay Tile.

ASTM C 297: 1988 Standard Test Method for Tensile Strength of Flat Sandwich Construction in Flatwise

---

**NORMA TÉCNICA COLOMBIANA 2086 (Primera actualización)**

---

ASTM C 554: 1993 Test Method for Craze Resistance of Fired Glazed Ceramic Whiterwares by a Thermal Shock Method.

ASTM C 1167: 1994 Standard Specification for Clay Roof Tiles.

---

**NORMA TÉCNICA COLOMBIANA 2086 (Primera actualización)**

---

**Anexo A (Informativo)****REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

INSTITUTO NACIONAL DE RACIONALIZACIÓN Y NORMALIZACIÓN. Determinación de la resistencia a la flexión de las tejas de arcilla cocida. Madrid. IRANOR, 1962. 1p. (Norma Española UNE 7193)

INSTITUTO NACIONAL DE RACIONALIZACIÓN Y NORMALIZACIÓN. Ensayo de permeabilidad de las tejas de arcilla cocida. Madrid. IRANOR, 1962. 1p. (Norma Española UNE 7191)

ASOCIACIÓN BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Teja Cerámica de Capa e Canal. 9p (NBR 9601)

ASOCIACIÓN BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Teja Cerámica Tipo Francesa. 7p (NBR 7172)

ASOCIACIÓN BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Teja Cerámica Tipo Francesa - Determinação da Carga de Ruptura a Flexão. 3p (NBR 6462)

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Specification for Clay Roof Tiles. Philadelphia, 1994. 5p. II (ASTM C 1167)