



**Universidad Santo Tomás De Aquino
Facultad De Ingeniería**

Programa De Maestría En Infraestructura Vial

TRABAJO DE GRADO DE MAESTRÍA

**EVALUACIÓN PRELIMINAR DEL COMPORTAMIENTO DE LÁMINAS DE
CAUCHO RECICLADO COMO ELEMENTO DE APOYO EN MODELOS DE
VIGAS SIMPLEMENTE APOYADAS SOMETIDAS A VIBRACIONES
HORIZONTALES.**

Presentado por:
**Luis Fernando Gartner Mc. Bain
Yudy Marlevis Minota Zea**

Director
Ing. Héctor Camilo Higuera Flórez M.Sc.

Febrero de 2019 - Bogotá D.C., Colombia.

Nota de Aceptación

Firma del Presidente del Jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Bogotá, Febrero de 2019

Agradecimientos

Agradezco a mis padres, mi hermana y mi novia por la perseverancia y el ánimo que me dieron para sacar este proyecto adelante. Gracias a mi compañera de tesis Yudy Minota por todas las noches que trabajamos juntos para lograr el éxito en esta tesis, y al ingeniero Héctor Camilo por todo su apoyo para culminar este proceso.

Luis Fernando Gartner Mc. Bain

Agradezco primero a Dios por las todas las bendiciones que ha traído a mi vida, a mis padres por ser siempre ese motor que me impulsa a luchar por mis sueños, por aguantar mis ausencias y mis angustias, a mi compañero de tesis Luis Fernando Gartner Mc. Bain por compartir sus conocimientos, por el esfuerzo y la perseverancia y a ti por impulsarme cada día a ser mejor, por enseñarme que cada logro con esfuerzo es valioso y al Ingeniero Héctor Camilo Higuera Flórez por decidir asumir este reto con disciplina, entrega y profesionalismo.

Yudy Minota Zea.

CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN.....	20
INTRODUCCIÓN	24
1 OBJETIVOS	26
1.1 OBJETIVO GENERAL	26
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	26
2 ALCANCES Y LIMITACIONES	27
2.1. ALCANCE.....	27
2.2. LIMITACIONES	27
3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	29
4 JUSTIFICACIÓN	31
5 MARCO TEÓRICO	33
5.1 COMPORTAMIENTO DE LOS MATERIALES	37
5.1.1 Componentes de los neumáticos	37
5.1.2 Composición del Concreto.....	48
5.2 PROPIEDADES DEL CAUCHO RECICLADO	49
5.3 METODOLOGÍA DE RECICLAJE PARA NEUMÁTICOS	52
5.3.1 Termólisis.....	52
5.3.2 Pirolisis.....	52
5.3.3 Incineración.....	52
5.3.4 Trituración mecánica.....	53
5.3.5 Trituración Criogénica	53

5.4	TIPOS DE EXCITACIÓN	55
5.4.1	Excitación por efectos ambientales	56
5.4.2	Excitación por desplazamiento	56
5.4.3	Excitación por liberación de cargas	57
5.4.4	Excitación por vibradores	57
6	ESTADO DEL ARTE	60
6.1	INFLUENCIA DE LAS VIBRACIONES EN LAS ESTRUCTURAS	60
6.2	ENSAYOS Y MEDICIONES DINÁMICAS	64
6.3	SISTEMAS DE CONTROL DE VIBRACIONES	67
7	PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	72
7.1	FASES DE EJECUCIÓN DEL PROYECTO	72
7.1.1	Etapa 1: Construcción de los modelos físicos.....	72
7.1.2	Etapa 2: Instalación de las placas de llanta reciclada en los modelos.....	78
7.1.3	Etapa 3: Ensayo en la Mesa Vibradora	82
8	RESULTADOS	89
8.1	ENSAYOS DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN	89
8.2	ENSAYO EN MESA VIBRADORA.....	92
8.2.1	Graficas del Historial de Desplazamiento del Modelo 1 (Modelo sin placas de llanta reciclada).....	93
8.2.2	Graficas del Historial del Desplazamiento del Modelo 2 (Con placas de caucho en la parte inferior)	96
8.2.3	Graficas del Historial de Desplazamiento del Modelo 3 (Con placas de caucho en la parte lateral)	98
8.2.4	Resultados Frecuencia hasta 11 Hz - Modelo 1 (Sin placas de caucho)...	100

8.2.5	Resultados Frecuencia hasta 11 Hz – Modelo 2 (Con placas de caucho en la parte inferior)	103
8.2.6	Resultados Frecuencia hasta 15 Hz – Modelo 3 (Con placas de caucho en la parte lateral)	106
9	MODELACIÓN NUMÉRICA	109
9.1	DESARROLLO DE LOS MODELOS NUMÉRICOS	109
9.1.1	Características de los apoyos de caucho reciclado	109
9.1.2	Características de los apoyos elastoméricos	110
9.1.3	Modelación de los apoyos	111
9.1.4	Características del concreto	111
9.1.5	Geometría de los modelos	112
9.1.6	Cargas asignadas en los modelos	115
9.2	RESULTADOS OBTENIDOS	116
9.2.1	Modelo 1 - Sin apoyos elastoméricos	116
9.2.2	Modelo 2 - Con apoyos elastoméricos de neopreno	118
9.2.3	Modelo 2 - Con apoyos elastoméricos de caucho reciclado	121
9.2.4	Modelo 3 - Con apoyos elastoméricos de neopreno	123
9.2.5	Modelo 3 - Con apoyos elastoméricos de caucho reciclado	125
9.3	RESUMEN DE RESULTADOS OBTENIDOS	127
9.3.1	Valores de momentos en el tablero	127
9.3.2	Valores de momento y cortante en las vigas	127
9.3.3	Valores de desplazamientos	128
10	ANÁLISIS DE RESULTADOS	129
10.1	ANÁLISIS DE MOMENTOS EN EL TABLERO	129
10.1.1	Modelo 2	129

10.1.2	Modelo 3.....	130
10.1.3	Modelos 2 y 3	131
10.2	ANÁLISIS DE MOMENTOS EN VIGAS	134
10.2.1	Modelo 2.....	134
10.2.2	Modelo 3.....	135
10.2.3	Modelos 2 y 3	136
10.3	ANÁLISIS DE CORTANTE EN VIGAS	138
10.3.1	Modelo 2.....	138
10.3.2	Modelo 3.....	139
10.3.3	Modelos 2 y 3	140
10.4	ANÁLISIS DE DESPLAZAMIENTO	141
11	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	144
11.1	CONCLUSIONES.....	144
11.2	RECOMENDACIONES.....	147
	BIBLIOGRAFÍA	150

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Valor en USD importado en neumáticos por Colombia.....	34
Figura 2. Comportamiento de las importaciones de neumáticos por tipo de vehículo, año 2011 – 2015.	35
Figura 3. Comportamiento - Cantidad de neumáticos importados por Colombia 2011-2015.	36
Figura 4. Componentes de neumáticos para automóviles y camionetas.	38
Figura 5. Componentes de neumáticos para camiones y microbuses.	38
Figura 6. Estructura química del caucho natural. (Chemsketch ACD/Labs).....	40
Figura 7. Representación de una unidad de isopreno.....	41
Figura 8. Estructura química del poli (cis-1,4-isopreno) caucho seco.....	42
Figura 9. Estructura química del caucho sintético Polibutadieno.....	46
Figura 10. Estructura química del caucho sintético Polibutadieno, enlaces dobles y posiciones del carbono.....	46
Figura 11. Apariencia del material Negro de Humo.	47
Figura 12. Proceso para separación de los componentes del neumático.....	54
Figura 13. Niveles de Tratamiento de los neumáticos fuera de uso.....	55
Figura 14. Resultados de Ensayo - Resistencia a la compresión – Cilindro 1.....	90
Figura 15. Resultados de Ensayo - Resistencia a la compresión – Cilindro 2.....	91
Figura 16. Resultados de Ensayo - Resistencia a la compresión – Cilindro 3.....	91
Figura 17. Resultado de Ensayo – Evolución de la Resistencia a la compresión promedio de los cilindros.	92

Figura 18. Representación del desplazamiento obtenido en el Modelo No. 1, en función de la Mesa Vibradora – Tiempo 2 segundos.....	94
Figura 19. Historial del Desplazamiento resultante en el Modelo 1, en función de la Mesa Vibradora – Tiempo 3 Seg.....	95
Figura 20. Historial del Desplazamiento resultante del Modelo 1, en función de la Mesa Vibradora – en ambos sentidos.....	95
Figura 21. Historial del Desplazamiento resultante en el Modelo 1– Ciclo Completo....	96
Figura 22. Historial del Desplazamiento del Modelo 2 – en el segundo 0.	97
Figura 23. Historial del Desplazamiento del Modelo 2 – en el segundo 1.	97
Figura 24. Historial del Desplazamiento del Modelo 2 – Ciclo Completo.....	98
Figura 25. Historial del Desplazamiento del Modelo 3 – En el segundo 0.....	99
Figura 26. Historial del Desplazamiento del Modelo 3 – En el segundo 1.....	99
Figura 27. Desplazamiento del Modelo 3 – Ciclo Completo.....	100
Figura 28. Frecuencia del Modelo 1 – Tiempo: 34 – 50 segundos.	101
Figura 29. Frecuencia del Modelo 1 – Tiempo: 80 – 90 segundos.	101
Figura 30. Frecuencia del Modelo 1 – Tiempo: 150 – 160 segundos.	102
Figura 31. Frecuencia del Modelo 1 – Tiempo: 200 – 210 segundos.	102
Figura 32. Frecuencia del Modelo 1 – Tiempo: 240 – 250 segundos.	103
Figura 33. Frecuencia del Modelo 2 – Tiempo: 30 – 40 segundos.	104
Figura 34. Frecuencia del Modelo 2 – Tiempo: 80 – 90 segundos.	104
Figura 35. Frecuencia del Modelo 2 – Tiempo: 120 – 130 segundos.	105
Figura 36. Frecuencia del Modelo 2 – Tiempo: 150 – 160 segundos.	105
Figura 37. Frecuencia del Modelo 3 – Tiempo: 48 – 60 segundos.	106
Figura 38. Frecuencia del Modelo 3 – Tiempo: 80 – 90 segundos.	107
Figura 39. Frecuencia del Modelo 3 – Tiempo: 150 – 160 segundos.	107

Figura 40. Frecuencia del Modelo 3 – Tiempo: 200 – 210 segundos.	108
Figura 41. Frecuencia del Modelo 3 – Tiempo: 230 – 240 segundos.	108
Figura 42. Propiedades del concreto en SAP2000.....	112
Figura 43. Geometría de las vigas de los modelos en SAP2000.....	113
Figura 44. Geometría de la placa de los modelos en SAP2000	113
Figura 45. Vista 3D del modelo en SAP2000.....	114
Figura 46. Vistas Modelo SAP2000.....	114
Figura 47. Asignación carga muerta en Modelo	115
Figura 48. Asignación de vibración en modelo	115
Figura 49. Vistas modelo 1, sin apoyos elastoméricos	116
Figura 50. Dirección de los ejes locales.....	117
Figura 51. Momentos resultantes en tablero Modelo 1.....	117
Figura 52. Resultantes de Momento y cortante en vigas - Modelo 1.....	118
Figura 53. Vistas modelo 2, con apoyos en neopreno.....	119
Figura 54. Dirección de los ejes locales.....	119
Figura 55. Momentos resultantes en tablero - Modelo 2 con neopreno.....	120
Figura 56. Resultantes de Momento y cortante en vigas - Modelo 2 con neopreno	120
Figura 57. Vistas modelo 2, con apoyos en caucho reciclado	121
Figura 58. Dirección de los ejes locales.....	121
Figura 59. Momentos resultantes en tablero - Modelo 2 con caucho reciclado.....	122
Figura 60. Resultantes de Momento y cortante en vigas - Modelo 2 con caucho reciclado	122
Figura 61. Cortes en modelo 3, con apoyos en neopreno	123
Figura 62. Dirección de los ejes locales.....	123
Figura 63. Momentos resultantes en tablero - Modelo 3 con neopreno.....	124

Figura 64. Resultantes de Momento y cortante en vigas - Modelo 3 con neopreno	124
Figura 65. Vistas modelo 3, con apoyos en caucho reciclado	125
Figura 66. Dirección de los ejes locales.....	125
Figura 67. Momentos resultantes en tablero - Modelo 3 con caucho reciclado.....	126
Figura 68. Resultantes de Momento y cortante en vigas - Modelo 3 con caucho reciclado	126
Figura 69. Momento M1-1 en tablero	133
Figura 70. Momento M2-2 en tablero	134
Figura 71. Momento en vigas.....	138
Figura 72. Cortante en vigas	141
Figura 73. Desplazamientos de la estructura	143

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Valor de Importaciones de Neumáticos nuevos en Colombia.	33
Tabla 2. Lista de los productos importados por Colombia 4011 Neumáticos en USD ...	35
Tabla 3. Toneladas de Neumáticos importadas por Colombia.	36
Tabla 4. Composición del látex.....	41
Tabla 5. Estructura, propiedades y aplicaciones de diferentes elastómeros industriales.	42
Tabla 6. Propiedades físicas Estireno – Butadieno (SBR).....	45
Tabla 7. Componentes del negro de humo pirolítico	48
Tabla 8. Resultados de ensayos de probetas con caucho de neumático fuera de uso.	49
Tabla 9. Propiedades de la banda de rodamiento con agregado de polvo de caucho reciclado.....	50
Tabla 10. Propiedades físicas del Caucho de Innerliner.	51
Tabla 11. Diseño de mezcla para un concreto de 21 MPa.	73
Tabla 12. Características de la placa de llanta reciclada.	78
Tabla 13. Características del material de adherencia - Pegaucho.	79
Tabla 14. Resultados ensayo de Resistencia a la Compresión.....	89
Tabla 15. Características apoyos de caucho reciclado.	109
Tabla 16. Características de neoprenos para apoyos.....	110
Tabla 17. Valores de constantes del apoyo para modelación.....	111
Tabla 18. Tabla comparativa de Momentos en el tablero.	127
Tabla 19. Comparativo de momento y cortante en vigas.....	127

Tabla 20. Comparativo desplazamientos	128
Tabla 21. Comparación M1-1 y M2-2 en tablero para el Modelo 2	129
Tabla 22. Comparación M1-1 y M2-2 en tablero para el Modelo 3	130
Tabla 23. Comparación M1-1 y M2-2 en tablero para los tres modelos.....	131
Tabla 24. Comparación M1-1 y M2-2 en tablero para los tres modelos.....	132
Tabla 25. Comparación de M máx para las vigas – Modelo 2.....	135
Tabla 26. Comparación de M máx. Para las vigas – Modelo 3	136
Tabla 27. Comparación de M máx. Para las vigas de todos los modelos	136
Tabla 28. Comparación general para valores de momento en vigas.....	137
Tabla 29. Comparación de V máx para las vigas – Modelo 2	139
Tabla 30. Comparación de V máx. Para las vigas – Modelo 3	139
Tabla 31. Comparación de V máx. Para las vigas de todos los Modelos	140
Tabla 32. Comparación de desplazamientos para los diferentes modelos	142

LISTA DE FOTOGRAFÍAS

	Pág.
Fotografía 1. Refuerzo Estructural para los modelos.....	74
Fotografía 2. Mezcla de concreto de 21 MPa, para los modelos.	74
Fotografía 3. Prueba de Slump a la mezcla de concreto.	75
Fotografía 4. Toma de temperatura de la mezcla de concreto.	75
Fotografía 5. Fundición de los modelos para realizar ensayos.	76
Fotografía 6. Cilindros de concreto para los ensayos.	77
Fotografía 7. Puente Modelo físico final.	77
Fotografía 8. Placas de llanta reciclada - GICOMER S.A.S.....	79
Fotografía 9. Placas instaladas la parte inferior de las vigas del Modelo 2.	81
Fotografía 10. Placas instaladas en la zona lateral de las vigas del Modelo 3.....	81
Fotografía 11. Mesa Vibradora - vista frontal.....	82
Fotografía 12. Mesa Vibradora - vista lateral.	83
Fotografía 13. Vista de las Placas de aluminio instaladas en el Modelo 2.	83
Fotografía 14. Instalación de equipo LVDT en el Modelo 2.	84
Fotografía 15. Modelo No. 2 - Instalado en la Mesa Vibradora con equipo LVDT – Vista 1.	85
Fotografía 16. Modelo No. 2 - Instalado en la Mesa Vibradora con equipo LVDT – Vista 2.	85
Fotografía 17. Modelo No. 2 - Instalado en la Mesa Vibradora con equipo LVDT – Vista 3.	85
Fotografía 18. Fotografía 18. Equipo de Control de la Mesa Vibradora.	86

Fotografía 19. Interfaz de configuración del Software INGEMODULER.....	87
Fotografía 20. Emisión de resultados de ensayos - Software INGEMODULER.	88
Fotografía 21. Montaje de los modelos en la Mesa Vibradora.	93

GLOSARIO

Agente contaminante: Sustancias nocivas, dañinas y/o factores que afectan el equilibrio del medio ambiente, los cuales pueden ser gaseosos, líquidos, sólidos, entre otros.

Algoritmo: Orden sucesivo que posibilita la solución para la ejecución de actividades con un orden preciso y definido. Estos pueden ser de orden cualitativo o cuantitativo.

Apoyo: Elemento de características específicas que evita que la estructura presente condiciones de inestabilidad y permite la transmisión controlada de la fuerza a la superestructura.

Caucho: Látex producido por varias moráceas y euforbiáceas, que, después de coagulado, es una masa impermeable muy elástica y tiene muchas aplicaciones en la industria.

Coficiente: Factor y/o proporción que permite determinar las características o propiedades de un cuerpo.

Combustión: Proceso químico exotérmico que se da al mezclar oxígeno con un material oxidable cuyo resultado es la liberación de energía en forma de calor.

Correlación: Relación mutua entre dos variables aleatorias.

Deflexión: En sistemas estructurales se considera la deformación que puede tener un elemento por causa de una carga y/o esfuerzo.

Desequilibrio: Factores que afectan el estado dinámico y la armonía de un sistema de forma negativa.

Elastómero: Material que tiene la capacidad de deformarse bajo la acción de una carga y que tiene la capacidad de retomar su forma original.

Estribo: Parte de un puente destinada a soportar el peso del tablero.

Frecuencia: Numero de repeticiones de un elemento durante un periodo o espacio determinado.

Hidrocarburo: Compuesto químico formado por carbono e hidrógeno.

Impacto: Hace referencia al choque de manera violenta de un objeto o materia contra otro, el cual supone en la mayoría de los casos algún tipo de alteración en las características de ese elemento. También hace alusión al efecto generado sobre algo, ya sea positivo o negativo.

Labrado: Dibujo en las llantas que tienen como funcionalidad permitir mayor adherencia entre esta y el pavimento.

Látex: Sustancia de aspecto lechoso constituida por resinas, alcaloides, entre otros., que se obtiene de los cortes hechos en el tronco de algunos árboles y de ciertas materias primas, como el caucho y la laca.

Modelación: Es una reproducción de las propiedades físicas de un objeto real o ficticio que se realiza de manera análoga, abstracta, fenomenológica o idealizada.

Mitigar: Atenuar los posibles daños que pudiesen presentarse por efectos de factores externos o internos.

Neumático: Pieza de caucho con cámara de aire o sin ella, que se coloca sobre la llanta.

Neopreno: Caucho sintético que resiste temperaturas muy altas.

Parámetro: Elemento o dato importante desde el que se examina un tema.

Pilas: Las pilas son los apoyos intermedios del puente, que transmiten los esfuerzos que reciben de los elementos portantes a las cimentaciones.

Puente: Es una estructura destinada a salvar obstáculos naturales, como ríos, valles, lagos o brazos de mar. O artificiales, etc.

Proliferación: Multiplicación o reproducción de algún organismo de forma rápida.

Reciprocidad: Correspondencia mutua entre una cosa y otra.

Reutilización: Volver a utilizar un bien o producto desechado.

Señal: En física, una señal es una variación de la corriente eléctrica o de otra magnitud que se utiliza para transmitir información.

Solicitaciones: Tensión producida en un cuerpo al estar sometido a una fuerza o sistema de fuerzas.

Simulación: Se define como un experimento o modelo que imita algunas características o aspectos de algo real.

Vibración: Propagación de ondas elásticas que produce deformaciones y tensiones sobre un medio continuo (o posición de equilibrio). Movimiento repetitivo alrededor de una posición de equilibrio.

RESUMEN

El presente proyecto de trabajo de grado tiene por objetivo realizar una evaluación preliminar de forma experimental mediante simulación numérica de la efectividad de placas de llanta reciclada como elemento de apoyo en un modelo físico de vigas simplemente apoyadas. Para este estudio se elaboraron tres (3) modelos físicos, y las dimensiones de los mismos y las frecuencias empleadas fueron consideradas en función de la capacidad del elemento en el cual se realizaron las pruebas (mesa vibradora para ensayos en ingeniería); los modelos se instrumentaron con sensores y fueron sometidos a movimientos horizontales con el fin de determinar a través del desplazamiento los patrones de comportamiento de la estructura en función del tipo de apoyo que tenía cada uno de estos modelos, considerando aspectos importantes tales como: modelo 1 no cuenta con placas de llanta reciclada incorporadas, modelo 2 se le incorporaron placas en la parte inferior de las dos vigas y el modelo 3 cuenta con placas en la parte lateral de las vigas. Los tres modelos fueron probados en una mesa vibradora cuya plataforma tiene dimensiones de 1.0m x 1.0m, y posteriormente se registraron sus vibraciones en tiempo real. Posteriormente se logró llevar a cabo la calibración del prototipo numérico en el cual fue posible modelar bajo las mismas condiciones el espécimen gracias a las herramientas analíticas y metodológicas del software SAP 2000, esta vez con láminas de neopreno tradicional incorporadas en las mismas posiciones del modelo físico, y sometidas a los mismos esfuerzos y vibraciones.

Los resultados obtenidos experimentalmente, fueron comparados entre si utilizando los datos de las propiedades físico-mecánicas del neopreno las cuales han sido objeto de estudio en diferentes trabajos, y se encuentran definidas comercialmente, y las de las láminas de caucho suministradas por el proveedor. Posteriormente, se realizó un análisis funcional de la incorporación de estas láminas de caucho reciclado en las estructuras del modelo, concluyendo que la incorporación de estas laminas en el mismo, tiende a mostrar señales de mejora en el comportamiento funcional de la estructura toda vez que se evidencia una reducción del cortante en las vigas y los momentos en los tableros. Sin embargo, hay un aspecto importante a considerar y es el aumento en los desplazamientos, esto permite concluir que la estructura presenta liberación de esfuerzos, y se deja abierta la posibilidad de realizar pruebas experimentales en futuras investigaciones, en modelos de diferente escala, con el fin

de determinar, mediante correlaciones estructurales, estudios económicos y ambientales si definitivamente la utilización de estas láminas de caucho reciclado es viable como elemento de apoyo elastomérico en estructuras reales , y de esta manera plantear alternativas ambientalmente amigables para el reciclaje de las llantas de los vehículos.

Palabras Clave: Neopreno, Placas de llanta reciclada, impacto medioambiental, reciclaje, elemento de apoyo, modelos, vibraciones.

ABSTRACT

The purpose of the present project, is to carry out a preliminary evaluation in an experimental way by means of numerical simulation of the effectiveness of recycled tire rubber plates as a support element in a physical model of simply supported beams. For this study, three (3) physic models were elaborated, in which their own dimensions and the frequencies used for the test, were considered in function of the capacity of the element in with the test where carried out (vibrating table for engineering test); the models were instrumented with sensors and were subjected to horizontal movements in order to determine through the displacement, the behavior patterns of the structure according to the type of support that each of these models had, considering important aspects such as: model 1 doesn't have any recycled tire rubber sheets incorporated, model 2, was fitted with plates in the lower part of the two beams, and model 3 has them incorporated in the lateral faces of the beams. All the models were tested on a small-scale vibrating table, whose platform has dimensions of 1m x 1m and subsequently the vibrations were recorded in real time. Later, we could carry out the calibration of the numerical prototype in which it was possible to model the specimen under the same conditions thanks to the analytical and methodological tools of the SAP 2000 software, this time with the traditional neoprene sheets incorporated in the same positions of the physical model, and subjected to the same efforts and vibrations.

The results obtained experimentally, were compared among themselves using the data of the physical-mechanical properties of the neoprene which have been object of study in different works, and are defined commercially, and those of the rubber sheets given by the supplier. Subsequently, a functional analysis of the incorporation of these sheets of recycled rubber in the structures of the model was carried out, concluding that the incorporation of these sheets, tends to show signs of improvement in the functional behavior of the structure every time evidence a reduction of the shear in the beams and the moments in the boards. However, there is an important aspect to consider and it is the increase in displacements, this allows to conclude that the structure presents liberation of efforts, and it leaves open the possibility of performing experimental tests in future investigations, in models of different scale, with the

In order to determine, through structural correlations, economic and environmental studies whether the use of these recycled rubber sheets is viable as an elastomeric support element in real structures, and in this way to propose environmentally friendly alternatives for recycling the tires of vehicles .

Keywords: Neoprene, recycled tire plates, environmental impact, recycling, support element, models, vibrations.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, hay varios estudios relacionados con el uso que se le puede dar al caucho reciclado, motivados por la cantidad descontrolada de neumáticos desechados y por la afectación agresiva que este material genera al medio ambiente; el presente documento, se encuentra enmarcado como una solución técnica, ambiental como opción de elemento para apoyo de estructuras, ensayado inicialmente en modelos de vigas simplemente apoyadas.

A pesar de que el neopreno es considerado un material efectivo y seguro, pues logra integrarse a nivel estructural de manera óptima; se pueden buscar alternativas de materiales cuyas características sean similares o equivalentes a este material con el fin de tener opciones en el momento de escoger los materiales para la construcción de infraestructura vial. Si bien el diseño de estos apoyos busca brindar entre otros aspectos, una adecuada transmisión de las cargas del tablero a las pilas, desplazamientos horizontales en dos direcciones distintas, giros en tres ejes diferentes, absorción de las cargas verticales y horizontales; adicionalmente, se puede ver un aporte positivo de las láminas de caucho reciclado como una combinación de soluciones de tipo técnico, ambiental y funcional. A partir de esta consideración, se da inicio al análisis de las propiedades físico-mecánicas de la lámina de caucho y del neopreno, lo que permite evidenciar el acercamiento entre estos dos materiales y la optimización de la información frente a la aplicabilidad en los modelos físicos construidos.

Adicionalmente, la integración de la lámina de caucho al modelo y la emisión de una señal de vibración ponen a prueba el límite de funcionamiento de dispositivos de apoyo cuando son sometidos a una acción que posibilita el incremento de desgaste de una estructura; lo anterior determina el posible aumento del desplazamiento de la estructura en función del tiempo, pero con un resultado efectivo en el momento de medir su capacidad de amortiguamiento y reacción.

Por tanto, en el presente proyecto se caracteriza el comportamiento de un modelo físico de vigas simplemente apoyadas, sometido a una vibración horizontal externa. Posteriormente, se desarrolla un modelo numérico, cuyo funcionamiento es equiparable al del modelo físico, para de esta forma poder mirar todos los efectos que se producen al cambiar las condiciones de apoyo del elemento (tipo de material del apoyo y configuración geométrica). Para que los modelos tanto físicos como numéricos sea comparables, existen múltiples variables que se mantienen constantes, tales como: tipo y resistencia del concreto, vibraciones externas, espesor de los apoyos (tanto en neopreno como en caucho) y geometría de los elementos; lo anterior permite ver eficientemente cuales son los cambios que se producen al modificar las características de los apoyos del modelo desarrollado, y de esta manera concluir si la utilización de un material u otro es beneficioso para el comportamiento estructural de los elementos ensayados.

1 OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar el comportamiento de láminas de caucho reciclado en modelos de vigas simplemente apoyadas, como alternativa de elemento de apoyo expuesto a vibraciones horizontales.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Construcción de modelos físicos, de vigas simplemente apoyadas, sometidas a vibraciones horizontales controladas.
- Realizar correlaciones numéricas de las propiedades físico-mecánicas tanto del neopreno como de las láminas de caucho reciclado para la modelación numérica de estos elementos incorporados al modelo de vigas simplemente apoyadas.
- Modelar mediante un software comercial de elementos finitos, tanto los elementos estructurales sin apoyos elastoméricos, como con la incorporación de las láminas de caucho reciclado y de neopreno tradicional.
- Determinar la influencia de la posición de las láminas de caucho, en el desplazamiento horizontal de los diferentes modelos físicos elaborados.
- Establecer la relación entre la utilización de diferentes elementos de apoyo tales como neopreno y láminas de caucho reciclado, y los desplazamientos horizontales de los elementos estructurales modelados física y numéricamente.

2 ALCANCES Y LIMITACIONES

Inicialmente, para establecer los parámetros bajo los cuales fueron ensayados los modelos tanto físicos como numéricos del presente trabajo de grado, se requieren mencionar algunos alcances y algunas limitaciones que se presentaron en el momento de tomar la decisión de realizar un trabajo práctico y/o investigativo, que sustente las proposiciones que se pretenden demostrar.

2.1. ALCANCE

Se pretende analizar el comportamiento de láminas de caucho reciclado como elemento de apoyo para estructuras simplemente apoyadas, mediante la elaboración y ensayos de modelos físicos con dimensiones controladas, y su extrapolación a un modelo numérico, basado en las propiedades obtenidas luego de ser ensayado en una mesa vibradora, con el fin de determinar si para este elemento y bajo las condiciones planteadas la utilización de láminas de caucho resulta factible en comparación con el comportamiento estructural de láminas de neopreno al ser utilizadas como elemento de apoyo, probando diferentes posiciones de la lámina de caucho en el elemento, con el fin de establecer cuál es la más óptima.

2.2. LIMITACIONES

- Se realizó la consulta y búsqueda de una mesa vibradora, en la cual solamente fue posible conseguir un turno en la Universidad Javeriana, la cual cuenta con una mesa de 1.0m * 1.0m. Bajo estas condiciones, la mesa vibradora presentaba la limitación de peso en la estructura a ensayar, lo cual condicionó tanto el diseño, como las dimensiones del elemento a analizar.

-
- La mesa seleccionada para llevar a cabo el ensayo contaba con un actuador de 10 ton, pero estaba condicionada a un rango de frecuencias entre 0 y 15 Hz, razón por la cual este fue el intervalo de frecuencias seleccionado para establecer el ensayo.
 - Debido a las limitaciones de peso del elemento (50kg), se establecieron medidas para el modelo de 50cm * 60cm en el tablero superior, y de 2 vigas de 10cm * 25cm colocadas para darle estabilidad al modelo.
 - Dadas estas medidas para el modelo, y debido a que debía ser un modelo construible, se optó por incorporar al elemento la cuantía mínima de acero de refuerzo, con el fin de darle un comportamiento lo más real posible.
 - Otro factor influyente en el momento de determinar las dimensiones del modelo además del peso propio que este debía tener, fue la complejidad de la extrapolación de modelos a escala real a una escala tan pequeña, puesto que podrían presentarse medidas constructivamente inviables.
 - Para la modelación tanto real como numérica del elemento estructural, se seleccionó una señal conocida como lo es la Northridge, debido a la facilidad comercial de obtenerla para realizar los ensayos.
 - Dado que el caucho reciclado es un material que es relativamente nuevo en el mercado, la consecución de las láminas y las propiedades con las que estas cuentan fue un factor determinante en el momento de escoger las que nos servirían para el ensayo, puesto que a pesar de que comercialmente estas cuentan con varios proveedores, ninguno excepto el utilizado en el presente trabajo, accedió a entregar esta información.

3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Generalmente los dispositivos elastoméricos usados como apoyos corresponden a neoprenos, cuya función principal es la de transmitir o redistribuir las cargas provenientes de la superestructura entre diferentes elementos de la infraestructura. Así mismo, presentan una alta capacidad para resistir las deformaciones ocasionadas por las cargas sobre estructuras como puentes, las diferencias entre la temperatura sobre el mismo, entre otros. La efectividad de este material resulta seguro desde el punto de vista del funcionamiento por su alto nivel de resistencia, durabilidad y por la capacidad que tiene de homogenizar los esfuerzos que mitigan posibles afectaciones de las pilas y estribos, y desde el punto de vista de la economía debido a su bajo costo.

Por otro lado, en aras de aprovechar las características de la placa de caucho de neumático reciclado y con ello, reducir el volumen en los depósitos de vertederos de este producto, que normalmente ocasionan un alto grado de contaminación ambiental, se plantea como alternativa, el posible aprovechamiento de las propiedades físicas y mecánicas del material con el fin de sustituir o reemplazar los cauchos sintéticos usados en la elaboración del neopreno. La metodología requerida para elaborar la placa de caucho de neumático reciclado, consiste en un proceso de trozado de la materia prima, imantación del material ferroso, refinación, pulverización y finalmente separación y almacenamiento del material; posteriormente se hace la combinación del polvo de caucho y aditivos, para terminar con el análisis y cálculos de peso de cada uno de los elementos anteriormente mencionados, para hacer el mezclado, prensado, vulcanización y finalmente el desarrollo de ensayos que permitan estimar las características físicas del producto.

Por lo tanto, la aplicabilidad de este material en infraestructura vial puede generar dos grandes ventajas: la primera es contribuir con la mitigación de factores de impacto climático negativo mediante la reutilización de neumáticos fuera de uso, reduciendo la contaminación

ambiental; y la segunda, es la innovación y el aporte funcional a los proyectos de construcción.

De acuerdo con lo anterior, las preguntas de investigación son: ¿Cuál es el comportamiento físico mecánico de láminas de caucho de neumático reciclado, para implementarlas como elementos de apoyo?, ¿La incorporación de láminas de caucho influye en el comportamiento de los esfuerzos internos del elemento ensayado?, ¿la posición de las láminas influye en la disminución de los desplazamientos debido a las vibraciones horizontales? y ¿Cuáles son los efectos de la implementación de láminas de caucho reciclado como dispositivos de apoyo en un modelo de viga simplemente apoyada en comparación con el neopreno?

4 JUSTIFICACIÓN

Tradicionalmente, para la construcción de puentes se ha utilizado el neopreno como material de apoyo, complementario a la estructura de estos, el cual además de ayudar a su comportamiento mecánico, se constituye como uno de los elementos vitales para su correcto funcionamiento. Sin embargo, al ser un material polimérico, su fabricación representa un fuerte impacto medioambiental que debe ser reducido, pensando en las condiciones climatológicas y el desequilibrio ambiental que se presenta en la actualidad. Por tal motivo, es necesario buscar alternativas de materiales ambientalmente amigables, que permitan garantizar la durabilidad y el funcionamiento de las estructuras utilizadas en infraestructura vial tales como los puentes, reduciendo el impacto ambiental y siendo económicamente viables para su implementación.

Con el objetivo de adelantar dichos estudios, es conveniente evidenciar y comparar las propiedades mecánicas, físicas y químicas, tanto del neopreno tradicional, como de las láminas fabricadas con material reciclado, con el fin de poder establecer similitudes y oportunidades de mejora que permitirían el uso de este tipo de material de una manera innovadora y eficaz, iniciando con una verificación previa en la implementación en modelos de vigas simplemente apoyadas y dando un punto de partida para ser ensayados en modelos de mayor escala. Para tal fin, se toman los resultados de caracterización realizados a ambos tipos de materiales dadas por sus respectivos proveedores, y se hace el análisis de su comportamiento como material de apoyo incorporado a la estructura ensayada. Estos análisis permitirán cuantificar los comportamientos estructurales en función del desplazamiento del elemento estructural ensayado, que se presentan debido a las características y propiedades de los materiales que se usen como alternativa de elemento de apoyo, las dimensiones que deban tener, su localización y su implementación en la estructura tanto de puentes existentes, como en nuevos diseños de estructuras a construir.

Para tal fin, se plantea como recurso de conocimiento, las caracterizaciones de empresas tanto nacionales como internacionales, que fabrican el neopreno tradicional, las cuales cuentan con bases de datos de resultados de ensayos caracterización realizados, contra las propiedades de las placas a usarse, las cuales serán obtenidas de resultados experimentales.

De la misma manera, gracias al estudio de estas propiedades, en futuras investigaciones será posible realizar una matriz medioambiental, en la cual se establezcan las ventajas y desventajas de la utilización de ambos materiales, con el fin de poder comparar y plantear alternativas ambientalmente amigables, que contribuyan a la preservación del medio ambiente sin afectar las características de los elementos estructurales diseñados.

Finalmente, luego de haber establecido similitudes y diferencias entre el comportamiento de ambos tipos de materiales, se buscará la incorporación de placas de llantas recicladas en vigas simplemente apoyadas, para de esta manera poder establecer de qué manera podrían trabajar mecánicamente en conjunto, para finalmente proceder a determinar si es viable su utilización.

5 MARCO TEÓRICO

En este capítulo se hará una descripción de los principales materiales usados para el desarrollo del presente proyecto; el caucho de neumático reciclado y el concreto, el primero cuenta con un gran potencial para reducir las vibraciones en modelos de vigas simplemente apoyadas tema principal y fundamental a verificar con los resultados de los ensayos a elaborar. De igual forma se tendrá en cuenta las propiedades del concreto usado para la elaboración de los modelos del ensayo y también las del caucho reciclado, se revisará el método de reciclaje, y el proceso de separación de los diferentes tipos de materiales que le componen.

El crecimiento del parque automotor a nivel nacional e internacional, acelera de manera exponencial la producción de neumáticos, y esto conlleva a un aumento en la emisión de agentes contaminantes para el medio ambiente; esta problemática radica principalmente en el poco uso que se le puede dar a este producto una vez cumple su ciclo de vida y la perturbación que genera por la ocupación de grandes espacios para su acopio; así mismo, es un elemento de incubación de insectos y genera proliferación de enfermedades y entre otros es altamente tóxico cuando es expuesto al fuego. De acuerdo a las estadísticas del Centro de Comercio Internacional, Colombia ha importado neumáticos desde el año 2011 hasta el año 2015 por un valor total de US 3.770.840. La Tabla 1 presenta los valores correspondientes a las cantidades de importación de neumáticos realizados por Colombia entre 2011 y 2015.

Tabla 1. Valor de Importaciones de Neumáticos nuevos en Colombia.

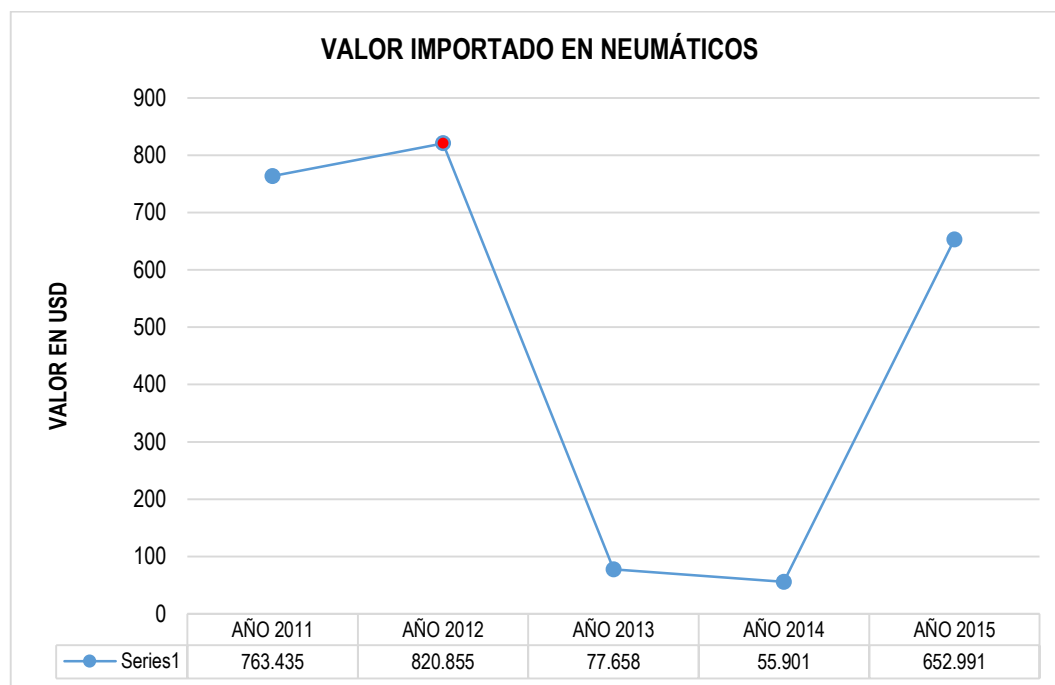
VALOR IMPORTADO EN NEUMÁTICOS (EN USD)						
AÑO	2011	2012	2013	2014	2015	TOTAL
VALOR (USD)	763.435	820.855	77.658	55.901	652.991	3.770.840

Fuente. Datos del centro de Comercio Internacional.

Nota: La tabla muestra el valor de importaciones de neumáticos nuevos en Colombia entre 2011-2015

La figura 1 muestra la relación de importaciones de neumático por año de forma descriptiva, lo que permite evidenciar que entre el año 2013 y 2014 se dieron bajas en este producto y sin embargo hacia el año 2015 las importaciones se recuperaron aproximadamente en un 80%.

Figura 1. Valor en USD importado en neumáticos por Colombia.



Fuente: Elaboración Propia.

Nota: Esta figura muestra el comportamiento a nivel económico de las importaciones de los neumáticos entre el año 2011 y 2015.

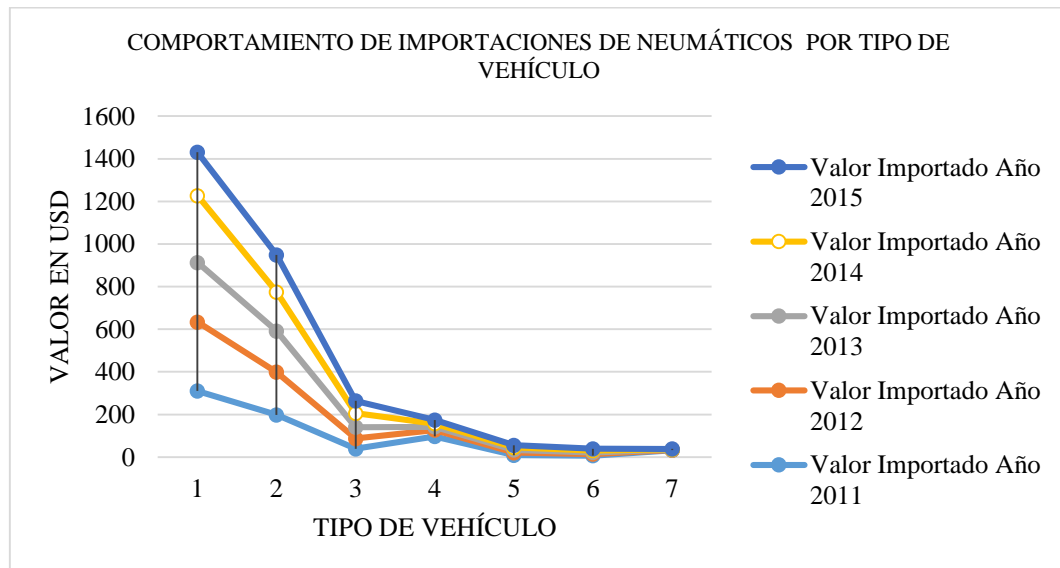
Igualmente, la Tabla 2 presenta las importaciones de neumáticos entre los años 2011 y 2015 clasificadas de acuerdo al tipo de vehículo, siendo los autobuses o camiones los de mayor valor.

Tabla 2. Lista de los productos importados por Colombia 4011 Neumáticos en USD

DESCRIPCIÓN DEL PRODUCTO	VALOR IMPORTADO				
	Año 2011	Año 2012	Año 2013	Año 2014	Año 2015
Neumáticos utilizados en autobuses o camiones.	310.557	323.089	279.235	314.004	203.959
Neumáticos utilizados en automóviles de turismo, incluido los del tipo familiar “break” o “station wagon”.	198.662	200.545	192.736	182.907	174.624
Neumáticos utilizados en motocicletas.	39.342	48.081	53.080	65.057	58.219
Neumáticos utilizados en vehículos y máquinas para la construcción o mantenimiento industrial, para llantas de diámetro > 61 cm.	96.887	29.809	15.506	15.171	17.038
Neumáticos utilizados en bicicletas.	9.400	11.658	12.611	11.749	10.615
Neumáticos utilizados en aeronaves.	7.092	7.068	7.449	9.034	8.911
Neumáticos utilizados en vehículos y máquinas agrícolas o forestales.	32.062	1.386	1.449	1.094	2.511

Fuente: Cálculos del CCI basados en estadísticas de UN COMTRADE.

Figura 2. Comportamiento de las importaciones de neumáticos por tipo de vehículo, año 2011 – 2015.



Fuente: Elaboración Propia.

La figura 2, muestra el comportamiento de las importaciones de neumático de acuerdo al tipo de vehículo por año de forma descriptiva. Como resultado de las estadísticas del Centro de Comercio Internacional la cual toma los cálculos del CCI – UN COMTRADE, Se concluye que Colombia importó un total de 748.081 toneladas de neumáticos entre los años 2011 y 2015, tal como se presenta en la Tabla 3.

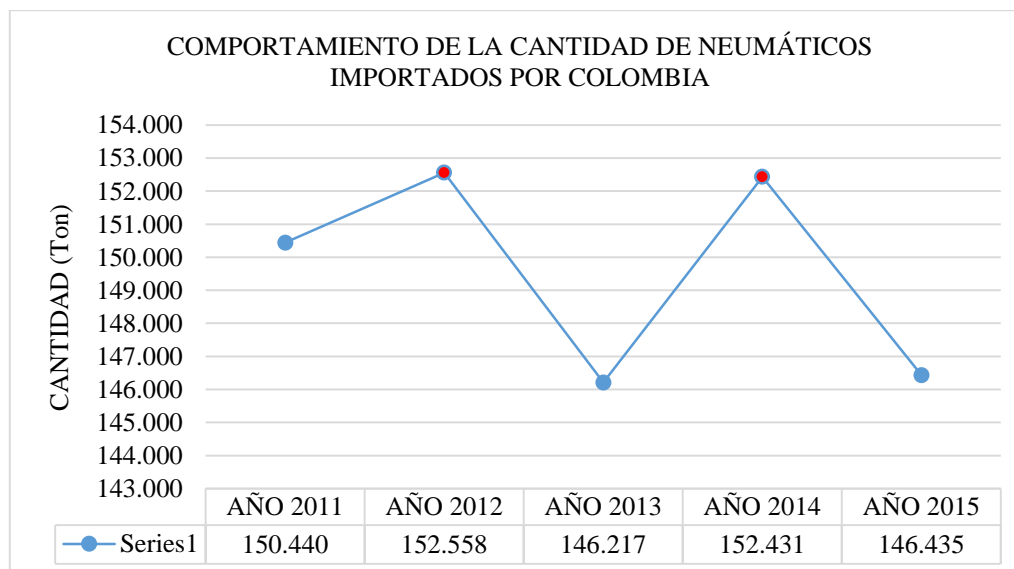
Tabla 3. Toneladas de Neumáticos importadas por Colombia.

CANTIDAD DE NEUMÁTICOS IMPORTADOS POR COLOMBIA						
AÑO	2011	2012	2013	2014	2015	TOTAL
CANTIDAD(TON)	150.440	152.558	146.217	152.431	146.435	748.081

Fuente. Datos del centro de Comercio Internacional.

La figura 3 muestra de manera descriptiva el comportamiento de las importaciones de la cantidad de toneladas de neumáticos importados por Colombia.

Figura 3. Comportamiento - Cantidad de neumáticos importados por Colombia 2011-2015.



Fuente: Elaboración propia.

En síntesis, resulta conveniente para el País contar con un plan de contingencia de tratamiento de estos elementos una vez hayan cumplido su ciclo de vida, teniendo pleno conocimiento de sus efectos negativos y positivos, pues ello determina si pueden ser materiales reutilizables en diferentes escenarios o finalmente desechados de la manera más adecuada.

5.1 COMPORTAMIENTO DE LOS MATERIALES

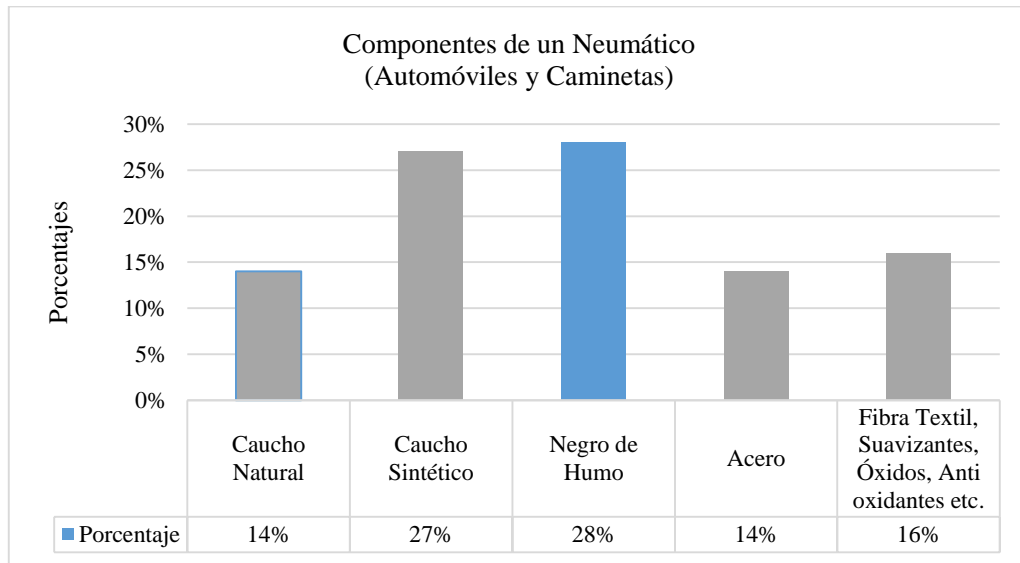
A continuación, se presenta la descripción del comportamiento de los materiales estudiados en el presente proyecto.

5.1.1 Componentes de los neumáticos

Los neumáticos son una estructura que presentan un diseño y funcionalidad a base de aire comprimido; para la fabricación de estos se utilizan entre otros componentes cauchos naturales, cauchos sintéticos, acero, textiles y aditivos tales como; negro de humo, aceites, óxido de zinc, dióxido de titanio, sulfuro, sílice, resinas fenólicas y ácidos, estos elementos le permiten cumplir su función principal que es soportar el peso del mismo vehículo y transmitir la potencia que genera el motor al suelo para poder darle movimiento a todo un sistema.

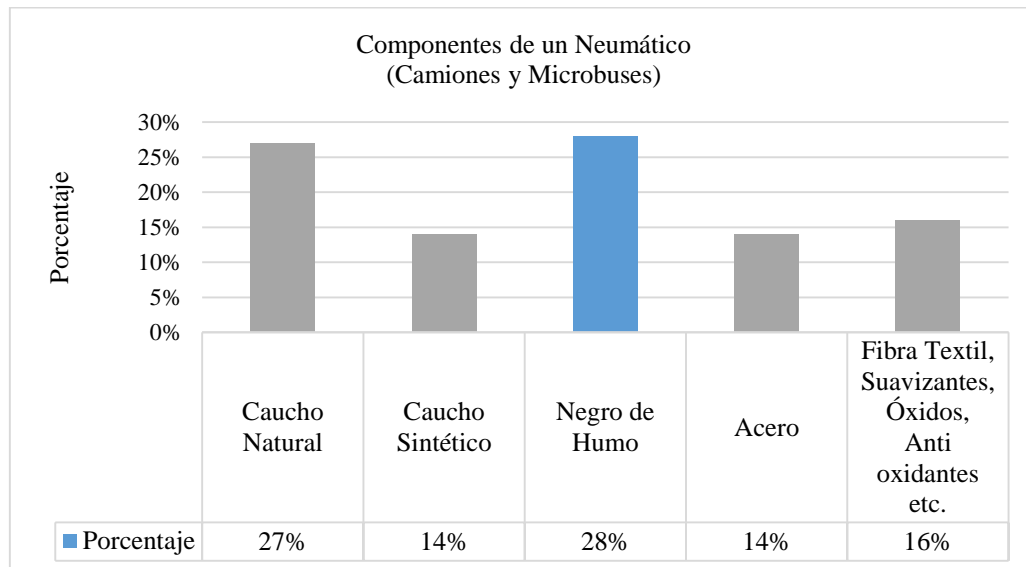
Los porcentajes de los componentes más comunes de acuerdo al tipo de vehículo, lo ha descrito la Rubber Manufacturers Association, y se muestra en las Figuras 4 y 5.

Figura 4. Componentes de neumáticos para automóviles y camionetas.



Fuente: Elaboración Propia.

Figura 5. Componentes de neumáticos para camiones y microbuses.



Fuente: Elaboración propia.

Los fabricantes en general presentan una descripción muy resumida de las características que aporta cada material al producto final, y de los principales componentes así:

5.1.1.1 *Caucho natural*

"Los indios del Amazonas descubrieron el árbol de caucho mucho antes del descubrimiento de América, lo llamaron Cahuchu o Cauchu, que significa: Madera que llora" (Charles Goodyear, New Haven, 1855).

Este material es un componente principal para la elaboración de la banda de rodamiento de los neumáticos, es un hidrocarburo de consistencia elástica extraído de algunas plantas entre ellas la más representativa el *Hevea Brasiliensis*; el proceso más efectivo para la extracción del látex es efectuar cortes oblicuos en dirección a la parte inferior de la corteza del árbol con el fin que el látex sea expulsado por la planta en forma de emulsión lechosa, este es un proceso repetitivo que hoy en día permite su recolección en grandes plantaciones para la producción de diversos elementos.

El caucho natural aporta manejabilidad, maleabilidad, resistencia mecánica y adherencia en cualquier superficie y su apariencia física es de coloración blanca en la mayoría de los casos, con alto grado de resistencia al calor. Lo anterior, indica lo importante que es asegurarse de que este elemento cumpla con condiciones como: flexibilidad debido a las múltiples deformaciones a la que es sometido y seguridad proporcionando adherencia llanta – pavimento a través del labrado y capacidad de frenado, entre otras.

a. Propiedades físicas del caucho natural

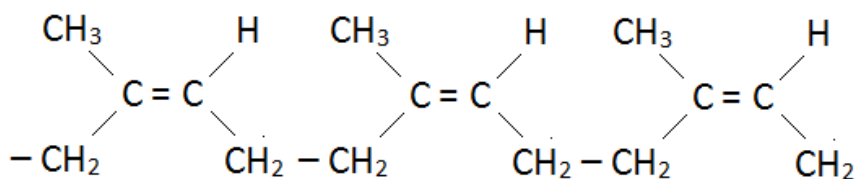
Estas propiedades son indicadores que definen el estado o transformación del caucho natural, entre otras se encuentran:

- Temperatura, el caucho presenta cambios físicos dependiendo de la variación de este factor, entre 0°C y 10°C se encuentra opaco y quebradizo, con temperaturas mayores a los 20°C toma un color blanco y se vuelve elástico y por encima de los 50°C tiende a ser plástico y pegajoso. Deformación por naturaleza plástica.
- Insoluble en agua, soluble en benceno y gasolina.
- Cuando el caucho está sometido a deformaciones repetitivas este no puede recuperar su forma original.
- La plasticidad puede modificarse dentro de ciertos límites por la acción de productos químicos.

b. Propiedades químicas del caucho natural

Zerda (1880), afirma que cuando el caucho es completamente puro, es sólido, blanco, traslúcido y menos pesado que el agua; su densidad es 0,925, pesando el agua 1.000; mantenido a una temperatura suave es flexible y elástico. (p. 3). El caucho es uno de los polímeros que se encuentra constituido por un hidrocarburo propio de la naturaleza, la Figura 6 presenta en forma gráfica la fórmula del caucho natural la cual químicamente es $(C_5H_8)_n$.

Figura 6. Estructura química del caucho natural. (Chemsketch ACD/Labs).



Fuente: <http://www.quimitube.com/polimeros-de-adicion-el-caucho-natural-y-el-caucho-sintetico>

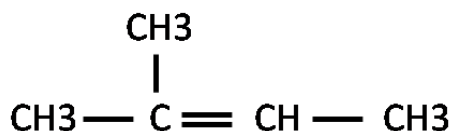
Torres, (1999) menciona en su tesis titulada “Manual para el cultivo del caucho en la Amazonia” que la composición química del látex es la siguiente:

Tabla 4. Composición del látex

Agua	52 a 70%
Hidrocarburos de caucho	27 a 40%
Prótidos	1.5 a 2.8%
Resinas	1 a 1.7%
Azúcares y quebrachitol	0.5 a 1.5%
Materias minerales	0.2 a 0.9%

Weininger y Stermitz (1988), establecen en el libro titulado “Química Orgánica”, (p.392), que el caucho natural consiste en unidades de isopreno repetidas., como se muestra en la Figura 7.

Figura 7. Representación de una unidad de isopreno.

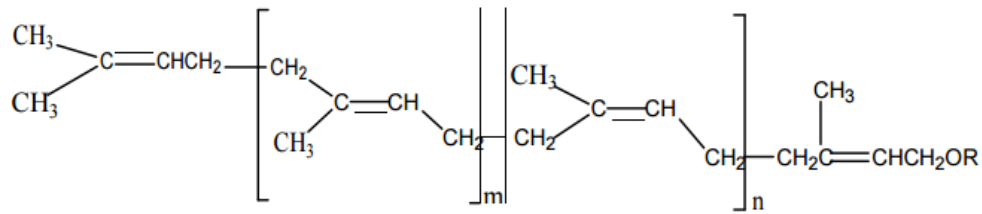


Fuente: Weininger y Stermitz 1988.

Una vez el látex se ha extraído del árbol mediante el procedimiento explicado anteriormente, se le da una forma sólida mediante el proceso de coagulación que no es más que la adicción de ácido fórmico y posteriormente es procesado.

De acuerdo a los estudios realizados por Camacho, et al (2014), a muestras coaguladas con el ácido mencionado con un contenido del mismo de 1 %, 3 % y 5 % (v/v), su contextura fue más blanda comparada con las muestras a las cuales se les aplicó ácido en un 10 %, 15 % y 20 % (v/v), pues presentaron mayor rigidez. La estructura química del Poli-isopreno se muestra en la Figura 8, siendo este un componente del caucho seco.

Figura 8. Estructura química del poli (cis-1,4-isopreno) caucho seco.



Fuente: (Camacho, et al 2014).

Teniendo en cuenta la diversidad y tipos de cauchos, la UPV (Universidad Politécnica de Valencia) dentro de su Curso de Fundamentos de Ciencia de Materiales, realizó una breve descripción de los tipos de polímeros y sus aplicaciones las cuales son presentadas en la Tabla 5, dentro de las cuales se encuentran los neumáticos.

Tabla 5. Estructura, propiedades y aplicaciones de diferentes elastómeros industriales.

Polímero	Estructura	Carga de rotura (MPa)	Alarg. (%)	Densidad (Mg/m ³)	Aplicaciones
Poliisopreno		21	800	0.93	Neumáticos
Poli butadieno		24		0.94	Neumáticos industriales, aislamiento de vibraciones
Butadieno-estireno (BS)		4-21	600-2000	1.0	Neumáticos

Fuente: Extraído de la Página web: <https://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm15>

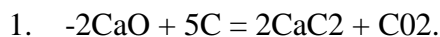
5.1.1.2 *Caucho Sintético*

Este material aporta a la mezcla de caucho resistencia a la abrasión, resistencia a la tensión y disipación de calor. Por otra parte los cauchos sintéticos han tomado fuerza en el mercado automotriz, es un elastómero con un grado de deformación elástica más alta que los cauchos naturales; este material elaborado artificialmente a partir del procesamiento de hidrocarburos, tuvo sus orígenes después de la segunda guerra mundial; y presenta características físicas y químicas similares al caucho natural, este material se clasifica de acuerdo a la función que desempeña dentro de la elaboración de los neumáticos, es usado principalmente en la elaboración de las bandas de rodamiento ya que presenta una alta resistencia al desgaste, aumenta el nivel de adherencia de las llantas y da mayor duración al neumático.

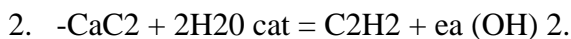
El caucho sintético, presenta un buen desempeño debido al proceso de polimerización artificial que se realiza para formar moléculas grandes mediante un catalizador; la fabricación de este material se da a partir de hidrocarburos derivados del petróleo y el porcentaje de este material puede llegar a ocupar hasta el 60% del material total para la elaboración del neumático. Entre otros se encuentran:

a. Estireno – Butadieno (SBR)

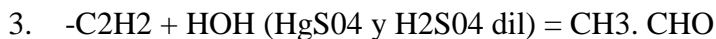
Este caucho es de origen sintético, es decir es elaborado a partir del procesamiento de hidrocarburos, su principal característica es la alta resistencia a la abrasión, tiene propiedades químicas como baja resistencia a los ácidos diluidos, baja resistencia a los aceites y muy buena resistencia al impacto. Gaviria (1945), establece en su artículo titulado “Caucho Sintético” la obtención del butadieno de la siguiente forma:



Carburo de calcio



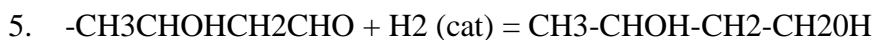
Acetileno



Acetaldehído



Aldol (Condensación)

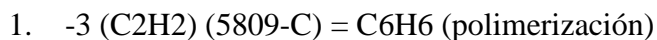


Butilenglicol

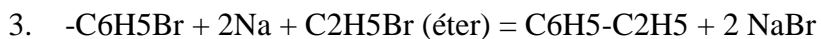
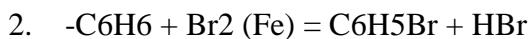


Butadieno

Igualmente, presenta la obtención del estireno de la siguiente forma:



Benceno



Etil-benceno



Estireno

Reacción final:



$(-\text{CH}_2\text{CHCHCH}_2\text{CH}_2\text{CH (C}_6\text{H}_5\text{-)})$ Butadieno estireno

Butadieno 75%. Estireno 25%. En muchas ocasiones se ha obtenido el butadieno por conversión del alcohol etílico (C₂H₅OH). Este método se conoce hace 45 años y fueron los rusos los primeros en ponerlo en uso. Otra base para la obtención del butadieno ha sido la des hidrogenación catalítica del butileno obtenido como subproducto del Cracking catalítico del aceite para producir gasolina de aviación. El Butano es también, después de tratado por el proceso de deshidrogenación, una fuente de obtención del butadieno. Gaviria (1945). La ficha técnica de la empresa Lork Industrias S.L, presenta en la Tabla 6 las propiedades del estireno.

Tabla 6. Propiedades físicas Estireno – Butadieno (SBR).

Propiedades	Unidades	Valores
Composición	Estireno Butadieno	
Color	Negro	
Peso específico	1.6 ± 0.05	gr/cm ³
Dureza	70 ± 5	SHORE A
Carga de rotura	≥ 3	MPa
Alargamiento a la rotura	≥ 250	%
Resistencia al Desgarro	12	N/mm
Temperatura mínima de servicio	-25	°C
Temperatura máxima de servicio	70	°C
Envejecimiento por aceite caliente	72h x 70°C	
Inc. Dureza	10	SHORE A
Inc. Carga de rotura	-20	%
Inc. Alargamiento	-40	&
Resistencia Química		
Ozono	Moderada	
Ácidos y Álcalis diluidos	Moderada	

Algunos de los aspectos negativos frente a su uso en los neumáticos es la baja adhesividad para consigo mismo y la baja tensión y resistencia al desgarre. Por lo anterior es muy común el uso de este material mezclado con otros cauchos.

5.1.1.3 Negro de Humo.

El negro de humo es carbón elemental, constituido principalmente por partículas con estructura gráfica. Se obtiene convirtiendo los hidrocarburos líquidos o gaseosos en carbono elemental y en hidrógeno mediante combustión parcial o por descomposición térmica. La mayor parte del negro de humo producido se obtiene mediante el procedimiento fiir-nace, que consiste en la combustión incompleta de residuos de aceites aromáticos pesados. El color negro de las llantas mostrado en la Figura 11, se debe al material negro que se encuentra presente en el carbón, el cual otorga características más resistentes a la rotura y a la abrasión, aumentando la capacidad cohesiva del material y la vida útil del mismo.

Figura 11. Apariencia del material Negro de Humo.



Fuente: Proteux Global Energy

López, et al, (2009), muestran en el artículo de “Situación actual del tratamiento de neumáticos fuera de uso y posibilidades de obtención de negro de humo de alta pureza”,

la composición del negro de humo pirolítico presentado en la Tabla 7, producido en épocas anteriores en dos plantas en España, las cuales a la fecha no se encuentran en operación, es importante apreciar que en peso el negro de humo tiene gran relevancia con un 75%, entre otros elementos que ocupan un 15%.

Tabla 7. Componentes del negro de humo pirolítico

Componente	% Peso Medio
Negro de Humo	75
Óxidos de Zinc, Hierro y Aluminio	15
Polímeros, caucho residual y S	9
SiO ₂ y otras fases minerales	1

Fuente: López, et al, 2009

Los Agentes químicos presentes en los neumáticos brindan baja resistencia al rodamiento y los cables para refuerzos metálicos y textiles, le dan la forma geométrica a la llanta y le aportan rigidez.

5.1.2 Composición del Concreto

La dosificación de concreto usado para los modelos de los puentes utilizados en las pruebas experimentales fue la requerida para obtener un concreto de resistencia 210 kg/cm² (3000 PSI), lo anterior teniendo en cuenta que la mayoría de puentes en Colombia fueron construidos entre los años 80 y 90 con concretos de esta resistencia. El acero de refuerzo usado es de una resistencia a la fluencia $F_y=420$ MPa a ASTM A-706 Grado 60.

La mezcla de concreto se puede dosificar de acuerdo a con las características requeridas en obra; uno de los materiales que componen esta mezcla es el agua, cuya función es permitir la activación de la capacidad ligante del cemento al reaccionar con el mismo y darle manejabilidad a la mezcla. La calidad del concreto depende en gran manera de que el agua

esté libre de impurezas, de aceites, espumas, materia orgánica, ácidos entre otras sustancias que puedan ser perjudiciales para esta. Por otro lado, los agregados constituyen entre un 60% y un 75% del volumen total de la mezcla de concreto, y la granulometría de este debe estar entre los límites de las curvas específicas con el fin de obtener una distribución de tamaños heterogénea, a fin de conseguir que las partículas pequeñas llenen los espacios vacíos que dejan las partículas de mayor tamaño.

Otro de los materiales es el cemento, pues cumple múltiples funciones es un agente ligante y a la vez proporciona a la mezcla la resistencia necesaria para soportar deformaciones; presenta características como granulometría fina y color gris o verdoso. Finalmente, los aditivos se usan para mejorar algunas propiedades de la mezcla de concreto como la durabilidad del concreto, reducir el contenido de agua o aumentar el tiempo de fraguado.

5.2 PROPIEDADES DEL CAUCHO RECICLADO

Una vez el neumático ha cumplido su ciclo de vida, se recicla reduciendo el producto a gránulos de caucho para darles otro uso, como lo son pisos de caucho, parques etc. Criollo Salamea (2014), realizó en su trabajo titulado “Caracterización de caucho reciclado proveniente de SCRAP y de neumáticos fuera de uso para su potencial aplicación como materia prima” ensayos con cinco probetas diferentes para los cuales suministro porcentajes diferentes de caucho de neumáticos fuera de uso, los resultados obtenidos son presentados en la Tabla 8.

Tabla 8. Resultados de ensayos de probetas con caucho de neumático fuera de uso.

Propiedad	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 4	Probeta 5
Densidad [kg/l]	1.050	1.060	1.05	1.05	1.06
Dureza [SH-A]	45.2	45.7	46.2	47.6	43.3

Propiedad	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 4	Probeta 5
Tensión [MPa]	1.4	1.3	1.4	1.3	1.4
Elongación [%]	158	145	146	139	164
MD 050 [MPa]	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
MD 100 [MPa]	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1
Rebound [%]	34.4	35.6	34.6	34.8	36.6

Fuente. Caracterización de caucho reciclado proveniente de SCRAP y de neumáticos fuera de uso para su potencial aplicación como materia prima. Cuenca. 2014. Universidad Politécnica Salesiana. Ingeniería Mecánica. (p.50)

Se puede concluir de ello que los resultados son muy similares en los ensayos realizados a las probetas. Luna Morocho (2013), en su trabajo de tesis titulado “Estudio de la aplicación potencial de compuestos obtenidos con residuos de caucho reciclado proveniente de CONTINENTAL TIRE ANDINA como materiales estructurales”, menciona el resultado de los ensayos realizados mediante comparativos de propiedades físicas del caucho nuevo de la banda de rodamiento versus el caucho reciclado de esta misma parte del neumático, que las propiedades del caucho varían de acuerdo a la parte del neumático, como se puede observar en la Tabla 9.

Tabla 9. Propiedades de la banda de rodamiento con agregado de polvo de caucho reciclado.

Propiedades físicas	Resultados caucho de banda de rodamiento	Resultados con Agregado de polvo de caucho reciclado
Esfuerzo Máximo de tracción (MPa)	16.5	16.6
Elongación (%)	423%	400%
Dureza Shore A	74	77
Prueba Lupke (23°C)	31%	30%
Prueba Lupke (70°C)	38%	37%

Propiedades físicas	Resultados caucho de banda de rodamiento	Resultados con Agregado de polvo de caucho reciclado
Abrasión DIN (mm ³)	90	101

Fuente. Luna, Patricio M. Estudio de la aplicación potencial de compuestos obtenidos con residuos de caucho reciclado proveniente de CONTINENTAL TIRE ANDINA como materiales estructurales. Cuenca. 2013. Universidad Politécnica Salesiana. Ingeniería Mecánica. (p.47), extraído del documento de Martínez, María, "Back to the tire", Tire, Año V, No. 1, 2005.

Como se puede ver en la Tabla 9, este producto presenta buenas propiedades referentes a resistencia al desgaste, dureza y deformación por compresión. La Tabla 10, presenta las propiedades del caucho de Innerliner, que refiere a la parte interna del neumático y tiene como función el almacenamiento del gas que contiene la rueda, y que permite el rodamiento normal de esta.

Tabla 10. Propiedades físicas del Caucho de Innerliner.

Propiedades físicas	Resultados Numéricos
Esfuerzo Máximo de tracción [MPa]	9.5
Elongación [%]	8
Dureza shore A	52
Permeabilidad al aire (a.m ² /Pa.s)	63.1
Pruebas Lupke (23°C)	30
Pruebas Lupke (70°C)	37

Fuente. Martínez, María, "Back to the tire", Tire, Año V, No. 1, 2005.

De acuerdo al estudio mencionado este elemento presenta un alto potencial, para ser usado como adición en los materiales estructurales, es decir las fibras de los neumáticos fuera de uso tienen un buen comportamiento que finalmente es transformado en energía.

5.3 METODOLOGÍA DE RECICLAJE PARA NEUMÁTICOS

Actualmente, se tienen diversos métodos para la recuperación del caucho de los neumáticos usados, algunos de estos contemplados en el artículo de G. J. Peláez Arroyave, S. M. Velásquez Restrepo y D. H. Giraldo Vásquez, (2017) “Aplicaciones de caucho reciclado: una revisión de la literatura,” :

5.3.1 Termólisis

Consiste en el calentamiento del neumático en un medio que no contenga oxígeno, con lo que se rompen los enlaces químicos del elemento.

5.3.2 Pirolisis

Este es un proceso que permite la transformación del caucho de llanta reciclada en elementos primarios a los que se les puede dar otro uso. El proceso inicia con la trituración del neumático y luego de ello debe someterse a temperaturas superiores a 600°C, el resultado es la generación de diferentes materiales como hidrocarburo líquido, gas y negro de humo este último se reutiliza en la elaboración de los neumáticos.

5.3.3 Incineración

Proceso que genera la combustión de los materiales orgánicos de los neumáticos, presenta serios inconvenientes medioambientales, debido a la producción de humo y gases perjudiciales para la salud humana, entre los que se encuentran el monóxido de carbono, el

hollín de xileno, óxidos de nitrógeno, plomo y zinc, benceno, fenoles, dióxidos de azufre, tolueno y el dióxido de carbono, entre otros.

5.3.4 Trituración mecánica

A pesar de que generalmente es el primer paso para los diferentes métodos de recuperación de los residuos de llantas, este produce una mejor rentabilidad debido a la calidad de los productos resultantes, y a la limpieza que presentan estos mismos. Este método, es el que se requiere ampliar debido a que es el utilizado para reducir el material y poder convertirlo en este caso en un amortiguador de impactos para las estructuras de los puentes.

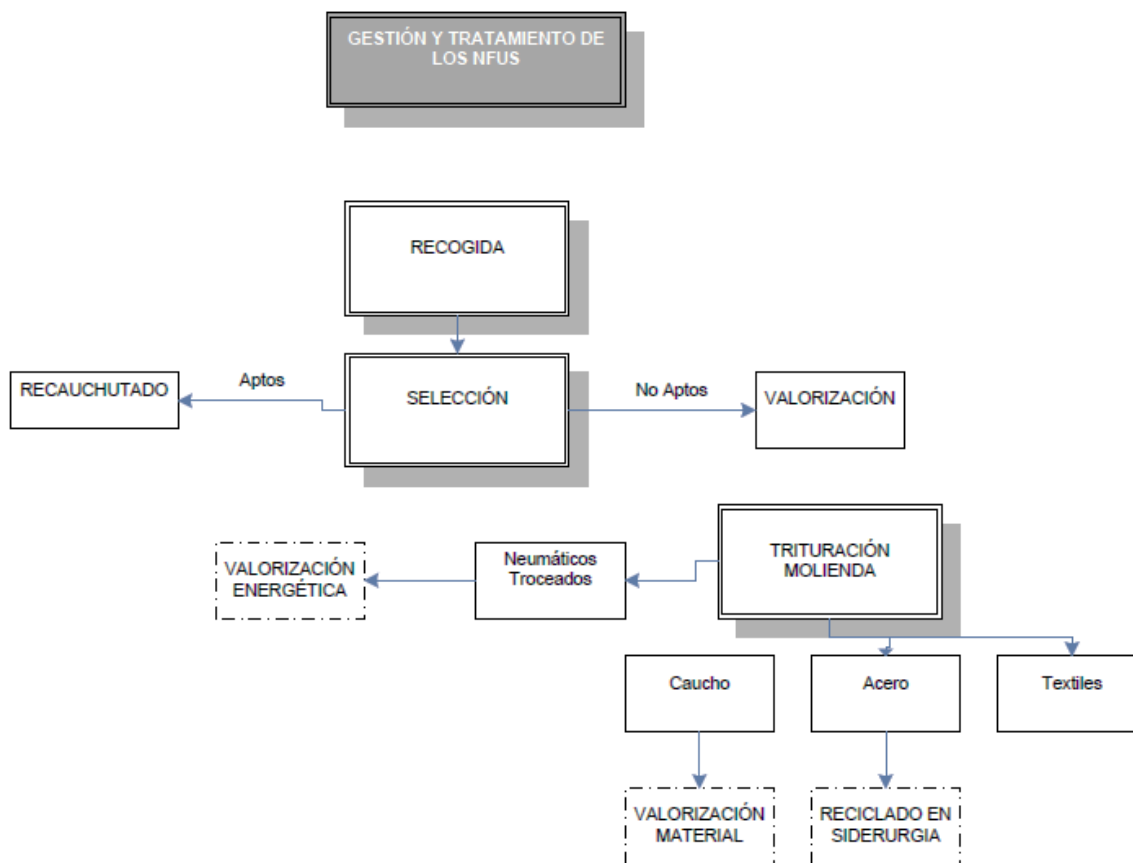
5.3.5 Trituración Criogénica

Este proceso ha definido una metodología que implica el congelamiento de las llantas con nitrógeno líquido, posterior a ello se someten las mismas a impactos con el fin de triturarlas y obtener como resultado el polvo de caucho. El resumen ejecutivo del estudio “Diagnóstico ambiental sobre el manejo actual de llantas y neumáticos usados generados por el parque automotor de Santa Fe de Bogotá” planteado por la Unión Temporal OCADE LTDA CONTROL AMBIENTAL Y DESARROLLO EMPRESARIAL, de Colombia, SANIPLAN, de Brasil y AMBIENTAL S.A., de Argentina; dando cumplimiento a lo requerido por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), presenta tres alternativas para el aprovechamiento de los residuos de llantas:

- Uso en la industria cementera o en termoeléctricas, debido a su alto potencial calorífico, lo cual permitiría utilizar este tipo de residuos como un combustible alternativo al carbón.
- Uso como materia prima para producción de pavimentos asfálticos modificados.
- Utilización como materia prima para productos de caucho.

La Figura 12, muestra el proceso de separación de los componentes de los neumáticos reciclados, o neumáticos fuera de uso, además de ello se aplica la metodología a elección de la fábrica que realiza la actividad para recuperar las partes que tienen aplicabilidad en otro elemento.

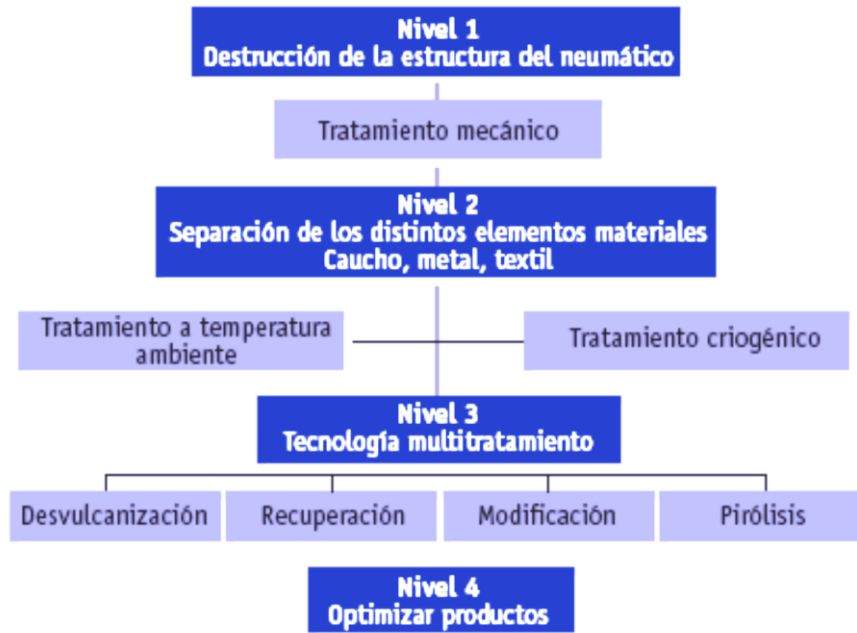
Figura 12. Proceso para separación de los componentes del neumático.



Fuente: López, et al (2009) *Situación actual del tratamiento de neumáticos fuera de uso y posibilidades de obtención de negro de humo de alta pureza.* (p.6).

Igualmente, López, et al, (2009) muestran en su artículo la clasificación de las diferentes tecnologías de reciclaje según el nivel de tratamiento. Los datos se han obtenido de la Asociación Europea de Reciclaje de Neumáticos (ETRA)⁷, del año 2003 y se muestran en la Figura 13.

Figura 13. Niveles de Tratamiento de los neumáticos fuera de uso.



Fuente: López, et al (2009) Situación actual del tratamiento de neumáticos fuera de uso y posibilidades de obtención de negro de humo de alta pureza. (p.6-7).

5.4 TIPOS DE EXCITACIÓN

Debido al crecimiento desmedido que ha tenido la tecnología en los últimos años, el poder realizar evaluaciones y juicios de estructuras, con modelaciones de las condiciones de funcionamiento normal, basados en los parámetros con los cuales fue diseñado, construido y puesto en operación, es una facilidad notoria en comparación con métodos de evaluación de estructuras desarrollados en tiempos anteriores, esto porque solamente se requiere el evaluar las condiciones reales de operación del elemento a modelar, sin necesidad de realizar ensayos destructivos para conocer las características y las condiciones principales de este tipo de estructuras. Esta ayuda adicionalmente ha permitido facilitar la medición y el análisis de los resultados que se plantean, viabilizando la consecución de la información, y la retroalimentación de la misma por expertos, permitiendo de esta manera una respuesta mucho más ágil ante los requerimientos que tienen estos, durante su operación.

Para poder llevar a cabo ensayos confiables, se debe siempre considerar cuales son los métodos que se están utilizando para modelar las condiciones del puente, cuáles son las características de los mismos, de que materiales están compuestos, cual es el entorno al que se encuentra sometido durante su fase de operación, los métodos que generan la excitación de la estructura, los mecanismos empleados para realizar las mediciones, y la manera como se llevarán a cabo los procedimientos de prueba. Algunos tipos de excitaciones que se presentan en las estructuras comprenden las siguientes:

5.4.1 Excitación por efectos ambientales

Son los efectos que se generan en la estructura del puente, debido al tráfico vehicular sobre el mismo, y a fenómenos como el viento y/o los sismos. Para realizar las mediciones de este tipo de excitación, el método más empleado es el control del tráfico vehicular sobre el mismo, debido a que no requiere que el puente este cerrado, y a que es posible monitorearlo con certeza, situación que no se tiene con fenómenos como el viento el cual es variable en cortos periodos de tiempo, ni con los sismos que aún en nuestros días resultan ser inesperados hasta para los profesionales que intentan predecirlos. De la misma manera, el generar estos controles de tráfico, resulta un método simple, debido a que se cuenta con los estándares de pesos y distribuciones con las que cuentan los vehículos, así como con las mediciones en tiempo real de las frecuencias con las que circulan por la estructura del puente. Este método es comúnmente empleado con la ayuda de vehículos normalizados, en los cuales se puede conocer las características exactas con las que cuentan, para tener certeza de lo que se está modelando. “Instituto Mexicano del Transportes., Secretaria de Comunicaciones y Transportes” (1999).

5.4.2 Excitación por desplazamiento

Consiste en aplicar una fuerza estática en el centro del puente, la cual genera un desplazamiento estático del mismo, liberándola a continuación para que la estructura evaluada recupere su punto de equilibrio, generando una oscilación al alrededor de este punto. Esta prueba, a pesar de que resulta muy eficiente debido a que es posible determinar con alta precisión el amortiguamiento de la estructura y a que es posible aplicar cargas tanto verticales como horizontales sobre la estructura del puente, es de alto costo por los mecanismos que se requieren para generar esta excitación. “Instituto Mexicano del Transportes., Secretaria de Comunicaciones y Transportes” (1999).

5.4.3 Excitación por liberación de cargas

Aplica el mismo principio que la excitación por desplazamiento, pero consiste en colocar una carga vertical que después será liberada para realizar las mediciones correspondientes.

5.4.4 Excitación por vibradores

Bajo este método se tiene el control sobre la señal de excitación. Es un método versátil, que permite realizar análisis modales, y determinar las funciones de respuesta en frecuencia. Cuenta con la desventaja de que requiere que se cierre el paso por el puente, tanto para el periodo de instrumentación, como para la medición correspondiente. Para el registro de las vibraciones en campo, se utilizan entre otros mecanismos:

- **Acelerómetros:** Mecanismos electrónicos, que luego de aplicarse una fuerza determinada sobre estos, producen una diferencia de potencial proporcional a dicha fuerza, la cual es recogida por un amplificador que produce una señal para llevar a cabo análisis posteriores. Debido a su tamaño, resultan ser manejables, y pueden ser colocados en cualquier parte de la estructura, registrando las vibraciones en las tres

direcciones. “Instituto Mexicano del Transportes., Secretaria de Comunicaciones y Transportes” (1999).

- **Galgas Extenso métricas:** Son dispositivos que miden micro deformaciones puntuales en el elemento estructural donde se colocan. “Instituto Mexicano del Transportes., Secretaria de Comunicaciones y Transportes” (1999). Además, presentan la limitación, de que solamente registran cargas muy puntuales, por lo cual no permite reflejar con certeza, cuál es el comportamiento de la estructura como conjunto ante la acción de las vibraciones.
- **Transductores de Desplazamiento:** Permiten registrar con un alto grado de precisión los desplazamientos dinámicos de la estructura. Pueden ser colocados en el sitio, pero requieren de la instalación de una plataforma inercial, la cual es virtualmente imposible de construir, o con el uso de laser que permite retirar su punto de registro de la estructura del puente.
- **Transductores de Velocidad:** Realizan la medición de las vibraciones dinámicas de la estructura, mediante el registro de la velocidad de desplazamiento del punto en el que se está realizando la medición.

Cualquiera de los mecanismos de medición y registro de vibraciones en puentes, requieren de la evaluación de varias frecuencias, expresando los resultados obtenidos en un amplio margen de vibraciones, teniendo en cuenta principios como la linealidad, la repetitividad de los ensayos, la reciprocidad de los mismos, la sensibilidad que se pueda presentar por cambios en las condiciones de pruebas que cuando se realizan en campo son constantes y casi imposibles de controlar, y se debe tener una muestra considerable de ensayos, que deberá ser representativa para registrar el comportamiento del puente. “Instituto Mexicano del Transportes., Secretaria de Comunicaciones y Transportes” (1999).

Luego de caracterizada la estructura, y de llevar a cabo algunos ensayos previos que permitan conocer el comportamiento de la estructura del puente ante la acción de carga, se debe realizar el análisis dinámico del mismo, el cual permite establecer entre otros:

- **Factores de impacto dinámico:** Es un factor que permite considerar el efecto derivado del tráfico. A pesar de que la AASHTO cuenta con una fórmula para determinarlo, esta está ligada al papel, por lo que en campo es posible determinarla, al comparar el comportamiento dinámico del puente cuando el vehículo pasa a una velocidad determinada, con los resultados obtenidos cuando este mismo vehículo cruza la estructura del puente a una velocidad muy baja. Este factor es posible determinarlo con la medida de la deflexión estática o la medida de la deflexión dinámica del puente. Estudios recientes, tal como lo muestra el “Instituto Mexicano del Transportes., Secretaria de Comunicaciones y Transportes” (1999). Posteriormente han determinado que el factor de impacto está directamente relacionado con el estado de la superficie de rodamiento de los vehículos, en la cual entre peor sea esta, mayor será el coeficiente de impacto que está afectando al puente.
- **Interacción vehículo-puente:** Garantizan el análisis dinámico de la estructura del puente, desde el punto de vista de la afectación que tienen debido a la rugosidad de la superficie de rodamiento, la velocidad y el tipo de tránsito y las características de los vehículos entre otros. Este tipo de análisis, se lleva a cabo en tres fases: experimental, analítica y de simulación.

6 ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se presentan los resultados, conclusiones, recomendaciones y hallazgos de investigaciones realizadas frente a la influencia de las vibraciones en los puentes; lo cual incluye la reducción o disipación de dichas vibraciones mediante el uso de placas de caucho de neumático reciclado. Adicionalmente, se presenta una descripción de las variables relacionadas de forma técnica y teórica que influyen y tienen relevancia en el desarrollo del presente proyecto.

Los puentes por ser estructuras que permiten la unión de elementos para conformar una sola unidad presentan alta sensibilidad a condiciones externas, por lo tanto, deben estar diseñados para soportar diferentes tipos de solicitación. Debido a lo anterior, durante su vida útil se genera cierta incertidumbre frente a su funcionamiento, razón por la cual se deben incluir ciertos aspectos relevantes en el funcionamiento de estas estructuras, la cuales han sido estudiadas por diferentes investigadores, como se presenta a continuación.

6.1 INFLUENCIA DE LAS VIBRACIONES EN LAS ESTRUCTURAS

Uno de los principales aspectos a analizar en el presente proyecto es el diseño estructural, que además de ser una disciplina propia de la ingeniería, ofrece herramientas elementales que tienen en cuenta diferentes variables que afectan las estructuras de puentes. En el caso de este proyecto, se tendrán en cuenta principalmente las vibraciones ambientales.

En el estudio Evaluación de puentes mediante el análisis de vibraciones del Instituto Mexicano del Transporte (1999), concluye: “el análisis de la respuesta dinámica de los puentes ha demostrado ser una herramienta muy poderosa para evaluar la condición estructural de este tipo de infraestructuras”, igualmente indica:

“En necesario contar con un modelo teórico numérico o experimental de referencia, con objeto de tener información de los parámetros de vibración que representan la condición ideal o sin daño y que serán los valores con los que se comparen las condiciones futuras o subsecuentes. En segundo lugar, el procedimiento experimental se debe planear con cuidado para obtener la información deseada y evitar errores de medición. Finalmente, la selección del algoritmo de interpretación, que debe estar muy ligado con el procedimiento experimental y la instrumentación, se debe seleccionar cuidando tomar en cuenta las características del puente y el potencial daño que pueda tener.” (Instituto Mexicano del Transporte 1999.p. 85). Dentro del presente proyecto, esta cita se toma como estandarte para la realización tanto de la modelación, como de la prueba experimental en el puente, buscando los métodos, software, materiales y condiciones lo más acorde posible con lo que se puede presentar en la realidad en la estructura de los puentes analizados.

Por otra parte, García, et al. (2002), de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, A.C, realizaron una serie de ensayos y posteriormente sintetizaron el análisis de los resultados obtenidos en el trabajo titulado Modelo Estructural y Medición De Vibraciones Dinámicas Del Puente “Fernando Espinosa”, en el cual describen la metodología empleada y los instrumentos utilizados en su desarrollo. Una vez obtuvieron una descripción previa de la estructura en estudio, implementaron su instrumentación con tres tipos de equipos de medición sísmica distribuidos en tres puntos del puente, lo que les permitió que los datos se obtuvieran de manera independiente y de acuerdo a los movimientos de vibración en las direcciones del plano X, Y y Z.

Después de una serie de modelaciones estimaron que la metodología experimental debía corresponder al registro de las señales emitidas por la estructura una vez esta se sometiera a excitaciones constantes; para ello tuvieron en cuenta aspectos como: “algoritmos y herramientas de análisis de señales que permitan la identificación de los parámetros estructurales de interés” (p.852), y establecieron los elementos generadores de vibración e identificaron las características principales de ellos. Conocidos los resultados de las

vibraciones, se pudo concluir que, el puente experimenta dos modos fundamentales en flexión vertical, con frecuencias de 0.98 y 1.61 Hz. En sentido transversal, se presentan modos en flexión de 0.68 y 1.56 Hz. La torsión se presenta en un modo superior en 2.98 Hz. (García, 2002, p. 855-856). Igualmente, afirma que “se presentan espectros de Fourier representativos que ilustran los valores de las frecuencias asociadas a los modos en flexión y sus respectivas coherencias”.

Así mismo, J. Valdez, J. De La Colina. (2008), en su trabajo titulado “Análisis de la Ampliación Dinámica de la Carga Viva en Puentes con Base en Pruebas Experimentales” presentaron los resultados obtenidos de los ensayos experimentales en puentes vehiculares expuestos a una carga viva manejado de manera controlada y vibración ambiental, los cuales presentaban variables de estructuración, geometría y materiales diferentes. Los autores centraron la investigación en la amplificación dinámica de la respuesta a flexión en las travesaños de los puentes. De esta forma, explican la incidencia que tiene cada una de las variables analizadas en el desarrollo de las pruebas realizadas y la amplitud de la vibración en relación a las cargas y el impacto de los vehículos, situación latente en función de las propiedades de los materiales con que se construyó el puente, diseño y geometría del mismo, elementos externos propios del vehículo como velocidad, peso, sistema de amortiguamiento, etc. Los autores concluyeron que bajo la exposición de que la condición de ampliación dinámica de una carga viva y de la estructura como tal, podrían tener una solución de mayor impacto si se pudiera realizar la modelación de un sistema que permita homogenizar o igualar las dos frecuencias bajo circunstancias reales.

En el año 2010 Gómez, et al, trabajaron en el proyecto de investigación “Pruebas de Vibración Ambiental en Puentes”, sobre la premisa de la identificación de las propiedades iniciales de los elementos estructurales con el fin de hallar aspectos de correlación que fuesen ligados a la identificación de los daños causados por agentes externos. Además de ello exponen que se debe tener en cuenta que las pruebas están totalmente ligadas tanto al tipo de sensor con el cual se realizan las mediciones In Situ, como a la cantidad de los mismos y la distribución frente al posicionamiento en la estructura. El análisis de vibraciones ambientales

tiene en cuenta variables como “aceleración, velocidad y desplazamiento”, tanto para las modelaciones de elementos finitos como partida, como para la evaluación de las frecuencias leídas en campo, razón por la cual solo se consideran los picos más representativos que influyen en la gráfica de dispersión generando mayores momentos de sensibilidad en la calibración del espectro. La variedad de metodologías que se pueden aplicar en el análisis de los datos procesados bajo condiciones reales de vibraciones ambientales, permiten finalmente manejar un umbral mayor de seguimiento y control en la línea de tiempo de servicio u operación de la estructura.

Posteriormente, Vélez, Wilber., y Riveros, Carlos., (2011), presentan el artículo “Caracterización dinámica en condiciones de excitación natural de puentes de concreto reforzado”, mediante el cual exponen la situación real de un puente debido a los daños en función del tiempo de operación; inicialmente realizaron la modelación de elementos finitos en SAP2000 para realizar la calibración; a partir de esto evidenciaron las densidades espectrales bajo ciertas condiciones de circulación de vehículos, teniendo en cuenta el código Colombiano de puentes (CCDSP-95), además de estas características también se tienen en cuenta variables como velocidad del vehículo y de factor de amortiguamiento. En consecuencia, la estructura presenta mayores niveles de frecuencia cuando hay un tránsito constante de vehículos puesto que las ondas propagadas en los elementos del puente generan mayores deformaciones.

Paralelamente, Vacca G., Hermes et al. (2011), mencionan en estudios realizados de las vibraciones, que estas se pueden generar por el tráfico de vehículos en las estructuras viales y en las aledañas al mismo, y se incluyó la elaboración de mediciones para registrar las vibraciones generadas por el tren de la sabana, Transmilenio (buses articulados) y de servicio público principalmente. Lo que permitió determinar curvas de atenuación tanto en aceleración como en velocidad.

Navarro y Ureña (2014), a partir de ensayos de mediciones del puente Virilla, Ruta Nacional No. 1 en Costa Rica, concluyeron que las frecuencias de vibración en su escala

natural fueron obtenidas partiendo de la evolución tiempo - circulación vehicular, lo cual se vio reflejado en los resultados con un aumento de las aceleraciones en el mismo instante en las diferentes direcciones del puente siendo ello algo anormal. Igualmente, interpretaron que los valores de las frecuencias obtenidas In Situ presentan algunas diferencias porcentuales con las analizadas en el modelo estructural teórico, toda vez que en este último no se evidencian los estados de rigidez de la estructura de una forma real, puesto que estos modelos por lo general usan formulismos de relaciones matemáticas cuyas variables no son totalmente exactas generando unos módulos de rigidez mayores en la estructura.

Finalmente, la Empresa Colombiana INGETEC – Ingenieros Consultores, Consuegra, F. (2015) realizó investigaciones en las cuales efectuó un análisis de vibraciones en diferentes puentes, como un instrumento para estudiar las alternativas posibles de reforzamiento estructural. Estas mediciones se realizaron a través de la instalación de sensores a ambos costados del puente. Los datos obtenidos experimentalmente sirvieron de base para calibrar los modelos de los puentes elaborados en SAP2000. Con lo anterior logro demostrar como el realizar un modelamiento correcto, con base en los datos obtenidos en los registros existentes de los puentes y los datos obtenidos experimentalmente sirvió para presentar una alternativa de reforzamiento y de disipación de vibraciones.

6.2 ENSAYOS Y MEDICIONES DINÁMICAS

Uno de los métodos más precisos para conocer el estado real de los puentes vehiculares teniendo en cuenta que estos se encuentran expuestos a cargas repetitivas durante su periodo de operación, causal de reducción en su vida útil, es la elaboración de ensayos los cuales permiten tomar medidas de prevención y corrección. Estos ensayos, están sujetos con dificultad a la obtención de la información de diseño y método constructivo del puente, documentos que por lo general reposan en los anaqueles de los constructores o diseñadores, y que es de difícil acceso, por lo que se requiere que en muchos de estos casos de verificación se deban desarrollar ensayos destructivos, que permitan conocer a fondo las características actuales de estas estructuras. Llegar a estas instancias se podría evitar si se implementará un

sistema de monitoreo constante, en el que sea posible determinar por comparaciones y por las características de su funcionamiento el comportamiento de la estructura como tal. Además de lo anterior, se debe tener en cuenta aspectos importantes que influyen en la afectación de los elementos estructurales de los puentes cuando son sometidos a tensiones o sobre esfuerzos, generando momentos de fatiga que ocasionan fractura en los elementos.

Dentro de este marco, García, et al (2002) presenta los resultados producto del estudio del análisis modal de la estructura del puente “Fernando Espinosa”, en el cual describe la instrumentación empleada, la metodología y el programa de mediciones, además del análisis y procesamiento de la información llevado a cabo con el fin de calcular las propiedades dinámicas básicas del sistema estructural, tales como frecuencias naturales de vibración, formas modales y amortiguamiento. Adicionalmente, se discute la formulación y calibración del modelo estructural con base en los datos obtenidos experimentales en campo. Los resultados de las mediciones dinámicas se usaron para calibrar los modelos de elementos finitos realizados. Estos modelos sirvieron para conocer el detalle del estado estructural del puente y posterior comparación con los resultados logrados del mismo modelo, pero sujeto a acciones diferentes o para representar cualquier tipo de daño. Este mismo modelo les sirvió para determinar respuestas que comparadas con las obtenidas de campañas de medición futura permitieran evaluar la evolución de daño ya existente y la detección del que podría aparecer después. Lo realizado demuestra el potencial de estas técnicas y herramientas como apoyo a los programas de mantenimiento y conservación de puentes.

Como lo menciona D. De León (2005), uno de los parámetros principales en la ingeniería y en el análisis de las estructuras, es el estado límite que suele determinarse en función del balance entre los conceptos de costo-beneficio. Este concepto, está ligado directamente a la probabilidad de exceder una capacidad crítica, la cual puede compararse con los patrones de carga de las estructuras y de esta manera inferir si requieren trabajos de modificación estructural para mitigar un riesgo.

De León, David & Valdés, Jesús (2007), realizaron un estudio que le otorga un rumbo a la problemática expuesta en este proyecto de grado, junto con la solución que se puede plantear para mitigar la afectación de las estructuras de los puentes, debido a una posible solución con costos muy bajos en comparación con un mantenimiento correctivo, que permitiera garantizar y prolongar la vida útil de este tipo de estructuras.

Así mismo, Crespo Saúl et al (2014), plantean en su investigación el análisis de los efectos transversales y longitudinales en puentes debidos a cargas vivas vehiculares en diferentes configuraciones y modelos de carga, poniendo a prueba dos métodos de repartición transversal; por un lado el criterio de Courbon, ampliamente usado por diseñadores de puentes y, por otro lado, el criterio de Morice and Little; la eficacia en la repartición transversal de estos criterios, es analizada a través de modelos de elementos finitos de referencia de dos superestructuras de puentes distintos: una de concreto reforzado y la otra de vigas AASHTO tipo IV. En general, encontraron que el método aproximado de Courbon, popular en el diseño de puentes en México, genera factores de reparto transversal de carga que sobrestimen el efecto respecto a modelos de elementos finitos de superestructuras (concreto reforzado y pre esforzado del tipo losa-viga) hasta en un 50%, lo que produce diseños más robustos y costosos. Por último, se sujetan a prueba las configuraciones y modelos de carga estudiados en términos de los estados límites de servicio, considerando como parámetro de comparación la deflexión máxima generada por estas.

Por otro lado, Consuegra, F. (2015) menciona que luego de construidas las estructuras de desarrollo económico como lo son los puentes vehiculares, se requiere estar en constante chequeo de su evaluación estructural para implementar mantenimientos correctivos y preventivos, establecer la técnica de reforzamiento que se requerirá emplear o reemplazar la estructura. Durante la realización de estos estudios se requiere en ocasiones realizar ensayos destructivos que permitan determinar las condiciones reales en las que se encuentra el puente. Es por ello que se propone un análisis basado en un monitoreo dinámico no destructivo y visita de campo para poder hacer un modelo, con el fin de poder calibrarlo y obtener resultados lo más cercano posibles a la realidad de la estructura.

6.3 SISTEMAS DE CONTROL DE VIBRACIONES

Existen diversos sistemas de control de vibraciones que permiten reducir la energía dispersa en la estructura cuando está expuesta a impactos de carga viva o cargas sísmicas controlando de esta manera las ondas longitudinales que se transportan a través de los elementos, con aisladores elaborados a base de goma entre otros materiales; de los sistemas más implementados son los aisladores pasivos los cuales tienen un impacto positivo económica y técnicamente.

Avilés, Raúl (2001), menciona en su trabajo de "Dispositivos para el control de vibraciones", el estudio Chileno en Materia de Control de Vibraciones, bajo el cual se "diseñaron y ensayaron los aisladores que se utilizaron en el puente Marga-Marga de Viña del Mar y en la línea No. 5 del metro de Santiago", en particular el material usado para el sistema de aislamiento se basó en una goma con características físicas y geométricas específicas usada como aislador, e instalado entre las vigas, los estribos y las cepas del puente.

Por otro lado, Jara, M. & Casas, J. (2002), realiza en su proyecto de "Control de vibraciones en puentes: un estado del arte y de la práctica", una breve descripción de los parámetros correlacionales que permiten aplicar infinidad de sistemas de control en puentes, todo esto con el fin de tener una configuración estructural con un alto grado de seguridad, funcionalidad y un manejo eficiente del entorno, igualmente establece el cumplimiento de las normas generales AASHTO entre otras. La rigidez constituye un parámetro fundamental en el análisis y desarrollo experimental de las causas y efectos de las vibraciones, pues traduce la relación fuerza-desplazamiento.

La tesis de maestría de Pita, M. Carlos (2010), titulada "Refuerzo de estructuras de puentes a través de dispositivos de control de vibraciones", considera "el estudio de la eficiencia de

los dispositivos de masa pasivos (sin energía externa) para el control efectivo de vibraciones en distintos tipos de estructuras de puentes sometidos a acciones sísmicas” (p.1). Este estudio reflexiona sobre el uso de diversos tipos de amortiguadores; la aplicabilidad de cada uno de estos se encuentra en función del tipo de material propio del puente, algunos de los elementos cumplen con su función de mitigar las vibraciones traducidas en ondas, bajo la oposición al desarrollo de deformaciones inelásticas por los posibles desplazamientos generados.

Por otro lado, Zellat, Kaoutar, y Kadri, Tahar. (2015), desarrollaron ensayos de manera experimental y expusieron en su trabajo titulado “Influence of seismic isolation system on bridge responses”, un manejo integral de la ecuación de movimiento en términos de energía, lo que les permitió concluir la efectividad de este mecanismo en las direcciones longitudinales del puente. Así mismo, la modelación del puente fue desarrollada implementando un modelo discreto y considerando la amortiguación en el tablero y las pilas bajo todos los modos de vibración, tanto en sentido longitudinal y transversal. La combinación de soluciones técnicas y la adecuada operación de estructuras en este caso puentes, genera un impacto ambientalmente sostenible, e influye de manera positiva como factor relevante; si se trata de incidir en el crecimiento económico y social de todo un país, siendo, así las cosas, las acciones fundamentales para mitigar el calentamiento global que actualmente azota a la población mundial, juegan un papel primordial en la mitigación de materiales contaminantes.

Es así como, Castro G. (2007) en su estudio realizado sobre las llantas recicladas de los vehículos, plantea que la masiva fabricación de neumáticos genera grandes dificultades para eliminarlos, lo que conlleva a la búsqueda de alternativas para mitigar la afectación de agentes contaminantes, y constituyen uno de los más graves problemas medioambientales de los últimos años en todo el mundo. Un neumático necesita grandes cantidades de energía para ser fabricado (medio barril de petróleo crudo para fabricar un neumático de camión) y esto provoca, contaminación ambiental al formar parte, generalmente de vertederos incontrolados. Adicionalmente, indica que existen métodos para conseguir un reciclado coherente de estos productos, pero faltan políticas que favorezcan la recolección y la

implantación de industrias dedicadas a la tarea de recuperar o eliminar, de forma limpia, los componentes peligrosos de los neumáticos de los diferentes vehículos. Finalmente, concluye que todo este material reciclado debería ser reutilizado y utilizado en productos para ingeniería.

C. Albano, et at. (2008), buscaron alternativas para reducir el impacto ambiental generado por los neumáticos una vez quedan fuera de uso y establecieron en su trabajo titulado “Estudio de concreto elaborado con caucho de reciclado de diferentes tamaños de partículas”, que mediante la elaboración de ensayos es posible analizar si el comportamiento de este componente en la estructura de pavimento bajo la adición de material de caucho de diferente granulometría, influye de manera positiva o negativa a su funcionamiento. Y posteriormente realizaron los diseños de las mezclas teniendo en cuenta dosificación y tamaño, lo que les permitió tener resultados de módulos de elasticidad, la impedancia acústica y la velocidad de pulso ultrasónico. En síntesis, establecieron como parámetro base, que una modificación del 5% de peso de caucho en la mezcla de concreto, ofrecía un comportamiento parecido al de las mezclas normales, igualmente detectaron que estas partículas trabajan como los agregados pétreos, pues influyen en el porcentaje de espacios vacíos y la porosidad de la mezcla.

López F.A., et at. (2009), realizan una síntesis de los neumáticos fuera de uso en España; una vez la contaminación del medio ambiente advierte de los daños irreversibles que se le están causando con el manejo desmedido en tiempos pasados de este tipo de residuos, el gobierno implementó medidas de disposición de estos elementos tóxicos con el fin de reducir la contaminación. Esta investigación está direccionada a la búsqueda de alternativas de implementación de este material en nuevos destinos. Finalmente, mediante la separación de los elementos de los neumáticos y la molienda del caucho, concluyeron que se puede obtener negro de humo y reducir las emisiones de dióxido de carbono en las industrias siderúrgicas, constituyéndose un aporte significativo para mejorar los niveles de contaminación del medio ambiente.

Sánchez, J. (2011), expone la problemática de manera clara frente a la inadecuada disposición final de los neumáticos, pues son elementos diseñados para tener larga durabilidad frente al clima y otros factores, más no para resistir largos periodos de uso; la vida útil de este elemento está en función del tipo de pavimento y de la carga del vehículo. Como solución a la proliferación de insectos, contaminación visual y al riesgo de incendio por ser los neumáticos materiales altamente combustible, la ingeniería ha implementado nuevas técnicas para ser empleadas en diferentes medios, siendo una alternativa de solución el estudio de uso como aislante de vibraciones, agregado como componente de mezclas asfálticas para la conformación de la estructura de las vías, pisos para industrias, pequeños accesorios etc. Igualmente refiere a que los neumáticos están compuestos de diferentes materiales, lo que permite realizar la separación de los mismos y triturarlo de acuerdo a lo requerido, por lo cual concluye que si es posible el manejo de una “segunda vida para estos residuos”. Así mismo, Luna M., Patricio (2013), en su Tesis estudió diversas formas de reutilización, y elaboró pruebas de ensayo que demuestran la factibilidad de la aplicación del neumático reciclado como agregado de material estructural. En primera instancia realizó una recopilación de todas las maneras existentes de reducción del caucho con fibras de distintos tamaños, además, de todas las formas de aplicación que se le dan a este material reprocesado en la actualidad. Adicionalmente, a esto desarrollo pruebas en la goma para estudiar su comportamiento como material térmico y acústico. Todos los ensayos fueron realizados bajo las normas que aplican respectivamente a cada prueba, razón por la cual son considerados como confiables.

Para finalizar, el Departamento Técnico Administrativo del Medio Ambiente de la ciudad de Bogotá en su documento “Diagnóstico ambiental sobre el manejo actual de llantas y neumáticos usados generados por el parque automotor de Santa Fe de Bogotá”, establece diferentes escenarios para la reutilización del caucho de las llantas recicladas, y plantea el estudio en cuatro alternativas: Aprovechamiento energético para plantas cementeras, aprovechamiento energético para calderas de termoeléctricas, materia prima para producción de pavimento asfáltico y trituración para generar materias primas de caucho. Desafortunadamente, por el estado actual del mercado, y los costos que implicarían los estudios y los procesos a desarrollar para su implementación como fuente de energía, se llegó

a la conclusión que no es viable. Como anexo se incluyen los datos del estudio, representado en la tabla de las ventajas y desventajas de las alternativas de uso de caucho de neumático reciclado en algunos escenarios. Posteriormente, se plantea un estudio financiero para la utilización del caucho como materia prima para la producción de concreto asfáltico, y para otros elementos, en el cual se establecen tres escenarios de producción, diferenciados por el tipo de material que se produciría, y el destino inmediato del mismo.

Se plantea un primer escenario, con una planta de producción de caucho de neumático pulverizado con granulometría de la malla 40, con destino al mercado de exportación y un empresario como operador del total de la unidad productiva, un segundo escenario, el cual plantea una planta de producción, donde el producto final será 50% caucho con granulometría que pasa la malla 40 con destino al mercado de exportación, y 50% granulometría de la malla 80 para ser utilizado en pavimento asfáltico, y un tercer escenario de una planta de producción de caucho de llanta pulverizada granulometría de malla 40 con destino al mercado de exportación, con una zona de acopio operada por el fabricante de las llantas, y una molienda operada por un empresario. Según el estudio realizado y proyectado, fue posible establecer que lo más rentable es que el productor asuma el costo de la captación y almacenamiento de la materia prima, y que el empresario se encargue de la molienda. El estudio concluye que es indispensable y necesario el impulso de una normatividad que permita legalizar el aprovechamiento de este residuo en otros procesos de la cadena de producción que involucre tanto a productores como usuarios, con el fin de disminuir el impacto ambiental que este residuo genera y garantizar su reutilización en alternativas como su mezcla con el pavimento asfáltico, las cuales además de mitigar los impactos negativos sobre el medio ambiente, constituyen una mejora en la calidad de vida de las personas que utilizan esta infraestructura.

7 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En este Capítulo se describe el procedimiento seguido en las pruebas experimentales que se llevaron a cabo en obra y en los Laboratorios de estructuras de la Pontificia Universidad Javeriana. Las pruebas fueron realizadas en los tres modelos físicos de vigas simplemente apoyadas construidas en concreto, dos de los modelos tenían las placas de llanta reciclada incorporadas en diferentes posiciones de los elementos estructurales y el otro estaba en su condición original sin placas. Igualmente, se describe las limitaciones propias de las condiciones del entorno.

Los resultados obtenidos en estas pruebas experimentales no suministran el nivel de amortiguamiento adicional que incorporan las placas a la estructura. Este nivel de amortiguamiento es incorporado en los modelos que se elaboran en el software SAP2000, para realizar el análisis de vibración de la estructura.

7.1 FASES DE EJECUCIÓN DEL PROYECTO

La fase experimental contempla las siguientes etapas:

7.1.1 Etapa 1: Construcción de los modelos físicos

La presente etapa describe el proceso para la elaboración de los modelos. Inicialmente se definieron parámetros como geometría y dimensiones de una viga simplemente apoyada, según las limitaciones dadas por la mesa vibradora de la siguiente manera:

- Dos vigas de 10 cm de ancho, y 25 cm de altura.
- Tablero de 5 cm de espesor.
- La viga simplemente apoyada presenta dimensiones, así: 60 cm de largo y 50 cm de ancho.
- Se realizó el diseño de la mezcla de concreto para obtener una resistencia a la compresión de 21MPa (3000 psi).

Para realizar el ensayo se implementó el diseño de mezcla que se presenta en la Tabla 11 para obtener un concreto de 21 MPa, con una dosificación de grava de 1 ½” de diámetro de acuerdo con la norma. Este concreto presenta un asentamiento de 5”, el cual es adecuado para fundir elementos con estas características.

Tabla 11. Diseño de mezcla para un concreto de 21 MPa.

Diseño SSS										
Tipo:	28d 25,0 6 CMN F Tuset									
(kgf/cm ²)	105	140	175	210	245	280	315	350	385	420
(psi)	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000	5500	6000
Cemento	210	230	250	270	290	310	330	350	370	400
Ceniza	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Agua	164	164	164	164	164	164	164	164	164	164
Grava No. 56 (25 mm)	642	636	631	625	620	614	609	603	598	589
Gravilla No. 7 (12,5 mm)	321	318	316	313	310	307	304	302	299	295
Arena Gruesa	979	971	962	953	944	936	927	918	909	896
Arena Media	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Polyheed 750 (D)										
Litros Glenium C355 Pluss (F)	1,19	1,30	1,42	1,53	1,64	1,76	1,87	1,98	2,09	2,26
Pozzolith 122HE (C)										

Fuente: Elaboración Propia

Los modelos cuentan con refuerzo longitudinal y transversal con las siguientes especificaciones técnicas:

- Acero de refuerzo $f_y = 420$ MPa, ASTM A-706 Grado 60, una en la parte superior y la otra en la inferior de las dos viguetas que conforman la estructura.
- Malla electrosoldada de 8 mm espaciada cada 20 cm, la cual es instalada en la placa.

La Fotografía 1 presenta la configuración del refuerzo.

Fotografía 1. Refuerzo Estructural para los modelos.



Fuente: Autores.

Posteriormente, con base en las dimensiones establecidas, se procedió a la fabricación de la formaleta requerida para realizar la fundición. Para la construcción de la formaleta se usó madera tipo trípex de diferente espesor, con lo cual se reducen las imperfecciones en la superficie, evento que tenía alta probabilidad de ocurrencia por el tamaño del modelo. Una vez lista la formaleta, se procedió a introducir la parrilla dentro de la misma garantizando que esta no tuviera contacto por ninguno de sus lados, adicional, a ello se colocaron distanciadores en su parte inferior. La Fotografía 2, muestra la mezcla de concreto con la cual se fundieron los modelos, para el desarrollo del presente proyecto.

Fotografía 2. Mezcla de concreto de 21 MPa, para los modelos.



Fuente: Autores.

A la mezcla de concreto se le realizó la prueba de Slump o Cono de Abrams, tal como se observa en la Fotografía 3. Los resultados de esta prueba cumplieron con los requerimientos de la norma NTC 396 (Asentamiento del concreto) con un valor de 5.5” de asentamiento.

Fotografía 3. Prueba de Slump a la mezcla de concreto.



Fuente: Autores.

De igual forma, se tomó el registro de la temperatura de la mezcla, conforme con la temperatura ambiente, la cual al momento de la fundición no debía exceder de los 32°C. Los resultados de temperatura registrados de la mezcla fueron de 22°C, como se observa en la Fotografía 4.

Fotografía 4. Toma de temperatura de la mezcla de concreto.



Fuente: Autores.

Una vez surtidos los ensayos de calidad se dio inicio a la fundida del elemento, golpeando las paredes de la formaleta con el fin de evitar la segregación del concreto y cumplir con uno de los requerimientos del presente trabajo, el cual es el de tener un elemento homogéneo, ver Fotografía 5. Posteriormente, se procedió a afinar la base del elemento para darle el acabado deseado, y se dejó fraguar por un lapso de 8 horas.

Fotografía 5. Fundición de los modelos para realizar ensayos.



Fuente: Autores.

Se tomó un muestreo de la mezcla para los cilindros, como se puede ver en la Fotografía 6, las cuales se enviaron a laboratorio para ensayo de 3, 7, 14, 28 y 56 días. Estas fueron preparadas bajo la Norma Técnica Colombiana NTC 673, falladas en una prensa avalada por el Organismo Nacional de Acreditación de Colombia - ONAC.

Fotografía 6. Cilindros de concreto para los ensayos.



Fuente: Autores.

Los especímenes se mantienen en una zona húmeda para garantizar el curado y así el concreto alcance la resistencia de manera adecuada (se anexan resultados de ensayo de resistencia). La Fotografía 7 presenta uno de los modelos físicos ya construido.

Fotografía 7. Puente Modelo físico final.



Fuente: Autores.

7.1.2 Etapa 2: Instalación de las placas de llanta reciclada en los modelos

Uno de los elementos fundamentales en el desarrollo del presente trabajo es el caucho, por lo cual la caracterización de éste de este es elemental y necesaria, para emplearlo en el ensayo, de acuerdo con la información suministrada por la empresa GICOMER S.A.S. La Tabla 12 presenta las características de las placas de llanta reciclada elaboradas por ellos, por lo tanto, se anexan los resultados de los ensayos desarrollados en los Laboratorio de Ingeniería Mecánica en la Universidad de los Andes.

Tabla 12. Características de la placa de llanta reciclada.

Descripción	Valor
Espesor Promedio:	5,778
Densidad Promedio a 23°C (g/cm ³):	1,0907
Dureza Shore A:	68,10
Esfuerzo Máximo, $\sigma_{\text{máx}}$ [MPa]:	2,510
Esfuerzo a Ruptura, σ_{rup} [MPa]:	2,363
Elongación a Ruptura, Δ_{rup} [%]:	69,487
Módulo de Elasticidad, E [MPa] :	8,302
Carga de Ruptura , P_{rup} [kN]:	0,106

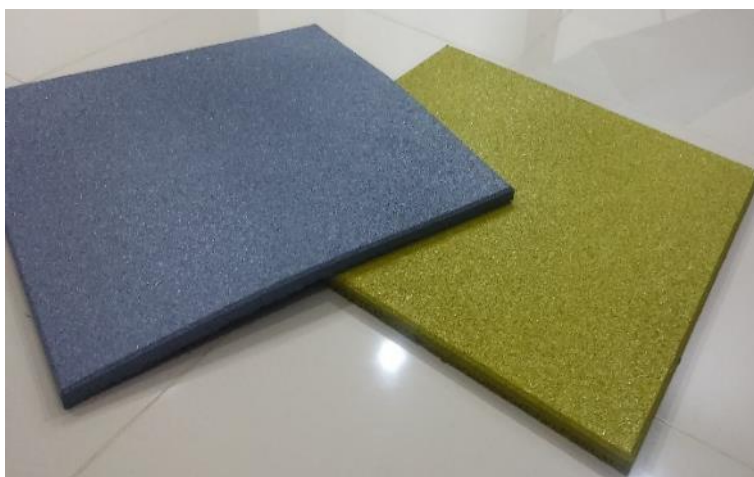
Fuente: Laboratorios de Ingeniería Mecánica - Universidad de los Andes (2015).

Como ya se había indicado anteriormente para el presente proyecto se fundieron tres (3) modelos con las mismas dimensiones y propiedades de los materiales. El Modelo 1 no presenta ningún tipo de elemento adicional, en el Modelo 2 se instalaron placas de llanta

reciclada en las vigas (parte inferior), por último, el Modelo 3 tiene instaladas las placas de llanta reciclada en la parte lateral de las vigas.

La Fotografía 8, muestra las placas de caucho instaladas en los modelos, el color simplemente es de carácter decorativo, toda vez que estos elementos actualmente son usados como pisos o baldosas para interiores y exteriores.

Fotografía 8. Placas de llanta reciclada - GICOMER S.A.S.



Fuente: Autores.

Por otra parte, y con el fin de adherir las placas de caucho a los Modelos 2 y 3, se utilizó un pegante cuyas características están implícitas en la Tabla 13; este producto permitió la unión de los dos materiales de manera precisa y proporcionó un nivel de confiabilidad frente a las vibraciones generadas por la mesa vibradora que fue empleada en el ensayo.

Tabla 13. Características del material de adherencia - Pegaucho.

Atributo	Detalle
Base	Cloropreno y Solidos

Atributo	Detalle
Medida	23,2 cmX10,4 cmX16,8 cm
Contenido	5 galones
Uso	Madera, Corcho, Papel, Cuero, Concreto, Caucho, Algunos textiles, Plásticos, Metales, Alfombra, Tapetes, Piso vinílico, Maderas a piso etc.
Ancho	16,8 cm
Beneficio	Proporciona alto rendimiento; Fuerza en el pegue; Permite fijar fácil los materiales a pegar; Buen cubrimiento de las superficies; Proporciona a la unión buena resistencia a la temperatura incluso en climas cálidos.
Preparación de la superficie	La superficie debe estar limpia, seca, lisa y libre de partículas sueltas, aceite y grasa
Color	Ocre
Tiempo de secado al tacto	Aplicar en las dos caras o dos sustratos a pegar, después de 15 min hacer la unión de los sustratos. Curado total, aprox. 3 días, dependiendo el clima.
Tipo	De contacto
Producto ecológico	No
Características	El cemento PL-285 PROFESIONAL posee un alto contenido de sólidos, lo que proporciona alto rendimiento y fuerza de pegue. Adicionalmente, su agarre inicial permite fijar fácilmente los materiales a pegar. Su viscosidad le proporciona un buen cubrimiento de las superficies permitiéndole aplicar el adhesivo fácilmente. Por su tiempo abierto, el producto conserva su pegajosidad, lo cual es favorable en ensambles de gran tamaño. Su alta resistencia a la

Atributo	Detalle
	temperatura le proporciona a la unión resistencia a temperaturas ambientales elevadas.
Largo	10,4 cm
Ventajas	Alto contenido de sólidos, tiempo abierto largo, Fácil aplicación.

Fuente: Extraído de la página web <http://www.homecenter.com.co/homecenter-co/product/60576/Pegante-Pl-285-1-Galon/60576>

En las Fotografías 9 y 10 (a continuación), se muestran los Modelos 2 y 3 con las placas ya instaladas.

Fotografía 9. Placas instaladas la parte inferior de las vigas del Modelo 2.



Fuente: Autores.

Fotografía 10. Placas instaladas en la zona lateral de las vigas del Modelo 3.



Fuente: Autores.

7.1.3 Etapa 3: Ensayo en la Mesa Vibradora

La Mesa Vibradora, es determinante para el ensayo para poder definir el nivel de amortiguamiento que las placas incrementan en la estructura. Estos resultados son obtenidos en función de un registro de movimientos controlados que permiten simular las vibraciones que pueden afectar cualquier tipo de estructura, las Fotografías 11 y 12 muestran la Mesa Vibradora, la cual tiene una dimensión de la plataforma de 100cm x 100cm, y puede soportar un peso hasta de 50 kg, el desplazamiento que puede experimentar la base es de aproximadamente 10,5 cm en cada dirección.

Fotografía 11. Mesa Vibradora - vista frontal.



Fuente: Autores.

Fotografía 12. Mesa Vibradora - vista lateral.

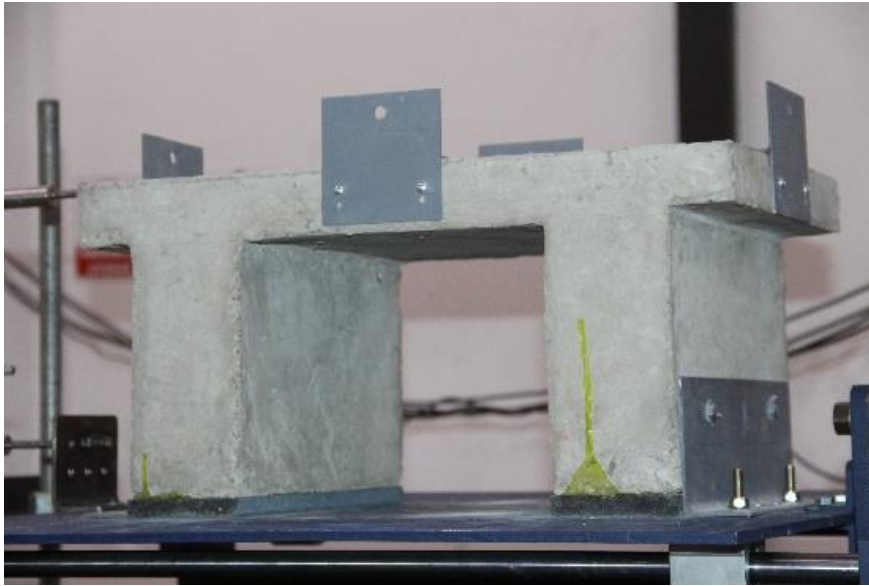


Fuente: Autores.

El desarrollo del ensayo presenta el siguiente orden:

- Montaje de cada uno de los modelos en la Mesa Vibradora, para lo cual se instaló en la parte lateral de estos elementos, láminas de aluminio en cada uno de sus extremos (ver Fotografía 13), con el fin de fijarlos a la mesa, con la ayuda de tornillos, también en la parte superior de los modelos se observan placas para el apoyo de los LVDT.

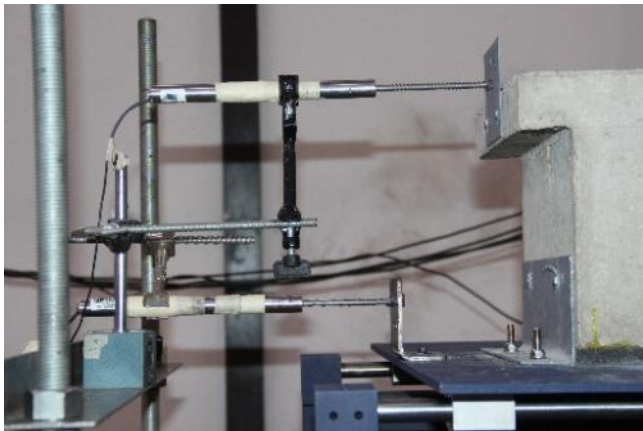
Fotografía 13. Vista de las Placas de aluminio instaladas en el Modelo 2.



Fuente: Autores.

- El sensor de desplazamiento inductivo LVDT mostrado en la Fotografía 14, presenta una alta precisión y permite realizar mediciones lineales a través del movimiento del núcleo, el cual determina distancia y transforma el movimiento mecánico o vibraciones en señales.

Fotografía 14. Instalación de equipo LVDT en el Modelo 2.



Fuente: Autores.

- La fuente de alimentación de los movimientos (aceleración, velocidad y desplazamiento) de la mesa, se transmite a través de un computador que envía señales a una serie de actuadores neumáticos de forma controlada, que a su vez se encuentra compuesto por válvulas y cilindros. Las Fotografías 15, 16, 17 y 18 muestran la relación de conexión entre la Mesa Vibradora y el sistema de control.

Fotografía 15. Modelo No. 2 - Instalado en la Mesa Vibradora con equipo LVDT – Vista 1.

Fuente: Autores.

Fotografía 16. Modelo No. 2 - Instalado en la Mesa Vibradora con equipo LVDT – Vista 2.



Fuente: Autores.

Fotografía 17. Modelo No. 2 - Instalado en la Mesa Vibradora con equipo LVDT – Vista 3.



Fuente: Autores.

Fotografía 18. Fotografía 18. Equipo de Control de la Mesa Vibradora.



Fuente: Autores.

- Finalmente, se debe emitir una señal a los modelos, por lo cual se tomó la frecuencia en cada uno de 11 Hz y 15 Hz. Al respecto es preciso aclarar que las vibraciones utilizadas en el ensayo se deben a las características de la mesa cuyo rango se mencionó anteriormente.
- El Software INGEMODULER, permite compilar en una sola estructura, las señales del sensor LVDT (Linear Variable Differential Transformer), para poder hacer un análisis físico de todos los datos obtenidos. La lectura de este software es inmediata y admite la correlación de lecturas desde diferentes perspectivas, incluso se pueden configurar las características físicas de los sensores.

National Instruments realiza una breve descripción del software así:

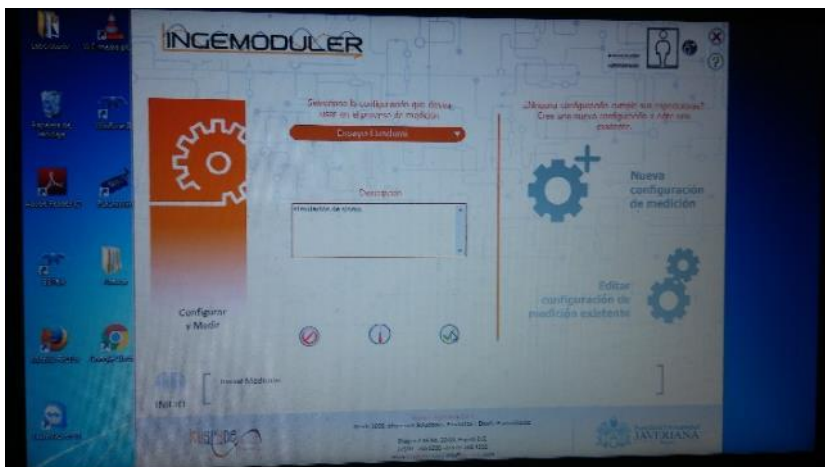
“(…) Físicamente, el INGEMODULER está compuesto por una caja transportadora robusta, lo que posibilita la instalación de este equipo tanto en laboratorios como en ambientes industriales (ejemplo, obras de construcción). Cada módulo de la serie C instalado en el INGEMODULER está cableado a una placa de conectores que distribuye los múltiples canales en el panel frontal del equipo. Dada su modularidad de conexión, el INGEMODULER puede intercambiar placas de sensores con otros equipos en caso de que estas no estén en uso, esto permite adecuar cada INGEMODULER a la necesidad específica de medición y a la vez, ensamblar otros equipos INGEMODULER con los módulos de sensores sobrantes. (...)”.

Adicionalmente,

“(…) El INGEMODULER tiene dos modos de operación, en línea y post proceso. En el modo en línea la adquisición se realiza en tiempo real y se puede visualizar cada una de las señales en una gráfica y/o en paneles adicionales. En el modo post proceso se selecciona una medición realizada previamente haciendo uso de archivos TDMS y se cargan las señales en un visualizador para analizarlas con más profundidad usando cursores o los paneles adicionales mencionados anteriormente. (...)”.

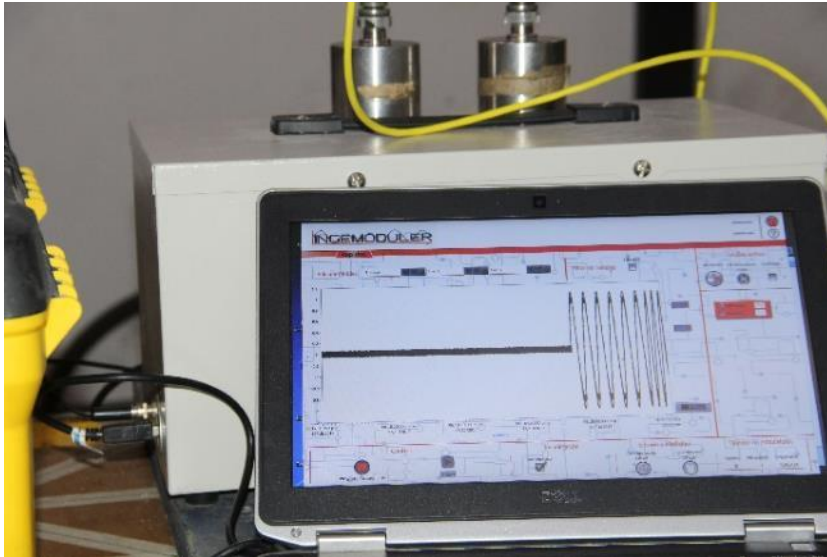
Las Fotografías 19 y 20 presentan una visualización panorámica de la interfaz inicial, como la de los resultados de las señales.

Fotografía 19. Interfaz de configuración del Software INGEMODULER.



Fuente: Autores.

Fotografía 20. Emisión de resultados de ensayos - Software INGEMODULER.



Fuente: Autores.

8 RESULTADOS

Los resultados experimentales obtenidos y descritos en el presente Capítulo, se constituyen como un ahondamiento en la temática escogida y el avance de un sistema tan complejo como es la combinación del mejoramiento de la infraestructura vial y la manipulación de los residuos de neumáticos, toda vez que resultan ambientalmente contaminantes y presentan un alto grado de complejidad en su recolección y el manejo de estos.

La presentación de la información relacionada con el proyecto esta subdividida de acuerdo con los lineamientos seguidos para la consecución de los objetivos, entre los que se encuentran temas de calidad, desarrollo técnico, parámetros comparados y uso de herramientas tecnológicas; con la obtención de la información arrojada por el software SAP2000 se determinaron las solicitaciones de la estructura a flexión y por cortante.

El uso de la Mesa Vibradora permitió reconocer las señales de amortiguamiento de cada uno de los modelos, y, en consecuencia, la presencia de la lámina de caucho adherida a estos influyó en los resultados.

8.1 ENSAYOS DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN

Durante la fabricación de los tres modelos usados para el desarrollo del proyecto, se tuvo el debido control de calidad de la mezcla de concreto, por lo cual se realizaron los ensayos correspondientes de resistencia a la compresión en especímenes cilíndricos conforme a lo que establece la norma NTC 673:2010, obteniendo los resultados presentados en la Tabla 14.

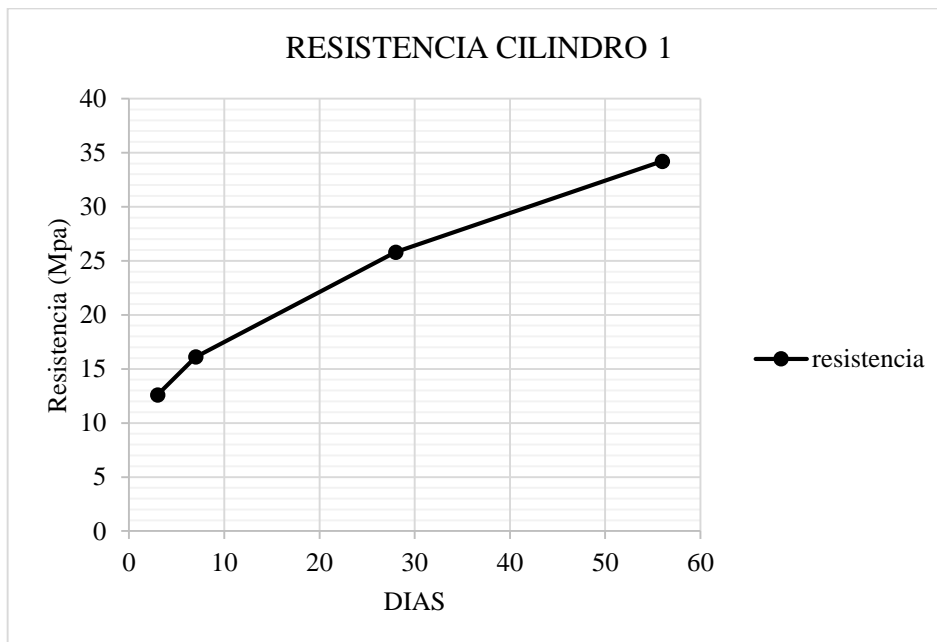
Tabla 14. Resultados ensayo de Resistencia a la Compresión.

TIEMPO (Días)	3	7	28	56
Resistencia MPa. Cilindro 1	12.6	16.1	25.8	34.2
Resistencia MPa. Cilindro 2	13.8	16.5	25.8	34.3
Resistencia MPa. Cilindro 3	12.4	16.9	26.3	35.3
Promedio MPa.	12.93	16.5	25.97	34.6
Resistencia %	61.60%	78.60%	123.65%	164.76%

Fuente: Elaboración propia.

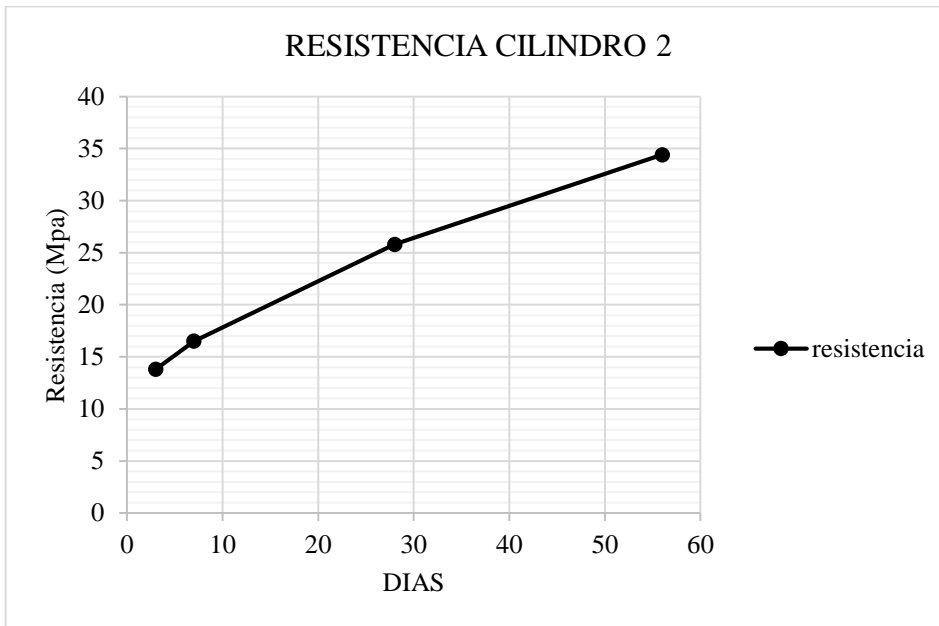
Con los resultados presentados en la Tabla 14, se obtuvieron las figuras que relacionan los resultados de resistencia a compresión de los cilindros fallados con las variables que se trabajan en el presente proyecto.

Figura 14. Resultados de Ensayo - Resistencia a la compresión – Cilindro 1.



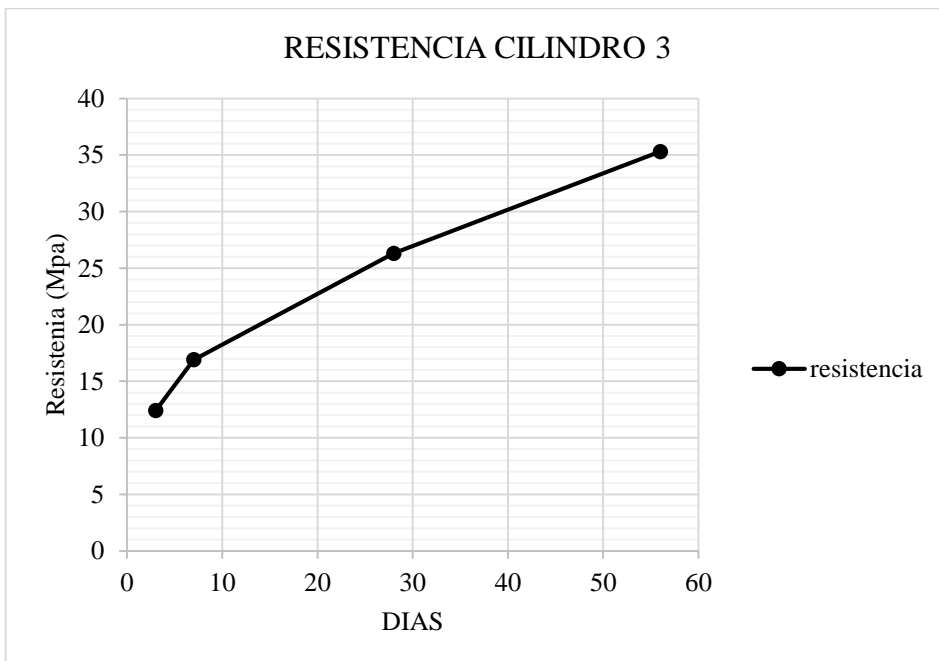
Fuente: Elaboración propia.

Figura 15. Resultados de Ensayo - Resistencia a la compresión – Cilindro 2.



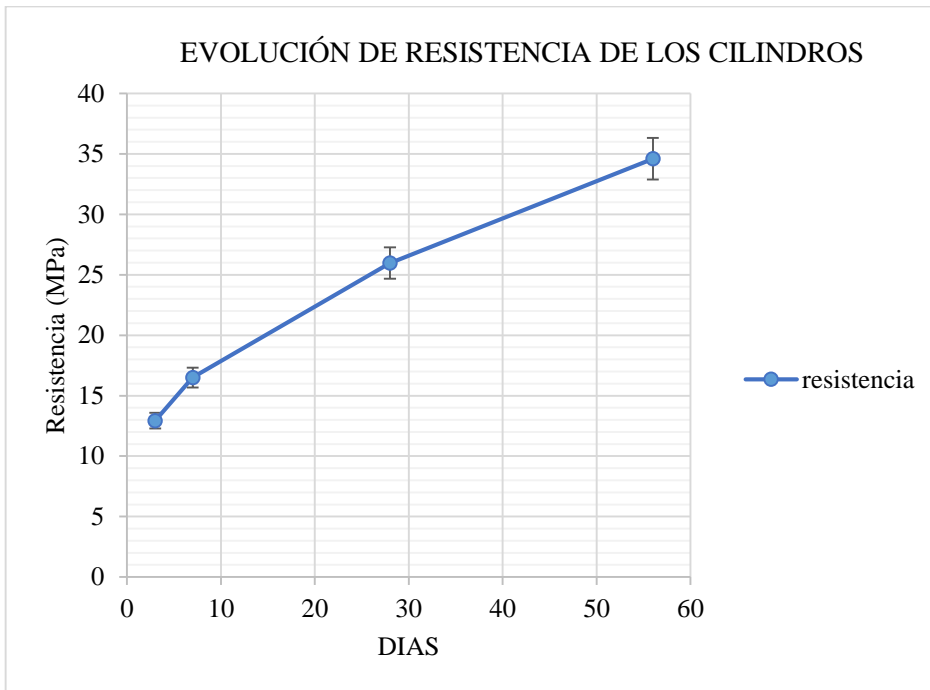
Fuente: Elaboración propia.

Figura 16. Resultados de Ensayo - Resistencia a la compresión – Cilindro 3.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 17. Resultado de Ensayo – Evolución de la Resistencia a la compresión promedio de los cilindros.



Fuente: Elaboración propia.

8.2 ENSAYO EN MESA VIBRADORA

La instalación final de los modelos en la Mesa Vibradora y la instalación del LVDT al mismo, se muestran en detalle en la Fotografía 21, el ensayo se encuentra documentado en un Video de corta duración que permite observar el desarrollo de la prueba. (Se anexa).

Fotografía 21. Montaje de los modelos en la Mesa Vibradora.



Fuente: Autores.

La base de este ensayo se fundamenta en el uso de la Mesa Vibradora la cual permite simular movimientos muy parecidos a los generados por una vibración en una estructura, en este caso un modelo de una viga simplemente apoyada; en la cual se probaron rangos de frecuencia entre 1Hz y 15Hz para los tres modelos.

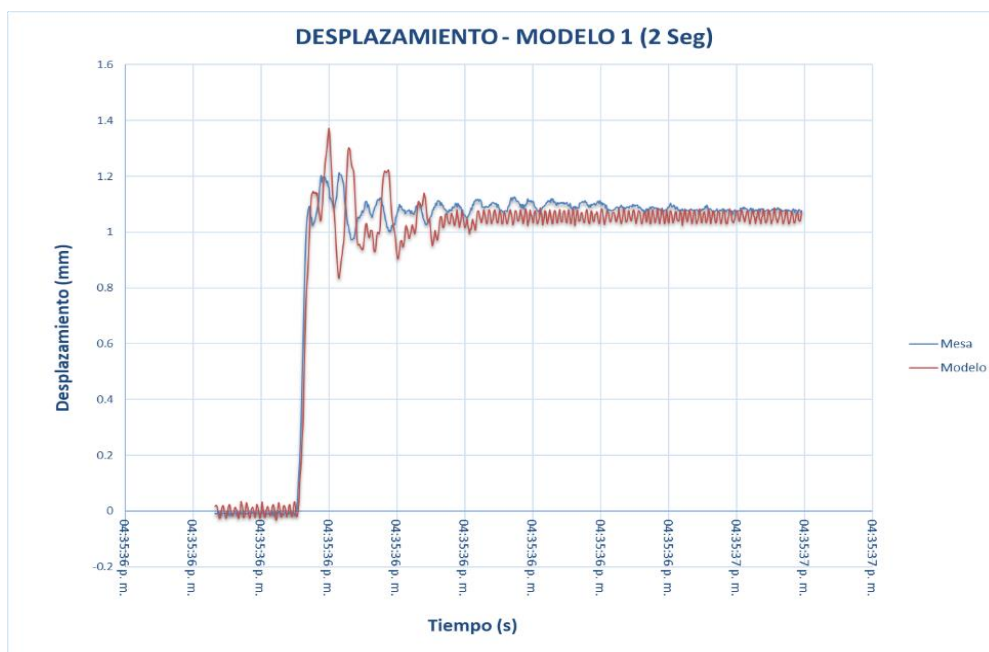
De acuerdo con lo anterior, el comportamiento de las señales de respuesta en los ensayos mencionados se encuentra en el siguiente orden:

8.2.1 Graficas del Historial de Desplazamiento del Modelo 1 (Modelo sin placas de llanta reciclada)

La rigidez, considerada como una medida cualitativa en el modelo experimental juega un papel muy importante, por ser una condición que genera incertidumbre en el comportamiento de la estructura, pues esta característica se encuentra directamente relacionada con la disipación de la energía transmitida a la estructura, por ello el amortiguamiento depende tanto de los componentes de los materiales, como del tiempo transcurrido una vez la estructura entra en contacto con la propagación de ondas llamadas vibraciones, generadas por la mesa.

La figura 18, muestra el desplazamiento del Modelo 1 y de la mesa en un intervalo de tiempo de dos segundos, en la cual la amplitud de la onda presenta una variación positiva y el desplazamiento inicial resulta significativo, a medida que avanza el tiempo se puede observar que el desplazamiento es mínimo.

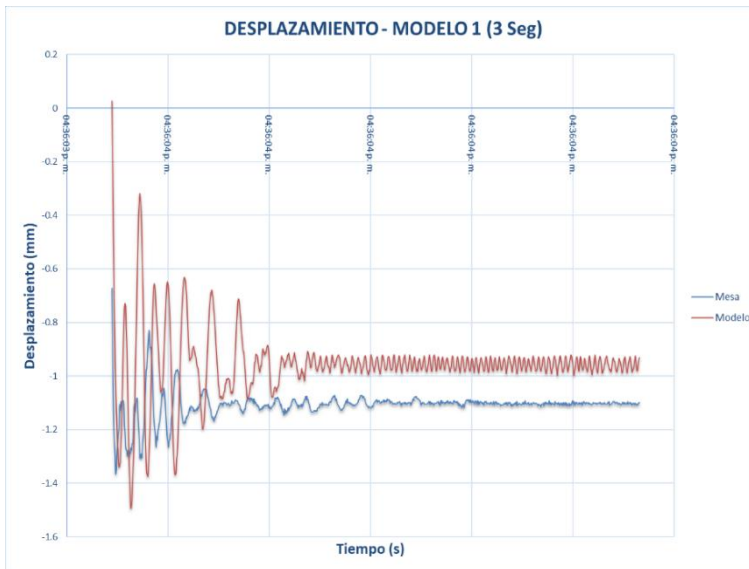
Figura 18. Representación del desplazamiento obtenido en el Modelo No. 1, en función de la Mesa Vibradora – Tiempo 2 segundos.



Fuente: Elaboración propia.

A pesar de que las figuras 19 y 20 presentan una variación de segundos, en un lapso tan corto, se puede observar la amplitud de la señal en función de los desplazamientos de la mesa y el modelo.

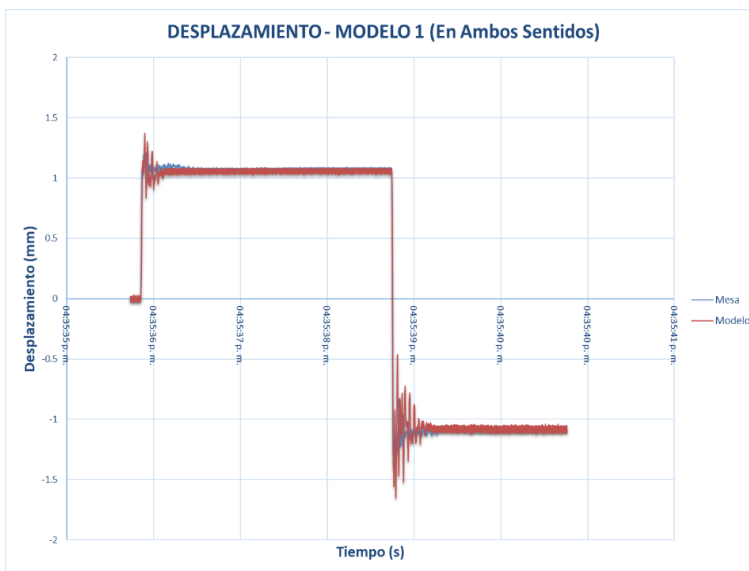
Figura 19. Historial del Desplazamiento resultante en el Modelo 1, en función de la Mesa Vibradora – Tiempo 3 Seg.



Fuente: Elaboración propia.

De igual manera, la figura 20 muestra el desplazamiento de la mesa y el Modelo 1, en ambos sentidos, esto permite ver un decrecimiento de la respuesta y por ende un incremento en el amortiguamiento.

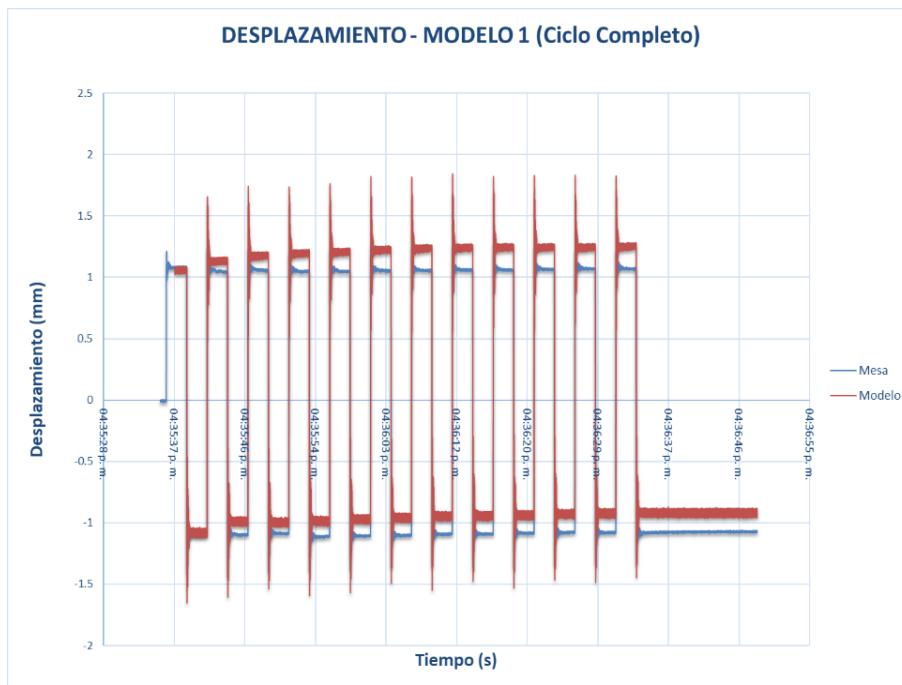
Figura 20. Historial del Desplazamiento resultante del Modelo 1, en función de la Mesa Vibradora – en ambos sentidos.



Fuente: Elaboración propia.

La figura 21, muestra la correlación entre el desplazamiento de la mesa vibradora y del Modelo 1 en función del tiempo.

Figura 21. Historial del Desplazamiento resultante en el Modelo 1– Ciclo Completo.

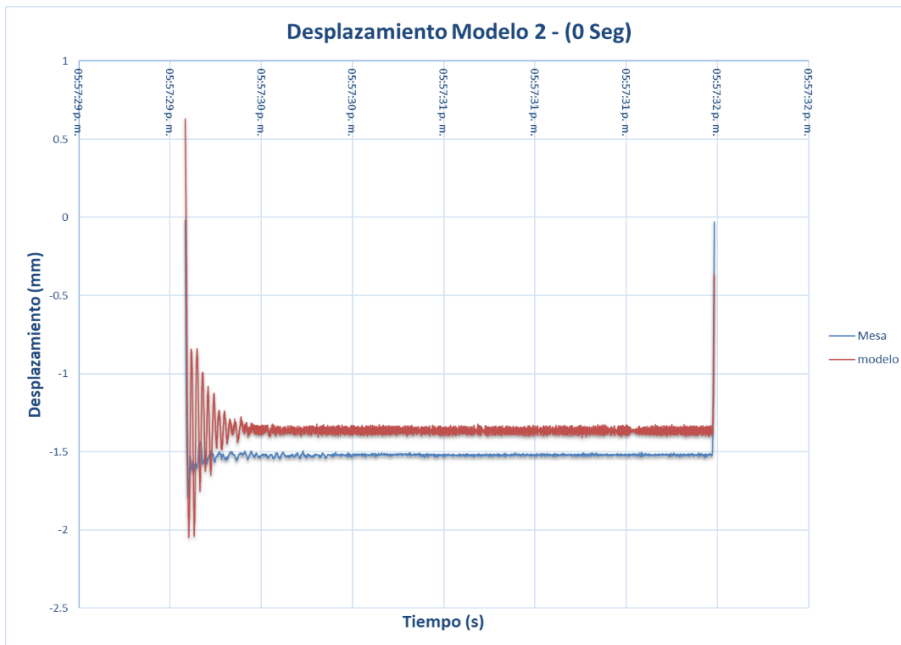


Fuente: Elaboración propia.

8.2.2 Graficas del Historial del Desplazamiento del Modelo 2 (Con placas de caucho en la parte inferior)

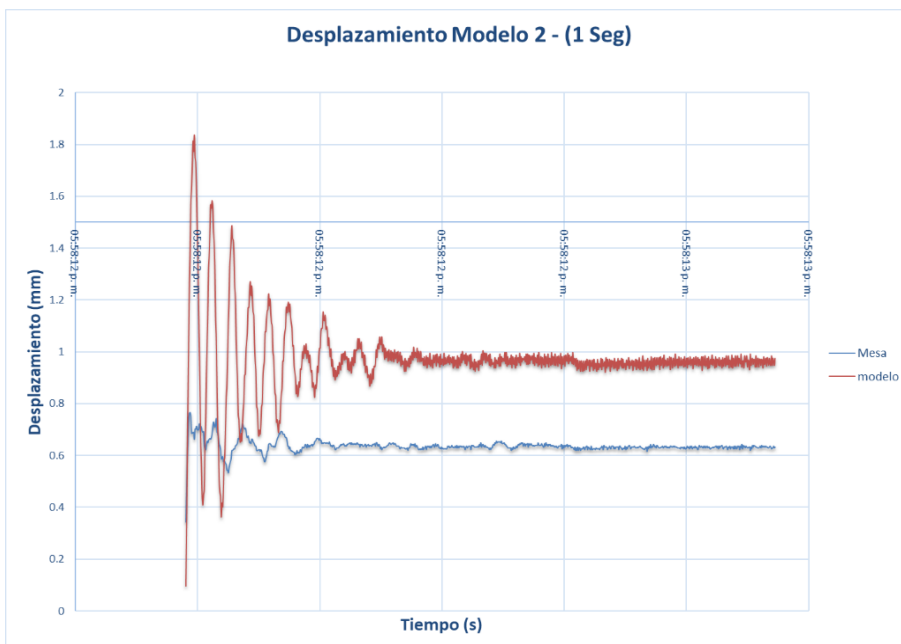
De la misma manera, para el Modelo 2 se grafica el desplazamiento de éste y de la Mesa Vibradora, los cuales se presentan en la figura 22, 23 y 24.

Figura 22. Historial del Desplazamiento del Modelo 2 – en el segundo 0.



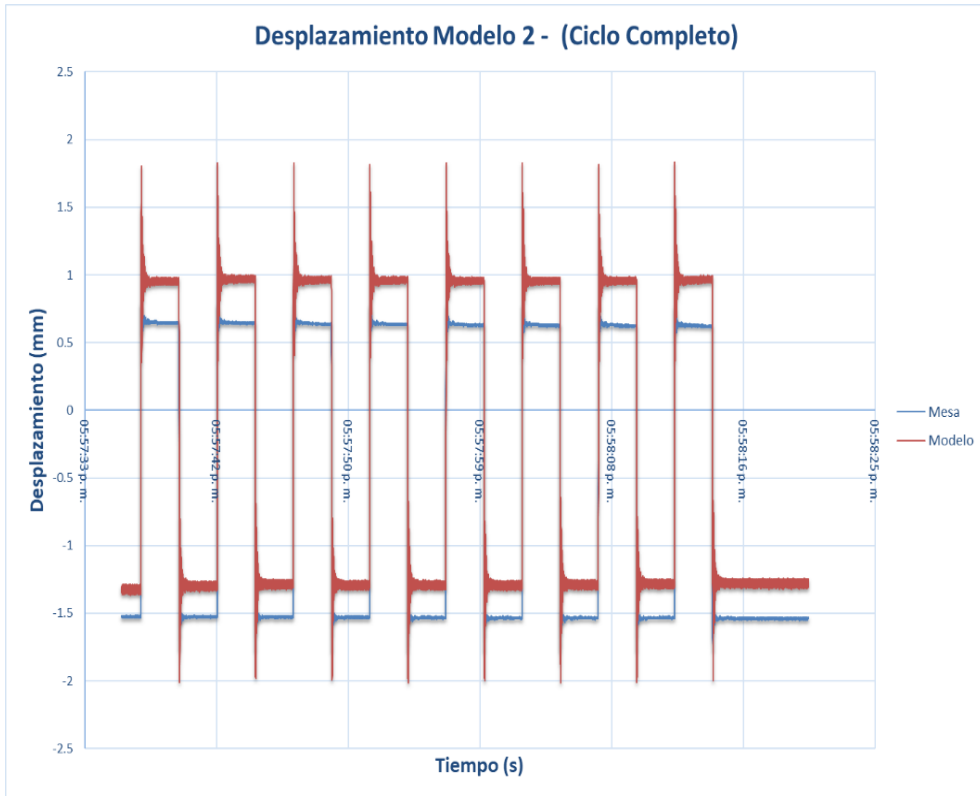
Fuente: Elaboración propia.

Figura 23. Historial del Desplazamiento del Modelo 2 – en el segundo 1.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 24. Historial del Desplazamiento del Modelo 2 – Ciclo Completo.

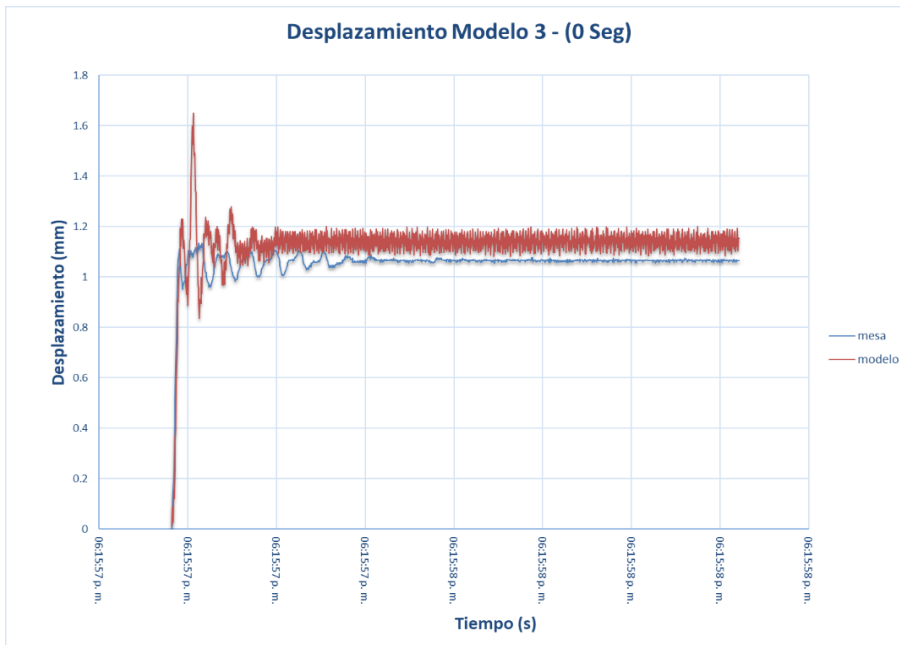


Fuente: Elaboración propia.

8.2.3 Gráficas del Historial de Desplazamiento del Modelo 3 (Con placas de caucho en la parte lateral)

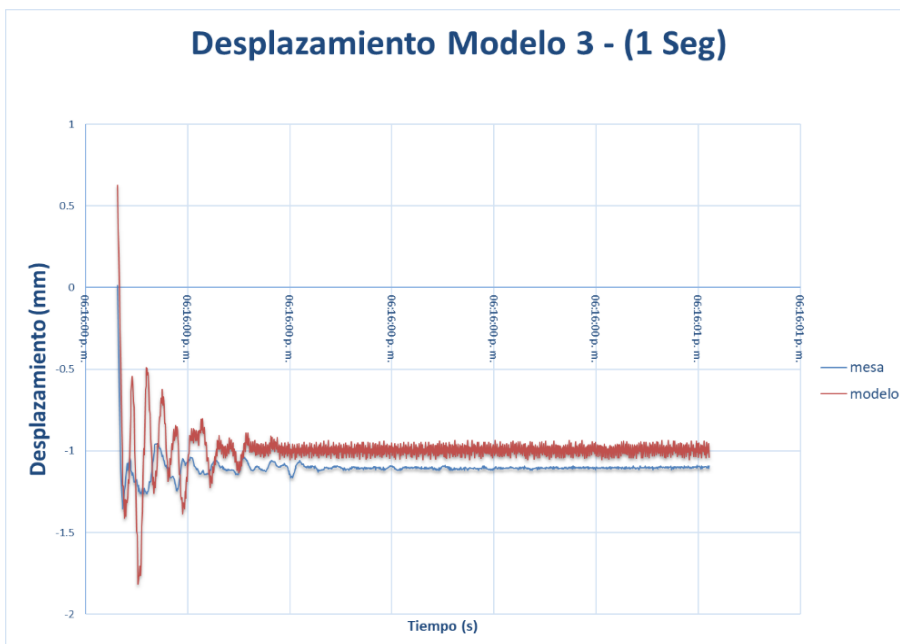
Las Figuras 25, 26 y 27, presentan los resultados del historial de desplazamiento de la mesa vibradora con relación al Modelo 3, en el cual se observa claramente que el modelo presenta mayor amplitud en los picos y menor longitud de onda.

Figura 25. Historial del Desplazamiento del Modelo 3 – En el segundo 0.



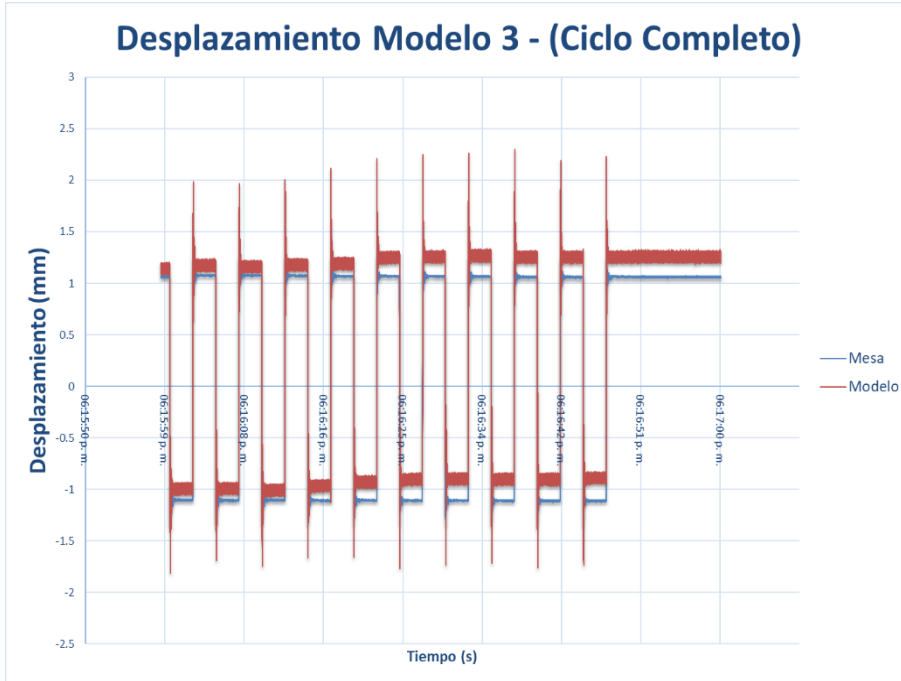
Fuente: Elaboración propia.

Figura 26. Historial del Desplazamiento del Modelo 3 – En el segundo 1.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 27. Desplazamiento del Modelo 3 – Ciclo Completo.

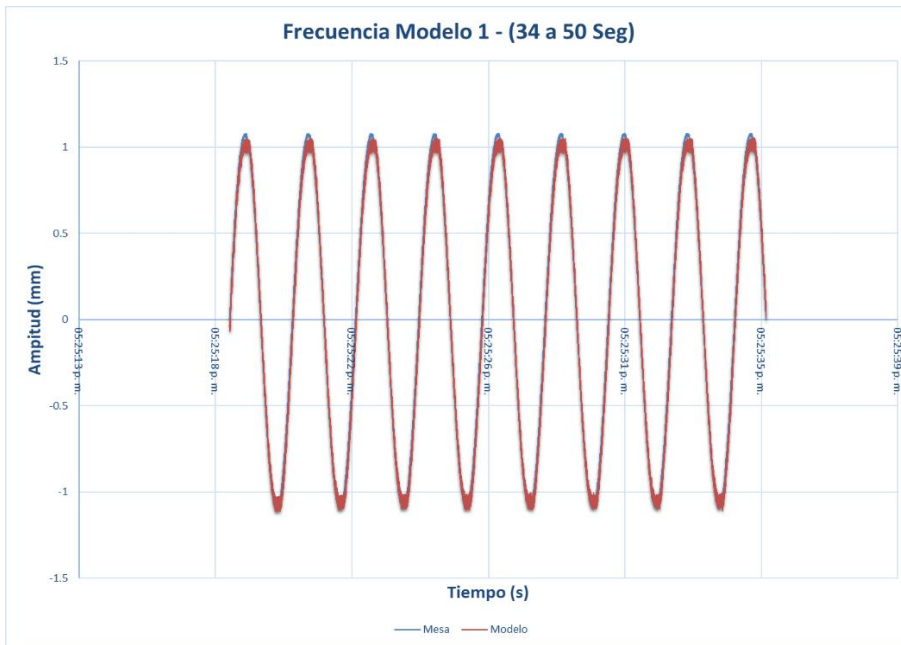


Fuente: Elaboración propia.

8.2.4 Resultados Frecuencia hasta 11 Hz - Modelo 1 (Sin placas de caucho)

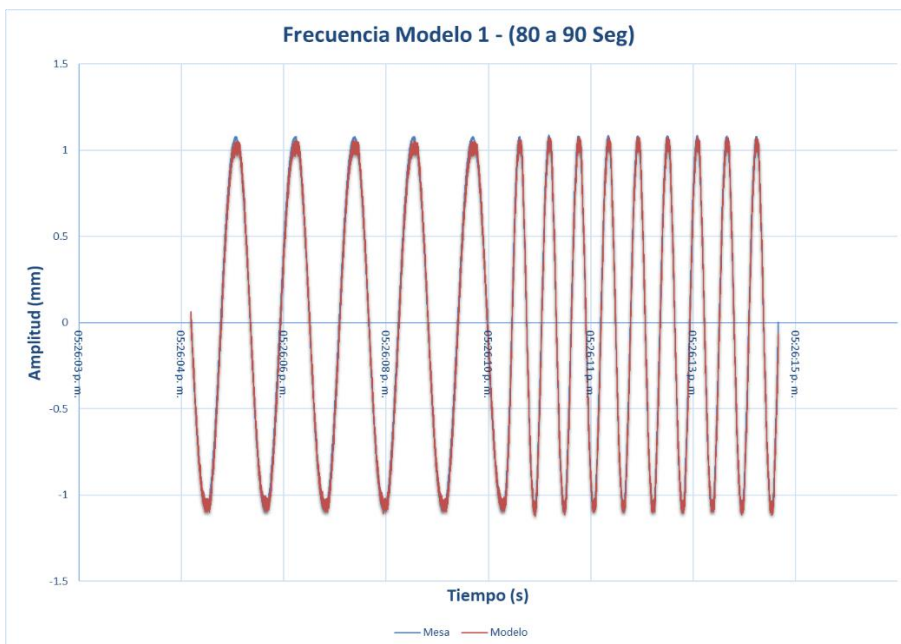
Las Figuras 28, 29, 30, 31 y 32, presentan las señales detalladas de la frecuencia para el Modelo 1, bajo este escenario la longitud de la onda y la amplitud tienen un espaciamiento constante, su propagación está relacionada con el parámetro del tiempo frente a la línea de equilibrio; lo que indica el aumento de la frecuencia y de la energía del sistema.

Figura 28. Frecuencia del Modelo 1 – Tiempo: 34 – 50 segundos.



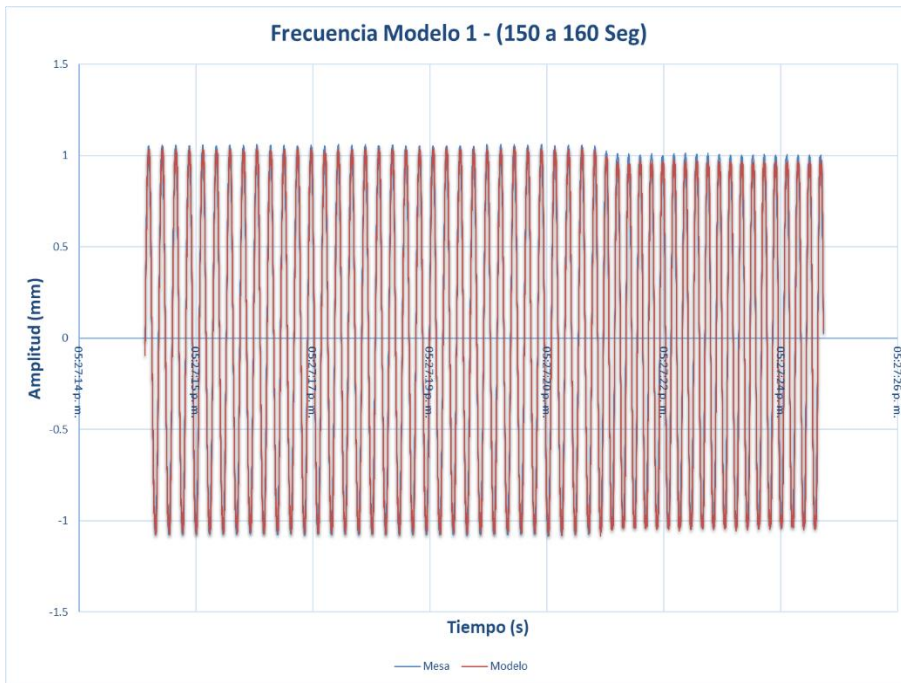
Fuente: Elaboración propia.

Figura 29. Frecuencia del Modelo 1 – Tiempo: 80 – 90 segundos.



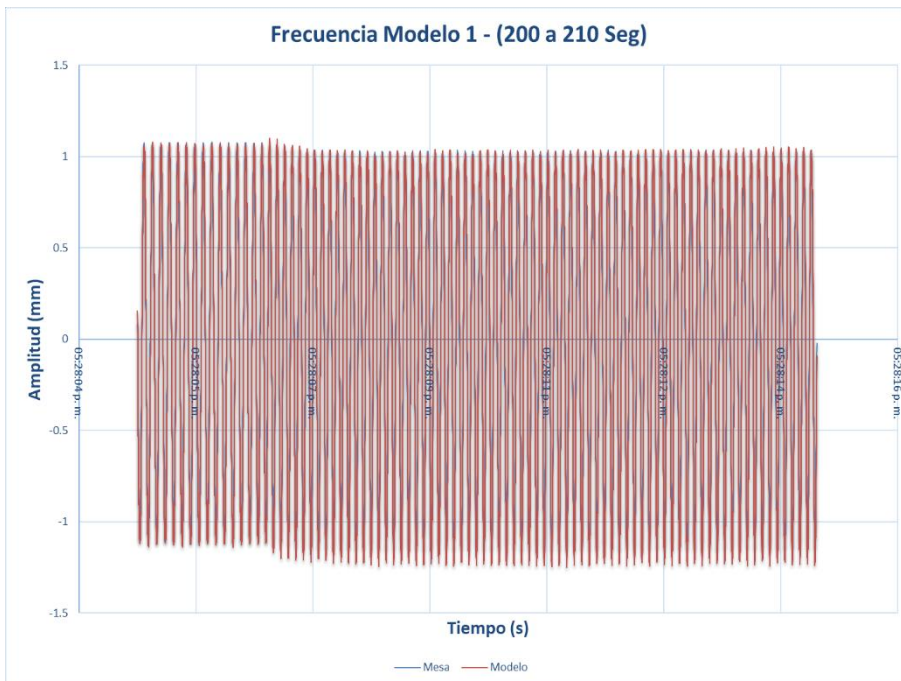
Fuente: Elaboración propia.

Figura 30. Frecuencia del Modelo 1 – Tiempo: 150 – 160 segundos.



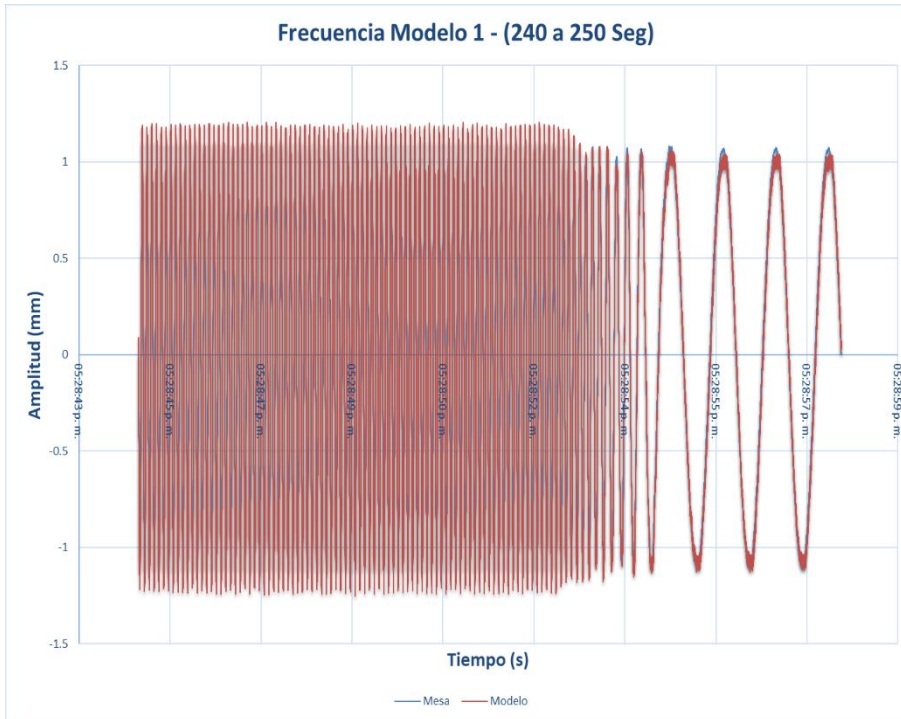
Fuente: Elaboración propia.

Figura 31. Frecuencia del Modelo 1 – Tiempo: 200 – 210 segundos.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 32. Frecuencia del Modelo 1 – Tiempo: 240 – 250 segundos.

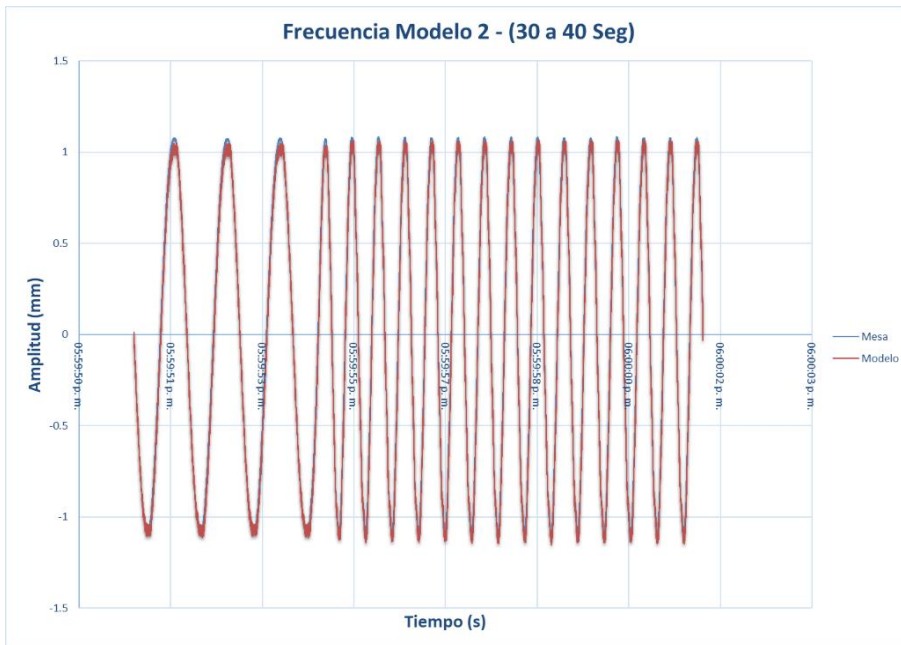


Fuente: Elaboración propia.

8.2.5 Resultados Frecuencia hasta 11 Hz – Modelo 2 (Con placas de caucho en la parte inferior)

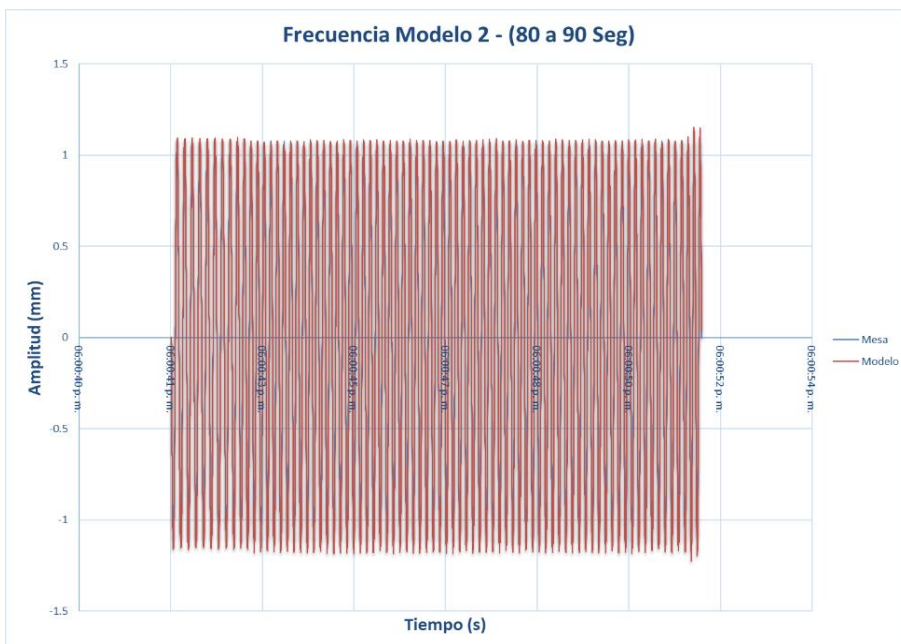
Una vez inicia el ensayo para el Modelo 2, cuya frecuencia máxima inicialmente fue de 11 Hz, se observa que la señal emitida tiene una mayor longitud en la onda, y a medida que transcurre el tiempo y que se incrementa la frecuencia, la propagación de esta presenta menor longitud y mayor amplitud, al finalizar el ensayo la longitud de la onda vuelve a aumentar, como se observa en las figuras 33, 34, 35 y 36.

Figura 33. Frecuencia del Modelo 2 – Tiempo: 30 – 40 segundos.



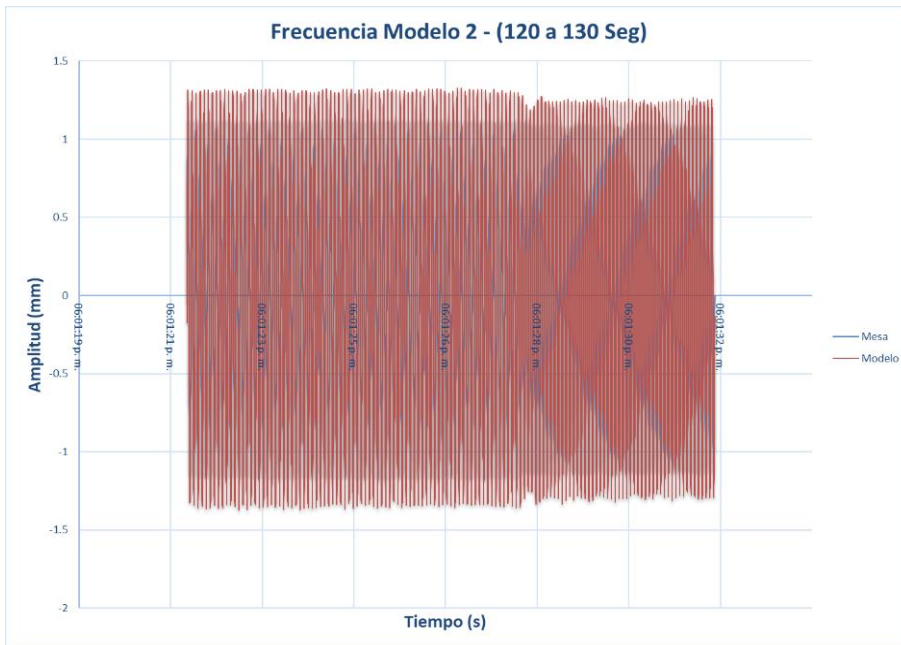
Fuente: Elaboración propia.

Figura 34. Frecuencia del Modelo 2 – Tiempo: 80 – 90 segundos.



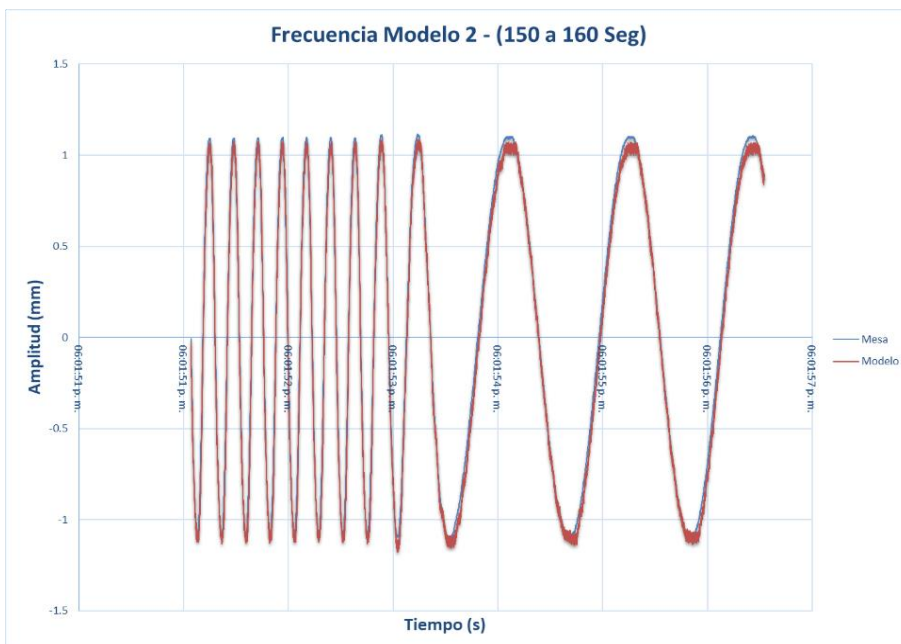
Fuente: Elaboración propia.

Figura 35. Frecuencia del Modelo 2 – Tiempo: 120 – 130 segundos.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 36. Frecuencia del Modelo 2 – Tiempo: 150 – 160 segundos.

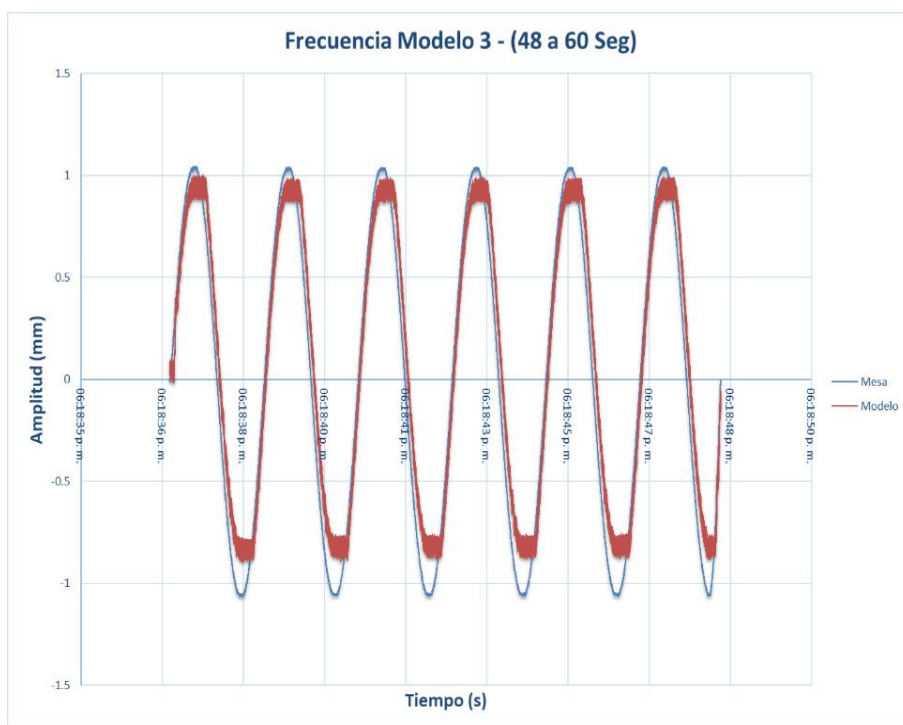


Fuente: Elaboración propia.

8.2.6 Resultados Frecuencia hasta 15 Hz – Modelo 3 (Con placas de caucho en la parte lateral)

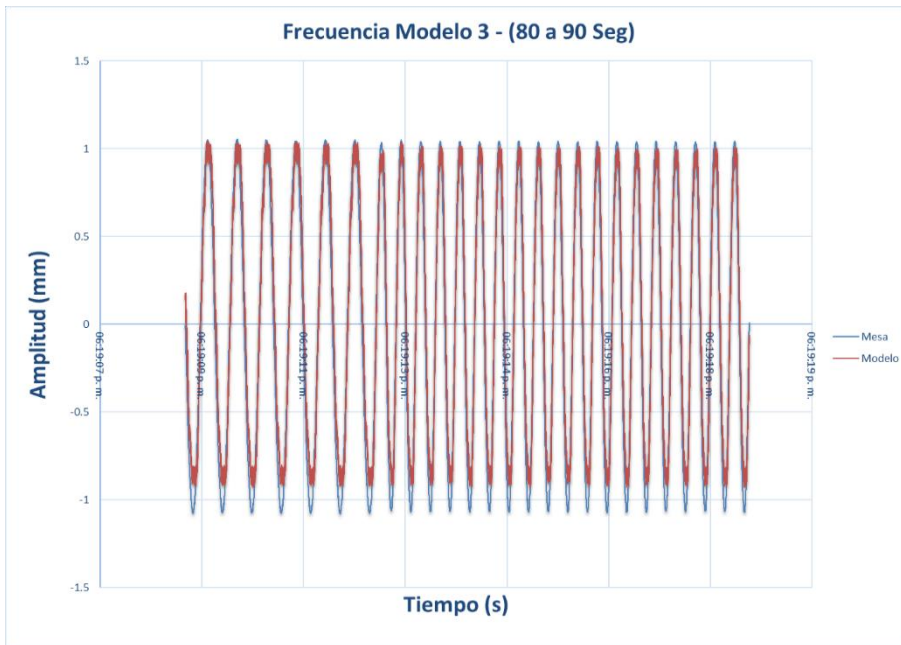
Finalmente, los resultados del ensayo de Modelo 3 se muestran en las figuras 42, 43, 44, 45 y 46, en este escenario se puede observar que las crestas de las ondas, para el modelo tienen una mayor compresión. Así mismo, al igual que el inicio de los otros ensayos, la longitud de la onda es mayor y esta disminuye a medida que transcurre el tiempo y se aumenta la frecuencia.

Figura 37. Frecuencia del Modelo 3 – Tiempo: 48 – 60 segundos.



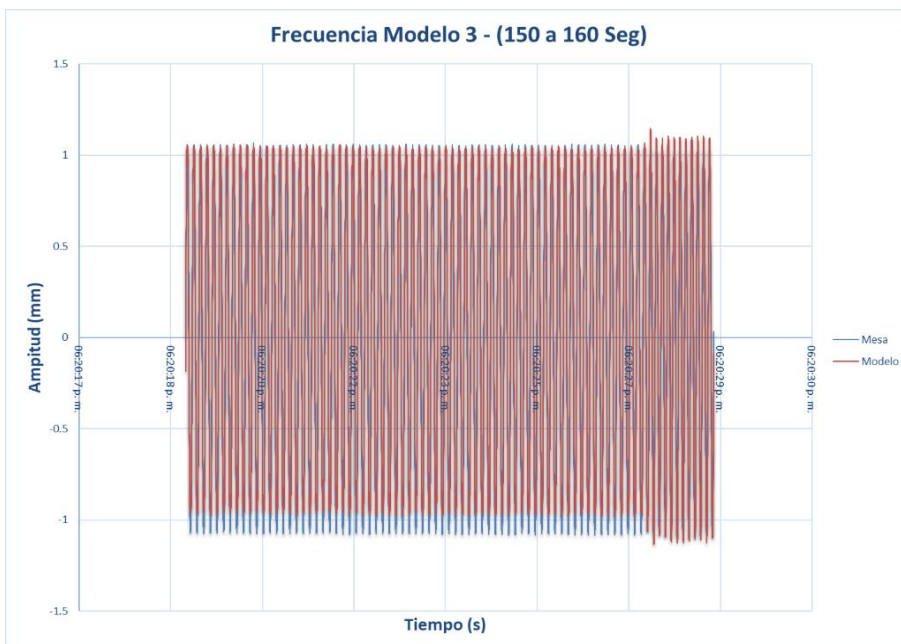
Fuente: Elaboración propia.

Figura 38. Frecuencia del Modelo 3 – Tiempo: 80 – 90 segundos.



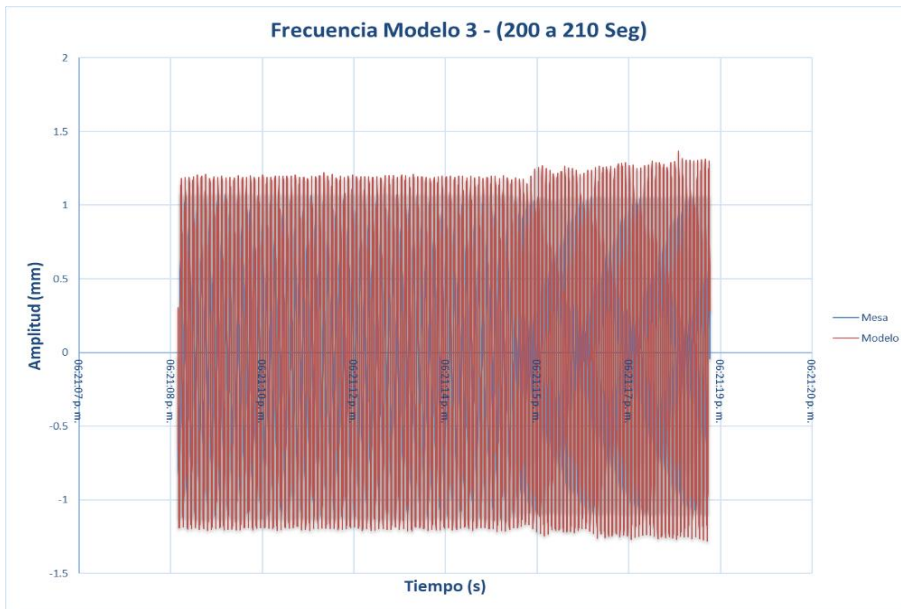
Fuente: Elaboración propia.

Figura 39. Frecuencia del Modelo 3 – Tiempo: 150 – 160 segundos.



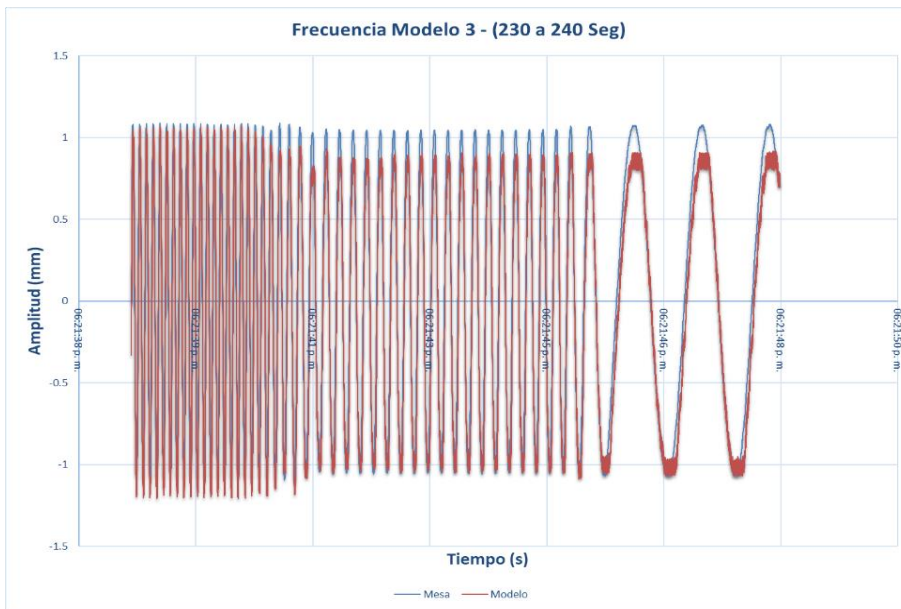
Fuente: Elaboración propia.

Figura 40. Frecuencia del Modelo 3 – Tiempo: 200 – 210 segundos.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 41. Frecuencia del Modelo 3 – Tiempo: 230 – 240 segundos.



Fuente: Elaboración propia.

9 MODELACIÓN NUMÉRICA

Para el presente trabajo, se hace una modelación numérica del comportamiento mecánico de los modelos físicos utilizando el software de elementos finitos SAP2000®, para de esta forma poder determinar cuáles son los efectos del cambio en las características de los apoyos (configuración y material).

Los modelos numéricos permiten obtener valores acerca del comportamiento mecánico de los elementos estructurales de concreto del modelo físico; lo anterior significa, obtener valores de desplazamientos y esfuerzos en losas de tableros y vigas (cortantes y momentos). Estos resultados permitirán establecer parámetros de comparación entre los diferentes modelos desarrollados.

9.1 DESARROLLO DE LOS MODELOS NUMÉRICOS

En primer lugar, para el desarrollo de los modelos numéricos, se deben definir las propiedades de los materiales.

9.1.1 Características de los apoyos de caucho reciclado

Para determinar las características de los apoyos en caucho reciclado, se utilizaron los valores de caracterización mostrados en el Capítulo 6.1 del presente documento. Los valores utilizados son:

Tabla 15. Características apoyos de caucho reciclado.

Descripción	Valor
Espesor Promedio (cm):	5,778
Densidad Promedio a 23°C (g/cm ³):	10,907

Descripción	Valor
Dureza Shore A:	68,10
Esfuerzo Máximo, $\sigma_{\text{máx}}$ [MPa]:	2,510
Esfuerzo a Ruptura, σ_{rup} [MPa]:	2,363
Elongación a Ruptura, Δ_{rup} [%]:	69,487
Módulo de Elasticidad, E [MPa] :	8,302
Carga de Ruptura , P_{rup} [kN]:	0,106

Fuente: Elaboración propia.

9.1.2 Características de los apoyos elastoméricos

Para la modelación de los apoyos en neopreno, se utilizaron valores de caracterización dados por el fabricante del material, los cuales se indican en la Tabla 16 a continuación:

Tabla 16. Características de neoprenos para apoyos

Características	Especificación	Resultados	Método
Dureza Shore A	60 ± 5	60	ASTM D2240
Cambio de Dureza Shore A	Máximo 15%	0	ASTM D2240
Tensión N/mm ²	Mínimo 15,5	16.33	ASTM D412
Cambio de Tensión %	Máximo- 15	-5.27	ASTM D573
Elongación %	Mínimo 350	440	ASTM D412
Cambio de Elongación %	Máximo - 40	-4.55	ASTM D573
Compresión Set %	Máximo 35	21.14	ASTM D395
Rasgado	Mínimo 31,5 kN/m	76.73	ASTM D624
Módulo de Corte	0.9 a 1.37 MPa	1.13	ASTM D4014
Adhesión (Caucho - Lamina)	Mínimo 40 lbs/pulg.	71.4	ASTM D429

Fuente: Elaboración propia.

9.1.3 Modelación de los apoyos

Para modelar los apoyos elastoméricos, se utilizó la metodología propuesta por Kelly, J. & Konstantinidis, D (2011), según la cual los apoyos, bien sean de neoprenos o de caucho reciclado, se pueden simular utilizando elementos tipo “spring” en los nodos de los elementos que se encuentran apoyados. En ese orden de ideas, los autores proponen calcular la rigidez del elemento tipo resorte mediante la siguiente expresión:

$$K = \frac{0.33 \times E \times I}{t} \quad \text{ec. 1}$$

En ese orden de ideas, con la metodología definida y los materiales caracterizados, se tiene que las constantes del resorte de los apoyos en dirección horizontal (K_h) y en dirección vertical (K_v), como se muestran a continuación:

Tabla 17. Valores de constantes del apoyo para modelación

Tipo	K_h (kN/m)	K_v (kN/m)
Caucho reciclado	7.13	98.62
Neopreno	14.90	402.37

Fuente: Elaboración propia.

9.1.4 Características del concreto

Para la modelación del concreto, se utilizaron los valores de caracterización mecánica indicados en el capítulo 7.1 del presente documento. El material se asignó en el modelo como se indica a continuación:

Figura 42. Propiedades del concreto en SAP2000

Material Property Data

General Data

Material Name and Display Color: 34.6MPa

Material Type: Concrete

Material Grade: fc 34.6MPa

Material Notes: Modify/Show Notes...

Weight and Mass

Weight per Unit Volume: 24

Mass per Unit Volume: 2,4473

Units

Units: KN, m, C

Isotropic Property Data

Modulus Of Elasticity, E: 27789382

Poisson, U: 0,2

Coefficient Of Thermal Expansion, A: 9,900E-06

Shear Modulus, G: 11578909

Other Properties For Concrete Materials

Specified Concrete Compressive Strength, f_c: 34600

Expected Concrete Compressive Strength: 34600

Lightweight Concrete

Shear Strength Reduction Factor:

Switch To Advanced Property Display

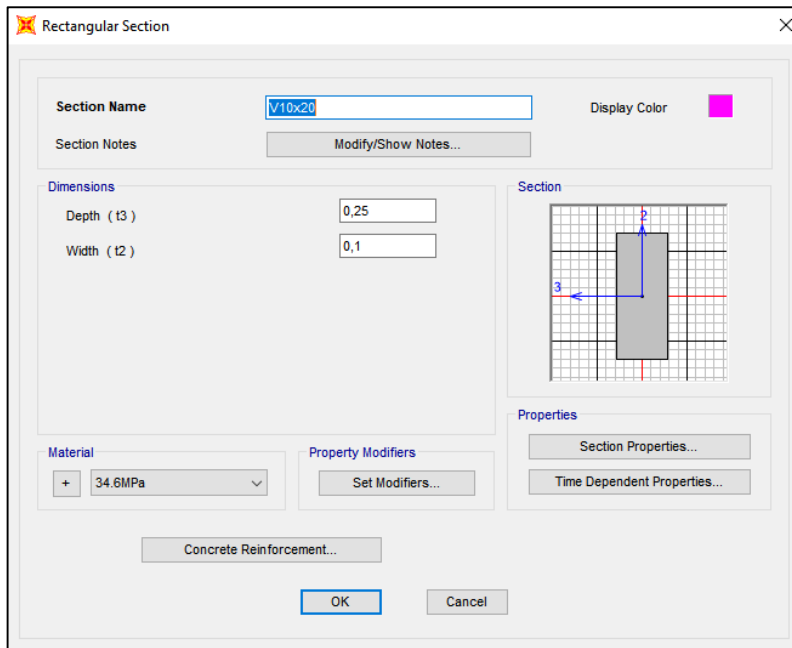
OK Cancel

Fuente: Elaboración propia.

9.1.5 Geometría de los modelos

Para la elaboración de los modelos numéricos se utilizaron elementos tipo “frame” para la simulación de las vigas, y elementos tipo “Shell” para la simulación de la losa del tablero del modelo físico. En primer lugar, se definieron vigas rectangulares de concreto de 0.10m x 0.25 m, como se precia a continuación:

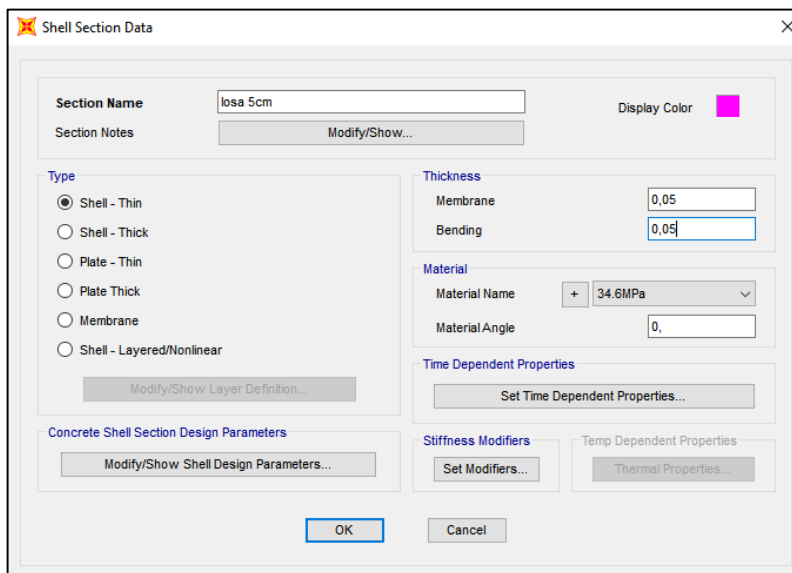
Figura 43. Geometría de las vigas de los modelos en SAP2000



Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente, se definió la losa del tablero de 0.05 como se aprecia a continuación:

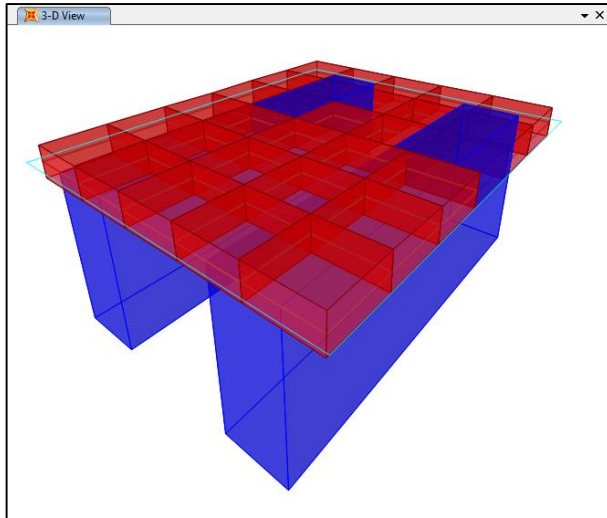
Figura 44. Geometría de la placa de los modelos en SAP2000



Fuente: Elaboración propia.

Con los elementos definidos, se construyó la geometría del modelo numérico, el cual representa el modelo físico ensayado en laboratorio, tal y como se muestra a continuación:

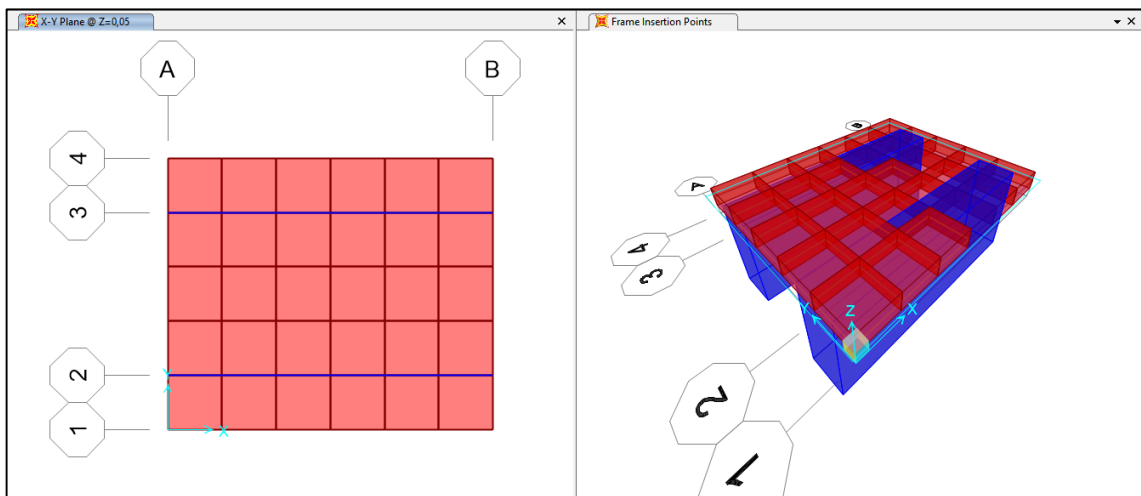
Figura 45. Vista 3D del modelo en SAP2000



Fuente: Elaboración propia.

El modelo desarrollado se puede ver completamente en la siguiente figura:

Figura 46. Vistas Modelo SAP2000



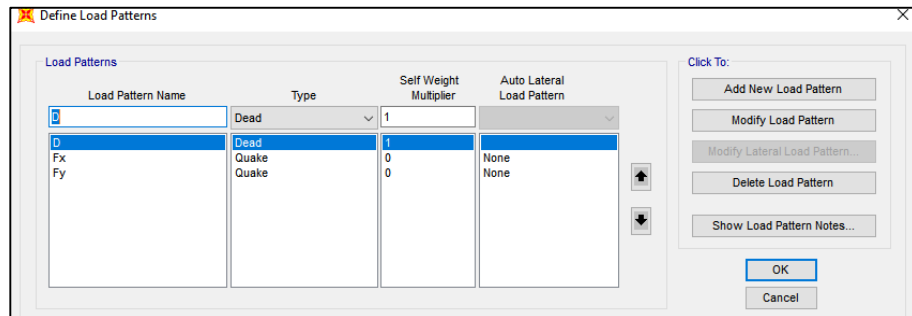
Fuente: Elaboración propia.

9.1.6 Cargas asignadas en los modelos

Para los modelos desarrollados, se tuvieron en cuenta dos cargas:

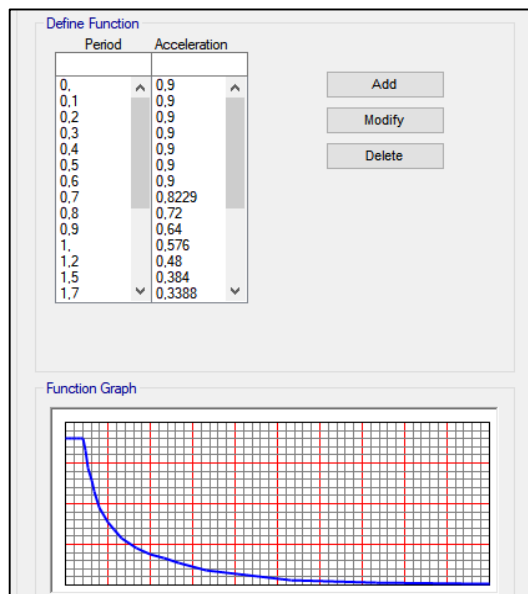
- Carga muerta debida al peso propio de los elementos, la cual se introdujo al modelo mediante la herramienta “Self Weight Multiplier” del software de análisis utilizado:

Figura 47. Asignación carga muerta en Modelo



- Fuerza inercial debida a la vibración externa a la que se sometió al elemento. Esta vibración fue incluida en el modelo mediante un espectro de análisis que representa la señal que se utilizó en el desarrollo del modelo físico.

Figura 48. Asignación de vibración en modelo



9.2 RESULTADOS OBTENIDOS

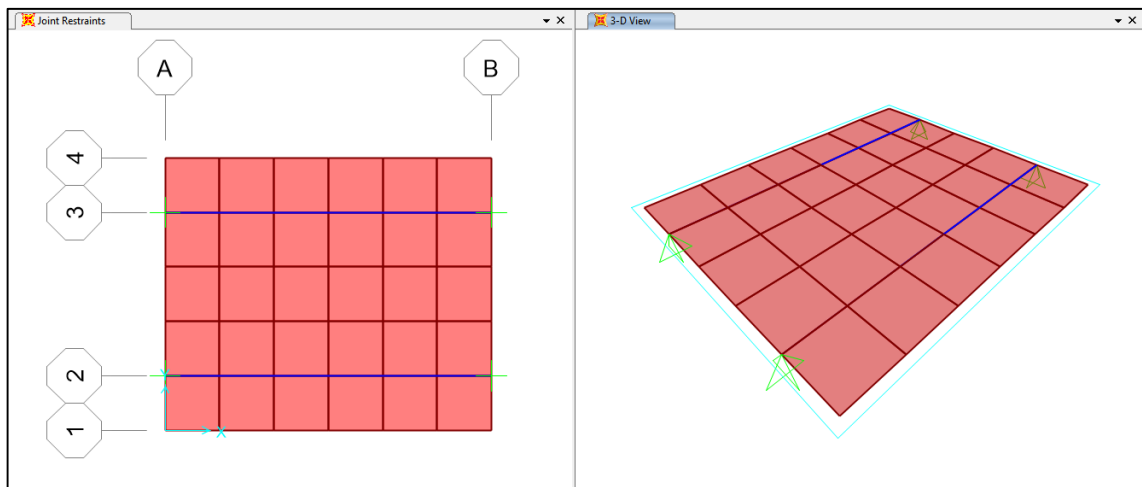
Para el modelo desarrollado se cambiaron las condiciones de apoyo, de acuerdo con el modelo físico trabajado. En ese orden de ideas, se trabajaron 5 (cinco) modelos numéricos de acuerdo a las siguientes condiciones de apoyo:

- **Modelo 1:** No tiene apoyos
- **Modelo 2:** Tiene apoyos en la parte inferior. Se hacen dos análisis, con neoprenos y con caucho reciclado.
- **Modelo 3:** Tiene apoyos en los costados. Se hacen dos análisis, con neoprenos y con caucho reciclado.

9.2.1 Modelo 1 - Sin apoyos elastoméricos

El modelo 1, es cuando la estructura no tiene apoyos elastoméricos. En este caso, se modeló numéricamente una estructura simplemente apoyada en los extremos, como se aprecia a continuación:

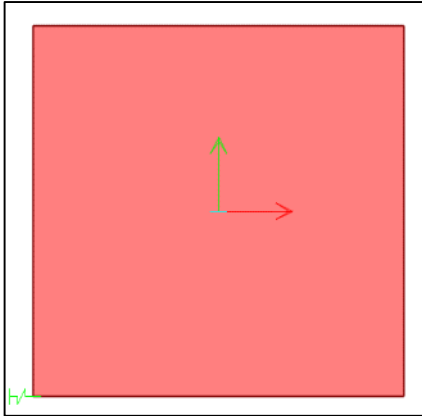
Figura 49. Vistas modelo 1, sin apoyos elastoméricos



Fuente: Elaboración propia.

Para la estructura modelada, se tomaron las siguientes direcciones para los ejes locales del tablero (1 en rojo y 2 en verde).

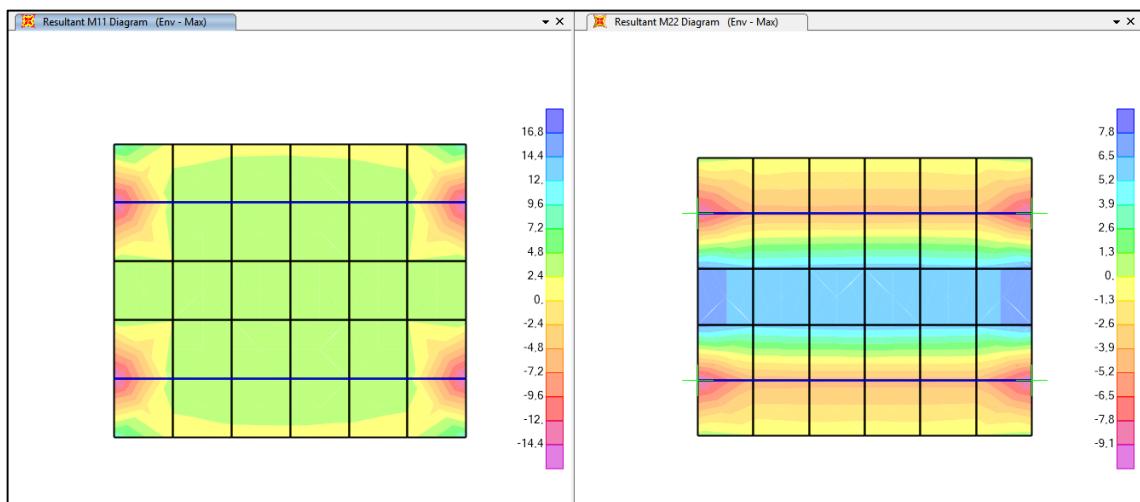
Figura 50. Dirección de los ejes locales



Fuente: Elaboración propia.

En primer lugar, se determinaron los valores de momento en el tablero, tanto en la dirección 1-1 como en la dirección 2-2, tal y como se presenta a continuación:

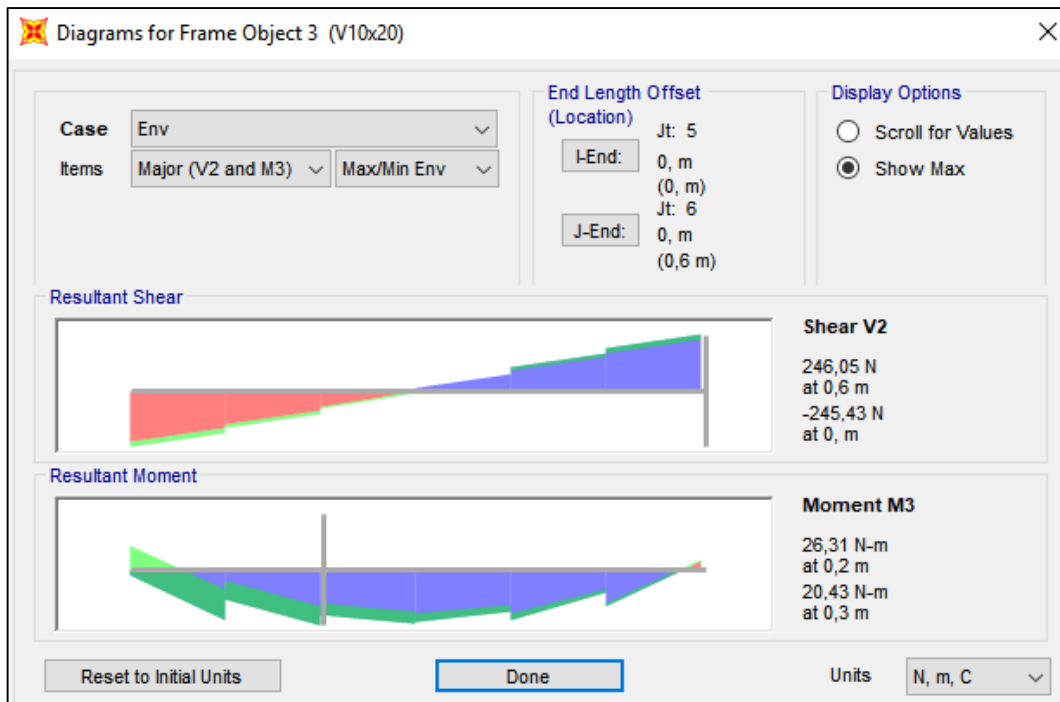
Figura 51. Momentos resultantes en tablero Modelo 1.



Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente se encontraron los valores de esfuerzo (momento y cortante) en las vigas del modelo, como se muestra a continuación:

Figura 52. Resultantes de Momento y cortante en vigas - Modelo 1

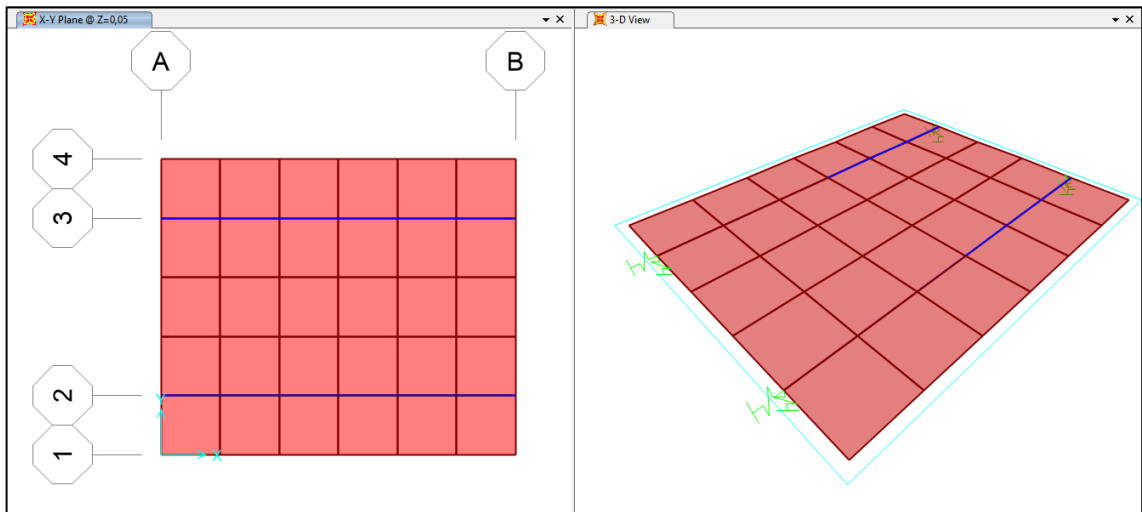


Fuente: Elaboración propia.

9.2.2 Modelo 2 - Con apoyos elastoméricos de neopreno

El modelo 2 con apoyos en neopreno, es cuando la estructura tiene apoyos elastoméricos de neopreno. En este caso, se modelo numéricamente una estructura apoyada sobre resortes, como se aprecia a continuación:

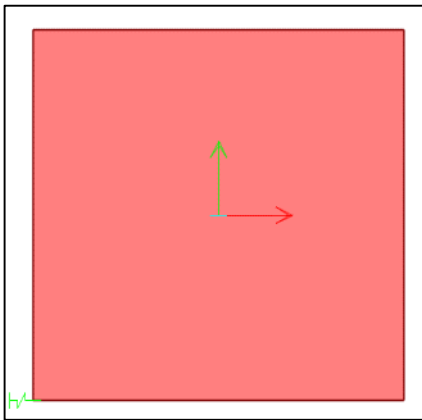
Figura 53. Vistas modelo 2, con apoyos en neopreno



Fuente: Elaboración propia.

Para la estructura modelada, se tomaron las siguientes direcciones para los ejes locales del tablero (1 en rojo y 2 en verde).

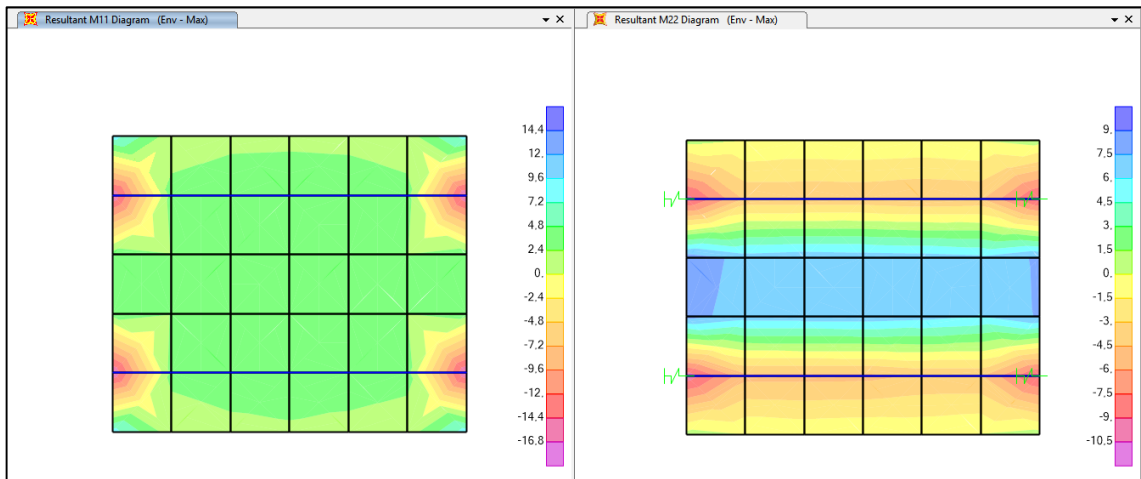
Figura 54. Dirección de los ejes locales



Fuente: Elaboración propia.

En primer lugar, se determinaron los valores de momento en el tablero, tanto en la dirección 1-1 como en la dirección 2-2, tal y como se presenta a continuación:

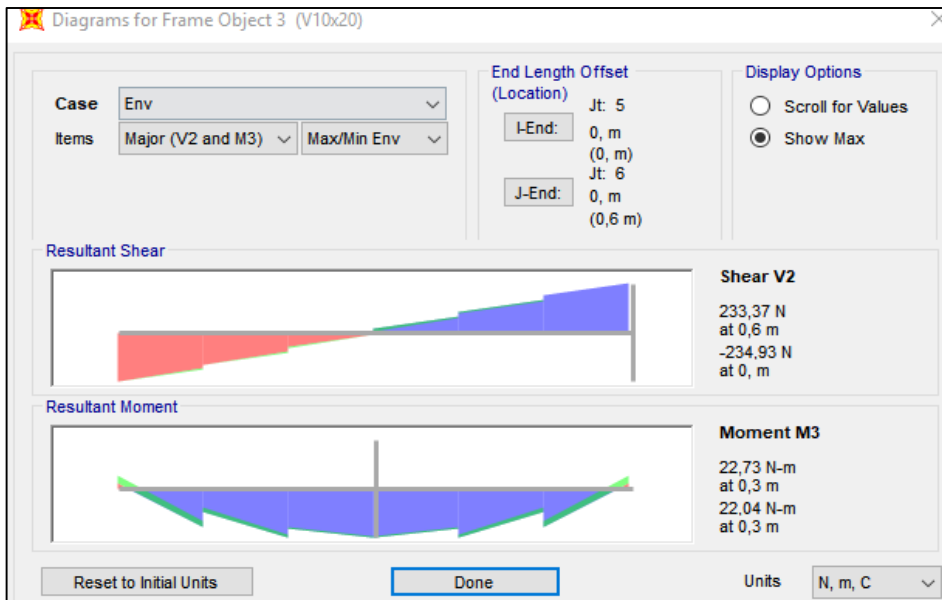
Figura 55. Momentos resultantes en tablero - Modelo 2 con neopreno



Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente se encontraron los valores de esfuerzo (momento y cortante) en las vigas del modelo, como se muestra a continuación:

Figura 56. Resultantes de Momento y cortante en vigas - Modelo 2 con neopreno

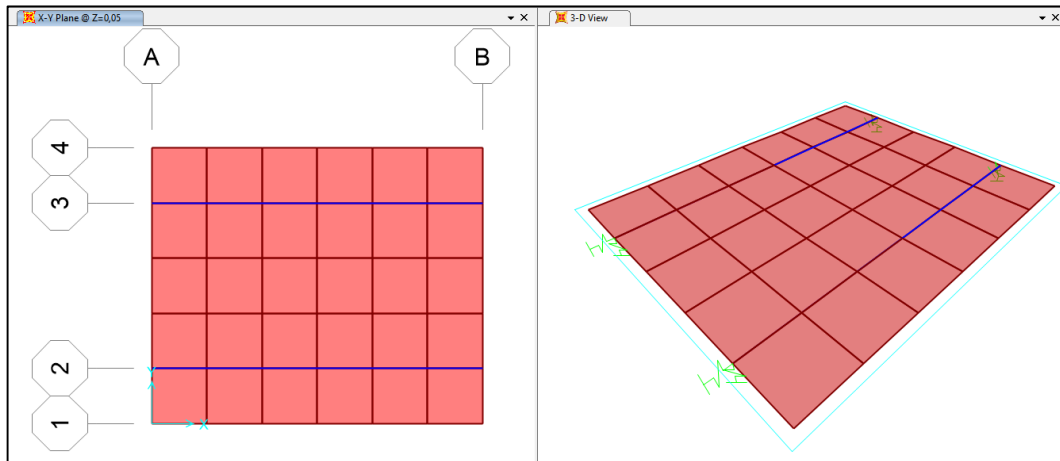


Fuente: Elaboración propia.

9.2.3 Modelo 2 - Con apoyos elastoméricos de caucho reciclado

El modelo 2 con apoyos en caucho reciclado, es cuando la estructura tiene apoyos en lámina de caucho en la parte inferior. En este caso, se modelo numéricamente una estructura apoyada sobre resortes, como se aprecia a continuación:

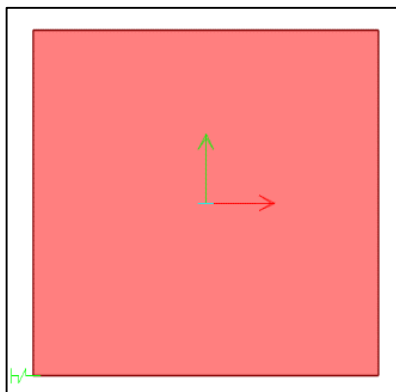
Figura 57. Vistas modelo 2, con apoyos en caucho reciclado



Fuente: Elaboración propia.

Para la estructura modelada, se tomaron las siguientes direcciones para los ejes locales del tablero (1 en rojo y 2 en verde).

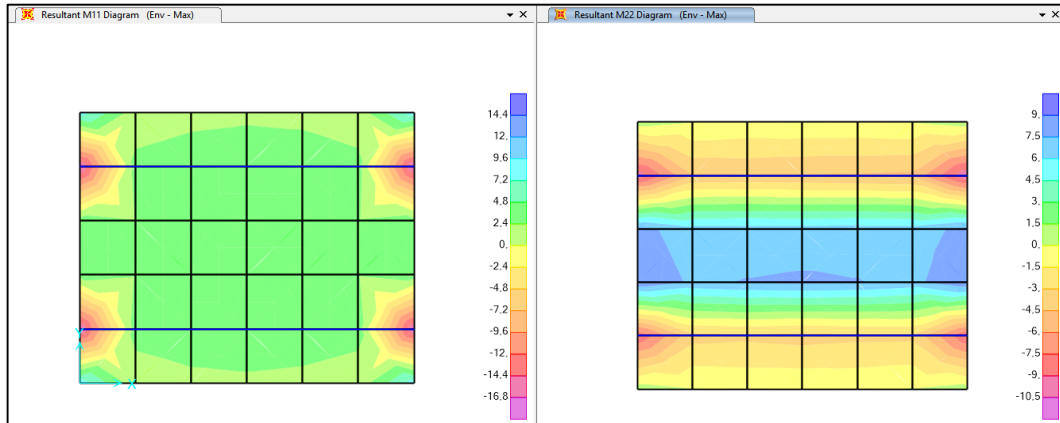
Figura 58. Dirección de los ejes locales



Fuente: Elaboración propia.

En primer lugar, se determinaron los valores de momento en el tablero, tanto en la dirección 1-1 como en la dirección 2-2, tal y como se presenta a continuación:

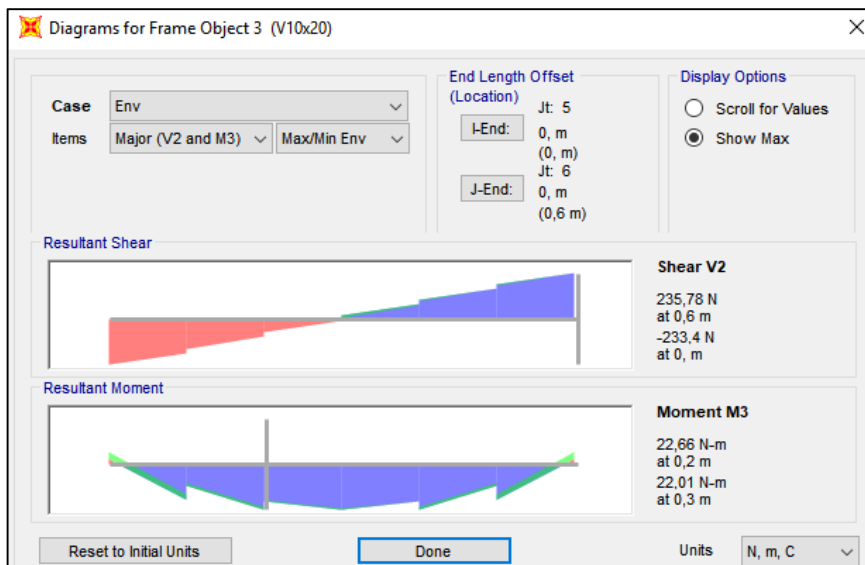
Figura 59. Momentos resultantes en tablero - Modelo 2 con caucho reciclado



Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente se encontraron los valores de esfuerzo (momento y cortante) en las vigas del modelo, como se muestra a continuación:

Figura 60. Resultantes de Momento y cortante en vigas - Modelo 2 con caucho reciclado

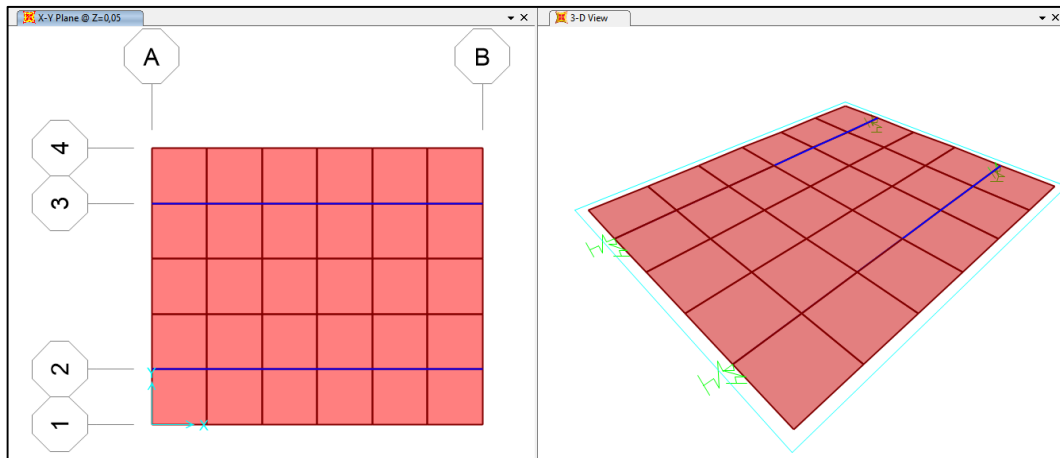


Fuente: Elaboración propia.

9.2.4 Modelo 3 - Con apoyos elastoméricos de neopreno

El modelo 3 con apoyos elastoméricos en neopreno, es cuando la estructura tiene apoyos en neopreno en la parte lateral. En este caso, se modelo numéricamente una estructura apoyada sobre resortes, como se aprecia a continuación:

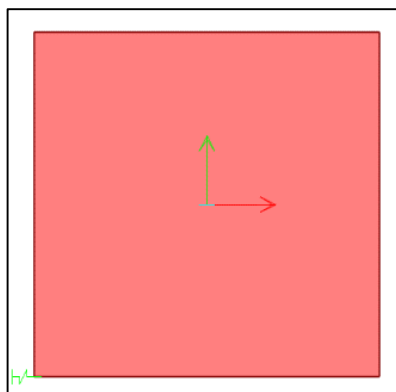
Figura 61. Cortes en modelo 3, con apoyos en neopreno



Fuente: Elaboración propia.

Para la estructura modelada, se tomaron las siguientes direcciones para los ejes locales del tablero (1 en rojo y 2 en verde).

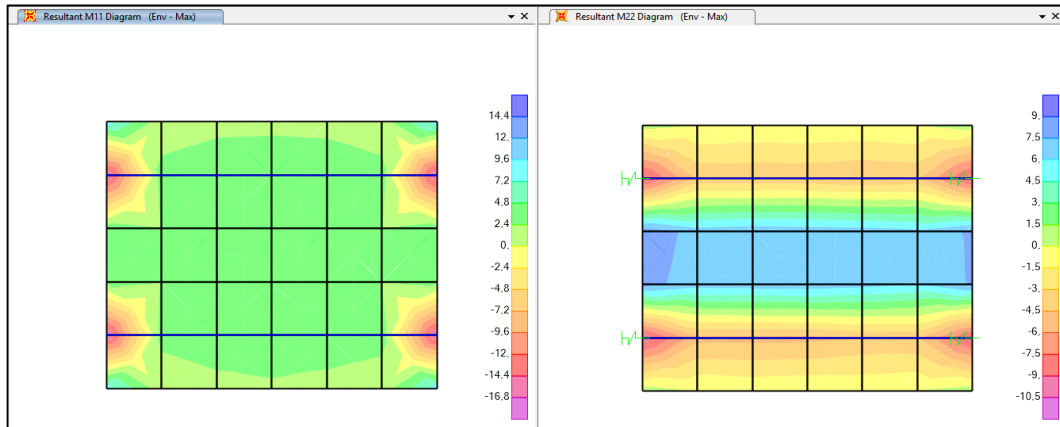
Figura 62. Dirección de los ejes locales



Fuente: Elaboración propia.

En primer lugar, se determinaron los valores de momento en el tablero, tanto en la dirección 1-1 como en la dirección 2-2, tal y como se presenta a continuación:

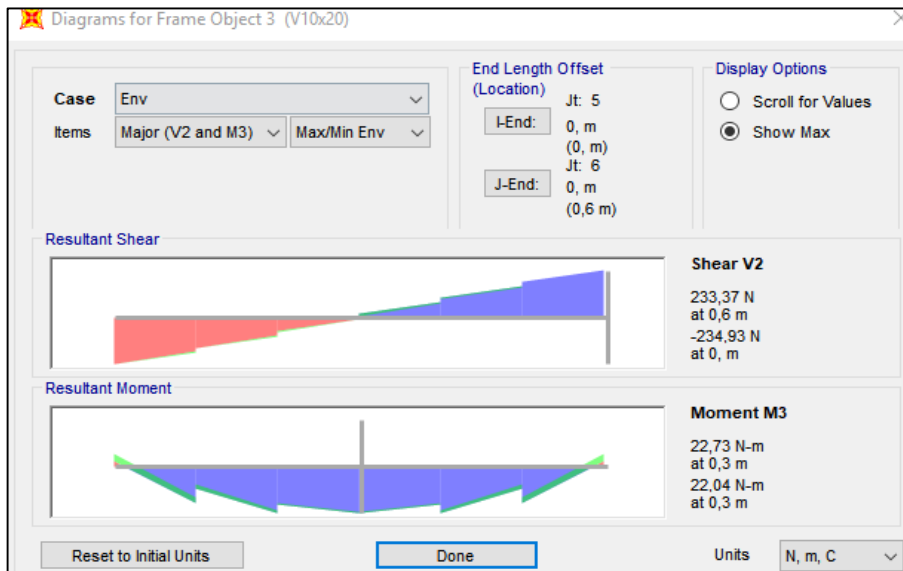
Figura 63. Momentos resultantes en tablero - Modelo 3 con neopreno



Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente se encontraron los valores de esfuerzo (momento y cortante) en las vigas del modelo, como se muestra a continuación:

Figura 64. Resultantes de Momento y cortante en vigas - Modelo 3 con neopreno

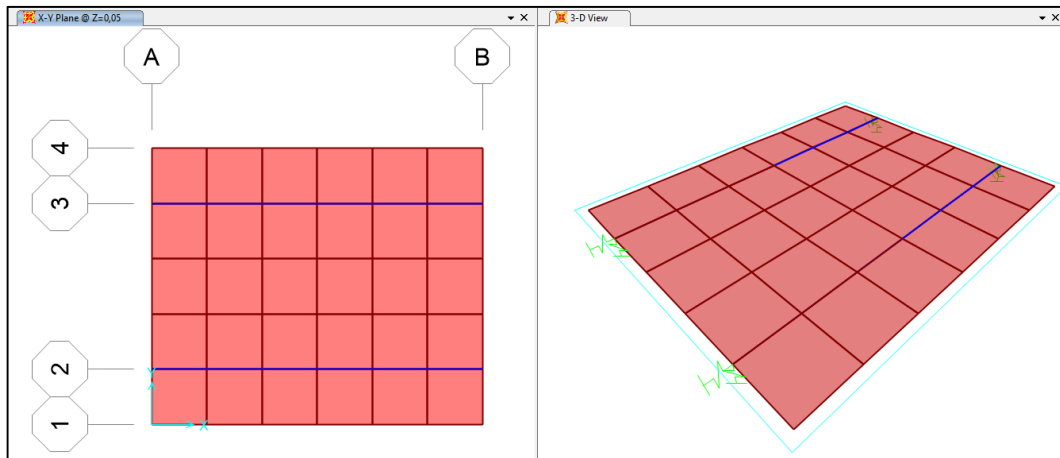


Fuente: Elaboración propia.

9.2.5 Modelo 3 - Con apoyos elastoméricos de caucho reciclado

El modelo 3 con apoyos elastoméricos en caucho reciclado, es cuando la estructura tiene apoyos de lámina de caucho en la parte lateral. En este caso, se modelo numéricamente una estructura apoyada sobre resortes, como se aprecia a continuación:

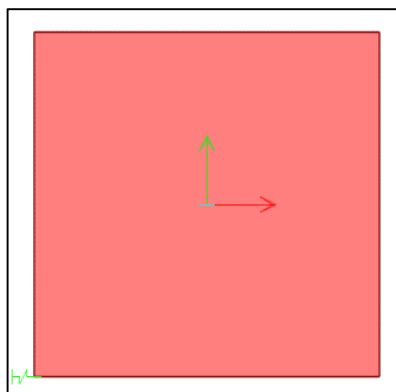
Figura 65. Vistas modelo 3, con apoyos en caucho reciclado



Fuente: Elaboración propia.

Para la estructura modelada, se tomaron las siguientes direcciones para los ejes locales del tablero (1 en rojo y 2 en verde).

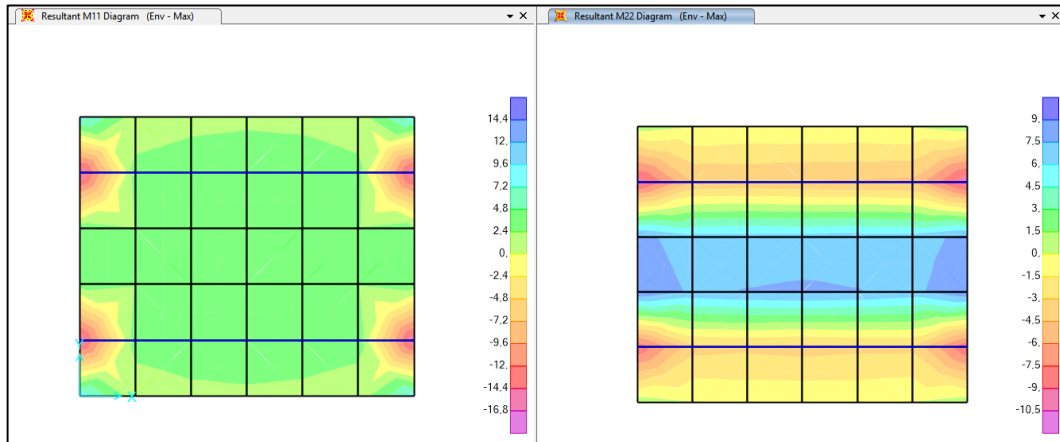
Figura 66. Dirección de los ejes locales



Fuente: Elaboración propia.

En primer lugar, se determinaron los valores de momento en el tablero, tanto en la dirección 1-1 como en la dirección 2-2, tal y como se presenta a continuación:

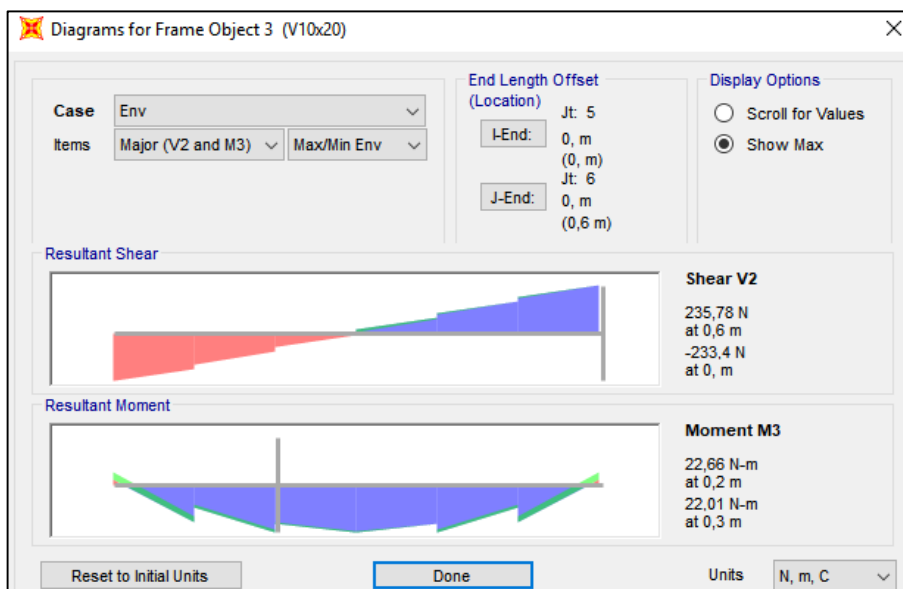
Figura 67. Momentos resultantes en tablero - Modelo 3 con caucho reciclado



Fuente: Elaboración propia

Posteriormente se encontraron los valores de esfuerzo (momento y cortante) en las vigas del modelo, como se muestra a continuación:

Figura 68. Resultantes de Momento y cortante en vigas - Modelo 3 con caucho reciclado



Fuente: Elaboración propia

9.3 RESUMEN DE RESULTADOS OBTENIDOS

A continuación, se presenta el resumen de todos los resultados obtenidos de la modelación de las vigas simplemente apoyadas para todas las condiciones. Cabe resaltar, que todos los resultados de los modelos numéricos concuerdan con los de los modelos físicos mostrados en capítulos anteriores.

9.3.1 Valores de momentos en el tablero

De los modelos se obtuvieron los valores de momento crítico para el tablero en las dos direcciones principales. Para cada una de las condiciones de apoyo se tienen los siguientes valores:

Tabla 18. Tabla comparativa de Momentos en el tablero.

	M 1-1 (N.m)	M 2-2 (N.m)
Mod 1 – Sin neoprenos	-15.91	-8.55
Mod 2 – Neoprenos	-15.27	-8.37
Mod 2 – Caucho reciclado	-14.89	-8.14
Mod 3 – Neoprenos	-15.43	-8.46
Mod 3 – Caucho reciclado	-15.08	-8.30

Fuente: Elaboración propia

9.3.2 Valores de momento y cortante en las vigas

De los modelos también se obtuvieron los valores de momento máximo y cortante máximo para las vigas. Para cada una de las condiciones de apoyo se tienen los siguientes valores:

Tabla 19. Comparativo de momento y cortante en vigas

	M_{máx.} (N.m)	V_{máx.} (N)
Mod 1 – Sin neoprenos	26.31	246.05
Mod 2 – Neoprenos	22.73	234.93

	M_{máx.} (N.m)	V_{máx.} (N)
Mod 2 – Caucho reciclado	22.66	233.78
Mod 3 – Neoprenos	24.96	239.09
Mod 3 – Caucho reciclado	24.12	237.68

Fuente: Elaboración propia

9.3.3 Valores de desplazamientos

Finalmente, de los modelos se obtuvieron los valores de desplazamiento máximo en cada una de las direcciones. Para la primera condición (simplemente apoyada) el desplazamiento es cero (0 mm) en cada una de las direcciones. Para cada una de las condiciones de apoyo se tienen los siguientes valores de desplazamiento longitudinal (δx), desplazamiento transversal (δy) y desplazamiento vertical (δz):

Tabla 20. Comparativo desplazamientos

	δx (mm)	δy (mm)	δz (mm)
Mod 1 – Sin neoprenos	0	0	0
Mod 2 – Neoprenos	1.71	0.12	0.07
Mod 2 – Caucho reciclado	3.51	0.54	0.27
Mod 3 – Neoprenos	1.60	0.11	0.06
Mod 3 – Caucho reciclado	3.12	0.48	0.21

Fuente: Elaboración propia

10 ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación, se presenta el análisis de los resultados obtenidos al implementar láminas de caucho reciclado como elementos de apoyo en el modelo de vigas en concreto simplemente apoyadas. Los resultados analizados en la presente sección son los de ambos modelos (tanto físicos como numéricos).

10.1 ANÁLISIS DE MOMENTOS EN EL TABLERO

En primer lugar, se realiza el análisis de resultados de los valores de momento en el tablero de los modelos.

10.1.1 Modelo 2

A continuación, se presenta una tabla comparativa entre los valores de momento en las direcciones 1 y 2 del tablero, obtenidos del análisis numérico de los modelos 1 y 2.

Tabla 21. Comparación M1-1 y M2-2 en tablero para el Modelo 2

	M 1-1 (N.m)	M 2-2 (N.m)	M 1-1 con base en Mod 1	M 1-1 con base en Mod 1	M 2-2 con base en Mod 1	M 2-2 con base en Mod 1
Mod 1 – Sin neoprenos	-15.91	-8.55	0	0.00%	0	0.00%
Mod 2 – Neoprenos	-15.27	-8.37	-0.64	-4.02%	-0.18	-2.11%
Mod 2 – Caucho reciclado	-14.89	-8.14	-1.02	-6.41%	-0.41	-4.80%

Fuente: Elaboración propia

En comparación con el modelo 1, el cual no presenta apoyos elastoméricos en ninguna de sus caras, es posible ver una reducción en el momento 1-1 presentado en el modelo con placa de neopreno de 0.64N.m equivalente al 4.02%, y una reducción de 1.02N.m en el modelo con caucho reciclado equivalente a un 6.41% menos que en el modelo 1. En el caso del momento 2-2, presento una reducción de 2.11% y 4.8% para los modelos con neopreno y caucho reciclado respectivamente, lo cual significa que para los casos donde el modelo viene incorporado con algún tipo de material elastomérico, los momentos son menores, y por ende sus esfuerzos reduciendo así el impacto que estos puedan llegar a sufrir.

De igual forma, es posible apreciar que la opción de colocar como apoyo el caucho reciclado presenta una reducción mayor en los momentos en el tablero, lo cual representaría preliminarmente, un mejor funcionamiento mecánico del modelo por reducción de los esfuerzos.

10.1.2 Modelo 3

A continuación, se presenta una tabla comparativa entre los valores de momento en las direcciones 1 y 2 del tablero, obtenidos del análisis numérico de los modelos 1 y 3.

Tabla 22. Comparación M1-1 y M2-2 en tablero para el Modelo 3

	M 1-1 (N.m)	M 2-2 (N.m)	M 1-1 con base en Mod 1	M 1-1 con base en Mod 1	M 2-2 con base en Mod 1	M 2-2 con base en Mod 1
Mod 1 – Sin neoprenos	-15.91	-8.55	0	0.00%	0	0.00%
Mod 3 – Neoprenos	-15.43	-8.46	-0.48	-3.02%	-0.09	-1.05%
Mod 3 – Caucho reciclado	-15.08	-8.3	-0.83	-5.22%	-0.25	-2.92%

Fuente: Elaboración propia

Comparando los resultados del modelo 3 (con apoyos elastoméricos localizados lateralmente en las vigas), con los resultados del modelo 1, es posible apreciar para el momento 1-1 en el tablero, una reducción de 0.48N.m para el caso del modelo con neopreno, y de 0.83N.m para el modelo con caucho reciclado, representando disminuciones del 3.02% y 5.22% respectivamente. Para el caso del momento 2-2, las reducciones son de 0.09N.m y 0.25N.m, equivalentes a un 1.05% y a un 2.92% respectivamente, lo cual nos lleva a inferir que definitivamente este tipo de apoyos si reducen los momentos en el tablero del modelo, razón por la cual es viable su implementación.

Al comparar ambos tipos de apoyos elastoméricos, vemos una diferencia de más de 2 puntos porcentuales en ambos momentos en el tablero, a favor del modelo con caucho reciclado, razón que sustenta que es un material más que viable para este tipo de condiciones.

10.1.3 Modelos 2 y 3

Adicionalmente, se hace la comparación entre los resultados obtenidos para los momentos del tablero en las direcciones 1-1 y 2-2 para todas las configuraciones, tal y como se presenta a continuación:

Tabla 23. Comparación M1-1 y M2-2 en tablero para los tres modelos

	M 1-1 (N.m)	M 2-2 (N.m)	M 1-1 con base en Mod 1	M 1-1 con base en Mod 1	M 2-2 con base en Mod 1	M 2-2 con base en Mod 1
Mod 1 – Sin neoprenos	-15.91	-8.55	0	0.00%	0	0.00%
Mod 2 – Neoprenos	-15.27	-8.37	-0.64	-4.02%	-0.18	-2.11%
Mod 2 – Caucho reciclado	-14.89	-8.14	-1.02	-6.41%	-0.41	-4.80%
Mod 3 – Neoprenos	-15.43	-8.46	-0.48	-3.02%	-0.09	-1.05%
Mod 3 – Caucho reciclado	-15.08	-8.3	-0.83	-5.22%	-0.25	-2.92%

Fuente: Elaboración propia

Si se tienen en cuenta los modelos que tienen incorporado el neopreno, vemos una reducción mayor de los momentos en el modelo 2, con las placas colocadas en la parte inferior de las vigas para ambos momentos, resultado que nos lleva a decir que funcionan de una manera más adecuada la colocación de estos apoyos en este lugar y que la estructura del modelo tendrá una capacidad de disipación de esfuerzos mayor si son colocados en este punto.

Por otra parte, analizando los modelos que tienen incorporado la lámina de caucho reciclado, se ve que también presentan la misma condición que los que tienen incorporado el neopreno, al presentar una disminución mayor en los momentos cuando las láminas están colocadas en la parte inferior de las vigas, fenómeno que nos lleva a concluir que para que el tablero del modelo tenga un mejor comportamiento, se deben colocar las láminas en la parte inferior de las vigas.

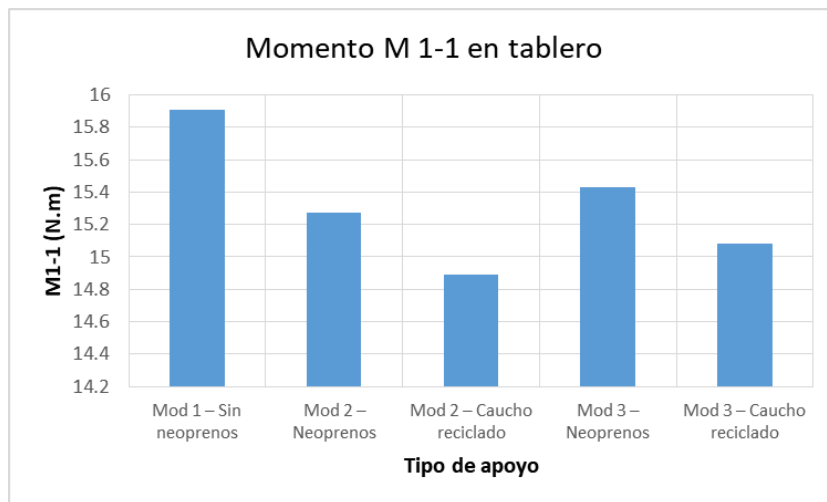
Tabla 24. Comparación M1-1 y M2-2 en tablero para los tres modelos

	M 1-1 (N.m)	M 2-2 (N.m)	M1-1 Variación respecto a Mod 2 - Neoprenos	M2-2 Variación respecto a Mod 2 - Neoprenos	M1-1 Variación respecto a Mod 2 - Caucho	M2-2 Variación respecto a Mod 2 - Caucho
Mod 1 – Sin neoprenos	-15.91	-8.55	4.19%	2.15%	3.11%	1.06%
Mod 2 – Neoprenos	-15.27	-8.37	0%	0%	-1.04%	-1.06%
Mod 2 – Caucho reciclado	-14.89	-8.14	-2.49%	-2.74%	-3.49%	-3.78%
Mod 3 – Neoprenos	-15.43	-8.46	1.04%	1.07%	0%	0%
Mod 3 – Caucho reciclado	-15.08	-8.30	-1.24%	-0.83%	-2.26%	-1.89%

Fuente: Elaboración propia

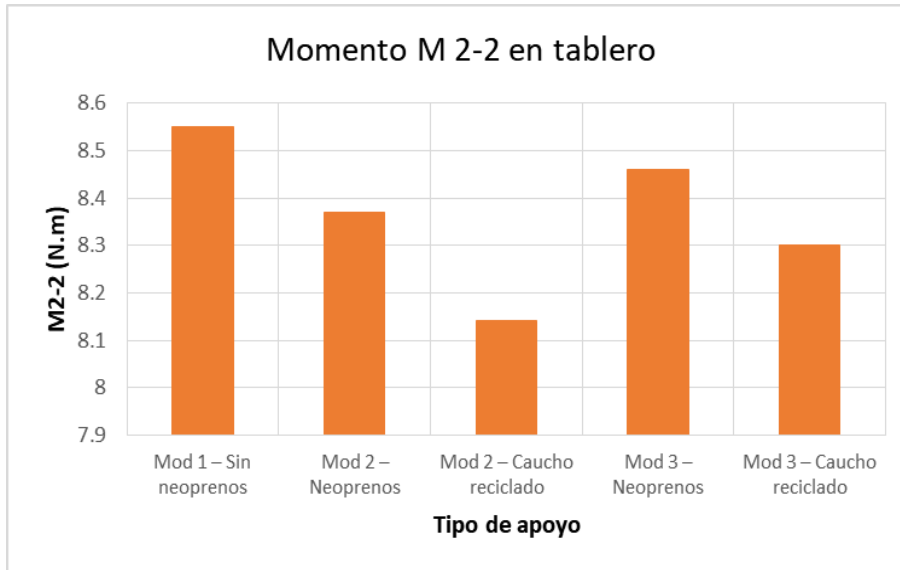
Si se analizan conjuntamente todos los tipos de apoyo, con las diferentes localizaciones planteadas para los apoyos elastoméricos, y se tiene en cuenta también el modelo 1 sin estos apoyos, es posible apreciar que comparando los resultados del neopreno en la parte inferior de las vigas, tanto el momento 1-1 como el 2-2, presentan un aumento en el modelo 1, lo cual nos lleva a la situación más crítica en la que se comportaría el modelo, razón por la cual se descarta su implementación, y a que comparado con su ubicación en la parte lateral de las vigas tampoco funcionaria. Si se compara con los resultados obtenidos para las láminas de caucho, es posible apreciar que se tiene un comportamiento mejor colocando este tipo de material, y que se presenta una reducción aún más considerable si es colocado en la parte inferior de las vigas. Con respecto a la comparación entre las láminas de neopreno colocadas en las caras laterales de las vigas, es posible ver que para el caso del modelo 1, los momentos 1-1 y 2-2 presentan un aumento considerable, razón por la cual no es viable colocarlo sin apoyos elastoméricos. Por su parte a pesar de que el neopreno localizado en la cara inferior de las mismas, presenta una reducción de los momentos del tablero del elemento, esta no es tan considerable como la que se presenta colocando las láminas de caucho reciclado en la parte inferior de las vigas, razón por la cual esta sería la opción más viable para mejorar el comportamiento del elemento. El comportamiento del M1-1 y M2-2 en el tablero en función del tipo de apoyo se puede apreciar en las siguientes figuras:

Figura 69. Momento M1-1 en tablero



Fuente: Elaboración propia

Figura 70. Momento M2-2 en tablero



Fuente: Elaboración propia

10.2 ANÁLISIS DE MOMENTOS EN VIGAS

Posteriormente se hace el análisis de los valores de momentos encontrados en las vigas para cada modelo, y para cada una de las condiciones de apoyo trabajadas (Tipo de material y localización).

10.2.1 Modelo 2

A continuación, se presenta una tabla comparativa entre los valores de momento en las vigas, obtenidos del análisis numérico de los modelos 1 y 2.

Tabla 25. Comparación de M máx para las vigas – Modelo 2

	M máx. (N.m)	Variación con respecto a Mod 1	Variación con respecto a Mod 1
Mod 1 – Sin neoprenos	26.31	0	0.00%
Mod 2 – Neoprenos	22.73	3.58	-13.61%
Mod 2 – Caucho reciclado	22.66	3.65	-13.87%

Fuente: Elaboración propia

Analizando los momentos encontrados en las vigas comparados contra el modelo 1, es posible apreciar que para el caso del modelo con los apoyos elastoméricos localizados en la parte inferior de las vigas, se presenta una reducción bastante considerable del momento en las vigas del elemento, razón por la cual es necesaria la implementación de estos apoyos en el mismo.

Analizando la tabla 25 se determina que, para el modelo con la placa de neopreno, se tiene una reducción de 3.58 N.m, mientras que para el modelo con las láminas de llanta reciclada, se tiene una reducción de 3.65 N.m, equivalentes al 13.61% y 13.87% respectivamente. Esto denota que para el caso del momento en las vigas funciona mejor la implementación del apoyo con material de caucho reciclado en la parte inferior de las mismas.

10.2.2 Modelo 3

A continuación, se presenta una tabla comparativa entre los valores de momento en las vigas, obtenidos del análisis numérico de los modelos 1 y 3.

Tabla 26. Comparación de M máx. Para las vigas – Modelo 3

	M máx. (N.m)	Variación con respecto a Mod 1	Variación con respecto a Mod 1
Mod 1 – Sin neoprenos	26.31	0	0.00%
Mod 3 – Neoprenos	24.96	-1.35	-5.13%
Mod 3 – Caucho reciclado	24.12	-2.19	-8.32%

Fuente: Elaboración propia

Para el caso del modelo 3, con los apoyos elastoméricos localizados en las caras laterales de las vigas, es posible apreciar que se tienen reducciones de 1.35 N.m equivalentes al 5.13% del momento en la viga, para el caso del modelo con neopreno en comparación con el modelo 1. Para el caso del modelo con las láminas de caucho reciclado incorporado, se tiene una reducción de 2.19 N.m equivalente al 8.32% de reducción de momento. Con este análisis, también es posible establecer que el caucho reciclado contribuye a tener una disminución mayor de los momentos en las vigas del elemento.

10.2.3 Modelos 2 y 3

A continuación, se presenta una tabla comparativa entre los valores de momento en las vigas para todas las configuraciones trabajadas.

Tabla 27. Comparación de M máx. Para las vigas de todos los modelos

	M máx. (N.m)	Variación con respecto a Mod 1	Variación con respecto a Mod 1
Mod 1 – Sin neoprenos	26.31	0	0.00%
Mod 2 – Neoprenos	22.73	-3.58	-13.61%
Mod 2 – Caucho reciclado	22.66	-3.65	-13.87%
Mod 3 – Neoprenos	24.96	-1.35	-5.13%
Mod 3 – Caucho reciclado	24.12	-2.19	-8.32%

Fuente: Elaboración propia

Analizando la tabla completa, para los tres modelos elaborados, es posible apreciar que la mayor reducción de momentos en comparación con el modelo que no cuenta con ningún tipo de apoyo elastomérico se presenta en el modelo con las láminas de caucho incorporadas en la parte inferior de las vigas, con una reducción del 13.61% del momento en el modelo, razón que la convierte en la opción más viable para implementar y mejorar el funcionamiento del elemento.

Luego de establecer que la mejor opción de localización de apoyos elastoméricos en el modelo es la de localizarlo en la parte inferior de las vigas, se presenta en la tabla 28 a continuación, una comparación general de todas las configuraciones trabajadas:

Tabla 28. Comparación general para valores de momento en vigas

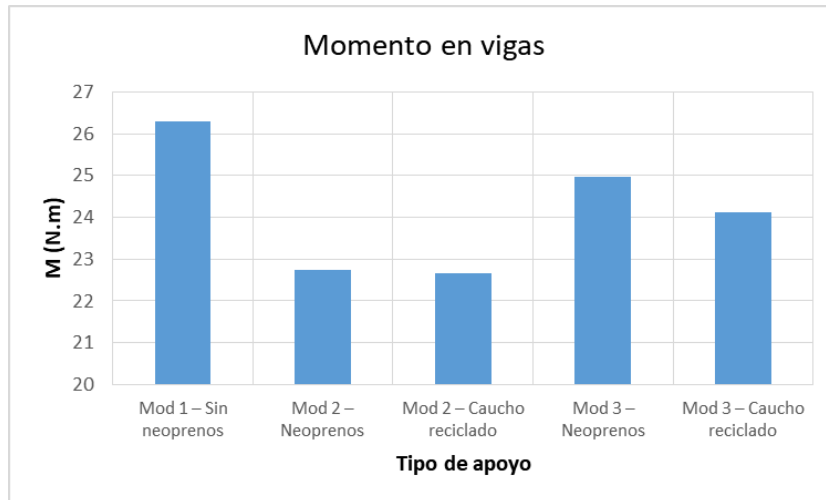
	M_{máx.} (N.m)	Variación de M respecto a Mod 2 - Neopreno	Variación de M respecto a Mod 2 - Caucho
Mod 1 – Sin neoprenos	26.31	15.75%	16.11%
Mod 2 – Neoprenos	22.73	0.00%	0.31%
Mod 2 – Caucho reciclado	22.66	-0.31%	0.00%
Mod 3 – Neoprenos	24.96	9.81%	10.15%
Mod 3 – Caucho reciclado	24.12	6.12%	6.44%

Fuente: Elaboración propia

De los valores de la tabla se puede observar que la localización del apoyo es un factor clave en el momento de analizar el comportamiento estructural del elemento, debido a que a pesar de que en el modelo 3 se tiene el mismo material incorporado al elemento, se presenta un aumento de 9.81% en el momento que registra la viga, lo cual denota que la localización de este en las caras laterales de las vigas, no contribuiría a una mejora en el funcionamiento del elemento. Por otro lado, es posible apreciar que la misma situación se presenta al

comparar los modelos con el caucho reciclado incorporado, con un aumento de 6.44% en el momento de la viga, razón por la cual la mejor opción es la localización de estos apoyos en la parte inferior de las mismas como lo tiene el modelo 2. El comportamiento del Momento en las vigas en función del tipo de apoyo se puede apreciar en la siguiente figura:

Figura 71. Momento en vigas



Fuente: Elaboración propia

10.3 ANÁLISIS DE CORTANTE EN VIGAS

En la presente sección se hace el análisis de los valores de cortante encontrados en las vigas para cada modelo, y para cada una de las condiciones de apoyo trabajadas (Tipo de material y localización).

10.3.1 Modelo 2

A continuación, se presenta una tabla comparativa entre los valores de cortante en las vigas, obtenidos del análisis numérico de los modelos 1 y 2.

Tabla 29. Comparación de V máx para las vigas – Modelo 2

	V máx. (N)	Variación con respecto a Mod 1 (N)	Variación con respecto a Mod 1
Mod 1 – Sin neoprenos	246.05	0	0.00%
Mod 2 – Neoprenos	234.93	-11.12	-4.52%
Mod 2 – Caucho reciclado	233.78	-12.27	-4.99%

Fuente: Elaboración propia

Comparando los resultados encontrados en los esfuerzos cortantes de las vigas, se establece que para el caso del modelo con las láminas incorporadas en la parte inferior de las vigas, este valor es menor para ambos casos de apoyos elastoméricos, comparado con el modelo 1 que no cuenta con ellos. Esto representa disminuciones del mismo en 11.12N (4.52%) y 12.27N (4.99%) respectivamente. Analizando estos resultados, es posible establecer que se tiene una mayor disminución del esfuerzo cortante con la utilización de las láminas de caucho reciclado que con el neopreno tradicional planteando a esta alternativa como una buena opción para mejorar el comportamiento estructural del elemento.

10.3.2 Modelo 3

A continuación, se presenta la tabla comparativa entre los valores de cortante en las vigas, obtenidos del análisis numérico de los modelos 1 y 3.

Tabla 30. Comparación de V máx. Para las vigas – Modelo 3

	V máx. (N)	Variación con respecto a Mod 1 (N)	Variación con respecto a Mod 1
Mod 1 – Sin neoprenos	246.05	0	0.00%
Mod 3 – Neoprenos	239.09	-6.96	-2.83%
Mod 3 – Caucho reciclado	237.68	-8.37	-3.40%

Fuente: Elaboración propia

Si se compara el modelo 3, con los apoyos elastoméricos localizados en las caras laterales de las vigas, es posible apreciar una disminución de este cortante significativa a su vez por lo que se confirma que la utilización de estos es requerida para el funcionamiento correcto del elemento. De la misma manera que para el caso del modelo 2, se puede determinar que la placa de caucho reciclado funciona de una manera más adecuada que la del neopreno tradicional, debido a que la disminución del cortante es mayor implementando este material 6.96N (2.83%) Vs. 8.37N (3.40%). Luego de esta interpretación, es posible apreciar que las disminuciones del esfuerzo cortante en la viga son mayores en el modelo con los apoyos elastoméricos localizados en la parte inferior de las vigas.

10.3.3 Modelos 2 y 3

A continuación, se presenta una tabla comparativa entre los valores de momento en las vigas para todas las configuraciones trabajadas.

Tabla 31. Comparación de V máx. Para las vigas de todos los Modelos

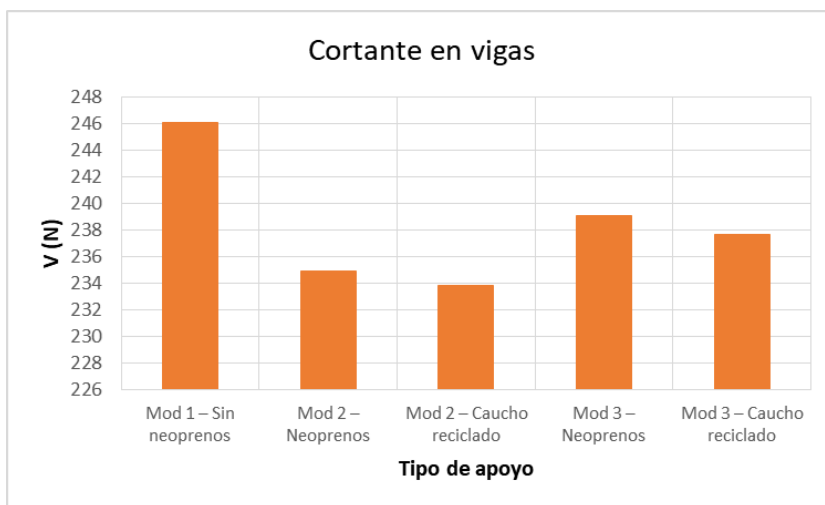
	V máx. (N)	Variación de V respecto a Mod 2 - Neopreno	Variación de V respecto a Mod 2 - Caucho
Mod 1 – Sin neoprenos	246.05	4.73%	5.25%
Mod 2 – Neoprenos	234.93	0.00%	0.49%
Mod 2 – Caucho reciclado	233.78	-0.49%	0.00%
Mod 3 – Neoprenos	239.09	1.77%	2.27%
Mod 3 – Caucho reciclado	237.68	1.17%	1.67%

Fuente: Elaboración propia

Según los valores mostrados en la tabla, se observa que las mayores disminuciones de cortante se presentan para el caso del modelo 2, registrándose el menor valor del cortante para el caso de la lámina de caucho. Esta presenta una disminución con respecto al mismo

modelo, pero con la lámina de neopreno de 0.49%, y de 1.77% y 1.17% en comparación con la localización de estos apoyos en las caras laterales de las vigas. Por ende, se puede establecer que la mejor opción para localizar estos apoyos según los valores de cortante registrados para las vigas del modelo, es en la parte inferior de las vigas, y con la incorporación de las láminas de caucho reciclado. El comportamiento del Cortante en las vigas en función del tipo de apoyo se puede apreciar en la siguiente figura:

Figura 72. Cortante en vigas



Fuente: Elaboración propia

10.4 ANÁLISIS DE DESPLAZAMIENTO

De acuerdo con los valores de la tabla, se aprecian diferencias considerables en los desplazamientos en los tres ejes que pueden llegar a sufrir el elemento, dependiendo tanto de la localización de los apoyos elastoméricos, como del tipo de material que se implemente.

En primer lugar, se observa que los mayores desplazamientos en los 3 ejes coordenados, se presentan para los modelos que cuentan con la implementación del caucho reciclado como material para apoyo elastomérico, presentando diferencias notorias con respecto a los demás

tipos de desplazamiento. De la misma manera, analizando esta tabla, es posible concluir que estos desplazamientos son mayores para el caso del Modelo 2, el cual es el que presenta los apoyos elastoméricos localizados en la parte inferior de las vigas

Tabla 32. Comparación de desplazamientos para los diferentes modelos

	δx (mm)	Diferencia respecto a Mod 2 - Caucho (mm)	δy (mm)	Diferencia respecto a Mod 2 - Caucho (mm)	δz (mm)	Diferencia respecto a Mod 2 - Caucho (mm)
Mod 1 – Sin neoprenos	0.00	- 3.51	0.00	-0.54	0.00	-0.27
Mod 2 – Neoprenos	1.71	-1.80	0.12	-0.42	0.07	-0.20
Mod 2 – Caucho reciclado	3.51	0.00	0.54	0.00	0.27	0.00
Mod 3 – Neoprenos	1.60	-1.91	0.11	-0.43	0.06	-0.21
Mod 3 – Caucho reciclado	3.12	-0.39	0.48	-0.06	0.21	-0.06

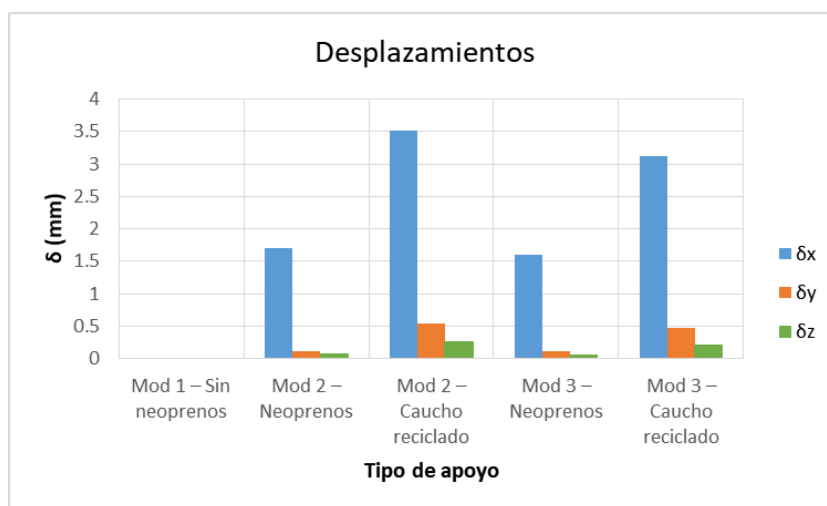
Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con los valores presentados en la tabla, se puede apreciar un aumento de los desplazamientos relativos de la estructura en función del tipo de apoyo que poseen. En primer lugar, para el desplazamiento en la dirección longitudinal (δx) se observa una diferencia de desplazamientos de 3.51 mm con respecto a la condición simplemente apoyada (se debe aclarar que en esta condición no sufre desplazamiento), de -1.80 mm si se comparan con los desplazamientos de la estructura apoyada sobre neoprenos en la parte inferior, y de -1.91 mm si el valor es comprado con el desplazamiento de la estructura apoyada sobre neoprenos ubicados en las caras laterales de la estructura.

En el caso del desplazamiento en la dirección transversal (δy) se observa una diferencia de desplazamientos de 0.54 mm con respecto a la condición simplemente apoyada y de 0.42 mm si se comparan con los desplazamientos de la estructura apoyada sobre neoprenos en la parte inferior. Finalmente, para el desplazamiento vertical (δz) se puede apreciar una diferencia de 0.27 mm con respecto a la condición simplemente apoyada y de 0.20 mm en

comparación con la estructura apoyada sobre neoprenos en la parte inferior. El comportamiento de los desplazamientos de la estructura en función del tipo de apoyo se puede apreciar en la siguiente figura:

Figura 73. Desplazamientos de la estructura



Fuente: Elaboración propia

Lo anterior demuestra que las reducciones de los valores de esfuerzo (momento flector y cortante) tanto en la losa del tablero como en las vigas de los modelos desarrollados, se dan principalmente por un aumento en los desplazamientos de la estructura. En ese orden de ideas, los elementos de caucho reciclado son eficientes para reducir el efecto las vibraciones sobre la estructura modelada, sin embargo, permiten que haya un mayor desplazamiento de las estructuras en las tres direcciones.

11 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En la presente sección se exponen las conclusiones y recomendaciones que se obtuvieron después de haber realizado la presente tesis.

11.1 CONCLUSIONES

En primer lugar, se presentan las conclusiones que se obtuvieron del análisis de resultados desarrollado anteriormente:

- El principal propósito de esta tesis fue estudiar el comportamiento de láminas de caucho reciclado de diferentes espesores, expuesta a vibraciones horizontales en un modelo de vigas simplemente apoyadas para ser implementadas como elemento de apoyo. Así las cosas, los resultados arrojados en la modelación numérica dieron una perspectiva viable y positiva de su implementación, debido a varios factores, entre otros: la modelación numérica muestra que las reacciones en la viga tienden a disminuir, por tanto los momentos y cortantes son menores, aunque los elementos estructurales que se encuentran apoyados sobre este material sufren mayor desplazamientos, los esfuerzos a tensión tienden a reducirse y además este elemento es de fácil acoplamiento en este tipo de estructuras.
- Por otro lado, fue posible constatar que este material es efectivo para ser usado como apoyo elastomérico, toda vez que influyó directamente en la reducción de los esfuerzos del elemento
- La excitación externa a la cual fue sometido el modelo influyó determinantemente en los movimientos de dicha estructura con una frecuencia definida, por lo cual las

amplitudes máximas no resultaron ser destructivas. Así mismo, la lámina de caucho reciclado instalada en la parte inferior de la viga al trabajar como apoyo brindo amortiguamiento permitiendo la rigidez del elemento.

- Luego de llevar a cabo comparaciones entre los momentos presentados en las vigas y en el tablero del modelo, es posible concluir que debido a que la placa de caucho reciclado es un apoyo con características más elásticas que el neopreno tradicional, permite que se genere una reducción en las vibraciones del elemento ensayado.
- De la misma manera, analizando las gráficas de desplazamiento encontradas en la mesa vibratoria, es posible concluir que, a este tamaño de modelo, se presenta una disminución considerable en las vibraciones del elemento, aclarando que para llevarlo a una escala mayor se debe realizar en trabajos futuros un análisis dimensional completo, que permita concluir si es posible su implementación.
- De la misma manera, luego de llevar a cabo el análisis de los diferentes desplazamientos de los modelos, con y sin la incorporación de apoyos elastoméricos en su estructura, en diferentes ubicaciones, es posible establecer que entre más desplazamiento tenga un elemento estructural menor será la cantidad de esfuerzos que deberá soportar. Para el caso de las opciones estudiadas, el caucho reciclado al ser un material que se deja deformar contribuye a liberar los esfuerzos de las estructuras, disipándolos y por ende disminuyendo los daños a los que estos elementos puedan estar sometidos. Sin embargo, para que esta conclusión sea aplicable en elementos a escala real, se debe realizar un análisis dimensional para poder llevar desde lo micro hasta lo macro esta conclusión, y estudiar con las limitaciones tanto presupuestales, como funcionales y constructivas si esta apreciación es válida en la realidad, considerando por ejemplo las juntas estructurales y las dimensiones que estas tienen en la construcción de estructuras.

-
- Entre menor sea el esfuerzo cortante al que esté sometido un elemento estructural, menores serán los factores que puedan afectar al elemento, y por ende aumentara la seguridad de funcionamiento de este, haciendo que el elemento logre soportar más esfuerzos funcionando de una manera más adecuada. Presupuestalmente hablando, entre menor sea el cortante de un elemento, menor será la cantidad de flejes que requiera, y por ende menor será el costo de fabricación del mismo.
 - Es posible concluir que la implementación de láminas de caucho reciclado para reemplazar el neopreno tradicional como elemento de apoyo de estructuras es viable desde el punto de vista técnico de un modelo físico del tamaño mencionado en el presente proyecto. Para concluir que es viable su utilización en estructuras reales, se debe complementar con estudios ambientales completos, económicos que permitan establecer la factibilidad de utilizar este tipo de material, y estructurales acompañados de análisis dimensionales que contribuyan a establecer si el comportamiento a escala real de este tipo de estructura va a ser el adecuado.
 - Luego de analizados los resultados, es importante concluir que no solamente es importante el tipo de apoyo elastomérico que se le va a colocar a la estructura del modelo a analizar, sino que también se debe tener en cuenta la localización del mismo dentro del sistema, debido a que dependiendo de esto se pueden tener mayores reducciones en cortantes, y momentos tanto para el tablero como para las vigas, reduciendo de esta manera los esfuerzos que soportara la estructura, optimizando su diseño y por ende mejorando su funcionamiento y alargando su vida útil.
 - Según los resultados obtenidos, teniendo en cuenta la localización de las láminas de caucho reciclado que se colocaron en el modelo físico, demuestran que la incorporación de estas laminas en los laterales de las vigas (Modelo 3), a pesar de que reducen los momentos encontrados en las vigas y en el tablero, no lo hacen de

una manera tan significativa como las localizadas en la parte inferior de las mismas (Modelo 2), por lo que debido a esto, y a que las localizadas en la parte inferior tienen un área de contacto mayor, y a que soportan todo el peso del elemento, es posible concluir que son la alternativa más viable para el reemplazo del neopreno en este modelo.

11.2 RECOMENDACIONES

Para finalizar, se presentan algunas recomendaciones a tener en cuenta en trabajos futuros sobre el tema de apoyos elastoméricos en modelos de vigas simplemente apoyadas de concreto:

- Es necesario continuar con la investigación en diferentes escalas bajo ensayos que consideren abanicos de posibles grosores de láminas de caucho reciclado, hasta tener un mayor control en los desplazamientos que se generan en las vigas y en el tablero, minimizando de esta manera el riesgo de colapso de la estructura.
- Igualmente, es pertinente considerar la implementación de estas placas en estructuras reales que se puedan monitorear con sensores de aceleración. En cuanto a los modelos vía simulación numérica, podrían modificarse para estudiar la respuesta de la estructura en forma transversal.
- Sería muy útil, hacer la implementación de una matriz medioambiental completa, complementada por ámbitos de otras disciplinas, como la botánica y la microbiología, por ejemplo, que contribuya a ahondar aún más en este nuevo material, y pueda correlacionarlo directamente con el neopreno, con el fin de establecer medioambientalmente cuál de los dos materiales contribuye más al sostenimiento del planeta.

-
- De la misma manera, se plantea la realización de un análisis económico, incluyendo fabricación, instalación, puesta en funcionamiento, mantenimientos y durabilidad de ambos materiales, con el fin de establecer si económicamente es viable su utilización en estructuras reales.
 - Se requiere un apoyo gubernamental preciso con el fin de poder disponer de mayor cantidad de bancos o centros de acopio para la recolección de neumáticos fuera de uso, permitiendo un mayor control de este producto y evitando la proliferación de vectores y contaminación del medio ambiente.
 - Bajo la necesidad de implementar elementos que puedan sustituir el apoyo convencional, empleado para disipar la energía y los esfuerzos que se dan entre las estructuras simplemente apoyadas, es conveniente implementar medidas de regulación que permitan normalizar los procedimientos en cuanto a las pruebas técnicas necesarias para descartar la viabilidad de uso de dichos materiales.
 - Uno de los aspectos que estimuló el desarrollo del presente documento, es el compromiso de contribuir con el equilibrio y restitución del medio ambiente, situación que se encuentra directamente relacionada con los procesos de reciclaje de este material; así las cosas, es necesario e imperioso reglamentar a nivel nacional acciones para el aprovechamiento y reutilización enfocado en procesos, cuyo incumplimiento acarree medidas sancionatorias monetarias drásticas.
 - Como complemento al trabajo de grado presentado, se deben realizar ensayos de desgaste y deterioro ambiental tanto del neopreno tradicional, como de las láminas de caucho reciclado, con el fin de poder complementar la viabilidad de uso de este material como elemento de apoyo en estructuras.

-
- Como opción de trabajo a futuro, se plantea la variación de parámetros en modelos numéricos tales como la resistencia del concreto, la configuración del refuerzo, y las dimensiones del mismo, junto con la incorporación de láminas de caucho reciclado, con el fin de establecer si estas variables afectan directamente o no en el comportamiento de las estructuras complementadas con este tipo de elemento de apoyo.
 - Se plantea como un posible trabajo a futuro, la correlación estructural entre láminas de caucho reciclado y el neopreno tradicional, con análisis dimensionales completos, que permitan establecer parámetros equivalentes a los presentados en la Norma Colombiana de diseño de Puentes CC-14, vigente en Colombia desde Enero de 2015, con el fin de tener en cuenta las variables que intervienen en el diseño de puentes, y en particular las especificaciones de apoyos para puentes en Colombia, con el fin de establecer si es posible la inclusión de este material dentro de dicha norma, y por ende impulsar su utilización tanto en estructuras de puentes existentes, como en el diseño de estos a futuro.
 - Finalmente, otro aspecto a estudiar en futuras investigaciones es la influencia del espesor de la lámina de caucho reciclado, y la determinación de un valor adecuado que pueda ser equivalente al neopreno utilizado en estructuras, con el fin de utilizar materiales más eficientes tanto técnica como económicamente, sin tener estructuras sub o sobredimensionadas.

BIBLIOGRAFÍA

ALBANO, C, Camacho, N, Hernández, M, Bravo, A. J, & Guevara, H. Estudio de concreto elaborado con caucho de reciclado de diferentes tamaños de partículas. Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela, (2008), 23(1), pp. 67-75.

Alonso, Matías Ingeniería Industrial y Viola, Martin – LU: 1015339 Ingeniería Industrial. Estudio de factibilidad técnica, económica y financiera de una planta de reciclado de neumáticos fuera de uso. Universidad Argentina De La Empresa Facultad De Ingeniería Y Ciencias Exactas. Noviembre 2, 2013. Pág. 36-52.

AVILÉS, R. Dispositivos para el control de vibraciones – Tesis de Pregrado. Universidad Austral de Chile. Valdivia Chile. (2001).

ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SÍSMICA – AIS. Código Colombiano de Diseño Sísmico de Puentes CCP-95. Decreto 3600 de 1996.

CONSUEGRA, F. Vibration analyses for the local and global evaluation of bridges as a tool for structural retrofit. Journal of Construction. Tercer Congreso Colombiano de Ingeniería Sísmica. Bucaramanga, Colombia. (2015).

CAMACHO, A. Análisis y caracterización fisicoquímica del látex de caucho especie Hevea Brasiliensis. (2014). Revista Tumbaga, V. 1, N. 9, pp. 83-97.

CARDONA, L y SANCHEZ L. Aprovechamiento de llantas usadas para la fabricación de pisos decorativos (2011). Universidad de Medellín. Pág. 57-62.

CASTRO, G. Reutilización, reciclado y disposición final de neumáticos. Buenos Aires, Argentina. Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires. (2007).

CRESPO, Saúl D, et at. Análisis de efectos longitudinales y transversales en puentes debidos a cargas vivas vehiculares. Sanfandila, México: Instituto Mexicano del Transporte. (2014).

CRIOLLO, Andrés. Caracterización de Caucho Reciclado proveniente de Scrap y de neumáticos fuera de uso para su potencial aplicación como materia prima. Universidad Politecnica Salesiana. (2014).

DE LEÓN, D. “Modeling and Analysis of Uncertainties for Risk-informed Decisions in Infrastructures engineering”, Journal of Structure and Infrastructure Engineering, (2005) Vol. 1, 1., pp. 19-31.

DE LEÓN, David & Valdés, Jesús. Estado límite de vibraciones de un puente vehicular con base en riesgo y confiabilidad. Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural. Ciudad de México, México (2007).

DNP, Departamento Nacional de Planeación. (2015). Reporte Global de Competitividad 2014-2015. Foro Económico Mundial Síntesis de Resultados para Colombia. DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACIÓN (DNP). (2015).

DNP, Departamento Nacional de Planeación. (2016). Reporte Global de Competitividad 2015-2016. Foro Económico Mundial Síntesis de Resultados para Colombia. DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACIÓN (DNP). (2016).

F.A. LÓPEZ, et at. Situación actual del tratamiento de neumáticos fuera de uso y posibilidades de obtención de negro de humo de alta pureza. (2009).

GARCÍA et al. Modelo estructural y medición de vibraciones dinámicas del puente Fernando Espinosa. Puebla, México. Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, XIII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural. (2002), pp.849-860.

GAVIRIA, William. Caucho Sintético. Revista Universidad Pontificia Bolivariana. (1945). Vol. 11, pp40-41.

GÓMEZ, Araujo. I., Maldonado Rondón, E, y Chio Cho G. Pruebas de Vibración Ambiental en Puentes. Revistas de la Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas UIS Ingenierías, (2010), Volumen 9 (No.1). pp. 55 – 68.

G. J. Peláez Arroyave, S. M. Velásquez Restrepo y D. H. Giraldo Vásquez, “Aplicaciones de caucho reciclado: una revisión de la literatura,” Ciencia e ingeniería Neogranadina, vol. 27, no. 2, pp. 27-50. (2017) DOI: [http:// dx.doi.org/10.18359/rcin.2143](http://dx.doi.org/10.18359/rcin.2143)

INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTES., Secretaria de Comunicaciones y Transportes. Evaluación de puentes mediante análisis de vibraciones. Sanfandila, Qro. (1999).

INVIAS, Instituto Nacional de Vías, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. Norma Colombiana de Diseño de Puentes (CCP-2014). (2014).

JARA, M. & Casas, J. Control de vibraciones en puentes: un estado del arte y de la práctica. Barcelona: Centre Internacional de Mètodes Numèrics en Enginyeria (CIMNE), (2002). ISBN 84-95999-01-3.

KELLY, J. M., & KONSTANTINIDIS, D. (2011). Mechanics of rubber bearings for seismic and vibration isolation. John Wiley & Sons. pp.20-39.

J. VALDEZ, J. De La Colina. Análisis de la Ampliación Dinámica de la Carga Viva en Puentes con Base en Pruebas Experimentales. Revista Tecnológica. ESPOL, (2008), Vol. 21, N.1., pp. 149-156.

LUNA, P. Estudio de la aplicación potencial de compuestos obtenidos con residuos de caucho reciclado provenientes de continental Tire andina como materiales estructurales. Cuenca, Ecuador: Universidad Politécnica Salesiana. (2013).

MUÑOZ, Edgar, & Gómez, David. Análisis de la evolución de los daños en los puentes de Colombia. Revista ingeniería de construcción, (2013), 28(1), pp.37-62.

NAVARRO, Henríquez, F., & Ureña-Muñoz, D. Measurements and analysis of vibrations at Virilla Bridge, national route N° 1. Revista Tecnología en Marcha, (2015), 28(2), pp. 16-32.

PITA, M. Carlos. Refuerzo de estructuras de puentes a través de dispositivos de control de vibraciones. Tesis de Maestría. Universidad Nacional del Cuyo. Mendoza Argentina. (2010).

TORRES, Carlos. Manual para el cultivo del caucho en la Amazonia. Universidad de la Amazonia. (1999).

TIREL, K. Ingeniería de perfil de modernas plantas para reciclaje de neumáticos fuera de uso (NFU). Santiago De Chile 2017.

UNIÓN TEMPORAL OCADE LTDA, CONTROL AMBIENTAL Y DESARROLLO EMPRESARIAL, de Colombia, SANIPLAN, de Brasil y AMBIENTAL S.A., de Argentina. Resumen Ejecutivo. Diagnóstico ambiental sobre el manejo actual de llantas y neumáticos usados generados por el parque automotor de Santa Fe de Bogotá.

VACCA, Gámez, Hermes, et at. Measurement and interpretation of vibrations produced by the traffic in Bogotá D.C. Revista ingeniería de construcción, (2011), 26(1), pp.61-80.

VÉLEZ, Wilber. & Riveros, Carlos. Caracterización dinámica en condiciones de excitación natural de puentes de concreto reforzado. Revista Vector 6. (2011), pp. 36 - 44.

ZELLAT, Kaoutar, & Kadri, Tahar. (2015). Influence of seismic isolation system on bridge responses. Revista ingeniería de Construcción. (2015). 30(3), [online]. 2015, vol.30, n.3, pp.210-214.