

**DETERMINACIÓN DE LA TÉCNICA DE VALIDACIÓN DE UNA PEQUEÑA  
MESA DE SIMULACIÓN SÍSMICA**

**Presentado por:**

**ANDRÉS FELIPE HURTADO TORRES**

**NANFER DARIANI PEREA PALACIOS**

**UNIVERSIDAD LIBRE  
SECCIONAL PEREIRA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS  
INGENIERÍA CIVIL  
PEREIRA - RISARALDA**

**2018**

**DETERMINACIÓN DE LA TÉCNICA DE VALIDACIÓN DE UNA PEQUEÑA  
MESA DE SIMULACIÓN SÍSMICA**

**Presentado por:**

**ANDRÉS FELIPE HURTADO TORRES**

**CODIGO ESTUDIANTIL: 374141136**

**NANFER DARIANI PEREA PALACIOS**

**CODIGO ESTUDIANTIL: 374141060**

**Trabajo de grado para optar el título de  
Ingeniero Civil**

**Director**

**CÉSAR AUGUSTO PEÑUELA MENESES**

**Ph. D Ingeniería Eléctrica**

**UNIVERSIDAD LIBRE  
SECCIONAL PEREIRA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS  
INGENIERÍA CIVIL  
PEREIRA - RISARALDA**

**2018**

**Nota de Aceptación:**

**Aprobado por el Comité de Unidad Académica en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Universidad Libre, para optar el título de Ingeniero Civil.**

---

**Firma de Presidente de Jurado**

---

**Firma del Director de Proyecto**

---

**Firma de Jurado**

---

**Firma de Jurado**

*A Dios, por darnos esa fuerza que a veces necesitamos en los momentos difíciles y por darnos la sabiduría necesaria para poder alcanzar nuestras metas.*

*A nuestros padres William Hurtado, Luz Dary Torres, Hernán Perea y Ayda Zulia Palacios, quienes fueron nuestros motores para llegar a lograr este triunfo, quienes nos formaron como personas de bien y nos inculcaron esos valores éticos los cuales nos sirvieron de gran ayuda para que todo esto fuera posible.*

*A nuestros hermanos que nos sirvieron de motivación para culminar esta etapa tan importante de nuestras vidas, dejándonos así un ejemplo de superación y esfuerzo absoluto.*

*A toda nuestra familia que no nos permitieron abandonar esta lucha a mitad de camino, si no que siempre estuvieron ahí apoyándonos y animándonos a seguir.*

## **AGRADECIMIENTOS**

A nuestros padres que estuvieron ahí dándonos su apoyo incondicional, por creer siempre en nosotros, por brindarnos todo su amor, paciencia, esfuerzo y por ayudarnos en todo momento a cumplir nuestros sueños.

Al doctor César Augusto Peñuela Meneses del grupo de investigación INAP, quien fue el director de nuestro proyecto y el responsable de que este trabajo de grado fuera posible, gracias por su dedicación, esfuerzo y paciencia.

A los ingenieros Leonardo cano y Lina María Gonzales, quienes nos brindaron todo su conocimiento en estructuras para llegar a realizar cálculos que eran indispensables para alcanzar los objetivos de nuestro proyecto.

Al ingeniero Cristhian Amariles, quien fue la persona que nos ayudó a realizar todos los ensayos de laboratorio y quien nos suministró todos los equipos necesarios para las prácticas de laboratorio.

A los docentes, familiares, amigos y todas aquellas personas que de alguna u otra manera nos ayudaron constantemente en este proceso de formación personal y profesional.

## TABLA DE CONTENIDO

	Pag
INTRODUCCIÓN .....	22
1 DEDINICIÓN DEL PROYECTO .....	24
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	24
1.2 JUSTIFICACIÓN.....	25
1.3 OBJETIVOS DEL PROYECTO.....	26
1.3.1 Objetivo general. ....	26
1.3.2 Objetivos específicos. ....	26
2 MARCOS DE REFERENCIA.....	27
2.1 MARCO TEÓRICO .....	27
2.1.1 Localización Espacial y Temporal.....	29
2.2 MARCO LEGAL.....	36
2.3 MARCO CONCEPTUAL .....	47
2.3.1 Principales componentes de una mesa de simulación sísmica.....	51
3 ESTADO DEL ARTE .....	53
3.1 MESAS SISMICAS EN COLOMBIA .....	53
3.1.1 Simulador sísmico uniaxial de la universidad del valle.....	53
3.1.2 Mesa de simulación sísmica universidad de los andes.....	54
3.1.3 Simulador sísmico universidad EAFIT.....	55
4 MODELOS MATEMÁTICOS DEL PROBLEMA .....	57
4.1 NOTACIÓN CIENTÍFICA.....	57
4.2 CIFRAS SIGNIFICATIVAS. ....	57
4.3 OPERACIONES ARITMÉTICAS CON CIFRAS SIGNIFICATIVAS. ....	58

4.4	REGLAS DE REDONDEO.....	59
4.5	SEMEJANZA .....	60
4.6	ESCALAMIENTO DE FUERZA. ....	63
4.7	ESPECTRO DE FOURIER. ....	64
4.8	PROCESAMIENTO DE SEÑALES SISMICAS (MATLAB). ....	71
4.9	ANÁLISIS DE VIGAS EN VOLADIZO.....	72
4.9.1	Voladizo con carga puntual en el extremo. ....	73
4.9.2	2º Teorema de Mohr. ....	73
4.10	MÓDULO DE ELASTICIDAD.....	74
5	MEMORIA DE CÁLCULOS.....	75
5.1	CÁLCULO DE DESPLAZAMIENTOS (CÁLCULOS MATEMATICOS) .....	78
5.2	ANÁLISIS DEL DESPLAZAMIENTO PROTOTIPO Y MODELO EN ETABS 82	
6	CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO. ....	93
6.1	MATERIALES PARA LA CONSTRUCCIÓN.....	93
6.2	ENSAYOS DE LABORATORIO.....	96
6.2.1	Granulometría agregado grueso. ....	96
6.2.2	Granulometría agregado fino. ....	99
6.2.3	Equivalente de arena (INV E 133-13).....	101
6.2.4	Materia orgánica (INV E 212-13).....	103
6.2.5	Gravedad específica y porcentaje de absorción en agregados gruesos (INV E 223-13). ....	104
6.2.6	Gravedad específica y porcentaje de absorción en agregados finos (INV E 222-13). ....	108
6.3	DISEÑO DE LA MEZCLA DEL CONCRETO HIDRÁULICO.....	111

6.3.1	Especificaciones.....	111
6.3.2	Procedimiento de diseño de mezcla.....	112
6.4	VACIADO DE CILINDROS Y COLUMNAS.....	120
6.5	ENSAYO DE RUPTURAS DE CILINDRO. ....	125
6.5.1	Ruptura de cilindro a los 21 días.....	125
6.5.2	Ruptura de cilindro a los 28 días.....	127
6.6	PROTOTIPO ELABORADO. ....	129
7	CONCLUSIONES.....	131
8	RECOMENDACIONES .....	133
9	Bibliografía .....	134



## LISTA DE TABLAS

	Pag
Tabla 1. Magnitud e intensidad de los Sismos.....	36
Tabla 2. Requisitos para varilla compactadora. Fuente: NTC 550.....	43
Tabla 3. Requisito de tamaño, tipo y modelo. Fuente: NTC 550. ....	43
Tabla 4. Requisitos para el método de compactación. Fuente: NTC 550. ....	43
Tabla 5. Características de Actuadores actualmente en el mercado. ....	49
Tabla 6. Resumen de escalas.....	64
Tabla 7. Análisis comparativos. ....	81
Tabla 8. Tabla Granulométrica.....	98
Tabla 9. Tabla Granulométrica.....	100
Tabla 10. Datos del ensayo gravedad especifica.....	106
Tabla 11. Tabla de resultados.....	107
Tabla 12. Datos del ensayo gravedad especifica arena. ....	110
Tabla 13. Resultados ensayo gravedad especifica arena.....	111
Tabla 14. Asentamiento recomendado para diversos tipos de construcción y sistema de colocación y compactación. ....	113
Tabla 15. Tamaños máximos de agregados según el tipo de construcción.....	114
Tabla 16. Requerimiento aproximado de agua de mezclado para diferentes asentamientos y tamaños máximos de agregado, con partículas de forma redondeada y textura lisa, en concreto sin aire incluido. ....	115
Tabla 17. Resistencia requerida de diseño cuando no hay datos que permitan determinar la desviación estándar. Fuente: Tecnología del concreto y mortero..	115
Tabla 18. Relación agua cemento. ....	116
Tabla 19. Granulometría del material completo. ....	118
Tabla 20. Porcentaje que contiene el material de grava y arena. ....	119
Tabla 21. Datos para el diseño. ....	119
Tabla 22. Proporción de la mezcla.....	120

## LISTA DE FIGURAS

	Pag
Figura 1 Sismo magnitud 7.1 .....	31
Figura 2 Sismógrafo.....	32
Figura 3 Acelerógrafos.....	33
Figura 4 Micro-tremores.....	34
Figura 5. Tipos de fallas durante el ensayo. ....	46
Figura 6. Descripción de los patrones de fallas. ....	46
Figura 7. Descripción de los patrones de fallas.....	47
Figura 8. Diseño para una mesa de simulación sísmica.....	48
Figura 9 Simulador Sísmico Uniaxial. ....	54
Figura 10 Mesa de Simulación Sísmica Universidad de los Andes. ....	55
Figura 11 Mesa de Simulación Sísmica Universidad Eafit.....	56
Figura 12 Análisis Dimensional.....	61
Figura 13 Semejanza Cinética .....	61
Figura 14. Representación de la función $f(t)$ en el intervalo $[0,1]$ seg. ....	67
Figura 15 Señal creada en Excel para validar rutina de Matlab.....	69
Figura 16.Sismo Creado rutina Matlab. ....	69
Figura 17. Señal Sísmica. Fuente: Señales sísmicas.....	70
Figura 18. Sismo México 1985.....	71
Figura 19. Viga en voladizo con carga puntual en el extremo. ....	73
Figura 20 Escalamiento Modelo y Prototipo. ....	75
Figura 21. Sección del material.....	82
Figura 22. Carga aplicada.....	83
Figura 23. Propiedades del material. ....	84
Figura 24. Vista del prototipo. ....	85
Figura 25. Vista del prototipo desplazado.....	85
Figura 26. Vista 2 del prototipo desplazado.....	86
Figura 27. Resultado desplazamiento.....	87
Figura 28. Sección del material.....	88

Figura 29. Carga aplicada al modelo.....	89
Figura 30. Propiedades del material. ....	90
Figura 31. Vista del modelo. ....	91
Figura 32. Vista del modelo desplazado. ....	91
Figura 33. Vista 2 del modelo desplazado. ....	92
Figura 34. Resultado desplazamiento del modelo. ....	92
Figura 35. Grava obtenida de la cantera Jasmín (La Virginia).....	94
Figura 36. Arena obtenida de la cantera Jasmín (La Virginia). ....	95
Figura 37. Formaleta para vaciar el concreto. ....	96
Figura 38. Material seleccionado para granulometría.....	97
Figura 39. Curva granulométrica agregado grueso.....	98
Figura 40. Granulometría uniforme. ....	99
Figura 41. Material seleccionado para granulometría. ....	99
Figura 42. Curva granulométrica agregado grueso.....	100
Figura 43. Curva Granulométrica Discontinua. ....	101
Figura 44. Ensayo equivalente de arena. ....	102
Figura 45. Ensayo equivalente de arena. ....	103
Figura 46. Ensayo materia orgánica. ....	104
Figura 47. Material sumergido en agua. ....	105
Figura 48. Material secado superficial. ....	105
Figura 49. Peso del montaje más la masa sumergida. ....	106
Figura 50. Material sumergido en agua. ....	108
Figura 51. Comprobación del estado saturado. ....	108
Figura 52. Peso del picnómetro más agua. ....	109
Figura 53. Peso picnómetro con agua más la muestra.....	109
Figura 54. Masa seca al horno extraída del picnómetro. ....	109
Figura 55. Concretadora. ....	121
Figura 56. Moldes para la elaboración de los cilindros. ....	121
Figura 57. Mezcla para vaciado de cilindros.....	122
Figura 58. Inicio de llenado.....	123

Figura 59. Enrasado de superficie. ....	123
Figura 60. Desencofre de cilindros. ....	124
Figura 61. Mezcla para el vaciado de la columna. ....	124
Figura 62. Peso del cilindro. ....	125
Figura 63. Resultado de la ruptura del cilindro a los 21 días. ....	126
Figura 64. Ruptura del cilindro a los 21 días. ....	126
Figura 65. Resultado de la ruptura del cilindro a los 28 días. ....	127
Figura 66. Ruptura del cilindro a los 28 días. ....	128
Figura 67. Desencofre de la columna. ....	129
Figura 68. Columna construida. ....	129
Figura 69. Columna construida. ....	130

## **LISTA DE ANEXOS**

Anexo A. Rutina escrita en Matlab. Sismo creado en Excel.

Anexo B. Rutina escrita en Matlab. Señal sísmica.

Anexo c. Rutina escrita en Matlab. Sismo San Francisco.

## RESUMEN

**TÍTULO: DETERMINACIÓN DE LA TÉCNICA DE VALIDACIÓN DE UNA PEQUEÑA MESA DE SIMULACIÓN SÍSMICA UNIDIRECCIONAL.**

**AUTORES: ANDRÉS FELIPE HURTADO TORRES, NANFER DARIANI PEREA PALACIOS.**

**PALABRAS CLAVES:**

**Mesa sísmica, Prototipo, Resistencia, Sensores, Diseño y Desplazamiento.**

### **RESUMEN:**

En este proyecto de investigación se pretende determinar la técnica de validación de una pequeña mesa de simulación sísmica, mediante la elaboración de un prototipo sencillo. El estudio de análisis por magnitud y similitud fue importante para lograr el diseño del modelo a escala, ya que de esto depende que las propiedades físicas y mecánicas del modelo escalado queden con las mismas características del prototipo real con el fin de garantizar que los resultados obtenidos por el prototipo sean iguales a los del modelo, pero en escala reducida.

## **ABSTRAC**

**TITLE: SETTING OF THE TECHNIQUES OF VALIDATION OF A SMALL SISMIC SIMULATION TABLE.**

**AUTHORS: ANDRES FELIPE HURTADO TORRES, NANFER DARIANI PEREA PALACIOS.**

**KEYWORDS:**

Seismic table, prototypes, resistance, motion, sensors, design and displacement.

**DESCRIPTION:**

In this project of investigation, one tries to determine the technology of validation of a small table of seismic simulation, by means of the production of a simple prototype. The study of analysis for magnitude and similarity was important to achieve the design of the model to scale, since on this it depends that the physical and mechanical properties of the climbed model stay with the same characteristics of the royal prototype, in order to guarantee, that the results obtained by the prototype are equal that to those of the model, but in limited scale.

## INTRODUCCIÓN

Los estudios realizados anteriormente sobre desastres naturales en Colombia fueron registros en la primera mitad del siglo XXI y tienen sus antecedentes en estudios a finales del siglo XIX y en diferentes tipos de documentos de dicha época. Como los demás estudios históricos sobre los desastres naturales en Colombia, los de sismicidad histórica tienen antecedentes relativamente antiguos y han seguido una rápida evolución a lo largo de los años.

Los graves desastres naturales ocurridos en Colombia a principios de los años ochenta (terremoto de Popayán 1983, erupción del volcán Nevado del Ruiz 1985 y deslizamiento de Villa Tina, en Medellín, 1987) alertaron a la comunidad científica colombiana ante la necesidad imperiosa de estudiar los niveles de amenaza y vulnerabilidad del país respecto a dichos fenómenos, en este orden de ideas los estudios de sismicidad, en específico los de sismicidad histórica, han jugado un papel importante.<sup>1</sup>

La sismología histórica, por ejemplo, se ocupa de cada uno de los sismos que se han presentado anteriormente y estos estudian sus documentos. Sus efectos; registran los sismos cronológicamente para definir sus relaciones de tiempo y frecuencia.<sup>2</sup> Debido a los diferentes resultados realizados mediante estudios de sismicidad en la región, se puede argumentar que Colombia está ubicada en una zona de alta actividad sísmica.

El eje cafetero es una de las regiones de Colombia la cual está amenazada con un alto nivel de actividad sísmica, y la ciudad de Pereira está ubicada dentro de dicha zona, esto se debe a que Colombia se encuentra unido al denominado cinturón de

---

<sup>1</sup> ESOINOSA BAQUERO, Armando, La sismicidad histórica en Colombia, Revista geográfica venezolana, vol. 44, 2003, P.272

<sup>2</sup> RAMIREZ, Jesús Emilio, Historia de los terremotos en Colombia, Instituto geográfico "Agustín Codazzi", segunda edición, P.12.



fuego que rodea al océano pacífico, caracterizado por ser una zona de alta actividad sísmica y volcánica.<sup>3</sup>

Debido a lo anterior se propone ensayar, estudiar y analizar los posibles efectos que puedan llegar a ocasionar los movimientos sísmicos en modelos reales y a escala, para así poder comprender los resultados y desempeños de cada uno de los elementos estructurales. Todo esto con el fin de garantizar una mejora en los procesos de diseño definido en los códigos de diseño y construcción sismo resistente NSR-10. En este orden de ideas, un simulador sísmico trabaja como un mecanismo comúnmente usado para este fin, y se puede implementar tanto en proyectos de investigación como en docencia universitaria.<sup>4</sup>

Por lo tanto, un simulador sísmico es de gran importancia para los modelos estructurales, ya que, estos tienen la ventaja de simular sismos a una escala reducida, lo cual permite identificar los efectos dinámicos a los cuales fueron sometidos los modelos estructurales y así poder conocer los posibles daños que ocasionará un determinado sismo a la estructura real.

Debido a lo anterior se podrán realizar mecanismos de prevención que puedan ayudar a que la estructura no reciba un impacto mayor al momento de presentarse un determinado sismo, mediante alternativas de reforzamiento estructural para que estas tengan una vida útil mucho mayor.

---

<sup>3</sup> La sismicidad histórica en Colombia, óp. Cit, P.276.

<sup>4</sup> VELEZ, Esteban, Diseño y evaluación de una pequeña mesa de simulación sísmica unidireccional, Universidad Libre, Facultad de Ingenierías, Pereira, 2016, P.17

## 1 DEDINICIÓN DEL PROYECTO

En este proyecto de investigación se pretende definir y diseñar el prototipo de un modelo estructural sencillo para validar el desempeño de una pequeña mesa de simulación sísmica, mostrando así que es posible diseñar modelos a escala reducida que al ser sometidos a movimientos oscilatorios en la mesa de simulación sísmica tengan la capacidad de reproducir (en ambientes controlados) los efectos en estructuras reales.

### 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Colombia se encuentra asentada en la llamada Placa Suramericana, y, adicionalmente, está rodeada por la Placa de Nazca y la Placa del Caribe. Estas placas son láminas duras de roca maciza que conforman la superficie de la tierra (comúnmente conocida como litosfera).

Lo anterior señala que las zonas aledañas a la ciudad de Pereira frecuentemente se vean afectadas por movimientos telúricos, motivo por el cual las estructuras deban contar con elementos necesarios para soportar los esfuerzos dinámicos a las que son sometidas<sup>5</sup>. Los estudios de sismicidad realizados en el país han logrado detectar y clasificar las áreas de mayor influencia sísmica, pero aún no se cuenta con una metodología para predecir ni el momento de ocurrencia del próximo movimiento sísmico, ni las características del fenómeno.<sup>6</sup>

---

<sup>5</sup> CARRILLO, Julián; BERNAL RUIZ, Néstor M.; PORRAS, Pahola. Evaluación del diseño de una pequeña mesa vibratoria para ensayos en ingeniería sismo-resistente. Anales de Documentación [en línea]. N° 1 (15 de mayo, 2013). Disponible en: < [http://www.umng.edu.co/documents/10162/4585612/articulo\\_6.pdf](http://www.umng.edu.co/documents/10162/4585612/articulo_6.pdf) > [citado en febrero 2016]

<sup>6</sup> Servicio Geológico Colombiano. ¿Es posible predecir un Sismo [en línea]? < <http://seisan.sgc.gov.co/RSNC/index.php/component/content/article/67-ies-posible-predecir-un-sismo> > [citado en 13 de mayo de 2015]

Al momento de ensayar el prototipo, se debe tener en cuenta la relación de los materiales, es decir, si el prototipo que está siendo evaluado es diseñado en concreto hidráulico, no se puede construir ni simular en un material diferente a este, ya que, dicho cambio modificaría el módulo de elasticidad, resistencia y otras propiedades físicas del material y al momento de obtener los resultados darían totalmente diferentes.

También se debe tener presente que el prototipo que va a ser utilizado para determinar la técnica de validación de la mesa de simulación sísmica no debe de exceder en un valor extremadamente mayor al valor del peso que resiste la mesa, ya que, este puede afectar en el funcionamiento de la mesa sísmica arrojando así valores erróneos o en su efecto anulando por completo el funcionamiento de esta.

## **1.2 JUSTIFICACIÓN**

Actualmente en la zona de Pereira, sólo se cuentan con mesas de simulación sísmica artesanales con grandes limitaciones al momento de reproducir los efectos reales de la perturbación sísmica. La Universidad Libre de Pereira dio un paso muy importante en el tema de sismicidad al momento de realizar el diseño y evaluación de una pequeña mesa de simulación sísmica unidireccional.

Pero, hasta el momento, dicha mesa de simulación sísmica unidireccional no cuenta con ningún tipo de prototipo diseñado para realizar ensayos que ayuden a analizar el comportamiento dinámico de alguna estructura, teniendo en cuenta que dicho prototipo debe ser diseñado en concreto, debido a que la mayoría de las estructuras reales están hechas de concreto y esto ayudaría a que los análisis dinámicos obtenidos por la mesa sísmica sean similares a los análisis dinámicos que se presenten en una estructura real al momento de presentarse un sismo.

Es por esto por lo que se tuvo la necesidad de realizar el diseño y construcción de un prototipo que cumpliera con todos los requisitos establecidos en el diseño de la mesa sísmica, con lo cual determina la técnica de validación de dicha mesa de simulación.

La construcción del prototipo servirá como ayuda y motivación para que los expertos en ingeniería civil juntos con alumnos de la facultad de ingeniería de la Universidad Libre de Pereira construyan en un futuro diferentes tipos de modelos para ensayos dinámicos en la mesa de simulación.

### **1.3 OBJETIVOS DEL PROYECTO**

#### 1.3.1 Objetivo general.

Definir y diseñar el prototipo de un modelo sencillo para determinar la técnica de validación de una pequeña mesa de simulación sísmica.

#### 1.3.2 Objetivos específicos.

- Revisión de herramientas matemáticas requeridas para el análisis de modelos sísmicos
- Determinar el modelo a escala del prototipo seleccionado de acuerdo con reglas de similitud y semejanza.
- Simular en una plataforma computacional adecuada tanto el modelo a escala como el prototipo y verificar la respuesta bajo condiciones estáticas y dinámicas.

## **2 MARCOS DE REFERENCIA**

A continuación, se presenta el marco referencial, el cual tiene como fin exponer los diferentes tipos de ondas sísmicas que existen, así como los métodos numéricos e instrumentos que son de gran ayuda para la localización de sismos.

### **2.1 MARCO TEÓRICO**

El análisis para entender o estudiar los sismos tienen como base la teoría de elasticidad y la resistencia de los materiales, y para dar a entender sus orígenes se debe llegar a la teoría de la tectónica global, la cual da a entender de manera integrada el origen de los terremotos, volcanes, formación de cadenas montañosas, y la magnetización de la tierra.

Algunas de las cosas que se conocen sobre el interior de nuestro planeta se obtiene a través del estudio de las ondas sísmicas las cuales viajan a través de la tierra, esto se basa en la determinación concreta del tiempo en que las ondas P y S requieren para desplazarse desde un terremoto hasta una estación sismográfica.

Los sismos se describen de acuerdo con dos clases de ondas. Las ondas internas, que a su vez se dividen en ondas primarias (ondas P) y ondas secundarias (ondas S), y las ondas superficiales que se dividen en ondas Rayleigh y ondas love.

Las ondas internas o de volumen se transmiten a través del interior de la tierra y se generan en el foco del terremoto emergiendo a la superficie libre. Por otro lado, las ondas superficiales se propagan en zonas de discontinuidad en el interior de la tierra, puesto que su generación se debe a procesos de acoplamiento de energía en superficies de discontinuidad.

Las ondas P son ondas longitudinales, por lo que el movimiento de vibración de las partículas es en la dirección de propagación de la onda, es decir, semejante al tipo de propagación de las ondas sonoras, de forma que la roca se comprime y se dilata con el paso de la onda. Las ondas S son ondas transversales, por lo que su

movimiento de vibración de partícula es perpendicular a la dirección de propagación de la onda, siendo su velocidad (típicamente entre 2 a 5 km/s, en roca) menor que de las P (con valores típicos entre 4 a 7 km/s en roca), por lo que siempre llegan tras ellas. Este tipo de ondas no puede propagarse en fluidos.<sup>7</sup>

Las ondas codas, las cuales se definen como señales registradas al final de los sismogramas de los eventos locales, posteriores a los arribos de las ondas P y S, siendo su amplitud decreciente en función del tiempo hasta el punto de confundirse con el ruido. Se han establecido como uno de los mecanismos más interesantes para la caracterización geológica del subsuelo debido a su origen dispersivo a partir de ondas primarias en heterogeneidades, por lo que su decaimiento o atenuación está controlado exclusivamente por las características tectónico - estructurales del terreno, independientemente de la magnitud y lejanía del evento.<sup>8</sup>

Las ondas Rayleigh surgen de la propagación de las ondas al incurrir sobre una superficie sin esfuerzo como la superficie de la tierra. Dichas ondas únicamente necesitan de una superficie para su propagación. Se desplazan por ésta de manera que las partículas del medio transmisor describen trayectorias elípticas en sentido contrario al del avance de la onda.<sup>9</sup>

Las ondas Love se generan por un fenómeno de transmisión por la litosfera terrestre y su desplazamiento es casi igual al de las ondas S, sin un desplazamiento vertical, de manera que el suelo se desplazara de un lado a otro respecto de un plano horizontal y paralelo. Las ondas Rayleigh se mueven más deprisa que las Love y estas últimas tampoco se propagan en los fluidos.<sup>10</sup>

---

<sup>7</sup> MOLINA, Sergio, El Tamaño De Los Terremotos: Intensidad y Magnitud, 2004, P99.

<sup>8</sup> BEDOYA, Diego Alexander, VARGAS, Carlos Alberto, Modelos de atenuación para una zona del piedemonte llanero colombiano utilizando atenuación de ondas coda, Vol. 36, N° 2, 2014, P.95.

<sup>9</sup> OCHOA CARDONA, Catalina, URIBE DORADO, José Ignacio, diseño y desarrollo de una experiencia interactiva que trata el tema del comportamiento de edificaciones frente a sismos, para la sala Colombia geodiversa del parque explora, Universidad Eafit, Medellín, 2006, P 16.

<sup>10</sup> MOLINA, Sergio, El Tamaño De Los Terremotos: Intensidad y Magnitud, 2004, P100.

Los sismogramas se establecen como registros temporales de los cuales se pueden observar los movimientos que presenta el suelo al momento de ocurrencia de un terremoto y, por lo tanto, las ondas mencionadas anteriormente y sus diferentes reflexiones y refracciones que dependerán de la distancia del foco del terremoto hasta el sismógrafo que esté registrando la señal. Dicho esto, se puede decir que las características propias de cada uno de los terremotos vienen reflejadas en el trazado de cada sismograma y se da a conocer, de esta manera, su validez.<sup>11</sup>

Los parámetros físicos que caracterizan un terremoto son la localización espacial y temporal de su foco (hipocentro) y su tamaño (energía liberada). A continuación, describiremos estos parámetros.

### **2.1.1 Localización Espacial y Temporal**

El registro de los sismogramas en papel inicia con la llegada de la instrumentación moderna, dicho avance en la tecnología se presenta debido a la propagación que generaron los grandes números de observatorios sismológicos alrededor del mundo, primero se inició con el desarrollo de los métodos gráficos y así dar inicio con la determinación de los epicentros (proyección vertical del foco del terremoto en la superficie de la tierra).

El método se basó en encontrar, a partir del sismograma, el intervalo de tiempo que hay entre la llegada de la onda P y la llegada de la onda S, completando como mínimo tres registros almacenados en diferentes estaciones (figura 1, arriba-izquierda).

Teniendo en cuenta la velocidad de propagación de las ondas sísmicas por el interior de la Tierra, es posible correlacionar dichos intervalos de tiempo con unas distancias medias de recorrido (figura 1, arriba-derecha). Estas curvas,

---

<sup>11</sup> MOLINA, Sergio, *Ibid.*, P99.

denominadas curvas como crónicas, se han obtenido asumiendo una velocidad constante de propagación de la onda P de 7.74 km/s y de 4.28 km/s.

Para la onda S. Las distancias correspondientes a cada intervalo de tiempo S-P se recogen en la tabla que aparece en la figura 1. Así será posible trazar desde cada estación un círculo cuyo radio es la distancia correspondiente al intervalo S-P en el sismograma allí registrado.<sup>12</sup>

El punto de intersección de los círculos nos dará la localización epicentral del terremoto en cuestión (figura, abajo-izquierda). Se une con una línea recta la máxima amplitud de la onda S, medida respecto al nivel base, para cada sismograma, con la distancia media a cada estación, dentro de un nomograma (figura 1, abajo-derecha), el punto donde toque al eje de magnitud Richter determinará el tamaño del terremoto (Magnitud 7.1 en el ejemplo).

---

<sup>12</sup> MOLINA, Sergio, *Ibid.*, p 101



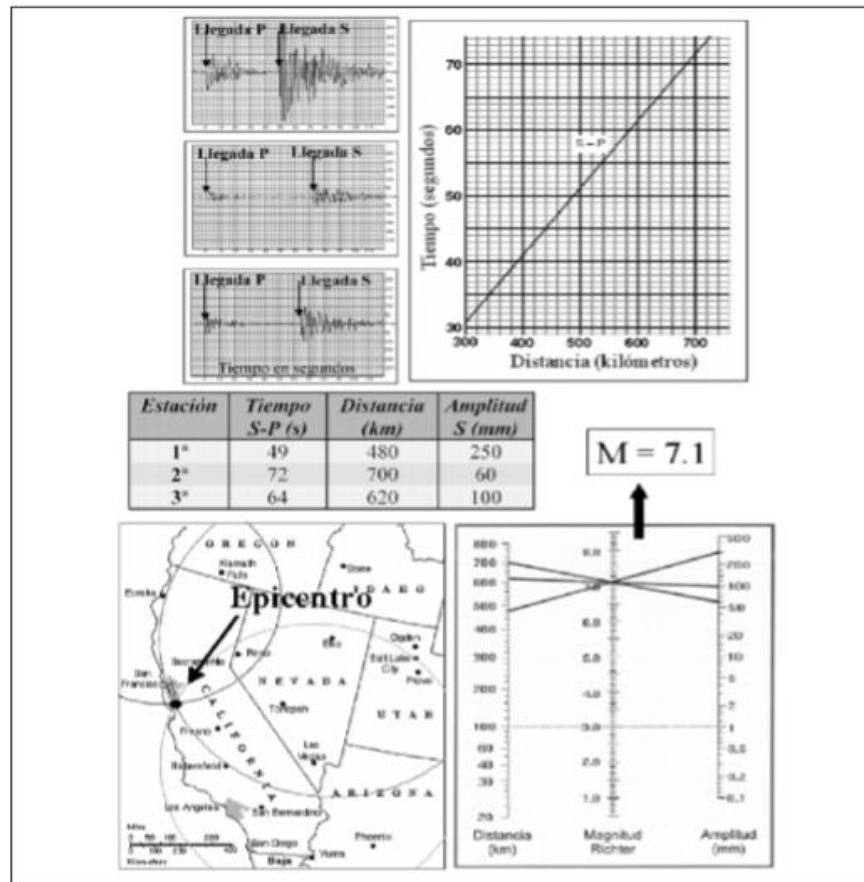


Figura 1 Sismo magnitud 7.1  
 Fuente: El tamaño de los terremotos: intensidad y magnitud.

Los métodos numéricos para la localización hipo central empezaron a desarrollarse en 1919 por L. Geiger y por V. Inglada en 1926. Sin embargo, el verdadero auge de estos métodos llegó con el desarrollo de los ordenadores, herramientas indispensables para llevar a cabo los cálculos numéricos con suficiente rapidez.

El hipocentro, es aquel punto en el interior de la tierra donde se origina el primer movimiento de un sismo y genera la propagación de sus ondas elásticas. Para determinar el hipocentro y tiempo de origen de un terremoto con cierta precisión, se requiere los tiempos de arribo de varias fases químicas provenientes de varias

estaciones, pero es posible utilizar una sola estación sísmica para obtener una estimación aproximada del hipocentro.<sup>13</sup>

Para el registro de los diferentes sismos que se producen en la corteza terrestre se cuenta con los siguientes instrumentos de medición:

- **Sismógrafo:** Es un instrumento que registra las velocidades del suelo causados por el paso de las ondas sísmicas o los desplazamientos, estos registros comúnmente son llamados sismogramas. Su funcionamiento se puede representar mediante un péndulo simple con un grado de libertad, estos equipos se utilizan también para medir las vibraciones producidas por un terremoto, donde se determina la hora, la localización del epicentro, magnitud y la profundidad en la cual se originó.



*Figura 2 Sismógrafo*

*Fuente: Diseño y evaluación de una pequeña mesa de simulación sísmica unidireccional universidad libre.*

Son instrumentos portátiles y compactos a prueba del intemperismo y de construcción robusta para su transporte y manipulación ante el uso que se le imponga, son operados bajo una batería recargable y deben ser capaces de

---

<sup>13</sup> MILLONES, José Luis, Localización de un sismo utilizando una estación de tres componentes, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ciencias Física E.A.P De Física, Lima-Perú, 2005, P8.

registrar al menos tres componentes del movimiento, dos horizontales ortogonales entre sí y un componente vertical.<sup>14</sup>

- **Acelerógrafos:** Son utilizados para medir el movimiento fuerte del suelo causado por el paso de las ondas sísmicas registrando la aceleración del terreno, estos registros son comúnmente llamados acelerogramas. Su funcionamiento se representa mediante un péndulo simple con un grado de libertad, estos son capaces de registrar aceleraciones menores a 0.1% de la aceleración de la gravedad y superiores al 100% de la aceleración de la gravedad.<sup>15</sup>



*Figura 3 Acelerógrafos*

*Fuente: Diseño y evaluación de una pequeña mesa de simulación sísmica unidireccional universidad libre.*

- **Microtremores:** Estos equipos proporcionan el periodo natural del suelo de una forma rápida y práctica, valor que sirve para conocer cuantitativamente el comportamiento dinámico del suelo y para determinar los factores sísmicos relativos al diseño de construcciones sismorresistente.<sup>16</sup>

<sup>14</sup> ORTIZ SALAS, Carmen Elena. Proyecto piloto de medidas de distribución de las intensidades sísmicas en la ciudad de Tacna mediante la intensidad de sismoscopios. Lima – Perú, 2010, p 13.

<sup>15</sup> ORTIZ SALAS, Carmen Elena Ibid., P 14.

<sup>16</sup> ORTIZ SALAS, Carmen Elena Ibid., P 15.



*Figura 4 Micro-tremores*

*Fuente: Diseño y evaluación de una pequeña mesa de simulación sísmica unidireccional universidad libre.*

Los principales parámetros que describen un sismo son:  $T_0$ ,  $X_0$ ,  $S_0$  y  $I$ .

Donde  $T_0$  describe en tiempo local y tiempo universal en el Meridiano de Greenwich (GTM) del sismo,

$X_0$  describe la latitud, longitud y profundidad del sismo.

$S_0$  describe la magnitud  $M$  del sismo.

$I$  describe la intensidad y severidad del sacudimiento del sismo.

La magnitud es una medida cuantitativa de la energía liberada en forma de onda sísmica y se mide en una escala continua.

La intensidad es una medida cualitativa de los efectos en un lugar determinado debido a la ocurrencia de un sismo, en América se utiliza la escala Mercalli.

Con base a estos dos parámetros los sismos se pueden clasificar en función de la cantidad de energía que es liberada (Magnitud) o también mediante el grado de destrucción que causan en un área (Intensidad), como se muestra en la tabla 1.<sup>17</sup>

MAGNITUD RICHTER	INTENSIDAD Y SEVERIDAD	ESCALA DE INTENSIDAD DE MERCALLI MODIFICADA
CERCANOS A 1.0 - 3,0	I	I - No se advierte sino por unas pocas personas y en condiciones de perceptibilidad especialmente favorables.
3.0 – 3.9	II - III	II - Se percibe sólo por algunas personas en reposo, particularmente las ubicadas en los pisos superiores de los edificios III - Se percibe en los interiores de los edificios y casas. Sin embargo, muchas personas no distinguen claramente que la naturaleza del fenómeno es sísmica, por su semejanza con la vibración producida por el paso de un vehículo liviano. Es posible estimar la duración del sismo.
4.0 – 4.9	IV -V	IV - Los objetos colgantes oscilan visiblemente. Muchas personas lo notan en el interior de los edificios aún durante el día. En el exterior, la percepción no es tan general. Se dejan oír las vibraciones de la vajilla, puertas y ventanas. Se sienten crujir algunos tabiques de madera. La sensación percibida es semejante a la que produciría el paso de un vehículo pesado. Los automóviles detenidos se mecen. V - La mayoría de las personas lo perciben aún en el exterior. En los interiores, durante la noche, muchas personas despiertan. Los líquidos oscilan dentro de sus recipientes y aún pueden derramarse. Los objetos inestables se mueven o se vuelcan. Los péndulos de los relojes alteran su ritmo o se detienen. Es posible estimar la dirección principal del movimiento sísmico.
5.0 – 5.9	VI –VII	VI - Lo perciben todas las personas. Se atemorizan y huyen hacia el exterior. Se siente inseguridad para caminar. Se quiebran los vidrios de las ventanas, la vajilla y los objetos frágiles. Los juguetes, libros y otros objetos caen de los armarios. Los cuadros suspendidos de las murallas caen. Los muebles se desplazan o se vuelcan. Se producen grietas en algunos estucos. Se hace visible el movimiento de los árboles y arbustos, o bien, se les oye crujir. Se siente el tañido de las campanas pequeñas de iglesias y escuelas. VII - Los objetos colgantes se estremecen. Se experimenta dificultad para mantenerse en pie. El fenómeno es percibido por los conductores de automóviles en marcha. Se producen daños de consideración en estructuras de albañilería mal construidas o mal proyectadas. Sufren daños menores (grietas) las estructuras corrientes de albañilería bien construidas. Se dañan los muebles. Caen trozos de estuco, ladrillos, parapetos, cornisas y diversos elementos arquitectónicos. Las chimeneas débiles se quiebran al nivel de la techumbre. Se producen ondas en los lagos; el agua se enturbia. Los terraplenes y taludes de arena o grava

<sup>17</sup> POBLETE ROJAS, Jorge Diego. Determinación Experimental de la Intensidad de Mercalli Modificada para Chile. Santiago de Chile, 2008, 228 h. Trabajo de grado (Ingeniero Civil). Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Ingeniería Civil.

		experimentan pequeños deslizamientos o hundimientos. Se dañan los canales de hormigón para regadío. Tañen todas las campanas.
<b>6.0 – 6.9</b>	VIII - IX	<p><b>VIII</b> - Se hace difícil e inseguro el manejo de vehículos. Se producen daños de consideración y aún el derrumbe parcial en estructuras de albañilería bien construidas. En estructuras de albañilería especialmente bien proyectadas y construidas sólo se producen daños leves. Caen murallas de albañilería. Caen chimeneas en casas e industrias; caen igualmente monumentos, columnas, torres y estanques elevados. Las casas de madera se desplazan y aún se salen totalmente de sus bases. Los tabiques se desprenden. Se quiebran las ramas de los árboles. Se producen cambios en las corrientes de agua y en la temperatura de vertientes y pozos. Aparecen grietas en el suelo húmedo, especialmente en la superficie de las pendientes escarpadas.</p> <p><b>IX</b> - Se produce pánico general. Las estructuras de albañilería mal proyectadas o mal construidas se destruyen. Las estructuras corrientes de albañilería bien construidas se dañan y a veces se derrumban totalmente. Las estructuras de albañilería bien proyectadas y bien construidas se dañan seriamente. Los cimientos se dañan. Las estructuras de madera son removidas de sus cimientos. Sufren daños considerables los depósitos de agua, gas, etc. Se quiebran las tuberías (cañerías) subterráneas. Aparecen grietas aún en suelos secos. En las regiones aluviales, pequeñas cantidades de lodo y arena son expelidas del suelo.</p>
<b>7.0 Y SUPERIORES</b>	X - XII	<p><b>X</b> - Se destruye gran parte de las estructuras de albañilería de toda especie. Se destruyen los cimientos de las estructuras de madera. Algunas estructuras de madera bien construidas, incluso puentes, se destruyen. Se producen grandes daños en represas, diques y malecones. Se producen grandes desplazamientos del terreno en los taludes. El agua de canales, ríos, lagos, etc. Sale proyectada a las riberas. Cantidades apreciables de lodo y arena se desplazan horizontalmente sobre las playas y terrenos planos. Los rieles de las vías férreas quedan ligeramente deformados.</p> <p><b>XI</b> - Muy pocas estructuras de albañilería quedan en pie. Los rieles de las vías férreas quedan fuertemente deformados. Las tuberías (cañerías subterráneas) quedan totalmente fuera de servicio.</p> <p><b>XII</b> - El daño es casi total. Se desplazan grandes masas de roca. Los objetos saltan al aire. Los niveles y perspectivas quedan distorsionados.</p>

*Tabla 1. Magnitud e intensidad de los Sismos.*

*Fuente: Determinación Experimental de la Intensidad de Mercalli Modificada para Chile.*

## 2.2 MARCO LEGAL

El Reglamento Colombiano de construcción sismorresistente (NSR 10), con la finalidad de reducir a un mínimo el riesgo de vida humana y defender en lo posible el patrimonio del estado y de los ciudadanos, expresa los requisitos mínimos para obtener un buen diseño y construcción sismorresistente en estructuras nuevas, con el objetivo de llegar a resistir fuerzas que le impone la naturaleza o su uso.

En este orden de ideas, la norma NSR-10 describe las variables a considerar en el diseño y construcción sismorresistente de nuevas edificaciones consignadas en el Título A en la tabla A.1.3-1<sup>18</sup>.

- 1) Predimensionamiento y coordinación con otros profesionales:** Se define el sistema estructural, dimensiones tentativas para evaluar preliminarmente las diferentes solicitudes como:
  - Masa de la estructura.
  - Cargas vivas y muertas.
  - Efectos sísmicos.
  - Fuerzas de viento.
  
- 2) Evaluación de las solicitudes definitivas:** En este paso se evalúan todas las solicitudes que pueden afectar la edificación como:
  - Efecto gravitacional de la masa de elementos estructurales, no estructurales, acabados, carga muerta, carga viva.
  - Fuerza del viento.
  - Deformaciones impuestas por efectos reológicos de los materiales estructurales.
  - Asentamiento del suelo donde está apoyada la estructura.
  
- 3) Obtención del nivel de amenaza sísmica y los valores de  $A_a$  y  $A_v$ :** En este paso se localiza la zona donde se construirá la estructura dentro de los mapas de zonificación sísmica, aquí se determina el nivel de amenaza sísmica del lugar.
  
- 4) Movimiento sísmico de diseño:** Se definen movimientos sísmicos de diseño de acuerdo con el lugar de la localización de la estructura donde se establecen parámetros como:

---

<sup>18</sup> VÉLEZ CASTRILLÓN, Kevin Esteban. DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UNA PEQUEÑA MESA DE SIMULACIÓN SÍSMICA UNIDIRECCIONAL. Universidad Libre Seccional Pereira. Colombia. 2016. P.33.

- Aceleración pico efectiva y la velocidad horizontal pico efectiva expresada en términos de aceleración del sismo de diseño.
- Características de las estratificaciones del suelo.
- La importancia de la edificación de acuerdo con el uso que tendrá.

**5) Características de la estructuración y del material estructural empleado:** Se define las limitaciones del empleo de los sistemas estructurales tales como:

- Sistemas de muros de carga.
- Sistema combinado.
- Sistema de pórticos.
- Sistema dual.

Y se define el material estructural a emplear entre ellos:

- Concreto estructural.
- Estructura metálica.
- Mampostería estructural.
- Madera.

De igual manera se elige el coeficiente de disipación de energía, la altura de la edificación y su grado de irregularidad.

**6) Grado de irregularidad de la estructura y procedimiento de análisis:** Se define como el procedimiento de análisis teniendo en cuenta la regularidad o irregularidad de la estructura, tanto en planta como en alzado, su grado de redundancia o ausencia de ella.



- 7)** Determinación de las fuerzas sísmicas: Con las variables determinadas en el numeral 7 se obtiene la fuerza sísmica que se le debe aplicar a la estructura.
- 8)** Análisis sísmico de la estructura: Este paso se lleva a cabo aplicando los movimientos sísmicos de diseño prescritos con anterioridad a uno de los siguientes modelos matemático:
- Método de la fuerza horizontal equivalente.
  - Método de análisis dinámico elástico.
  - Método de análisis dinámico inelástico.
  - Método de análisis alternos, los cuales deben tener en cuenta las características dinámicas de las edificaciones, el comportamiento inelástico de los materiales y de aceptación general a la ingeniería.
- 9)** Desplazamientos horizontales: Con base a los desplazamientos obtenidos en el análisis sísmico de la estructura se evalúan y controlan las derivas bajo los efectos durante un sismo:
- Deformación inelástica de los elementos estructurales y no estructurales.
  - Estabilidad global de la estructura.
  - Daño de los elementos estructurales que no hacen parte del sistema de resistencia sísmica y a los elementos no estructurales, tales como muros divisorios, particiones, enchapes, acabados, instalaciones eléctricas, mecánicas, etc.
- 10)** Verificación de derivas: Teniendo las derivas por medios de uno de los análisis matemáticos, se verifica que no excedan los límites descritos en el numeral A.6 de la NSR-10.

- 11)**Combinación de las diferentes solicitudes: Teniendo en cuenta los coeficientes de disipación de energía del sistema estructural, se logra reducir los efectos sísmicos de diseño dividiendo la fuerza sísmica entre el coeficiente de capacidad de disipación de energía.
- 12)**Diseño de los elementos estructurales: Este diseño permitirá a la estructura actuar en el rango inelástico ante la ocurrencia de sismo, cumpliendo así con los objetivos de la norma sismo resistente NSR-10.
- 13)**Diseño de la cimentación: Teniendo los resultados de las combinaciones realizadas en el numeral 11, empleando las cargas apropiadas y las fuerzas sísmicas reducidas de diseño, la capacidad de la estructura y las reacciones en los elementos estructurales; se diseña la cimentación de acuerdo con el título H de la norma NSR-10.
- 14)**Diseño de los elementos no estructurales: Este diseño debe seguir los siguientes requisitos:
- Se define el grado de desempeño en el capítulo A9 de acuerdo con el grupo de uso de la edificación.
  - El diseño de estos elementos debe ser por profesionales facultados para este fin de acuerdo con el artículo 26 y 29 de la ley 400 de 1997.
  - Estanterías que en algún momento pueden hacer parte de la estructura o un sistema estructural independiente de acuerdo con las especificaciones de cada aplicación, conforme al capítulo 9 de la norma NSR-10.
  - Se permite el uso de elementos diseñados e instalados por su fabricante siguiendo las instrucciones de A.1.5.1.2 de la NSR-10.
- 15)**Revisión de los diseños: Los planos, memorias y estudios realizados deben ser revisados para la obtención de la licencia de construcción como lo indica

la ley 400 de 1997 y la ley 388 de 1997 con sus reglamentos correspondientes.

El Instituto Nacional de Vías (INVIAS), con sus especificaciones técnicas y normas de ensayos para materiales como grava y arena, permitieron obtener un diseño de mezcla adecuado del concreto hidráulico, el cual iba a ser utilizado para la construcción del modelo (columna).

Tipos de ensayos:

Los ensayos que se presentan a continuación son los que permiten conocer en qué estado se encuentra el material seleccionado (grava y arena). Si tiene mucho contenido orgánico, si está bien gradado, cuál será el tamaño máximo de los agregados (gruesos y finos), y otras cualidades del material. También ayudan a obtener un diseño de mezcla adecuado.

1. Granulometría agregado grueso y fino (INV E 123-07).
2. Equivalente de arena (INV E 133-13).
3. Contenido de materia orgánica (INV E 212-13).
4. Gravedad específica y porcentaje de absorción en agregados gruesos (INV-E 223-13).
5. Gravedad específica y porcentaje de absorción en agregados finos (INV-E 222-13).

Norma técnica colombiana (NTC 550)

Esta norma establece los procedimientos para la elaboración y curado de especímenes cilíndricos y prismáticos, tomados de muestras representativas de concreto fresco para construcción<sup>19</sup>.

Requisitos para ensayo:

**1) Especímenes de cilindro.**

Deben ser cilindros de concreto fundidos y fraguados en posición vertical, con una altura igual a dos veces el diámetro. El espécimen patrón debe ser un cilindro de 150 mm de diámetro interior por 300 mm de altura.

**2) Sitio de elaboración.**

Los especímenes se deben elaborar pronto sobre una superficie nivelada, rígida, libre de vibración o de cualquier otra perturbación y en un sitio lo más cercano posible a donde van a ser almacenados.

**3) Fundida de los cilindros.**

El método de compactación, el número y profundidad aproximada de las capas y el número de golpes por capa se determinan a partir de las tablas 2, 3 y 4. Si la compactación se hace por apisonamiento, se selecciona el tamaño de la varilla de compactación con la Tabla 2.

---

<sup>19</sup> NORMA TECNICA COLOMBIANA, NTC 550 Segunda actualización, p.4.

DIMENSIONES DE LA VARILLA			
Diámetro del cilindro, mm	Diámetro de la varilla, mm	Longitud de la varilla, mm	Número de golpes/capa
< 150	10	300	25
150	16	600	25
200	16	600	50
250 o mayores	16	600	75

Tabla 2. Requisitos para varilla compactadora. Fuente: NTC 550.

Tipo y tamaño del espécimen, profundidad, (mm)	Método de compactación	Número de capas	Profundidad aproximada de la capa, (mm)
<b>Cilindros:</b>			
300 o menos	Apisonamiento	3 iguales	100 o menos
Más de 300	Apisonamiento	Las que se requieran	100 o menos
300 o menos	Vibración	2 iguales	150 o menos
300 a 450	Vibración	2 iguales	Media profundidad del espécimen
Más de 450	Vibración	3 o más	200 o lo más cerca posible

Tabla 3. Requisito de tamaño, tipo y modelo. Fuente: NTC 550.

Asentamiento (mm)	Método de compactación
>75	Apisonamiento
25 a 75	Apisonamiento o vibración
<25	Vibración

Tabla 4. Requisitos para el método de compactación. Fuente: NTC 550.

#### 4) Apisonamiento.

Se coloca el concreto en un molde adecuado y se adicionan el número requerido de capas (3) y el volumen de cada capa debe ser aproximadamente igual. Se apisona cada capa con el extremo redondeado de la varilla, usando el número de golpes requerido (25). La capa del fondo se apisona en toda su superficie. Los golpes se distribuyen uniformemente sobre la sección transversal del molde. Para cada capa que se va colocando, se deja que la

varilla penetre aproximadamente 12 mm en la capa inferior, cuando la profundidad de la capa es menor de 100 mm, y aproximadamente 25 mm.

5) Acabado.

Después de compactar el espécimen, se enrasa la superficie de éste para quitar el exceso de concreto, utilizando la varilla de compactación, una llana de madera, o un palustre. Este acabado se realiza con el mínimo de manipulación necesaria para producir una superficie homogénea y lisa que esté a nivel con el borde del molde y no tenga depresiones ni proyecciones mayores de 3 mm.

6) Protección.

Inmediatamente después del acabado, se deben tomar una serie de precauciones para evitar la evaporación y pérdida de agua de los especímenes. Las superficies exteriores de los moldes de cartón se deben proteger del contacto con cualquier fuente de humedad. Los especímenes se deben cubrir con una platina u hoja no absorbente y no reactiva, o con una lámina de plástico impermeable. Se pueden emplear costales húmedos sobre esta lámina para retardar la evaporación, sin que estos hagan contacto con el concreto.

7) Curado inicial.

Después del moldeo, los especímenes se deben almacenar en un depósito con temperatura controlada en el rango de 16 °C a 27 °C y en un ambiente húmedo (la norma no establece un valor determinado para el porcentaje de humedad), de manera que se limite la pérdida de humedad hasta por 48 h. La temperatura en los especímenes y entre ellos se debe controlar en todo momento protegiéndolos de la luz solar directa y de dispositivos de calefacción radiantes.

8) Curado final.

Al terminar el curado inicial, y antes de que transcurran 30 min después de

retirado el molde, se deben almacenar los especímenes en un ambiente húmedo, con agua libre sobre la superficie de estos, a una temperatura de  $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2,0\text{ }^{\circ}\text{C}$  sobre la superficie del cilindro. Se permiten temperaturas entre  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  por períodos no mayores de 3 h, inmediatamente antes del ensayo, si se mantiene humedad libre sobre la superficie de los especímenes en todo momento, excepto cuando se ha aplicado un refrentado con un compuesto de azufre.

Norma técnica colombiana (NTC 673).

Este ensayo se refiere a la determinación de la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto, tanto en cilindros moldeados, como núcleos extraídos, y se limita a concretos con un peso unitario superior a  $800\text{ kg/m}^3$  ( $50\text{ lb/pe}^3$ ).

El ensayo consiste en aplicar una carga axial de compresión a cilindros moldeados o a núcleos, a una velocidad de carga prescrita, hasta que se presente la falla. La resistencia a la compresión del espécimen se determina dividiendo la carga aplicada durante el ensayo por la sección transversal de éste<sup>20</sup>.

---

<sup>20</sup> NORMA TECNICA COLOMBIANA (NTC 673), Tercera actualización Resistencia a la compresión, Colombia, 2010, p.1.

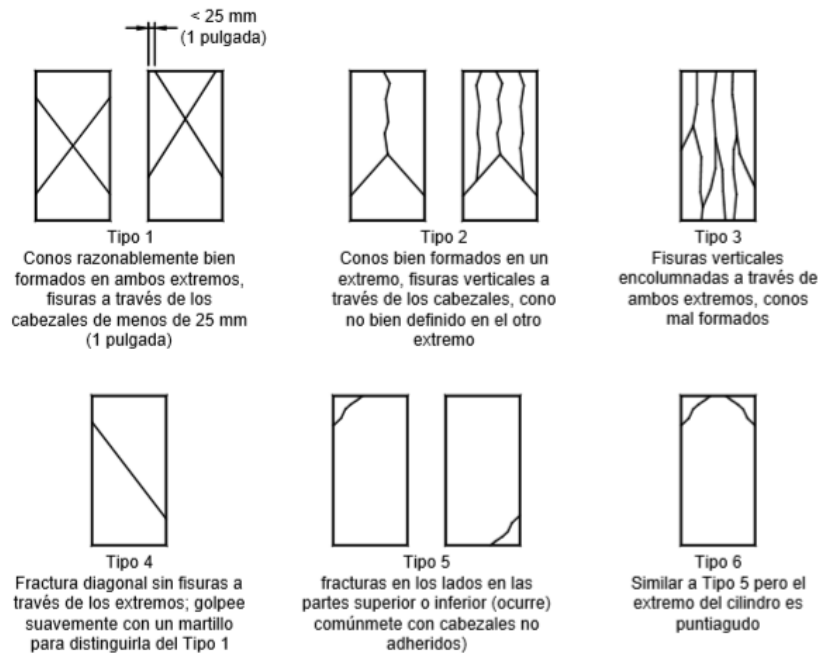


Figura 5. Tipos de fallas durante el ensayo.  
Fuente: Norma técnica colombiana (NTC 673).

	<b>Cónica.</b> Se presenta cuando se logra una <b>carga de compresión bien aplicada</b> sobre un <b>especimen de prueba bien preparado</b> .
	<b>Transversal.</b> Cuando las caras de aplicación de carga se encuentran en el límite de desviación (perpendicularidad) tolerada especificada de $0.5^\circ$
	<b>Columnar.</b> Presentan una superficie de carga convexa y <b>deficiencia del material de refrentado</b> ; también por concavidad del plato de cabeceo o convexidad en una de las placas de carga.
	Especímenes que presentan una cara de aplicación de carga cóncava y por <b>deficiencias del material de refrentado</b> ; también por concavidad de una de las placas de carga.

Figura 6. Descripción de los patrones de fallas.  
Fuente: Universidad Nacional de Colombia. Sede Bogotá.




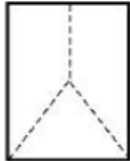
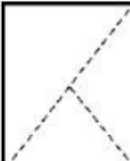
	<p>Cuando se producen concentraciones de esfuerzos en puntos sobresalientes de las caras de aplicación de carga y deficiencia del material de refrentado, por rugosidades en el plato en el que se realiza el refrentado o por deformación de la placa de carga</p>
	<p><b>Cónica y dividida.</b> Presentan una cara de aplicación de carga convexa y deficiencias del material de refrentado o rugosidades del plato de refrentado</p>
	<p><b>Cónica y transversal.</b> Cuando las caras de aplicación de carga del espécimen están ligeramente fuera de las tolerancias de paralelismo establecidas o por ligeras desviaciones en el centrado del espécimen con respecto al eje de carga de la máquina.</p>

Figura 7. Descripción de los patrones de fallas. Fuente: Universidad Nacional de Colombia. Sede Bogotá.

### 2.3 MARCO CONCEPTUAL

Una mesa vibratoria es esencialmente una plataforma móvil que simula los movimientos de un sismo en una, dos o más direcciones sobre un modelo estructural. El esquema general de una mesa vibratoria se muestra en la Figura 8. Esta herramienta consta generalmente de una plataforma móvil, una masa de reacción, uno o más actuadores y apoyos para la plataforma, que generalmente son rodamientos lineales (ver Figura 8). Los ensayos en mesa vibratoria generalmente involucran modelos a escala reducida, aunque en los últimos años se han llevado a cabo ensayos en escala real usando mesas vibratorias como la del E-Defense en Japón o la de la Universidad de San Diego en Estados Unidos, las cuales permiten el ensayo de estructuras en escala real y simulan movimientos en 6 grados de libertad<sup>21</sup>.

<sup>21</sup> BERNAL RUIZ, Néstor Mauricio. Automatización del Equipo de Simulación Sísmica Uniaxial del Laboratorio de Estructuras. Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá. Colombia. 2013. P.8.

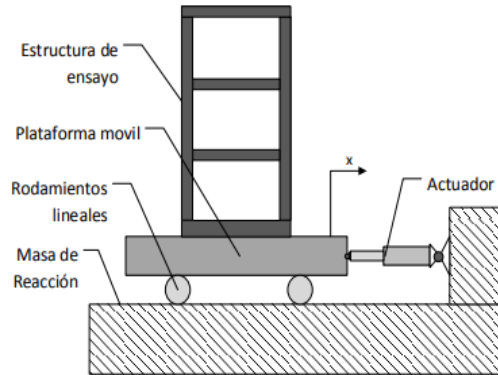


Figura 8. Diseño para una mesa de simulación sísmica.  
 Fuente: Automatización del Equipo de Simulación Sísmica Uniaxial del Laboratorio de estructuras, universidad militar nueva granada.

El movimiento de la mesa de simulación sísmica con una fuente neumática o hidráulica se realiza con la propagación de aire o un fluido a través de actuadores (cilindros y válvulas). Para el caso de un servomotor como fuente de movimiento, el diseño requiere de un actuador que convierta el movimiento de rotación en un movimiento lineal. Por otro lado, es posible la implementación de un motor lineal, sin embargo, si bien esta dispensa la necesidad de actuadores y electroválvulas, involucra un costo relativamente alto y es comercialmente disponible en pequeñas potencias. En cualquier caso, las características de aceleración, velocidad y desplazamiento son controladas por medio de señales eléctricas en los actuadores mecánicos, y, a su vez, dichas señales son recibidas desde un controlador el cual toma acciones en función de la orden dada en el sistema de control.<sup>22</sup>

Para dimensionar la capacidad de la fuente de movimiento, y por tanto del actuador, se debe considerar la fuerza máxima  $F$  que se debe ejercer cuando el sistema se encuentre en operación, tal como se muestra en la ecuación (1), donde  $M$  es la masa móvil total (estructura de soporte, espécimen, y cojinetes de los rodamientos),  $N$  el peso soportado por los rodamientos lineales (estructura de soporte y

<sup>22</sup> VÉLEZ CASTRILLÓN, Kevin Esteban. DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UNA PEQUEÑA MESA DE SIMULACIÓN SÍSMICA UNIDIRECCIONAL. Universidad Libre Seccional Pereira. Colombia. 2016. P.40.

espécimen),  $a$  es la aceleración máxima en condición oscilatoria, y  $\mu$  el coeficiente de fricción dinámico de los rodamientos lineales.<sup>23</sup>

$$F = Ma + \mu N \quad (1)$$

Asimismo, variables como velocidad, aceleración, amplitud y frecuencia fundamental, son muy importantes a considerar en la selección del actuador, ya que actualmente en el mercado se encuentran actuadores neumáticos, hidráulicos y electromecánicos anteriormente mencionados, cada uno de ellos con ventajas y desventajas; a continuación, en la tabla 5 se presentan algunas de sus características, ventajas y desventajas:

Tipo de Actuador	Actuador Electromecánico	Actuador Hidráulico	Actuador Neumático
Capacidad de Carga	Alto	Muy Alto	Alto
Vida Útil	Muy Larga	Larga con el mantenimiento adecuado.	Larga con el mantenimiento adecuado.
Velocidad	Muy Alta	Moderada	Muy Alta
Aceleración	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta
Posicionamiento electrónico.	Fácil	Difícil	Muy Difícil
Requisitos relativos a espacio.	Mínimo	Alto (Compresor, Mangueras)	Alto (Compresor, mangueras)
Eficiencia	< 90%	< 50%	< 50%
Instalación	Compatible con estándares de instalación de servo controles electrónicos.	Complejo, requiere servo-válvulas, tuberías de alta presión, bombas de filtrado, detección de posición.	Muy complejo, requiere servo-válvulas, tubería, filtros, compresores, detección de posición.
Mantenimiento	Muy Bajo	Difícil mantenimiento (Presencia de fugas)	Alto
Costo	Moderado	Moderado	Bajo Costo

Tabla 5. Características de Actuadores actualmente en el mercado.

Fuente: Diseño y evaluación de una pequeña mesa de simulación sísmica unidireccional.

<sup>23</sup> VÉLEZ CASTRILLÓN, Kevin Esteban. Ibid. P.41.

Para el cálculo de la amplitud mínima del actuador se tiene la ecuación (2) donde en función de la aceleración máxima y frecuencia máxima de operación se determina la máxima amplitud, donde  $a_{max}$  es la aceleración máxima de funcionamiento del actuador y  $f_{max}$  la frecuencia máxima de operación.

$$A_{min} = \frac{a_{max}}{(2\pi * f_{max})^2} \quad (2)$$

Para determinar la frecuencia fundamental del actuador se tiene la ecuación (3), en función de la amplitud máxima  $A_{max}$  del actuador y la aceleración máxima  $a_{max}$ .

$$f_f = \sqrt{\frac{a_{max}}{A_{max}}} * \frac{1}{2\pi} \quad (3)$$

Para establecer la aceleración se utiliza la ecuación (4), del actuador es necesario conocer la frecuencia y la amplitud del vástago del actuador; donde  $f_f$  es la frecuencia y  $A$  la carrera del vástago del actuador.

$$a_f = (2\pi * f_f)^2 * A \quad (4)$$

Y la última variable a considerar es la velocidad máxima de operación dada en la ecuación (5), en función de la frecuencia y la carrera máxima del vástago del actuador.

$$V_{máx} = 2\pi f_f * A \quad (5)$$

La sección mecánica de la mesa contiene tanto elementos móviles como estáticos, entre los componentes móviles se encuentran la plataforma de ensayo y las guías lineales que soportan el elemento de prueba. Los componentes estáticos comprenden los rieles de las guías lineales, los soportes, y la masa de reacción, la

cual le dará soporte al actuador y trasladará todos los esfuerzos al anclaje de la mesa. El diseño de los elementos mecánicos debe cumplir requerimientos de rigidez, resistencia, durabilidad y economía, para lo cual se debe tener en cuenta tanto los esfuerzos estáticos como los dinámicos<sup>24</sup>

### 2.3.1 Principales componentes de una mesa de simulación sísmica.

Los componentes básicos de una mesa de simulación sísmica se presentan a continuación:

#### 2.3.1.1 Masa de reacción

En el momento de simulación el actuador debe estar fijo a la masa de reacción, la cual permite que la fuerza ejercida por el actuador reaccione sobre ella transmitiendo esta fuerza a la cimentación. La masa de reacción sirve además para soportar los diferentes componentes de la mesa de simulación sísmica unidireccional como la plataforma para los especímenes, guías lineales, actuador. Esta va fija en la losa de contrapiso del laboratorio, la masa de reacción varía de acuerdo con el grado de movimiento que se quiera llegar.<sup>25</sup>

#### 2.3.1.2 Plataforma para especímenes

Este componente proporciona el área donde se fijarán los diferentes modelos a ensayar. Esta estará apoyada en las guías lineales fijadas a los bloques de los rodamientos y su movimiento unidireccional estará controlado por el actuador. La plataforma debe ser lo competentemente rígida en los movimientos y acciones a las cuales estará expuesta.

---

<sup>24</sup> VÉLEZ CASTRILLÓN, Kevin Esteban. Óp. Cit. P.44.

<sup>25</sup> CLAVIJO CARTAGENA, Juan Carlos; RAMIREZ CONTRERAS, Luis Reinaldo. Diseño, Modelamiento y Simulación de una Mesa Sísmica Unidireccional Hidráulica. Bucaramanga. Colombia, 2011, 122 h. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico – Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica.

La plataforma para los especímenes debe cumplir con las siguientes condiciones<sup>26</sup>.

- La frecuencia natural de la plataforma debe ser 3 o 4 veces superior a la máxima frecuencia de operación.
- La masa de la plataforma debe ser lo más ligera sin perder las propiedades físicas y mecánicas necesarias para su funcionamiento con la idea de minimizar las fuerzas de inercia que el actuador pueda imprimir sobre esta con su movimiento.

#### 2.3.1.3 Sistema de guías lineales.

Estos elementos proveen una superficie de deslizamiento de baja fricción para la plataforma y para los diferentes especímenes a ensayar.

#### 2.3.1.4 Unidad de potencia o actuador.

Este será el sistema que proporciona la potencia y las características de aceleración, velocidad y frecuencia a la mesa de simulación sísmica, dentro de los sistemas o unidades de potencia se encuentran mecánicos, eléctricos e hidráulicos<sup>27</sup>

#### 2.3.1.5 Sistema de control y adquisición de datos.

Es el sistema que controla el actuador electromecánico mediante un PLC que transmite la información necesaria para replicar los movimientos sísmicos. El controlador verifica el posicionamiento del vástago del actuador, regula la velocidad, regula la posición, generando así un correcto funcionamiento del actuador, reduciendo al máximo los errores.

---

<sup>26</sup> CLAVIJO CARTAGENA, Juan Carlos; RAMIREZ CONTRERAS, Luis Reinaldo, Ibid. P.31.

<sup>27</sup> CLAVIJO CARTAGENA, Juan Carlos; RAMIREZ CONTRERAS, Luis Reinaldo, Ibid. P.67.

## 3 ESTADO DEL ARTE

### 3.1 MESAS SISMICAS EN COLOMBIA

Algunas de las universidades de Colombia ya cuentan con la implementación de diferentes mesas de simulación de sismos aplicados a modelos reales o a escala reducida de diferentes tipos de estructuras y diferentes metodologías de funcionamiento. A continuación, se describirán algunas de estas mesas sísmicas.

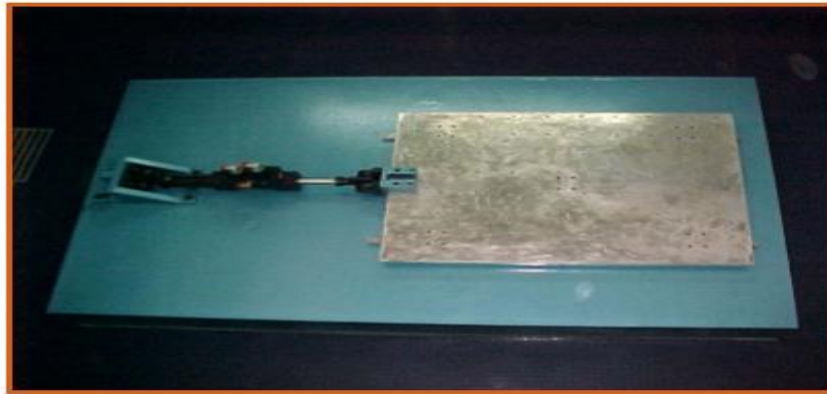
#### 3.1.1 Simulador sísmico uniaxial de la universidad del valle.

La universidad del valle cuenta con un simulador sísmico uniaxial que consiste en una placa de aluminio de 1.1 m x 1.5 m montado en cojinetes lineales Schneeberger. La placa de aluminio es desplazada horizontalmente por un actuador hidráulico de 45 KN (10 kip) que tiene servo válvulas duales de 15 gpm cada una. El simulador fue diseñado para operar en un rango de frecuencias de 0 a 50 Hz, tener un recorrido total de 15 cm, alcanzar velocidades de 90 cm/s, e impartir aceleraciones de 4 g's sobre modelos de 1 tonelada.

El diseño del simulador sísmico tuvo los siguientes objetivos:

- Una mesa vibratoria capaz de reproducir con precisión los movimientos sísmicos en la forma de desplazamientos del suelo (registrados en sismos pasados), mediante un actuador servo-hidráulico controlado con retroalimentación de desplazamiento.
- Un simulador con suficiente sensibilidad para ensayar modelos estructurales de pequeña escala que satisfacen las leyes de similitud (el movimiento del simulador es más rápido que el del prototipo y por lo tanto debe tener capacidades a frecuencias de hasta 50 Hz.

- Una mesa con la rigidez y masa necesarias para minimizar el efecto de interacción modelo-mesa.
- Un sistema de rodamiento de baja fricción y alta precisión para minimizar efectos no lineales.
- Un sistema hidráulico con frecuencias naturales de la columna de aceite mayores a 50 Hz.
- Un sistema de aislamiento para reducir la transmisión de vibraciones al edificio donde se encuentra ubicado el laboratorio.<sup>28</sup>



*Figura 9 Simulador Sísmico Uniaxial.*

*Fuente: Diseño y Construcción del Simulador Sísmico Uniaxial de la Universidad del Valle.*

### 3.1.2 Mesa de simulación sísmica universidad de los andes.

El programa de ingeniería civil de la universidad de los andes cuenta con una mesa de simulación sísmica unidireccional, tiene la capacidad de introducir en la base estructuras a escalas o reales, con dimensiones de 4,5 metro x 4,5 metros, la cual tiene una capacidad de soportar carga vertical hasta de 50 toneladas. Esta mesa permite reproducir sismos hasta de 8 grados de intensidad en la escala de Richter

---

<sup>28</sup> VARGAS, Gustavo Adolfo, VANEGAS, José Esteban, THOMSON, Peter, Diseño y construcción del simulador sísmico uniaxial, Universidad Del Valle, Facultada de Ingeniería, Cali, P 58.



y permite analizar sus efectos en diferentes estructuras, frecuencias desde 0 hasta 53 Hz y desplazamientos máximos de 30 centímetros.<sup>29</sup>



*Figura 10 Mesa de Simulación Sísmica Universidad de los Andes.  
Fuente: Revista Contacto, Universidad de los Andes.*

### 3.1.3 Simulador sísmico universidad EAFIT.

El programa de ingeniería civil de la universidad EAFIT cuenta con la mesa de simulación sísmica más grande del país, tiene dimensiones de 6 metro x 6 metro, tiene la capacidad de soportar carga vertical hasta de 70 toneladas con frecuencias de 0 a 2 Hz, velocidad máxima de 80 cm/s y desplazamientos máximos de 10 cm.

Todo controlado por un sistema electrónico de alta precisión desarrollado en su mayor parte por personal de la universidad y empresas nacionales.<sup>30</sup>

---

<sup>29</sup> Universidad De Los Andes, Facultad de Ingeniería, Revista Contacto, Facultad Investigativa para un mejor País, 2015, P 61.

<sup>30</sup> SIMULADOR SISMICO UNIVERSIDAD EAFIT, Laboratorio de Investigación de Ingeniería Sísmica.



*Figura 11 Mesa de Simulación Sísmica Universidad Eafit.*

*Fuente:* Diseño y evaluación de una pequeña mesa de simulación sísmica unidireccional, Universidad Libre Pereira.

El análisis dimensional es un método para verificar ecuaciones y planificar experimentos sistemáticos. A partir del análisis dimensional se obtienen una serie de grupos adimensionales, que van a permitir utilizar los resultados experimentales obtenidos en condiciones limitadas, a situaciones en que se tengan diferentes dimensiones geométricas, cinemáticas y dinámicas. Los ensayos con modelos más comunes son en mecánica de fluidos, hidráulica y canales hidrodinámicos.

En el campo de ingeniería civil aún no se realizan trabajos investigativos donde se construyan prototipos reales y se diseñen modelos a escala de dicho prototipo aplicando leyes de similitud y semejanzas.

Se utilizaron las bases de datos suministradas por la universidad libre seccional Pereira, encontrando documentos como: Análisis dimensional y semejanza (desarrollo de modelos a escalas) y Análisis dimensional y semejanza (experimentación en mecánicas de fluidos), todos estos relacionados a mecánicas de fluidos, pero ninguno referente a modelos estructurales.

Por lo tanto, este trabajo de investigación quedara como base y antecedente para investigaciones futuras sobre modelos de similitud y semejanza.

## **4 MODELOS MATEMÁTICOS DEL PROBLEMA**

Para hacer un escalamiento de un prototipo real a un modelo de escala reducida, es necesario conocer un poco sobre las leyes de semejanza, por lo tanto, es muy importante tener un poco de claridad en los temas de notación científica y cifras significativas los cuales nos permitirán entender un poco sobre las leyes de semejanza.

### **4.1 NOTACIÓN CIENTÍFICA.**

Para entender la metodología de las cifras significativas, primero hay que conocer un poco sobre la notación científica, está básicamente consiste en escribir cualquier número, ya sea grande o pequeño en forma de un número decimal que contenga una sola cifra entera, la de las unidades, y una potencia de base 10 y exponente positivo o negativo.

Ejemplo: A continuación, se escribirán en notación científica los siguientes números.

0,0026, en notación científica quedaría de la siguiente forma,  $2,6 \times 10^{-3}$  ó 156.000.000, que, en notación científica seria,  $1,56 \times 10^8$ .

### **4.2 CIFRAS SIGNIFICATIVAS.**

Las cifras significativas de una cantidad vienen dadas por todos los dígitos con certeza, más la primera cifra estimada o dígito dudoso. El número de cifras significativas de una cantidad expresa su precisión.

A continuación, se presentan una serie de números con sus respectivas cifras significativas.

La medida 3,52 metros tiene 3 cifras significativas.

La medida 4 km tiene una sola cifra significativa.

La medida 4,0 centímetros tiene dos cifras significativas.

### 4.3 OPERACIONES ARITMÉTICAS CON CIFRAS SIGNIFICATIVAS.

Suma: La suma de dos o más medidas no debe ser más precisa que la menos precisa de las medidas.

Ejemplo: Se tiene que sumar las siguientes medidas: 2,361 m; 8,16 m; 3,1 m. matemáticamente hablando, se puede sumar de la siguiente manera.

$$\begin{array}{r} 2,361 \text{ m} \\ 8,16 \text{ m} \\ \underline{3,1 \text{ m}} \\ 13,621 \text{ m} \end{array}$$

Se debe considerar que se está sumando medidas y la operación anterior no es correcta, ya que no se puede asumir que en la medida 8,16 m la cifra de las milésimas sea un cero, en realidad no se sabe. La misma situación se presenta con la medida 3,1 m ¿Qué se debe hacer?, simplemente presentar todas las medidas con el mismo grado de precisión que la menos precisa de las mismas.

$$\begin{array}{r} 2,361 \text{ m} \\ 8,16x \text{ m} \\ \underline{3,1xx \text{ m}} \\ 13,5xx \text{ m} \end{array} \qquad \begin{array}{r} 2,4 \text{ m} \\ 8,2 \text{ m} \\ \underline{3,1 \text{ m}} \\ 13,7 \text{ m} \end{array}$$

La suma de la derecha es fiable, ya que es el resultado de una suma de medidas fiables (números que si se conocen con certeza). Sin embargo, la suma de la izquierda no lo es, ya que se desconoce las cifras señaladas con x.

Resta: La diferencia de dos medidas no debe ser más precisa que la menos precisa de las mismas.

Ejemplo: Dada las siguientes medidas 56,38 cm y 5,2 cm, encontrar su diferencia.

$$\begin{array}{r} 56,38 \text{ cm} \\ - 5,2 \text{ cm} \\ \hline 51,2 \text{ cm} \end{array}$$

Producto: El producto de dos o más medidas no debe tener más cifras significativas que la medida que tiene el menor número de ellas.

Ejemplo: Calcular la superficie de una pieza rectangular de 4,34 m de largo por 1,2 m de ancho.

$$(4,34 \text{ m})(1,2 \text{ m}) = 5,208 \text{ m}^2. \text{Resultado } 5,2 \text{ m}^2$$

Cociente: El cociente de dos medidas no debe tener más cifras significativas que la medida que tiene el menor número de ellas.<sup>31</sup>

Ejemplo: Determinar la rapidez media de un móvil que recorre 8,825 m en 2,31 s.

$$v = \frac{8,825 \text{ m}}{2,31 \text{ s}} = 3,82034 \text{ m s}^{-1}. \text{Resultado } 3,8 \text{ m s}^{-1}$$

#### 4.4 REGLAS DE REDONDEO.

Las operaciones que se han realizado anteriormente demuestran la necesidad de eliminar dígitos que carecen de sentido. Esto se conoce con el nombre de redondeo de números, y se aplica según las siguientes reglas:

- Si la cifra a eliminar es menor que 5, se produce a eliminar sin más.

---

<sup>31</sup> Medidas, Gráficos y Cálculos De ERRORES Y Laboratorio De Calculo, P5

- Si la cifra a eliminar es mayor que 5, se aumenta en una unidad la última cifra retenida.
- Si la cifra a eliminar es 5, y la que le antecede es impar, se aumenta esta en una unidad y si es par se deja como está.

También se utiliza la siguiente regla: Si la cifra a eliminar es menor que 5, la última cifra retenida se queda igual. Si la cifra a eliminar es 5 o mayor que 5 entonces se aumenta en una unidad la última cifra retenida.<sup>32</sup>

Ejemplo: Redondear los siguientes números a la centésimas.

2,347..... 2,35  
 6,498..... 6,5  
 4,374..... 4,37  
 0,008..... 0,01  
 34,3579..... 34,36.

#### 4.5 SEMEJANZA

La teoría de la semejanza es una herramienta de análisis que orienta en la decisión de cómo construir o ensayar un modelo físico. Esta teoría pone en relación el modelo con el equivalente natural, prototipo, y analiza en qué sentido son semejantes. En primer lugar, se nos ocurriría pedir que el modelo fuese geoméricamente similar al prototipo. Esta es la noción más elemental y es también la que exigiríamos a una maqueta de cualquier objeto para que ésta fuese realista.

Por tanto, decimos que existe semejanza geométrica si las relaciones entre las magnitudes geométricas se mantienen constantes entre modelo y prototipo. Estas magnitudes son la longitud (L), el área (L<sup>2</sup>) y el volumen (L<sup>3</sup>).<sup>33</sup>

---

<sup>32</sup> Ibid., p 6

<sup>33</sup> ÁLVAREZ, José, Análisis Dimensional y Semejanza, Tema 3, 2008, P13.

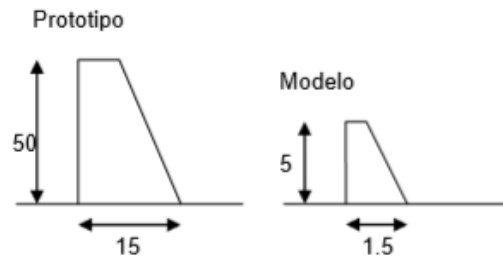


Figura 12 Análisis Dimensional

Fuente: Análisis dimensional y semejanza, José Anta Álvarez, P13.

Entonces, la relación entre las longitudes características del modelo y el prototipo deben mantenerse constantes:

$$\lambda_G = \frac{L_p}{L_m} = \frac{d_p}{d_m} = \frac{H_p}{H_m}$$

Donde los subíndices p y m hacen referencia a prototipo y modelo respectivamente, y  $\lambda_G$  es el coeficiente de semejanza geométrica.

Existe semejanza cinemática si las líneas de corriente en modelo y prototipo son semejantes.

La semejanza geométrica debe estar asegurada, y no deben aparecer en el modelo singularidades que no existan en el prototipo, como remolinos o fenómenos de tensión superficial.

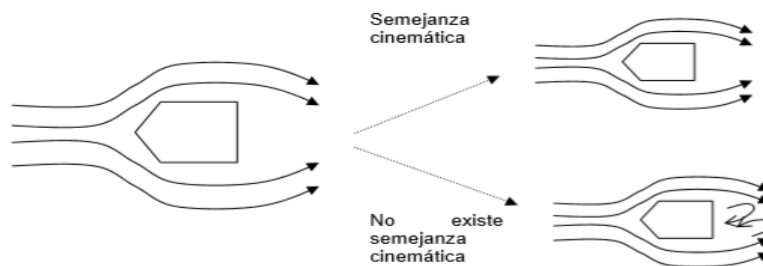


Figura 13 Semejanza Cinética

Fuente: Análisis dimensional y semejanza, José Anta Álvarez, P14.

De este modo, el cociente entre las velocidades características entre modelo y prototipo deben mantenerse constantes:

$$\lambda_c = \frac{V_p}{V_m} = \frac{\mu_p}{\mu_m} = \frac{w_p}{w_m} \quad (6)$$

Por último, se dice que existe semejanza dinámica si la distribución de fuerzas entre puntos correspondientes de modelo y prototipo es igual en dirección y sentido, y las relaciones en módulo también son iguales, para cualquier tipo de fuerza.

Del mismo modo que para las semejanzas geométricas y cinemáticas, la semejanza dinámica existe si:

$$\lambda_D = \frac{(F_1)_P}{(F_1)_m} = \frac{(F_2)_P}{(F_2)_m} \quad (7)$$

El que exista semejanza geométrica no garantiza la existencia de la semejanza cinemática y la dinámica. Pero para que haya semejanza cinemática, la semejanza geométrica debe existir.

Para que exista semejanza dinámica, la semejanza cinemática y por consiguiente la geométrica, deben estar aseguradas.

En un modelo físico se dice que las condiciones de flujo son similares a las del prototipo (realidad), cuando el modelo tiene una forma similar (semejanza



geométrica), el flujo se mueve de un modo similar (semejanza cinética) y las fuerzas existentes en ambos casos también son similares (semejanza dinámica).<sup>34</sup>

#### **4.6 ESCALAMIENTO DE FUERZA.**

Debido a que se van a analizar modelos a escala reducida, se tiene la necesidad de realizar un escalamiento adecuado de la fuerza, la cual se aplicara a dichos modelos.

Estructuras sujetas a carga dinámicas.

Los modelos a escala reducida de estructuras sometidas a cargas dinámicas se han estudiado desde la segunda guerra mundial pasando por los estudios de Hudson, Baker, Harris, etc. La complejidad de estas cargas y los efectos que estas causan sobre las edificaciones han puesto a las técnicas de la modelación a escala reducida a la par con las técnicas analíticas.

Los requerimientos de similitud que gobiernan las relaciones dinámicas entre el modelo y la estructura prototipo dependen de la geometría, de las propiedades de los materiales de la estructura y del tipo de carga. Las cargas dinámicas de interés en la ingeniería estructural van desde cargas de viento hasta vibraciones elásticas producidas por el tráfico. El problema de mayor interés son las cargas dinámicas producidos por sismos, debido a su gran potencial de producir desastres.<sup>35</sup>

---

<sup>34</sup> Ibid. P13-14.

<sup>35</sup> VIDES DE LA HOZ, Félix Joaquín, Metodología para realizar modelos de concreto reforzado a escala reducida, Universidad Industrial De Santander, Bucaramanga, 2006, p 16.

ESCALA		MODELO	1/5	1/8
Longitud	(Sl)	(Sl)	0.2	0.125
Tiempo	(St)	$\sqrt{Sl}$	0.45	0.35
Frecuencia	(S)	$1/\sqrt{Sl}$	2.24	2.82
Velocidad	(Sv)	$\sqrt{Sl}$	0.45	0.35
Gravedad	(Sg)	1	1	1
Aceleración	(Sa)	1	1	1
Densidad	(Sp)	$SE/Sl$	0.2 SE	0.125 SE
Deformación	(Se)	1	1	1
Tensión	(S $\sigma$ )	SE	SE	SE
Módulo de elasticidad	(SE)	SE	SE	SE
Desplazamiento	(S $\delta$ )	Sl	0.2	0.125
Fuerza	(Sf)	$SES^2l$	0.04 SE	0.016 SE

Tabla 6. Resumen de escalas.

Fuente: Consideraciones de diseño y construcción de una mesa vibratoria para ejecución de ensayos dinámicos.

#### 4.7 ESPECTRO DE FOURIER.

En los últimos años se ha logrado avanzar mucho en los estudios de señales digitales. Desde la aparición del cálculo en el siglo XVII, hasta la publicación del tratado de Fourier sobre la representación de funciones mediante series armónicas a principios del siglo XIX. Con el transcurrir del tiempo se convirtió en un proceso limitado en su desarrollo, por la dificultad que se presenta al momento de analizar señales con gran cantidad de datos sin contar con el apoyo de las computadoras.

Recién en el año 1965 se logra una evolución en la Transformada de Fourier gracias a los investigadores Cooley y Tukey quienes desarrollaron un algoritmo veloz llamado Transformada Rápida de Fourier, que se vio impulsado con la proliferación de los microprocesadores y circuitos integrados. El desarrollo de dicho algoritmo en

aquel año fue la herramienta que definitivamente abrió el campo del procesamiento digital de señales.<sup>36</sup>

Dicho espectro es utilizado en el presente trabajo para demostrar que la mayor información obtenida por la amplitud se encuentra en un rango de 0 a 20 Hz.

A seguir se presenta un ejemplo en el que se genera un conjunto de datos a partir del cual, al aplicar la herramienta de análisis y obtener las componentes espectrales que originan el movimiento oscilatorio. Se consideran dos funciones del tiempo, ecuaciones 8 y 9:

$$f_1(t) = a\text{Cos}(w_1t) \quad (8)$$

$$f_2(t) = b\text{Sen}(w_2t) \quad (9)$$

Donde:

a: Amplitud

b: Amplitud

w: Frecuencia

La suma de estas dos funciones será:

$$f_1(t) + f_2(t) = a\text{Cos}(w_1t) + b\text{Sen}(w_1t) \quad (10)$$

Expresando las funciones trigonométricas en forma compleja y sumando:

$$\begin{matrix} \overline{F_1} = a|_{\underline{0^\circ}} = a + j0 \\ \overline{F_2} = b|_{\underline{-90^\circ}} = 0 - jb \end{matrix} \quad \overline{F_1} + \overline{F_2} = a - jb = \sqrt{a^2 + b^2} \left| \underline{-\text{arctg} \frac{b}{a}} \right.$$

---

<sup>36</sup> ECHEVERRYA PEREZ, Fernando Iván. Evaluación de parámetros dinámicos en estructuras en movimiento y registros sísmicos utilizando la transformada wavelet. Universidad Austral de Chile. Facultad de ingeniería civil. Chile. 2010. P 16.

Y en forma temporal la suma será:

$$f_1(t) + f_2(t) = \sqrt{a^2 + b^2} \cos\left(\omega t - \arctg \frac{b}{a}\right)$$

Una función periódica puede ser desarrollada en serie trigonométrica de Fourier, según la ecuación 11:

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{n=\infty} (a_n \cos n\omega_1 t + b_n \sin n\omega_1 t) \quad (11)$$

La cual puede reescribirse como

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{n=\infty} A_n \cos(n\omega_1 t + \alpha_n) \quad (12)$$

Donde:

$$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad y \quad \alpha_n = -\arctg \frac{b_n}{a_n} \quad (13)$$

La función  $f(t)$  queda definida por una constante e infinitas funciones coseno que reciben el nombre de armónicos, siendo el de orden  $n=1$  el primer armónico, de frecuencia igual a la frecuencia fundamental y el resto de frecuencia superior.

La frecuencia de una función es fácil de entender si se comienza con una función periódica. Por ejemplo, la función  $f_2(t) = b \sin(2\pi \omega_2 t)$ , con  $b > 0$ , posee una amplitud  $b$  y una frecuencia  $\omega$  (Poularikas, 1999), la frecuencia  $f$  indica cuantos ciclos existen en el intervalo  $[0,1]$  seg. Por ejemplo, al dar los valores  $b=1$  y  $f=2$ Hz.

a los parámetros de la función  $f(t)$  se obtiene  $f(t)=\text{sen}(4\pi t)$ , es decir, se repite cada intervalo de tiempo  $(2\pi)$ , ver figura 14.

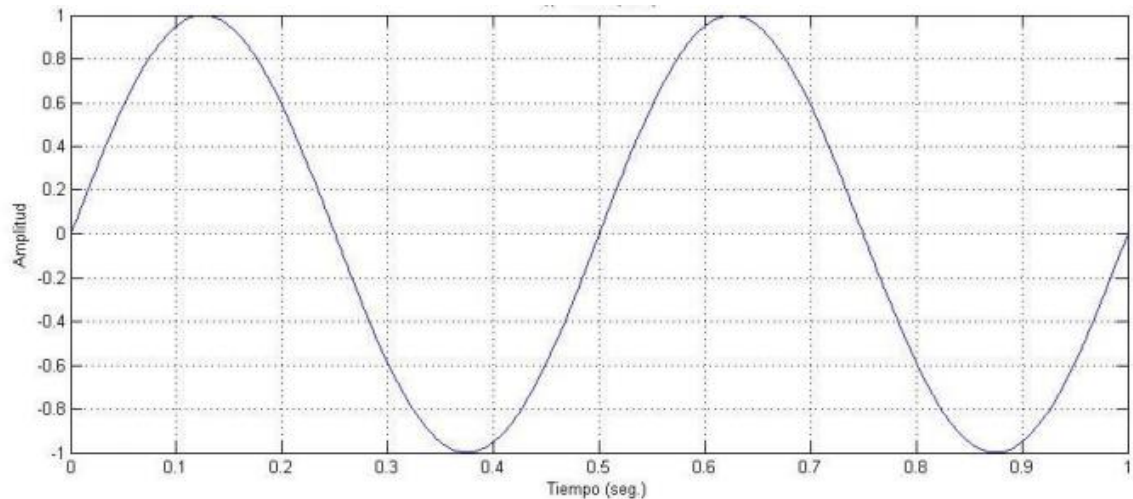


Figura 14. Representación de la función  $f(t)$  en el intervalo  $[0,1]$  seg.

Las representaciones gráficas:

$A_n$  frente a  $\omega$  recibe el nombre de espectro de amplitudes de la serie trigonométrica de Fourier. Corresponde a una representación de líneas verticales a la frecuencia del armónico y de longitud igual a su amplitud.

$a_n$  frente a  $\omega$  recibe el nombre de espectro de fase de la serie trigonométrica de Fourier. El análisis de los espectros de amplitudes y fase de la serie trigonométrica de Fourier permite estudiar la influencia de cada armónico en la composición de la función periódica. El espectro de amplitudes de funciones periódicas que contienen discontinuidades, por ejemplo, las ondas cuadradas, pulsos y dientes de sierra, está formada por líneas que decrecen lentamente.

En el primer caso es necesario elegir bastantes términos de la serie para generar la onda  $f(t)$ , mientras que en el segundo caso basta con pocos términos para generar una onda. Como se muestra en la ecuación 14.

se creó una señal sísmica en Excel para generar una onda, la cual se basa en la suma de varias funciones armónicas (figura 14), con el fin de analizar su comportamiento sinusoidal y su relación tiempo - frecuencia. La señal creada se compone de tres funciones armónicas con diferentes valores en amplitud y frecuencia (Ecuación 14), cuyos valores deben ser recreados por la rutina construida en Matlab figura 15 (ver anexo A). La función generada se presenta en la ecuación 14.

$$x(t) = A_1 \text{Sen}(2 \pi w_1 t) + A_2 \text{Sen}(4 \pi w_2 t) + A_3 \text{Sen}(6 \pi w_3 t) \quad (14)$$

Donde: Donde  $A_1$ ,  $A_2$ , y  $A_3$  son las Amplitudes de la onda.,  $w_1$ ,  $w_2$ , y  $w_3$  son las frecuencias angulares de oscilación de cada componente de la señal, y  $t$  es la variable independiente tiempo. En particular, y a manera de ejemplo, se va a definir  $A_1 = 10$ ,  $A_2 = 7$ , y  $A_3 = 9$ , y  $2 \pi$ ,  $4 \pi$ ,  $6 \pi$  son los intervalos de tiempo que se repiten.

Cuando la función es armónica (seno o coseno), se trata de un movimiento ondulatorio armónico, la característica de esta función es la siguiente:

La función seno es periódica y se repite cuando el argumento se incrementa en  $2\pi$  (frecuencia), es por esto por lo que la ecuación 14 se presenta de dicha forma.

Reemplazando estos valores en la ecuación (14), se tiene:

$$x(t) = 10 \text{Sen}(2 \pi * t) + 7 \text{Sen}(4 \pi * t) + 9 \text{Sen}(6 \pi * t)$$

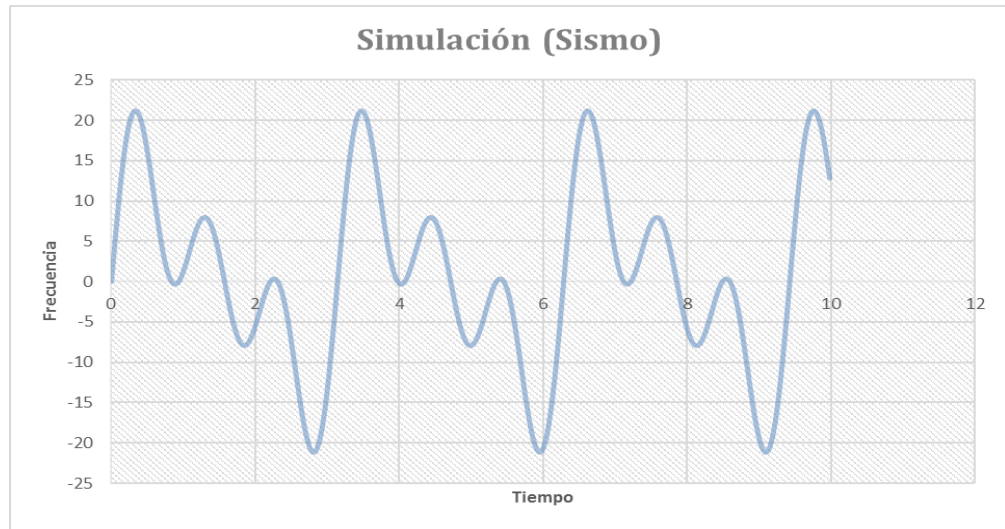


Figura 15 Señal creada en Excel para validar rutina de Matlab  
 Fuente: Elaboración propia.

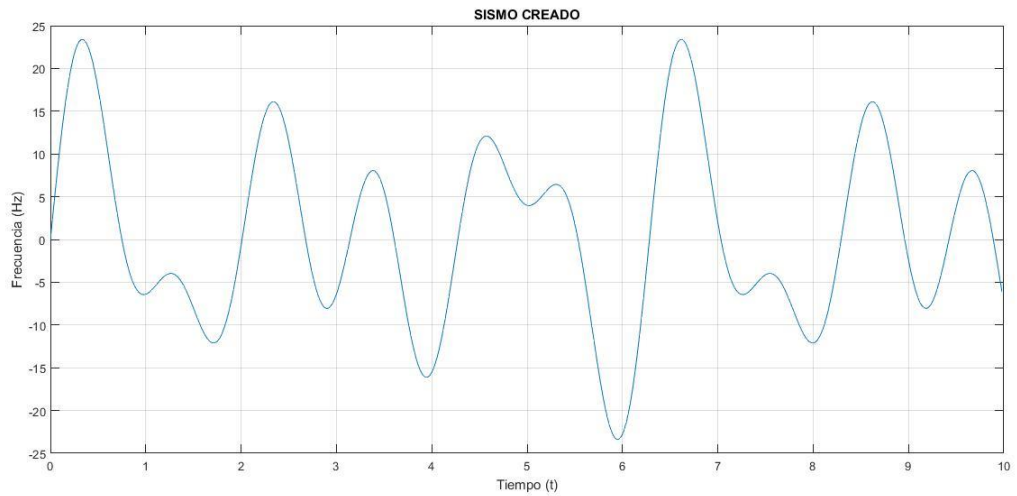


Figura 16. Sismo Creado rutina Matlab.  
 Fuente: Elaboración propia.

Se esperaba que el comportamiento sinusoidal de la rutina escrita en Matlab presentara un comportamiento similar al sismo creado en Excel. Como se observa en las figuras 15 y 16, ambas presentan un comportamiento periódico, el objetivo fundamental era demostrar que las frecuencias más representativas no excedieran

los 20 HZ y como se evidencia en las figuras mencionadas antes dichas frecuencias no exceden los 20 HZ.

En la figura 17 se refleja el resultado que arrojo una rutina modelada en Matlab (Ver anexo B). esta se modelo con el fin de demostrar que independientemente de la magnitud con la que se presente un sismo, sus rangos de frecuencias más significativas van a oscilar entre 0 a 20 HZ.

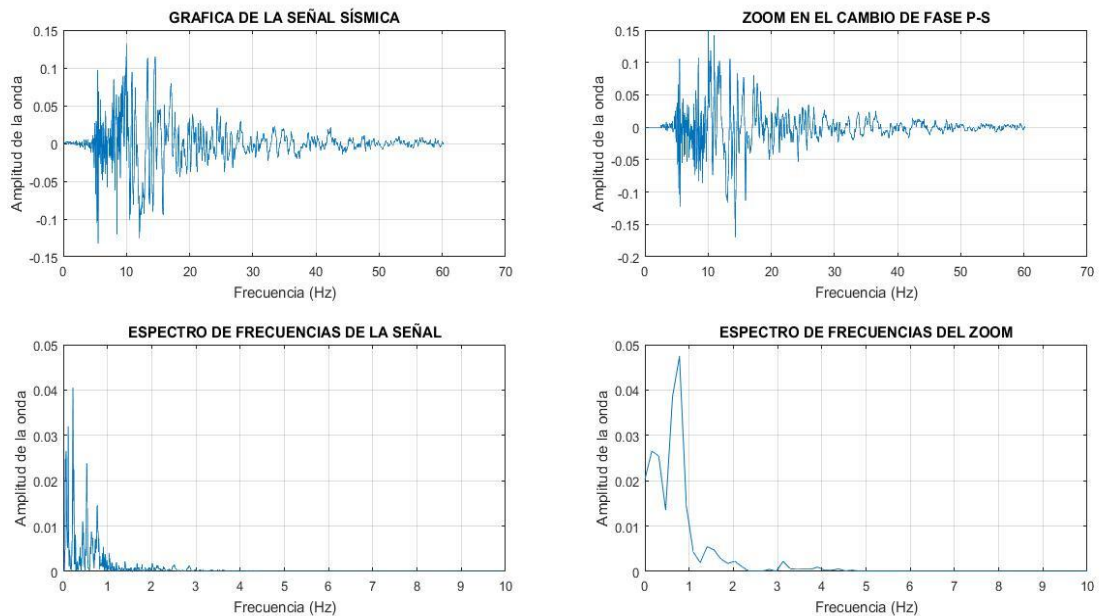


Figura 17. Señal Sísmica. Fuente: Señales sísmicas.

Para demostrar lo mencionado anteriormente, se escogió un sismo de forma aleatoria del libro “DINÁMICA ESTRUCTURAL APLICADO AL DISEÑO SÍSMICO”, el cual fue registrado en San Francisco, dicho sismo fue modelado en el software Matlab, con el fin de argumentar que las frecuencias más representativas van de 0 a 20 Hz como se observa en la figura 18 (ver anexo C).



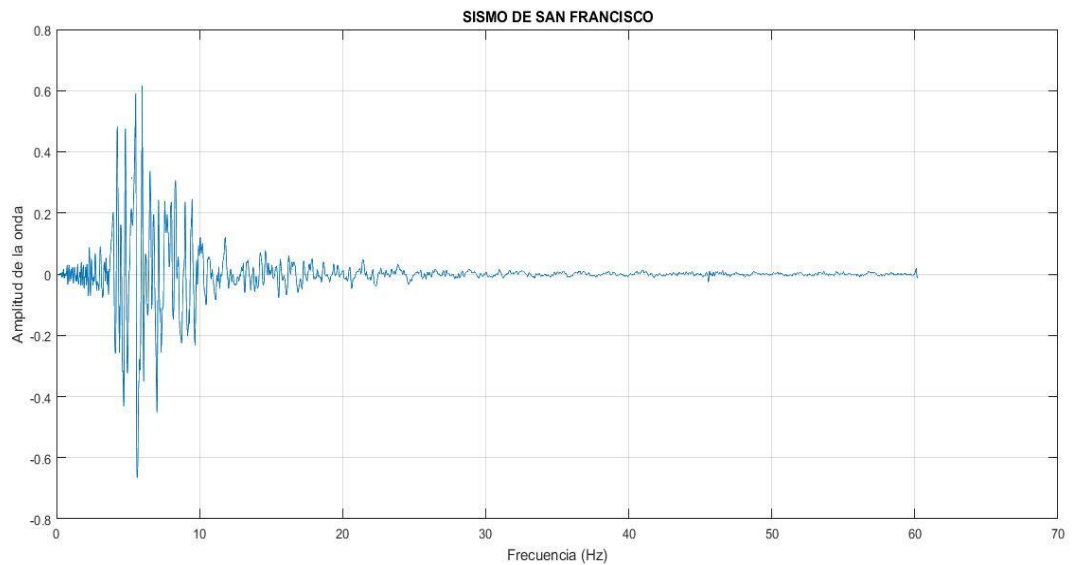


Figura 18. Sismo San Francisco 1985  
Fuente: Elaboración propia.

#### 4.8 PROCESAMIENTO DE SEÑALES SISMICAS (MATLAB).

MATLAB es un software utilizado para la programación como un ambiente de trabajo. Es por esto, por lo que se puede usar tanto en el modo consola (es decir, en el que se hacen cálculos cuyo resultado se obtiene inmediatamente por medio de los comandos adecuados, que se dan en línea) como en el modo rutina (estos son, programas cuyos comandos están codificados). Cualquiera de los modos puede ponerse en relación entre sí. Por ejemplo, una rutina (cuya denotación general es un archivo M, \*.m) puede pedir datos de la consola, a través del comando input; igualmente, una estructura típica de un programa, como es un bucle for — end se puede pulsar en la consola directamente sin necesidad de hacer un programa tipo M.

Sus manejos directos de vectores, matrices y cadenas de caracteres como objetos; su posibilidad de trabajar con números reales o complejos indistintamente; la no exigencia de declarar variables y arreglos para reserva de memoria; y la posibilidad

de combinar matemática simbólica con numérica, entre otras, son las características más importantes de MATLAB<sup>37</sup>

Una señal es una variable física que contiene o transporta información (Oppenheim, y otros, 1998). Algunos tipos de señales son: tensión, sonido, imagen, temperatura captada por un sensor, movimiento, entre otros. Lo realmente importante para esta investigación son las señales que varían en el tiempo. No todas las señales varían en el tiempo, las señales variables en el tiempo pueden representarse mediante una función del tiempo  $y(t)$ . Estas señales pueden ser de dos tipos: continuas o discretas.

El procesamiento digital de señales implica haber expresado previamente la magnitud de la señal en forma numérica. Cada número, así obtenido, representa la magnitud de la señal en un instante determinado. Entonces, tendremos una sucesión de muestras de la señal en lugar de la señal completa.<sup>38</sup>

#### **4.9 ANÁLISIS DE VIGAS EN VOLADIZO**

Una viga en “voladizo”, se caracteriza por estar apoyada en solo uno de sus extremos mediante un empotramiento. Debido a la necesidad de dicho empotramiento, los voladizos suelen ser prolongaciones de vigas continuas de varios apoyos.

Una carga sobre una viga en voladizo produce dos reacciones en el soporte: La fuerza de corte vertical, que contrarresta el peso del objeto; y el momento de flexión, que evita que la viga rote.

Un efecto mecánico que se produce en los voladizos es la deflexión, afectada por:

---

<sup>37</sup> HURTADO GOMEZ, Jorge Eduardo, Introducción a la dinámica de estructuras, Universidad Nacional de Colombia sede Manizales, 2000, P 151.

<sup>38</sup> JIMENEZ TINTAYA, Cesar Omar, Procesamiento digital de señales sísmicas con Matlab, Instituto geofísico del Perú, Vol. 10, 2007, P 46.

- Longitud
- Material
- Localización de la carga
- Forma de la sección transversal.

Todos los voladizos cumplen las siguientes condiciones, en el extremo empotrado  $\sum M_B = 0$  (sumatorio de momentos respecto el empotramiento es nulo),  $\theta_B = 0$  (ángulo de giro en el empotramiento es nulo) y  $\Delta_B = 0$  (desplazamiento vertical en el empotramiento es nulo)<sup>39</sup>. Como se observa en la figura 18.

#### 4.9.1 Voladizo con carga puntual en el extremo.

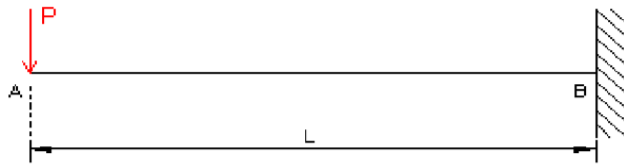


Figura 19. Viga en voladizo con carga puntual en el extremo.

Fuente: Elaboración de fórmulas analíticas y tablas de cálculo para las estructuras metálicas de acero según la normativa Euro código 3.

Donde: L= Longitud y P= Fuerza

#### 4.9.2 2º Teorema de Mohr.

Se aplica el 2º Teorema de Mohr el cual servirá de ayuda para deducir la fórmula que se va a utilizar para calcular el desplazamiento en el extremo libre, ecuación 15.

$$\Delta_A = - \int_{B=L}^{A=0} \frac{-Px}{EI} (x_A - x) dx \quad (15)$$

<sup>39</sup> TEJERIZO FERNANDEZ, Maribel, Elaboración de fórmulas analíticas y tablas de cálculo para las estructuras metálicas de acero según la normativa Euro código 3, Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona, abril 2015, P8.

$$\Delta_A = - \int_L^0 \frac{Px^2}{EI}$$

$$\Delta_A = - \left[ \frac{Px^3}{EI} \right]_L^0$$

$$\Delta_A = \frac{PL^3}{3EI} \quad (16)$$

Donde:  $\Delta_A$  = Es el desplazamiento de la viga, generado por la carga aplicada,  $P$  = es el valor de la carga aplicada,  $L$  = longitud de la viga,  $E$  = módulo de elasticidad del material (concreto hidráulico) e  $I$  = momento de inercia del prototipo o modelo.

Para este caso se puede aplicar el análisis de viga en voladizo, ya que el modelo evaluado se encuentra empotrado en la base y esto hará que se comporte como una viga en voladizo.

#### 4.10 MÓDULO DE ELASTICIDAD

El módulo de elasticidad,  $E_c$ , para el concreto puede tomarse como  $w_c^{1.5} \cdot 0.043 \sqrt{f'_c}$  (en MPa), para valores de  $w_c$  comprendidos entre 1440 y 2560 kg/m<sup>3</sup>. Para concreto de densidad normal,  $E_c$  puede tomarse como  $4700 \sqrt{f'_c}$ .<sup>40</sup>

---

<sup>40</sup>REGLAMENTO COLOMBIANO DE CONSTRUCCION SISMO RESISTENTE, Titulo C, 2010. P. C112

## 5 MEMORIA DE CÁLCULOS

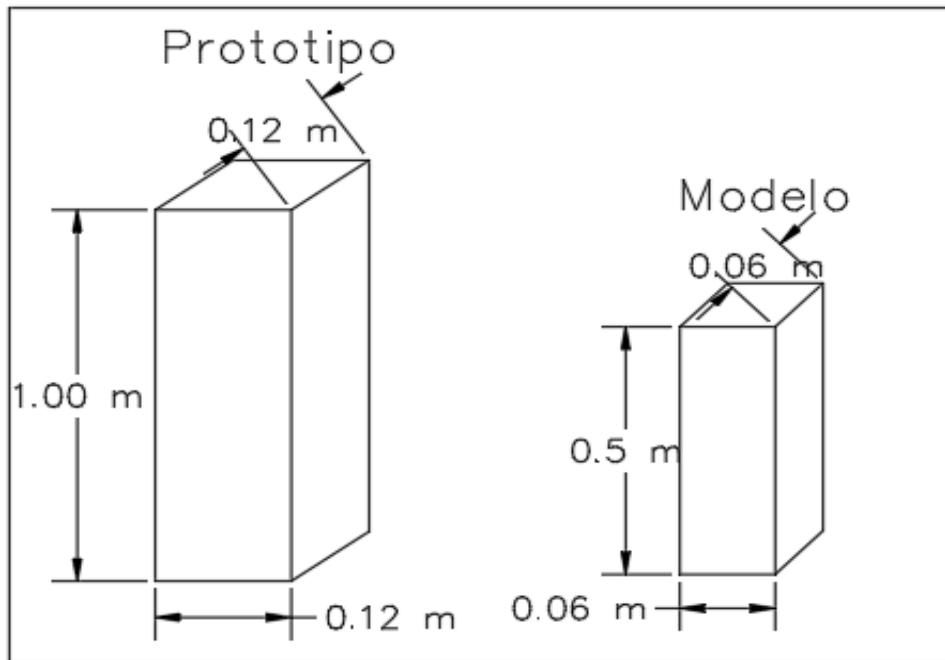


Figura 20 Escalamiento Modelo y Prototipo.  
Fuente: Elaboración Propia.

$$h_p = 1.00 \text{ mts}$$

$$L_p = 0.12 \text{ mts}$$

$$b_p = 0.12 \text{ mst}$$

$$D_{\text{concreto}} = 2654.71 \text{ kg/m}^3$$

Donde  $h_p$  es la altura de la columna,  $L_p$  es el largo de la columna y  $b_p$  es la base de la columna, del prototipo.

Se toma una relación de  $\frac{1}{0.5}$  como referencia de la escala, por lo tanto, se tiene que:

$$\lambda_E = \frac{L_p}{L_m} = \frac{1}{0.5} \quad (17)$$

La relación de la ecuación 17 se utilizará para encontrar los valores a escala del prototipo, los cuales serán los valores del modelo.

$$\frac{h_p}{h_m} = \frac{1}{0.5}, \text{reemplamos el valor de } h_p, \text{ para encontrar } h_m$$

$$\frac{1 \text{ mts}}{h_m} = \frac{1}{0.5} \quad h_m = \frac{1 \text{ mts} * 0.5}{1} \quad h_m = 0.5 \text{ mts}$$

Se realiza el mismo procedimiento descrito anteriormente para encontrar  $L_m$  y  $b_m$

$$\frac{0.12 \text{ mts}}{L_m} = \frac{1}{0.5} \quad L_m = \frac{0.12 \text{ mts} * 0.5}{1} \quad L_m = 0.06 \text{ mts}$$

$$\frac{0.12 \text{ mts}}{b_m} = \frac{1}{0.5} \quad b_m = \frac{0.12 \text{ mts} * 0.5}{1} \quad b = 0.06 \text{ mts}$$

$$V_p = 1 \text{ mts} * 0.12 \text{ mts} * 0.12 \text{ mts} = 0.0144 \text{ mts}^3$$

$$V_m = 0.5 \text{ mts} * 0.06 \text{ mts} * 0.06 \text{ mts} = 0.0018 \text{ mts}^3$$

$$W_p = 0.0144 \text{ mts}^3 * 2654.71 \frac{\text{kg}}{\text{mts}^3} = 38.2 \text{ kg}$$

$$W_m = 0.0018 \text{ mts}^3 * 2654.71 \frac{\text{kg}}{\text{mts}^3} = 4.8 \text{ kg}$$

Luego de obtener las medidas del modelo escalado, se procede a chequear la relación prototipo/modelo y saber si cumple con la relación 1/0.5.

$$\frac{1}{0.5} = 2, \text{ luego se toma la relación } \frac{L_p}{L_m} \text{ y se reemplazan sus valores}$$

$$\frac{0.12 \text{ mts}}{0.06 \text{ mts}} = 2$$

Como se puede observar si se cumple la condición  $\frac{L_p}{L_m} = \frac{1}{0.5}$ .

También se puede realizar el mismo análisis con las unidades de volumen y peso.

$$\lambda = \frac{V_p}{V_m} = \frac{W_p}{W_m} \quad \lambda = \frac{0.0144 \text{ mts}^3}{0.0018 \text{ mts}^3} = \frac{38.2 \text{ kg}}{4.8 \text{ kg}} = 8$$

Se aclara que en este caso no cumple con la relación  $\frac{1}{0.5} = 2$ , ya que en el ejercicio anterior se utilizó unidades diferentes, como las de volumen. Para obtener valores similares se debe elevar dicha relación al cubo,  $\left(\frac{1}{0.5}\right)^3$ , para garantizar las mismas unidades, en este caso unidades de volumen.

$$Fuerza = S_e S_l^2 \quad (18)$$

Donde:

Se = Modulo de elasticidad

Sl = Factor de escala de longitud.

Como se trata del mismo material, tanto del prototipo como para el modelo, el módulo de elasticidad es 1.

$$S_l = \left(\frac{1}{0.5}\right)^2$$

$$Fuerza = 1 * \left(\frac{1}{0.5}\right)^2$$

$$\frac{F_{prototipo}}{F_{modelo}} = \left(\frac{1}{0.5}\right)^2$$

Se conoce la fuerza del prototipo que es de 500 kg, se realiza el despeje adecuado para conocer el valor escalado de la fuerza del modelo.

$$500 = \left(\frac{1}{0.5}\right)^2 * F_{modelo}$$

$$F_{modelo} = \frac{500}{4} = 125$$

## 5.1 CÁLCULO DE DESPLAZAMIENTOS (CÁLCULOS MATEMATICOS)

### 5.1.1.1 Desplazamiento prototipo y modelo

Fórmula para el cálculo de desplazamiento una viga empotrada se presenta en la ecuación 16.

$$\Delta = \frac{FL^3}{3EI}$$

Para el cálculo del módulo de elasticidad se utilizó la ecuación 19, la cual se expresa en la sección 4.10.

$$Ec = w_c^{1.5} 0.043\sqrt{f'_c} \tag{19}$$

Se debe conocer la densidad del concreto y su resistencia máxima alcanzada a los 28 días de edad como se indica en la norma (INV E 410-13).

Datos:

Peso del cilindro: 14.07 kg

Diámetro del cilindro: 0.15 m.

Altura cilindro: 0.30 m.



Carga aplicada: 0361.83

Resistencia F'c: 21 MPa.

$$Densidad = \frac{Masa}{Volumen} \quad (20)$$

$$Volumen = area * altura \quad (21)$$

$$Area = \frac{\pi * D^2}{4} \quad (22)$$

$$Area = \frac{\pi (0.15)^2}{4} = 0.017672 \text{ m}^2$$

$$Volumen = 0.018 * 0.30 = 0.0053 \text{ m}^3$$

$$Densidad = \frac{14.07 \text{ kg}}{0.0054 \text{ m}^3} = 2654.71 \text{ kg/m}^3$$

Una vez encontrado los valores de resistencia y densidad del concreto se procede a utilizar la ecuación 19 para encontrar módulo de elasticidad.

$$Ec = 2654.71^{1.5} * 0.043 * \sqrt{21} = 26952.79 \text{ MPa}$$

Donde:

M: Mega

Pa: Pascal

Ecuación del momento de inercia para el prototipo y modelo:

$$I = \frac{b * h^3}{12} \quad (23)$$

Inercia para el prototipo:

$$I = \frac{12cm * (12cm)^3}{12} = 1728 cm^4$$

Inercia para el modelo:

$$I = \frac{6cm * (6cm)^3}{12} = 108cm^4$$

Para el cálculo de los desplazamientos del prototipo y modelo se utiliza la ecuación 16, reemplazando los valores correspondientes.

Antes de utilizar la ecuación 16, se convierte el valor del módulo de elasticidad ( $E_c$ ), a  $kg/cm^2$ , el cual se encuentra en MPa. Mirar el siguiente procedimiento.

Se tiene que:

$$Mega = 10^6$$

$$1Pa = \frac{N}{m^2} = \frac{(kg * m)/seg^2}{m^2}$$

$$E_c = 26952.79MPa = 26952.79M \frac{(kg * m)/s^2}{m^2}$$

Luego se divide en la gravedad ( $9.81 m/s^2$ ), para obtener el valor en  $kg/m^2$ .

$$E_c = \frac{26952.79}{9.81} * \frac{\frac{kg * m}{s^2}}{m^2} * \frac{1}{\frac{m}{s^2}} = 2747.48M \frac{kg}{m^2} * \frac{(1m)^2}{(100cm)^2} = 0.274748M \frac{kg}{cm^2}$$

Por último, se multiplica por  $10^6$ , el cual es el valor de M (mega).

$$E_c = 0.274748 * 10^6 = 274748 \text{ kg/cm}^2$$

Una vez obtenido el valor del modúló de elasticidad ( $E_c$ ) en las unidades adecuadas se procede a calcular el desplazamiento del prototipo.

Desplazamiento para el prototipo:

$$\Delta = \frac{(500 \text{ kgf})(100\text{cm})^3}{3 \left( 274748 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \right) (1728\text{cm}^4)} = 0.351 \text{ cm}$$

Desplazamiento para el modelo:

$$\Delta = \frac{(125\text{kgf})(50\text{cm})^3}{3 \left( 274748 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \right) (108\text{cm}^4)} = 0.1755\text{cm}$$

DIMENSIONES			
	PROTOTIPO REAL	MODELO ESCALADO	ID. CORRELACION
Base (m)	0.12	0.06	2
Ancho ( )	0.12	0.06	2
Altura(m)	1	0.5	2
Peso(kg)	38.2	4.8	8
Fuerza(kgf)	500	125	4
Desplazamiento(cm)	0.351	0.1755	2

*Tabla 7. Análisis comparativos.  
Fuente: Elaboración propia.*

## 5.2 ANÁLISIS DEL DESPLAZAMIENTO PROTOTIPO Y MODELO EN ETABS

Una vez obtenido los cálculos matemáticos del desplazamiento del prototipo y modelo, se decidió modelarlos en ETABS para comparar y confirmar los resultados.

### 5.2.1.1 Análisis prototipo

En la figura 21 se observa los valores asignados de la propiedad del materia y dimensiones del prototipo.

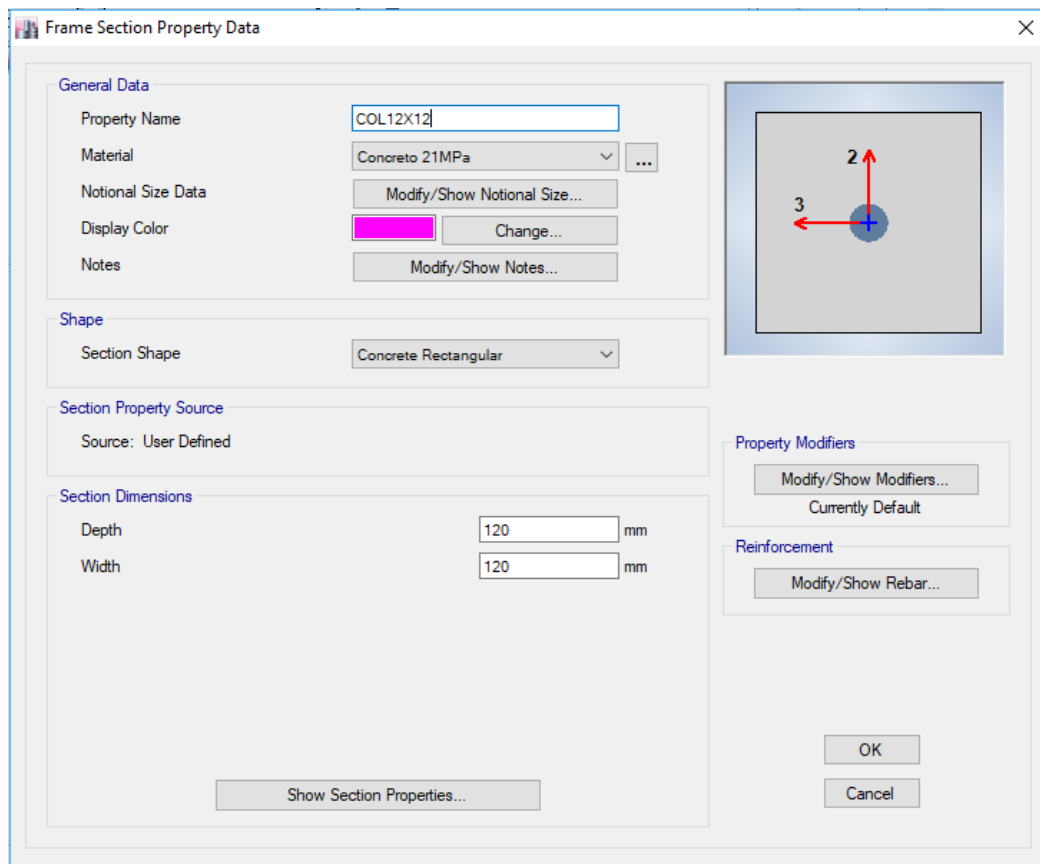


Figura 21. Sección del material.  
Fuente: Elaboración propia.

Se aplicó una carga de 4.9 KN, la cual equivale a 500 kgf, valor con el cual se están realizando los cálculos, dicha carga se aplicó a una distancia de 1.00 metros de altura, la cual es la medida del prototipo, ver figura 22.

	1.	2.	3.	4.
Distance	1	0	0	0
Load	4.9	0	0	0

Figura 22. Carga aplicada.  
Fuente: Elaboración propia.

En la figura 23 se observa el valor asignado del módulo de elasticidad del material con cual se diseñó el prototipo (concreto hidráulico).

**Material Property Data**

**General Data**

Material Name: Concreteo 21MPa

Material Type: Concrete

Directional Symmetry Type: Isotropic

Material Display Color: ■ Change...

Material Notes: Modify/Show Notes...

**Material Weight and Mass**

Specify Weight Density  Specify Mass Density

Weight per Unit Volume: 23.5631 kN/m<sup>3</sup>

Mass per Unit Volume: 2402.77 kg/m<sup>3</sup>

**Mechanical Property Data**

Modulus of Elasticity, E: 26952.79 MPa

Poisson's Ratio, U: 0.2

Coefficient of Thermal Expansion, A: 0.0000099 1/C

Shear Modulus, G: 11230.33 MPa

**Design Property Data**

Modify/Show Material Property Design Data...

**Advanced Material Property Data**

Nonlinear Material Data... Material Damping Properties... Time Dependent Properties...

OK Cancel

Figura 23. Propiedades del material.  
Fuente: Elaboración propia.

En las figuras 24, 25 y 26 se puede observar el proceso de modelación que arroja el software (ETABS) al momento de aplicar la fuerza (4.9 KN) sobre el prototipo, obteniendo así su desplazamiento. En la figura 26 se observa el valor de desplazamiento en milímetros que arrojó dicha modelación.

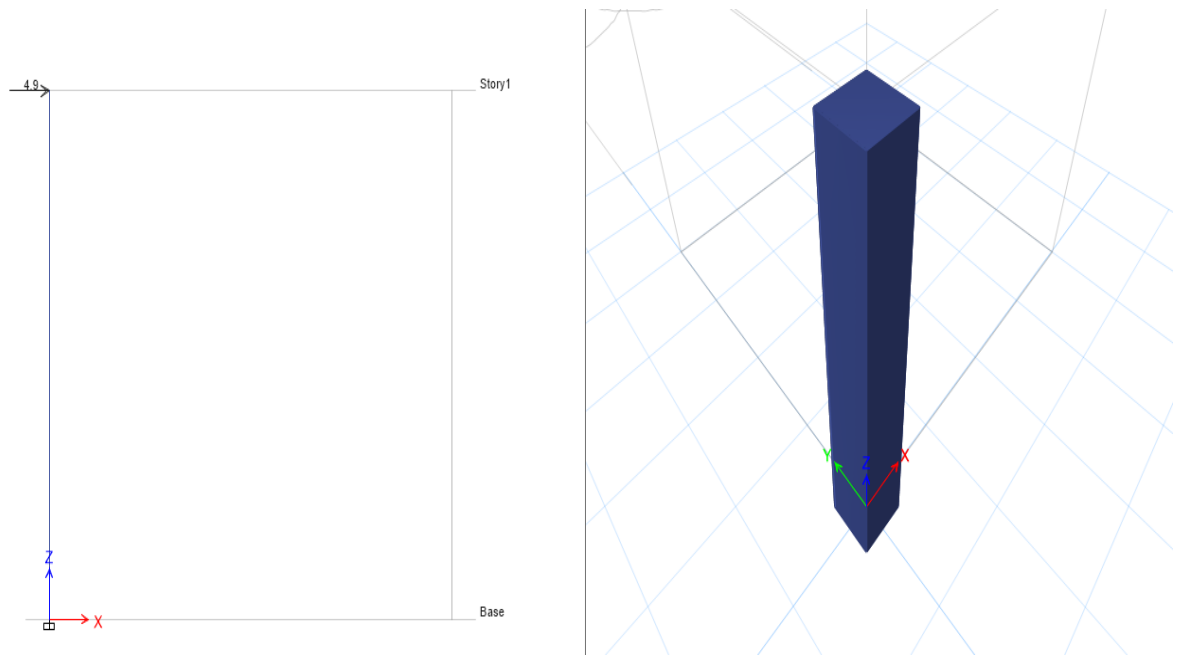


Figura 24. Vista del prototipo.  
Fuente: Elaboración propia.

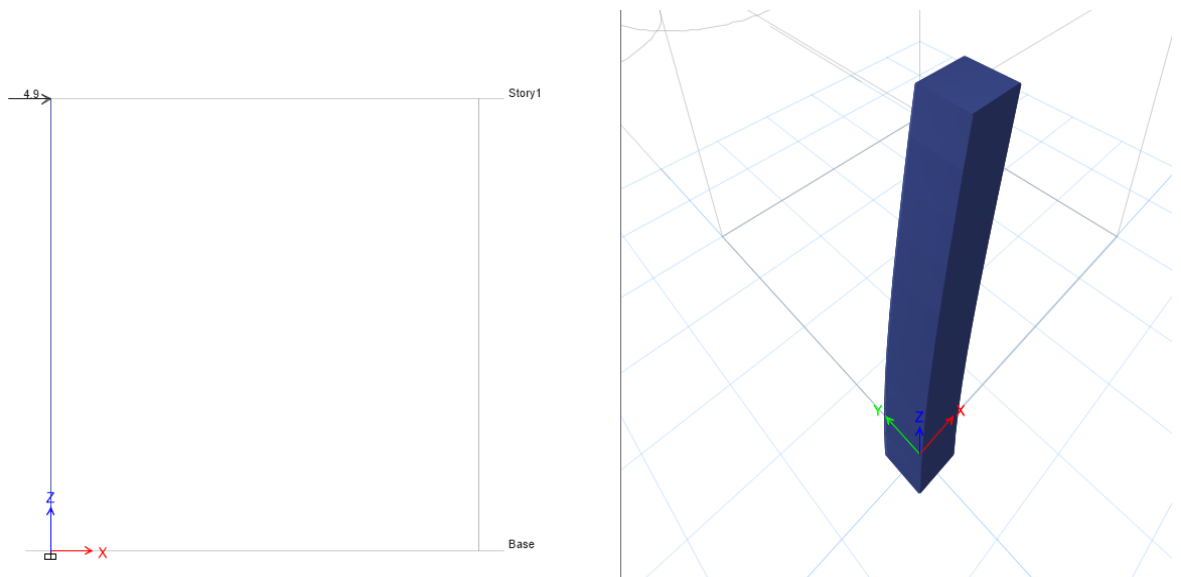


Figura 25. Vista del prototipo desplazado.  
Fuente: Elaboración propia.

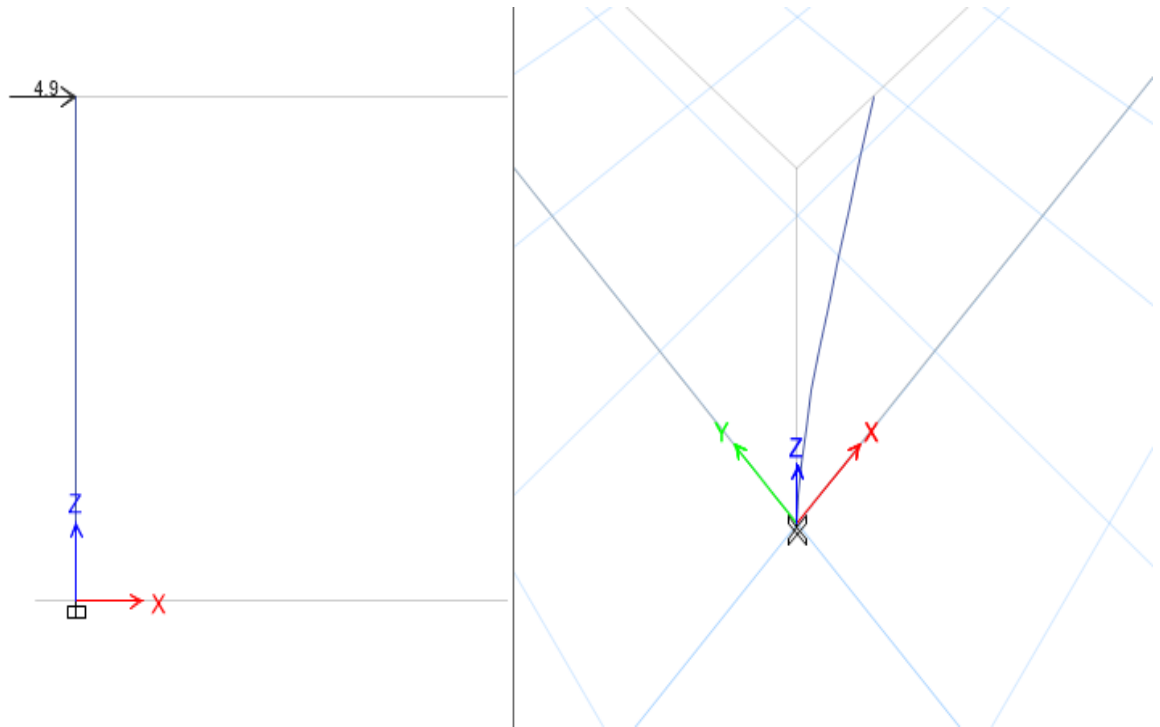


Figura 26. Vista 2 del prototipo desplazado.  
Fuente: Elaboración propia.

En la figura 27 se observa el valor del desplazamiento arrojado durante la modelación del pórtico, valor suministrado en mm, este valor fue comparado con los cálculos que se realizaron a mano para verificar que los datos arrojados por el programa son correctos.



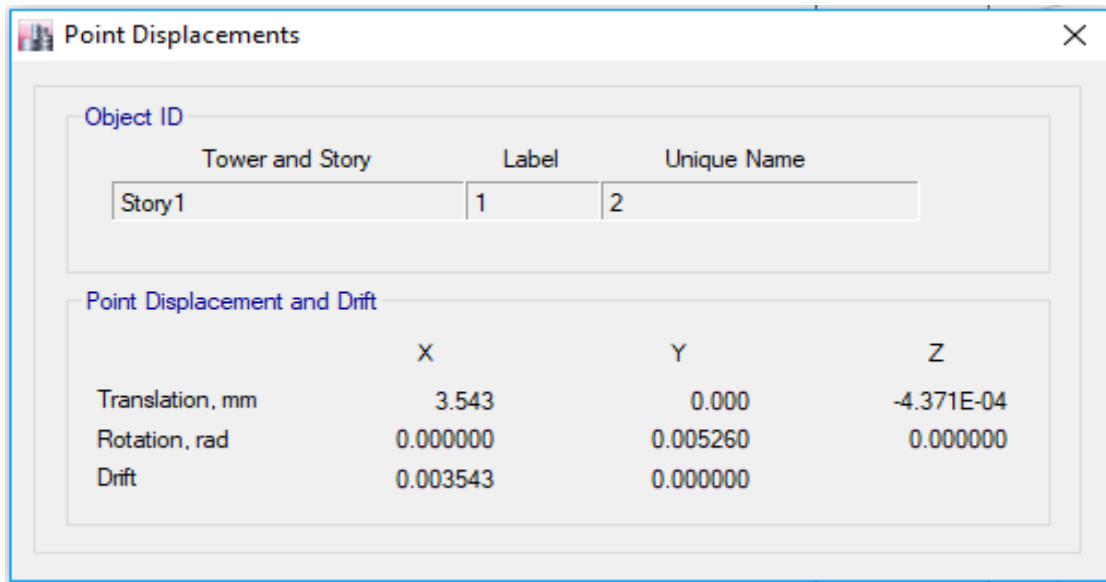


Figura 27. Resultado desplazamiento.  
Fuente: Elaboración.

#### 5.2.1.2 Análisis modelo

En la figura 28 se observa los valores asignados de la propiedad del material y dimensiones del modelo escalado.

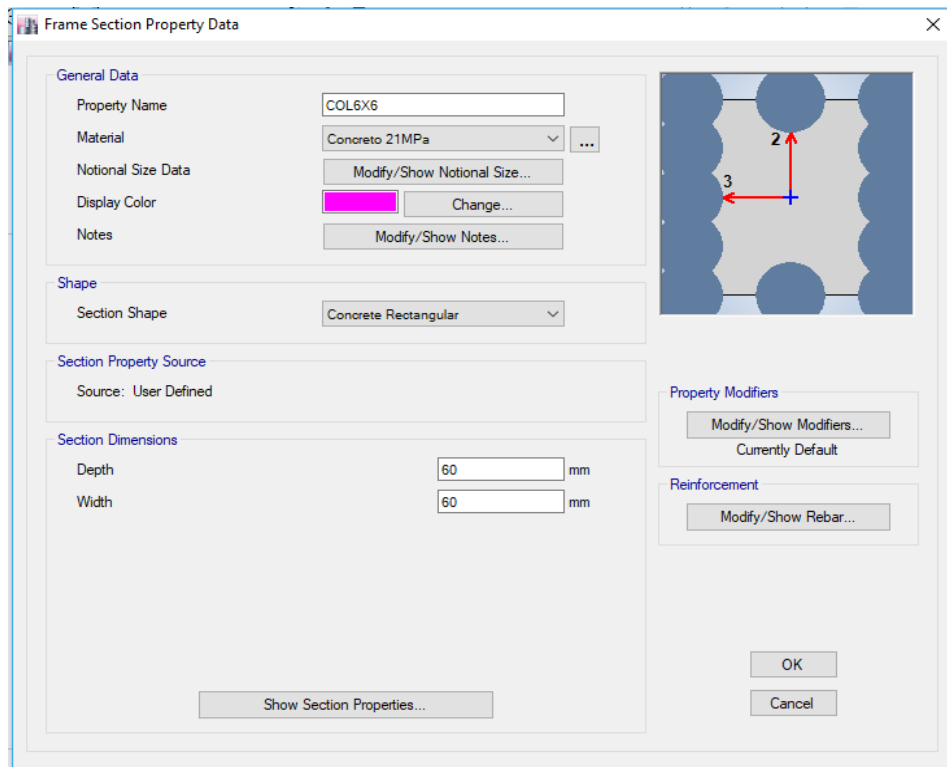


Figura 28. Sección del material. Fuente: Elaboración propia.

Se aplicó una cara 1.225 KN, la cual equivale a 125 kgf, valor con el cual se están realizando los cálculos, dicha carga se aplicó a una distancia de 0.50 metros de altura, la cual es la medida del prototipo, ver figura 29.

Frame Load Assignment - Point

Load Pattern Name: Dead

Load Type and Direction:
   
 Forces  Moments
   
 Direction of Load Application: Global-X

Options:
   
 Add to Existing Loads
   
 Replace Existing Loads
   
 Delete Existing Loads

Point Loads:

	1.	2.	3.	4.
Distance	0.5	0	0	0
Load	1.225	0	0	0

Relative Distance from End-I
  Absolute Distance from End-I

OK Close Apply

Figura 29. Carga aplicada al modelo. Fuente: Elaboración. Propia.

En la figura 30 se observa el valor asignado del módulo de elasticidad del material con cual se diseñó el modelo (concreto hidráulico).

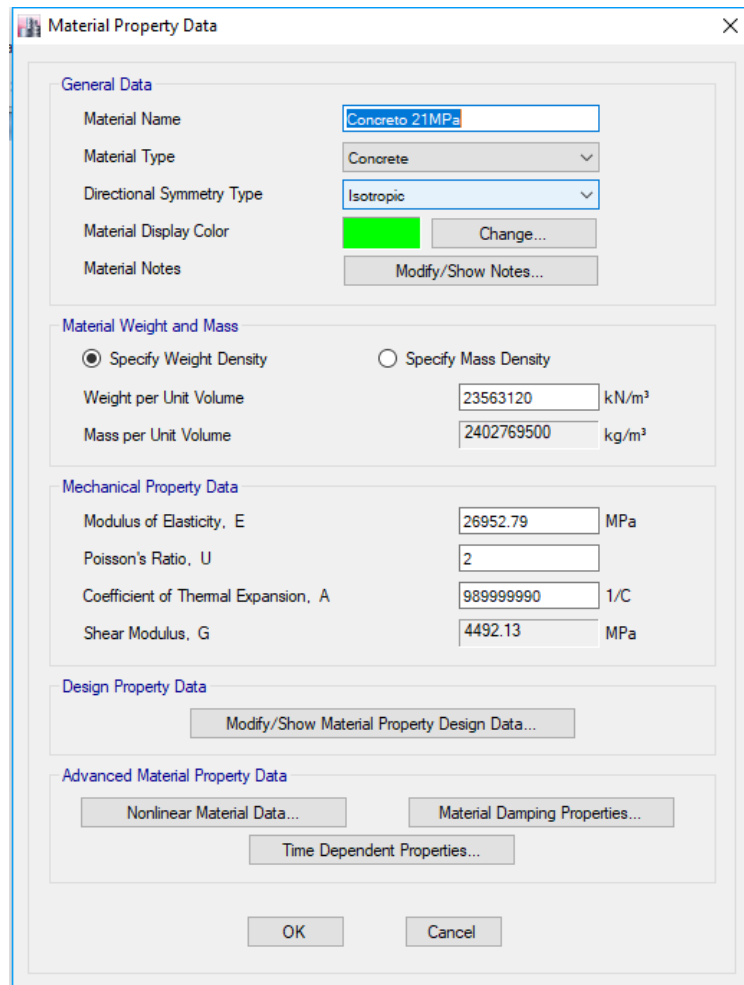


Figura 30. Propiedades del material. Fuente: Elaboración propia.

En las figuras 31, 32 y 33 se puede observar el proceso de modelación que arrojo el software (ETABS) al momento de aplicar la fuerza (4.9 KN) sobre el prototipo, obteniendo así su desplazamiento. En la figura 33 se observa el valor de desplazamiento en milímetros que arrojo dicha modelación.



Figura 31. Vista del modelo. Fuente: Elaboración propia.

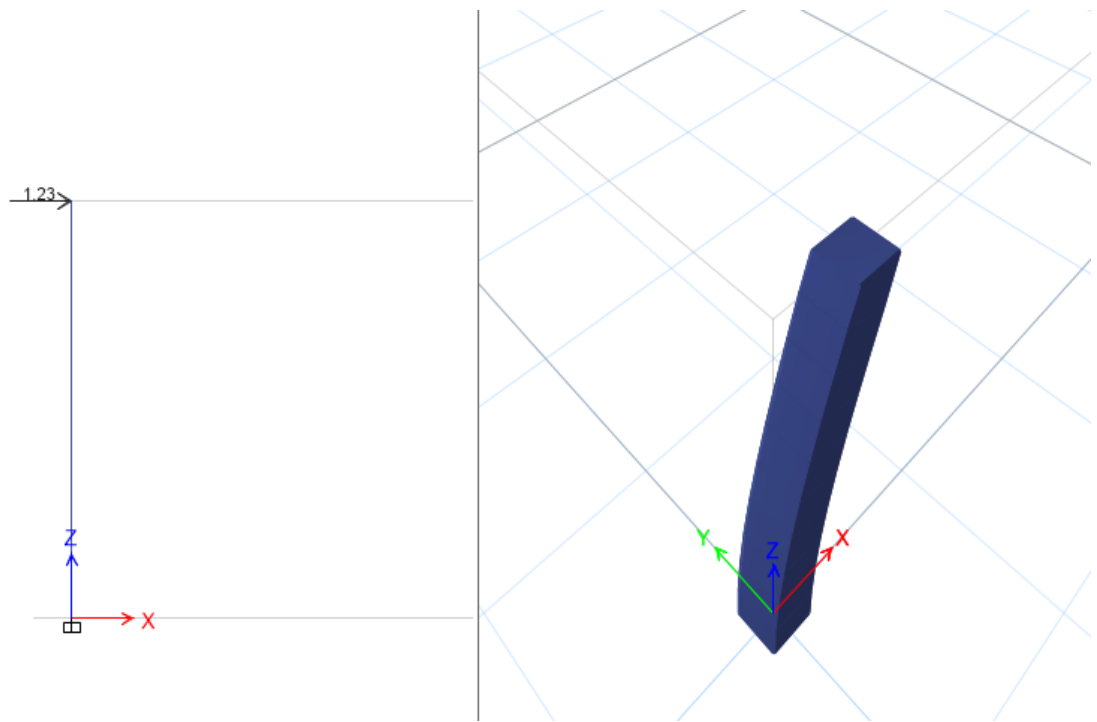


Figura 32. Vista del modelo desplazado. Fuente: Elaboración propia.

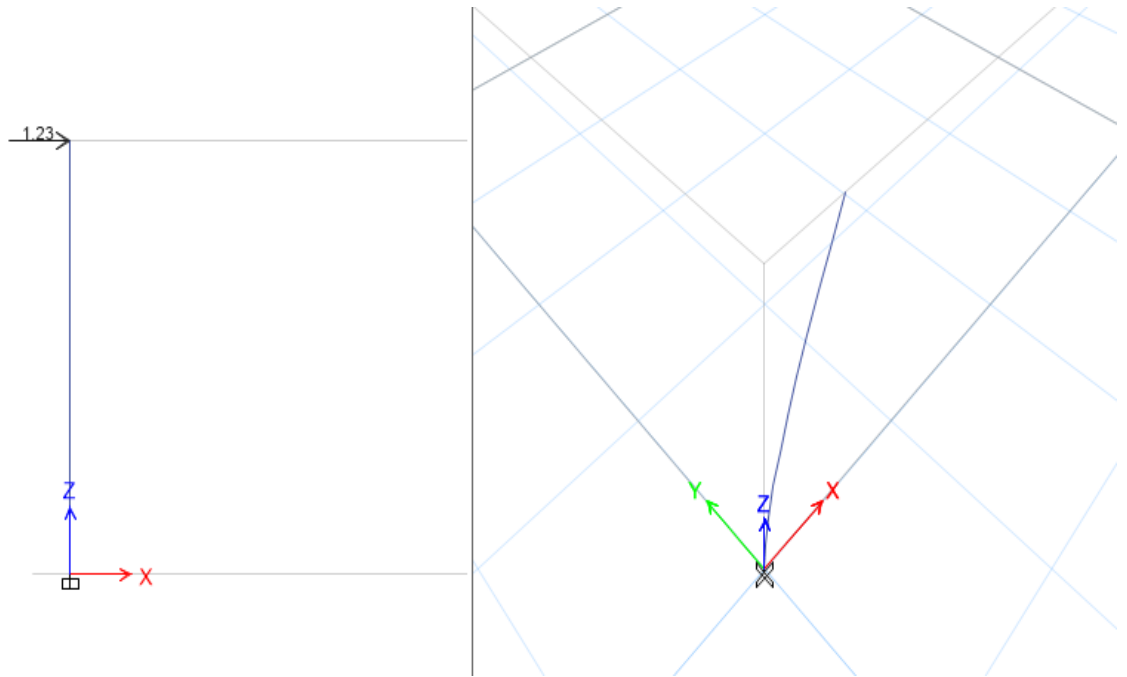


Figura 33. Vista 2 del modelo desplazado. Fuente: Elaboración propia.

En la figura 34 se observa el valor del desplazamiento arrojado durante la modelación del modelo a escala, valor suministrado en mm, este valor fue comparado con los cálculos que se realizaron a mano para verificar que los datos arrojados por el programa son correctos.

Object ID			
Tower and Story	Label	Unique Name	
Story1	1	2	
Point Displacement and Drift			
	X	Y	Z
Translation, mm	1.799	0.000	-109.280
Rotation, rad	0.000000	0.005260	0.000000
Drift	0.003598	0.000000	

Figura 34. Resultado desplazamiento del modelo. Fuente: Elaboración propia.

## 6 CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO.

### 6.1 MATERIALES PARA LA CONSTRUCCIÓN.

El material que se utilizó para la construcción del prototipo fue seleccionado de la cantera Jazmín, la cual se encuentra en el municipio de la Virginia y cuenta con todos los estándares de calidad, certificados por Invias.

Los materiales utilizados fueron los siguientes:

- **Grava:** Partículas de roca que pasan por el tamiz de 75 mm (3") de abertura y quedan retenidas en el tamiz de 4.75 mm (No.4). Se presenta las siguientes subdivisiones:
  - **Grava gruesa:** Pasa el tamiz de 75 mm (3") y queda retenida sobre el tamiz de 19 mm (3/4").
  - **Grava fina:** Pasa el tamiz de 19 mm (3/4") y queda retenida sobre el tamiz de 4.75 mm (No.4).<sup>41</sup>

---

<sup>41</sup> INSTITUTO NACIONAL DE VIAS. Normas Y Especificaciones, Colombia, 2012, P.E-102.



*Figura 35. Grava obtenida de la cantera Jasmín (La Virginia).  
Fuente: Elaboración propia.*

- **Arena:** Partículas de roca que pasan por el tamiz 4.75 mm (No.4) de abertura y quedan retenidas en el tamiz (No.200). Se presenta las siguientes subdivisiones:
  - **Arena gruesa:** Pasa el tamiz de 4.75 mm (No.4) y queda retenida sobre el tamiz de 2.00 mm (No.10).
  - **Arena media:** Pasa el tamiz de 2.00 mm (No.10) y queda retenida sobre el tamiz de 425  $\mu\text{m}$  (No.40).<sup>42</sup>
  - **Arena fina:** Pasa el tamiz de 425  $\mu\text{m}$  (No.40) y queda retenida sobre el tamiz de 75  $\mu\text{m}$  (No.200).

---

<sup>42</sup> Ibid. P.E-102. Sección Suelos.





*Figura 36. Arena obtenida de la cantera Jasmín (La Virginia).  
Fuente: Elaboración propia.*

- **Cemento:** La Norma Técnica Colombiana NTC 121, es la que rige al cemento en todo el territorio colombiano. (Especificación de desempeño para cemento hidráulico), la cual fue actualizada en el año 2014. Esta norma describe seis tipos de cemento los cuales se clasifican por desempeño y donde el objetivo primordial es garantizar la durabilidad del concreto y la versatilidad de utilización en las obras, además de ser mucho más amigable con el medio ambiente.
- **Formaleta:** Se utilizaron dos bisagranes, uno de 3.00 metros de altura y 0.12 metros de ancho con un espesor de 2.00 centímetros y el otro de 3.00 metros de altura y 0.16 metros de ancho con espesor de 2.00 centímetros. El objetivo era realizar una formaleta que sirviera de molde a la hora de vaciar el concreto y garantizar que el prototipo (columna) quedara con las dimensiones correctas, como se muestra en la figura 33. Debido a que la formaleta fue construida por los autores del proyecto se tiene una incertidumbre de error de +/- 5.00 mm



*Figura 37. Formaleta para vaciar el concreto.  
Fuente: Elaboración propia.*

## **6.2 ENSAYOS DE LABORATORIO.**

Al material obtenido se le debe realizar varios ensayos en el laboratorio, como granulometría, materia orgánica, equivalente de arena, gravedad específica entre otros. Todo esto con el fin de conocer el estado y la calidad del material. Los ensayos mencionados anteriormente también permiten conocer cuál será el diseño de mezcla adecuado para que el concreto alcance la resistencia requerida.

### **6.2.1 Granulometría agregado grueso.**

Para iniciar con la prueba de granulometría del agregado grueso se extrajo una muestra de 5.00 kilogramos, como se observa en la figura 37 (valor en gramos), la cual será evaluada por los tamices de 50mm (2"), 38 mm (1 ½"), 25mm (1"), 19mm (¾"), 12.53mm (½"), 9.50mm (3/8") y 4.75mm (No.4).



Tabla 8. Tabla Granulométrica.  
Fuente: Elaboración propia.

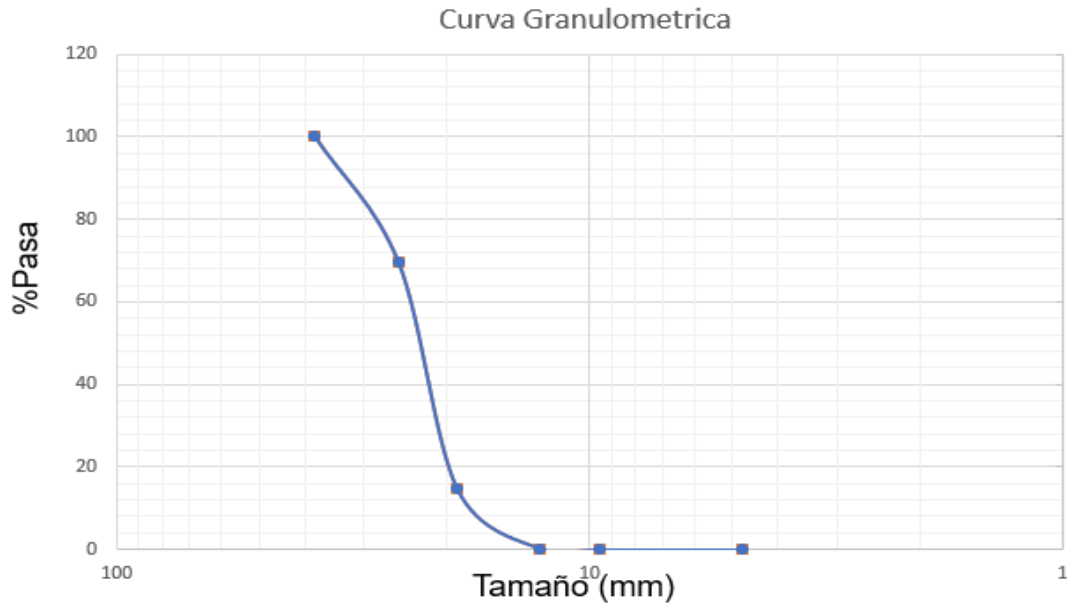


Figura 39. Curva granulométrica agregado grueso.  
Fuente: Elaboración propia.

De la tabla 8, se puede observar que el 85.40% del material es grava gruesa y el 14.60% restante es grava fina.

En la figura 38 se observa una curva granulométrica uniforme, esto quiere decir que el material se encuentra mal gradado, cuando se habla de mala gradación se refiere a que el material seleccionado tiene ausencia de varios tamaños y excesos en otros.

Según el manual de carreteras este material no sirve para pavimentos o algún tipo de construcción vial, debido a que su compactación no sería la ideal. Pero si puede ser utilizado para otro tipo de construcciones, como cimentaciones, columnas, muros, vigas entre otros.

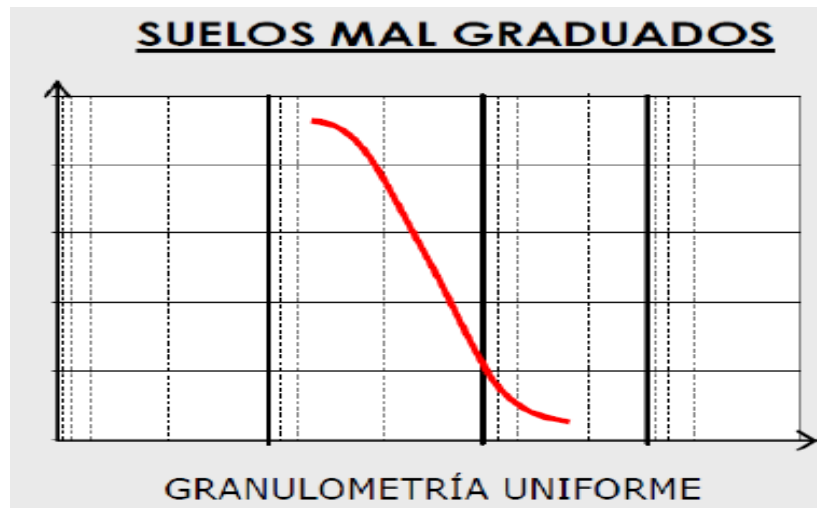


Figura 40. Granulometría uniforme.  
Fuente: Luis Bañon, José Beviá, Manual de carreteras 2.

### 6.2.2 Granulometría agregado fino.

Para realizar el siguiente ensayo se extrajo una muestra de 5.00 kilogramo como se observa en la figura 40. La cual será evaluada por los tamices de 9.53mm (3/8"), 4.75mm (#4), 2mm (#10), 0.60mm (#30), 0.30mm (#50), 0.074mm (#200).



Figura 41. Material seleccionado para granulometría.  
Fuente: Elaboración propia.

ARENA					
TAMIZ	TAMAÑO (mm)	PESO RETENIDO (g)	% RETENIDO	% RETENIDO ACUMULADO	% PASA
3/8"	9.53	70.14	1.40	1.40	98.60
#4	4.75	945.98	18.69	20.09	79.68
#10	2.00	1548.1	30.96	51.05	48.71
#16	1.18	554.04	10.42	61.47	37.63
#30	0.60	562.14	11.42	72.90	26.38
#50	0.30	448.5	9.97	82.87	17.41
#200	0.074	795.58	15.83	98.70	1.50
Fondo		75.	1.30	100	0.00
	TOTAL	4999 = 5.000			

Tabla 9. Tabla Granulométrica.  
Fuente Elaboración propia.

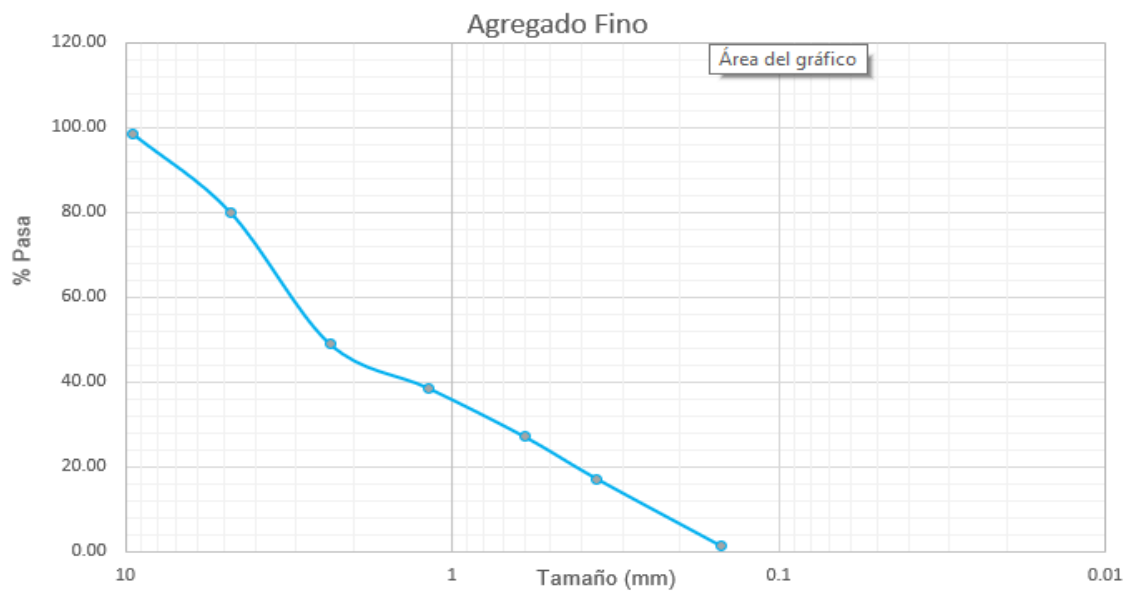


Figura 42. Curva granulométrica agregado grueso.  
Fuente: Elaboración propia.

De la tabla 9, se puede observar que el 30.97% del material es arena gruesa, 22.33% es arena media y el 27.88% restante es arena fina.

En la figura 41, se observa una curva granulométrica discontinua, esto quiere decir que el material se encuentra mal gradado.

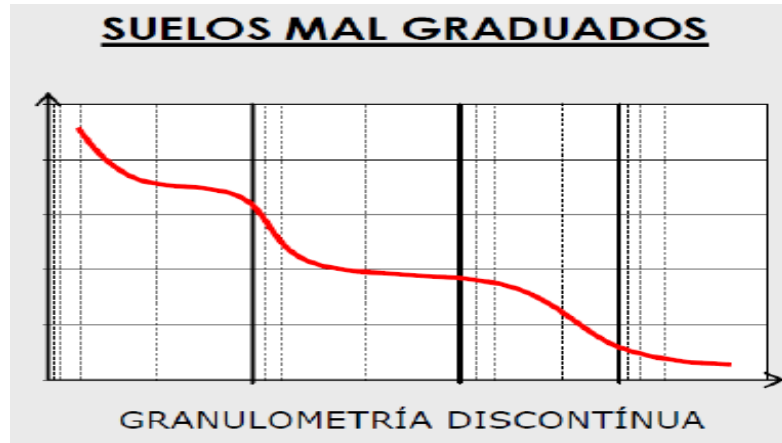


Figura 43. Curva Granulométrica Discontinua.  
Fuente: Luis Bañón, José Beviá, Manual de carreteras 2.

### 6.2.3 Equivalente de arena (INV E 133-13).

Se usa un volumen normalizado de suelo o de agregado fino y una pequeña cantidad de solución floculante, se colocan en un cilindro de plástico graduado y se agitan, para que las partículas de arena pierdan la cobertura de material arcilloso o similar. La muestra es posteriormente "irrigada", usando cierta cantidad de solución floculante, para forzar al material arcilloso o similar a quedar en suspensión sobre la arena. Después de un período de sedimentación, se determinan las alturas del material arcilloso y fino floculado y de la arena en el cilindro. El equivalente de arena es la relación entre la altura de arena y la altura de arcilla, expresada en porcentaje.<sup>43</sup>

$$EA = \frac{\text{Lectura Arena}}{\text{Lectura Arcilla}} \times 100 \quad (24)$$

Donde:

<sup>43</sup> INSTITUTO NACIONAL DE VIAS. Normas de ensayos laboratorio, Colombia, 2013, P. E-133-2.

EA: Equivalente de arena.

Lectura de arena:  $103 \pm 1.00$  mm.

Lectura de arcilla:  $113 \pm 1.00$  mm.

En la lectura de se presenta una incertidumbre de error de  $\pm 1.00$  mm.

$$EA = \frac{103}{113} \times 100$$

$$EA = 91.15 \pm 1 \%$$

- Arena:  $91.15 \pm 1\%$
- Arcilla:  $8.85 \pm 1\%$

Los datos que se reemplazaron en la ecuación 24, fueron obtenidos de la figura 44.



*Figura 44. Ensayo equivalente de arena.  
Fuente: Elaboración propia.*





*Figura 45. Ensayo equivalente de arena.  
Fuente: Elaboración propia*

#### 6.2.4 Materia orgánica (INV E 212-13).

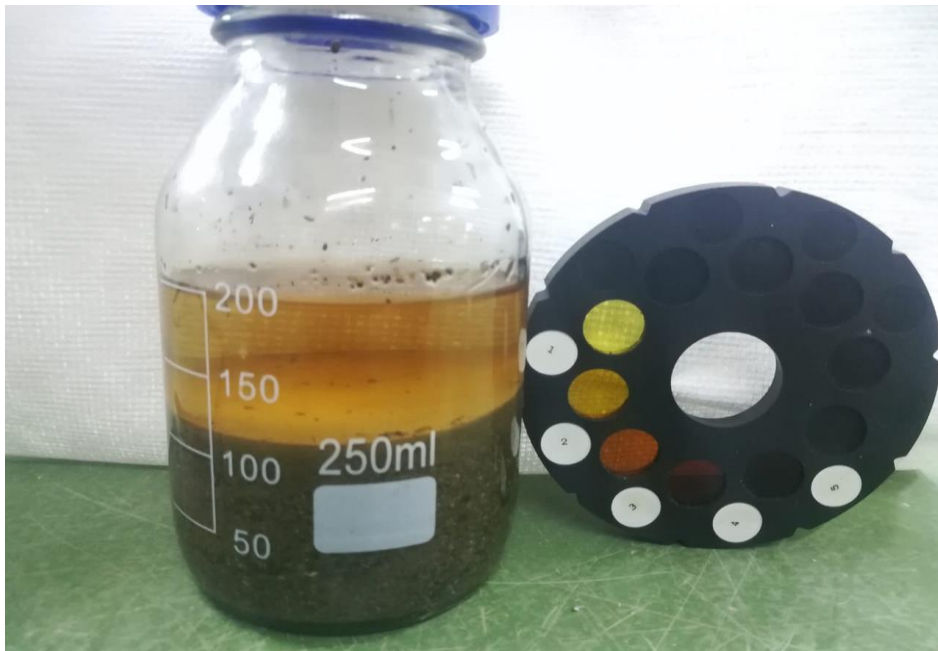
Este ensayo sirve para determinar de manera aproximada, la presencia de materia orgánica en arenas usadas en la preparación concretos de cemento hidráulico. Este procedimiento usa vidrios de colores de referencia.<sup>44</sup>

La importancia de este método de ensayo está en el hecho de proporcionar una advertencia sobre las impurezas orgánicas que puedan estar presentes en el material. Cuando una muestra sujeta a este ensayo produce un color más oscuro que el color estándar, es aconsejable ejecutar la prueba para determinar el efecto de las impurezas orgánicas sobre la resistencia del concreto.<sup>45</sup>

---

<sup>44</sup> CONTENIDO APROXIMADO DE MATERIA ORGÁNICA EN ARENAS USADAS EN LA PREPARACIÓN DE MORTEROS O CONCRETOS, INV E 212-13, Colombia, 2013, P.1.

<sup>45</sup> NORMA AASHTO T 71.



*Figura 46. Ensayo materia orgánica.  
Fuente: Elaboración propia.*

El material no contiene componentes orgánicos perjudiciales, por lo tanto, se aprueba para la producción de concreto hidráulico. Se le debe de realizar un lavado al material.

La norma (INV E 212-13), establece que, posiblemente, la arena contiene componentes orgánicos perjudiciales, cuando el color del líquido es más oscuro que la placa orgánica No. 3, y en este caso como se observa en la figura 46, el líquido es más claro que la placa orgánica No.3.

#### 6.2.5 Gravedad específica y porcentaje de absorción en agregados gruesos (INV E 223-13).

Gravedad específica es la relación entre la masa (peso en el aire) de un volumen de sólidos y la masa de un volumen igual de agua a una temperatura establecida. Su valor es adimensional.

Absorción, es la masa del agua que llena los poros permeables de las partículas de agregado sin incluir el agua adherida a la superficie de estas, expresada como porcentaje de la masa seca del agregado, después de secado a  $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ .<sup>46</sup>



Figura 47. Material sumergido en agua. Fuente: Elaboración propia.



Figura 48. Material secado superficial. Fuente: Elaboración propia.

---

<sup>46</sup> GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN DE AGREGADOS GRUESOS, INV E 223-13, Colombia, 2013, P.1.



Figura 49. Peso del montaje más la masa sumergida.  
Fuente: Elaboración propia.

DATOS DEL ENSAYO GRAVEDADA ESPECIFICA		
	Símbolo	Masa (g)
Masa seca al horno	A	3000
Masa saturada superficialmente seca	B	3011
Masa de la muestra + agua	C	1827
Masa del montaje	-	937

Tabla 10. Datos del ensayo gravedad específica.  
Fuente: Elaboración propia.

$$\text{Densidad relativa (Gravedad específica)} = \frac{A}{B - C} \quad (25)$$

$$\text{Densidad relativa (Gravedad específica)} = \frac{3000}{3011 - 1827}$$

$$\text{Densidad relativa (Gravedad específica)} = 2.53$$

$$\% \text{ Absorción} = \frac{B - A}{A} \times 100 \quad (26)$$

$$\% \text{ Absorción} = \frac{3011 - 3000}{3000} \times 100$$

$$\% \text{ Absorción} = 0.37$$

$$\text{Densidad relativa seca al horno} = \frac{B}{B - C} \quad (27)$$

$$\text{Densidad relativa seca al horno} = \frac{3011}{3011 - 1827} = 2.54$$

$$\text{Densidad relativa SS} = \frac{A}{A - C} \quad (28)$$

$$\text{Densidad relativa SS} = \frac{3000}{3000 - 1827} = 2.56$$

TABLA DE RESULTADOS		
	Símbolo	
Densidad relativa seca al horno	SH	2.54
Densidad relativa sss	SSS	2.56
Densidad relativa aparente		2.53
Absorción		0.37

Tabla 11. Tabla de resultados.  
Fuente: Elaboración propia.

Rango de aceptación de gravedad específica para agregados gruesos: 2.33 y 2.75.

La densidad relativa aparente (2.53), se encuentra dentro del rango de aceptación establecido por la ASTM.

El % de absorción resultante (0.37), si cumple con lo establecido por la norma, lo que quiere decir que el material no presenta demasiados poros.

### 6.2.6 Gravedad específica y porcentaje de absorción en agregados finos (INV E 222-13).

Con este ensayo se determina la densidad promedio, la densidad relativa (gravedad específica), y la absorción del agregado fino. La gravedad específica es la característica generalmente empleada para calcular el volumen ocupado por el agregado en mezcla de concreto hidráulico.

Los valores de absorción se usan para calcular el cambio de masa de un agregado a causa del agua absorbida por sus partículas.



Figura 50. Material sumergido en agua. Fuente: Elaboración propia.



Figura 51. Comprobación del estado saturado. Fuente: Elaboración propia

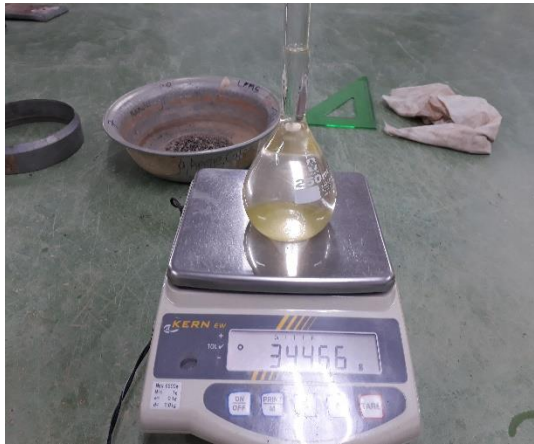


Figura 52. Peso del picnómetro más agua. Fuente: Elaboración propia.



Figura 53. Peso picnómetro con agua más la muestra. Fuente: Elaboración propia.



Figura 54. Masa seca al horno extraída del picnómetro.  
Fuente: Elaboración propia

DATOS DEL ENSAYO GRAVEDADA ESPECIFICA		
	Símbolo	Masa (g)
Masa suelo saturada superficialmente seca	S	103.4
Masa seca al horno	A	99.01
Masa del picnómetro + agua	B	344.66
Masa del picnómetro + agua + muestra	C	408.16

Tabla 12. Datos del ensayo gravedad especifica arena.  
Fuente: Elaboración propia.

$$\text{Densidad relativa (Gravedad especifica)} = \frac{A}{(B + S - C)} \quad (29)$$

$$\text{Densidad relativa (Gravedad especifica)} = \frac{99.01}{(344.66 + 103.4 - 408.16)}$$

$$\text{Densidad relativa (Gravedad especifica)} = 2.48$$

$$\text{Densidad relativa seca al horno} = \frac{S}{(B + S - C)} \quad (30)$$

$$\text{Densidad relativa seca al horno} = \frac{103.4}{344.66 + 103.4 - 408.16} = 2.59$$

$$\text{Densidad relativa aparente} = \frac{A}{B + A - C} \quad (31)$$

$$\text{Densidad relativa aparente} = \frac{99.01}{344.66 + 99.01 - 408.16} = 2.78$$

$$\% \text{ Absorción} = \frac{S - A}{A} \times 100 \quad (32)$$

$$\% \text{ Absorción} = \frac{103.4 - 99.01}{99.01} \times 100 = 4.43$$



TABLA DE RESULTADOS		
	Símbolo	
Densidad relativa seca al horno	SH	2.59
Densidad relativa sss	SSS	2.48
Densidad relativa aparente		2.78
Absorción	%	4.43

*Tabla 13. Resultados ensayo gravedad específica arena.  
Fuente: Elaboración propia.*

Rango de aceptación de gravedad específica para agregados finos: 2.21 y 2.67.

Rango de aceptación de % de absorción para agregados finos: 0 y 5%.

La gravedad específica de la arena (2.48) y el % de absorción (4.43), están dentro del rango establecido por la norma.

### 6.3 DISEÑO DE LA MEZCLA DEL CONCRETO HIDRÁULICO.

El proporcionamiento de mezclas de concreto o “Diseño de mezclas”, es un proceso que consiste en la selección de los ingredientes disponibles (cemento, agregados, agua y aditivos) y la determinación de sus cantidades relativas para producir, tan económicamente como sea posible, concreto con el grado requerido de manejabilidad, que al endurecer a la velocidad apropiada adquiere las propiedades de resistencia, durabilidad, peso unitario, estabilidad de volumen y apariencias adecuadas.<sup>47</sup>

#### 6.3.1 Especificaciones

Por lo general, cada proyecto tiene requerimientos particulares que dependen del tipo de estructura, condiciones de clima, sistema constructivo, tiempo y costo de ejecución, entre otros, que pueden abarcar una gama de propiedades y

---

<sup>47</sup> SANCHEZ DE GUZMAN, Diego. Tecnología del Concreto y del Mortero. Biblioteca de la Construcción. Colombia. 2001. P.221.

características del concreto. Frecuentemente las especificaciones pueden solicitar algunos de los siguientes aspectos<sup>48</sup>:

- a) Máximo y/o mínimo asentamiento.
- b) Tamaño máximo y/o máximo nominal del agrega grueso.
- c) Contenido mínimo de aire incluido, para adecuada durabilidad en ciertos climas.
- d) Resistencia a la compresión mínima necesaria, por consideraciones estructurales.
- e) Resistencia mínima de sobre diseño.
- f) Máxima relación agua-cemento y/o contenido mínimo de cemento.
- g) Máximo contenido de cemento, para evitar agrietamiento por exceso de temperatura en concreto masivo.
- h) Máximo contenido de cemento, para evitar agrietamiento por contracción en condiciones de baja humedad.
- i) Tipos especiales de cemento o agregados.
- j) Peso unitario mínimo, para presas de gravedad y estructuras similares.
- k) Uso de adictivos.

### 6.3.2 Procedimiento de diseño de mezcla

#### **1. Selección del asentamiento.**

En la tabla 13, se puede observar los posibles valores de asentamiento para tener en cuenta dependiendo del tipo de construcción.

---

<sup>48</sup> SANCHEZ DE GUZMAN, Diego. Op cit. P 223.

<b>Consistencia</b>	<b>Asentamiento (mm)</b>	<b>Tipo de construcción</b>	<b>Sistema de colocación</b>	<b>Sistema de compactación</b>
<b>Muy seca</b>	0-20	Prefabricados de alta resistencia, revestimiento de pantalla de cimentación.	Con vibradores de formaleta; concretos de proyección neumática (lanzado).	Secciones sujetas a vibración extrema, puede requerirse presión.
<b>Seca</b>	20-35	Pavimentos	Pavimentadoras con terminadora vibratoria.	Secciones sujetas a vibración intensa.
<b>Semiseca</b>	35-50	Pavimentos, fundaciones en concreto simple.	Colocación con máquinas operadas manualmente	Secciones simplemente reforzadas con vibración.
<b>Media</b>	50-100	Pavimentos compactados a mano, losas, vigas.	Colocación manual.	Secciones medianamente reforzadas, sin vibración.
<b>Húmeda</b>	100-150	Elementos estructurales esbeltos.	Bombeo.	Secciones bastante reforzadas, sin vibración.
<b>Muy húmeda</b>	150 o más	Elementos muy esbeltos, pilotes fundidos.	Tubo-embudo.	Secciones altamente reforzadas, sin vibración. (Normalmente no adecuados para vibrarse)

*Tabla 14. Asentamiento recomendado para diversos tipos de construcción y sistema de colocación y compactación.*

*Fuente: Tecnología del concreto y mortero.*

## **2. Selección del tamaño máximo del agregado.**

La tabla 14, facilita la selección del tamaño máximo del agregado dependiendo el tipo de uso.

Tamaños máximos de agregados según el tipo de construcción				
Dimensión mínima de la sección (cm)	Tamaño máximo en pulg. (mm)			
	Muros reforzados, vigas y columnas	Muros sin refuerzo	Losas muy reforzadas	Losas sin refuerzo o poco reforzadas
6-15	½"(12)-¾"(19)	¾"(19)	¾"(19)-1"(25)	¾"(19)-1 ¾"(38)
19-29	¾"(19)-1 ½"(38)	1 ½"(38)	1 ½"(38)	1 ½"(38)-3"(76)
30-74	1 ½"(38)-3"(76)	3"(76)	1 ½"(38)-3"(76)	3"(76)
75 o más	1 ½"(38)-3"(76)	6" (152)	1 ½"(38)-3"(76)	3"(76)- 6"(152)

Tabla 15. Tamaños máximos de agregados según el tipo de construcción.  
Fuente: Tecnología del concreto y mortero.

### 3. Módulo de finura arena.

El módulo de finura solo se obtiene de la arena, el cual es la sumatoria del porcentaje retenido acumulado del tamiz número 4 hasta el tamiz número 100 y ese valor dividido en 100, como se muestra en la ecuación 35.

$$\sum \frac{\% \text{ retenido acumulado} \#4 \sim \#100}{100} \quad (33)$$

### 4. Estimación del contenido de aire.

Como es sabido, durante la operación de mezclado queda aire naturalmente atrapado dentro del concreto<sup>49</sup>. Pero en este caso se tomó el contenido de aire como cero, quiere decir que no se va a incluir ningún tipo de aire adicional.

### 5. Estimación del contenido de agua de mezclado.

Como se recordará, el agua de mezclado cumple dos funciones principales en una mezcla de concreto, una es hidratar las partículas de cemento, y la otra, producir la fluidez necesaria.<sup>50</sup>

<sup>49</sup> SANCHEZ DE GUZMAN, Diego. Op cit. P 231.

<sup>50</sup> SANCHEZ DE GUZMAN, Diego. Op cit. P 233.

Asentamiento		Tamaño máximo del agregado, en mm (pulg)							
		9.51 ¾"	12.7 ½"	19.0 ¾"	25.4 1"	38.1 1 ½"	50.8 2"	64.0 2 ½"	76.1 3"
mm	Pulg	Agua de mezclado, en kg/m <sup>3</sup> de concreto							
0	0	213	185	171	154	144	136	129	123
25	1	218	192	177	161	150	142	134	128
50	2	222	197	183	167	155	146	138	132
75	3	226	202	187	172	160	150	141	136
100	4	229	205	191	176	164	154	144	139
125	5	231	208	194	179	168	156	146	141
150	6	233	212	195	182	172	159	150	143
175	7	237	216	200	187	176	165	156	148
200	8	244	22	206	195	182	171	162	154

Tabla 16. Requerimiento aproximado de agua de mezclado para diferentes asentamientos y tamaños máximos de agregado, con partículas de forma redondeada y textura lisa, en concreto sin aire incluido.  
Fuente: Tecnología del concreto y mortero.

## 6. Determinación de la resistencia de diseño.

De acuerdo con las condiciones de las normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo-Resistente (NSR-10) y con lo expuesto en el capítulo 10 (criterios de evaluación para criterio de mezclas), el concreto debe diseñarse y producirse para asegurar una resistencia a la compresión promedio ( $f'_{cr}$ ), lo suficientemente alta para minimizar la frecuencia de resultados de pruebas de la resistencia por debajo del valor de la resistencia a la compresión especificada del concreto ( $f'_c$ ).<sup>51</sup>

Resistencia especificada $F'_c$ (kg/cm <sup>2</sup> )	Resistencia de diseño de la mezcla $F'_{cr}$ (kg/cm <sup>2</sup> )
Meno de 250 kg/cm <sup>2</sup>	$F'_c + 70$ kg/cm <sup>2</sup>
De 210 kg/cm <sup>2</sup> a 350 kg/cm <sup>2</sup>	$F'_c + 85$ kg/cm <sup>2</sup>
Más de 350 kg/cm <sup>2</sup>	$F'_c + 100$ kg/cm <sup>2</sup>

Tabla 17. Resistencia requerida de diseño cuando no hay datos que permitan determinar la desviación estándar. Fuente: Tecnología del concreto y mortero.

<sup>51</sup> SANCHEZ DE GUZMAN, Diego. Op cit. P 235.

## 7. Selección de la relación agua-cemento.

Debido a que la resistencia del concreto se rige principalmente por la resistencia e interacción de sus fases constituyentes; pasta, agregados e interfaces de adherencia pasta-agregado, es común que los diferentes agregados y cementos produzcan resistencias distintas con la misma relación agua-cemento. Por esta razón, es importante conocer o desarrollar la correspondencia entre la resistencia y la relación agua cemento, para cada grupo de materiales en particular y para diferentes edades<sup>52</sup>.

Resistencia a la compresión kg/cm <sup>2</sup>	Relación agua-cemento en peso		
	Límite superior	Línea media	Límite inferior
140	-	0.72	0.65
175	-	0.65	0.58
210	0.70	0.58	0.53
245	0.64	0.53	0.49
280	0.59	0.48	0.45
315	0.54	0.44	0.42
350	0.49	0.40	0.38

Tabla 18. Relación agua cemento. Fuente: Tecnología del concreto y mortero.

## 8. Cálculo del contenido de cemento.

Para el cálculo del contenido de cemento se debe usar la ecuación 86.

$$C = \frac{A}{(A/C)} \quad (34)$$

## 9. Estimación de las proporciones de agregados.

Para conocer las proporciones de los agregados, se deben de utilizar las ecuaciones 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41 y 42.

<sup>52</sup> SANCHEZ DE GUZMAN, Diego. Op cit. P 237.

$$Volumen\ agregados = 1 - \left( \frac{Cantidad\ Agua}{Densidad\ Agua} \right) - \left( \frac{Cantidad\ Cemento}{Densidad\ Cemento} \right) \quad (35)$$

$$G_{prom} = \frac{100\%}{\frac{\% Agregado\ Grueso}{P. Espec. Apart} + \frac{\% Agregado\ Fino}{P. Espec. Apart}} \quad (36)$$

Donde:

% Agregado grueso: cantidad en porcentaje del material grueso que se encontró en la granulometría.

% Agregado fino: cantidad en porcentaje del material fino que se encontró en la granulometría.

P. espec. apart: Peso específico aparente del material grueso o fino.

$$Cantidad\ de\ agregados = G_{prom} * Volumen\ agregados \quad (37)$$

$$Peso\ Arena = Cantidad\ agregados * \% Agregado\ fino \quad (38)$$

$$Peso\ Grava = Cantidad\ agregados * \% Agregado\ grueso \quad (39)$$

## 10. Estimación de la porción de la mezcla.

Se debe dividir la cantidad de cada uno de los agregados, incluyendo al cemento entre la cantidad de cemento.

$$\text{Proporcion cemento} = \frac{\text{Cantidad de cemento}}{\text{Cantidad de cemento}} \quad (40)$$

$$\text{Proporción arena} = \frac{\text{Cantidad arena}}{\text{Cantidad cemento}} \quad (41)$$

$$\text{Proporción grava} = \frac{\text{Cantidad grava}}{\text{Cantidad cemento}} \quad (42)$$

### 6.3.2.1 METODOLOGÍA DEL PROCESO DE DISEÑO UTILIZADO

Se inicia con la granulometría de todo el material (grava y arena), para conocer los porcentajes de grava y de arena que contiene el material, luego se procede a sacar los datos para el diseño utilizando las tablas y los algoritmos mencionados en la sección 6.3.2.

Granulometría					
Tamices (pulg)	Tamices (mm)	Peso retenido	Porcentaje retenido	Porcentaje retenido acumulado	Porcentaje pasante
1 ½"	37.5	0	0	0	100
1"	25	1566	15.66	15.664	84.34
¾"	19	2703	27.04	42.7	57.30
½"	12.5	720	7.20	49.90	50.10
3/8"	9.5	79.14	0.79	50.693	49.31
#4	4.75	945.98	9.46	60.155	39.84
#10	2	1548.1	15.48	75.640	24.36
#16	1.18	554.04	5.54	81.181	18.82
#30	0.6	562.14	5.62	86.804	13.20
#50	0.36	448.50	4.49	91.290	8.71
#200	0.075	795.58	7.96	99.248	0.75
Fondo		75.20	0.75	100	0.00
		Total	9.998=10.000		

Tabla 19. Granulometría del material completo.  
Fuente: Elaboración propia.



% Grava y Arena	
Grava	60.52
Arena	39.48

Tabla 20. Porcentaje que contiene el material de grava y arena.  
Fuente: Elaboración propia.

Módulo de finura	2.88
Asentamiento (cm)	5
Tamaño máximo nominal (mm)	19
Contenido de aire	0
Cantidad de agua	183
F'c	21
F'cr	29.5
Relación agua-cemento (A/C)	0.5
Contenido de cemento	366
Peso específico aparente grava	2.53
Peso específico aparente grava	2.48
Densidad del cemento (kg/m <sup>3</sup> )	3000
Volúmenes agregados (m <sup>3</sup> )	0.70
Gprom (kg/m <sup>3</sup> )	2510
Cantidad agregados (kg)	1744.5
Peso arena (kg)	688.7
Peso grava	1055.7

Tabla 21. Datos para el diseño del concreto hidráulico.  
Fuente: Elaboración Propia.

Material	Peso (kg)	Densidad aparente (kg/m <sup>3</sup> )	Volumen (m <sup>3</sup> )	Proporción
Agua	183	1000	0.183	
Cemento	366	3000	0.12	1
Agregado Fino	688.7	2480	0.28	1.88
Agregado Grueso	1055.7	2530	0.42	2.88

*Tabla 22. Proporción de la mezcla. Fuente: Elaboración propia*

#### **6.4 VACIADO DE CILINDROS Y COLUMNAS.**

Una vez obtenido el diseño de mezcla y las proporciones de los agregados, se procede a realizar el trabajo de campo, el cual consiste en vaciar los cilindros y columna.

Para realizar esta práctica se utilizó una concretadora como se muestra en la figura 54, un bugí, una pala, varilla compactadora y moldes para cilindros. Los equipos mencionados anteriormente fueron suministrados por el personal del laboratorio de ingeniería civil de la universidad libre seccional Pereira.

Primero se procedió a vaciar la arena dentro de la concretadora y se dio inicio al proceso de mezclado, paso un tiempo estimado de más o menos un minuto y se vació el cemento, el cual se dejó mezclar durante un minuto con la arena, posterior a esto se vació la grava y también se dejó mezclar durante un minuto y por último se vació el agua y se dejó mezclar durante 2 minutos y medio.

La mezcla mencionada anteriormente se utilizó para vaciar la columna. Y se produjo a realizar otra mezcla manual con la misma proporción y con el mismo procedimiento anterior para vaciar los cilindros, teniendo en cuenta los parámetros obtenido en el diseño de mezcla.



Figura 55. Concretadora. Fuente: Elaboración propia.



Figura 56. Moldes para la elaboración de los cilindros. Fuente: Elaboración propia.



*Figura 57. Mezcla para vaciado de cilindros. Fuente: Elaboración propia.*

Para el vaciado de los cilindros se realizó el siguiente procedimiento, primero se revisaron todos los aparatos a utilizar, con el fin de verificar que estos estuvieran adecuados y cumplieran con los requisitos que exige la NTC 550 (Norma Técnica Colombiana), luego se le agrego un poco de ACPM al interior de los cilindros para facilitar su desencofre, más adelante se siguió con el llenado, el cual se hizo mediante tres capas iguales. Se apisono cada capa con el extremo de la varilla computadora, utilizando veinticinco golpes por capa en toda su profundidad y distribuyéndose así uniformemente en toda la superficie del molde, después de que se agregó la capa final y se compacto, se adiciono la cantidad de material necesario para llenar el molde y por último se enraso la superficie con la varilla compactadora como se muestra en la figura 59.



Figura 58. Inicio de llenado. Fuente: Elaboración propia.

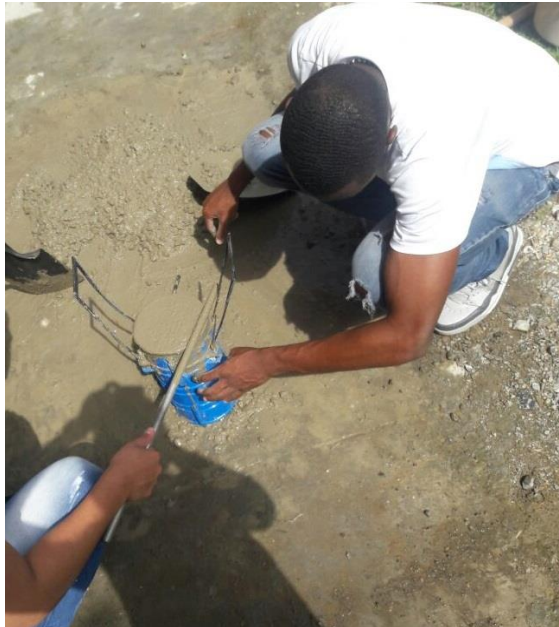


Figura 59. Enrasado de superficie. Fuente: Elaboración propia.



*Figura 60. Desencofre de cilindros. Fuente: Elaboración propia.*

Para el vaciado de la columna se utilizó la mezcla que se muestra en la figura 61. También se usó un vibrador, el cual tenía como función compactar la mezcla y evitar una posible segregación en el material mezclado.



*Figura 61. Mezcla para el vaciado de la columna. Fuente: Elaboración propia.*

## 6.5 ENSAYO DE RUPTURAS DE CILINDRO.

A continuación, se mostrarán los ensayos de resistencia a la compresión que se realizaron a los cilindros de concreto hidráulico, con el fin de conocer su máxima resistencia.

### 6.5.1 Ruptura de cilindro a los 21 días.



Figura 62. Peso del cilindro. Fuente: Elaboración propia.

Como se muestra en la figura 63, la ruptura del cilindro a los 21 días tuvo una resistencia de 18.18 MPa, soportando una carga de 321.37 KN, el cual genero un tipo de falla número cinco (figura 64), como se indica en la NTC 673.



Figura 63. Resultado de la ruptura del cilindro a los 21 días. Fuente: Elaboración propia.



Figura 64. Ruptura del cilindro a los 21 días. Fuente: Elaboración propia.



### 6.5.2 Ruptura de cilindro a los 28 días.

Como se muestra en la figura 65, la ruptura del cilindro a los 28 días tuvo una resistencia de 20.48 MPa (por equivalencia se toma una resistencia de 21 Mpa), soportando una carga de 361.83 KN, el cual genero un tipo de falla número dos (figura 66), según la norma (NTC 673).

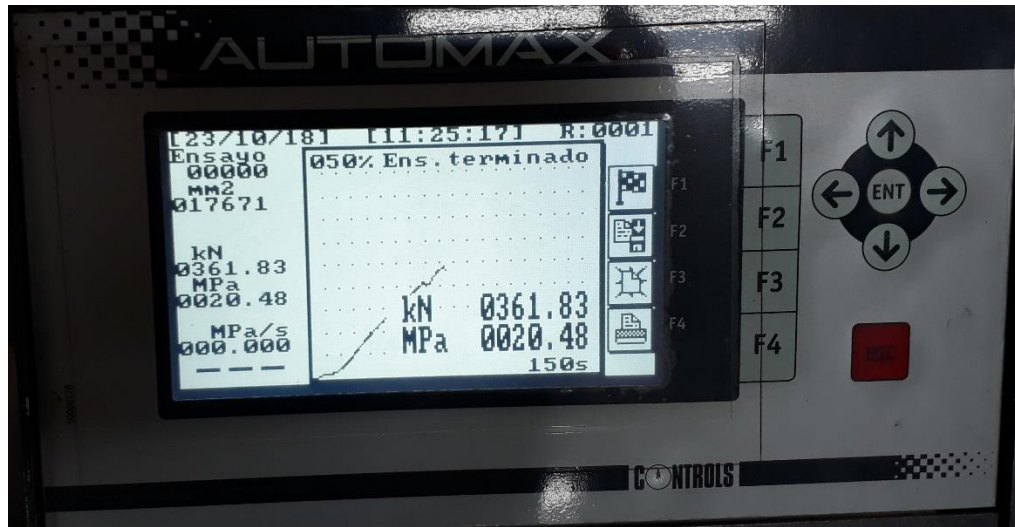


Figura 65. Resultado de la ruptura del cilindro a los 28 días. Fuente: Elaboración propia.



*Figura 66. Ruptura del cilindro a los 28 días. Fuente: Elaboración propia.*

## 6.6 PROTOTIPO ELABORADO.



Figura 67. Desencofre de la columna. Fuente: Elaboración propia.



Figura 68. Columna construida. Fuente: Elaboración propia.



*Figura 69. Columna construida. Fuente: Elaboración propia.*

## 7 CONCLUSIONES

El presente trabajo suministra todas las herramientas, cálculos y soportes tanto bibliográficos como de análisis pertinentes para la implementación del prototipo que evaluara el desempeño de la mesa de simulación sísmica unidireccional.

Mediante del software etabs se logró modelar el prototipo y conocer cuál sería su posible desplazamiento ante la aplicación de diferentes cargas.

Con la ayuda de los ensayos de laboratorio como granulometría, gravedad específica, equivalente de arena, entre otros, se logró conocer las características del material, el diseño de mezcla, su resistencia y obtener la construcción del prototipo.

El análisis del diseño propuesto cumple con requerimientos estáticos y dinámicos necesarios para un óptimo desempeño, con lo cual la adquisición de datos se espera que sea confiable para los análisis posteriores.

## TRABAJOS FUTUROS

La implementación de la mesa permitiría a la comunidad unilibrista de la facultad de ingenierías ampliar su conocimiento en áreas como análisis de estructuras, suelos, fluidos, física mecánica, sistemas, entre otros. Generándose así una herramienta de análisis que complemente los equipos del laboratorio existente e impulsar a la universidad a la acreditación de programas. Por tal motivo se recomienda a futuro la construcción de la mesa de simulación sísmica diseñada en este trabajo.

La implementación de la mesa de simulación sísmica unidireccional permitiría la realización de concursos de estructuras a escala reducida, divulgando y promoviendo las relaciones institucionales promoviendo así la innovación de modelos y la optimización de diseños estructurales.

Las mesas de simulación sísmica permitirían observar en estructuras a escala reducida diferentes variables como efectos de carga en estructuras regulares e irregulares, características de respuesta dinámica bajo reproducciones de sismos observando su respuesta inelástica, elástica y fisuras, efectos de masa, irregularidades de rigidez, torsión y efectos de volcado, idealización de las nuevas estructuras bajo fuerzas horizontales.

## 8 RECOMENDACIONES

Para construir el modelo a escala del prototipo utilizado en este proyecto se debe de respetar las medidas de escalamiento tanto de fuerzas como longitudes, las cuales fueron establecidas en el desarrollo del proyecto. Y cumplir con las especificaciones de la mesa de simulación sísmica.

Para articular el prototipo (columna) a la plata forma de la mesa de simulación sísmica, se puede construir una base hierro fundido en forma de cubo con una profundidad de  $\frac{1}{3}$  de la altura del prototipo y que tenga las dimensiones exactas de la columna, para que esta quede fija y no genere ningún tipo de movimiento a la hora del ensayo.

Se debe seguir estrictamente con las dimensiones y localizaciones de cada uno de los componentes de la mesa para el óptimo funcionamiento de la mesa de simulación sísmica y los modelos en estudio.

La mesa de simulación sísmica no requiere de una cimentación debido a que los esfuerzos que ejerce a la losa de contrapiso son mínimos.

## 9 Bibliografía

2015], Quanser®. Shakes Table II [en línea]. [http://www.quanser.com/Products/shake\\_table\\_II](http://www.quanser.com/Products/shake_table_II) [citado en 6 julio de.

2015], Servicio Geológico Colombiano. ¿Es posible predecir un Sismo [en línea]? < <http://seisan.sgc.gov.co/RSNC/index.php/component/content/article/67-ies-posible-predecir-un-sismo>> [citado en 13 de mayo de.

CARRILLO, Julián, BERNAL RUIZ, Néstor M. y PORRAS, Pahola. Evaluación del diseño de una pequeña mesa vibratoria para ensayos en ingeniería sismo-resistente. Anales de Documentación [en línea]. N° 1 (15 de mayo., 2013). Disponible en: < <http://www.umng.edu>.

CLAVIJO CARTAGENA, Juan Carlos y RAMIREZ CONTRERAS, Luis Reinaldo. Diseño, Modelamiento y Simulación de una Mesa Sísmica Unidireccional Hidráulica. Bucaramanga. Colombia, 2011, 122 h. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico – Me.

CONTENIDO APROXIMADO DE MATERIA ORGÁNICA EN ARENAS USADAS EN LA PREPARACIÓN DE MORTEROS O CONCRETOS, INV E 212-13, Colombia, 2013, P.1.

ECHEVERRYA PEREZ, Fernando Iván. Evaluación de parámetros dinámicos en estructuras en movimiento y registros sísmicos utilizando la transformada wavelet. Universidad Austral de Chile. Facultad de ingeniería civil. Chile. 2010. P 16.

ESQINOSA BAQUERO, Armando, La sismicidad histórica en Colombia, Revista geográfica venezolana, vol. 44, 2003, P.272.

GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN DE AGREGADOS GRUESOS, INV E 223-13, Colombia, 2013, P.1.

HURTADO GOMEZ, Jorge Eduardo, Introducción a la dinámica de estructuras, Universidad Nacional de Colombia sede Manizales, 2000, P 151.

INSTITUTO NACIONAL DE VIAS. Normas de ensayos laboratorio, equivalente de arena, Colombia, 2013, P. E-133-2.

INSTITUTO NACIONAL DE VIAS. Normas Y Especificaciones, Colombia, 2012, P.E-102.

JIMENEZ TINTAYA, Cesar Omar, Procesamiento digital de señales sísmicas con Matlab, Instituto geofísico del Perú, Vol. 10, 2007, P 46.

Medidas, Gráficos y Cálculos De ERRORES Y Laboratorio De Calculo, P5.



MILLONES, José Luis, Localización de un sismo utilizando una estación de tres componentes, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ciencias Físicas E.A.P De Física, Lima-Perú, 2005, P8.

MOLINA, Sergio, El Tamaño De Los Terremotos: Intensidad y Magnitud, 2004, P99.

NORMA TECNICA COLOMBIANA, NTC 550 Segunda actualización, p.4.

NORMA TECNICA COLOMBIANA, NTC 673, Resistencia a la comprensión, Tercera actualización, p.1.

OCHOA CARDONA, Catalina, URIBE DORADO, José Ignacio, diseño y desarrollo de una experiencia interactiva que trata el tema del comportamiento de edificaciones frente a sismos, para la sala Colombia geodiversa del parque explora, Universidad Eafit, Medellín.

Oppenheim, Alan y Willsky, Alan. 1998. *Señales y Sistemas*. México : Prentice Hall, 1998. pág. 200.

ORTIZ SALAS, Carmen Elena. Proyecto piloto de medidas de distribución de las intensidades sísmicas en la ciudad de Tacna mediante la intensidad de sismoscopios. Lima – Perú, 2010, p 13.

RAMIREZ, Jesús Emilio, Historia de los terremotos en Colombia, Instituto geográfico “Agustín Codazzi”, segunda edición, P.12.

REGLAMENTO COLOMBIANO DE CONSTRUCCION SISMO RESISTENTE, Titulo A, 2010. P. A2.

SANCHEZ DE GUZMAN, Diego. Tecnología del Concreto y del Mortero. Biblioteca de la Construcción. Colombia. 2001. P.221.

Sears, Francis Weston. 2004. *Física universitaria, Volume 1*. s.l. : Pearson Educación, 2004.

SIMULADOR SISMICO UNIVERSIDAD EAFIT, Laboratorio de Investigación de Ingeniería Sísmica.

TEJERIZO FERNANDEZ, Maribel, Elaboración de fórmulas analíticas y tablas de cálculo para las estructuras metálicas de acero según la normativa Euro código 3, Escola Técnica Superior d’Enginyeria Industrial de Barcelona, abril 2015, P8.

Universidad De Los Andes, Facultad de Ingeniería, Revista Contacto, Facultad Investigativa para un mejor País, 2015, P 61.

VÉLEZ CASTRILLÓN, Kevin Esteban. DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UNA PEQUEÑA MESA DE SIMULACIÓN SÍSMICA UNIDIRECCIONAL. Universidad Libre Seccional Pereira. Colombia. 2016. P.33.

VIDES DE LA HOZ, Félix Joaquín, Metodología para realizar modelos de concreto reforzado a escala reducida, Universidad Industrial De Santander, Bucaramanga, 2006, p 16.

## ANEXO A. RUTINA ESCRITA EN MATLAB SISMO CREADO

```
clear all, clc, close all

Fs = 50;          % Sampling frequency
T = 1/Fs;        % Sampling period

load SISMO_CREADO.txt
t = SISMO_CREADO(:,1); % Vector tiempo
y = SISMO_CREADO(:,2); % Vector señal sismica
L = length(y); % longitud del vector
plot(t,y)
Y = fft(y);

P2 = abs(Y/L);
P1 = P2(1:L/2+1)
P1(2:end-1) = 2*P1(2:end-1);

f = Fs*(0:(L/2))/L;
plot(t,P1)
title('Sismo San Francisco')
xlabel('t (Hz)')
ylabel('|P1(f)|')
```

## ANEXO B. RUTINA ESCRITA EN MATLAB

A continuación, se presenta un algoritmo para el cálculo de los parámetros de una señal sísmica en entorno Matlab ®.

```

clear all, clc, close all

% Calculo de las fases, periodo y la %
% %
% amplitud de una onda sismica % %
fprintf('%s%\n', ' CALCULO DE
FASES, %%AMPLITUD Y PERIODO')
fprintf('\n')
fprintf('%s%\n', ' DE ONDAS
SISMICAS')
fprintf('\n')
load sismo.txt % Cargar archivo en %
t = sismo(:,1); % Vector tiempo
y = sismo(:,2); % Vector señal sismica
N = length(y); % longitud del vector
Fs = 20;
T = 1/Fs; % Intervalo de muestreo
[A,l]=max(abs(y)); % l = posicion del
%maximo
y1 = hilbert(y);
y2 = sqrt(y.*y+y1.*conj(y1));
A2 = max(y2);
y2 = y2/A2; % envolvente
comp = mean(y2(1:60));
for n = 10:l
if y2(n) > 5.9*comp
n;
break
end
end
for k = 1:n
if y2(n-k)-y2(n-k-1)<0&y2(n-k)<0.015
lp = n-k;
tp = (lp)*T;
break
end
end
fprintf('%s%8.6f\n', ' Tiempo P = ',tp);
lx = round((lp+l)/2);
for n = lx:l
if y2(n) > 0.45
n;
break
end
end

% Calculo de la fase S
for k = lx:n+lx
if (y2(n+lx-k)-y2(n+lx-k-1)<0)&
y2(n+lx-k)<0.09
ls = n+lx-k;
ts = (ls)*T;
break
end
end
fprintf('%s%8.6f\n', ' Tiempo S = ',ts);

% Plotear las gráficas
subplot(2,2,1), plot (t,y), grid on
title ('Grafica de la señal sismica')
fprintf('%s%8.6f\n', ' Amplitud = ',A);
Y = fft(y,N);
Pyy = Y.*conj(Y) / N;
f = (1/T)*(0:N/2)/ N;
subplot(2,2,3), plot(f,Pyy(1:N/2+1))
axis([0 1000 0 30]), grid on

```

```

title('Espectro de frecuencias de la
señal')
xlabel('Frecuencia (Hz)')
N = 128; % N = numero de puntos TRF
for k = 1:N
y1(k) = y(l-N/4+k);
end
subplot(2,2,2), plot (t,y1), grid on
title ('Zoom en el cambio de fase P-S')
Y = fft(y1,N);
Pyy = Y.*conj(Y) / N;
f = (1/T)*(0:N/2)/ N;
delta_f = f(2)-f(1);
subplot(2,2,4), plot(f,Pyy(1:N/2+1))
axis([0 1000 0 30]), grid on
title('Espectro de frecuencias del
zoom')
xlabel('Frecuencia (Hz)')

% Calculo del periodo
[amp_espectro,J] = max (abs(Pyy));
fs = delta_f*(J-1);
periodo = 1/fs;
fprintf('%s%8.6f\n', ' Periodo =
',periodo);
% Calcular la duración
prom_f = sum(abs(y(N-20:N)))/21;
tf= 0;
for k = N:-1:l
if y(k) > 4*prom_fk;
tf = k*T+ss;
break
end
end
end
dur = round(tf-tp);
fprintf('%s%7.2f\n', ' Duracion = ',dur);

```

## ANEXO C. RUTINA ESCRITA EN MATLAB SISMO SAN FRANCISCO

```
clear all, clc, close all
```

```
Fs = 50;          % Sampling frequency  
T = 1/Fs;        % Sampling period
```

```
load SISMO_SAN_FRANCISCO.txt  
t = SISMO_SAN_FRANCISCO(:,1); % Vector tiempo  
y = SISMO_SAN_FRANCISCO(:,2); % Vector señal sismica  
L = length(y); % longitud del vector  
plot(t,y)  
Y = fft(y);
```

```
P2 = abs(Y/L);  
P1 = P2(1:L/2+1)  
P1(2:end-1) = 2*P1(2:end-1);
```

```
f = Fs*(0:(L/2))/L;  
plot(t,P1)  
title('Sismo San Francisco')  
xlabel('t (Hz)')  
ylabel('|P1(f)|')
```