

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

CATALINA OCHOA CARDONA
JOSÉ IGNACIO URIBE DORADO
JUAN DAVID LONDOÑO VARGAS
SEBASTIÁN PELÁEZ CASTAÑO

Asesor:

Jorge Alberto Calle D'Alleman
Profesor Proyecto 3
Departamento de Ingeniería de Diseño de Producto
Universidad EAFIT

UNIVERSIDAD EAFIT
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA DE
DISEÑO DE PRODUCTO
MEDELLÍN
2006

AGRADECIMIENTOS

A Maria Adelaida Chaverra porque fue alguien vital para materializar este proyecto.

A Ana Cristina Abad, por creer en nosotros.

A Ricardo Jaramillo, por recibirnos con semejante paciencia y ánimo para explicarnos fundamentos de vibración, y aguantarse nuestras preguntas como de niños de primaria.

A Rubén, por aguantarnos la cantidad de pedidos y unos cuantos líos de compras.

A Ricardo porque sin él hubiéramos causado 3000 cortos circuitos.

A Magüis porque ese diseño gráfico le quedó increíble.

A Rotoplast, especialmente a Jayson, por toda la asesoría brindada para el diseño del molde.

A Conrado, por el molde que le quedó muy bueno.

A Alejandro y a Hugo, por su asesoría en el tema eléctrico, electrónico.

A Deiby, Jorge, Juan, Fernando, Gabriel, Uldar, Oscar, Wilson.

A José y Wilson de Carpintería.

A Juanes y Nico porque nunca faltaba su ayuda oportuna (casi los ponemos en la portada).

Y a los que se nos pasan, ahí disculpan.

a nuestros papás
y parientes por aguantarnos y apoyarnos,

a todas las personas que nos ayudaron.

y a nuestros amigos
por chéveres.

CONTENIDO

| | Página |
|--|--------|
| LISTA DE TABLAS | vii |
| LISTA DE FIGURAS | ix |
| LISTA DE ANEXOS | xiii |
| GLOSARIO | xiv |
| RESUMEN | xvii |
| 1. INTRODUCCIÓN | 1 |
| 2. JUSTIFICACIÓN | 3 |
| 3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA | 5 |
| 4. OBJETIVOS | 7 |
| 5. MARCO TEÓRICO | 8 |
| 5.1. MUSEOGRAFÍA, LÚDICA Y PEDAGOGÍA | 8 |
| 5.2. SISMOS Y VIBRACIÓN | 14 |
| 5.3. SISMORRESISTENCIA Y CONSTRUCCIONES | 26 |
| 6. MARCO CONCEPTUAL | 32 |
| 6.1. INFORMACIÓN RELEVANTE PARA EL DESARROLLO DEL SET DE MÓDULOS | 32 |
| 6.2. INFORMACIÓN RELEVANTE PARA EL DESARROLLO DE LA MESA VIBRADORA | 38 |
| 6.3. INFORMACIÓN RELEVANTE PARA LA INTEGRACIÓN DE LA EXPERIENCIA INTERACTIVA. | 40 |
| 7. DESARROLLO DEL SET DE MÓDULOS | 44 |
| 7.1. ESPECIFICACIONES DE DISEÑO | 44 |
| 7.2. ANÁLISIS FUNCIONAL | 46 |
| 7.3. GENERACIÓN DE ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN | 48 |
| 7.4. EVALUACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS | 51 |

| | Página |
|--|------------|
| 7.5. SELECCIÓN Y AJUSTES DE DISEÑO | 55 |
| 7.6. DISEÑO DE DETALLE | 61 |
| 7.7. PRUEBAS TÉCNICAS | 71 |
| 8. DESARROLLO DE LA MESA VIBRADORA | 74 |
| 8.1. ESPECIFICACIONES DE DISEÑO | 74 |
| 8.2. ANÁLISIS FUNCIONAL | 76 |
| 8.3. GENERACION Y EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS PARA EL MECANISMO | 77 |
| 8.4. CÁLCULOS PARA EL MECANISMO | 84 |
| 8.5. PRUEBAS VIRTUALES | 93 |
| 8.6. PROPUESTA FORMAL PARA LA MESA | 98 |
| 8.7. DISEÑO DE DETALLE | 100 |
| 8.8. PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO | 107 |
| 9. INTEGRACIÓN DE LA EXPERIENCIA INTERACTIVA | 110 |
| 9.1. DESARROLLO DE LA DINÁMICA DE JUEGO | 110 |
| 9.2. DETALLES PARA LA INTEGRACIÓN DE LA EXPERIENCIA | 116 |
| 10. VALIDACIÓN DE LA EXPERIENCIA INTERACTIVA | 123 |
| 10.1. PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO | 123 |
| 10.2. PRUEBAS DE USUARIO | 125 |
| 10.3. COSTOS DE PRODUCCIÓN | 128 |
| RESULTADOS | 130 |
| CONCLUSIONES | 132 |
| RECOMENDACIONES | 134 |
| BIBLIOGRAFÍA | 135 |
| ANEXOS | 138 |

LISTA DE TABLAS

| | Página |
|--|--------|
| Tabla 1. Escala Mercalli Modificada -MM-. | 18 |
| Tabla 2. Especificaciones de diseño para el set de módulos. | 45 |
| Tabla 3. Matriz de evaluación de alternativas para el set de módulos. | 52 |
| Tabla 4. Resultados de la evaluación de las pruebas de usuario. | 54 |
| Tabla 5. Evaluación comparativa de posibles tamaños del set de módulos. | 57 |
| Tabla 6. Resultados de la prueba de funcionamiento del set de módulos. | 60 |
| Tabla 7. Diferentes posibilidades de material y proceso productivo. | 62 |
| Tabla 8. Evaluación comparativa de dos combinaciones proceso-material posibles para las piezas del set de módulos. | 64 |
| Tabla 9. Deformación en las esquinas del prototipo de la pieza 8C-1 luego de la prueba de impacto. | 73 |
| Tabla 10. Especificaciones de diseño para la mesa vibradora. | 74 |
| Tabla 11. Matriz de evaluación de alternativas para las funciones principales de la mesa vibradora. | 80 |
| Tabla 12. Comparación cualitativa de S1 y la integración de S2 y S5. | 82 |
| Tabla 13. Comparación de las posibilidades de ubicación para la alternativa V10. | 83 |
| Tabla 14. Pares de valores posibles para la masa excéntrica. | 86 |
| Tabla 15. Esfuerzos en servicio severo con más de un millón de ciclos, para resortes de compresión, tratados térmicamente. | 91 |
| Tabla 16. Dimensiones y comportamiento teórico de los tres resortes elegidos. | 93 |
| Tabla 17. Resultados obtenidos de la modelación de la situación física en CosmosMotion para los resortes 1, 2 y 3. | 95 |
| Tabla 18. Evaluación de los resortes 1, 2 y 3. | 97 |
| Tabla 19. Matriz de evaluación de alternativas de forma. | 100 |

| | Página |
|---|--------|
| Tabla 20. Dimensiones y comportamiento de los resortes adquiridos. | 103 |
| Tabla 21. Posibles soluciones para la dinámica de juego, según deseos y necesidades. | 111 |
| Tabla 22. Matriz de evaluación de alternativas para la dinámica de juego. | 114 |
| Tabla 23. Calificación al usuario según la intensidad de sismo alcanzado. | 116 |
| Tabla 24. Evaluación de alternativas de interacción usuario-máquina, para variar la intensidad del sismo. | 118 |
| Tabla 25. Relación de potencial eléctrico y frecuencia de rotación del motor reductor. | 124 |
| Tabla 26. Equivalencia de la intensidad de sismo percibida por el usuario con el rango de frecuencia rotación del motor reductor. | 124 |

LISTA DE FIGURAS

| | Página |
|---|--------|
| Figura 1. Onda sísmicas: P, S, Love y Rayleigh. | 17 |
| Figura 2. El diagrama muestra un nomograma de Richter, con el cual se calcula la magnitud de un sismo por medio de un sismograma. | 19 |
| Figura 3. Medición de aceleración (S_a), velocidad (S_v) y desplazamiento (S_d) del suelo respecto al periodo de oscilación efectuada en dos tipos de suelo (roca y tierra) para el terremoto de Loma Prieta (California, 1989) | 21 |
| Figura 4. Mesa vibradora manual. | 23 |
| Figura 5. Interior de una mesa vibradora del taller de prototipos de la Universidad EAFIT | 23 |
| Figura 6. Vibro-compactador | 24 |
| Figura 7. Sistema de vibración para probar suspensión de automóviles. | 24 |
| Figura 8. Agitador orbital para laboratorio de Biotecnología. | 24 |
| Figura 9. Sistema Lego. | 36 |
| Figura 10. Torre de babel ó <i>Tumbling tower</i> . | 36 |
| Figura 11. Juego Octopus. | 36 |
| Figura 12. Rompecabezas 3D. | 37 |
| Figura 13. Juego para armar estructuras y someterlas a sismos simulados. | 37 |
| Figura 14. Caja negra para el set de módulos. | 47 |
| Figura 15. Árbol de funciones para el set de módulos. | 47 |
| Figura 16. Alternativas de diseño (1, 2, 3 y 3A) para el set de módulos. | 48 |
| Figura 17. Alternativas de diseño (4, 5, 6 y 7) para el set de módulos. | 49 |
| Figura 18. Alternativas de diseño (7A, 7B, 8, 8A, 8B) para el set de módulos. | 50 |
| Figura 19. Modelos de las alternativas 7, 8, 8A y 8B. | 53 |
| Figura 20. Colaboradores jugando con los modelos de las alternativas 7, 8, 8A y 8B. | 54 |

| | Página |
|---|--------|
| Figura 21. Alternativa 8C, compuesta por dos tipos de pieza: 8C-1 y 8C-2. | 55 |
| Figura 22. Posibilidades para la pieza 8C-2. | 56 |
| Figura 23. Colaboradores jugando con la alternativa 8C. | 59 |
| Figura 24. Modelo de módulos sobre mesa vibradora. | 60 |
| Figura 25. Algunos productos rotomoldeados. | 64 |
| Figura 26. Redondeos para las aristas de la pieza 8C-1. | 65 |
| Figura 27. Líneas de partición: longitudinal y transversal. | 65 |
| Figura 28. <i>Flanches</i> y ubicación de tornillos en el molde. | 66 |
| Figura 29. Inserto y ubicación de este en el molde. | 67 |
| Figura 30. Inserto con tornillo. | 67 |
| Figura 31. Sección del inserto agujereado con tubo de teflón. | 68 |
| Figura 32. Puntos de sujeción de una cara del molde. | 68 |
| Figura 33. Modelo en madera para fundición en aluminio del molde. | 69 |
| Figura 34. Modelo de inserto torneado. | 69 |
| Figura 35. Molde terminado. | 70 |
| Figura 36. Prototipo de 500g. | 70 |
| Figura 37. Porosidad en arista. Prototipo de 600g. | 70 |
| Figura 38. Prototipo de 700g. | 71 |
| Figura 39. Carga de dos personas paradas sobre el prototipo. | 71 |
| Figura 40. Carga de una persona sobre una cara estrecha del prototipo. | 72 |
| Figura 41. Carga una persona sobre una esfera de refuerzo. | 72 |
| Figura 42. Prueba de impacto. | 73 |
| Figura 43. Esquinas 6 (izquierda) y 3 luego de la prueba de impacto. | 73 |
| Figura 44. Caja negra para la mesa vibradora. | 76 |
| Figura 45. Árbol de funciones para la mesa vibradora. | 76 |
| Figura 46. Alternativas S1, S2, S3 y S4. | 77 |

| | Página |
|--|--------|
| Figura 47. Alternativas S5 y S6, SV7 y SV8. | 78 |
| Figura 48. Alternativas V9, V10 y V11. | 79 |
| Figura 49. Integración de las alternativas S2 y S5. | 82 |
| Figura 50. Posibles ubicaciones para la alternativa V10. | 83 |
| Figura 51. Esquema del mecanismo propuesto. | 84 |
| Figura 52. Masas m1 y m2. Distancias r1 y r2. | 86 |
| Figura 53. Resorte sometido a una fuerza lateral (Q) y axial P. Experimenta una deformación lateral θ_1 . | 88 |
| Figura 54. Gráfica para calcular el Factor C. | 89 |
| Figura 55. Modelo teórico que representa el comportamiento lateral de los resortes. | 91 |
| Figura 56. Gráfico que ilustra la amplitud de oscilación respecto a la frecuencia de excitación. | 92 |
| Figura 57. Modelación virtual con el complemento CosmosMotion del software SolidWorks. | 94 |
| Figura 58. Comparación desplazamiento máximo en X. Resortes 1, 2 y 3. | 96 |
| Figura 59. Comparación Aceleración máxima en X. Resortes 1, 2 y 3. | 96 |
| Figura 60. Alternativas de forma F1, F2, F3, F4. | 98 |
| Figura 61. Alternativa de forma F5 y alternativas de superficie en movimiento M6, M7 Y M8. | 99 |
| Figura 62. Esquema de la sección dinámica de la mesa vibradora. | 101 |
| Figura 63. Biela. | 101 |
| Figura 64. Ensamble de masa excéntrica con biela. | 102 |
| Figura 65. Motor reductor DC de 20V. | 103 |
| Figura 66. Eje con chumaceras y acople araña. | 103 |
| Figura 67. Estructura para la sección dinámica de la mesa vibradora. | 104 |
| Figura 68. Sección. Sujeción del extremo de un resorte. | 105 |

| | Página |
|---|--------|
| Figura 69. Vista general de la sección dinámica (sin resortes). | 105 |
| Figura 70. Superficie plana de la mesa vibradora. | 105 |
| Figura 71. Estructura base de la mesa vibradora. | 106 |
| Figura 72. Cubierta para la mesa vibradora. | 107 |
| Figura 73. Prototipo de la mesa vibradora construido para la Universidad EAFIT. | 108 |
| Figura 74. Comparación de desplazamiento máximo. Situación real y modelación virtual. | 108 |
| Figura 75. Comparación de aceleración máxima. Situación real y modelación virtual. | 109 |
| Figura 76. Vista superior del edificio a armar. | 115 |
| Figura 77. Edificio a armar. | 115 |
| Figura 78. Palanca y ubicación de la resistencia variable. | 119 |
| Figura 79. Resistencia variable. | 119 |
| Figura 80. Sujeción del eje de la palanca entre dos chumaceras. | 119 |
| Figura 81. Palanca con resorte y amortiguador. | 120 |
| Figura 82. Estructura de la palanca y ubicación del <i>microsuiche</i> . | 121 |
| Figura 83. Experiencia interactiva delimitada con barrera. | 122 |
| Figura 84. Base sobre la que el usuario construye el edificio. | 122 |
| Figura 85. Mesa vibradora desarrollada para la Universidad EAFIT. | 126 |
| Figura 86. Pruebas de usuario | 127 |
| Figura 87. Experiencia interactiva propuesta. | 130 |

LISTA DE ANEXOS

| | Página |
|--|--------|
| ANEXO 1. Análisis de soporte de la mesa vibradora con cuatro columnas de acero. | 138 |
| ANEXO 2. Resultados de las pruebas de usuario para las alternativas de diseño del set de módulos. | 140 |
| ANEXO 3. Construcción del modelo del molde para el <i>rotomoldeo</i> de la pieza principal del set de módulos. | 142 |
| ANEXO 4. Fuente de alimentación regulable de 15V 15A, para controlar la intensidad de oscilación de la mesa vibradora. | 144 |
| ANEXO 5. Prueba de sincronización set de módulos – mesa vibradora. | 146 |
| ANEXO 6. Terrestre - La Tortuga que Tiembla. Proyecto desarrollado para el departamento de Comunicación y Cultura de la Universidad EAFIT. | 147 |
| ANEXO 7. Planos. | 148 |

GLOSARIO

AMORTIGUAMIENTO: Disminución progresiva, en el tiempo, de la intensidad de un fenómeno periódico.

AMPLITUD: Valor máximo que adquiere una variable en un fenómeno oscilatorio.

APORTICADA: Sistema constructivo en el que se fabrica una estructura en concreto reforzado, sobre la cual se ubica la mampostería

CIMIENTO: Parte del edificio que está debajo de tierra el cual brinda amarre al suelo.

CAJA NEGRA: Herramienta del diseño conceptual en que se define la función principal de un sistema y sus entradas y salidas.

COLUMNA: Elemento de refuerzo vertical que transmite cargas del edificio hasta los cimientos. Conserva forma de línea. Tiene refuerzos importantes.

CONFINAR: Recluir dentro de límites.

EXPERIENCIA INTERACTIVA: Módulo del museo interactivo que aborda un tema específico y lo trata lúdicamente.

FACTOR DE CORRECCIÓN DE CURVATURA: Factor utilizado para calcular el esfuerzo que experimenta un resorte sometido a cierta carga.

FLANCHE: Pestaña o saliente del molde de rotomoldeo que permite que este sea cerrado.

FRECUENCIA NATURAL: Propiedad física de los cuerpos que depende de su de su rigidez y distribución de masa. Es la frecuencia a la que el cuerpo oscilara en una situación de vibración libre.

GRADO DE LIBERTAD: Es uno de los varios componentes ortogonales que se pueden usar para caracterizar completamente el movimiento.

INSERTO: Parte de un molde añadida, que no hace parte del cuerpo central del mismo.

MAMPOSTERÍA: Sistema constructivo que utiliza ladrillos o adobes.

MONTAJE INTERACTIVO: Experiencia Interactiva

MULTIUSUARIO: Característica de un objeto que le da la posibilidad de ser utilizado por cualquier tipo de usuario.

MURO ESTRUCTURAL: Muro que en su construcción ha sido reforzado de manera que pueda soportar cargas laterales y/o horizontales.

NOMOGRAMA: Representación gráfica que permite realizar con rapidez cálculos numéricos aproximados.

OSCILACIÓN: Cada uno de los vaivenes de un movimiento oscilatorio.

PRECARGA: Carga permanente a la que están sometidos los resortes en un sistema.

RESET: Reinicio.

RESONANCIA: Fenómeno que se produce al coincidir la frecuencia propia de un sistema mecánico, eléctrico, etc., con la frecuencia de una excitación externa.

RESPIRADERO: Agujero en el molde de rotomoldeo que permite salida de gases perjudiciales para la pieza producida.

ROTOMOLDEO: Proceso de producción de plásticos que somete el molde a calor desde el exterior al mismo tiempo que lo rota lentamente sobre dos ejes, produciendo productos huecos.

SET: Conjunto de elementos que comparten una propiedad o tienen un fin común.

SISMÓGRAFO: Instrumento que señala durante un sismo la dirección y amplitud de las oscilaciones y sacudimientos de la tierra.

SISMOGRAMA: Registro del sismógrafo.

SISMORRESISTENCIA: Calidad de una edificación de estar reforzada adecuadamente para resistir las fuerzas que se presentan durante un sismo.

VIGA: La que, tendida sobre pilares o columnas, sirve para sostener las cabezas de otros maderos también horizontales, así como para sustentar cuerpos superiores del edificio.

TABIQUE: Sistema constructivo que utiliza columnas en forma de paredes, ahorrando esta última necesidad.

RESUMEN

Se desarrolla una Experiencia interactiva para el Parque Explora. Ésta se compone principalmente de: una mesa vibradora, que cumple la función de simular sismos y un set de módulos, que permite al usuario simular edificaciones.

El proyecto inicia con una exploración de diversas áreas: museografía, pedagogía, sismología, simulación de sismos, teoría de vibraciones, ingeniería sismorresistente y técnicas de construcción local. Posteriormente se analiza y selecciona la información más relevante para el proyecto.

A continuación se desarrolla el set de módulos y la mesa vibradora. Se logra realizando para cada uno: especificaciones de diseño, alternativas de solución, evaluación y selección, ajustes de diseño, diseño de detalle y pruebas técnicas.

Más adelante se logra una adecuada integración de estas partes, definiendo la dinámica de juego que guía el uso de la Experiencia, así como ciertos detalles importantes para la interacción del usuario con la Experiencia.

Finalmente se efectúa la validación la Experiencia, sometiéndola a pruebas de funcionamiento (que ayudan a sincronizar las partes entre sí) y de usuario, sometiéndola al uso de potenciales visitantes del Parque.

El resultado es una propuesta de Experiencia Interactiva que demuestra ilustrar adecuadamente el fenómeno abordado, además de buen desempeño y adecuada interacción con el usuario.

1. INTRODUCCIÓN

El Parque Explora es un proyecto que se viene gestando desde la década de 1990. Ha sido expuesto como un espacio que posibilite la apropiación social de la ciencia y tecnología en el Valle de Aburrá y municipios vecinos (CTA, 2000), operando de una manera cautivadora y lúdica, que a la vez despierte inquietudes sobre el conocimiento científico.

El Parque estará compuesto, entre otros posibles espacios, por Salas Interactivas, Aulas Taller, Sala de Cine, Biblioteca Interactiva. Colombia Geodiversa será una de las Salas Interactivas, cuyo objetivo principal es explicar diversos fenómenos geológicos.

Esta Sala estará inundada por una amplia variedad de imágenes de diversas regiones de Colombia y por diversas experiencias que explican los movimientos tectónicos, la formación de dunas, la formación de montañas, entre muchos otros fenómenos geológicos.

Una de las Experiencias Interactivas planteadas para este espacio es la que busca generar inquietudes sobre el comportamiento de las edificaciones frente a sismos. La Experiencia brindará al visitante la posibilidad de armar su propia edificación con un juego de módulos destinado para ello, que a continuación podrá someter a un sismo simulado. Luego de este emocionante momento, cuando la edificación que él mismo construyó esté afectada por el sismo, le surgirán una gran variedad de inquietudes, como ¿Por qué la edificación se comportó como lo hizo frente al sismo? ¿Cómo se podría lograr que la edificación resista un sismo mayor? Estas respuestas las podrá resolver parcialmente con la información complementaria

que encontrará en la Experiencia. Parcialmente, puesto que el objetivo ésta es despertar en el visitante inquietudes, para que luego investigue por otras vías del conocimiento.

Esta Experiencia Interactiva es el objeto del presente proyecto, la cual es desarrollada integralmente en él.

2. JUSTIFICACIÓN

Como se presentó anteriormente, la Experiencia interactiva elegida para desarrollar en el presente proyecto de grado, se integrará como propuesta para hacer parte de la sala Colombia Geodiversa del Parque Explora. Ésta surge como respuesta a la necesidad expuesta por el equipo de museografía del Parque.

La importancia de generar una propuesta desde la universidad para esta experiencia radica en varios puntos: primero, la Universidad EAFIT tiene amplia experiencia e interés en el trabajo de la ingeniería sismorresistente, lo cual se evidencia con la construcción del nuevo laboratorio de esta disciplina y con los diversos programas alrededor de geología e ingeniería civil.

Segundo, en la universidad se ha manifestado un amplio interés por poner los conocimientos propios de la academia a disposición de grupos ajenos a ésta y viene haciéndolo de una manera didáctica y lúdica, como se evidencia en el proyecto Universidad de los Niños, en el cual se desarrolla un taller titulado ¿Por qué la tierra tiembla?

Tercero, dentro del programa de Ingeniería de Diseño de Producto se incluyen diversos cursos que brindan herramientas para facilitar el exitoso desarrollo del proyecto. En la asignatura Proyecto 3 se dedica la atención especialmente a los museos interactivos. En Semiótica se brindan herramientas adecuadas para el hábil manejo de la comunicación, algo fundamental en este tipo de proyecto; se puede asegurar que el producto de la Experiencia, una vez instalada, es el mensaje que el usuario se lleva, el cual conlleva un aprendizaje. Con los cursos Diseño Conceptual y Diseño Metódico se cuenta con una herramienta definida

para desarrollar los productos que se esperan tener al final de este proyecto. Éstos, entre otros justifican por qué el ingeniero de diseño de producto es un profesional preparado para solucionar los problemas que se presentan al desarrollar un proyecto de estas características.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La idea inicial de la Experiencia Interactiva a desarrollar fue planteada por el equipo de museografía del Parque Explora. Resumiendo, se trata de un juego en el cual se tiene una superficie horizontal en la que se simulan temblores, con la posibilidad de variar su intensidad, y sobre la cual se pueden construir varios tipos de edificaciones a escala usando un juego de módulos especialmente diseñado para la Experiencia. Al accionarse un temblor, el visitante podrá observar el comportamiento de su edificación.

Los usuarios potenciales de dicha Experiencia son los mismos usuarios del Parque Explora, los cuales se clasifican en un grupo denominado *multiusuario*, que abarca un rango de edades amplio (niñez hasta tercera edad), igual que el nivel socioeconómico (cualquier estrato). Por recomendación del equipo de museografía del Parque, y para facilitar el planteamiento de la Experiencia desde diversos frentes (pedagógico, formalización, lenguaje utilizado) se enfatiza en un grupo de edad y nivel de escolaridad definido: estudiantes de los grados 10 y 11. Aunque por nivel socioeconómico no se hace necesario una segregación, se recomienda hacer énfasis en los estratos 1 y 2, pues en estos estratos la cantidad de construcciones informales es muy alta; así, estos visitantes lograrán cierta sensibilización sobre la *sismorresistencia*, que para ellos es muy importante por ser, como se expresó, potenciales ejecutores de construcción informal.

Para lograr un buen resultado, integral y coherente en el desarrollo de la Experiencia Interactiva, se hace necesaria una diferenciación de las partes que la componen y de allí segmentar en etapas el proceso. Las principales partes de la Experiencia son: (1) el set de módulos, que permitirá al usuario construir una edificación; (2) la mesa vibradora, que producirá la vibración necesaria para

afectar la edificación construida por el usuario; y (3) la integración de estos dos elementos en un juego que comande la Experiencia como tal, lo cual implica dinámica de uso, distribución espacial y formalización.

Es así como se divide el proyecto en tres amplias etapas, a saber: (1) desarrollo del set de módulos, (2) desarrollo de la mesa vibradora y, (3) integración de la Experiencia interactiva.

4. OBJETIVOS

4.1. OBJETIVO GENERAL

Desarrollar una Experiencia Interactiva que sensibilice e informe a los usuarios sobre el tema del comportamiento de edificaciones frente a sismos para la sala Colombia Geodiversa del Parque Explora.

4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar la información obtenida durante la etapa de investigación para establecer los elementos teóricos básicos a desarrollar en la Experiencia.
- Diseñar y desarrollar un set módulos, para que el usuario disponga de material adecuado para construir edificaciones a escala.
- Diseñar la mesa vibradora sobre la cual se ubican las edificaciones construidas por los usuarios, para someterlas a un sismo simulado.
- Integrar correctamente set de módulos y mesa vibradora en un juego que imponga reto y genere emoción al usuario, para lograr una propuesta coherente y atractiva de Experiencia Interactiva para los visitantes del Parque Explora.

5. MARCO TEÓRICO

Para un satisfactorio desarrollo del proyecto, se considera pertinente hacer una cuidadosa revisión de teoría y estado del arte en varias áreas: museografía para museos interactivos, pedagogía, sismología, simulación de sismos, teoría de vibraciones, ingeniería sismorresistente y técnicas de construcción local. En el presente capítulo se expone la teoría correspondiente a las mencionadas áreas, clasificada en tres secciones: (1) Museografía, lúdica y pedagogía, (2) Sismología y vibraciones y (3) Sismorresistencia y construcciones.

5.1. MUSEOGRAFÍA, LÚDICA Y PEDAGOGÍA

5.1.1. Algo de historia de los museos interactivos

La idea de los museos interactivos actuales cristaliza en parte, con la creación por Frank Oppenheimer del Exploratorium de San Francisco en el año 1969. Oppenheimer planteó un museo de ciencia saliéndose del paradigma de la colección de objetos científicos, para poner como eje las preguntas de la ciencia. Aunque antes de éste ya existían intenciones similares, el enfoque era muy parcial y no abandonaba el paradigma del museo tradicional. Así sucedió en museos como el Science Museum de Londres, el Deutsche Museum o el Palais de la Découverte en París, en el cual no solo se exhibía la máquina de vapor, sino que también se acompañaba con la explicación de los principios por los que funciona, y el contexto de su tecnología (PARAMO, E. 2005).

A partir de todas estas iniciativas ha detonado una fuerte corriente de hacer de conocimiento público la ciencia y la tecnología. Esto justificado en que, “si el factor más determinante de la sociedad contemporánea es la revolución científico-

tecnológica en la que estamos inmersos, entonces, hacer bien visible esta realidad y facilitar la comprensión de la misma es una tarea no sólo de urgencia cultural y democrática, sino también realmente estratégica desde un punto de vista socioeconómico” (PARAMO, E. 2005). Y ésta es precisamente la misión de los museos interactivos de ciencia.

5.1.2. La naturaleza de los museos interactivos de ciencia

Son éstos quizá el mejor medio para la divulgación de la ciencia y la tecnología, pues su apertura radical a todas las formas de expresión facilita la transmisión de mensajes. Allí el uso del lenguaje es supremamente versátil y pasa desde la conversación con un guía hasta la interacción con una máquina electrónica, pasando por diversos medios de expresión plástica y el juego colectivo o individual. Lo único que tienen en común todas estas modalidades de expresión es que aprovechan la curiosidad de la persona, y consecuentemente, no pretenden dar respuestas completas sino encender inquietudes, o como escribe Carl Sagan “(...) no sustituyen a la educación en la escuela o en la casa, pero despiertan y producen entusiasmo. Un museo de ciencia inspira a un niño a leer un libro, a seguir un curso o a volver otra vez al museo” (PARAMO, E. 2005).

El concepto racional del mundo es el eje temático alrededor del cual se plantea el museo interactivo. Pero no se emplea únicamente la razón, sino también el corazón y los sentidos para construir ese saber, recurriendo a la idea de viaje como metáfora del conocimiento (BETANCOURT, J. 1998). Así se tiene al visitante con la disposición y la curiosidad de un viajero en tierras desconocidas, lo cual genera un ambiente apto para el aprendizaje.

5.1.3. La Experiencia interactiva

También llamada módulo o montaje interactivo. Es ésta la pequeña pieza de rompecabezas a partir de la cual se construye el museo de ciencia. Aunque enseña conocimientos sobre un tema específico de carácter científico, su

importancia radica en que transmite entusiasmo y genera inquietudes acerca de este tema. Y lo hace a través del juego, aprovechando la curiosidad y que “en el museo estamos dispuestos a ocupar bastante tiempo, a movernos, a hacer cosas, a encontrar a otra gente en una disposición similar a la nuestra” (PARAMO, E. 2005).

Julián Betancourt¹ sostiene que los montajes interactivos se deben prestar para una lectura densa lo cual significa que “la puesta en escena debe inducir o incitar diferentes interpretaciones de acuerdo con las perspectivas de cada persona” (BETANCOURT, J. 1998). Así, un profesor de geografía logrará conclusiones nuevas de una Experiencia interactiva, al mismo tiempo que un niño de 10 años, que vive su primer contacto con el tema de la Experiencia, despertará interés por el conocimiento relacionado con éste.

La esencia de la Experiencia interactiva está en que el visitante se ve impulsado a generar estímulos en un sistema. Sea a otras personas, a una máquina o a objetos sencillos, obtendrá respuestas o reacciones que consigo llevan mensajes, que son el punto de partida para las inquietudes y el aprendizaje. Hay varios tipos de Experiencia: social, individual y grupal (ROLDAN, A. 2005). La social solo requiere de un espacio y un guía que con ayudas visuales explica las condiciones del juego, en el cual la materia principal son los participantes. La individual gira en torno a la relación de la persona con el prototipo interactivo, al cual la persona genera respuestas a estímulos del sistema y viceversa. La grupal es similar a la individual, solo que son varias personas las que interactúan con el sistema.

5.1.4. Consideraciones para el desarrollo de una Experiencia interactiva

Sostiene Betancourt que un montaje interactivo están implícitos cuatro supuestos comunicacionales: liviandad, fácil manejo, accesibilidad y familiaridad

¹ Director del Museo de la Ciencia y el Juego, en Bogotá.

(BETANCOURT, J. 1998). La sencillez en la puesta en escena es una característica común para los cuatro. Esto en aspectos más puntuales se traduce en:

- “El montaje tiene un diseño transparente, es fácil explorarlo como ‘máquina’: su estructura, sus partes, su funcionamiento” (BETANCOURT, J. 1998). Ninguno de ellos da pie al misterio.
- “El montaje debe incorporar elementos de la vida cotidiana, o utilizar dimensiones similares a las de los objetos que nos rodean” (BETANCOURT, J. 1998).
- En el planteamiento del contenido de la Experiencia, se debe evitar hasta donde sea posible la información innecesaria, es decir información que en lugar de aclarar ideas distrae la atención de la idea central a expresar (CÓRDOBA, F. 2000).
- Se debe buscar la mayor simplicidad posible en el montaje (cantidad de partes, cualidades de diseño) sin caer en una excesiva simplificación del mensaje, lo cual puede causar errores de interpretación (CÓRDOBA, F. 2000).

5.1.5. Un modelo pedagógico

Teniendo en cuenta que en los museos interactivos está en juego el aprendizaje, es conveniente tener como apoyo algún modelo pedagógico que sea compatible con su naturaleza.

La pedagogía Waldorf, iniciada por el austriaco Rudolf Steiner en Alemania desde la segunda década del siglo XX, tiene varios elementos en común con los museos interactivos de ciencia. Cabe resaltar tres de ellos:

Para la pedagogía Waldorf, a través del juego se logra que el aprendizaje se produzca de manera inadvertida, natural y auténtica.

Segundo, se recurre a la experiencia sensorial y a los objetos cotidianos para lograr el aprendizaje. En la pedagogía Waldorf se plantea que “toda verdadera comprensión exige como condición previa el acto de percibir” (GÖBEL, N. 1994). Consecuentemente, se da gran importancia al aprendizaje práctico (aprendizaje a partir de una actividad específica), “de manera que el corazón, la mano y la cabeza sean copartícipes del mismo” (GÖBEL, N. 1994).

El tercer punto consiste en la importancia delegada en el autoaprendizaje. Para la pedagogía Waldorf es vital que las personas alcancen la capacidad de aprender de una forma autónoma y desarrollen la facultad de poder educarse a si mismos. En ella es fundamental la consigna “el hombre jamás deja de aprender, ni agota su capacidad de aprendizaje” (GÖBEL, N. 1994).

En el contexto de la pedagogía Waldorf, cada persona tiene tres dimensiones vitales que constituyen su ser: el *sentir*, el *hacer* y el *pensar*. Se desarrollan por etapas de siete años, comenzando por el *sentir*, en los primeros siete años de vida, continuando con el *hacer* durante el segundo septenio y más adelante el *pensar* en el tercer septenio. Este ciclo se repite a lo largo de la vida continuamente en el orden señalado, por etapas de siete años.

En los septenios de dominancia del *sentir*, se presenta mayor admiración por lo bello (preferencia estética). En los de dominancia del *hacer* hay mayor tendencia hacia lo bueno (preferencia moral). En los del *pensar* hay mayor fascinación por lo verdadero (preferencia intelectual). En el caso de los primeros tres septenios hay además tendencia a buscar protección, a sentirse mandado y a sentirse acompañado, respectivamente.

Según el planteamiento de Steiner, toda actividad educativa debe estimular simultáneamente las tres dimensiones de la persona, teniendo en cuenta el natural desarrollo de estas.

5.1.6. Museos Interactivos: situación local

En Colombia, la historia de los museos para ver y sí tocar es relativamente reciente. Todo comenzó en el año 1984, con un proyecto de la Universidad Nacional: el Museo de la Ciencia y el Juego. Este museo, uno de los primeros en Latinoamérica de este tipo, nació con la intención de hacer más familiares los avances científicos a la gente del común, a los ajenos al mundo de la ciencia. Adicionalmente se define con una postura clara como un museo que solo toma dos contextos de los museos tradicionales: el visitante y la exposición. Los otros dos, a saber, el objeto y la colección, que implícitamente implican una actitud de respeto, de ver y no tocar, son dejados a un lado.

A partir del nacimiento del Museo de la Ciencia y el Juego, han aparecido nuevos proyectos a diferentes escalas. Está el Museo Interactivo de las Empresas Públicas en Medellín, y Maloka en Bogotá, siendo éstos los de mayor escala en Colombia. A una escala menor se encuentran museos como el Museo de la Ciencia y el Juego Eureka en Armenia, el Museo Interactivo de la Frontera en Cúcuta, la Casa de la Ciencia y el Juego en Pasto, entre otros.

Cabe resaltar la existencia de la red Liliput, de iniciativa de la Universidad Nacional de Colombia. Reúne museos interactivos de Colombia y Ecuador, y busca impulsar el intercambio de vivencias, montajes interactivos y diversos materiales didácticos, así como lograr apoyo mutuo.

5.2. SISMOS Y VIBRACIÓN

5.2.1. Sismología: Algo de historia (SARRIA, A. 1995)

El estudio de los sismos tiene sus raíces en la teoría de la elasticidad y la resistencia de los materiales. Estudios como los realizados por Galilei (siglo XVI), Hooke (siglo XVII), Navier, Cauchy y Poisson (siglo XIX) componen los fundamentos de la actual sismología. Otros hitos para esta disciplina son:

- El descubrimiento de dos tipos de ondas en los sólidos diferentes de las conocidas, realizado por lord Rayleigh (1887) y Love (1910).
- Determinación de la profundidad del límite inferior de la corteza (Mohorovicic, 1909) y de la profundidad del núcleo terrestre (Gutenberg, 1922)
- Construcción del sismógrafo de deformación (Benioff, 1935).
- C. F. Richter propone la escala de magnitudes para evaluar la energía liberada por un sismo (1935).
- Creación de la Asociación Internacional de Ingeniería Sísmica (década de 1960). Con ella despegó un fuerte movimiento que se manifestó en congresos, aumento de equipos de registro sísmico y diversos estudios.
- La aparición de los computadores y posteriormente microcomputadores, aceleró el desarrollo de la ingeniería sísmica.
- Aumento notable de la cantidad de mesas vibratorias a escala natural y reducida, destinadas a estudios de la influencia de los movimientos sísmicos sobre estructuras (década de 1990).

5.2.2. ¿Como se origina un sismo?

Para explicar los orígenes de los sismos hay que recurrir a la teoría de la tectónica global. Esta explica de forma integrada, lógica y coherente el origen de terremotos y volcanes, la formación de cadenas montañosas y la magnetización de la tierra.

Plantea que la corteza está fragmentada en placas, las cuales crecen a lo largo de las dorsales marinas por la ascensión de material fundido del manto. Al entrar en contacto con la corteza y posteriormente con los fondos marinos, se solidifica, incrementando así el tamaño de la placa tectónica (oceánica). Esta cantidad de material ganado debe ser perdido en otro punto de la misma placa. Ocurre pues en las zonas de subducción o fosas marinas. Allí se presenta el choque de dos placas, generalmente una oceánica con una continental. La composición de la placa oceánica la hace más densa que la continental, lo cual causa que sea la primera la que tiende a deslizarse por debajo de la segunda, generando al tiempo vastos esfuerzos sobre ésta y sobre sí misma.

En general, los movimientos relativos de las placas tectónicas producen deformaciones *semielásticas* en las proximidades de los contornos de las placas que chocan entre sí. Estas deformaciones implican un almacenamiento lento de energía elástica en estas zonas. Cuando las fuerzas debidas al movimiento de las placas superan las que tratan de mantener unidos los contactos de estas (la fricción), se produce una ruptura súbita a lo largo de los contactos, liberándose gran parte de la energía elástica acumulada, momento en el cual sucede un sismo.

La magnitud del sismo depende tanto de la cantidad de energía acumulada, como de la duración de la liberación de la misma. Puede que las cantidades de energía elástica acumuladas sean suficientes como para generar un sismo de gran magnitud, pero si esta liberación se hace lentamente, a lo largo de días o incluso años, la magnitud del sismo podrá ser tan baja que ni una persona la alcanzará a percibir en la superficie.

Además de las zonas de subducción hay otros denominados ambientes tectónicos en los que se pueden originar sismos:

- Fallas geológicas. Éstas desempeñan el papel de “fusibles” en los mecanismos tectónicos: se trata de zonas lineales en las que se descarga parte de la energía acumulada por la placa a causa del choque con otra placa.
- Al interior de la placa, lejos de los contornos, eventualmente se originan sismos, posiblemente a causa de energías residuales acumuladas en ciclos de derivas continentales antiguos: de más de 200 millones de años de antigüedad.
- Zonas de actividad volcánica, que por lo general producen sismos de baja magnitud.
- Zonas de actividad humana que involucre explosión de bombas atómicas, de grandes cargas de dinamita o simplemente el derrumbe de galerías remanentes de la actividad minera.

5.2.3. Características de los sismos

5.2.3.1. Tipos de ondas (SARRIA, A. 1995)

Existen dos tipos de ondas sísmicas Las internas, que son las que se propagan al interior de un mismo material sólido, y las superficiales, que se transmiten entre dos sólidos de diferente rigidez o en la superficie misma de la corteza terrestre. Nótese que las ondas superficiales se pueden presentar al interior de la corteza.

Las ondas internas se clasifican en ondas primarias (ondas P) y secundarias (ondas S). Las primarias, también llamadas longitudinales o de compresión, se caracterizan por la continua compresión-descompresión del material sólido que se presenta en la misma dirección en que la onda avanza. Las ondas S, también llamadas transversales o de cortante se caracterizan por desplazamientos del medio transmisor en direcciones perpendiculares a la dirección de avance de la onda. Las ondas P viajan a mayor velocidad que las ondas S, pero estas últimas resultan más destructivas para las edificaciones pues su amplitud es mayor, teniendo periodos similares. Las ondas P pueden viajar en fluidos, las S no.

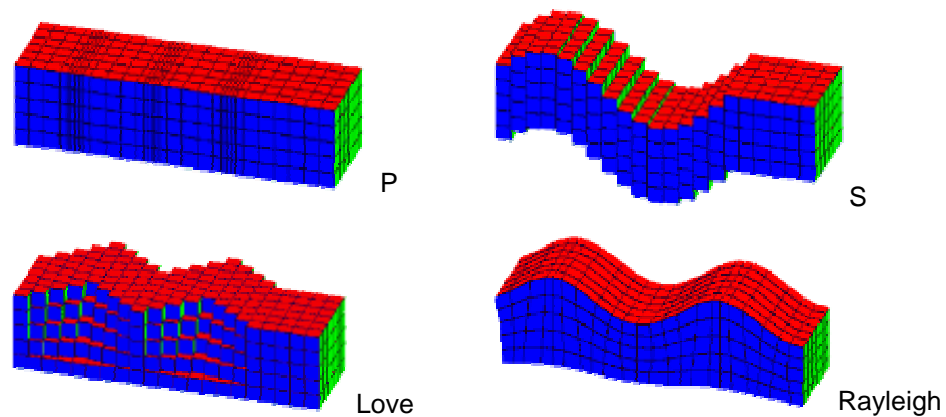


Figura 1. Ondas sísmicas: P, S, Love y Rayleigh. (Fuente <http://tonydude.net>)

Las ondas superficiales son más lentas que las internas y tienen una mayor amplitud. Se conocen dos tipos de ondas superficiales: las de Love y las de Rayleigh. Las de Love son similares a las ondas S y para que se presenten se requiere que en la superficie haya una capa diferenciada de rigidez distinta de la del medio subyacente. Las ondas de Rayleigh 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 (ANONIMO 1).

Cabe resaltar que si el medio por el que se transmiten las ondas fuera uniforme, el producto de las rupturas serían ondas armónicas. Más en la realidad esto no ocurre y de ahí que la naturaleza de los sismos sea más caótica que armónica. Al darse cambios de rigidez en el medio se producen frentes de aparición de ondas superficiales y rebotes de ondas internas, lo cual causa la aparición de nuevas ondas de diferentes frecuencias o longitud de onda en diferentes puntos.

5.2.3.2. Foco y epicentro

El punto donde se produce la liberación de energía que da paso al sismo se denomina foco o hipocentro. Éste se logra determinar comparando registros que

dejan varios sismógrafos ubicados en diferentes puntos de la región en que ocurre el sismo. El epicentro es el punto más cercano al foco sobre la superficie terrestre.

5.2.3.3. Magnitud e intensidad: medición de los sismos

Tabla 1. Escala Mercalli Modificada -MM- (Fuente <http://www.universum.unam.mx>)

| | |
|------|--|
| I | Sacudida sentida por muy pocas personas en condiciones especialmente favorables. |
| II | Sacudida sentida sólo por pocas personas en reposo, especialmente en los pisos altos de los edificios. Los objetos suspendidos pueden oscilar. |
| III | Sacudida sentida claramente en los interiores, especialmente en los pisos altos de los edificios, muchas personas no lo asocian con un temblor. Los vehículos de motor estacionados pueden moverse ligeramente. Vibración como la originada por el paso de un carro pesado. Duración estimable |
| IV | Sacudida sentida durante el día por muchas personas en los interiores, por pocas en el exterior. Por la noche algunas despiertan. Vibración de vajillas, vidrios de ventanas y puertas; los muros crujen. Sensación como de un carro pesado chocando contra un edificio, los vehículos de motor estacionados se balancean claramente. |
| V | Sacudida sentida casi por todo el mundo; muchos despiertan. Algunas piezas de vajilla, vidrios de ventanas, etcétera, se rompen; pocos casos de agrietamiento de aplanados; caen objetos inestables. Se observan perturbaciones en los árboles, postes y otros objetos altos. Se detienen de relojes de péndulo. |
| VI | Sacudida sentida por todo mundo; muchas personas atemorizadas huyen hacia afuera. Algunos muebles pesados cambian de sitio; pocos ejemplos de caída de aplanados o daño en chimeneas. Daños ligeros. |
| VII | Advertido por todos. La gente huye al exterior. Daños sin importancia en edificios de buen diseño y construcción. Daños ligeros en estructuras ordinarias bien construidas; daños considerables en las débiles o mal planeadas; rotura de algunas chimeneas. Estimado por las personas conduciendo vehículos en movimiento. |
| VIII | Daños ligeros en estructuras de diseño especialmente bueno; considerable en edificios ordinarios con derrumbe parcial; grande en estructuras débilmente construidas. Los muros salen de sus armaduras. Caída de chimeneas, pilas de productos en los almacenes de las fábricas, columnas, monumentos y muros. Los muebles pesados se vuelcan. Arena y lodo proyectados en pequeñas cantidades. Cambio en el nivel del agua de los pozos. Pérdida de control en personas que guían vehículos motorizados. |
| IX | Daño considerable en las estructuras de diseño bueno; las armaduras de las estructuras bien planeadas se desploman; grandes daños en los edificios sólidos, con derrumbe parcial. Los edificios salen de sus cimientos. El terreno se agrieta notablemente. Las tuberías subterráneas se rompen. |
| X | Destrucción de algunas estructuras de madera bien construidas; la mayor parte de las estructuras de mampostería y armaduras se destruyen con todo y cimientos; agrietamiento considerable del terreno. Las vías del ferrocarril se tuercen. Considerables deslizamientos en las márgenes de los ríos y pendientes fuertes. Invasión del agua de los ríos sobre sus márgenes. |
| XI | Casi ninguna estructura de mampostería queda en pie. Puentes destruidos. Anchas grietas en el terreno. Las tuberías subterráneas quedan fuera de servicio. Hundimientos y derrumbes en terreno suave. Gran torsión de vías férreas. |
| XII | Destrucción total. Ondas visibles sobre el terreno. Perturbaciones de las cotas de nivel (ríos, lagos y mares). Objetos son lanzados al aire. |

Con la intención de facilitar la comparación de varios sismos entre sí, se han realizado varios intentos para medirlos. Determinar *intensidad* es una manera de lograrlo. La intensidad mide el efecto del sismo en un punto definido. Así, para un

mismo sismo, pueden presentarse diferentes intensidades en diferentes localidades (FLORES, R. 2005). Esto sucede porque a medida que las ondas de energía se alejan del punto donde se originó el sismo, su intensidad se debilita gracias a que cada vez es un mayor volumen por el que ha pasado la misma cantidad de energía (ANONIMO 1). Esta medición es la más utilizada en la actualidad para determinar los efectos de los sismos sobre la población y las edificaciones.

Para medir la intensidad de los sismos han aparecido diversas escalas, como la MSK o la Mercalli Modificada -MM- (Ver Tabla 1).

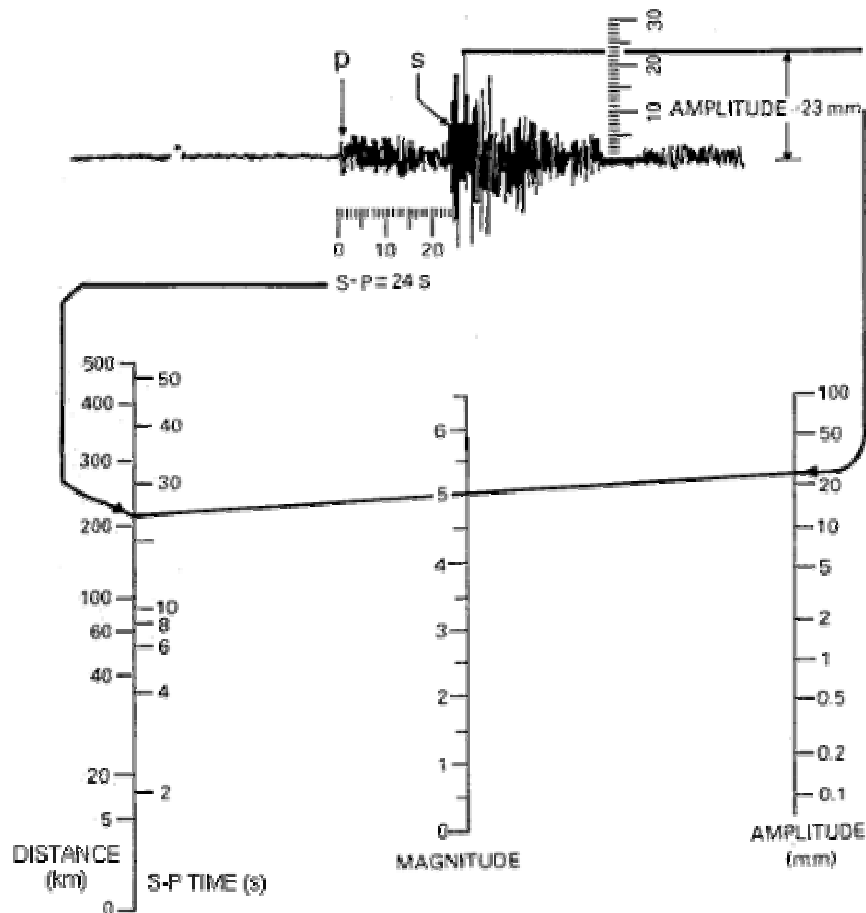


Figura 2. El diagrama muestra un nomograma de Richter, con el cual se calcula la magnitud de un sismo por medio de un *sismograma*. (fuente <http://www.seismo.unr.edu>)

C. F. Richter, hacia el año de 1935, introdujo el concepto de magnitud. Esta se supone es propia para cada sismo y teóricamente debe estar representada por un solo número, por lo cual diferentes mediciones del mismo sismo deben presentar aproximadamente el mismo valor. La escala Richter mide la magnitud de los sismos en términos de la amplitud máxima de las ondas sísmicas que produce.

La magnitud mide la cantidad de energía liberada en el foco del sismo, por lo cual en su cálculo se involucran básicamente: la distancia del foco, la *amplitud* máxima registrada por los *sismógrafos* y el lapso de tiempo ocurrido entre las ondas P y las ondas S. Todo esto en una misma estación sismológica.

Richter estableció un *nomograma* para determinar la magnitud de cada sismo, donde las variables son: distancia del foco, escala de magnitud y amplitud máxima registrada. A partir de este *nomograma* se calcula la Escala Richter de Magnitudes (ver Figura 2). Esta es una escala logarítmica: la amplitud máxima registrada aumenta 10 veces de un grado al siguiente. El grado 0 de esta escala se asignó a los sismos más débiles registrados en California hasta el año de 1935. Aunque la escala Richter no tiene límite superior, hasta hoy ningún sismo ha superado los 9.6 grados.

Es de anotar que la Escala Richter se presta para malas interpretaciones, especialmente por el uso dado en los medios de comunicación. A diferencia de la intensidad, la magnitud es absoluta. Así, esta puede ser igual en dos lugares muy distantes que experimenten el mismo sismo, pudiendo ser altamente destructivo en un lugar e inofensivo en el otro. Por esto no es correcto hablar de magnitud sin hablar de distancia al foco, para determinar los posibles impactos a poblaciones y edificaciones (JARAMILLO, J. D. 2006).

5.2.4. Sismos en términos de sismorresistencia: Aceleración y frecuencia

Para el efecto del cálculo del impacto de los sismos sobre edificaciones es poco dicente tratar una escala cualitativa (intensidades) o calcular la energía liberada en el foco del sismo. Por esto en el ámbito de la ingeniería se suelen medir los sismos en términos de la aceleración que experimenta un cuerpo en la superficie terrestre. Y para esto se toma como referencia la aceleración de la gravedad (g). Los sismos más fuertes alcanzan aceleraciones de 1g y su desplazamiento máximo es de 10cm en un suelo adecuado para construir (JARAMILLO, J. D. 2006.)

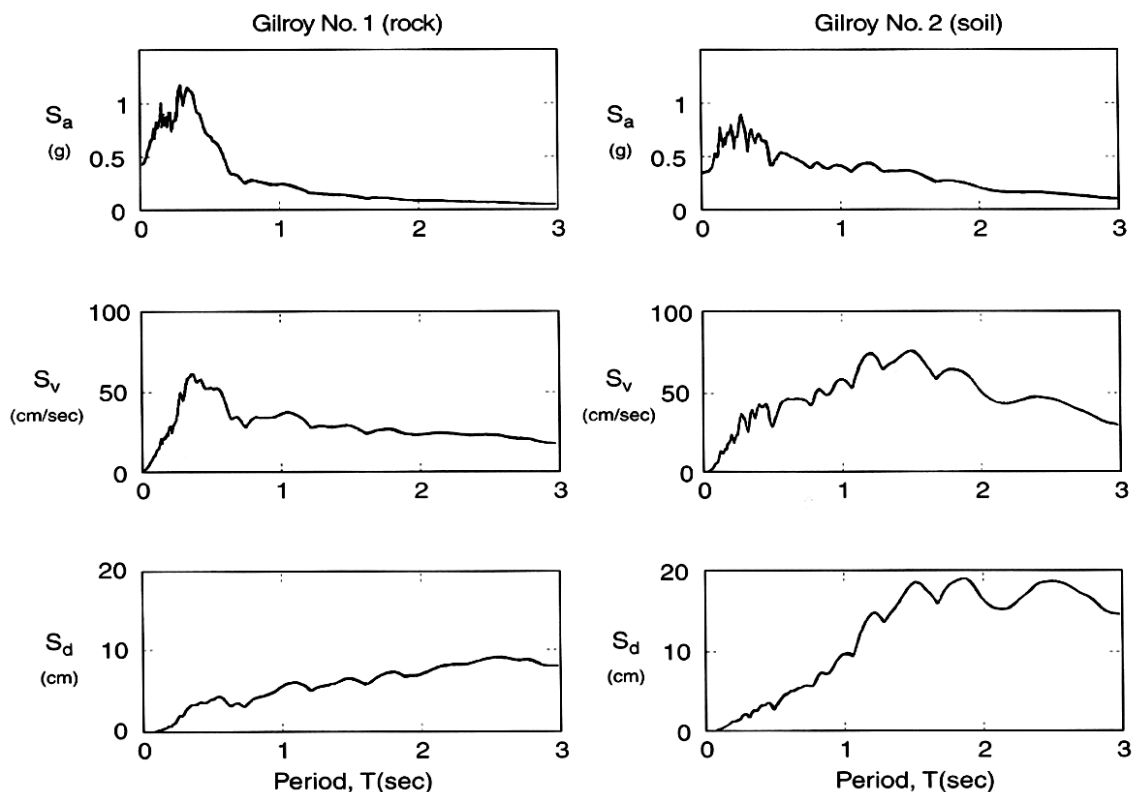


Figura 3. Medición de aceleración (S_a), velocidad (S_v) y desplazamiento (S_d) del suelo respecto al periodo de oscilación efectuada en dos tipos de suelo (roca y tierra) para el terremoto de Loma Prieta (California, 1989) (fuente <http://biblioteca.upc.es>)

Si bien un sismo real es el producto de gran cantidad de ondas de diferentes frecuencias que viajan por la corteza terrestre (BOTERO, J. 2006), las vibraciones percibidas en la superficie se encuentran, en términos generales, en un mismo rango de frecuencias aproximadamente entre 0,5Hz y 5Hz (ESCOBAR, G. 2003). Las más bajas frecuencias ocurren en suelos de baja solidez (alta fragmentación, baja densidad) y las más altas en suelos de alta solidez.²

5.2.5. Simuladores de sismos

Los simuladores de sismos se pueden clasificar según su finalidad. Por un lado están los de fines científicos, contruidos para estudiar el comportamiento de construcciones reales frente a sismos. Y por otro están los didácticos, cuya finalidad está en experimentos sencillos que permiten entender los daños que puede causar un sismo a diversos tipos de edificaciones. Estos también pueden ser hechos simplemente para divertir.

La plataforma de simulación de sismos más avanzada se encuentra en Ibaraki-ken (Japón) y fue construida para el Ministerio de Construcción. Es de 8 metros de lado, y cuenta con seis grados de libertad. Es capaz de simular terremotos con desplazamientos de +/- 600 mm y velocidades de 2 m/s. La aceleración máxima es de 2g cuando la carga es de 100 toneladas (MTS. 2005). En conclusión, está en capacidad de generar sismos muy similares a los reales.

En Colombia hay plataformas de simulación de sismos en la Universidad de Medellín, en la Facultad de Minas de la Universidad Nacional, y en la Universidad EAFIT. Esta última cuenta con una plataforma de 6 metros de lado, y es de un grado de libertad, con frecuencia y amplitud variables.

² En un sismo se presentan ondas de un rango de frecuencias muy amplio: desde centésimas de Hertz hasta varios cientos de Hertz. En este caso se tienen en cuenta las más destructivas, esto es las que causan mayor aceleración en el suelo (ESCOBAR, G. 2003).

Los simuladores de sismos didácticos se pueden denominar también mesas vibratoras. Existen varios tipos, según el tipo de tecnología utilizado: mesas vibratoras caseras, de tecnología intermedia y de tecnología avanzada. Una casera se puede construir con canicas, un marco rectangular, una tabla y una tapa plástica circular (Figura 4). Una de tecnología intermedia se puede construir montando una tabla sobre resortes, a la cual va fijado un motor, que a su vez soporta una masa excéntrica (Figura 5).

Entre los simuladores de sismos de tecnología avanzada, se encuentran los existentes en algunos museos interactivos. En ellos se busca que la persona experimente fuerzas similares a las de un sismo real, por lo cual se trata de plataformas grandes, similares a las de fines científicos, pero a diferencia de estas el control preciso y el manejo de datos cuantitativos son mucho menores.

5.2.6. Otros sistemas de vibración

Existen sistemas que por medio de vibración cumplen su función. Entre ellos están los vibrocompactadores, que utilizando resortes y un peso excéntrico

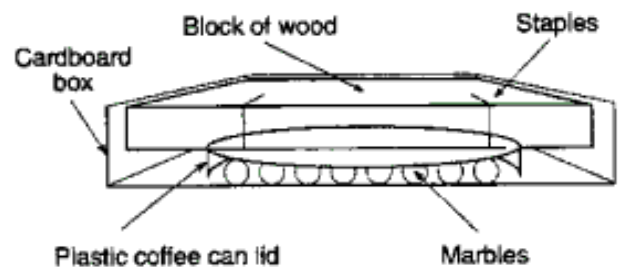


Figura 4. Mesa vibradora manual
(Fuente <http://mceer.buffalo.edu>)

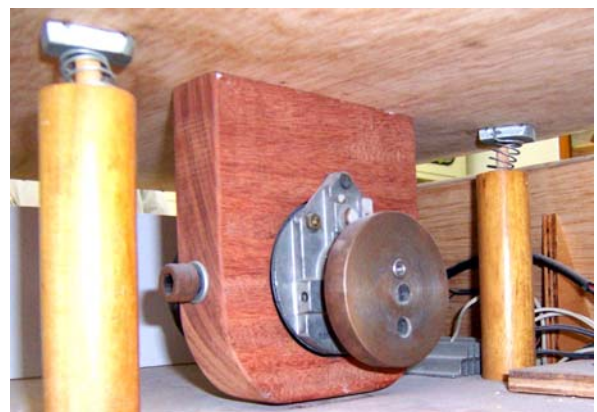


Figura 5. Interior de una mesa vibradora del taller de prototipos de la Universidad EAFIT

ligado a un motor, logran compactar suelos (Figura 6). En algunos talleres automotrices existen sistemas de vibración para probar la amortiguación de los vehículos. Operan soportados por resortes y obtienen la vibración gracias a una rueda excéntrica que empuja el sistema hacia arriba y hacia abajo (Figura 7).

En diversos laboratorios se utilizan mesas vibratorias para diversos fines, como sucede en laboratorios de biotecnología, para acelerar el crecimiento de células (Figura 8), o en hospitales, para impedir que las plaquetas sanguíneas donadas, depositadas en una bolsa se coagulen.



Figura 6. Vibro-compactador



Figura 8. Agitador orbital para laboratorio de Biotecnología.

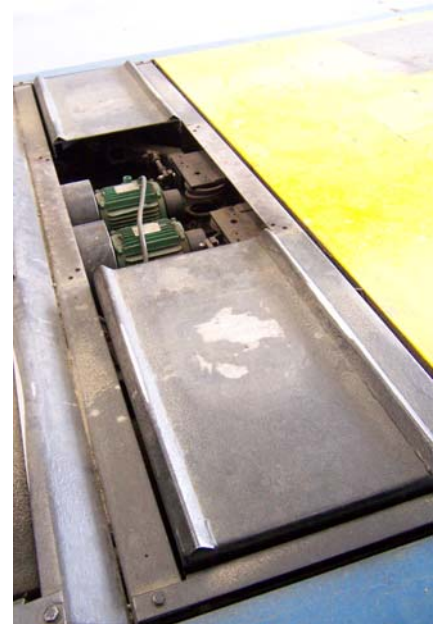


Figura 7. Sistema de vibración para probar suspensión de automóviles.

5.2.7. Teoría de vibraciones (THOMSON, W. 1982)

Todos los cuerpos que poseen masa y elasticidad están en capacidad de vibrar. El estudio de las vibraciones está relacionado con los movimientos oscilatorios de estos y las fuerzas que los causan.

La mayoría de máquinas y estructuras experimentan vibraciones, por lo que en el diseño es necesario considerar su conducta oscilatoria.

Existen dos tipos de vibraciones: libres y forzadas. La vibración libre es la que ocurre cuando un sistema oscila bajo la acción de fuerzas inherentes al sistema mismo. Este oscilará a una o más de sus *frecuencias naturales*.

La vibración que tiene lugar bajo la excitación de fuerzas externas es una vibración forzada. Cuando la excitación es oscilatoria, el sistema es obligado a vibrar a la frecuencia de excitación. Si esta coincide con una de las *frecuencias naturales* del sistema, se produce una situación de *resonancia*, la cual genera oscilaciones peligrosamente grandes.

Todos los sistemas vibratorios están sometidos a cierto grado de *amortiguamiento* puesto que la energía se disipa por fricción y otras resistencias. El amortiguamiento es de gran importancia como limitador de la amplitud de oscilación en resonancia.

5.2.8. Grados de libertad

El número de coordenadas independientes que se requieren para describir el movimiento de un sistema, es denominado *grado de libertad*. Así, una partícula libre que experimenta un movimiento general en el espacio tiene tres grados de libertad mientras que un cuerpo rígido tendrá seis grados de libertad: tres componentes de posición y tres ángulos que definen su orientación.

Por la complejidad que implica el cálculo de sistemas de varios grados de libertad, gran cantidad de problemas de vibración pueden ser tratados con aproximación suficiente, reduciéndolos a sistemas de un grado de libertad.

El movimiento oscilatorio puede repetirse a sí mismo regularmente, como en el caso de un péndulo de reloj (un grado de libertad), o desplegar considerable irregularidad, como en el caso de los movimientos sísmicos (seis grados de libertad).

5.3. SISMORRESISTENCIA Y CONSTRUCCIONES

5.3.1. Algo de historia sobre las construcciones sismorresistentes

Es claro cómo a lo largo de la historia ha existido la preocupación de protegerse de los efectos destructivos de los sismos. Se tiene conocimiento que desde 20 siglos antes de nuestra era, Hamurabi, rey de Babilonia, creó un código de construcción, lo cual indica que la normalización antisísmica es tan antigua como la civilización misma. Desde hace ya mucho tiempo, en diferentes regiones de la tierra en las que hay actividad sísmica se han percatado que luego de un sismo intenso algunas construcciones permanecen prácticamente sin daño, al tiempo que otras quedan destruidas. Esto ha llevado a preguntarse ¿Qué hace que unas construcciones sean más resistentes a los sismos que otras? Éste es el origen de la construcción sismorresistente.

A partir de los sismos de San Francisco en Estados Unidos (1906), Mesina en Italia (1908) y Tokio, Japón en 1923, los ingenieros comenzaron a analizar los efectos de los sismos sobre los edificios existentes, para a partir de ello generar ciertas medidas que permitieran que en futuros terremotos, los daños a las edificaciones fueran menores. Algunas de las medidas aún son vigentes,

especialmente las emitidas por los ingenieros japoneses, y otras se han modificado luego de posteriores análisis.

5.3.2. Sismorresistencia en Colombia

A raíz del terremoto de Popayán de 1983, en Colombia se introdujo el Código Colombiano de Sismorresistencia, el cual exige a los constructores unas condiciones mínimas de refuerzo *sismorresistente* a las edificaciones, con miras a que los daños a personas y edificaciones sean menores en futuros eventos sísmicos.

Debido a la creciente cantidad de viviendas informales, especialmente en zonas de estratos bajos en las ciudades, varias instituciones han dedicado esfuerzos a divulgar y capacitar en las buenas prácticas de *sismorresistencia*, teniendo en cuenta el nivel de educación y de capacidad de inversión de estas personas. Entre ellas el Sena y la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica.

5.3.3. ¿Qué hace que una edificación sea sismorresistente?

Aunque ha sido muy grande el trabajo dedicado a realizar estudios y a generar medidas para prevenir desastres causados por sismos, es claro que siempre una edificación tendrá cierta vulnerabilidad. La resistencia absoluta a sismos no existe. A este respecto, se habla en el ámbito de ingeniería *sismorresistente* de probabilidad de resistencia a futuros sismos, partiendo de lo sucedido en eventos pasados y teniendo en cuenta la inversión realizada en refuerzos.

Hay varios factores de diseño y construcción que le dan a una edificación la cualidad de *sismorresistente* (MEJIA, L; SENA.2000; AIS. 2001), estos son:

- Una edificación debe trabajar como unidad frente a un sismo. Esto implica que todos sus componentes se encuentren bien amarrados entre sí de

manera que se presenten los mínimos movimientos relativos posibles entre ellos.

- Desde el punto de vista de la *sismorresistencia*, el edificio ideal sería un cubo.
- Desde un punto de vista menos radical se puede establecer que la forma general de la edificación debe estar compuesta por volúmenes de formas geométricas simples, como prismas, conos, cilindros, entre otros.
- La simetría de los diferentes volúmenes del edificio, respecto a los ejes transversal y longitudinal, es determinante.
- Una edificación debe tener una estructura apropiada, la cual debe ser sólida, simétrica, uniforme y continua o bien conectada.
- Una buena cimentación es fundamental para lograr un buen comportamiento sísmico.
- La calidad del suelo es supremamente importante. Por lo tanto es condición que la edificación se encuentre sobre un suelo suficientemente sólido, esto es: de alta densidad y baja porosidad (BEDOYA, G. 2006) (suelos de relleno u otros que pueden amplificar los sismos son bastante peligrosos para cualquier construcción).
- La continuidad es importante: todos los ejes de los muros que conforman los diferentes espacios deben ser, hasta donde sea posible, colineales, tanto vertical como horizontalmente.
- Deben disponerse suficientes muros en dos direcciones perpendiculares entre sí.
- Un muro estructural largo trabaja mucho mejor que uno corto.
- Los muros estructurales deben ser confinados o amarrados horizontalmente cada 25 veces su grosor.
- Entre menor sea el peso de la construcción, mayor será su *sismorresistencia*.

- Se debe buscar uniformidad en la rigidez, evitando que se presente diversidad de materiales en la constitución de componentes que desempeñan trabajos similares.
- A esto va ligada la ubicación de vanos (espacios para ventanas y puertas) la cual debe ser cuidadosamente hecha pues de lo contrario se pueden generar considerables diferencias de rigidez.
- La construcción de una extensión a un edificio puede introducir irregularidades en la planta e introducir irregularidades de rigidez y *período* sobre toda la estructura, lo cual lo hace más susceptible de colapsar.
- La localización de un edificio con respecto a otros edificios en la vecindad puede afectar su comportamiento durante un terremoto. En el caso de una fila de viviendas en una cuadra urbana, por lo general son las viviendas situadas en los extremos de la fila o las situadas en la esquina las que se ven más afectadas. Un extremo de la vivienda está anclado a la vivienda vecina, mientras que el otro lado no, generando irregularidad en la rigidez general de la estructura, lo que conlleva un daño mayor.
- Daños severos pueden resultar cuando dos edificios altos con períodos naturales distintos están situados muy cerca el uno del otro. Durante el terremoto, ambos pueden mecerse a frecuencias distintas y chocarse el uno contra el otro, causando un efecto conocido como "golpeteo".
- La resistencia sísmica de una edificación depende de algo más que el tipo de construcción: la mala calidad de la mano de obra, y mal estado de la construcción afectan considerablemente su vulnerabilidad.

5.3.4. Técnicas locales de construcción (URIBE, A. 2006)

En Colombia existe una amplia variedad de edificaciones gracias a varios factores, como son: coexistencia de construcciones antiguas y modernas, multiculturalidad, alta cantidad y diversidad de zonas rurales, entre otros. Y aunque se encuentran algunos materiales alternativos de construcción, como son la madera, la guadua y

el bahareque, es clara la predominancia de las construcciones en mampostería no reforzada y mampostería reforzada de 1 y 2 pisos.

La mampostería no reforzada es un tipo de construcción en la que solo se utilizan ladrillos y concreto. No existe ningún tipo de refuerzo que brinde resistencia ante fuerzas horizontales (como sucede en un sismo). Este tipo de construcción se puede comparar fácilmente con un “arrume” de piezas, por lo que es altamente vulnerable.

Por su parte, la mampostería estructural o reforzada, tiene una alta resistencia sísmica ya que parte del refuerzo de los muros con material compuesto de concreto y hierro, aprovechando los agujeros verticales de los ladrillos. Una variación de esto es formar columnas (concreto y hierro) entre dos secciones de pared. Se acostumbra para construir edificios de hasta 5 pisos.

Otras formas importantes de construcción sismorresistente, utilizadas localmente son:

- Sistema tradicional o *aporticado*. Se construye sobre una estructura hecha con concreto reforzado, compuesta de columnas y losas, estas últimas reforzadas con vigas y nervios. Se utiliza para construcciones industriales y edificios.
- Sistema de *tabiques* de concreto. Es un principio de construcción similar al *aporticado*, con la diferencia que las columnas son reemplazadas por tabiques, esto es, elementos verticales planos. Especialmente utilizado en edificios altos.
- Casas prefabricadas, las cuales se construyen a partir de bloques de concreto, madera y *fibrocemento*, que se ensamblan unos con otros al momento de construir la casa.

- Construcciones en madera. Bastante efectivas en zonas de alta actividad sísmica, tanto estructura como muros son troncos o tablas de madera. En algunos lugares se utiliza guadua.

En el contexto de la construcción que involucra mampostería se puede hablar de dos tipos de amarre entre componentes:

- Amarre débil. Es la pega entre bloques o ladrillos la cual se hace con concreto. Funciona bien a compresión, más no tolera cargas horizontales.
- Amarre fuerte. Amarre de hierro rodeado de concreto. Se utiliza para ensamblar columnas con vigas o losas, puntos donde se acumulan esfuerzos importantes. Soporta tanto cargas horizontales como verticales.

6. MARCO CONCEPTUAL

Partiendo de la información expuesta en el anterior capítulo, se hace una estructuración y depuración de ésta, añadiendo información donde se considera necesario. Para hacerlo se toman como referencia las tres partes centrales del proyecto, a saber: set de módulos, mesa vibradora y la integración de la Experiencia interactiva en conjunto.

6.1. INFORMACIÓN RELEVANTE PARA EL DESARROLLO DEL SET DE MÓDULOS

6.1.1. Factores Pedagógicos Relevantes

El set de módulos debe cumplir con algunas condiciones básicas:

- Más que brindar respuestas, el juego debe generar inquietudes y preguntas.
- El juego debe ser cautivador de manera que atraiga a los visitantes y genere deseo de utilizarlo.
- La forma de uso debe ser rápidamente asimilable y muy intuitiva. De esta condición se desprenden estas posibilidades:
 - Debe estar compuesto por piezas sencillas.
 - No debe tener muchas piezas diferentes entre sí.
 - La manera de ensamblar las piezas entre sí debe ser rápida y fácil.

- Usar colores asociados a cada tipo de módulo ayuda a clasificar rápidamente las piezas.
- El juego debe posibilitar varias maneras de armar, incluyendo formas “erróneas”, es decir, no *sismorresistentes*, que caigan fácilmente. El error brinda más posibilidades de aprendizaje que el acierto, pues incita el autoaprendizaje.
- Se debe tratar de comunicar pocas ideas, sencillas y claras, pero importantes para el tema abordado. Debe evitarse el “ruido”, esto es información adicional que distrae de la idea (o ideas) central que se pretende expresar.

6.1.2. Consideraciones Relacionadas con la Naturaleza del Parque Explora

Éstas son algunas recomendaciones para el desarrollo del set de módulos brindadas por el equipo de museografía del Parque Explora (GÓEZ, A. 2006):

- Si bien el planteamiento del Parque es que las Experiencias tengan un enfoque *multiusuario*, puede dirigirse hacia estudiantes de décimo y undécimo grado de educación secundaria, como herramienta metodológica.
- La Experiencia no puede depender de un guía para ser presentada y explicada a los visitantes. Eventualmente puede tener acompañamiento de éste.
- El *reset* es importante. Esto quiere decir que luego de que una persona termine de interactuar con la Experiencia, ésta debe quedar lista para ser usada por otra persona
- El tiempo de interacción debe ser reducido, es recomendable que éste no supere 5 minutos.

- Debe haber un equilibrio entre ilustrar el fenómeno y entretener al usuario.
- Las piezas pequeñas son susceptibles de ser robadas o perderse. Por esto su costo individual no debe ser alto.
- El Parque Explora está diseñado bajo un principio formal básico: plano - curva - plano. Esto quiere decir que no hay vértices o esquinas, todas las esquinas se transforman en redondeos.

6.1.3. Factores de Sismorresistencia

Como se observa en el marco teórico, existe un conjunto de factores que determinan el nivel de resistencia de una edificación frente a un sismo. De los enunciados se hace una depuración para eliminar redundancias y consideraciones demasiado técnicas o específicas, quedan entonces las siguientes máximas de *sismorresistencia* para la Experiencia interactiva, definidas con el apoyo de un experto en el tema (JARAMILLO, J.2006):

- Una edificación debe trabajar como unidad frente a un sismo, para lo cual debe tener una estructura apropiada, la cual debe ser sólida, simétrica, uniforme y bien conectada.
- La forma general de la edificación debe estar compuesta por volúmenes de formas geométricas simples y simétricas.
- La edificación debe estar situada sobre un suelo de buena calidad, esto es con una suficiente solidez.

6.1.4. Una segunda depuración

Teniendo en cuenta los aspectos pedagógicos mencionados (página 32), se hace necesario tomar la idea más importante para que se transmita información simple y clara, que sea la idea central de la Experiencia, ésta es:

Una edificación es más *sismorresistente* mientras más se comporte como unidad. Para esto debe tener una estructura bien conectada que amarre todas sus partes entre sí.

Las otras dos ideas son susceptibles de ser abordadas en otras dos Experiencias Interactivas, “hermanas” de la desarrollada en este proyecto.

6.1.5. Características de una Edificación

Debido a las condiciones pedagógicas observadas anteriormente, se hace necesario limitar el conjunto de partes que componen el set de módulos. Éstas deben cumplir con las condiciones funcionales y semánticas mínimas para que el usuario las asocie con partes de una edificación. Estas son:

Columnas. Transmite cargas del edificio al suelo.

Vigas. Generan amarre horizontal, sujetando columnas y enmarcando paredes.

Mampostería o paredes. Funcionan como un diafragma rígido que evita el cizallamiento. Es un referente semántico importante para dar la apariencia de edificación.

La selección de estos componentes se justifica en que son los más comunes y los mínimos para lograr una construcción *sismorresistente*.

A esto se hace necesario agregar que convencionalmente se da un amarre fuerte entre los componentes que hacen parte de la estructura (columnas y vigas) Y al interior de la mampostería se dan amarres débiles.

6.1.6. Referentes existentes

Se pueden tomar dos categorías de referentes para el desarrollo del set de módulos: los juegos de armar y los juegos con intereses didácticos que buscan explicar el impacto de sismos sobre edificaciones.

Sobre los juegos de armar hay varios referentes que cabe revisar, por ser planteados para construir edificaciones a escala o similares. Entre ellos están:

- Estralandia y Lego, que se basan en ensambles mecánicos ubicados normalmente en las caras horizontales de las piezas (Figura 9).
- Torre de babel, que por simple posicionamiento de las piezas, una sobre otra, se construyen edificios. La fuerza de compresión generada por el mismo peso de las piezas que están más arriba permite una relativa estabilidad del edificio (Figura 10).
- Octopus es un juego de madera que con elementos de ensamble y palos de madera, permite armar diversas estructuras (Figura 11).



Figura 10. Torre de babel ó *Tumbling tower*. (Fuente <http://mysticriver toysandgifts.com>)

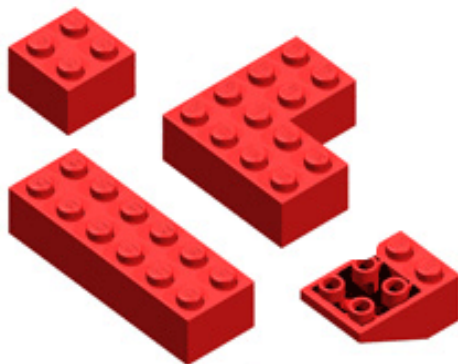


Figura 9. Sistema Lego.
(Fuente <http://www.photoshoproadmap.com>)

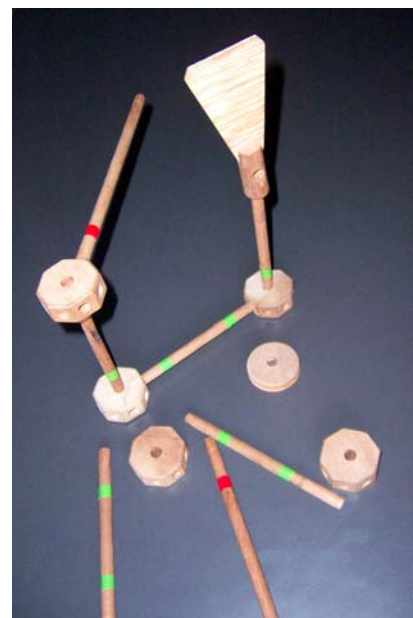


Figura 11. Juego Octopus.

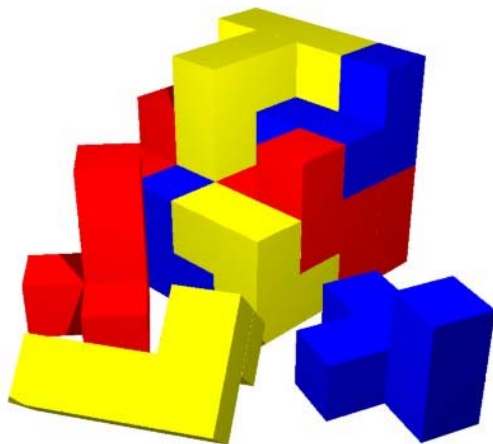


Figura 12. Rompecabezas 3D.
(Fuente <http://www.happypuzzle.co.uk>)

- A partir de varias piezas como se ve en la Figura 12, otro juego genérico permite armar cubos y volúmenes similares.

En Internet se encuentran algunos ejemplos de juegos de armar con intereses didácticos. Estos tienen en común diferentes maneras caseras de simular edificaciones para luego someterlas a sismos. Algunos ejemplos de ellos:

- Cubos de azúcar y mantequilla de maní. Los primeros cumplen la función de ladrillos y la mantequilla hace de pega (MCEER, 2005).
- Palos de paleta y arcilla. Los primeros hacen de columnas y vigas y la arcilla une un palo con otro (MCEER, 2005).

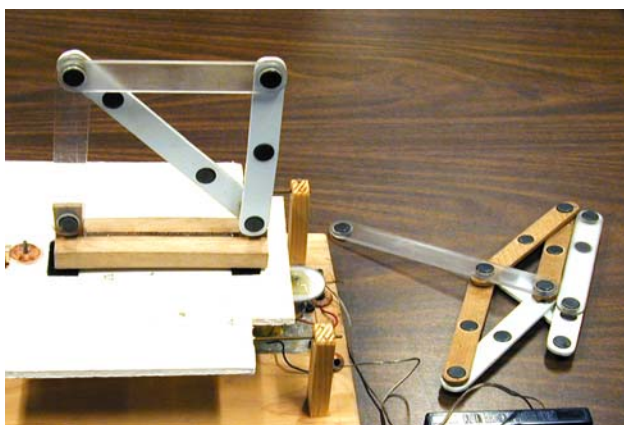


Figura 13. Juego para armar estructuras y someterlas a sismos simulados.
(Fuente <http://www.exploratorium.edu>)

- Palos de paleta con imán (FAULTLINE, 2005). A cada palo de paleta se le pegan imanes en el centro y en los extremos. Con varios de estos palos se arma una estructura (Figura 13).

6.2. INFORMACIÓN RELEVANTE PARA EL DESARROLLO DE LA MESA VIBRADORA

6.2.1. Sobre sismología y simulación de sismos

Un sismo es una liberación súbita de energía elástica acumulada al interior de la corteza terrestre. El medio por el que viajan las ondas no es uniforme, y de ahí que la naturaleza de los sismos sea más caótica que armónica.

Existen dos tipos de ondas sísmicas: internas y superficiales. Las más veloces y suaves son las ondas internas. Las más lentas y destructivas son las ondas superficiales (Rayleigh y Love).

Aunque el movimiento causado por un sismo es de *6 grados de libertad*, normalmente los simuladores para investigaciones en el campo de la *sismorresistencia* trabajan con uno o dos *grados de libertad*. Por economía se omiten los desplazamientos verticales, puesto que son las fuerzas horizontales las que más afectan una edificación.

6.2.2. Respecto a la medición de los sismos

La intensidad, comúnmente medida con la escala Mercalli Modificada, determina el efecto de un sismo en un punto definido. Esta medición es la más utilizada para determinar los efectos de los sismos sobre la población y las edificaciones.

La escala Richter mide la cantidad de energía liberada en el foco del sismo, y lo hace en términos de la amplitud máxima de las ondas sísmicas que produce. Esta escala de magnitudes es logarítmica.

Otra técnica para determinar el poder destructivo de un sismo consiste en medir la aceleración del terreno en un punto definido, la cual está ligada al desplazamiento oscilatorio y la frecuencia en que sucede. Las ondas sísmicas tienen en general la

misma frecuencia, pero su amplitud varía. En la práctica, esta medida se logra con acelerómetros

6.2.3. De la teoría de vibraciones

Todos los cuerpos que poseen masa y elasticidad están en capacidad de vibrar. La mayoría de maquinas y estructuras experimentan alguna cantidad de vibraciones, por lo que en el diseño es necesario considerar su conducta oscilatoria. Es necesario pues, tener en cuenta para la mesa vibradora el desgaste y mantenimiento necesarios por su cotidiana vibración.

El tipo de vibración a la que puede estar sometida la mesa vibradora se denomina vibración forzada. Se llama así a la que tiene lugar bajo excitación de fuerzas externas, impuestas de forma oscilatoria. El sistema es obligado a vibrar a la frecuencia de excitación. Si esta coincide con una de las *frecuencias naturales* del sistema, se produce una situación de *resonancia*, la cual genera oscilaciones de mayor amplitud. La determinación de la *frecuencia natural* de un cuerpo que va a estar sometido a vibración forzada es importante, puesto que la resonancia puede causar oscilaciones peligrosamente grandes. Este es el caso del puente de Tacoma Narrows, en el estado de Washington (Estados Unidos), que cayó en 1940, cuatro meses después de construido. El accidente se atribuye a los vientos causados por un temporal, que produjeron el efecto de resonancia en el puente.

6.2.4. Respecto al montaje y puesta en escena

La esencia de la Experiencia interactiva está en que el visitante se ve impulsado a generar estímulos en ella. De allí que la mesa vibradora debe dar la sensación de ser un objeto sencillo y familiar. Que no se perciba como un objeto técnico, sino más bien como un juguete.

La mesa vibradora debe ser bastante accesible.

Por tratarse de una mesa vibradora didáctica, el control preciso y el manejo de datos cuantitativos no son necesarios. De esto se concluye que se puede optar por un sistema de movimientos complejos no controlados con precisión, que simule de manera más cercana la naturaleza caótica de un sismo.

6.3. INFORMACIÓN RELEVANTE PARA LA INTEGRACIÓN DE LA EXPERIENCIA INTERACTIVA.

6.3.1. Análisis pedagógico

Las Experiencias interactivas deben conjugar actividades que impliquen sentir, hacer y pensar, de manera que el aprendizaje se dé de manera inadvertida y natural. En el jugar están inmersas estas tres dimensiones (para Julián Betancourt razón, corazón y sentidos, página 9), de allí que en el museo interactivo se recurra al juego como eje de contacto con la persona.

El juego debe tener entonces su soporte en el sentir, que en el contexto del museo interactivo se concentra en la emoción causada por la curiosidad y la sorpresa. El sentir debe estar presente en dos momentos: en el abordaje de la Experiencia y en su uso. El primer momento implica cautivar a la persona aprovechando su curiosidad. El segundo momento se vale de la sorpresa para incitar a la persona a que continúe en la Experiencia hasta finalizar el juego, alimentando al mismo tiempo su curiosidad.

El juego debe incitar al usuario a actuar (hacer), y que ese actuar sea determinante para el curso de la Experiencia.

La conjugación del actuar y de la emoción producida por la curiosidad y la sorpresa, se convierten en el punto de partida del aprendizaje. Luego de ser incitado a vivir un fenómeno por sí mismo (haciendo) y que su curiosidad se ha

alimentado con la sorpresa, el usuario tiene una disposición adecuada para interrogarse sobre el fenómeno (pensar) abordado por la Experiencia. Para lograrlo, ésta debe exponer algún material que permita el aprendizaje (visual, auditivo, audiovisual, entre otros) pero sobre todo debe plantear interrogantes que alimenten la curiosidad de la persona y la inciten a explorar por sí misma alrededor del fenómeno abordado por la Experiencia. Es importante con la puesta en escena estimular la curiosidad del visitante.

Si bien la persona vive momentos de mayor dominancia del sentir, hacer o pensar, siempre estos se presentan de manera simultánea (MAYA, T. 2006).

Es de resaltar que por tratarse de una Experiencia *multiusuario*, tanto sentir, hacer y pensar deben ser estimulados en cualquier persona que la aborde, indiferente de su nivel académico o socioeconómico. Esto teniendo en cuenta que la Experiencia interactiva en desarrollo está enfocada a personas mayores de 10 años.

6.3.2. Aspectos comunicativos

Los supuestos comunicacionales expuestos en el marco teórico (página 10) deben estar presentes en la Experiencia interactiva. De ellos se resalta lo siguiente:

- Liviana. Utiliza un lenguaje sencillo y expone solamente la información necesaria. Esto implica limitar el número de partes que la componen.
- Familiar. Debe tomar como referentes elementos de la vida cotidiana.
- Accesible. Todas sus partes deben tener un diseño transparente y sencillo, que no de pie al misterio.
- De fácil manejo. La forma de uso debe ser fácil y comprensible.

La simplicidad es un factor imprescindible para la puesta en escena. Asimismo la sencillez en el manejo del lenguaje es la mayor condición. En este sentido es importante que los mensajes percibidos partan de dos supuestos: evitar hasta

donde sea posible la información innecesaria y evitar una excesiva simplificación de los mensajes, lo cual puede causar errores de interpretación.

Las formas de expresión para un montaje interactivo deben ser acordes con la naturaleza del tema tratado. Son entonces la plástica y la información visual, auditiva y audiovisual las formas de expresión más coherentes con el tema de la Experiencia.

Respecto a la interfase, es importante hacer evidente para el usuario en qué momentos y lugares debe generar estímulos al sistema (actitud activa) y en cuáles debe recibir estímulos (actitud receptiva).

6.3.3. Eje temático

El eje temático para todo montaje interactivo, por definición, es la concepción racional del mundo. Quiere decir que el actuar del usuario y la emoción que el montaje pueda despertar en él, están enfocados a generar inquietudes racionales. Son entonces sentir y hacer, dos dimensiones de la persona que se conjugan con el pensar, para finalmente estimular este último.

En la Experiencia Interactiva en desarrollo, la información contenida se puede clasificar en dos grandes áreas: *sismorresistencia* y *sismología*.

La principal lección que se debe llevar el usuario se resume en la denominada máxima de sismorresistencia para la Experiencia (página 35). Ésta merece exponerse nuevamente: una edificación es más sismorresistente mientras más se comporte como unidad. Para esto debe tener una estructura bien conectada que amarre sus partes entre sí.

La información relacionada con *sismología* debe ser bastante limitada y se debe presentar como secundaria. Se debe informar únicamente sobre las

características de los sismos en la superficie. Para esto se mencionan y explican brevemente los tipos de ondas sísmicas (P, S, Rayleigh y Love; Figura 1) y las técnicas para medir los sismos (magnitud e intensidad; ver página 18).

6.3.4. Tipos de Experiencia interactiva

De los tipos de Experiencia existentes (página 10) ésta puede cumplir con las características de una individual y de una grupal. Esto significa que la persona aborda un “juguete” (montaje-máquina) sola o acompañada, y en ambos casos debe generar resultados satisfactorios, esto es: los usuarios comprenden el juego, logran jugar y obtienen mensajes adecuados.

7. DESARROLLO DEL SET DE MÓDULOS

El set de módulos es uno de los requerimientos expuestos por el equipo de museografía del Parque Explora para esta Experiencia. Es además la parte que tiene un contacto más directo con el usuario, por lo cual se puede considerar como su eje central. Es igualmente el pretexto para abordar la Experiencia Interactiva y el protagonista de la misma, después del usuario, naturalmente.

Su objetivo es brindar al usuario la posibilidad de construir fácilmente edificaciones a escala reducida, que remitan a las reales, y que luego de sometidas a un sismo simulado, permitan generar inquietudes acerca de los factores que hacen más *sismorresistente* una edificación.

En este capítulo se da cuenta del proceso de desarrollo, partiendo de las especificaciones de diseño, pasando por la generación de ideas, evaluación y ajustes de diseño, diseño de detalle y culminando con una evaluación final del prototipo.

7.1. ESPECIFICACIONES DE DISEÑO

A partir de los temas tratados en los dos puntos anteriores, se especifican algunos requerimientos técnicos que servirán para la generación de alternativas de solución para el set de módulos. Estos se observan en la Tabla 2.

Tabla 2. Especificaciones de diseño para el set de módulos.

| Necesidad / Deseo | N ó D | Requerimiento técnico |
|---|-------|--|
| Debe permitir diversas maneras de armado, desde una muy sencilla y frágil hasta una más elaborada y resistente. | N | Cualquier pieza debe poder ensamblarse fácilmente con cualquier otra pieza. |
| El juego debe ser cautivador. | N | La forma de cada pieza debe ser sencilla, cercana a una forma geométrica básica. De colores llamativos. |
| El set de módulos debe integrarse visualmente con la apariencia general de Explora. | N | La forma de las piezas debe ser acorde con el principio formal de Explora: plano-curva-plano. |
| La forma de uso debe ser rápidamente asimilable y muy intuitiva para el público designado para la Experiencia. | D | En menos de 20 segundos un estudiante de 10 u 11 grado debe poder entender algunas de las maneras de ensamblar las piezas. |
| No debe haber muchas piezas diferentes entre sí. | D | El número de piezas diferentes no debe ser mayor que 5. Cada tipo de pieza debe estar asociada a un color. |
| La manera de ensamble entre unas piezas y otras debe ser rápida y fácil. | D | En un solo movimiento dos piezas deben poder quedar ensambladas. |
| El <i>reset</i> del juego debe ser fácil y rápido. | N | Las piezas, en cualquier forma que sean armadas, deben poder desarmarse por la misma Experiencia, sin necesidad de ayuda de ninguna persona. |
| Las piezas deben ser económicas de manera que se puedan reponer fácilmente. | N | El costo total del set de módulos no debe superar \$ 1'500.000 |

| | | |
|---|---|--|
| La construcción de una pequeña edificación debe poder hacerse rápidamente. | N | Una edificación que utilice 20 piezas debe poder construirse en 3 minutos. |
| Piezas deben resistir impactos. | D | Tanto material como geometría deben garantizar resistencia al impacto de una caída de una altura de 2 m. |
| Las piezas deben ser suficientemente livianas que resulten fáciles de manipular para un niño. | N | La densidad media de una pieza debe estar entre 0,05 g/cm ³ y 0,7 g/cm ³ . El peso de cada módulo no supera 600g. |
| Deben ser pesadas lo suficiente para que cualquier edificación construida con ellas no se desmorone fácilmente durante el armado. Naturalmente se debe caer con el sismo. | N | |
| Las piezas deben tener un tamaño mínimo que evite que un niño las ingiera. Las piezas se deben ver a la distancia de manera que resulten atractivas. | N | Las piezas deben tener por lo menos una longitud de 5cm en una de sus dimensiones. |
| Cada módulo debe tener un tamaño que le permita a un niño de 10 años manipularlo. | N | Ninguna dimensión de los módulos es mayor que 50cm. |

7.2. ANÁLISIS FUNCIONAL

Para definir claramente los principales flujos y la función principal del set de módulos es de utilidad construir una “caja negra” (Figura 14) que ayuda a definir el *qué*, o en otras palabras lo que el producto debe lograr (MUÑOZ, A. 2006).

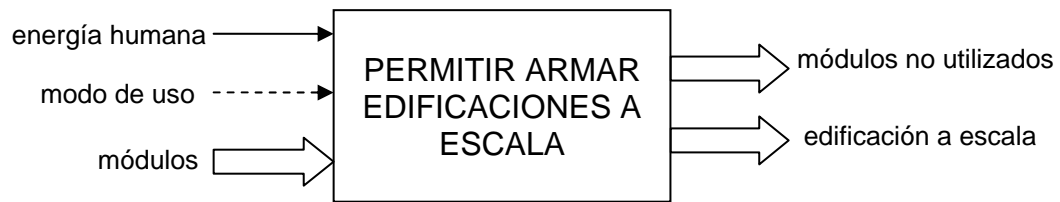


Figura 14. Caja negra para el set de módulos.

Para llegar a una mayor profundidad en el análisis, se desagrega esta función principal en un conjunto de funciones secundarias esenciales, por medio de un árbol de funciones (Figura 15) que consiste en analizar sistemáticamente las funciones que realiza un producto, según las percibe el usuario, y organizarlas jerárquicamente (MUÑOZ, A. 2006).

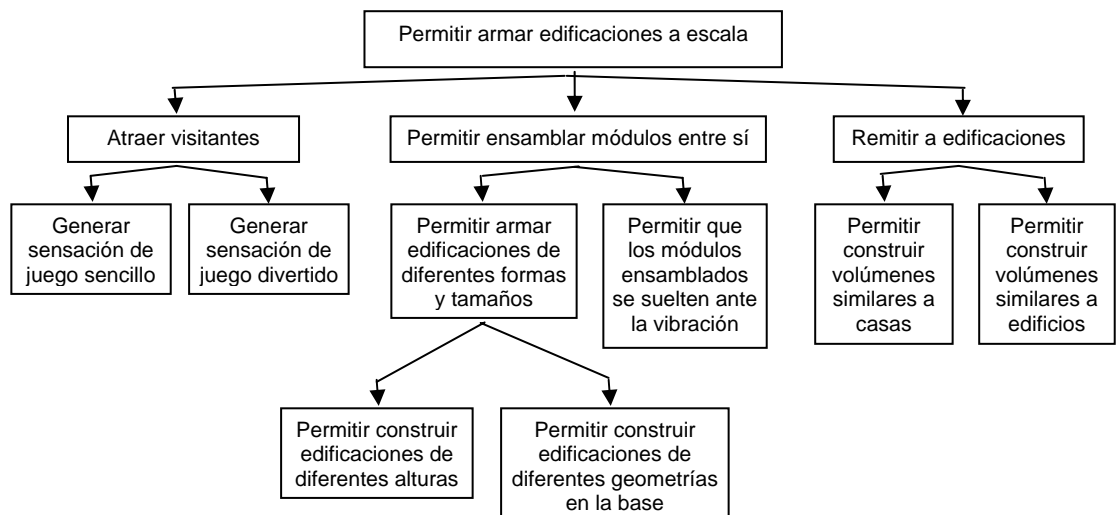


Figura 15. Árbol de funciones para el set de módulos.

7.3. GENERACIÓN DE ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN

Tomando como punto de partida las consideraciones pedagógicas, de sismorresistencia, especificaciones de diseño y el análisis funcional, se plantean trece alternativas de solución, las cuales se observan en las Figuras 16 a 18.

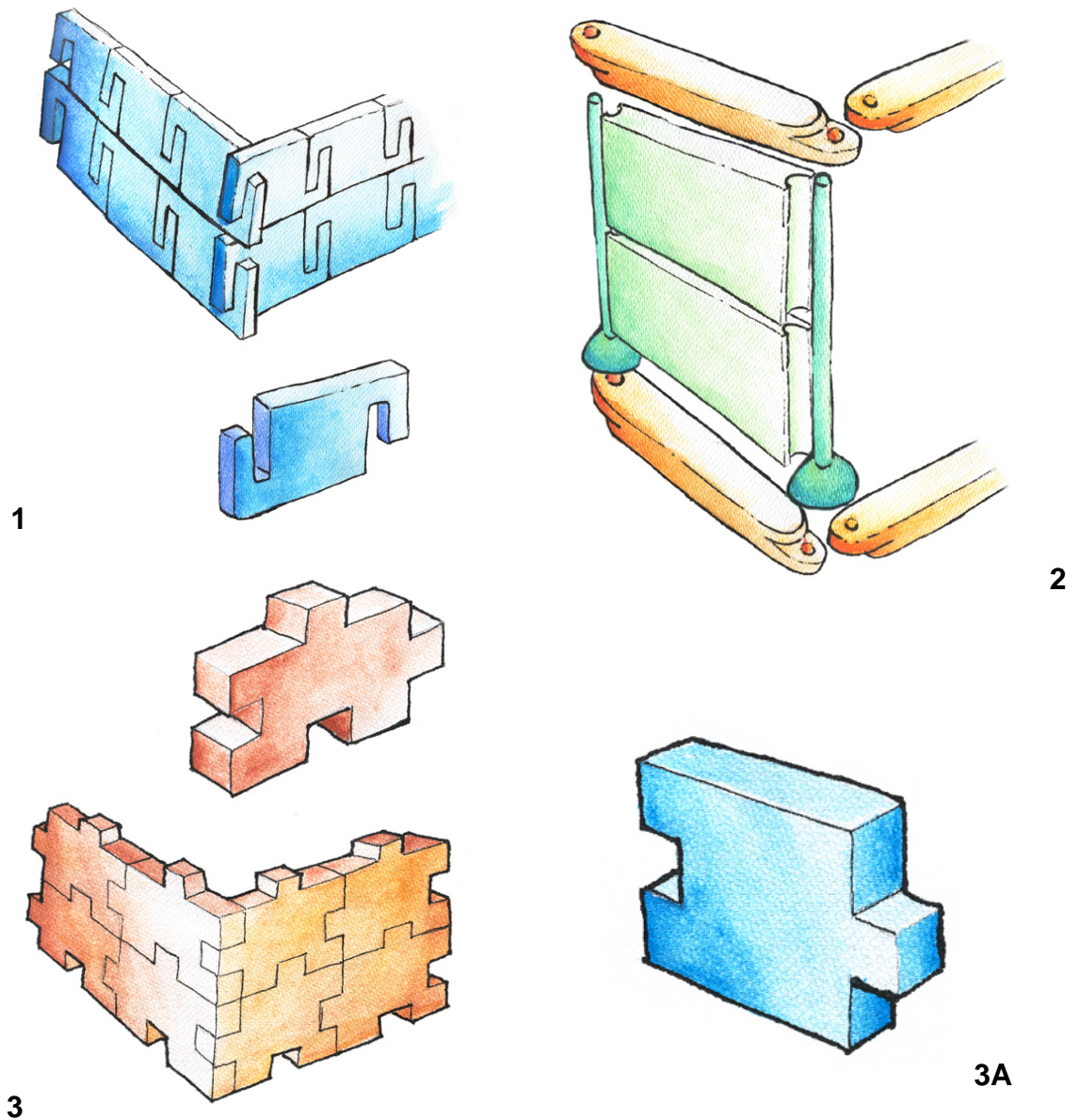
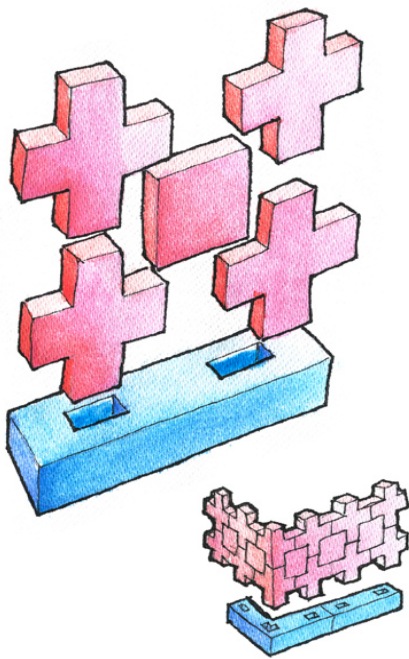
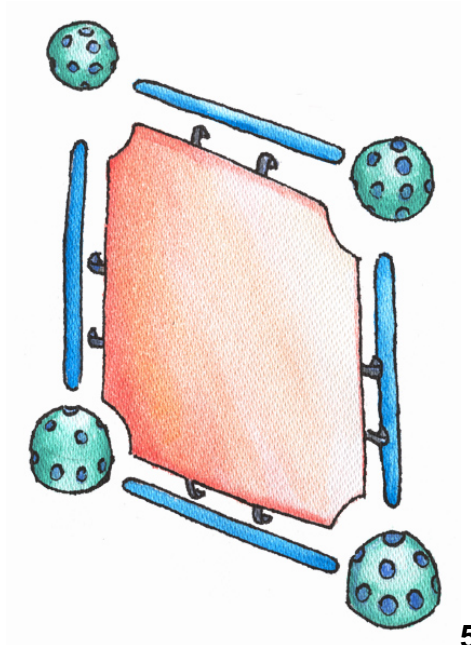


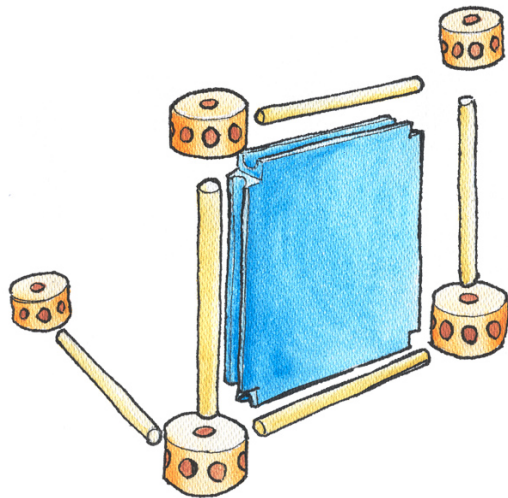
Figura 16. Alternativas de diseño (1, 2, 3 y 3A) para el set de módulos.



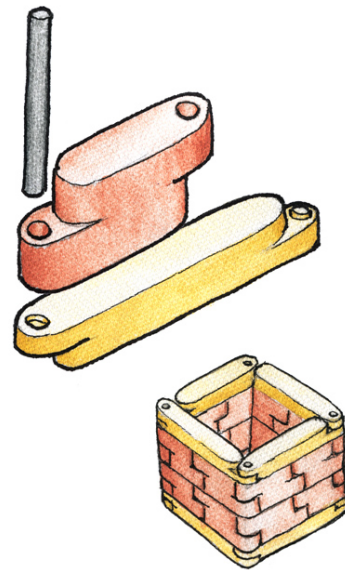
4



5



6



7

Figura 17. Alternativas de diseño (4, 5, 6 y 7) para el set de módulos.

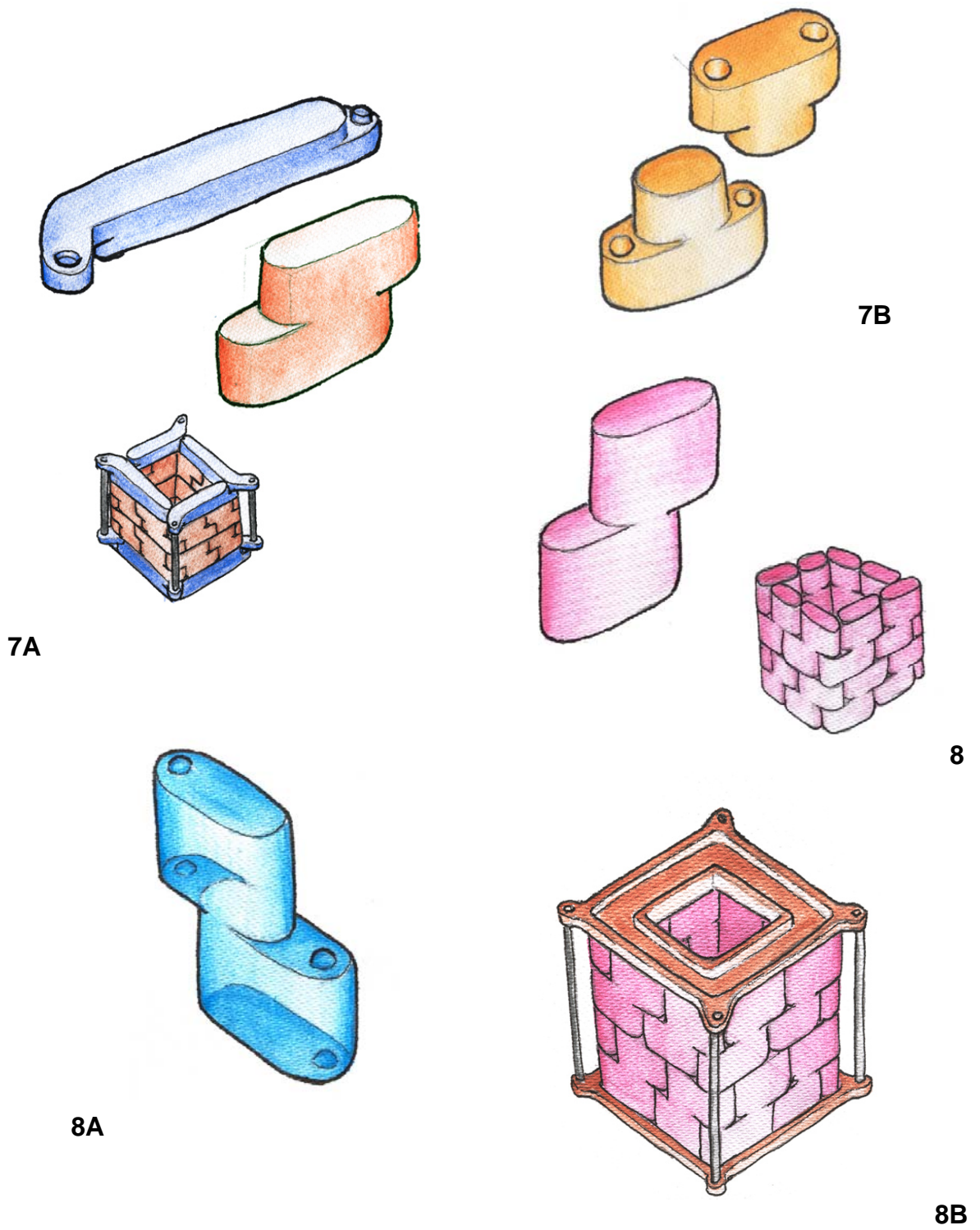


Figura 18. Alternativas de diseño (7A, 7B, 8, 8A, 8B) para el set de módulos.

7.4. EVALUACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS

7.4.1. Criterios de evaluación

Para lograr una acertada selección de las alternativas se plantean los siguientes criterios de evaluación, obtenidos a partir de las especificaciones de diseño y la información relacionada con construcción sismorresistente (página 34):

- Ensamble fácil. Las piezas encajan fácil y rápidamente entre sí.
- Comprensible. La forma de las piezas facilita la comprensión de la manera de uso.
- Piezas sencillas.
- Forma Explora. Las piezas son acordes con el principio de diseño de Explora: plano-curva-plano.
- Diversidad de piezas. El número de piezas diferentes es menor que 5.
- Facilidad de reset. Una edificación se puede desarmar sin ayuda de nadie, con vibración.
- Costo de producción. La producción del conjunto total de módulos no supera \$1`500.000
- Tiempo de armado. Rápidamente se puede armar una edificación.
- Resistencia a impacto. Las piezas pueden caer de una altura de 2m sin que se vean afectadas.
- Peso por pieza. El peso de cada pieza está por debajo de 600g.
- Tamaño por pieza. Las piezas tienen un tamaño entre 5cm y 50cm
- Ilustra fenómeno. Permite experimentar construyendo edificaciones reforzadas y sin reforzar.

7.4.2. Evaluación

Teniendo como punto de partida los criterios expuestos en la sección anterior, y asignándole a cada uno un porcentaje que permita ponderar según su importancia relativa, se efectúa la evaluación de alternativas, expuesta en la Tabla 3.

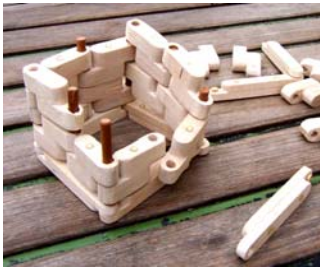
Tabla 3. Matriz de evaluación de alternativas para el set de módulos.

| CRITERIOS DE EVALUACIÓN | Ensamble fácil | Comprensible | Piezas sencillas | Forma Explora | Diversidad de piezas | Facilidad de reset | Costo de producción | Tiempo de armado | Resistencia a impacto | Peso por pieza | Tamaño por pieza | Ilustra fenómeno | TOTAL |
|-------------------------|----------------|--------------|------------------|---------------|----------------------|--------------------|---------------------|------------------|-----------------------|----------------|------------------|------------------|-------|
| % | 12 | 12 | 8 | 8 | 6 | 8 | 7 | 7 | 7 | 6 | 6 | 13 | 100 |
| Alternativas | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 5 | 4 | 6 | 6 | 7 | 7 | 4 | 4 | 6 | 8 | 6 | 8 | 5,88 |
| 2 | 5 | 6 | 6 | 2 | 10 | 6 | 8 | 7 | 6 | 8 | 8 | 2 | 5,73 |
| 3 | 2 | 6 | 6 | 2 | 10 | 6 | 9 | 4 | 5 | 8 | 8 | 2 | 5,16 |
| 3A | 7 | 7 | 7 | 2 | 10 | 8 | 8 | 6 | 5 | 8 | 8 | 2 | 6,19 |
| 4 | 6 | 2 | 6 | 2 | 4 | 7 | 3 | 2 | 5 | 7 | 5 | 5 | 4,47 |
| 5 | 5 | 5 | 6 | 3 | 4 | 3 | 3 | 6 | 7 | 6 | 3 | 7 | 4,97 |
| 6 | 3 | 4 | 5 | 3 | 6 | 3 | 4 | 2 | 5 | 5 | 3 | 7 | 4,24 |
| 7 | 6 | 6 | 8 | 10 | 7 | 6 | 6 | 6 | 8 | 8 | 7 | 9 | 7,25 |
| 7A | 7 | 7 | 6 | 9 | 7 | 7 | 4 | 7 | 7 | 8 | 7 | 8 | 7,06 |
| 7B | 6 | 5 | 7 | 6 | 7 | 6 | 6 | 6 | 6 | 8 | 7 | 7 | 6,33 |
| 8 | 9 | 9 | 9 | 10 | 10 | 9 | 8 | 10 | 8 | 8 | 9 | 3 | 8,23 |
| 8A | 7 | 7 | 8 | 10 | 10 | 9 | 7 | 8 | 8 | 8 | 9 | 5 | 7,72 |
| 8B | 6 | 7 | 7 | 9 | 7 | 8 | 6 | 7 | 8 | 7 | 9 | 10 | 7,63 |

Las alternativas 7, 8, 8A y 8B son las que mayor puntuación alcanzan. Se procede entonces a hacer una evaluación cualitativa de estas, partiendo de la interacción de potenciales usuarios con cada una de ellas.

7.4.3. Pruebas de usuario

Para las pruebas de usuario se construye un modelo en madera de las alternativas 7, 8, 8A y 8B, los cuales se muestran en la Figura 19.



Los usuarios del Parque Explora son personas de cualquier edad y cualquier nivel socioeconómico habitantes, o visitantes de Medellín. Siendo un segmento tan amplio, el muestreo para seleccionar los colaboradores que prueben las propuestas para el set de módulos se torna bastante complejo. Teniendo en cuenta que el presente proyecto es de diseño y no de investigación, se escoge la zona aledaña al espacio que ocupará el Parque para ubicar estos colaboradores. Más precisamente se selecciona el Parque de los Deseos, por su proximidad y naturaleza similar a la del Parque Explora.

Las personas seleccionadas son entonces visitantes del Parque de los Deseos de edades entre 10 y 65 años. Se intenta abordar personas de diferentes edades (desde niños hasta adultos mayores) para cada una de las propuestas a evaluar.

Las principales características a evaluar en cada propuesta son:

- Facilidad de ensamble. La persona comprende fácilmente la manera de ensamblar las piezas y lo hace fácilmente.
- Comprensión del problema. La persona muestra intención de construir una edificación que resista sismos.

Figura 19. Modelos de las alternativas 7, 8, 8A y 8B.

- Tiempo utilizado en terminar la edificación. En promedio, no debe superar cinco minutos, por tratarse de un juego para museo interactivo.
- Explicación del fenómeno. La persona tiene varias posibilidades de armado, algunas más sismorresistentes que otras.

Los resultados obtenidos se resumen en la Tabla 4. La evaluación detallada se expone en el Anexo 2.

Tabla 4. Resultados de la evaluación de las pruebas de usuario.

| Alternativa | Criterios | | | |
|-------------|-----------------------|--------------------------|------------------|--------------------------|
| | Facilidad de ensamble | Comprensión del problema | Tiempo utilizado | Explicación del fenómeno |
| 7 | Baja | Media | Bastante | Media |
| 8 | Alto | Media-alta | Poco | Media |
| 8A | Media | Media-alta | Medio | Media |
| 8B | Muy baja | Media | Bastante | Baja |

Las alternativas 7 y 8B presentan falencias especialmente en el tiempo utilizado por los colaboradores para construir una edificación y en la facilidad de ensamble.



Figura 20. Colaboradores jugando con los modelos de las alternativas 7, 8, 8A y 8B. (Imágenes capturadas de video)

En las pruebas se hace evidente que estas dos características están bastante ligadas. La comprensión del problema se ve también afectada por la necesidad de descifrar la manera de ensamblar unas piezas con otras. Se pone menos atención en la construcción que se arma y más en cómo armarlo.

7.5. SELECCIÓN Y AJUSTES DE DISEÑO

Las alternativas con una mayor facilidad de ensamble, más fácil comprensión del problema y menor tiempo utilizado son 8 y 8A. Ambas presentan dificultades en la ilustración del fenómeno, porque permiten muy pocas variaciones en el armado.

7.5.1. Ajustes de diseño

La principal ventaja que presenta 8 sobre 8A está en la facilidad de ensamble, pues en 8 las piezas no poseen lado superior ni inferior, cosa que sí ocurre en 8A. La ventaja que tiene 8A sobre 8 está en que la primera permite amarres medianamente fuertes, lo cual posibilita armar edificios más *sismorresistentes*. Su desventaja está en que la ilustración del fenómeno es limitada.

Se plantea entonces una nueva propuesta que integra 8 y 8A, ofreciendo una mayor posibilidad de ilustración del fenómeno y que la misma facilidad de ensamble que 8. Resulta así la alternativa 8C, donde cada pieza es similar a 8A, cambiando únicamente la existencia de cara superior e inferior. Esto se logra convirtiendo todos los puntos de

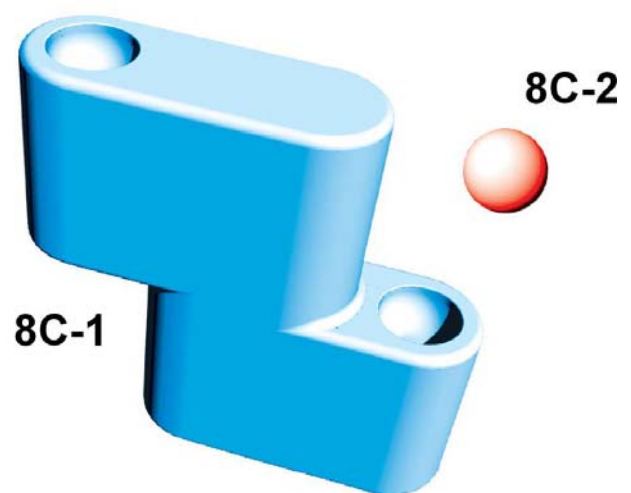


Figura 21. Alternativa 8C, compuesta por dos tipos de pieza: 8C-1 y 8C-2.

amarre en semiesferas en bajorrelieve, las cuales reciben esferas que generan el amarre, denominadas “esferas de refuerzo” en el contexto del proyecto (Figura 21).

7.5.2. Definición de tamaño

El tamaño de las piezas es un factor importante, teniendo en cuenta varios aspectos:

- Facilidad de uso de las piezas.
- Seguridad del usuario. Piezas pequeñas pueden ser ingeridas por niños o de caer en el suelo pueden causar accidentes.
- Costo de producción/compra de las piezas y disponibilidad comercial.
- Impacto visual. Las piezas resultan atractivas y generan la impresión de ser fáciles y divertidas de armar.
- Vida útil de las piezas.

Para la consecución de las esferas de refuerzo (8C-2) resulta conveniente recurrir a esferas disponibles comercialmente, por costo y facilidad de reposición. Se definen entonces cuatro tamaños diferentes para (8C-1), partiendo de esferas conseguidas en el mercado local:



Figura 22. Posibilidades para la pieza 8C-2.

- Tamaño 1. Bola de cristal. Diámetro 11mm. Dimensiones aproximadas de 8C-1: 10cm-11cm-3cm.
- Tamaño 2. Bola de tenis de mesa. Diámetro 38mm. Dimensiones aproximadas de 8C-1: 20cm-22cm-6cm.
- Tamaño 3. Bola plástica bicolor “Inteco”. Diámetro 50mm. Dimensiones aproximadas de 8C-1: 26cm-29cm-8cm.
- Tamaño 4. Bola de piscina de bolas. Diámetro 65mm. Dimensiones aproximadas de 8C-1: 30cm-33cm-9cm.

Tabla 5. Evaluación comparativa de posibles tamaños del set de módulos.

| Criterios | Tamaño 1 | Tamaño 2 | Tamaño 3 | Tamaño 4 |
|---|---|---|--|--|
| Facilidad de uso | Canicas se pierden fácilmente | Pelotas rebotan mucho, se dañan si se pisan. Piezas de tamaño cómodo | Pelotas aguantan pisadas. Piezas cómodas de usar | Pelotas aguantan pisadas, fáciles de encontrar. Piezas grandes, cómodas de usar |
| Seguridad | Canicas se ingieren fácilmente, pueden hacer caer | Bien | Piezas grandes, si son pesadas pueden golpear usuarios | Piezas grandes, si son pesadas pueden golpear usuarios |
| Costo / disponibilidad comercial | Muy bajo, alta oferta | Bajo, alta oferta | Medio-Bajo, baja oferta | Medio-Bajo, alta oferta |
| Impacto visual | Muy bajo | Medio | Medio | Alto |
| Vida útil | Reposición frecuente de canicas. Piezas se pierden fácilmente | Baja, pelotas se revientan fácilmente | Alta, pelotas aguantan pisadas | Alta, pelotas aguantan pisadas |

En la Tabla 5 se hace una evaluación de los cuatro posibles tamaños, partiendo de los criterios expuestos al comienzo de esta sección. Los tamaños 1 y 2 son descartados por seguridad (el primero) y por corta vida útil (los dos), al requerir una alta reposición de esferas.

Entre los tamaños 3 y 4 resulta preferible el tamaño 4, por su alto impacto visual y la alta disponibilidad comercial de las pelotas de piscina, a un bajo costo. Las bolas plásticas bicolor “Inteco” de diámetro 50mm son de baja rotación en el mercado, pues son producidas únicamente por una empresa.

7.5.3. Validación

Antes de proceder con el diseño de detalle del set de módulos se hace necesario verificar desde varias ópticas la alternativa elegida (8C en el tamaño 4). Estas son:

- Usuario. Las piezas permiten construir una edificación fácil y rápidamente. Se entiende cómo usar cada una de las piezas y se logran ensamblar sin mayor problema.
- Funcionamiento. Permite armar edificaciones que se derrumban fácilmente en un sismo y otras más resistentes.
- Ilustración del fenómeno. Ilustra claramente la importancia de una estructura adecuada para que una edificación resista cargas sísmicas.

7.5.3.1. Usuario

Se hace necesario recurrir a pruebas de usuario. La mayoría de éstas se efectúan en el Parque de los Deseos. Las edades de los colaboradores están entre 7 y 50 años. Se trabaja con un modelo a escala 1:3.

Las conclusiones de estas pruebas se resumen a continuación:

- Los usuarios ensamblan fácilmente los módulos y esferas de refuerzo.
- Los usuarios comprenden y asumen el reto de construir un edificio que resista cargas sísmicas.
- El tiempo invertido en general es moderado, en promedio 3 minutos.
- Hay una clara recepción del mensaje: la ilustración del fenómeno es claramente asociada al reto del set de módulos. Los usuarios en general

buscan distribuir las esferas de refuerzo de manera que el edificio resista mejor un sismo.

- Los niños mayores de 10 años entienden y aceptan el reto de armar un edificio *sismorresistente* y logran resultados satisfactorios. Los niños menores de esta edad hacen uso libre de los módulos y se entretienen en ello.
- A todos los colaboradores se les pidió construir un edificio de 4 pisos (siendo cada piso conformado por un cuadrado de 4 piezas). Si se quiere obtener un tiempo menor de construcción se puede plantear la construcción de un edificio de 3 pisos.

La evaluación detallada de esta alternativa se ve en el Anexo 2.



Figura 23. Colaboradores jugando con la alternativa 8C. (Imágenes capturadas de video)

7.5.3.2. *Funcionamiento*

Para validar el funcionamiento del set de módulos se construye un modelo escala 1:1. Para esta prueba el peso de las piezas es importante, por lo que se simula el peso final de cada pieza, que debe estar entre 350g y 600g (ver especificaciones de diseño, página 46)¹. Las piezas construidas tienen un peso de 380g. Como esferas de refuerzo se utilizan pelotas de piscina de bolas (Figura 24).

¹ 350g es el peso que tiene la pieza en la densidad mínima 0,05g/cm³.



Los criterios para la prueba son: un edificio de 3 pisos (base cuadrada, 4 módulos por piso) armado sin esferas de refuerzo se debe caer en un sismo suave. El mismo edificio con todas sus cavidades ocupadas con esferas de refuerzo debe resistir un sismo fuerte.

Para simular los sismos se utiliza a una mesa disponible en el Laboratorio de Ingeniería Sismorresistente de la Universidad Eafit, la cual trabaja en un grado de libertad, con amplitud de desplazamiento constante de 35mm y frecuencia de oscilación variable.

Los resultados de la prueba se resumen en la Tabla 6.

Figura 24. Modelo de módulos sobre mesa vibradora (Arriba edificio armado, abajo edificio derrumbándose).

Tabla 6. Resultados de la prueba de funcionamiento del set de módulos.

| Edificaciones construidas | Sismo máximo resistido | |
|---------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|
| | Frecuencia de oscilación (Hz) | Aceleración (m/s ²) |
| Edificio sin refuerzo | 1,7 | 2 |
| Edificio con refuerzo parcial 1 | 2 | 2,8 |
| Edificio con refuerzo parcial 2 | 2,7 | 4,9 |
| Edificio con refuerzo parcial 3 | 3,2 | 7,1 |
| Edificio con refuerzo total | 4 | 11 |

Los resultados dejan ver que el set de módulos, con un peso de 380g por pieza, funciona correctamente, permitiendo construir edificios de diferente nivel de resistencia a cargas sísmicas.

7.5.3.3. Ilustración del fenómeno

A este efecto se recurre a dos validadores de opinión, uno desde la parte técnica y otro desde la parte pedagógica.

Desde la parte técnica se somete la propuesta al criterio del un especialista en Ingeniería Sísmica². Los comentarios obtenidos son bastante satisfactorios: la propuesta ilustra la importancia de una estructura para la resistencia a sismos y genera inquietudes al respecto.

Desde la óptica de la pedagogía, los resultados son también satisfactorios³. Se destaca que el reto impuesto al jugador coincide claramente con el fenómeno tratado: es necesario ingeniarse una buena estructura para lograr que el edificio resista el temblor. Se destaca la sencillez del juego, que es una ventaja para la comprensión del mismo.

7.6. DISEÑO DE DETALLE

Se procede a desarrollar en detalle la propuesta planteada hasta este punto, consistente en un set de 12 piezas cuya forma se ilustra en la Figura 21, más 24 pelotas plásticas de diámetro 65mm. Para esto se debe hacer primero la selección de material y proceso productivo a utilizar.

² Juan Diego Jaramillo, Phd. Ingeniería Sismorresistente.

³ Tita Maya. Pedagoga.

7.6.1. Selección de material y proceso productivo

Siendo las dimensiones generales de la pieza a producir 330mm de largo, 300mm de alto y 90mm de ancho. Y teniendo en cuenta que la producción esperada es de 24 piezas, previendo 12 piezas de reposición, resultan posibles las siguientes combinaciones de material-proceso productivo, disponibles en el mercado nacional:

Tabla 7. Diferentes posibilidades de material y proceso productivo.

| Material / Proceso | Termoformado | Inyección | Soplado | Rotomoldeo | Vaciado | Maquinado | Formado manual |
|---------------------------|--------------|-----------|---------|------------|---------|-----------|----------------|
| Polietileno | | ■ | ■ | ■ | | | |
| Poliestireno | ■ | ■ | | | | | |
| Polipropileno | ■ | ■ | ■ | | | | |
| PET | | | ■ | | | | |
| Acrílico | ■ | | | | | | |
| EPU | | ■ | | | ■ | | |
| PVC | | ■ | | | ■ | | |
| Resina de poliéster | | | | | ■ | ■ | |
| Fibra de vidrio | | | | | | | ■ |
| Espuma cubierta con lona | | | | | | | ■ |

Los procesos de inyección y soplado requieren una inversión en moldes bastante alta, la cual se justifica para 10.000 unidades en adelante. Por esta razón se descartan. Asimismo la inyección de EPU resulta bastante costosa, especialmente el molde y el material.

Por la forma de la pieza (especialmente por los bajorrelieves semiesféricos) el termoformado se torna complejo, lo cual implica muchos empates y cortes. Esto disminuye la calidad de la pieza, al mismo tiempo que genera posibles puntos de ruptura frente al impacto.

La resina de poliéster resulta inadecuada por su baja resistencia al impacto.

El PVC, conocido comercialmente como plastisol, tiene una baja resistencia a golpes y presión.

La fibra de vidrio, aplicada comúnmente con resina de poliéster, tiene un regular comportamiento frente a impactos frecuentes: desmejoran su apariencia y puede aparecer fractura.

Resultan entonces dos posibilidades para la combinación proceso productivo-material:

- Polietileno *rotomoldeado*.
- EPU (Espuma de poliuretano) vaciada o formada manualmente (corte, pega) y forrada con lona, cosida.

Por su mal comportamiento frente al contacto directo con el usuario en uso frecuente (se ensucia, se desgasta, se desgarran) la EPU conviene cubrirla con lona.

En la Tabla 8 se hace una evaluación comparativa las dos posibilidades vigentes.

Es evidente que a excepción de la seguridad, tiene más ventajas la producción de las piezas en polietileno *rotomoldeado*. Para evitar inconvenientes de seguridad se debe dar un peso adecuado a la pieza (no superior a 600g).

Vale anotar que la rigidez del polietileno remite de mejor manera a los materiales convencionales de la construcción, a diferencia de la EPU que es bastante blanda. Por esta misma razón, la EPU puede tener dificultades en el ensamble con las esferas plásticas.

Tabla 8. Evaluación comparativa de dos combinaciones proceso-material posibles para las piezas del set de módulos.

| Criterios | Polietileno rotomoldeado | EPU forrado con lona |
|----------------------|---|--|
| Costo | Mediano para inversión, bajo para producción. | Alto para producción. |
| Vida útil | Larga. | Media. |
| Cercanía al fenómeno | Alta, por la rigidez del material. | Baja por la baja rigidez del material. |
| Comodidad | Alta. | Alta. |
| Seguridad | Media (depende del peso de la pieza). | Alta, material blando. |
| Mantenimiento | Muy fácil. | Medianamente fácil. |

Se elige pues el proceso de *rotomoldeo*.

7.6.2. Ajustes para rotomoldeo

El proceso de *rotomoldeo* es trabajado principalmente por Rotoplast y Rototech en el área metropolitana del Valle de Aburrá. De éste se obtienen productos plásticos huecos, de grosor de pared media y alta (entre 2mm y 12mm aproximadamente). El material trabajado en estas empresas es polietileno lineal (o de densidad media, 0,93g/cm³).



Figura 25. Algunos productos *rotomoldeados*.

(Fuente <http://www.rotoplast.com.co>)

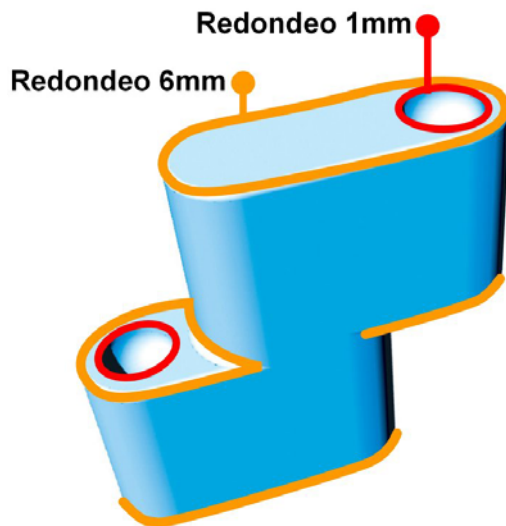


Figura 26. Redondeos para las aristas de la pieza 8C-1.

módulos, lo cual permite que las piezas caigan más fácilmente al ser sometidas a un movimiento oscilatorio. Y reducidos en las cavidades que reciben las esferas de refuerzo (1mm) de manera que estas no se escapen fácilmente. Esto se ilustra en la Figura 26.

7.6.3. Diseño del molde

Existen dos posibilidades para la línea de partición del molde: longitudinal o transversal (Figura 27). La transversal requiere ángulo de desmolde de 1° (LÓPEZ, J. 2006) y la producción del molde es bastante más compleja que la longitudinal, por lo que se opta por esta última.

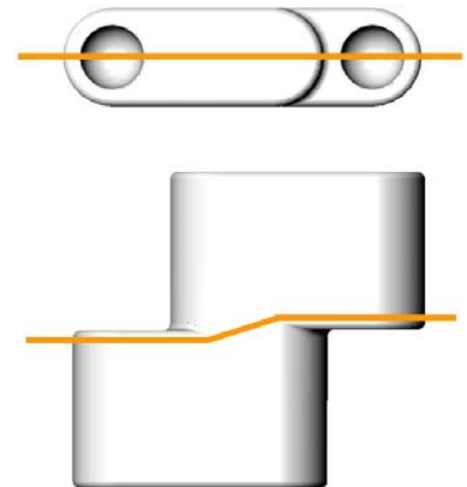


Figura 27. Líneas de partición: longitudinal (arriba) y transversal.

Se estima un grosor de pared de 2,3mm para obtener un peso total por pieza⁴ de 500g. Es recomendable redondear todas las aristas (PATIÑO, L. 2005), de esta manera se facilita que el material fluya en el molde, evitando acumulamiento de tensiones sobre las aristas y por lo tanto que estas se deterioren en el uso.

Estos redondeos deben ser generosos (radio 6mm) en las zonas que están en contacto con el suelo o con otros

⁴ Calculado con el software SolidWorks

Son varias las condiciones para obtener un molde adecuado para *rotomoldeo*⁵. Éstas se evalúan a continuación:

El molde debe tener un grosor de pared constante. De 9mm si es de aluminio o de 3mm si es de acero. Así se logra una temperatura uniforme en las paredes interiores del molde, para lograr un grosor de pared constante y evitar deformaciones en la pieza *rotomoldeada*.

El molde debe tener “flanches” o pestañas salientes en la zona de la línea de partición, de manera que pueda cerrarse completamente. Estas deben tener un grosor de $\frac{1}{4}$ de pulgada y un ancho de $1\frac{1}{2}$ pulgadas. Para el cierre del molde se utilizan tornillos de $\frac{1}{2}$ pulgada que se deben ubicar en varios puntos de los

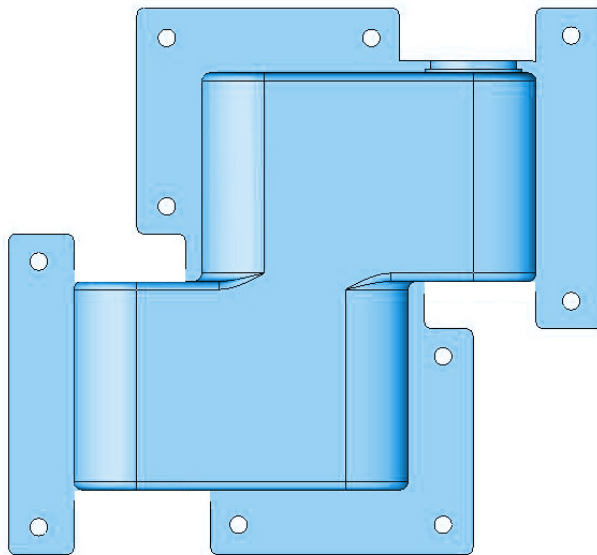


Figura 28. Flanches y ubicación de tornillos en el molde.

flanches garantizando el cierre total. Para el molde en desarrollo, son necesarios 10 tornillos. La ubicación más adecuada de estos se observa en la Figura 28.

Para generar los bajorrelieves semiesféricos en la pieza, es necesaria la utilización de cuatro insertos, que permiten el desmolde de la pieza, evitando que se amarre en éstos puntos (Figura 29). Estos insertos

⁵ Los detalles del molde han sido definidos en asesoría con Jayson López, Ingeniero de planta de Rotoplast S.A.

pueden encajar en la pared del molde, siendo ubicados sobre una de las mitades. Al cerrar el molde, los insertos quedan atrapados entre las paredes de las dos mitades de este, lo cual permite bajos tiempos de preparación del molde y de desmolde.

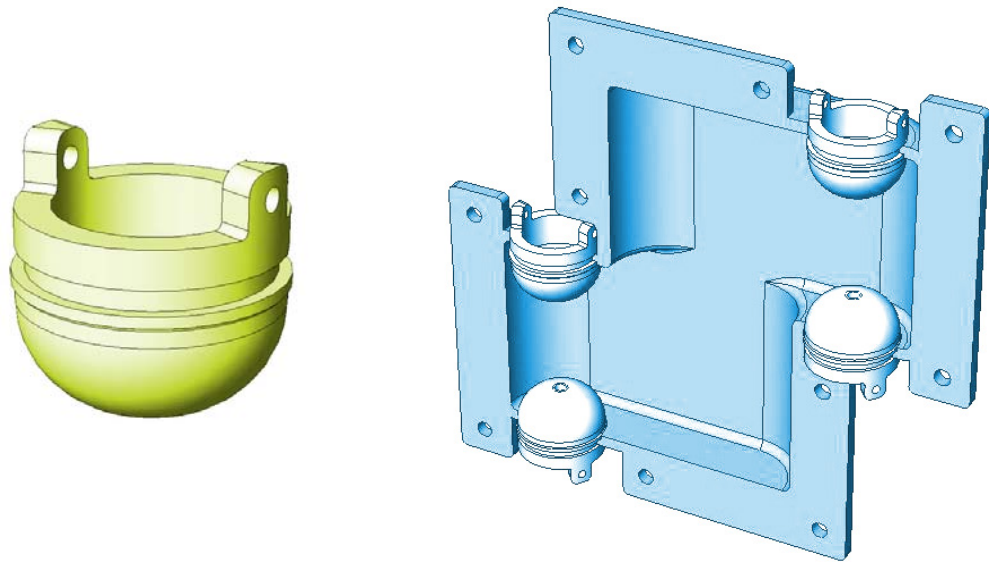


Figura 29. Inserto y ubicación de éste en el molde.

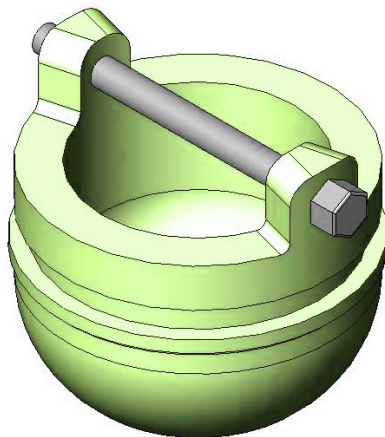


Figura 30. Inserto con tornillo.

Para facilitar la retirada de los insertos de la pieza rotomoldeada, se debe añadir un tornillo de diámetro $\frac{1}{4}$ " para que permita que la pieza sea enganchada. Así un operario podrá someter más fácilmente a tracción cada inserto, desprendiéndolo más fácilmente de la pieza, y por lo tanto reduciendo el tiempo invertido en esta actividad.

Debe haber una salida de gases, pues de no haberlos pueden aparecer porosidades y grietas en la pieza rotomoldeada, gracias a que los gases buscan salir por la línea de partición. Esta salida, denominada *respiradero*, se ubica en el centro de uno de los insertos de la zona intermedia de la pieza, como se ve en la Figura 31. Se perfora la pieza y se inserta un tubo de teflón de diámetro $\frac{1}{2}$ pulgada.

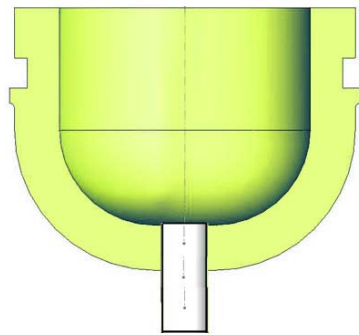


Figura 31. Sección del inserto agujereado con tubo de teflón.

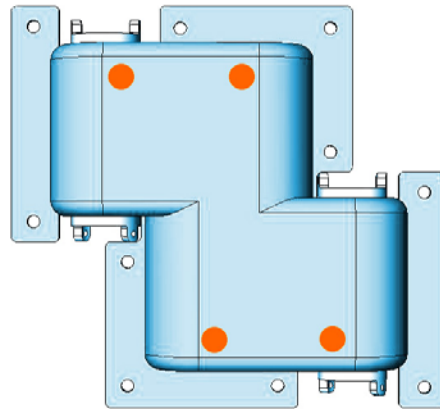


Figura 32. Puntos de sujeción de una cara del molde.

El molde debe tener varios puntos de sujeción, que permiten el montaje en la máquina de *rotomoldeo*. Estos consisten en cilindros de 1 pulgada de diámetro por 20mm de largo, se ubican en la cara externa de cada una de las mitades. Para el presente molde son necesarios 8 cilindros de sujeción (4 en cada mitad), distribuidos como se ilustra en la Figura 32.

7.6.4. Producción

Para la construcción del molde hay dos posibilidades:

- Maquinar en aluminio o acero el molde en una máquina CNC.
- Construir un modelo del molde en un material blando y vaciarlo en aluminio fundido.

Por costo resulta bastante más viable la segunda opción. La materia prima para la primera opción resulta excesivamente costosa (si es aluminio) y el tiempo de CNC es bastante, lo cual tiene un valor comercial muy alto. Para el acero hay que tener en cuenta también el costo de las herramientas, las cuales se desgastan en la fabricación del molde (GARCÍA, J. 2006).



Figura 33. Modelo en madera para fundición en aluminio del molde.

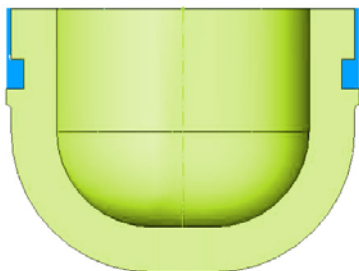


Figura 34. Modelo de inserto torneado (vista en sección).

El modelo es construido en MDF. Sus dimensiones se incrementan 2,2%, teniendo en cuenta 1% de contracción de la pieza rotomoldeada y 1,2% de contracción del aluminio fundido (LÓPEZ, J. 2006). Para más detalle de la construcción del modelo ver el Anexo 3.

El modelo de los insertos se hace en madera, torneado. Para facilitar el proceso de fundición en aluminio se omite la zona azul (Figura 34), cuya función es ajustar correctamente los insertos en el molde. Esta zona se tornea sobre las copias de aluminio, lográndose así un mayor ajuste.

Luego de ser vaciado en aluminio y pulido, se efectúan los ajustes necesarios: se tornean los insertos, se hacen las perforaciones necesarias para los tornillos de $\frac{1}{2}$ pulgada, y se prepara el molde para sujeción en la máquina de *rotomoldeo*.

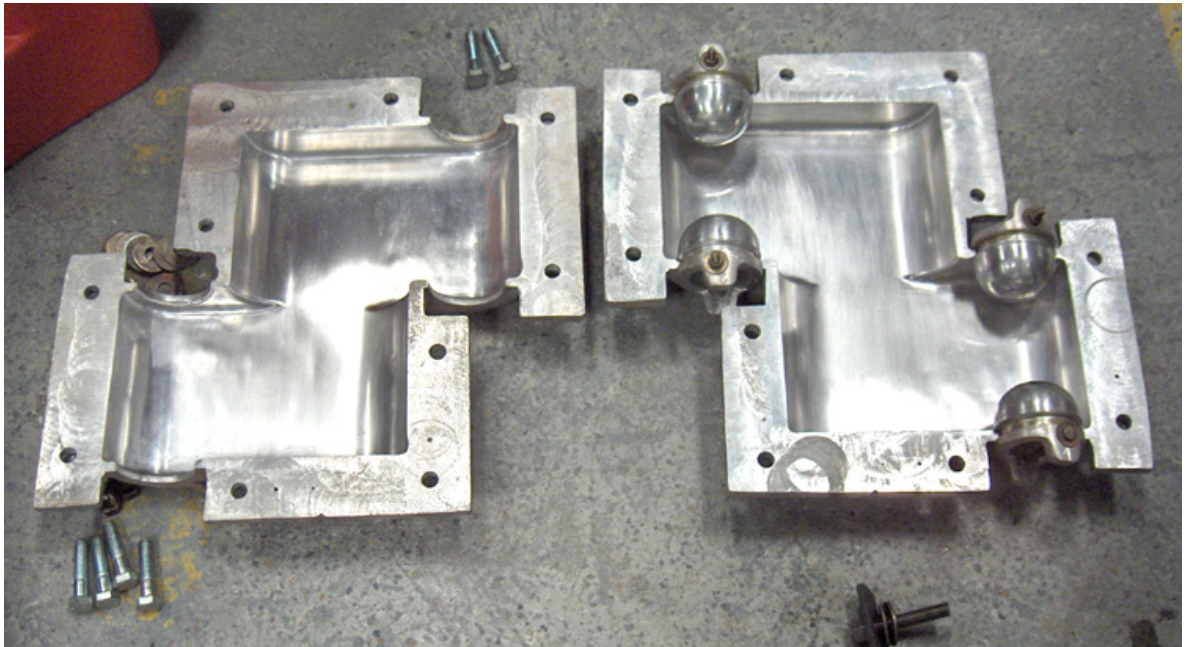


Figura 35. Molde terminado.



Figura 36. Prototipo de 500g.



Figura 37. Porosidad en arista.
Prototipo de 600g.

Para determinar la cantidad de material a insertar en el molde, se fabrican varios prototipos:

Inicialmente se fabrica un prototipo con 500g de material (PE de densidad media coloreado). Como se observa en la Figura 36, el resultado es una pieza bastante alabeada y con un daño severo en uno de los agujeros.

Se procede a hacer una prueba con 600g de material. En este caso el resultado es más satisfactorio, aunque se observa aun alabeo y cierta porosidad en la arista de los agujeros (Figura 37).

Finalmente se hace una prueba con 700g de material. Al molde se le hace la perforación en uno de los insertos y se le inserta el tubo de teflón, para permitir salida de gases. El resultado es satisfactorio, con muy baja porosidad y alabeo mínimo. Se opta por esta tercera opción.



Figura 38. Prototipo de 700g.

7.7. PRUEBAS TÉCNICAS

Las piezas se someten a diversas pruebas que permiten evaluar sus propiedades físicas, partiendo de posibles abusos en el uso cotidiano. A continuación se resumen los resultados:

7.7.1. Pruebas de compresión

Tanto 8C-1 (pieza rotomoldeada) como 8C-2 (pelota comercial) se someten a este tipo de prueba.

La pieza 8C-1 se somete a la carga de dos personas paradas sobre ella (140Kg aproximadamente) durante un minuto, sobre la cara de mayor área (Figura 39). El



Figura 39. Carga de dos personas paradas sobre el prototipo.

comportamiento de la pieza es satisfactorio, resiste perfectamente la carga sin mostrar deterioro.

La pieza 8C-1 se somete a la carga de una persona (70Kg) parada sobre una de las caras de menor área, durante un minuto (Figura 40). El resultado es satisfactorio, la pieza no muestra deterioro.



Figura 40. Carga de una persona sobre una cara estrecha del prototipo.



Figura 41. Carga una persona sobre una esfera de refuerzo.

La pieza 8C-2 se somete a la carga de una persona (70Kg) parada sobre ésta. La pieza muestra una deformación inicial como se ve en la Figura 41.

Después de 30 minutos, la pieza vuelve a su forma inicial con apenas una sutil huella de la deformación. Es perfectamente posible seguir utilizándola en el juego.

7.7.2. Prueba de impacto

La pieza 8C-1 se somete a una prueba cíclica de impacto, realizada manualmente, sobre un piso liso y duro (gres porcelanizado). Se deja caer desde una altura de 2,5m por 100 veces⁶, exagerando así las condiciones de uso esperadas.

Únicamente dos esquinas presentan deformación luego de la prueba. En la Tabla 9, se resume el proceso de deformación de la pieza a lo largo de ésta.

En la Figura 43 se puede observar la máxima deformación causada en las esquinas 3 y 6. Si bien el aspecto de estas esquinas no es

⁶ Cabe anotar que la altura máxima de caída en el uso cotidiano no supera 1,4m, evento que sucede escasamente. Se espera que una altura frecuente de caída de 80cm.



Figura 42.
Prueba de impacto.

agradable, la pieza puede seguir trabajando normalmente como parte del set de módulos.

Cabe destacar que las esquinas 3 y 6 se encuentran en el lado opuesto al agujero de salida de gases del molde. Esto deja ver que el escape de gases por este lado está debilitando las aristas deterioradas en la prueba. Por esto es recomendable hacer una segunda perforación para salida de gases (*respiradero*) en el inserto de este lado del molde.

Se recomienda utilizar un piso que absorba energía de impacto, como caucho o plástico, para lograr una mayor vida útil de las piezas.

Tabla 9. Deformación en las esquinas del prototipo de la pieza 8C-1 luego de la prueba de impacto.

| Número de ciclos | Deformación por esquinas | | | | | |
|------------------|--------------------------|---------|---------|---------|---------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 20 | Ninguna | Ninguna | Ninguna | Ninguna | Ninguna | Mínima |
| 40 | Ninguna | Ninguna | Ninguna | Ninguna | Ninguna | Media |
| 60 | Ninguna | Ninguna | Mínima | Ninguna | Ninguna | Alta |
| 80 | Ninguna | Ninguna | Media | Ninguna | Ninguna | Alta |
| 100 | Ninguna | Ninguna | Alta | Ninguna | Ninguna | Alta |

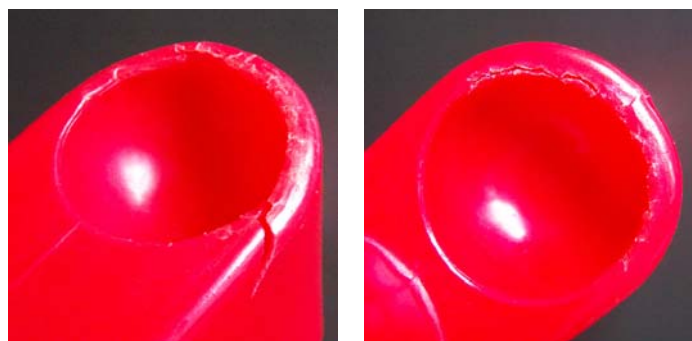


Figura 43. Esquinas 6 (izquierda) y 3 luego de la prueba de impacto.

8. DESARROLLO DE LA MESA VIBRADORA

La mesa vibradora es otro de los requerimientos expuestos por el equipo de museografía del Parque Explora. Su objetivo es servir de soporte a la construcción de edificaciones usando el set de módulos, para luego someterlas a sismos simulados de diferentes intensidades.

En este capítulo se expone el desarrollo de la mesa vibradora comenzando por las especificaciones de diseño, pasando por análisis funcional, generación y evaluación de alternativas para la solución del mecanismo y cálculos de éste. Luego se hace un trabajo de formalización de la mesa en conjunto, para diseñarla en detalle y finalizar con pruebas de funcionamiento.

8.1. ESPECIFICACIONES DE DISEÑO

A partir de la información recopilada en el marco teórico respecto a sismología y a los requerimientos que una máquina de este tipo puede tener para un museo interactivo, se establecen las especificaciones de diseño para la mesa vibradora, en la Tabla 10.

Tabla 10. Especificaciones de diseño para la mesa vibradora.

| Necesidad / Deseo | N ó D | Requerimiento técnico |
|---|--------------|--|
| No necesita reparaciones frecuentes. | N | Piezas con una vida útil entre 5 y 10 años. |
| De fácil limpieza y mantenimiento | N | Superficies lisas. Partes internas de fácil acceso. |
| No requiere gran número de herramientas para su reparación. | D | Máximo tres herramientas diferentes para desarmarla. Herramientas comerciales como destornillador, llave hexagonal y raches. |

| | | |
|---|---|---|
| Dimensiones apropiadas para 4 personas entre 120cm y 185cm de estatura, trabajando simultáneamente en la misma edificación. | N | Altura entre 30cm y 55cm, largo entre 100cm y 180cm, ancho entre 50cm y 100cm. |
| Mecanismos alejados de posible contacto con usuario. | N | Mecanismos cubiertos y con elementos de seguridad. |
| Debe ser estable, no debe bailar. | N | Utilizar anclajes al suelo. |
| La vibración producida debe tener una apariencia cercana a la de los sismos. | N | La frecuencia de oscilación debe estar entre 0,5 y 5 Hertz. La vibración dominante debe ser en el plano horizontal. |
| Los sismos producidos deben ser de intensidad variable. | D | La variación de la intensidad debe estar ligada preferiblemente a la amplitud del desplazamiento que a la frecuencia del mismo. |
| | | La aceleración percibida en la superficie de la mesa debe poder variarse entre 0 y 1g ¹ , por lo menos en una dirección en el plano horizontal. |
| La vibración de la plataforma no debe afectar el desempeño del resto de la Experiencia ni el entorno. | N | Aislar la vibración del entorno. |
| Al apoyarse un usuario sobre la mesa, ésta no se debe desestabilizar. | N | La mesa debe soportar 70kg sin afectarse considerablemente. |
| Utilizar mecanismos sencillos. | D | El mecanismo debe ser calculable y debe poder simularse virtualmente. No debe tener más de 10 partes principales. |
| Costo moderado | N | El costo total de la mesa no debe superar \$ 5'000.000 |
| Control simple para el usuario | D | Debe tener máximo tres puntos de entrada de datos al sistema (botones, palancas, perillas, etc.). Éstos deben ser fáciles de usar y entender para alguien que no sepa leer. |

* 1g equivale a 9,8 m/s²

8.2. ANÁLISIS FUNCIONAL

Se hace necesario detectar la función y flujo principales de la mesa vibradora. Para esto se construye una caja negra (Figura 44). Ésta evidencia que el flujo principal del sistema es una superficie horizontal, sobre la que el usuario construye edificaciones.

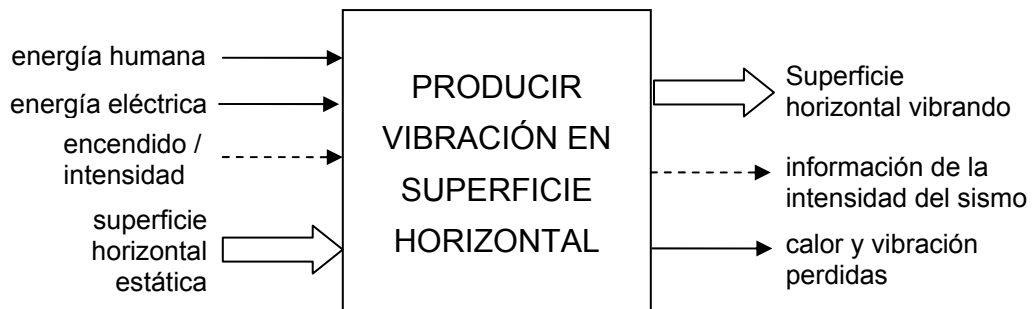


Figura 44. Caja negra para la mesa vibradora.

A partir de esto resulta que la principal función es producir vibración en la superficie horizontal.

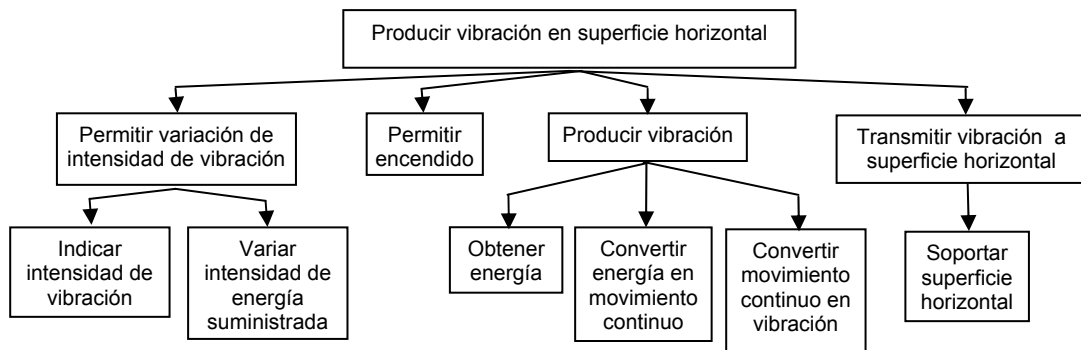


Figura 45. Árbol de funciones para la mesa vibradora.

Esta función principal se desagrega en funciones más específicas que ayudan a clarificar el problema de diseño y abordarlo desde sus partes (Figura 45). Del árbol

de funciones se destacan dos, por su importancia para lograr la función principal. Estas son: Producir vibración (que se descompone en tres subfunciones) y Soportar superficie horizontal. Las otras son funciones secundarias que se resuelven a partir de las soluciones propuestas para las mencionadas.

8.3. GENERACION Y EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS PARA EL MECANISMO

8.3.1. Alternativas de solución para el mecanismo

Se generan entonces alternativas de solución para las dos funciones mencionadas, recurriendo a los referentes (ver marco teórico, página 23) y a nuevas posibilidades.

8.3.1.1. Soportar superficie horizontal

A continuación se exponen las alternativas para esta función (Figura 46).

- S1. Dispone de 4 resortes verticales.

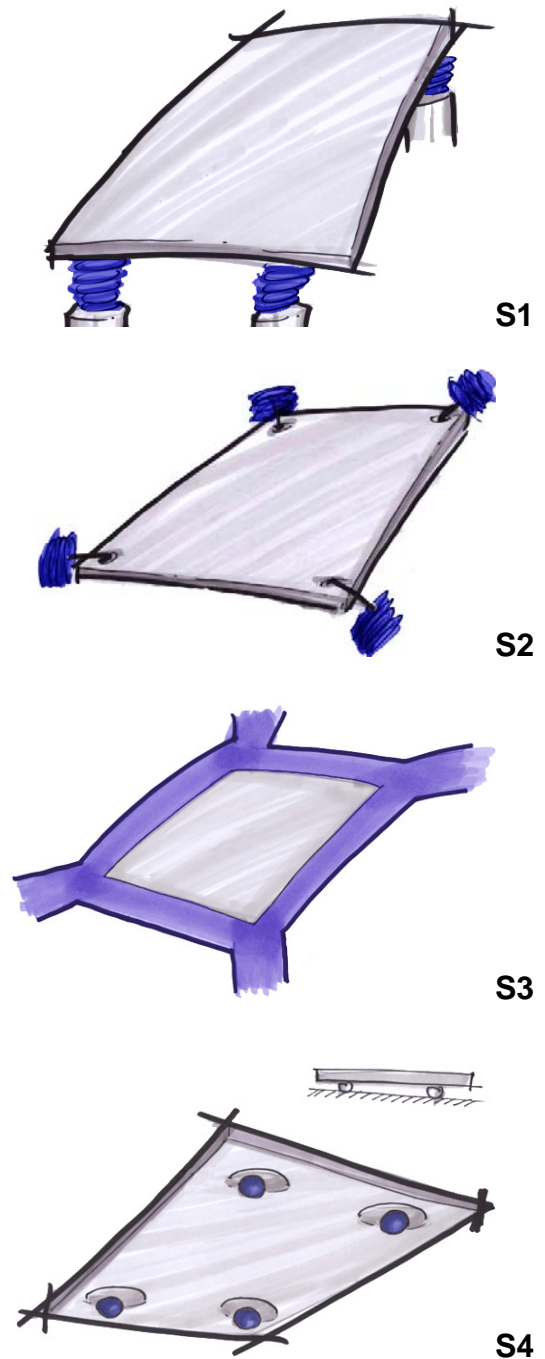
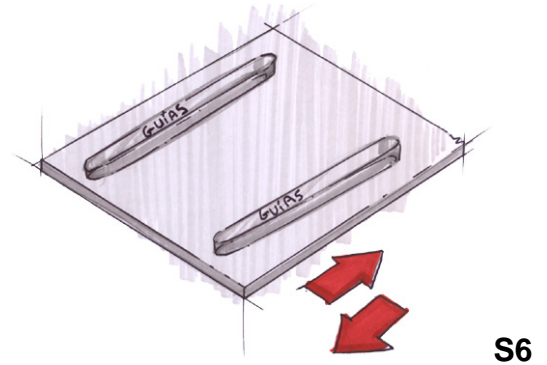


Figura 46. Alternativas S1, S2, S3 y S4.

- S2. Dispone de 4 resortes horizontales, diagonales.
- S3. Soportada por lona elástica.
- S4. Soportada por 4 esferas.
- S5. Soportada por 8 elastómeros.
- S6. Soportada sobre dos guías que permiten únicamente un grado de libertad.



8.3.1.2. Producir vibración

A continuación se exponen las alternativas para esta función (Figuras 47 y 48).

- SV7. Incluye soporte y vibración. La superficie está soportada excéntricamente sobre 4 discos que giran sincronizadamente.
- SV8. Incluye soporte y vibración. La superficie está soportada sobre 3 discos de tamaños distintos que giran excéntricamente.
- V9. Una biela sujeta excéntricamente a un disco, hace desplazar hacia delante y atrás la superficie.
- V10. Una masa excéntrica es impulsada por un motor que a su vez está sujeta a la superficie.

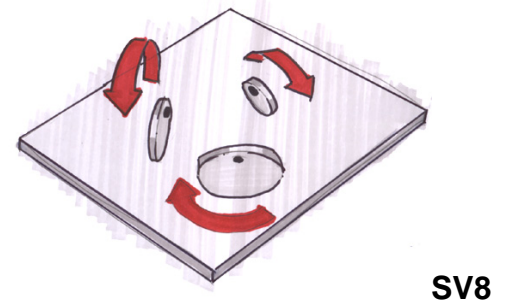
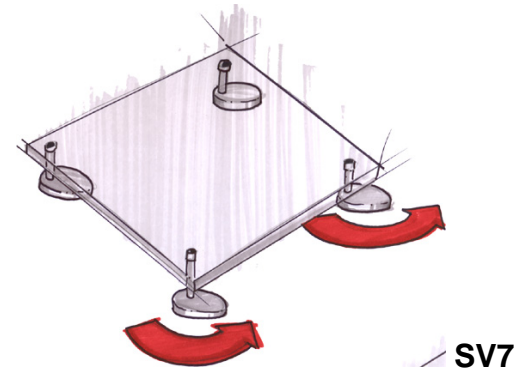


Figura 47. Alternativas S5 y S6, SV7 y SV8.

- V11. Manualmente se hala la superficie.

8.3.2. Criterios de evaluación

Partiendo de las especificaciones de diseño se plantean los siguientes criterios para evaluar todas las alternativas expuestas en la anterior sección.

- Vida útil. Los componentes deben tener una vida útil mínima de 5 años trabajando 8 horas diarias.
- Facilidad de mantenimiento. La máquina debe poder asearse, ajustarse y de ser el caso aceitarse, con pocos movimientos y en menos de 15 minutos.
- Frecuencia de mantenimiento/ reparación. La máquina debe necesitar reparación y/o mantenimiento con una frecuencia mayor a 6 meses.
- Resistencia a sobrepeso. Si una persona se apoya en la superficie horizontal, ésta debe aguantarlo.
- Partes comerciales. Los repuestos deben conseguirse fácilmente y a un costo favorable.
- Costo moderado. Que el mecanismo no supere \$1'500.000
- Seguridad para el usuario. Éste no debe estar expuesto a ser machacado, cortado o golpeado.

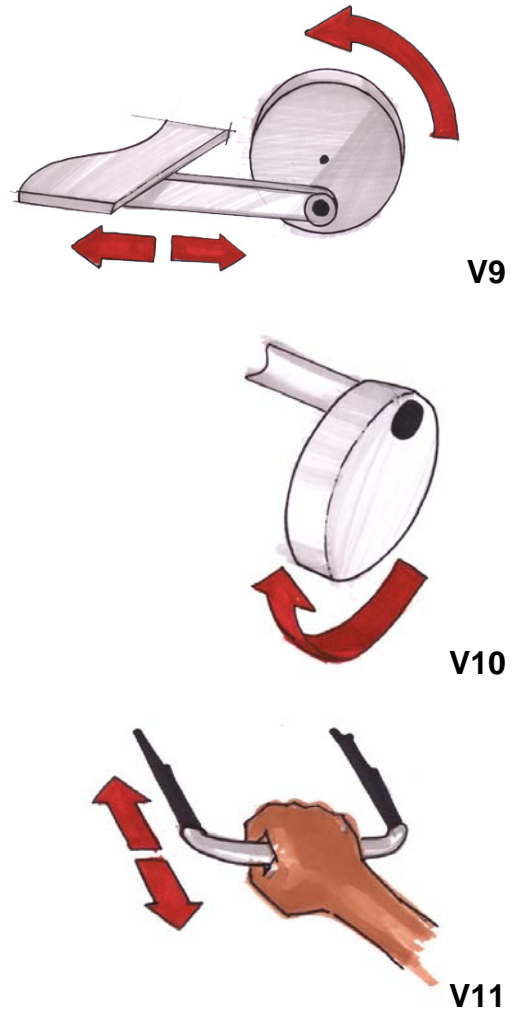


Figura 48. Alternativas V9, V10 y V11.

- Ilustración del fenómeno. El movimiento es similar en apariencia al de un sismo.
- Facilidad para variar intensidad. Con un mecanismo y control simples, se debe poder controlar la intensidad del sismo.
- Sencillez del mecanismo. Debe ser sencillo en su construcción y funcionamiento.

Tabla 11. Matriz de evaluación de alternativas para las funciones principales de la mesa vibradora.

| CRITERIOS DE EVALUACIÓN | Vida útil | Facilidad de mantenimiento | Frecuencia mantenimiento/repación | Resistencia a sobrepeso | Partes comerciales | Costo moderado | Seguridad para el usuario | Ilustración del fenómeno | Facilidad para variar intensidad | Sencillez del mecanismo | TOTAL | |
|-------------------------|-----------|----------------------------|-----------------------------------|-------------------------|--------------------|----------------|---------------------------|--------------------------|----------------------------------|-------------------------|-------------|-----|
| | % | 10 | 15 | 15 | 10 | 5 | 5 | 10 | 20 | 5 | 5 | 100 |
| Alternativas | | | | | | | | | | | | |
| S1 | 10 | 9 | 10 | 10 | 9 | 8 | 9 | 10 | 8 | 9 | 9,45 | |
| S2 | 8 | 7 | 9 | 8 | 9 | 8 | 8 | 10 | 6 | 9 | 8,4 | |
| S3 | 4 | 8 | 6 | 3 | 5 | 9 | 9 | 6 | 7 | 9 | 6,4 | |
| S4 | 7 | 8 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 5 | 4 | 8 | 7,55 | |
| S5 | 4 | 8 | 7 | 7 | 7 | 10 | 9 | 10 | 10 | 8 | 8 | |
| S6 | 9 | 7 | 9 | 7 | 6 | 7 | 8 | 4 | 5 | 6 | 6,8 | |
| SV7 | 9 | 7 | 8 | 8 | 6 | 6 | 9 | 6 | 5 | 7 | 7,25 | |
| SV8 | 9 | 8 | 5 | 10 | 5 | 4 | 6 | 8 | 4 | 4 | 6,9 | |
| V9 | 9 | 6 | 8 | 8 | 8 | 7 | 8 | 7 | 5 | 7 | 7,35 | |
| V10 | 9 | 9 | 10 | 10 | 8 | 8 | 9 | 8 | 8 | 9 | 8,9 | |
| V11 | 9 | 9 | 10 | 10 | 8 | 10 | 5 | 4 | 3 | 10 | 7,6 | |

8.3.3. Evaluación de alternativas

Partiendo de estos criterios, se evalúan las alternativas, asignándole un porcentaje a cada una, según su importancia relativa para la máquina en desarrollo. Se evalúan conjuntamente las alternativas para las funciones Soportar superficie horizontal y Producir vibración, por ser ambas compatibles con los criterios seleccionados.

8.3.4. Selección y ajustes de la alternativa elegida

Se observa que de las alternativas de mayor puntuación (que superan 8 puntos), son tres para la función de Soportar superficie horizontal y una para Producir vibración. Cabe en este punto hacer un análisis para, a partir de estas, lograr la mejor solución posible para el mecanismo.

Las alternativas S2 y S5 son bastante similares, su diferencia principal está en que la S5 utiliza elastómeros mientras que S2 es soportada con resortes. Los elastómeros son más frágiles y presentan fatiga más rápidamente, lo cual no es compatible con un módulo interactivo que estará sometido a uso pesado. Esto favorece a S2.

Otra diferencia significativa está en el número de componentes soportantes y su distribución: mientras que S2 solo tiene 4 resortes, ubicados a un ángulo de 45° en cada esquina de la superficie horizontal, S5 cuenta con 8 ligamentos elásticos, ubicados en ángulo de 45° respecto a los ejes X, Y, Z. Esto le da a S5 una mayor posibilidad de moverse en todas las direcciones, mientras que S2 tiene mayor movilidad vertical que horizontal. Esto privilegia a S5, puesto que las fuerzas de los sismos que más afectan las edificaciones son horizontales (ver marco conceptual, página 38).

Se pueden sintetizar entonces S2 y S5 en una alternativa que utilice la distribución de S5 implementando los resortes de S5, como se ve en la Figura 49.

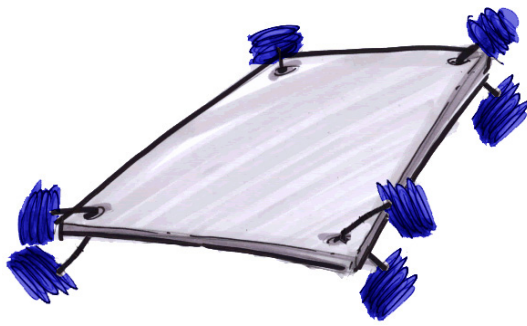


Figura 49. Integración de las alternativas S2 y S5.

Esta nueva alternativa se puede comparar con S1. La Tabla 12 ilustra ventajas y desventajas de ambas alternativas.

El desplazamiento en S1 es mayormente horizontal que vertical pues la constante de elasticidad de deformación axial de un resorte de compresión, es mayor que la constante de elasticidad para deformación lateral (ver Cálculos para el mecanismo, página 84). Esto implica una mayor fuerza para deformar una misma distancia axialmente que lateralmente.

Tabla 12. Comparación cualitativa de S1 y la integración de S2 y S5.

| ALTERNATIVA | Desplazamiento permitido | Facilidad de soporte |
|-------------------|--------------------------------|--|
| S1 | Mayor horizontal que vertical. | Muy fácil. Se puede soportar sobre el suelo. |
| Integración S2-S5 | Igual horizontal y vertical. | Medianamente fácil. Necesita cuatro columnas reforzadas. |

Se observa entonces que tanto por el tipo de desplazamiento que permite, como por facilidad de soporte, la alternativa elegida para soportar la superficie horizontal es S1.

Respecto a función Producir vibración se tiene la opción V10. Esta alternativa es compatible con S1 para trabajar como mecanismo productor de vibración. Para ésta hay varias posibilidades de ubicación:



Figura 50. Posibles ubicaciones para la alternativa V10.

- V10A. Una masa excéntrica. Eje de rotación horizontal (X).
- V10B. Una masa excéntrica. Eje de rotación vertical (Z).
- V10C. Dos masas excéntricas. Eje de rotación vertical (Z) más eje de rotación horizontal (X).
- V10D. Tres masas excéntricas. Un eje de rotación vertical (Z) más dos ejes de rotación horizontales (X, Y)
- V10E. Dos masas excéntricas. Dos ejes de rotación horizontales (X, Y)
- V10F. Dos masas excéntricas. Dos ejes de rotación verticales (Z, Z)

En la Tabla 13 se hace una evaluación cualitativa de estas alternativas para la ubicación de las masas excéntricas.

Tabla 13. Comparación de las posibilidades de ubicación para la alternativa V10.

| ALTERNATIVA | Dificultad de control | Mecanismo sencillo | Costo | Ilustración del fenómeno |
|-------------|-----------------------|--------------------|-------|--------------------------|
| V10A | Sencillo | Muy sencillo | Bajo | Baja |
| V10B | Sencillo | Muy sencillo | Bajo | Alta |
| V10C | Medio | Medio | Medio | Alta |
| V10D | Complejo | Complejo | Alto | Alta |
| V10E | Medio | Medio | Medio | Alta |
| V10F | Muy complejo | Muy complejo | Medio | Alta |

Se observa que las posibilidades de ubicación que más cumplen con los criterios evaluados son V10A y V10B. Si bien ambas utilizan un mecanismo sencillo, de

fácil control y a un bajo costo, V10B ilustra de mejor manera el fenómeno, pues genera movimiento horizontal en dos direcciones, diferente de V10A que genera movimiento vertical y horizontal en una sola dirección.

8.4. CÁLCULOS PARA EL MECANISMO

Hasta este punto el mecanismo elegido para el funcionamiento de la mesa vibradora consta de una superficie horizontal soportada por cuatro resortes, la cual tiene sujetado por debajo un peso excéntrico que es puesto a girar por un motor. Esto se ilustra en la Figura 51.

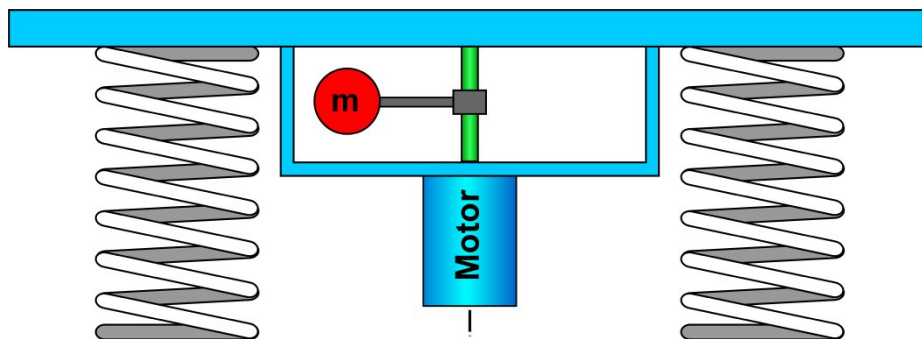


Figura 51. Esquema del mecanismo propuesto.

Es necesario tener en cuenta que en el uso, la superficie horizontal recibe más que su propio peso. Esto debido a los módulos que van sobre ella y a que durante el juego uno o varios usuarios se pueden apoyar sobre ella. Esto implica que en términos generales, se tiene una masa aproximada de 50Kg, lo cual se calcula

teniendo en cuenta la masa del set de módulos (7Kg) y dos personas adultas apoyadas en la superficie horizontal (20Kg cada una²).

Para que el mecanismo no se vea afectado en su funcionamiento, es necesario que los resortes tengan una *precarga* que disminuya el impacto de este peso sobre el sistema. Esto se logra si la superficie horizontal tiene un peso mayor al esperado por cargas externas. Por esto se propone trabajar con una masa de 100kg para la superficie horizontal, siendo éste un valor preliminar y sujeto a ser evaluado en este capítulo.

8.4.1. Desplazamiento oscilatorio

Para lograr que el movimiento de la mesa se asemeje al de un sismo real, es necesario tener en cuenta el desplazamiento. Un sismo altamente destructivo puede generar desplazamientos horizontales de aproximadamente 100mm en la superficie (JARAMILLO, J. 2006). Para el set de módulos, un piso de un edificio es reducido 10 veces. En el caso de la mesa, siguiendo este factor de escala, se necesitan entonces 10mm de desplazamiento, para guardar la proporción. En este caso, por tratarse de una máquina lúdica, puede ser útil exagerar esta distancia, duplicándola, siendo así necesario un desplazamiento máximo de 20mm.

8.4.2. Masa excéntrica

Para determinar la masa m_2 ubicada excéntricamente respecto al eje de movimiento y la distancia r_2 que lo separa de este, es necesario hacer un balance de torque, partiendo de que conforman un mismo sistema (JARAMILLO, R. 2006). Se tienen en cuenta tanto la masa total de la mesa m_1 , como el desplazamiento máximo esperado r_1 (Figura 52).

² Una persona que pesa 60kg de 165cm de estura que apoya sus manos sobre una superficie horizontal ubicada a 50cm de altura causa una fuerza equivalente a 20kgF (Prueba de autoría propia)

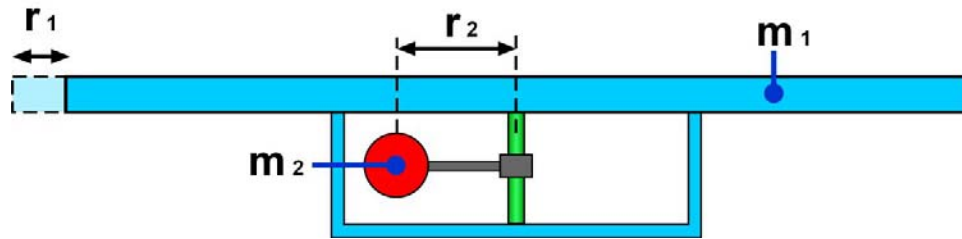


Figura 52. Masas m_1 y m_2 . Distancias r_1 y r_2 .

Tanto los valores de m_1 y r_1 son conocidos, 100kg y 20mm, respectivamente. Para r_2 se sabe que debe ser mayor que cero y menor que 300mm, puesto que una distancia mayor causa que interfiera con los resortes (teniendo en cuenta un ancho máximo de la mesa de 1000mm). Partiendo de que Torque = fuerza x distancia, resulta (JARAMILLO, R. 2006):

$$(m_1 \cdot a) r_1 = (m_2 \cdot a) r_2$$

La aceleración de ambos términos de la ecuación se cancela, pues es la misma para todo el sistema, quedando:

$$m_1 \cdot r_1 = m_2 \cdot r_2$$

A partir de esta ecuación es posible establecer valores adecuados para la masa excéntrica, tanto a m_2 como r_2 . La Tabla 14 muestra cuatro combinaciones posibles de valores para estas dos variables.

Tabla 14. Pares de valores posibles para la masa excéntrica.

| VARIABLE | Opción 1 | Opción 2 | Opción 3 | Opción 4 |
|----------|----------|----------|----------|----------|
| m_2 | 8kg | 10kg | 16kg | 20kg |
| r_2 | 250mm | 200mm | 125mm | 100mm |

De las cuatro opciones expuestas, es más viable trabajar con las que tienen menor masa a mayor distancia del eje de rotación. De la ecuación de momentum angular L (ALONSO, M. 1986):

$$L = m \cdot r^2 \cdot \omega$$

donde ω es la velocidad angular, resulta que es más eficiente para un sistema aumentar el radio r que la masa m , pues el primero está elevado al cuadrado. Se dejan entonces como posibilidades sujetas a evaluación las opciones 1 y 2.

8.4.3. Aceleración causada

Para el desplazamiento máximo (20mm) se espera que la mesa alcance aceleraciones cercanas a 1 gravedad, por lo que partiendo de la ecuación de aceleración (JARAMILLO, J. 2006):

$$A = D \cdot \omega^2$$

se puede obtener un valor aproximado para la frecuencia f de oscilación de la mesa. Siendo el desplazamiento D 20mm y la aceleración A $9,8\text{m/s}^2$, y teniendo en cuenta que la frecuencia circular ω es equivalente a $2\pi f$, obtenemos una frecuencia de oscilación de 3,53Hz. Teóricamente, éste debe ser el valor en que se alcance la máxima amplitud de oscilación en la mesa vibradora.

8.4.4. Soporte

Partiendo de la alternativa elegida para soportar la superficie horizontal (S1) se pueden tomar dos caminos. El primero es usar columnas de acero que gracias a su capacidad de flexión, permitan el movimiento oscilatorio. El segundo es efectivamente hacerlo con resortes metálicos. La ventaja del primero es el costo, que es aproximadamente 10 veces menor que el segundo. Por esta razón se evalúa primero esta posibilidad.

En el Anexo 1 se demuestra como las columnas necesarias para permitir el desplazamiento de 20mm están altamente expuestas a fatiga, por lo que resultan inadecuadas como soporte de la superficie horizontal.

Se pasa entonces a calcular los resortes. Ya definidas distancia r_1 y masa m_1 , teniendo en cuenta que se espera que el movimiento oscilatorio de la superficie horizontal alcance una aceleración aproximada de 1 gravedad, en una dirección en el plano horizontal, resulta posible calcular las dimensiones de cada uno de los resortes que soportan la superficie horizontal.

8.4.5. Cálculo de los resortes: Dimensiones y deformación

Para un módulo de elasticidad cercano a 200GPa y un módulo de rigidez alrededor de 80 GPa es posible calcular la deflexión lateral ∂_1 del resorte ante una fuerza Q (KENT, W. 1950). El acero 1045, utilizado comercialmente para fabricar resortes, tiene valores muy próximos a estos (GONZÁLEZ, H. 2005), por lo cual es válido calcular la deflexión lateral ∂_1 del resorte, ante una fuerza Q de cizalla, utilizando la siguiente ecuación:

$$\partial_1 = \left(\frac{C \cdot Q \cdot n \cdot r}{10^6 \cdot d^4} \right) \cdot (0.408 \cdot L^2 + 2.12 \cdot r^2)$$

Siendo Q la fuerza lateral aplicada al resorte, n el número de espiras activas, r el radio medio del resorte, L la longitud del

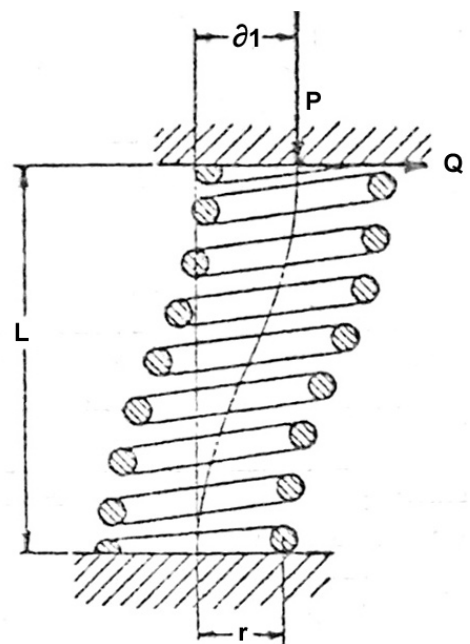


Figura 53. Resorte sometido a una fuerza lateral (Q) y axial P . Experimenta una deformación lateral ∂_1 .

(Fuente: KENT, W. 1950).

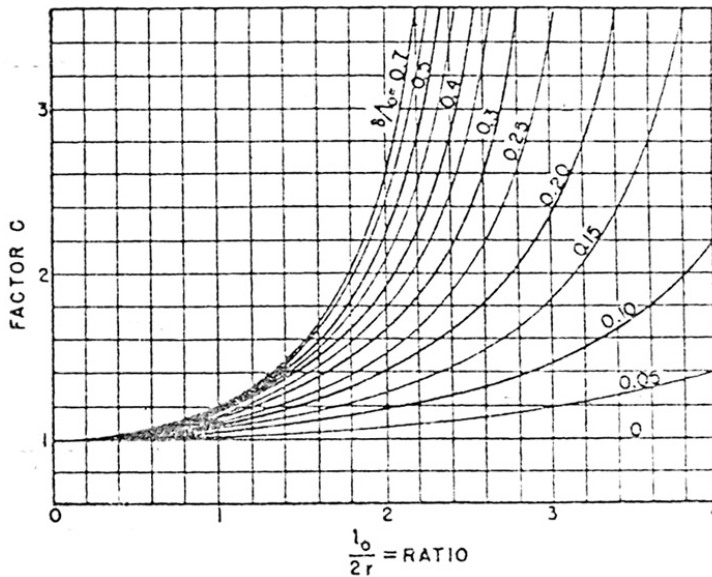


Figura 54. Gráfica para calcular el Factor C.

(Fuente: KENT, W. 1950).

resorte comprimido. C es un factor que depende de la relación entre la longitud libre del resorte y el diámetro del resorte ($L_0 / 2r$) junto con la relación entre la deformación axial del y la longitud libre del mismo (δ / L_0). Siendo δ :

$$\delta = \frac{64 \cdot P \cdot r^3 \cdot n}{G \cdot d^4}$$

Donde P es la fuerza aplicada axialmente al resorte y G es el módulo de rigidez del material. Con esta información, se calcula C utilizando la información contenida en la Figura 54. En el cálculo de δ y δ_1 , los valores conocidos son:

$Q = 245 \text{ N}$, que se obtiene de dividir la masa de la superficie horizontal (100kg) entre el número de resortes (4) y multiplicándola por la aceleración lateral esperada (1 gravedad)

$P = 245\text{N}$, obtenida de dividir el peso de la superficie horizontal (980N) entre el número de resortes (4).

$G = 80\text{GPa}$, definido como una de las condiciones iniciales para utilizar la ecuación de δ_1 .

Asumiendo valores para cada una de las otras variables (d, r, n, L), todas relacionadas con las dimensiones del resorte, resulta posible obtener valores para δ y δ_1 .

Así, para un mismo resorte que experimenta fuerzas P y Q, causantes de las deformaciones δ y δ_1 respectivamente, resulta posible calcular las constantes de elasticidad K y K_1 (KENT, W. 1950), de la siguiente forma:

$$K = \frac{P}{\delta} \quad (\text{Constante de elasticidad para deformación axial})$$

$$K_1 = \frac{Q}{\delta_1} \quad (\text{Constante de elasticidad para deformación lateral})$$

8.4.6. Cálculo de los resortes: Resistencia a la fatiga

Es posible calcular el esfuerzo S al que se ve sometido cada resorte a partir de la carga máxima que soporta cíclicamente (en este caso Q), el radio medio del resorte r y el diámetro del alambre d (KENT, W. 1950).

$$S = K_c \cdot \frac{16 \cdot P \cdot r}{\pi \cdot d^3}$$

K_c es un factor de corrección de curvatura dado a partir de:

$$K_c = \left(\frac{4 \cdot c - 1}{4 \cdot c - 4} \right) + \left(\frac{0.615}{c} \right)$$

Donde c es el índice del resorte, $c = 2r / d$.

El valor obtenido para S se debe comparar con los expuestos en la Tabla 15, la cual compara esfuerzo máximo soportado con el calibre del alambre, para resortes tratados térmicamente. Esta tabla ha sido construida teniendo en cuenta servicio severo, con más de un millón de ciclos de uso.

Tabla 15. Esfuerzos en servicio severo con más de un millón de ciclos, para resortes de compresión, tratados térmicamente. (Fuente: Westinghouse Electric Corporation, En: KENT, W. 1950).

| Diámetro del alambre (pulgadas) | Máximo esfuerzo permitido | |
|---------------------------------|---------------------------|-----|
| | PSI | Mpa |
| 0,085 | 60.000 | 414 |
| 0,085 – 0,185 | 55.000 | 379 |
| 0,185 – 0,320 | 48.000 | 331 |
| 0,320 – 0,530 | 42.000 | 290 |
| 0,530 – 0,970 | 36.000 | 248 |
| 0,970 – 1,5 | 32.000 | 221 |

Nótese que el máximo esfuerzo permitido es inversamente proporcional al diámetro del alambre. Es recomendable trabajar con un margen de seguridad de 2 para evitar accidentes y daños costosos en la máquina.

8.4.7. Cálculo de los resortes: Frecuencia natural

Para el caso del mecanismo en desarrollo, es prioritario observar el comportamiento estático del resorte trabajando axialmente (precarga de los resortes) mientras que respecto a la deformación lateral es necesario observar el

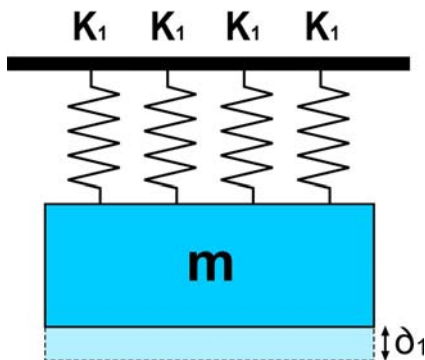


Figura 55. Modelo teórico que representa el comportamiento lateral de los resortes.

comportamiento dinámico, pues cada resorte es sometido a fuerzas laterales oscilatorias. Es preciso entonces tener en cuenta otra variable: la frecuencia natural del sistema.

Esta se calcula en función de la masa m y la constante de elasticidad lateral K_1 . El sistema oscilatorio se puede representar en un modelo teórico tal como ilustra la Figura 55. La frecuencia natural se calcula con la ecuación (THOMSON, W. 1982):

$$f_n = \left(\frac{1}{2 \cdot \Pi} \right) \cdot \sqrt{\frac{K_{total}}{m}}$$

La constante de elasticidad K_{total} resulta de la sumatoria de la constante de elasticidad de los cuatro resortes K_1 , por tratarse de resortes trabajando en paralelo (THOMSON, W. 1982). Por esta razón se puede expresar como $4K_1$.

Según la deformación lateral δ_1 que cada resorte permite, causada por la misma fuerza $Q = 245N$, es posible conocer el valor esperado de K_{total} , y por lo tanto, calcular la frecuencia natural del sistema para cada resorte evaluado.

Para que el sistema oscile dentro de rangos controlables y calculables, con una muy baja exposición a fatiga, es recomendable evitar la resonancia. Esto se logra con una excitación que se encuentre por debajo del 50% de la frecuencia natural o por encima del 150% de esta. Aunque bien es posible someter el sistema a resonancia, no por lapsos de tiempo muy extensos (JARAMILLO, R. 2006). Para esto se deben sobredimensionar los resortes de manera que los esfuerzos experimentados en resonancia sean despreciables.

Al evaluar los resortes es conveniente asegurarse que la frecuencia natural del sistema para el resorte elegido no iguale ni esté cercana a 3,53Hz, que es la frecuencia que causa la aceleración de 1 gravedad.

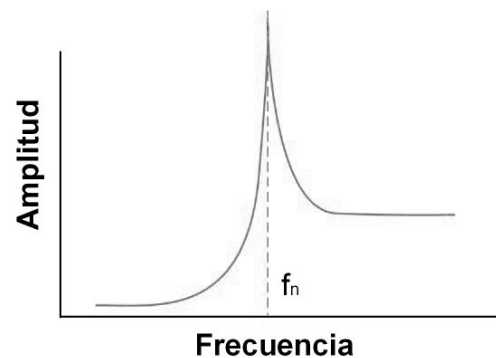


Figura 56. Gráfico que ilustra la amplitud de oscilación respecto a la frecuencia de excitación.

(Fuente: <http://www.dliengineering.com>)

8.4.8. Evaluación de resortes

Con la ayuda de una tabla dinámica construida en Microsoft Excel a partir de las ecuaciones expuestas para el cálculo de los resortes, se definen tres posibles resortes, variando en cada uno las dimensiones (d , r , n , L), evaluando las constantes de elasticidad axial y lateral obtenidas K y K_1 , la frecuencia natural F_n causada en el sistema, y el esfuerzo S causado en el alambre del resorte. Estos se exponen en la Tabla 16.

Tabla 16. Dimensiones y comportamiento teórico de los tres resortes elegidos.

| DIMENSIONES | RESORTES | | |
|-----------------------------|----------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 |
| L (mm) | 300 | 300 | 300 |
| n | 13 | 9 | 13 |
| r (mm) | 46 | 37 | 40 |
| d (pulgadas) | 0,47 | 0,55 | 0,55 |
| COMPORTAMIENTO | | | |
| ∂ (mm) | 6,7 | 1,6 | 2,7 |
| ∂_1 (mm) | 44,6 | 12,1 | 19 |
| K (N/mm) | 36,8 | 152 | 90 |
| K₁ (N/mm) | 5,5 | 20,3 | 12,9 |
| S (MPa) | 39,6 | 21,7 | 23 |
| F_n (Hz) | 2,4 | 4,5 | 3,6 |

8.5. PRUEBAS VIRTUALES

Para realizar una selección más certera de los resortes se hace una modelación virtual de la situación física con el software CosmosMotion, complemento del software Solidworks. La representación de la situación física se logra con 12 resortes tal como lo ilustra la Figura 57.

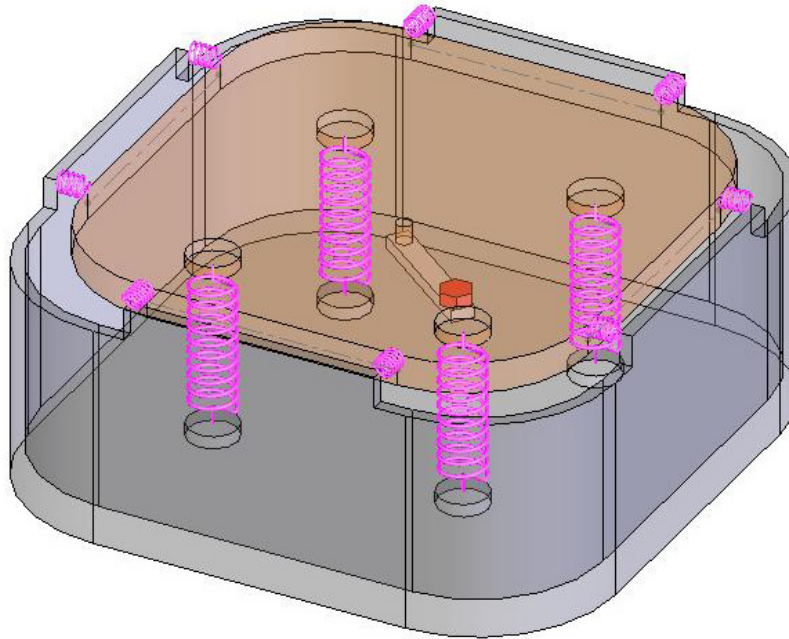


Figura 57. Modelación virtual con el complemento CosmosMotion del software SolidWorks.

Los 4 resortes verticales trabajan con la constante K . A cada resorte vertical corresponden dos resortes horizontales, que trabajan con la constante K_1 , representando la elasticidad del resorte frente a cargas laterales.

A cada resorte se le asigna un valor de amortiguación b , obtenido por la relación (CASTAÑEDA, L. 2006):

$$b = \xi b_{\text{crítica}}$$

donde

$$b_{\text{crítica}} = 2\sqrt{(Km)}$$

La amortiguación existente en la situación real es producto de la combinación de varias fuerzas, principalmente la fricción con el aire y la amortiguación propia del material de los resortes. En este caso se hace una aproximación teniendo en

cuenta únicamente el material. De esta manera se toma un factor de amortiguación ξ de 0,0006, correspondiente al acero estirado en frío (PEREZ, R. 1999). Se toma la masa m como 25kg, resultado de dividir la masa que cargan los resortes (100kg) entre el número de éstos (4).

Se ubica una masa excéntrica de 10kg a 200mm del centro. La variable en esta prueba es la frecuencia f con que gira la masa.

Para el análisis de resultados se observan tres variables arrojadas por el software: desplazamiento horizontal (CMPosition X), desplazamiento vertical en una esquina de la mesa (Position Y) y aceleración horizontal (CMAceleration X).

Luego de llevar los valores de K y K_f de los resortes 1, 2 y 3 al software CosmosMotion, con los correspondientes valores de amortiguación, se obtienen los resultados que se observan en la Tabla 17.

Tabla 17. Resultados obtenidos de la modelación de la situación física en CosmosMotion para los resortes 1, 2 y 3. Se toman los valores máximos registrados para cada variable (X max, Z max, Ax max).

| Resorte 1 | | | | Resorte 2 | | | | Resorte 3 | | | |
|-----------|------------|------------|-----------------------------|-----------|------------|------------|-----------------------------|-----------|------------|------------|-----------------------------|
| f (rev/s) | X max (mm) | Z max (mm) | Ax max (mm/s ²) | f (rev/s) | X max (mm) | Z max (mm) | Ax max (mm/s ²) | f (rev/s) | X max (mm) | Z max (mm) | Ax max (mm/s ²) |
| 0,5 | 1,2 | 0 | 10 | 0,5 | 0,25 | 0 | 5 | 0,5 | 0,4 | 0 | 4 |
| 1 | 4,4 | 0 | 175 | 1 | 1 | 0 | 40 | 1 | 1,6 | 0 | 70 |
| 1,5 | 9,1 | 0,04 | 840 | 1,5 | 2,3 | 0,01 | 200 | 1,5 | 4 | 0,02 | 320 |
| 2 | 13,8 | 0,04 | 2320 | 2 | 4,5 | 0,02 | 725 | 2 | 7,4 | 0,03 | 1160 |
| 2,5 | 17 | 0,05 | 4500 | 2,5 | 7,6 | 0,12 | 2000 | 2,5 | 12 | 0,07 | 3000 |
| 3 | 18,8 | 0,06 | 7100 | 3 | 12,4 | 0,1 | 4750 | 3 | 17,4 | 0,08 | 6900 |
| 3,5 | 19,6 | 0,05 | 10000 | 3,5 | 18,3 | 0,25 | 10300 | 3,5 | 21,4 | 0,1 | 11700 |
| 4 | 20,1 | 0,04 | 13360 | 4 | 24,7 | 0,12 | 18600 | 4 | 23 | 0,08 | 15040 |
| 4,5 | 20,4 | 0,04 | 16900 | 4,5 | 29,6 | 0,12 | 27870 | 4,5 | 24,2 | 0,07 | 20500 |
| 5 | 20,7 | 0,03 | 21650 | 5 | 30,9 | 0,15 | 35450 | 5 | 22 | 0,06 | 23400 |

8.5.1. Análisis de resultados

En términos generales el comportamiento del sistema con los diferentes resortes es bastante similar, tanto en aceleración como en desplazamiento horizontal (ver Figuras 58 y 59).

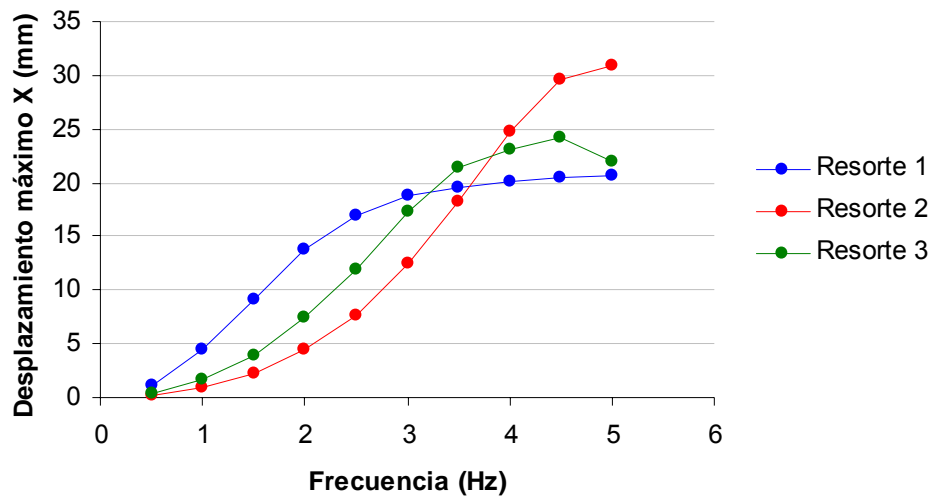


Figura 58. Comparación desplazamiento máximo en X. Resortes 1, 2 y 3.

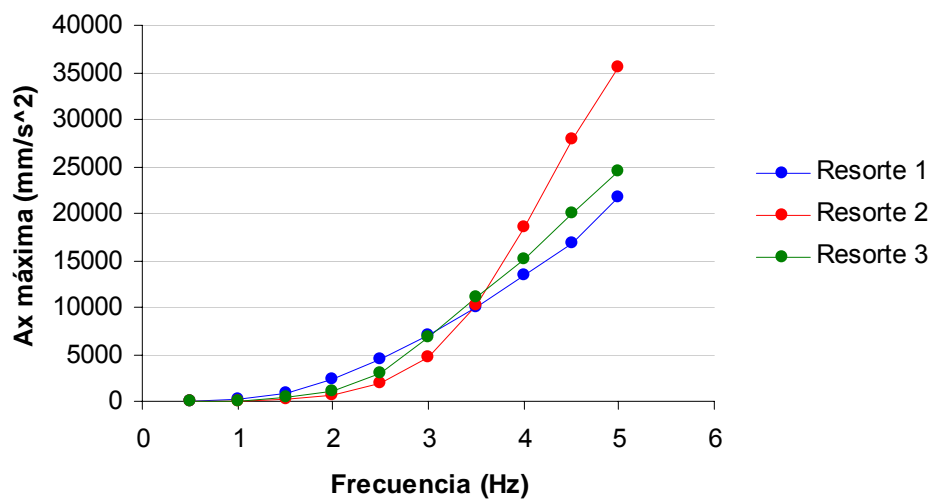


Figura 59. Comparación Aceleración máxima en X. Resortes 1, 2 y 3.

Se observa que las tres líneas se cruzan en ambas gráficas alrededor de 3,5Hz, alcanzando valores muy próximos a 9800 mm/s². Esto indica que con cualquiera de los tres resortes se alcanza un comportamiento satisfactorio, comparado con el calculado en la página 87 (Aceleración causada). En el caso de la aceleración, el comportamiento es similar hasta 3,5Hz. La mayor diferencia está en las curvas de desplazamiento máximo en X.

Para la elección del resorte se tienen en cuenta dos criterios:

- La cercanía al fenómeno. El sistema debe causar una percepción en el usuario de incremento y disminución de su intensidad de manera similar a como ocurre en un sismo real.
- El sistema debe ser estable. No debe afectarse considerablemente si se apoya una persona sobre la superficie de la mesa.

En la Tabla 18 se observa un análisis del comportamiento de los tres resortes en las pruebas virtuales comparado con los criterios enunciados.

Tabla 18. Evaluación de los resortes 1, 2 y 3.

| Criterios | Resorte 1 | Resorte 2 | Resorte 3 |
|----------------------|---|--|---|
| Cercanía al fenómeno | Media. Alcanza a baja frecuencia la máxima sacudida. | Alta. A bajas frecuencias tiene bajos desplazamientos. A mayor frecuencia mayor incremento del desplazamiento. | Media. Presenta un incremento constante del desplazamiento. |
| Estabilidad | Baja. Tiene una K lateral muy baja, por lo que es muy sensible. | Alta. Tiene una K lateral alta, es poco sensible. | Media. Tiene una K lateral intermedia. |

Se observa que el resorte más adecuado tanto por cercanía al fenómeno como por estabilidad es el 2. Se implementan entonces 4 resortes³ con las características del resorte 2.

8.6. PROPUESTA FORMAL PARA LA MESA

A partir del mecanismo propuesto, se prosigue con la generación de alternativas para dar forma a la mesa vibradora, teniendo en cuenta especialmente: apariencia general y comodidad en el uso.

8.6.1. Alternativas de forma

Se presentan 5 alternativas para la forma general de la mesa:

F1. Rectángulo de esquinas redondeadas.

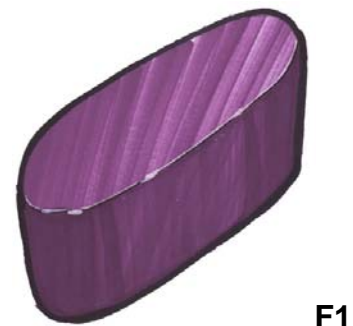
F2. Círculo.

F3. Cuadrado de esquinas redondeadas.

F4. Semicírculo (para ubicar contra una pared).

F5. Triángulo de esquinas redondeadas.

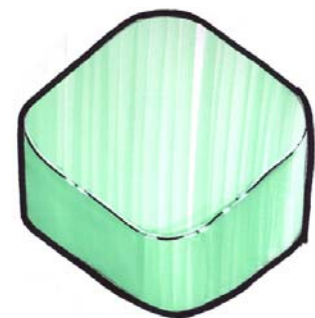
Se presentan además 3 alternativas para la superficie en movimiento:



F1



F2



F3



F4

Figura 60. Alternativas de forma F1, F2, F3, F4.

³ Según la disponibilidad comercial se pueden utilizar resortes diferentes. La mayor condición es que la K_1 del resorte sea cercana a 20N/mm.

M6. Toda la cubierta de la mesa se mueve

M7. La mitad de arriba de la mesa se mueve.

M8. Solo la parte interna de la cara superior se mueve.

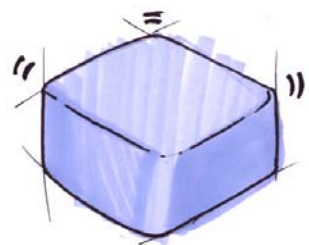
8.6.2. Evaluación

Para evaluar las alternativas de forma expuestas se recurre a los siguientes criterios:

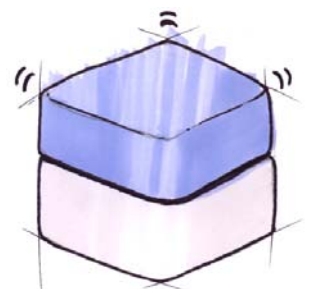
- Circulación. Suficiente como para que cuatro personas puedan armar simultáneamente en la misma mesa y moverse alrededor de ella.
- Comodidad en uso. Resulta cómodo para un niño de 125cm de estatura como para un adulto de 175cm.
- Mantenimiento. Permite fácil acceso para reparaciones y mantenimiento rutinario.
- Ubicación de edificación. Dispone de un espacio adecuado para construir un edificio con el set de módulos.
- Adecuado para set de módulos. Permite fácil acceso a las piezas.
- Apariencia general. Sencillo, atractivo y acorde con principio formal de Explora: plano-curva-plano.
- Seguridad. El usuario no está expuesto a ser lastimado.



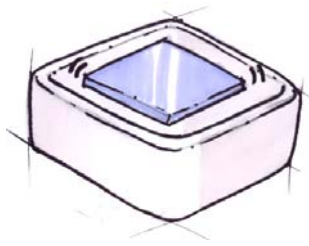
F5



M6



M7



M8

Figura 61. Alternativa de forma F5 y alternativas de superficie en movimiento M6, M7 Y M8.

Tabla 19. Matriz de evaluación de alternativas de forma.

| CRITERIOS DE EVALUACIÓN | Circulación | Comodidad | Mantenimiento | Ubicar edificación | Adecuado para módulos | Apariencia general | Seguridad | TOTAL |
|-------------------------|-------------|-----------|---------------|--------------------|-----------------------|--------------------|-----------|-------------|
| | 18 | 15 | 10 | 12 | 15 | 15 | 15 | |
| % | 18 | 15 | 10 | 12 | 15 | 15 | 15 | 100 |
| Alternativas | | | | | | | | |
| F1 | 7 | 8 | 8 | 6 | 9 | 9 | 8 | 7,88 |
| F2 | 10 | 9 | 8 | 10 | 9 | 10 | 8 | 9,2 |
| F3 | 9 | 10 | 8 | 10 | 9 | 10 | 8 | 9,17 |
| F4 | 8 | 8 | 8 | 9 | 8 | 7 | 8 | 7,97 |
| F5 | 7 | 7 | 8 | 10 | 7 | 7 | 8 | 7,61 |
| M6 | 8 | 7 | 6 | 8 | 6 | 9 | 6 | 7,2 |
| M7 | 8 | 8 | 5 | 8 | 8 | 9 | 7 | 7,7 |
| M8 | 10 | 8 | 8 | 8 | 9 | 9 | 9 | 8,81 |

8.6.3. Ajustes de diseño

Se observa que F2, F3 y M8 son las alternativas con mayor puntaje. Teniendo en cuenta el patrón de diseño curva-plano-curva de Explora, resulta más acertada la forma de F3. En cuando a la superficie en movimiento, es evidente que por seguridad resulta más adecuada M8.

8.7. DISEÑO DE DETALLE

Para diseñar en detalle la mesa vibradora, ésta se divide en dos secciones principales: sección dinámica y sección estática.

8.7.1. Sección dinámica

Compuesta por todas las partes que son soportadas por los 4 resortes, siendo las principales: Biela, masa excéntrica, motor, superficie horizontal y resortes.

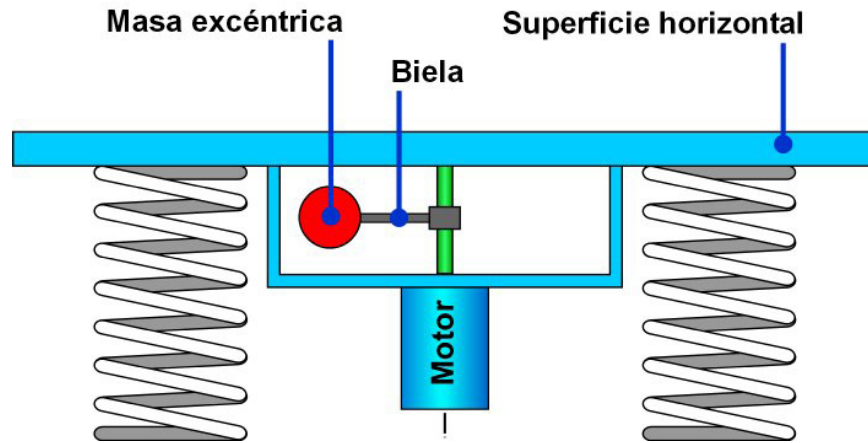
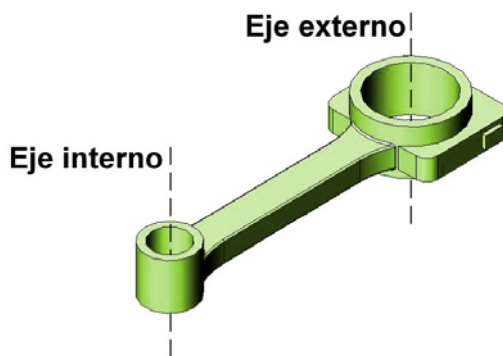


Figura 62. Esquema de la sección dinámica de la mesa vibradora.

Por costo y facilidad de construcción, resulta posible utilizar una biela de automóvil. Una pieza de este tipo está concebida para una carga bastante alta, mucho mayor a la que está expuesta en el actual uso. La biela obtenida tiene una distancia entre ejes de 180mm. Esta se ilustra en la Figura 63.



La masa excéntrica debe cumplir con dos condiciones: ser lo más compacta posible y tener un peso de 11,1kg (se obtiene de adaptar la relación calculada $m_1.r_1$ equivalente a 10kg x 200mm, a la longitud de la biela obtenida, 180mm, ver página 85).

Figura 63. Biela.

El material más adecuado para esta pieza resulta ser la fundición gris, por costo y densidad ($7,8\text{g/cm}^3$). La forma propuesta debe conservar el centro de masa sobre el eje externo de la biela. En la Figura 64 se ilustra la propuesta de masa excéntrica, compuesta de dos piezas iguales, y una central. El amarre de éstas se realiza con tornillos de $\frac{1}{2}$ ". Para lograr un máximo ajuste, que evite movimiento relativo entre la biela y la masa excéntrica se utiliza banda de caucho de 2mm.

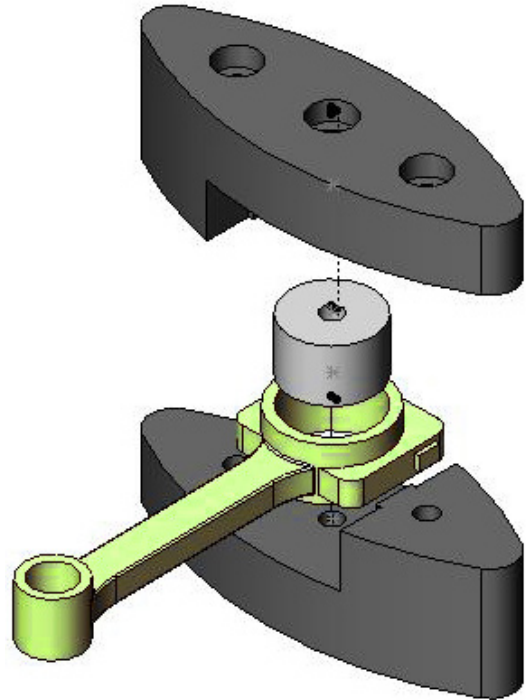


Figura 64. Ensamble de masa excéntrica con biela.

Por tener su eje principal en sentido vertical, el movimiento de este sistema tiene una muy baja demanda de potencia, a pesar de tratarse de una masa excéntrica de 11,1Kg. Es posible usar dos tipos de motores para generar este movimiento: DC o AC. La ventaja de los motores DC está en que la variación de la frecuencia de rotación es bastante más económica que en los AC, los cuales requieren de un variador de frecuencias. Por tanto se opta por utilizar un motor reductor DC de 20V, el cual se considera apto para este montaje (RUIZ, A. 2006) y es sometido a prueba en el prototipo (Figura 65).



Figura 65. Motor reductor DC de 20V.
(Fuente <http://www.sdp-si.com>)

Para la transmisión del movimiento se utiliza un acople araña, el cual evita que se transmitan cargas físicas indeseables al motor. Para soportar la biela que sostiene la masa excéntrica se utiliza un eje de 1" de diámetro, sostenido entre dos chumaceras del mismo diámetro, como se observa en la Figura 66.

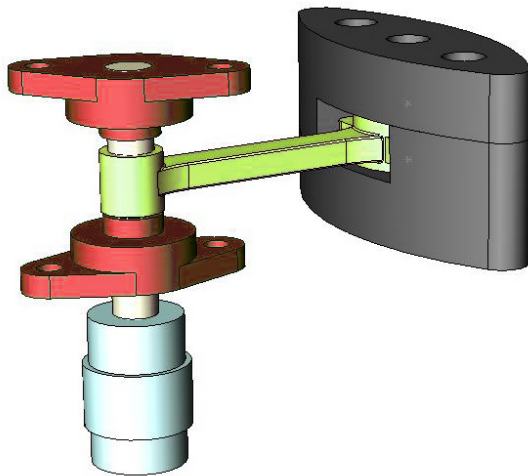


Figura 66. Eje con chumaceras y acople araña.

Los resortes adquiridos divergen en dimensiones del seleccionado teóricamente (resorte 2), más las características más importantes se conservan: K_1 y F_n . En la Tabla 20 se exponen las dimensiones y comportamiento de estos resortes.

Tabla 20. Dimensiones y comportamiento de los resortes adquiridos.

Debe haber una estructura que sostenga todas las partes mencionadas. Ésta debe ser metálica. Es conveniente utilizar un mismo tipo de perfilera para optimizar el material. Para este caso se utiliza perfilera en ángulo de acero 1020, calibre $3/16$ " de 1" de ancho.

| DIMENSIONES RESORTES ADQUIRIDOS | |
|------------------------------------|-------|
| L (mm) | 340 |
| n | 4 |
| r (mm) | 90 |
| d (pulgadas) | 0,61 |
| COMPORTAMIENTO | |
| \varnothing (mm) | 2,4 |
| \varnothing_1 (mm) | 12,3 |
| K (N/mm) | 103,9 |
| K_1 (N/mm) | 19,9 |
| S (MPa) | 31,3 |
| F_n (Hz) | 4,49 |

Para las partes que necesitan una mayor área de contacto se usa platina de acero 1020 calibre $\frac{3}{16}$ ". Teniendo en cuenta la forma y el tamaño propuesto para la mesa vibradora en secciones anteriores del presente capítulo, la estructura propuesta para esta función se ilustra en la Figura 67. Sus lados miden 68cm y su altura es de 38cm.

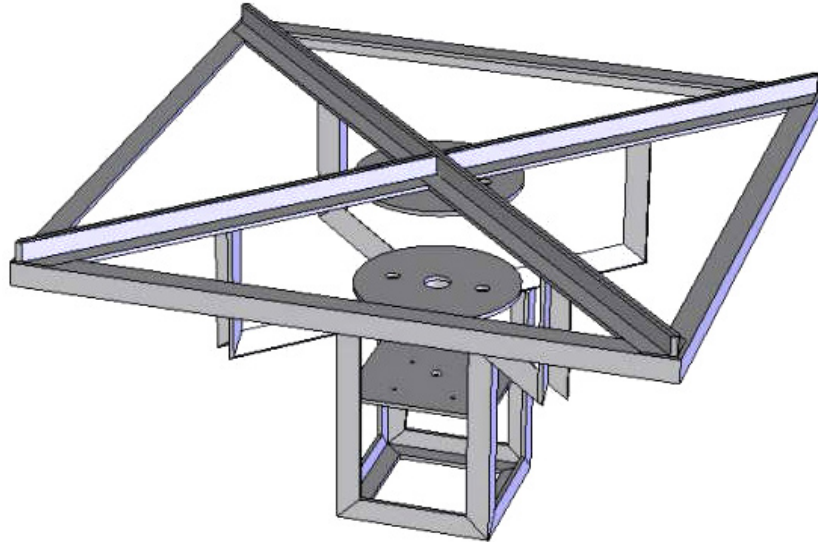


Figura 67. Estructura para la sección dinámica de la mesa vibradora.

Es conveniente que la masa excéntrica se encuentre lo más cerca posible a la parte superior de la mesa para evitar excesivo balanceo en sentido vertical, el cual puede causar alta inestabilidad en la mesa (JARAMILLO, R. 2006).

La sujeción de los resortes a esta estructura se debe efectuar mecánicamente, evitando soldadura, la cual puede alterar las propiedades físicas del resorte y lo puede hacer más susceptible de fractura (GOMEZ, F. 2006). Se realiza entonces un aprisionamiento de los extremos del resorte, inmovilizándolos⁴, como se ilustra en la Figura 68.

⁴ Para esto se aprovecha la forma de los resortes adquiridos, los cuales tienen las espiras de los extremos más estrechas y completamente planas y horizontales.

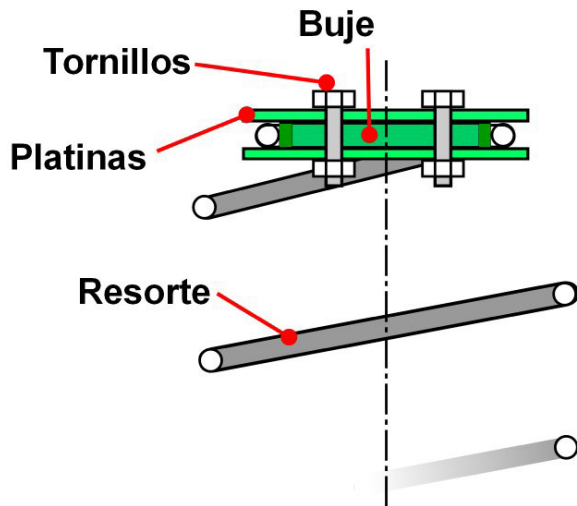


Figura 68. Sección. Sujeción del extremo de un resorte.

Para lograr el peso para el cual se calculó el sistema oscilatorio, es necesario lograr una masa de 100Kg en la parte dinámica del mismo. Para esto es necesario incrementar 60Kg, lo cual se logra ubicándolo en la superficie horizontal superior de la mesa⁵. De esta forma se diseña una superficie plana de acero 1020 calibre $\frac{3}{8}$, como se ilustra en la Figura 70.

Es conveniente que esta superficie tenga una cubierta blanda que absorba la energía de impacto causada por la caída de las piezas del set de módulos (ver capítulo 9, página 122).

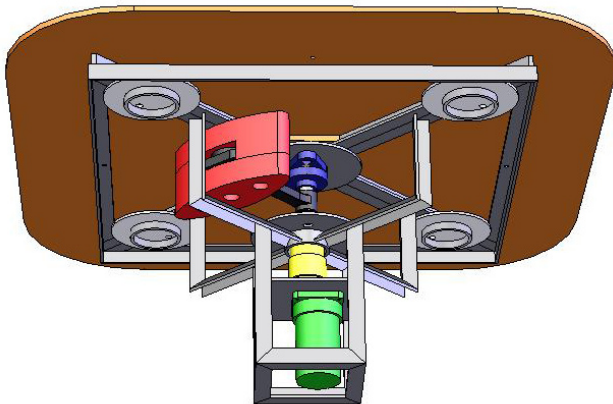


Figura 69. Vista general de la sección dinámica (sin resortes).

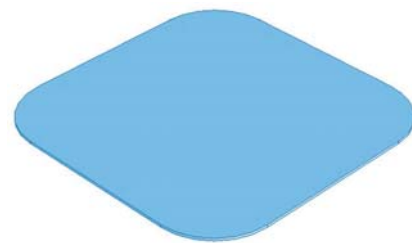


Figura 70. Superficie plana de la mesa vibradora.

⁵ Este dato se obtiene luego de modelar en el software SolidWorks las piezas que conforman la sección dinámica de la mesa.

8.7.2. Sección estática

Compuesta por las partes que soportan los resortes, fijan la mesa al piso y protegen al usuario de los mecanismos.

La sujeción inferior de los resortes se efectúa de la misma manera que en la parte superior (Figura 68).

Es necesaria una estructura resistente y estable, que permita adecuada sujeción al piso. De ésta se debe sostener la cubierta de la mesa. Se ilustra en la Figura 71. Se plantea en perfilería cuadrada de 1", calibre 14, acero 1020. La sujeción al suelo se logra por medio de pernos y chazos.

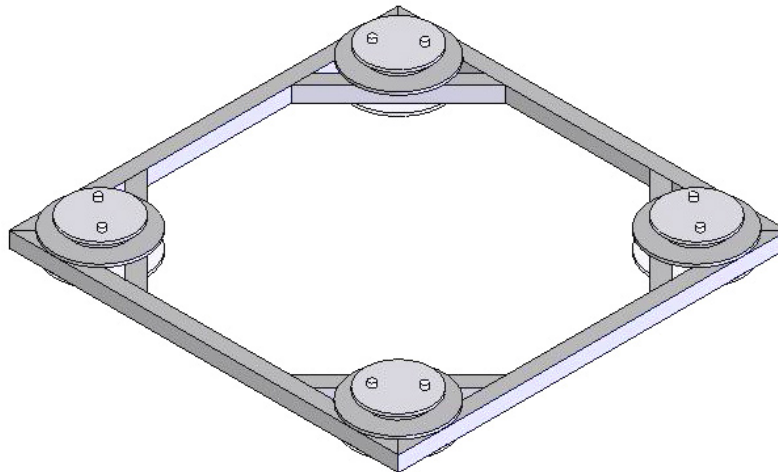


Figura 71. Estructura base de la mesa vibradora.

La cubierta propuesta, acorde con la alternativa de forma seleccionada (F3) se ilustra en la Figura 72. Se propone en perfil tubular diámetro 1½", calibre 14 en acero 1020, cubierto con lámina de acero 1020 calibre 16. Cabe destacar el uso de un marco protector blando, que absorbe la energía de impacto causado por la caída de las piezas del set de módulos. Este se propone en triplex tapizado con espuma de alta densidad y lona de PVC.

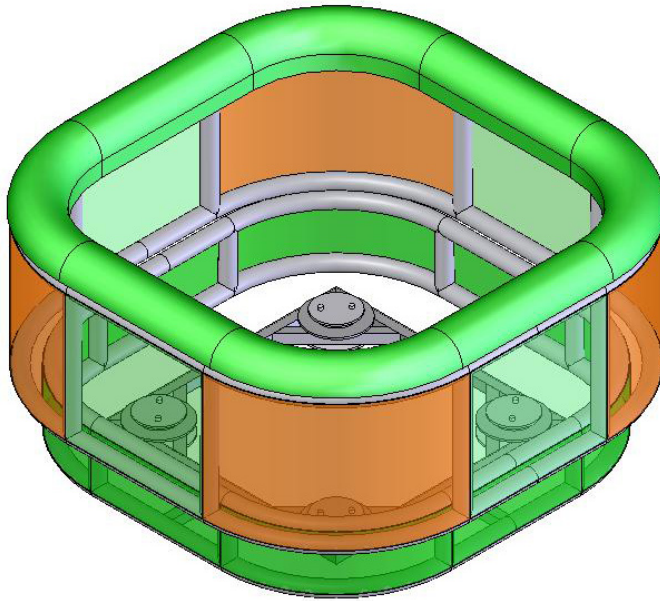


Figura 72. Cubierta para la mesa vibratora.

Partiendo de que el montaje interactivo “debe ser fácil explorarlo como máquina” (ver Marco teórico página 11) es conveniente que la máquina permita ver parcialmente su interior, que el visitante pueda entender cómo opera ésta. Para esto se propone una zona transparente en la cubierta (en acrílico o policarbonato) con una aplicación gráfica acorde con el contexto (Parque Explora, sala Colombia Geodiversa).

8.8. PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

Con la máquina construida (al nivel de estructura, Figura 73) se efectúa una prueba de funcionamiento comparando el comportamiento real con el obtenido en la modelación física. Los resultados se observan en las Figuras 74 y 75.

Se encuentra diferencia entre las frecuencias en que se alcanzan los valores máximos esperados. El desplazamiento máximo se alcanza en 2,5Hz, esto es 1Hz por debajo de lo previsto. La aceleración máxima se alcanza en 3Hz, es decir, 0,5Hz por debajo de lo esperado. Esto implica que en la situación real, para un desplazamiento máximo de 20mm se alcanza una aceleración de 5100mm/s^2 .



Figura 73. Prototipo de la mesa vibradora construido para la Universidad EAFIT.

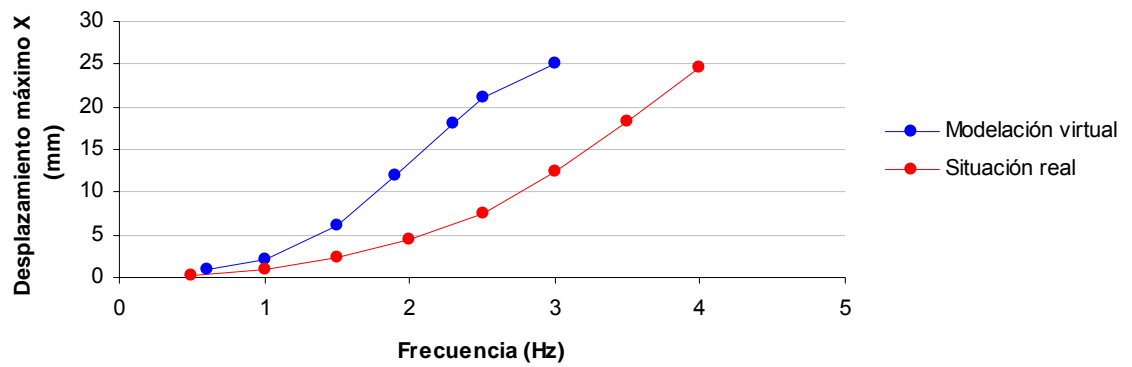


Figura 74. Comparación de desplazamiento máximo. Situación real y modelación virtual.

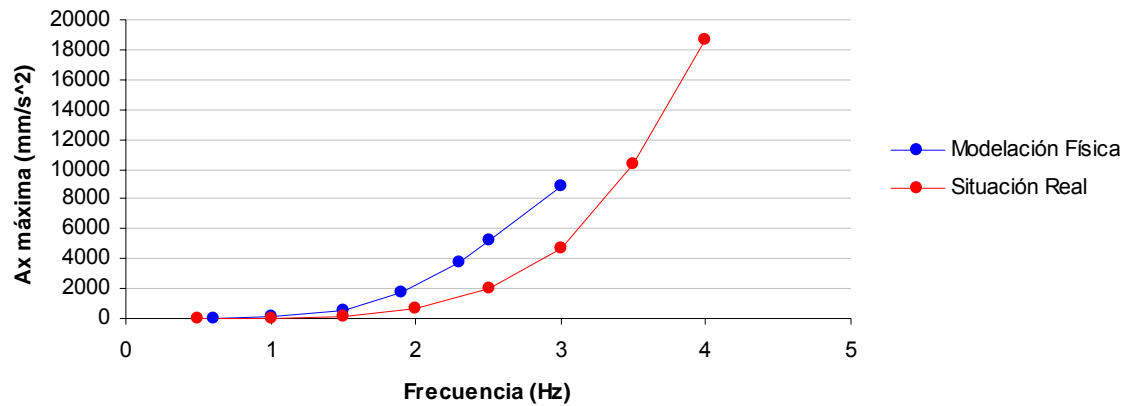


Figura 75. Comparación de aceleración máxima. Situación real y modelación virtual.

Relacionado con la frecuencia, se obtiene una desviación del 28,6% para el valor máximo de desplazamiento. Para el máximo valor de aceleración se obtiene una desviación de 14,3%. Las implicaciones que esto pueda tener sobre el comportamiento del conjunto se observan en el siguiente capítulo, en una prueba que involucra set de módulos y mesa vibradora.

9. INTEGRACIÓN DE LA EXPERIENCIA INTERACTIVA

La integración de la Experiencia interactiva es un punto importante para dar buen término al trabajo hecho en los capítulos anteriores. El objetivo en esta sección es definir ciertas características de interacción con el usuario, necesarias para que la Experiencia en su totalidad sea coherente.

Así pues, se desarrolla una dinámica de juego que integra set de módulos y mesa vibradora. Partiendo de ésta, se definen ciertos detalles de uso necesarios para lograr una propuesta de montaje interactivo que genere una experiencia impactante en los usuarios.

9.1. DESARROLLO DE LA DINÁMICA DE JUEGO

9.1.1. Requerimientos para el juego

En la Tabla 21 se plantea un listado de soluciones para ciertos deseos y necesidades relacionados con la dinámica de juego¹. Estas soluciones funcionan como herramienta para posteriormente generar propuestas de juego.

¹ Esta tabla está basada la herramienta Especificaciones de diseño de producto (PDS), haciendo una adaptación propia.

Tabla 21. Posibles soluciones para la dinámica de juego, según deseos y necesidades.

| Deseos o Necesidades | N ó D | Posibles soluciones |
|--|--------------|--|
| Debe cautivar, producir curiosidad, sorprender. | N | Sonidos, formas, colores y luces. Movimiento. Situación impactante. |
| Debe retar al usuario, incitar a jugar | N | Sugerir objetivo o meta. Imponer misión. Conformar equipos de trabajo. Impulsar competencia. Resolver un problema. |
| Debe tener referentes cotidianos (objetos y juegos conocidos). | D | Juegos: Tangram, Lego, Tetris, Torre de Babel, Palitos Chinos, Castillos de cartas. Objetos: Columnas, ladrillos, marcos de puerta, sismógrafos, bomberos, varillas y perfiles de hierro, grúas. Situaciones: Destrucción, emergencia, peligro, sirenas, rescate, |
| Debe ser fácilmente entendible, sencillo. | N | Una sola meta impuesta al usuario. |
| Instrucciones claras y sencillas. | N | Frases cortas. Exponer mensajes auditivos y/o visuales comprensibles. Usar lenguaje primario. |
| Debe tener orden lógico. | N | Debe tener inicio, desarrollo y final. |
| Debe facilitar el hacer al usuario. | N | Dar pistas de lo que el usuario tiene que hacer. Montaje sencillo, entendible. |
| Debe reaccionar según la acción del usuario. | D | Permite que el usuario perciba que hay varias posibilidades de armado, que hay unas más adecuadas que otras. |
| Debe acercar al fenómeno, brindando mensajes sencillos pero no en exceso simplificados. | N | Debe despertar inquietudes en la persona y dar pistas para su solución. |
| Debe despertar inquietudes en la persona. | N | Debe permitir que el usuario se equivoque. |
| Debe permitir fácil volver a empezar, que funcione bien cuando un usuario comience luego que otro termine. | N | Sencillo reinicio del juego |

9.1.2. Generación de alternativas

A continuación se describen brevemente seis opciones para la dinámica de juego, partiendo de factores pedagógicos (ver marco conceptual, página 40) y las posibles soluciones enunciadas en la anterior sección.

1. Para este juego es necesario formar 2 equipos. Cada equipo construye una edificación lo mas alta y reforzada posible con los módulos en un tiempo determinado. Al terminar dicho tiempo los equipos someten las edificaciones a sismos de diferente intensidad. La edificación que logre soportar un sismo de mayor intensidad es la ganadora².
2. El usuario oprime un botón, que da inicio a una secuencia programada, con instrucción sonora, cuyo contenido se resume a continuación: “Científicos anuncian que pronto vendrá un temblor. Debes construir un edificio lo más alto y sismorresistente posible antes de que este llegue”. Luego de cierto tiempo (entre 1 y 3 minutos) se generan automáticamente temblores programados cuya intensidad es variable.
3. El usuario construye un edificio de cierta forma y tamaño definidos, con un número limitado de esferas de refuerzo. El reto del juego está en la manera como el usuario distribuye las esferas, buscando que éste sea lo más *sismorresistente* posible. Posteriormente el usuario acciona un sismo que crece gradualmente y observa hasta que intensidad de sismo resiste su edificio. El incentivo se encuentra en saber que tan buen constructor es el usuario, lo cual depende de la intensidad alcanzada.
4. Inicialmente el usuario recibe un número determinado de módulos (sin esferas de refuerzo) con los cuales debe construir un edificio de una altura

² Esta propuesta requiere dos mesas vibratoras independientes.

determinada. Luego acciona un sismo que crece gradualmente y se registra la intensidad alcanzada. Se reconstruye el edificio poniendo todas las esferas de refuerzo disponibles. Se acciona el mismo sismo creciente y se comparan los resultados con el edificio inicial.

5. Con los módulos y las esferas de refuerzo el usuario debe construir 3 edificios de igual altura que tengan diferente forma en la base (cuadrada, lineal, pentagonal). Luego se someten simultáneamente a un sismo, observando la manera como afecta cada uno de los edificios.
6. El usuario recibe 4 módulos y 4 esferas de refuerzo, para que construya el primer piso del edificio. Al terminar se acciona un sismo. Si logra mantenerse en pie, recibe el mismo número de módulos y esferas que recibió inicialmente, para que construya el segundo piso. Se acciona nuevamente el sismo. Se continúa hasta que el edificio se tenga en pie. Entre mayor sea la altura alcanzada, mejor calificación de constructor recibe el usuario.

9.1.3. Evaluación y selección

Para seleccionar de manera más acertada la dinámica de juego, es necesario plantear ciertos criterios de evaluación de las alternativas expuestas. Éstos se obtienen de analizar los requerimientos para el juego y la información compilada en el Marco conceptual (página 40).

- Flexible. Se puede jugar individualmente o en grupo sin perder la esencia.
- Genera reto. Impone un reto personal más que de competencia.
- Sencillo. Se entiende y se juega fácilmente.
- Contenido. Ilustra el fenómeno.
- Orden. Tiene un orden lógico.
- Permite que el usuario se equivoque.

- Genera inquietudes. Causa inquietudes sobre la sismorresistencia.
- Emocionante. Divierte tanto niños mayores de 10 años como adultos.
- Duración. No supera 5 minutos.
- Independencia. No depende de un guía para su buen funcionamiento.
- Integración. Integra coherentemente el set de módulos y la mesa vibradora.

Teniendo como punto de partida estos criterios y asignándole a cada uno un porcentaje que permita ponderar según su importancia relativa, se efectúa la evaluación de alternativas, expuesta en la Tabla 22.

Tabla 22. Matriz de evaluación de alternativas para la dinámica de juego.

| CRITERIOS DE EVALUACIÓN | Flexible | Genera reto | Sencillo | Contenido | Orden | Permite equivocación | Genera inquietudes | Emocionante | Duración | Independencia | Integración | TOTAL |
|-------------------------|----------|-------------|----------|-----------|-------|----------------------|--------------------|-------------|----------|---------------|-------------|-------------|
| % | 7 | 13 | 11 | 9 | 9 | 6 | 8 | 9 | 10 | 10 | 8 | 100 |
| Alternativas | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 3 | 5 | 8 | 4 | 9 | 6 | 3 | 9 | 5 | 5 | 7 | 5,88 |
| 2 | 6 | 6 | 3 | 5 | 6 | 4 | 4 | 9 | 7 | 5 | 7 | 5,65 |
| 3 | 7 | 9 | 10 | 8 | 8 | 7 | 7 | 7 | 9 | 9 | 8 | 8,25 |
| 4 | 6 | 3 | 3 | 9 | 4 | 3 | 9 | 3 | 3 | 5 | 8 | 4,92 |
| 5 | 8 | 4 | 3 | 2 | 3 | 5 | 8 | 5 | 3 | 5 | 3 | 4,29 |
| 6 | 6 | 9 | 7 | 8 | 6 | 7 | 7 | 7 | 5 | 6 | 7 | 6,89 |

9.1.4. Propuesta de juego

La alternativa seleccionada es la número 3. Se procede entonces a desarrollarla en detalle.

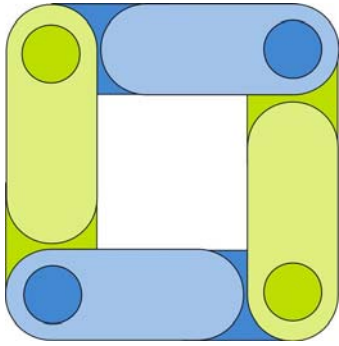


Figura 76. Vista superior del edificio a armar.

Buscando economía de tiempo³ y simplicidad en el uso, se propone un edificio de base cuadrada, un módulo por cada lado, como se observa en la Figura 76. Es además la forma cuadrada o rectangular la más convencional en la construcción actual, lo cual facilita la asociación del edificio del juego con los reales.

El edificio debe poder ser construido por un niño de 120cm de estatura (estatura promedio de un niño de 10 años), por lo cual su altura máxima no debe superar 140cm. El edificio debe tener entonces tres pisos, logrando una altura total de 87cm⁴. Son necesarios entonces 12 módulos para completar el edificio.

Para reforzar el edificio el usuario cuenta con 16 esferas. Este número es elegido a partir de pruebas de funcionamiento y de usuario, las cuales se exponen en el siguiente capítulo.

La propuesta de juego queda pues de la siguiente manera: el usuario, construye un edificio de 3 pisos, de forma cuadrada con 12 módulos. Para esto dispone de ayudas visuales que ilustran la forma de armar el mismo. A medida que se va construyendo, debe ser reforzado con las 16 esferas, de la mejor manera que considere el usuario. Una vez terminado,

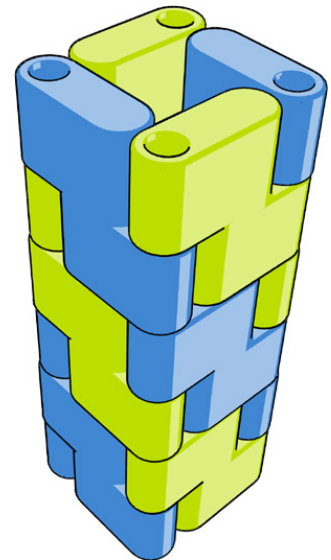


Figura 77. Edificio a armar.

³ Esto teniendo en cuenta el poco tiempo de que se dispone para cada módulo interactivo en un museo.

⁴ Partiendo de que el edificio se construye sobre la mesa vibradora que tiene 50cm de altura.

él mismo acciona un sismo cuya intensidad se va incrementando gradualmente, observando hasta que nivel resiste el edificio. Según esto se puede establecer una escala de calificación, determinando que tan buen constructor es el usuario, la cual se expone en la Tabla 23.

Tabla 23 Calificación al usuario según la intensidad de sismo alcanzado.

| Intensidad del sismo | Tipo de constructor |
|-----------------------------|----------------------------|
| 6 | Peligroso |
| 7 | Distraído |
| 8 | Aterrizado |
| 9 | Hábil |
| 10 | Grandioso |

La intensidad del sismo se determina a partir de la escala Mercalli Modificada (ver marco teórico, página 18) siendo la intensidad 6 a partir de la cual “la sacudida es sentida por todo el mundo” y hay daños ligeros en las edificaciones. La intensidad 10 corresponde a destrucción de la mayoría de edificaciones, es decir que solo las mejores estructuras quedan en pie.

Se escoge esta escala porque determina la intensidad del sismo respecto a los daños ocasionados en un lugar específico. La escala Richter no se utiliza en este caso porque se presentan diferentes intensidades para un sismo de igual magnitud, según sea la distancia al foco desde el lugar donde se mide el sismo (ver Marco teórico, página 18).

9.2. DETALLES PARA LA INTEGRACIÓN DE LA EXPERIENCIA

Una vez formalizados los principales componentes de esta Experiencia (set de módulos y mesa vibradora) y la manera como son utilizados (dinámica del juego) se hace necesario definir ciertos detalles que darán forma final a la Experiencia interactiva. Estos son:

- La manera como el usuario varía la intensidad del sismo.

- El almacenamiento de los módulos mientras no están en uso.
- La manera como se reinicia la Experiencia para que un nuevo usuario participe.
- Ayudas para que el usuario tenga una interacción satisfactoria con la Experiencia.

9.2.1. Variación de la intensidad del sismo

Resulta posible modificar la intensidad de oscilación de la mesa vibradora variando la velocidad de rotación de la masa excéntrica (ver Pruebas de funcionamiento de la mesa vibradora, página 107). Esta intensidad está determinada por el desplazamiento y aceleración horizontales de la superficie superior de la misma.

Por lo tanto, al variar la velocidad de rotación del motor reductor (página 102) es posible modificar la intensidad del sismo. Esto se logra regulando el voltaje entregado al mismo, por medio de una fuente DC variable. Los detalles sobre esta fuente se pueden encontrar en el Anexo 4.

Respecto a la interacción usuario-máquina, para la variación de la intensidad del sismo se plantean tres alternativas:

1. Palanca. Dispone de un grado de libertad rotacional, que al desplazarse hacia delante incrementa la intensidad del sismo. Su ayuda visual es un dial.
2. Perilla. Al rotarse hacia la derecha incrementa la intensidad del sismo. Tiene un dial como ayuda visual.
3. Botones. Cinco botones, cada uno correspondiente a una intensidad de sismo (6 a 10). Al oprimir un botón se acciona un sismo de intensidad constante, correspondiente al valor del botón.

Para evaluar cual de estas opciones es más acertada para la Experiencia en desarrollo se consideran los siguientes criterios:

- Facilidad en el uso.
- Clara y entendible.
- Causa emoción.
- Costo de desarrollo
- Sencillez de fabricación.

La evaluación de las alternativas propuestas se observa en la Tabla 24.

Tabla 24. Evaluación de alternativas de interacción usuario-máquina, para variar la intensidad del sismo.

| CRITERIOS DE EVALUACIÓN | Fácil uso | Claridad | Emoción | Costo | Fabricación | TOTAL |
|-------------------------|-----------|----------|---------|-------|-------------|-------------|
| % | 30 | 20 | 20 | 15 | 15 | 100 |
| Alternativas | | | | | | |
| 1 | 10 | 10 | 10 | 9 | 10 | 9,85 |
| 2 | 6 | 8 | 4 | 10 | 10 | 7,2 |
| 3 | 10 | 8 | 8 | 7 | 6 | 8,15 |

9.2.1.1. Diseño de detalle de la palanca

Siendo elegida la alternativa 1, se prosigue a desarrollarla en detalle.

Como palanca se utiliza un perfil tubular de acero 1020, calibre 16, diámetro $\frac{3}{4}$ ", con una esfera plástica en la parte superior, la cual brinda comodidad para ser manipulada. En la parte inferior se suelda una barra de $\frac{3}{4}$ " de diámetro, acero 1020, la cual trabaja como eje de pivote.

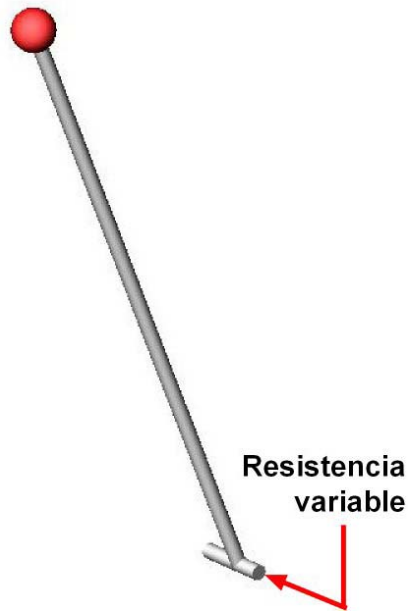


Figura 78. Palanca y ubicación de la resistencia variable.



Figura 79. Resistencia variable.

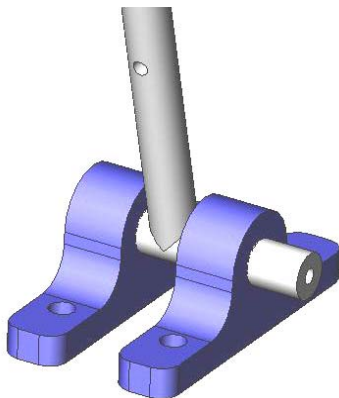


Figura 80. Sujeción del eje de la palanca entre dos chumaceras.

El dispositivo de entrada de la fuente DC variable, el cual gradúa la velocidad de rotación del motor reductor es una resistencia variable. Ésta dispone de una perilla como se observa en la Figura 79. Se ubica sobre el eje de pivote de la palanca, permitiendo que la perilla gire al ser desplazada la palanca, como se observa en la Figura 78.

Para garantizar que la palanca disponga solamente de un grado de libertad rotacional, el eje de pivote se sujeta a dos chumaceras de pedestal (Figura 80).

Apuntado a que la palanca sea de sencilla manipulación, permitiendo una paulatina graduación de la intensidad del sismo, es necesario que ésta oponga cierta resistencia a ser desplazada. Adicionalmente es conveniente que al ser soltada por el usuario, la palanca retorne a su punto inicial, evitando desgaste innecesario de la mesa. Es muy factible que algunos usuarios abandonen la Experiencia dejando accionada la palanca.

Esto se soluciona por medio de un sistema de resorte y amortiguación. El resorte es ubicado 9cm sobre el eje de pivote de la palanca, sujetado como se observa en la Figura 81 a la superficie que soporta la palanca. Así

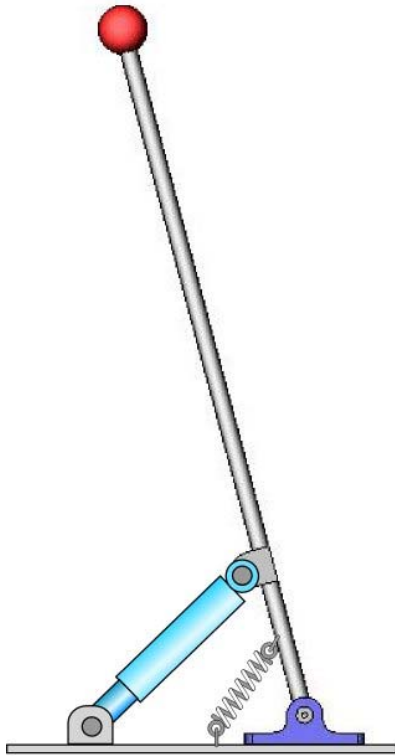


Figura 81. Palanca con resorte y amortiguador.

garantiza que la palanca siempre retorne a su punto inicial, al mismo tiempo que opone cierta resistencia al avance de ésta⁵.

Un amortiguador⁶, ubicado a 20cm del eje de pivote, sujetado de la misma manera, garantiza que el movimiento tanto de avance, como de retorno se haga lentamente (Figura 81).

Este montaje permite un desplazamiento angular a la palanca de 22°. La sincronización del desplazamiento de la palanca con la intensidad del sismo requiere una prueba que involucra mesa vibradora, fuente DC variable y palanca, la cual se observa en el siguiente capítulo (página 123).

9.2.1.2. Ubicación de la palanca

La palanca se ubica en uno de los lados de la mesa vibradora, a cuya cubierta se le adiciona un armazón cuyo fin es soportar y proteger el mecanismo de la palanca y la fuente DC variable. Se propone en perfil tubular diámetro 1½", calibre 14 en acero 1020, cubierto con lámina de acero 1020 calibre 16. Éste se observa en la Figura 82.

⁵ Se utiliza un resorte de tensión de un valor k de 10N/mm de 80mm de longitud.

⁶ Se utiliza un amortiguador delantero de motocicleta Auteco Plus.

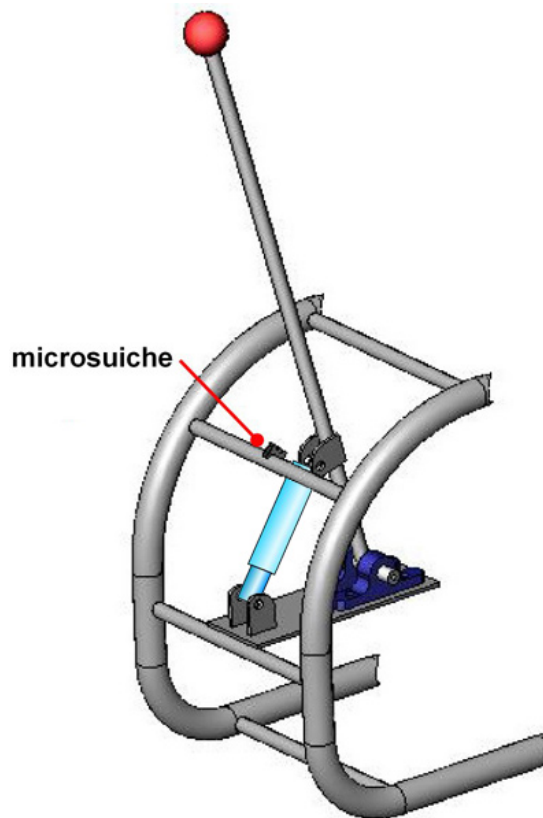


Figura 82. Estructura de la palanca y ubicación del *microsuiche*.

La fuente DC variable cuenta con un *microsuiche* normalmente cerrado, que se ubica en el punto inicial de la palanca, sobre la estructura, de manera que mientras la palanca permanezca inactiva el circuito se encuentra abierto (Figura 82).

9.2.2. Reinicio del juego y almacenamiento de módulos

Cuando un usuario aborda la Experiencia debe tomar las piezas de algún lugar, para armar el edificio. Es necesario pensar que cuando un usuario abandona la Experiencia luego de jugar, las piezas deben quedar disponibles para que el nuevo visitante las utilice. Resulta importante que el reinicio no dependa de los usuarios, sino que lo realice la máquina misma.

Siendo que el usuario aumenta gradualmente la intensidad del sismo, es bastante factible que la mayoría de los edificios se derrumben antes de alcanzar la máxima intensidad o que suceda durante esta (ver pruebas de usuario, siguiente capítulo). Así, en la mayoría de los casos el edificio se derrumba al finalizar el ciclo de uso de un usuario.

En casos excepcionales en que el edificio permanece en pie, se hace necesario que el siguiente usuario o bien un guía desarme el edificio. Mientras permanece

en pie, este edificio puede convertirse en un incentivo hacia los demás visitantes, que descubren que alguien logró que el edificio se sostenga en pie en el sismo máximo.

Teniendo en cuenta las dimensiones de la mesa vibradora y las de cada uno de los módulos, al derrumbarse el edificio la mayoría de las piezas han de caer al suelo. De esta situación problemática surge la solución misma: el almacenamiento de los módulos se hace en el piso mismo, el cual se delimita con una barrera de 80cm de altura para que las piezas que caen al suelo no salgan del área de la Experiencia (Figura 83).

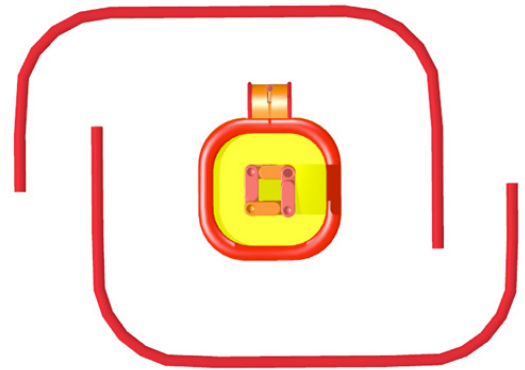


Figura 83. Experiencia interactiva delimitada con barrera (vista superior).

9.2.3. Ayudas al usuario

Para que el usuario tenga nociones de la forma del edificio y de la ubicación de éste, es necesaria alguna ayuda además de una clara explicación gráfica. Sobre la superficie de la mesa se sujeta una base que tiene cuatro agujeros semiesféricos, iguales a los del módulo, de manera que el edificio se pueda sujetar a ésta por medio de las esferas de refuerzo (haciendo las veces de cimientos). Se fabrica en madera con recubrimiento de caucho.

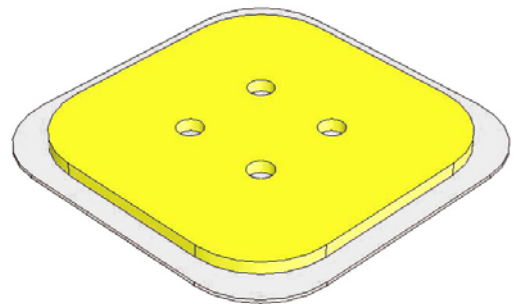


Figura 84. Base sobre la que el usuario construye el edificio.

10. VALIDACIÓN DE LA EXPERIENCIA INTERACTIVA

Luego de tener las partes de la Experiencia desarrolladas e integradas como una propuesta coherente, hace falta sincronizarlas en lo práctico. Esto implica que la palanca accione la mesa vibradora de acuerdo con la escala de intensidad definida y que según esta intensidad la edificación construida por el usuario con el set de módulos se vea coherentemente afectada. Para esto se hacen pruebas de funcionamiento.

Adicionalmente se hacen pruebas de usuario como validación desde la perspectiva de éste. Finalmente se elabora una estimación de los costos de producción de la Experiencia.

10.1. PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

10.1.1. Sincronización mesa vibradora-palanca

Es necesario realizar una prueba para garantizar la sincronización entre el potencial eléctrico entregado por la fuente variable, el movimiento causado en la mesa vibradora y el desplazamiento de la palanca.

Inicialmente es necesario observar la relación entre la frecuencia de rotación y el potencial eléctrico entregado por la fuente DC variable¹. Este se observa en la

¹ Esto con corriente ilimitada, por cuanto se espera que el motor reductor, con la masa excéntrica, demanda hasta 6A. La capacidad de la fuente es de 15A.

Tabla 25. Relación de potencial eléctrico y frecuencia de rotación del motor reductor.

| Voltaje (V) | Frecuencia (Hz) |
|-------------|-----------------|
| 1 | 0 |
| 2 | 0 |
| 2,8 | 0,5 |
| 4,4 | 0,8 |
| 5,5 | 1,0 |
| 7,2 | 1,3 |
| 8,3 | 1,5 |
| 9,9 | 1,8 |
| 11,0 | 2,0 |
| 12,7 | 2,3 |

Nota: El voltaje máximo entregado por la fuente es 12,7V.

Tabla 26. Equivalencia de la intensidad de sismo percibida por el usuario con el rango de frecuencia rotación del motor reductor.

| Intensidad de sismo | Rango de Frecuencia (Hz) |
|---------------------|--------------------------|
| 6 | 0,4 a 0,5 |
| 7 | 0,6 a 1,3 |
| 8 | 1,4 a 1,8 |
| 9 | 1,9 a 2,2 |
| 10 | 2,3 |

Tabla 25. Se considera entonces el valor mínimo de funcionamiento 0,5Hz y el máximo 2,3Hz.

El siguiente paso es determinar el desplazamiento angular de que dispone el montaje de la palanca (capítulo 9, página 120). Este es igual a 22°.

Se realiza un ajuste en la fuente DC variable para que el desplazamiento angular de la resistencia variable que regula el voltaje sea aproximadamente igual al de la palanca. Los detalles de este ajuste se encuentran en el Anexo 4.

La equivalencia entre la frecuencia de rotación del motor reductor y el valor de la intensidad del sismo percibido por el usuario se expone en la Tabla 26.

10.1.2. Sincronización mesa vibradora-set de módulos

Para determinar el número de esferas de refuerzo que se debe entregar al usuario, es necesario evaluar las diversas posibilidades de refuerzo que diferentes cantidades de éstas permiten y el comportamiento frente a sismos de diferente intensidad.

Se construye inicialmente un edificio con la totalidad de esferas de refuerzo que recibe (12 módulos, 24 esferas). Se somete durante 45 segundos a un sismo de intensidad 10, esto se repite 3 veces. Lo mismo se hace con 22, 20, 18, 16, 14 y 12 esferas, variando la posición de éstas. Los resultados detallados de esta prueba se observan en el Anexo 5.

Luego de esta prueba se concluye que se deben entregar 16 esferas de refuerzo al usuario. Este número impone reto, pues son pocas configuraciones las que permiten que el edificio resista un sismo de intensidad 10.

Otras conclusiones importantes son:

- Si se retira alguna esfera del último nivel ², éste se derrumba fácilmente.
- Si se quitan dos esferas del mismo nivel, en los niveles 3, 4 ó 5, el edificio cae fácilmente.
- El edificio se puede dejar sin las bolas de la base (cimientos) y resiste mejor el sismo, siempre que esté adecuadamente reforzado en la parte superior.
- Si se retiran dos esferas que sujetan un mismo módulo, en los niveles 4 y 5, es muy probable que no resista el sismo.

10.2. PRUEBAS DE USUARIO

Luego de las pruebas de funcionamiento, se realiza la validación con usuarios. Esto utilizando un prototipo de la mesa vibradora, controlable con palanca, desarrollado para la Universidad EAFIT (ver Anexo 6). Este se muestra en la Figura 85. Se utiliza también el prototipo del set de módulos, *rotomoldeado* en PE por Rotoplast S.A.

² El edificio cuenta con 6 niveles donde es posible poner esferas de refuerzo (se cuenta desde el piso, el nivel superior no se cuenta)



Figura 85. Mesa vibradora desarrollada para la Universidad EAFIT.

Para la validación con usuarios se recurre a personas de diferentes contextos: niños estudiantes de colegio, jóvenes estudiantes universitarios, profesores, adultos de oficios ajenos a diseño.

Cada usuario (o grupo de éstos) recibe instrucciones básicas sobre la “misión” que tienen: Construir un edificio con los doce módulos, de base cuadrada, de tres pisos. El edificio debe ser reforzado con 16 bolas, teniendo en cuenta que no hay tantas bolas como espacios disponibles para éstas. Luego deben someterlo a un sismo creciente, accionando la palanca, y observar hasta que intensidad de sismo resiste.

Luego de las pruebas se obtienen las siguientes conclusiones:

- El juego es cautivador y genera reto en los usuarios.

- El set de módulos cumple bien su función y su manera de uso es bastante intuitiva.
- Los niños más pequeños (menores de 12 años) disfrutaron más armando construcciones de forma libre y reforzándolas con las pelotas, que armando el edificio planteado para la Experiencia. El nivel logrado al accionar la palanca funciona también para esta opción, pues permite observar cuánto resiste la construcción elaborada.
- El sismo, en relación con su manera de sacudir el edificio, se percibe cercano a los reales.
- Los edificios reforzados por los usuarios generalmente resisten hasta intensidad 8. Son pocos los que alcanzaron intensidad 9, y ninguno 10. Esto genera reto y deseo de reintentar en algunos de ellos.
- En ocasiones sobran pelotas, algunos usuarios no creen necesitar las 16 bolas en la primera ocasión.
- La palanca da buen resultado, pues no permite que se alcance inmediatamente el máximo sismo, sino que se hace gradualmente.
- La fuerza que opone la palanca es adecuada para niños mayores de 8 años.



Figura 86. Pruebas de usuario

10.3. COSTOS DE PRODUCCIÓN

A continuación se hace un resumen de los costos³ para la Experiencia interactiva desarrollada, teniendo en cuenta únicamente materiales y producción.

10.3.1. Costo del set de módulos

El costo de producción del molde es \$ 2 300 000, teniendo en cuenta:

| | |
|------------------------|--------------|
| Fabricación del modelo | \$ 1 500 000 |
| Fundición del molde | \$ 600 000 |
| Acabados del molde | \$ 200 000 |

El costo de producción de cada pieza en PE, realizado por Rotoplast S.A. es (LÓPEZ, J. 2006):

| | |
|---|----------------------|
| Para prototipos (primer lote de producción) | \$ 28 000 cada pieza |
| Para producción | \$ 13 000 cada pieza |

El costo de cada esfera de refuerzo es de \$200, producidas por Inteco S.A.. Se recomienda disponer de inventario suficiente de éstas para reposición. Se estima una cantidad de 50 esferas por set de módulos.

De esta manera, el primer set de módulos (12 unidades más 12 para reposición, más 50 esferas) tiene un costo de \$ 672 000.

Futuros set de módulos tienen un costo de \$ 312 000 (16 unidades más 50 esferas).

³ Estos costos incluyen IVA.

10.3.2. Costo de la mesa vibradora

Los costos para la mesa vibradora pueden tener un mayor margen de error por la cantidad de piezas que la componen. Abarcan materiales más producción. Incluyen además mecanismo de la palanca, la fuente variable y la delimitación del espacio de la Experiencia interactiva.

| | |
|--|---------------------|
| Estructura superior | \$ 1 000 000 |
| Superficie horizontal | \$ 500 000 |
| Cubierta | \$1 000 000 |
| Resortes | \$ 600 000 |
| Elementos mecánicos comerciales (Acople, chumaceras, amortiguador, biela) | \$ 100 000 |
| Motor | \$ 200 000 |
| Fuente DC variable | \$ 150 000 |
| Masa excéntrica | \$ 100 000 |
| Ejes torneados | \$ 80 000 |
| Palanca | \$ 80 000 |
| Base del edificio | \$ 100 000 |
| Tornillería | \$ 100 000 |
| Barreras para delimitación del espacio | \$ 1000 000 |
| Total | \$ 5 010 000 |

10.3.3. Costo total de la Experiencia propuesta

Se estima el costo de producción de la Experiencia interactiva en \$ 7 982 000.

RESULTADOS

Luego del presente proyecto se obtiene una propuesta para la Experiencia interactiva que trata el tema del comportamiento de edificaciones frente a sismos, consistente en:

- Una mesa vibradora acompañada de una palanca que permite variar la intensidad de la sacudida.
- Un set de módulos, compuesto por 12 módulos para armar un edificio y 16 pelotas para reforzarlo.
- Una dinámica de juego que guía las actividades en la Experiencia Interactiva.

Elementos validados funcionalmente y en su relación con el usuario.

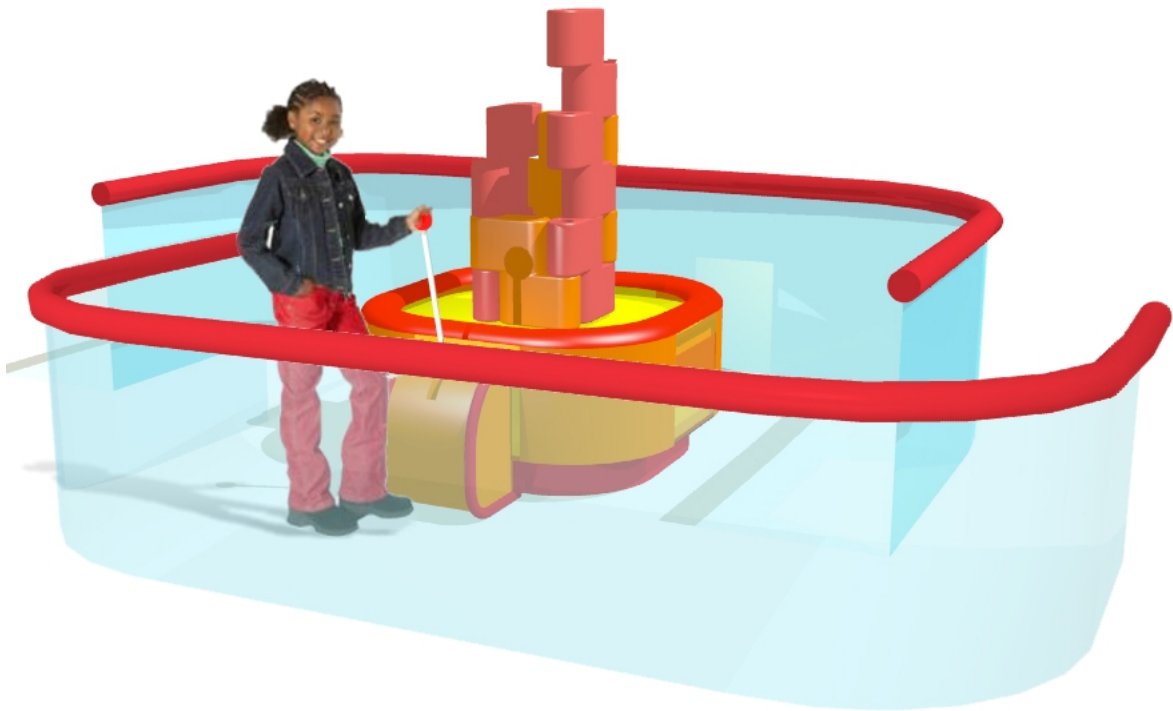


Figura 87. Experiencia interactiva propuesta.

Como resultados adicionales:

- Se presenta una propuesta para organización del espacio de la Experiencia dentro de la Sala Colombia Geodiversa, que permite al mismo tiempo almacenar y proteger el set de módulos.
- Se sugiere una idea para el contenido teórico de la Experiencia, como información complementaria a ésta (ver marco conceptual, página 42).

CONCLUSIONES

- El set de módulos cumple su función correctamente, teniendo gran impacto sobre usuarios y despertando inquietudes en ellos. En general, los niños menores de 12 años disfrutaban más construyendo edificaciones libremente, mientras que niños mayores de esta edad y adultos asumen el reto impuesto por el juego.
- Se ha logrado una solución sencilla y de bajo costo para el mecanismo de la mesa vibradora, el cual simula adecuadamente un sismo real (BEDOYA, G. 2006).
- La sincronización entre el set de módulos y la mesa vibradora, mediada por la dinámica de juego, se ha logrado de forma exitosa. Los usuarios tienen la posibilidad de armar configuraciones de refuerzo más *sismorresistentes* que otras.
- La dinámica de juego propuesta funciona. Adicionalmente da la posibilidad de un juego más libre, en que los usuarios construyan edificios de cualquier forma, que una vez reforzados son sometidos a un sismo que crece gradualmente, evaluando así la *sismorresistencia* del mismo.
- Siendo una herramienta bastante útil, la modelación virtual de un sistema oscilatorio que utiliza resortes puede presentar desviaciones considerables. Por esta razón es necesario una prueba real para el desarrollo de mecanismos que requieran una mayor precisión. En el presente caso esta

desviación es poco perjudicial por tratarse de una máquina de carácter lúdico.

- Para que el desarrollo de un juego sea exitoso, es necesaria una frecuente validación del mismo con potenciales usuarios a lo largo del proceso.
- La Experiencia propuesta permite intuir sistemas sismorresistentes de tecnología reciente, como es el sistema que desconecta el edificio del suelo por medio de discos de baja fricción, permitiendo que el edificio “patine” sobre el suelo durante un sismo (JARAMILLO, J. 2006).
- El proceso de *rotomoldeo* es bastante compatible con productos de carácter recreativo. Especialmente respecto a resistencia a compresión e intemperie. Localmente está bastante desaprovechado en este ámbito.
- Si bien resulta compleja, la aplicación de una metodología de diseño de producto al desarrollo de una dinámica de juego (requerimientos, generación de alternativas, evaluación y selección) arroja resultados satisfactorios.
- Aunque las piezas del set de módulos tienen una masa de 700g (superando la especificación de 600g), gracias a su volumen cuentan con una densidad baja. Luego de las pruebas de usuario se evidencia que los módulos resultan fáciles de manipular.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda utilizar en la experiencia un piso que absorba la energía de impacto de las piezas del set de módulos al caer (de caucho o de plástico). Así se puede lograr una mayor vida útil de estas.
- Si se quiere una Experiencia de mayor impacto, es preferible que la mesa vibradora sea una plataforma de mayor tamaño (aproximadamente 2m x 2m), permitiendo que las personas también experimenten el sismo. El mecanismo desarrollado en este proyecto es viable de ser adaptado a este tamaño.

Esta propuesta funciona mejor si la mesa vibradora tiene una menor altura. Para esto la estructura de la mesa vibradora se debe empotrar en una cavidad en el suelo, de una profundidad aproximada de 40cm. Esto aproxima los niveles del piso y la superficie que tiembla, facilitando el acceso de los usuarios y que éstos alcancen más fácilmente las piezas que se salgan de la mesa.

- Para mejorar la calidad de las piezas producidas por *rotomoldeo*, se recomienda que el molde cuente con dos *respiraderos* (en vez de uno) en los dos insertos de las caras exteriores del molde. Adicionalmente se recomienda cubrir con cinta de teflón la superficie de contacto entre insertos y molde, donde se presenta fuga de gases durante el enfriamiento. Todas estas medidas apuntan a reducir la cantidad de poros en las piezas.

BIBLIOGRAFÍA

1. ALONSO, Marcelo y Rojo, Onofre. Física – Mecánica y termodinámica. Addison-Wesley Iberoamericana. Wilmington, E.U.A. 1986.
2. ANONIMO 1 [en línea].
<http://www.terra.es/personal/agmh25/volcanes/sismo1.htm>
[Revisión: Abril 2 de 2006]
3. ASOCIACION COLOMBIANA DE INGENIERIA SISMICA (AIS). Manual De Construcción, Evaluación Y Rehabilitación Sismo Resistente De Viviendas De Mampostería. 2001.
4. BEDOYA, Geovanny. Geólogo. Entrevista, Febrero 8 de 2006.
5. BETANCOURT M., Julián. De Museos y juegos. En: Museolúdica N°1. 1998.
6. BIBLIOTECA VIRTUAL DE LA UPC. [en línea]
<http://biblioteca.upc.es/PFC/arxiu/migrats/36067-12.pdf>
[Revisión: Junio 2 de 2006]
7. BOTERO, Juan Carlos. Entrevista, mayo 20 de 2006.
8. CALERO, Roque; Casta, José Antonio. Fundamentos de mecanismos y máquinas para ingenieros. McGraw Hill. Madrid. 1999.
9. CASTAÑEDA, Leonel. Entrevista, marzo 18 de 2006.
10. CENTRO DE LA CONSTRUCCION SENA Antioquia, Guía de Estudios. Construcción de casas sismorresistentes de uno y dos pisos. Universidad Nacional de Colombia, 2000
11. CÓRDOBA D. Fabio. Una idea llega. En: Museolúdica N°4. Página 58. 2000.
12. CRAIG, Roy R. Jr. Mecánica de Materiales. Grupo Patria Cultural, México. 2002.

13. CTA (Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia). Parque Explora: El gran proyecto educativo, cultural y urbano de los antioqueños de cara al siglo XXI. Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia. Medellín. 2000.
14. ESCOBAR, Gonzalo. Manual de geología para Ingenieros Universidad Nacional de Colombia. Manizales. 2003.
15. FAULTLINE Seismic science at the Epicenter. [en línea]
<http://www.exploratorium.edu/faultline/index.html>
[Revisión: noviembre25 de 2005].
16. FLORES, Rodrigo. Ingeniería Sísmica en Chile. [en línea]
<<http://www2.ing.puc.cl/~iing/ed428/rodrigoflores.html>> [consulta: 26 de octubre de 2005]
17. GARCÍA, Juan Diego. Encargado Centro de máquinas Universidad EAFIT. Entrevista. Junio 3 de 2006.
18. GÖBEL, Nana y McAlice, Jon. Catálogo de la exposición “Pedagogía Waldorf” celebrada en el marco de la 44º Conferencia sobre Educación de la UNESCO: 3 a 5 de octubre de 1994. Ginebra. Editorial Freude der Erziehungskunst Rudolf Steiners. Paginas: 26,48.
19. GÓEZ, Andrés. Integrante del equipo de museografía del proyecto de Explora. Entrevista. Febrero 15 de 2006.
20. GÓMEZ, Fernando. Ingeniero Mecánico. Entrevista. Julio 24 de 2006.
21. GONZALEZ, Hector; Cardona, J. Fabio y Monroy, Gustavo. Diseño de un banco de pruebas de desbalanceo y desalineamiento mecánico. En: Scientia et Technica N° 28. UTP. Pereira. 2005.
22. JARAMILLO, Juan Diego. Phd. Ingeniería Sismorresistente. Entrevista, marzo 20 del 2006.
23. JARAMILLO, Ricardo. Especialista en Mantenimiento Industrial. Entrevista, abril 3 de 2006.
24. KENT, William. Mechanical engineers handbook, Design and production. John Wiley & sons, New York. 1950.

25. LÓPEZ, Jayson. Ingeniero de Planta de Rotoplast S.A. Entrevista, abril 18 de 2006.
26. MAYA, Tita. Pedagoga. Mayo 4 de 2006.
27. MCEER (Multidisciplinary Center of Earthquake Engineering Research) [en línea] <http://mceer.buffalo.edu/education/k-2/exercises/shtable.asp#top> [Revisión: noviembre25 de 2005].
28. MEJÍA, Luis Gonzalo. Notas sobre diseño sismorresistente para casas de 1 y 2 pisos. Medellín, Luis Gonzalo Mejía C. y Cia. Ingenieros Civiles.
29. MTS, High Performance Seismic Simulations. [en línea] <<http://www.mts.com/aesd/Seismic.htm>>. [22 de octubre el 2005]
30. MUÑOZ, Ana María; Giraldo, Carolina. Mejoramiento del proceso de diseño y fabricación de prototipos de mangos de la línea de metálicos de Imusa. Proyecto de grado. Universidad EAFIT. Medellín 2005.
31. PÁRAMO, Ernesto. El conocimiento puede ser contagioso. El papel de los museos en la cultura científica. [en línea] < <http://www.imim.es/quark/28-29/028118.htm>> [consulta : 26 de octubre de 2005]
32. PATIÑO, Luis Fernando. Metodología para el diseño de objetos plásticos de uso domestico. Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín. 2005.
33. ROLDAN, Andrés. Director museografía Parque Explora. Entrevista, Marzo 25 de 2006.
34. RUIZ, Alejandro. Integrante del grupo de Investigación en Mecatrónica. Universidad EAFIT. Entrevista. Julio 25 de 2006.
35. SARRIA, Alberto. Ingeniería Sísmica, 2ª Edición. Santa Fe de Bogotá, Editorial Presencia, 1995.
36. THOMSON, William y Rincon Castell, Humberto. Teoría de Vibraciones: Aplicaciones. Mexico : Prentice Hall, 1982.
37. URIBE E, Álvaro. Arquitecto. Entrevista, Marzo 5 de 2006.

ANEXO 1. Análisis de soporte de la mesa vibradora con cuatro columnas de acero.

Partiendo de los siguientes valores:

$$r_1 = 20\text{mm}$$

$$m_1 = 100\text{kg}$$

Y teniendo en cuenta que se espera que el movimiento oscilatorio de la superficie horizontal alcance aceleraciones de 1g en un eje del plano horizontal, se calculan las dimensiones de cada una de las columnas soportan la superficie horizontal.

Siendo la aceleración tomada para calcularlas de 1g ($9,8\text{m/s}^2$), es posible representar la situación como una viga soportando un peso en un extremo, tal como lo ilustra el diagrama. Para calcular la deflexión δ se utiliza la ecuación:

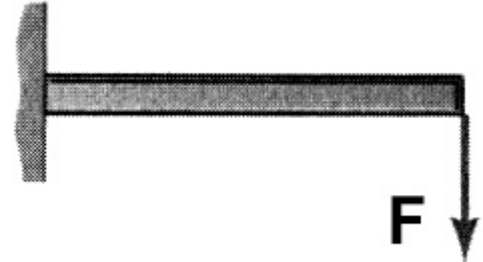


Figura. Viga sometida a fuerza F.

(Fuente: CRAIG, R. 2002)

$$\delta = F \cdot L^3 / 3 E \cdot I$$

Donde F es la fuerza causada en el extremo de la viga, L la longitud de la viga, E el módulo de elasticidad del material, I el momento de inercia (para el caso de una viga de perfil cilíndrico $I = \pi \cdot d^3 / 32$, siendo d el diámetro de la columna).

Luego de reemplazar I por su equivalente y de despejar d, resulta:

$$d = \sqrt[3]{(F \cdot L^3 / (3\pi E \cdot \delta / 32))}$$

Utilizando un valor para F de 245N (equivalente a $\frac{1}{4}$ del peso de la mesa, que es lo que soporta cada columna).

Tomando L de 0,4m que es una longitud adecuada para lograr la altura establecida para la mesa. Tomando el módulo de elasticidad de un acero estructural, 200 GPa (CRAIG, R. 2002). Teniendo en cuenta que $\delta = r_1$.

Resulta entonces que $d = 2,37 \text{ mm}$.

A esto se hace necesario probar el esfuerzo en el punto de mayor fatiga, que es la base de la columna. Partiendo de la ecuación para calcular el esfuerzo (JARAMILLO, R. 2006):

$$S = M \cdot d / I$$

Donde M es el torque aplicado en el punto de mayor fatiga (245N a 0,4m), resulta $S = 177,75 \text{ MPa}$.

Teniendo en cuenta que la resistencia última para el acero estructural es de 400MPa (CRAIG, R. 2002), el esfuerzo causado sobre el punto de mayor fatiga es un 44,4% de la resistencia última del material.

Según el gráfico, se observa que el punto de fatiga se alcanza en aproximadamente 10.000 ciclos, lo cual es bastante poco para la frecuencia de

uso que va a tener la mesa vibradora. Calculando que en una hora sea accionada 10 veces y que en cada una se causen en promedio 100 ciclos, en 10 horas se alcanzará la fatiga. Esto implica reemplazo diario de las columnas.

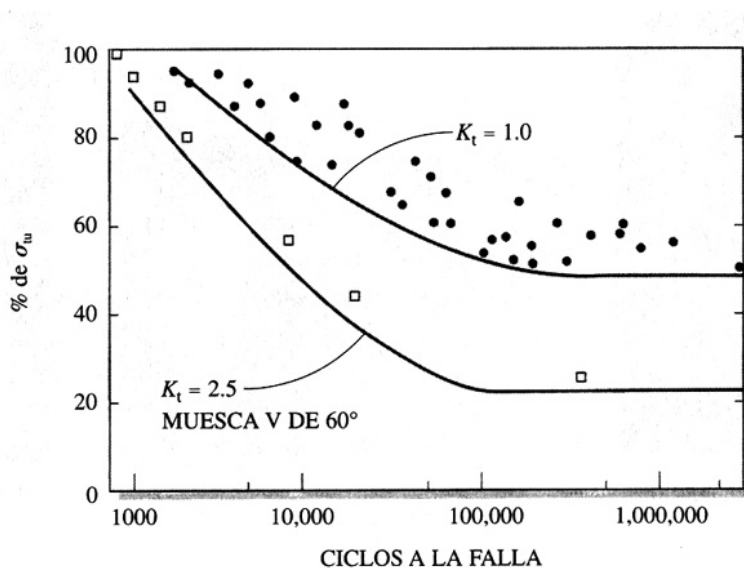


Figura. Diagrama de vida infinita para barra redonda de acero. (Fuente: CRAIG, R. 2002)

ANEXO 2. Resultados de las pruebas de usuario para las alternativas de diseño del set de módulos.

Según el registro en video de cada una de las pruebas de usuario, para las alternativas 7, 8, 8A, 8B Y 8C, se califican de 1 a 10 cada uno de los criterios seleccionados para estas (siendo 1 la calificación más baja y 10 la más alta), asignándole a cada uno cierto porcentaje según su importancia relativa.

| Alternativa 7 | | | | | | | | | | |
|--------------------------|----|---|---|---|---|---|---|---|---|------------|
| Criterios | % | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | Total |
| Facilidad de ensamble | 25 | 5 | 5 | 4 | 3 | 3 | 4 | 5 | 6 | 4,4 |
| Comprensión del problema | 20 | 7 | 9 | 5 | 3 | 6 | 7 | 2 | 7 | 5,8 |
| Tiempo utilizado | 25 | 9 | 4 | 4 | 8 | 1 | 1 | 3 | 1 | 3,9 |
| Explicación del fenómeno | 30 | 8 | 7 | 6 | 6 | 7 | 7 | 5 | 7 | 6,6 |
| Total | | | | | | | | | | 5,2 |

| Alternativa 8 | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------|----|----|---|---|---|----|----|----|----|----|----|------------|-------|
| Criterios | % | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | Total |
| Facilidad de ensamble | 25 | 9 | 9 | 7 | 9 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 9 | 10 | 9,4 |
| Comprensión del problema | 20 | 10 | 8 | 6 | 6 | 6 | 7 | 8 | 7 | 7 | 8 | 8 | 7,4 |
| Tiempo utilizado | 25 | 10 | 9 | 8 | 8 | 7 | 7 | 9 | 9 | 8 | 7 | 7 | 8,1 |
| Explicación del fenómeno | 30 | 7 | 6 | 5 | 5 | 6 | 7 | 7 | 7 | 7 | 6 | 6 | 6,3 |
| Total | | | | | | | | | | | | 7,7 | |

| Alternativa 8A | | | | | | |
|--------------------------|----|---|---|---|---|------------|
| Criterios | % | 1 | 2 | 3 | 4 | Total |
| Facilidad de ensamble | 25 | 6 | 5 | 4 | 4 | 4,8 |
| Comprensión del problema | 20 | 8 | 8 | 8 | 7 | 7,8 |
| Tiempo utilizado | 25 | 5 | 6 | 6 | 4 | 5,3 |
| Explicación del fenómeno | 30 | 6 | 6 | 7 | 8 | 6,8 |
| Total | | | | | | 6,1 |

| Alternativa 8B | | | | | | |
|--------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|--------------|
| Criterios | % | 1 | 2 | 3 | 4 | Total |
| Facilidad de ensamble | 25 | 2 | 1 | 2 | 3 | 2,0 |
| Comprensión del problema | 20 | 5 | 5 | 5 | 4 | 4,8 |
| Tiempo utilizado | 25 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1,3 |
| Explicación del fenómeno | 30 | 3 | 4 | 4 | 3 | 3,5 |
| Total | | | | | | 2,8 |

| Alternativa 8C | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|--------------|
| Criterios | % | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | Total |
| Facilidad de ensamble | 25 | 9 | 10 | 9 | 9 | 7 | 10 | 10 | 9 | 9 | 10 | 9 | 9 | 9,2 |
| Comprensión del problema | 20 | 10 | 10 | 9 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 9 | 10 | 10 | 10 | 9,8 |
| Tiempo utilizado | 25 | 7 | 10 | 8 | 6 | 8 | 9 | 9 | 7 | 7 | 9 | 7 | 8 | 7,9 |
| Explicación del fenómeno | 30 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 9 | 9,9 |
| Total | | | | | | | | | | | | | | 9,2 |

ANEXO 3. Construcción del modelo del molde para el *rotomoldeo* la pieza principal del set de módulos.

Este modelo se desarrolla con una fresadora de control numérico. Se hace el maquinado en bloques de MDF cuyas dimensiones son 460mm x 400mm x 60mm.

Programa: MASTERCAM X
Máquina: MILLTRONICS

| LADO 1 | |
|----------|-----------|
| ARCHIVO | L1 MADERA |
| MATERIAL | MDF |
| Z MAX | -44,925 |

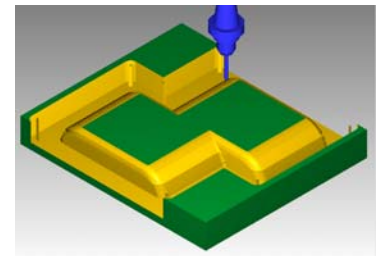


Figura. Lado 1 de la mitad izquierda del molde.

| NUMBER | TOOL TYPE | DIAMETER | FEED RATE | PLUNGE RATE | SPINDLE SPEED | STRATEGY |
|--------|-----------|----------|-----------|-------------|---------------|------------------------|
| T1 | END MILL | 12,7 | 3000 | 3000 | 5000 | Surface rough pocket |
| T2 | BALL MILL | 12,7 | 3000 | 3000 | 5000 | Contour 2D |
| T3 | BALL MILL | 7,9375 | 3000 | 3000 | 5000 | Pocket estándar |
| T4 | BALL MILL | 6,35 | 3000 | 3000 | 6000 | Surface finish contour |

| LADO 2 | |
|----------|-----------|
| ARCHIVO | L2 MADERA |
| MATERIAL | MDF |
| Z MAX | -45,45 |

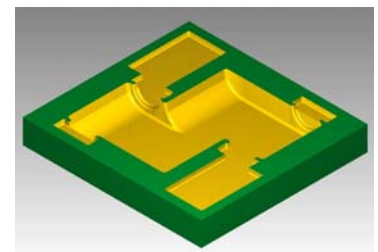


Figura. Lado 2 de la mitad derecha del molde.

| NUMBER | TOOL TYPE | DIAMETER | FEED RATE | PLUNGE RATE | SPINDLE SPEED | STRATEGY |
|--------|-----------|----------|-----------|-------------|---------------|------------------------|
| T1 | END MILL | 12,7 | 3000 | 3000 | 5000 | Surface rough pocket |
| T2 | BALL MILL | 12,7 | 3000 | 3000 | 5000 | Contour 2D |
| T3 | BALL MILL | 7,9375 | 3000 | 3000 | 5000 | Pocket estándar |
| T4 | BALL MILL | 6,35 | 3000 | 3000 | 6000 | Surface finish contour |



Figura. Modelo del molde luego de maquinado.

El maquinado se realiza por ambos lados de la mitad izquierda del modelo del molde. Luego se repite el mismo proceso para la otra la mitad derecha, cuya forma es espejo de la primera.

ANEXO 4. Fuente de alimentación regulable de 15V 15A, para controlar la intensidad de oscilación de la mesa vibradora.

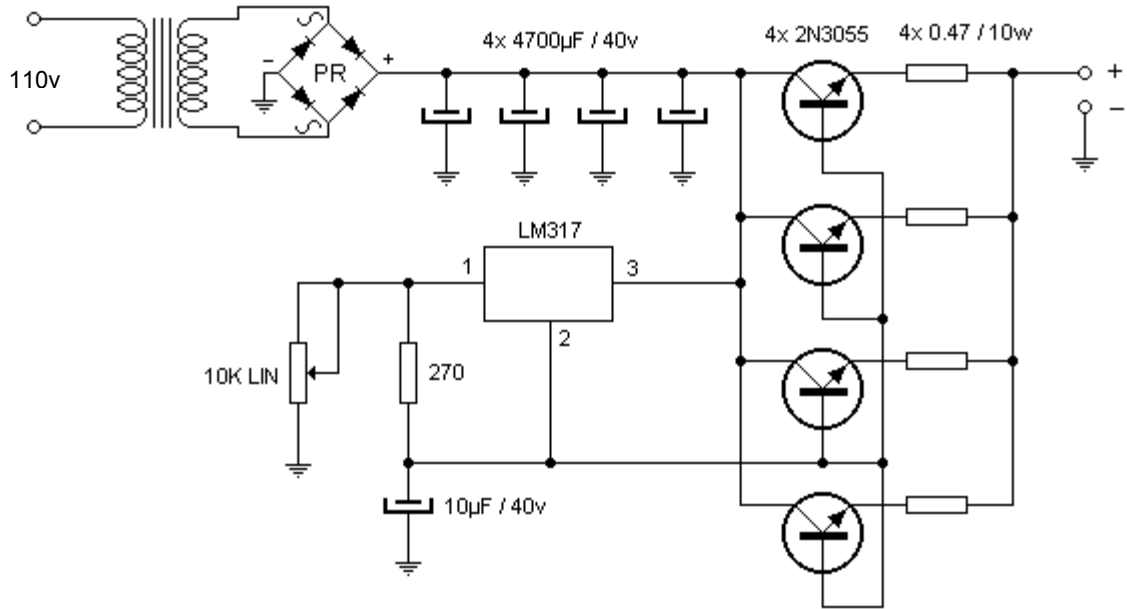


Figura. Esquema del circuito para la fuente. (Fuente: <http://www.electronicafacil.net>)

Para el funcionamiento y regulación del mecanismo de la mesa se realizó el montaje de una fuente que proporciona una salida cuya tensión puede ser ajustada entre 1.5 y 15 voltios y entrega una corriente de 15 amperios.

Como ve observa en el esquema eléctrico la fuente proporciona semejante cantidad de corriente gracias al trabajo en paralelo de cuatro transistores de potencia, los cuales deben ser montados en un buen disipador de calor. El ajuste de tensión lo realiza el integrado LM317, el cual también debe ser disipado mecánicamente.

El transformador debe tener un primario acorde a la red eléctrica, mientras que el secundario debe proporcionar 16 voltios y 15 amperios. Los condensadores electrolíticos deben ser montados en paralelo para sumarse entre sí. El puente

rectificador debe ser de al menos 50 voltios y 20 amperios. Se recomienda usar uno metálico y montarlo sobre el disipador de calor.

Por medio de un potenciómetro lineal de 50K Ω se ajusta la tensión de salida. Las resistencias conectadas a los emisores de los transistores deben ser de al menos 10 vatios.

Dado el tamaño de los componentes una alternativa válida para el montaje de esta fuente es hacerlo sobre una regla de terminales, soldando los componentes pasivos sobre ella, mientras que los transistores, el integrado y el puente rectificador se montan sobre un generoso disipador de calor.

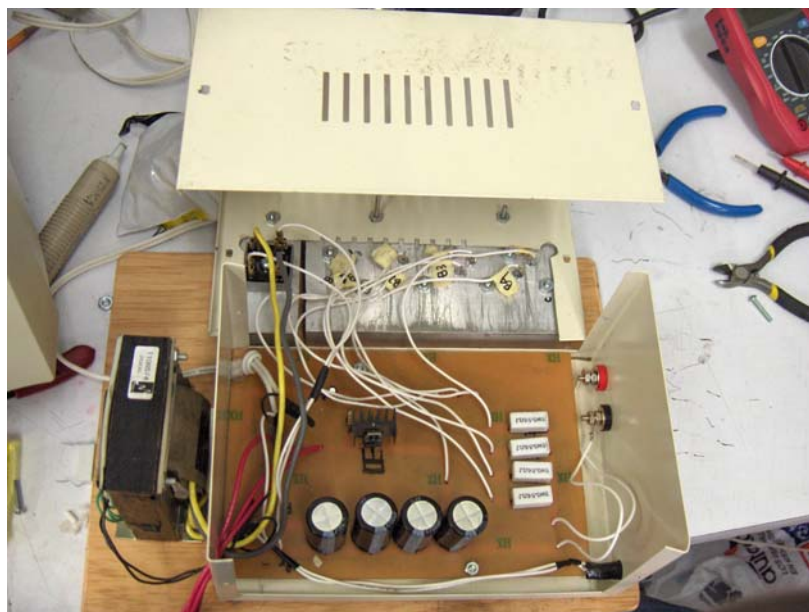


Figura. Fuente de alimentación regulable

Para ajustar el desplazamiento angular del potenciómetro lineal con el de la palanca, se le adiciona una resistencia de 320 Ω en serie. Así se obtienen 3 voltios para un desplazamiento de 30° y 12 voltios para 50°. Resulta un desplazamiento angular total de 20°, bastante aproximado al de la palanca.

ANEXO 5. Prueba de sincronización set de módulos – mesa vibradora.

En la Figura de la derecha se observa el nombre asignado a cada columna (A, B, C, D) y a cada fila (1 a 6).

Para la prueba se somete el edificio reforzado a un sismo de intensidad 10 durante 45 segundos. La siguiente tabla expone los resultados de esta prueba.

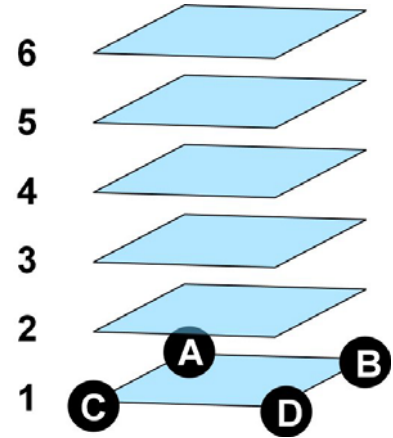


Figura. Esquema de posible ubicación de esferas.

| Número de esferas | Esferas retiradas | ¿Resiste? |
|-------------------|-------------------------------------|-----------|
| 24 | - | sí |
| 24 | - | sí |
| 24 | - | sí |
| 22 | A1,D4 | sí |
| 22 | C2,D5 | sí |
| 22 | B6, C6 | no |
| 20 | B1,C1,A5,D5 | no |
| 20 | A1,D1,C1,D1 | sí |
| 20 | A1,D2,C3,B4 | sí |
| 18 | A1,B2,C3,D4,A5,B6 | no |
| 18 | A1,D1,B2,C3,D4,A5 | sí |
| 18 | A1,B1,C1,D1,C3,D5 | sí |
| 16 | A1,B1,C1,D2,C3,A4,B5,D6 | no |
| 16 | A1,D1,C1,D1,B2,C3,A4,D5 | sí |
| 16 | B2,C2,D3,A3,B4,C5,A5,D6 | no |
| 14 | A1,D1,C1,D1,B2,C3,A4,D5,B6,C6 | no |
| 14 | B1,C1,D2,C2,A3,D3,B4,C4,A5,D5 | no |
| 14 | A1,B1,C2,D2,A4,B4,C5,D5,A6,D6 | no |
| 12 | A1,D1,B2,C2,A3,D3,B4,C4,A5,D5,B6,C6 | no |
| 12 | A1,D1,C1,D1,B2,C2,A3,D3,B4,C4,A5,D5 | no |
| 12 | A2,B2,C3,D3,A4,B4,C5,D5,A6,B6,C6,D6 | no |

ANEXO 6. Terrestre - La Tortuga que Tiembla. Proyecto desarrollado para el departamento de Comunicación y Cultura de la Universidad EAFIT.

Universidad de los Niños es un proyecto realizado por la Universidad EAFIT que busca acercar niños entre 7 y 14 años de edad al mundo de la Universidad, por medio de talleres que responden preguntas planteadas por los mismos niños. Entre ellas se encuentran ¿Por qué existen las palabras? ¿Por qué debemos obedecer? ¿Por qué la tierra tiembla?

Detectando la necesidad de un stand promocional para el proyecto Universidad de los Niños, y aprovechando la afinidad temática del presente proyecto con uno de los talleres (¿Por qué la tierra tiembla?) se hizo una propuesta de stand denominado “Terrestre - La Tortuga que Tiembla”. Este se compone de una mesa vibradora redonda (la cual representa el caparazón de la tortuga), una canasta (la cabeza) y cuatro columnas informativas (patas de la tortuga). Todo esto sobre un tapete cuya forma representa la silueta de una tortuga, el cual cumple la función de delimitar el espacio del stand.

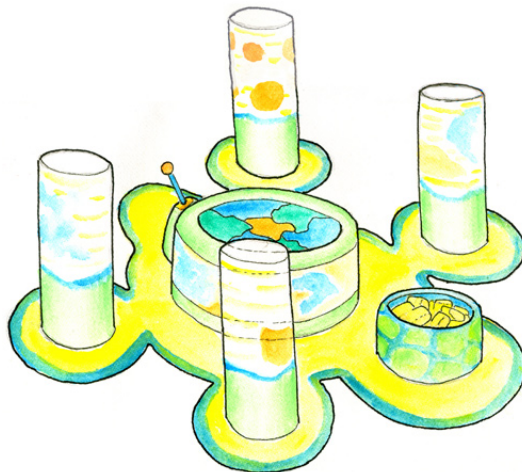


Figura. Propuesta para Terrestre - La Tortuga que Tiembla.

Los prototipos desarrollados para el presente proyecto hacen parte del stand. En la imagen se observa la propuesta inicial entregada al departamento de Comunicación y Cultura. Actualmente se encuentra en proceso de desarrollo.

ANEXO 7. Planos.