



Estudio del comportamiento sísmico de contenidos de uso típico en el Hospital General

Docente Ambato

Sarmiento Paspuel, Oscar Stiven

Departamento de Ciencias de la Tierra y de la Construcción

Carrera de Ingeniería Civil

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero Civil

Ing. Haro Báez, Ana Gabriela, PhD.

13 de enero del 2021

Document Information

Analyzed document	Tesis - Stiven Sarmiento.pdf (D90490942)
Submitted	12/22/2020 5:50:00 PM
Submitted by	
Submitter email	ossarmiento@espe.edu.ec
Similarity	2%
Analysis address	agharo.espe@analysis.arkund.com

Sources included in the report

	Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE / Ballesteros Salazar Kevin & Caizaguano Montero Diego URKUND.docx	
SA	Document Ballesteros Salazar Kevin & Caizaguano Montero Diego URKUND.docx (D77551559) Submitted by: dgcaizaguano@espe.edu.ec Receiver: agharo.espe@analysis.arkund.com	 8
SA	TESIS_RENGIFO-MERA.docx Document TESIS_RENGIFO-MERA.docx (D64022677)	 1
SA	20171205 Prisc. Chamarro_ Gab. Coronel.pdf Document 20171205 Prisc. Chamarro_ Gab. Coronel.pdf (D33349128)	 2

Firma

ANA GABRIELA HARO BAEZ Digitally signed by ANA GABRIELA HARO BAEZ
Date: 2021.01.13 17:16:17
-05'00'

Ing. Haro Báez, Ana Gabriela, PhD.

C.C:1713500302



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y DE LA CONSTRUCCIÓN

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, "**Estudio del comportamiento sísmico de contenidos de uso típico en el Hospital General Docente Ambato**" fue realizado por el señor **Sarmiento Paspuel, Oscar Stiven**, el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 13 de enero del 2021

Firma

ANA GABRIELA
HARO BAEZ

Digitally signed by ANA
GABRIELA HARO BAEZ
Date: 2021.01.13 17:16:47 -05'00'

Ing. Haro Báez, Ana Gabriela, PhD.

C.C:1713500302



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y DE LA CONSTRUCCIÓN

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Yo, **Sarmiento Paspuel, Oscar Stiven**, con cédula de ciudadanía n° 0401870803, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación "**Estudio del comportamiento sísmico de contenidos de uso típico en el Hospital General Docente Ambato**" es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 13 de enero del 2021

Firma

Sarmiento Paspuel, Oscar Stiven

C.C: 0401870803



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y DE LA CONSTRUCCIÓN

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Yo, **Sarmiento Paspuel, Oscar Stiven**, con cédula de ciudadanía n° 0401870803, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **"Estudio del comportamiento sísmico de contenidos de uso típico en el Hospital General Docente Ambato"** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 13 de enero del 2021

Firma

Una firma manuscrita en tinta azul, que parece ser la del Sr. Sarmiento Paspuel, Oscar Stiven, sobre una línea horizontal.

Sarmiento Paspuel, Oscar Stiven

C.C: 0401870803

Dedicatoria

Dedicado a mis padres Alba y Oscar, quienes siempre me han apoyado e inculcado los valores y principios que han convertido en la persona que soy hoy, y que me han permitido alcanzar mis más grandes logros.

Dedicado a mi hermano Juan, quien constantemente ha sido parte de mis logros alcanzados en mi vida personal y profesional.

Dedicado a mi familia, abuelos, tíos, y primos, que siempre han estado pendientes de mi trayectoria y han sabido estar ahí para darme ánimos y palabras de aliento.

Oscar Stiven Sarmiento Paspuel

Agradecimiento

Agradecido con mis padres, por brindarme la posibilidad de acceder a una educación y vida de calidad.

Agradecido con la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, por brindarme la oportunidad de formación en esta maravillosa profesión de la Ingeniería Civil.

Agradecido con los docentes de la Carrera de Ingeniería Civil, por su dedicación para transmitir sus conocimientos y experiencias necesarias para mi formación profesional.

Agradecido con la Ing. Anita Haro, PhD. directora de este Proyecto de Titulación, quien constantemente con sus conocimientos impulso el presente trabajo.

Agradecido con mis amigos, Capitán Paul Rodríguez, Capitán Oscar Andachi, Sr. Carlos Ochoa, Srta. Priscilla Carvajal, quienes siempre me brindaron su ayuda incondicional y supieron colaborar significativamente con mi formación profesional y personal.

Agradecido con Daniela, quien me ha brindado palabras de aliento, ayuda, y me ha acompañado durante este proceso de formación.

Agradecido con mis amigos y compañeros, quienes han contribuido en todo este proceso de formación profesional y personal.

Oscar Stiven Sarmiento Paspuel

Índice de Contenidos

	8
Dedicatoria	6
Agradecimiento	7
Resumen.....	18
Abstract	19
Capítulo I.....	20
Generalidades	20
Introducción	20
Antecedentes.....	20
Planteamiento del problema	24
Macro.....	24
Meso	28
Micro	31
Justificación e importancia	35
Objetivos generales y específicos	37
Objetivo General.....	37
Objetivos Específicos	37
Desarrollo	37
Capítulo I	37
Capítulo II	37
Capítulo III	38

Capítulo IV	9
Capítulo IV	38
Capítulo V	38
Capítulo VI	38
Capítulo VII	38
Capítulo II	39
Análisis de la estructura existente.....	39
Introducción	39
Marco Teórico.....	39
Sistemas de un grado de libertad	39
Vibración libre	40
Respuesta a las excitaciones	40
Excitación sísmica	40
Espectro de respuesta.....	41
Espectro de diseño	41
Espectro de diseño elástico horizontal de diseño.....	41
Análisis modal espectral	43
Espectros de aceleración de diseño para el análisis sísmico	43
Espectro DBE	46
Espectro MCE	47
Espectro NEC-15.....	48
Componente vertical del sismo.....	49

	10
Análisis de la respuesta en el tiempo	50
Acelerograma escalado	51
Análisis de la estructura existente	54
Capítulo III	59
Análisis de equipos	59
Introducción	59
Marco teórico	59
Elementos no estructurales	59
Equipos	59
Cuerpo rígido	59
Comportamiento dinámico de cuerpos rígidos	60
Condición de volteo	61
Evaluación y diseño de equipos	61
Modelo de George W. Housner	62
Modelo propuesto por Makris & Roussos	64
Levantamiento de equipos	68
Equipos médicos	68
Equipos hidrosanitarios	72
Equipos eléctricos	73
Resumen de equipos	74
Análisis del comportamiento de equipos	75

	11
Acelerogramas por cada piso	76
Análisis con RMotion	80
Resumen de resultados.....	81
Capítulo IV	83
Diseño de anclajes.....	83
Introducción	83
Marco teórico.....	83
Nivel de rendimiento no estructural	83
Diseño de arriostramiento de componentes no estructurales	84
Cálculo de fuerzas de diseño	85
Fuerzas de diseño sísmico	85
Combinaciones de carga	90
Anclaje de componentes no estructurales.....	91
Anclajes en hormigón o mampostería	91
Componentes mecánicos y eléctricos	92
Equipamiento mecánico.	92
Recipientes de almacenamiento y calentadores de agua	92
Equipos eléctricos y de comunicaciones	93
Contenedores de material peligroso.....	93
Criterios de aceptación	94
Cálculo de anclajes con RMotion	95

	12
Fuerzas estáticas	95
Fuerzas dinámicas	96
Diseño de anclajes	97
Resultados.....	98
Capítulo V	102
RMotion.....	102
Introducción	102
Desarrollo	102
Inicio	102
Modelo Makris	103
Modo Housner	105
Reforzamiento	106
Diseño	107
Ayuda	108
Capítulo VI	110
Guía de ubicación de equipos.....	110
Introducción	110
Resumen	110
Recomendaciones de ubicación.....	110
Anclajes	111
Equipos.....	111

	13
Planta de tratamiento	111
Cisterna	113
Tomógrafo	114
UPS	115
Rayos X	116
Autoclave	116
Equipos móviles	117
Monitor.....	118
Capítulo VII	120
Análisis y discusión de resultados	120
Comportamiento de los equipos	120
Conclusiones	121
Recomendaciones	122
Referencias	124
Anexos	128

Índice de Tablas

Tabla 1 Valores y factores modificados para suelo tipo D.....	46
Tabla 2 Aceleraciones a nivel de piso MCE	58
Tabla 3 Equipos seleccionados	74
Tabla 4 Equipos y variables de estudio	75
Tabla 5 Aceleraciones y periodos a nivel de piso.....	79
Tabla 6 Resultados de análisis de equipos	82
Tabla 7 Coeficientes para equipos	87
Tabla 8 Coeficientes de sitio Fa	88
Tabla 9 Variables para análisis de equipos	98
Tabla 10 Resultados de análisis de equipos	100

Índice de Figuras

Figura 1 Edificio en Ciudad de Concepción en Chile después del sismo de 2010	21
Figura 2 Daño no estructural en hospital de Ecuador	22
Figura 3 Daños en Hospital Solca en Portoviejo, Manabí	23
Figura 4 Inversiones típicas en construcción de edificios	27
Figura 5 Tanque volcado en hospital debido al terremoto de Northridge de 1994.....	27
Figura 6 Daños en Hospital en Chone	29
Figura 7 Hotel afectado por el terremoto de 2016 en Tarqui, Manabí.....	29
Figura 8 Daños en Clínica San Antonio de Portoviejo, Manabí	30
Figura 9 Daños en columna de Hospital H Alcibar después del terremoto de 1998	32
Figura 10 Daños en Hospital Miguel H. Alcibar después del terremoto de 2016	33
Figura 11 Daños en contenidos del Hospital Miguel H Alcibar.....	34
Figura 12 Sistema de 1GDL	39
Figura 13 Espectro elástico horizontal de diseño.....	42
Figura 14 Ubicación del hospital	44
Figura 15 Clasificación de suelos de la Ciudad de Ambato	44
Figura 16 Espectro DBE.....	46
Figura 17 Espectro MCE	47
Figura 18 Espectro NEC-15	48
Figura 19 Fallas geológicas con nivel de amenaza sísmica alta, y moderada.....	51
Figura 20 Registro obtenido de PEER Ground Motion Database	52
Figura 21 Aceleraciones registradas en estación Santa Mónica.....	53
Figura 22 Registro de aceleraciones escalado en ETABS.....	54
Figura 23 Modelo del bloque B	54
Figura 24 Aceleraciones a nivel de piso en Bloque A	55

	16
Figura 25 Aceleraciones a nivel de piso en Bloque B	56
Figura 26 Aceleraciones a nivel de piso en Bloque C	56
Figura 27 Derivas inelásticas por bloques	57
Figura 28 Registro en el tiempo – MCE sintético	57
Figura 29 Características geométricas de un cuerpo rígido.....	60
Figura 30 Modelo de cuerpo rígido	62
Figura 31 Aceleración en terremoto de Michoacán en 1985 y un pulso tipo A	64
Figura 32 Aceleración en terremoto de California en 1979 y un pulso tipo B	65
Figura 33 Aceleración en terremoto de Northridge en 1994 y un pulso tipo C2.....	65
Figura 34 Tomógrafo SIEMENS.....	68
Figura 35 Equipo de Rayos X	69
Figura 36 Esterilizador Matachana.....	70
Figura 37 Ecógrafos marca Mindray	70
Figura 38 Máquina de hemodiálisis marca OCM	71
Figura 39 Planta de ósmosis y filtros de ablandamiento.....	72
Figura 40 Tanque de recirculación.....	72
Figura 41 UPS marca GENERAL ELECTRIC.....	73
Figura 42 Respuesta en el tiempo del nivel N+13.40.....	76
Figura 43 Respuesta en el tiempo del nivel N+8.90.....	77
Figura 44 Respuesta en el tiempo del nivel N+4.40.....	78
Figura 45 Respuesta en el tiempo del nivel N-0.10	79
Figura 46 Equipos analizados según el Modelo de Housner	80
Figura 47 Equipos analizados según el Modelo de Makris & Roussos.....	81
Figura 48 Análisis estático	95
Figura 49 Análisis dinámico	96

	17
Figura 50 Cálculo de anclajes	97
Figura 51 Anclaje seleccionado	100
Figura 52 Ventana de inicio.....	102
Figura 53 Función del modelo de Makris & Roussos.....	103
Figura 54 Función del modelo de George W. Housner.....	105
Figura 55 Función del Reforzamiento ASCE 41 - 17	106
Figura 56 Función de Diseño de anclajes AISC 360.....	107
Figura 57 Función de ayuda.....	108
Figura 58 Anclaje de tanques.....	111
Figura 59 Anclaje de tanques.....	112
Figura 60 Anclaje en cisterna.....	113
Figura 61 Anclaje en equipos delicados.....	114
Figura 62 Anclaje en equipos UPS	115
Figura 63 Anclaje en autoclave	116
Figura 64 Anclaje en equipos móviles.....	117
Figura 65 Anclaje para monitores al techo.....	118
Figura 66 Anclaje para monitores en pared	119
Figura 67 Volcamiento de equipos por nivel	120
Figura 68 Volcamiento de equipos por modelo.....	121

Resumen

Este estudio abordó el comportamiento de elementos no estructurales presentes en hospitales durante un evento sísmico, debido a que terremotos pasados han causado pérdida de vidas humanas, económicas, e interrupciones del funcionamiento dentro de hospitales, siendo estas estructuras esenciales, que deben permanecer en continuo funcionamiento para atender las necesidades de la comunidad. El objetivo de esta investigación fue analizar el comportamiento dinámico de contenidos de uso típico en el Hospital General Docente Ambato. Para su desarrollo se realizó un análisis sísmico a la estructura del hospital, sometida a espectros y registros de aceleraciones pertinentes. Se hizo una selección de equipos presentes en el hospital, estos elementos no estructurales fueron considerados como cuerpos rígidos, y se analizó su respuesta ante aceleraciones transmitidas desde el suelo hacia cada nivel de la estructura, como un movimiento de balanceo; los equipos fueron modelados en base a artículos académicos, normas, y guías de diseño, que permitieron predecir de manera aproximada su comportamiento durante un evento sísmico, que podría suceder en la ubicación del hospital. Finalmente, esta investigación concluyó que un elevado porcentaje de los equipos analizados se vuelcan; por este motivo se diseñaron y recomendaron soluciones que pueden evitar daños, interrupciones del funcionamiento del hospital, y amenazas a la seguridad de sus usuarios.

Palabras clave:

- **MOVIMIENTO DE BALANCEO**
- **DAÑO EN HOSPITALES**
- **CUERPOS RIGIDOS**

Abstract

This study addressed the behavior of non-structural elements present in hospitals during a seismic event, due to the fact that past earthquakes have caused loss of human and economic life, and interruptions of operation within hospitals, these being essential structures that must remain in continuous operation. to serve the needs of the community. The objective of this research was to analyze the dynamic behavior of equipment at the Ambato General Docent Hospital. For its development, a seismic analysis was carried out on the structure of the hospital, subjected to spectra and relevant acceleration records. A selection was made of the equipment present in the hospital, these non-structural elements were considered as rigid blocks, and their response to accelerations transmitted from the ground to each level of the structure was analyzed, such as a rocking movement; The equipment was modeled on the basis of academic articles, norms, and design guides, which made it possible to roughly predict their behavior during a seismic event that could occur at the hospital location. Finally, this research concluded that a high percentage of the analyzed equipment overturn; For this reason, solutions were designed and recommended that can avoid damages, interruptions in the hospital's operation, and threats to the safety of its users.

Keywords:

- **ROCKING MOTION**
- **DAMAGE IN HOSPITALS**
- **RIGID BLOCKS**

Capítulo I

Generalidades

Introducción

El desarrollo de nuevas tecnologías ha permitido la construcción de estructuras cada vez más seguras, y que se adaptan a las nuevas normas y códigos de diseño enfocados en optimizar y mejorar el desempeño de las mismas. Sin embargo, se han registrado numerosos casos en los que un terremoto ha causado grandes afectaciones a los elementos no estructurales de una edificación, esto ha generado cuantiosas pérdidas económicas debido al alto costo de algunos componentes o equipos presentes en edificaciones como hospitales u oficinas, que han sido afectados debido a un mal comportamiento sus elementos no estructurales.

Desde el siglo pasado se han llevado a cabo estudios que han permitido que se desarrollen nuevas normas y códigos de diseño para elementos no estructurales, con la finalidad de reducir los riesgos de: la seguridad de los usuarios de cada edificación, cuantiosas pérdidas económicas, y pérdidas totales o parciales de las funciones de cada edificación. Siendo los hospitales elementos esenciales es pertinente realizar un estudio basado en normas y códigos que permitan reducir los riesgos antes mencionados.

Antecedentes

Se estima que en América Latina aproximadamente el 50% de los hospitales existentes están ubicados en zonas de alto riesgo. Entre 1980 a 1995, un total de 93 hospitales y 538 centros de salud fueron afectados sensiblemente debido a desastres naturales. Esto, no sólo generó una fuerte inversión de los gobiernos para su rehabilitación o reconstrucción, sino que se dejaron de prestar servicios y se

suspendieron temporalmente servicios de salud necesarios para la comunidad (Bambaren et al., 2007).

Figura 1

Edificio en Ciudad de Concepción en Chile después del sismo de 2010



Nota: Tomado de *El mega sismo de Chile de 2010* (p.30), por (Aguar, 2011).

Se realizó una evaluación después del terremoto de San Fernando de 1971 en EEUU, de 50 edificios, que fueron sometidos a un bajo nivel de movimiento, indicó que: ninguno sufrió daño estructural, pero todos sufrieron graves daños a sus elementos no estructurales por lo que quedaron fuera de funcionamiento. En el Hospital Olive View murieron 3 personas, dos pacientes por falla del equipo de apoyo de vida y uno por un golpe producto de una caída de un elemento no estructural, este hospital fue reparado y reforzado estructuralmente en forma considerable, sin embargo, después del sismo de Northridge de 1994 volvió a salir de funcionamiento, esta vez no por fallas estructurales sino por una no estructural. En el terremoto de México de 1985, dos hospitales principales sufrieron daño en equipo por monto de \$ 640 millones de dólares. El hospital de Antofagasta, Chile, durante el terremoto de Julio de 1995, sufrió daños en el

estanque elevado de agua dejando el hospital sin capacidad de recibir nuevos pacientes y con dificultades de funcionamiento (Krauskopf et al., 1996).

El 16 de abril de 2016 ocurrió uno de los peores eventos sísmicos que ha sufrido el territorio ecuatoriano, un terremoto de 7.8 grados en la escala de Richter, que dejó un saldo de 663 fallecidos y 9 desaparecidos. En las primeras 72 horas, 6,274 heridos recibieron atención médica. El terremoto afectó a seis provincias de la costa: Esmeraldas, Manabí, Santa Elena, Guayas, Santo Domingo de los Tsáchilas y Los Ríos. Sin embargo, Manabí y el sur de Esmeraldas fueron las más afectadas (Organización Panamericana de la Salud, 2016).

Figura 2

Daño no estructural en hospital de Ecuador



Nota: Tomado de *Sistematización de la respuesta del sector salud* (p.19), por (Ministerio De Salud Pública del Ecuador et al., 2017).

La infraestructura de salud fue afectada seriamente: 6 hospitales y 14 centros de salud quedaron inoperativos; 15 hospitales y 24 centros de salud sufrieron daños, se

perdieron 537 camas hospitalarias, y equipos de refrigeración quedaron fuera de servicio. Por lo menos 431,954 habitantes de los cantones más afectados de Esmeraldas y Manabí tuvieron acceso limitado a los servicios de salud, o contaron con servicios en condiciones de menor calidad y oportunidad a los previamente existentes. Asimismo, gran parte de los sistemas de agua potable fueron afectados luego del sismo. En términos económicos, se estima que las pérdidas para el país fueron de entre USD 2,000 y 3,500 millones, en el sector salud se estimó una pérdida de USD 169 millones, de los cuales 75.82 % corresponde a los daños registrados en la infraestructura física y el equipamiento de los establecimientos de salud; el resto se distribuye entre los ingresos no percibidos y los costos adicionales (Ministerio De Salud Pública del Ecuador et al., 2017).

Figura 3

Daños en Hospital Solca en Portoviejo, Manabí



Nota: Tomado de *Evaluación de los costos de reconstrucción Sismo en Ecuador abril 2016* (p.67), por (SENPLADES, 2016).

Debido a que los equipos y componentes forman parte fundamental dentro de la funcionalidad, operatividad, y seguridad de un edificio, a mediados del siglo pasado se

realizaron estudios e investigaciones acerca del comportamiento de estos elementos, inicialmente fueron modelados como cuerpos rígidos, y a medida del tiempo se fue ampliando el alcance y precisión de los modelos y aplicaciones.

El comportamiento de bloques rígidos simplemente apoyados sobre una superficie ha sido estudiado durante este último siglo; los pioneros sobre este tema son Milne en 1885 y Housner en 1963, estimaron condiciones críticas para volteo y generando modelos del comportamiento de un bloque rígido expuesto a un movimiento horizontal en su base. En años posteriores, se han ido realizando varios estudios con el fin identificar limitaciones de los modelos iniciales, y generar nuevos modelos con mayor alcance (Jaimes et al., 2018).

Dentro del campo de la evaluación sísmica de estructuras el estudio del comportamiento dinámico de cuerpos rígidos es muy importante, debido a que algunos elementos estructurales y no estructurales se pueden modelar como cuerpos rígidos. Algunos ejemplos son: construcciones formadas por grandes bloques de piedra; estructuras de mampostería simple, máquinas, equipo, mobiliario, reactores nucleares, estatuas y objetos de arte, ya que estos elementos generalmente fallan bajo acciones sísmicas y generan escombros (Peña, 2015).

Planteamiento del problema

Macro

Los hospitales prestan servicios esenciales para proteger, y preservar la salud y bienestar de una comunidad. Una cobertura de estos servicios es aún más indispensable durante e inmediatamente después de desastres. Debido a la complejidad de las operaciones hospitalarias, incluso la falla más pequeña en uno de sus sistemas de construcción o equipamiento puede causar serias interrupciones en las

funciones del hospital. Esto hace que los hospitales sean extremadamente vulnerables a una variedad de peligros naturales (FEMA 577, 2007).

Se debe considerar la vulnerabilidad estructural del hospital, el daño potencial a los componentes estructurales de un edificio, incluidos cimientos, muros de carga, columnas y vigas, escaleras, pisos y cubiertas de techo, u otros tipos de componentes estructurales que ayudan a sostener el edificio. Asimismo, deben ser considerados los efectos del daño a los componentes y equipos no estructurales del edificio, estos pueden ser tan perjudiciales y peligrosos para la seguridad de pacientes, como cualquier daño estructural, también pueden afectar las funciones del hospital y la seguridad de los ocupantes, e incluyen las posibles fallas de los componentes arquitectónicos, tanto en el exterior como en el interior de los edificios. Además, en muchos casos, después de un desastre sigue siendo necesario el uso de instrumentos médicos sofisticados u otros equipos, y la vulnerabilidad del hospital se ve agravada por la presencia de sustancias peligrosas que pueden derramarse o liberarse (FEMA 577, 2007).

En el pasado, botellas en laboratorios clínicos se cayeron y comenzaron incendios. Los terremotos han catapultado cajones de archivadores y ventiladores a través de las habitaciones a gran velocidad, con el potencial de causar lesiones considerables al personal. Cualquier equipo con ruedas es vulnerable al desplazamiento y posee el potencial de causar lesiones. Además, los hospitales usan y dependen de muchos tipos de sistemas de comunicación, estos equipos se montan con frecuencia en los techos y se exponen a sufrir daños graves, dejando al hospital sin este servicio vital en un momento crítico (FEMA 577, 2007).

A pesar de que el desarrollo de la ingeniería ha permitido disminuir el riesgo de colapso parcial o total de una estructura, las pérdidas económicas generadas por eventos sísmicos siguen siendo graves. Esto se debe principalmente a que el costo de la estructura representa entre un 10 y 15 % del costo total de la obra. De esta manera las pérdidas económicas radican en el daño no estructural, componentes, equipos y en la pérdida y recuperación de servicios. Lo anterior queda demostrado en el terremoto de San Fernando de 1971 en EEUU. Una evaluación de 25 edificios comerciales dio como resultado que el daño estructural representó el 3% del daño ocurrido, el daño eléctrico y mecánico 7%, el daño a terminaciones exteriores 34% y a terminaciones interiores 56%. Durante este terremoto varios hospitales sufrieron daños en mayoría en sus elementos no estructurales, equipos y componentes que imposibilitaron que los hospitales puedan seguir operando (Krauskopf et al., 1996).

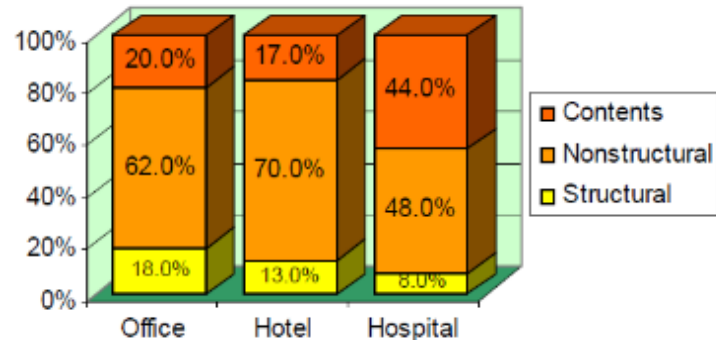
Los elementos estructurales de un hospital representan aproximadamente el 8% del costo total de construcción, mientras que los componentes y sistemas no estructurales: mecánicos, eléctricos, de plomería, y arquitectónicos, representan el 92% restante del costo. Los contenidos como particiones móviles, muebles, equipos médicos y de oficina, representan un valor adicional significativo en riesgo. Si se comparan estos costos, se observa claramente que la mayor inversión de capital para construcción en la mayoría de los hospitales se debe a los sistemas y contenidos no estructurales. Una relación similar se puede encontrar en edificios destinados a ser hoteles y oficinas (Whittaker & Soong, 2003).

Diversas investigaciones han concluido que el porcentaje de inversión en los elementos no estructurales y equipos respecto a la inversión total de la construcción de los edificios es bastante elevado, y además que estos elementos representan un

potencial riesgo tanto como para la seguridad de los usuarios de los edificios, así como también para que el edificio pueda seguir operando después de un evento sísmico.

Figura 4

Inversiones típicas en construcción de edificios

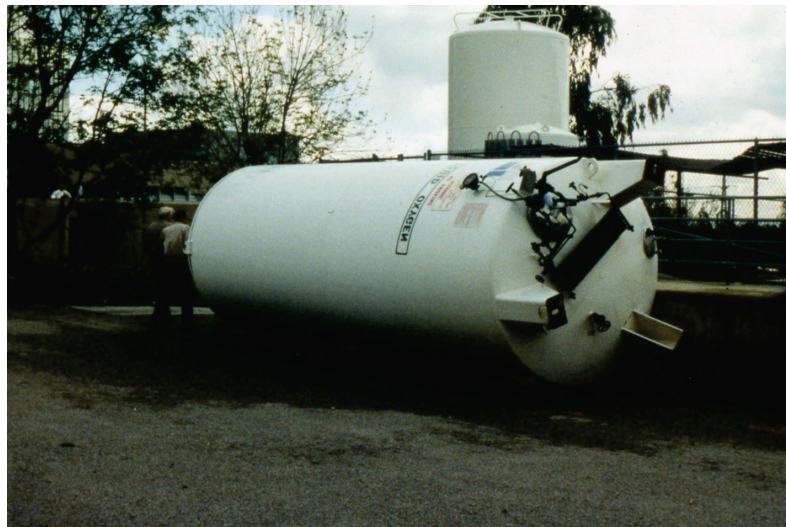


Nota: Tomado de “An overview of non-structural components research at three US earthquake engineering research centers” (p.271), por (Whittaker & Soong, 2003).

Los elementos no estructurales y equipamiento pueden representar: un riesgo para la seguridad de vida de los usuarios de un edificio, una gran pérdida económica, y una pérdida total o parcial del funcionamiento de un edificio. El terremoto de Northridge en 1994 resultó en la suspensión parcial o total de los servicios en 23 hospitales y en \$ 3 billones en daños relacionados con los hospitales (FEMA E-74, 2012).

Figura 5

Tanque volcado en hospital debido al terremoto de Northridge de 1994



Nota: Tomado de *Reducing the Risks of Nonstructural Earthquake Damage* (p.6-205), por (FEMA E-74, 2012).

Meso

El Ecuador está situado dentro de un contexto histórico en el que se nota una recurrencia de terremotos con magnitudes superiores a 7 grados en la escala de Richter, por lo que ha sido clasificado como una de las zonas de alto peligro sísmico en el mundo (Hibsch et al., 1996).

Argudo & Yela (1995) realizaron la evaluación de la vulnerabilidad de hospitales de Guayaquil, como parte de un proyecto regional dirigido a mitigar desastres naturales. En esta evaluación se analizó el comportamiento sísmico de los 20 hospitales con mayor número de camas frente a sollicitaciones sísmicas probables, y se concluyó que: cuatro hospitales tienen probabilidad de experimentar daños no estructurales severos, y daños estructurales moderados, además, cinco hospitales tienen la probabilidad de experimentar daños de tipo estructural severos que incluyen: colapso de estructuras vitales como tanques, y estructuras que sostienen a equipos e instalaciones.

Figura 6

Daños en Hospital en Chone



Nota: Tomado de EERI Earthquake Reconnaissance Team Report: M7.8 Muisne, Ecuador Earthquake on April 16 (p.37), por (Lanning et al., 2016)

En abril de 2016 después del terremoto de 7.8 grados en la escala de Richter, en la región costa, 39 unidades de salud, que incluyen centros de salud, hospitales básicos, generales y aquellos que proporcionan servicios especializados, fueron dañados y 20 dejaron de funcionar tras la catástrofe. El Hospital Verdi Cevallos sufrió daños no estructurales y una fuga de agua tras la ruptura de tuberías que inundó parcialmente la planta baja de esta casa de salud. Posteriormente se evacuaron pacientes hacia el hospital de Solca en Portoviejo (Organización Panamericana de la Salud, 2016).

Figura 7

Hotel afectado por el terremoto de 2016 en Tarqui, Manabí



Nota: Tomado de Evaluación de los costos de reconstrucción Sismo en Ecuador abril 2016 (p.163), por (SENPLADES, 2016)

Del costo total de afectación en hospitales el 99.6 % corresponde al valor de la reposición de la infraestructura destruida y a las reparaciones mayores y menores. Menos de 1 % de los daños se debieron a la afectación en los equipos, mobiliario y bienes que se encontraban al interior de las edificaciones de salud. El daño a equipos biomédicos y mobiliario clínico y administrativo fue menor de lo esperado en relación con la magnitud del sismo. También se reportaron daños en las bodegas de medicamentos y dispositivos médicos del MSP, especialmente en aquellas ubicadas en las sedes distritales como la de Portoviejo, Manta, Bahía de Caráquez y Pedernales (SENPLADES, 2016).

Figura 8

Daños en Clínica San Antonio de Portoviejo, Manabí



Nota: Tomado de *Evaluación de los costos de reconstrucción Sismo en Ecuador abril 2016* (p.69), por (SENPLADES, 2016)

En la actualidad la Norma Ecuatoriana de la Construcción cataloga a los hospitales como estructuras esenciales, por lo cual se solicita que este tipo de estructuras puedan estar operativas inclusive después de un terremoto para atender emergencias. Mediante la aplicación de la norma y cumplimiento de los parámetros descritos en ella se busca que la estructura de los hospitales se comporte de manera que permita seguir operando y cumpliendo sus funciones. Asimismo, es de vital importancia que los componentes no estructurales, equipos, elementos internos y externos del hospital no representen una amenaza a la seguridad de los usuarios, ni interrumpen el funcionamiento y operaciones médicas del hospital.

Micro

El terremoto de Ambato en agosto de 1949 causó graves afectaciones, en Ambato murieron aproximadamente 6,000 personas. Además, causó grandes daños en las provincias de Tungurahua, Chimborazo y Cotopaxi. Ciudades como Pelileo, Pillaro,

Guano y Patate fueron destruidas. Durante este evento, la mayor cantidad de daño fue concentrada en la ciudad de Ambato, siendo destruida una tercera parte de ella. El Hospital de Ambato colapsó y quedó fuera de operación, esto genera una limitación importante en el acceso al servicio de salud de los habitantes de la zona (Aguiar & Rivas, 2018; Beauval et al., 2010).

El 4 de agosto de 1998, se presentó un sismo de magnitud 7.2 originándose cerca de la ciudad de Bahía de Caráquez, en la provincia de Manabí. El hospital Miguel H. Alcívar siendo el único de la ciudad, sufrió graves daños, llegando casi a un colapso de su estructura. Algunas columnas sufrieron daños y presentaron fallas de corte debido a un escaso refuerzo transversal. Mas adelante, en los años 2000 y 2001 este hospital fue reparado y reforzado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de Ecuador (Aguiar et al., 2016).

Figura 9

Daños en columna de Hospital H Alcibar después del terremoto de 1998



Nota: Tomado de “Acelerogramas y espectros inferidos del terremoto 1998 (Mw 7,2) Bahía de Caráquez, Ecuador” (p.102), por (Aguiar et al., 2016), *Ágora De Heterodoxias*, 2(2)

Posteriormente, el sismo presentado el 16 de abril del 2016 ocasionó graves daños en el Hospital Miguel H. Alcívar, el hospital sufrió una fuerte afectación a sus elementos no estructurales que impidió que pueda seguir operativo ante la emergencia sanitaria, cabe destacar que los daños a la infraestructura no fueron significativos, pero debido a la magnitud del daño no estructural fue demolido en los días posteriores al sismo (Rojas, 2019).

Después de una evaluación el hospital Miguel H. Alcívar se consideró como no operativo. Se trasladaron los equipos médicos de este edificio a otro hospital temporal cercano. Contaba con un reforzamiento en el cual se incluída muros corte, y reforzamiento de columnas. A pesar del buen comportamiento de la estructura, la mampostería sin refuerzo que fue utilizada en paredes exteriores e interiores falló, causando que los escombros obstaculicen el ascensor, a pesar de que no hubo mayor daño en los niveles superiores se observó que estanterías altas que no estaban arriostradas se voltearon causando daños en equipos (Lanning et al., 2016).

Figura 10

Daños en Hospital Miguel H. Alcívar después del terremoto de 2016



Nota: Tomado de EERI Earthquake Reconnaissance Team Report: M7.8 Muisne, Ecuador Earthquake on April 16 (p.66), por (Lanning et al., 2016)

Como se puede observar en la **Figura 10**, los daños causados por el terremoto representan un riesgo para la vida y seguridad de los usuarios del hospital, así como también para los equipos y componentes del hospital.

Figura 11

Daños en contenidos del Hospital Miguel H Alcibar



Nota: Tomado de EERI Earthquake Reconnaissance Team Report: M7.8 Muisne, Ecuador Earthquake on April 16 (p.66), por (Lanning et al., 2016)

A partir del sismo del 2016, con un acertado criterio se están diseñando nuevos hospitales en Ecuador con aisladores sísmicos, en los que se necesita contar con espectros de aceleraciones para dos períodos de retorno que son de 975 años y 2475 años, debido al historial de eventos sísmicos suscitados en Ambato, es importante que se adopten nuevas filosofías de diseño, en las que se priorice la seguridad tanto de elementos estructurales, como también de los elementos no estructurales y así asegurar la funcionalidad y operación continua de estas estructuras categorizadas como esenciales (Aguiar & Rivas, 2018).

El sismo de 16 de abril del 2016 dejó en evidencia la vulnerabilidad y la falencia de varias estructuras catalogadas como esenciales, que posterior al sismo suspendieron sus actividades quedando inoperativas, por lo tanto, se vuelve de suma importancia realizar un análisis del comportamiento de los equipos del “Hospital General Docente Ambato” con la finalidad de saber el comportamiento de dichos elementos ante un evento sísmico, y saber si este hospital, posterior a un sismo podría seguir cumpliendo sus funciones tal como lo requiere la Norma Ecuatoriana de la Construcción.

Justificación e importancia

La presente investigación busca conocer un comportamiento aproximado de los equipos presentes en el “Hospital General Docente Ambato” durante un evento sísmico, este tipo de edificación es catalogada como estructura esencial por la Norma Ecuatoriana de Construcción, donde se especifica que debe estar en constante funcionamiento incluso después de ser afectada por un terremoto, con la finalidad de seguir atendiendo las necesidades de la comunidad.

Para asegurar el cumplimiento de los requerimientos de la Norma Ecuatoriana de Construcción, es de vital importancia realizar un estudio del comportamiento sísmico del equipo presente en el hospital, estos cumplen funciones directamente relacionadas con la operatividad y funcionalidad del hospital, ya que al sufrir daños o quedar fuera de servicio, limitarían parcial o totalmente el funcionamiento del hospital.

A pesar de que se han desarrollado nuevas normas para el diseño de edificios, es necesario que los edificios sean diseñados no solo para reducir el daño en su estructura, sino también para reducir el riesgo de daño en equipos y componentes que forman parte del mismo. El daño en equipos y componentes puede representar un grave riesgo para la seguridad de los usuarios de un edificio, además pueden causar problemas en las funciones y operaciones del mismo. Pueden generar graves pérdidas económicas en las que los equipos y componentes pueden representar hasta el 56% del costo de reparación total de un hospital contrastada con el 3% del costo de la reparación de los elementos estructurales (Krauskopf et al., 1996).

Los hospitales cuentan con un alto contenido de equipos médicos, mecánicos y de alta tecnología que junto a los equipos de oficina, mobiliarios y eléctricos representan casi el doble del valor económico de la edificación. Debido a esto, se debe cuidar de que esta fuerte inversión para el adecuamiento del equipamiento médico, se acompañe de medidas que permitan reducir la vulnerabilidad de los elementos estructurales, no estructurales y de equipamiento del hospital, con el fin de evitar que un evento sísmico pueda dañar gravemente estos costosos equipos y pueda los dejar fuera de funcionamiento, generando un déficit en la capacidad de atención del hospital (Bambaren et al., 2007).

Objetivos generales y específicos

Objetivo General

Analizar el comportamiento dinámico de contenidos de uso típico en el Hospital General Docente Ambato

Objetivos Específicos

- Realizar un análisis sísmico de la estructura actual.
- Realizar un levantamiento de los contenidos de uso típico presentes.
- Determinar el comportamiento dinámico de los contenidos de uso típico.
- Realizar una guía de correcta ubicación de los contenidos de uso típico.
- Elaborar una herramienta de cálculo que permita realizar un análisis del comportamiento dinámico de bloques rígidos simétricos.

Desarrollo

Capítulo I

En este capítulo se aborda una introducción al tema de estudio, antecedentes, planteamiento del problema, justificación e importancia, y los objetivos a cumplir con el presente estudio. Con eso se da una clara idea de la pertinencia de la investigación y lo que se busca lograr al ser concluida.

Capítulo II

En este capítulo se presentan conceptos teóricos y normativas que detallan el procedimiento a seguir para realizar un análisis sísmico de la estructura existente en la cual se realizará este estudio. Para esto se definirán los espectros de diseño necesarios para el análisis estructural.

Capítulo III

En este capítulo se presentará la base metodológica y teórica que permitirá realizar un estudio de una aproximación del comportamiento de los componentes o equipos presentes en la edificación de estudio durante un evento sísmico. Para esto se realizará un levantamiento y selección de los equipos a ser objeto de estudio. Posteriormente se realizará el estudio de una aproximación del comportamiento dinámico de estos, basado en la metodología antes mencionada.

Capítulo IV

En este capítulo se presentarán códigos y normativas relacionadas al tema de estudio, posteriormente se realizará un análisis y propuesta de arriostamiento para los elementos seccionados en el capítulo anterior, basándose en las normas mencionadas en este capítulo.

Capítulo V

En este capítulo se presentará una herramienta de cálculo llamada RMotion para el análisis del comportamiento dinámico de cuerpos rígidos basados en los conceptos citados en el Capítulo III y IV.

Capítulo VI

En este capítulo se presentará una guía de identificación, ubicación y arriostamiento de los elementos seleccionados en el Capítulo III, además de recomendaciones generales para otros elementos.

Capítulo VII

En este capítulo se presentará un análisis y discusión de los resultados obtenidos con el desarrollo de presente investigación.

Capítulo II

Análisis de la estructura existente

Introducción

En este capítulo se presentan los conceptos fundamentales referente a la dinámica de estructuras, así como también se definirán espectros de diseño necesarios para realizar el análisis sísmico de la estructura existente, y se obtendrán los resultados necesarios para iniciar con el análisis del comportamiento dinámico de cuerpos rígidos del Capítulo III.

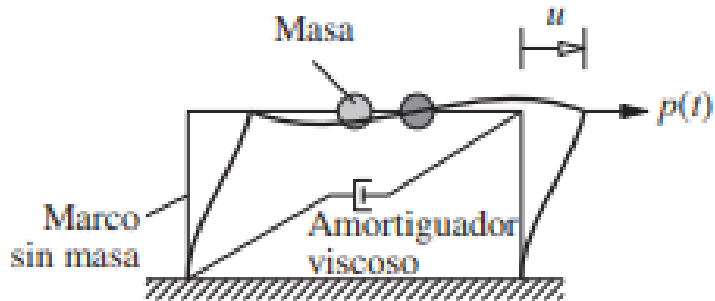
Marco Teórico

Sistemas de un grado de libertad

Este sistema se considera como una idealización de una estructura de un solo piso, en la que se supone que la viga y las columnas son axialmente indeformables, cada elemento de la estructura contribuye a las propiedades inerciales, elásticas y de amortiguamiento del sistema. Se compone de una masa m concentrada en el nivel del techo, un marco que es considerado sin masa que proporciona rigidez al sistema, y un amortiguador viscoso que disipa la energía de vibración del sistema. Sin embargo, este es un sistema idealizado, cada una de estas propiedades se concentra en tres componentes distintos: la masa, la rigidez y el amortiguamiento (Chopra, 2014).

Figura 12

Sistema de 1GDL



Nota: Tomado de *Dinámica de estructuras* (p.7), por (Chopra, 2014), Pearson Educación.

Vibración libre

Una estructura experimenta una vibración libre cuando por el efecto de una perturbación cambia de su estado estático inicial, y se mantiene vibrando sin ninguna perturbación externa (Chopra, 2014).

Respuesta a las excitaciones

Para obtener una visión de cómo los sistemas de 1GDL responderán a varios tipos de fuerzas, es necesario comprender la respuesta de las estructuras ante una excitación armónica. Este es un tema clásico en la dinámica estructural, y tiene varias aplicaciones en la ingeniería sísmica (Chopra, 2014).

Excitación sísmica

En ingeniería, se define el movimiento del suelo durante un sismo como la variación de la aceleración en el tiempo. Dada una aceleración del suelo para un sistema de 1GDL, el problema a resolver es definido por completo si se conoce la masa, rigidez y el amortiguamiento del sistema. Para registrar las tres componentes básicas de un movimiento del suelo ocasionado por un evento sísmico, se utiliza un instrumento llamado acelerógrafo de movimiento fuerte, que se activa cuando llegan las primeras

ondas del sismo. Estos valores pueden variar mucho, y dependen de las características locales del suelo (Chopra, 2014).

Espectro de respuesta

Es un medio que permite resumir la máxima respuesta de todos los posibles sistemas lineales de 1GDL a un componente en específico del movimiento del suelo. Además, permite enfocar los conocimientos de dinámica estructura hacia el diseño de una estructura y al desarrollo de requisitos en códigos de construcción. Mediante un gráfico se puede representar el máximo valor de una cantidad de respuesta en función del periodo de vibración natural T_n del sistema, o de varios parámetros relacionados a este (Chopra, 2014).

Espectro de diseño

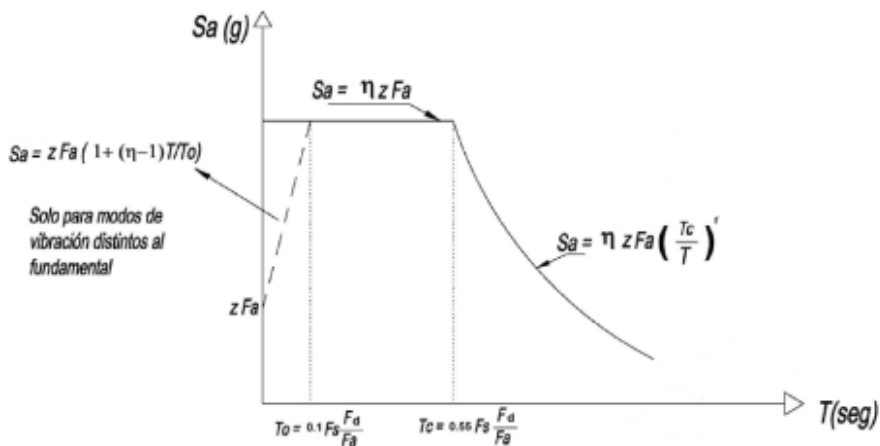
Dado que este espectro es usado para diseñar nuevas estructuras o para evaluar la seguridad y comportamiento sísmico de estructuras existentes, debe cumplir ciertos requisitos, a fin de que la estructura pueda resistir sismos en el futuro. En un sentido general, este espectro debe representar los movimientos del suelo registrados en el sitio durante los sismos pasados, o de movimientos registrados en otras instalaciones con condiciones similares. El espectro de diseño consiste en un conjunto de curvas suaves para cada nivel de amortiguamiento del sistema (Chopra, 2014).

Espectro de diseño elástico horizontal de diseño

En La Norma Ecuatoriana de la Construcción del 2015 el espectro de diseño elástico es expresado en fracción de la aceleración de la gravedad, y depende de factores como: la zona sísmica, tipo de suelo, y coeficientes de amplificación de suelo (NEC-SE-DS, 2015).

Figura 13

Espectro elástico horizontal de diseño



Nota: Tomado de *Peligro Sísmico Diseño Sismo Resistente* (p.33), por (NEC-SE-DS, 2015).

Dónde:

- η Razón entre la aceleración espectral $S_a (T = 0.1 \text{ s})$ y el PGA para el período de retorno seleccionado.
- F_a Coeficiente de amplificación de suelo en la zona de período cortó. Amplifica las ordenadas del espectro elástico de respuesta de aceleraciones para diseño en roca, considerando los efectos de sitio
- F_d Coeficiente de amplificación de suelo. Amplifica las ordenadas del espectro elástico de respuesta de desplazamientos para diseño en roca, considerando los efectos de sitio
- F_s Coeficiente de amplificación de suelo. Considera el comportamiento no lineal de los suelos, la degradación del período del sitio que depende de la intensidad y contenido de frecuencia de la excitación sísmica y los desplazamientos relativos del suelo, para los espectros de aceleraciones y desplazamientos
- S_a Espectro de respuesta elástico de aceleraciones (expresado como fracción de la aceleración de la gravedad g). Depende del período o modo de vibración de la estructura
- T Período fundamental de vibración de la estructura
- T_0 Período límite de vibración en el espectro sísmico elástico de aceleraciones que representa el sismo de diseño
- T_c Período límite de vibración en el espectro sísmico elástico de aceleraciones que representa el sismo de diseño
- Z Aceleración máxima en roca esperada para el sismo de diseño, expresada como fracción de la aceleración de la gravedad g

Análisis modal espectral

Es un método que se utiliza para estimar las fuerzas y desplazamientos actuantes en elementos de una estructura. Se basa en considerar que vibración del suelo es transmitida a la estructura a través de sus elementos generando que las principales masas se muevan o se desplazan en forma relativa respecto al suelo (Rodríguez, 2016).

Espectros de aceleración de diseño para el análisis sísmico

Para definir un espectro de diseño se debe obtener y clasificar los registros sísmicos de acuerdo al lugar en que fueron registrados debido a que la forma espectral depende del tipo de suelo. Una vez que se clasifiquen los eventos se procede a obtener los espectros de respuesta de cada uno de ellos, posteriormente se aplican las estadísticas con las que se determina el espectro de diseño (Aguiar, 2012).

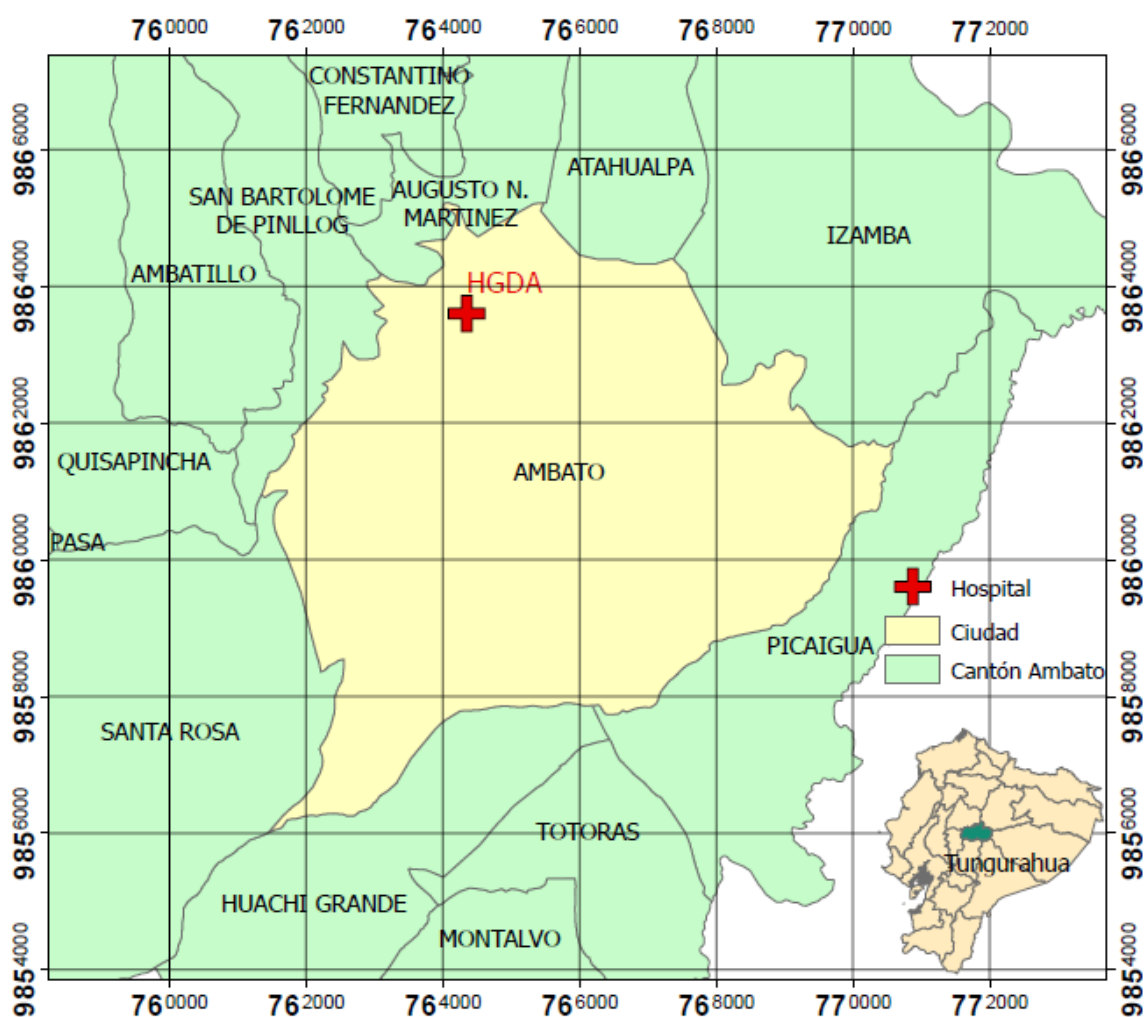
Para la obtención de los espectros de aceleración necesarios para la realización de este trabajo se toma en cuenta el trabajo realizado por Aguiar & Rivas (2018) en su libro: Microzonificación Sísmica de Ambato, en el cual se analizaron los resultados presentados en los mapas de período del suelo, velocidad de la onda de corte y clasificación de los perfiles de suelo. Posteriormente se analizarán las características y parámetros de interés de cada tipo de suelo.

Para el diseño de elementos estructurales se debe usar el Espectro de Diseño *DBE*, y para determinar derivas de piso y desplazamientos se usará el Espectro Máximo Considerado *MCE*. Espectros que deben ser obtenidos en este estudio. Para el diseño de una vivienda u oficina el espectro de diseño, *DBE*, es el que tiene un período de retorno de 475 años y el máximo considerado, *MCE*, el que tiene un período de retorno de 975 años. Sin embargo para un Hospital el espectro de diseño *DBE*, tiene un período

de retorno de 975 años y el máximo considerado *MCE* es de 2475 años (Aguiar & Rivas, 2018).

Figura 14

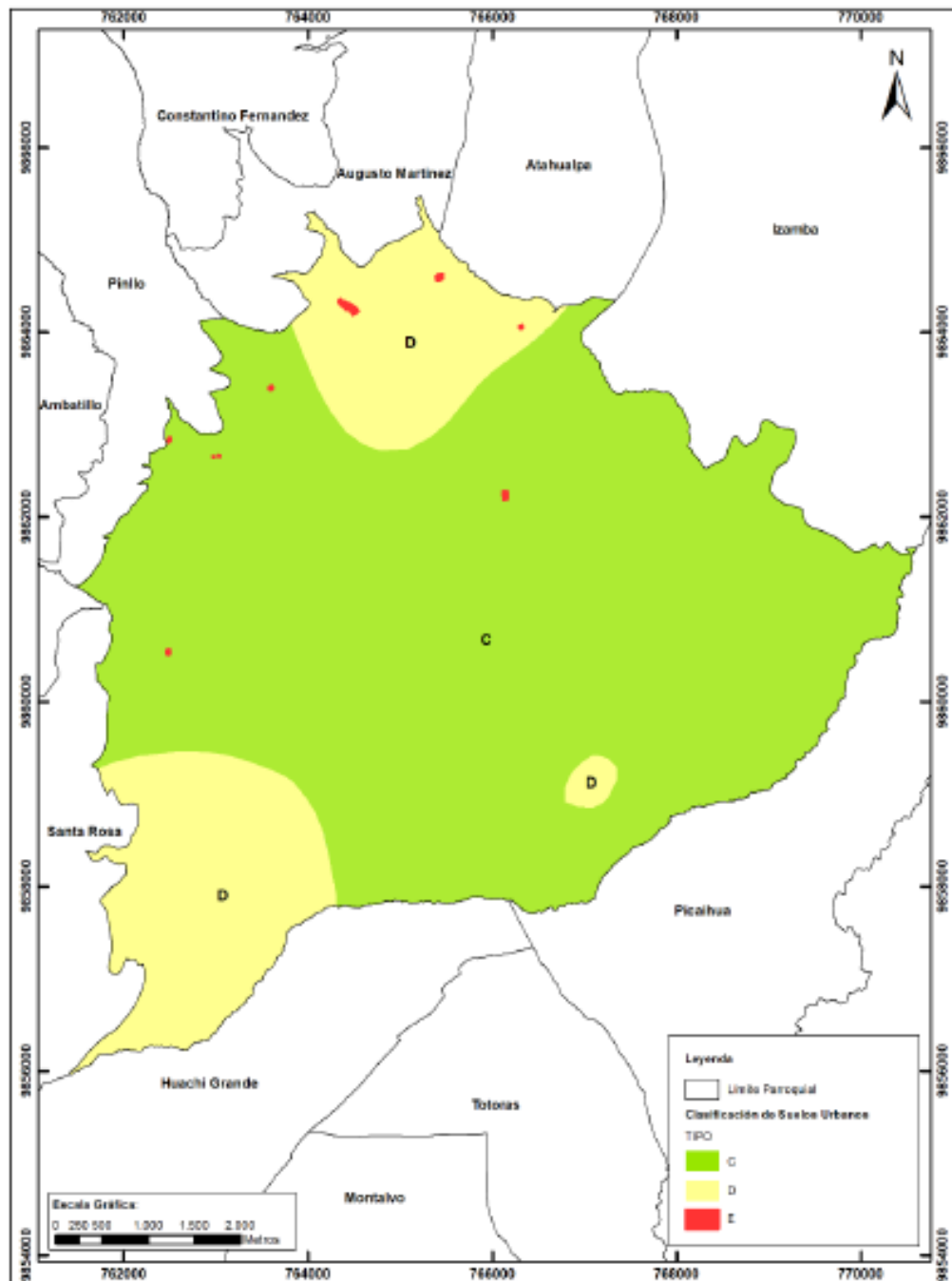
Ubicación del hospital



Como se muestra en la **Figura 14**, el hospital se encuentra las coordenadas UTM Este 764504 y Norte 9863744; y según la **Figura 15** presente en el trabajo realizado por Aguilar & Rivas (2018), el hospital está construido sobre un suelo tipo D.

Figura 15

Clasificación de suelos de la Ciudad de Ambato



Nota: Tomado de *Microzonificación sísmica de Ambato* (p.99), por (Aguiar & Rivas, 2018).

Para obtener el espectro de aceleraciones se utiliza las mismas ecuaciones definidas en el espectro de diseño elaborado por NEC-SE-DS (2015), modificando los siguientes factores para suelo tipo D.

Tabla 1

Valores y factores modificados para suelo tipo D

T_r	Z	F_a	F_d	F_s	r
475	0.43	1.1	1.19	1.28	1.2
975	0.59	1.02	1.12	1.20	1.2
2475	0.78	1.02	1.20	1.19	1.2

Nota: Tomado de *Microzonificación sísmica de Ambato* (p.305), por (Aguiar & Rivas, 2018).

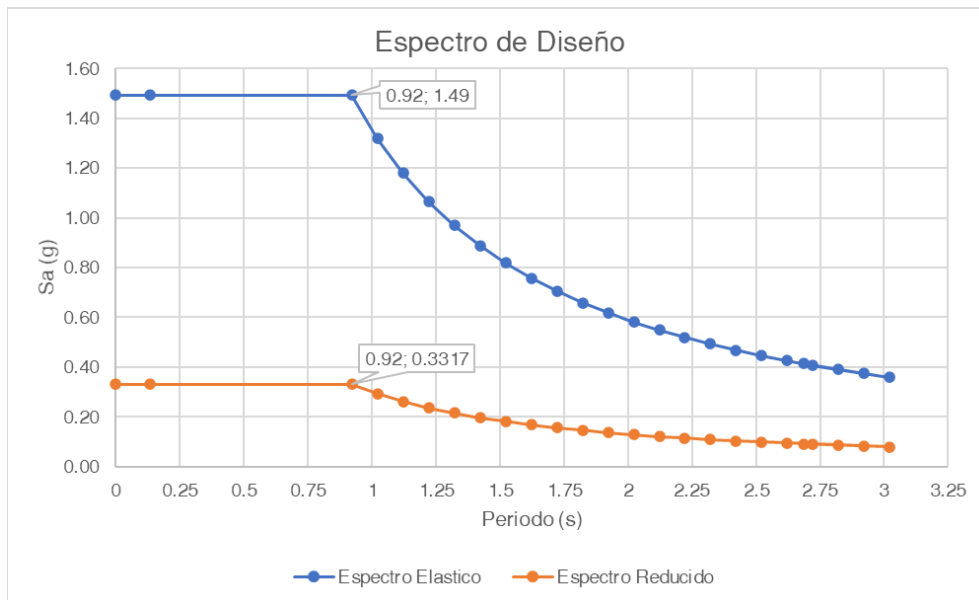
En base a los coeficientes presentados en la **Tabla 1** se generan espectros de diseño considerando los criterios para hospitales antes mencionados. A continuación se presentan espectros de diseño para *DBE* y *MCE*, además se presenta el espectro de diseño para un tipo de suelo D definido en NEC-SE-DS (2015).

Espectro DBE

Debido a que analiza el comportamiento de un hospital, el espectro de diseño tiene un periodo de retorno de 975 años.

Figura 16

Espectro DBE



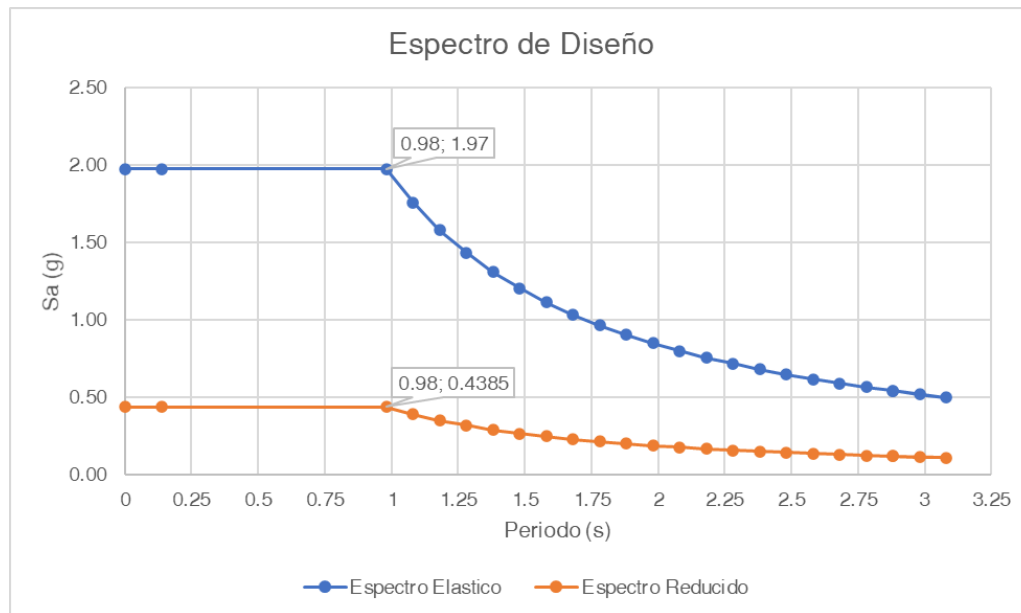
Nota: Los valores de la aceleración están en función del valor de la aceleración de la gravedad.

Espectro MCE

Para el espectro *MCE* se consideró un periodo de retorno de 2475 años, con este espectro se diseñarán los refuerzos para los equipos.

Figura 17

Espectro MCE



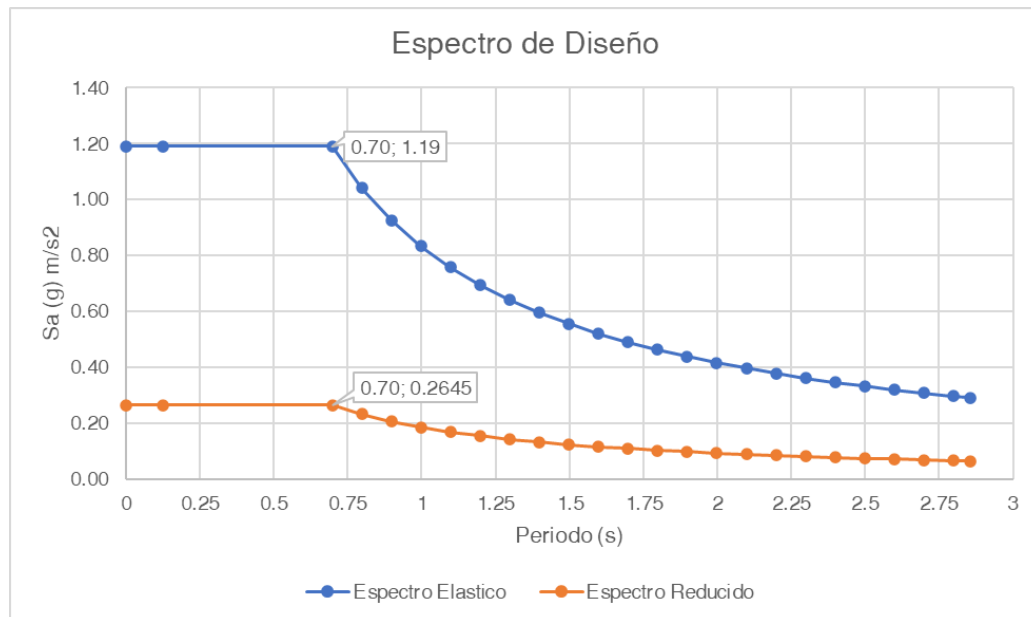
Nota: Los valores de la aceleración están en función del valor de la aceleración de la gravedad.

Espectro NEC-15

Para obtener este espectro se considera los parámetros y coeficientes definidos en la (NEC-SE-DS, 2015) para un suelo tipo D, y se considera un periodo de retorno de 475 años. Este espectro se lo usara para comparar los resultados obtenidos con los espectros *DBE* y *MCE*.

Figura 18

Espectro NEC-15



Nota: Los valores de la aceleración están en función del valor de la aceleración de la gravedad.

Componente vertical del sismo

El trabajo desarrollado por Aguiar & Rivas (2018) presenta un espectro de control para aceleraciones verticales desarrollado de forma determinística. El valor máximo valor de la ordenada espectral para la componente vertical denominada S_{DS} para un perfil de suelo D es $1.026(g)$ y se integra al análisis sísmico de la estructura según la propuesta del ASCE 7-16 en el Capítulo 12, en la que propone que la los estados de carga para efectos del sismo sean calculados según la ecuación (1).

$$E = E_h + E_v \quad (1)$$

$$E_v = 0.2 * S_{DS} * D \quad (2)$$

$$S_{DS} = \frac{2}{3} S_{MS} \quad (3)$$

Donde:

E = Estado de carga por sismo.

E_h = Estado de carga por componente horizontal del sismo.

E_v = Estado de carga por componente vertical del sismo.

S_{DS} = Parámetro de aceleración del espectro *MCE* para periodos cortos.

D = Efecto de la carga muerta o permanente.

S_{MS} = Máxima aceleración horizontal obtenida de la meseta del espectro de diseño.

Por lo tanto, el componente el sismo vertical para este estudio queda definido en los estados de carga como $0.21 \cdot D$

Análisis de la respuesta en el tiempo

Este análisis busca encontrar el comportamiento de una estructura a través del tiempo, para determinar la respuesta de aceleración, velocidad, y desplazamiento. Un método clásico para encontrar estas respuestas es el método β de Newmark que permite medir la respuesta en el tiempo de las estructuras sometidas a pulsos de aceleración o también a acciones sísmicas que pueden ser expresadas como registros de aceleraciones (Aguar, 2012).

La ecuación general del movimiento en dinámica de estructuras, en el rango elástico es:

$$m\ddot{q} + c\dot{q} + kq = Q \quad (4)$$

Donde:

m = Masa del sistema

c = Amortiguamiento del sistema

k = Rigidez del sistema

Q = Carga o excitación que actúa en el sistema

\ddot{q} = Aceleración

\dot{q} = Velocidad

q = *Desplazamiento*

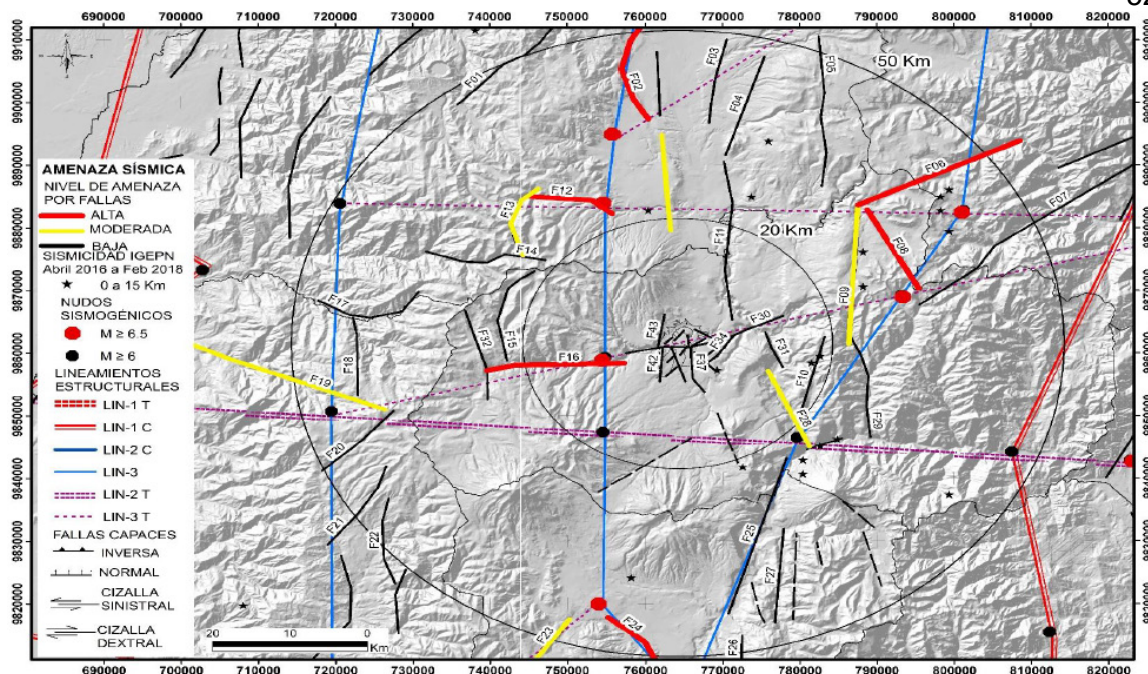
Cabe destacar que los parámetros \ddot{q} , \dot{q} , q , y Q son funciones del tiempo t , y que este método puede ocuparse para sistemas de *1GDL* como para n grados de libertad (Aguiar, 2012).

Acelerograma escalado

En el estudio desarrollado por Aguiar & Rivas (2018) se presentan las fallas geológicas capaces de generar un nivel de amenaza sísmica alta, y moderada para la ciudad de Ambato, como se muestra en la **Figura 19**, en base a estas fallas se buscará un registro de aceleraciones para analizar la estructura.

Figura 19

Fallas geológicas con nivel de amenaza sísmica alta, y moderada

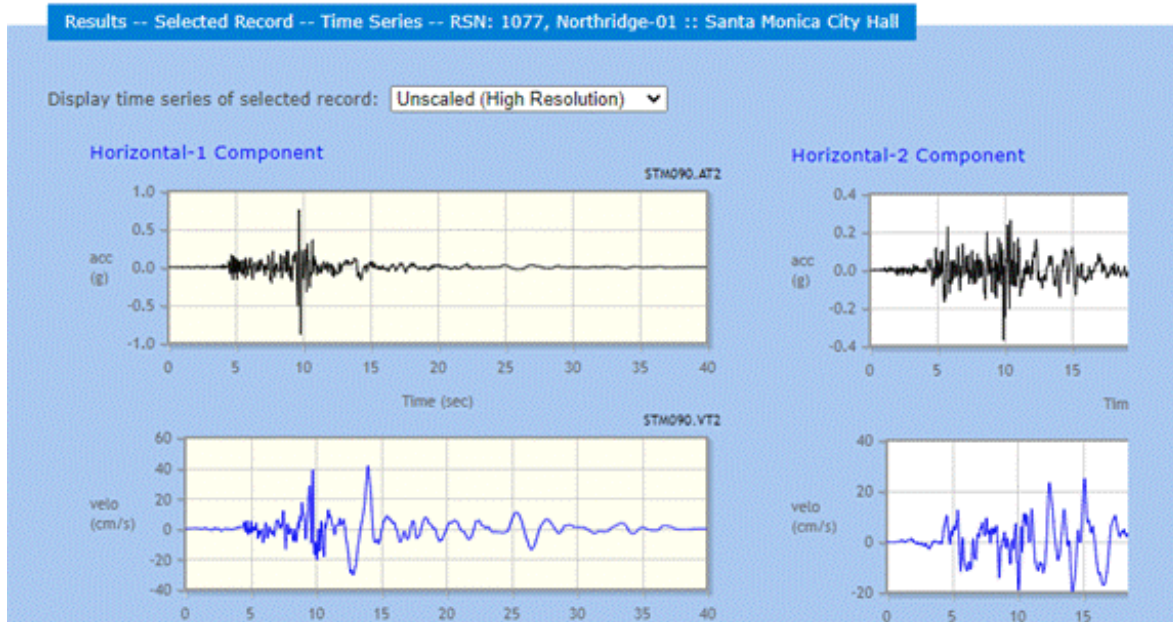


Nota: Tomado de *Microzonificación sísmica de Ambato* (p.164), por (Aguiar & Rivas, 2018).

A continuación, se realiza una búsqueda de registros de aceleraciones en la base de datos del PEER Ground Motion Database, en el que se selecciona un registro con características similares a las presentes en el sitio de estudio, y en base a las fallas presentadas en la **Figura 19**; tomando en cuenta que el registro seleccionado, debe tener un factor de escalamiento respecto al espectro *MCE*, menor a 3. La búsqueda del registro se muestra en la **Figura 20**.

Figura 20

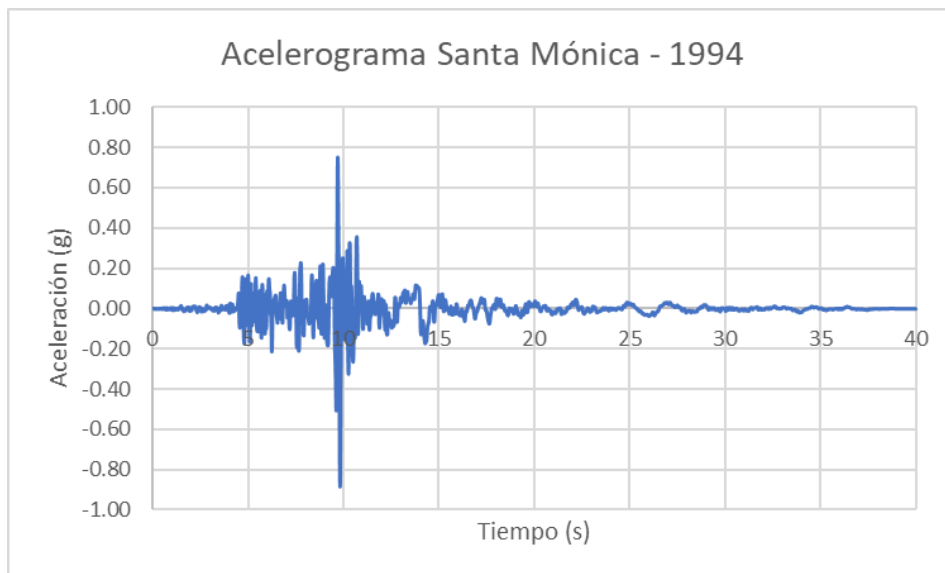
Registro obtenido de PEER Ground Motion Database



En base a estas condiciones, se seleccionó el registro de aceleraciones del terremoto de Northridge de 1994 registrado en la estación de Santa Mónica, presentado en la **Figura 21**.

Figura 21

Aceleraciones registradas en estación Santa Mónica



Posteriormente se hace uso del software ETABS, para realizar un escalamiento de este registro en base al espectro MCE; y se obtiene un nuevo registro de aceleraciones presentado en la **Figura 22**, que será usado para analizar la estructura.

Figura 22

Registro de aceleraciones escalado en ETABS



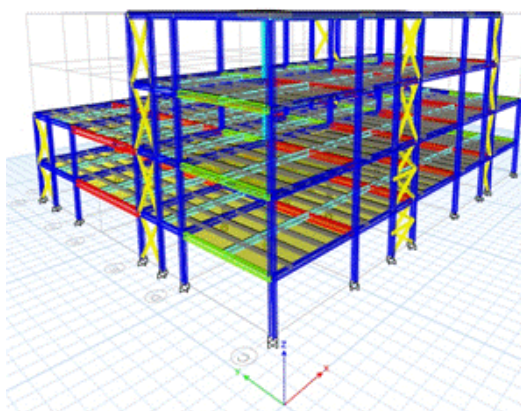
Nota: Se muestra el registro original en azul, y el registro escalado en rojo.

Análisis de la estructura existente

Las modelaciones de la estructura se realizaron en el programa ETABS a partir de los planos estructurales del hospital, se utilizarán los espectros de diseño y acelerogramas antes definidos en este mismo capítulo. A continuación, se analizarán los bloques A, B, y C del hospital, los cuales fueron reforzados mediante muros de corte conformados por columnas y diagonales rigidizadoras.

Figura 23

Modelo del bloque B



En la **Figura 23** se puede observar el bloque B del hospital, cabe destacar que posterior al diseño original se realizó un reforzamiento con muros de corte que rigidizan a la estructura. A continuación, se presentan resultados de interés para el presente estudio, obtenidos del análisis de los bloques del hospital.

Se realizó el análisis utilizando los espectros de respuesta *MCE*, *DBE*, y *NEC-15* y se encontraron las siguientes aceleraciones a nivel de piso en los siguientes bloques estructurales:

Figura 24

Aceleraciones a nivel de piso en Bloque A

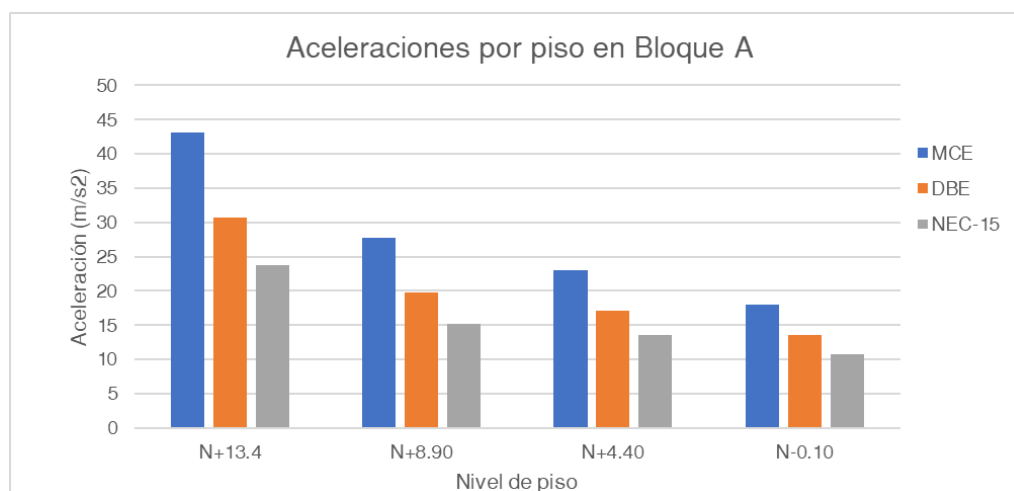
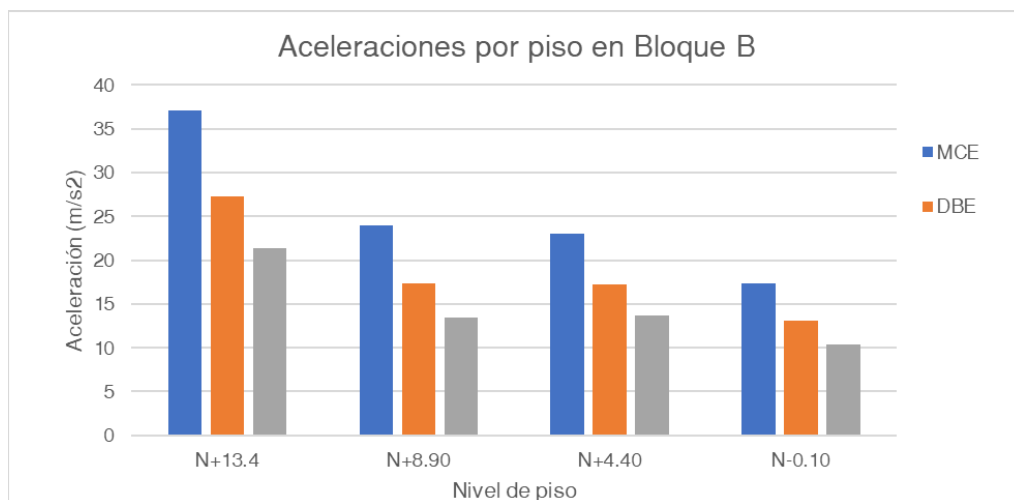
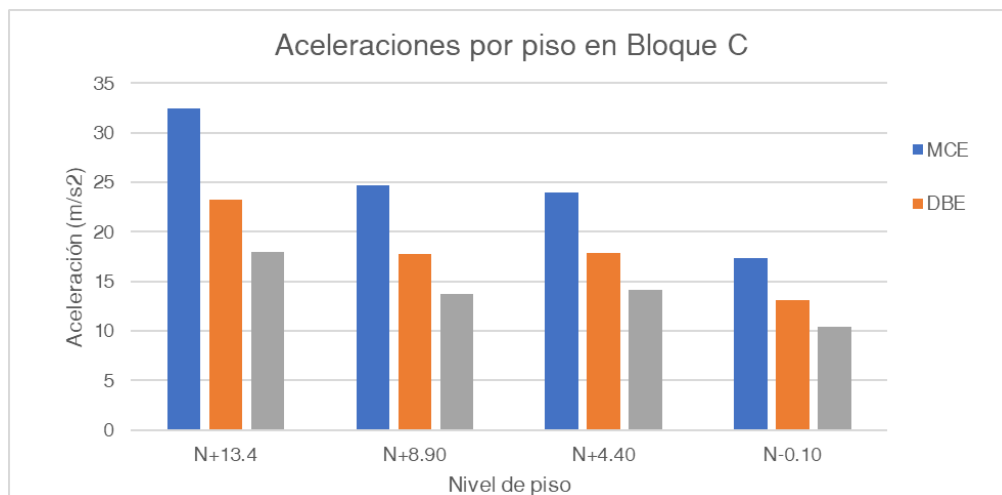
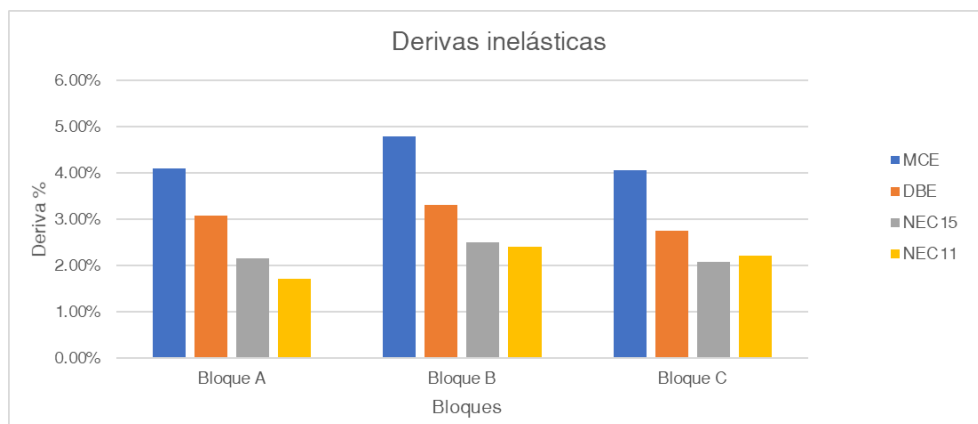


Figura 25*Aceleraciones a nivel de piso en Bloque B***Figura 26***Aceleraciones a nivel de piso en Bloque C*

A continuación, se presentan las derivas inelásticas de cada bloque. Para este análisis se incluyeron los resultados del cálculo del reforzamiento de la estructura basados en la NEC-11, como también para los espectros *MCE*, *DBE*, y *NEC-15* definidos anteriormente .

Figura 27

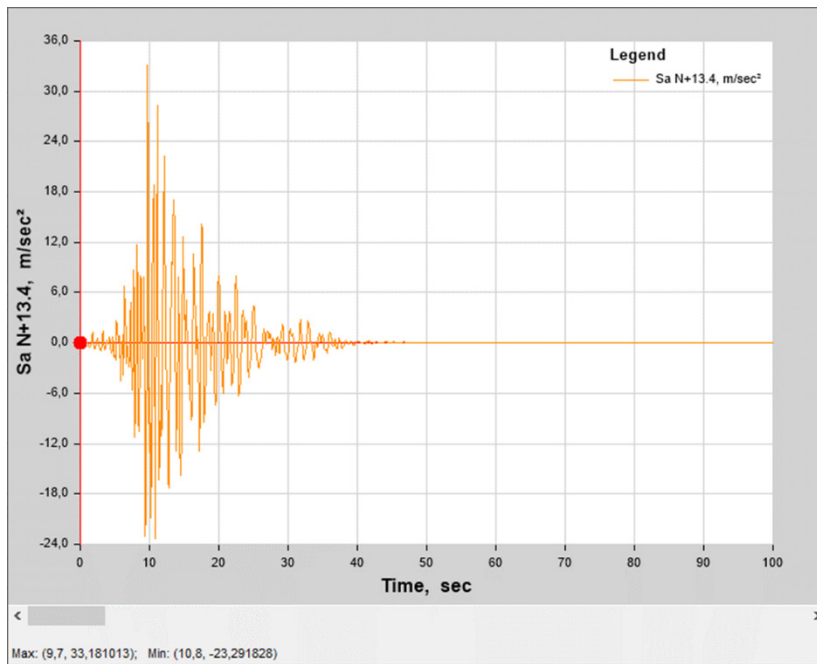
Derivas inelásticas por bloques



En la **Figura 28** podemos observar la respuesta en el tiempo de un nudo en el nivel N+13.40, calculado con el espectro escalado basando en el espectro *MCE* y los registros de la estación Santa Mónica durante el terremoto de Northridge de 1994.

Figura 28

Registro en el tiempo – MCE sintético



En la **Tabla 2** se presentan las aceleraciones a nivel de piso obtenidas del análisis de la estructura del Bloque B utilizando el espectro *MCE* la cual será usada para el cálculo de fuerzas de diseño para anclajes de cada equipo.

Tabla 2

Aceleraciones a nivel de piso MCE

Nivel	Sa (m/s²)
N+13.4	37.15
N+8.90	23.98
N+4.40	22.98
N-0.10	17.39
MCE	19.36

Capítulo III

Análisis de equipos

Introducción

En este capítulo se presentan los conceptos y modelos relacionados al análisis del comportamiento dinámico de cuerpos rígidos, en este estudio son llamados equipos. Posteriormente se realizará una selección y levantamiento los equipos presentes en el hospital para analizar su comportamiento dinámico mediante la herramienta RMotion, basándose en los modelos descritos en este capítulo.

Marco teórico

Elementos no estructurales

Son los componentes que se apoyan sobre un elemento estructural, y que desempeñan diversas funciones dentro y fuera del edificio tales como: elementos arquitectónicos, mecánicos, componentes mobiliarios, equipos médicos, eléctricos, y de comunicación. Estos están instalados permanentemente, o son parte integral de un sistema de construcción (ASCE, 2017).

Equipos

Elementos no estructurales presentes dentro de la edificación que son parte del normal funcionamiento y operación del hospital tales como equipo médico y mobiliario.

Cuerpo rígido

Es un sistema constituido por varias partículas, en el cual, al aplicarse fuerzas y momentos, las distancias entre todos sus componentes permaneces constantes, debido a esto, un cuerpo rígido conserva su forma durante su movimiento (Alonso & Finn, 1970).

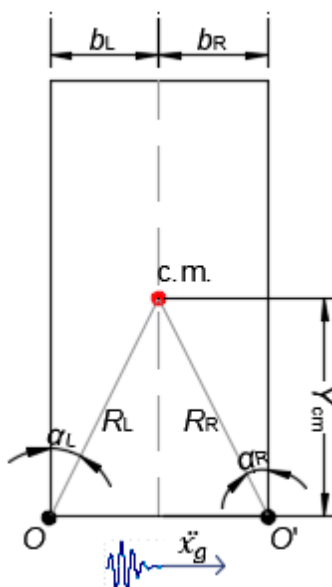
Comportamiento dinámico de cuerpos rígidos

Dentro de la evaluación sísmica de estructuras un campo muy importante es el estudio del comportamiento dinámico de cuerpos rígidos, debido a que algunos elementos tanto estructurales como no estructurales pueden ser modelados como cuerpos rígidos por ejemplo estructuras que incluyen grandes bloques de piedra, estructuras de mampostería simple, maquinas, equipo mobiliario, reactores nucleares, estatuas, y obras de arte (Peña, 2015).

En la **Figura 29** se puede observar el balanceo de un cuerpo rígido, este oscilará entre los puntos O y O' que son sus centros de rotación, si es aplicada una excitación horizontal de magnitud suficiente, el cuerpo comenzara a balancearse, dependiendo de la dirección de aplicación de la excitación, el cuerpo oscilará alrededor de O u O' , si no falla por volteo, seguirá oscilando hasta detenerse (Reinoso et al., 2019).

Figura 29

Características geométricas de un cuerpo rígido



Nota: Tomado de *Curvas de volteo asociadas a medidas referentes de intensidad sísmica* (p.2), por (Reinoso et al., 2019).

Condición de volteo

El volteo de un bloque se genera cuando este gira alrededor de alguno de sus vértices y se levanta, este movimiento es provocado cuando la magnitud del momento de volteo debido a la fuerza inercial y el giro inducido provocados por una excitación en el bloque, es mayor que el momento resistente, que depende del peso del bloque (Jaimes et al., 2018).

Evaluación y diseño de equipos

Los equipos presentes en un edificio deben estar diseñados para resistir los movimientos ocasionados por un sismo en función de su relación dinámica con el edificio. Para el diseño del equipo y sus anclajes se debe tener en cuenta el comportamiento dinámico del edificio tanto en conjunto como por partes. El edificio actúa como un filtro de vibraciones, y transmite dichas vibraciones a los pisos superiores

principalmente cuando estas vibraciones tienen frecuencias cercanas a la frecuencia natural del edificio (Dowrick, 2011).

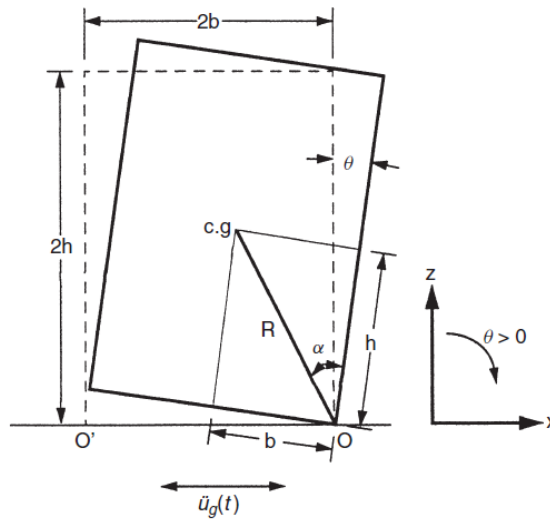
De manera aproximada, el período fundamental de un edificio flexible puede tomarse como $0.1N$ segundos, donde N es el número de pisos, aunque elementos individuales de la estructura, como los pisos en los que se monta el equipo podrían tener períodos fundamentales más bajos. A medida que aumenta la altura del edificio generalmente aumentará la magnitud de las aceleraciones horizontales, debido a la amplificación de aceleraciones del suelo. La determinación precisa de las fuerzas transmitidas a equipos presentes en un edificio es un problema complejo, generalmente solo se realizan en grandes construcciones, para edificios más ordinarios el diseño en base a un espectro de respuesta tiende a ser suficiente (Dowrick, 2011).

Modelo de George W. Housner

Según el trabajo desarrollado por Housner (1963) un cuerpo rígido puede ser modelado de acuerdo a la **Figura 30** y las condiciones necesarias para que un bloque se voltee, dependen de sus características geométricas resumiéndolas en las siguientes ecuaciones:

Figura 30

Modelo de cuerpo rígido



Nota: Tomado de *Rocking Response and Overturning of Equipment Under Horizontal Pulse-Type Motions* (p.15), por (Makris & Roussos, 1998).

El parámetro b , será la dimensión mínima para evitar el volteo del bloque, y se resumen tres ecuaciones dependiendo de diferentes parámetros.

Dependiendo de la velocidad del movimiento del suelo S_v .

$$b = S_v * \sqrt{\frac{h}{g}} \quad (5)$$

Sometido a un pulso cuadrado de aceleración.

$$b = \frac{a}{g} * \frac{2h}{1 + \sqrt{1 + \frac{4h}{g * t_1^2}}} \quad (6)$$

Sometido a un pulso sinusoidal.

$$b = \frac{a}{g} * \frac{h}{\sqrt{1 + \frac{h}{g} \left(\frac{2\pi}{T_g}\right)^2}} \quad (7)$$

En donde:

a = Aceleración del suelo.

G = Valor de la constante de la gravedad.

T_g = Es el periodo del pulso correspondiente a la aceleración del suelo.

t₁ = Es el periodo del pulso cuadrado necesario para producir un volcamiento

Modelo propuesto por Makris & Roussos

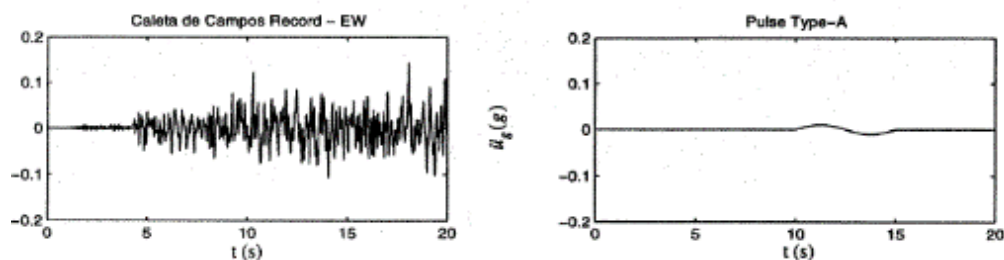
En este estudio Makris & Roussos (1998) presentan las ecuaciones desarrolladas para tres diferentes tipos de pulsos: El pulso cicloidal Tipo A , el Tipo B, y el pulso Tipo Cn, donde n representa el número de ciclos del pulso.

A continuación, se presentan tres ejemplos de registros de aceleraciones producidas por terremotos en las que se puede diferenciar los tipos de pulsos antes descritos.

En la **Figura 31** podemos observar un pulso cicloidal Tipo A, este se aproxima como un pulso hacia adelante.

Figura 31

Aceleración en terremoto de Michoacán en 1985 y un pulso tipo A

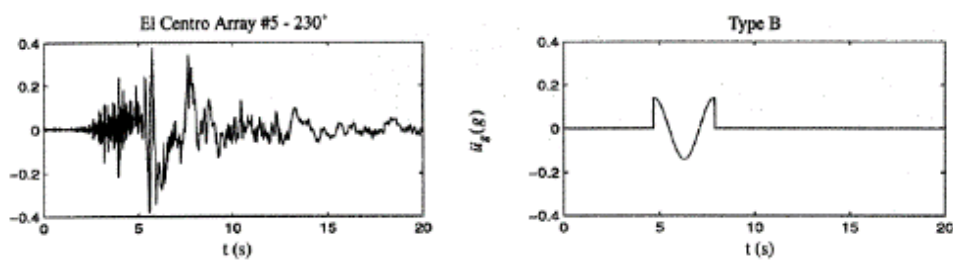


Nota: Tomado de *Rocking Response and Overturning of Equipment Under Horizontal Pulse-Type Motions* (p.30), por (Makris & Roussos, 1998).

En la **Figura 32** podemos observar un pulso cicloidal Tipo B, este se aproxima como un pulso hacia adelante y hacia atrás.

Figura 32

Aceleración en terremoto de California en 1979 y un pulso tipo B

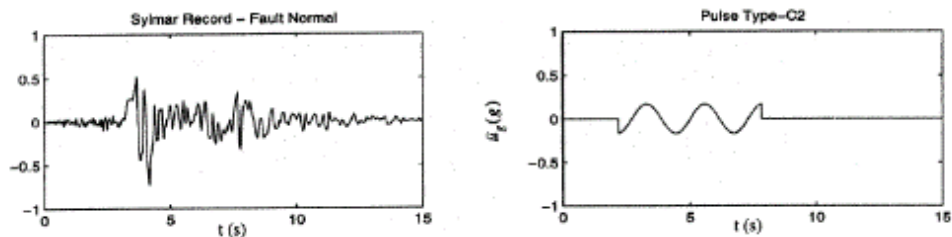


Nota: Tomado de *Rocking Response and Overturning of Equipment Under Horizontal Pulse-Type Motions* (p.31), por (Makris & Roussos, 1998).

En la **Figura 33** podemos observar un pulso Tipo C_n , este se aproxima como un movimiento registrado que exhibe n ciclos principales en su historial de aceleraciones, velocidad y desplazamiento, en este caso se observan 2 ciclos.

Figura 33

Aceleración en terremoto de Northridge en 1994 y un pulso tipo C2



Nota: Tomado de *Rocking Response and Overturning of Equipment Under Horizontal Pulse-Type Motions* (p.36), por (Makris & Roussos, 1998).

El esquema del procedimiento propuesto para estimar el nivel de un movimiento de tierra dado que es necesario para volcar un equipo se basa en el modelo descrito por Housner (1963) y tiene las siguientes variables y en base a la **Figura 30**, siendo R la distancia entre el centro de gravedad y los puntos O y O' , una esbeltez, α y frecuencia determinada como parámetro, p , se presentan a continuación:

$$\tan(\alpha) = \frac{b}{h} \quad (8)$$

$$p = \sqrt{\frac{3g}{4R}} \quad (9)$$

$$\omega_p = \frac{2\pi}{T_p} \quad (10)$$

En donde:

g Valor constante de la gravedad.

ω_p Frecuencia del pulso

T_p Periodo del pulso

Según el trabajo desarrollado por Makris & Roussos (1998) el análisis del comportamiento dinámico de cuerpos rígidos se resumen en el siguiente proceso:

1. En el registro de aceleraciones localizar el tiempo en el que tiene lugar el pico de aceleración máxima del terreno a_p .

2. Ampliar el registro de velocidad cerca del momento de la aceleración máxima del terreno, e identificar el tipo y período T_p , del registro que resulta en la aceleración máxima del suelo. Estimar la amplitud de velocidad, v_p del registro de velocidades, los valores de v_p y T_p deben cumplir con la ecuación (13).

3. Calcular la aceleración mínima de vuelco a_{po} según la ecuación (11) donde $\beta = \frac{1}{6}$ para pulsos tipo A o C_n , y $\beta = \frac{1}{4}$ para un pulso tipo B.

$$a_{po} = \alpha \left[1 + \beta \left(\frac{\omega_p}{P} \right) \right] \quad (11)$$

4. Calcular la razón r . Esta relación da el nivel aproximado del movimiento del suelo que volcará un bloque con una esbeltez α y una frecuencia p

$$r = \frac{a_{po}}{a_p} \quad (12)$$

5. En caso de que el historial de velocidad exhiba un pulso distinguible de larga duración, identificar la amplitud de velocidad, v_p , y el periodo T_p , de este pulso. Luego, calcular la aceleración a_p correspondiente a este pulso con la ecuación (13)

$$a_p = \frac{2\pi}{T_p} v_p = \omega_p v_p$$

6. Calcular la aceleración de vuelco mínima a_{po} , de este pulso como en el paso 3 con la ecuación (11).

7. Repetir el paso 4 utilizando el valor a_p estimado en el paso 5 y el valor a_{po} calculado en el paso 6. Si la proporción r calculada en el paso 7 es mayor que la proporción calculada en el paso 4, el bloque se vuelca debido al pulso de corta duración para el nivel del movimiento del suelo calculado en el paso 4. Por el contrario, si la relación r calculada en el paso 7 es menor que la calculada en el paso 4, el bloque se voltea debido al pulso de larga duración y para el nivel del movimiento del suelo calculado en paso 7.

Levantamiento de equipos

Después de analizar varios equipos presentes en el hospital se eligieron los más relevantes para este estudio, siendo considerado el valor económico, peso, dimensiones, y la función que cumplen dentro del hospital, se presentan a continuación:

Equipos médicos

Los equipos médicos más relevantes son un equipo de tomografía computarizada marca SIEMENS, una máquina de radiografía marca ITALRAY, un equipo de esterilización marca MATACHANA.

Figura 34

Tomógrafo SIEMENS



Este equipo esta simplemente apoyado sobre el piso del hospital y no tiene ningún tipo de empotramiento

Figura 35

Equipo de Rayos X



Este equipo tampoco dispone de algún tipo de anclaje y está simplemente apoyado sobre el piso del hospital

En la **Figura 36** se presenta un esterilizador marca Matachana, que no dispone de ningún anclaje.

Figura 36

Esterilizador Matachana



También serán analizados equipos médicos más pequeños y que disponen de mayor movilidad tales como ecógrafos, máquinas de hemodiálisis, monitores de signos vitales, y respiradores.

Figura 37

Ecógrafos marca Mindray



Nota: Estos equipos tienen ruedas móviles

Figura 38

Máquina de hemodiálisis marca OCM



Equipos hidrosanitarios

Ahora se presenta una planta de ósmosis inversa ubicada en el nivel N+8.00 la cual además cuenta con filtros de ablandamiento y un tanque de recirculación, y también existe una cisterna en la terraza, ninguno de estos equipos está anclado.

Figura 39

Planta de ósmosis y filtros de ablandamiento



En la **Figura 40** se puede observar un tanque de recirculación de agua con capacidad para 1,000 litros. El tanque no está anclado, y no posee conexiones flexibles

Figura 40

Tanque de recirculación



Equipos eléctricos

En esta categoría se encuentra un Sistema de Alimentación Interrumpida marca GENERAL ELECTRIC, y está presente en todas plantas del hospital.

Figura 41

UPS marca GENERAL ELECTRIC



Resumen de equipos

A continuación, se presenta una tabla de resumen de los equipos presentes en el hospital que han sido considerados para estudio

Tabla 3

Equipos seleccionados

Número	Equipos	Nivel	Marca	Modelo
1	Tomógrafo	N+3.50	Siemens	Emotion 16
2	Autoclave	N+3.50	Matachana	S1000
3	Ups	Todos	Ge	Lp 33 series ups
4	Equipo de rayos x	N+3.50	Italray	Bt-statix
5	E. De hemodiálisis	N+8.00	Ocm	4008s classix
6	Planta osmosis	N+8.00	-	-

Número	Equipos	Nivel	Marca	Modelo
7	Filtros de ablandamiento	N+8.00	-	-
8	Tanque de recirculación	N+8.00	-	-
9	Cisternas	N+17.00	-	-
10	Monitor	Todos	Edan	Elite v6

Análisis del comportamiento de equipos

A continuación, se presenta el análisis de los equipos considerados para este estudio. En la **Tabla 4** se muestran los equipos y las variables de cada uno de ellos, y las respuestas en el tiempo de los cuatro niveles del Bloque B, estos acelerogramas fueron obtenidos de un análisis de respuesta en el tiempo de la estructura sometida a un acelerograma escalado presentado anteriormente, así como también el uso de RMotion y un resumen de los resultados obtenidos en esta sección.

Tabla 4

Equipos y variables de estudio

Equipo	Código	Base (m)	Altura (m)	Nivel
Cuerpo del tomógrafo	1	0.35	0.90	N-0.10
Cama del tomógrafo	2	0.34	0.47	N-0.10
Consola del tomógrafo	3	0.40	0.37	N-0.10
Autoclave	11	0.50	0.98	N-0.10
UPS	21	0.36	0.90	N-0.10
Monitor	81	0.12	0.19	N-0.10

Equipo	Código	Base (m)	Altura (m)	Nivel
Equipo de hemodiálisis	41	0.25	0.69	N-0.10
Ecógrafo	71	0.25	0.60	N-0.10
Camilla de E. Rayos X	31	0.39	0.38	N-0.10
Generador de E. Rayos X	32	0.24	0.70	N-0.10
UPS	22	0.36	0.90	N+4.40
Planta osmosis	51	0.40	0.75	N+4.40
Filtros de ablandamiento	52	0.25	0.90	N+4.40
Tanque de recirculación	53	0.53	0.98	N+4.40
Ecógrafo	72	0.25	0.60	N+4.40
Monitor	82	0.12	0.19	N+4.40
Ecógrafo	73	0.25	0.60	N+8.90
UPS	23	0.36	0.90	N+8.90
Monitor	83	0.12	0.19	N+8.90
Cisterna	61	0.94	0.90	N+13.4

Acelerogramas por cada piso

Las respuestas en el tiempo de los cuatro niveles del Bloque B, fueron obtenidos de un análisis de respuesta en el tiempo de la estructura sometida a un acelerograma sintético obtenido a partir del espectro MCE y el acelerograma registrado en la estación de Santa Mónica durante el terremoto de Northridge en 1994.

Figura 42

Respuesta en el tiempo del nivel N+13.40

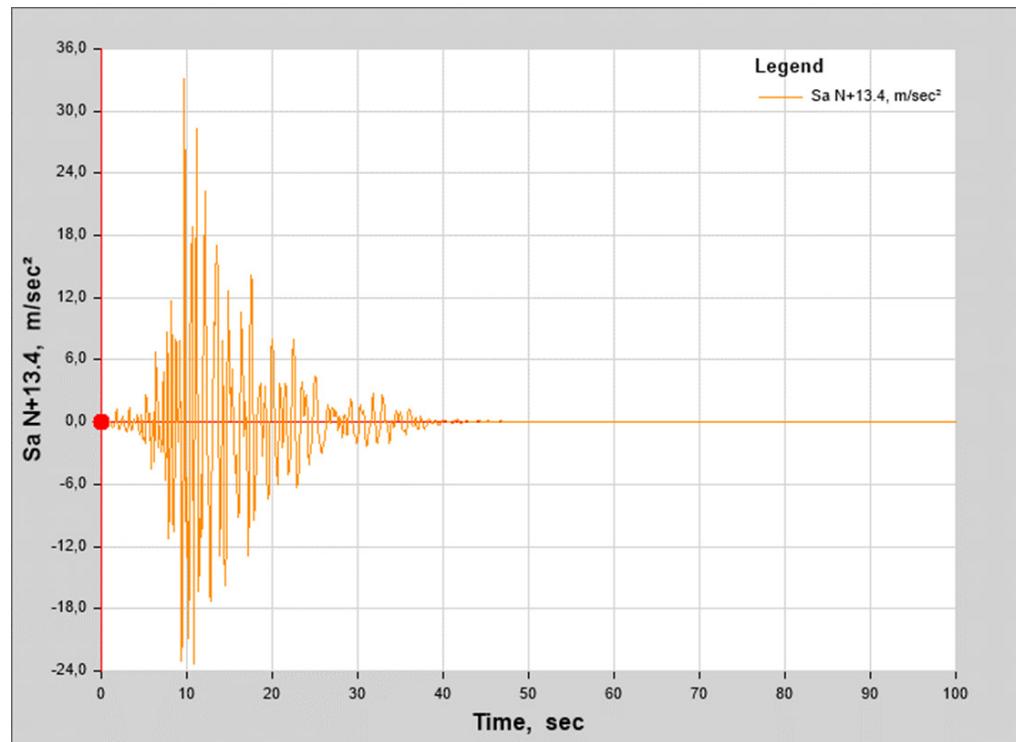


Figura 43

Respuesta en el tiempo del nivel N+8.90

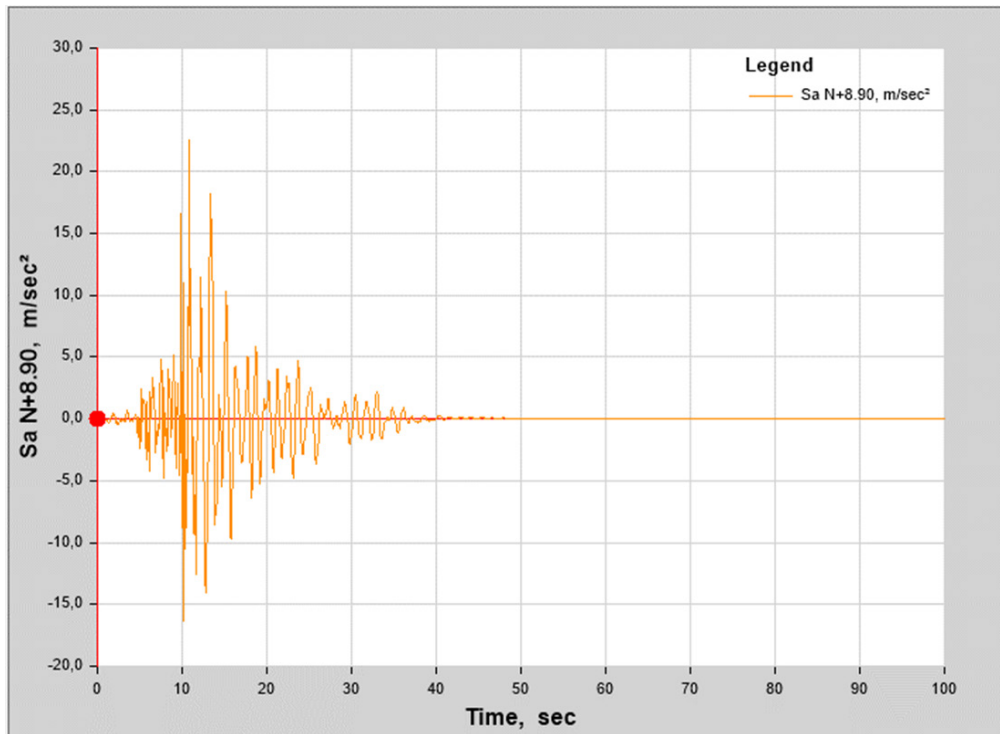


Figura 44

Respuesta en el tiempo del nivel N+4.40

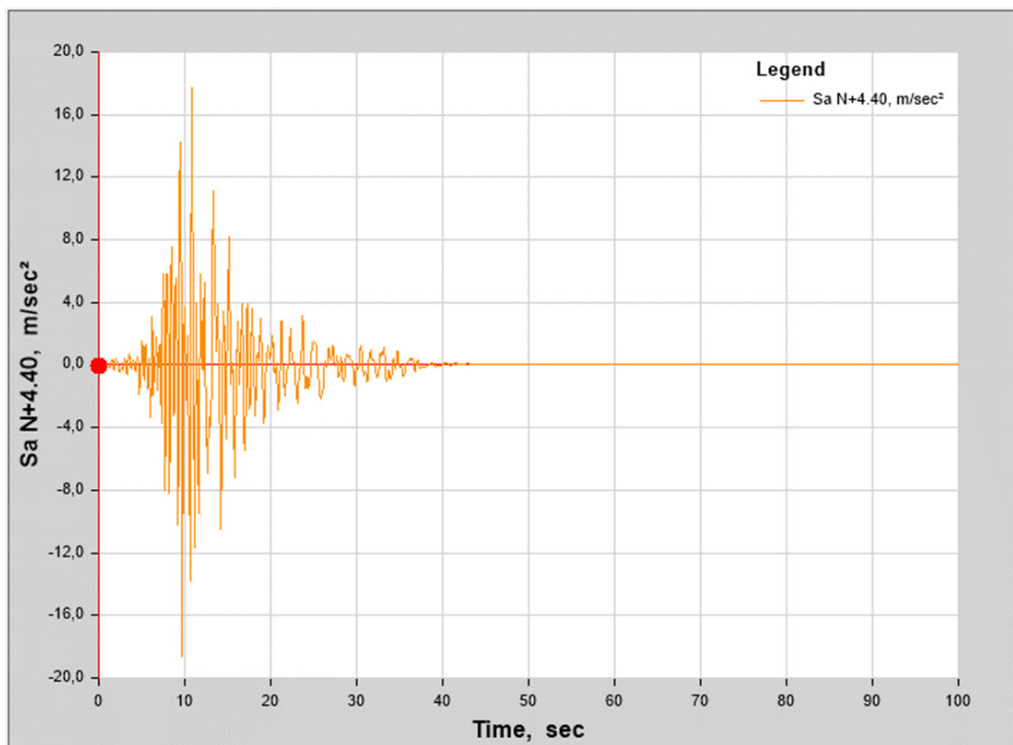
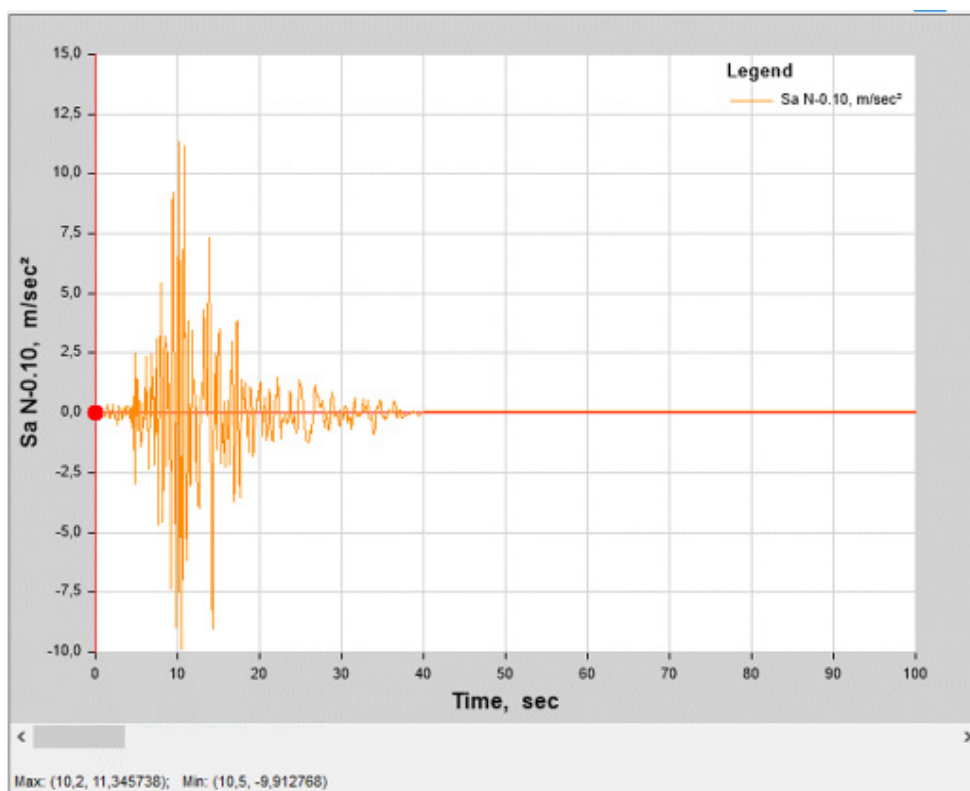


Figura 45

Respuesta en el tiempo del nivel N-0.10



Las aceleraciones máximas registradas en cada piso, el periodo y tipo de pulso para cada modelo correspondiente se presentan en la **Tabla 5**

Tabla 5

Aceleraciones y periodos a nivel de piso

Nivel	Sa (m/s ²)	T (s)	
		Makris	Housner
N+13.4	33.18	0.53	0.9
N+8.90	22.58	0.61	0.8
N+4.40	17.68	0.67	0.6
N-0.10	11.35	0.4	0.2

Análisis con RMotion

En esta sección se hace uso de la herramienta RMotion presentada en el Capítulo V que fue desarrollada en base a los modelos expuestos en este capítulo, se obtuvieron los resultados presentados a continuación.

Para las evaluar la condición de los equipos se agruparon en función del nivel en donde se encuentran y se ingresan las variables de cada equipo presentadas en la **Tabla 4**, también se debe ingresar las aceleraciones, periodo y tipo de pulso correspondientes a cada nivel del edificio y a cada modelo de cálculo como se muestra en la **Tabla 5**.

A continuación se puede observar el análisis de los equipos presentes en el nivel N+4.40 siendo analizados con el modelo desarrollado por Housner (1963) en la **Figura 46**, y con el modelo de Makris & Roussos (1998) en la **Figura 47**.

Figura 46

Equipos analizados según el Modelo de Housner

Inicio | Modelo Makris | Modelo Housner | Reforzamiento | Diseño | Ayuda

ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

MODELO DE GEORGE W. HOUSNER

Modo de cálculo: Aceleración del suelo

Ingreso Aceleración (m/s²): 17.78

Ingreso Período (s): 0.6

Ingreso parametros

ID	b (m)	h (m)
1	22	0.36
2	51	0.40
3	52	0.25
4	53	0.53
5	72	0.25
6	82	0.12
7		
8		
9		
10		

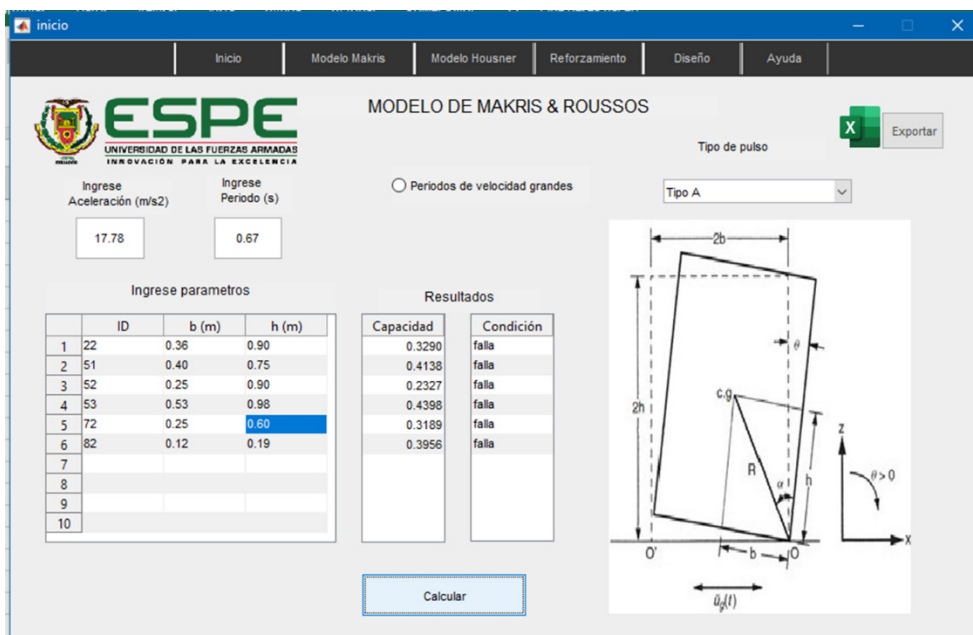
Resultados

Base req. (m)	Condición
0.4906	fallo
0.4438	fallo
0.4906	fallo
0.5138	ok
0.3918	fallo
0.1949	fallo

Calcular

Figura 47

Equipos analizados según el Modelo de Makris & Roussos



En este caso se puede observar que ambos modelos reportan un resultado similar.

Resumen de resultados

Los equipos seleccionados se analizaron utilizando RMotion, para ello se utilizó los acelerogramas obtenidos del análisis de respuesta en el tiempo y los modelos desarrollados por Housner (1963) y por Makris & Roussos (1998) descritos en este capítulo.

En la **Tabla 6** se presenta los resultados de este análisis, la condición **falla** significa que el equipo comenzará a balancearse hasta volcarse, y la condición **ok** significa que el equipo comenzará a balancearse, pero no se volcará, a pesar de que el equipo no sufra un volcamiento este puede resultar dañado por efectos del balanceo.

Tabla 6*Resultados de análisis de equipos*

Equipo	Nivel	Modelo	
		Housner	Makris
Cuerpo del tomógrafo	N-0.10	ok	falla
Cama del tomógrafo	N-0.10	ok	ok
Consola del tomógrafo	N-0.10	ok	ok
Autoclave	N-0.10	ok	falla
UPS	N-0.10	ok	falla
Monitor	N-0.10	ok	falla
Equipo de hemodiálisis	N-0.10	ok	falla
Ecógrafo	N-0.10	ok	falla
Camilla de E. Rayos X	N-0.10	ok	ok
Generador de E. Rayos X	N-0.10	ok	falla
UPS	N+4.40	falla	falla
Planta osmosis	N+4.40	falla	falla
Filtros de ablandamiento	N+4.40	falla	falla
Tanque de recirculación	N+4.40	ok	falla
Ecógrafo	N+4.40	falla	falla
Monito	N+4.40	falla	falla
Ecógrafo	N+8.90	falla	falla
UPS	N+8.90	falla	falla
Monitor	N+8.90	falla	falla
Cisterna	N+13.4	falla	falla

Capítulo IV

Diseño de anclajes

Introducción

En este capítulo se presentan conceptos y procedimientos a seguir descritos en la norma ASCE 41-17 para la evaluación y reforzamiento de elementos no estructurales. Posteriormente se presentarán los resultados del análisis y una propuesta de arriostramiento para los equipos descritos en el capítulo anterior.

Marco teórico

A continuación, se establece los requisitos para la evaluación sísmica y la adaptación de componentes y sistemas arquitectónicos, mecánicos y eléctricos existentes que están instalados permanentemente o son parte integral de un sistema de construcción. Se proporcionan requisitos para componentes no estructurales dependiendo de los niveles de rendimiento elegidos para este estudio. Estos requerimientos están basados en las normas ASCE 7-16 y ASCE 41-17.

Nivel de rendimiento no estructural

El nivel de rendimiento no estructural con el cual se adaptarán los componentes no estructurales de un edificio se seleccionará entre cinco niveles de rendimiento no estructural, estos son: Operacional, Retención de posición, Seguridad de vida, Riesgos reducidos, y No considerados.

Operacional.

En este nivel de rendimiento se requiere que posterior al daño ocasionado por un terremoto, los componentes no estructurales puedan proporcionar las funciones que proporcionaban en el edificio antes del terremoto.

Retención de posición.

En este nivel los componentes no estructurales después de un terremoto pueden dañarse en la medida en que no dejen de funcionar de inmediato, pero se deben asegurar en su lugar para evitar daños causados por caídas, o roturas de las conexiones de servicios.

Seguridad de vida.

Es el estado de daño posterior al terremoto en el que los componentes no estructurales pueden dañarse, pero el daño consecuente no representa una amenaza para la vida.

Reducido.

Es el estado de daño posterior al terremoto en el que los componentes no estructurales están dañados y podrían crear riesgos de caída, pero los componentes no estructurales de alto riesgo, están asegurados para evitar caídas en áreas de concentración pública, de no ser así estos componentes podrían representar un riesgo para la seguridad de la vida de muchas personas. La preservación de la salida, la protección de los sistemas de extinción de incendios y cuestiones similares de seguridad de la vida no son considerados en este nivel.

No considerado.

Cuando una evaluación o modificación no considera todos los componentes no estructurales a uno de los niveles antes mencionados, el nivel de rendimiento no estructural será rendimiento no estructural no considerado.

Diseño de arriostramiento de componentes no estructurales

Los componentes no estructurales se diseñarán para lograr el cumplir el nivel de rendimiento seleccionado.

Los requisitos de análisis, evaluación y modernización para el Nivel de rendimiento Operativo se basarán en los requisitos de esta norma, aumentados con los requisitos de ASCE 7-16, Capítulo 13, asumiendo que todos los elementos no estructurales tienen un factor de importancia componente, I_p , de 1.5.

Cálculo de fuerzas de diseño

Las fuerzas en componentes no estructurales se calcularán de la siguiente manera:

1. Para un estudio estático las fuerzas sísmicas se calcularán de acuerdo con la con la sección: Fuerzas sísmicas horizontales de diseño.
2. Alternativamente, se calcula las fuerzas sísmicas dinámicas de acuerdo con la sección: Análisis Dinámico.

Fuerzas de diseño sísmico

La fuerza de diseño sísmico horizontal **F_p** se aplicará en el centro de gravedad del componente y se distribuirá en relación con la distribución de masa del componente y se determinará de acuerdo con las ecuaciones (14), o (19), de acuerdo a los criterios y procedimientos relacionados a ellas.

Fuerzas sísmicas horizontales de diseño.

Las fuerzas sísmicas horizontales sobre componentes no estructurales se determinarán de acuerdo con la ecuación (14).

$$F_p = \frac{0.4a_p S_{XS} W_p \left(1 + \frac{2x}{h}\right)}{\frac{R_p}{I_p}} \quad (14)$$

F_p calculado de acuerdo con la ecuación (14) se basará en la rigidez del componente y la ductilidad de su arriostramiento y anclaje, pero no debe exceder el valor determinado de **F_p** calculado de acuerdo con la ecuación (15) y no será inferior a **F_p** calculado de acuerdo con la ecuación (16).

$$F_p(\text{máximo}) = 1.6S_{XS}I_pW_p \quad (15)$$

$$F_p(\text{minimo}) = 0.3S_{XS}I_pW_p \quad (16)$$

$$S_{XS} = F_aS_s \quad (17)$$

$$S_s = \frac{3}{2}Sa \quad (18)$$

El parámetro de aceleración de respuesta espectral para períodos de diseño cortos, S_{XS} , se obtendrá de la ecuación (17) donde F_a son los coeficientes de sitio determinados respectivamente en la **Tabla 8**

Coefficientes de sitio F_a

Donde:

W_p = Peso del componente en operación

a_p = Factor de amplificación de componentes de acuerdo a la **Tabla 7**

F_p = Fuerza sísmica aplicada horizontalmente en el centro de gravedad del componente y distribuida de acuerdo con la distribución de su masa.

S_{XS} = Parámetro de aceleración de respuesta espectral en períodos cortos para el nivel de riesgo sísmico asociado con el nivel de rendimiento estructural para el edificio.

h = Elevación promedio del techo de la estructura, en relación con el nivel de su base.

R_p = Factor de modificación de la respuesta del componente de acuerdo a la **Tabla 7**.

x = Elevación del punto medio de la unión del componente a la base de la estructura. Para los componentes anclados por debajo del nivel del suelo, el valor de x se tomará como 0. El valor de x nunca debe exceder h .

I_p = Factor de importancia del componente.

S_S = Aceleración máxima esperada para el espectro *MCE*, expresada como fracción de la aceleración de la gravedad g .

S_a = Aceleración máxima esperada para el espectro de diseño, expresada como fracción de la aceleración de la gravedad g

A continuación, se presentan los coeficientes a usar de los diferentes tipos de componentes.

Tabla 7

Coeficientes para equipos

Equipos	a_p	R_p	Ω_0
Techos falsos, gabinetes, equipo de laboratorio, estanterías	1	2.5	2
Motores, bombas, y recipientes a presión, sin soportes tipo falda	1	2.5	2

Equipos	a_p	R_p	Ω_0
Recipientes a presión, con soportes tipo falda	2.5	2.5	2
Generadores, baterías, inversores, motores y transformadores	1	2.5	2

Nota: Tomado de *Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures* (p.129), por (ASCE, 2016).

En la siguiente tabla se presentan los coeficientes de sitio F_a necesarios para el cálculo de S_x .

Tabla 8

Coefficientes de sitio F_a

Suelo	$S_s \leq 0.25$	$S_s = 0.5$	$S_s = 0.75$	$S_s = 1.0$	$S_s = 1.25$	$S_s \geq 1.5$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
C	1.3	1.3	1.2	1.2	1.2	1.2
D	1.6	1.4	1.2	1.1	1.0	1.0
E	2.4	1.7	1.3	*	*	*
F	*	*	*	*	*	*

Nota: Tomado de *Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures* (p.84), por (ASCE, 2016). Para determinar los valores de * consultar la sección 11.4.8 del ASCE 7-16.

Análisis Dinámico.

En lugar de las fuerzas determinadas de acuerdo con la ecuación (14), las aceleraciones utilizadas para determinar las fuerzas de diseño para componentes no

estructurales pueden determinarse mediante espectros de respuesta de piso usando la ecuación (19).

$$F_p = \frac{a_i a_p W_p}{\left(\frac{R_p}{I_p}\right)} A_x \quad (19)$$

La determinación de las aceleraciones de la estructura utilizando estos métodos se realizará con $R_p = 1.0$. Las fuerzas sísmicas para el análisis dinámico lineal se calcularán de acuerdo con la ecuación (19), donde:

a_i = Aceleración máxima en el nivel i obtenida del análisis modal

A_x = Factor de amplificación torsional determinado por la ecuación (20).

$$A_x = \left(\frac{\delta_{\max}}{1.2\delta_{\text{avg}}} \right)^2 \quad (20)$$

Donde:

δ_{\max} = *Máximo desplazamiento en el nivel x calculado asumiendo $A_x = 1$ mm*

δ_{avg} = *Promedio de los desplazamientos en los puntos extremos de la estructura en el nivel x*

El factor de amplificación torsional **A_x** no será inferior a 1.0 y no será mayor a 3.0, la carga más severa para cada elemento se considerará para el diseño.

Fuerzas sísmicas verticales.

Las fuerzas sísmicas verticales que actúan sobre componentes no estructurales se determinarán de acuerdo con la ecuación (21).

F_{pv} se calculará de acuerdo con la ecuación (21) pero no necesita exceder **F_p** calculado de acuerdo con la ecuación (15).

(21)

$$F_{pv} = 0.2S_{XS}W_P$$

Donde:

F_{pv} = Fuerza sísmica de la componente aplicada verticalmente en el centro de gravedad del componente o distribuida de acuerdo con la distribución de masa del componente.

Todos los demás términos en la ecuación (21) será como se define en la sección anterior.

Combinaciones de carga

Las fuerzas no estructurales para los componentes y elementos de arriostramiento correspondientes se determinarán con base en las siguientes combinaciones de carga:

$$Q_{UF} = 1.2W_P + F_{vp} \pm F_p \quad (22)$$

$$Q_{UF} = 0.9W_P - F_{vp} \pm F_p \quad (23)$$

Las fuerzas no estructurales para el anclaje de componentes al hormigón y la mampostería se determinarán en función de las siguientes combinaciones de carga:

$$Q_{UF} = 1.2W_P + F_{vp} \pm \Omega_0 F_p \quad (24)$$

$$Q_{UF} = 0.9W_P - F_{vp} \pm \Omega_0 F_p \quad (25)$$

Donde:

Ω_0 = Factor de sobrecarga para el componente presentado en la **Tabla 7**

Anclaje de componentes no estructurales

Los componentes no estructurales y sus soportes deben estar unidos o anclados a la estructura de acuerdo con los requisitos de esta sección, y la unión debe cumplir con los requisitos para el material principal como se establece a continuación.

Fuerza de diseño en el anclaje.

La fuerza en el anclaje se determinará en función de las fuerzas calculadas para cada componente según las ecuaciones (14), y (15), excepto que R_p no se tomará como mayor que 6.

Anclajes en hormigón o mampostería

Anclajes en hormigón.

Los anclajes en concreto deben diseñarse de acuerdo con el Capítulo 17 de ACI 318 del año 2019.

Anclajes en mampostería.

Los anclajes en mampostería deben diseñarse de acuerdo con la norma TMS 402 del año 2016. Los anclajes deben diseñarse para regirse por la resistencia a la tracción o al corte de un elemento de acero dúctil.

Múltiples anclajes.

La determinación de la distribución de fuerza de múltiples anclajes en para un componente deberá tener en cuenta la rigidez y la ductilidad del componente, soporte de componentes, anclajes, estructura y la capacidad de redistribuir cargas a todos los elementos de anclaje.

Componentes mecánicos y eléctricos

Los componentes mecánicos y eléctricos y sus soportes deberán cumplir los requisitos descritos en cada caso. El anclaje de componentes mecánicos y eléctricos y sus soportes a la estructura deben cumplir con los requisitos de la sección Anclaje de componentes no estructurales. Los coeficientes correspondientes a cada componente se seleccionarán de la **Tabla 7**.

Equipamiento mecánico.

Es el equipo utilizado para la operación del edificio que cumple con uno o más de los siguientes tipos se evaluará de acuerdo con esta sección para el Nivel de rendimiento de Seguridad de vida o Retención de posición.

1. Todos los equipos que pesen más de 400 lb.
2. Equipo no anclado que pese más de 100 lb. Que no tenga un factor de seguridad contra el vuelco de 1.5 o más cuando se apliquen fuerzas sísmicas, calculadas de acuerdo con la sección 13.4.3 del ASCE 7-16;
3. Equipo que pese más de 20 lb que esté unido al techo, pared u otro soporte a más de 1.2 m sobre el piso.

Recipientes de almacenamiento y calentadores de agua

Los recipientes de almacenamiento y los calentadores de agua deben incluir todos los recipientes que contengan fluidos utilizados para la operación del edificio.

Los recipientes se clasificarán en una de las siguientes dos categorías:

1. Categoría A. Recipientes con soporte estructural de contenido, en los cuales el caparazón es soportado por patas o una falda.

2. Categoría B. Recipientes de fondo plano en los que el peso del contenido es soportado por el piso, el techo o una plataforma estructural.

Equipos eléctricos y de comunicaciones

Todos los equipos eléctricos y de comunicación, incluidos tableros de paneles, bastidores de baterías, centros de control de motores, interruptores y otros componentes fijos ubicados en salas eléctricas o en cualquier otro lugar del edificio que cumplan cualquiera de los siguientes criterios, deberán cumplir con los requisitos de esta sección para Seguridad de vida y Retención de posición:

1. Todos los equipos que pesen más de 400 lb.
2. Equipo no anclado que pese más de 100 lb que no tenga un factor de seguridad contra el vuelco de 1.5 o mayor cuando se apliquen fuerzas sísmicas.
3. Equipo que pese más de 20 lb que esté unido al techo, pared u otro soporte a más de 1.2 m sobre el piso.
4. Equipo de operación del edificio. Para el Nivel de rendimiento operativo, todos los equipos en regiones de sismicidad alta y moderada se evaluarán de acuerdo con esta sección.

Contenedores de material peligroso

El almacenamiento de material peligroso debe incluir contenedores instalados sobre soportes, sobre si mismos, o almacenados en mostradores o estantes, que contienen materiales definidos como peligrosos, incluidos los siguientes tipos:

1. Tanques de gas propano;
2. Recipientes de gas comprimido;

3. Contenedores de almacenamiento de productos químicos secos o líquidos.

Las estructuras grandes no edificables, como los tanques grandes que se encuentran en la industria pesada o las centrales eléctricas, los tanques de almacenamiento de petróleo de techo flotante y los tanques de propano grandes de más de 3.1m de largo en las plantas de fabricación o distribución de propano no necesitan cumplir con los requisitos de esta sección.

Criterios de aceptación

Los criterios de aceptación se aplicarán de acuerdo a cada nivel de rendimiento como se muestra a continuación.

Nivel de rendimiento de seguridad de vida.

El anclaje para equipos mecánicos debe ser capaz de resistir las fuerzas sísmicas calculadas de acuerdo con la sección: Fuerzas de diseño sísmico, utilizando un factor de importancia de componente, I_p , de 1.0. Los equipos que forman parte del sistema de seguridad de la vida, como los equipos de extinción de incendios, o que contienen materiales peligrosos deben cumplir los requisitos para el Nivel de rendimiento operativo

El equipo que forma parte del sistema de energía de emergencia debe cumplir con los requisitos para el Nivel de rendimiento operativo.

Nivel de rendimiento de retención de posición.

El equipo debe cumplir para un factor de importancia de componente, I_p , de 1.0. El anclaje del equipo debe ser capaz de resistir las fuerzas sísmicas calculadas utilizando un factor de importancia del componente, I_p , de 1.0. Los equipos que forman parte del sistema de seguridad de la vida, como los equipos de extinción de incendios, o

que contienen materiales peligrosos deben cumplir los requisitos para el Nivel de rendimiento operativo

Nivel de rendimiento operativo.

El equipo debe cumplir los requisitos de la sección: Diseño de arriostamiento de componentes no estructurales, con base en los requisitos calculados con un factor de importancia del componente, I_p , de 1.5.

Cálculo de anclajes con RMotion

En esta sección se presenta el cálculo de fuerzas de diseño para anclajes y también los anclajes necesarios para cada equipo. Para el cálculo de fuerzas de diseño para anclaje con la herramienta RMotion presentada en el Capítulo V es necesario ingresar las variables mostradas en la **Tabla 9**, las aceleraciones a nivel de piso, y la máxima aceleración presente en el espectro *MCE* presentadas en la **Tabla 2**.

Fuerzas estáticas

En la **Figura 48** se muestra el cálculo de las fuerzas de diseño para anclajes en elementos de acero y hormigón utilizando el análisis estático descrito en la sección: Fuerzas sísmicas horizontales de diseño.

Figura 48

Análisis estático

inicio

Inicio | Modelo Makris | Modelo Housner | Reforzamiento | Diseño | Ayuda

ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

REFORZAMIENTO ASCE 41-17

Exportar

Modo de cálculo: Análisis estático

Nivel de rendimiento: NR- Operacional

Ingrese Aceleración (m/s²): 19.36

Ingrese Coeficiente (fa): 1

Ingrese Altura total de edificio (m): 17

Ingrese parametros

	ID	x	Wp	ap	rp	Ω
1	1	3.5	1200	1	2.5	2
2	2	3.5	400	1	2.5	2
3	3	3.5	60	1	2.5	2
4	11	3.5	2450	1	2.5	2
5	21	3.5	400	1	2.5	2
6	22	8	400	1	2.5	2
7	23	12.5	400	1	2.5	2
8	31	3.5	140	1	2.5	2
9	32	3.5	135	1	2.5	2
10	41	3.5	86	1	2.5	2

Fuerzas de diseño en [Kgf]

Acero	Hormigón
2.7231e+03	4.5887e+03
907.7060	1.5296e+03
136.1559	229.4350
5.5597e+03	9.3686e+03
907.7060	1.5296e+03
907.7060	1.5296e+03
988.1820	1.6905e+03
317.6971	535.3483
306.3508	516.2287
195.1568	328.8568

Overturning of slender objects

Sliding of stocky objects

Ground motion

Calcular

Fuerzas dinámicas

En la **Figura 49** se muestra el cálculo de las fuerzas de diseño para anclajes en elementos de acero y hormigón utilizando el análisis dinámico descrito en la sección: Análisis Dinámico.

Figura 49

Análisis dinámico

inicio

Inicio | Modelo Makris | Modelo Housner | Reforzamiento | Diseño | Ayuda

ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

REFORZAMIENTO ASCE 41-17

Exportar

Modo de cálculo: Análisis dinámico | Nivel de rendimiento: NR- Operacional

Ingreso Aceleración (m/s²): 19.36 | Ingreso Coeficiente (fa): 1 | Ingreso Altura total de edificio (m): 17 | Ingreso δ_{max} : 1 | Ingreso δ_{avg} : 1

Ingreso parametros

	ID	x	Wp	ap	rp	Ω	A_i (m/s ²)
1	1	3.5	1200	1	2.5	2	17.39
2	2	3.5	400	1	2.5	2	17.39
3	3	3.5	60	1	2.5	2	17.39
4	11	3.5	2450	1	2.5	2	17.39
5	21	3.5	400	1	2.5	2	17.39
6	22	8	400	1	2.5	2	22.98
7	23	12.5	400	1	2.5	2	23.98
8	31	3.5	140	1	2.5	2	17.39
9	32	3.5	135	1	2.5	2	17.39
10	41	3.5	86	1	2.5	2	17.39

Fuerzas de diseño en [Kg]

Acero	Hormigón
4.0494e+03	7.2413e+03
1.3498e+03	2.4138e+03
202.4718	362.0668
8.2678e+03	1.4784e+04
1.3498e+03	2.4138e+03
1.6918e+03	3.0978e+03
1.7530e+03	3.2202e+03
472.4342	844.8224
455.5615	814.6502
290.2096	518.9623

Diagrama: Overtuning of slender objects, Sliding of stooey objects, Ground motion

Calcular

Debido a que las fuerzas de diseño son mayores para el análisis dinámico estas fueron elegidas para el diseño de los anclajes.

Diseño de anclajes

Para el diseño de anclajes se cargan las fuerzas de diseño presentadas en la **Figura 49**, se ingresa un módulo de fluencia correspondiente al material elegido para el anclaje, se procede a ingresa un número de anclajes para cada equipo, y esta función de RMotion reporta un diámetro mínimo a ser usado de acuerdo a la información proporcionada como se muestra en la **Figura 50**.

Figura 50

Cálculo de anclajes

DISEÑO DE ANCLAJES AISC 360

Ingreso
Fy (kg/cm²)
6000

Cargar fuerzas anteriores

Hormigón

ID	Axial (Kgf)	Cortante (Kgf)	# Anclajes
1	710.6978	7.2413e+03	8
2	236.8993	2.4138e+03	4
3	35.5349	362.0668	2
4	1.4510e+03	1.4784e+04	8
5	236.8993	2.4138e+03	4
6	236.8993	3.0978e+03	4
7	236.8993	3.2202e+03	4
8	82.9147	844.8224	4
9	79.9535	814.6502	4
10	50.9333	518.9623	4

Área cm ²	Diametro mm
0.2699	5.8619
0.1799	4.7862
0.0540	2.6215
0.5510	8.3759
0.1799	4.7862
0.2309	5.4221
0.2400	5.5282
0.0630	2.8316
0.0607	2.7805
0.0774	3.1385

DISEÑAR SEGÚN
ACI318 - CAP 17

Calcular

En este caso se diseñaron los anclajes para realizarlos en hormigón, para realizar el anclaje se debe tener en cuenta las especificaciones del anclaje a ser usado y las especificaciones del Capítulo 17 del ACI-318 del año 2019.

Resultados

Los equipos y variables necesarias para el análisis de las fuerzas de diseño que serán usadas para el diseño de anclajes se presentan en la **Tabla 9**.

Tabla 9

Variables para análisis de equipos

Equipo	Código	Peso (Kg)	Elev. (m)	ap	rp	Ω	Acel. (m/s ²)
Cuerpo del tomógrafo	1	1200	3.50	1	2.5	2	17.39
Cama del tomógrafo	2	400	3.50	1	2.5	2	17.39
Consola del tomógrafo	3	60	3.50	1	2.5	2	17.39

Equipo	Código	Peso (Kg)	Elev. (m)	ap	rp	Ω	Acel. (m/s²)
Autoclave	11	2450	3.50	1	2.5	2	17.39
UPS	21	400	3.50	1	2.5	2	17.39
UPS	22	400	8.00	1	2.5	2	22.98
UPS	23	400	12.50	1	2.5	2	23.98
Camilla de E. Rayos X	31	140	3.50	1	2.5	2	17.39
Generador de E. Rayos X	32	135	3.50	1	2.5	2	17.39
Equipo de hemodiálisis	41	86	3.50	1	2.5	2	17.39
Planta osmosis	51	200	8.00	1	2.5	2	22.98
Filtros de ablandamiento	52	190	8.00	1	2.5	2	22.98
Tanque de recirculación	53	1000	8.00	1	2.5	2	22.98
Cisterna	61	5000	17.00	1	2.5	2	37.15
Ecógrafo	71	70	3.50	1	2.5	2	17.39
Ecógrafo	72	70	8.00	1	2.5	2	22.98
Ecógrafo	73	70	12.50	1	2.5	2	23.98
Monitor	81	14.5	3.50	1	2.5	2	17.39
Monitor	82	14.5	8.00	1	2.5	2	22.98
Monitor	83	14.5	12.50	1	2.5	2	23.98

Para calcular las fuerzas de diseño de anclajes se utilizó RMotion, además se presenta un número y diámetro mínimo de anclajes necesarios para soportar dichas fuerzas, para este estudio se consideró los anclajes disponibles en el mercado nacional.

Figura 51

Anclaje seleccionado



Los anclajes considerados para este cálculo son el modelo *Wedge-All* de la marca *Simpson Strong-Tie* como se muestra en la **Figura 51**. Para realizar la instalación de estos anclajes se debe considerar las especificaciones del fabricante además del Capítulo 17 del ACI-318 del año 2019.

Tabla 10

Resultados de análisis de equipos

Equipo	Nivel	F. axial Kgf	F. Cortante Kgf	Diám. pulg.	# de anclajes
Cuerpo del tomógrafo	N-0.10	709.60	7240.23	1/4"	8
Cama del tomógrafo	N-0.10	236.53	2413.41	1/4"	4
Consola del tomógrafo	N-0.10	35.48	362.01	1/4"	2
Autoclave	N-0.10	1448.76	14782.14	3/8"	8
UPS	N-0.10	236.53	2413.41	1/4"	4
UPS	N+4.40	236.53	3097.43	1/4"	4

Equipo	Nivel	F. axial Kgf	F. Cortante Kgf	Diám. pulg.	# de anclajes
UPS	N+8.90	236.53	4831.35	1/4"	4
Camilla de E. Rayos X	N-0.10	82.79	844.69	1/4"	4
Generador de E. Rayos X	N-0.10	79.83	814.53	1/4"	4
Equipo de hemodiálisis	N-0.10	50.85	518.88	1/4"	2
Planta osmosis	N+4.40	118.27	1548.72	1/4"	2
Filtros de ablandamiento	N+4.40	112.35	1471.28	1/4"	2
Tanque de recirculación	N+4.40	591.33	7743.58	1/4"	8
Cisterna	N+13.4	2956.65	60391.87	5/8"	12
Ecógrafo	N-0.10	41.39	422.35	1/4"	1
Ecógrafo	N+4.40	41.39	542.05	1/4"	1
Ecógrafo	N+8.90	41.39	563.46	1/4"	1
Monitor	N-0.10	8.57	87.49	1/4"	1
Monitor	N+4.40	8.57	112.28	1/4"	1
Monitor	N+8.90	8.57	116.72	1/4"	1

Capítulo V

RMotion

Introducción

En este capítulo se realizará la presentación una herramienta de cálculo llamada RMotion que permite analizar el comportamiento de los equipos de una manera rápida y sencilla, esta herramienta fue desarrollada en el programa MATLAB en base a las normas mencionadas en este trabajo y presenta una interfaz gráfica fácil de entender y usar.

Desarrollo

RMotion fue desarrollada para que el usuario pueda desplazarse por las diferentes funciones utilizando pestañas que encuentran en la barra superior. A continuación, se presentan las ventanas y elementos de RMotion.

Inicio

En esta ventana se presenta una bienvenida a RMotion, y desde aquí se puede acceder a las demás funciones por medio de la barra de pestañas, que se encuentra en la parte superior.

Figura 52

Ventana de inicio



Desde cualquier ventana se puede utilizar la barra de pestañas para intercambiar de ventanas y funciones de la RMotion.

Modelo Makris

En esta ventana se puede analizar el comportamiento de los equipos utilizando la teoría desarrollada por Makris & Roussos (1998), y en el procedimiento descrito en la sección: Modelo propuesto por Makris & Roussos.

Figura 53

Función del modelo de Makris & Roussos

En esta función deben de ser ingresados los parámetros de aceleración, periodo, y velocidad si es el caso, obtenidos del análisis de la estructura y presentados en el Capítulo II. Así mismo deben ser ingresados los parámetros de base, altura, y un código de identificación para cada equipo definidos en el Capítulo III que van a ser analizados. Esta función tiene 3 opciones de cálculo definidas en la sección: Modelo propuesto por Makris & Roussos.

Esta función reporta la capacidad de resistir las fuerzas de aceleración y velocidad a las que cada equipo está sometido, y varia de 0 a 1, representando los valores menores o iguales a 1 que el equipo sufra un volcamiento, esta condición también se reporta en esta función. Los equipos deben analizarse en los sentidos longitudinal y transversal.

Todas las funciones tienen la opción de exportar los resultados de cada una de ellas hacia una hoja de cálculo del programa EXCEL.

Modo Housner

En esta función se puede analizar el comportamiento de los equipos basados en la teoría desarrollada por Housner (1963), y presentada en la sección: Modelo de George W. Housner.

Figura 54

Función del modelo de George W. Housner

En esta función al igual que en la anterior, se deben ingresar los mismos parámetros obtenidos del análisis de la estructura realizados en el Capítulo II, y las mismas variables de los equipos definidos en el Capítulo III.

Esta función reporta la base necesaria para soportar la aceleración o velocidad a la que el equipo está sometido, si el parámetro b reportado es menor al que tiene el equipo, este no se volcará, en caso contrario el equipo se volcará, además reporta esta condición para cada uno de los equipos analizados, y presenta 3 opciones de cálculos definidos en la sección: Modelo de George W. Housner.

Reforzamiento

Esta función presenta la función del cálculo de la fuerza a la que serán sometidos los anclajes de cada uno de los equipos, está basada en el Capítulo 13 del ASCE 41-17 y su fundamento teórico esta presentado en el Capítulo IV.

Figura 55

Función del Reforzamiento ASCE 41 - 17

Esta función permite realizar un análisis estático o dinámico, y funciona para 3 diferentes niveles de rendimiento. Se debe ingresar una mayor cantidad de parámetros tales como: aceleración, coeficientes, altura total del edificio y de ubicación del equipo.

Reporta la fuerza a la que deben ser diseñados los anclajes o arriostramientos de cada uno de los equipos, para anclajes en hormigón o sobre una estructura de acero. Para mayor detalle de los cálculos y resultados, estos se pueden exportar hacia una hoja de cálculo.

Diseño

En esta pestaña se presenta la función del diseño de los anclajes para que soporten las fuerzas calculadas en la pestaña anterior. Está basada en la norma AISC 360.

Figura 56

Función de Diseño de anclajes AISC 360

Esta función presenta la opción de cargar las fuerzas de diseño previamente calculadas en la ventana anterior. Los parámetros a ingresar son: el número de grupos de anclaje, el número de anclas presentes en cada grupo, el módulo de fluencia del material de anclaje, y las fuerzas de diseño e identificación para cada equipo, si no fueron cargadas previamente.

La función reporta un área de sección transversal mínima en centímetros cuadrados necesaria para soportar las fuerzas de diseño a la que cada equipo está

sometido, así como también un diámetro mínimo del anclaje, estos valores dependen del material en el que serán diseñados.

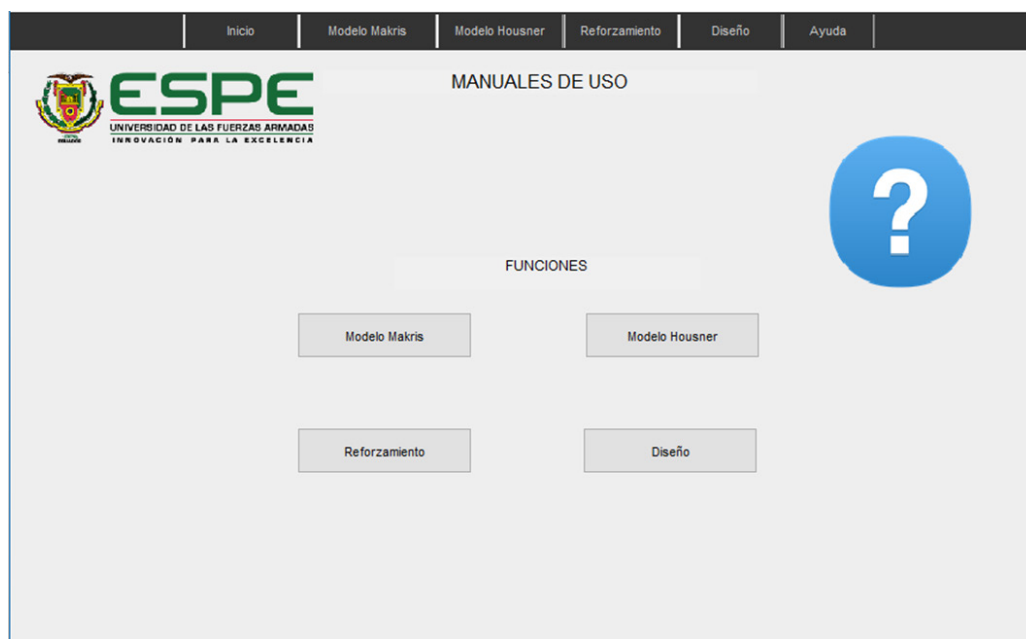
Esta función realiza el cálculo únicamente de los elementos de anclaje, no se considera los soportes y condiciones de instalación. Para el diseño de anclajes en hormigón, además del cálculo presentado en esta función, se deben diseñar los anclajes siguiendo las normas presentes en el Capítulo 17 del ACI 318-19.

Ayuda

En esta función se presentan los manuales de uso de RMotion, así también su fundamento, consideraciones y limitaciones de cada una de las funciones presentes, también se indican de una manera más detallada las unidades de ingreso y de los resultados de cada una.

Figura 57

Función de ayuda



Para un entendimiento pleno de RMotion, se debe consultar además del presente trabajo y manuales proporcionados en esta función, las normas y documentos a las se hace referencia en ellos.

Capítulo VI

Guía de ubicación de equipos

Introducción

En este capítulo se realizará una guía práctica en la que se incluyen recomendaciones de la ubicación de los equipos definidos en el Capítulo III, pisos deberían estar ubicados, tipo de reforzamiento deberían tener, y también recomendaciones generales presentes en la guía realizada por FEMA E-74 (2012).

Resumen

Como se puede observar en la **Tabla 6** varios equipos analizados según el modelo de Makris & Roussos (1998) y el modelo de Housner (1963) fallan, esto significa que los equipos comenzarán a balancearse hasta volcarse, y a pesar de que algunos equipos no fallan esto no significa que no podrían sufrir daño, por este motivo se recomienda que todos los equipos analizados sean anclados para evitar daños por volcamientos y deslizamientos. En los equipos móviles, las ruedas deben estar bloqueadas para evitar desplazamientos, volcamientos, y daños.

Recomendaciones de ubicación

Se recomienda que tanto como la plana de osmosis, filtros de ablandamiento y el tanque de recirculación sean ubicados en la primera planta del hospital, de igual manera se deben considerar utilizar conexiones flexibles en las tuberías.

De forma general los equipos más pesados deben estar anclados en los pisos inferiores ya que al estar ubicados en los pisos superiores van estar sometidos a mayores aceleraciones, y por consiguiente tienen más posibilidades de sufrir volcamientos y daños.

No se deben ubicar equipos grandes y pesados cerca de puertas, escaleras, entradas a ascensores, pasillos, y sitios de concentración de personas, ya que estos podrían obstaculizar las rutas de escape o golpear a las personas.

Anclajes

Se recomienda que se analice con mayor atención los anclajes basándose en las especificaciones técnicas del fabricante de los anclajes elegidos. Para anclajes en hormigón se debe también revisar el Capítulo 17 del ACI 318-19.

Para equipos pesados se deben tener al menos cuatro puntos de anclaje, y para equipos livianos se deben adecuar para poder soportar al menos un anclaje.

Equipos

Para realizar los anclajes de equipos se deben de tomar en como referencia los resultados obtenidos en la **Tabla 10**, y se debe consultar las especificaciones de cada equipo, tipo de anclaje, y estructura en la que se realizara el anclaje. Para anclajes a ser realizados sobre elementos de concreto se debe tomar en cuenta lo expuesto en el Capítulo 17 del ACI-318-19.

Planta de tratamiento

Filtros de ablandamiento.

Los cilindros deben estar anclados a un marco construido para restringir el movimiento y evitar daños por volteo de los cilindros o en las uniones en la tubería como se muestra en la **Figura 58**.

Figura 58

Anclaje de tanques



Nota: Tomado de *Reducing the Risks of Nonstructural Earthquake Damage* (p.6-224), por (FEMA E-74, 2012).

Planta.

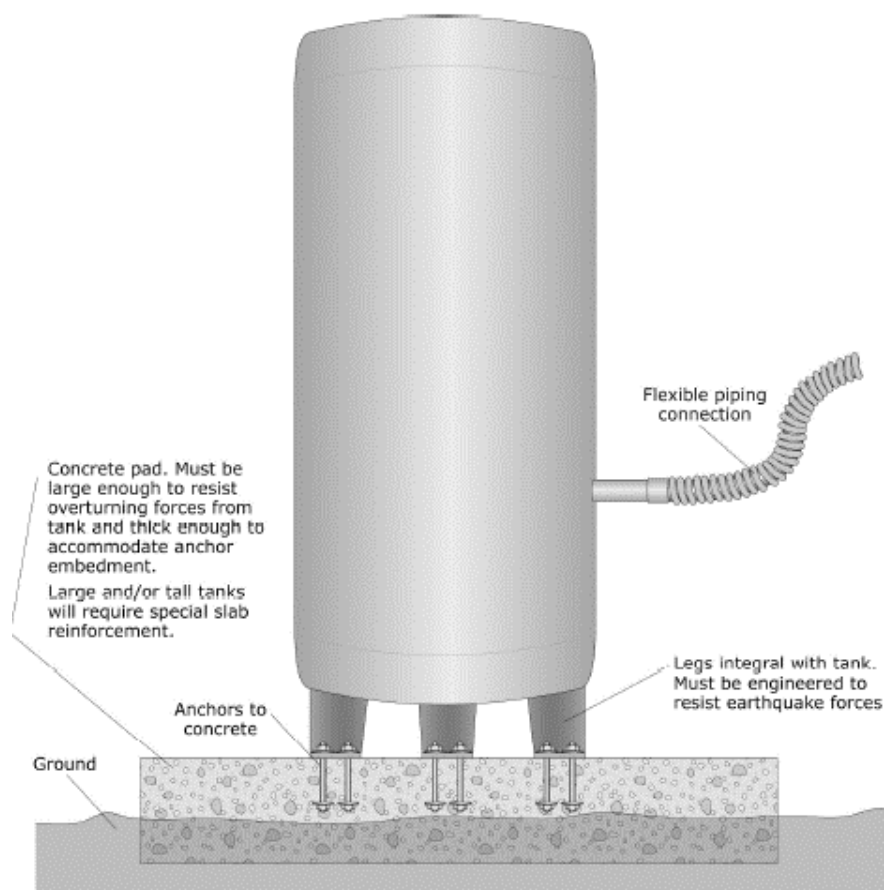
La planta debe ser anclada en al menos cuatro puntos, se debe tomar en como referencia el número y tipo de anclajes presentados en la **Tabla 10**, el tipo de anclaje recomendado se muestra en la **Figura 62**, y se deben incluir conexiones flexibles a las tuberías conectadas a la planta.

Tanque de recirculación.

El tanque debe ser anclado a la losa de concreto utilizando un número y modelos de anclajes apropiados, se puede tomar como referencia los resultados obtenidos en la **Tabla 10**, además de considerar instalar tuberías con conexiones flexibles para evitar daños. También se debe tener en cuenta las especificaciones del tanque para poder realizar el anclaje.

Figura 59

Anclaje de tanques



Nota: Tomado de *Reducing the Risks of Nonstructural Earthquake Damage* (p.6-211), por (FEMA E-74, 2012).

Cisterna

La cisterna debe estar anclada a la losa donde está apoyada, o a su vez se debe anclar a una plataforma metálica que es parte de la estructura, además se debe incluir conexiones flexibles en la tubería para evitar daños por volcamiento o deslizamiento.

Figura 60

Anclaje en cisterna



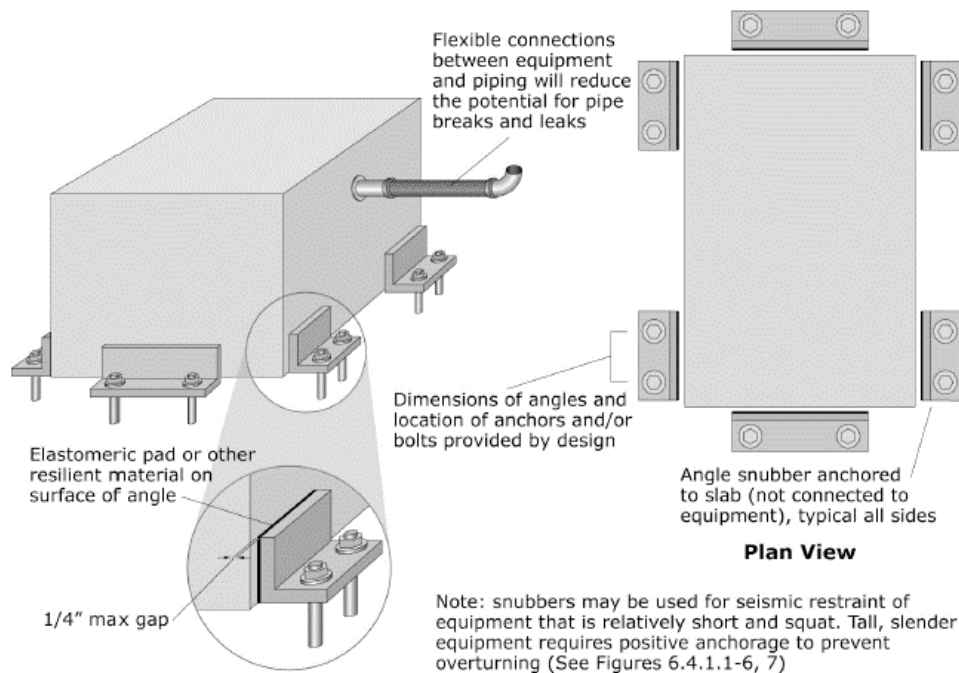
Nota: Tomado de *Reducing the Risks of Nonstructural Earthquake Damage* (p.6-219), por (FEMA E-74, 2012).

Tomógrafo

El tomógrafo y todos sus componentes se deben anclar a la losa tomando en cuenta todas las recomendaciones realizadas en este capítulo y las especificaciones del fabricante del equipo, se debe tomar en cuenta un tipo de anclaje como se muestra en la **Figura 61**, este tipo de anclajes son útiles cuando los equipos no disponen soportes especiales para ser anclados y no se desea modificar el equipo.

Figura 61

Anclaje en equipos delicados



Nota: Tomado de *Reducing the Risks of Nonstructural Earthquake Damage* (p.6-170), por (FEMA E-74, 2012).

UPS

Los UPS se deben anclar siguiendo la recomendación de la **Tabla 10** ya que para cada nivel en que se vaya a ubicar cada UPS se debe utilizar anclajes diferentes, el tipo de anclaje recomendado se muestra en la **Figura 62**, se debe anclar el marco del equipo al suelo utilizando una pletina.

Figura 62

Anclaje en equipos UPS



Nota: Tomado de *Reducing the Risks of Nonstructural Earthquake Damage* (p.6-524), por (FEMA E-74, 2012).

Rayos X

Los componentes del equipo de Rayos X deben ser anclados como se muestra en la **Figura 61** y siguiendo las recomendaciones de la **Tabla 10**, además se debe considerar las especificaciones del fabricante del equipo y las condiciones del lugar donde se va a instalar.

Autoclave

Este equipo debe ser anclado como se muestra en la figura, y se debe considerar las especificaciones del fabricante del equipo, además de mantener bloqueada su compuerta para evitar daños ocasionados por el contenido del equipo.

Figura 63

Anclaje en autoclave



Nota: Tomado de *Reducing the Risks of Nonstructural Earthquake Damage* (p.6-364), por (FEMA E-74, 2012).

Equipos móviles

En esta categoría se encuentran los equipos como respiradores, ecógrafos y máquinas de hemodiálisis. Debido a que estos equipos o sus contenidos podrían deslizarse, volcarse y golpear a otros equipos o personas, se recomienda elaborar una base que permita utilizar el anclaje calculado en la **Tabla 10**, alternatively se puede realizar un anclaje como se muestra en la **Figura 64**, siempre teniendo en cuenta las especificaciones de cada equipo y las condiciones de las instalaciones donde se encuentra el equipo.

Figura 64

Anclaje en equipos móviles



Nota: Tomado de *Reducing the Risks of Nonstructural Earthquake Damage* (p.6-565), por (FEMA E-74, 2012).

Monitor

Los monitores deben contar con un adecuado anclaje ya que podrían caerse, voltearse, o sus soportes podrían desprenderse de la pared o techo, por esto se recomienda que los equipos no deben estar simplemente apoyados sobre cualquier tipo de superficie, para los monitores analizados en este estudio se recomienda se tome como referencia el anclaje que se presenta en la **Tabla 10** para realizar sus anclajes al techo o pared según corresponda como se muestra en la **Figura 65**.

Figura 65

Anclaje para monitores al techo

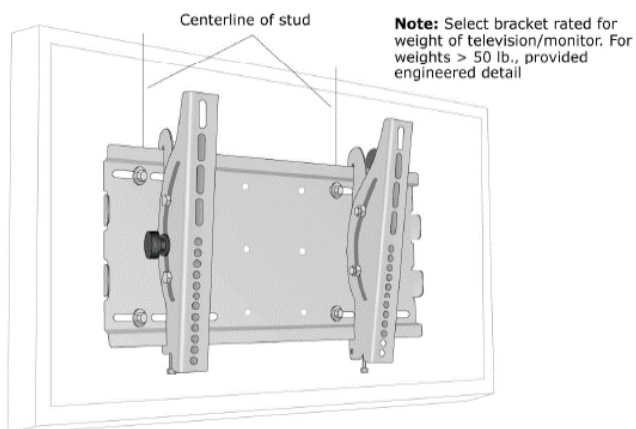


Nota: Tomado de *Reducing the Risks of Nonstructural Earthquake Damage* (p.6-542), por (FEMA E-74, 2012).

Para monitores como televisiones se recomienda usar un soporte especial que debe ir anclado al techo o pared como indica la **Figura 66**, y bajo ninguna circunstancia deberían estar suspendidos sobre la cama, un mueble o un lugar donde la gente podría descansar.

Figura 66

Anclaje para monitores en pared



Nota: Tomado de *Reducing the Risks of Nonstructural Earthquake Damage* (p.6-543), por (FEMA E-74, 2012).

Capítulo VII

Análisis y discusión de resultados

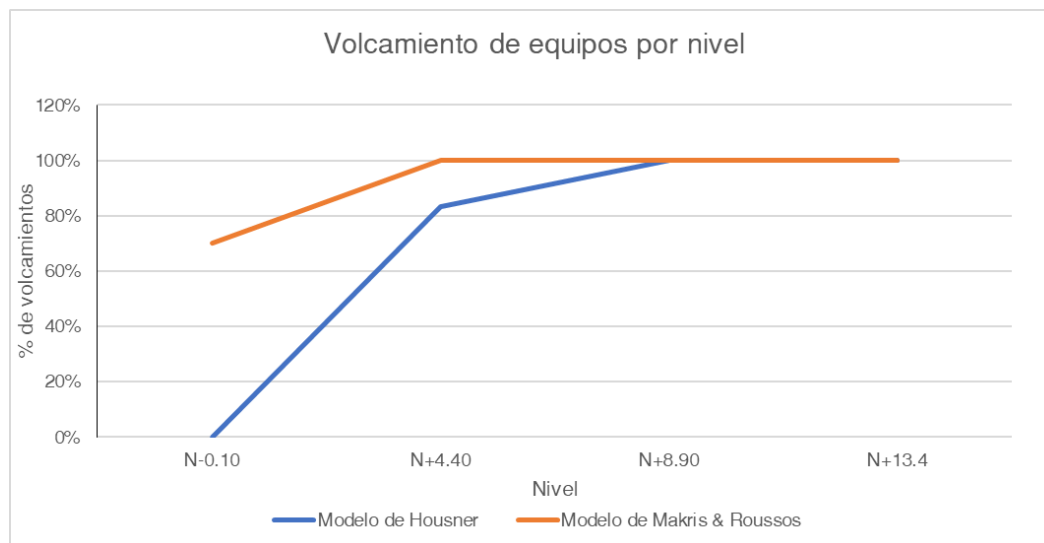
En esta sección se presenta y analizan los resultados de este estudio, así como también conclusiones y recomendaciones en base a lo presentado en capítulos anteriores.

Comportamiento de los equipos

El análisis del comportamiento de los equipos se presenta en la sección: Resumen de resultados, y como se observa en la **Figura 67**, a medida en que los equipos son ubicados en niveles con mayor elevación, tienden a estar sometidos a mayores aceleraciones y por tanto a volcarse un mayor porcentaje de ellos.

Figura 67

Volcamiento de equipos por nivel

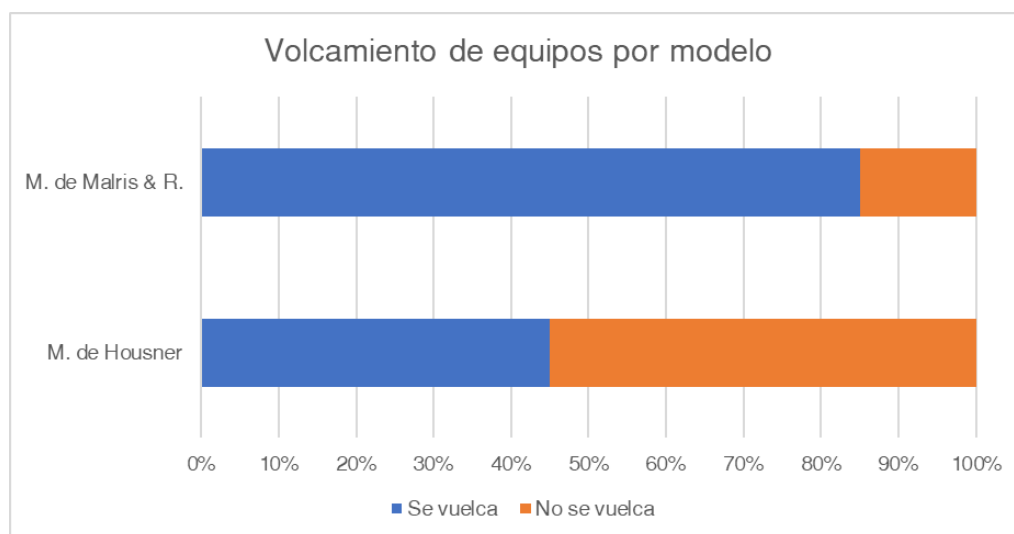


En la **Figura 68** se puede observar que el porcentaje de volcamiento en equipos analizados por el modelo de Makris & Roussos (1998) es 85%, siendo bastante mayor a

los resultados obtenidos por el modelo de Housner (1963) con un porcentaje de volcamiento del 45%.

Figura 68

Volcamiento de equipos por modelo



Esta diferencia responde al hecho que el modelo realizado por Makris & Roussos (1998) es más complejo y requiere un número mayor de variables que el modelo presentado por Housner (1963).

Conclusiones

Si bien bajo los parámetros de la NEC-11 las derivas de la estructura son cercanas al 2%, se puede observar que para el sismo MCE se registrar valores de derivas cercanos al 5%, lo cual es un indicador que la estructura y los elementos no estructurales podrían llegar a sufrir graves daños de ocurrir dicho sismo.

El hospital cuenta con equipos de gran importancia para su continuo funcionamiento; los equipos analizados en este estudio están simplemente apoyados sobre los diferentes niveles del hospital y no disponen de ningún tipo de anclaje o dispositivo de sujeción.

Los equipos seleccionados para este estudio presentan una probabilidad alta de volcamiento, si bien en ciertos equipos no se reporta un volcamiento, estos si podrían resultar dañados por efectos del balanceo de los mismos, esto representa una amenaza para el funcionamiento del hospital y la seguridad de sus usuarios.

A pesar de que el anclaje necesario para cada equipo es calculado y presentado en este estudio, hay varias formas de realizar su implementación en cada equipo, estas deben obedecer a las características, condiciones y necesidades específicas de cada uno a fin de proporcionar un anclaje adecuado.

La herramienta RMotion realizada en este estudio es de gran utilidad y de fácil manejo, mediante su uso se puede predecir de manera aproximada el comportamiento de equipos modelados como cuerpos rígidos durante un evento sísmico.

Recomendaciones

Realizar un reforzamiento en la estructura que permita un correcto comportamiento de los equipos para un nivel de desempeño de operación inmediata, ante el sismo *MCE* de 2475 años de periodo de retorno.

Considerar el comportamiento y requerimientos de los equipos al diseñar la estructura del hospital, así mismo los equipos deben ser adquiridos junto a acoples que permitan una correcta ubicación y anclaje adecuado para cada uno.

Realizar un anclaje a todos los equipos analizados para evitar daños en los mismos y reducir el riesgo para los usuarios del hospital.

Tomar la guía realizada en este estudio como referencia para la ubicación e implementación de los anclajes para cada equipo; para más información referirse a la

guía FEMA E-74 (2012), así como también a las especificaciones del fabricante de cada equipo.

Integrar el análisis del comportamiento dinámico de equipos a los estudios necesarios para construir una edificación esencial, para esto se puede utilizar la herramienta RMotion, presentada en este estudio.

Referencias

- Aguiar, R. (2011). EL MEGA SISMO DE CHILE DE 2010. *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, 16(1), 30.
- Aguiar, R. (2012). *Dinámica de Estructuras con CEINCI-LAB* (Centro de Investigaciones Científicas & Escuela Politécnica del Ejército (eds.); 2a ed.).
- Aguiar, R., Morales, E., Chunga, K., Iza, E., & Castillo, F. (2016). Acelerogramas y espectros inferidos del terremoto 1998 (Mw 7,2) Bahía de Caráquez, Ecuador. *Ágora De Heterodoxias*, 2(2), 98–115.
<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.22983.91048>
- Aguiar, R., & Rivas, A. (2018). *Microzonificación sísmica de Ambato* (Instituto Panamericano de Geografía e Historia (ed.); 1a ed.). Instituto Panamericano de Geografía e Historia.
- Alonso, M., & Finn, E. (1970). Mecánica. En *Física* (1a ed., pp. 296–299). Addison-Wesley.
- Argudo, J., & Yela, R. (1995). Vulnerabilidad estructural de hospitales de Guayaquil-Ecuador. *snsf Guayaquil. EC*.
- ASCE. (2016). *Minimum design loads for buildings and other structures*. | ASCE standard, ASCE/ SEI 7-16, minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures (Número 7 98). American Society of Civil Engineers.
<https://doi.org/10.1061/9780872629042>
- ASCE. (2017). *ASCE standard, ASCE/SEI, 41-17, seismic evaluation and retrofit of existing buildings* (Reston). American Society of Civil Engineers.
<https://doi.org/10.1061/9780784414859>

- Bambaren, C., Gutierrez, A., & Del Socorro, M. (2007). Hospitales seguros ante desastres. *Revista Médica Herediana*, 18(3), 149–154.
- Beauval, C., Yepes, H., Bakun, W. H., Egred, J., Alvarado, A., & Singaicho, J.-C. (2010). Locations and magnitudes of historical earthquakes in the Sierra of Ecuador (1587–1996). *Geophysical Journal International*, 181(3), 1613–1633.
- Chopra, A. K. (2014). *Dinámica de estructuras* (4a ed.). Pearson Educación.
- Dowrick, D. (2011). *EARTHQUAKE RESISTANT DESIGN AND RISK REDUCTION, 2ND EDITION* (John Wiley & Sons (ed.); 2a ed.). Wiley India Pvt. Limited.
- FEMA 577. (2007). *Design Guide for Improving Hospital Safety in Earthquakes, Floods, and High Winds: Providing Protection to People and Buildings*.
- FEMA E-74. (2012). *Reducing the Risks of Nonstructural Earthquake Damage*.
- Hibsch, C., Alvarado, A., Yepes, H., Sebrier, M., & Pérez, V. (1996). RIESGO SÍSMICO DE QUITO (ECUADOR) CON EL ANÁLISIS DE LOS SEDIMENTOS CUATERNARIOS. *Bull. Inst. fr. études andines*, 25(3), 359–388.
- Housner, G. W. (1963). The behavior of inverted pendulum structures during earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 53(2), 403–417.
- Jaimes, M., Fernández-sola, L., Arredondo, C., & Reinoso, E. (2018). Dynamic Rocking Behavior Of Freestanding Symmetrical Rigid Blocks Considering Dynamic Soil-Structure Interaction. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia*, 39(3), 112–120.
- Krauskopf, R., Inostroza, M., & Urzúa, C. (1996). *Capacidad de respuesta de hospitales ante desastres sísmicos: Aspectos no estructurales*.

- Lanning, F., Haro, A., Liu, M. K., Monzon, A., Monzón-Despang, H., Schultz, A., Tola, A., Diaz-Fanas, G., Antonaki, N., Nikolaou, S., Vera-Grunauer, X., Gilsanz, R., Diaz, V., Franco, G., Stone, H., Ahmed, B., Chian, S., Hughes, F., Jirouskova, N., & Lopez, J. (2016). *EERI Earthquake Reconnaissance Team Report: M7.8 Muisne, Ecuador Earthquake on April 16, 2016*.
<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.27341.23527>
- Makris, N., & Roussos, Y. (1998). *Rocking Response and Overturning of Equipment Under Horizontal Pulse-Type Motions*.
- Ministerio De Salud Pública del Ecuador, Organización Panamericana de la Salud, & Organización Mundial de la Salud. (2017). *Sistematización de la respuesta del sector salud*.
- NEC-SE-DS. (2015). *Peligro Sísmico Diseño Sismo Resistente*.
- Organización Panamericana de la Salud. (2016). El terremoto en Ecuador: Daños significativos a los servicios de salud; se desplegaron equipos médicos de emergencia. *Desastres: Preparativos y Mitigación en las Américas*, 1(121).
- Peña, F. (2015). Modelo simplificado para el estudio del balanceo asimétrico de cuerpos rígidos esbeltos. *Revista Internacional de Metodos Numericos para Calculo y Diseno en Ingenieria*, 31(1), 1–7.
- Reinoso, E., Arredondo, C., & Ramos, S. (2019). *CURVAS DE VOLTEO ASOCIADAS A MEDIDAS REFERENTES DE INTENSIDAD SÍSMICA* (pp. 3–5).
- Rodriguez, D. (2016). *Análisis sismorresistente mediante el método modal espectral de un edificio habitacional ubicado en la comuna de Tomé*. Universidad Católica de la Santísima Concepción.

Rojas, P. F. (2019). *Desempeño de edificios esenciales durante sismos en Ecuador – Caso hospitales y clínicas, centros de salud o de emergencia sanitaria*. Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

SENPLADES. (2016). *Evaluación de los costos de reconstrucción Sismo en Ecuador abril 2016*.

Whittaker, A., & Soong, T. (2003). An overview of non-structural components research at three US earthquake engineering research centers. *ATC Seminar on Seismic Design, Performance, and Retrofit of Nonstructural Components in Critical Facilities*, 29(2), 271–280. <https://www.atcouncil.org/pdfs/Whittaker.pdf>

