



FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL

TESIS

**“EFECTOS DEL AISLADOR POR SU FUNCIONALIDAD DE
RODAMIENTO FRENTE A LA CONDICIÓN DE BASE FIJA EN
EL COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE ESTRUCTURAS DE
EDIFICACIONES DE 5 NIVELES,
AREQUIPA 2017”**

PRESENTADO POR EL BACHILLER:

EDWIN RODOLFO HUARAYA QUISPE

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE

INGENIERO CIVIL

PUNO – PERÚ

2018

DEDICATORIA

A mis padres y hermanos por ser el pilar fundamental en todo lo que soy, en toda mi educación, tanto académica, como de la vida, por su incondicional apoyo perfectamente mantenido a través del tiempo. Todo este trabajo ha sido posible gracias a ellos.

AGRADECIMIENTO

Con gratitud a la Universidad Alas Peruanas" quien ha servido de base a mi entendimiento del campo de la ingeniería en la que me he visto inmerso la cual llevo en mi corazón en todo lugar y en todo momento.

Se agradece por su contribución al desarrollo de esta tesis a mis asesores y maestros por sus esfuerzos quienes, con su conocimiento, su experiencia y ayuda constante permitieron la realización del presente trabajo de investigación.

RESUMEN

La presente tesis desarrolla el estudio de los: "Efectos del aislador por su funcionalidad de rodamiento frente a la condición de base fija en el comportamiento sísmico de estructuras de edificaciones de 5 niveles Arequipa 2017 ", El incumplimiento de las normas técnicas sismorresistente de construcción, así como la deficiencia de estas y la falta de actualización, ha provocado que nuestras edificaciones sean propensas a sufrir daños considerables o el colapso, como consecuencia nuestro país presenta una alta vulnerabilidad sísmica, este estudio es orientado a implementar un sistema de aislamiento sísmico de base para las edificaciones con sistema dual, por lo que se propone un aislador basado en lo que se define como funcionalidad de rodamiento donde se hace uso de técnicas para el diseño geométrico de su superficie y la ubicación de las fuerzas de gravedad y sísmica respecto al movimiento, el objetivo general es analizar el comportamiento sísmico en condición fija y aislada. Metodológicamente el presente estudio se basó en la aplicación de un tratamiento por medio de la instalación de aisladores de rodamiento y determinar mediante un análisis sísmico espectral, el aumento o disminución del comportamiento sísmico. Los resultados obtenidos determinaron un aumento del comportamiento sísmico de un 57.8% a 92.8% respectivamente, por lo tanto, se concluye de manera efectiva el aumento del comportamiento sísmico en una estructura dual de 5 niveles al utilizarse aisladores de rodamiento, lográndose alcanzar una alta desconexión del suelo estructura frente a movimientos sísmicos. El punto de partida para el diseño del aislador fue la premisa de lograr la máxima desconexión suelo-estructura que fuera posible, optándose así por el mecanismo de rodado como medio principal de producir el desacople, debido principalmente al bajo nivel de esfuerzo necesario para iniciar el movimiento en comparación con el principio de deslizamiento, el presente proyecto podrá servir de manera técnica para nuevas investigaciones.

Palabras clave: Aislador, comportamiento sísmico, edificación dual, rodamiento.

SUMMARY

This thesis develops the study of: "Effects of the insulator for its rolling functionality against the condition of fixed base in the seismic behavior of structures of buildings of 5 levels Arequipa 2017", The non-compliance with the technical seismic resistant construction standards, as well as the deficiency of these and the lack of updating, has caused that our buildings are prone to suffer considerable damages or the collapse, as a consequence our country presents a high seismic vulnerability, this study is oriented to implement a base seismic isolation system for buildings with dual system, so an insulator is proposed based on what is defined as rolling functionality where techniques are used for the geometric design of its surface and the location of gravity and seismic forces with respect to movement , the general objective is to analyze the seismic behavior in condition n fixed and isolated. Methodologically the present study was based on the application of a treatment by means of the installation of bearing insulators and to determine, by means of a seismic spectral analysis, the increase or decrease of the seismic behavior. The obtained results determined an increase of the seismic behavior from 57.8% to 92.8% respectively, therefore, it is concluded in an effective way the increase of the seismic behavior in a dual structure of 5 levels when using bearing insulators, achieving a high disconnection of the ground structure against seismic movements. The starting point for the design of the insulator was the premise of achieving the maximum floor-structure disconnection possible, thus opting for the rolling mechanism as the main means of producing the decoupling, mainly due to the low level of effort necessary to initiate the movement compared to the principle of sliding, the present project may serve as a technical way for new investigations.

Keywords: Insulator, seismic behavior, dual construction, bearing.

SÍNTESIS

El presente trabajo es la aplicación de conocimientos teóricos y prácticos, el objetivo primordial es la aislación sísmica mediante el uso de aisladores sísmicos de rodamiento, haciendo posible que su configuración geométrica, punto de aplicación de las fuerzas de gravedad y sísmicas inherentes al aislador del tratamiento, logren desviar la energía sísmica provenientes del movimiento y aceleración del terreno en energía potencial, esto debido a las ventajas de forma y excentricidades verticales, que se detallan como el diseño de cada aislador, esta ventaja que en síntesis logra un alto grado de desacople de la estructura con el suelo logrando de esta manera la disminución de las respuestas sísmicas tanto de fuerzas cortantes y de distorsión por nivel de la estructura tal como se detalla en la parte experimental de esta tesis, todo esto para lograr un mejor comportamiento sísmico de la estructura frente a los movimientos sísmicos.

Para llevar a cabo este proceso tanto para la aplicación y diseño se hizo uso de conocimientos previos de dinámica de estructuras por lo cual el presente trabajo posee una parte deductiva donde el autor hace uso de conocimientos generales, aceptados universalmente en el campo de la ingeniería para lograr el modelamiento de esta clase particular de aisladores en edificaciones. Se debe tener en cuenta que el objetivo principal mediante el uso de este tipo de aisladores es que la edificación mejore su comportamiento frente a un sismo los cual se detalla en la sección estadística inferencial en la que se hace una comparación de una base fija y una aislada, además se constata que la edificación en estudio queda totalmente operacional, donde los daños estructurales y no estructurales son despreciables o nulos, y una vez ocurrido el sismo la edificación queda totalmente funcional, para esto se hizo uso de niveles de comportamiento según visión 2000 y FEMA 273.

ÍNDICE

	Pág.
DEDICATORIA.....	i
AGRADECIMIENTO	ii
RESUMEN	iii
SUMMARY.....	iv
SÍNTESIS.....	iv
ÍNDICE	vi
ÍNDICE DE TABLAS	x
ÍNDICE DE FIGURAS	xii
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I	
1 PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO.....	2
1.1 DESCRIPCIÓN DE LA REALIDAD PROBLEMÁTICA	2
1.2 DELIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN	6
1.2.1 Espacial.....	6
1.2.2 Temporal	6
1.3 PLANTEAMIENTO DE PROBLEMAS DE INVESTIGACIÓN	6
1.3.1 Problema general	6
1.3.2 Problemas específicos	6
1.4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	7
1.4.1 Objetivo general	7
1.4.2 Objetivos específicos.....	7
1.5 FORMULACIÓN DE LA HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN	7
1.5.1 Hipótesis general.....	7
1.5.2 Hipótesis específicas.....	7

1.6	VARIABLES DE LA INVESTIGACIÓN	8
1.6.1	Variable independiente.....	8
1.6.2	Variables dependientes.....	8
1.6.3	Operacionalización de variables.....	9
1.7	DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN	9
1.7.1	Tipo de investigación.....	9
1.7.2	Nivel de investigación.....	10
1.7.3	Métodos de investigación	10
1.7.4	Diseño de investigación.....	11
1.8	POBLACIÓN Y MUESTRA DE LA INVESTIGACIÓN	12
1.8.1	Población.....	12
1.8.2	Muestra	12
1.9	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS	12
1.9.1	Técnicas.....	12
1.9.2	Instrumentos.....	13
1.10	JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN	13
1.10.1	Justificación.....	13
1.10.2	Importancia.....	16
CAPÍTULO II		
2	MARCO TEÓRICO	17
2.1	ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN	17
2.1.1	Antecedentes internacionales	17
2.1.2	Antecedentes nacionales	19
2.2	BASES TEÓRICAS	21
2.2.1	Aislador elastomérico	21
2.2.2	Espectro de diseño.....	31

2.2.3	Nivel de amenaza sísmica.....	32
2.2.4	Nivel de comportamiento.....	32
2.2.5	Criterios de aceptabilidad.....	33
2.3	DESCRIPCIÓN DEL AISLADOR DE BASE PROPUESTO.....	34
2.4	ANÁLISIS DEDUCTIVO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICO-FÍSICO.....	35
2.5	DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO.....	57
2.6	ESTRUCTURACIÓN Y PREDIMENSIONAMIENTO.....	59
2.6.1	Predimensionamiento de elementos principales.....	59
2.6.2	Parámetros del análisis sísmico.....	62
2.7	ANÁLISIS DINÁMICO MODAL BASE DE EMPOTRAMIENTO.....	72
2.8	ANÁLISIS DINÁMICO MODAL BASE AISLADA.....	81
2.9	DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS.....	92
CAPÍTULO III		
3	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.....	100
3.1	CONFIABILIDAD Y VALIDACIÓN DEL INSTRUMENTO.....	100
3.1.1	Confiabilidad del instrumento.....	100
3.1.2	Validación de los resultados.....	101
3.2	ANÁLISIS CUANTITATIVO DE LAS VARIABLES.....	102
3.3	PRUEBAS DE NORMALIDAD.....	111
CAPÍTULO IV		
4	PROCESO DE CONTRASTE DE HIPÓTESIS.....	115
4.1	PRUEBA DE HIPÓTESIS GENERAL.....	115
4.2	PRUEBA DE HIPOTESIS ESPECÍFICA.....	115
CAPÍTULO V		
5	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	129
CONCLUSIONES.....		131

RECOMENDACIONES	133
FUENTES DE INFORMACIÓN	136
ANEXO 01.....	142
ANEXO 02.....	142
ANEXO 03.....	144

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla II. 1 Fuente: sistema de protección sísmica (Álvaro Talavera 2017)	21
Tabla II. 2 Niveles de amenaza sísmica SEAOC(1995).	32
Tabla II. 3 Nivel de comportamiento FEMA 273	32
Tabla II. 4 Nivel de comportamiento VISIÓN 2000	33
Tabla II. 5 Límites de distorsión FEMA 273	33
Tabla II. 6 Límites de distorsión VISIÓN 2000	33
Tabla IIa 1	41
Tabla IIa 2	42
Tabla IIa 3 Pre dimensionamiento de Columnas	61
Tabla IIa 4 Pre dimensionamiento de Vigas	62
Tabla IIa 5 Factor de zona, fuente Norma E.030	63
Tabla IIa 6 Factor de suelo "s" fuente Norma E.030	64
Tabla IIa 7 Periodos T_p y T_I fuente Norma E.030	64
Tabla IIa 8 Coeficiente de amplificación	65
Tabla IIa 9 Peso específico	71
Tabla IIa 10 Cargas Mínimas repartidas equivalentes a la de tabiquería	72
Tabla IIa 11 Resumen de cargas	72
Tabla IIa 12 Control de derivas en las direcciones x, y	80
Tabla IIa 13 función parabólica $k=0.15m$	82
Tabla IIa 14 definición de los puntos de rigidez Kaislador	84
Tabla IIa 15 Metrado de cargas por columna	84
Tabla IIa 16 Kaislador corregida para el modelamiento	85
Tabla IIa 17 Kaislador definido por K_1 , K_2 (modelo no lineal)	86
Tabla IIa 18 Control de derivas en las direcciones x, y	90
Tabla IIa 19 Distorsión del sistema en ambas direcciones X, Y	90
Tabla IIa 20 Comportamiento según FEMA 273	90
Tabla IIa 21 Nivel de comportamiento VISIÓN 2000	91
Tabla IIa 22 Aceleración base del edificio	91
Tabla III 1 grado de confiabilidad	100
Tabla III 2 Resultados de test y retest	101
Tabla III 3 Cuadro comparativo de respuestas sísmicas deriva de entrepiso	102
Tabla III 4 tendencia central y dispersión para la	103
Tabla III 5 tendencia central y dispersión para la muestra del sistema base aislado	104
Tabla III 6 distribución de frecuencias absolutas y	106

Tabla III 7 tendencia central y de dispersión para la diferencia de derivas	107
Tabla III 8 Cuadro comparativo de respuestas sísmicas cortante (T).....	109
Tabla III 9 tendencia central y dispersión.....	110
Tabla III 10 tendencia central y dispersión.....	110
Tabla III 11 Prueba de normalidad de distribución.....	112
Tabla III 12 Prueba de normalidad de distribución.....	113
Tabla IV 1 nivel de comportamiento VISIÓN 2000	115
Tabla IV 2 comportamiento en términos porcentuales.....	115
Tabla IV 3 Prueba t para la media de diferencias de dos muestras dependientes...	118
Tabla IV 4 cuadro de derivas de entrepiso en una edificación dual de 5 niveles (cm/cm)	119
Tabla IV 5 Prueba t para la media de diferencias de dos muestras dependientes....	122
Tabla IV 6 cuadro de cortantes de nivel en una edificación dual de 5 niveles (T)	125
Tabla IV 7 Prueba t para la media de diferencias de dos muestras dependientes...	127

Figura II 31 Resultados fuerza cortante (x) por nivel en Toneladas	78
Figura II 32 desplazamientos laterales (x) por nivel en cm.....	78
Figura II 33 Resultados fuerza cortante (y) por nivel en Toneladas	79
Figura II 34 desplazamientos laterales (y) por nivel en cm.....	79
Figura II 35 piso rígido con pedestales para la colocación de los aisladores de rodamiento	81
Figura II 36 x (longitud de la generatriz horizontal) vs uB.....	83
Figura II 37 (fuerza restitutiva) vs uB	83
Figura II 38 Grafica F(T) vs uB.....	85
Figura II 39 definición del modelo no lineal del Kaisalador	86
Figura II 40 pseudo-aceleración (m/s ²)	87
Figura II 41 visualización de desplazamientos 3D	87
Figura II 42 fuerza cortante (x) por nivel en Toneladas	88
Figura II 43 desplazamientos laterales (x) por nivel en cm.....	88
Figura II 44 fuerza cortante (y) por nivel en Toneladas	89
Figura II 45 desplazamientos laterales (y) por nivel en cm.....	89
Figura III 1 confiabilidad de los resultados.....	101
Figura III 2 variación de las derivas según el sistema de conexión suelo estructura .	103
Figura III 3 desplazamiento lateral dirección x Figura III 4 desplazamiento lateral dirección y.....	105
Figura III 5 diagrama de caja para la diferencia de derivas	107
Figura III 6 Histograma de intervalo y frecuencias relativas	108
Figura III 7 variación de las cortantes según el sistema de conexión suelo estructura	109
Figura III 8 Gráfico de cuantiles empíricos y cuantiles teórico normal (deriva).....	111
Figura III 9 Gráfico de cuantiles empíricos y cuantiles teórico normal (cortante)	113
Figura IV 1 Criterio estadístico región de aceptación	118
Figura IV 2 Criterio estadístico región de aceptación	122
Figura IV 3 Criterio estadístico región de aceptación	128

INTRODUCCIÓN

El Perú por su ubicación geográfica es un país de gran ocurrencia sísmica, debido a que nos encontramos ubicados en el borde occidental de Sudamérica donde se produce la subducción de la Placa de Nazca y la Placa Sudamericana. A lo largo del tiempo han ocurrido diversos sismos muy destructores, como el de Chimbote 1970, Lima 1974, Ica 2007, entre otros. Es por ello que toda estructura construida en aquella zona, debe ser diseñada con un diseño sismo-resistente para poder así resistir este tipo de sollicitaciones.

En la ciudad de Arequipa se registraron varios eventos sísmicos como la registrada el 23 de junio de 2001, de 8.4 en potencia de Magnitud de Momento (Mw), El terremoto dejó un número de muertes de 102 personas muertas, siendo uno de los desastres de gran consideración debido a la precariedad constructivas de sus viviendas y alta masificación demográfica de sus habitantes, por ello es necesario diseñar estructuras que resistan fuerzas sísmicas. Sin embargo, es nuestro deber hacer construcciones que puedan resistir tanto sismos de pequeña como de alta magnitud.

El diseño sismorresistente tiene como objetivo principal la protección de la vida, mejorando el comportamiento sísmico de las edificaciones para reducir el colapso. Por otro lado, se debe asegurar principalmente el funcionamiento de aquellas estructuras vitales (hospitales, centros educativos y otros) en caso de una emergencia, cambiando e objetivo principal por el de mantener la operatividad de la estructura.

Por ende, uno de los métodos para mejorar el comportamiento de la edificación es el aislamiento sísmico mediante aisladores. Este aislamiento permite un control pasivo de la vibración de la estructura, reduciendo la transmisión de las fuerzas sísmicas. En la actualidad puede ser utilizada en cualquier tipo de edificios, centrales eléctricas, puentes, entre otros. En la presente tesis se desarrollará la aplicación de este método en una edificación dual de 5 niveles

CAPÍTULO I:

PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO

1.1 DESCRIPCIÓN DE LA REALIDAD PROBLEMÁTICA

Los movimientos sísmicos representan un peligro para las estructuras causándoles daños permanentes tanto en cimentaciones como en la superestructura, y en algunos casos llegando al colapso, estos eventos sísmicos son un fenómeno natural que ha cobrado miles de vidas humanas.

Debido a los daños estructurales acontecidos en varios países causados por movimientos sísmicos se ha comenzado a cuestionar la efectividad de las estructuras convencionales y de los análisis empleados para valorar su respuesta, de manera técnica el problema subyace en que "Las fuerzas cortantes altas producen una pérdida adicional de rigidez debido a la mayor deformación cortante en las zonas de articulación plástica bajo las cargas alternas"¹. Por ello se han llegado a cuestionar los sistemas de cálculo empleados ya que muchos de ellos fueron incapaces de prever la presencia de fallas frágiles en sistemas supuestamente dúctiles, cabe notar que esta se relaciona con el factor R de reducción sísmica y muchas veces la ductilidad real del sistema definida como " como la relación entre la deriva máxima útil y la deriva de fluencia"² no representa la que se supone en el espectro de diseño inelástico, este problema manifiesta la imposibilidad de determinar la demanda de ductilidad ante un evento sísmico y dónde se va a producir haciéndose necesario el empleo de nuevos sistemas de protección entre ellos los aisladores sísmicos de base.

En la actualidad nos encontramos en un auge de nuevas tecnologías el uso de materiales y maquinaria moderna ha hecho posible que haya

¹ Park R. y Paulay T. 1983 Estructuras de Concreto Reforzado. Primera Edición. México: Editorial LIMUSA S. A., 593 p.

² Gallegos H. y Casabone C. 2005 Albañilería estructural. Tercera Edición. Lima: Editorial de la pontificia Universidad Católica del Perú, 394 p.

edificaciones en la que se invierte grandes costos debido a la magnitud e importancia de ellas, edificaciones cada vez de mayor altura que en muchas de ellas albergan gran cantidad de personas y esto debido al aumento demográfico, por su importancia tenemos hospitales que además de las vidas humanas también posee instrumentación y máquinas de alto costo y delicada calibración, no olvidemos que hay edificaciones que después de un evento sísmico podría causar un desastre a un mayor como son las centrales nucleares debido a la contaminación radioactiva en la fuga de estos elementos sumamente peligrosos, además tenemos otras estructuras como puentes modernos que alcanzan mayores luces o de alto tráfico, así como puentes que por su ubicación en caso sufriera un colapso después de un sismo podría provocar que ciudades o poblados enteros queden aislados, así como las centrales eléctricas etc. en este contexto durante las últimas décadas los daños producidos en muchas de ellas ha conllevado a replantear el brindar protección y de esta manera el concepto de aislación de base sísmica ha comenzado a ser considerado seriamente como una alternativa en el diseño sísmo-resistente de estructuras, especialmente en aquellos casos en que se busca un mejor desempeño sísmico para las estructuras y sus contenidos. El excelente desempeño que las estructuras aisladas han tenido durante los sismos de Northridge (Los Ángeles, 1994) y Kobe (Kobe, 1995), avalan las bondades de esta alternativa en cuanto a aumentar considerablemente el nivel de seguridad para las personas y la operatividad de la estructura después de un sismo.

Perú entre otros países forma parte de la zona conocida como "Cinturón de Fuego del Pacífico" de gran actividad sísmica y está prácticamente ubicado sobre una falla geológica, el encuentro de la Placa de Nazca y la Placa Sudamericana. Nuestro país ha experimentado en los últimos 50 años importantes eventos sísmicos, que han provocado pérdidas humanas y materiales. Un terremoto, también llamado seísmo o sismo, es una sacudida del terreno que se produce cuando los materiales del interior de la Tierra se desplazan, "La onda sísmica tiene su origen en el foco del terremoto y se

propagan a través de las capas de la tierra hasta la superficie"³ buscando el equilibrio desde situaciones inestables, que son consecuencia de los movimientos que se producen principalmente en los bordes de la placa, en nuestro país siendo el de mayor envergadura ocurrió en 1970 en el departamento de Huaraz.

El incumplimiento de las normas técnicas sismorresistente de construcción, así como la deficiencia de estas y la falta de actualización, ha provocado que nuestras edificaciones sean propensas a sufrir daños considerables o el colapso, "Sismos recientes han demostrado claramente que un edificio o puente que no haya sido diseñado para fuerzas sísmicas puede ser destruido incluso por un sismo que no sea particularmente severo. La mayoría de las estructuras pueden ser diseñadas y construidas de manera económica para resistir las fuerzas causadas durante la mayoría de los sismos, por otro lado, el costo de proporcionar resistencia sísmica a estructuras existentes (llamado remodelación) puede ser en extremo caro"⁴, para contraponer lo mencionado es necesario el uso de nuevas tecnologías de protección sismo resistente, así como la incorporación y adaptabilidad a nuestra región de su respectiva normativa. Por ende, uno de los métodos para mejorar el comportamiento de la edificación es el aislamiento sísmico mediante aisladores. Este aislamiento permite un control pasivo de la vibración de la estructura, reduciendo la transmisión de las fuerzas sísmica. Este sistema tiene como estrategia principal desacoplar la estructura del movimiento del suelo para proteger a ésta del efecto de los sismos. Esto se consigue gracias a dispositivos que se encuentran entre los cimientos y la estructura, los cuales permiten el movimiento horizontal y son rígidos al movimiento vertical. Además, es frecuente incorporar amortiguamiento estructural para limitar los desplazamientos de la superestructura a valores aceptables según la norma.

³ Barbat Alex H. 1982 Cálculo sísmico de las estructuras. Primera Edición. Barcelona: Editores Técnicos Asociados, 18 p. ISBN 84-7146-237-0

⁴ McCormac, Jack C. 2010 Análisis de Estructuras, Método Clásico y Matricial. Cuarta Edición. México: Alfaomega Grupo Editor, S. A., 2010 33 p. ISBN 978-607-7854-56-2

El aislamiento de base es recomendable en estructuras rígidas sobre terrenos firmes, además las edificaciones no deben tener una relación altura base muy excesiva, ya que los momentos de vuelco aumentan proporcional a dicha relación, lo que puede ocasionar la pérdida de equilibrio de la superestructura. Entre los principales aisladores de base se encuentran: Aisladores elastoméricos, Aisladores Deslizantes, Sistemas de Aislación de base rodante

En la ciudad de Arequipa se registraron varios eventos sísmicos siendo algunos de ellos de peligrosidad, lo que con llevo a desastres de gran consideración y debido a la precariedad constructivas de sus viviendas y alta masificación demográfica de sus habitantes por ello "Se define como Peligrosidad Sísmica, la probabilidad de ocurrencia, dentro de un período específico de tiempo y dentro de una región determinada, movimientos del suelo cuyos parámetros: aceleración, velocidad, desplazamiento, magnitud o intensidad son cuantificados."⁵. Es importante aclarar la diferencia entre riesgo y peligro sísmico, La amenaza o peligro es el factor de riesgo externo de un sujeto o sistema, y el riesgo o daño es el nivel de destrucción o pérdida esperada obtenido de la combinación de la probabilidad de ocurrencia de eventos peligrosos y de la vulnerabilidad de los elementos expuestos a tales amenazas. La diferencia fundamental entre la amenaza y el riesgo está en que la amenaza se relaciona con la probabilidad de que se manifieste un evento natural o un evento provocado, mientras que el riesgo está relacionado con la probabilidad de que se manifiesten ciertas consecuencias, las cuales están íntimamente relacionadas no sólo con el grado de exposición de los elementos sometidos, sino con la vulnerabilidad que tienen dichos elementos a los efectos del evento.⁶

⁵ Aguiar R. F. 2008 Análisis Sísmico de Edificios. Primera Edición. Quito: Centro de Investigaciones Científicas 7 p. ISBN-978-9978-30-104-3

⁶ OPS [Organización Panamericana de La Salud] 2004 Fundamentos Para La Mitigación de Desastres en Establecimientos de Salud. Segunda Edición. Washington, D.C, Biblioteca de la OPS. ISBN 92-75-32304-6

1.2 DELIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN

1.2.1 ESPACIAL

El alcance del proyecto está delimitado al diseño y comparación de sistemas estructurales con el uso de aisladores de base en rodamiento de una estructura sistema dual de 5 niveles ubicada en Departamento Arequipa, Provincia de Arequipa Distrito Miraflores.

1.2.2 TEMPORAL

El estudio se llevará a cabo a partir de enero del 2017 hasta octubre 2017, tiempo que permitirá planificar y desarrollar el trabajo de campo y analizar los resultados y presentar el informe final de tesis.

1.3 PLANTEAMIENTO DE PROBLEMAS DE INVESTIGACIÓN

1.3.1 PROBLEMA GENERAL

¿Cuál es el efecto del aislador por su funcionalidad de rodamiento en el comportamiento sísmico frente a la condición de base fija en edificaciones de cinco niveles Arequipa 2017?

1.3.2 PROBLEMAS ESPECÍFICOS

- ¿Cuál es el efecto del aislador por su funcionalidad de rodamiento en la deriva de entrepiso en el comportamiento sísmico frente a la condición de base fija en edificaciones de cinco niveles?
- ¿Cuál es el efecto del aislador por su funcionalidad de rodamiento en la cortante de nivel en el comportamiento sísmico frente a la condición de base fija en edificaciones de cinco niveles?

1.4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.4.1 OBJETIVO GENERAL

Analizar los efectos del aislador por su funcionalidad de rodamiento en el comportamiento sísmico frente a la condición de base fija en edificaciones de cinco niveles Arequipa 2017.

1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar el efecto del aislador por su funcionalidad de rodamiento en la deriva de entrepiso del comportamiento sísmico frente a la condición de base fija en edificaciones de cinco niveles.
- Establecer el efecto del aislador por su funcionalidad de rodamiento en la cortante de nivel en el comportamiento sísmico frente a la condición de base fija en edificaciones de cinco niveles.

1.5 FORMULACIÓN DE LA HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

1.5.1 HIPÓTESIS GENERAL

El uso de aisladores por su funcionalidad de rodamiento tendrá efectos altamente significativos en el mejor comportamiento sísmico frente a la condición base fija en edificaciones de cinco niveles Arequipa 2017.

1.5.2 HIPÓTESIS ESPECÍFICAS

- El uso del aislador por su funcionalidad de rodamiento tendría efectos muy significativos en comportamiento sísmico de la deriva de entrepiso frente a la condición de base fija en edificaciones de cinco niveles.

- El uso de aislador por su funcionalidad de rodamiento tendría efectos altamente significativos en comportamiento sísmico de la cortante de nivel frente a la condición de base fija en edificaciones de cinco niveles.

1.6 VARIABLES DE LA INVESTIGACIÓN

1.6.1 VARIABLE INDEPENDIENTE

Variables Independientes (causa)

X1 = Condición de base fija.

X2 = Condición de aislamiento basado en su funcionalidad de rodamiento.

1.6.2 VARIABLES DEPENDIENTES

Variable Dependiente (efecto)

Y = Comportamiento sísmico de la estructura.

Indicadores:

- Deriva de entrepiso
- Cortante sísmico basal

1.6.3 OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

VARIABLES	DIMENSIONES	INDICADORES
Variable independiente (X1) Aislador por su funcionalidad de rodamiento	Grado de desconexión suelo-estructura	<ul style="list-style-type: none"> • Cero grados de libertad • Grado de libertad al desplazamiento en la dirección x, y, z • Grado de libertad a la rotación en la dirección x, y, z
Variable independiente (X2) condición de base fija	Grado de fijación suelo-estructura	<ul style="list-style-type: none"> • Cero grados de libertad • Grado de libertad al desplazamiento en la dirección x, y, z • Grado de libertad a la rotación en la dirección x, y, z
Variable dependiente (Y) Comportamiento sísmico de la estructura	Deriva de entrepiso	Cm/Cm
	Cortante de nivel	Ton

FUENTE: *Elaboración propia.*

1.7 DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

1.7.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN

El presente estudio corresponde a un enfoque cuantitativo, debido que se cuantifican los datos para el respectivo análisis sísmico dinámico, así mismo para su análisis e interpretación se usó herramientas estadísticas, por su propósito es de carácter aplicativo, puesto pretende analizar la aplicación de sistemas de aislamiento de base mediante superficies de rodamiento para lograr una máxima desconexión suelo estructura y por su naturaleza característica de estudio es experimental, porque se probara la causalidad de las variables independientes, sistemas con base fija y base aislada, sobre los efecto en el comportamiento de las estructuras como variable dependiente.

1.7.2 NIVEL DE INVESTIGACIÓN

De acuerdo a la profundidad del estudio de la investigación, es aplicativo. porque analiza el uso de aisladores por su funcionalidad de rodamiento permitiendo que el aislador sea capaz de rodar sobre una superficie de contacto en lugar de deslizar, y esto se debe principalmente a lo pequeño que resulta el coeficiente de rodadura en comparación al coeficiente de rozamiento, permitiendo así que la estructura inicie el movimiento bajo pequeñas cargas, logrando una mejor desconexión suelo-estructura como consecuencia se logró una disminución de las respuestas dinámicas tanto en la deriva de entrepiso y cortante sísmico basal, logrando disminuir los daños provocados durante un sismo, de esta manera logró redireccionar la energía de deformación de la superestructura hacia los aisladores.

El uso de aisladores por su funcionalidad de rodamiento permitirá estabilizar la edificación, es decir volver a su posición original de manera suave para ello utilizó el peso propio de la edificación en contraposición de las fuerzas sísmicas, y esto debido al diseño de la geometría superficial de contacto, es decir lo que denominamos en la presente tesis como funcionalidad de rodamiento.

1.7.3 MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN

El estudio hace uso de las etapas de método científico en todas sus fases, la primera fase se inicia con una interrogante en la que se desea dar solución a un problema, la segunda fase es la observación del fenómeno de aislamiento a estudiar, tercera fase la formulación de la hipótesis, cuarta fase la experimentación en la que se realizó un análisis y evaluación a través del modelamiento usando elementos finitos del programa robot structural, quinta fase el análisis de datos que es la comparación y abstracción generalización de los efectos y resultados del proceso de experimentación, sexta fase en la que se acepta o rechaza la hipótesis.

De la misma forma como herramienta del conocimiento es el método deductivo-inductivo, pues permite conocer los hechos en su dinámica estructural de un nuevo modelo de aisladores por su funcionalidad de rodamiento sobre la estructura de una edificación mediante la aplicación de un estímulo de carga sísmica.

1.7.4 DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

En la presente Investigación por sus características peculiares posee la validez interna y externa, consiste en administrar un tratamiento por medio de la instalación de aisladores de rodamiento (variable independiente) y hacer mediciones a las derivas y cortantes de nivel a un grupo de elementos que corresponde a los 5 niveles de una edificación dual considerando sus dos direcciones, una medición antes de la instalación y otra medición al mismo grupo después de la instalación. Dado que se efectúa una observación de los resultados obtenidos de la prueba análisis dinámico modal espectral de acuerdo a la norma E0.30 cap. IV, esta determinó qué cambios hubo en el comportamiento sísmico de la edificación (variable dependiente). A esta una prueba antes del tratamiento se le denomina pretest y la prueba después del tratamiento se le denomina posttest, lo que corresponde a un diseño experimental pretest – posttest de un solo grupo, para lo cual se realizó el siguiente esquema:

Elementos del grupo	Antes (sin aislador) Condiciones de bases fija	Después (con aislador) Condición de base aislada
N° 1		
N° 2		
.		
.		
N° n		

FUENTE: *Elaboración propia.*

donde las columnas representan las observaciones obtenidas a través de la aplicación de una prueba sísmica, y sus respectivas diferencias que determinaron si hubo un aumento o disminución del comportamiento sísmico.

1.8 POBLACIÓN Y MUESTRA DE LA INVESTIGACIÓN

1.8.1 POBLACIÓN

La población o universo de la presente investigación es el análisis de edificios de cinco niveles ubicada en el Distrito Miraflores, Provincia de Arequipa Departamento Arequipa.

1.8.2 MUESTRA

La muestra se consideró para una estructura específica dual de 5 niveles calle Francisco Bolognesi manzana K4 Distrito Miraflores, Provincia de Arequipa Departamento Arequipa.

1.9 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

1.9.1 TÉCNICAS

- a) **Observación.** Se realizó una observación estructurada, se tiene un plan referente a qué variables debe observar, variable independiente (aisladores por su funcionalidad de rodamiento y condición de base fija) para analizar su efecto sobre la variable dependiente (comportamiento sísmico).
- b) **Ensayos (modelos matemáticos).** para ello se utilizó el software Robot structural basado en MEF (método de elementos finitos) ampliamente aceptado para realizar el modelamiento matemático, el ensayo consistirá en aplicar un estímulo de aceleración sísmica a una edificación bajo diferentes grados de desconexión suelo-estructura.

1.9.2 INSTRUMENTOS

- a) **Ficha observacional:** Se utilizó cuadros en EXEL en los que se detalló de manera descriptiva el aislador funcional de rodamiento, carga vertical que soporta, excentricidad máxima de fuerzas verticales, excentricidad mínima de fuerzas horizontales, desplazamiento relativo máximo, así como detalles de la edificación, altura y peso total de la edificación.
- b) **Ficha de resultado del modelamiento matemático:** para los resultados del ensayo del modelamiento matemático se utilizó cuadros de EXEL en el que se detalló los resultados de la deriva de entrepiso, cortante sísmico basal, deformación lateral por piso y aceleración basal que determinaron el comportamiento sísmico de la edificación con el uso de aisladores por su funcionalidad de rodamiento y condición de base fija.

1.10 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN

1.10.1 JUSTIFICACIÓN

Debido al gran desarrollo que ha experimentado recientemente el análisis y diseño de estructuras con sistemas de reducción de vibraciones, es muy posible que nuevos dispositivos, quizás más innovadores y adecuados sean propuestos. Ante esta complejidad de encontrar nuevas alternativas de diseño de aislamiento son una prioridad ya que es necesario que nuestras estructuras sean capaces de reaccionar positivamente ante los eventos sísmicos y las fuerzas de inercia generadas "cuya magnitud depende de su flexibilidad y la masa, si las cargas dinámicas se aplican lentamente, las fuerzas de inercia serán pequeñas y podemos ignorarla tratando el problema como si fuera estático., si la aplicación de la carga es súbita las fuerzas de inercia adquieren importancia (en relación a las cargas externas), y sus efectos

se harán sentir en los esfuerzos resultantes"⁷, existe una diferencia marcada entre magnitud e intensidad de un sismo, "la magnitud Richter da una medida de la energía liberada por un movimiento sísmico, no describe los efectos destructivos causados en una determinada localización. Tal descripción las proporciona las intensidades sísmicas"⁸ esto ocurre sobre todo en zonas altamente sísmicas como el Perú y sobre todo por tener un silencio sísmico en el norte del Perú de más de 100 años.

Realmente las fuerzas y los desplazamientos son solo una mera manifestación del ataque sísmico "Los efectos de un sismo se caracterizan porque los niveles de potencia son decididamente altos, pero de corta duración, alrededor de un minuto en algunos casos. La consecuencia lógica de esta observación es que dispositivos antisísmicos son diseñados para resistir pocos ciclos histéricos, pero con desplazamientos substanciales, así como también pocos ciclos de alta potencia"⁹. Los sismos son en esencia fenómenos energéticos, medibles esto depende del "tipo de terreno en que se haya obtenido el acelerograma es muy importante, pues las características dinámicas de la excitación varían en función de este. En suelos firmes las vibraciones son rápidas y la velocidad de onda de cortante es alta, mientras que en suelos blandos las oscilaciones son de menor frecuencia, esto es, su periodo es relativamente más largo"¹⁰, para disminuir dichas vibraciones se utiliza

⁷ Colindres Selva R. 1983 Dinámica de suelos y estructuras aplicada a la ingeniería sísmica., Primera Edición. México: Editorial Limusa. 16-17 p. ISBN 968-18-1484-3

⁸ Paz, Mario William. 2004 Dinámica Estructural, Teoría y Calculo Quinta Edición. Barcelona: Editorial Reverte, S.A., 580 p. ISBN 1-4020-7667-3

⁹ Aguiar, R. "et al." 2008 Aisladores de Base Elastoméricos y FPS. Primera Edición. Quito: Centro de Investigaciones Científicas. 3 p. ISBN 978-9978-30-104-3

¹⁰ Rochel Awad R. 2012 Análisis y diseño sísmico de edificios. Segunda Edición. Medellín: Editorial Universidad EAFIT, 41 p. ISBN: 978-958-720-117-8

estrategias de defensa que deben ser organizadas debidamente considerando esta naturaleza intrínseca.

El diseño sismorresistente tiene como objetivo principal la protección de la vida, mejorando el comportamiento sísmico de las edificaciones para reducir el colapso. Por otro lado, se debe asegurar principalmente el funcionamiento de aquellas estructuras vitales (hospitales, centros educativos y otros) en caso de una emergencia, cambiando el objetivo principal por el de mantener la operatividad de la estructura.

“Desde el punto de vista técnico y financiero solo es posible reducir estos riesgos en el caso de grandes sismos. por lo que los propósitos de diseño están básicamente encaminados a evitar las pérdidas de vidas humanas en cualquier sismo, ya sea debida al colapso estructural o por efectos secundarios (fragmentos que caen o fuego), y a la reducción de daño y pérdida del conjunto construido. obviamente, algunas estructuras demandan mayor resistencia sísmica que otras, en virtud de su mayor importancia social y/o financiera. es pues necesario determinar, al definir el alcance de diseño, no solamente el valor intrínseco evidente de la estructura, sino también el valor de permanencia que le da el cliente”¹¹

El aislamiento sísmico es una tecnología que año a año, alienta a muchos inventores a crear novedosos sistemas de aislamiento. Sin embargo, este trabajo se enfocará a la aplicación de un nuevo sistema de aislamiento sísmico no convencional.

Con un sistema estructural con aislamiento sísmico se espera beneficiar a toda construcción a nivel local y nacional para evitar los daños en la estructura y sobre todo los colapsos.

¹¹ Dowrick, D. J. 1990. Diseño de Estructuras Resistentes a Sismos Para Ingenieros y Arquitectos. Primera Edición. México: Editorial LIMUSA S. A., 13 P. ISBN 968-18-1627-7

El aislamiento sísmico es una técnica de diseño sismorresistente que consiste en introducir un elemento de apoyo de alta flexibilidad o baja resistencia que independiza a la estructura del movimiento que se propaga por el suelo donde ésta se funda. La incorporación de aisladores sísmicos permite reducir la rigidez del sistema estructural logrando que el período de vibración de la estructura aislada sea aproximadamente tres veces mayor al período de la estructura sin sistema de aislación. Finalmente, este sistema permite asegurar cero daño estructural y total protección a las personas y los contenidos.

1.10.2 IMPORTANCIA

La importancia del trabajo radica con un sistema estructural con aislamiento sísmico se espera beneficiar a toda construcción a nivel local y nacional para evitar los daños en la estructura y sobre todo los colapsos.

El aislamiento sísmico es una técnica de diseño sismorresistente que consiste en introducir un elemento de apoyo de alta flexibilidad o baja resistencia que independiza a la estructura del movimiento que se propaga por el suelo donde ésta se funda. La incorporación de aisladores sísmicos permite reducir la rigidez del sistema estructural logrando que el período de vibración de la estructura aislada sea aproximadamente tres veces mayor al período de la estructura sin sistema de aislación. Finalmente, este sistema permite asegurar cero daño estructural y total protección a las personas y los contenidos.

CAPITULO II:

MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

2.1.1 ANTECEDENTES INTERNACIONALES

En el último siglo se han buscado diversos mecanismos que sirvan para desacoplar a la estructura del suelo lo que se conoce como interacción-suelo estructura, es decir que "produzcan la misma configuración de desplazamientos diferenciales entre los dos elementos"¹², esto con el objetivo de reducir las fuerzas y como consecuencia los daños. En 1996 James M. Kelly da a conocer tres ejemplos de los primeros edificios aislados. Dos de ellos fueron construidos sobre esferas: un edificio en Sebastopol, Ucrania y un edificio de cinco pisos en México; y el tercero, un edificio de cuatro pisos para el observatorio sismológico del estado de Beijing sobre una capa de arena, siempre considerando la resistencia a las distintas condiciones ambientales y climáticas en un período de vida útil de por lo menos el mismo que el de la superestructura¹³. El concepto de aislamiento basal consiste en separar el edificio de los movimientos del suelo generados por un sismo, ubicando dispositivos de rigidez horizontal baja entre la cimentación y la estructura; siendo el objetivo aumentar la flexibilidad de la estructura, alargar el período fundamental de vibración, de tal manera que se disminuya las aceleraciones impuestas por el sismo y por ende disminuya la carga sísmica que se transmite a la superestructura. De esta manera se pretende que la superestructura trabaje dentro del rango elástico.

¹² Zeevaert, L. 1980. Interacción Suelo-Estructura de Cimentaciones Superficiales y Profunda, Sujeta a Cargas Estáticas y Sísmicas. Primera Edición. México: Editorial LIMUSA S.A, 11 p. ISBN 968-18-1237-9

¹³ Arriagada, J. A. 2005. Aislación Sísmica de un Edificio de Oficinas de Siete Pisos. Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias de la Ingeniería. Valdivia: Universidad Austral de Chile.

A finales de la década de los 70' unos pocos edificios aislados fueron construidos en Japón. Fue el inicio del desarrollo de los SREI (Steel reinforced elastomer isolator), en los cuales, se vulcanizan las capas de caucho y las placas de acero intercaladas con el fin de aumentar la rigidez vertical. Hasta el año 1985 sólo tres proyectos habían sido completados. Entre 1985 y 1994, durante el boom de la economía japonesa, el número de edificios aislados empezó a incrementarse a razón de 10 edificios por año.

En Estados Unidos el proceso de la elaboración de códigos que incluyeran pautas para el diseño con aisladores sísmicos empezó con una simple publicación de la Asociación de Ingenieros estructurales del Norte de California llamada "Tentative Seismic Iso- lation Design Requirements" (SEAOC 1986), la cual, se basaba principalmente en el diseño con métodos estáticos. En el año 1990 los miembros del comité sismológico del SEAOC deciden incluir en su "Blue Book", un apéndice con los requerimientos de "General Requirements for the Design and Construction of Seismic Isolated Structures". Esta publicación fue considerablemente modificada y se incluyó como un apéndice no obligatorio del capítulo 23 en la versión del año 1991 del UBC (Uniform Building Code) con el nombre de "Earthquake Regulations for Seismic-Isolated Structures". Tanto el comité sismológico del SEAOC como el del UBC han ido revisando periódicamente sus códigos y han ido actualizándolos.¹⁴ En las últimas versiones el diseño se basa fundamentalmente en el análisis dinámico de las estructuras. Por otro lado, por encargo del Consejo de Seguridad Sísmica para Edificios, se incorporaron nuevos requerimientos para el diseño de estructuras con aislación sísmica y disipación de energía.

¹⁴ UBC. 1997. Appendix Chapter 16: Earthquake Regulations for Seismic- Isolated Structures. Uniform Building Code. California.

En el caso de Sudamérica, Chile ha sido uno de los primeros países en incorporar aisladores sísmicos a sus estructuras. Cuenta además con la norma chilena NCh2745 – 2003 que es el resultado de la adaptación a la realidad chilena del código UBC (Uniform Building Code) del año 1997 y su compatibilización con la norma chilena NCh433.Of1996. Entre los edificios actualmente aislados en Chile se tiene: un bloque del conjunto habitacional Comunidad Andalucía construido entre los años 1991 y 1992 para un estudio hecho por la Universidad Católica de Chile, el centro médico San Carlos de Apoquindo de la Universidad Católica de Chile construido en el año 2000 y el Hospital Militar inaugurado en el año 2008.¹⁵



Figura II 1 Clínica San Carlos construidos con aisladores de base

Clínica San Carlos (2001) de Apoquindo en Santiago que tiene 22 aisladores con núcleo de plomo y 30 aisladores sin núcleo de plomo

2.1.2 ANTECEDENTES NACIONALES

En el Perú el tema del aislamiento basal está en sus inicios y su aplicación aun no es muy difundida. Algunos ejemplos de estructuras aisladas son dos tanques de gas licuado del proyecto Melchorita cuyas

¹⁵ De la Llera, J. C. 2011. Aisladores Sísmicos en el Hospital Militar. ArquitecturaMOP 10 p.

bases poseen aisladores sísmicos de la empresa Earthquake Protection Systems.

Aunque la normas actuales ya contemplan algunas directrices, se permite la utilización de aislamiento sísmico o de sistemas de disipación de energía en la edificación, siempre en cuando se contemplen las disposiciones de esta norma (mínima fuerza cortante en la base, distorsión de entrepiso máxima permisible), y en la medida que sea aplicable los requisitos del documento siguiente: "Minimum Design Loads for building and other structures" ASCE/SEI 7-10, Structural Engineering Institute of the American Society Of Civil Engineers, Reston, Virginia, USA, 2010. (Norma E.30)

Una consideración importante a tomar es que el Perú no cuenta con la normativa de un mapeo que indique las aceleraciones máximas del sismo, sin embargo, según las normas citadas este valor no debe ser menor que 1.5 veces el sismo de diseño.¹⁶ y Para diseñar la superestructura se considera el sismo de diseño que tiene el 10% de probabilidad de ser excedido en 50 años y con un periodo de retorno de 475 años (FEMA 451B)

Al momento de aplicar un tipo de aislación sísmica la estructura en conjunto se hace más flexible, por lo cual habrá un aumento del periodo natural fundamental de vibración, Según recomienda Farzad & Kelly, un rango de 2 a 3 segundos es lo deseable. la reducción de las fuerzas reduce los desplazamientos relativos de entrepiso de forma que, por lo general, se cumplen fácilmente las derivas que exige la norma E.030¹⁷

¹⁶ ASCE. 2010. Seismic Design Requirements for Seismically Isolated Structures. En Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures. Reston, Virginia, United States of America: Engineers, American Society of Civil

¹⁷ Korswagen, P. A., Arias, J. C., & Huaranga, P. G. 2012. *Análisis y diseño de estructuras con aisladores sísmicos en el Perú*. Tesis, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima.

Actualmente en el Perú existen algunas edificaciones que cuentan con aislamiento sísmico y otras se encuentran en proyecto¹⁸.

Nombre del proyecto	Ubicación	Tipo de Aislador	N° de dispositivos	N° de Pisos , Aprox.	Estado	Año
Hospital de Rioja	Rioja, San Martin	Elastoméricos (LRB) + deslizadores dobles	100	Dos bloques aislados de 2 y 3 pisos	Terminado	2016
Complejo de ciencias sociales PUCP	San Miguel, Lima	Elastoméricos (LRB) + deslizadores dobles	40	Edificio de 9 piso y tres sótanos (aislado debajo del 2 sótano)	Terminado	2016
Edificio paseo colonial	Cercado, Lima	Elastoméricos (LRB) + deslizadores dobles	72	Edificio de 15 piso y dos sótanos	Terminado	2015
Universidad UNI	SMP-LIMA	Elastoméricos Con núcleo de plomo	20	Sistema de monitoreo terreno, 1er y 4 to piso	Terminado	2013
Universidad UTEC-Lima	Barranco- Lima	Elastoméricos Con núcleo de plomo y deslizadores	145	11 pisos	Terminado	2013
Hospital Regional de Moquegua	Moquegua	Elastoméricos Con núcleo de plomo y deslizadores	216	3 edificios de 2 pisos+ 3 edificios de 4 pisos	Terminado	2014
Hospital Tocache	Tocache, San Martin	Elastoméricos Con núcleo de plomo y deslizadores	109	Un solo bloque de 4 y 3 pisos	Terminado	2015

Tabla II. 1 Fuente: sistema de protección sísmica (Álvaro Talavera 2017)

2.2 BASES TEÓRICAS

2.2.1 AISLADOR ELASTOMÉRICO

Ricardo Abarca explica que existen varios tipos de aisladores sísmicos, como los elastoméricos, friccionales y viscosos. Los aisladores

¹⁸ Talavera G. Alvaro. 2017 Experiencia Nacional en Edificaciones con sistemas de Protección Sísmica. Página oficial del Ministerio de vivienda <http://www3.vivienda.gob.pe/dnc/archivos/difusion/eventos/2017>

elastoméricos son los que más reducen la energía de los terremotos, en alrededor del 80 o 90%, y son los que más se usan en Chile.¹⁹

2.2.1.1 AISLADOR ELASTOMÉRICO DE BAJO AMORTIGUAMIENTO (LDR)

Este tipo de dispositivos son los más simples dentro de los aisladores elastoméricos. Los aisladores tipo LDR presentan bajo amortiguamiento (2-5% como máximo), por lo que generalmente se utilizan en conjunto con disipadores de energía que proveen amortiguamiento adicional al sistema. Estos dispositivos presentan la ventaja de ser fáciles de fabricar.

2.2.1.2 AISLADOR ELASTOMÉRICO CON NÚCLEO DE PLOMO (LRB)

Los aisladores con núcleo de plomo en la base (Lead-plug Rubber Bearing) son aisladores elastoméricos similares a los LDR, pero poseen un núcleo de plomo, ubicado en el centro del aislador, que permite aumentar el nivel de amortiguamiento del sistema hasta niveles cercanos al 25-30%. Al deformarse lateralmente el aislador durante la acción de un sismo, el núcleo de plomo fluye, incurriendo en deformaciones plásticas, y disipando energía en forma de calor. Al término de la acción sísmica, la goma del aislador retorna la estructura a su posición original, mientras el núcleo de plomo recristaliza. De esta forma el sistema queda listo para un nuevo evento sísmico.

2.2.1.3 AISLADOR ELASTOMÉRICO DE ALTO AMORTIGUAMIENTO (HDR)

Los HDR son aisladores elastoméricos cuyas láminas de elastómeros son fabricados adicionando elementos como carbón, aceites y resinas, con el fin de aumentar el amortiguamiento de la goma hasta niveles cercanos al 10-15%.

¹⁹ Abarca. R. 2015 Aisladores sísmicos de VULCO suman otro hospital en Chile y llegan a Perú En: Ediciones especiales [en línea]. Santiago de Chile: Pedro Álvarez, [consulta: 8 de septiembre de 2018].

Los aisladores tipo HDR presentan mayor sensibilidad a cambios de temperatura y frecuencia que los aisladores tipo LRB. A su vez, los aisladores HDR presentan una mayor rigidez para los primeros ciclos de carga, que generalmente se estabiliza luego del tercer ciclo de carga. Estos dispositivos, al igual que los dispositivos tipo LRB, combinan la flexibilidad y disipación de energía en un solo elemento, con la característica de ser, relativamente, de fácil fabricación.

2.2.1.4 NUEVO SISTEMA AISLADOR ROLL-N-CAGE (RNC)

El aislador Roll-n-Cage (RNC) es el resultado de la búsqueda de un dispositivo de aislación que permita la combinación de las propiedades benéficas de los distintos aisladores descritos, a la vez que minimiza sus desventajas. El punto de partida para el diseño del aislador fue la premisa de lograr la máxima desconexión suelo-estructura que fuera posible, optándose así por el mecanismo de rodado como medio principal de producir el desacople, debido principalmente al bajo nivel de esfuerzo necesario para iniciar el movimiento en comparación con el principio de deslizamiento.

PRINCIPALES COMPONENTES

La principal componente del aislador RNC es su cuerpo rodante central, el que se encuentra contenido entre dos placas de sujeción. La forma cuasi elíptica del núcleo está en concordancia con las formas observadas en las placas de anclaje, evitando así que la estructura presente desplazamientos verticales al producirse la rodadura del cuerpo central, a la vez que proporciona un mecanismo de limitación de los desplazamientos.

Entre el cuerpo central y las placas de anclaje se inserta una capa de un material más flexible que aquel empleado en las placas, recomendándose el uso de un material resistente con propiedades hiperelásticas como el neopreno, cuya función es la de aumentar el

coeficiente de rozamiento con el núcleo, impidiendo así que éste deslice sobre la superficie, limitando el contacto entre superficies rígidas y evitando el aplastamiento del núcleo.

MECANISMO DE FUNCIONAMIENTO

Como se mencionó el principio básico del aislador RNC es su capacidad de rotación, la que ofrece una gran desconexión suelo-estructura debido a la escasa fuerza necesaria para iniciar el movimiento. Sin embargo, un sistema con mínima resistencia lateral es susceptible de sufrir vibraciones bajo pequeñas cargas, toda vez que puede presentar grandes deformaciones permanentes bajo cargas sísmicas. Para impedir estos efectos, se incorporaron amortiguadores metálicos de fluencia, o barras de plomo en su defecto, como una jaula alrededor del cuerpo central, las que proveen la suficiente rigidez lateral para pequeñas cargas laterales, en adición a amortiguamiento para limitar la amplitud de desplazamiento por vibraciones. su disposición radial permite garantizar la misma tensión de cortante en todas direcciones.

El aislador RNC tiene un mecanismo de regulación para limitar los desplazamientos a un máximo predeterminado bajo la acción de sismos severos, por sobre este límite, el mecanismo de control detiene la estructura aislada con mínimo impacto. El mecanismo restaurador, que permite que la estructura recupere su posición original, está dado por la forma semielíptica del cuerpo central, la que, junto con el peso de la estructura, generan un momento restaurador.

En resumen, la principal característica del aislador RNC es que permite una gran desconexión entre el suelo y la estructura a la vez que proporciona la suficiente resistencia a pequeñas vibraciones, posee un mecanismo de regulación de los desplazamientos, amortiguamiento y resistencia a levantamiento, junto con la capacidad de recobrar su posición original.

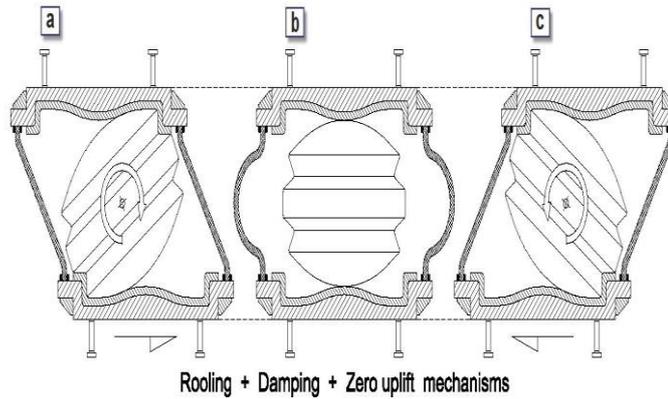


Figura II 2 Posición inicial y final del aislador RNC-c en fase de carga

2.2.1.5 MODELAMIENTO BILINEAL DE AISLADORES SÍSMICOS

En la práctica todos los tipos de aisladores sísmicos pueden ser modelados por un modelo bilineal basado en tres parámetros; la rigidez elástica K_e , la rigidez plástica K_p y la resistencia característica del aislador Q , según se muestra en la Figura II. 3

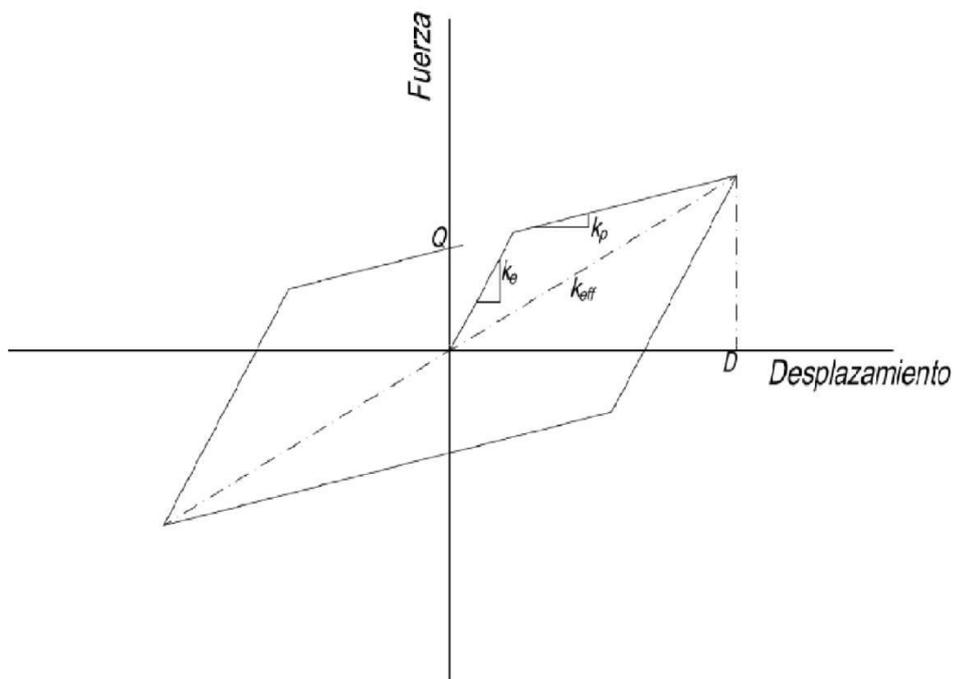


Figura II 3 Parámetros de ciclo básico de histéresis

La rigidez elástica se define como la ratio entre la fuerza y el desplazamiento para el límite elástico, mientras que la rigidez plástica puede ser definida en función de la rigidez elástica²⁰.

2.2.1.6 EFECTO DE LOS AISLADORES SÍSMICOS SOBRE LAS EDIFICACIONES

La aislación sísmica posee una serie de ventajas sobre otras técnicas de mitigación sísmicas, destacando su simplicidad, bajo coste y escasa mantención. Se estima que el uso de aisladores sísmicos puede mejorar el desempeño estructural, a la vez de lograr una reducción de los costes de construcción en torno al 5%.

Al emplear dispositivos de aislación sísmica, la estructura se torna considerablemente más flexible, esperándose por tanto un aumento importante en los desplazamientos del edificio, los que, si bien dependerán de la estructura misma, existe un amplio consenso que los ubica en el rango de 50 mm a 400 mm, siendo posible encontrar máximos que duplican estos valores para sismos extremos.

En términos generales, dado que la gran mayoría de los terremotos a nivel mundial presentan grandes aceleraciones en períodos relativamente bajos, entre 0.1-1.0 segundos, según se observa en la Figura II 4, el uso de aisladores sísmicos representa una excelente alternativa para mantener las estructuras alejadas de dichos períodos.

No obstante, ello, se han registrado casos, como el terremoto de la Ciudad de México, en el que la excitación producida por el sismo se encuentra contenida en un rango de períodos más largos, dando pie a un aumento de la respuesta estructural en lugar de la deseada

²⁰ ISMAIL, Mohammed. 2009 *An Innovative Isolation Device for Aseismic Design*. Jose Rodellar (dir.). Tesis Doctoral Inédita. Universidad Politécnica de Catalunya.

reducción, resaltando la importancia de contar con un sistema de alto amortiguamiento capaz de hacer frente a eventos sísmicos poco frecuentes.

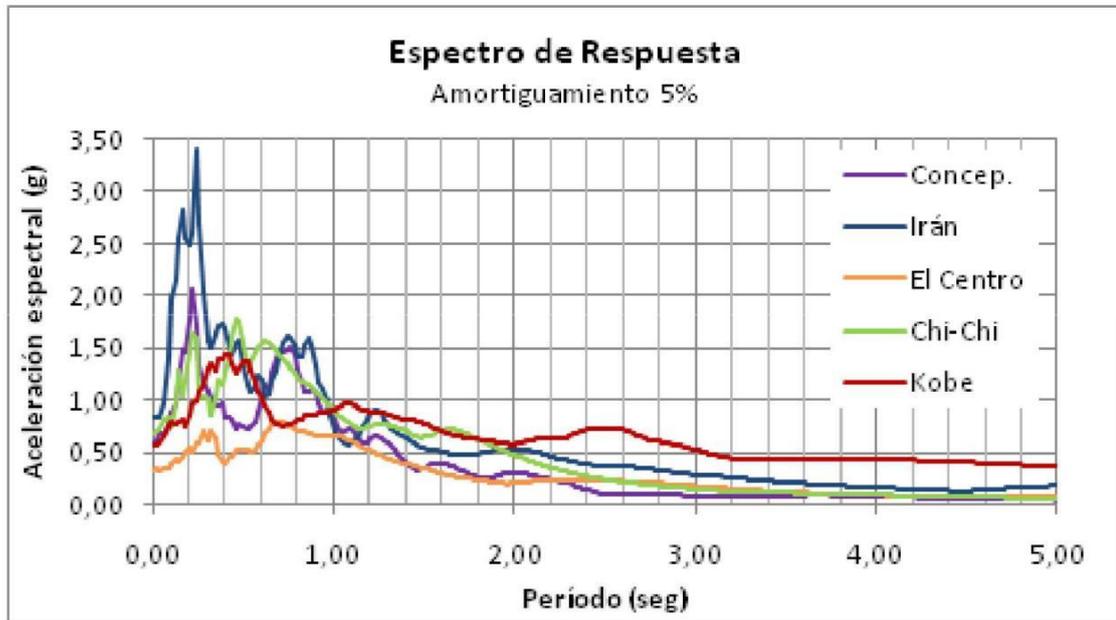


Figura II 4 Espectro de respuesta para varios sismos considerando un 5% de amortiguamiento

Dado los rangos típicos de acción de los terremotos, son las estructuras más rígidas las que pueden beneficiarse del eventual uso de aisladores sísmicos, pues son este tipo de estructuras las que presentan períodos bajos. La propiedad más importante de la aislación sísmica es su disminución en la rigidez del edificio, permitiendo un aumento en el periodo fundamental de la estructura, eliminando así riesgos de resonancia y reduciendo la aceleración a la cual es sometido.

La flexibilidad del edificio produce un aumento del período de la estructura, produciendo así una disminución en la aceleración registrada. Este aumento de período no sólo afecta la aceleración sufrida por el edificio, sino que también afecta de manera importante los desplazamientos horizontales. Sin embargo, estos desplazamientos pueden ser contrarrestados mediante un aumento del amortiguamiento “en general en todo cuerpo en movimiento, este tiende a disminuir con el

tiempo, La razón de esta disminución está asociada con una pérdida de la energía presente en el sistema. Esta pérdida de energía es producida por fuerzas de amortiguamiento o de fricción que obran sobre el sistema. La energía, ya sea cinética o potencial, se transforma en otras formas de energía tales como calor o ruido, estos mecanismos e transformación de energía son complejos y no están totalmente entendidos, aun hoy en día. No obstante, existen varias formas de describir estos fenómenos que en alguna medida se ajustan a la observación”²¹

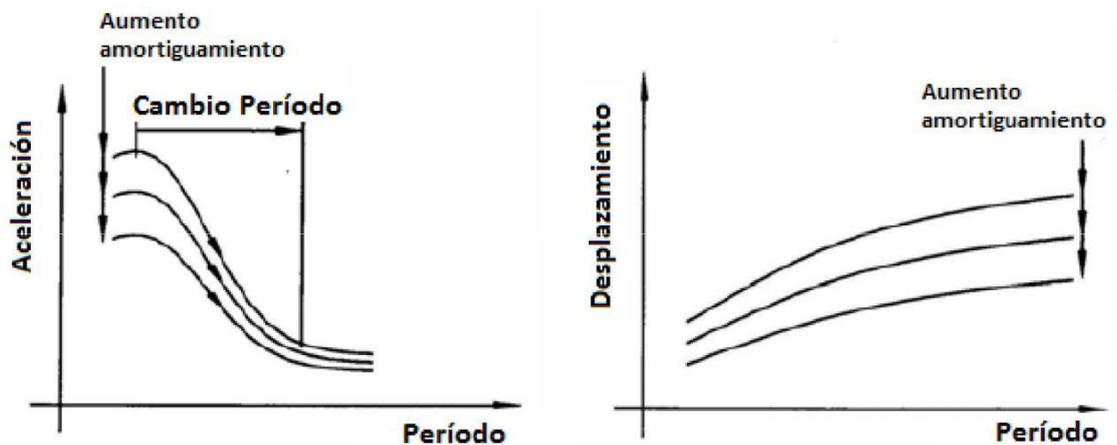


Figura II 5 Efecto del cambio de rigidez en una estructura

Es debido al efecto que produce la aislación sísmica sobre las edificaciones, que el diseño mediante dispositivos de aislación sísmica busca limitar los esfuerzos producto del terremoto en lugar de proporcionar la capacidad necesaria para resistirlos. Esto se logra por la desconexión suelo-estructura que los aisladores proporcionan gracias a su baja rigidez horizontal, permitiendo de esta forma que las aceleraciones transmitidas a la estructura, sean generalmente menor que aquellas generadas por los movimientos horizontales del terreno.

²¹ García Reyes E. 1998 Dinámica Estructural Aplicada al Diseño Sísmico. Segunda Edición. Bogotá: Editorial Universidad de los Andes, 11 p. ISBN 958-33-0768-8

2.2.1.7 COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA AISLADO

Haciendo una comparación entre el diseño normativo sismo-resistente y las estructuras con aislamiento de base, el primero se basa en aumentar la capacidad de resistencia y deformación de los elementos estructurales, teniendo como criterio la ductilidad. En cambio, las estructuras con aislamiento de base vibran como un cuerpo rígido, con grandes deformaciones de desplazamiento que son soportadas por los aisladores.

En la Fig. II. 6 se muestra que el edificio sin aislamiento de base absorbe la aceleración del suelo en gran medida; mientras que el edificio con aislamiento de base, las fuerzas laterales se ven reducidas y redistribuidas sobre los pisos, mitigando el momento que tiende a voltear la estructura.

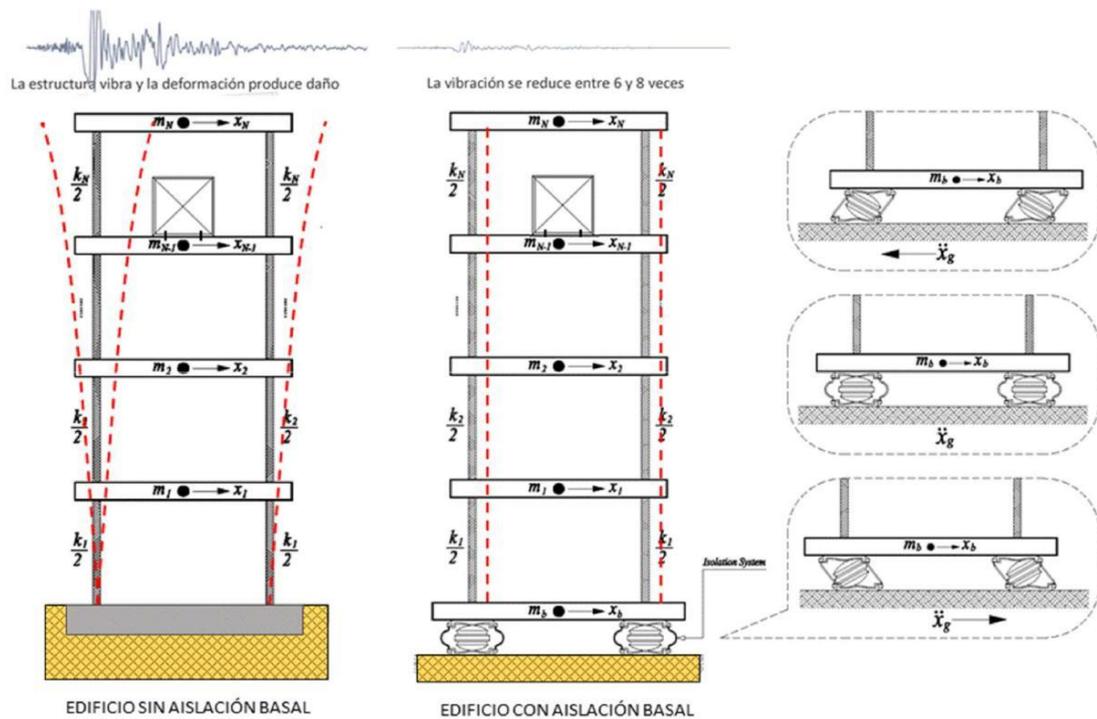


Figura II 6 Imagen comparativa entre edificio con aislamiento y sin aislamiento de base

El sistema de aislación debe satisfacer tres requisitos fundamentales:

- Flexibilidad horizontal de modo de alargar el período fundamental de vibración de la estructura a una zona de menor aceleración espectral.
- Amortiguamiento y disipación de energía, de modo de reducir la demanda de deformación sobre el sistema de aislación.
- Resistencia para cargas de servicio, de manera de evitar vibraciones molestas.

Con respecto a la aceleración espectral, para razones de amortiguamiento de $\xi = 5, 10, 15\%$. que juega un papel importante. La flexibilización de la estructura, y el consecuente incremento de su período fundamental, hacen que la estructura reduzca la demanda de deformaciones y los esfuerzos en los elementos estructurales.

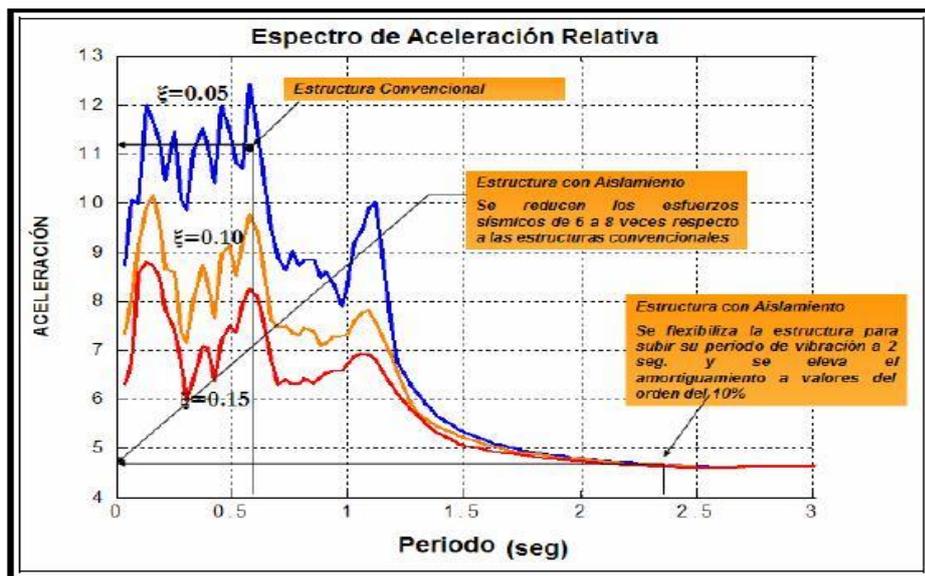


Figura II 7 Espectro de aceleración por razones de amortiguamiento de $\xi = 5, 10, 15\%$.

La conveniencia de usar los aisladores de base depende de las formas de los espectros, debido a que si tenemos las ordenadas espectrales altas y por consecuencia la respuesta sísmica se incrementa cuando

tenemos un periodo fundamental cercano a 2 seg, que coincide con los valores de periodo que se tiene en estructuras con aislamiento de base.

Además, este sistema se aplica mejor en suelos rígidos y en periodos fundamentales bajos.

2.2.2 ESPECTRO DE DISEÑO

Un espectro se puede definir como un gráfico de la respuesta máxima (expresada en términos de desplazamiento, velocidad, aceleración o cualquier parámetro de interés) que produce una acción dinámica determinada en la estructura u oscilador de un grado de libertad. En estos gráficos, se representan en abscisas el periodo propio de la estructura (o la frecuencia) y en ordenadas la respuesta máxima calculada para distintos factores de amortiguamiento²². Los espectros de diseño son generalmente bastante suavizados, se obtiene después de promediar espectros de múltiples movimientos sísmicos para "describir la aceleración del terreno producida por un sismo es necesario escoger intervalos de tiempo entre 0.01 y 0.02 segundos y en total se necesitan 1500 a 3000 ordenadas. Si se tiene pórticos de diferentes periodos de vibración con igual coeficiente de amortiguamiento ξ sometidas todas ellas a la misma excitación sísmica en la base, se obtienen los máximos valores de desplazamiento, velocidad y aceleración que presenta cada una de estas estructuras, con periodos de vibración diferentes en ellas (estas ocurren en diferentes tiempos), es posible entonces, construir un sistema de ejes de coordenadas en el que se indique, en el eje de las abscisas, el periodo de vibración T correspondiente a cada estructura y en el eje de las ordenadas se registre cada una de estos máximos valores, La grafica resultante en esta operación representa el espectro de respuesta. Dependiendo de cada uno de los máximos valores de interés se tendrán espectros de

²² Muños Díaz E. 2012. Ingeniería de puentes colapso, inspección especial, socavación, Vulnerabilidad sísmica y capacidad de carga tomo II. Primera Edición. Bogotá: Editorial Pontificia Universidad Javeriana, ISBN 978-958-716-400-8

respuesta de desplazamiento, de velocidades y aceleraciones"²³ de esa manera se obtiene el espectro de diseño mediante métodos estadísticos de esa manera se evita las fuertes fluctuaciones en las aceleraciones.

2.2.3 NIVEL DE AMENAZA SÍSMICA

El comité VISIÓN 2000 (SEAOC, 1995) Define 4 niveles de amenaza sísmica, reproduce los correspondiente 4 niveles de movimiento sísmico.

<i>Nivel del movimiento sísmico</i>	<i>Período medio de retorno T (años)</i>	<i>Probabilidad de excedencia (p,t)</i>
Frecuente	43 años	50% en 30 años
Ocasional	72 años	50% en 50 años
Raro	475 años	10% en 50 años
Muy Raro	970 años	10 % en 100 años

Tabla II. 2 Niveles de amenaza sísmica SEAOC(1995).

2.2.4 NIVEL DE COMPORTAMIENTO

El FEMA 273 define 3 niveles de comportamiento para estructuras.

Parámetros	Ocupación inmediata (IO)	Seguridad de vidas (LS)	Prevención de colapso (CP)
Elementos Estructurales	Fluencia local en algunos elementos; no fracturas; pandeo menor en elementos que pueden ocasionar leves distorsiones.	Formación de articulaciones; pandeo local en algunos elementos; considerable distorsión en los nodos; algunas fracturas parciales en elementos; fracturas aisladas en conexiones de momento, pero sin comprometer ninguna conexión a cortante.	Severa distorsión en las vigas y paneles de columnas; numerosas fracturas en conexiones a momento, pero las conexiones a cortante permanecen intactas.

Tabla II. 3 Nivel de comportamiento FEMA 273

²³ Vallecilla C. R. 2003 Fuerzas Sísmicas Principios y Aplicaciones. Primera Edición Bogotá: Editorial KIMPRES LTDA, 38 p. ISBN 958-33-4572-5

Estado de daño	Nivel de desempeño	Descripción de los daños
Despreciable	Totalmente Operacional	Daño estructural y no estructural despreciable o nulo. Los sistemas de evacuación y todas las instalaciones continúan prestando sus servicios.
Leve	Operacional	Agrietamientos en elementos estructurales. Daño entre leve y moderado en contenidos y elementos arquitectónicos. Los sistemas de seguridad y evacuación funcionan con normalidad.
Moderado	Seguridad	Daños moderados en algunos elementos. Pérdida de resistencia y rigidez del sistema resistente de cargas laterales. El sistema permanece funcional. Algunos elementos no estructurales y contenidos pueden dañarse. Puede ser necesario cerrar el edificio temporalmente.
Severo	Pre - Colapso	Daños severos en elementos estructurales. Fallo de elementos secundarios, no estructurales y contenidos. Puede llegar a ser necesario demoler el edificio.
Completo	Colapso	Pérdida parcial o total de soporte. Colapso parcial o total. No es posible la reparación.

Tabla II. 4 Nivel de comportamiento VISIÓN 2000

2.2.5 CRITERIOS DE ACEPTABILIDAD

Nivel de comportamiento	FEMA 273
OCUPACION INMEDIATA	0.01
SEGURIDAD DE VIDA	0.01-0.02
PREVENCION DEL COLAPSO	0.04

Tabla II. 5 Limites de distorsión FEMA 273

Nivel de comportamiento	VISIÓN 2000
Totalmente operacional	0-0.002
Operacional	0.002-0.005
Seguridad	0.005-0.015
Próximo al colapso	0.0015-0.025
Colapso	> 0.025

Tabla II. 6 Limites de distorsión VISIÓN 2000

2.3 DESCRIPCIÓN DEL AISLADOR DE BASE PROPUESTO

El principio básico del aislador es su capacidad de rotación, la que ofrece una gran desconexión suelo-estructura debido a la escasa fuerza necesaria para iniciar el movimiento. Sin embargo, un sistema con mínima resistencia lateral es susceptible de sufrir vibraciones bajo pequeñas cargas, toda vez que puede presentar grandes deformaciones permanentes bajo cargas sísmicas. Para impedir estos efectos, se incorporaron amortiguadores de fluido viscoso como una jaula alrededor del cuerpo central, las que proveen la suficiente rigidez lateral para pequeñas cargas laterales, en adición al amortiguamiento para limitar la amplitud de desplazamiento por vibraciones. Su disposición radial permite garantizar la misma tensión de cortante en todas direcciones.

El aislador tiene un mecanismo de regulación para limitar los desplazamientos a un máximo predeterminado bajo la acción de sismos severos que se colocará en paralelo a los amortiguadores de fluido viscoso (ambos podrán diseñarse en conjunto), Por sobre este límite, el mecanismo de control detiene la estructura aislada con mínimo impacto, además poseerá una extensión de su superficie con un radio de curvatura demasiado grande que permitirá que de manera suave con mínimo impacto el mecanismo llegue al tope. El mecanismo restaurador de desfase hace que el peso de la estructura actuando junto con la fricción, generan un momento restaurador que permita que la estructura recupere su posición original.

No debemos olvidar los efectos de momentos de volteo, en especial en estructuras esbeltas para lo cual el mecanismo de regulación de desplazamiento tendrá doble función controlará los desplazamientos máximos predeterminados, y aquellas fuerzas verticales ocasionada por el momento de volteo.

2.4 ANÁLISIS DEDUCTIVO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICO-FÍSICO

En la fig II. 8 se muestra en corte la superficie de rodamiento del aislador, que se puede generar si hacemos rotar en revolución de 360 grados la curva O-1 alrededor del eje Y, el terreno lo representa el eje X girando alrededor del eje Y, la fuerza vertical P se aplica sobre una rotula que se encuentra a una distancia \bar{r} del punto O.

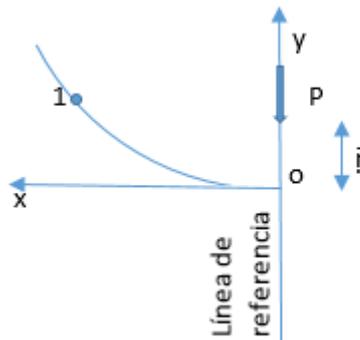


Figura II 8 Posición inicial

La línea de referencia nos servirá como un eje neutro que en todo tiempo conservará su posición, el valor de \bar{r} es la distancia del punto de aplicación de la fuerza P al punto O que se encuentra en el eje del aislador que se representa como el eje de ordenadas Y ver fig. II 8. EL movimiento del terreno se inicia cuando hay un desplazamiento $u_g(t)$ desde la línea de referencia. El movimiento del aislador se separa en un movimiento de rodamiento de 1-O de la fig.II 8, hasta 1'-O' de la fig. II 9 manteniendo su tangencialidad al terreno donde no hay resbalamiento y por ende la longitud de la curva 1'-O' tendrá que ser igual $u_g(t)$ en el tiempo t, el otro movimiento será netamente de basculamiento hasta llegar a la posición 1-O de la fig II 9.

Donde se observa el desplazamiento horizontal del terreno $u_g(t)$ corresponde a la longitud de la curva.

$$ug(t) = \bar{s} + s \quad \dots\dots \text{Ecuación 1}$$

Creándose un desfase de fuerzas entre la fuerza P y la fuerza de reacción vertical P, de longitud igual a:

$$dh = (X * \text{COS}(\infty) + Y * \text{SIN}(\infty) - \bar{r} * \text{SIN}(\infty))$$

En la fig. Il 9 el rodamiento se encuentra en movimiento en el instante t y al hacer el desplace de fuerzas al lugar de la rótula la sumatoria de momentos deberá ser cero, además que la única fuerza que se traslada a la rótula es la fuerza F pues las fuerzas P verticales se eliminan, por lo que:

$$dv = (X * \text{SIN}(\infty) - Y * \text{COS}(\infty) + \bar{r} * \text{COS}(\infty))$$

$$P * (X * \text{COS}(\infty) + Y * \text{SIN}(\infty) - \bar{r} * \text{SIN}(\infty)) = F * (X * \text{SIN}(\infty) - Y * \text{COS}(\infty) + \bar{r} * \text{COS}(\infty))$$

Despejando F

$$F = \frac{(P * (X * \text{COS}(\infty) + Y * \text{SIN}(\infty) - \bar{r} * \text{SIN}(\infty)))}{(X * \text{SIN}(\infty) - Y * \text{COS}(\infty) + \bar{r} * \text{COS}(\infty))} = \frac{(P * (X + Y * \text{TAN}(\infty) - \bar{r} * \text{TAN}(\infty)))}{(X * \text{TAN}(\infty) - Y + \bar{r})}$$

$$F = \frac{P * (X + Y * \frac{dy}{dx} - \bar{r} * \frac{dy}{dx})}{\left(X * \frac{dy}{dx} - Y + \bar{r} \right)} \quad \dots\dots \text{Ecuación 2}$$

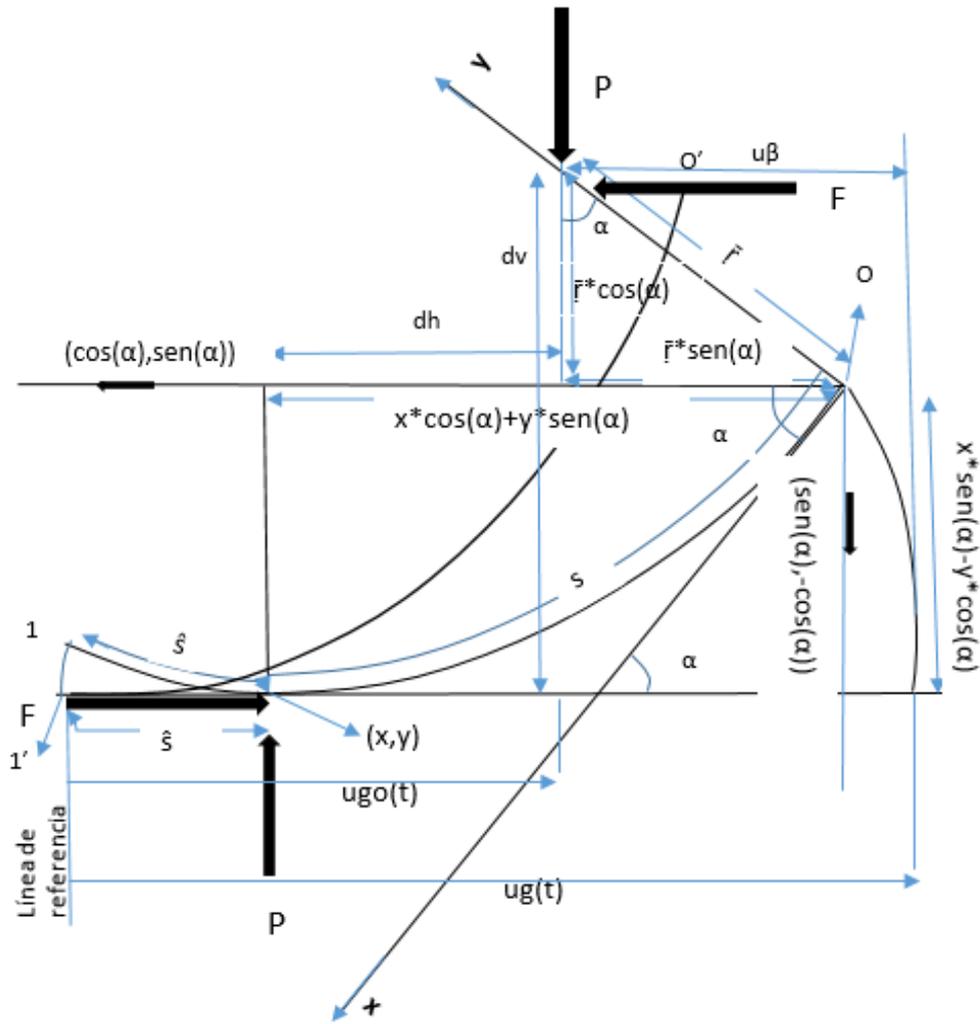


Figura II 9 Geometría y ubicación de fuerzas

De la figura II 9 se define:

- \vec{r} Distancia del punto de aplicación de la fuerza P al punto O que se encuentra en el eje del aislador
- (x, y) Corresponde al punto de contacto entre la superficie horizontal y la superficie propia del aislador, define la generatriz
- Y Eje ordenadas que coincide con el eje del aislador, directriz
- L.R. Línea de referencia en la que no se contempla ningún desplazamiento
- P Peso sísmico que llega al aislador, ver RNE norma E 030 Sección 4.3
- F Fuerza de reposición
- dv Brazo del par de fuerzas F
- dh Brazo del par de fuerzas P

u_B	Desplazamiento horizontal relativo del aislador
s	Longitud de la línea curva del aislador desde el eje del aislador hasta el par (x,y)
α	Angulo formado entre la línea horizontal y el eje X
$u_g(t)$	Desplazamiento horizontal del terreno en función del tiempo respecto a L.R.
$u_{gp}(t)$	Desplazamiento horizontal de la base del aislador en función del tiempo respecto a L.R.

La longitud de la curva desde el punto O hasta el punto de reacción P tendrá una dimensión igual a la integral:

$$s = \int_0^x \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} * dx$$

Despejando de la ecuación 1 el valor \bar{s} obtendremos

$$\bar{s} = u_g(t) - s$$

La proyección de la longitud \bar{r} sobre la horizontal se definirá como u_o y usando identidades trigonométricas se obtendrá:

$$u_B = s - dh = \int_0^x \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} * dx - (X * \cos(\alpha) + Y * \sin(\alpha) - \bar{r} * \sin(\alpha))$$

Ecuación 3

La fuerza restitutiva o de reposición F al igual que en muchos aisladores tiene una función restauradora de la estructura a la posición original, hay que tener presente que el aislador no trabaja de manera elástica mediante la deformación de sus materiales, pese a esto si se puede buscar una relación entre la fuerza F y el desplazamiento u_B .

$$u_B = \int_0^x \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} * dx - \text{COS}(\infty)(X + (Y - \bar{r}) * \text{TAN}(\infty))$$

En la fig. II 9 la pendiente en el punto (X, Y) corresponde a la derivada de Y con respecto a X por lo que:

$$\text{TAN}(\infty) = \frac{dy}{dx}$$

Reemplazando este valor se obtiene:

$$u_B = \int_0^x \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} * dx - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2}} (X + (Y - \bar{r}) * \left(\frac{dy}{dx}\right)) \quad \text{Ecuación 4}$$

El desplazamiento del punto de aplicación de la fuerza p proyectado en la horizontal es $u_{g_p}(t)$

$$u_{g_p}(t) = u_g(t) - u_B$$

$$u_o = -u_B$$

$$u_{g_p}(t) = u_g(t) + u_o$$

Como se observa los valores F y u_o están en función del tiempo t y la variable X, pues suponemos a Y como función de X, entonces se concluye que un objetivo es hallar X en función del tiempo.

Para lo cual condicionaremos F en función de u_o mediante una función predeterminada:

$$F = f(u_B)$$

Reemplazando de 2 y 3

$$\frac{P * \left(X + Y * \frac{dy}{dx} - \bar{r} * \frac{dy}{dx} \right)}{\left(X * \frac{dy}{dx} - Y + \bar{r} \right)} = f \left(\int_0^x \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2} * dx - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2}} \left(X + (Y - \bar{r}) * \left(\frac{dy}{dx} \right) \right) \right)$$

Ecuación 5

La cual es una ecuación diferencial de primer orden, el objetivo será hallar Y en función de X cuya solución dependerá en mucho de la funcionalidad predeterminada de f, además tendrá como condiciones iniciales Y=0 y X=0.

las ecuaciones 2, 3, 4 se pueden tabular para diferentes valores de la función Y(X), en el Anexo 2 se muestran las gráficas y tabulaciones para diferentes funciones como la circunferencia, elipse, parábola y clotoide, pudiendo desarrollarse otras funciones con mejores resultados.

La solución de la ecuación diferencial 5 es en grado sumamente dificultoso por lo cual en la presente tesis se dará una solución utilizando elementos discretos.

Por lo tanto, condicionando F en función de u β tenemos

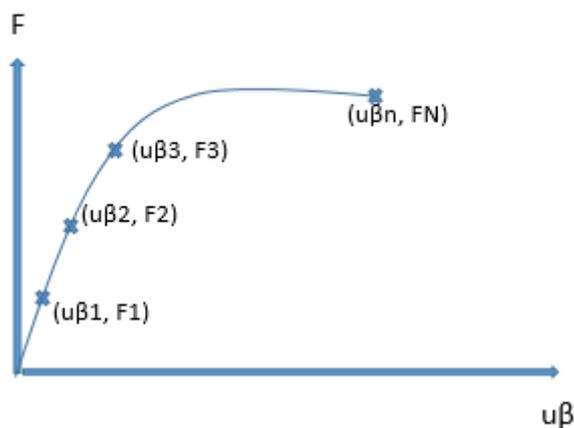


Figura II 10 F vs. u β

Tabla IIa 1

$u\beta_n$	F_n
$u\beta_1$	F_1
$u\beta_2$	F_2
..	..
..	..
$u\beta_n$	F_n

Por lo tanto Y en función de X podrá ser representado mediante

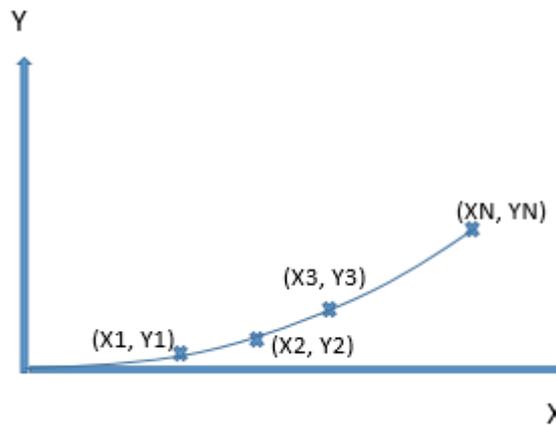


Figura II 11 Y vs. X

Donde la pendiente de dos elementos puntuales será

$$TAN(\infty) = \frac{(Y_n - Y_{n-1})}{(X_n - X_{n-1})}$$

Por otro lado

$$TAN(\infty) = \frac{dy}{dx}$$

Además, $X=X_n$, $Y=Y_n$, $F=F_n$ y $u\beta=u\beta_n$ reemplazando en las ecuaciones 2 y 3 se tiene:

$$F_n = \frac{P * (X_n + Y_n * \left(\frac{(Y_n - Y_{n-1})}{(X_n - X_{n-1})} \right) - \bar{r} * \left(\frac{(Y_n - Y_{n-1})}{(X_n - X_{n-1})} \right))}{X_n * \left(\frac{(Y_n - Y_{n-1})}{(X_n - X_{n-1})} \right) - Y_n + \bar{r}} \dots \text{Ecuación 6}$$

$$u_{Bn} = \sum_{i=1}^n \sqrt{(X_i - X_{i-1})^2 + (Y_i - Y_{i-1})^2} - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{(Y_n - Y_{n-1})}{(X_n - X_{n-1})} \right)^2}} (X_n + (Y_n - \bar{r}) * \left(\frac{dy}{dx} \right))$$

..... Ecuación 7

$$X_0 = 0$$

$$Y_0 = 0$$

Para comenzar a proyectar las soluciones de X_n y Y_n se tendrá presente los primeros valores, que serán X_0 y Y_0 iguales a cero, pues se comienza en el origen, de esa manera se tendrá dos ecuaciones (5 y 6) con dos incógnitas X_n y Y_n para un determinado F_n y $u_{\beta n}$.

Por lo tanto, se podrá tabular

Tabla Ila 2

Xn	Yn
X1	Y1
X2	Y2
..	..
..	..
XN	YN

en coordenadas polares tendremos

$$X = r * SIN(\theta)$$

$$Y = R - r * COS(\theta)$$

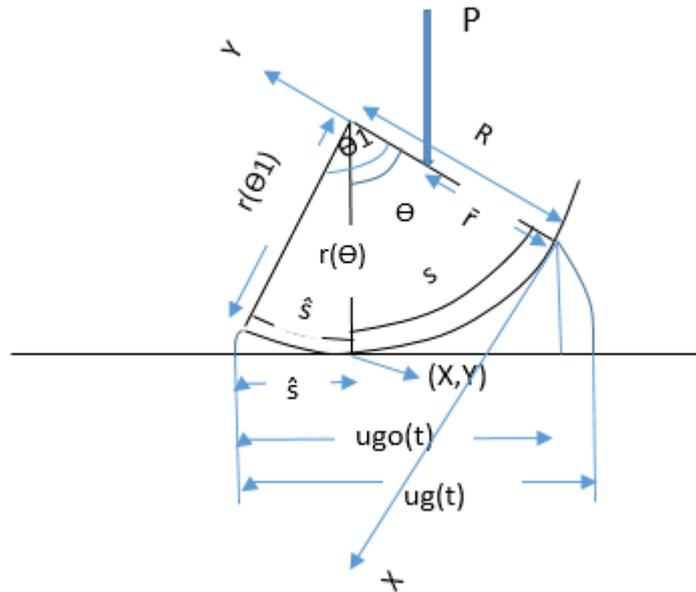


Figura II 12 Geometría en coordenadas polares

Hallando las diferenciales para X, Y obtendremos

$$dY = \left(dr * SIN(\theta) + r * COS(\theta) * d\theta \right) \dots\dots \text{Ecuación 8}$$

$$dX = -dr * COS(\theta) + r * SIN(\theta) * d\theta \dots\dots \text{Ecuación 9}$$

Hallando la derivada de Y con respecto a X

$$\frac{dy}{dx} = \frac{\left(-\frac{dr}{d\theta} * COS(\theta) + r * SIN(\theta) \right)}{\left(\frac{dr}{d\theta} * SIN(\theta) + r * COS(\theta) \right)} = \frac{\left(-\frac{dr}{d\theta} + r * TAN(\theta) \right)}{\left(\frac{dr}{d\theta} * TAN(\theta) + r \right)} \dots\dots \text{Ecuación 10}$$

Para la longitud de la curva s tenemos

$$s = \int_0^x \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} * dx$$

Reemplazando 8 y 9 tenemos en la ecuación anterior tenemos

$$s = \int_0^\theta \sqrt{1 + \left(\frac{\left(-\frac{dr}{d\theta} * \cos(\theta) + r * \sin(\theta)\right)}{\left(\frac{dr}{d\theta} * \sin(\theta) + r * \cos(\theta)\right)}\right)^2} * \left(\frac{dr}{d\theta} * \sin(\theta) + r * \cos(\theta)\right) d\theta$$

Reduciendo términos

$$s = \int_0^\theta \sqrt{\left(\frac{dr}{d\theta}\right)^2 + r^2} d\theta \dots\dots\dots \text{Ecuación 11}$$

Para F

$$F = \frac{P * \left(X + Y * \frac{dy}{dx} - \bar{r} * \frac{dy}{dx}\right)}{\left(X * \frac{dy}{dx} - Y + \bar{r}\right)}$$

Reemplazando valores tenemos

$$F = \frac{P * \left(r * \sin(\theta) + (R - r * \cos(\theta)) * \frac{\left(-\frac{dr}{d\theta} + r * \tan(\theta)\right)}{\left(\frac{dr}{d\theta} * \tan(\theta) + r\right)} - \bar{r} * \frac{\left(-\frac{dr}{d\theta} + r * \tan(\theta)\right)}{\left(\frac{dr}{d\theta} * \tan(\theta) + r\right)}\right)}{r * \sin(\theta) * \frac{\left(-\frac{dr}{d\theta} + r * \tan(\theta)\right)}{\left(\frac{dr}{d\theta} * \tan(\theta) + r\right)} - (R - r * \cos(\theta)) + \bar{r}}$$

Para uB

$$u_B = \int_0^X \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} * dx - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2}} (X + (Y - \bar{r}) * \left(\frac{dy}{dx}\right))$$

Reemplazando valores tenemos

$$u_B = \int_0^\theta \sqrt{\left(\frac{dr}{d\theta}\right)^2 + r^2} d\theta - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\left(-\frac{dr}{d\theta} + r * TAN(\theta)\right)}{\left(\frac{dr}{d\theta} * TAN(\theta) + r\right)}\right)^2}} (r * SIN(\theta) + (R - r * COS(\theta) - \bar{r}) * \left(\frac{\left(-\frac{dr}{d\theta} + r * TAN(\theta)\right)}{\left(\frac{dr}{d\theta} * TAN(\theta) + r\right)}\right))$$

De manera ilustrativa podemos condicionar la curva de generación del rodamiento como un segmento de circunferencia, por lo que r sería una constante y tomara el valor de:

$$r = R$$

Y la derivada del radio respecto al desplazamiento angular será:

$$\frac{dr}{d\theta} = 0$$

Reemplazando estos valores en la ecuación 9 y 10 obtenemos

$$\frac{dy}{dx} = TAN(\theta)$$

$$s = \int_0^\theta \sqrt{\left(\frac{dr}{d\theta}\right)^2 + r^2} * d\theta = R * \theta$$

De igual manera reemplazando para F, y u β se obtendrá

Para F

$$F = \frac{P * (R * SIN(\theta) + (R - R * COS(\theta)) * TAN(\theta) - \bar{r} * TAN(\theta))}{R * SIN(\theta) * TAN(\theta) - (R - R * COS(\theta)) + \bar{r}}$$

$$F = P * \left(\frac{(R * SIN\theta - \bar{r} * SIN\theta)}{R - R * COS\theta + \bar{r} * COS(\theta)} \right) = P * \frac{((R - \bar{r}) * SIN\theta)}{R - (R - \bar{r}) * COS\theta}$$

Para u_{β}

$$u_B = R * \theta - \frac{1}{\sqrt{1 + (TAN(\theta))^2}} (R * SIN(\theta) + (R - R * COS(\theta) - \bar{r}) * (TAN(\theta)))$$

$$u_B = R * \theta - COS(\theta) (R * SIN(\theta) + (R - R * COS(\theta) - \bar{r}) * (TAN(\theta)))$$

$$u_B = R * \theta - COS(\theta) (R * SIN(\theta) + (R - \bar{r}) * (TAN(\theta) - R * SIN(\theta)))$$

$$u_B = R * \theta - COS(\theta) ((R - \bar{r}) * (TAN(\theta)))$$

$$u_B = R * \theta - ((R - \bar{r}) * SIN(\theta))$$

Donde para F, y u_{β} además del tiempo se observa que están en función del ángulo Θ

De manera analítica se puede obtener las mismas fórmulas ver fig. II. 13

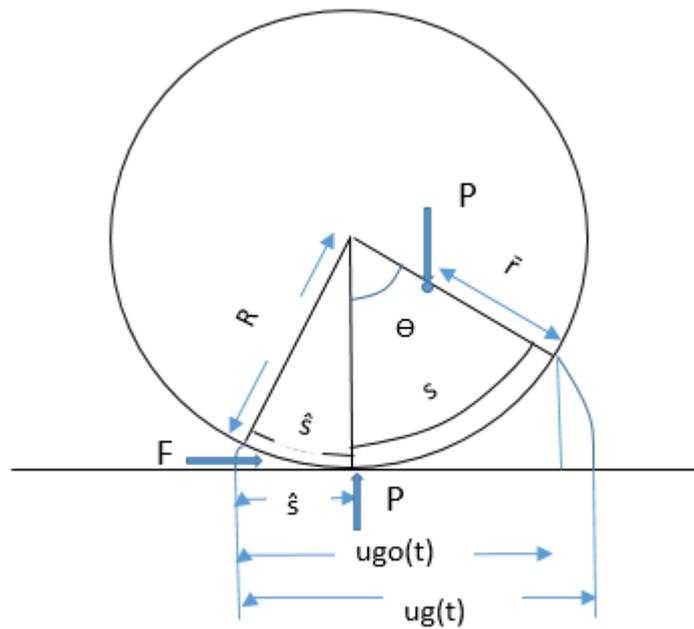


Figura II 13 Geometría con $r = R$

Hallando momentos en la rotula

$$P * ((R - \bar{r}) * \text{SIN} \theta) = F * (R - (R - \bar{r}) * \text{COS} \theta)$$

Despejando F

$$F = \frac{((R - \bar{r}) * \text{SIN} \theta)}{R - (R - \bar{r}) * \text{COS} \theta}$$

Donde u_{β} será

$$u_{\beta} = R * \theta - ((R - \bar{r}) * \text{SIN}(\theta))$$

Formulación de las ecuaciones de movimiento

Como indicamos anteriormente a partir de $u_g(t)$ la estructura podrá adquirir desplazamientos relativos de nivel ver fig. II. 14, de esa manera a cada desplazamiento relativo habrá que sumarle $u_g(t)$ para hallar el desplazamiento total entonces:

$$\begin{pmatrix} u_0^i(t) \\ u_1^i(t) \\ u_2^i(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_0(t) \\ u_1(t) \\ u_2(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} u_g(t) \\ u_g(t) \\ u_g(t) \end{pmatrix}$$

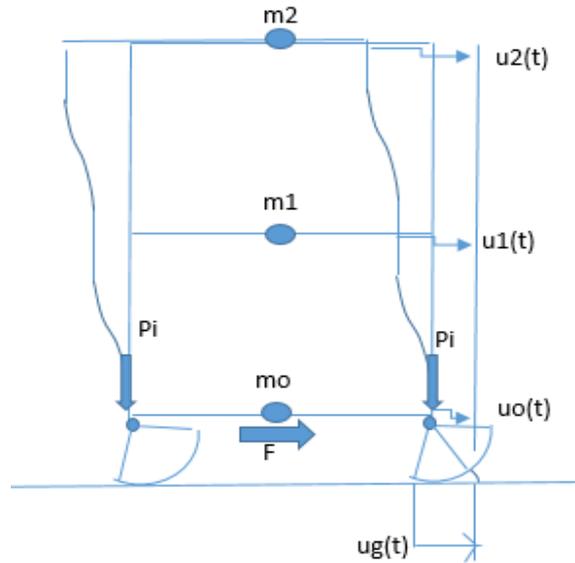


Figura II 14 Sistema de tres grados de libertad (2 niveles)

Por lo tanto, las fuerzas inerciales tendrán la forma:

$$FI = \begin{pmatrix} m_0 & 0 & 0 \\ 0 & m_1 & 0 \\ 0 & 0 & m_2 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} \ddot{u}_0^i(t) \\ \ddot{u}_1^i(t) \\ \ddot{u}_2^i(t) \end{pmatrix}$$

Es necesario precisar que "Las fuerzas sísmicas son fuerzas de inercia producidas por el hecho que los niveles tienen masas sujetas a aceleraciones."²⁴

Desarrollando los desplazamientos totales

²⁴ San Bartolomé, A. 1999 Análisis de Edificios. Segunda Edición. Lima: Editorial de la Pontificia Universidad Católica del Perú, 239 p. ISBN 9972-42-112-0

$$FI = \begin{pmatrix} m_0 & 0 & 0 \\ 0 & m_1 & 0 \\ 0 & 0 & m_2 \end{pmatrix} * \left(\begin{pmatrix} \ddot{u}_0(t) \\ \ddot{u}_1(t) \\ \ddot{u}_2(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \ddot{u}_g(t) \\ \ddot{u}_g(t) \\ \ddot{u}_g(t) \end{pmatrix} \right)$$

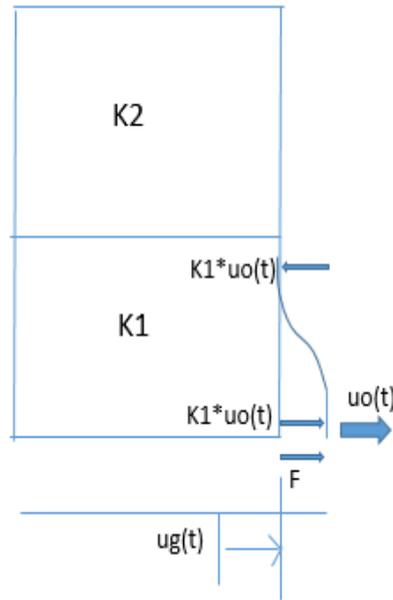


Figura II 15 a

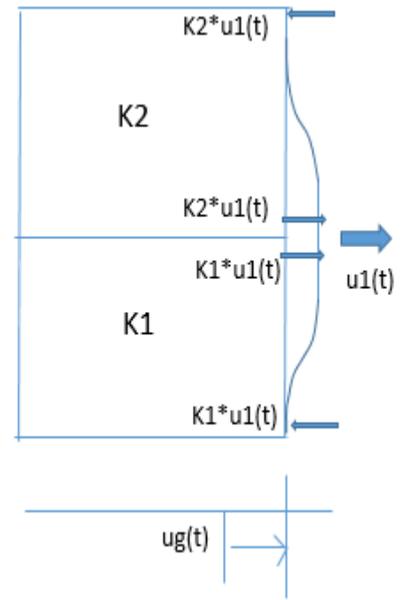


Figura II 15 b

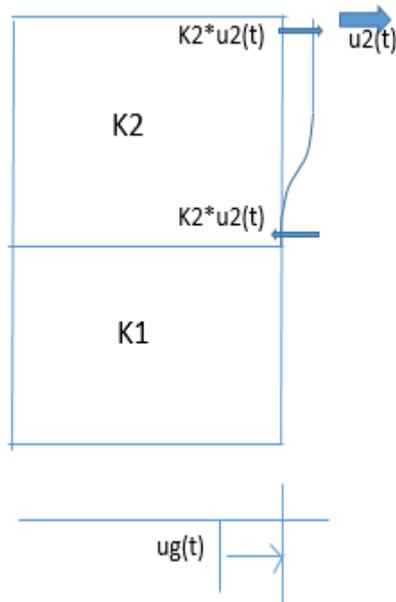


Figura II 15 c

Las fuerzas elásticas (ver *Figura II. 15 a, 15 b, 15 c*) generadas serán FS

$$FS = \begin{pmatrix} k_1 * u_0(t) - F & -k_1 * u_1(t) & 0 \\ -k_1 * u_0(t) & (k_1 + k_2) * u_1(t) & -k_2 * u_2(t) \\ 0 & -k_2 * u_1(t) & k_2 * u_2(t) \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Sin considerar el amortiguamiento la suma de las fuerzas elásticas y fuerzas inerciales deben ser cero pues no hay fuerzas externas dinámicas aplicadas a ningún nivel por lo que:

$$FI + FS = 0$$

$$\begin{pmatrix} m_0 & 0 & 0 \\ 0 & m_1 & 0 \\ 0 & 0 & m_2 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} \ddot{u}_0(t) \\ \ddot{u}_1(t) \\ \ddot{u}_2(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \ddot{u}_g(t) \\ \ddot{u}_g(t) \\ \ddot{u}_g(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} k_1 * u_0(t) - F & -k_1 * u_1(t) & 0 \\ -k_1 * u_0(t) & (k_1 + k_2) * u_1(t) & -k_2 * u_2(t) \\ 0 & -k_2 * u_1(t) & k_2 * u_2(t) \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Ecuación 12

traspasando términos al otro lado de la igualdad se obtiene:

$$\begin{pmatrix} m_0 & 0 & 0 \\ 0 & m_1 & 0 \\ 0 & 0 & m_2 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} \ddot{u}_0(t) \\ \ddot{u}_1(t) \\ \ddot{u}_2(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} k_1 * u_0(t) - F & -k_1 * u_1(t) & 0 \\ -k_1 * u_0(t) & (k_1 + k_2) * u_1(t) & -k_2 * u_2(t) \\ 0 & -k_2 * u_1(t) & k_2 * u_2(t) \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} m_0 & 0 & 0 \\ 0 & m_1 & 0 \\ 0 & 0 & m_2 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} * \ddot{u}_g(t)$$

Ecuación 13

Donde, como se analizó anteriormente F está en función de u_B mediante una ecuación predeterminada f.

$$F = f(u_B)$$

$$F = f(-u_0)$$

De esta manera de la ecuación 4 se puede hallar Y en función de X

Por lo tanto:

$$F = \frac{P * (X + Y * \frac{dy}{dx} - \bar{r} * \frac{dy}{dx})}{\left(X * \frac{dy}{dx} - Y + \bar{r} \right)}$$

$$u_o = - \left(\int_0^x \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2} * dx - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2}} (X + (Y - \bar{r}) * \left(\frac{dy}{dx} \right)) \right)$$

F y uo están en función de X, y este valor en función del tiempo

De esta manera en la ecuación 12 hay 3 ecuaciones diferenciales con 3 incógnita X(t), u1(t), u2(t) Con las condiciones de frontera que todos son cero en el tiempo t=0.

Si se toma los desplazamientos desde un marco referencial como el punto de apoyo en rotula de las fuerzas P (base de la estructura) habrá dos desplazamientos relativos $u_1(t)$ y $u_2(t)$

$$\begin{pmatrix} u_0(t) \\ u_1(t) \\ u_2(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_0(t) \\ u_0(t) \\ u_0(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ u_1(t) \\ u_2(t) \end{pmatrix}$$

Los desplazamientos totales por nivel serán

$$\begin{pmatrix} u'_0(t) \\ u'_1(t) \\ u'_2(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} ug(t) \\ ug(t) \\ ug(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} u_0(t) \\ u_0(t) \\ u_0(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ u_1(t) \\ u_2(t) \end{pmatrix}$$

De la ecuación 11

$$\begin{pmatrix} m_0 & 0 & 0 \\ 0 & m_1 & 0 \\ 0 & 0 & m_2 \end{pmatrix} * \left(\begin{pmatrix} \ddot{u}_0(t) \\ \ddot{u}_1(t) \\ \ddot{u}_2(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \ddot{u}g(t) \\ \ddot{u}g(t) \\ \ddot{u}g(t) \end{pmatrix} \right) + \begin{pmatrix} k_1 * u_0(t) & -k_1 * u_1(t) & 0 \\ -k_1 * u_0(t) & (k_1 + k_2) * u_1(t) & -k_2 * u_2(t) \\ 0 & -k_2 * u_1(t) & k_2 * u_2(t) \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

reemplazando valores

$$\begin{pmatrix} m_0 & 0 & 0 \\ 0 & m_1 & 0 \\ 0 & 0 & m_2 \end{pmatrix} * \left(\begin{pmatrix} \ddot{u}g(t) \\ \ddot{u}g(t) \\ \ddot{u}g(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \ddot{u}_0(t) \\ \ddot{u}_0(t) \\ \ddot{u}_0(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ \ddot{u}_1(t) \\ \ddot{u}_2(t) \end{pmatrix} \right) + \begin{pmatrix} k_1 & -k_1 & 0 \\ -k_1 & (k_1 + k_2) & -k_2 \\ 0 & -k_2 & k_2 \end{pmatrix} * \left(\begin{pmatrix} u_0(t) \\ u_0(t) \\ u_0(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ u_1(t) \\ u_2(t) \end{pmatrix} \right) = \begin{pmatrix} F \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Ecuación 14

Sumando las tres ecuaciones se obtiene

$$m_0 * (\ddot{u}g(t) + \ddot{u}_0(t)) + m_1 * (\ddot{u}g(t) + \ddot{u}_0(t) + \ddot{u}_1(t)) + m_2 * (\ddot{u}g(t) + \ddot{u}_0(t) + \ddot{u}_2(t)) = F$$

Agrupando de manera conveniente se obtiene la segunda ley de newton

$$m_0 * \ddot{u}_0'(t) + m_1 * \ddot{u}_1'(t) + m_2 * \ddot{u}_2'(t) = F$$

Por otro lado podemos agrupar

$$(m_0 + m_1 + m_2) * \ddot{u}g(t) + \begin{pmatrix} m_0 & m_1 & m_2 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} \ddot{u}_0(t) \\ \ddot{u}_1(t) \\ \ddot{u}_2(t) \end{pmatrix} = F \dots \text{Ecuación 15}$$

Tomando las dos últimas ecuaciones del sistema ecuaciones diferenciales 13

$$\begin{pmatrix} 0 & m_1 & 0 \\ 0 & 0 & m_2 \end{pmatrix} * \left(\begin{pmatrix} \ddot{u}g(t) \\ \ddot{u}g(t) \\ \ddot{u}g(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \ddot{u}_0(t) \\ \ddot{u}_0(t) \\ \ddot{u}_0(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ \ddot{u}_1(t) \\ \ddot{u}_2(t) \end{pmatrix} \right) + \begin{pmatrix} -k_1 & (k_1 + k_2) & -k_2 \\ 0 & -k_2 & k_2 \end{pmatrix} * \left(\begin{pmatrix} u_0(t) \\ u_0(t) \\ u_0(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ u_1(t) \\ u_2(t) \end{pmatrix} \right) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Agrupando las fuerzas inerciales se tiene

$$\begin{pmatrix} m_1 \\ m_2 \end{pmatrix} * \ddot{u}g(t) + \begin{pmatrix} m_1 & m_1 & 0 \\ m_2 & 0 & m_2 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} \ddot{u}_0(t) \\ \ddot{u}_1(t) \\ \ddot{u}_2(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -k_1 & (k_1 + k_2) & -k_2 \\ 0 & -k_2 & k_2 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} u_0(t) \\ u_0(t) \\ u_0(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -k_1 & (k_1 + k_2) & -k_2 \\ 0 & -k_2 & k_2 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 0 \\ u_1(t) \\ u_2(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

pero

$$\begin{pmatrix} -k_1 & (k_1 + k_2) & -k_2 \\ 0 & -k_2 & k_2 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} u_0(t) \\ u_0(t) \\ u_0(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} -k_1 & (k_1 + k_2) & -k_2 \\ 0 & -k_2 & k_2 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 0 \\ u_1'(t) \\ u_2'(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & (k_1 + k_2) & -k_2 \\ 0 & -k_2 & k_2 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} u_0(t) \\ u_1'(t) \\ u_2'(t) \end{pmatrix}$$

Por lo que

$$\begin{pmatrix} m_1 \\ m_2 \end{pmatrix} * \ddot{u}g(t) + \begin{pmatrix} m_1 & m_1 & 0 \\ m_2 & 0 & m_2 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} \ddot{u}_0(t) \\ \ddot{u}_1(t) \\ \ddot{u}_2(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & (k_1 + k_2) & -k_2 \\ 0 & -k_2 & k_2 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} u_0(t) \\ u_1(t) \\ u_2(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Ecuación 16

De las ecuaciones 14 y 15 se concluye

$$\begin{pmatrix} m_0 + m_1 + m_2 \\ m_1 \\ m_2 \end{pmatrix} * \ddot{u}g(t) + \begin{pmatrix} m_0 + m_1 + m_2 & m_1 & m_2 \\ m_1 & m_1 & 0 \\ m_2 & 0 & m_2 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} \ddot{u}_0(t) \\ \ddot{u}_1(t) \\ \ddot{u}_2(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & (k_1 + k_2) & -k_2 \\ 0 & -k_2 & k_2 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} u_0(t) \\ u_1(t) \\ u_2(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Pasando términos al otro lado de la igualdad de tiene

$$\begin{pmatrix} m_0 + m_1 + m_2 & m_1 & m_2 \\ m_1 & m_1 & 0 \\ m_2 & 0 & m_2 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} \ddot{u}_0(t) \\ \ddot{u}_1(t) \\ \ddot{u}_2(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & (k_1 + k_2) & -k_2 \\ 0 & -k_2 & k_2 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} u_0(t) \\ u_1(t) \\ u_2(t) \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} m_0 + m_1 + m_2 \\ m_1 \\ m_2 \end{pmatrix} * \ddot{u}g(t) + \begin{pmatrix} F \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Ecuación 17

En caso que F y uB sean directamente proporcionales

$$\frac{F}{u_B} = K_0$$

$$F = K_0 * u_B = K_0 * -u_0$$

Reemplazando en la ecuación 16

$$\begin{pmatrix} m_0 + m_1 + m_2 & m_1 & m_2 \\ m_1 & m_1 & 0 \\ m_2 & 0 & m_2 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} \ddot{u}_0(t) \\ \ddot{u}_1(t) \\ \ddot{u}_2(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} k_0 & 0 & 0 \\ 0 & (k_1 + k_2) & -k_2 \\ 0 & -k_2 & k_2 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} u_0(t) \\ u_1(t) \\ u_2(t) \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} m_0 + m_1 + m_2 \\ m_1 \\ m_2 \end{pmatrix} * \ddot{u}_g(t)$$

Ecuación 18

Nuevamente tomando las dos últimas ecuaciones del sistema ecuaciones diferenciales 13

$$\begin{pmatrix} 0 & m_1 & 0 \\ 0 & 0 & m_2 \end{pmatrix} * \left(\begin{pmatrix} \ddot{u}_g(t) \\ \ddot{u}_g(t) \\ \ddot{u}_g(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \ddot{u}_0(t) \\ \ddot{u}_0(t) \\ \ddot{u}_0(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ \ddot{u}_1(t) \\ \ddot{u}_2(t) \end{pmatrix} \right) + \begin{pmatrix} -k_1 & (k_1 + k_2) & -k_2 \\ 0 & -k_2 & k_2 \end{pmatrix} * \left(\begin{pmatrix} u_0(t) \\ u_0(t) \\ u_0(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ u_1(t) \\ u_2(t) \end{pmatrix} \right) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 0 & m_1 & 0 \\ 0 & 0 & m_2 \end{pmatrix} * \left(\begin{pmatrix} \ddot{u}_g(t) \\ \ddot{u}_g(t) \\ \ddot{u}_g(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \ddot{u}_0(t) \\ \ddot{u}_0(t) \\ \ddot{u}_0(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ \ddot{u}_1(t) \\ \ddot{u}_2(t) \end{pmatrix} \right) + \begin{pmatrix} -k_1 & (k_1 + k_2) & -k_2 \\ 0 & -k_2 & k_2 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} u_0(t) \\ u_0(t) \\ u_0(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -k_1 & (k_1 + k_2) & -k_2 \\ 0 & -k_2 & k_2 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 0 \\ u_1(t) \\ u_2(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

definiendo $u_{go}(t)$

$$\ddot{u}_g(t) + \ddot{u}_0(t) = \ddot{u}_{go}(t)$$

$$\begin{pmatrix} -k_1 & (k_1 + k_2) & -k_2 \\ 0 & -k_2 & k_2 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 0 \\ u_1(t) \\ u_2(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & (k_1 + k_2) & -k_2 \\ 0 & -k_2 & k_2 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 0 \\ u_1(t) \\ u_2(t) \end{pmatrix}$$

Reemplazando valores

$$\begin{pmatrix} 0 & m_1 & 0 \\ 0 & 0 & m_2 \end{pmatrix} * \left(\begin{pmatrix} \ddot{u}_{go}(t) \\ \ddot{u}_{go}(t) \\ \ddot{u}_{go}(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ \ddot{u}_1(t) \\ \ddot{u}_2(t) \end{pmatrix} \right) + \begin{pmatrix} 0 & (k_1 + k_2) & -k_2 \\ 0 & -k_2 & k_2 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 0 \\ u_1(t) \\ u_2(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Agrupando términos

$$\begin{pmatrix} m_1 \\ m_2 \end{pmatrix} * \ddot{u}_g(t) + \begin{pmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} \ddot{u}_1(t) \\ \ddot{u}_2(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} (k_1 + k_2) & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Se concluye que

$$\begin{pmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} \ddot{u}_1(t) \\ \ddot{u}_2(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} (k_1 + k_2) & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} m_1 \\ m_2 \end{pmatrix} * \ddot{u}_g(t) \dots\dots \text{Ecuación 19}$$

De la ecuación 13

$$\begin{pmatrix} m_0 & 0 & 0 \\ 0 & m_1 & 0 \\ 0 & 0 & m_2 \end{pmatrix} * \left(\begin{pmatrix} \ddot{u}_g(t) \\ \ddot{u}_g(t) \\ \ddot{u}_g(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \ddot{u}_0(t) \\ \ddot{u}_0(t) \\ \ddot{u}_0(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ \ddot{u}_1(t) \\ \ddot{u}_2(t) \end{pmatrix} \right) + \begin{pmatrix} k_1 & -k_1 & 0 \\ -k_1 & (k_1 + k_2) & -k_2 \\ 0 & -k_2 & k_2 \end{pmatrix} * \left(\begin{pmatrix} u_0(t) \\ u_0(t) \\ u_0(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ u_1(t) \\ u_2(t) \end{pmatrix} \right) = \begin{pmatrix} F \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} m_0 & 0 & 0 \\ 0 & m_1 & 0 \\ 0 & 0 & m_2 \end{pmatrix} * \left(\begin{pmatrix} \ddot{u}_g(t) \\ \ddot{u}_g(t) \\ \ddot{u}_g(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ \ddot{u}_1(t) \\ \ddot{u}_2(t) \end{pmatrix} \right) + \begin{pmatrix} k_1 & -k_1 & 0 \\ -k_1 & (k_1 + k_2) & -k_2 \\ 0 & -k_2 & k_2 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} u_0(t) \\ u_0(t) \\ u_0(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} k_1 & -k_1 & 0 \\ -k_1 & (k_1 + k_2) & -k_2 \\ 0 & -k_2 & k_2 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 0 \\ u_1(t) \\ u_2(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} m_0 \\ m_1 \\ m_2 \end{pmatrix} * \ddot{u}_g(t) + \begin{pmatrix} m_0 & 0 & 0 \\ 0 & m_1 & 0 \\ 0 & 0 & m_2 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 0 \\ \ddot{u}_1(t) \\ \ddot{u}_2(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} k_1 & -k_1 & 0 \\ -k_1 & (k_1 + k_2) & -k_2 \\ 0 & -k_2 & k_2 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 0 \\ u_1(t) \\ u_2(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Se concluye

$$\begin{pmatrix} m_0 & 0 & 0 \\ 0 & m_1 & 0 \\ 0 & 0 & m_2 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 0 \\ \ddot{u}_1(t) \\ \ddot{u}_2(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} k_1 & -k_1 & 0 \\ -k_1 & (k_1 + k_2) & -k_2 \\ 0 & -k_2 & k_2 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 0 \\ u_1(t) \\ u_2(t) \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} m_0 \\ m_1 \\ m_2 \end{pmatrix} * \ddot{u}_g(t) + \begin{pmatrix} F \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Ecuación 20

Aislador de base en rodamiento de doble superficie

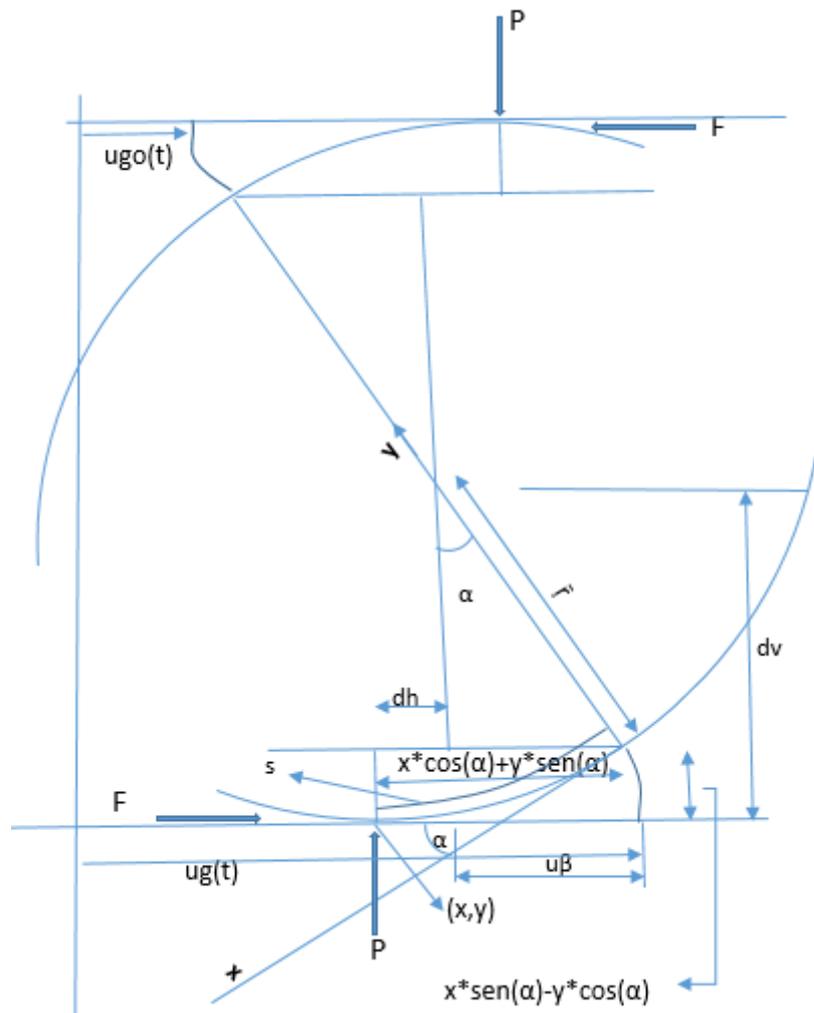


Figura II 16 Geometría y ubicación de fuerzas doble superficie

$$dh = (X * \cos(\alpha) + Y * \sin(\alpha) - \bar{r} * \sin(\alpha))$$

$$dv = (X * \sin(\alpha) - Y * \cos(\alpha) + \bar{r} * \cos(\alpha))$$

$$P * 2 * dh = F * 2 * dv$$

$$P * 2 * (X * \cos(\alpha) + Y * \sin(\alpha) - \bar{r} * \sin(\alpha)) = F * 2 * (X * \sin(\alpha) - Y * \cos(\alpha) + \bar{r} * \cos(\alpha))$$

$$F = \frac{(P * (X * \cos(\alpha) + Y * \sin(\alpha) - \bar{r} * \sin(\alpha)))}{(X * \sin(\alpha) - Y * \cos(\alpha) + \bar{r} * \cos(\alpha))} = \frac{(P * (X + Y * \tan(\alpha) - \bar{r} * \tan(\alpha)))}{(X * \tan(\alpha) - Y + \bar{r})}$$

$$F = \frac{P * (X + Y * \frac{dy}{dx} - \bar{r} * \frac{dy}{dx})}{\left(X * \frac{dy}{dx} - Y + \bar{r} \right)}$$

$$s = \int_0^x \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2} * dx$$

$$u_B = 2 * (s - dh) = 2 * \left(\int_0^x \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2} * dx - (X * \cos(\infty) + Y * \sin(\infty) - \bar{r} * \sin(\infty)) \right)$$

$$u_B = 2 * \left(\int_0^x \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2} * dx - \cos(\infty) (X + (Y - \bar{r}) * \tan(\infty)) \right)$$

$$u_B = 2 * \left(\int_0^x \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2} * dx - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2}} (X + (Y - \bar{r}) * \left(\frac{dy}{dx} \right)) \right) \text{ Ecuación 21}$$

2.5 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO.

Se considerará una estructura dual de 5 niveles para una vivienda multifamiliar el perímetro del área a tratar será de 30 ml en su longitud mayor y de 22 ml en su longitud menor, consta de 2 áreas destinadas para construcción de escaleras (estas cuentan con propias placas y se encuentran aisladas estructuralmente de la edificación).

La primera planta tendrá una altura 4m y las cuatro plantas subsiguientes una altura de 2.7m haciendo una altura total de 14.8m

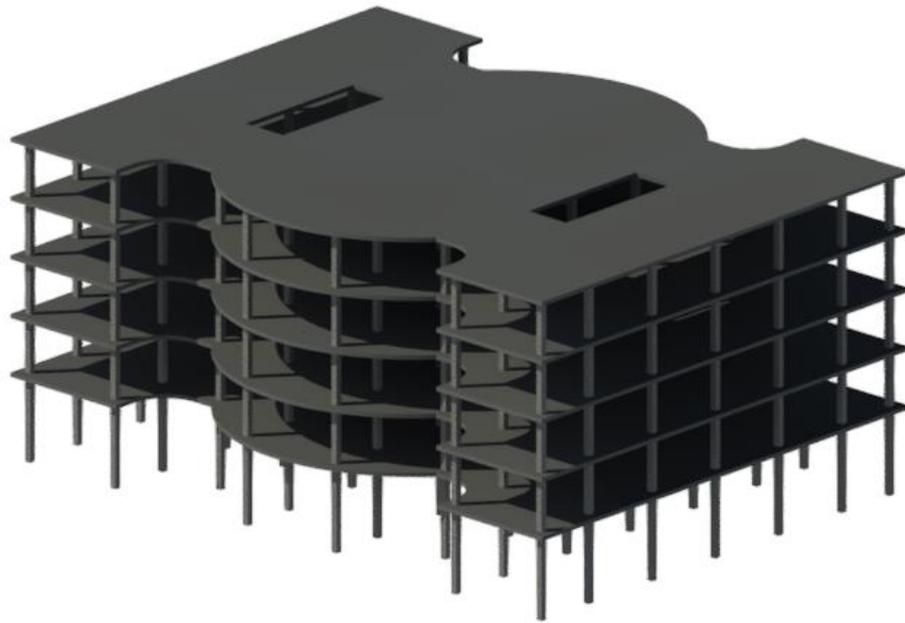


Figura II 17 Edificación dual de 5 niveles

se aplicarán las siguientes normas

-Norma E.020 Cargas. - Está norma trata acerca de las cargas empleadas en el diseño de la edificación. En donde estas deben tener como principal consideración que las combinaciones de cargas no deben causar esfuerzos ni deformaciones que excedan la capacidad de los materiales estructurales descritos en la norma.

-Norma E.030 Diseño Sismo resistente. - Esta Norma establece las condiciones mínimas para que las edificaciones diseñadas según sus requerimientos tengan un comportamiento sísmico acorde a la filosofía del diseño sismo resistente, esta consiste en:

- Evitar pérdidas de vidas
- Asegurar la continuidad de los servicios básicos
- Minimizar los daños a la propiedad.

2.6 ESTRUCTURACIÓN Y PREDIMENSIONAMIENTO

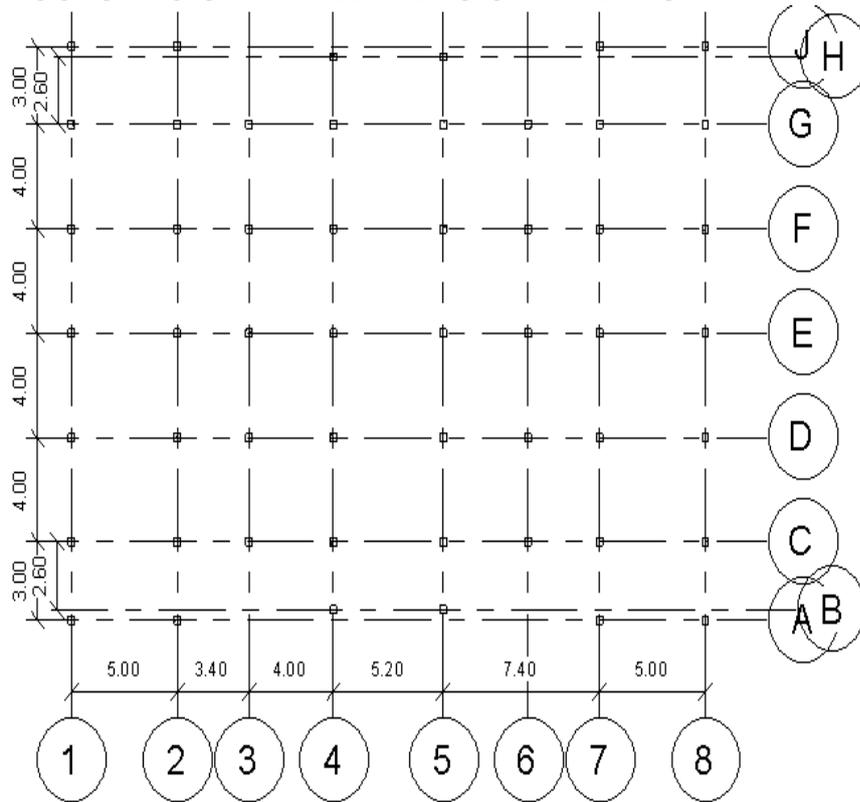


Figura II 18

2.6.1 PREDIMENSIONAMIENTO DE ELEMENTOS PRINCIPALES

Pre dimensionamiento de Losa Aligerada

El tipo de losa que se utilizará en el proyecto es una losa aligerada en sentido unidireccional.

Según el criterio del libro de Antonio Blanco Blasco – Estructuración y Diseño de Edificaciones de Concreto Armado, para luces comprendidas entre 3 y 5.20 m, se observa que la losa de mayor área es de 4 x 5 m² tomando Ln como la menor longitud (dirección de las viguetas).

$$H = L_n / 25 = 400 / 25 = 16 \text{ cm}$$

se utilizará un espesor de losa de 20 cm. Teniendo en cuenta este criterio, la losa aligerada en ambos sectores tendrá un espesor de 20 cm.

PREDIMENSIONAMIENTO DE COLUMNAS

Para el predimensionamiento, se aplicará la siguiente fórmula dependiendo del tipo de columna.

Columnas centradas

$$A_{col} = \frac{P \times A \times N}{0.45f'_c}$$

Columnas excéntricas y esquinadas:

$$A_{col} = \frac{P \times A \times N}{0.35f'_c}$$

Dónde: P es una carga supuesta de 1000 kg/cm² pues se trata de una edificación de categoría C, A es el área tributaria (según ubicación de la columna) ver la figura de áreas tributarias, f'_c = 210 kg/cm² y N es el número de pisos (5 pisos en este caso).

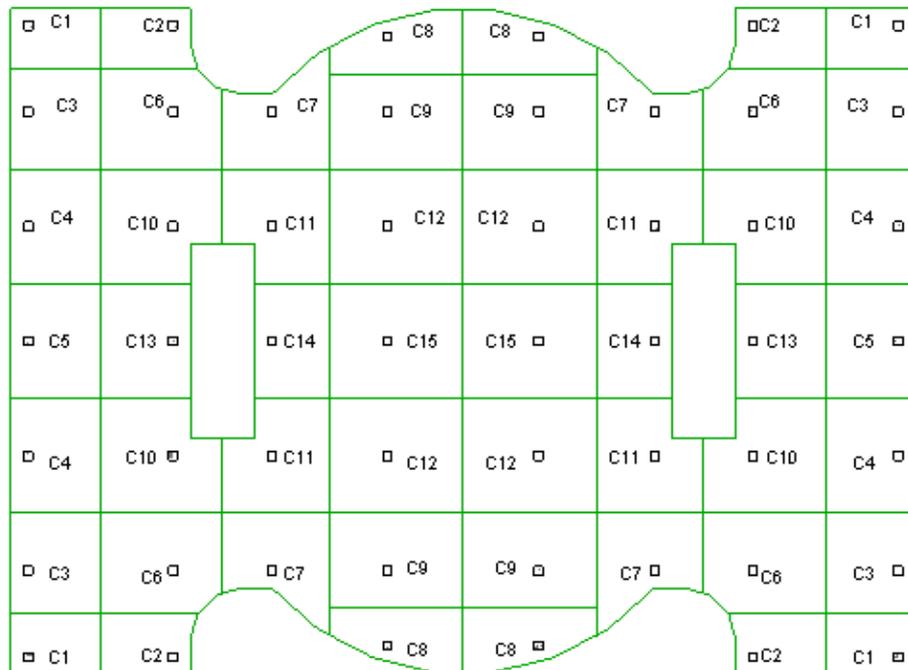


Figura II 19 Seccionamiento por áreas tributarias

Tabla Ila 3 Pre dimensionamiento de Columnas

Tipo	Área Trib. (m ²)	Peso (Kg/m ²)	N° pisos	P(servicio)	f _c (Kg/m ²)	Coef. tipo de columna
C1	6.51	1000	5	32550	210	0.35
C2	6.58	1000	5	32900	210	0.35
C3	10.85	1000	5	54250	210	0.35
C4	12.4	1000	5	62000	210	0.35
C5	12.4	1000	5	62000	210	0.35
C6	14.3	1000	5	71500	210	0.35
C7	11.52	1000	5	57600	210	0.35
C8	8.62	1000	5	43100	210	0.35
C9	15.2	1000	5	76000	210	0.35
C10	15.26	1000	5	76300	210	0.45
C11	13.26	1000	5	66300	210	0.45
C12	18.4	1000	5	92000	210	0.45
C13	12.4	1000	5	62000	210	0.45
C14	10.4	1000	5	52000	210	0.45
C15	18.4	1000	5	92000	210	0.45

Tipo	Área de columna (cm ²)	a (cm)	Sección (cm)
C1	442.86	21.04	25X30
C2	447.62	21.16	25X30
C3	738.10	27.17	25X40
C4	843.54	29.04	25X40
C5	843.54	29.04	25X40
C6	972.79	31.19	P1
C7	783.67	27.99	P1-P2
C8	586.39	24.22	Ø 30
C9	1034.01	32.16	Ø 40
C10	807.41	28.41	P1-P2
C11	701.59	26.49	30X40
C12	973.54	31.20	30X40
C13	656.08	25.61	30X40
C14	550.26	23.46	30X40
C15	973.54	31.20	30X40

Predimensionamiento de Vigas horizontales (eje x) y verticales (eje y)

Para el pre dimensionamiento de vigas, se tendrá en cuenta el criterio del libro de Antonio Blanco Blasco – Estructuración y Diseño de Edificaciones de Concreto Armado, el cual consiste en la siguiente fórmula:

$$h = \frac{L}{12}, B = \frac{h}{2}$$

h = peralte de la viga, L = Longitud de la viga, b = base de la viga

Tabla Ila 4 Pre dimensionamiento de Vigas

ubicación	Longitud de vigas representativas m	L/12	Peralte cm	Base cm
dirección x	5.2	43.3	50	25
dirección y	4	33.3	40	25

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos, la edificación contará con tres tipos de vigas:

Viga 1: 25x40 ejes 1,2,3,4,5,6,7,8

Viga 2: 25x50 ejes A, J

Viga 3: 30x50 ejes B, C, D, E, F, G, H

Las vigas deben tener una base mínima de 25 cm – diseño sismo resistente.

2.6.2 PARÁMETROS DEL ANÁLISIS SÍSMICO

Existen diferentes parámetros utilizados para realizar el análisis dinámico de la estructura, entre ellos tenemos:

Factor de zona

El territorio peruano se encuentra dividido en tres zonas sísmicas (Ver fig. II 20), cada zona tiene un factor diferente (Ver Tabla Ila 5)



Figura II 20 Fuente norma E-0.30

Tabla Ila 5 Factor de zona, fuente Norma E.030

ZONA	Z
4	0,45
3	0,35
2	0,25
1	0,10

En nuestro caso, el edificio de vivienda se encuentra ubicado en el departamento de Arequipa por lo que el factor de zona será 0.35

Condiciones geotécnicas

El suelo está conformado por arena media a fina con presencia de limo y no presenta nivel freático ver Anexo 04, se trata de un suelo flexible (suelo blando) por lo que corresponde a un perfil de suelo S3 conforme a la Norma E.030

Tabla Ila 6 Parámetros del suelo según la Norma E.030.

Tabla Ila 6 Factor de suelo "s" fuente Norma E.030

SUELO ZONA	S ₀	S ₁	S ₂	S ₃
	Z ₄	0,80	1,00	1,05
Z ₃	0,80	1,00	1,15	1,20
Z ₂	0,80	1,00	1,20	1,40
Z ₁	0,80	1,00	1,60	2,00

PERIODOS DEL SUELO TP TL

Tabla Ila 7 Periodos T_p y T_L fuente Norma E.030

PERÍODOS "T _P " Y "T _L "				
	Perfil de suelo			
	S ₀	S ₁	S ₂	S ₃
T _P (s)	0,3	0,4	0,6	1,0
T _L (s)	3,0	2,5	2,0	1,6

De acuerdo a la Tabla Ila 7 para un perfil de suelo S3 los valores T_p y T_L

$T_p = 1 \text{ s}$

$T_L = 1.6 \text{ s}$

Factor de amplificación sísmica (C)

Se define como la respuesta de la estructura ante la aceleración en su cimentación, esta amplificación depende de cada estructura en función del período fundamental de vibración T.

Se tabularon valores T – C para así conseguir el espectro de diseño, utilizando la siguiente fórmula:

$$\begin{aligned}
 T < T_p & \quad C = 2,5 \\
 T_p < T < T_L & \quad C = 2,5 \cdot T_p/T \\
 T > T_L & \quad C = 2,5 \cdot T_p \cdot T_L/T^2
 \end{aligned}$$

Tabla Ila 8 Coeficiente de amplificación

T	C	T	C	T	C
0	2.500	1.45	1.724	2.9	0.476
0.05	2.500	1.5	1.665	2.95	0.460
0.1	2.500	1.55	1.613	3	0.444
0.15	2.500	1.6	1.563	3.05	0.429
0.2	2.500	1.65	1.469	3.1	0.415
0.25	2.500	1.7	1.384	3.15	0.404
0.3	2.500	1.75	1.306	3.2	0.390
0.35	2.500	1.8	1.234	3.25	0.378
0.4	2.500	1.85	1.168	3.3	0.367
0.45	2.500	1.9	1.108	3.35	0.357
0.5	2.500	1.95	1.052	3.4	0.345
0.55	2.500	2	1.000	3.45	0.336
0.6	2.500	2.05	0.951	3.5	0.326
0.65	2.500	2.1	0.906	3.55	0.316
0.7	2.500	2.15	0.866	3.6	0.309
0.75	2.500	2.2	0.827	3.65	0.301
0.8	2.500	2.25	0.790	3.7	0.291
0.85	2.500	2.3	0.755	3.75	0.283

0.9	2.500	2.35	0.724	3.8	0.278
0.95	2.500	2.4	0.695	3.85	0.270
1	2.500	2.45	0.666	3.9	0.262
1.05	2.380	2.5	0.641	3.95	0.256
1.1	2.273	2.55	0.615	4	0.250
1.15	2.174	2.6	0.592	4.05	0.245
1.2	2.083	2.65	0.569	4.1	0.239
1.25	1.999	2.7	0.549	4.15	0.233
1.3	1.922	2.75	0.528	4.2	0.227
1.35	1.852	2.8	0.510	4.25	0.221
1.4	1.786	2.85	0.493	4.3	0.215

Factor de uso (U)

C Edificaciones Comunes	Edificaciones comunes tales como: viviendas, oficinas, hoteles, restaurantes, depósitos e instalaciones industriales cuya falla no acarree peligros adicionales de incendios o fugas de contaminantes.	1,0
-------------------------------	--	-----

Figura II 21 Fuente norma E-0.30

La estructura al ser un edificio de oficinas pertenece a la categoría «C» - edificaciones comunes, por lo que tendrá un factor de uso e importancia «U» de 1.0 (Ver Figura II. 21)

Coeficiente de reducción (R)

SISTEMAS ESTRUCTURALES	
Sistema Estructural	Coeficiente Básico de Reducción R_0 (*)
Acero:	
Pórticos Especiales Resistentes a Momentos (SMF)	8
Pórticos Intermedios Resistentes a Momentos (IMF)	7
Pórticos Ordinarios Resistentes a Momentos (OMF)	6
Pórticos Especiales Concéntricamente Arriostrados (SCBF)	8 6
Pórticos Ordinarios Concéntricamente Arriostrados (OCBF)	8
Pórticos Excéntricamente Arriostrados (EBF)	
Concreto Armado:	
Pórticos	8
Dual	7
De muros estructurales	6
Muros de ductilidad limitada	4
Albañilería Armada o Confinada.	3
Madera (Por esfuerzos admisibles)	7

Figura II 22 Coeficiente de reducción básica R_0 , fuente Norma E0.30

El coeficiente de reducción se obtiene a través de la Figura II 22, donde su valor depende del sistema estructural utilizado. La estructura a evaluar, en las dos direcciones, utiliza el sistema estructural dual. Por lo que se obtendrá un $R_0 = 7$, $I_a = 1$, $I_p = 1$

$$R = R_0 \cdot I_a \cdot I_p$$

$$R = 7$$

Periodo fundamental de vibración (T)

El período fundamental de vibración para cada dirección se estimará con la siguiente expresión:

$$T = h_n / C_t$$

Donde:

$C_t = 60$ Para edificios albañilería y para todos los edificios de concreto armado duales.

$$T = 14.8 / 60 = 0.246 \text{ s}$$

Parámetros del análisis sísmico

$$h_n = 14.8$$

$$C_t = 60$$

$$T_L = 1$$

$$T_p = 1.6$$

$$Z = 0.35$$

$$U = 1$$

$$S = 1.2$$

$$R = 7$$

Donde

Z = Factor de zona

U = Factor de uso

S = Factor de suelo

C = Coeficiente de amplificación sísmica

R = Factor de reducción

Hn = Altura del edificio

Ct = coeficiente para estimar el periodo fundamental de un edificio

Tp= Periodo que define la plataforma de espectro para cada tipo de suelo

TL= Periodo inicio de desplazamiento constante

ACELERACION ESPECTRAL (Sa)

Para cada una de las direcciones horizontales analizadas se utilizará un espectro inelástico de pseudo-aceleraciones. se define como:

$$S_a = \frac{Z \cdot U \cdot C \cdot S}{R} \cdot g$$

Existe una diferencia importante entre el espectro de diseño y el espectro de respuesta, el primero define el estándar mientras que el segundo es el real "G.W. Housner jugó un papel decisivo en la gran aceptación del concepto del espectro de respuesta del sismo (iniciado por M. A. Biot en 1932) como un medio practico para caracterizar los

movimientos del terreno y sus efectos sobre las estructuras”²⁵

Reemplazando valores

$$s_a = 0.35 \times 1 \times C \times 1.2 \times 9.81 / 7 \text{ m/s}^2 = S_{ax} = S_{ay}$$

donde los valores de C coeficiente de amplificación se obtiene de la Tabla IIa 8

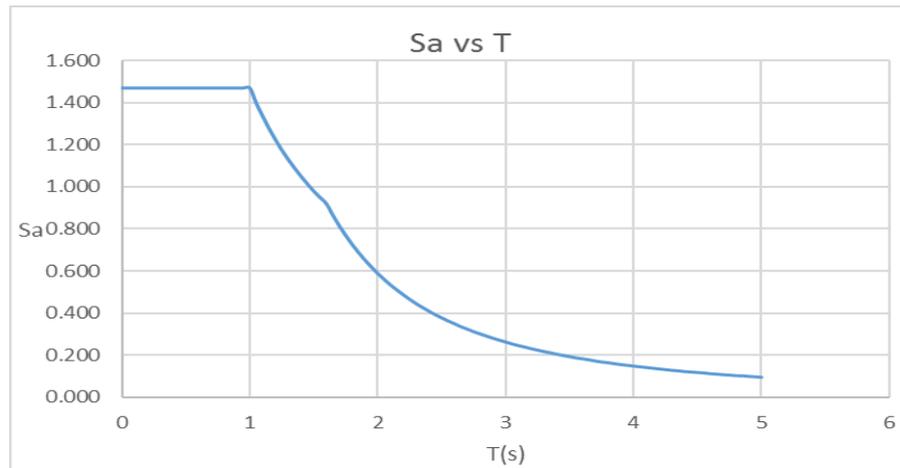


Figura II 23 seudo-aceleración (m/s²)

METRADO DE CARGAS

Para Columnas

Para realizar el metrado de cargas de cada columna por piso se tendrá las siguientes

Consideraciones:

La sobrecarga tendrá un valor de 200 kg/m² debido a que el edificio será para viviendas, además la sobrecarga para azotea será de 100 kg/m²

La carga mínima repartida equivalente a la tabiquería de entre piso será igual a 210 kg/m², y tabiquería de azotea será igual a 90 kg/m². Esta se obtuvo calculando el peso del tabique de unidades de albañilería huecas y luego ubicando la carga mínima repartida en la Tabla IIa 10

²⁵ Chopra, Anil K. 1995 Dynamics of structures; theory and applications to earthquake engineering. Tercera Edición. California: Editorial Prentice-Hall. Inc, 207 p. ISBN 0-13-855214-2.

Tabla Ila 9 Peso especifico

Materiales para Albañilería:	Peso (Kg/m3)
Unidades de albañilería sólidas	1800
Unidades de albañilería huecas	1350

Tabiquería de entrepiso

Peso específico	1400	Kg/m3 (Tabla V.7)
Altura del Tabique	2.5	m
espesor del tabique	0.15	m

Peso Tabique	525	kg/ml
--------------	-----	-------

Tabiquería de azotea

Peso específico	1400	Kg/m3 (Tabla V.7)
Altura del Tabique	1.1	m
espesor del tabique	0.15	m

Peso Tabique	231	kg/ml
--------------	-----	-------

Tabla Ila 10 Cargas Mínimas repartidas equivalentes a la de tabiquería

Peso del tabique (Kg/m)	Carga equivalente a ser añadida a la carga muerta (Kg/m ²)
74 o menos	30
75 a 149	60
150 a 249	90
250 a 399	150
400 a 549	210
550 a 699	270
700 a 849	330
850 a 1000	390

La losa aligerada tiene un espesor de 20 cm, por lo que su carga equivalente será 300 kg/cm². norma E-0.20 además se considerará los acabados como una carga permanente de 100 kg/cm²

Tabla Ila 11 Resumen de cargas

cuadro resumen de carga		entrepiso	azotea
Carga muerta (kg/m ²)	Losa	300	300
	Tabiquería	210	90
	Acabado	100	100
	TOTAL	610	490
carga viva (kg/m ²)	TOTAL	200	100

2.7 ANÁLISIS DINÁMICO MODAL BASE DE EMPOTRAMIENTO

Los materiales se definen desde el menú "Herramientas > Preferencias del Proyecto", eligiendo la opción "Materiales" y "Modificar", con lo cual se desplegará una nueva ventana con los espacios que se necesitan llenar para definir un material para el concreto.

$$f'c=210 \text{ kg/cm}^2$$

módulo de elasticidad del concreto

$$E_c = 15100(f'c)^{1/2}$$

$$E_c = 218819.9 \text{ kg/cm}^2$$

módulo de poisson del concreto

$$\nu = 0.2$$

módulo de corte concreto

$$G = E_c / 2 * (1 + \nu) = 91174.9 \text{ kg/cm}^2$$

luego se procede a hacer el modelamiento de la estructura aporticada las secciones de vigas y columnas pre dimensionadas, según las alturas y ejes en planta antes mencionado, teniendo presente que la que la losa se considera como diafragma rígido según norma E.030.

se ingresará 3 casos de carga

1 PERM, corresponde al metrado que el programa hace de manera automática solo de vigas y columnas (su masa esta ya considerada para el análisis sísmico)

2 CM, corresponde a la carga muerta del cuadro resumen de cargas en T/m² (su masa no está considerada, por lo tanto, se deberá hacer una conversión al 100% de la carga en masa para el análisis sísmico)

3 CV, corresponde a la carga viva del cuadro resumen de cargas en T/m² (Se deberá hacer una conversión al 25% de la carga en masa para el análisis sísmico).

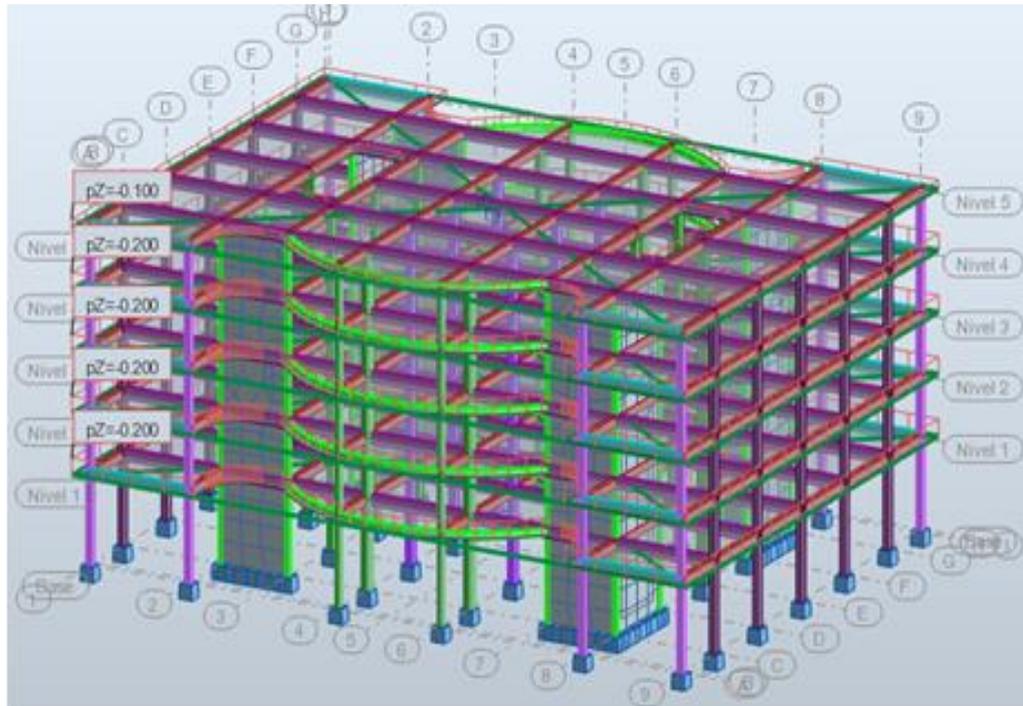


Figura II 24 caso 2 carga muerta

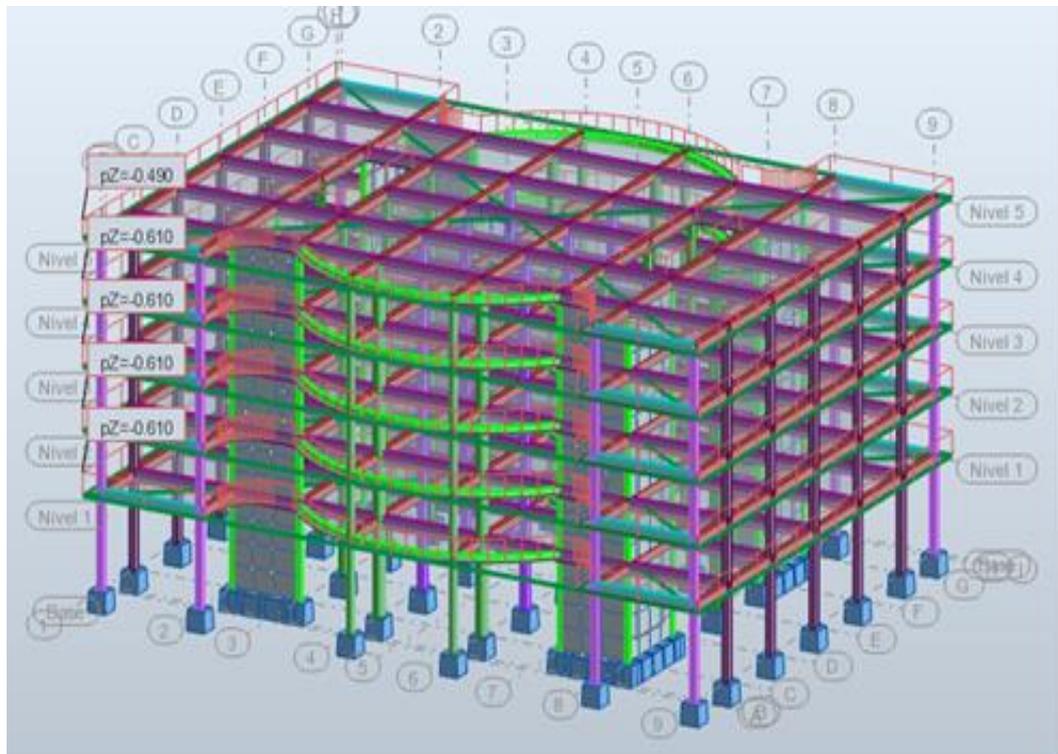


Figura II 25 caso 3 carga viva

definición de los apoyos de empotramiento del modelamiento sin uso de aisladores (cero grados de libertad).

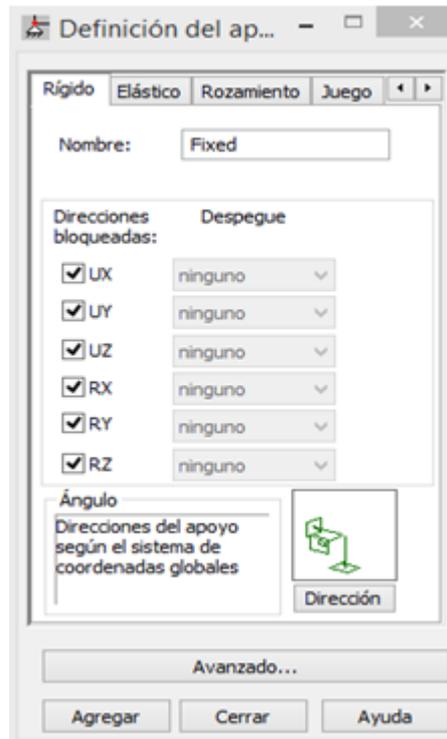


Figura II 26 Definición de los apoyos

Estimación del peso sísmico

El peso (P), se calculará adicionando a la carga permanente y total de la edificación un porcentaje de la carga viva o sobrecarga que se determinará de la siguiente manera:

- En edificaciones de las categorías A y B, se tomará el 50 % de la carga viva.
- En edificaciones de la categoría C, se tomará el 25 % de la carga viva.
- En depósitos, el 80 % del peso total que es posible almacenar.
- En azoteas y techos en general se tomará el 25 % de la carga viva.

-En estructuras de tanques, silos y estructuras similares se considerará el 100 % de la carga que puede contener.

por lo que se deberá convertir el caso 2 CM (carga muerta) en masa al 100%, además la norma nos pide para la categoría C que el caso 3 CV (carga viva) entre en un 25% como masa, de esta manera podrá ser afectado la CM y CV por las fuerzas laterales del sismo en los porcentajes antes mencionados.

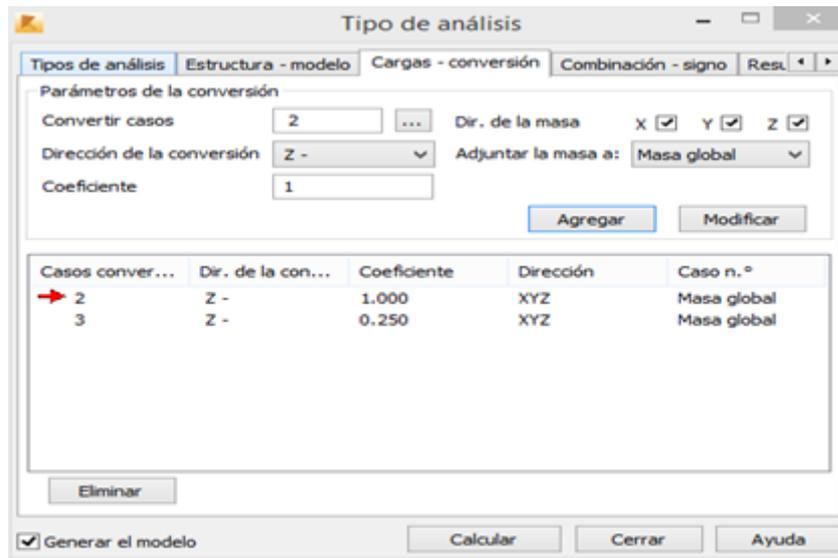


Figura II 27 Tipo de análisis

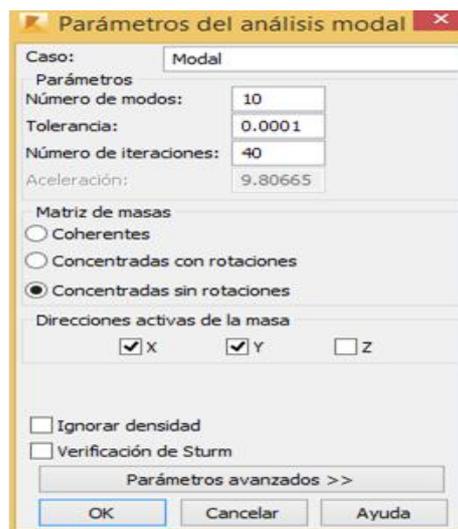


Figura II 28 parámetros del análisis modal

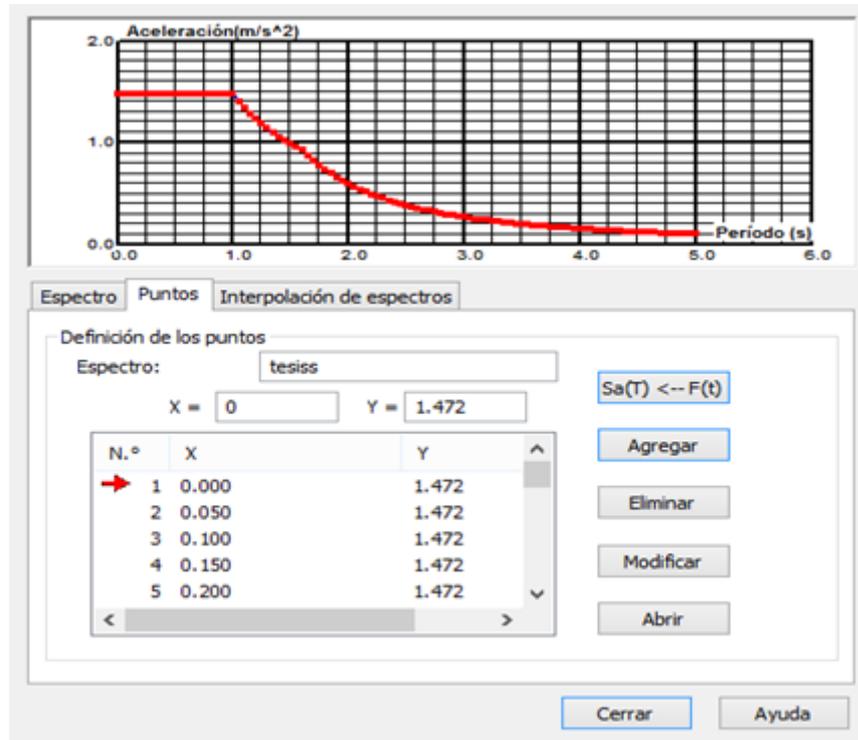


Figura II 29 definición de la aceleración espectral S_{ax} Say

se procede calcular

para la combinación modal se utilizará SRSS (raíz cuadrada de la suma de los cuadrados).

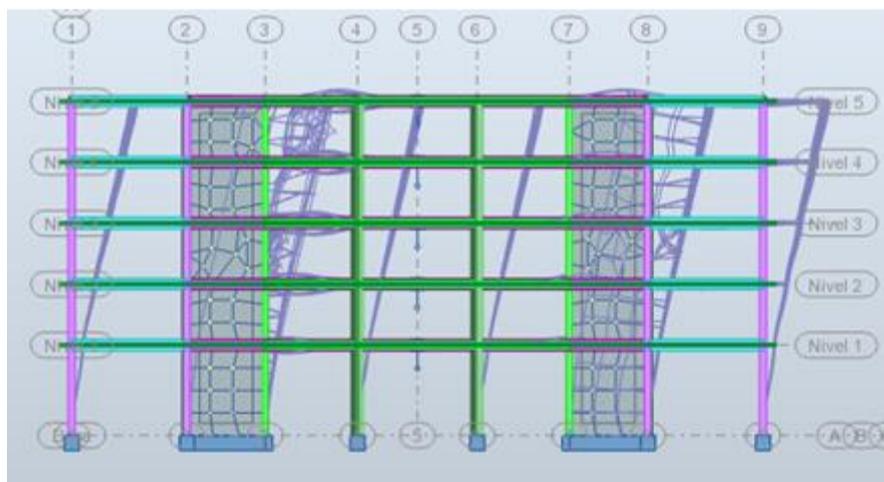


Figura II 30 desplazamientos del modelamiento en programa robot structural

Resultados en la dirección x

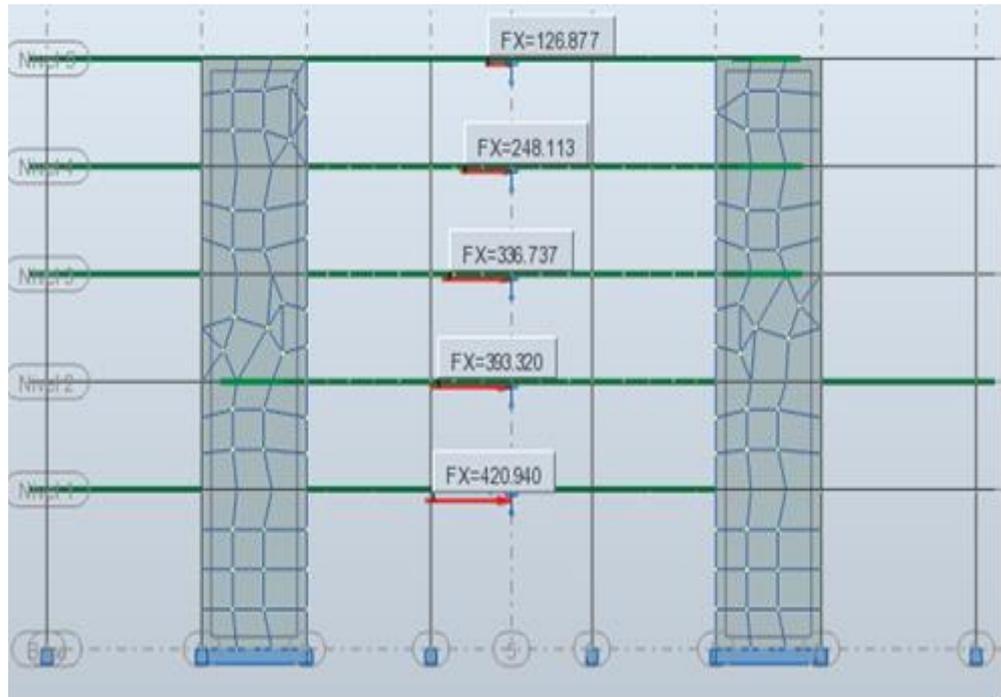


Figura II 31 Resultados fuerza cortante (x) por nivel en Toneladas

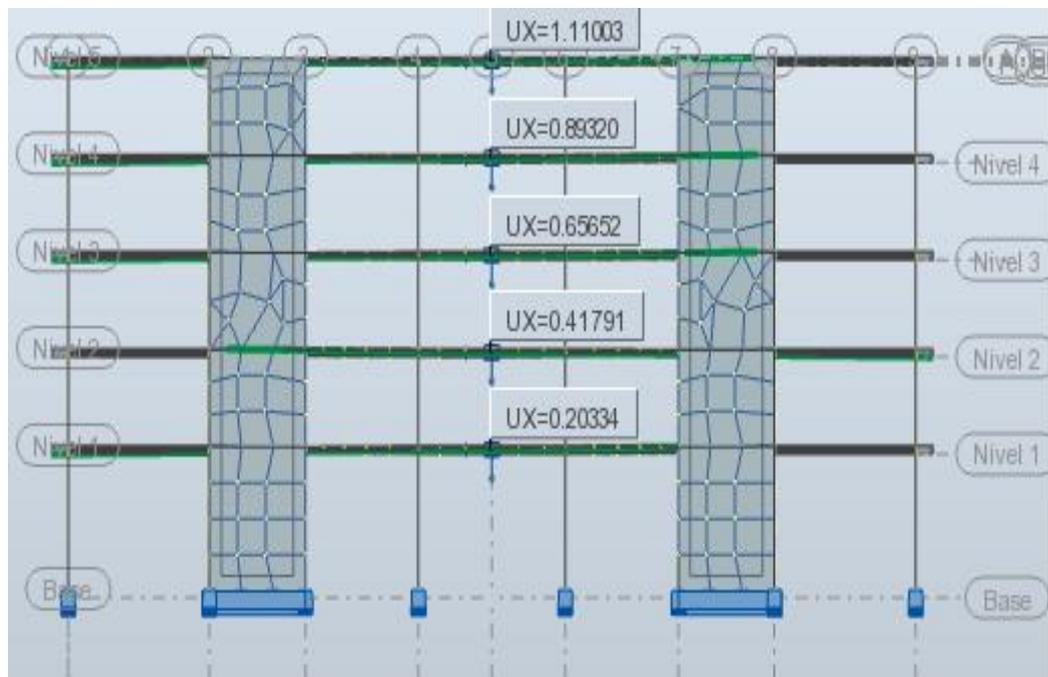


Figura II 32 desplazamientos laterales (x) por nivel en cm

Resultados en la dirección y

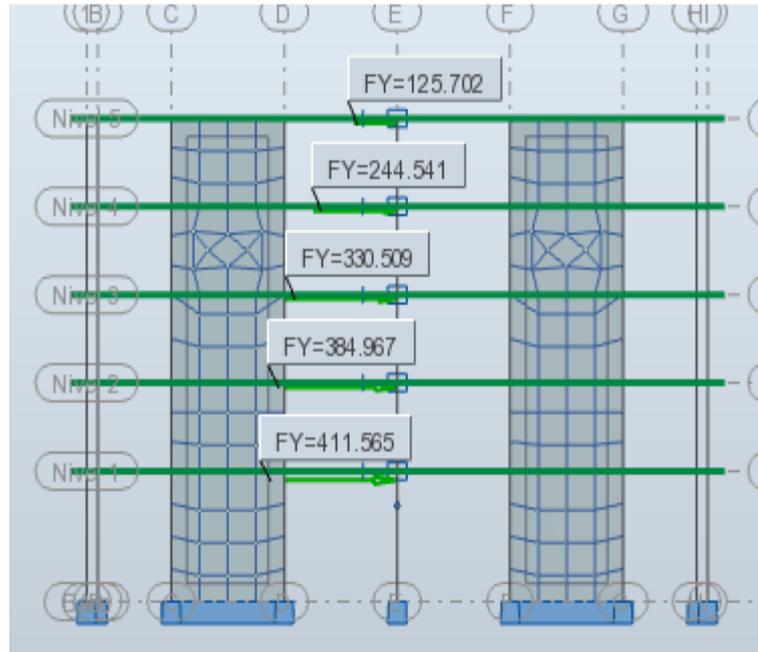


Figura II 33 Resultados fuerza cortante (y) por nivel en Toneladas

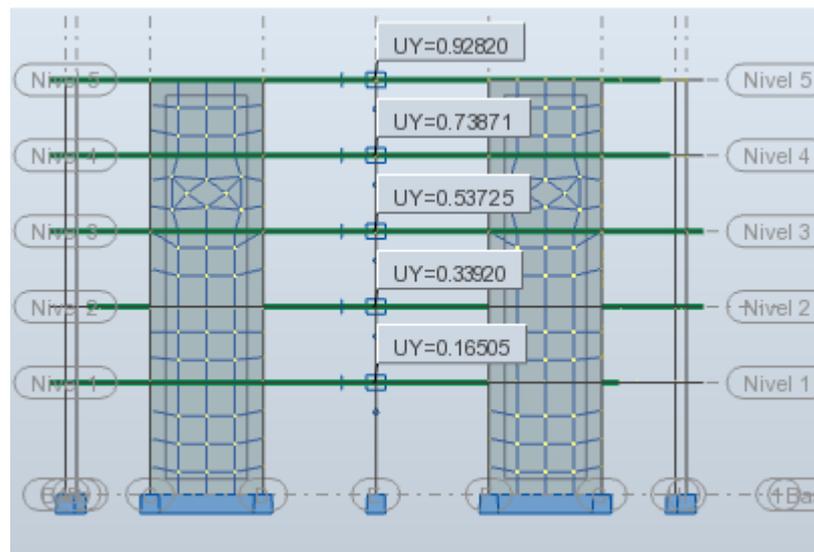


Figura II 34 desplazamientos laterales (y) por nivel en cm

Se debe comprobar que el máximo desplazamiento relativo de entrepiso no exceda el 0.007, ya que se trata de un edificio construido de concreto.

$$|Deriva(Piso p)| = \frac{Desplazamiento_{p+1} - Desplazamiento_p}{Altura de entrepiso} < 0.007$$

RESULTADOS DEL ANALISIS ANÁLISIS DINÁMICO MODAL BASE DE EMPOTRAMIENTO

Tabla Ila 12 Control de derivas en las direcciones x, y

ALTURA Hi (cm)	R (x,y)		Desplazamientos totales		desplazamiento lateral		desplazamiento relativo de entrepiso Di	
	Rx	Ry	Ux(cm)	Uy(cm)	0.75*Rx*U x	0.75*Ry*U y	Dr Ux	Dr Uy
400	7	7	0.20334	0.16505	1.06754	0.86651	1.0675 4	0.8665 1
270	7	7	0.41791	0.3392	2.19403	1.78080	1.1264 9	0.9142 9
270	7	7	0.65652	0.53725	3.44673	2.82056	1.2527 0	1.0397 6
270	7	7	0.8932	0.73871	4.68930	3.87823	1.2425 7	1.0576 7
270	7	7	1.11003	0.9282	5.82766	4.87305	1.1383 6	0.9948 2

derivadas Di/Hi		máx. deriva Norma E.030	control de derivas	
Deriva x	Deriva y	X,Y	X	Y
0.0027	0.0022	0.007	CUMPLE	CUMPLE
0.0042	0.0034	0.007	CUMPLE	CUMPLE
0.0046	0.0039	0.007	CUMPLE	CUMPLE
0.0046	0.0039	0.007	CUMPLE	CUMPLE
0.0042	0.0037	0.007	CUMPLE	CUMPLE

2.8 ANÁLISIS DINÁMICO MODAL BASE AISLADA

Se deberá considerar vigas de amarre en el nivel 0.5m de la estructura, unidos a los pedestales que servirán de superficie de apoyo de la estructura a los aisladores, que tendrá longitudes iguales en planta de 1.2m, las vigas de amarre serán de 30x60 cm² (longitudes sobredimensionadas de 25x50 cm² para minimizar los efectos de flexión por efecto de las fuerzas laterales originadas del sismo) unidos a una losa de 20cm de espesor, de esa manera se garantizara un comportamiento rígido de la losa al nivel 0.5m.

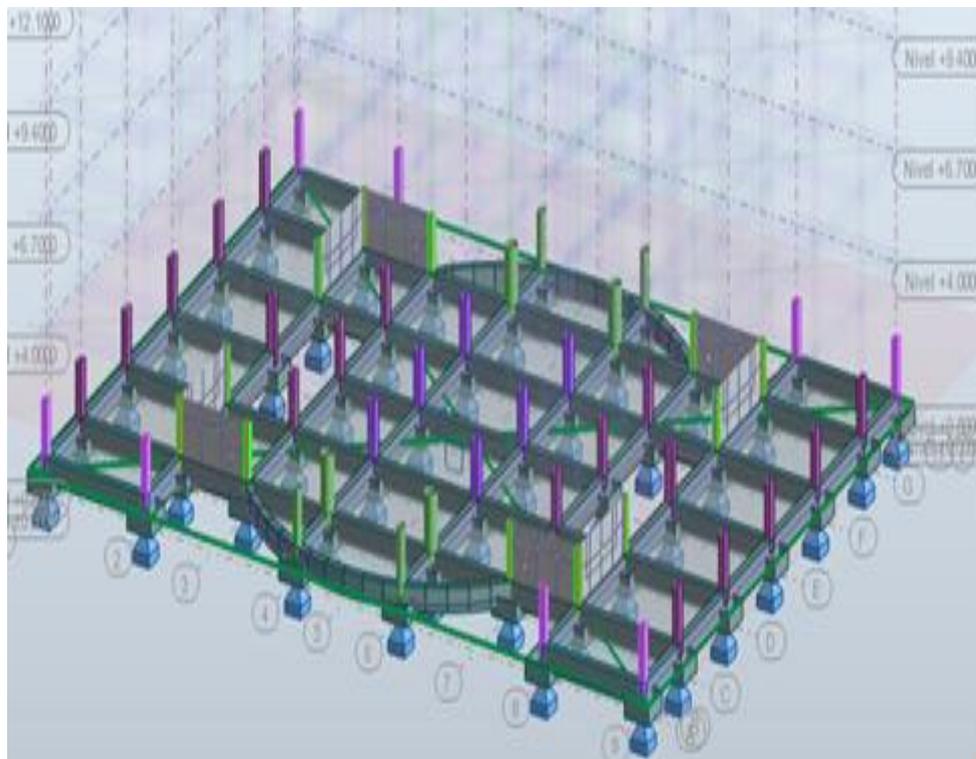


Figura II 35 piso rígido con pedestales para la colocación de los aisladores de rodamiento

la carga muerta y sobrecarga será la misma considerada en la tabla Ila 11, antes de escoger el tipo de superficie se hicieron ensayos previos entre una superficie elíptica y una parabólica ver tablas, dando mejores resultados debido a la baja pendiente entre la fuerza restitutiva y u_B la superficie parabólica

Se optó por un diseño parabólico ver Anexo 03 debido a su baja pendiente de F vs u_B . con las condiciones de la tabla Ila 13

Tabla Ila 13 función parabólica $k=0.15m$

uB (cm)	F (Tn)			X (cm)		
	k=0.15m		P=1Tn	k=0.15m		
	$\bar{r}=0.12m$	$\bar{r}=0.25m$	$\bar{r}=0.5m$	$\bar{r}=0.12m$	$\bar{r}=0.25m$	$\bar{r}=0.5m$
0	0	0	0	0	0	0
2	0.247	0.016	0	5.015	2.406	2.004
4	0.483	0.035	0.001	10.106	4.842	4.026
6	0.702	0.056	0.004	15.35	7.332	6.082
8	0.91	0.082	0.01	20.829	9.904	8.199
10	1.111	0.117	0.02	26.629	12.608	10.386
12	1.316	0.16	0.035	32.913	15.463	12.681
14	1.532	0.216	0.057	39.736	18.518	15.093
16	1.768	0.286	0.087	47.275	21.814	17.671
18	2.029	0.374	0.129	55.627	25.425	20.439
20	2.323	0.483	0.183	64.966	29.397	23.439
22	2.656	0.615	0.253	75.447	33.801	26.716
24	3.035	0.775	0.342	87.281	38.741	30.333
26	3.467	0.964	0.453	100.66	44.287	34.348
28	3.959	1.187	0.591	115.826	50.566	38.845
30	4.522	1.445	0.757	133.061	57.687	43.91
32	5.165	1.742	0.956	152.649	65.792	49.637
34	5.899	2.08	1.192	174.968	75.04	56.152
36	6.739	2.465	1.466	200.407	85.59	63.576
38	7.698	2.901	1.784	229.396	97.645	72.056
40	8.795	3.394	2.147	262.488	111.426	81.768

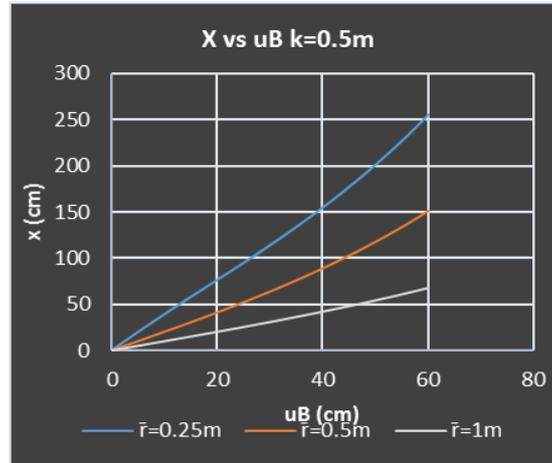


Figura II 36 x (longitud de la generatriz horizontal) vs uB

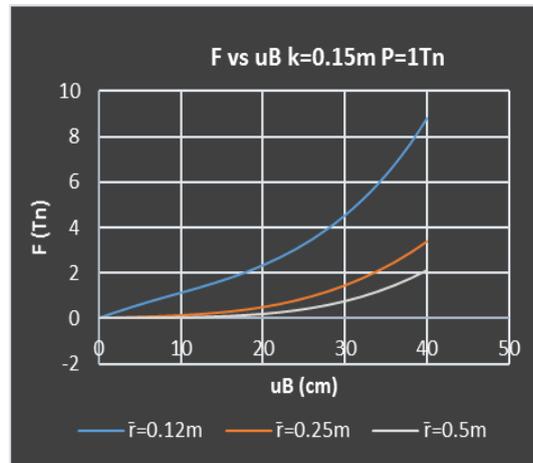


Figura II 37 (fuerza restitutiva) vs uB

Descripción del aislador

Se considera una doble superficie para lo cual se duplicará el valor de \bar{r} , como se muestra en la fig. esto con la intención de bajar aún más el valor de la pendiente F vs uB.

para una edificación de 5 niveles la altura de aislador $h=50cm$ por lo que \bar{r} tendrá un valor de $0.25cm$

donde aplicando lo deducido en la ecuación 21 $uB_{doble\ superficie} = uB_{una\ superficie}$

Tabla Ila 14 definición de los puntos de rigidez Kaislador

uB	F(T)
0	0
4	0.016
8	0.035
12	0.056
16	0.082
20	0.117
24	0.16
28	0.216

modelamiento en el programa robot estructural del aislamiento de base parabólico.

se necesitará conocer el valor de P (peso que llega a cada aislador), para ello se necesitará hacer un metrado de cargas por columna

Tabla Ila 15 Metrado de cargas por columna

COLUMNA	CARGA MUERTA (T)	CARVA VIVA (T)	carga muerta + 25% carga viva (T)	P aislador (T)
C1	33.00	6.79	34.7	35
C2	31.61	6.53	33.24	
C3	50.57	11.03	53.33	54
C14	49.40	10.61	52.05	
C4	56.42	12.63	59.58	62
C5	58.38	13.12	61.66	
C13	56.95	12.88	60.17	
C11	55.35	12	58.35	
C12	90.14	20.46	95.25	95
C15	89.58	21.05	94.84	
C9	82.66	17.43	87.02	88
C10	80.40	15.26	84.21	
C6	120.66	22.51	126.29	127
C7	71.72	12.95	74.96	75
C8	44.08	9.22	46.38	47

se corregirá de manera lineal por segmentos los valores de $F(T)$ en la siguiente tabla se muestran los resultados

Tabla IIa 16 Kaisalador corregida para el modelamiento

uB	F(T)	F(T)corregida
0	0	0
4	0.016	0.01875
8	0.035	0.0375
12	0.056	0.05625
16	0.082	0.075
20	0.117	0.122
24	0.16	0.169
28	0.216	0.216

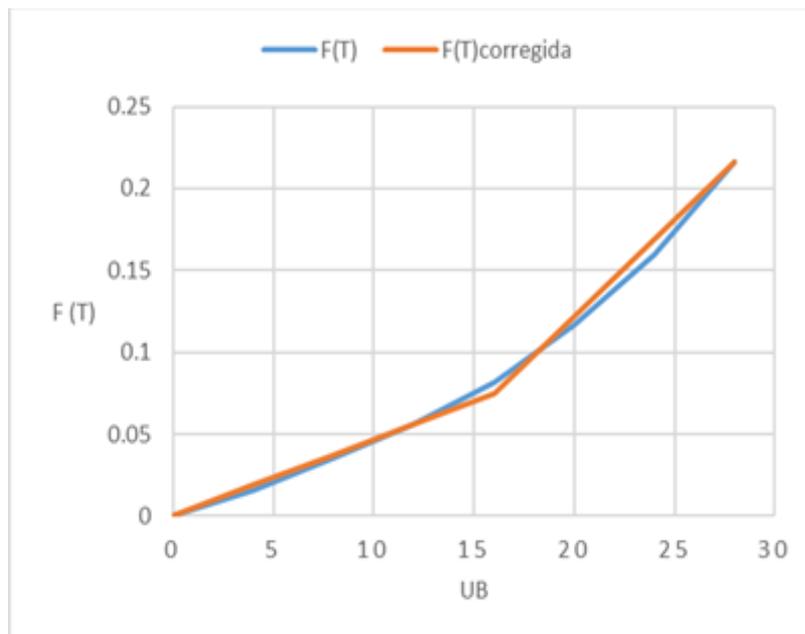


Figura II 38 Grafica $F(T)$ vs uB

para el modelamiento del aislador, los soporte en robot structural en los soportes en la definición del modelo no lineal escogemos bilineal como se muestra en la figura II 38

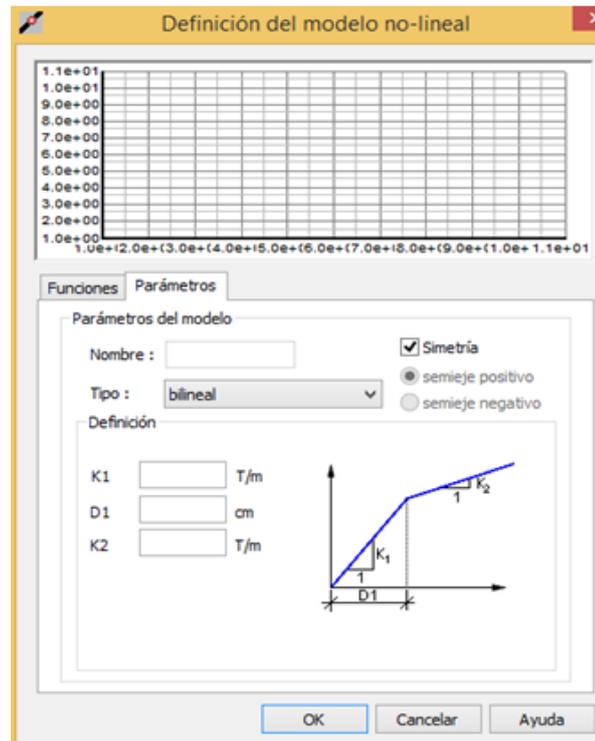


Figura II 39 definición del modelo no lineal del Kaisalador

estos datos se ingresarán para cada uno de los soportes el K_{aislador} de acuerdo al peso que llega a cada aislador Ver Anexo 02.

Tabla Ila 17 Kaisalador definido por $K1$, $K2$ (modelo no lineal)

Peso (T)	a(cm)		K1 (T/m)	K2 (T/m)
35	16		16.41	41.13
62	16		29.06	72.85
54	16		25.31	63.45
127	16		59.53	149.23
75	16		35.16	88.13
88	16		41.25	103.4
47	16		22.03	55.23
95	16		44.53	111.63

donde

a= punto de separación de uB de los dos segmentos en cm

$K1$ = pendiente del primer segmento en unidades de elasticidad (T/m)

$K2$ = pendiente del segundo segmento en unidades de elasticidad (T/m)

ingreso del espectro de aceleraciones S_{ax} S_{ay} que serán iguales como

se halló anteriormente.

$$s_a = 0.35 \times 1 \times C \times 1.2 \times 9.81 / 7 \text{ m/s}^2 = S_{ax} = S_{ay}$$

donde C coeficiente de amplificación

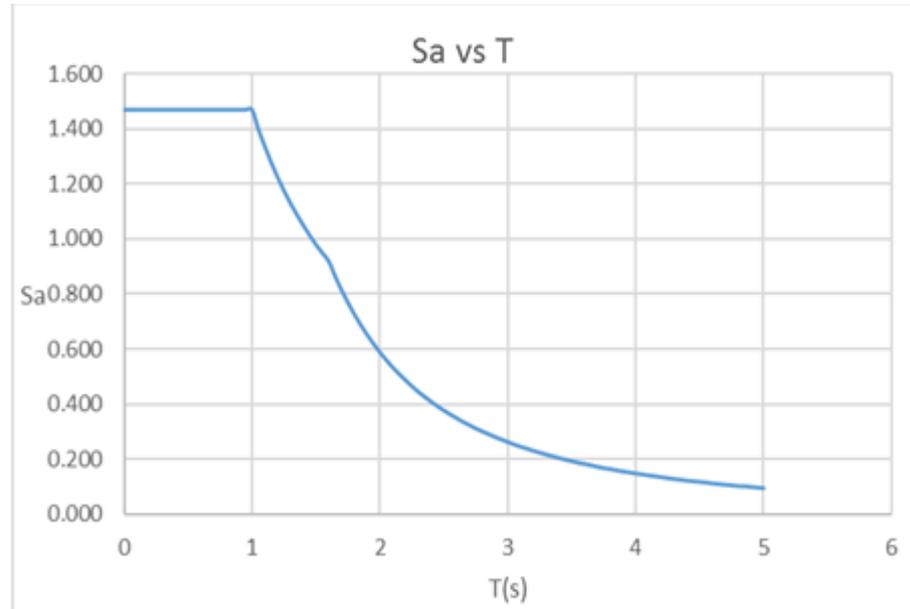


Figura II 40 pseudo-aceleración (m/s²)

salida de resultados

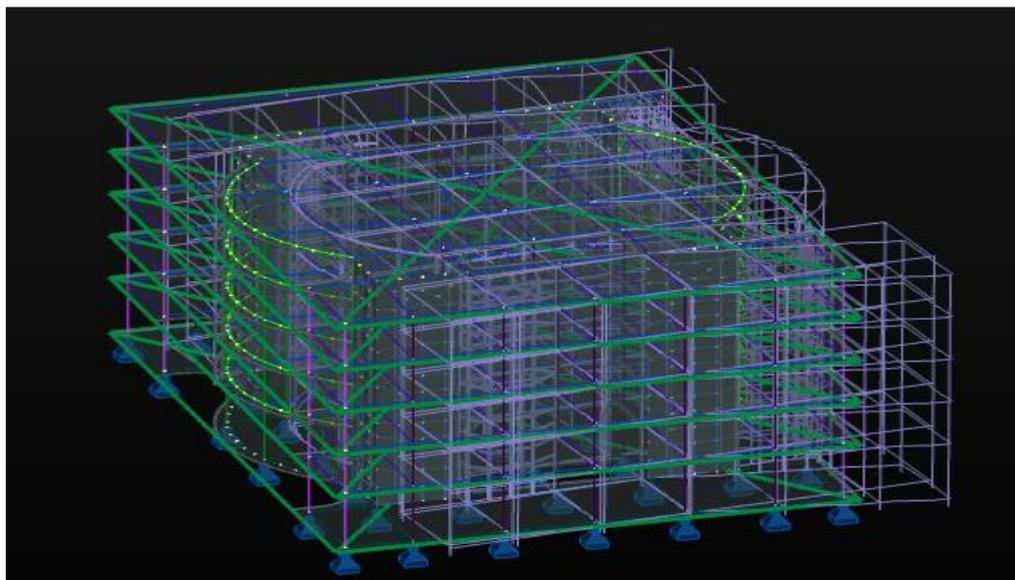


Figura II 41 visualización de desplazamientos 3D

en la figura se observa una traslación del edificio desde la base lo cual evidencia una desconexión suelo estructura

Resultados en la dirección x

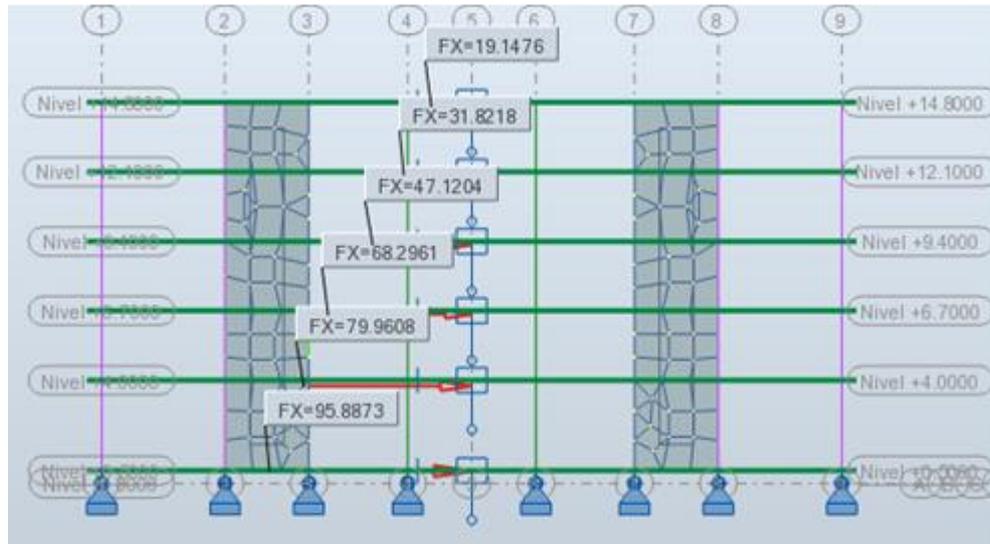


Figura II 42 fuerza cortante (x) por nivel en Toneladas

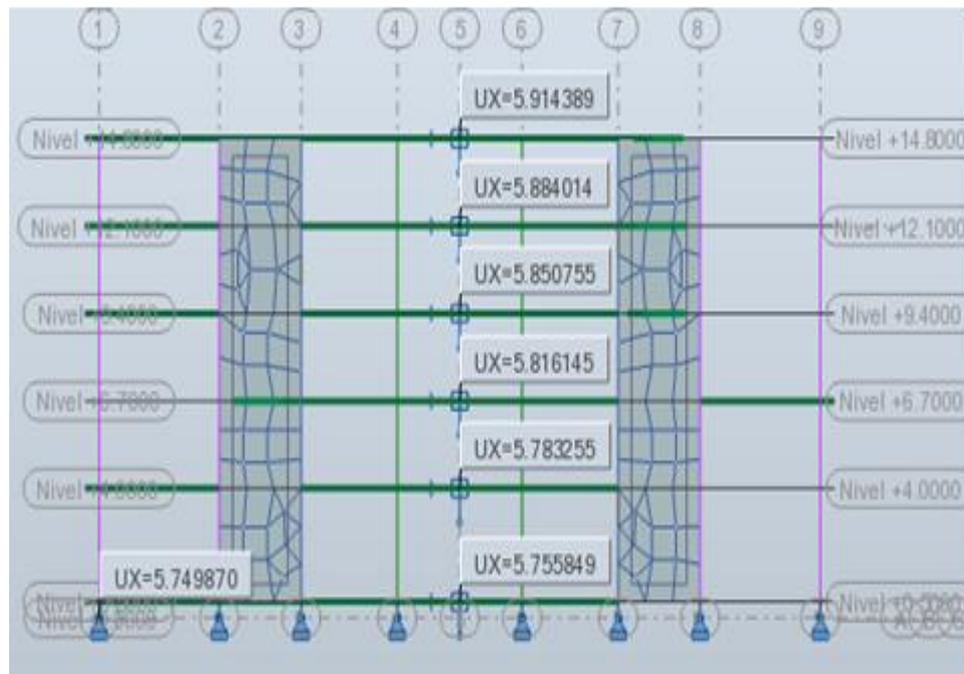


Figura II 43 desplazamientos laterales (x) por nivel en cm

Resultados en la dirección y

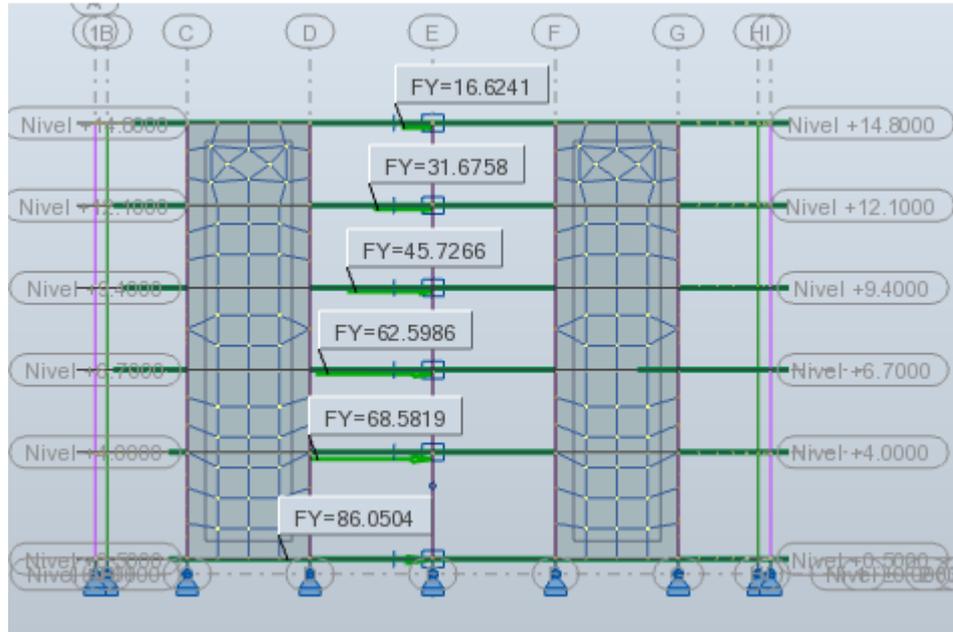


Figura II 44 fuerza cortante (y) por nivel en Toneladas

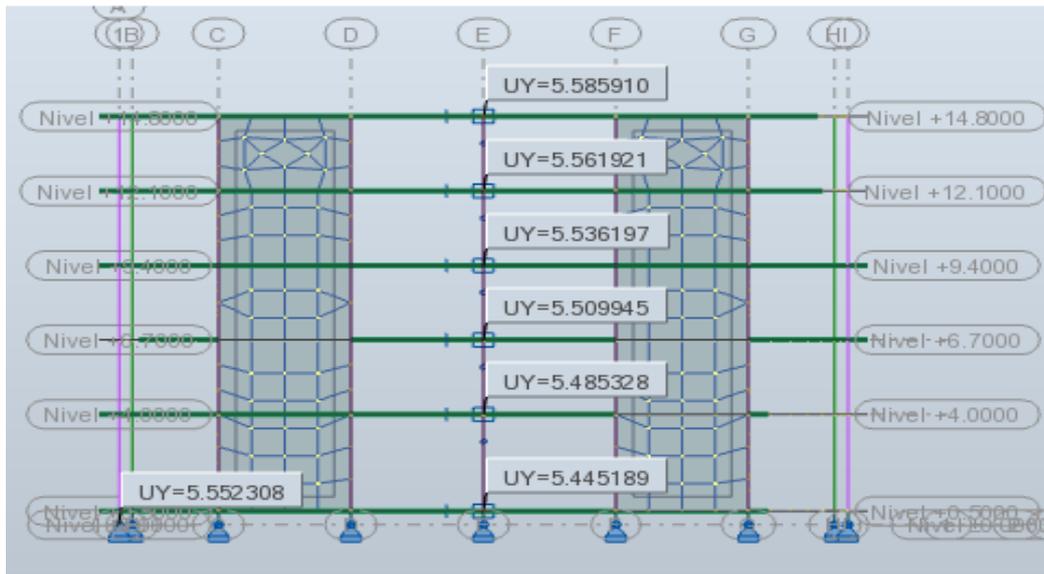


Figura II 45 desplazamientos laterales (y) por nivel en cm

Se debe comprobar que el máximo desplazamiento relativo de entrepiso no exceda el 0.007, ya que se trata de un edificio construido de concreto.

RESULTADOS DEL ANALISIS DINÁMICO MODAL BASE AISLADA

control de derivas

Tabla Ila 18 Control de derivas en las direcciones x, y

		R (x,y)		U base		Desplazamientos totales		Desplazamiento relativo a la base	
NIVEL	ALTURA Hi (cm)	Rx	Ry	Ux base (cm)	Uy base (cm)	Ux(cm)	Uy(cm)	Ux (cm)	Uy (cm)
1	350	7	7	5.75585	5.44519	5.783255	5.485328	0.027406	0.040139
2	270	7	7	5.75585	5.44519	5.816145	5.509945	0.060296	0.064756
3	270	7	7	5.75585	5.44519	5.850755	5.536197	0.094906	0.091008
4	270	7	7	5.75585	5.44519	5.884014	5.561921	0.128165	0.116732
5	270	7	7	5.75585	5.44519	5.914389	5.58591	0.15854	0.140721

desplazamiento lateral		desplazamiento relativo de entrepiso Di		derivadas Di/Hi		máx. deriva Norma E.030	control de derivas	
$0.75 \cdot Rx \cdot Ux$	$0.75 \cdot Ry \cdot Uy$	Dr Ux	Dr Uy	Deriva x	Deriva y	X,Y	X	Y
0.1438815	0.21072975	0.1438815	0.21072975	0.00041	0.00060	0.007	CUMPLE	CUMPLE
0.316554	0.339969	0.1726725	0.12923925	0.00064	0.00048	0.007	CUMPLE	CUMPLE
0.4982565	0.477792	0.1817025	0.137823	0.00067	0.00051	0.007	CUMPLE	CUMPLE
0.67286625	0.612843	0.17460975	0.135051	0.00065	0.00050	0.007	CUMPLE	CUMPLE
0.832335	0.73878525	0.15946875	0.12594225	0.00059	0.00047	0.007	CUMPLE	CUMPLE

Tabla Ila 19 Distorsión del sistema en ambas direcciones X, Y

Desplazamiento lateral en X	Desplazamiento lateral en Y	Distorsión del sistema en X	Distorsión del sistema en Y
0.832335	0.73878525	0.000582052	0.000516633

Tabla Ila 20 Comportamiento según FEMA 273

Nivel de comportamiento	FEMA 273	Distorsión del sistema en X	Distorsión del sistema en Y	COMPORTAMIENTO	
				X	Y
OCUPACION INMEDIATA	0.01	0.000582052	0.000516633	CUMPLE	CUMPLE
SEGURIDAD DE VIDA	0.01-0.02	0.000582052	0.000516633	NO CUMPLE	NO CUMPLE
PREVENCIÓN DEL COLAPSO	0.04	0.000582052	0.000516633	NO CUMPLE	NO CUMPLE

Tabla IIa 21 Nivel de comportamiento VISIÓN 2000

Nivel de comportamiento	VISIÓN 2000	Distorsión del sistema en X	Distorsión del sistema en Y	COMPORTAMIENTO	
				X	Y
TOTALMENTE OPERACIONAL	0.002	0.000582052	0.000516633	CUMPLE	CUMPLE
OPERACIONAL	0.005	0.000582052	0.000516633	NO CUMPLE	NO CUMPLE
SEGURIDAD	0.015	0.000582052	0.000516633	NO CUMPLE	NO CUMPLE
PROXIMO AL COLAPSO	0.025	0.000582052	0.000516633	NO CUMPLE	NO CUMPLE
COLAPSO	> 0.025	0.000582052	0.000516633	NO CUMPLE	NO CUMPLE

Tabla IIa 22 Aceleración base del edificio

SISTEMA	Dirección	T (seg.)	% masa participativa (modo 1)	Aceleración (g)
BASE AISLADA	X	3.26	98.63	0.023
	Y	3.313	90.329	0.022
BASE FIJA	X	0.47	78.12	0.15
	Y	0.43	76.37	0.15

2.9 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS

ACELERACIÓN ESPECTRAL: Valor máximo de la aceleración absoluta producida por un temblor en un oscilador simple.

ACELERÓGRAFO: Registra la aceleración del suelo durante un terremoto.

ACELERÓMETRO: Instrumento para medir la aceleración en función del tiempo

AISLAMIENTO SÍSMICO: es una colección de elementos estructurales para desemparejar una superestructura del edificio de su tierra y así proteger la integridad del edificio. El aislamiento sísmico es una herramienta de gran alcance de la ingeniería sísmica.

AISLAMIENTO: Reducción de la severidad de la respuesta, que se logra comúnmente con el uso de material resilente.

AMORTIGUADOR SÍSMICO: es un dispositivo que se usa para disipar la energía de un sismo en un edificio.

CARGA GRAVITACIONAL O PESO, ($m.g$): Es el efecto vertical de la aceleración debida a la gravedad sobre la masa m de la edificación. m debe ser igual a la masa de la estructura más la masa de los elementos tales como muros divisorios y particiones, equipos permanentes, tanques y sus contenidos, etc.

CARGA MUERTA: Es la carga vertical debida a los efectos gravitacionales de la masa o peso, de todos los elementos permanentes ya sean estructurales o no estructurales.

CARGA VIVA: Es la carga debida al uso de la estructura, sin incluir la carga muerta, fuerza de viento o sismo.

CENTRO DE MASA DEL PISO: Es el lugar geométrico donde estaría localizada, en planta, toda la masa del piso al suponer el diafragma del piso como un cuerpo infinitamente rígido en su propio plano.

CENTRO DE RIGIDEZ DEL PISO: Es el lugar geométrico, localizado en planta y determinado bajo el supuesto de que el diafragma del piso es infinitamente rígido en su propio plano, donde al aplicar una fuerza horizontal, en cualquier dirección, no se presenta rotación del diafragma alrededor de un eje vertical.

CINTURÓN DE FUEGO DEL PACÍFICO: Zona de intensa actividad sísmica y volcánica que rodea al Océano Pacífico. Concentra cerca del 90% del total de los sismos y el 75% del total de los volcanes activos del planeta.

COEFICIENTE DE AMORTIGUAMIENTO CRÍTICO: Es, para un sistema elástico, de un grado de libertad con amortiguamiento viscoso, el cociente entre la cantidad de amortiguamiento del sistema y el amortiguamiento mínimo que inhibe toda oscilación.

COEFICIENTE DE CAPACIDAD DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA BÁSICO R_0 : Coeficiente que se prescribe para cada sistema estructural de resistencia sísmica, cuyo valor depende del tipo de sistema estructural y de las características de capacidad de disipación de energía propias del material estructural que se utiliza en el sistema. Es una medida de la capacidad de disipación de energía general del sistema de resistencia sísmica cuando los movimientos sísmicos hacen que responda inelásticamente.

COEFICIENTE DE CAPACIDAD DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA, R : Coeficiente que corresponde al coeficiente de capacidad de disipación de energía básico, R_0 , multiplicado por los coeficientes de reducción de capacidad de disipación debido a irregularidades en altura, I_a , irregularidad en planta, I_p

CORTANTE DE PISO: Es la suma algebraica de las fuerzas sísmicas horizontales que actúan por encima del piso en consideración.

CORTANTE EN LA BASE: Es la suma algebraica, tomada en la base, de todas las fuerzas sísmicas horizontales del edificio.

DERIVA DE PISO: Es la diferencia entre los desplazamientos horizontales de los niveles entre los cuales está comprendido el piso.

DIAFRAGMA: Conjunto de elementos estructurales, tal como una losa de entrepiso, que transmite las fuerzas inerciales horizontales a los elementos verticales del sistema de resistencia sísmica.

DUCTILIDAD: Capacidad que tiene un material estructural de resistir, sin fallar, deformaciones que lleven al material estructural más allá del límite elástico, o límite donde las deformaciones son linealmente proporcionales al esfuerzo o fuerza aplicada.

EDIFICACIÓN: Es una construcción cuyo uso primordial es la habitación u ocupación por seres humanos.

EDIFICACIONES ESENCIALES: Son aquellos equipamientos urbanos de atención a la comunidad que deben funcionar durante y después de un sismo, cuya operación no puede ser trasladada rápidamente a un lugar alternativo, tales como hospitales y centrales de operación y control de líneas vitales.

ELEMENTOS FLEXIBLES: Son aquellos cuya deformación, al ser solicitados por una fuerza horizontal, es significativamente mayor que la de los elementos adyacentes del sistema.

ELEMENTOS NO ESTRUCTURALES: Elementos o componentes de la edificación que no hacen parte de la estructura o su cimentación.

EPICENTRO: Es el punto en la superficie de la Tierra que se encuentra directamente por encima del hipocentro, por lo cual es la primera zona afectada por la onda sísmica.

ESPECTRO DE DISEÑO: Es el espectro correspondiente a los movimientos sísmicos de diseño.

ESPECTRO: Es la colección de valores máximos, ya sea de aceleración, velocidad o desplazamiento, que tienen los sistemas de un grado de libertad durante un sismo.

ESTRUCTURA: Es un ensamblaje de elementos, diseñado para soportar las cargas gravitacionales y resistir las fuerzas horizontales. Las estructuras pueden ser catalogadas como estructuras de edificaciones o estructuras diferentes a las de las edificaciones.

EXÉNTRICO: Pieza circular de hierro o acero, cuyo eje de rotación no ocupa el centro geométrico; está destinada a transformar un movimiento de rotación en uno de otra clase, especialmente rectilíneo alternativo

FALLA: Es el plano de ruptura de bloques rocosos, producto de los esfuerzos a que ha sido sometida la corteza terrestre. A lo largo de ella se produce movimiento

FRECUENCIA FUNDAMENTAL: La frecuencia más baja de un sistema con múltiples grados de libertad.

FRECUENCIA NATURAL: Número de siglos por segundo de un sistema con un solo grado de libertad que vibra libremente o de un sistema de múltiples grados de libertad que vibra en uno de los modos normales.

FUERZA RESTAURADORA ELÁSTICA: Según el principio de acción reacción o tercera ley de Newton, en cada interacción existen dos fuerzas. Esto implica que si ejercemos una fuerza sobre un muelle, este último ejercerá también sobre nosotros otra fuerza de igual dirección y módulo aunque de sentido contrario. Dicha fuerza, recibe el nombre de fuerza elástica o restauradora.

FUERZAS SÍSMICAS: Son los efectos inerciales causados por la aceleración del sismo, expresados como fuerzas para ser utilizadas en el análisis y diseño de la estructura.

HIPOCENTRO: Es el punto en el interior de la Tierra en donde se produce un sismo.

INTENSIDAD: Es una estimación de cómo es percibido un sismo en una localidad determinada y sus efectos.

INTERACCIÓN SUELO-ESTRUCTURA: Es el efecto que tienen en la respuesta estática y dinámica de la estructura las propiedades de rigidez del suelo que da apoyo a la edificación, en conjunto con las propiedades de rigidez de la cimentación y de la estructura.

MAGNITUD RICHTER: Una medida de la energía total liberada por un temblor

MASA: Cantidad de materia que posee un cuerpo. En el Sistema Internacional de Medidas (SI) se expresa en kilogramos, kg.

MÉTODO DE LA FUERZA HORIZONTAL EQUIVALENTE: Es el método de análisis sísmico en el cual los efectos de los movimientos sísmicos de diseño se expresan por medio de unas fuerzas horizontales estáticas equivalentes.

MODO FUNDAMENTAL: Es el modo de vibración correspondiente al período fundamental de la estructura en la dirección horizontal de interés.

MODOS DE VIBRACIÓN: Son las diferentes formas de vibración propias de la estructura. A cada modo de vibración corresponde una frecuencia de vibración propia. La respuesta dinámica de la estructura, en el rango elástico, se puede expresar como la superposición de los efectos de los diferentes modos. Una estructura tiene tantos modos de vibración, como grados de libertad tenga.

MODOS NORMALES: Desplazamiento relativo de las coordenadas de un sistema con múltiples grados de libertad que vibra en una de sus frecuencias naturales

MURO DE CARGA: Es un muro estructural, continuo hasta la cimentación, que soporta principalmente cargas verticales.

MURO ESTRUCTURAL: Es un muro, de carga o no, que se diseña para resistir fuerzas horizontales, de sismo o de viento, paralelas al plano del muro.

ONDA: Propagación de una perturbación (deformación del cuerpo de agua) a través de un medio con transporte de energía, pero no de materia.

PERÍODO DE VIBRACIÓN FUNDAMENTAL: Es el mayor período de vibración de la estructura en la dirección horizontal de interés.

PERÍODO DE VIBRACIÓN T: Es el tiempo que transcurre dentro de un movimiento armónico ondulatorio, o vibratorio, para que éste se repita.

PÓRTICO: Es un conjunto de vigas, columnas y, en algunos casos, diagonales, todos ellos interconectados entre sí por medio de conexiones o nudos que pueden ser, o no, capaces de transmitir momentos flectores de un elemento a otro.

PROBABILIDAD: Es el cociente del número de casos que realmente ocurren, dividido por el número total de casos posibles.

RÉPLICA: Las réplicas de un terremoto son movimientos sísmicos que ocurren en la misma región en donde hubo un temblor más grande. Por definición, son de magnitud menor y ocurren después del evento principal.

RESISTENCIA: Es la capacidad útil de una estructura, o de sus miembros, para resistir cargas, dentro de los límites de deformación establecidos en este Reglamento.

RESPUESTA ESPECTRAL: Gráfico de la respuesta máxima (desplazamiento velocidad yo aceleración) para un sistema con un grado de libertad definido por su frecuencia natural o periodo sometido a una excitación específica

RIESGO SÍSMICO: Corresponde a la determinación de las consecuencias económicas y sociales, expresada en términos monetarios, o de víctimas, respectivamente, para el sitio de interés en función de su probabilidad de excedencia para un tiempo de exposición dado.

RIGIDEZ DE PISO: Para un piso , es el cociente entre el cortante de piso, V y la deriva que éste cortante produce en el piso.

RIGIDEZ: es una medida cualitativa de la resistencia a las deformaciones elásticas producidas por un material, que contempla la capacidad de un elemento estructural para soportar esfuerzos sin adquirir grandes deformaciones.

SISMO DE DISEÑO: Es la caracterización de los movimientos sísmicos mínimos que deben utilizarse en la realización del diseño sismo resistente. Para efectos del presente Reglamento, es un sismo cuyos efectos en el lugar de interés tienen una probabilidad de sólo diez por ciento de ser excedidos en un lapso de cincuenta años, lo cual conduce a un período promedio de retorno de 475 años. El diseño sismo resistente tiene dentro de sus objetivos la protección de la vida ante la ocurrencia del sismo de diseño.

SISMO, TEMBLOR O TERREMOTO: Vibraciones de la corteza terrestre inducidas por el paso de ondas sísmicas provenientes de un lugar o zona donde han ocurrido movimientos súbitos de la corteza terrestre.

SISTEMA DUAL: Es el sistema estructural resultante de la combinación de un pórtico espacial resistente a momentos (de capacidad moderada o alta de disipación de energía) con muros estructurales o pórticos con diagonales

SOLICITACIONES: Son las fuerzas u otras acciones que afectan la estructura, dentro de las cuales se cuentan: los efectos gravitacionales sobre su propia masa, o peso propio, las cargas generadas por los elementos no estructurales, por sus ocupantes y sus posesiones, los efectos ambientales tales como el viento o el sismo, los asentamientos diferenciales, y los cambios dimensionales causados por variaciones en la temperatura o efectos reológicos de los materiales. En general corresponden a todo lo que puede afectar la estructura.

TEORÍA DE LA TECTÓNICA DE PLACAS: Se definió en los años 60. Describe cómo la corteza terrestre está fraccionada en varias partes con velocidades y movimientos distintos.

VIBRACIÓN ALEATORIA: Proceso que no puede predecirse en el sentido determinístico, sino probabilísticamente aplicando la teoría estadística.

VIBRACIÓN FORZADA: Vibración en la cual la respuesta se debe a una excitación externa del sistema.

VIBRACIÓN LIBRE: Se dice que una estructura experimenta vibración libre cuando es perturbada de su posición de equilibrio estático y después deja de vibrar sin ninguna excitación dinámica externa.

VIBRACIÓN PERMANENTE: Movimiento que permanece en el sistema después que el movimiento transitorio presente al iniciarse el movimiento ha desaparecido.

VIBRACIÓN TRANSITORIA: Parte del movimiento inicial que desaparece debido a fuerzas de amortiguamiento en el sistema.

VULNERABILIDAD: Es la cuantificación del potencial de mal comportamiento de una edificación con respecto a alguna sollicitación.

CAPÍTULO III:

PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

3.1 CONFIABILIDAD Y VALIDACIÓN DEL INSTRUMENTO

3.1.1 Confiabilidad del Instrumento

La confiabilidad de una prueba es la consistencia de los resultados aplicada al mismo grupo, en nuestro caso los niveles de la edificación. para lo cual se usó de la confiabilidad por estabilidad temporal (Confiabilidad de test y retest).

En este procedimiento, se aplicó un mismo instrumento de medición, dos o más veces a un mismo sujeto u objeto de investigación, dentro de un período de tiempo relativamente corto. En este caso, se realizó una correlación entre los datos obtenidos en las diferentes aplicaciones, con lo cual, si se obtiene que la correlación realizada es altamente positiva, se puede inferir que el instrumento es confiable.

mediante la aplicación de una prueba, que es un sismo espectral en el que se midió el comportamiento sísmico de la estructura, el cual se aplicó un antes y después (test-retest) el tratamiento, uso de aisladores, y se obtienen dos resultados, la correlación de ambos resultados se comparó con la correlación de Pearson para lo cual se elaboró la siguiente tabla (herrera 1998).

Tabla III 1 grado de confiabilidad

<i>0.53 a menos</i>	<i>Confiabilidad nula</i>
<i>0.54 a 0.59</i>	<i>Confiabilidad baja</i>
<i>0.60 a 0.65</i>	<i>Confiable</i>
<i>0.66 a 0.71</i>	<i>Muy confiable</i>
<i>0.72 a 0.99</i>	<i>Excelente confiabilidad</i>
<i>1</i>	<i>Confiabilidad perfecta</i>

Tabla III 2 Resultados de test y retest

Numero de elemento	nivel	comportamiento sistema base fijo	comportamiento sistema aislado
1	nivel 1	0.69	0.95
2	nivel 2	0.57	0.92
3	nivel 3	0.53	0.92
4	nivel 4	0.53	0.92
5	nivel 5	0.57	0.93

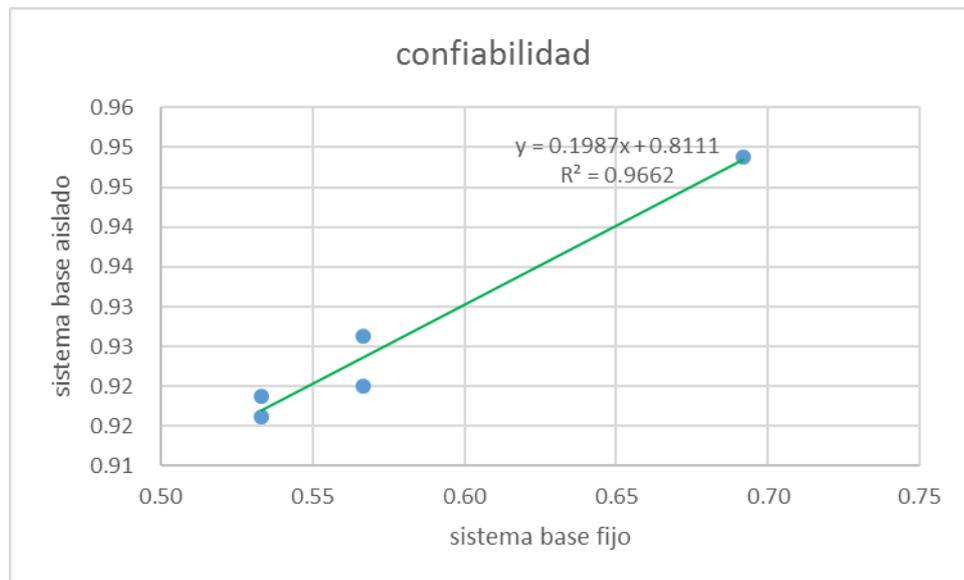


Figura III 1 confiabilidad de los resultados

El coeficiente de Pearson obtenido es $R=0.9829$ que se encuentra en el rango de 0.72-0.99, se concluye que los resultados muestran que el instrumento tiene excelente confiabilidad.

3.1.2 Validación de los resultados

Se utilizó como instrumento de medición el software Robot Structural Análisis Profesional, de propiedad y responsabilidad de la empresa Autodesk, ampliamente aceptada en el campo de modelamiento, análisis, diseño en la ingeniería estructural. El software Autodesk Robot Structural Analysis Profesional ofrece a los ingenieros estructurales capacidades avanzadas de simulación y análisis de edificios para estructuras grandes y complejas. Además, ofrece un flujo de trabajo sin

problemas, lo que permite a los ingenieros realizar simulaciones y análisis más rápidamente de una variedad de estructuras.

3.2 ANÁLISIS CUANTITATIVO DE LAS VARIABLES

comparación de respuestas sísmicas de la deriva

El análisis comparativo de respuestas sísmicas de la modelación en Robot Structural guiados por un modelo Normativo Sismo resistente entre un sistema sin aislamiento de base, y el modelo con el aislador propuesto son los siguientes:

Tabla III 3 Cuadro comparativo de respuestas sísmicas deriva de entrepiso

Numero de elemento	nivel y dirección del elemento	sistema base fijo	sistema aislado
1	nivel 1 (sentido x)	0.0027	0.00041
2	nivel 1 (sentido y)	0.0022	0.00060
3	nivel 2 (sentido x)	0.0042	0.00064
4	nivel 2 (sentido y)	0.0034	0.00048
5	nivel 3 (sentido x)	0.0046	0.00067
6	nivel 3 (sentido y)	0.0039	0.00051
7	nivel 4 (sentido x)	0.0046	0.00065
8	nivel 4 (sentido y)	0.0039	0.00050
9	nivel 5 (sentido x)	0.0042	0.00059
10	nivel 5 (sentido y)	0.0037	0.00047

Un buen comportamiento sísmico implica 3 propiedades esenciales resistencia, rigidez y ductilidad ante cargas laterales, no es fácil cumplir simultáneamente las tres condiciones ya que en general las estructuras muy rígidas y resistentes se vuelven también poco dúctiles. La norma E.030 en el capítulo 5 requisitos de rigidez, resistencia y ductilidad indican que para cumplir de manera convenientes estos tres requisitos deberá cumplir ciertos límites para la distorsión de entrepiso, por ello una reducción de respuestas como son la cortante basal y las derivas de entre piso garantizaron la disminución de daños estructurales, pues se minimiza la deformación de manera que los elementos no lleguen alcanzar la plastificación.

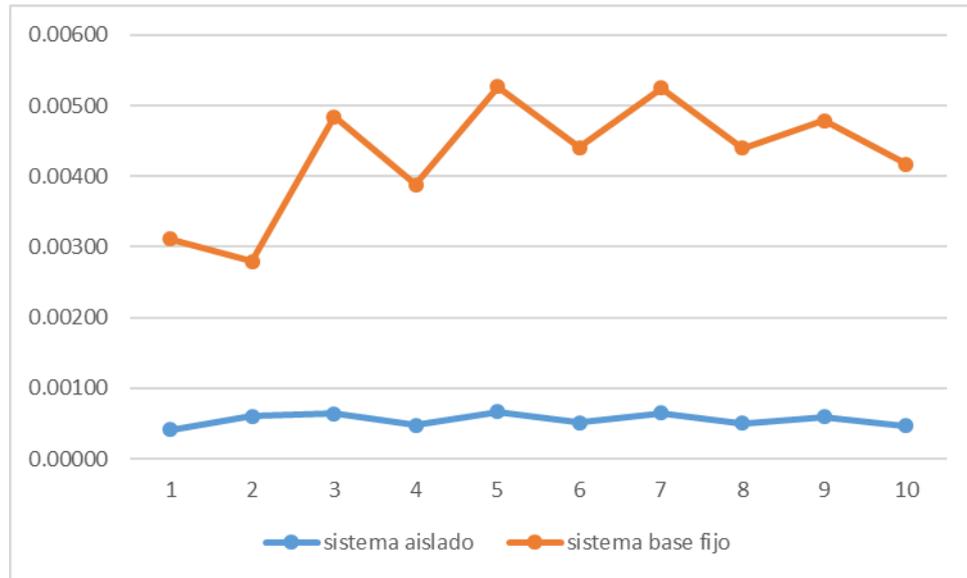


Figura III 2 variación de las derivas según el sistema de conexión suelo estructura

En la figura III 2 se observa una disminución muy representativa de las derivas de entrepiso en un sistema aislado por rodamiento frente a un sistema de base fija lo que evidencia una alta desconexión lateral suelo estructura, y de esta manera un mejor comportamiento sísmico manifestándose esto en la disminución de derivas frente a las solicitaciones sísmicas como indica la norma E.030. capítulo 5.

Tabla III 4 tendencia central y dispersión para la muestra del sistema base fija

		Estadístico
Media		0.0037
95% de intervalo de confianza para la media	Límite inferior	0.0032
	Límite superior	0.0043
Mediana		0.0039
Varianza		0.0000
Desv. Desviación		0.0008
Mínimo		0.0022
Máximo		0.0046
Rango		0.0024
asimetría		-0.965
Curtosis		0.2912

Tabla III 5 tendencia central y dispersión para la muestra del sistema base aislado

	Estadístico	
Media	0.00055	
95% de intervalo de confianza para la media	Límite inferior	0.00049
	Límite superior	0.00062
Mediana	0.00055	
Varianza	0.00000	
Desv. Desviación	0.00009	
Mínimo	0.00041	
Máximo	0.00067	
Rango	0.00026	
asimetría	-0.112	
Curtosis	-1.43048	

En la tabla III 4 y tabla III 5 se muestran los resultados hallados para las medidas de tendencia central como la media, mediana y medidas de dispersión como son el rango, la varianza y desviación estándar muestral, se observa una disminución de las derivas hasta en un 85% esta disminución no es de extrañar pues generalmente los aisladores convencionales logran una reducción entre un 60% a 80% de sus respuestas sísmicas pero esto depende mucho de la empresa que los fabrica, por ejemplo Gerente de aisladores VULCO S.A. afirma, Los aisladores elastoméricos son los que más reducen la energía de los terremotos, en alrededor del 80% a 90%¹⁹, esto se debe a que generalmente aumenta su periodo fundamental hasta en 2 segundos, así como el incremento del amortiguamiento por valores del 10%, claro está que para lograr una desconexión suelo estructura frente a las sollicitaciones sísmicas depende mucho de la calidad, resistencia, y rigideces especiales (en especial el bajo módulo de corte de los elastómeros) de los materiales, con esto se muestra una mejoría con respecto a otros aisladores, cabe recalcar que los aisladores de rodamiento pueden lograr desconexiones muy elevadas debido a su

geometría y la ubicación de las fuerzas de gravedad y sísmica respecto al movimiento, sin desmerecer la importancia de la calidad y resistencia de los materiales.

el coeficiente de variación para un sistema de base fija es de 21.62% mientras que para un sistema de base aislado es de 16.36% lo que implica que existe una mayor dispersión respecto a su media en un sistema de base fija que en un sistema de base aislada esto se puede observar en la figura III 6, para las derivas del sistema de base fijo la curtosis positiva 0.291 implica que la curva de distribución es leptocúrtica (apuntada ligeramente) y su asimetría -0.965 indica que la distribución esta sesgada a la izquierda, la curtosis para las derivas del sistema de base aislado es -1.43 implica que la curva de distribución es platicúrtica (achatada), y su asimetría -0.112 indica que la distribución esta ligeramente sesgada a la izquierda.

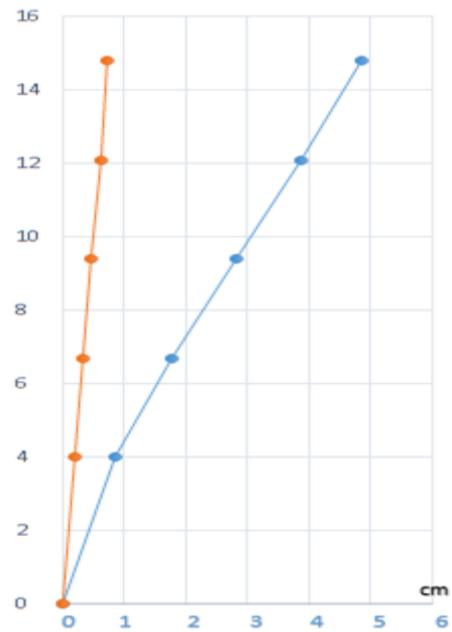
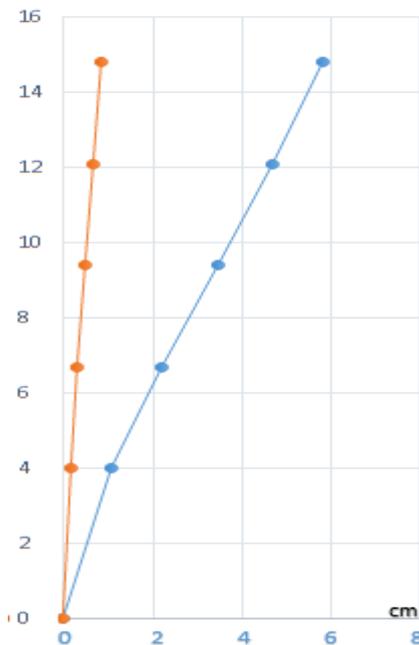


Figura III 3 desplazamiento lateral dirección x Figura III 4 desplazamiento lateral dirección y

En la figura III 3 y III 4 se evidencia una disminución de los desplazamientos laterales en la dirección x, y con un desplazamiento de 0.83 cm y 0.74 cm en el último nivel en el sistema aislado respectivamente, frente 5.83 cm y 4.87 cm de un sistema de base fijo.

la distribución de frecuencias por intervalo de la diferencia entre las derivas de entrepiso de un sistema de base fija con respecto a un sistema de base aislada, se muestran en la tabla III 6, el número de intervalos de clase según la regla de sturges se obtiene 4.322 se redondea al inmediato superior 5 intervalos de clase, y se halla la amplitud del rango de 0.00047 entonces se obtiene.

Tamaño de la muestra (N)	10
Mínimo valor	-0.00395
Máximo valor	-0.0016
Rango	0.00235
Número de clases (K=1+3,322log(N))	4.322
Amplitud del rango	0.00047

Tabla III 6 distribución de frecuencias absolutas y relativas para la diferencia de derivas

Intervalo	Frecuencia absoluta	Frecuencia relativa	Frecuencia relativa %	Porcentaje acumulado
<= -,0037150	2	0.2	20.0	20.0
-.0037149 - .0032450	4	0.4	40.0	60.0
-.0032449 - .0027750	2	0.2	20.0	80.0
-.0027750 - .0023049	0	0.0	0.0	80.0
-.0023049+	2	0.2	20.0	100.0
Total	10	1.0	100.0	

La distribución de frecuencias tabla III 6 muestra que entre los límites de intervalo número 2, [-0.00372, -0.0032 > que representa una disminución alta, existe un porcentaje de 40% del total de diferencias que se encuentran dentro de ese rango de intervalo, así mismo en la distribución de frecuencias figura III 6 se muestra que existe mayor área justamente en el lado izquierdo donde hay mayor disminución de derivas, lo que muestra que existen mayor cantidad de elementos (diferencias de derivas) con una disminución alta, esto se observa en su asimetría 1.284 sesgada a la derecha y con una curtosis de 1.257 apuntada.

Tabla III 7 tendencia central y de dispersión para la diferencia de derivas

Descripción	Estadístico	
Media	-0.003188000	
95% de intervalo de confianza para la media	Límite inferior	-0.003717727
	Límite superior	-0.002658273
Mediana	-0.003395000	
Varianza	0.000	
Desv. Desviación	0.0007405073	
Mínimo	-0.0039500	
Máximo	-0.0016000	
Rango	0.0023500	
Asimetría	1.284	
Curtosis	1.257	

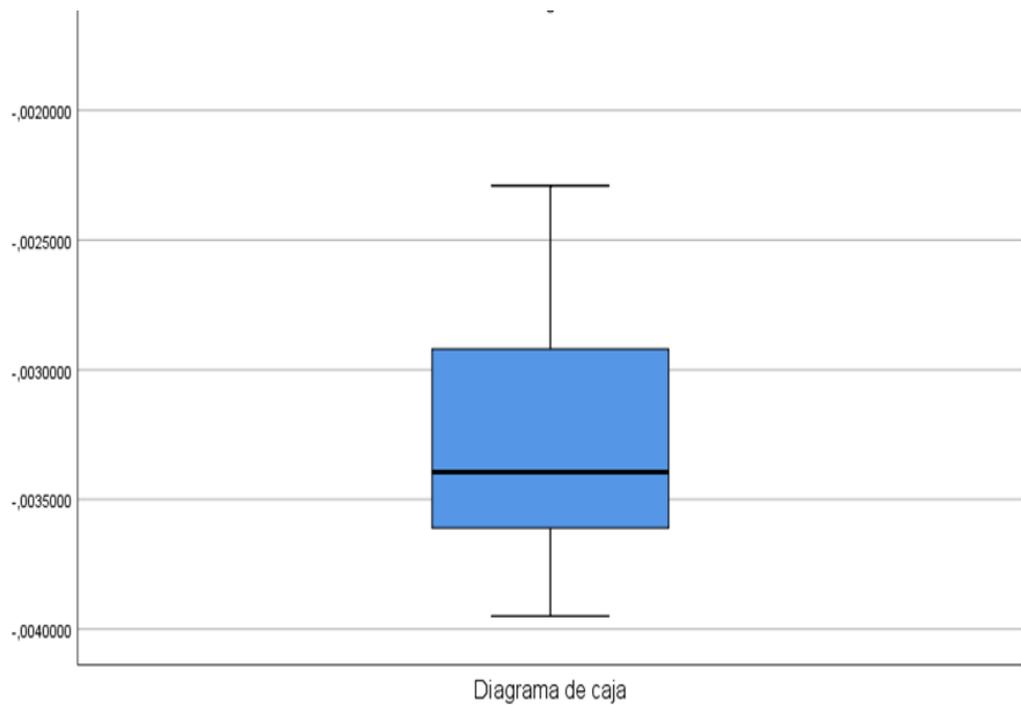


Figura III 5 diagrama de caja para la diferencia de derivas

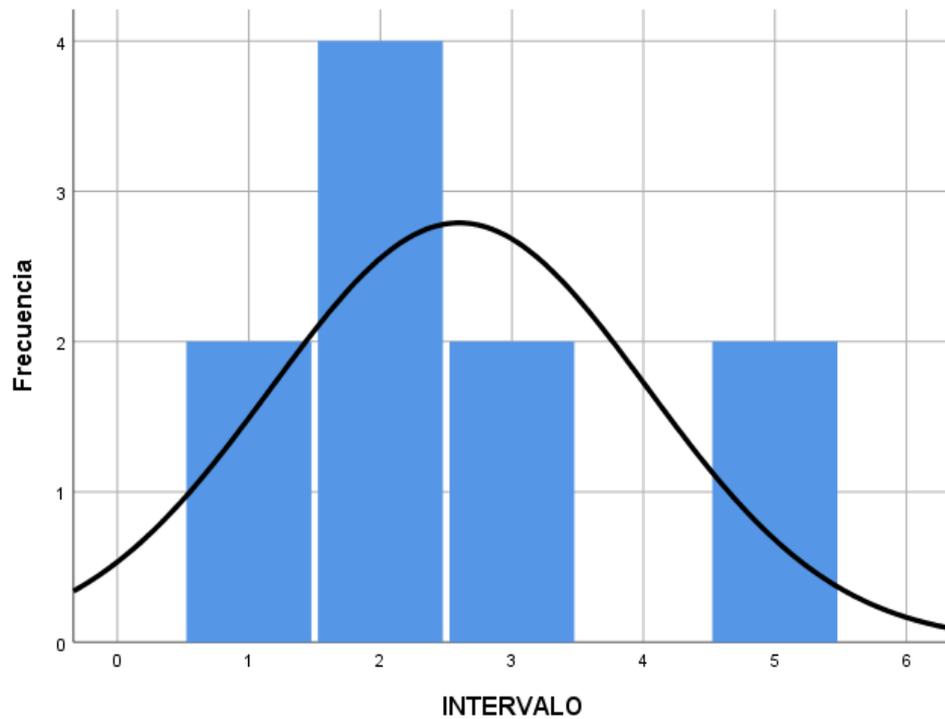


Figura III 6 Histograma de intervalo y frecuencias relativas

comparación de respuestas sísmicas de la cortante

El análisis comparativo de respuestas sísmicas de la cortante en los diferentes niveles y direcciones se detallan en la tabla III 8 donde se observa una clara disminución de la respuesta sísmica (análisis dinámico modal espectral) de la cortante de un estado sin la instalación de aisladores de rodamiento (antes) y un estado con la instalación de aisladores de rodamiento en la edificación (después).

Tabla III 8 Cuadro comparativo de respuestas sísmicas cortante (T)

Número de elemento	nivel y dirección del elemento	sistema base fijo	sistema aislado
1	nivel 1 (sentido x)	420.940	79.961
2	nivel 1 (sentido y)	411.565	68.582
3	nivel 2 (sentido x)	393.320	68.296
4	nivel 2 (sentido y)	384.967	62.599
5	nivel 3(sentido x)	336.737	47.120
6	nivel 3(sentido y)	330.509	45.727
7	nivel 4(sentido x)	248.113	31.822
8	nivel 4(sentido y)	244.541	31.676
9	nivel 5(sentido x)	126.877	19.148
10	nivel 5(sentido y)	125.702	16.624

La norma E.030 en el capítulo 5 requisitos de rigidez, resistencia y ductilidad no indican que requisitos a cumplir, la cortante para un buen comportamiento sísmico, se obtuvo una reducción de este tipo de respuesta esto implica que la energía sísmica lateral queda transformada por la geometría del aislador a una energía potencial (energía generada por la gravedad debido al cambio de posición) en otras palabras existe una reducción de la energía sísmica.

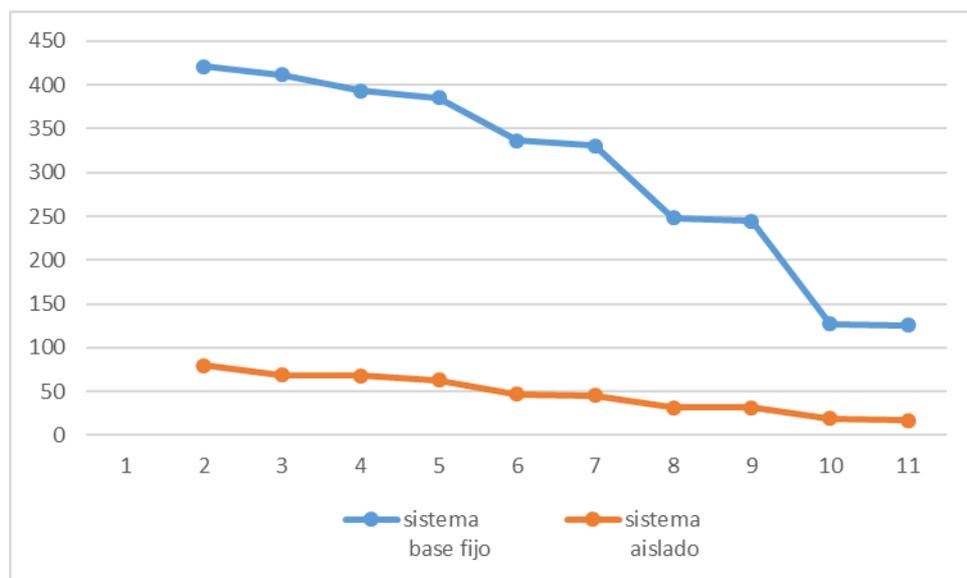


Figura III 7 variación de las cortantes según el sistema de conexión suelo estructura

En la figura III 7 se observa una disminución muy representativa de las cortantes de nivel de un sistema aislado por rodamiento frente a un sistema de base fija, se observa que son mayores las cortantes en los primeros niveles para ambos sistemas (base fija y base aislada) pues se observa una pendiente negativa, además un aspecto importante es que existe una mayor reducción de la cortante en los primeros niveles que en los últimos.

Tabla III 9 tendencia central y dispersión para la muestra del sistema base fija

		Estadístico
Media		302.3280
95% de intervalo de confianza para la media	Límite inferior	222.7589
	Límite superior	381.8971
Mediana		333.6250
Varianza		12372.086
Desv. Desviación		111.22988
Mínimo		125.70
Máximo		420.94
Rango		295.24
asimetría		-0.697
Curtosis		-0.920

Tabla III 10 tendencia central y dispersión para la muestra del sistema aislado

		Estadístico
Media		47.1560
95% de intervalo de confianza para la media	Límite inferior	31.3134
	Límite superior	62.9986
Mediana		46.4250
Varianza		490.466
Desv. Desviación		22.14647
Mínimo		16.62
Máximo		79.96
Rango		63.34
asimetría		0.007
Curtosis		-1.415

En la tabla III 9 y tabla III 10 se muestran los resultados hallados para las medidas de tendencia central como la media , mediana y medidas de dispersión como son el rango la varianza y desviación estándar muestral, se observa una disminución de media de las cortantes hasta en un 84% esto demostraría que existe una alta desconexión suelo estructura frente a fuerzas sísmicas laterales, el coeficiente de variación para un sistema de base fija es de 36.79% mientras que para un sistema de base aislado es de 46.95% lo que implica que existe una mayor dispersión respecto a su media en un sistema de base fija que en un sistema de base aislada, la curtosis negativa en ambos sistemas implica que la curva de distribución es platicurtica (achatada).

3.3 PRUEBAS DE NORMALIDAD

En la figura III 9 se observa el grafico de cuantiles de las diferencias de derivas (distorsión de entrepiso) Q-Q Normal como método gráfico de normalidad distribución para una muestra de diferencias de tamaño n, se dibujan n puntos con los (n+1)-cuantiles de la distribución de comparación, por ejemplo el valor observado de la muestra en el eje horizontal y la distribución normal, en el eje vertical, Figura III 8 es aproximadamente a una línea recta, especialmente cerca de su centro.

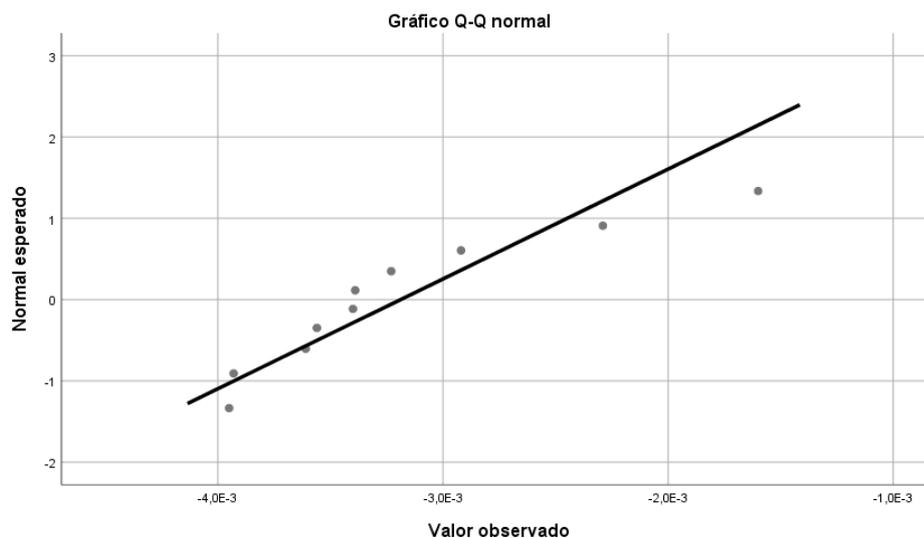


Figura III 8 Gráfico de cuantiles empíricos y cuantiles teórico normal (deriva)

para verificar la normalidad de distribución de las diferencias d_i de la tabla III 11 se usó el test de normalidad de Shapiro Wilk que es apropiado si el número de elementos de la muestra sea menor que 50, los resultados se obtuvieron con el uso del software SPSS programa orientado al análisis estadístico.

Tabla III 11 Prueba de normalidad de distribución

Shapiro-Wilk		
Estadístico	gl	Sig.
0.874	10	0.111

para ello se usó una hipótesis nula y una hipótesis alternativa el nivel de significancia o margen de error de la prueba será $\alpha=0.05$

$$H_0: X \sim N \text{ la serie } X \text{ es normal}$$

$$H_a: X \not\sim N \text{ La serie } X \text{ no es normal}$$

del cálculo observado en el software se observa que $SW_{\text{calculado}}=0.874$ ahora si el $SW_{\text{calculado}} > SW_{\text{tablas}}$ se acepta la hipótesis nula y rechaza la hipótesis alternativa. el SW_{tablas} con $n=10$ y $\alpha=0.05$ es de 0.842, entonces se acepta la hipótesis nula.

se concluye que existe suficiente evidencia estadística para aceptar la hipótesis nula con un nivel de confianza del 95 % por lo tanto d_i sigue una distribución normal

En la figura III 10 se observa el grafico de cuantiles para las diferencias de cortantes Q-Q Normal como método gráfico de normalidad distribución para una muestra de diferencias de tamaño n , se dibujan n puntos con los $(n+1)$ -cuantiles de la distribución de comparación, por ejemplo el valor observado de la muestra en el eje horizontal y la distribución normal, en el eje vertical, se observa que la comparación es aproximadamente a una línea recta, especialmente cerca de su centro.

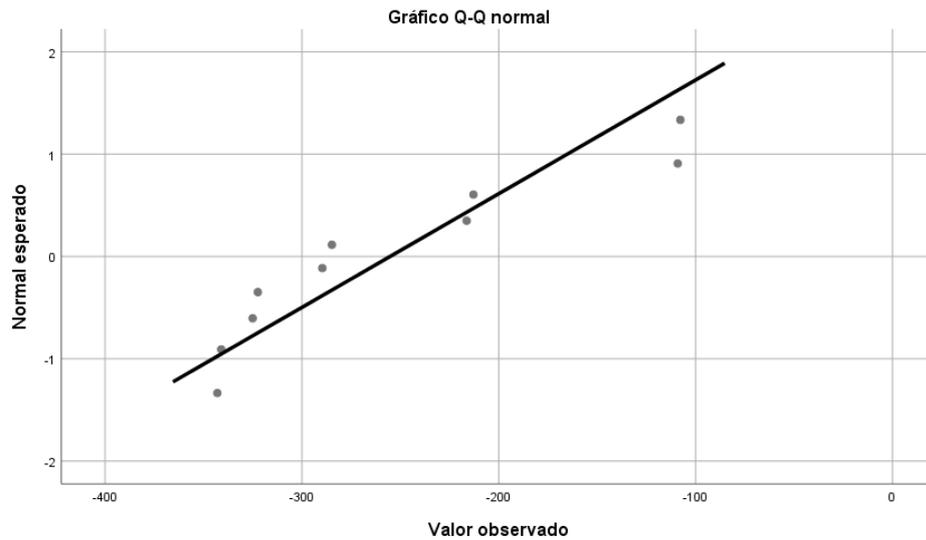


Figura III 9 Gráfico de cuantiles empíricos y cuantiles teórico normal (cortante)

para verificar la normalidad de distribución de las diferencias d_i de la tabla III 12 se usó del test de normalidad de Shapiro Wilk usado siempre que el número de elementos de la muestra sea menor que 50, los resultados obtenidos fueron con el uso del software SPSS programa orientado al análisis estadístico.

Tabla III 12 Prueba de normalidad de distribución

Shapiro-Wilk		
Estadístico	gl	Sig.
0.847	10	0.054

para ello se usó de una hipótesis nula y una hipótesis alternativa el nivel de significancia o margen de error de la prueba será $\alpha=0.05$

$H_0: X \sim N$ la serie X es normal

$H_a: X \not\sim N$ La serie X no es normal

del cálculo observado en el software se observa que $SW_{calculado}=0.847$ ahora si el $SW_{calculado} > SW_{tablas}$ se acepta la hipótesis nula y rechaza la hipótesis alternativa. el SW_{tablas} con $n=10$ y $\alpha=0.05$ es de 0.842, entonces se acepta la hipótesis nula.

se concluye que existe suficiente evidencia estadística para aceptar la hipótesis nula con un nivel de confianza del 95 % por lo tanto *d_i* sigue una distribución normal

CAPÍTULO IV:

PROCESO DE CONTRASTE DE HIPÓTESIS

4.1 PRUEBA DE HIPÓTESIS GENERAL

Análisis inferencial del comportamiento sísmico

Para la definición del comportamiento sísmico se usó los niveles suministrados de VISIÓN 2000 los cuales definen el nivel de comportamiento de la estructura frente a un sismo, Los cuales de acuerdo a los resultados de las derivas inelásticas se interpolan según los rangos de derivas suministrados, en esta definición se plantea 5 niveles de comportamiento.

Tabla IV 1 nivel de comportamiento VISIÓN 2000

COMPORTAMIENTO	VISIÓN 2000 Rango de derivas	comportamiento %
<i>Totalmente operacional</i>	0-0.002	75%-100%
<i>Operacional</i>	0.002-0.005	50%-75%
<i>Seguridad</i>	0.005-0.015	25%-75%
<i>Próximo al colapso</i>	0.0015-0.025	0%-25%
<i>Colapso</i>	> 0.025	-----

De acuerdo a la deriva y los rangos porcentuales se obtuvieron porcentajes de comportamiento, es importante destacar que para el modelamiento de estructuras nuevas se debería aplicar un comportamiento mayor al 50% y estructuras existentes que necesiten reparación mayor al 25%.

Tabla IV 2 comportamiento en términos porcentuales

Numero de elemento	nivel	comportamiento % sistema base fijo	comportamiento % sistema aislado
1	nivel 1	69%	95%
2	nivel 2	57%	92%
3	nivel 3	53%	92%
4	nivel 4	53%	92%
5	nivel 5	57%	93%

Debido a que el número de elementos es menor a 30 se aplicó la prueba de hipótesis t student para la media de las diferencias de dos muestras dependientes, se caracteriza por una medición seguida por una intervención de algún tipo y después otra medida²⁶. Esto se puede llamar un estudio antes y después²⁷, En la tabla IV 2 se muestran el comportamiento de nivel en un edificio dual de 5 niveles al principio antes de colocar los aisladores sísmico de rodamiento y después de colocar los aisladores.

las diferencias d_i pueden calcularse tomando las siguientes medidas descriptivas.

$$\bar{d} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n} = \frac{174}{10} = 17.4$$

donde los elementos de la muestra 1 está conformado por el comportamiento en porcentaje para un sistema base fija y los elementos de la muestra 2 está conformado por el comportamiento en porcentaje de un sistema aislado (aislador de rodamiento).

la desviación estándar muestral de la diferencia

$$S_d = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{110.4708}{4}} = 5.25525$$

²⁶ Suarez, V.A. y Kowalsky M.J. 2007 "Estadística para administración y economía" 11ª Edición, ISBN 958-682-513-2.

²⁷ Wayne W. D. 1991 Bioestadística Base para el análisis de las ciencias de la salud. Tercera Edición. México: Editorial LIMUSA. S.A. ISBN 968-18-0178-4

1. Planteamiento de hipótesis

se planteó una hipótesis nula y alterna donde u_d es la media de las diferencias de la población (después - antes)

<i>Hipótesis</i>	<i>Estadístico de prueba t</i>	<i>Criterio de rechazo de H_0</i>
$H_0 : u_d \leq 0$		
$H_1 : u_d > 0$	$t_o = \frac{\bar{d} - 0}{\frac{S_d}{\sqrt{n}}}$	$t_o > t_{\alpha, n-1}$

$H_0 : u_d \leq 0$ La aplicación de aisladores por su funcionalidad de rodamiento no tendrá efectos significativos en el mejor comportamiento sísmico frente a la condición base fija en edificaciones de cinco niveles.

$H_1 : u_d > 0$ La aplicación de aisladores por su funcionalidad de rodamiento tendrá efectos significativos en el mejor comportamiento sísmico frente a la condición base fija en edificaciones de cinco niveles.

2. Nivel de significancia

Se ha elegido al $\alpha = 0.05$ que equivale al 95 % de confianza de 4 grados de libertad, de la tabla de distribución t student, donde el Valor crítico de t se define como t_c

$$t_c = t_{\alpha, n-1} = t_{0.05, 4} = 2.13185$$

3. Estadístico de prueba

se procede a calcular el estadístico t de prueba

$$t_o = \frac{\bar{d} - 0}{\frac{S_d}{\sqrt{n}}} = \frac{34.7667 - 0}{\sqrt{\frac{110.4708}{4}}} = 14.7929$$

4. Prueba t para la media de diferencias

Tabla IV 3 Prueba t para la media de diferencias de dos muestras dependientes

	Variable 1	Variable 2
Media	92.6	57.8333333
Varianza	1.753125	42.9166667
Observaciones	5	5
Coefficiente de correlación de Pearson	0.98294228	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	4	
Estadístico t_o	14.7929312	
$P(T \leq t)$ una cola	6.0784E-05	
Valor crítico de t (una cola)	2.13184679	
$P(T \leq t)$ dos colas	0.00012157	
Valor crítico de t (dos colas)	2.77644511	

región de aceptación



Figura IV 1 Criterio estadístico región de aceptación

5. Conclusión

En la tabla de distribución t de student se encuentra que el valor crítico de prueba es $t_{0.05,4}=2.132$ por el criterio de rechazo de la hipótesis nula deberá cumplirse que $t_o > t_{\alpha,n-1}$ donde el valor del estadístico t_o deberá estar dentro del margen de la cola derecha (región de rechazo H_o) de la figura IV 1, como $2.132 < 14.7929$, además para esta prueba se observa que el valor de $p=6.078 \cdot 10^{-5}$ tiene un valor muy inferior al valor de significancia de 0.05 con lo cual se puede decir que es estadísticamente significativa rechazar la hipótesis nula H_o , y se acepta la hipótesis alternativa, con esto se concluye que, La aplicación de aisladores por su funcionalidad de rodamiento tendrá efectos significativos en el mejor comportamiento sísmico frente a la condición base fija en edificaciones de cinco niveles.

4.2 PRUEBA DE HIPOTESIS ESPECÍFICA

Análisis inferencial para las derivas de entrepiso

Tabla IV 4 cuadro de derivas de entrepiso en una edificación dual de 5 niveles (cm/cm)

Elemento	Sistema base fijo Antes de colocar aisladores (X_1)	Sistema aislado Después de colocar aisladores (X_2)	Diferencia (después-antes) d_i
1	0.0027	0.00041	-0.00229
2	0.0022	0.00060	-0.00160
3	0.0042	0.00064	-0.00356
4	0.0034	0.00048	-0.00292
5	0.0046	0.00067	-0.00393
6	0.0039	0.00051	-0.00339
7	0.0046	0.00065	-0.00395
8	0.0039	0.00050	-0.00340
9	0.0042	0.00059	-0.00361
10	0.0037	0.00047	-0.00323

PRUEBA DE HIPOTESIS ESPECIFICA 1

Debido a que el número de elementos es menor a 30 se aplicó la prueba de hipótesis t student para la media de las diferencias de dos muestras dependientes, se caracteriza por una medición seguida por una intervención de algún tipo y después otra medida. Esto se puede llamar un estudio "antes" y "después", En la tabla IV 4 se muestran el comportamiento de las derivas de entrepiso en un edificio dual de 5 niveles al principio antes de colocar los aisladores sísmico de rodamiento y después de colocar los aisladores.

las diferencias d_i pueden calcularse tomando las siguientes medidas descriptivas.

$$\bar{d} = \frac{\sum_i^n d_i}{n} = \frac{-0.03188}{10} = -0.003188$$

donde los elementos de la muestra 1 está conformado por las derivas de entrepiso de un sistema base fija y los elementos de la muestra 2 por las derivas de entrepiso de un sistema aislado (aislador de rodamiento).

la desviación estándar muestral de la diferencia

$$S_d = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{4.93516 * 10^{-06}}{9}} = 7.405028 * 10^{-4}$$

6. Planteamiento de hipótesis

se planteó una hipótesis nula y alterna donde μ_d es la media de las diferencias de la población (después - antes)

<i>Hipótesis</i>	<i>Estadístico de prueba t</i>	<i>Criterio de rechazo de Ho</i>
$H_o : u_d \geq 0$	$t_o = \frac{\bar{d} - 0}{\frac{S_d}{\sqrt{n}}}$	$t_o < -t_{\alpha, n-1}$
$H_1 : u_d < 0$		

$H_o : u_d \geq 0$ La aplicación de aisladores por su funcionalidad de rodamiento no tendrá efectos significativos en la disminución de las derivas de entrepiso frente a la condición base fija en edificaciones de cinco niveles.

$H_1 : u_d < 0$ La aplicación de aisladores por su funcionalidad de rodamiento tendrá efectos significativos en la disminución de las derivas de entrepiso frente a la condición base fija en edificaciones de cinco niveles.

7. Nivel de significancia

Se ha elegido al $\alpha = 0.05$ que equivale al 95 % de confianza de 9 grados de libertad, de la tabla de distribución t student, donde el Valor crítico de t se define como t_c

$$t_c = -t_{\alpha, n-1} = -t_{0.05, 9} = -1.83311293$$

8. Estadístico de prueba

se procede a calcular el estadístico t de prueba

$$t_o = \frac{\bar{d} - 0}{\frac{S_d}{\sqrt{n}}} = \frac{-0.003188 - 0}{\frac{\sqrt{4.93516 * 10^{-06}}}{9}} = -13.6141004$$

9. Prueba t para la media de diferencias

Tabla IV 5 Prueba t para la media de diferencias de dos muestras dependientes

	Variable 1	Variable 2
Media	0.000552	0.00374
Varianza	7.95111E-09	6.1378E-07
Observaciones	10	10
Coefficiente de correlación de Pearson	0.525188331	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	9	
Estadístico t_0	-13.61410039	
$P(T \leq t)$ una cola	1.30518E-07	
Valor crítico de t (una cola)	-1.833112933	
$P(T \leq t)$ dos colas	2.61036E-07	
Valor crítico de t (dos colas)	± 2.262157163	

región de aceptación

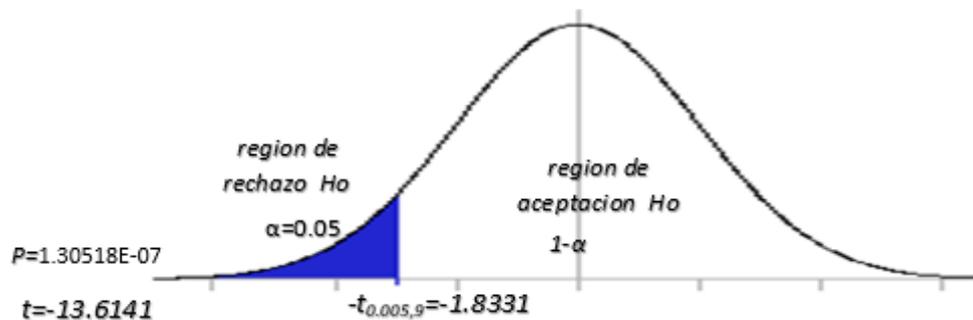


Figura IV 2 Criterio estadístico región de aceptación

10. Conclusión

En la tabla de distribución t de student se encuentra que el valor crítico de prueba es $-t_{0.05,9} = -1.8331$ por el criterio de rechazo de la hipótesis nula debe cumplirse que $t_0 < -t_{\alpha,n-1}$ donde el valor del estadístico t_0 debe estar dentro del margen de la cola izquierda (región de rechazo

Ho) de la figura IV 2, como $-13.6141 < -1.8331$, además para esta prueba se observa que el valor de $p = 1.3051 \cdot 10^{-7}$ tiene un valor muy inferior al valor de significancia de 0.05 con lo cual se puede decir que es estadísticamente significativa rechazar la hipótesis nula Ho, y se acepta la hipótesis alternativa, con esto se concluye que, La aplicación de aisladores por su funcionalidad de rodamiento tuvo efectos significativos en la disminución de deriva de entrepiso frente a la condición base fija en edificaciones de cinco niveles.

De manera alternativa si la intención hubiera sido la de aceptar la hipótesis Ho se tendría que hallar los límites de confianza al 95 % de u_d con valores de t dentro del intervalo $t \geq t_c$, que está dentro de la zona de no rechazo de Ho.

el estadístico t donde el valor de:

$$t = \frac{\bar{d} - u_d}{\frac{S_d}{\sqrt{n}}} \geq t_c$$

despejando u_d de la desigualdad

$$\bar{d} - t_c \left(\frac{S_d}{\sqrt{n}} \right) \geq u_d$$

$$-0.003188 - 1.83311293 * \frac{7.405028 * 10^{-4}}{\sqrt{10}} \geq u_d$$

$$-2.7587 * 10^{-3} \geq u_d$$

con lo que se observa que ningún valor del intervalo de u_d puede cumplir con la condición de nuestra hipótesis $H_o : u_d \geq 0$ y se rechaza la hipótesis nula, visto de otra manera para rechazar la hipótesis nula se tiene que descartar la posibilidad de que algún valor de u_d sea mayor o igual que cero por lo que:

$$0 > \bar{d} - t_c \left(\frac{S_d}{\sqrt{n}} \right) \geq u_d$$

pero el valor del estadístico de prueba t_o está dado por

$$t_o = \frac{\bar{d} - 0}{\frac{S_d}{\sqrt{n}}}$$

despejando \bar{d} y reemplazando en el lado izquierdo de la desigualdad se obtiene:

$$0 > 0 + t_o \left(\frac{S_d}{\sqrt{n}} \right) - t_c \left(\frac{S_d}{\sqrt{n}} \right)$$

$$t_c \geq t_o \text{ entonces}$$

$t_c = -t_{\alpha, n-1} > t_o$ que vendría hacer nuestra conclusión de criterio de rechazo de H_o tal como se especifica en nuestro planteamiento de hipótesis, una manera simplificada para rechazar H_o es comprobar que se cumpla

$$t_c \left(\frac{S_d}{\sqrt{n}} \right) + 0 > \bar{d}$$

$$-1.83311293 * \frac{7.405028 * 10^{-4}}{\sqrt{10}} > -0.003188$$

$$-0.000429 > -0.003188$$

Análisis inferencial para las cortantes de nivel

Tabla IV 6 cuadro de cortantes de nivel en una edificación dual de 5 niveles (T)

Elemento	Sistema base fijo Antes de colocar aisladores (X ₁)	Sistema aislado Después de colocar aisladores (X ₂)	Diferencia (después-antes) d _i
1	420.94	79.961	-340.979
2	411.57	68.582	-342.983
3	393.32	68.296	-325.024
4	384.97	62.599	-322.368
5	336.74	47.120	-289.617
6	330.51	45.727	-284.782
7	248.11	31.822	-216.291
8	244.54	31.676	-212.865
9	126.88	19.148	-107.729
10	125.70	16.624	-109.078

PRUEBA DE HIPOTESIS ESPECIFICA 2

Debido a que el número de elementos es menor a 30 se aplicó la prueba de hipótesis t student para la media de las diferencias de dos muestras dependientes, se caracteriza por una medición seguida por una intervención de algún tipo y después otra medida. Esto se puede llamar un estudio antes y después, En la tabla IV 6 obtenidas del Anexo 02 se muestran el comportamiento de las cortantes de entrepiso en un edificio dual de 5 niveles al principio antes de colocar los aisladores sísmico de rodamiento y después de colocar los aisladores.

las diferencias d_i pueden calcularse tomando las siguientes medidas descriptivas.

$$\bar{d} = \frac{\sum_i^n d_i}{n} = \frac{-2551.7159}{10} = -255.17159$$

donde los elementos de la muestra 1 está conformado por las derivas de entrepiso de un sistema base fija y los elementos de la muestra 2 por las derivas de entrepiso de un sistema aislado (aislador de rodamiento).

la desviación estándar muestral de la diferencia

$$S_d = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{72915.9612}{9}} = 90.0098521$$

11. Planteamiento de hipótesis

se planteó una hipótesis nula y alterna donde u_d es la media de las diferencias de la población (después - antes)

<i>Hipótesis</i>	<i>Estadístico de prueba t</i>	<i>Criterio de rechazo de Ho</i>
$H_o : u_d \geq 0$		
$H_1 : u_d < 0$	$t_o = \frac{\bar{d} - 0}{\frac{S_d}{\sqrt{n}}}$	$t_o < -t_{\alpha, n-1}$

$H_o : u_d \geq 0$ La aplicación de aisladores por su funcionalidad de rodamiento no tendrá efectos significativos en la disminución de las cortantes de nivel frente a la condición base fija en edificaciones de cinco niveles.

$H_1 : u_d < 0$ La aplicación de aisladores por su funcionalidad de rodamiento tendrá efectos significativos en la disminución de las cortantes de nivel frente a la condición base fija en edificaciones de cinco niveles.

12. Nivel de significancia

Se ha elegido al $\alpha = 0.05$ que equivale al 95 % de confianza de 9 grados de libertad, de la tabla de distribución t student, donde el Valor crítico de t se define como t_c

$$t_c = -t_{\alpha, n-1} = -t_{0.05, 9} = -1.83311293$$

13. Estadístico de prueba

se procede a calcular el estadístico t de prueba

$$t_o = \frac{\bar{d} - 0}{\frac{S_d}{\sqrt{n}}} = \frac{-255.17159 - 0}{\frac{\sqrt{72915.9612}}{9}} = -8.96483$$

14. Prueba t para la media de diferencias

Tabla IV 7 Prueba t para la media de diferencias de dos muestras dependientes

	Variable 1	Variable 2
Media	302.3271	47.15551
Varianza	12371.8696	490.45181
Observaciones	10	10
Coeficiente de correlación de Pearson	0.96629806	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	9	
Estadístico t_o	-8.9648344	
P(T<=t) una cola	4.4079E-06	
Valor crítico de t (una cola)	-1.83311293	
P(T<=t) dos colas	8.8158E-06	
Valor crítico de t (dos colas)	±2.26215716	

región de aceptación

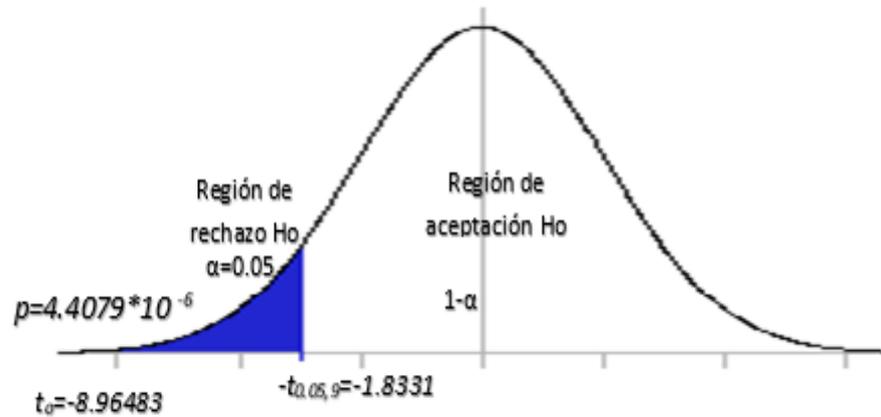


Figura IV 3 Criterio estadístico región de aceptación

15. Conclusión

En la tabla de distribución t de student se encuentra que el valor crítico de prueba es $-t_{0.05,9}=-1.8331$ por el criterio de rechazo de la hipótesis nula debe cumplirse que $t_o < -t_{\alpha,n-1}$ donde el valor del estadístico t_o debe estar dentro del margen de la cola izquierda (región de rechazo Ho) de la figura IV 3, como $-8.9648344 < -1.8331$, además para esta prueba se observa que el valor de $p=4.4079*10^{-6}$ tiene un valor muy inferior al valor de significancia de 0.05 con lo cual se puede decir que es estadísticamente significativa rechazar la hipótesis nula Ho, y se acepta la hipótesis alternativa, con esto se concluye que, La aplicación de aisladores por su funcionalidad de rodamiento tuvo efectos significativos en la disminución de deriva de entrepiso frente a la condición base fija en edificaciones de cinco niveles.

CAPÍTULO V:

5 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Al evaluar y calificar los resultados se observó que la aislación sísmica implica un aumento del periodo de vibración, esto se manifiesta en la estructura como una disminución de la aceleración espectral y fuerzas sísmicas, esta tendencia de aumento del periodo de vibración según Farzad y Kelly debe estar en un rango de 2 a 3 segundos, esto se constata según los resultados obtenidos, para el primer modo de vibración en la dirección X de $T=0.466$ seg. a $T=3.26$ seg. y en la dirección Y de $T=0.43$ seg. a $T= 3.313$ seg. el incremento del periodo es de 2.79 y 2.88 segundos en las direcciones X y Y respectivamente, es decir un aumento de 2.8 seg aprox. estos resultados son cónsonos con el marco teórico, esto implica que si existe una aislación sísmica de acuerdo al análisis sísmico espectral en ambas direcciones, de esa manera se evidencia una alta disminución de las aceleraciones espectrales en ambas direcciones y esto implicó una reducción de las respuestas dinámicas y con ello un mejor comportamiento sísmico. Por ello se alcanza una alta desconexión del suelo estructura frente a movimientos sísmicos, esto denota que la edificación pasa de un nivel de comportamiento operacional a totalmente operacional, si bien con el primero se contemplan daños de agrietamiento en elementos estructurales en el segundo los daños estructurales y no estructurales serán nulos.

Una de las limitaciones que se tuvo es que la normativa E0.30 no detalla de manera descriptiva los niveles de comportamiento, es por eso que se utilizó las recomendaciones de VISIÓN 2000 esto muestra una deficiencia de nuestra norma, es importante destacar que si bien en la presente tesis solo se enfoca en las implicaciones de forma y puntos de aplicación de las fuerzas en esta clase de aisladores de rodamiento, el enfoque es innovador ya que tiene altas repercusiones

y no existen estudios previos, esto no desmerece que se hagan nuevos estudios con la aplicación de elementos disipadores de energía que acompañen en el diseño de esta clase de aisladores, además de hacer pruebas de laboratorio en edificaciones reales en simuladores de sismos a escala natural, además de estudios de costos con respecto a otros tipos de aisladores.

En la presente tesis no se consideró el aspecto de disipación energética sísmica, aunque la mayoría de aisladores disipan la energía sísmica por ductilidad de sus elementos, por fricción, o por amortiguamiento viscoso, etc. es necesario ser enfático que esta clase de aisladores disipan energía sísmica por medio de la pérdida de calor en las superficies de contacto, pero la función principal de su enfoque es la de transformar la energía sísmica a una energía potencial, el uso de materiales disipadores de energía sísmica como componentes propios llevaría a nuevas hipótesis, pero se desea mencionar algunas pautas, si se observa las gráficas de los aisladores existe un pequeño desplazamiento vertical del orden de milímetros, en realidad gran parte de la energía sísmica se utiliza en mover toda la edificación en dirección a este desplazamiento vertical. Esta aceleración vertical añadida está en función de la aceleración horizontal, en otros términos, existe una transformación de la energía sísmica en energía potencial, cabe recalcar que existe aceleraciones verticales propias del sismo pero de manera general estas son pequeñas comparadas a las aceleraciones horizontales, estas últimas son las que en realidad producen los daños sísmicos.

CONCLUSIONES

Según los resultados obtenidos con el diseño normativo sismo-resistente de un sistema dual y el modelo con aisladores de rodamiento de superficie parabólico. Se puede concluir que:

PRIMERO: Al realizar un análisis de los aisladores de base por su funcionalidad de rodamiento se obtuvieron efectos altamente significativos en el mejor comportamiento sísmico frente a la condición base fija en edificaciones de cinco niveles, lográndose un aumento del comportamiento sísmico porcentual promedio de 57.8% a 92.8%, por ello el tratamiento en la edificación provoca una disminución de las aceleraciones en promedio de 0.15g a 0.0225g en ambas direcciones, estos resultados muestran que existe una disminución en las demandas sísmicas y esto influye directamente en las deformaciones.

SEGUNDO: Que al Realizar el análisis de los efectos del aislador por su funcionalidad de rodamiento se obtuvieron resultados altamente significativos en la disminución de las derivas de entrepiso frente a la condición base fija en edificaciones de cinco niveles, la reducción de la distorsión de entrepiso de 0.0037 a 0.00055, hubo una disminución del 85%, además el beneficio que implica esto en los requerimientos de rigidez, resistencia y ductilidad estipulados en la norma E.030 capítulo 5.

TERCERO: Que al Realizar el análisis de los efectos del aislador por su funcionalidad de rodamiento se obtuvieron resultados altamente significativos en la disminución de las cortante de nivel frente a la condición base fija en edificaciones de cinco niveles, Este aislamiento por funcionalidad de rodamiento permite un control pasivo de la vibración de la estructura lo que con lleva a una reducción tanto de la energía como demandas sísmica y esto queda manifiesto como disminución de 302.33 Ton a 47.16 Ton de las

cortantes de nivel de un 84 % de acuerdo al análisis sísmico. La fuerza cortante en la base es la que gobierna el diseño de elementos que soportan las fuerzas laterales.

RECOMENDACIONES

Concluida la presente investigación, se considera necesario dar algunas recomendaciones:

PRIMERO: Se recomienda realizar la modificación de la norma E-030 Diseño Sismo resistente 2016, Tabla N° 11 Límites de distorsión de entre piso, la cual es indiferente para una edificación esencial, importante o común. Por ejemplo si hablamos solo de edificios de concreto, una edificación esencial (Hospitales, Estaciones de bomberos, Universidades ,etc.) en presencia de un sismo debería admitir menor deriva que un edificio común, en otras palabras un buen comportamiento, si la comparamos con VISIÓN 2000 una edificación esencial debería estar dentro de un rango de deriva de totalmente operacional, una edificación importante en un rango operacional y una edificación común en seguridad de vida , pero ninguna cercana al colapso, claro está que previamente debería hacerse un estudio a determinar que valores deberían tomar estos rangos de deriva, lo cual hace en cierta manera deficiente a nuestra norma, para completar lo explicado anteriormente, esto sería poco, si es que no contempla que se verifique que la ductilidad de diseño sea mayor o igual que la ductilidad de demanda según el método a aplicar y de esa manera se garantice el valor de la deriva inelástica.

SEGUNDO: Se debe tener cuidado en los detalles del diseño de las superficies, teniendo presente que no deben ocurrir un deslizamiento por fricción dinámica, para que los aisladores trabajen tal como se les diseño. Además, los elementos deben estar diseñados para desarrollar desplazamientos según el máximo sismo esperado. Si esto no ocurriese, podría ocasionar el colapso de la estructura. Por ende, uno de los métodos para mejorar el comportamiento de la edificación es el aislamiento sísmico mediante aisladores. Por otro lado, mediante ensayos con el uso de este tipo de aisladores se

podrá asegurar principalmente el funcionamiento de aquellas estructuras vitales en caso de una emergencia, cambiando el objetivo principal por el de mantener la operatividad de la estructura. En la actualidad puede ser utilizada en edificios, centros educativos, puentes y otros, además de aquellos cuyo colapso puede causar un riesgo adicional como centrales nucleares, grandes hornos, fábricas de materiales inflamables y tóxicos.

Para el modelamiento de los aisladores de rodamiento se debe ser minucioso al insertar los parámetros de los aisladores. Además de verificar la colocación de estos en la base de cada columna en el programa Robot Structural.

TERCERO: Se debe tener en cuenta que los aisladores generalmente tienen garantizados una vida útil de 50 años, se deben hacer estudios sobre los tipos de materiales en la construcción de este tipo de aisladores de rodamiento, así como sobre la aplicación de este tipo de aisladores de rodamiento en combinación de otros aisladores de base convencionales como son los elastoméricos o de fricción.

En la presente Tesis el enfoque no está basado en la búsqueda de nuevos materiales capaces de generar amortiguamiento ya sea viscoso, visco elástico, de fricción o de resorte si no en la búsqueda de formas geométricas y posición de las fuerzas de manera que se pueda controlar y disminuir la rigidez, el amortiguamiento que se genera es por pérdida de calor entre las superficies de contacto en alrededor del 10% no se debe olvidar que la estructura en si posee un amortiguamiento de alrededor del 5% que sumado al amortiguamiento del aislador se logra un amortiguamiento del 15%, Además de lo mencionado anteriormente es necesario que se realicen estudios del aumento de los % de amortiguamiento, según los materiales a utilizar en el aislador de rodamiento de manera que se disipe la energía en calor o degradación de los materiales en

cada uno de los lazos o ciclos histéricos, estos ensayos podrán realizarse mediante ensayos reales o mediante software avanzados, es importante destacar que el fenómeno de amortiguamiento es un tema muy complejo y no entendido en su totalidad, hemos presentado solo un primer paso de lo que se viene dando como avance en el tema estructural en el Perú, se sugiere a futuras generaciones que sigan con la investigación del tema de aisladores, considerando, por ejemplo edificio con sótanos, edificios de gran altura etc.

FUENTES DE INFORMACIÓN

1. Park R. y Paulay T. Estructuras de Concreto Reforzado. Primera Edición. México: Editorial LIMUSA S. A., 1983 593 p. ISBN 968-18-0100-8
2. Gallegos H. y Casabone C. Albañilería estructural. Tercera Edición. Lima: Editorial de la Pontificia Universidad Católica del Perú, 2005 394 p. ISBN 9972-42-754-4
3. Barbat Alex H. Cálculo sísmico de las estructuras. Primera Edición. Barcelona: Editores Técnicos Asociados, 1982. 18 p. ISBN 84-7146-237-0
4. McCormac, Jack C. Análisis de Estructuras, Método Clásico y Matricial. Cuarta Edición. México: Alfaomega Grupo Editor, S. A., 2010 33 p. ISBN 978-607-7854-56-2
5. Aguiar R. F. Análisis Sísmico de Edificios. Primera Edición. Quito: Centro de Investigaciones Científicas, 2008. 7 p. ISBN-978-9978-30-104-3
6. OPS [Organización Panamericana de La Salud] Fundamentos Para La Mitigación de Desastres en Establecimientos de Salud. Segunda Edición. Washington, D.C, Biblioteca de la OPS. 2004 14 p. ISBN 92-75-32304-6
7. Colindres Selva R. Dinámica de suelos y estructuras aplicada a la ingeniería sísmica., Primera Edición. México: Editorial Limusa, 1983. 16-17 p. ISBN 968-18-1484-3
8. Paz, Mario William. Dinámica Estructural, Teoría y Cálculo Quinta Edición. Barcelona: Editorial Reverte, S.A., 2004 580 p. ISBN 1-4020-7667-3
9. Aguiar, R. "et al." Aisladores de Base Elastoméricos y FPS. Primera Edición. Quito: Centro de Investigaciones Científicas. 2008 3 p. ISBN 978-9978-30-104-3

10. Rochel Awad R. Análisis y diseño sísmico de edificios. Segunda Edición. Medellín: Editorial Universidad EAFIT, 2012 41 p. ISBN: 978-958-720-117-8
11. Dowrick, D. J. Diseño de Estructuras Resistentes a Sismos Para Ingenieros y Arquitectos. Primera Edición. México: Editorial LIMUSA S. A., 1990 13 P. ISBN 968-18-1627-7
12. Zeevaert, L. Interacción Suelo-Estructura de Cimentaciones Superficiales y Profunda, Sujeta a Cargas Estáticas y Sísmicas. Primera Edición. México: Editorial LIMUSA S.A., 1980 11 p. ISBN 968-18-1237-9
13. Arriagada, J. A. (2005). Aislación Sísmica de un Edificio de Oficinas de Siete Pisos. Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias de la Ingeniería. Valdivia: Universidad Austral de Chile.
14. UBC. (1997). Appendix Chapter 16: Earthquake Regulations for Seismic-Isolated Structures. Uniform Building Code. California.
15. De la Llera, J. C. (2011). Aisladores Sísmicos en el Hospital Militar. ArquitecturaMOP, 10.
16. ASCE. (2010). Seismic Design Requirements for Seismically Isolated Structures. En Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures (págs. 165-177). Reston, Virginia, United States of America: Engineers, American Society of Civil.
17. Korswagen, P. A., Arias, J. C., & Huaranga, P. G. (2012). Análisis y diseño de estructuras con aisladores sísmicos en el Perú. Tesis, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima.
18. Talavera G. Alvaro. (2017) Experiencia Nacional en Edificaciones con sistemas de Protección Sísmica. Página oficial del Ministerio de vivienda
<http://www3.vivienda.gob.pe/dnc/archivos/difusion/eventos/2017>

19. Abarca. R. Aisladores sísmicos de VULCO suman otro hospital en Chile y llegan a Perú En: Ediciones especiales [en línea]. Santiago de Chile: Pedro Álvarez, 22 abril 2015. [consulta: 8 de septiembre de 2018]. Disponible en: <http://www.edicionesespeciales.elmercurio.com/destacadas/detalle/index.asp?idnoticia=201504221885235&idcuerpo>
20. ISMAIL, Mohammed. *An Innovative Isolation Device for Aseismic Design*. Jose Rodellar (dir.). Tesis Doctoral Inédita. Universidad Politécnica de Catalunya, 2009
21. García Reyes E. *Dinámica Estructural Aplicada al Diseño Sísmico*. Segunda Edición. Bogotá: Editorial Universidad de los Andes, 1998. 11 p. ISBN 958-33-0768-8
22. Muños Díaz E. *Ingeniería de puentes colapso, inspección especial, socavación, Vulnerabilidad sísmica y capacidad de carga tomo II*. Primera Edición. Bogotá: Editorial pontificia Universidad Javeriana, 2012 196-197 p. ISBN 978-958-716-400-8
23. Vallecilla C. R. *Fuerzas Sísmicas Principios y Aplicaciones*. Primera Edición Bogotá: Editorial KIMPRES LTDA, 2003 38 p. ISBN 958-33-4572-5
24. San Bartolomé, A. *Análisis de Edificios*. Segunda Edición. Lima: Editorial de la Pontificia Universidad Católica del Perú, 1999 239 p. ISBN 9972-42-112-0
25. Chopra, Anil K. *Dynamics of structures; theory and applications to earthquake engineering*. Tercera Edición. California: Editorial Prentice-Hall. Inc, 1995. 207 p. ISBN 0-13-855214-2.
26. Suarez, V.A. y Kowalsky M.J. "Estadística para administración y economía" 11ª Edición, 2007 ISBN 958-682-513-2.

27. Wayne W. D. Bioestadística Base para el análisis de las ciencias de la salud. Tercera Edición. México: Editorial LIMUSA. S.A., 1991 256 p. ISBN 968-18-0178-4
28. FEMA 273 and 274 [1997]; "NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings," Federal Emergency Management Agency (FEMA), Washington, DC.
29. FEMA 450 - Commentary. (2004). Chapter 13: Seismically Isolated Structure Design Requirements. Washington, D.C.: Federal Emergency Management Agency
30. FEMA 451. (2006). NEHRP Recommended Provisions: Design Examples, Chapter 11: Seismically Isolated Structures. (Building Seismic Safety Council, & C. A. Kircher, Edits.) Washington, D.C.: Federal Emergency Management Agency. Recuperado el 14 de Noviembre de 2014
31. Ministerio de Vivienda y Construcción. Norma E.030 Diseño Sismo resistente: 2016
32. SEAOC Visión 2000 Committee [1995]; Performance-Based Seismic Engineering, Report prepared by Structural Engineers Association of California, Sacramento, California.
33. ATC 40, Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings, Vol. 1, 2. Applied Technology Council, november, 1996.

ANEXOS

ANEXO N° 01

Matriz de consistencia
EFECTOS DEL AISLADOR POR SU FUNCIONALIDAD DE RODAMIENTO FRENTE A LA CONDICIÓN DE BASE FIJA EN EL COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE ESTRUCTURAS DE EDIFICACIONES DE 5 NIVELES AREQUIPA 2017

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPOTESIS	VARIABLE	DIEMENCIONES	INDICADORES	METODOLOGIA
<p>Problema General ¿Cuál es el efecto del aislador por su funcionalidad de rodamiento en el comportamiento sísmico frente a la condición de base fija en edificaciones de cinco niveles Arequipa 2017?</p> <p>Problemas Específicos ¿Cómo es el análisis de los efectos del aislador por su funcionalidad de rodamiento en la deriva de entrepiso frente a la condición de base fija en edificaciones de cinco niveles?</p> <p>¿Cómo es el análisis de los efectos del aislador por su funcionalidad de rodamiento de la cortante de nivel frente a la condición de base fija en edificaciones de cinco niveles?</p>	<p>Objetivo General Analizar los efectos del aislador por su funcionalidad de rodamiento en el comportamiento sísmico frente a la condición de base fija en edificaciones de cinco niveles Arequipa 2017</p> <p>Objetivos Específicos -Realizar el análisis de los efectos del aislador por su funcionalidad de rodamiento en la deriva de entrepiso frente a la condición de base fija en edificaciones de cinco niveles. -Realizar el análisis de los efectos del aislador por su funcionalidad de rodamiento de la cortante de nivel frente a la condición de base fija en edificaciones de cinco niveles.</p>	<p>Hipótesis General El uso de aisladores por su funcionalidad de rodamiento tendrá efectos altamente significativos en el mejor comportamiento sísmico frente a la condición base fija en edificaciones de cinco niveles Arequipa 2017.</p> <p>Hipótesis Específicas -La aplicación de aisladores por su funcionalidad de rodamiento tendrá efectos altamente significativos en la disminución de deriva de entrepiso frente a la condición base fija en edificaciones de cinco niveles. -La aplicación de aisladores por su funcionalidad de rodamiento tendrá efectos altamente significativos en la disminución de la cortante de nivel frente a la condición base fija en edificaciones de cinco niveles.</p>	<p>Variable independiente (X1) Aislador por su funcionalidad de rodamiento</p> <p>Variable independiente (X2) condición de base fija</p> <p>Variable dependiente (Y) Comportamiento sísmico de la estructura</p>	<p>Grado de desconexión suelo-estructura</p> <p>Grado de fijación suelo-estructura</p> <p>Deriva de entrepiso</p> <p>Cortante de nivel</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Cero grados de libertad • Grado de libertad al desplazamiento en la dirección x, y, z • Grado de libertad a la rotación en la dirección x, y, z <ul style="list-style-type: none"> • Cero grados de libertad • Grado de libertad al desplazamiento en la dirección x, y, z • Grado de libertad a la rotación en la dirección x, y, z <p>Cm/Cm</p> <p>Ton</p>	<p>TIPO. Cuantitativo Aplicativo experimental NIVEL: aplicativo DISEÑO. Diseño Factorial MÉTODO: Deductivo-inductivo POBLACIÓN: edificios de cinco niveles ubicada en el Distrito Miraflores, Provincia de Arequipa Departamento Arequipa. MUESTRA: La muestra se considerará una estructura específica a portcada de 5 niveles calle Francisco Bolognesi manzana K4 Distrito Miraflores, Provincia de Arequipa Departamento Arequipa Método de muestreo no probabilístico TECNICA: -Observación. -Ensayos (Modelos matemáticos) INSTRUMENTO: -Ficha observacional -Ficha de resultado del modelamiento matemático PROCEDIMIENTO: Análisis descriptivo Análisis inferencial (T-student)</p>

ANEXO 02

Instrumentos de recolección de datos

FICHA OBSERVACIONAL N° 1

SECCION Y CARACTERISTICAS DEL AISLADOR POR COLUMNA

Tipo	Sección (cm)	Peso sísmico aislador (T)	características aislador de función parabólica		
			a(cm)	K1 (T/m)	K2 (T/m)
C1	25X30	35	16	16.41	41.13
C2	25X30	35	16	16.41	41.13
C3	25X40	54	16	25.31	63.45
C4	25X40	62	16	29.06	72.85
C5	25X40	62	16	29.06	88.13
C6	P1	127	16	59.53	149.23
C7	P1-P2	75	16	35.16	88.13
C8	Ø 30	48	16	22.03	55.23
C9	Ø 40	88	16	41.25	103.4
C10	P1-P2	88	16	41.25	103.4
C11	30X40	62	16	29.06	72.85
C12	30X40	95	16	44.53	111.63
C13	30X40	62	16	29.06	72.85
C14	30X40	54	16	25.31	63.45
C15	30X40	95	16	44.53	111.63

FICHA N° 1 DE RESULTADO DEL MODELAMIENTO EN ROBOT STRUCTURAL

Resultado del modelamiento en robot structural				
Desplazamientos totales				
NIVEL	sistema base fija		sistema base aislada	
	Ux(cm)	Uy(cm)	Ux(cm)	Uy(cm)
1	0.20334	0.16505	5.783255	5.485328
2	0.41791	0.3392	5.816145	5.509945
3	0.65652	0.53725	5.850755	5.536197
4	0.8932	0.73871	5.884014	5.561921
5	1.11003	0.9282	5.914389	5.58591

FICHA N° 2 DE RESULTADO DEL MODELAMIENTO EN ROBOT STRUCTURAL

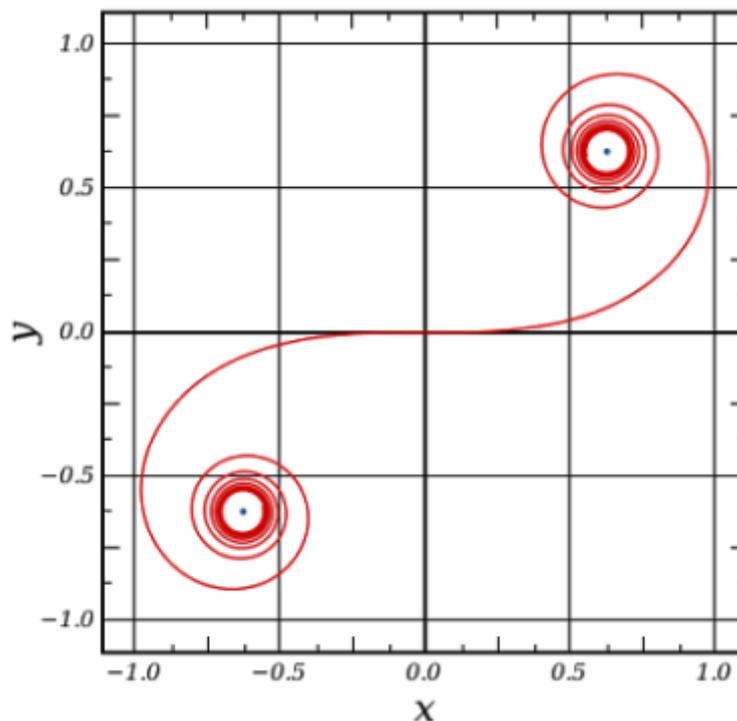
Resultado del modelamiento en robot structural				
Cortante de nivel				
NIVEL	sistema base fija		sistema base aislada	
	Vx(T)	Vy(T)	Vx(T)	Vy(T)
1	420.94	411.565	79.961	68.582
2	393.32	384.967	68.296	62.599
3	336.737	330.509	47.12	45.727
4	284.113	244.541	31.822	31.676
5	126.877	125.702	19.148	16.624

ANEXO 03

LA ESPIRAL CLOTOIDE DE CORNU

A pesar de ser conocida por Euler en 1744 que la empleó para resolver un problema planteado por Bernoulli, quien probablemente la planteó allá por 1696, su nombre hace honor a Marie--Alfred Cornú, físico francés (1841-1902) que la usó en sus estudios sobre la difracción de la luz

Una curva plana en forma de espiral doble, con simetría central. Una curva cicloide que tiene la característica o propiedad que su curvatura en cualquier punto es proporcional a la distancia a lo largo de la curva medida desde el origen.



La ecuación básica tiene la forma: $R \cdot L = k^2$

L : es la longitud de la curva desde el origen

R : es el radio de la curva cuando la curva tiene una longitud L

k : es un valor constante para cualquier combinación de L y R , también se denomina parámetro de la curva.

sea (x,y) el par ordenado que define un punto cualquiera en la espiral clotoide y sea θ el ángulo entre la recta tangente y la horizontal tenemos la siguiente relación para un dL

$$dx = dL * \cos(\theta)$$

$$dy = dL * \sin(\theta)$$

integrando ambos lados de la igualdad

$$x = \int_0^L \cos(\theta) * dL$$

$$y = \int_0^L \sin(\theta) * dL$$

utilizando la expansión polinomial en series de Taylor

$$f(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{f^{(n)}(a)}{n!} (x-a)^n$$

donde f una función cuyas n derivadas existen y a el punto alrededor del cual más se aproxima la serie a la función entonces:

$$\cos(\theta) = 1 - \frac{\theta^2}{2!} + \frac{\theta^4}{4!} - \frac{\theta^6}{6!} + \dots$$

$$\sin(\theta) = \theta - \frac{\theta^3}{3!} + \frac{\theta^5}{5!} - \frac{\theta^7}{7!} + \dots$$

de la relación $R*L = k^2$ obtenemos

$$\theta = \frac{L^2}{2 * K^2}$$

reemplazando en las integrales obtenemos

$$x = \int_0^L \cos\left(\frac{L^2}{2 * K^2}\right) * dL = \int_0^L \left[1 - \frac{\left(\frac{L^2}{2 * K^2}\right)^2}{2!} + \frac{\left(\frac{L^2}{2 * K^2}\right)^4}{4!} - \frac{\left(\frac{L^2}{2 * K^2}\right)^6}{6!} + \dots \right] * dL$$

$$y = \int_0^L \sin\left(\frac{L^2}{2 * K^2}\right) * dL = \int_0^L \left[\frac{\left(\frac{L^2}{2 * K^2}\right)^3}{3!} - \frac{\left(\frac{L^2}{2 * K^2}\right)^5}{5!} + \frac{\left(\frac{L^2}{2 * K^2}\right)^7}{7!} - \dots \right] * dL$$

$$x = L * \left(1 - \frac{1}{10} * \left(\frac{L^2}{2 * K^2}\right)^2 + \frac{1}{216} * \left(\frac{L^2}{2 * K^2}\right)^4 - \frac{1}{9360} * \left(\frac{L^2}{2 * K^2}\right)^6 \dots \right)$$

$$y = L * \left(\frac{1}{3} * \left(\frac{L^2}{2 * K^2}\right) - \frac{1}{7 * 3!} * \left(\frac{L^2}{2 * K^2}\right)^3 + \frac{1}{11 * 5!} * \left(\frac{L^2}{2 * K^2}\right)^5 - \frac{1}{15 * 7!} * \left(\frac{L^2}{2 * K^2}\right)^7 \dots \right)$$

$$\frac{dy}{dx} = \frac{322560 * L^2 * K^{12} - 13440 * L^6 * K^8 + 168 * L^{10} * K^4 - L^{14}}{645120 * K^{14} - 80640 * L^4 * K^{10} + 1680 * L^8 * K^6 - 14 * L^{12} * K^2}$$

$$s = L$$

si se reemplaza en las siguientes ecuaciones

$$u_B = s - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2}} \left(X + (Y - \bar{r}) * \left(\frac{dy}{dx}\right) \right)$$

$$F = \frac{P * \left(X + Y * \frac{dy}{dx} - \bar{r} * \frac{dy}{dx} \right)}{\left(X * \frac{dy}{dx} - Y + \bar{r} \right)}$$

se podrá obtener las siguientes tablas

clotoide para $k=1.5m$

uB (cm)	F (Tn)					X (cm)				
	K=1.5m P=1Tn					K=1.5m				
	$\bar{r}=0.25m$	$\bar{r}=0.5m$	$\bar{r}=1m$	$\bar{r}=1.5m$	$\bar{r}=2m$	$\bar{r}=0.25m$	$\bar{r}=0.5m$	$\bar{r}=1m$	$\bar{r}=1.5m$	$\bar{r}=2m$
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	2.028	0.787	0.278	0.15	0.096	58.591	42.209	29.943	24.46	21.191
4	2.353	1.044	0.379	0.203	0.13	80.026	59.246	42.325	34.601	29.964
6	2.396	1.195	0.449	0.241	0.153	94.62	71.876	51.73	42.353	36.698
8	2.347	1.289	0.502	0.27	0.171	105.66	82.142	59.616	48.872	42.362
10	2.268	1.345	0.544	0.293	0.186	114.49	90.801	66.475	54.58	47.345
12	2.183	1.377	0.578	0.313	0.198	121.85	98.332	72.629	59.731	51.838
14	2.099	1.392	0.606	0.329	0.208	128.13	104.98	78.224	64.447	55.963
16	2.019	1.396	0.629	0.343	0.216	133.57	110.93	83.37	68.815	59.801
18	1.945	1.392	0.648	0.356	0.224	138.39	116.31	88.152	72.9	63.38
20	1.876	1.383	0.663	0.366	0.23	142.7	121.19	92.614	76.748	66.77
22	1.812	1.369	0.676	0.375	0.236	146.61	125.68	96.8	80.375	69.979
24	1.753	1.353	0.686	0.383	0.24	150.13	129.8	100.75	83.837	73.034
26	1.699	1.335	0.694	0.389	0.244	153.36	133.64	104.49	87.122	75.961
28	1.648	1.316	0.699	0.395	0.248	156.34	137.2	108.03	90.275	78.77
30	1.6	1.296	0.704	0.4	0.251	159.1	140.51	111.41	93.297	81.472
32	1.555	1.275	0.707	0.404	0.253	161.66	143.62	114.63	96.195	84.069
34	1.513	1.255	0.709	0.407	0.255	164.06	146.54	117.71	98.99	86.58
36	1.474	1.234	0.71	0.41	0.257	166.29	149.29	120.66	101.69	89.01
38	1.437	1.213	0.71	0.412	0.258	168.37	151.88	123.47	104.3	91.366
40	1.402	1.193	0.709	0.413	0.259	170.33	154.33	126.18	106.81	93.652
42	1.368	1.173	0.707	0.414	0.26	172.2	156.66	128.78	109.25	95.874
44	1.336	1.153	0.705	0.415	0.26	173.95	158.87	131.29	111.61	98.036
46	1.307	1.134	0.702	0.415	0.26	175.59	160.96	133.7	113.91	100.14
48	1.278	1.115	0.698	0.415	0.26	177.16	162.94	136.02	116.14	102.19
50	1.25	1.096	0.695	0.415	0.26	178.65	164.84	138.26	118.3	104.18
52	1.224	1.078	0.69	0.414	0.259	180.05	166.67	140.42	120.41	106.13
54	1.198	1.06	0.686	0.413	0.258	181.41	168.39	142.51	122.46	108.04
56	1.174	1.043	0.681	0.412	0.257	182.66	170.04	144.54	124.46	109.9
58	1.151	1.025	0.676	0.41	0.256	183.89	171.63	146.5	126.41	111.73
60	1.129	1.009	0.67	0.409	0.255	185.04	173.14	148.39	128.3	113.5

clotoide para $k=1m$

uB (cm)	F (Tn)				X (cm)			
	K=1m P=1Tn				K=1m			
	$\bar{r}=0.25m$	$\bar{r}=0.5m$	$\bar{r}=1m$	$\bar{r}=1.5m$	$\bar{r}=0.25m$	$\bar{r}=0.5m$	$\bar{r}=1m$	$\bar{r}=1.5m$
0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	1.386	0.516	0.179	0.095	39.341	28.176	19.98	16.319
4	1.674	0.687	0.241	0.127	54.247	39.65	28.23	23.07
6	1.758	0.792	0.282	0.148	64.648	48.241	34.54	28.25
8	1.758	0.861	0.313	0.163	72.615	55.288	39.82	32.601
10	1.724	0.906	0.337	0.175	79.08	61.311	44.45	36.427
12	1.675	0.936	0.355	0.184	84.458	66.589	48.6	39.876
14	1.622	0.954	0.371	0.191	89.068	71.291	52.39	43.04
16	1.567	0.963	0.383	0.197	93.094	75.52	55.88	45.975
18	1.514	0.965	0.392	0.201	96.611	79.358	59.14	48.721
20	1.462	0.963	0.4	0.205	99.781	82.878	62.2	51.311
22	1.414	0.958	0.405	0.208	102.6	86.119	65.07	53.766
24	1.368	0.949	0.41	0.209	105.17	89.109	67.79	56.097
26	1.324	0.939	0.413	0.21	107.51	91.888	70.37	58.331
28	1.283	0.927	0.414	0.211	109.66	94.486	72.84	60.462
30	1.244	0.914	0.415	0.211	111.63	96.904	75.18	62.516
32	1.207	0.901	0.415	0.21	113.45	99.167	77.42	64.491
34	1.172	0.886	0.415	0.21	115.13	101.3	79.58	66.394
36	1.139	0.872	0.413	0.208	116.7	103.3	81.64	68.236
38	1.107	0.857	0.411	0.207	118.16	105.19	83.62	70.021
40	1.077	0.841	0.409	0.205	119.53	106.97	85.53	71.745
42	1.048	0.826	0.406	0.203	120.8	108.66	87.37	73.418
44	1.021	0.811	0.402	0.2	121.98	110.26	89.14	75.043
46	0.994	0.796	0.398	0.197	123.09	111.78	90.86	76.624
48	0.969	0.78	0.394	0.195	124.15	113.22	92.51	78.162
50	0.945	0.765	0.39	0.191	125.12	114.58	94.11	79.659
52	0.921	0.751	0.385	0.188	126.05	115.87	95.66	81.118
54	0.899	0.736	0.38	0.185	126.93	117.11	97.15	82.54
56	0.877	0.721	0.375	0.181	127.74	118.29	98.6	83.928
58	0.856	0.707	0.369	0.177	128.52	119.4	100	85.282
60	0.836	0.693	0.364	0.173	129.23	120.47	101.4	86.604

clotoide para $k=0.5m$

uB (cm)	F (Tn)			X (cm)		
	K=0.5m P=1Tn			K=0.5m		
	$\bar{r}=0.25m$	$\bar{r}=0.5m$	$\bar{r}=0.75m$	$\bar{r}=0.25m$	$\bar{r}=0.5m$	$\bar{r}=0.75m$
0	0	0	0	0	0	0
2	0.687	0.241	0.127	19.833	14.109	11.529
4	0.861	0.313	0.163	27.639	19.912	16.302
6	0.936	0.355	0.184	33.289	24.294	19.934
8	0.963	0.382	0.197	37.759	27.938	22.985
10	0.963	0.4	0.205	41.434	31.1	25.653
12	0.949	0.41	0.209	44.56	33.892	28.05
14	0.927	0.414	0.211	47.242	36.412	30.234
16	0.901	0.415	0.21	49.587	38.709	32.245
18	0.872	0.413	0.208	51.646	40.821	34.116
20	0.841	0.409	0.205	53.485	42.763	35.869
22	0.811	0.402	0.2	55.126	44.57	37.522
24	0.78	0.394	0.194	56.61	46.253	39.078
26	0.751	0.385	0.188	57.934	47.828	40.559
28	0.721	0.375	0.181	59.136	49.298	41.962
30	0.693	0.364	0.173	60.229	50.682	43.3
32	0.665	0.352	0.165	61.223	51.986	44.58
34	0.638	0.34	0.156	62.126	53.206	45.802
36	0.611	0.327	0.147	62.947	54.357	46.969
38	0.586	0.314	0.137	63.694	55.443	48.089
40	0.561	0.3	0.127	64.374	56.468	49.165
42	0.536	0.287	0.117	64.993	57.436	50.198
44	0.513	0.273	0.107	65.557	58.35	51.191
46	0.49	0.259	0.096	66.069	59.213	52.145
48	0.467	0.245	0.085	66.521	60.027	53.062
50	0.445	0.23	0.074	66.93	60.796	53.945
52	0.423	0.216	0.062	67.301	61.521	54.794
54	0.402	0.201	0.051	67.636	62.206	55.611
56	0.381	0.187	0.039	67.918	62.852	56.397
58	0.361	0.172	0.027	68.172	63.453	57.154
60	0.341	0.157	0.015	68.4	64.018	57.882

clotoide para $k=0.25m$

uB (cm)	F (Tn)		X (cm)	
	K=0.25m P=1Tn		K=0.25m	
	$\bar{r}=0.15m$	$\bar{r}=0.25m$	$\bar{r}=0.15m$	$\bar{r}=0.25m$
0	0	0	0	0
2	0.672	0.313	12.709	9.947
4	0.782	0.382	17.546	13.97
6	0.797	0.409	20.913	16.94
8	0.775	0.415	23.476	19.356
10	0.737	0.409	25.507	21.383
12	0.692	0.394	27.171	23.122
14	0.646	0.375	28.53	24.643
16	0.599	0.352	29.686	25.987
18	0.554	0.327	30.644	27.176
20	0.509	0.3	31.454	28.228
22	0.466	0.273	32.138	29.169
24	0.425	0.245	32.712	30.008
26	0.384	0.216	33.19	30.755
28	0.345	0.186	33.582	31.418
30	0.307	0.157	33.9	32.003
32	0.269	0.127	34.151	32.517
34	0.233	0.097	34.333	32.966
36	0.197		34.452	
38	0.161		34.523	

clotoide para $k=0.15m$

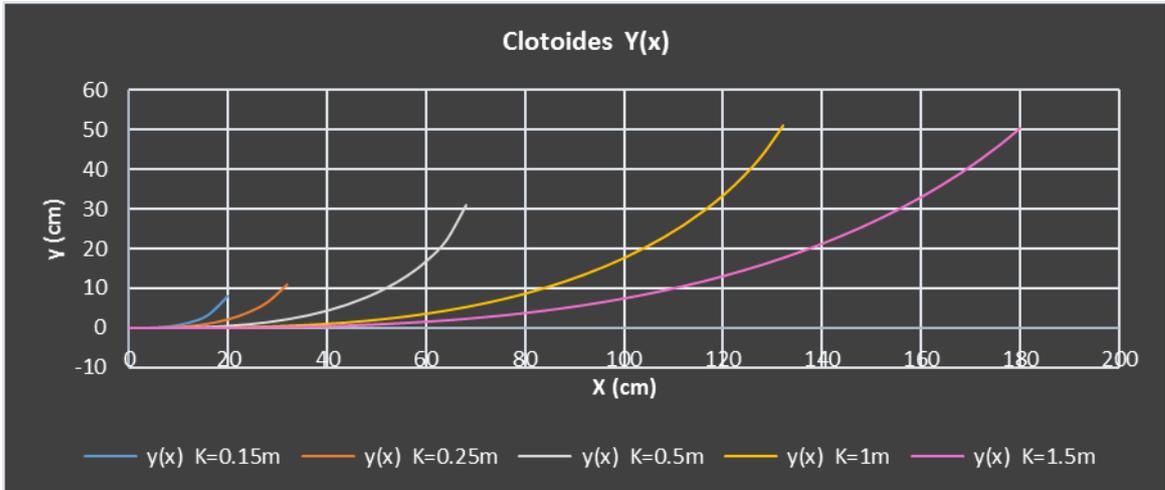
uB (cm)	F (Tn)		X (Tn)	
	K=0.15m P=1Tn		K=0.15m	
	$\bar{r}=0.12m$	$\bar{r}=0.2m$	$\bar{r}=0.12m$	$\bar{r}=0.2m$
0	0	0	0	0
2	0.513	0.23	8.526	6.677
4	0.567	0.259	11.745	9.363
6	0.551	0.255	13.963	11.35
8	0.508	0.235	15.623	12.95
10	0.456	0.207	16.907	14.29
12	0.401	0.173	17.921	15.42
14	0.344	0.135	18.724	16.4
16	0.288	0.095	19.358	17.25
18	0.232	0.053	19.849	17.98
20	0.176	0.009	20.216	18.61
22	0.121		20.478	
24	0.066		20.644	
26	0.01		20.723	

tabla de valores $y(x)$ en cm

X (cm)	y (x) cm				
	K=0.15m	K=0.25m	K=0.5m	K=1m	K=1.5m
0	0	0	0	0	0
4	0.048	0.017	0.005	0.001	0.001
8	0.382	0.137	0.035	0.009	0.004
12	1.313	0.462	0.116	0.03	0.013
16	3.311	1.105	0.275	0.071	0.031
20	8.128	2.187	0.534	0.137	0.059
24		3.891	0.928	0.234	0.103
28		6.53	1.474	0.37	0.164
32		11.006	2.21	0.551	0.245
36			3.164	0.782	0.347

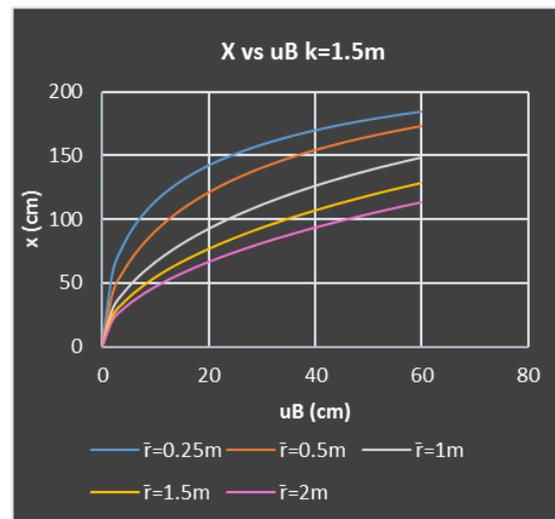
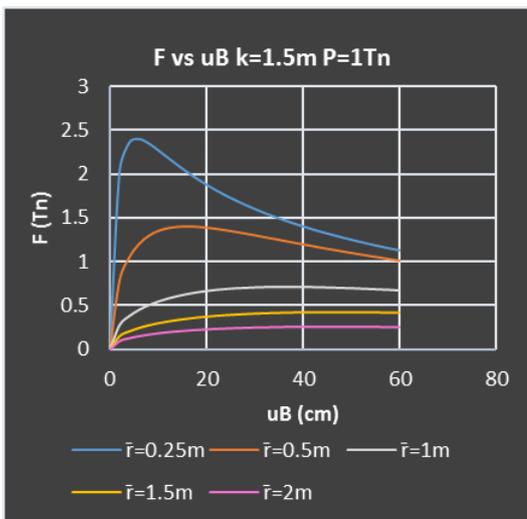
40			4.377	1.07	0.474
44			5.894	1.423	0.633
48			7.784	1.852	0.823
52			10.126	2.359	1.045
56			13.064	2.952	1.304
60			16.845	3.637	1.603
64			22.021	4.423	1.948
68			30.875	5.317	2.339
72				6.329	2.777
76				7.467	3.267
80				8.747	3.811
84				10.19	4.419
88				11.796	5.088
92				13.582	5.82
96				15.565	6.62
100				17.771	7.497
104				20.258	8.452
108				23.024	9.486
112				26.116	10.603
116				29.661	11.813
120				33.67	13.124
124				38.393	14.532
128				44.047	16.042
132				51.195	17.678
136					19.433
140					21.311
144					23.337
148					25.515
152					27.843
156					30.369
160					33.076
164					36.009
168					39.174
172					42.627
176					46.376
180					50.507

grafica de y vs x



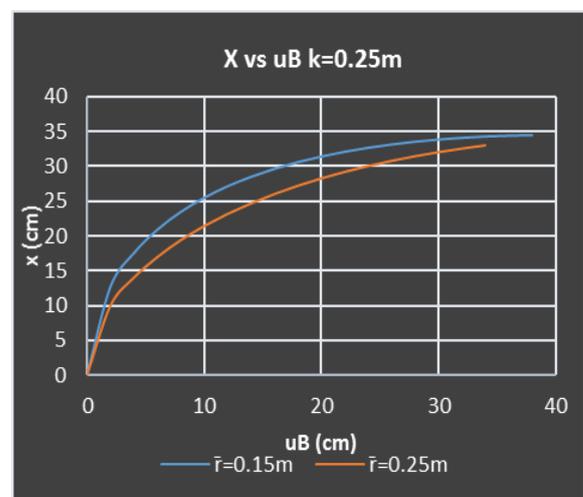
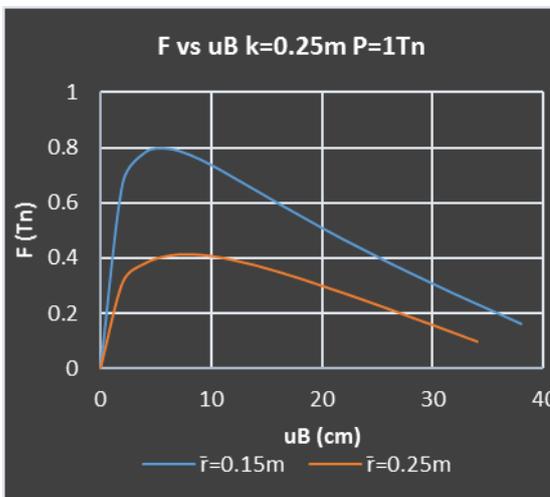
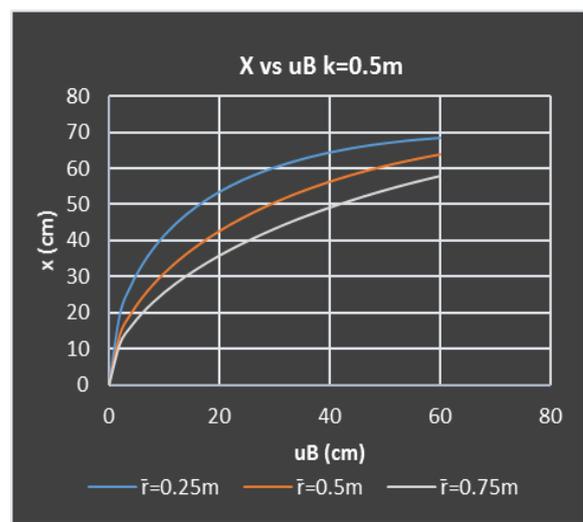
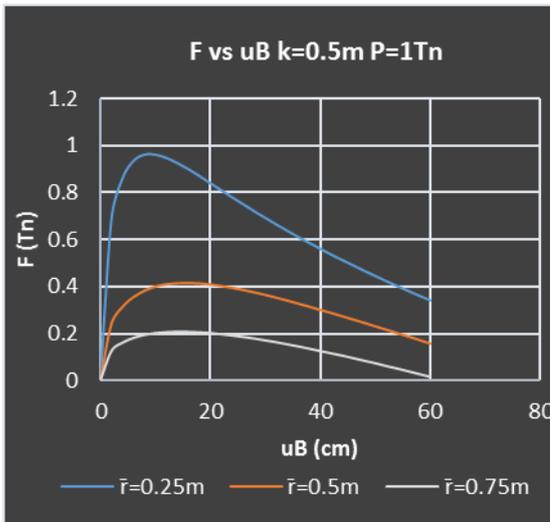
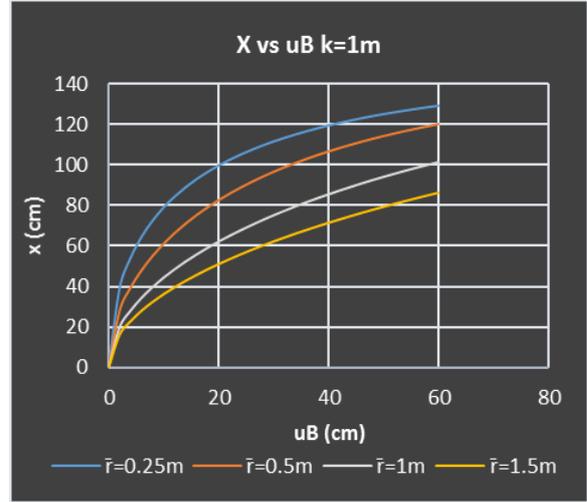
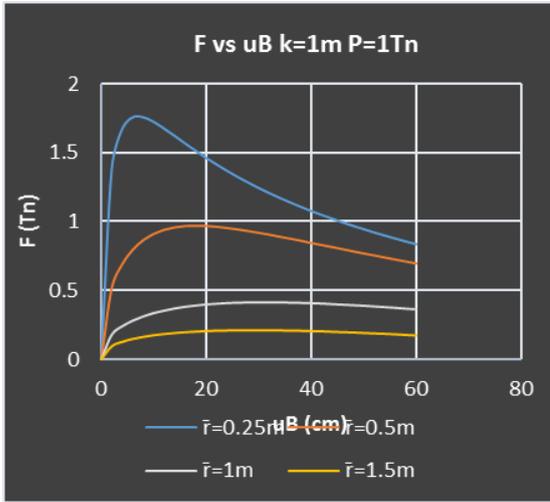
F (fuerza restitutiva)
vs uB

x (longitud de la generatriz horizontal)
vs uB

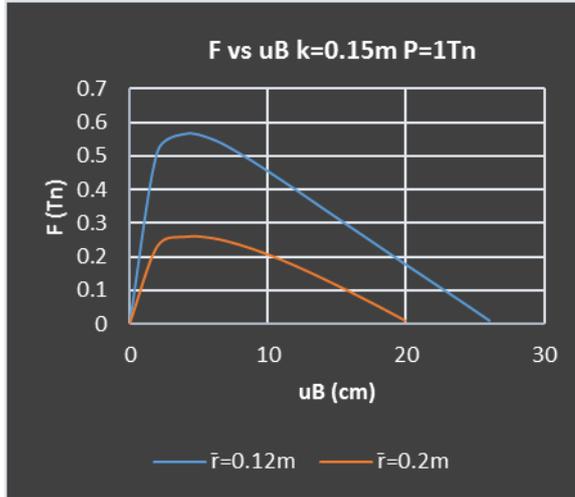


*F (fuerza restitutiva)
vs u_B*

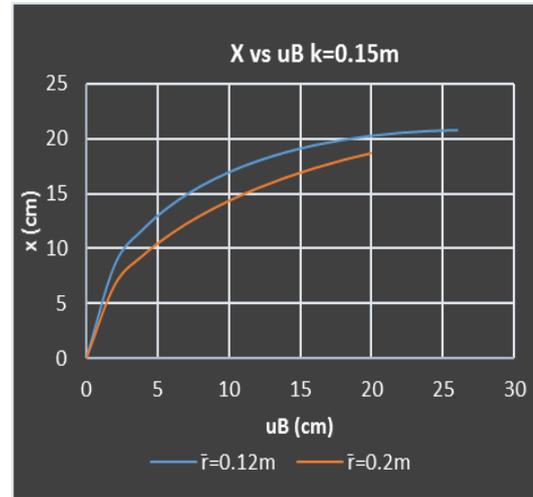
*x(longitud de la generatriz horizontal)
vs u_B*



*F (fuerza restitutiva)
vs u_B*



*x(longitud de la generatriz horizontal)
vs u_B*



FUNCIÓN POLAR DE RADIO CONSTANTE $r(\theta) = R$

utilizaremos funciones paramétricas para representar una curva generatriz, considerando cada coordenada de un punto como una función dependiente del parámetro θ .

$$X = r * SIN(\theta) \qquad Y = R - r * COS(\theta)$$

el desplazamiento relativo base de estructura y suelo es:

$$u_B = R * \theta - ((R - \bar{r}) * SIN(\theta))$$

la fuerza restitutiva será:

$$F = \frac{P * ((R - \bar{r}) * SIN\theta)}{R - (R - \bar{r}) * COS\theta}$$

reemplazando valores obtenemos:

función polar de radio constante $r(\theta) = R$

UB (cm)	F (Tn)						X (cm)					
	R=7m P=1Tn						R=7m					
	$\bar{r}=0.5m$	$\bar{r}=1m$	$\bar{r}=1.5m$	$\bar{r}=2m$	$\bar{r}=2.5m$	$\bar{r}=3m$	$\bar{r}=0.5m$	$\bar{r}=1m$	$\bar{r}=1.5m$	$\bar{r}=2m$	$\bar{r}=2.5m$	$\bar{r}=3m$
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0.513	0.12	0.049	0.025	0.014	0.009	27.895	13.99	9.332	7	5.6	4.667
4	0.985	0.238	0.098	0.05	0.029	0.018	55.195	27.95	18.66	14	11.2	9.333
6	1.389	0.355	0.146	0.075	0.043	0.027	81.407	41.82	27.96	21	16.8	14
8	1.714	0.467	0.194	0.1	0.058	0.036	106.21	55.59	37.25	28	22.39	18.66
10	1.964	0.576	0.242	0.124	0.072	0.044	129.48	69.2	46.51	34.9	27.98	23.32
12	2.148	0.68	0.289	0.149	0.086	0.053	151.16	82.64	55.72	41.9	33.56	27.98
14	2.28	0.778	0.335	0.173	0.1	0.062	171.35	95.88	64.9	48.9	39.14	32.64
16	2.371	0.87	0.38	0.198	0.115	0.071	190.13	108.9	74.02	55.8	44.72	37.29
18	2.432	0.955	0.424	0.222	0.129	0.08	207.61	121.7	83.08	62.7	50.28	41.94
20	2.471	1.035	0.467	0.246	0.143	0.088	223.9	134.2	92.08	69.6	55.83	46.59
22	2.492	1.108	0.51	0.269	0.157	0.097	239.13	146.4	101	76.5	61.38	51.23
24	2.501	1.174	0.55	0.292	0.171	0.106	253.44	158.3	109.9	83.3	66.91	55.86
26	2.501	1.235	0.59	0.315	0.184	0.115	266.92	170	118.6	90.1	72.44	60.49
28	2.494	1.29	0.629	0.338	0.198	0.123	279.58	181.4	127.3	96.9	77.95	65.11
30	2.482	1.339	0.666	0.36	0.212	0.132	291.59	192.4	135.9	104	83.44	69.73
32	2.467	1.384	0.701	0.382	0.225	0.141	302.95	203.2	144.5	110	88.93	74.34
34	2.449	1.424	0.736	0.404	0.239	0.149	313.72	213.7	152.9	117	94.39	78.94
36	2.43	1.459	0.769	0.425	0.252	0.158	324	223.9	161.2	124	99.84	83.53
38	2.409	1.491	0.8	0.446	0.265	0.166	333.82	233.9	169.4	130	105.3	88.12
40	2.387	1.518	0.83	0.466	0.278	0.175	343.15	243.6	177.5	137	110.7	92.7
42	2.365	1.543	0.859	0.486	0.291	0.183	352.09	253	185.5	143	116.1	97.26
44	2.343	1.564	0.887	0.506	0.304	0.191	360.65	262.1	193.4	150	121.5	101.8
46	2.321	1.583	0.913	0.525	0.317	0.2	368.88	271.1	201.2	156	126.8	106.4
48	2.299	1.598	0.938	0.544	0.329	0.208	376.78	279.7	208.9	163	132.2	110.9
50	2.277	1.612	0.961	0.562	0.342	0.216	384.39	288.2	216.5	169	137.5	115.4
52	2.255	1.624	0.983	0.58	0.354	0.224	391.71	296.4	224	175	142.8	119.9
54	2.233	1.634	1.005	0.598	0.366	0.232	398.78	304.4	231.3	182	148	124.4
56	2.212	1.642	1.025	0.614	0.378	0.24	405.61	312.2	238.6	188	153.3	128.9
58	2.192	1.648	1.044	0.631	0.389	0.248	412.21	319.8	245.7	194	158.5	133.4
60	2.171	1.654	1.061	0.647	0.401	0.256	418.59	327.2	252.7	200	163.7	137.9
62	2.151	1.658	1.078	0.663	0.412	0.264	424.74	334.4	259.7	206	168.9	142.3
64	2.132	1.661	1.094	0.678	0.424	0.272	430.7	341.4	266.5	212	174	146.8
66	2.113	1.663	1.109	0.693	0.435	0.279	436.49	348.2	273.2	218	179.2	151.2
68	2.094	1.664	1.122	0.707	0.445	0.287	442.12	354.9	279.8	224	184.2	155.6
70	2.076	1.664	1.135	0.721	0.456	0.294	447.6	361.4	286.3	230	189.3	160

función polar de radio constante $r(\theta) = R$

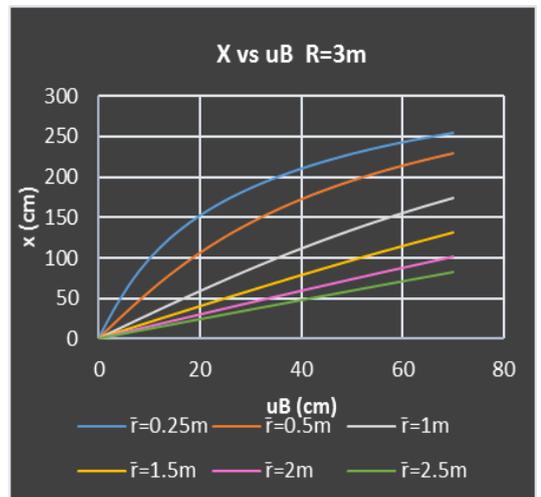
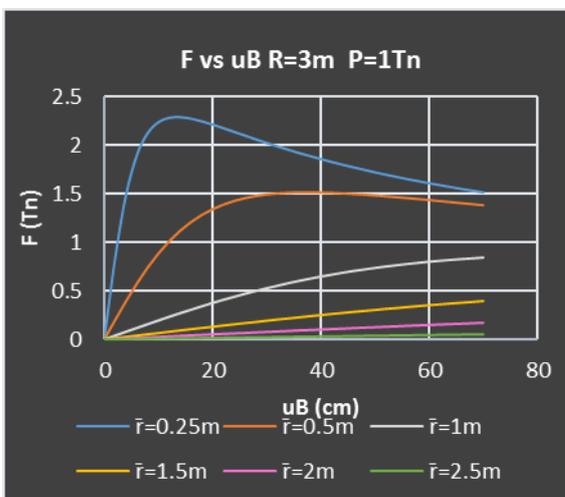
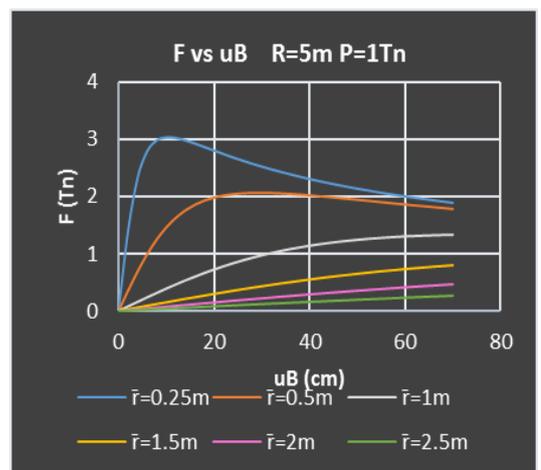
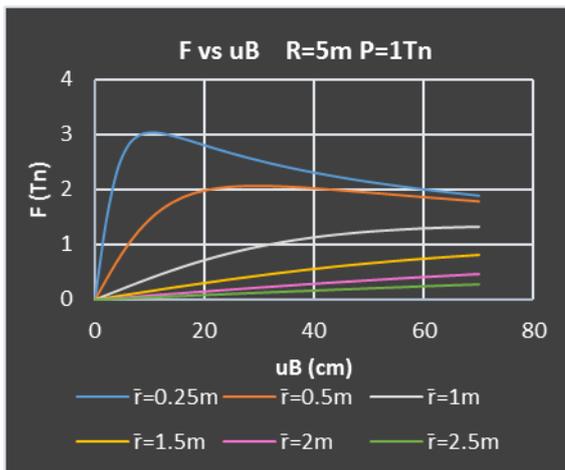
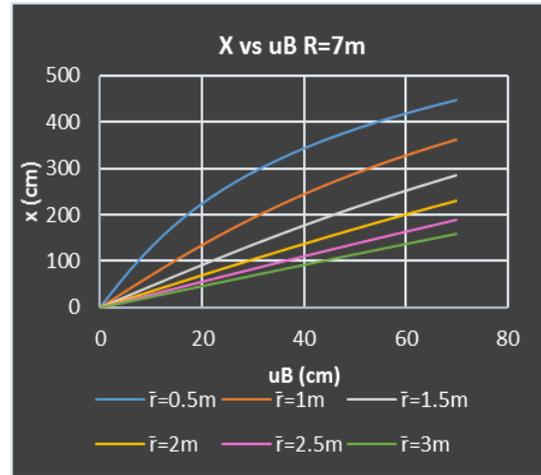
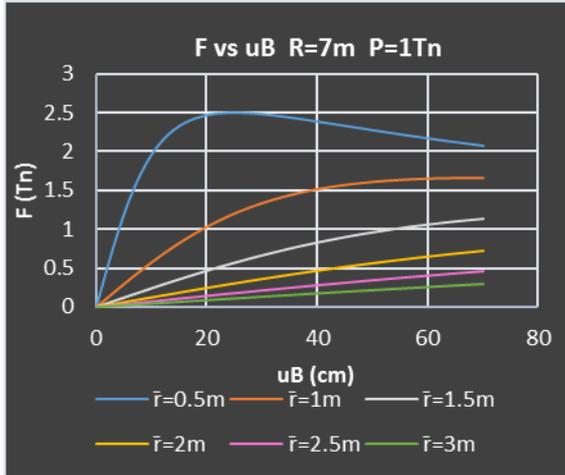
UB (cm)	F (Tn)						X (cm)					
	R=5m P=1Tn						R=5m					
	$\bar{r}=0.25m$	$\bar{r}=0.5m$	$\bar{r}=1m$	$\bar{r}=1.5m$	$\bar{r}=2m$	$\bar{r}=2.5m$	$\bar{r}=0.25m$	$\bar{r}=0.5m$	$\bar{r}=1m$	$\bar{r}=1.5m$	$\bar{r}=2m$	$\bar{r}=2.5m$
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	1.407	0.356	0.08	0.031	0.015	0.008	39.195	19.946	9.996	6.666	5	4
4	2.332	0.693	0.159	0.062	0.03	0.016	74.418	39.584	19.973	13.328	9.998	7.999
6	2.797	0.994	0.238	0.093	0.045	0.024	104.475	58.646	29.909	19.982	14.994	11.998
8	2.987	1.25	0.314	0.124	0.06	0.032	129.861	76.922	39.787	26.624	19.986	15.994
10	3.04	1.461	0.389	0.154	0.075	0.04	151.521	94.298	49.588	33.25	24.974	19.989
12	3.029	1.629	0.461	0.185	0.09	0.048	170.332	110.736	59.297	39.858	29.955	23.981
14	2.987	1.758	0.531	0.215	0.104	0.056	186.902	126.18	68.897	46.442	34.928	27.97
16	2.931	1.857	0.597	0.244	0.119	0.064	201.675	140.711	78.376	53	39.893	31.956
18	2.87	1.93	0.661	0.273	0.134	0.072	215.018	154.361	87.715	59.527	44.849	35.938
20	2.808	1.982	0.721	0.302	0.148	0.08	227.143	167.17	96.908	66.021	49.793	39.915
22	2.747	2.019	0.777	0.33	0.163	0.087	238.259	179.219	105.947	72.477	54.725	43.886
24	2.688	2.042	0.83	0.358	0.177	0.095	248.506	190.551	114.826	78.895	59.644	47.853
26	2.632	2.057	0.879	0.385	0.191	0.103	258.029	201.238	123.532	85.268	64.547	51.813
28	2.578	2.063	0.925	0.411	0.205	0.111	266.944	211.346	132.062	91.598	69.436	55.767
30	2.528	2.064	0.967	0.437	0.219	0.119	275.246	220.934	140.421	97.877	74.309	59.714
32	2.479	2.061	1.007	0.462	0.233	0.126	283.101	229.986	148.597	104.108	79.163	63.653
34	2.434	2.054	1.043	0.487	0.247	0.134	290.463	238.629	156.59	110.282	83.998	67.584
36	2.391	2.044	1.076	0.51	0.26	0.142	297.45	246.807	164.414	116.405	88.815	71.508
38	2.35	2.033	1.106	0.534	0.274	0.149	304.093	254.634	172.04	122.467	93.61	75.422
40	2.311	2.02	1.134	0.556	0.287	0.157	310.382	262.096	179.505	128.473	98.383	79.326
42	2.274	2.006	1.159	0.578	0.3	0.164	316.371	269.216	186.778	134.417	103.134	83.221
44	2.239	1.991	1.181	0.599	0.313	0.172	322.093	276.045	193.893	140.297	107.863	87.106
46	2.205	1.975	1.202	0.619	0.325	0.179	327.566	282.598	200.818	146.119	112.565	90.98
48	2.173	1.959	1.22	0.638	0.338	0.186	332.806	288.879	207.591	151.869	117.243	94.843
50	2.142	1.943	1.237	0.657	0.35	0.194	337.83	294.899	214.189	157.558	121.897	98.694
52	2.113	1.927	1.251	0.675	0.362	0.201	342.652	300.692	220.629	163.181	126.522	102.534
54	2.085	1.91	1.264	0.693	0.374	0.208	347.286	306.271	226.922	168.732	131.119	106.361
56	2.057	1.894	1.276	0.709	0.385	0.215	351.744	311.647	233.045	174.219	135.69	110.176
58	2.031	1.877	1.286	0.725	0.397	0.222	356.038	316.832	239.024	179.638	140.233	113.978
60	2.006	1.861	1.295	0.741	0.408	0.229	360.179	321.837	244.866	184.983	144.743	117.765
62	1.982	1.845	1.303	0.755	0.419	0.236	364.176	326.671	250.56	190.263	149.225	121.539
64	1.959	1.83	1.31	0.769	0.43	0.243	368.04	331.344	256.111	195.476	153.677	125.299
66	1.937	1.814	1.315	0.783	0.44	0.25	371.779	335.865	261.533	200.613	158.098	129.045
68	1.915	1.799	1.32	0.795	0.451	0.256	375.38	340.243	266.829	205.683	162.485	132.775
70	1.894	1.783	1.324	0.808	0.461	0.263	378.86	344.486	272.001	210.687	166.841	136.49

función polar de radio constante $r(\theta) = R$

UB (cm)	F (Tn)						X (cm)					
	R=3m P=1Tn						R=3m					
	$\bar{r}=0.25m$	$\bar{r}=0.5m$	$\bar{r}=1m$	$\bar{r}=1.5m$	$\bar{r}=2m$	$\bar{r}=2.5m$	$\bar{r}=0.25m$	$\bar{r}=0.5m$	$\bar{r}=1m$	$\bar{r}=1.5m$	$\bar{r}=2m$	$\bar{r}=2.5m$
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0.839	0.199	0.04	0.013	0.005	0.002	23.693	11.979	5.999	4	3	2.4
4	1.487	0.391	0.08	0.027	0.01	0.003	45.825	23.845	11.99	7.998	5.999	4.8
6	1.898	0.572	0.119	0.04	0.015	0.005	65.568	35.498	17.967	11.993	8.998	7.199
8	2.127	0.736	0.158	0.053	0.02	0.006	82.885	46.838	23.923	15.985	11.995	9.598
10	2.24	0.881	0.197	0.066	0.025	0.008	98	57.815	29.85	19.97	14.99	11.996
12	2.286	1.007	0.235	0.08	0.03	0.01	111.28	68.355	35.743	23.949	17.984	14.393
14	2.292	1.114	0.272	0.093	0.035	0.011	123.06	78.451	41.595	27.919	20.974	16.789
16	2.277	1.203	0.308	0.106	0.04	0.013	133.59	88.09	47.401	31.879	23.961	19.184
18	2.25	1.276	0.343	0.119	0.045	0.014	143.09	97.258	53.154	35.828	26.945	21.577
20	2.216	1.335	0.378	0.131	0.05	0.016	151.72	105.967	58.847	39.765	29.925	23.969
22	2.179	1.383	0.411	0.144	0.055	0.018	159.63	114.241	64.477	43.688	32.9	26.359
24	2.14	1.42	0.442	0.157	0.06	0.019	166.89	122.098	70.04	47.595	35.871	28.747
26	2.102	1.449	0.473	0.169	0.064	0.021	173.59	129.546	75.532	51.487	38.836	31.133
28	2.063	1.47	0.502	0.181	0.069	0.022	179.84	136.618	80.951	55.361	41.795	33.516
30	2.026	1.486	0.53	0.194	0.074	0.024	185.64	143.345	86.289	59.216	44.749	35.897
32	1.99	1.497	0.557	0.206	0.079	0.025	191.06	149.748	91.545	63.052	47.695	38.274
34	1.956	1.503	0.583	0.217	0.084	0.027	196.17	155.821	96.719	66.866	50.634	40.649
36	1.922	1.507	0.607	0.229	0.089	0.029	200.97	161.628	101.81	70.659	53.567	43.021
38	1.891	1.507	0.63	0.241	0.093	0.03	205.47	167.137	106.81	74.428	56.491	45.39
40	1.86	1.506	0.651	0.252	0.098	0.032	209.73	172.416	111.72	78.173	59.407	47.755
42	1.83	1.502	0.671	0.263	0.103	0.033	213.77	177.436	116.55	81.893	62.314	50.116
44	1.802	1.497	0.691	0.274	0.107	0.035	217.6	182.241	121.28	85.588	65.212	52.474
46	1.775	1.491	0.709	0.285	0.112	0.036	221.24	186.848	125.92	89.254	68.101	54.828
48	1.749	1.484	0.725	0.295	0.117	0.038	224.69	191.241	130.47	92.895	70.981	57.177
50	1.723	1.476	0.741	0.305	0.121	0.04	227.99	195.45	134.93	96.504	73.849	59.522
52	1.699	1.467	0.756	0.316	0.126	0.041	231.13	199.49	139.3	100.09	76.707	61.863
54	1.676	1.458	0.769	0.325	0.13	0.043	234.13	203.369	143.58	103.64	79.555	64.199
56	1.653	1.449	0.782	0.335	0.135	0.044	237	207.093	147.77	107.16	82.391	66.53
58	1.632	1.439	0.794	0.345	0.139	0.046	239.74	210.667	151.87	110.65	85.215	68.857
60	1.611	1.429	0.805	0.354	0.144	0.047	242.36	214.096	155.89	114.1	88.027	71.178
62	1.591	1.418	0.815	0.363	0.148	0.049	244.86	217.394	159.81	117.53	90.827	73.493
64	1.571	1.408	0.824	0.372	0.152	0.05	247.26	220.568	163.66	120.92	93.614	75.803
66	1.552	1.397	0.833	0.38	0.156	0.052	249.57	223.624	167.41	124.28	96.388	78.107
68	1.534	1.387	0.84	0.388	0.161	0.053	251.8	226.568	171.09	127.6	99.15	80.405
70	1.516	1.376	0.848	0.397	0.165	0.055	253.91	229.405	174.67	130.89	101.9	82.698

*F (fuerza restitutiva)
vs uB*

*x(longitud de la generatriz horizontal)
vs uB*



FUNCIÓN PARABOLICA

si se hace coincidir el eje y con el eje de la parábola y el eje x pasa por su vértice, entonces la ecuación de la parábola es:

$$y = \frac{x^2}{4 * k}$$

donde k es la distancia del foco al vértice y la directriz será $y=-k$ donde la parábola se abre hacia arriba, la derivada de y respecto a x será:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{x}{2 * k}$$

reemplazando estos valores en el desplazamiento relativo y fuerza restitutiva:

$$u_B = \int_0^x \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} * dx - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2}} (X + (Y - \bar{r}) * \left(\frac{dy}{dx}\right))$$

$$F = \frac{P * (X + Y * \frac{dy}{dx} - \bar{r} * \frac{dy}{dx})}{\left(X * \frac{dy}{dx} - Y + \bar{r}\right)}$$

se obtendrá las siguientes tablas

función parabólica $k=1m$

uB (cm)	F (Tn)			X (cm)		
	k=1m P=1Tn			k=1m		
	$\bar{r}=0.25m$	$\bar{r}=0.5m$	$\bar{r}=1m$	$\bar{r}=0.25m$	$\bar{r}=0.5m$	$\bar{r}=1m$
0	0	0	0	0	0	0
2	0.545	0.12	0.02	15.916	7.998	4
4	1.013	0.238	0.04	31.367	15.983	8.002
6	1.369	0.352	0.06	46.051	23.943	12.007
8	1.621	0.462	0.08	59.88	31.869	16.017
10	1.791	0.567	0.1	72.865	39.75	20.033
12	1.906	0.665	0.12	85.122	47.582	24.058
14	1.983	0.757	0.14	96.729	55.359	28.092
16	2.035	0.841	0.161	107.81	63.08	32.137
18	2.071	0.919	0.181	118.45	70.745	36.195
20	2.097	0.991	0.201	128.74	78.354	40.267
22	2.117	1.057	0.222	138.73	85.912	44.356
24	2.132	1.117	0.242	148.48	93.423	48.463
26	2.146	1.173	0.263	158.03	100.891	52.588
28	2.158	1.224	0.284	167.43	108.324	56.735
30	2.169	1.272	0.305	176.71	115.726	60.905
32	2.181	1.316	0.325	185.89	123.105	65.098
34	2.193	1.357	0.347	194.99	130.467	69.319
36	2.206	1.396	0.368	204.05	137.819	73.567
38	2.219	1.433	0.389	213.07	145.168	77.843
40	2.234	1.468	0.411	222.07	152.52	82.151
42	2.249	1.501	0.432	231.08	159.882	86.493
44	2.265	1.534	0.454	240.09	167.261	90.868
46	2.283	1.565	0.476	249.12	174.661	95.28
48	2.301	1.596	0.499	258.19	182.09	99.73
50	2.321	1.626	0.521	267.3	189.553	104.22
52	2.342	1.655	0.544	276.47	197.056	108.75
54	2.364	1.684	0.567	285.69	204.604	113.33
56	2.387	1.714	0.59	294.99	212.202	117.95
58	2.411	1.743	0.613	304.36	219.857	122.61
60	2.437	1.772	0.637	313.81	227.572	127.33

función parabólica $k=0.5m$

uB (cm)	F (Tn)			X (cm)		
	k=0.5m P=1Tn			k=0.5m		
	$\bar{r}=0.25m$	$\bar{r}=0.5m$	$\bar{r}=1m$	$\bar{r}=0.25m$	$\bar{r}=0.5m$	$\bar{r}=1m$
0	0	0	0	0	0	0
2	0.238	0.04	0	7.991	4.001	2
4	0.462	0.08	0	15.932	8.009	4.002
6	0.664	0.12	0	23.788	12.029	6.007
8	0.841	0.161	0	31.537	16.07	8.017
10	0.991	0.201	0.001	39.177	20.135	10.034
12	1.117	0.242	0.001	46.709	24.232	12.058
14	1.224	0.284	0.001	54.16	28.37	14.093
16	1.316	0.326	0.002	61.552	32.551	16.138
18	1.396	0.368	0.003	68.909	36.785	18.197
20	1.467	0.411	0.004	76.261	41.079	20.271
22	1.533	0.454	0.005	83.632	45.436	22.361
24	1.596	0.499	0.007	91.045	49.869	24.47
26	1.655	0.544	0.009	98.53	54.377	26.599
28	1.714	0.59	0.011	106.11	58.978	28.752
30	1.772	0.637	0.014	113.79	63.669	30.928
32	1.831	0.685	0.017	121.6	68.463	33.13
34	1.89	0.734	0.021	129.57	73.368	35.362
36	1.952	0.784	0.025	137.71	78.386	37.623
38	2.015	0.835	0.029	146.04	83.533	39.918
40	2.081	0.888	0.035	154.57	88.816	42.249
42	2.149	0.942	0.04	163.32	94.238	44.618
44	2.22	0.998	0.047	172.31	99.81	47.027
46	2.294	1.055	0.054	181.56	105.542	49.478
48	2.371	1.114	0.062	191.08	111.443	51.976
50	2.452	1.175	0.071	200.9	117.523	54.524
52	2.536	1.238	0.08	211.02	123.792	57.123
54	2.624	1.303	0.091	221.47	130.259	59.778
56	2.717	1.369	0.102	232.26	136.934	62.491
58	2.813	1.438	0.115	243.42	143.824	65.266
60	2.914	1.51	0.128	254.96	150.951	68.107

función parabólica $k=0.25m$

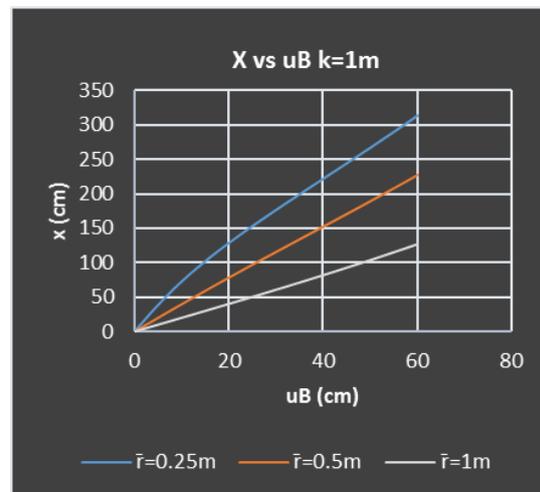
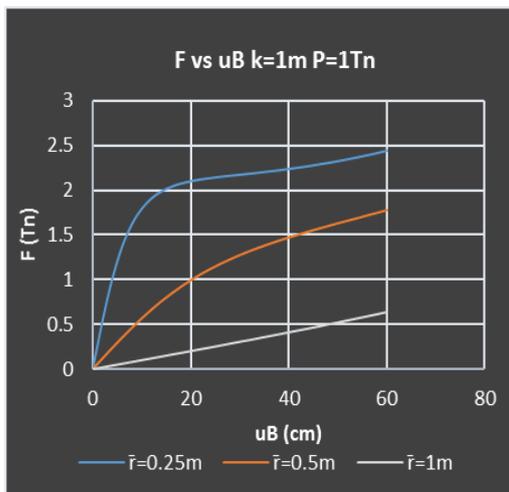
uB (cm)	F (Tn)		X (cm)	
	k=0.25m	P=1Tn	k=0.25m	
	$\bar{r}=0.25m$	$\bar{r}=0.5m$	$\bar{r}=0.25m$	$\bar{r}=0.5m$
0	0	0	0	0
2	0.08	0	4.006	2.001
4	0.161	0	8.038	4.01
6	0.242	0.001	12.121	6.03
8	0.326	0.002	16.278	8.07
10	0.411	0.004	20.543	10.136
12	0.499	0.007	24.943	12.238
14	0.59	0.012	29.493	14.379
16	0.685	0.017	34.24	16.566
18	0.784	0.025	39.202	18.815
20	0.888	0.035	44.417	21.128
22	0.998	0.047	49.904	23.515
24	1.115	0.062	55.731	25.993
26	1.238	0.08	61.907	28.564
28	1.37	0.102	68.478	31.249
30	1.51	0.128	75.485	34.059
32	1.659	0.159	82.97	37.005
34	1.82	0.195	90.998	40.106
36	1.992	0.237	99.599	43.384
38	2.177	0.286	108.85	46.858
40	2.376	0.342	118.79	50.551
42	2.59	0.406	129.48	54.481
44	2.82	0.479	141.02	58.677
46	3.069	0.561	153.44	63.17
48	3.337	0.653	166.86	67.993
50	3.627	0.757	181.35	73.176

función parabólica $k=0.15m$

uB (cm)	F (Tn)			X (cm)		
	k=0.15m P=1Tn			k=0.15m		
	$\bar{r}=0.12m$	$\bar{r}=0.25m$	$\bar{r}=0.5m$	$\bar{r}=0.12m$	$\bar{r}=0.25m$	$\bar{r}=0.5m$
0	0	0	0	0	0	0
2	0.247	0.016	0	5.015	2.406	2.004
4	0.483	0.035	0.001	10.106	4.842	4.026
6	0.702	0.056	0.004	15.35	7.332	6.082
8	0.91	0.082	0.01	20.829	9.904	8.199
10	1.111	0.117	0.02	26.629	12.608	10.386
12	1.316	0.16	0.035	32.913	15.463	12.681
14	1.532	0.216	0.057	39.736	18.518	15.093
16	1.768	0.286	0.087	47.275	21.814	17.671
18	2.029	0.374	0.129	55.627	25.425	20.439
20	2.323	0.483	0.183	64.966	29.397	23.439
22	2.656	0.615	0.253	75.447	33.801	26.716
24	3.035	0.775	0.342	87.281	38.741	30.333
26	3.467	0.964	0.453	100.66	44.287	34.348
28	3.959	1.187	0.591	115.826	50.566	38.845
30	4.522	1.445	0.757	133.061	57.687	43.91
32	5.165	1.742	0.956	152.649	65.792	49.637
34	5.899	2.08	1.192	174.968	75.04	56.152
36	6.739	2.465	1.466	200.407	85.59	63.576
38	7.698	2.901	1.784	229.396	97.645	72.056
40	8.795	3.394	2.147	262.488	111.426	81.768

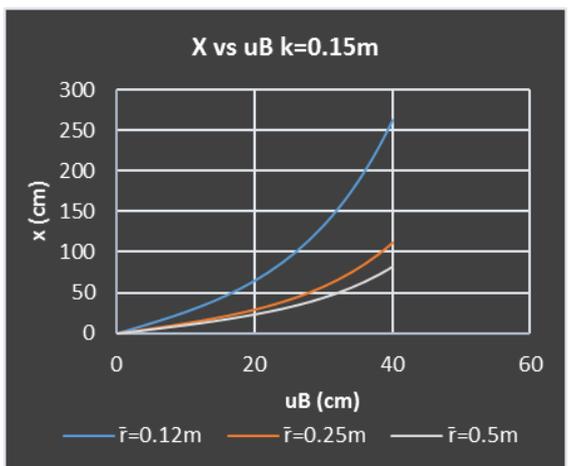
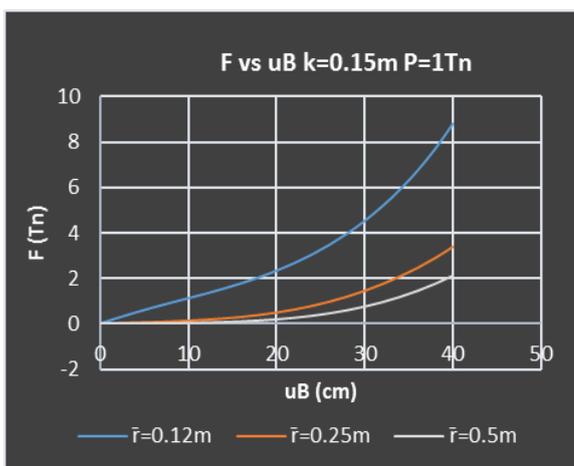
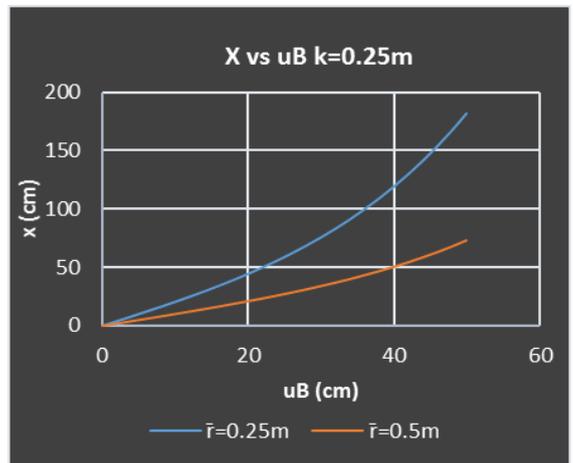
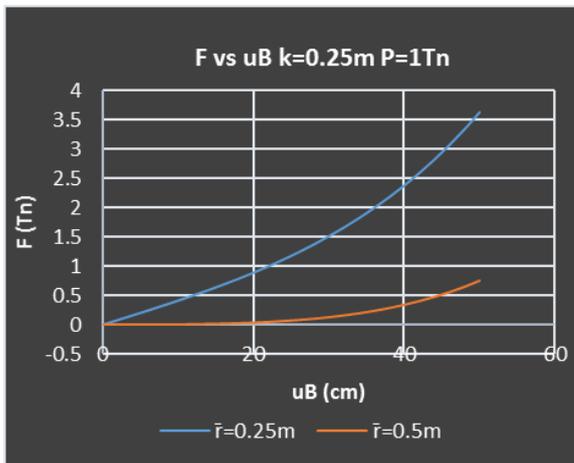
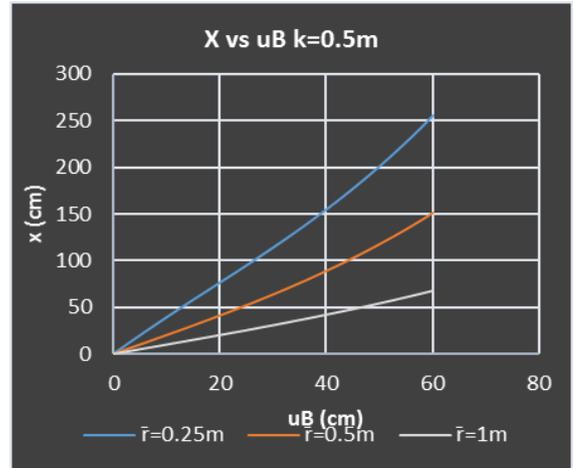
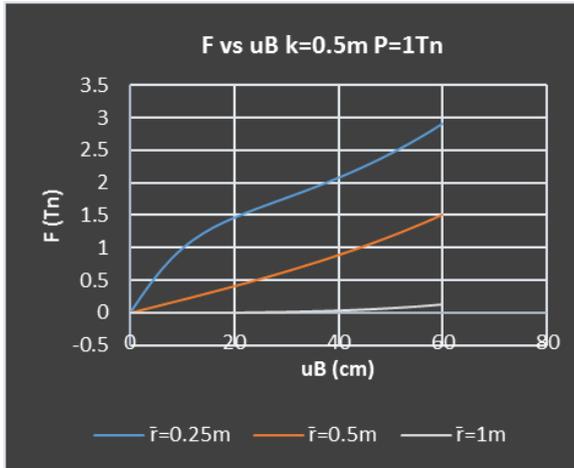
F (fuerza restitutiva)
vs uB

x(longitud de la generatriz horizontal)
vs uB



*F (fuerza restitutiva)
vs uB*

*x(longitud de la generatriz horizontal)
vs uB*



FUNCIÓN ELIPTICA

sea el centro de la elipse (0, b) y sus distancias del centro a sus vértices, a y b ubicado en el eje horizontal y vertical respectivamente, entonces la ecuación de la elipse es:

$$\frac{(x-0)^2}{a^2} + \frac{(y-b)^2}{b^2} = 1$$

por lo que la función y que pasa por la intersección de ejes coordenados será

$$y = b * (1 - \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}})$$

la derivada de y respecto a x será:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{b * x * \sqrt{a^2 - x^2}}{a * (a + x) * (a - x)}$$

reemplazando estos valores en el desplazamiento relativo y fuerza restitutiva:

$$u_B = \int_0^x \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} * dx - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2}} (X + (Y - \bar{r}) * \left(\frac{dy}{dx}\right))$$

$$F = \frac{P * (X + Y * \frac{dy}{dx} - \bar{r} * \frac{dy}{dx})}{\left(X * \frac{dy}{dx} - Y + \bar{r}\right)}$$

se obtendrá las siguientes tablas

función elíptica $a=7m$ y $b=5m$

uB (cm)	F (Tn)						X (cm)					
	a=7m b=5m P=1Tn						a=7m b=5m					
	$\bar{r}=0.5m$	$\bar{r}=1m$	$\bar{r}=1.5m$	$\bar{r}=2m$	$\bar{r}=2.5m$	$\bar{r}=3m$	$\bar{r}=0.5m$	$\bar{r}=1m$	$\bar{r}=1.5m$	$\bar{r}=2m$	$\bar{r}=2.5m$	$\bar{r}=3m$
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0.729	0.176	0.074	0.039	0.023	0.015	38.965	19.583	13.063	9.799	7.839	6.533
4	1.375	0.348	0.147	0.078	0.047	0.03	76.614	39.065	26.103	19.59	15.675	13.064
6	1.892	0.516	0.22	0.117	0.07	0.045	112	58.356	39.1	29.365	23.504	19.592
8	2.272	0.676	0.291	0.155	0.093	0.06	144.58	77.37	52.034	39.118	31.323	26.114
10	2.535	0.826	0.362	0.193	0.116	0.075	174.23	96.017	64.883	48.841	39.129	32.629
12	2.707	0.966	0.431	0.231	0.139	0.09	201.13	114.24	77.628	58.527	46.917	39.136
14	2.812	1.095	0.497	0.269	0.162	0.105	225.49	131.99	90.25	68.168	54.686	45.631
16	2.872	1.212	0.562	0.305	0.185	0.12	247.61	149.21	102.73	77.758	62.43	52.115
18	2.898	1.316	0.625	0.342	0.207	0.135	267.72	165.89	115.06	87.29	70.15	58.584
20	2.903	1.41	0.685	0.377	0.23	0.15	286.14	182	127.22	96.758	77.837	65.038
22	2.893	1.492	0.742	0.412	0.252	0.164	303.04	197.52	139.19	106.156	85.494	71.474
24	2.872	1.564	0.797	0.447	0.273	0.179	318.61	212.46	150.98	115.48	93.114	77.891
26	2.845	1.626	0.849	0.48	0.295	0.193	333	226.84	162.56	124.721	100.7	84.288
28	2.813	1.679	0.898	0.513	0.316	0.207	346.38	240.64	173.93	133.873	108.24	90.662
30	2.778	1.725	0.945	0.544	0.337	0.221	358.86	253.9	185.08	142.935	115.74	97.013
32	2.742	1.764	0.989	0.575	0.358	0.235	370.5	266.64	196.01	151.903	123.19	103.34
34	2.705	1.796	1.03	0.605	0.378	0.249	381.42	278.85	206.71	160.773	130.59	109.64
36	2.667	1.823	1.068	0.634	0.398	0.263	391.72	290.56	217.19	169.538	137.94	115.91
38	2.63	1.845	1.104	0.662	0.417	0.277	401.38	301.81	227.44	178.194	145.24	122.15
40	2.593	1.862	1.137	0.689	0.437	0.29	410.5	312.6	237.45	186.743	152.48	128.36
42	2.557	1.875	1.168	0.715	0.455	0.303	419.14	322.97	247.23	195.184	159.66	134.54
44	2.521	1.885	1.197	0.74	0.474	0.316	427.35	332.92	256.78	203.503	166.79	140.68
46	2.486	1.893	1.223	0.765	0.492	0.329	435.14	342.5	266.11	211.709	173.85	146.79
48	2.452	1.897	1.247	0.788	0.51	0.342	442.57	351.69	275.21	219.802	180.85	152.87
50	2.419	1.9	1.269	0.81	0.527	0.355	449.65	360.53	284.08	227.766	187.79	158.9
52	2.387	1.9	1.289	0.831	0.544	0.367	456.44	369.05	292.74	235.619	194.66	164.9
54	2.356	1.899	1.308	0.852	0.56	0.379	462.88	377.25	301.18	243.344	201.46	170.86
56	2.325	1.896	1.325	0.871	0.576	0.391	469.04	385.16	309.41	250.953	208.19	176.79
58	2.296	1.892	1.34	0.889	0.591	0.403	474.97	392.76	317.44	258.436	214.86	182.66
60	2.267	1.887	1.353	0.907	0.606	0.414	480.7	400.1	325.26	265.801	221.46	188.5
62	2.239	1.881	1.365	0.924	0.621	0.426	486.14	407.18	332.87	273.04	227.98	194.3
64	2.212	1.874	1.376	0.94	0.635	0.437	491.39	414.02	340.31	280.166	234.44	200.05
66	2.185	1.866	1.386	0.955	0.649	0.448	496.5	420.63	347.56	287.159	240.81	205.76
68	2.16	1.858	1.394	0.969	0.662	0.459	501.34	427.02	354.61	294.041	247.12	211.42
70	2.135	1.849	1.402	0.983	0.675	0.469	506.06	433.19	361.49	300.801	253.35	217.04

función elíptica $a=3m$ y $b=2m$

uB (cm)	F (Tn)					X (cm)				
	a=3m b=2m P=1Tn					a=3m b=2m				
	$\bar{r}=0.5m$	$\bar{r}=1m$	$\bar{r}=1.5m$	$\bar{r}=2m$	$\bar{r}=2.5m$	$\bar{r}=0.5m$	$\bar{r}=1m$	$\bar{r}=1.5m$	$\bar{r}=2m$	$\bar{r}=2.5m$
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0.317	0.07	0.027	0.012	0.006	17.938	8.995	5.999	4.499	3.6
4	0.616	0.139	0.053	0.025	0.013	35.522	17.961	11.99	8.996	7.198
6	0.883	0.208	0.08	0.037	0.019	52.448	26.867	17.967	13.488	10.794
8	1.109	0.274	0.106	0.05	0.026	68.478	35.688	23.923	17.971	14.386
10	1.294	0.339	0.132	0.062	0.032	83.489	44.395	29.851	22.444	17.973
12	1.439	0.401	0.158	0.074	0.038	97.411	52.966	35.743	26.903	21.554
14	1.549	0.46	0.183	0.087	0.045	110.24	61.379	41.594	31.346	25.127
16	1.629	0.517	0.208	0.099	0.051	122.05	69.616	47.398	35.772	28.691
18	1.686	0.57	0.232	0.111	0.057	132.87	77.66	53.147	40.176	32.246
20	1.724	0.62	0.256	0.122	0.063	142.79	85.493	58.838	44.557	35.789
22	1.747	0.666	0.279	0.134	0.069	151.89	93.115	64.464	48.912	39.319
24	1.758	0.708	0.301	0.146	0.075	160.26	100.5	70.022	53.239	42.836
26	1.761	0.748	0.323	0.157	0.081	167.97	107.67	75.504	57.537	46.339
28	1.756	0.784	0.344	0.168	0.087	175.08	114.6	80.908	61.803	49.825
30	1.747	0.816	0.365	0.179	0.093	181.64	121.29	86.231	66.034	53.295
32	1.734	0.845	0.384	0.19	0.099	187.71	127.74	91.469	70.229	56.747
34	1.718	0.872	0.403	0.2	0.105	193.36	133.97	96.62	74.386	60.18
36	1.7	0.895	0.421	0.21	0.11	198.62	139.96	101.68	78.504	63.593
38	1.68	0.916	0.439	0.221	0.116	203.53	145.73	106.65	82.581	66.985
40	1.66	0.934	0.455	0.23	0.121	208.1	151.28	111.52	86.615	70.355
42	1.638	0.95	0.471	0.24	0.127	212.4	156.62	116.3	90.605	73.703
44	1.617	0.964	0.486	0.249	0.132	216.43	161.75	120.98	94.55	77.027
46	1.594	0.976	0.5	0.258	0.137	220.23	166.67	125.56	98.449	80.327
48	1.572	0.986	0.513	0.267	0.142	223.8	171.41	130.05	102.3	83.602
50	1.55	0.994	0.526	0.276	0.147	227.16	175.95	134.44	106.1	86.851
52	1.528	1	0.538	0.284	0.152	230.34	180.33	138.72	109.86	90.073
54	1.506	1.006	0.549	0.292	0.157	233.34	184.52	142.92	113.56	93.268
56	1.485	1.009	0.56	0.3	0.162	236.19	188.55	147.01	117.21	96.435
58	1.463	1.012	0.569	0.307	0.166	238.91	192.43	151.01	120.81	99.574
60	1.442	1.014	0.578	0.314	0.171	241.51	196.15	154.92	124.36	102.68

función elíptica $a=2m$ y $b=1m$

uB (cm)	F (Tn)					X (cm)				
	a=2m b=1m P=1Tn					a=2m b=1m				
	$\bar{r}=0.25m$	$\bar{r}=0.5m$	$\bar{r}=1m$	$\bar{r}=1.5m$	$\bar{r}=2m$	$\bar{r}=0.25m$	$\bar{r}=0.5m$	$\bar{r}=1m$	$\bar{r}=1.5m$	$\bar{r}=2m$
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	1.117	0.277	0.06	0.022	0.01	31.189	15.927	7.993	5.331	3.999
4	1.868	0.538	0.119	0.044	0.02	58.374	31.437	15.944	10.651	7.994
6	2.241	0.768	0.177	0.066	0.03	80.215	46.173	23.814	15.95	11.98
8	2.378	0.963	0.234	0.088	0.04	97.33	59.89	31.564	21.216	15.953
10	2.395	1.118	0.288	0.109	0.05	110.79	72.442	39.161	26.438	19.909
12	2.353	1.237	0.34	0.13	0.059	121.548	83.796	46.572	31.608	23.843
14	2.287	1.324	0.388	0.151	0.069	130.3	93.989	53.772	36.717	27.751
16	2.21	1.385	0.434	0.171	0.078	137.56	103.09	60.739	41.753	31.63
18	2.131	1.424	0.476	0.19	0.087	143.645	111.21	67.46	46.711	35.477
20	2.053	1.447	0.515	0.209	0.096	148.852	118.44	73.911	51.582	39.286
22	1.978	1.457	0.55	0.226	0.105	153.335	124.91	80.1	56.361	43.056
24	1.907	1.456	0.582	0.244	0.114	157.254	130.68	86.005	61.041	46.782
26	1.841	1.449	0.611	0.26	0.122	160.687	135.86	91.641	65.618	50.462
28	1.777	1.437	0.636	0.276	0.13	163.743	140.53	97.006	70.087	54.093
30	1.718	1.42	0.658	0.29	0.138	166.476	144.73	102.1	74.445	57.672
32	1.662	1.4	0.678	0.304	0.145	168.937	148.55	106.94	78.691	61.198
34	1.609	1.379	0.694	0.317	0.153	171.177	152	111.52	82.822	64.667
36	1.559	1.356	0.708	0.33	0.16	173.198	155.17	115.85	86.831	68.079
38	1.512	1.332	0.72	0.341	0.166	175.015	158.07	119.97	90.723	71.431
40	1.467	1.307	0.729	0.352	0.173	176.73	160.72	123.84	94.503	74.723
42	1.425	1.282	0.737	0.361	0.179	178.259	163.16	127.53	98.159	77.953
44	1.384	1.257	0.742	0.37	0.185	179.702	165.4	130.99	101.7	81.122
46	1.346	1.232	0.746	0.378	0.19	181.009	167.49	134.28	105.13	84.224
48	1.308	1.208	0.749	0.386	0.195	182.266	169.43	137.4	108.44	87.262
50	1.274	1.183	0.75	0.392	0.2	183.366	171.23	140.33	111.64	90.239
52	1.239	1.159	0.75	0.398	0.204	184.466	172.89	143.11	114.74	93.148
54	1.208	1.135	0.748	0.403	0.209	185.432	174.47	145.74	117.72	95.992
56	1.177	1.112	0.746	0.408	0.212	186.34	175.91	148.24	120.6	98.774
58	1.146	1.089	0.743	0.412	0.216	187.247	177.29	150.6	123.38	101.49
60	1.118	1.066	0.739	0.415	0.219	188.045	178.56	152.85	126.06	104.14

función elíptica $a=1m$ y $b=0.5m$

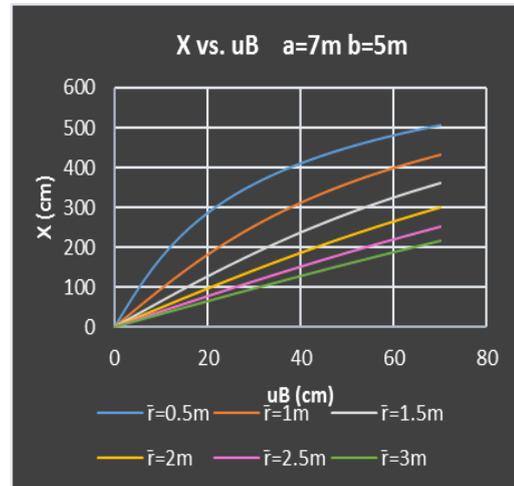
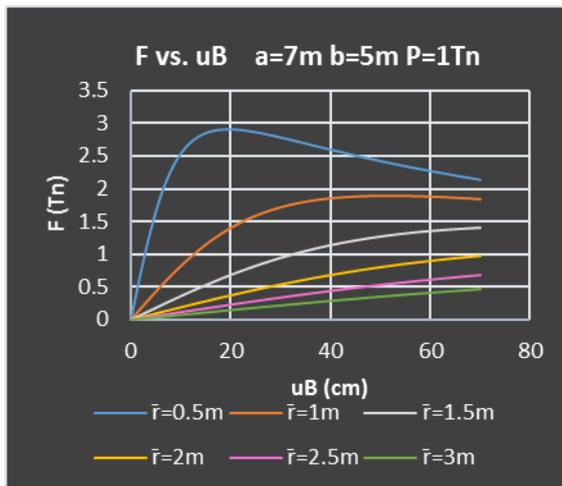
uB (cm)	F (Tn)			X (cm)		
	a=1m b=0.5m P=1Tn			a=1m b=0.5m		
	$\bar{r}=0.25m$	$\bar{r}=0.5m$	$\bar{r}=1m$	$\bar{r}=0.25m$	$\bar{r}=0.5m$	$\bar{r}=1m$
0	0	0	0	0	0	0
2	0.538	0.119	0.02	15.718	7.972	3.997
4	0.962	0.234	0.04	29.942	15.78	7.976
6	1.237	0.34	0.059	41.9	23.29	11.921
8	1.385	0.434	0.078	51.546	30.37	15.815
10	1.447	0.515	0.096	59.22	36.96	19.642
12	1.456	0.582	0.114	65.336	43	23.39
14	1.437	0.636	0.13	70.261	48.5	27.045
16	1.4	0.678	0.145	74.277	53.47	30.597
18	1.356	0.708	0.16	77.58	57.93	34.038
20	1.307	0.729	0.173	80.352	61.92	37.361
22	1.257	0.742	0.185	82.711	65.5	40.56
24	1.208	0.749	0.195	84.707	68.7	43.63
26	1.159	0.75	0.204	86.446	71.56	46.573
28	1.112	0.746	0.212	87.96	74.12	49.386
30	1.066	0.739	0.219	89.281	76.42	52.068
32	1.022	0.729	0.225	90.442	78.5	54.625
34	0.98	0.717	0.229	91.478	80.36	57.056
36	0.94	0.703	0.233	92.427	82.06	59.366
38	0.901	0.688	0.235	93.225	83.59	61.559
40	0.864	0.672	0.236	93.981	84.99	63.642
42	0.828	0.654	0.236	94.631	86.26	65.609
44	0.793	0.636	0.236	95.264	87.42	67.476
46	0.761	0.618	0.234	95.772	88.49	69.243
48	0.728	0.599	0.232	96.28	89.48	70.918
50	0.697	0.58	0.229	96.737	90.36	72.498

función elíptica $a=0.5m$ y $b=0.25m$

uB (cm)	F (Tn)			X (cm)		
	a=0.5m b=0.25m P=1Tn			a=0.5m b=0.25m		
	$\bar{r}=0.15m$	$\bar{r}=0.25m$	$\bar{r}=0.5m$	$\bar{r}=0.15m$	$\bar{r}=0.25m$	$\bar{r}=0.5m$
0	0	0	0	0	0	0
2	0.687	0.234	0.04	12.76	7.891	3.988
4	1.09	0.434	0.078	22.895	15.184	7.907
6	1.235	0.582	0.114	30.021	21.501	11.695
8	1.246	0.678	0.145	34.917	26.733	15.299
10	1.199	0.729	0.173	38.353	30.96	18.68
12	1.131	0.749	0.195	40.852	34.345	21.815
14	1.056	0.746	0.212	42.73	37.059	24.692
16	0.981	0.729	0.225	44.178	39.247	27.314
18	0.909	0.703	0.233	45.313	41.03	29.682
20	0.841	0.672	0.236	46.233	42.497	31.818
22	0.776	0.636	0.236	46.981	43.711	33.738
24	0.715	0.599	0.232	47.587	44.741	35.457
26	0.657	0.561	0.225	48.09	45.596	36.999
28	0.602	0.522	0.216	48.534	46.328	38.38
30	0.551	0.483	0.204	48.849	46.958	39.615
32	0.5	0.445	0.191	49.158	47.498	40.729
34	0.453	0.406	0.175	49.354	47.945	41.725
36	0.408	0.368	0.159	49.488	48.354	42.628
38	0.364	0.33	0.141	49.623	48.678	43.44
40	0.319	0.293	0.122	49.758	48.998	44.172

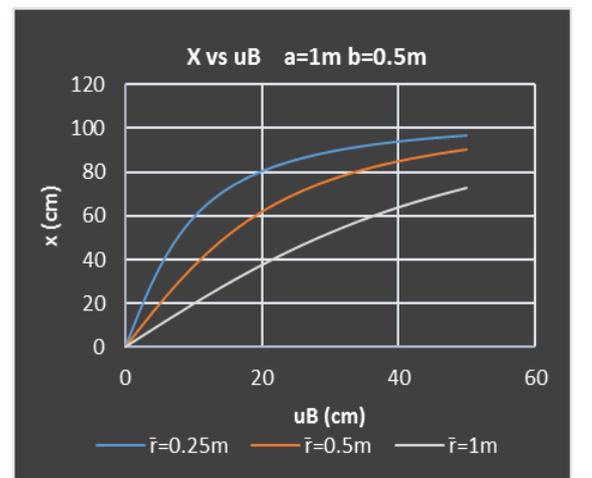
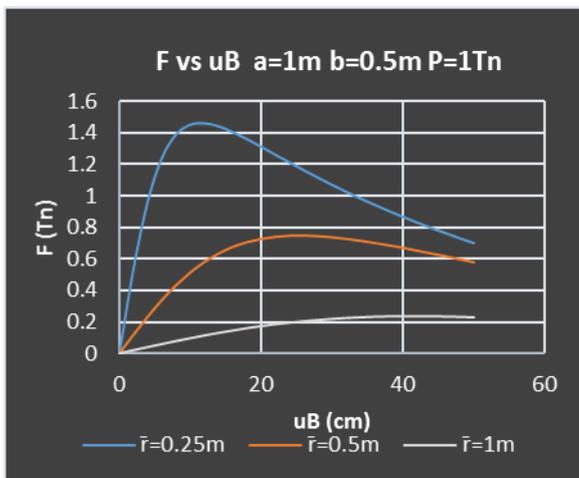
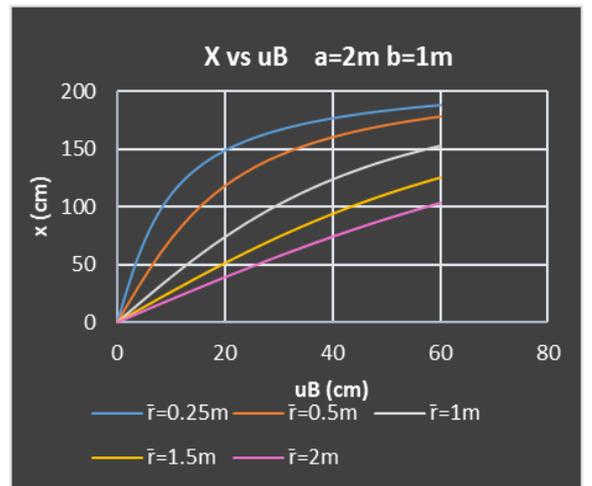
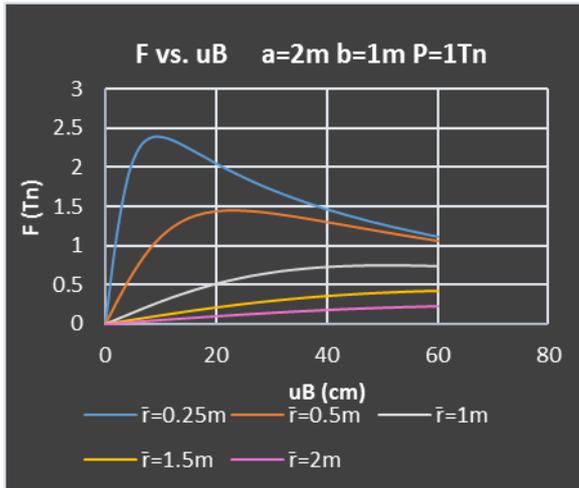
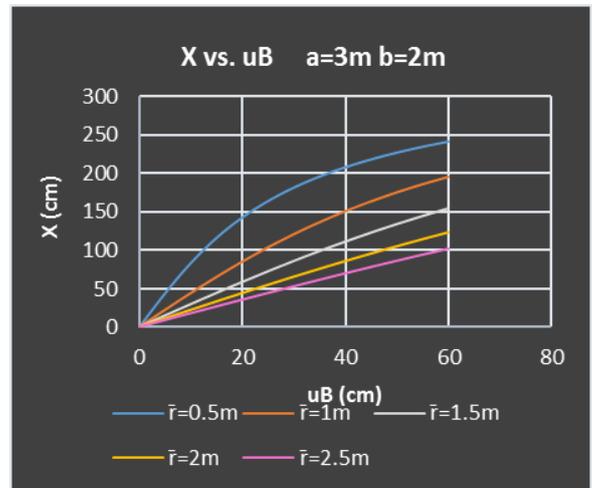
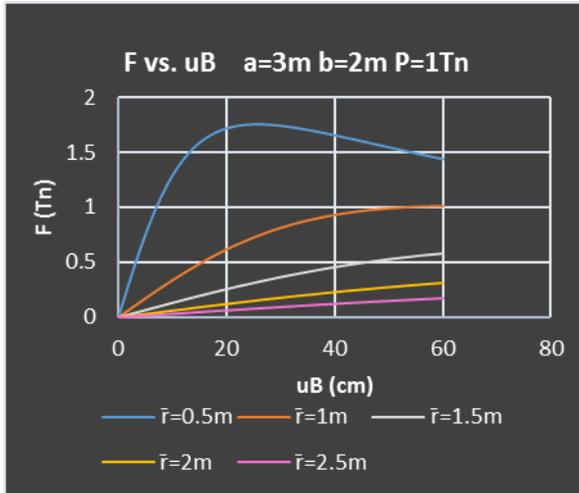
F (fuerza restitutiva) vs uB

x(longitud de la generatriz horizontal) vs uB



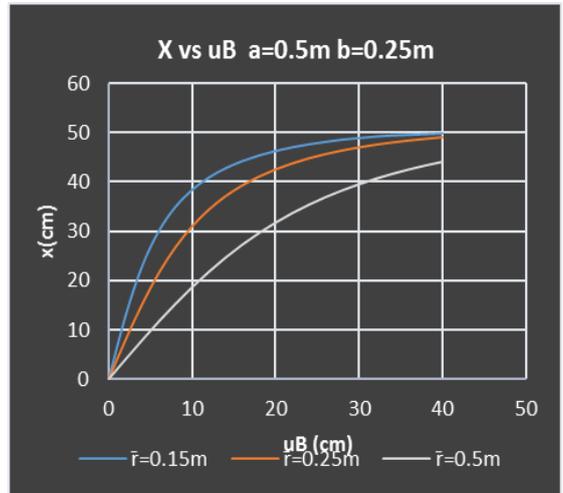
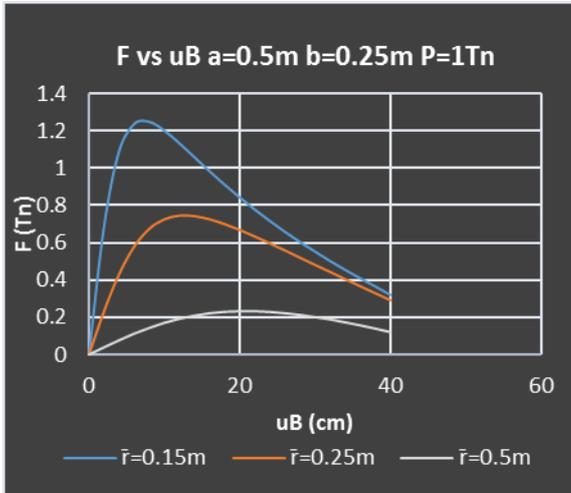
F (fuerza restitutiva) vs uB

x(longitud de la generatriz horizontal) vs uB



*F (fuerza restitutiva)
vs u_B*

*x(longitud de la generatriz horizontal)
vs u_B*



Anexo 04

Estudio de mecánica de suelos

