

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL**



***PROPUESTA DE UN SISTEMA ECONÓMICO DE
AISLAMIENTO SÍSMICO PARA VIVIENDAS***

TESIS

**Para optar el Título Profesional de:
INGENIERO CIVIL**

LUIS ALBERTO BEDRIÑANA MERA

Lima- Perú

2009

RESUMEN

La filosofía convencional del diseño sismo resistente, está basada en dotar a las estructuras de una combinación de resistencia, redundancia y ductilidad tal que sean capaces de soportar la demanda sísmica. Por lo que muchos de los elementos en la estructura deben incursionar en el rango de comportamiento inelástico para lograr tales objetivos de ductilidad. En contraste las nuevas técnicas del control de la respuesta plantean dotar a la estructura de elementos, especialmente diseñados, que sean capaces de soportar toda la demanda sísmica y concentrar el daño fuera de la estructura principal. Una de estas nuevas técnicas es conocida como Aislamiento Sísmico o Aislamiento de Base.

En el presente trabajo se propone un sistema de aislamiento sísmico del tipo friccional y se estudia su eficiencia para aplicarla en edificaciones de mampostería. Este sistema propuesto es sencillo, se basa en planchas de metal que desacoplan a la estructura de su cimentación. Se busca que el sistema sea económico, con el objeto de que sea aplicable en las zonas de nuestro país que son muy propensas a eventos sísmicos y que en muchos casos son zonas en desarrollo.

Para conocer las características principales del dispositivo propuesto se realizaron ensayos de carga cíclica, sometiendo al sistema a distintos niveles de carga vertical para estudiar la respuesta del dispositivo en distintas condiciones de servicio. Se determinó además los principales parámetros que determinan el comportamiento del dispositivo.

Con el objeto de verificar la eficacia del sistema de aislamiento propuesto se efectuó una serie de análisis sísmicos a una estructura de mampostería típica y se efectuó la comparación de la respuesta con y sin aislamiento. Esta estructura fue sometida a distintos eventos sísmicos registrados en la ciudad de Lima para el análisis dinámico. Adicionalmente se estudia la variación de la respuesta de diferentes estructuras de un piso aisladas sísmicamente con el sistema propuesto.

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS.....	viii
LISTA DE FOTOGRAFÍAS	xi
LISTA DE TABLAS.....	xii
LISTA DE SIMBOLOS	xiii
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1 ESTADO DEL ARTE EN EL AISLAMIENTO SÍSMICO	3
1.1 Antecedentes.....	3
1.2 Fundamentos del sistema de aislamiento sísmico	4
1.3 Sistemas de aislamiento sísmico	8
1.3.1 Aisladores flexibles basados en Caucho.....	8
1.3.1.1 Aisladores de caucho natural.....	8
1.3.1.2 Aisladores de caucho con corazón de plomo.....	10
1.3.1.3 Aisladores de caucho de alto amortiguamiento.....	13
1.3.2 Aisladores por fricción	15
1.3.2.1 Aisladores de fricción pura	15
1.3.2.2 Sistema de aislamiento “Electricité de France”	17
1.3.2.3 Sistema de aislamiento Elástico Friccionante (R-FBI).....	19
1.3.2.4 Sistema de Péndulo de Fricción (FPS).....	20
1.3.3 Sistemas de Aislamiento Rodantes	24
1.3.3.1 Aisladores con rodillos.....	24
1.3.3.2 Aisladores rodantes con esferas.....	25
1.3.3.3 Sistema de riel rodante.....	26
1.4 Construcción y mantenimiento de sistemas de aislamiento.....	27
CAPÍTULO 2 SISTEMA DE AISLAMIENTO PROPUESTO	36
2.1 Características del sistema propuesto.....	36
2.2 Comportamiento dinámico del sistema	38
2.3 Principales parámetros del comportamiento dinámico	39

CAPÍTULO 3 ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL SISTEMA DE AISLAMIENTO PROPUESTO	44
3.1 Objetivos de los ensayos	44
3.2 Descripción del dispositivo estudiado	44
3.3 Instalaciones y montaje para los ensayos.....	45
3.4 Instrumentación para el ensayo	48
3.5 Programa de ensayos.....	51
3.6 Principales resultados de los ensayos	52
3.7 Análisis de resultados de los ensayos	62
CAPÍTULO 4 RESPUESTA DEL SISTEMA DE AISLAMIENTO EN VIVIENDAS.....	72
4.1 Propiedades del modelo de vivienda estudiado	72
4.2 Diseño preliminar del sistema de aislamiento empleado.....	74
4.2.1 Parámetros y propiedades principales	74
4.3 Respuesta sísmica no lineal de la estructura aislada	79
4.3.1 Curvas de capacidad de la estructura con base fija	84
4.3.2 Análisis dinámico de la estructura con base fija	87
4.3.3 Análisis dinámico de la estructura con base aislada	92
CAPÍTULO 5 ESTUDIO PARAMÉTRICO DE LA RESPUESTA DE ESTRUCTURAS AISLADAS.....	99
5.1 Planteamiento del problema	99
5.2 Respuesta de la estructura ante movimientos en la base	101
CONCLUSIONES.....	108
RECOMENDACIONES	110
BIBLIOGRAFÍA.....	111
ANEXOS.....	A.1
A.1 Teoría lineal del aislamiento sísmico	A.1
A.2 Archivo fotográfico del estudio experimental del dispositivo.....	A.6
A.3 Plano del dispositivo ensayado.....	A.9

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Configuración del sistema de aislamiento en un edificio.....	5
Figura 1.2 Disminución del cortante basal en estructuras aisladas.....	5
Figura 1.3 Desplazamiento en la base de estructuras aisladas.....	6
Figura 1.4 Comportamiento de una estructura con base fija y base aislada.....	7
Figura 1.5 Influencia del suelo en la respuesta de estructuras aisladas.....	7
Figura 1.6 Características de un dispositivo de caucho natural.....	9
Figura 1.7 Curva de histéresis para el dispositivo de caucho natural.....	9
Figura 1.8 Esquema del dispositivo de caucho con corazón de plomo.....	11
Figura 1.9 Curvas de histéresis para el caucho con corazón de plomo.....	11
Figura 1.10 Modelo de histéresis para el caucho con corazón de plomo.....	12
Figura 1.11 Comportamiento del caucho de alto amortiguamiento.....	15
Figura 1.12 Sistema de aislamiento propuesto por Calantarients en 1909.....	16
Figura 1.13 Conexiones para instalaciones propuestas por Calantarients.....	17
Figura 1.14 Curva de histéresis teórica para dispositivos de fricción pura.....	17
Figura 1.15 Esquema del dispositivo aislador “Electricité de France”.....	18
Figura 1.16 Modelo para la curva de histéresis del “Electricité de France”.....	18
Figura 1.17 Esquema del dispositivo aislador de fricción elástica.....	19
Figura 1.18 Sistema de aislamiento del Péndulo de Fricción.....	21
Figura 1.19 Principio de funcionamiento del Péndulo de Fricción.....	22
Figura 1.20 Comportamiento dinámico del péndulo de fricción.....	22
Figura 1.21 Curva de histéresis experimental del Péndulo de Fricción.....	23
Figura 1.22 Esquema del aislador deslizante con rodillos.....	25
Figura 1.23 Curvas de histéresis del dispositivo deslizante con rodillos.....	25
Figura 1.24 Esquema del dispositivo de aislamiento con esferas rodantes.....	26
Figura 1.25 Esquema del dispositivo de aislamiento de riel rodante.....	26
Figura 1.26 Curvas de histéresis del aislador de tren rodante.....	27
Figura 1.27 Parámetros de verificación de aisladores.....	28
Figura 1.28 Nivel de ajuste de la plancha de base para el aislador.....	29
Figura 1.29 Construcción de los apoyos para los aisladores.....	30
Figura 1.30 Vaciado de concreto en los apoyos de los aisladores.....	30
Figura 1.31 Colocación de los aisladores en los apoyos.....	31
Figura 1.32 Empalme del dispositivo aislador a la columna.....	32

Figura 2.1	Dispositivo de aislamiento propuesto y sus dimensiones	37
Figura 2.2	Comportamiento dinámico del dispositivo propuesto.	39
Figura 2.3	Variación real del coeficiente de rozamiento con la velocidad	40
Figura 2.4	Variación ideal del coeficiente de rozamiento con la velocidad.	41
Figura 2.5	Variación del coeficiente de rozamiento con la presión vertical.....	42
Figura 2.6	Variación del rozamiento respecto a la presión vertical.....	42
Figura 3.1	Vista frontal del montaje para los ensayos.....	46
Figura 3.2	Vista lateral del montaje para los ensayos.....	47
Figura 3.3	Ubicación de los transductores para los ensayos.....	50
Figura 3.4	Esquema del ensayo cíclico.....	51
Figura 3.5	Curva de histéresis del dispositivo sin carga vertical.....	54
Figura 3.6	Historia de la carga lateral aplicada al dispositivo (V=5tn).....	54
Figura 3.7	Historia del desplazamiento del dispositivo (V=5tn).	55
Figura 3.8	Curvas de histéresis a cada lado del dispositivo (V=5tn).....	56
Figura 3.9	Curva de histéresis del dispositivo (V=5tn).	56
Figura 3.10	Curvas de histéresis a cada lado del dispositivo (V=10tn).....	57
Figura 3.11	Curva de histéresis en el centro del dispositivo (V=10tn).	58
Figura 3.12	Curvas de histéresis a cada lado del dispositivo (V=2.65tn).....	58
Figura 3.13	Curva de histéresis en el centro del dispositivo (V=2.65tn).	59
Figura 3.14	Curvas de histéresis a cada lado del dispositivo (V=7.65tn).....	60
Figura 3.15	Curva de histéresis en el centro del dispositivo (V=7.65tn).	61
Figura 3.16	Variación de la carga con la presión vertical en el dispositivo.	62
Figura 3.17	Valores principales de los resultados en el dispositivo.....	63
Figura 3.18	Parámetros principales de la curva de histéresis del aislador.	64
Figura 3.19	Variación de la energía disipada con la presión vertical	65
Figura 3.20	Variación de la rigidez efectiva con la presión vertical.....	66
Figura 3.21	Variación del amortiguamiento con la presión vertical.....	68
Figura 3.22	Variación del coeficiente de fricción con la presión vertical.	69
Figura 3.23	Variación de la rigidez inicial con la presión vertical.....	70
Figura 3.24	Variación de la degradación de rigidez con la presión vertical	70
Figura 3.25	Variación de la fuerza de fluencia con la presión vertical	71
Figura 4.1	Dimensiones en planta de la vivienda estudiada.	73
Figura 4.2	Vista en planta del nivel de aislamiento de la estructura.	76
Figura 4.3	Metodología para evaluación de estructuras de mampostería	80
Figura 4.4	Comportamiento de los muros de mampostería confinada	82

Figura 4.5 Comportamiento de un muro de mampostería confinada.....	82
Figura 4.6 Modelo estructural de un muro de mampostería	83
Figura 4.7 Modelo de histéresis para la mampostería usado en el STERA 3D .	83
Figura 4.8 Comportamiento de un muro de mampostería	84
Figura 4.9 Análisis pushover de la vivienda en el programa STERA 3D.	84
Figura 4.10 Curva de capacidad de la estructura con base fija.	85
Figura 4.11 Espectro de Capacidad de la estructura con base fija.....	87
Figura 4.12 Variación de la masa durante el análisis pushover.....	88
Figura 4.13 Sistema de 1GDL equivalente de la estructura con base fija.....	89
Figura 4.14 Espectro de respuesta de los sismos empleados.....	90
Figura 4.15 Desplazamientos de la estructura con base fija	92
Figura 4.16 Análisis del sistema de 1GDL con base aislada.	93
Figura 4.17 Desplazamientos de la estructura con base aislada.....	94
Figura 4.18 Distorsiones de entrepiso en la estructura con base fija.....	95
Figura 4.19 Distorsiones de entrepiso de la estructura aislada.	95
Figura 4.20 Comparación de las distorsiones para el sismo 6.	96
Figura 5.1 Modelo de 1GDL de una estructura aislada por fricción.....	99
Figura 5.2 Desplazamiento en la base de la estructura ante un movimiento sinusoidal en la base.	104
Figura 5.3 Deformación en la estructura aislada, sometida a un movimiento sinusoidal en la base.	104
Figura 5.4 Amplificación de aceleraciones en la estructura aislada.....	105
Figura 5.5 Deformaciones en estructuras aislada sismicamente ante un movimiento en la base.	105
Figura 5.6 Comparación de la amplificación de la aceleración en estructuras aisladas y con base fija.....	106
Figura 5.7 Comparación de la deformación en estructuras aisladas y estructuras con base fija.	106

LISTA DE FOTOGRAFÍAS

Foto 1.1 Conexión del aislador a la estructura	32
Foto 2.1 Disco circular del dispositivo	38
Foto 3.1 Vista del dispositivo de aislamiento ensayado.	45
Foto 3.2 vista del montaje final para los ensayos.....	47
Foto 3.3 Equipo de adquisición de los datos del ensayo.....	50
Foto 3.4 Desgaste en la superficie del dispositivo.....	61
Foto A.1 Planchas de metal usadas en el dispositivo.....	A.6
Foto A.2 Construcción del dispositivo.	A.6
Foto A.3 Disco del dispositivo.	A.6
Foto A.4 Detalle de las láminas colocadas en el disco para la medición.	A.6
Foto A.5 Instalación del dispositivo en el mecano de cargas	A.6
Foto A.6 Colocación de los sensores de medición.....	A.6
Foto A.7 Montaje final para los ensayos.	A.7
Foto A.8 Desarrollo de los ensayos.	A.7
Foto A.9 Ensayo con 5tn de carga vertical.....	A.7
Foto A.10 Desplazamiento en el dispositivo con 5tn de carga vertical.	A.7
Foto A.11 Detalle de la aplicación de carga vertical.....	A.7
Foto A.12 Desplazamiento en el dispositivo con 2.65tn de carga vertical.	A.7
Foto A.13 Detalle de los rodillos usados para los ensayos.	A.8
Foto A.14 Instante del levantamiento del eje horizontal.	A.8
Foto A.15 Detalle del desgaste por fricción en el disco.....	A.8
Foto A.16 Estado final del dispositivo luego de los ensayos.	A.8

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1	Parámetros para la verificación de los aisladores.....	33
Tabla 1.2	Parámetros para la inspección del sistema de aislamiento.	35
Tabla 3.1	Valor de carga vertical aplicada en cada ensayo.....	52
Tabla 3.2	Peso del montaje sobre el espécimen.....	53
Tabla 3.3	Principales resultados del primer ciclo de carga en los ensayos.	63
Tabla 3.4	Principales parámetros del dispositivo calculados de los ensayos. ...	64
Tabla 4.1	Masas y rigideces laterales de la vivienda estudiada.	74
Tabla 4.2	Modos de vibración de la vivienda para cada dirección de análisis ...	74
Tabla 4.3	Área tributaria de cada tipo de aislador.....	75
Tabla 4.4	Presión vertical en los aisladores.....	76
Tabla 4.5	Coefficiente de fricción en los aisladores.....	77
Tabla 4.6	Rigidez efectiva del sistema de aislamiento.....	77
Tabla 4.7	Amortiguamiento equivalente del sistema de aislamiento.....	78
Tabla 4.8	<i>Rigidez inicial del modelo no lineal de los aisladores</i>	78
Tabla 4.9	Degradación de rigidez para cada tipo de aislador.....	79
Tabla 4.10	Fuerza de deslizamiento para cada tipo de aislador.....	79
Tabla 4.11	Parámetros principales del modelo trilineal del sistema 1GDL.....	89
Tabla 4.12	Catálogo de registros sísmicos empleados en el análisis.....	90
Tabla 4.13	Respuesta máxima de la estructura con base fija para cada registro sísmico.....	91
Tabla 4.14	Respuesta máxima de la estructura aislada para cada registro sísmico.....	93
Tabla 4.15	Reducción de la respuesta sísmica de la estructura por el uso de aisladores.....	97
Tabla 5.1	Valores máximos de respuesta de la estructura aislada.....	103

LISTA DE SIMBOLOS

K_H :	Rigidez lateral.
A :	Área neta de la sección transversal.
t_c :	Espesor total del caucho.
G :	Módulo de corte.
E_c :	Módulo de compresión del caucho.
E_m :	Módulo de elasticidad del material.
K_V :	Rigidez vertical.
K_p :	Rigidez lateral del plomo.
K_c :	Rigidez lateral del caucho.
C_2 :	Factor de modificación de rigidez.
G_c :	Módulo de corte del caucho.
A_c :	Área de la sección de caucho.
G_p :	Módulo de corte del plomo.
A_p :	Área de la sección de plomo.
t_p :	Espesor total del plomo.
t :	Espesor neto del muro.
γ :	Deformación unitaria de corte.
Q_y :	Fuerza cortante de fluencia.
C_q :	Factor de corrección de la fuerza de fluencia.
σ_{yp} :	Esfuerzo de fluencia del plomo.
K_{H1} :	Rigidez lateral elástica.
K_{H2} :	Rigidez lateral inelástica.
α :	Factor de degradación de rigideces.
F_l :	Fuerza lateral en el dispositivo.
W :	Peso total.
R :	Radio de curvatura.
u :	Desplazamiento lateral.
μ :	Coefficiente de fricción.
v :	Velocidad de deslizamiento.
σ_v :	Esfuerzo vertical o esfuerzo normal.
d :	Desplazamiento máximo del ciclo de histéresis.
K_{ef} :	Rigidez efectiva o equivalente del dispositivo.

T_b :	Periodo del sistema de aislamiento.
β_{eq} :	Amortiguamiento equivalente del sistema.
μ_{max} :	Coefficiente de fricción máximo, para velocidades altas.
μ_{min} :	Coefficiente de fricción mínimo, para velocidades bajas.
	Constante.
	Número de Euler.
	Energía disipada por ciclo de histéresis.
	Rigidez inicial de la curva.
	Rigidez secundaria de la curva.
	Rigidez inicial de la curva.
	Fuerza de deslizamiento del dispositivo.
	Altura del muro.
	Longitud del muro.
	Número de pisos de la estructura.
	Ciclo de cargas del análisis pushover.
m_i :	Masa concentrada en el piso "i".
	Desplazamiento del piso "i" en el ciclo de cargas "z" del análisis pushover.
	Fuerza lateral del piso "i" en el ciclo de cargas "z" del análisis pushover.
	Cortante basal en el ciclo de cargas "z" del análisis pushover.
	Aceleración del espectro de capacidad para el ciclo "z".
	Desplazamiento del espectro de capacidad para el ciclo "z".
	Masa modal utilizada en análisis pushover.
	Fuerza de rozamiento seco (Coulomb).
	Módulo de la fuerza de rozamiento.
	Rigidez lateral.
	Amortiguamiento viscoso del material.
m_b :	Masa de la base sobre el nivel de aislamiento.
m_s :	Masa de la estructura aislada.
u_b :	Desplazamiento lateral total del sistema de aislamiento.
u_s :	Desplazamiento lateral total de la estructura.
	Desplazamiento del terreno.
	Módulo del desplazamiento del terreno.
	Frecuencia del movimiento del terreno.
	Tiempo.
T_s :	Periodo natural de la estructura.

INTRODUCCIÓN

La filosofía convencional del diseño sismo resistente de estructuras, esta basada en el criterio de dotar a las estructuras de una combinación de resistencia, redundancia y ductilidad tal que sean capaces de soportar la demanda símica. Para lograr estos requerimientos de ductilidad la estructura debe incursionar en el rango de comportamiento inelástico y por lo tanto muchos de sus elementos también.

En contraste las nuevas técnicas modernas de diseño sismo resistente plantean dotar a la estructura de ciertos elementos diseñados especialmente, tales que sean en estos donde se localicen los fenómenos no lineales en lugar de los elementos de la estructura. Una de estas técnicas modernas es conocida como Aislamiento Sísmico o Aislamiento de Base.

El concepto del aislamiento sísmico es sencillo, se busca limitar el efecto negativo de los movimientos de la base interponiendo un elemento que pueda absorber dichos movimientos y a la vez soportar las cargas gravitacionales de la estructura. Los aisladores en la mayoría de los casos están fundados en dos criterios:

Desacoplar completamente a la estructura de su cimentación por medio de elementos que permitan deslizarse libremente a la estructura y que disipen energía a través de la fricción.

Desacoplar la estructura de los movimientos horizontales del sismo interponiendo un elemento estructural, flexible y capaz de tomar la excitación símica, entre la estructura y la cimentación.

En el presente trabajo se propone y estudia la eficiencia de un sistema de aislamiento sísmico del tipo friccional para su aplicación en edificaciones de mampostería. El sistema propuesto es simple, ya que busca ser un sistema económico, eficiente y aplicable masivamente en zonas de nuestro país que son muy propensas a eventos sísmicos. Así que el principal objetivo del presente

trabajo es verificar la eficiencia del sistema propuesto en edificaciones de mampostería.

El presente trabajo está organizado en cinco capítulos:

El Capítulo I presenta una breve revisión del estado del Arte en el Aislamiento Sísmico. Se presentan en este capítulo los fundamentos de esta técnica, los principales dispositivos usados en el mundo, las investigaciones realizadas; además se incluye una revisión de los métodos constructivos para estructuras aisladas así como el mantenimiento de estos sistemas.

En el Capítulo II se presenta las características principales del sistema de aislamiento propuesto. Se muestra la geometría, dimensiones, materiales y detalles usados en los dispositivos; además de mostrar las principales características de su funcionamiento y parámetros que lo gobiernan.

En el Capítulo III se desarrolla el estudio experimental del dispositivo ante cargas laterales. Se presentan las características del ensayo realizado y los principales resultados, asimismo se analizan y discuten los resultados del ensayo.

En el Capítulo IV se presenta el análisis de una estructura de mampostería con unidades de fabricación artesanal usando el sistema de aislamiento propuesto, y se compara la respuesta que tenía la estructura con base fija. Para realizar dicho análisis se sigue una metodología para la evaluación por desempeño de estructuras de mampostería y se somete a la estructura a los sismos más severos registrados en Lima, para luego comparar las respuestas máximas obtenidas.

En el Capítulo V se presenta un estudio Paramétrico de la respuesta de estructuras aisladas mediante el sistema propuesto. Se realiza un análisis lineal tiempo historia simple que permita conocer como varía la respuesta al cambiar ciertos parámetros de la estructura aislada.

CAPÍTULO 1 ESTADO DEL ARTE EN EL AISLAMIENTO SÍSMICO

En el siguiente capítulo se revisa el estado del arte en el Aislamiento Sísmico, los fundamentos de esta técnica, las principales investigaciones, materiales y tipos de aisladores empleados en el mundo. Se revisa además las técnicas para la construcción de edificios aislados, así como el mantenimiento de estos sistemas.

1.1 Antecedentes

Si bien el desarrollo de un estudio riguroso del aislamiento sísmico en edificios es una materia reciente, existe un buen número de estructuras antiguas aisladas con algún tipo sistema de aislamiento.

Se ha comprobado la existencia varios procedimientos utilizados por sumerios, griegos, romanos y bizantinos, que colocaban una capa de arena fina bajo el cimiento logrando un aislamiento del tipo friccional [3]. Además existen ciertas evidencias pre-inca de un sistema de gaviones primitivos hechos con fibra vegetal (Shicra) que funcionaron como un sistema de aislamiento. La primera patente para un dispositivo de aislamiento sísmico se presentó en Estados Unidos por Jacob Bechtold, ciudadano alemán, en 1906 y es un dispositivo del tipo de fricción que consistía en esferas de metal [4]. En 1909 J. A. Calantarients presentó una patente de sistemas de apoyos mediante capas de talco para edificios de baja altura en Scarborough, Inglaterra [17]. El primer edificio aislado con un sistema de aislamiento de caucho fue una escuela elemental de Skopje, Macedonia (Ex-Yugoslavia) en 1969. Uno de los primeros edificios aislados con el sistema de fricción fue uno de siete pisos de concreto armado en Sevastopol, Crimea. En 1974 se construyó una escuela de cuatro pisos de concreto armado en la Ciudad de México; en donde cada columna de esta escuela se apoya en dos placas con más de cien esferas metálicas en su interior y un dispositivo que limita el desplazamiento lateral [3].

En 1976 en la Universidad de Berkeley en Estados Unidos, se iniciaron las investigaciones para el empleo de caucho reforzado en el aislamiento de edificios [13], logrando una buena aceptación del sistema en edificios nucleares y edificios de gran importancia. En 1978 se fabricaron los primeros sistemas de caucho reforzado de uso práctico y se experimentaron en un modelo de edificio de cinco pisos.

En Japón desde la década de 1980 ha habido un amplio desarrollo y aplicación de la técnica de aislamiento sísmico. Para el año de 1991 ya existían más de 58 edificios construidos con sistemas de aislamiento de caucho reforzado, para 1995 el número se incrementó a 125 y actualmente se tiene mas 1500 edificios utilizando este sistema.

En cuanto al reforzamiento de estructuras, esta técnica ha tenido gran aceptación en edificios históricos. Existen varios casos de edificios en Estados Unidos reforzados con esta técnica. Ejemplo de ello son "Salt Lake City and County" y el "Masonic Hall".

1.2 Fundamentos del sistema de aislamiento sísmico

El fundamento del aislamiento sísmico es simple. El sistema busca desacoplar a la estructura de las componentes horizontales del movimiento del terreno interponiendo elementos estructurales con baja rigidez lateral entre la estructura y su base. Estos elementos deben ser capaces de transmitir eficientemente las cargas verticales a la cimentación. En la Figura 1.1 se muestra la configuración de un sistema de aislamiento para un edificio.

El sistema de aislamiento le brinda a la estructura un periodo fundamental que es mucho mayor al que tendría la estructura con base fija, y mayor además al periodo predominante del movimiento del terreno (en caso de ser un suelo rígido). Este aumento del periodo en la estructura es de gran beneficio ya que la mayor parte de los movimientos sísmicos producidos en suelos rígidos (como en el caso de Lima), tienen mayor demanda en estructuras con periodos bajos generando mayores fuerzas cortantes en la base. Entonces si se logra incrementar el periodo en la estructura, el comportamiento de ésta pasaría de

una zona de alta demanda a una zona donde la demanda es menor y por lo tanto la fuerza en la estructura también sería menor como se puede ver en la Figura 1.2. Sin embargo el desplazamiento en el nivel del aislamiento aumentaría, ya que para periodos altos mayor es el desplazamiento de la estructura (Figura 1.3). Este beneficio se obtiene aun sin un incremento en el amortiguamiento del sistema, pero suele usarse amortiguadores adicionales al sistema de aislamiento para controlar la deformación en el nivel del aislamiento.

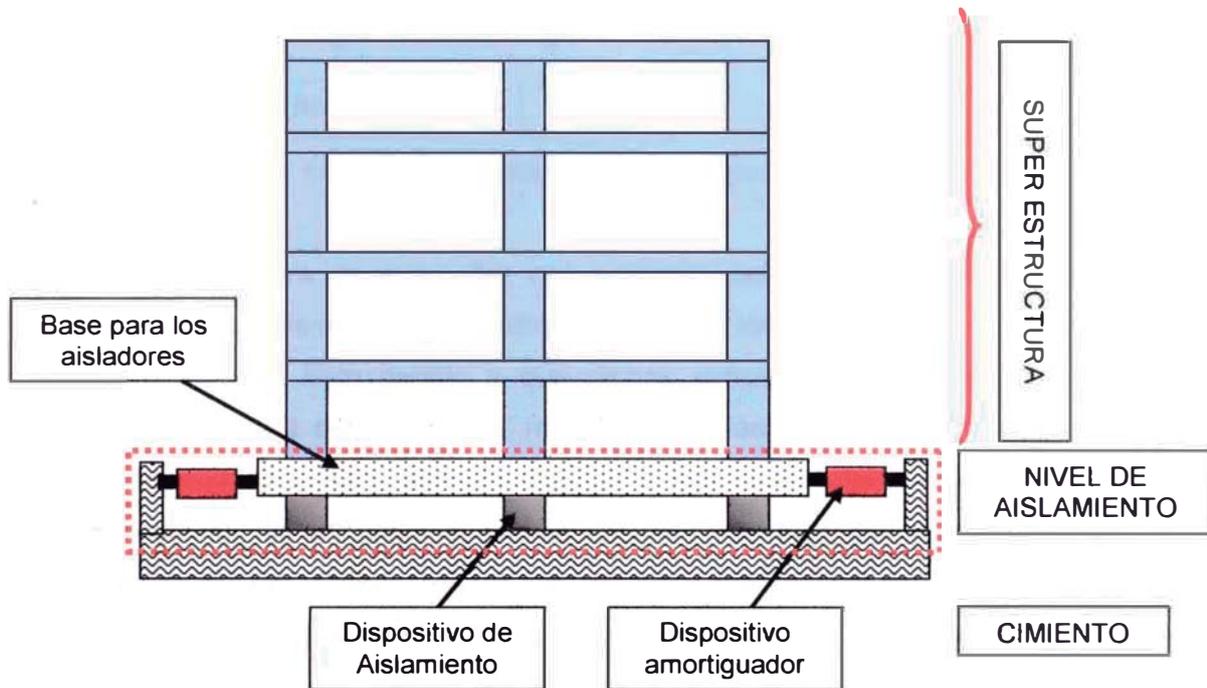


Figura 1.1 Configuración del sistema de aislamiento en un edificio.

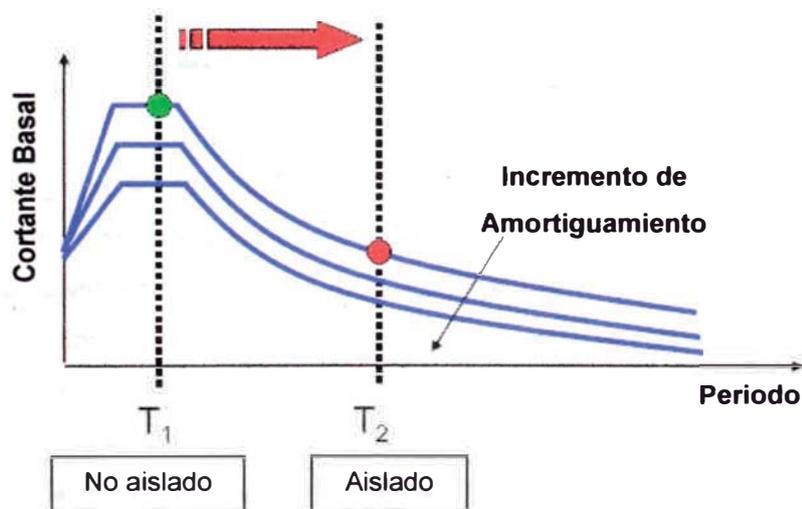


Figura 1.2 Disminución del cortante basal en estructuras aisladas

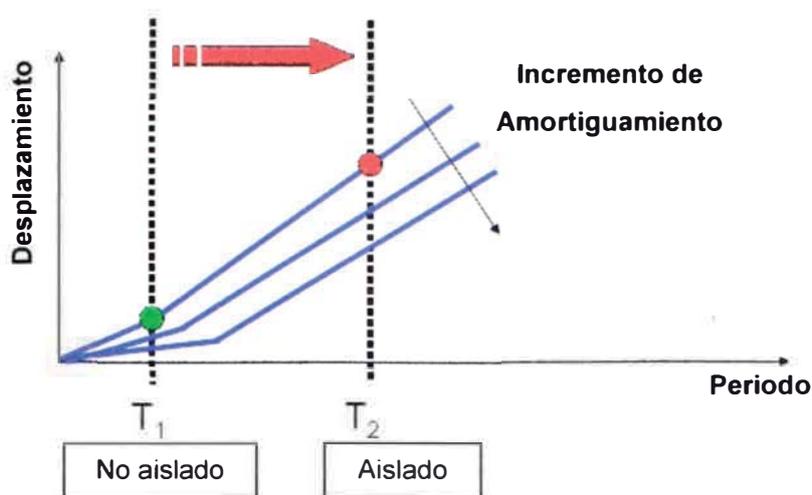


Figura 1.3 Desplazamiento en la base de estructuras aisladas.

En una estructura de base fija convencional, las fuerzas en la estructura producto de un sismo severo ocasionan daño en los elementos estructurales y no estructurales. Esto debido a que dichas estructuras son diseñadas para disipar la energía del sismo por medio de la plastificación y el daño en los elementos estructurales, además de que la estructura soporta distorsiones y aceleraciones de entrepiso considerables. En contraste los edificios aislados tienen un comportamiento en el cual sólo se producen deformaciones en el sistema de aislamiento mientras que la superestructura se mantiene con una deformación pequeña (Figura 1.4), es decir que la superestructura se comporta casi como un cuerpo rígido. Al no haber deformaciones considerables en la superestructura esta se mantiene en el rango elástico y no sufriría daño, por lo que el equipamiento y funcionalidad del edificio esta asegurada aún cuando ocurran sismos severos.

Por otra parte, una de las desventajas del sistema de aislamiento, es el hecho de que para suelos blandos esta técnica no es efectiva. En el caso de suelos blandos los movimientos sísmicos producen fuerzas mayores en estructuras con un periodo fundamental alto, mientras que en las estructuras con periodos bajos las fuerzas son menores (Figura 1.5). Entonces no sería conveniente usar sistemas de aislamiento en estructuras ubicadas en suelos blandos, ya que al aumentar su periodo provocaría que existan fuerzas mayores a las que existirían si la estructura tuviera base fija.

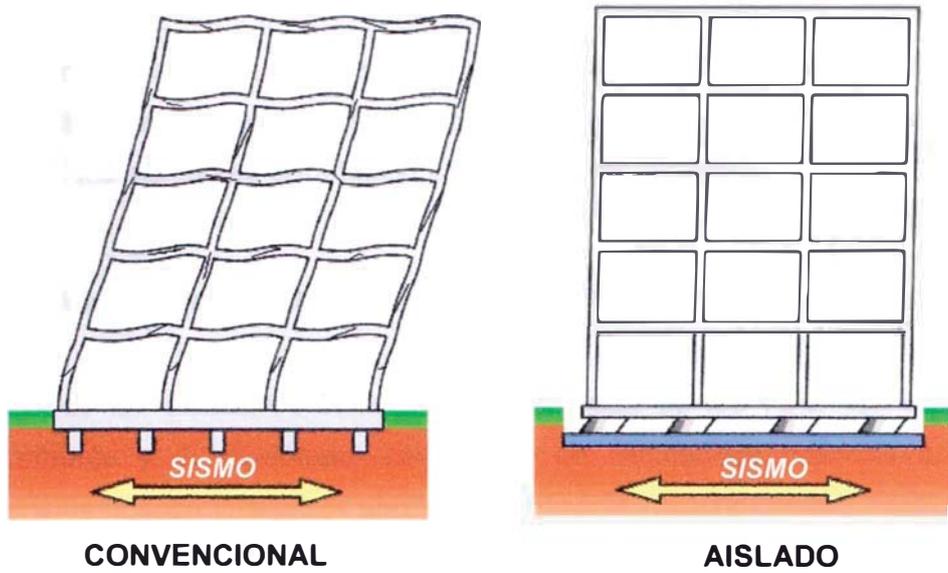


Figura 1.4 Comportamiento de una estructura con base fija y base aislada.

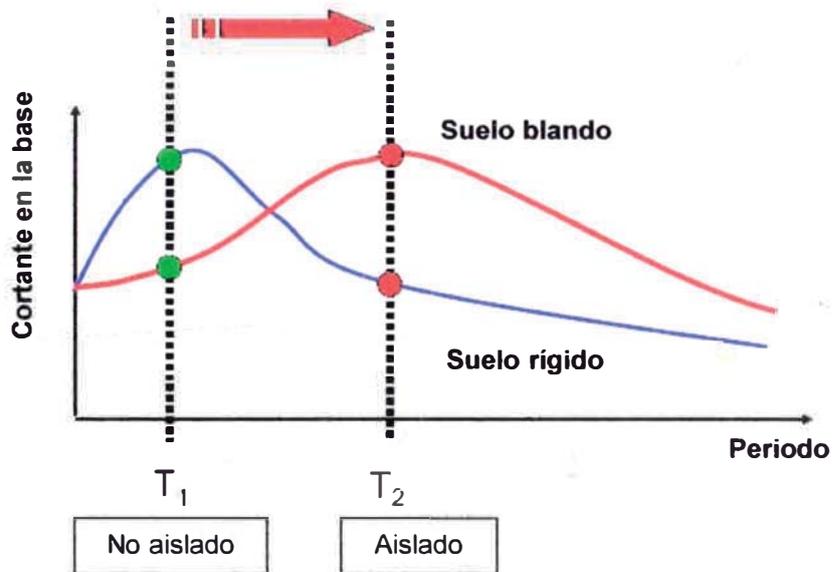


Figura 1.5 Influencia del suelo en la respuesta de estructuras aisladas.

Por lo tanto el sistema de aislamiento es efectivo en estructuras con bajo periodo fundamental (estructuras de mediana altura), y ubicadas en zonas con suelo rígido.

1.3 Sistemas de aislamiento sísmico

El aislamiento sísmico, presenta en esencia tres tipos de sistemas de acuerdo a su principio de funcionamiento. Se tienen los aisladores flexibles (basados en caucho), los aisladores por fricción y los aisladores rodantes.

1.3.1 Aisladores flexibles basados en Caucho

El uso de los aisladores comenzó en la década de los 70's, con el uso de elastómeros y el elastómero reforzado. Los dispositivos basados en estos materiales buscan interponer un elemento flexible (caucho) entre la estructura y la cimentación con el objetivo de incrementar el periodo de la estructura.

1.3.1.1 Aisladores de caucho natural

La Figura 1.6 muestra las características principales de este tipo de dispositivos. Estos dispositivos están compuestos por delgadas capas de caucho unidas a pequeñas laminas de acero, superpuestas una sobre otra y unidas entre si a través de un proceso de vulcanización. Estos dispositivos además se unen a unas planchas de borde de acero, que sirven para fijar el elastómero a la estructura. La forma del dispositivo puede ser circular o cuadrada, aunque se han utilizado mayormente en la forma circular. Las láminas internas de acero sirven de refuerzo vertical, ya que son estas las que le brindan mayor rigidez vertical al caucho, permitiendo que el dispositivo sea capaz de tomar las cargas verticales de la estructura. De esta manera se logra que el dispositivo sea rígido verticalmente y flexible horizontalmente.

El comportamiento dinámico del dispositivo esta determinado por su curva de histéresis, la cual puede ser representada aproximadamente como una línea recta con rigidez lateral K_H . En la Figura 1.7 se aprecia una comparación de la curva de histéresis analítica y la curva de histéresis obtenida de ensayos para un determinado tipo de dispositivo. Se puede deducir de estas curvas que existe un escaso amortiguamiento en este tipo de dispositivos, ya que el área que encierra su lazo es pequeña. El comportamiento del dispositivo por tanto es casi lineal

con deformaciones de corte altas (alrededor del 100% de deformación cortante) y un amortiguamiento del 2% al 3%. Si bien el amortiguamiento no es necesario en un dispositivo de aislamiento sísmico, si es recomendable ya que reduce la magnitud del desplazamiento lateral del sistema de aislamiento. Para estos dispositivos la estabilidad del módulo de elasticidad con el tiempo es buena.

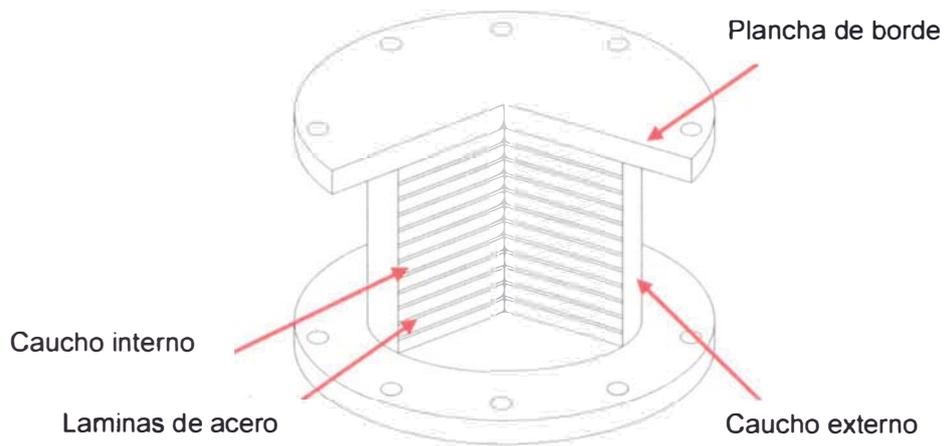


Figura 1.6 Características de un dispositivo de caucho natural.

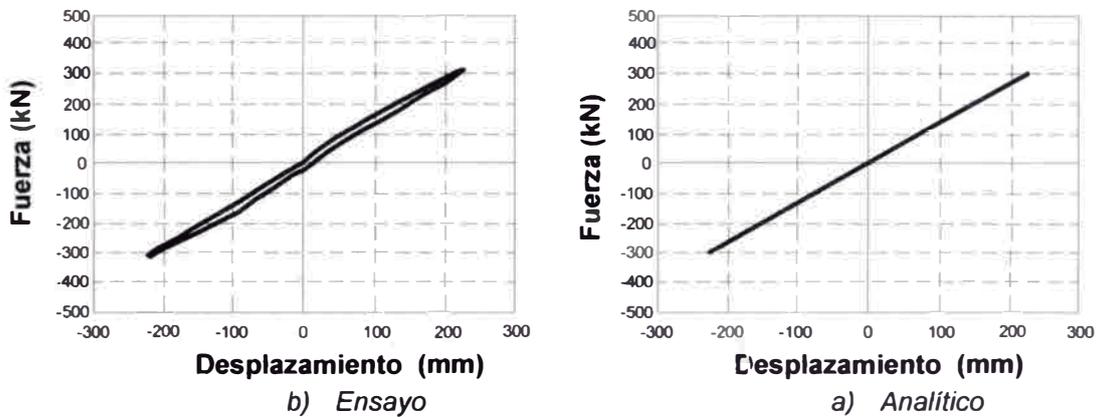


Figura 1.7 Curva de histéresis para el dispositivo de caucho natural. [9]

El valor de la rigidez lateral K_H está determinada por la siguiente expresión

$$K_H = G \frac{A}{t_c} \quad \dots (1.3.1-1)$$

Donde

- G: Módulo de corte del caucho.
- A: Área neta del apoyo.
- t_c : Espesor total del caucho.

El valor de la rigidez vertical del dispositivo esta dado por

$$K_V = E_c \frac{A}{t_c} \dots (1.3.1-2)$$

Donde E_c es el módulo elástico de compresión el cual depende del esfuerzo de compresión y del factor de forma.

Las ventajas de este dispositivo son varias: son simples de fabricar, fácil de modelar por el comportamiento lineal y su comportamiento no es afectado por el tiempo, temperatura, o corrosión. La principal desventaja de este dispositivo es que tiene muy poco amortiguamiento, por lo que se le tiene que usar con dispositivos de amortiguamiento adicionales.

1.3.1.2 Aisladores de caucho con corazón de plomo

El sistema de caucho natural con corazón de plomo fue desarrollado en Nueva Zelanda en 1975 y ha sido utilizado extensamente en Nueva Zelanda, Japón y Estados Unidos [17]. De similares características que el dispositivo de caucho natural, este sistema contiene una o más barras de plomo insertadas en los agujeros del caucho como se aprecia en la Figura 1.8.

Las planchas de acero al interior del dispositivo fuerzan a las barras de plomo a deformarse únicamente por corte, incrementando así la disipación de la energía. La barra plomo se deforma físicamente a un flujo de esfuerzos de alrededor de 10MPa ($1.02 \times 10^6 \text{ kg/m}^2$) con lo que esta barra de plomo fluye y disipa energía brindándole al dispositivo un comportamiento del tipo bilineal. [17]

La Figura 1.9 muestra la comparación las curvas de histéresis analítica y experimental para un mismo espécimen. Se puede apreciar que el área encerrada por el lazo es mayor que en el caso del dispositivo de caucho natural, por lo que el amortiguamiento de este sistema es mucho mayor, sin embargo se observa que el comportamiento del dispositivo tiende a ser curvo debido a la plastificación del plomo.

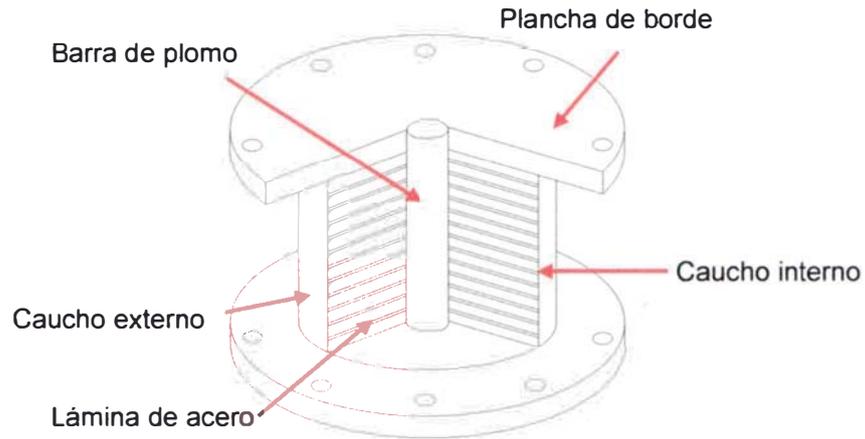


Figura 1.8 Esquema del dispositivo de caucho con corazón de plomo.

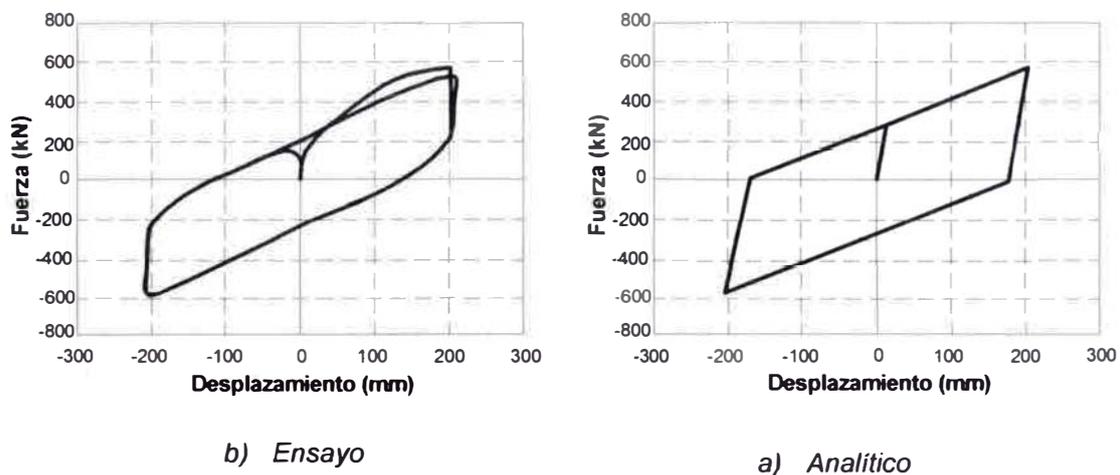


Figura 1.9 Curvas de histéresis para el dispositivo de caucho con corazón de plomo. [9]

El modelo del comportamiento dinámico del dispositivo es de característica bilineal. El modelo para el dispositivo incluiría una rigidez inicial K_{H1} y una rigidez secundaria K_{H2} y la fuerza de fluencia Q_y como se muestra en la Figura 1.10.

El valor de K_{H2} está expresado por la ecuación 1.3.1-3 en donde C_2 es un factor de modificación de rigidez y el valor de K_c es el aporte de rigidez del caucho que se calcula por la ecuación 1.3.1-4 (similar a la expresión para el caucho natural), mientras que K_p es el aporte de rigidez del plomo y se calcula por la ecuación 1.3.1-5. Los valores de G_c , A_c , t_c son el módulo de corte, el área de la sección, y el espesor total respectivamente para el caucho y de similar forma para el plomo en la expresión 1.3.1-5. [9]

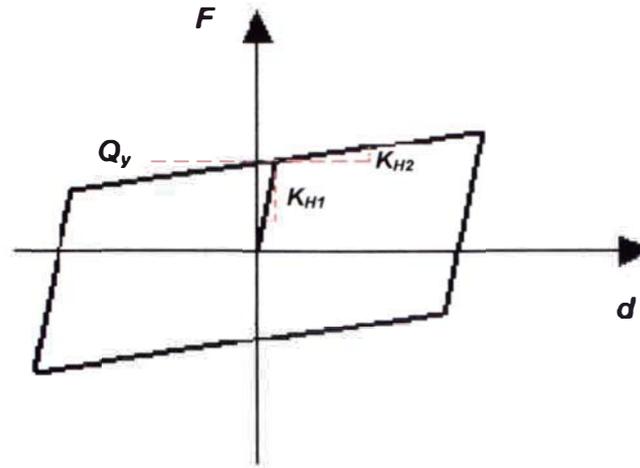


Figura 1.10 Modelo de histéresis para el dispositivo de caucho con corazón de plomo.[9]

$$K_H = C_2(K_c + K_p) \quad \dots (1.3.1-3)$$

$$K_c = G_c \frac{A_c}{t_c} \quad \dots (1.3.1-4)$$

$$K_p = G_p \frac{A_p}{t_p} \quad \dots (1.3.1-5)$$

El factor de modificación de la rigidez C_2 , toma en cuenta la dependencia de la rigidez a la deformación cortante unitaria γ y está determinada por la expresión 1.3.1-6. [9]

$$C_2 = \begin{cases} 0.779\gamma^{-0.43} & (\gamma < 0.25) \\ \gamma^{-0.25} & (0.25 \leq \gamma \leq 1.0) \\ \gamma^{-0.12} & (1.0 \leq \gamma < 2.5) \end{cases} \quad \dots (1.3.1-6)$$

La fuerza de fluencia del dispositivo Q_y se determina por la expresión 1.3.1-7 y depende de la fluencia en la barra de plomo. En dicha expresión el valor de σ_{yp} es el esfuerzo de fluencia del plomo, A_p es el área transversal total del plomo, y C_q es un factor de corrección del valor de Q_y que toma en cuenta el efecto de la dependencia a la deformación por corte. El valor de C_q está expresado por la ecuación 1.3.1-8 [9].

$$Q_y = C_q \sigma_{yp} A_p \quad \dots (1.3.1-7)$$

$$C_q = \begin{cases} 2.036\gamma^{0.41} & (\gamma \leq 0.10) \\ 1.106\gamma^{0.145} & (0.10 < \gamma < 0.50) \\ 1 & (\gamma \geq 0.50) \end{cases} \quad \dots (1.3.1-8)$$

El valor de la rigidez inicial K_{H1} se determina como una relación de la rigidez secundaria, como lo muestra la ecuación 1.3.1-9. Donde α es un factor de degradación de rigideces [9].

$$K_{H1} = \alpha K_{H2} \quad \dots (1.3.1-9)$$

1.3.1.3 Aisladores de caucho de alto amortiguamiento

El incluir metales para el incremento del amortiguamiento en el elastómero produce que el comportamiento del dispositivo se torne más complejo por diversos motivos, como se mencionó en el punto anterior. Es por esto que en un intento de evitar el uso de metales adicionales, se mejoró químicamente las características del caucho produciendo cauchos con mejores cualidades dinámicas. Estos cauchos son los denominados "Caucho natural de alto amortiguamiento" (HDNR por sus siglas en inglés), que son producidos por diversas empresas en el mundo.

El desarrollo de los componentes del caucho natural con capacidades inherentes de amortiguamiento fue logrado en 1982 por La Asociación de Investigación de los Productores de Caucho Malayo (MRPRA en inglés) del Reino Unido. El amortiguamiento extra se logra añadiendo bloques de carbón extrafinos, aceites o resinas, y otros compuestos. Gracias a estos compuestos el amortiguamiento se incrementa a valores comprendidos entre el 10% y el 20% a niveles del 100% de la deformación por corte; mientras que el módulo de corte varía de 0.34MPa (34.7tn/m²), a niveles bajos de endurecimiento, hasta valores de 1.40MPa (14.3tn/m²) en niveles altos de endurecimiento. [9]

El comportamiento dinámico del material se puede apreciar en la Figura 1.11. El material tiene un comportamiento no lineal para valores de deformación cortante menores que 20%, caracterizado por una alta rigidez y amortiguamiento, lo cual es ideal para evitar el movimiento del sistema ante efectos de viento o sismos leves. Para valores de deformación cortante comprendidos entre el 20% al 120% que es el nivel para los sismos de diseño de los códigos, el módulo de corte disminuye por lo que la rigidez también decrece. Finalmente para valores de deformación por corte mayor del 120%, el caucho sufre un proceso de cristalización lo que conduce a un incremento del amortiguamiento y de la rigidez. Estas características brindan al sistema un comportamiento que es muy rígido para fuerzas pequeñas, un comportamiento flexible y casi lineal para las fuerzas del nivel de diseño, y finalmente un comportamiento el cual es capaz de limitar el desplazamiento en niveles de carga que sobrepasan las cargas de diseño. [12]

Una peculiaridad de este sistema es que el amortiguamiento no es de naturaleza histerética ni viscosa, pero sus características están en el medio de ambas. Es sabido que en un elemento lineal viscoso la disipación de energía depende del cuadrado del desplazamiento, mientras que en un elemento histerético tiende a ser lineal esta dependencia. Por lo que la disipación de energía del sistema de caucho de alto amortiguamiento es dependiente del desplazamiento elevado a una potencia que se encuentra entre 1 y 2. Diversos especímenes de aisladores ensayado en el EERC de Berkeley California muestran que la disipación de energía por ciclo de histéresis es proporcional al desplazamiento elevado a una potencia aproximada de 1.5 [12]. Esta característica hace posible que los aisladores de caucho de alto amortiguamiento puedan ser modelados como una combinación de un elemento viscoso lineal y un elemento elastoplástico.

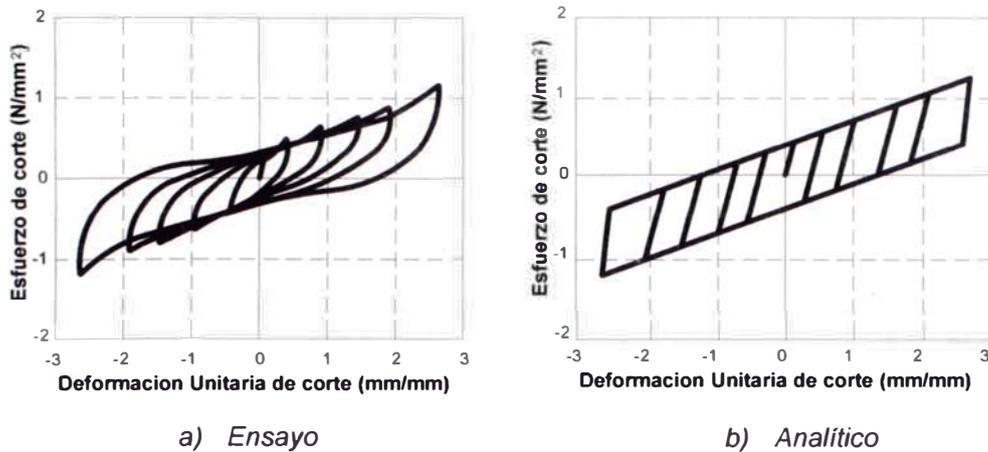


Figura 1.11 Comportamiento del dispositivo de caucho de alto amortiguamiento. [9]

1.3.2 Aisladores por fricción

El concepto aislamiento sísmico ha estado presente durante siglos como una forma de reducir el efecto negativo de los sismos en las estructuras, y uno de los primeros sistemas propuestos fueron los sistemas de fricción. Este sistema es más simple que el de los elastómeros y se tiene conocimiento de que se han utilizado sistemas de fricción en épocas pasadas.

1.3.2.1 Aisladores de fricción pura

Uno de los primeros sistemas de aislamiento por fricción pura fue propuesto en 1909 por Johannes Avetican Calantarients, un doctor en medicina, en Inglaterra. El propuso separar la estructura de su cimentación, interponiendo una capa de talco, además de diseñar unas ingeniosas conexiones para las líneas vitales como las tuberías (Figura 1.12 y Figura 1.13). [17]

Calantarients entendió que la reducción de deformaciones en la estructura aislada se logra a costa de grandes desplazamientos entre la base y la cimentación, y esa fue la razón de los diseños especiales para las instalaciones. Este sistema incorporó los principales elementos para un buen sistema de aislamiento sísmico: un medio de desacoplar la estructura de su base, una restricción de movimiento ante cargas laterales pequeñas, y un medio para que las líneas vitales puedan soportar los desplazamientos de la base.

Diversos sistemas de fricción pura fueron propuestos en el transcurso del siglo pasado, la mayoría de ellos basados en el concepto de la fricción de Coulomb. Este modelo de fricción supone que el rozamiento sólo depende del peso y de la rugosidad de las superficies en contacto. El comportamiento dinámico de los sistemas basados en esta hipótesis tiene las características de la Figura 1.14 que corresponde al lazo de histéresis teórico de los mismos.

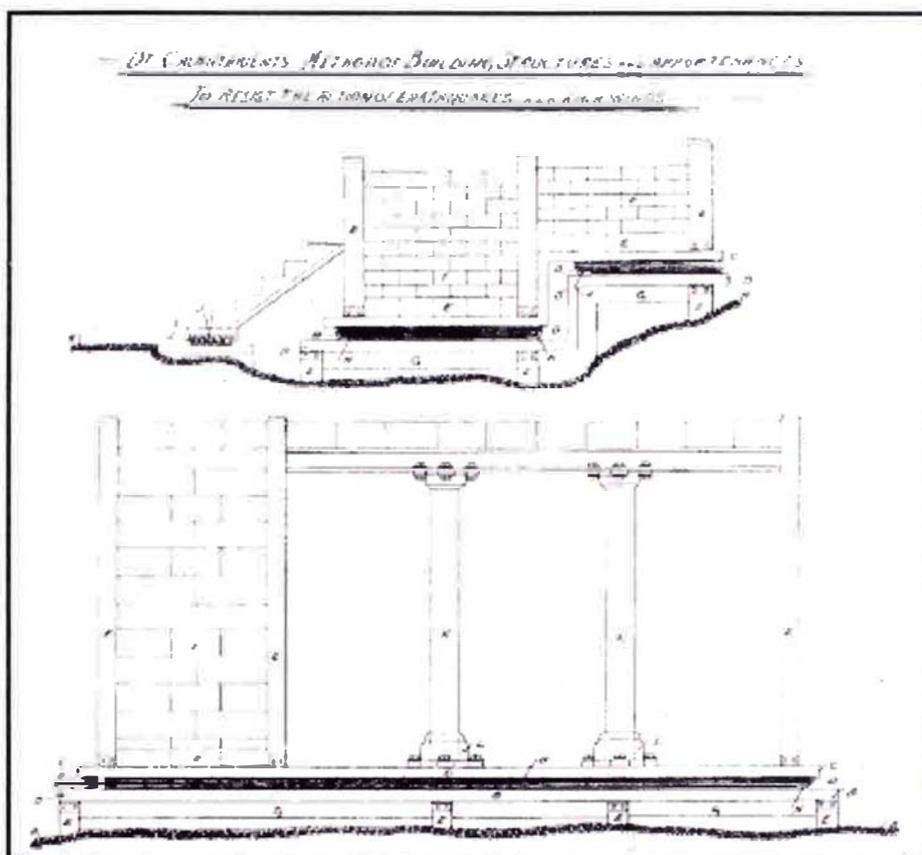


Figura 1.12 Sistema de aislamiento propuesto por Calantarients en 1909. [17]

La hipótesis de considerar la fricción de Coulomb en estos aisladores es desafortunadamente una representación pobre del comportamiento real de estos sistemas. En los aisladores de fricción la mayoría de materiales usados son de teflón o acero inoxidable y en estos materiales el coeficiente de fricción depende de la temperatura, el esfuerzo de contacto, velocidad de deslizamiento, grado de humedad, limpieza de la superficie. Es por esto que se propusieron mejores modelos que tomen en cuenta estos fenómenos.

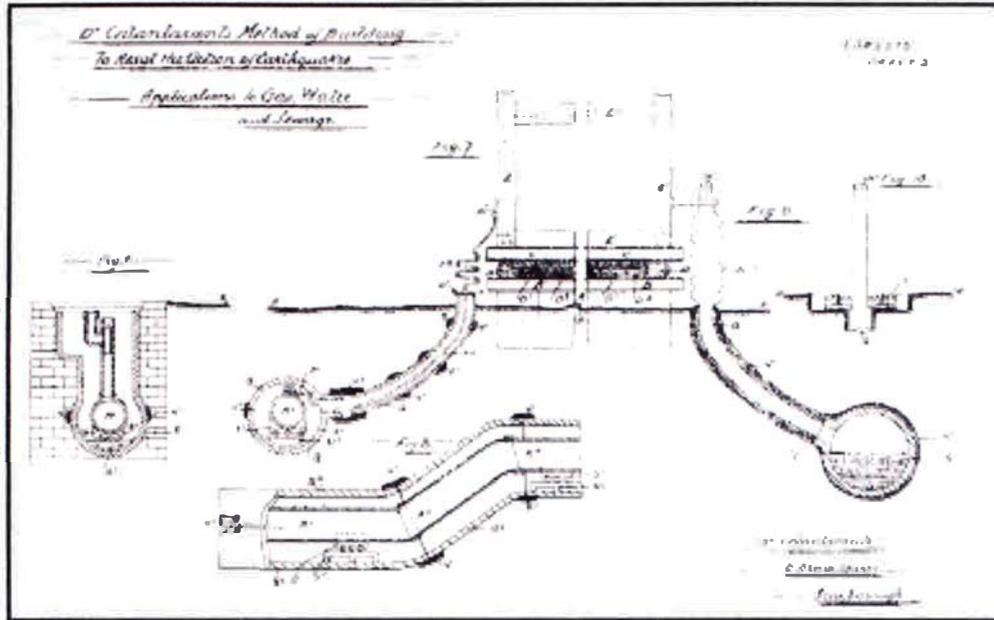


Figura 1.13 Conexiones para instalaciones propuestas por Calantarients. [17]

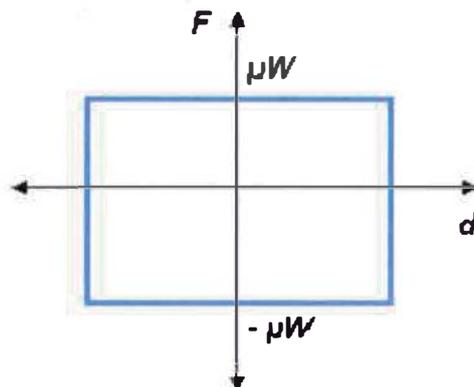


Figura 1.14 Curva de histéresis teórica para dispositivos de fricción pura.

1.3.2.2 Sistema de aislamiento "Electricité de France"

Una de las principales desventajas de los sistemas de aislamiento por fricción pura es que no cuentan con una capacidad de restauración por lo que la estructura luego del sismo puede experimentar desplazamientos permanentes. Diversos intentos fueron realizados para brindarle la capacidad restauradora a los apoyos de fricción, una de las alternativas la constituye el sistema de la "Electricité de France". Este es el caso de un sistema de aislamiento que combina las propiedades de la fricción y las propiedades de los elastómeros. Desarrollado a los comienzos de la década de los setentas para la aplicación en

las instalaciones de Plantas Nucleares y fue aplicado solo una vez en una gran planta nuclear en Koeberg, Sudáfrica.

El dispositivo está formado por dos placas deslizantes y por un neopreno reforzado, colocados en serie. Las placas deslizantes están ubicadas en la parte superior del dispositivo mientras que el caucho se ubica por debajo, como se puede apreciar en la Figura 1.15. El dispositivo funciona como un aislador elastómero cuando la demanda del sismo es baja, pero cuando la demanda del sismo es alta empieza a deslizarse y funciona como un apoyo de fricción pura limitándose la fuerza del sismo a la fuerza de fricción en las placas de acero. La fricción le brinda la disipación de energía al sistema mientras que el elastómero le brinda la capacidad restauradora.

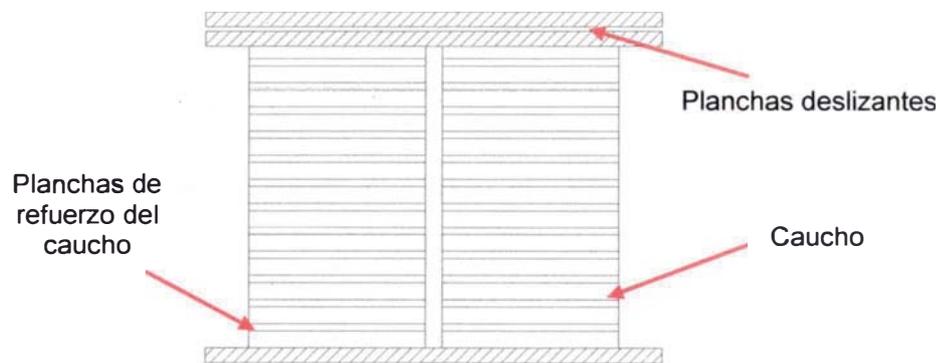


Figura 1.15 Esquema del dispositivo aislador "Electricité de France".

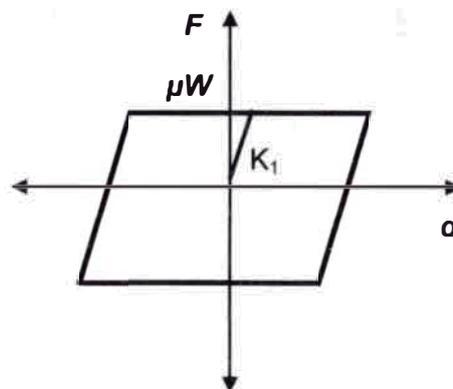


Figura 1.16 Modelo para la curva de histéresis del "Electricité de France".

El comportamiento dinámico de este sistema es similar al de un apoyo de fricción pura, con la diferencia de que ahora posee una rigidez inicial que depende del elastómero. Entonces el dispositivo se deformara inicialmente con la rigidez del elastómero, hasta que alcance un punto tal que no se pueda deformar más y empiece el deslizamiento. La Figura 1.16 muestra el modelo para el lazo de histéresis del dispositivo.

1.3.2.3 Sistema de aislamiento Elástico Friccionante (R-FBI)

Otro problema de los dispositivos en base a rozamiento es que el coeficiente de fricción se incrementa cuando hay velocidades altas de deslizamiento. Por ejemplo para el caso del teflón el coeficiente de fricción varia de 0.05 para velocidades bajas hasta 0.15 para velocidades altas ante una presión vertical constante. Un intento de solucionar este problema fue el sistema de aislamiento Elástico Friccionante (R-FBI). Este dispositivo intenta disminuir la velocidad de deslizamiento entre la estructura y su base, usando muchas superficies de deslizamiento en un solo dispositivo. Al usar muchas superficies de contacto la velocidad se distribuye entre todas estas superficies haciendo que la velocidad sea menor. La Figura 1.17 muestra el esquema del dispositivo. Adicionalmente se le coloca una barra de caucho al centro del dispositivo para brindarle la capacidad de restauradora al dispositivo.

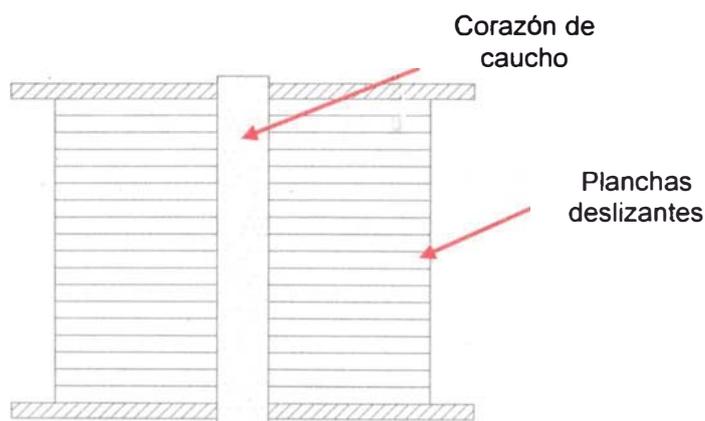


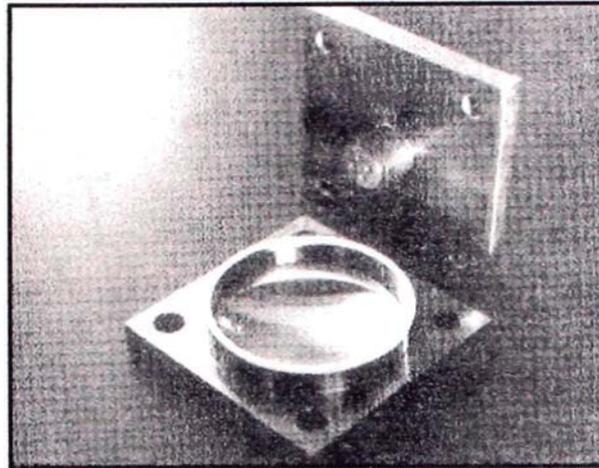
Figura 1.17 Esquema del dispositivo aislador de fricción elástica.

El comportamiento dinámico de este sistema es similar al del "Electricité de France" por lo que la curva de histéresis de la Figura 1.16 también se puede emplear en este sistema.

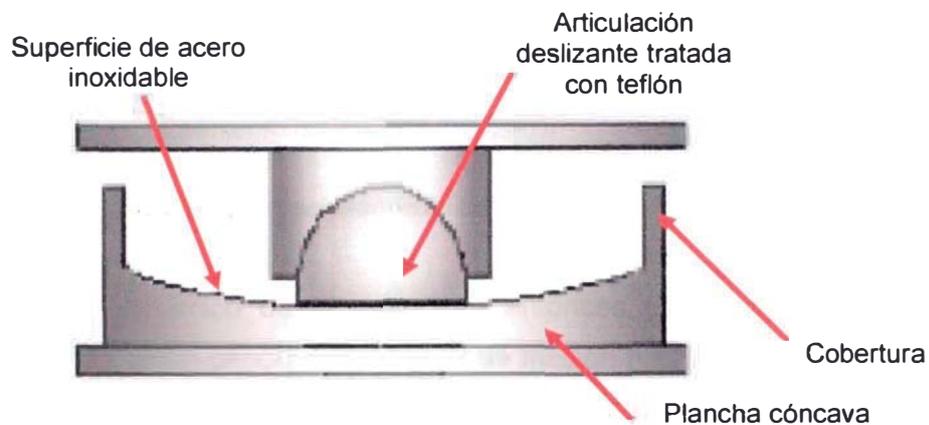
1.3.2.4 Sistema de Péndulo de Fricción (FPS)

Los dispositivos basados en la fricción no tienen por sí solos una fuerza restauradora que permita a la estructura volver a su posición inicial, por esto se pueden producir desplazamientos permanentes. Un intento de brindar esta fuerza restauradora a los dispositivos basados en fricción es el Sistema del Péndulo de Fricción o FPS (Friction Pendulum System), desarrollado en la Universidad de California en Berkeley, a mediados de la década de 1980 [30]. El sistema consiste en una superficie cóncava, una articulación que desliza sobre la superficie, y una cubierta que impide el ingreso de polvo a las superficies deslizantes (Figura 1.18). Generalmente las superficies deslizantes son tratadas con Teflón para darle un coeficiente de fricción bajo, lo que permite al dispositivo funcionar.

El principio del dispositivo es simple, ya que ante cargas laterales la estructura empieza a deslizarse sobre la superficie cóncava siguiendo el movimiento de un péndulo simple (Figura 1.19), donde la fuerza restauradora es la componente horizontal de la fuerza de gravedad. Entonces la fuerza lateral resistente en el dispositivo tiene dos componentes, una componente es la fuerza de fricción pura en las superficies de contacto y la otra es la fuerza lateral de gravedad. Si se consideran desplazamientos pequeños en comparación al radio de curvatura de la superficie deslizante, se tiene que la fuerza lateral resistente está expresada por la ecuación 1.3.2-1. [29]



a) Vista del FPS. [29]



b) Esquema del dispositivo.

Figura 1.18 Sistema de aislamiento del Péndulo de Fricción.

$$F_l = \frac{W}{R} u + \mu W \text{signo}(\dot{u}) \quad \dots (1.3.2-1)$$

Donde

- W : Peso de la estructura aislada.
- u : Desplazamiento lateral del dispositivo.
- R : Radio de curvatura del dispositivo.
- μ : Coeficiente de fricción.

De la ecuación 1.3.2-1 se puede apreciar claramente las dos fuerzas componentes. En la primera parte de la ecuación se muestra la influencia de la curvatura del dispositivo, donde la fuerza lateral depende del radio y del peso de

la estructura; mientras que en la segunda parte la fuerza de fricción se asume dependiente del peso y de la velocidad del sistema.

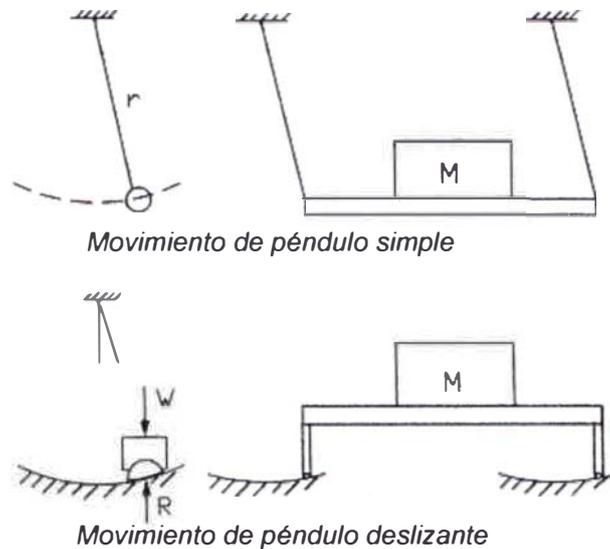


Figura 1.19 Principio de funcionamiento del Péndulo de Fricción. [29]

El comportamiento dinámico de la estructura entonces es la suma de dos comportamientos, el de un péndulo simple y el de fricción pura. Por lo tanto para obtener el lazo de histéresis del sistema, es necesario sumar las dos componentes de cada parte del comportamiento como se indica en la Figura 1.20. Esta curva indica que el sistema tendrá una rigidez inicial infinita hasta que se supere la fricción en la superficie. Luego el sistema oscilará como un péndulo simple disipando energía a través de la fricción. Ensayos realizados al dispositivo demuestran la precisión de las expresiones analíticas para la fuerza resistente del sistema planteadas en la ecuación 1.3.2-1. En la Figura 1.21 se muestra una curva experimental del dispositivo.

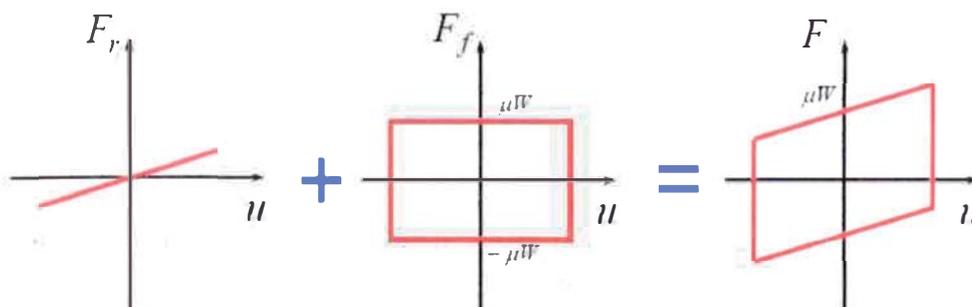


Figura 1.20 Comportamiento dinámico del péndulo de fricción.



Figura 1.21 Curva de histéresis experimental del Péndulo de Fricción. [30]

Como en otros dispositivos, el coeficiente de fricción depende de diversos factores adicionalmente al peso. Diversos estudios han comprobado la dependencia de este coeficiente de fricción, al esfuerzo normal en la superficie y la velocidad de desplazamiento del sistema. La ecuación 1.3.2-2 intenta predecir la dependencia del coeficiente de fricción. [9]

$$\mu_{(\sigma_v, v)} = (0.197 - 0.121 e^{(-0.009v)}) \sigma_v^{-0.57} \dots (1.3.2-2)$$

Donde

σ_v : Esfuerzo normal en la superficie.

v : Velocidad del sistema.

Finalmente de la curva de histéresis se pueden obtener expresiones para el análisis lineal de estructuras con sistemas de péndulo de fricción. Las expresiones que determinan respectivamente la rigidez efectiva (K_{ef}), el periodo del sistema de aislamiento (T_b), y el amortiguamiento equivalente (β_{eq}), son las siguientes

$$K_{ef} = \frac{\mu W}{d} + \frac{W}{R} \dots (1.3.2-3)$$

$$T_b = 2\pi \sqrt{\frac{1}{g \left(\frac{\mu}{d} + \frac{1}{R} \right)}} \quad \dots (1.3.2-4)$$

$$\beta_{eq} = \frac{2}{\pi \left(1 + \frac{d}{\mu R} \right)} \quad \dots (1.3.2-5)$$

Donde el valor de d expresa el desplazamiento máximo en el dispositivo evaluado del lazo de histéresis.

1.3.3 Sistemas de Aislamiento Rodantes

Los sistemas de aislamiento por fricción tienen como fundamento la fricción entre planchas de metal que deslizan entre si. Una variación de este principio son los denominados sistemas de aislamientos rodantes, en los cuales la fricción se presenta a través de esferas que ruedan entre planchas de metal. Durante el transcurso del siglo pasado se han propuesto diversos sistemas con las características de rodamiento, existiendo estudios técnicos de algunos de estos sistemas.

En el año de 1974 se construyó una escuela de cuatro pisos en la ciudad de México. En el mencionado colegio cada columna de la escuela se apoya en dos placas metálicas con más de cien esferas metálicas en su interior y un dispositivo que restringe el desplazamiento lateral a 12cm. [3]

1.3.3.1 Aisladores con rodillos

En este dispositivo se tienen dos planchas metálicas con una serie de rodillos en medio. El dispositivo entra en función cuando los rodillos logran rodar y la fricción que se desarrolla en ese momento disipa la energía del sismo. La Figura 1.22 muestra el esquema del dispositivo y sus partes.

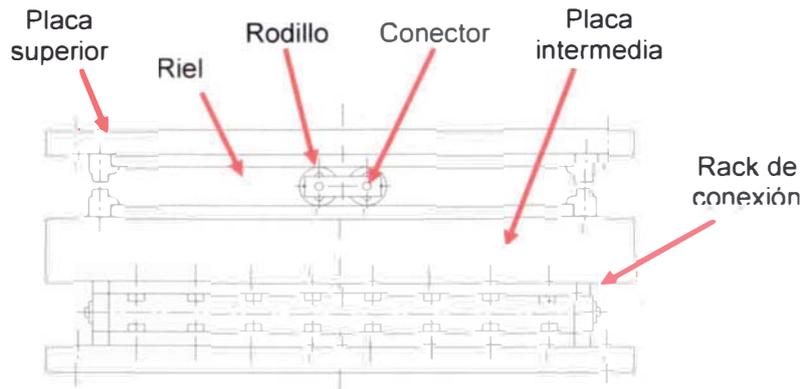


Figura 1.22 Esquema del aislador deslizante con rodillos. [9]

El comportamiento dinámico del dispositivo es similar que el comportamiento de los dispositivos de fricción pura. Se tiene una rigidez infinita hasta que los rodillos ruedan, luego la estructura desliza sin ninguna restricción hasta que se llega al tope. El proceso se repite para ambas direcciones en un movimiento sísmico. En la Figura 1.23 se muestra la comparación entre las curvas de histéresis experimentales y analíticas para un dispositivo determinado.

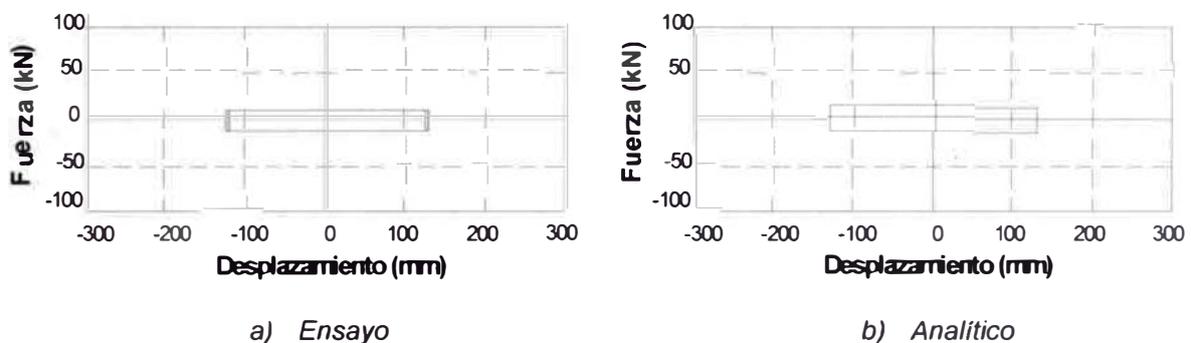


Figura 1.23 Curvas de histéresis del dispositivo deslizante con rodillos. [9]

1.3.3.2 Aisladores rodantes con esferas

Este sistema de aislamiento emplea esferas como mecanismo de disipación de energía. El dispositivo consiste de dos planchas, una superior y otra inferior, en el intermedio se colocan un gran número de esferas. Generalmente la superficie donde las esferas ruedan se trata con algún lubricante. En la Figura 1.24 se muestra el esquema del dispositivo y sus principales características.

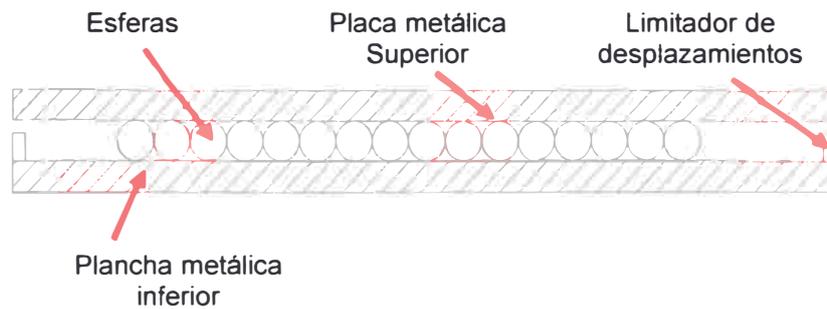


Figura 1.24 Esquema del dispositivo de aislamiento con esferas rodantes.

El comportamiento dinámico en estos dispositivos es idéntico al mostrado anteriormente. Por lo que se puede emplear la curva de histéresis analítica mostrada en la Figura 1.14.

1.3.3.3 Sistema de riel rodante

Otro dispositivo de aislamiento sísmico que usa el sistema rodante, es el aislador de riel rodante. Este sistema está compuesto de dos apoyos lineales montados en medio de dos rieles lineales ortogonales (cruzados entre sí). Los apoyos lineales tienen un coeficiente de fricción bastante bajo, con el objetivo de reducir las fuerzas cortantes a la estructura. En la Figura 1.25 se muestra un dispositivo de riel rodante.

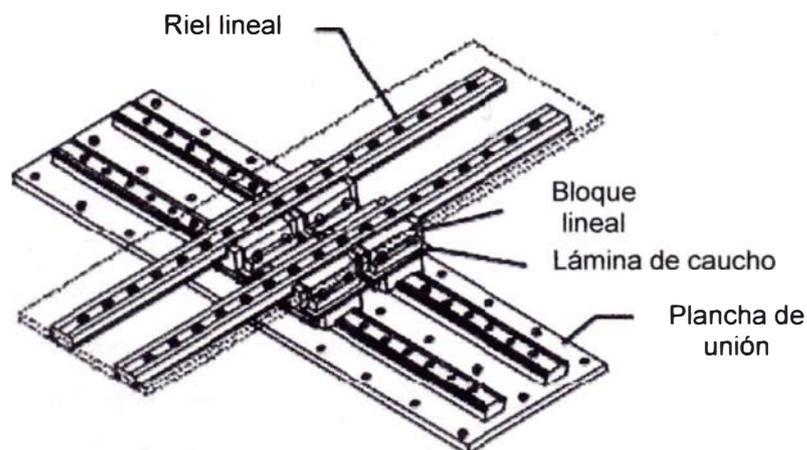


Figura 1.25 Esquema del dispositivo de aislamiento de riel rodante. [9]

En la Figura 1.26 se muestra la curva de histéresis obtenida de un ensayo de laboratorio, y una curva de histéresis obtenida por un modelo analítico.

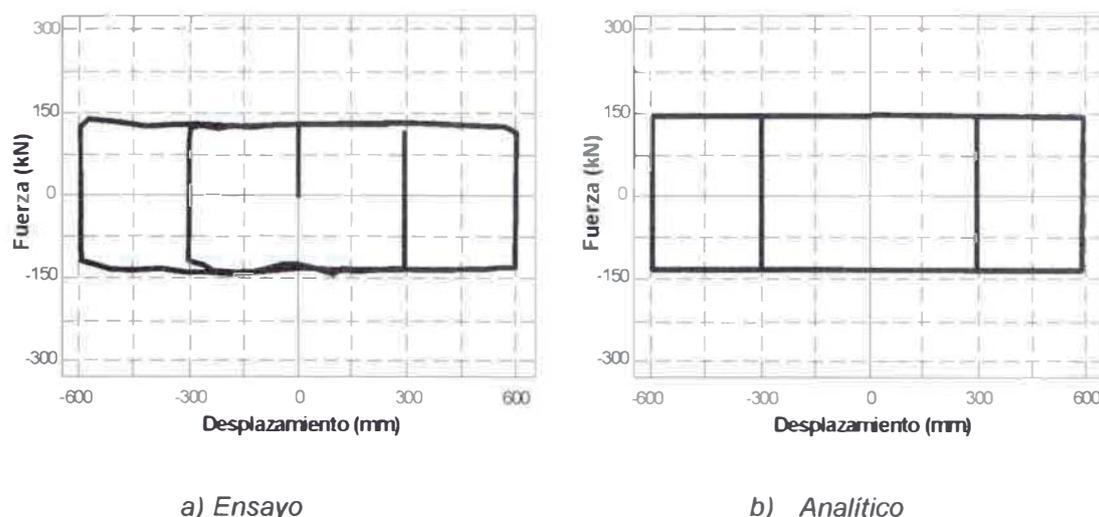


Figura 1.26 Curvas de histéresis del aislador de tren rodante. [9]

1.4 Construcción y mantenimiento de sistemas de aislamiento

En esta sección se presenta algunas recomendaciones para la construcción de edificios aislados y el mantenimiento de los sistemas de aislamiento. Estas recomendaciones están basadas en los lineamientos establecidos por la Sociedad Japonesa de Aislamiento Sísmico (JSSI). [11]

La construcción de edificios aislados es una tarea ardua, ya que requiere nuevas técnicas constructivas y procesos que son más complejos que los habituales. En el lugar de construcción, el momento más importante es la colocación de las bases para los aisladores ya que estos deben permanecer exactamente nivelados en un plano horizontal para los aisladores; además de respetar el espacio libre entre los soportes y los muros de contención en los extremos para asegurar el espacio de maniobrabilidad. Adicionalmente los aisladores deben inspeccionarse antes de la construcción, de tal manera que no haya errores de fabricación o imperfecciones que compliquen la colocación de estos aisladores (Figura 1.27). También deben verificarse las planchas de unión de los aisladores a los apoyos, de tal manera que todos los agujeros coincidan. La Tabla 1.1 (página 33) resume los parámetros que deben evaluarse en los aisladores antes de usarse en los edificios.

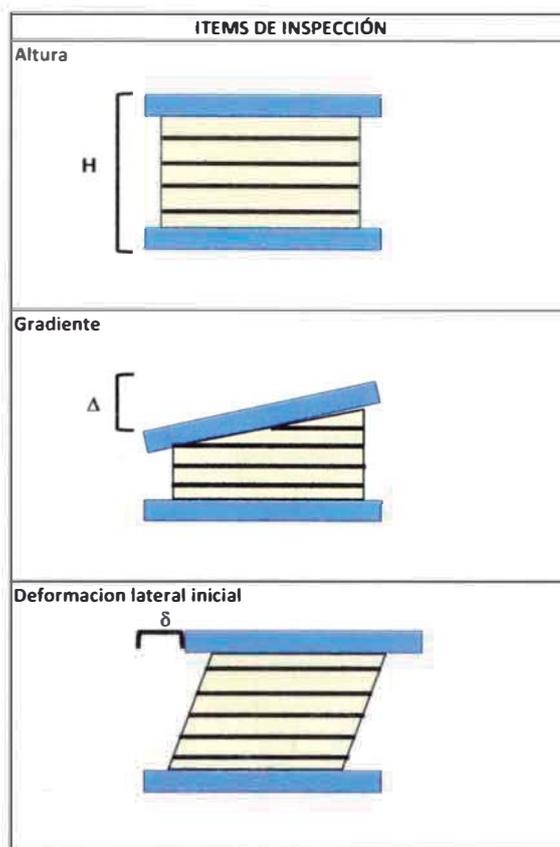


Figura 1.27 Parámetros de verificación de aisladores antes de la construcción.

Para mantener horizontales los apoyos de los aisladores y ser capaces de soportar la carga adicional del edificio, estos deben ser construidos teniendo en cuenta el proceso descrito a continuación. La plancha de base para el aislador debe ser ajustada a un nivel horizontal mediante pernos de ajuste según la Figura 1.28. Luego se colocan las varillas de refuerzo y el marco de anclaje en el apoyo antes de que se coloque el concreto dentro, la Figura 1.29 muestra el refuerzo y el marco de anclaje. Una vez encofrado el apoyo se procede a vaciar el concreto (Figura 1.30), para que una vez curado el concreto se coloque los aisladores según se muestra en la Figura 1.31. El siguiente trabajo es vincular el movimiento del aislador al movimiento de la superestructura, para lograr este objetivo se construyen columnas y vigas para rigidizar la superestructura, además se une el refuerzo del capitel al aislador como se muestra en la Figura 1.32. Lo que se pretende en esta etapa es asegurar la transferencia de las fuerzas y desplazamientos de la superestructura al aislador y luego a la cimentación, para esto se le coloca un refuerzo especial por encima del aislador que va unido al refuerzo de la columna como en se ve en la Figura 1.32 (página 32). Finalizada la colocación del aislador debe realizarse un trabajo especial para

la reducción del aire atrapado bajo la plancha de apoyo superior del aislador. Este trabajo se puede hacer de muchas maneras una de ellas es por la inyección de mortero muy líquido (grouting) el circula por toda la zona libre de la unión desalojando el aire atrapado.

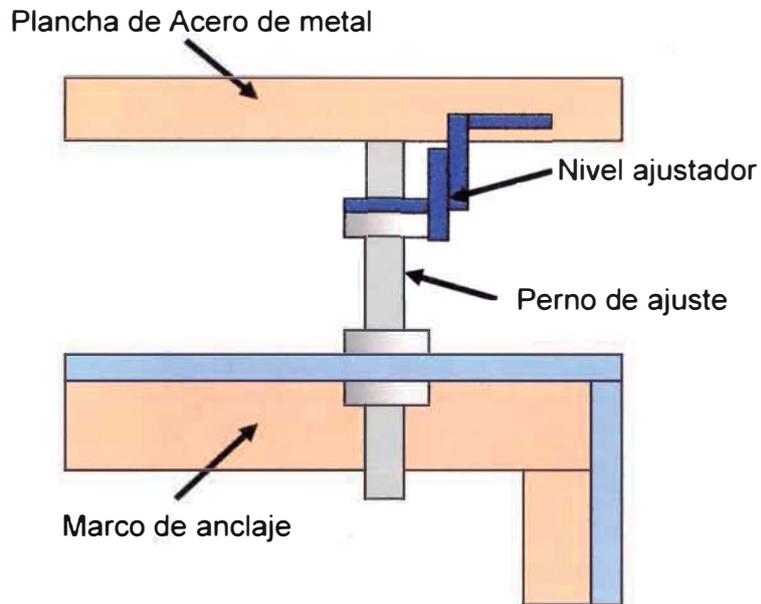
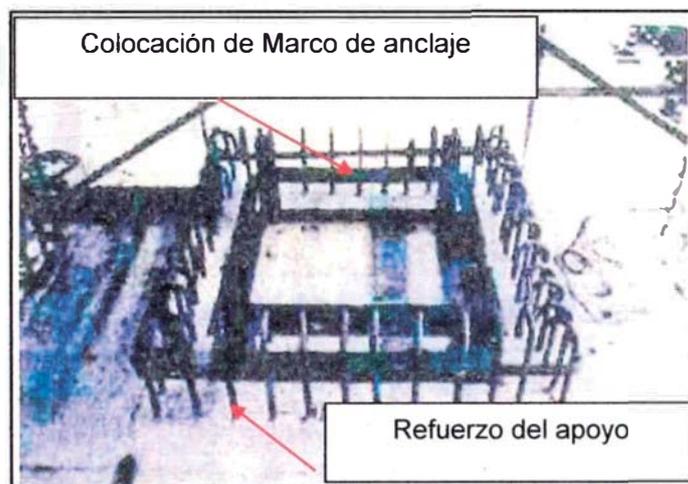
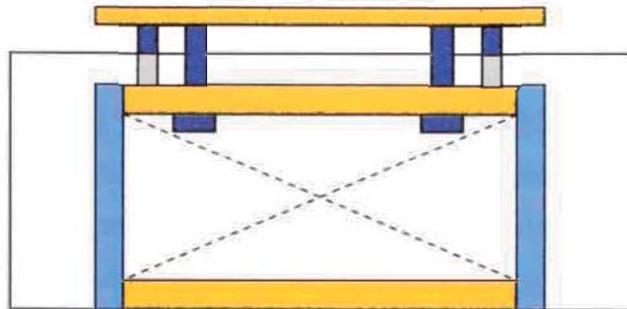


Figura 1.28 Nivel de ajuste de la plancha de base para el aislador.



a) Detalle de refuerzo del apoyo de aisladores. [11]



b) Esquema de colocación de los apoyos. [11]

Figura 1.29 Construcción de los apoyos para los aisladores.



a) Vaciado del concreto [11]



b) Esquema de vaciado.

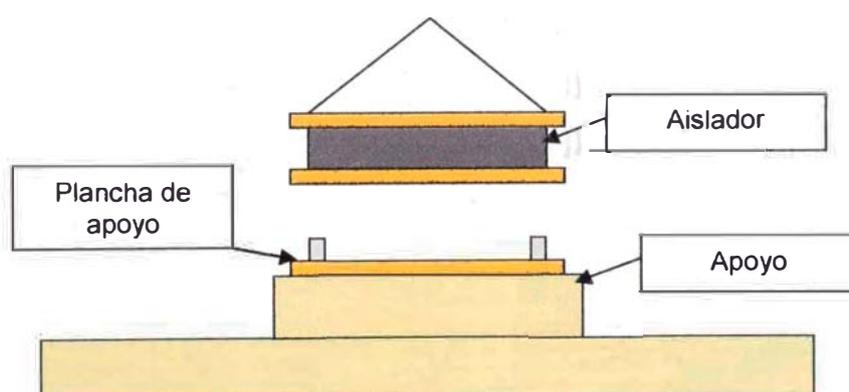
Figura 1.30 Vaciado de concreto en los apoyos de los aisladores.

Para el caso de proyectos de reforzamiento de edificios existentes el procedimiento es similar, sin embargo debe tenerse en cuenta ciertos criterios. En primer lugar debe construirse las vigas rigidizantes de las columnas de base, y luego instalar una serie de gatas a manera de puntales para después cortar las columnas. Debe considerarse el hecho de que el corte se realiza para un número de columnas a la vez, es decir se aísla un par de columnas por vez en cada zona, para no tener problemas de inestabilidad del edificio ante cargas gravitacionales y ante la ocurrencia de un sismo en el momento del

reforzamiento. En la Foto 1.1 se muestra un detalle de la conexión de los aisladores para el reforzamiento de un edificio. Se puede observar, a un costado de la columna, las gatas que mantienen elevado el edificio mientras se instala el aislador en la columna, estas gatas tienen instalados sensores de desplazamiento para controlar los desniveles y evitar que el edificio se incline. Una vez colocada las gatas, se procede a cortar la columna y a construir la base para el aislador siguiendo el proceso descrito anteriormente para edificios nuevos.

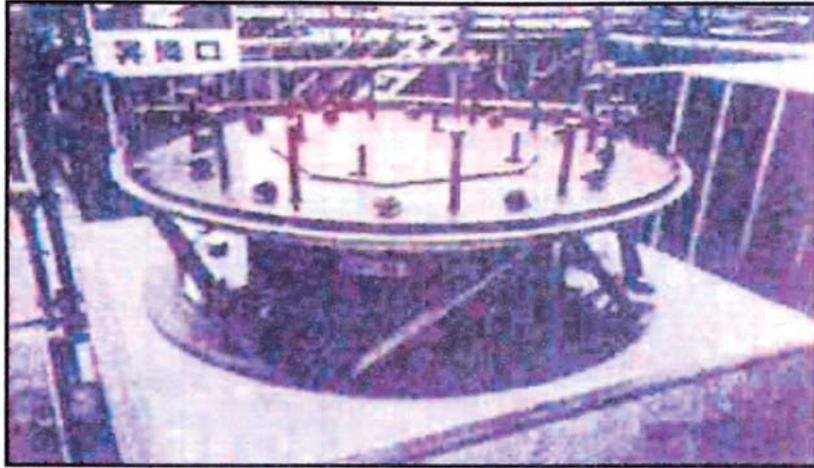


a) Colocación del aislador. [11]

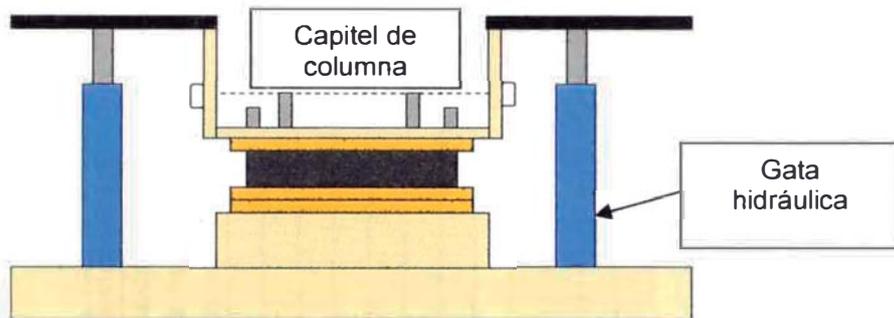


b) Esquema de colocación.

Figura 1.31 Colocación de los aisladores en los apoyos.



a) Detalle del empalme del aislador a columna. [11]



b) Esquema de unión del aislador a la columna.

Figura 1.32 Empalme del dispositivo aislador a la columna.

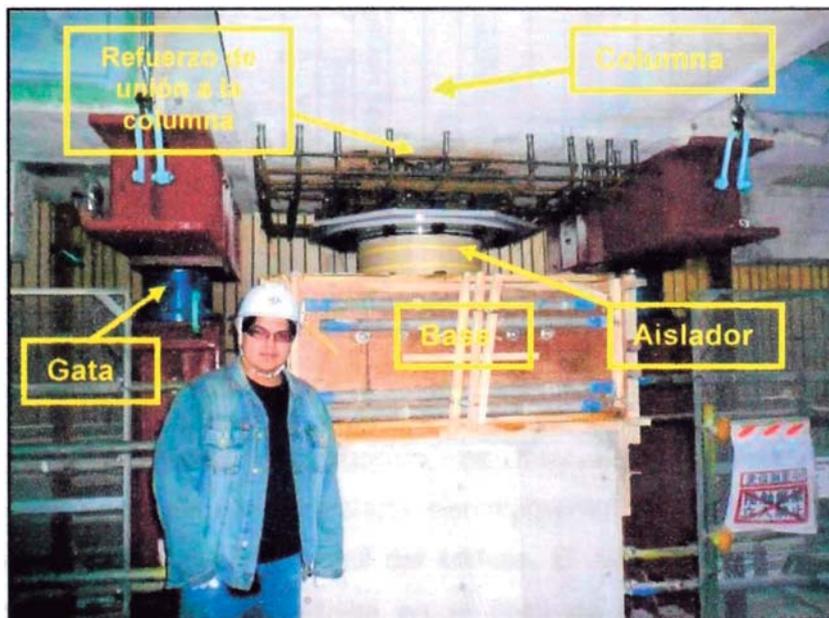


Foto 1.1 Conexión del aislador a la estructura.

Tabla 1.1 Parámetros para la verificación de los aisladores. [9]

Ítem de Evaluación	Apoyo de caucho laminado (M)			Apoyos deslizantes (P)			Apoyos rodantes (B)	
	Caucho Natural	Caucho de Alto Amortiguamiento	Caucho Mejorado con Plomo	Deslizamiento Elástico	Deslizamiento en plano curvado	Deslizamiento Plano	Ruedas Planas	Tren de ruedas
Esfuerzo de Compresión								
Relación Fuerza-Deformación								
Rigidez horizontal (inicial, secundaria)								
Rigidez Vertical								
Límite de Deformación								
Límite de resistencia a la compresión								
Límite del esfuerzo a tensión								
Coefficiente de fricción								
coeficiente de amortiguamiento equivalente								
Dependencia a la temperatura								
Envejecimiento								
Creep								

Además de la adecuada construcción, es muy importante un adecuado mantenimiento de la estructura aislada sísmicamente para mantener el buen desempeño a lo largo de la vida útil del edificio. El mantenimiento debe tener especial cuidado en los dispositivos en el nivel de aislamiento sísmico del edificio.

La inspección al sistema de aislamiento debe ser efectuada por un especialista, y es necesario realizar estas inspecciones en intervalos periódicos de tiempo (por ejemplo cada 10 años) y luego de ocurrido un sismo severo en la zona. La inspección al término de la obra es de gran importancia para obtener información original y usarla en futuras inspecciones. Para la inspección se establecen los siguientes ítems [11]:

- Dispositivos como aisladores elastomérico, deslizantes, amortiguadores, etc.
- Nivel del aislamiento sísmico, zona perimétrica, espacio libre, juntas de expansión, etc.
- Uniones flexibles de plomería, circuitos y cables eléctricos, y demás instalaciones.

Si después de la inspección se encuentra algún desperfecto o mal funcionamiento, las medidas correctivas deben ejecutarse con la decisión y autorización del propietario del edificio, el especialista y el gerente del edificio en conjunto. La inspección debe ser hecha por los especialistas como se indica:

- *Inspección al término de obra.* La ejecución de esta inspección debe ser hecha en presencia del supervisor y del residente de la construcción para obtener información original para las futuras inspecciones.
- *Inspección periódica.* Esta inspección debe realizarse luego de 5 años de construido el sistema, y luego cada 10 años donde el especialista realiza un reporte de inspección.
- *Inspección obligatoria.* Después de un sismo severo especificado por el ingeniero estructural, debe de hacerse una inspección obligatoria por el especialista.
- *Inspección precisa.* Cuando se compruebe mala condición o mala forma en los dispositivos de aislamiento, debe realizarse una inspección mas precisa para saber en detalle el problema y tomar las medidas correctivas.

Es importante que el propietario del edificio mantenga los reportes de todas las inspecciones así como la información y planos de la construcción del sistema. En la Tabla 1.2 se muestran los parámetros básicos para la inspección del sistema de aislamiento.

Tabla 1.2 Parámetros para la inspección del sistema de aislamiento. [9]

Objeto	Desempeño requerido	Ítem de Control	Método de Control
Dispositivos	Capacidad de apoyo	Daño o Corrosión	Observación
	Capacidad al Movimiento lateral	Deformación Vertical o creep	Medición
	Capacidad de Recuperación	Deformación Horizontal	Medición
	Amortiguamiento	Rigidez Horizontal o vertical Máxima deformación Máxima carrera	Observación Aisladores de repuesto y aisladores protegidos contra fuego dados por las especificaciones del ingeniero estructural
Nivel de aislamiento	No existencia de impedimentos	Espacio libre	Medición
Perímetro	Movimiento de la estructura	Existe o no	Observación
Inst. Sanitarias	Capacidad de seguir los desplazamiento del nivel de aislamiento	Movible o no	Observación
Inst. Eléctricas		Movible o no	Observación

CAPÍTULO 2 SISTEMA DE AISLAMIENTO PROPUESTO

En el siguiente capítulo se presenta el sistema de aislamiento propuesto, sus componentes, sus características y su esquema de aplicación. Además se muestra el principio de funcionamiento del sistema y una revisión de los parámetros que gobiernan su comportamiento.

2.1 Características del sistema propuesto

El sistema de aislamiento sísmico propuesto debe cumplir con algunos requisitos importantes, por lo que el sistema debe ser:

- Un sistema económico
- De fabricación simple
- De funcionamiento sencillo
- De uso práctico

Por estas razones se propone un sistema del tipo friccional, ya que estos sistemas cumplen los requisitos mencionados anteriormente. Asimismo para conseguir el objetivo de ser un sistema de fabricación simple y de uso práctico se consideró el uso del acero como material principal del sistema propuesto.

El sistema de aislamiento propuesto para ser empleado en viviendas esta constituido principalmente por dos partes: una inferior y la otra superior. La parte inferior del dispositivo consiste en planchas soldadas de acero estructural del tipo A36, las cuales sirven de base al dispositivo y para conectarla a la cimentación. A una de las planchas se le realiza un corte formando un agujero para alojar la parte central y superior del sistema. La parte superior del dispositivo está compuesto por un disco y una plancha adicional soldados entre sí, siendo el disco el que se apoya en las planchas inferiores de manera que la interacción entre el disco y la plancha inferior produce la fricción en el dispositivo. La plancha de la base superior se une al sobrecimiento de los muros mediante pernos estructurales y a la vez esta sirve como una cubierta para impedir el

ingreso de polvo. En la Figura 2.1 se muestra el dispositivo de aislamiento propuesto y sus dimensiones en milímetros.

El sistema propuesto está diseñado para disipar energía por fricción, por lo cual las planchas deslizantes cubren un papel importante en el dispositivo ya que son éstas las que disipan la energía. Entonces las planchas deben ser lo suficientemente resistentes al desgaste por fricción, además de ser totalmente lisas para mantener un coeficiente de fricción lo suficientemente bajo que permita el movimiento del dispositivo.

El disco deslizante es de forma circular, de manera que la fricción se distribuya uniformemente en un área circular. Con la forma circular del disco, se pretende entonces evitar concentración de esfuerzos por fricción en la superficie del disco. Si el disco por ejemplo tuviese una forma cuadrada los esfuerzos de fricción se concentrarían en las esquinas. En la Foto 2.1 se muestra una vista del disco circular empleado en el dispositivo de ensayo.



Figura 2.1 Dispositivo de aislamiento propuesto y sus dimensiones en milímetros.



Foto 2.1 Disco circular del dispositivo (volteado).

2.2 Comportamiento dinámico del sistema

El comportamiento dinámico del sistema es sencillo, ya que ante una carga vertical determinada el dispositivo opone una determinada resistencia al movimiento que es proporcional a la carga vertical soportada. Se supone que en este momento la fuerza lateral resistente del dispositivo es el producto del coeficiente de fricción estático y la carga vertical actuante en el dispositivo. Esta gran resistencia inicial es de gran ayuda al momento de impedir el movimiento del sistema ante cargas laterales menores como por ejemplo vientos, movimientos de suelo por el paso de vehículos pesados, sismos leves, etc.

Una vez que la fuerza lateral aplicada al sistema alcanza la resistencia proporcionada por el coeficiente de fricción, el sistema se deslizará con una resistencia lateral sumamente pequeña hasta que alcanza los toques en el dispositivo. Mientras el sistema se desliza, la energía se disipa por la fricción entre el disco y las planchas base logrando que la energía del sismo no ingrese en la estructura principal.

El dispositivo se deslizará hasta alcanzar el punto máximo, donde se ubican unos toques en el dispositivo. Luego cuando la fuerza lateral disminuya el sistema se detendrá, para ponerse en movimiento otra vez cuando la fuerza lateral se incremente en el sentido contrario. Esto logrará que el sistema retorne a su posición inicial para seguir deslizándose hasta alcanzar el límite opuesto en

donde volverá a detenerse. En cada ida y venida el dispositivo cumple los denominados ciclos de histéresis, y en cada ciclo el dispositivo disipará mayor cantidad de energía, al mismo tiempo que el metal se desgasta cada vez más en cada ciclo. En la Figura 2.2 se muestra un esquema del comportamiento dinámico del dispositivo.

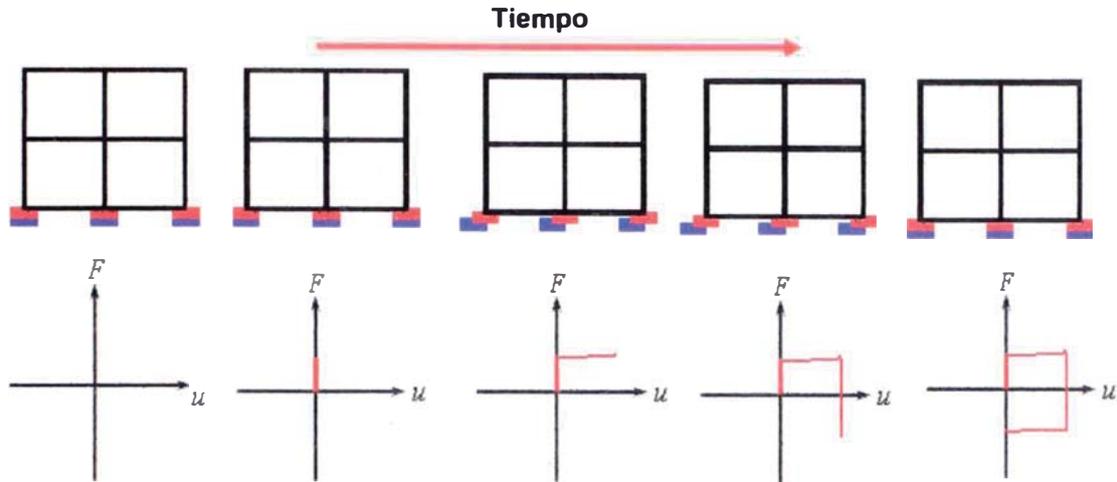


Figura 2.2 Comportamiento dinámico del dispositivo propuesto.

Este comportamiento permite desacoplar casi totalmente las fuerzas producidas por el sismo, permitiendo que la estructura se mueva como un cuerpo rígido. La fuerza que se transmite a la estructura depende en gran medida del coeficiente de rozamiento, el cual solo funciona en la parte inicial del comportamiento del dispositivo. Si se logra mantener el coeficiente de rozamiento bajo la fuerza que se transmite a la estructura es bastante baja, por lo que la estructura no sufriría ningún daño.

2.3 Principales parámetros del comportamiento dinámico

El comportamiento dinámico descrito anteriormente depende de diversos factores entre los cuales podemos encontrar la presión vertical sobre el dispositivo, el coeficiente de rozamiento, la velocidad de deslizamiento, la temperatura, entre otros. En el presente estudio sólo se toma en cuenta la influencia de la presión vertical, y el coeficiente de rozamiento.

Como se mencionó anteriormente, el principal fundamento del sistema es la fricción entre sus placas. Esta fricción depende de diversos factores, pero por sobre todo la fricción está íntimamente ligada a la presión vertical en la superficie deslizante del dispositivo, y a la velocidad de deslizamiento como se muestra en la expresión 2.3-1.

$$\mu = \mu(\sigma_v, v) \quad \dots(2.3-1)$$

El coeficiente de rozamiento es dependiente de la velocidad de deslizamiento, es decir que la velocidad en que las planchas se friccionan entre sí afecta el coeficiente de fricción. La teoría clásica del rozamiento de Coulomb plantea que el coeficiente de fricción es un valor constante y que no varía cuando se desliza un cuerpo sobre una superficie. Aunque la hipótesis de Coulomb representa la filosofía del fenómeno del rozamiento ésta no se ajusta a la realidad, ya que en la mayoría de casos, para los cuales el coeficiente de fricción varía.

Las investigaciones experimentales, como la de Zayas [30], muestran que el coeficiente de fricción varía desde un valor mínimo, que es el coeficiente de Coulomb, hasta un valor máximo. Esta variación es de carácter exponencial, es decir que una parte de la variación del coeficiente de rozamiento es exponencial hasta alcanzar el valor máximo. La variación real del coeficiente de rozamiento no es siempre uniforme (Figura 2.3), pero con el fin de modelar este fenómeno se considera una variación exponencial uniforme del coeficiente de rozamiento (Figura 2.4).

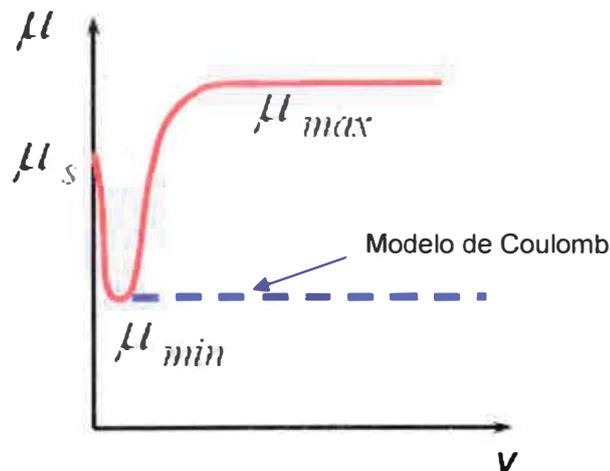


Figura 2.3 Variación real del coeficiente de rozamiento con la velocidad. [6]

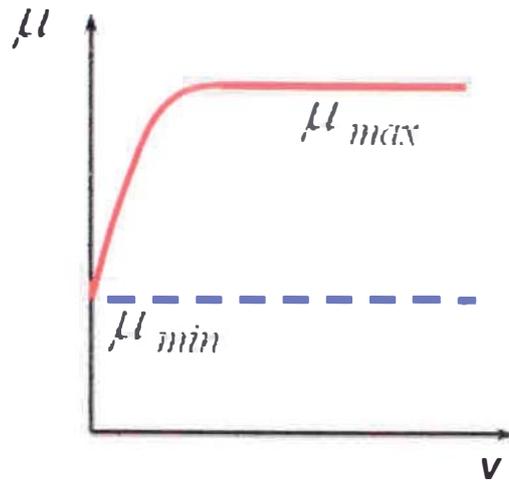


Figura 2.4 Variación ideal del coeficiente de rozamiento con la velocidad. [6]

Entonces la variación de coeficiente de fricción está dado por la siguiente expresión [6]

$$\mu = \mu_{\max} - (\mu_{\max} - \mu_{\min}) e^{-a|v|} \quad \dots(2.3-1)$$

Donde:

μ : Coeficiente de rozamiento.

μ_{\max} : Coeficiente de rozamiento máximo.

μ_{\min} : Coeficiente de rozamiento mínimo (Coulomb).

a : Valor constante.

v : Velocidad de deslizamiento.

Los valores de coeficiente de rozamiento máximo y mínimo de la expresión 2.3-1 son determinados experimentalmente mediante ensayos dinámicos. En estos ensayos se determina el coeficiente de rozamiento a velocidades bajas, y luego se determina el coeficiente de rozamiento a velocidades altas. Estos valores resultan ser diferentes para cada tipo de material y para cada sistema, ya que está ligado al tipo de superficie deslizante. Por ejemplo para un sistema de Péndulo de Fricción, cuya superficie de rozamiento es tratada con teflón, se tiene que la expresión 2.3-1 resulta en la expresión 2.3-2. [9]

$$\mu = 0.197 - (0.121) e^{-0.009|v|} \quad \dots(2.3-2)$$

Adicionalmente el coeficiente de fricción es una función de la presión vertical en la superficie deslizante. Al incrementarse la presión vertical la amplificación del coeficiente de rozamiento disminuye, y el valor de coeficiente de rozamiento máximo (μ_{max}) resulta ser menor como se puede ver en la Figura 2.5.

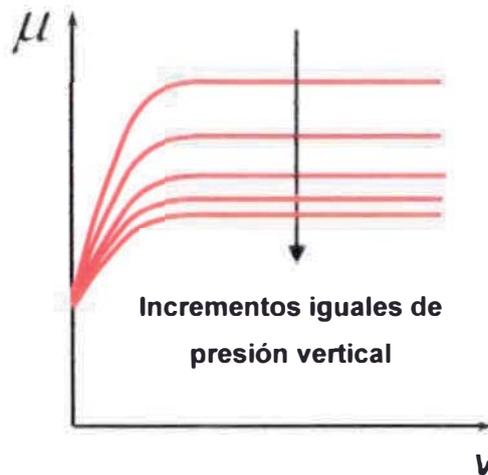


Figura 2.5 Variación del coeficiente de rozamiento con la presión vertical. [6]

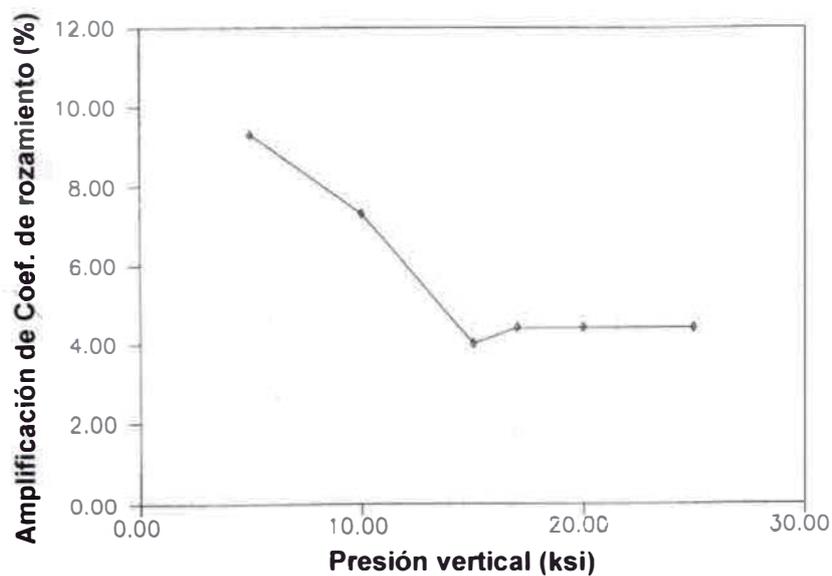


Figura 2.6 Variación de la amplificación del coeficiente de rozamiento respecto de la presión vertical. [30]

Diversos estudios experimentales demuestran que la variación del coeficiente de rozamiento respecto de la presión vertical es de carácter exponencial. En la

Figura 2.6 se observa una curva obtenida experimentalmente por Zayas [30], donde se muestra la variación de tipo exponencial del coeficiente de rozamiento respecto de la presión vertical. La amplificación del coeficiente de fricción se reduce a medida que se incrementa presión vertical.

Considerando la influencia de la presión vertical en el dispositivo, la expresión 2.3-2 se modifica dando lugar a la expresión 2.3-3 en la cual la presión vertical o esfuerzo axial esta dado por el símbolo σ_v . En esta expresión se puede notar claramente la influencia exponencial de la presión vertical, que en este caso es una influencia exponencial negativa. [9]

$$\mu = (0.197 - (0.121) e^{-0.009|v|}) \sigma_v^{-0.57} \quad \dots(2.3-3)$$

CAPÍTULO 3 ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL SISTEMA DE AISLAMIENTO PROPUESTO

En el siguiente capítulo se presenta el desarrollo del estudio experimental realizado al sistema de aislamiento sísmico propuesto. Se presenta el esquema de ensayo, las consideraciones necesarias para las pruebas, el equipo utilizado, y además se discuten los principales resultados de las pruebas.

3.1 Objetivos de los ensayos

El programa de ensayos se llevó a cabo en el Laboratorio de Estructuras del Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (CISMID) de la Universidad Nacional de Ingeniería. Los principales objetivos del programa de ensayos son:

- Determinar las propiedades dinámicas y el comportamiento del aislador ante cargas laterales cíclicas.
- Obtener las curvas de comportamiento características del tipo de aislador propuesto, así como sus parámetros principales.

3.2 Descripción del dispositivo estudiado

Una descripción detallada del sistema de aislamiento propuesto se presentó en el CAPÍTULO 2. En esta sección se muestra una síntesis del espécimen usado en los ensayos.

El espécimen es un aislador del tipo friccional, el cual consta de unas planchas de base y un disco superior que deslizará libremente apoyándose en las planchas base. Plancha de acero base es de 55 cm por 45 cm para mantener un buen anclaje con, la plancha superior que va sujeta a la estructura es de 30 cm por 30 cm, y el disco tienen un diámetro de 15 cm. Tanto la plancha de base como la plancha superior, tienen agujeros para poder empernarlas tanto a la base del ensayo como a la viga de transferencia. En el espécimen el disco de una pulgada de espesor, se encuentra soldado a la plancha superior permitiendo

que el disco se mueva conjuntamente con la estructura superior. El acero utilizado para el espécimen es del tipo A36. En la Figura 2.1 se detallan las dimensiones del espécimen ensayado. Las superficies deslizantes se prepararon previamente eliminando todo residuo de óxido, o algún elemento que impida el libre deslizamiento. Asimismo el dispositivo se fijó a la estructura de montaje mediante pernos estructurales. La Foto 3.1 muestra el espécimen instalado para el ensayo.

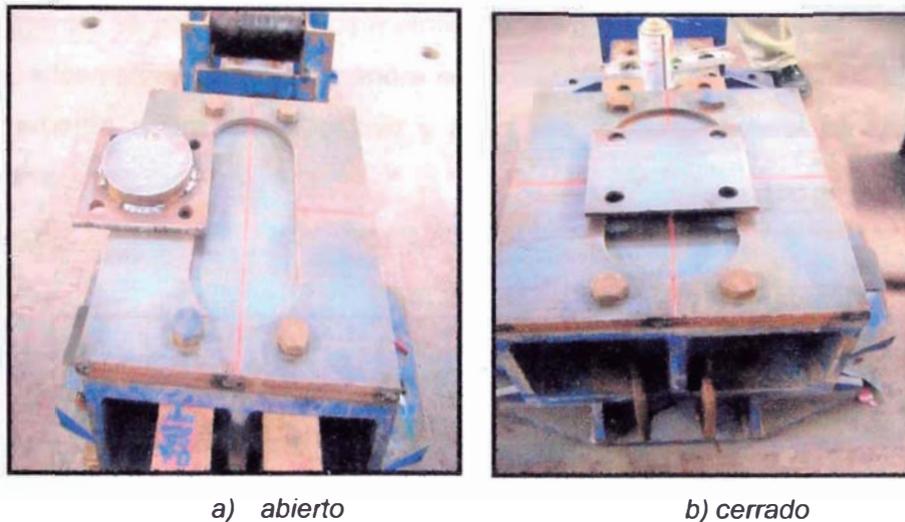


Foto 3.1 Vista del dispositivo de aislamiento ensayado.

3.3 Instalaciones y montaje para los ensayos

Las instalaciones del Laboratorio de Estructuras del CISMID cuentan con un muro de reacción y una losa de carga de concreto pretensado. Sobre esta losa se fija el dispositivo a ensayar y el kit de montaje a través de pernos de alta resistencia.

Para la realización del programa de ensayos fue necesario ejecutar un montaje especial, mostrándose en la Figura 3.1 y la Figura 3.2 el esquema del montaje empleado. Utilizando la losa de reacción se coloca un pedestal para fijar la gata horizontal, mientras que con un marco de carga se fija la gata vertical. El espécimen se coloca en una base que esta fija a la losa de reacción mediante los pernos de alta resistencia, mientras que la parte del espécimen que deslizará se fija a la viga horizontal de transferencia con ayuda de pernos. La viga de

transferencia tiene la función de distribuir uniformemente la carga vertical al espécimen, y a su vez transferir la carga horizontal al dispositivo. El marco de carga está fijado a la losa mediante los pernos, logrando que el marco pueda resistir la reacción de la fuerza aplicada por la gata vertical.

Para mantener el movimiento horizontal de la viga de transferencia, se colocaron rodillos que sirven de apoyo a la viga y a su vez le permiten moverse. Además, para lograr que la viga de transferencia se mueva horizontalmente sin ningún impedimento, se colocan rodillos metálicos más pequeños por debajo de la base del actuador vertical. De esta manera se logra que la carga vertical se distribuya eficientemente sobre el dispositivo y a su vez la carga lateral se aplique al dispositivo.

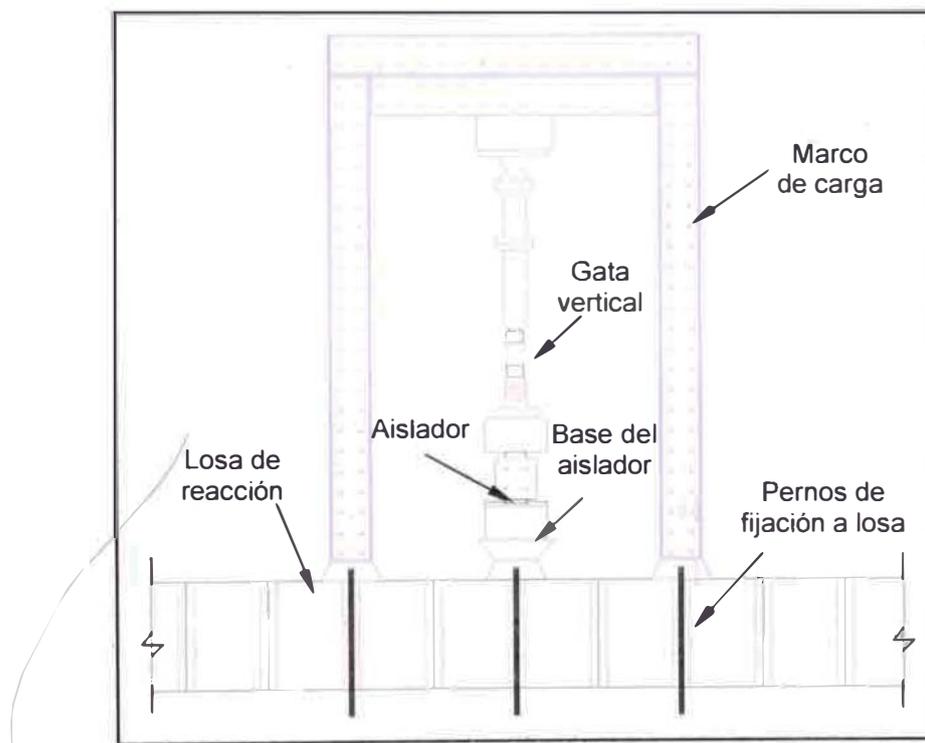


Figura 3.1 Vista frontal del montaje para los ensayos.

La gata horizontal está sostenida al pedestal mediante pernos estructurales. A su vez el pedestal está fijado a la losa de carga mediante pernos para evitar que se mueva al momento de aplicar la carga lateral. La gata horizontal tiene unos soportes intermedios para disminuir la longitud sin apoyo de la gata, lo cual reduce cualquier fuerza adicional que se introduzca al momento de aplicar la

carga lateral, evitando así daños en la gata horizontal. La Foto 3.2 muestra el montaje final para el ensayo y sus distintas partes conectadas.

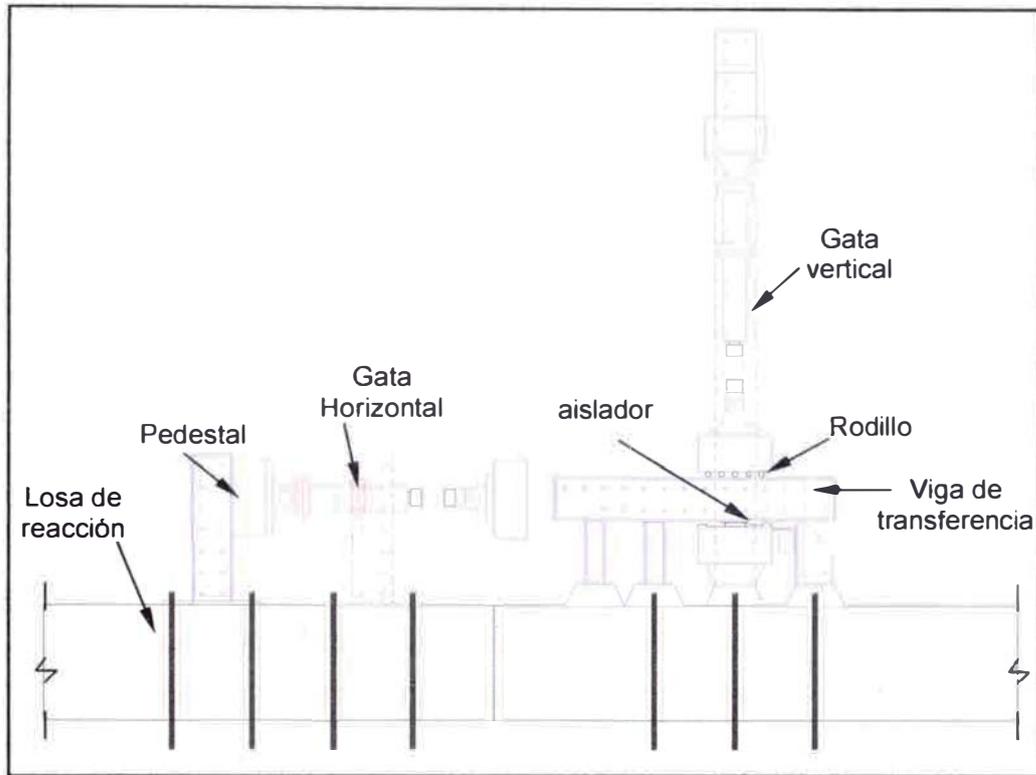


Figura 3.2 Vista lateral del montaje para los ensayos.



Foto 3.2 vista del montaje final para los ensayos.

3.4 Instrumentación para el ensayo

Para el programa de ensayos se utilizaron dos gatas hidráulicas para aplicar las cargas al dispositivo. Como se describió anteriormente se utiliza una gata vertical para simular la carga de gravedad en el espécimen, y se utiliza otra gata horizontal para simular el efecto del sismo en el dispositivo.

Las gatas hidráulicas están controladas por un sistema manual presión, el cual mueve el embolo variando la presión de ingreso del aceite a la gata. Cada gata tiene una celda de carga que permite registrar los valores de cargas que se están aplicando durante el ensayo (Las Gatas son marca Tokyo Sokki Kenkyujo).

La gata que aplica cargas horizontalmente es del tipo TCLP-20BW, y tiene una capacidad de 20tn tanto para tensión como a compresión. La carrera de la gata es de ± 20 cm. Para la lectura de la celda de carga es necesario factorar la lectura por las constantes de calibración que son $+2004 \times 10^{-6}$ para las fuerzas en tensión y -1994×10^{-6} para las fuerzas en compresión. Por otra parte la gata utilizada para las cargas verticales es del tipo TCLP-50BW, y su capacidad es de 50tn con una carrera de ± 25 cm. En el caso de la gata vertical solo se aplican fuerzas de compresión, por lo que la constante que se utiliza es de -1993×10^{-6} para obtener el valor verdadero de la carga vertical.

Durante los ensayos el control de la carga en las gatas se realiza mediante un sistema manual, el cual controla la presión de aceite que ingresa al embolo de la gata a través de válvulas. Al abrir o cerrar las válvulas aumenta o disminuye la velocidad de la aplicación de carga de las gatas.

Para la obtención de los resultados de los ensayos se emplearon 9 canales de lectura de datos. De estos canales, 6 fueron utilizados para la lectura de los desplazamientos horizontales y verticales. Los otros 3 canales, se utilizaron para la lectura de la carga horizontal y vertical.

En la lectura de las cargas verticales y horizontales se emplearon celdas de carga para cada una de las cargas, la cuales fueron calibradas previamente a los ensayos. El rango de lecturas de la celda de cargas es de ± 50 kg, por lo para

valores de fuerzas menores la lectura no será lo suficientemente exacta. Estas lecturas se realizaron en los primeros canales de medición para poder tener un control exacto de las cargas aplicadas al espécimen durante el ensayo.

Con el fin de registrar los desplazamientos durante los ensayos se instalaron transductores de desplazamientos los cuales permiten registrar el valor de los desplazamientos en tiempo real durante la ejecución del ensayo. Se colocó un transductor para medir la deformación vertical en la parte superior de la viga de transferencia. Para los desplazamientos horizontales en el dispositivo se utilizaron un juego de 4 transductores ubicados a cada lado del disco superior. Finalmente se utilizó un transductor al final del actuador horizontal con el objetivo de controlar la carrera durante el ensayo. La Figura 3.3 muestra la ubicación de los transductores de desplazamientos.

Los transductores son dispositivos que convierten una cantidad mecánica (desplazamiento, deformación, fuerza, etc) en una diferencia de potencial eléctrico. Los transductores utilizados para los ensayos, son los Transductores de Desplazamiento de Voltaje Lineal (LVTD, son marca Kyowa Electronic Instruments Co. Tokio, Japón). En estos transductores el voltaje depende de la posición de un núcleo que esta sujeto a un embobinado interno, este núcleo se desplace con el espécimen durante el ensayo. Los transductores usados para el ensayo son del tipo DT-100A (para los canales CH-04, CH-05, CH-06, y CH-07) y del tipo DT-50A (para los canales CH-03 y CH-08). El transductor del tipo DT-100A tiene una amplitud de 100mm, mientras que el del tipo DT-50A tiene una amplitud de 50mm.

Para la adquisición de los datos del ensayo se utilizó un amplificador de señales de seis canales y otro amplificador de tres canales. Este amplificador incrementa la amplitud de voltaje del ensayo de tal manera que pueda ser leído por otros equipos. Los amplificadores utilizados son: DPM-611A de seis canales y DPM-601A de tres canales (marca Kyowa Electronic Instruments Co., Tokio-Japón).



Figura 3.3 Ubicación de los transductores para los ensayos.

Luego de amplificar los voltajes leídos durante el ensayo, es necesario transformarlos para que la computadora pueda leer tales señales. Para esto se usa un Convertidor A-D, que convierte las diferencias de voltaje a un lenguaje de bits que la computadora puede procesar. El equipo usado para el ensayo es un Convertidor A-D del tipo ADC-116C marca Kyowa Electronic Instruments Co.



Foto 3.3 Equipo de adquisición de los datos del ensayo.

El Convertidor A-D está conectado a una computadora, en la cual se almacena la información del ensayo. La computadora lee de manera simultánea los valores de carga y desplazamiento que se presentan en el espécimen, y mediante un

programa de cómputo mantiene un control en tiempo real de los valores del ensayo. A este procedimiento se le denomina ensayo con computadora en línea. En la Foto 3.3 se muestra la disposición final para el equipo de adquisición de datos.

3.5 Programa de ensayos

Como se mencionó anteriormente se efectuó una serie de ensayos pseudo estáticos al dispositivo de aislamiento. Se pretende entonces simular las cargas a las cuales estará sujeta el espécimen cuando esté instalado en la estructura y ocurra un sismo. La carga vertical aplicada al espécimen simula las cargas de gravedad que soportaría el dispositivo instalado, siendo esta carga parte de las sobrecargas y el peso de la súper estructura. Por lo que la carga vertical se mantiene en un valor constante durante el ensayo, mientras que la carga horizontal representa la acción del sismo en la estructura aislada y estas cargas tienen valores variables en el tiempo. Para el ensayo esta carga horizontal tiene características cíclicas para simular las cargas aleatorias del sismo. La Figura 3.4 muestra un esquema del ensayo.

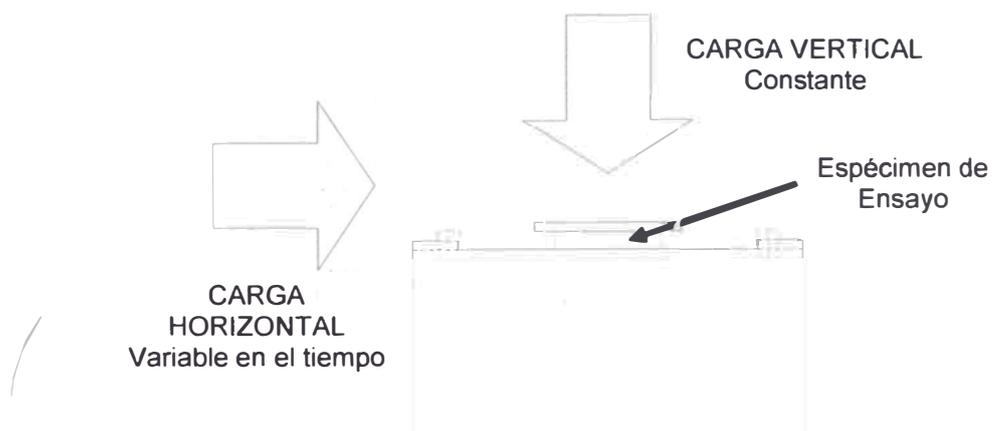


Figura 3.4 Esquema del ensayo cíclico.

Para determinar las propiedades dinámicas del dispositivo se efectuó una secuencia de ensayos de carga cíclica en el dispositivo. En cada ensayo se varía la carga lateral, variando así los desplazamientos horizontales hasta completar 5 ciclos de histéresis en el mejor de los casos. Esta secuencia de ensayo se repite

aplicando distintos valores de carga vertical en cada uno de los ensayos. En la Tabla 3.1 se muestran los valores de carga aplicada por la gata vertical para cada secuencia de ensayo, donde estos valores de carga fueron calculados para cada situación de carga.

Tabla 3.1 Valor de carga vertical aplicada en cada ensayo.

ENSAYO	CARGA VERTICAL (ton)
1	0.00
2	5.00
3	10.00
4	2.65
5	7.65

El procedimiento para los ensayos se describe a continuación:

1. Se aplica lentamente la carga vertical hasta llegar al valor determinado de carga vertical.
2. Se inicia la aplicación de la carga lateral lentamente hasta que el dispositivo empiece a deslizarse y alcance el valor límite de desplazamiento.
3. Se detiene el actuador una vez alcanzado el valor límite de desplazamiento.
4. Se procede a retirar la carga del actuador horizontal hasta llegar al valor de cero, para luego aplicar carga en el sentido contrario (jalando) y alcanzar el valor límite de desplazamiento en la otra dirección.
5. Se retira la carga hasta llegar al valor de carga horizontal cero.
6. Se repite los pasos del 1 al 5 hasta completar el número de ciclos deseados.

Además, el procedimiento de ensayo se repite para cada nivel de carga vertical buscando representar el comportamiento del dispositivo para cada estado de carga vertical.

3.6 Principales resultados de los ensayos

A continuación se presenta los principales resultados registrados en los ensayos y además una breve discusión de los mismos.

Antes de evaluar los resultados, es necesario tener en cuenta que al valor de carga vertical de los ensayos debe agregarse el peso de las partes del montaje sobre el espécimen. Si bien este peso es pequeño en comparación con las cargas aplicadas, permitirá determinar valores más exactos de los parámetros requeridos. El valor del peso del montaje sobre el dispositivo es de 350 kg, en la Tabla 3.2 se puede ver en detalle el cálculo de este peso.

Tabla 3.2 Peso del montaje sobre el espécimen.

VIGA					
Número	Ancho	Espesor	Largo	Volumen (m3)	Peso (tn)
2	0.300	0.013	2.100	0.016	0.126
1	0.125	0.013	2.100	0.003	0.026
2	0.300	0.013	0.300	0.002	0.018
					0.17
OJO CHINO					
Número	Ancho	Largo	Espesor	Volumen (m3)	Peso (tn)
3	0.250	0.550	0.020	0.008	0.065
2	0.450	0.550	0.030	0.015	0.117
					0.18
PESO MUERTO TOTAL					0.35 tn

En la primera parte de los ensayos se aplicó una carga lateral cíclica sin la incidencia de carga vertical con el fin de obtener el valor del coeficiente de fricción estático y tener un primer control de los parámetros. El valor máximo de carga aplicada fue de aproximadamente 0.10tn y se registraron valores máximos de desplazamientos del orden de 65 mm en la ida, y 51mm de regreso. En esta parte se completó un ciclo de cargas y en la Figura 3.5 se muestra la curva de histéresis en el centro del dispositivo. La inestabilidad en la curva se debe al hecho de que la celda de cargas registra valores de carga mayores a 50kg, por lo que para valores más pequeños no tienen la precisión adecuada.

La curva de la Figura 3.5 permite conocer experimentalmente el valor del coeficiente de fricción entre los metales del dispositivo. En el CAPÍTULO 2 se mencionó la suposición de que la fuerza resistente inicialmente en el dispositivo,

es la fuerza de fricción y esta fuerza está relacionada con el peso que actúa sobre el dispositivo. El peso sobre el dispositivo está determinado en la Tabla 3.2 y tiene un valor de 0.35tn, mientras que el valor de fuerza para el cual el dispositivo empieza a moverse es de 0.08tn en promedio. Por lo que obtenemos que el valor del coeficiente de fricción estático es de $\mu_{est}=0.23$.

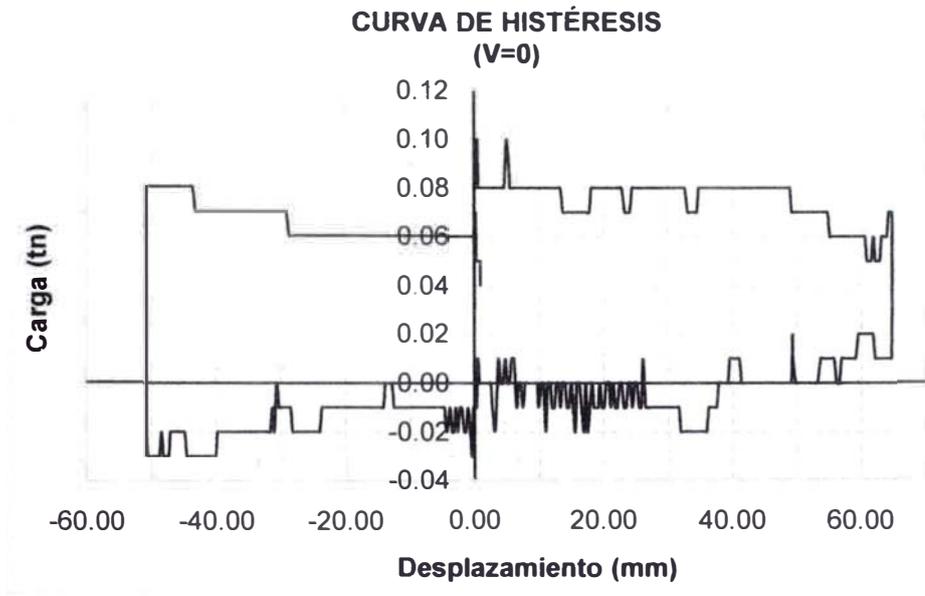


Figura 3.5 Curva de histéresis del dispositivo sin carga vertical.

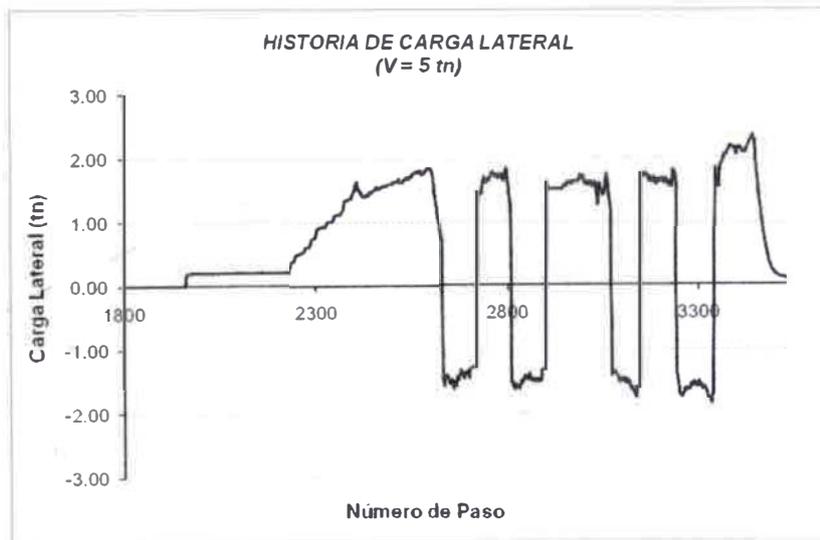


Figura 3.6 Historia de la carga lateral aplicada al dispositivo (V=5tn).

En la Figura 3.6 se muestra la historia de la carga lateral aplicada sobre el dispositivo (no se muestran los pasos correspondientes a la aplicación de la carga vertical). Se puede notar claramente los ciclos de carga y descarga, con una carga máxima aplicada de 2.30tn empujando y 1.90tn jalando.

En la Figura 3.7 se muestra la historia del desplazamiento del dispositivo, lo primeros pasos no son graficados por que corresponden al momento de la aplicación de carga vertical. Se puede notar claramente los ciclos de desplazamiento y los instantes en los cuales el dispositivo se detiene. Los desplazamientos máximos registrados son aproximadamente de 53mm en ida y 62mm de regreso.

Uniendo la historia de carga y la historia del desplazamiento obtenemos la curva de histéresis del dispositivo. En la Figura 3.8 se presentan las curvas de histéresis del dispositivo. Estas curvas fueron obtenidas con los desplazamientos registrados a cada lado del dispositivo (izquierda y derecha), lo que muestra que en algunos instantes el disco del dispositivo sufre una rotación respecto a su eje vertical en sentido anti horario, y esta se presenta cuando el dispositivo es jalado y se detiene. En la mayoría de los momentos del ensayo esta rotación es muy pequeña y por lo tanto es despreciable. Para conocer el valor del desplazamiento en el centro del dispositivo, se calcula un promedio de los valores extremos. Los valores de la curva de histéresis en el centro del dispositivo se muestran en la Figura 3.9.



Figura 3.7 Historia del desplazamiento del dispositivo (V=5tn).

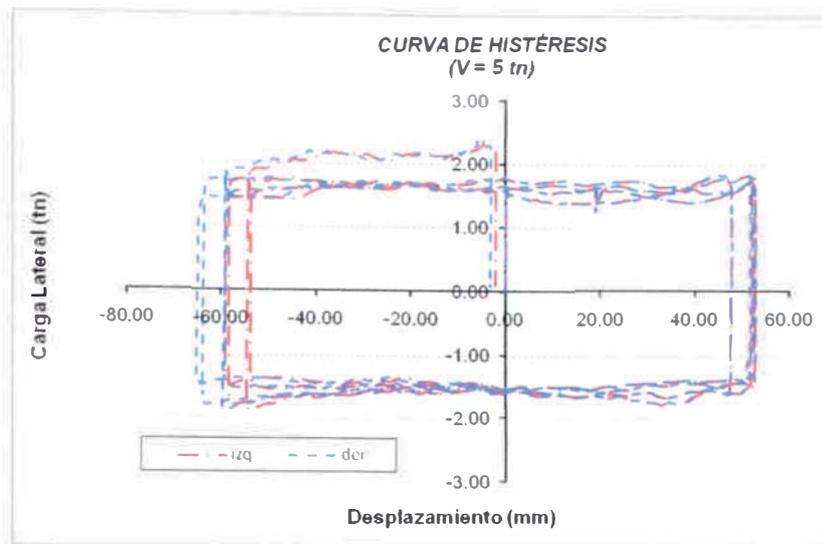


Figura 3.8 Curvas de histéresis a cada lado del dispositivo (V=5tn).

La curva de histéresis en el centro del dispositivo muestra la tendencia del comportamiento del sistema. El dispositivo tiene una alta rigidez inicial hasta que se rompe la acción del coeficiente de fricción estático, luego el dispositivo se desplaza sin oposición hasta que alcanza el desplazamiento máximo y se detiene, este comportamiento se repite para cada carga y descarga. Además se observa que al aumentarle la carga vertical cambian los valores de fuerza resistente y se incrementa la capacidad de disipación de energía, ya que el área encerrada por el lazo de histéresis es mayor que cuando no se le aplicaba carga vertical.

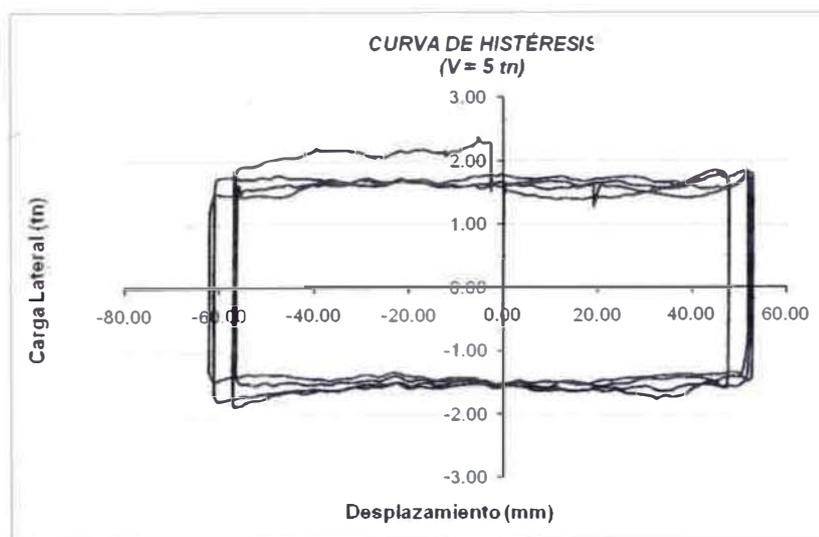


Figura 3.9 Curva de histéresis del dispositivo (V=5tn).

Se comentó anteriormente que el ensayo con carga vertical de 10 toneladas, fue interrumpido sin completar los ciclos de histéresis esperados, ya que durante este ensayo se observó el problema del levantamiento en el disco del espécimen, por lo que se detuvo el ensayo.

En la Figura 3.10 se muestran las curvas de histéresis a cada lado del dispositivo (izquierda y derecha). Se puede apreciar que existe una rotación considerable en el momento en que va a ser empujado por segunda vez, precisamente es en ese momento donde el disco se levanta y se detiene el ensayo. Las rotaciones en el disco pueden ser peligrosas para la respuesta de la estructura, ya que podría inducir a problemas de rotación.

En la Figura 3.11 se muestra la curva de histéresis en el centro del dispositivo, donde se puede observar nuevamente la gran rigidez inicial del dispositivo y como se reduce la rigidez cuando el dispositivo está en movimiento. A diferencia de las anteriores curvas de histéresis, luego de vencer la fuerza de rozamiento existe una segunda rigidez que aunque es pequeña tiende a ser lineal. Si bien no se tiene el número de ciclos deseados la figura muestra una idea de cómo la carga vertical afecta al ciclo de histéresis. La fuerza de rozamiento del sistema es aproximadamente $3.90tn$, con lo que podemos determinar que el coeficiente de fricción estática del dispositivo en el primer ciclo del ensayo es aproximadamente 0.38 .

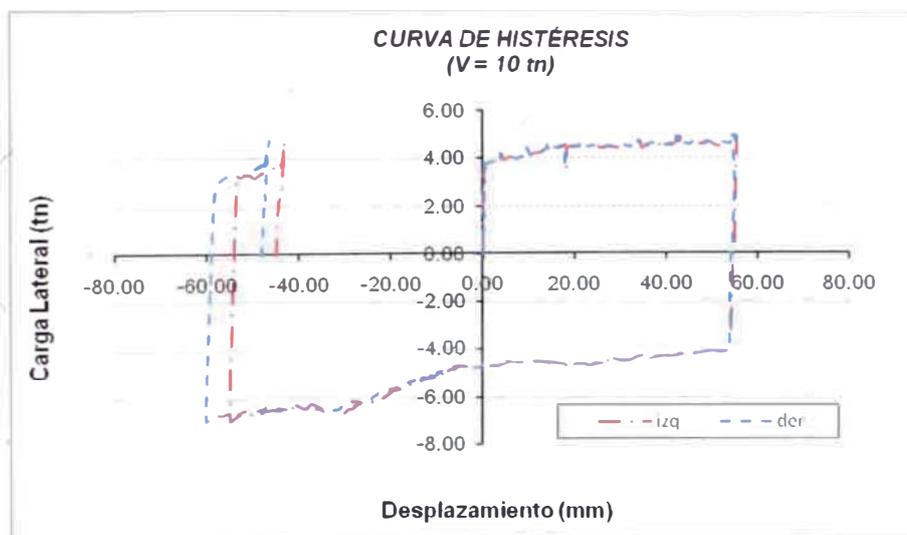


Figura 3.10 Curvas de histéresis a cada lado del dispositivo ($V=10tn$).

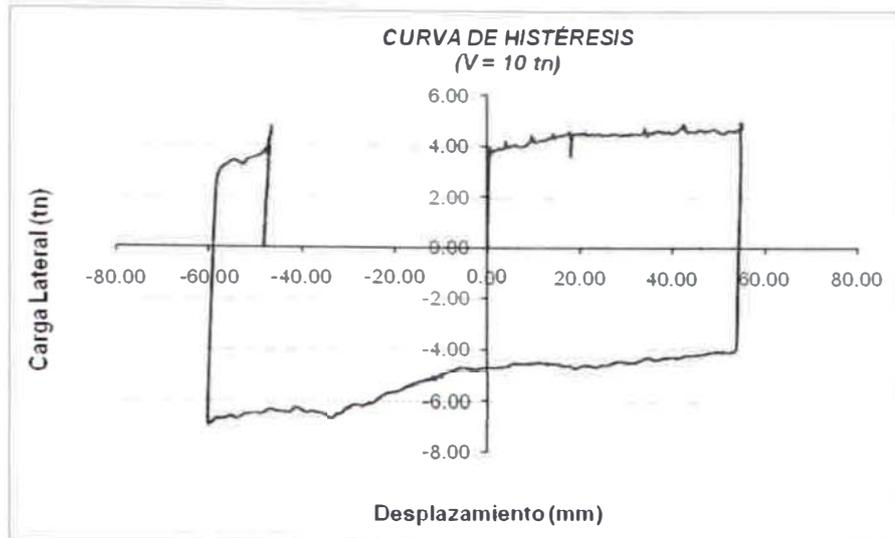


Figura 3.11 Curva de histéresis en el centro del dispositivo ($V=10tn$).

Durante el ensayo con carga vertical de 2.65tn se logra aplicar los cinco ciclos de carga lateral deseados y los valores máximos de carga lateral aplicados al dispositivo fueron de 2.45tn empujando y 2.30tn jalando. Además los desplazamientos máximos alcanzados en este ensayo son de aproximadamente 61mm empujando y 47mm jalando. En la Figura 3.12 se muestra las curvas de histéresis a cada lado del dispositivo, donde se puede apreciar, al igual que en los otros ensayos, que existe rotación en el disco del dispositivo en el momento en que regresa y vuelve a ser empujado. Esta rotación es considerable ya que implica una variación de desplazamientos del orden de 5mm a cada lado del dispositivo.

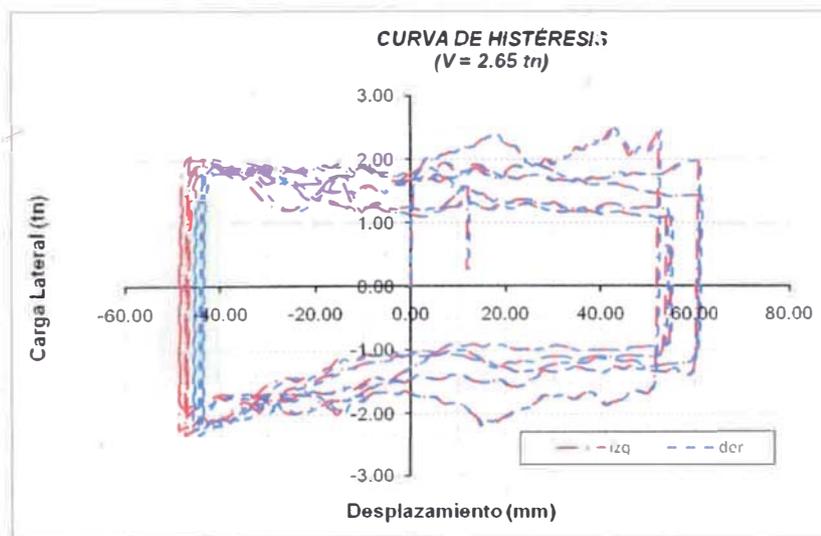


Figura 3.12 Curvas de histéresis a cada lado del dispositivo ($V=2.65tn$).

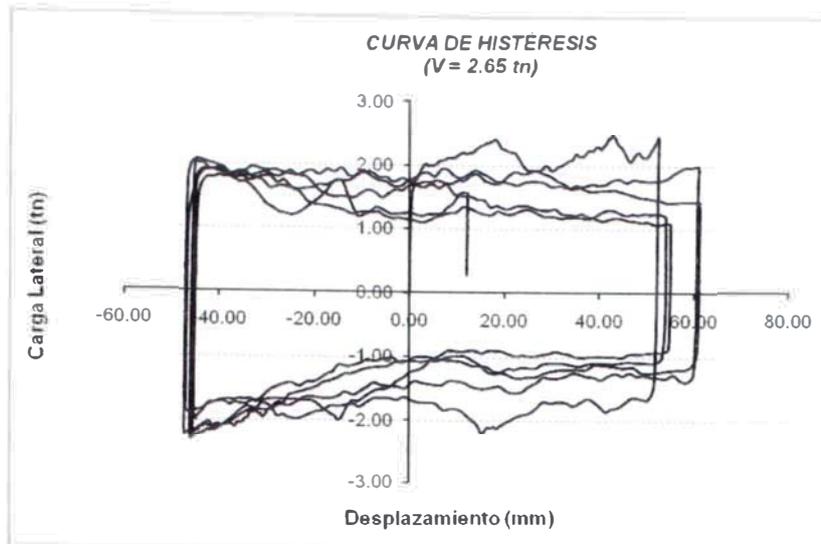


Figura 3.13 Curva de histéresis en el centro del dispositivo ($V=2.65tn$).

Considerando solamente los desplazamientos en el centro del dispositivo se traza la curva de histéresis del dispositivo, como se muestra en la Figura 3.13. En esta curva se puede apreciar claramente como la variación en la fuerza lateral distorsiona la curva de comportamiento. La fuerza con la que se rompe la resistencia del rozamiento es aproximadamente $0.60tn$, con lo que el coeficiente de rozamiento estático para el primer ciclo de carga es de 0.36 .

Finalmente para el último ensayo se procede a aplicar una carga vertical de $7.65tn$. Durante este ensayo se logra completar dos ciclos antes de que el eje de la gata horizontal se levante con lo que se detuvo el ensayo. La carga lateral aplicada alcanza valores de $9tn$ empujando y $7.60tn$ jalando, mientras que los desplazamientos máximos durante el ensayo son de $55.60mm$ empujando y de $58.70mm$ jalando.

Se determinan las curvas de histéresis para el ensayo, utilizando las historias de cargas y de desplazamientos. En la Figura 3.14 se muestran las curvas de histéresis a cada lado del espécimen. Se puede apreciar la rotación en el disco en el momento en el que el disco vuelve a ser empujado, al igual que en otros ensayos. Además se observa que la curva tiende a abrirse con cada ciclo, lo cual indica que se disipa una mayor cantidad de energía por fricción en cada nuevo ciclo de carga. Las curvas de histéresis completan dos ciclos, hasta que se detiene el ensayo, debido a que la carga lateral crece abruptamente. Esta

variación en la carga horizontal se debe al deterioro de la superficie lo que incrementa el coeficiente de fricción.

En la Figura 3.15 se aprecia la curva de histéresis del dispositivo con los desplazamientos calculados al centro del mismo. En esta figura podemos notar que el dispositivo tiene una rigidez inicial (que en este caso ya no es vertical), hasta que se rompe la acción de la fuerza de fricción, y luego alcanza una segunda rigidez con la cual se desplaza hasta alcanzar el máximo desplazamiento. Además la curva se abre conforme se incrementa el número de ciclos, esto debido al incremento de la carga vertical. La fuerza de resistencia por el rozamiento es $3.70tn$, lo que nos resulta en un coeficiente de fricción igual a 0.46 . Este alto valor del coeficiente de fricción nos indica el nivel de desgaste en las superficies de contacto del dispositivo. Es precisamente este desgaste lo que le proporciona al dispositivo una segunda rigidez, a su vez disipa mayor energía e incrementa la resistencia lateral del dispositivo.

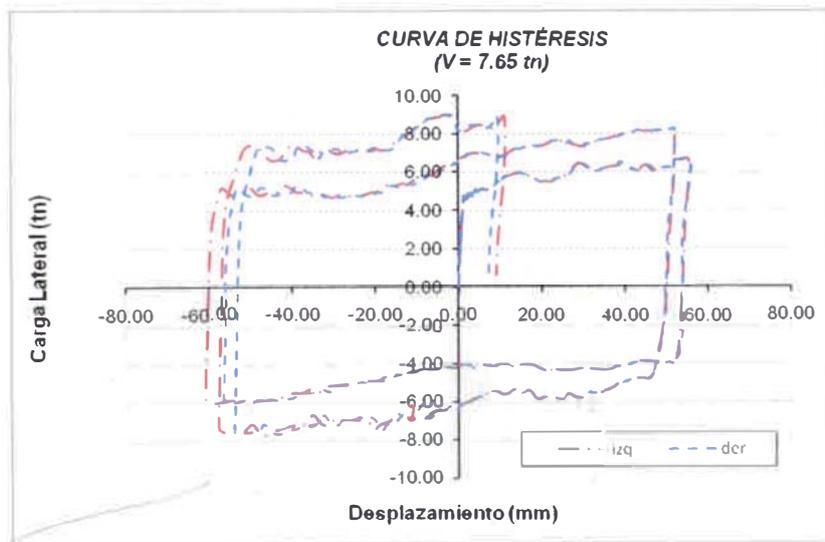


Figura 3.14 Curvas de histéresis a cada lado del dispositivo ($V=7.65tn$).

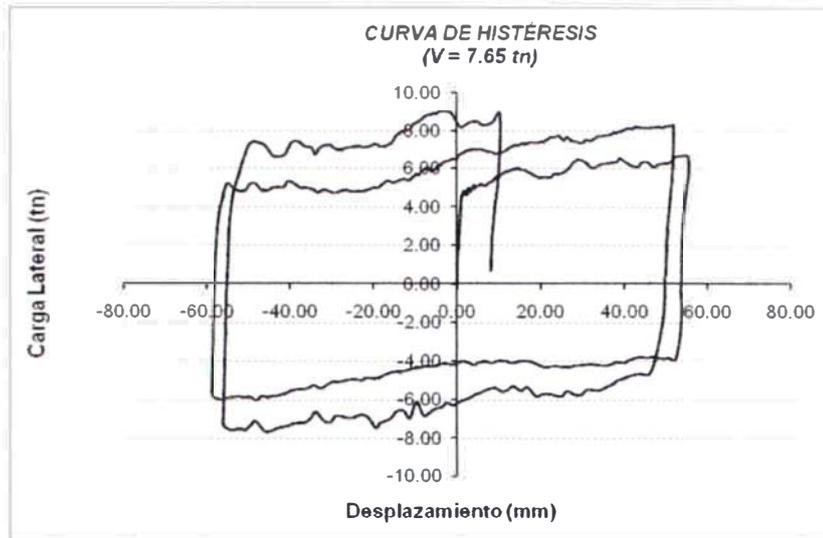


Figura 3.15 Curva de histéresis en el centro del dispositivo (V=7.65tn).

Terminada la aplicación de cargas del dispositivo se revisó el estado final en el dispositivo para estudiar como es afectado el material a las repetidas cargas. En la Foto 3.4 se muestra el estado final en las superficies del dispositivo, donde es el desgaste de los metales lo que afecta al dispositivo. Este desgaste provoca la variación del coeficiente de fricción, así como muchas de las propiedades principales en el dispositivo. Aunque se muestra la evidencia del desgaste en el dispositivo, en el presente estudio no se tiene un análisis que tome dicho fenómeno.

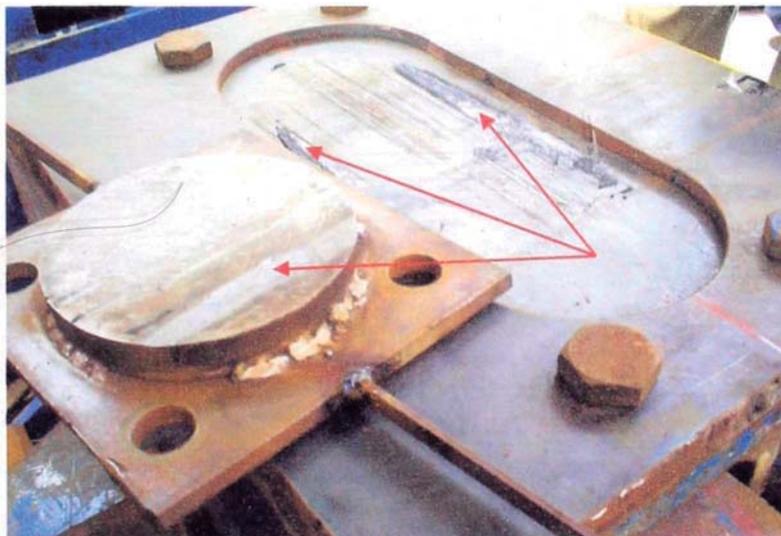


Foto 3.4 Desgaste en la superficie del dispositivo.

3.7 Análisis de resultados de los ensayos

Los resultados presentados anteriormente muestran el comportamiento dinámico del dispositivo estudiado, además permiten tener la información necesaria para determinar los principales parámetros del dispositivo. En esta sección se hace un análisis de los resultados experimentales, para determinar el valor de los parámetros que permitan modelar el comportamiento del dispositivo.

La rigidez efectiva y el amortiguamiento equivalente, son las características más importantes a ser determinadas de los ensayos realizados. Adicionalmente es de interés conocer el coeficiente de fricción estático entre las superficies de contacto del dispositivo, ya que esto depende del acabado que se les de.

Se puede observar de los ensayos que la resistencia lateral del dispositivo depende de la carga vertical aplicada en el mismo. Por lo tanto a mayor esfuerzo vertical en el dispositivo, mayor es la resistencia lateral del dispositivo. En la Figura 3.16 se puede observar la etapa de carga en cada uno de los ensayos, y se aprecia claramente como la resistencia lateral se incrementa cuando se incrementa el esfuerzo vertical en el dispositivo.

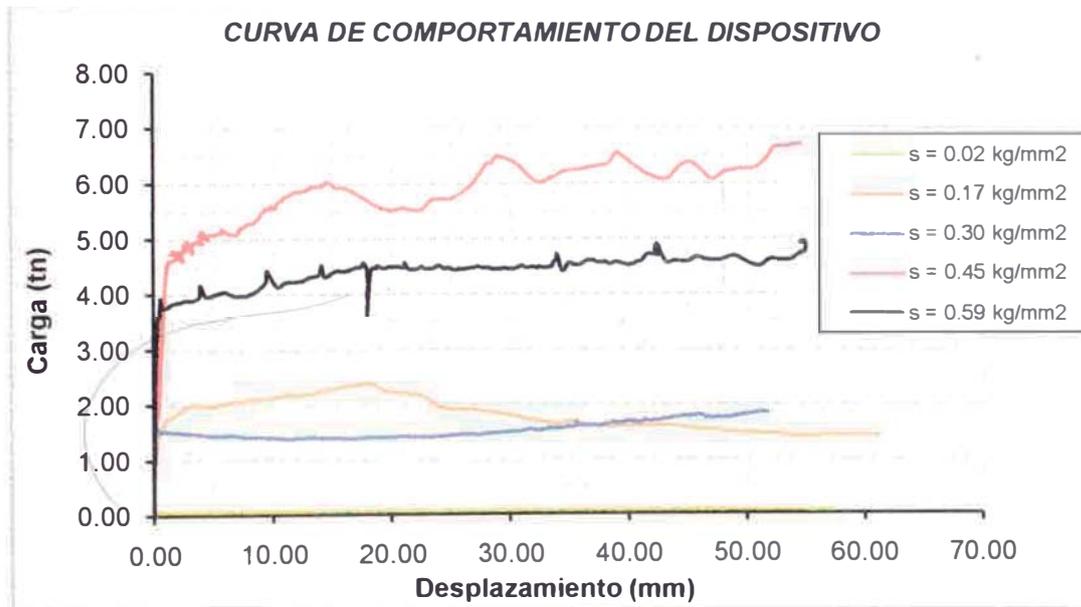


Figura 3.16 Variación de la carga lateral con la presión vertical en el dispositivo.

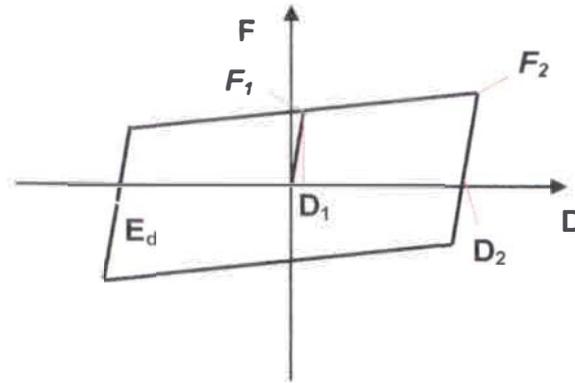


Figura 3.17 Valores principales de los resultados en el dispositivo.

Si se asume un comportamiento bilineal para el dispositivo, se obtienen los principales parámetros de la curva de histéresis analítica. En la Figura 3.17 se muestran los principales parámetros del comportamiento del aislador estudiado, donde:

- F_1 : Fuerza de inicio de deslizamiento del dispositivo.
- F_2 : Fuerza última alcanzada en el ciclo.
- D_1 : Desplazamiento de inicio del deslizamiento.
- D_2 : Desplazamiento último alcanzado.
- E_d : Energía disipada en el ciclo (área encerrada bajo la curva).

Tabla 3.3 Principales resultados del primer ciclo de carga en los ensayos.

N°	V (kg)	F1 (kg)	F2 (kg)	D1 (mm)	D2 (mm)	Ed (kg-mm)
1	350.0	80.00	100.00	0.50	64.88	9808.25
2	3000.0	1760.00	2000.00	1.10	60.00	333445.75
3	5350.0	1550.00	1800.00	0.50	52.88	351747.88
4	8000.0	4580.00	6680.00	1.15	55.50	1263743.00
5	10350.0	3840.00	4700.00	1.00	55.08	1250000.00

En la Tabla 3.3 se muestran los principales valores obtenidos de los ensayos, todos los valores corresponden al primer ciclo de carga. La fuerza lateral resistente del dispositivo se incrementa con la carga vertical, y la energía disipada en el dispositivo varía también con la carga vertical. Los resultados en los ítems número 2 y 4 corresponden a los últimos ensayos, y es por esta razón que la fuerza lateral resistente es mayor que en los ítems número 3 y 5.

Probablemente la fuerza lateral se incrementa debido al desgaste producido en los últimos ensayos ya que han soportado un considerable número de ciclos hasta estos ensayos.

Basándose en los principales resultados de los ensayos, se calculan los parámetros principales del comportamiento del dispositivo. Los principales parámetros a determinar son: la rigidez efectiva y el amortiguamiento equivalente; sin embargo se determinaron otros parámetros como el coeficiente de fricción estático, y las rigideces del lazo histerético. En la Figura 3.18 se muestran los principales parámetros calculados de los ensayos, donde:

- K_1 : Rigidez inicial del dispositivo de ciclo.
- K_2 : Rigidez final del dispositivo del ciclo.
- K_{ef} : Rigidez efectiva del dispositivo del ciclo.
- β_{eq} : Amortiguamiento equivalente a un sistema viscoso lineal.
- μ : Coeficiente de fricción estático del ciclo.
- σ_v : Presión vertical en el dispositivo.

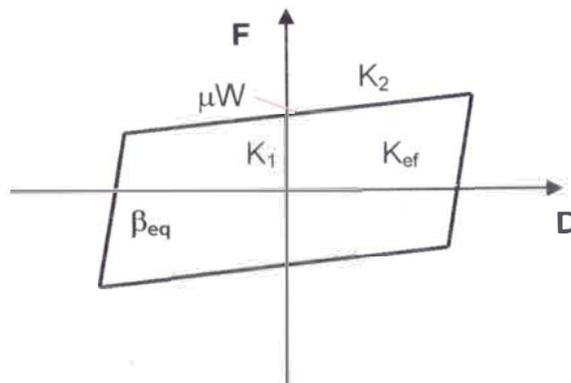


Figura 3.18 Parámetros principales de la curva de histéresis del aislador.

En la Tabla 3.4 se muestran los parámetros del dispositivo calculados de los ensayos. Se puede apreciar que la energía de deformación se incrementa con el incremento del esfuerzo vertical, asimismo el amortiguamiento también se incrementa con el esfuerzo vertical. La rigidez inicial se varía casi linealmente con el esfuerzo vertical, en cambio la rigidez final toma valores muy pequeños para presiones pequeñas y valores altos para presiones altas.

Tabla 3.4 Principales parámetros del dispositivo calculados de los ensayos.

N°	σ_v (kg/mm ²)	Ed (kg-mm)	μ	K1 (kg/mm)	K2 (kg/mm)	Kef (kg/mm)	β_{eq} (%)
1.00	0.02	9808.25	0.23	800.00	0.00	133.33	0.33
2.00	0.17	333445.75	0.59	1600.00	4.07	3333.33	0.44
3.00	0.30	351747.88	0.29	3100.00	4.77	3404.26	0.59
4.00	0.45	1263743.00	0.57	3982.61	38.64	12036.04	0.54
5.00	0.59	1250000.00	0.37	3840.00	15.90	8533.82	0.77

Los valores de la Energía disipada (Ed) en el ciclo fueron determinados mediante el cálculo del área encerrada bajo la curva del primer ciclo. En la Figura 3.19 se muestra la influencia del esfuerzo vertical en la disipación de la energía. La energía de deformación aumenta con la variación del esfuerzo principal, esto debido principalmente a que la fuerza resistente en el dispositivo depende de la carga vertical aplicada al dispositivo. Como se vio anteriormente, a mayor presión el lazo de histéresis se incrementa, con lo que se incrementa el área bajo la gráfica.

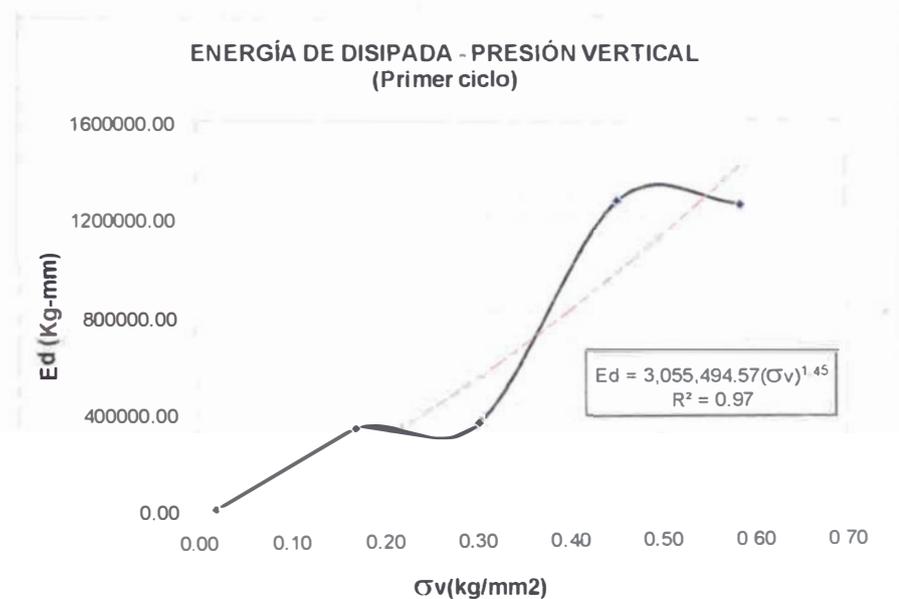


Figura 3.19 Variación de la energía disipada con la presión vertical (Primer ciclo).

Realizando un ajuste de los valores de la curva en la Figura 3.19, se encuentra que la aproximación para la variación de la energía disipada es del tipo exponencial. El exponente de la variación es 1.45 lo que expresa que es un intermedio entre la variación lineal y cuadrática. Entonces la variación de la

energía disipada (E_d) queda expresada por la ecuación 3.8-1, donde el esfuerzo vertical (σ_v) tiene unidades Kg/mm^2 y la energía disipada esta en $Kg-mm$.

$$E_d = 3055494.6(\sigma_v)^{1.45} \quad \dots(3.8-1)$$

Se calcula la rigidez efectiva del primer ciclo para cada curva obtenida en los ensayos. La rigidez efectiva se determinó como la relación entre la fuerza máxima alcanzada en el ciclo y el desplazamiento máximo del mismo. En la Figura 3.20 se muestra la variación de la rigidez efectiva con la presión vertical. En esta figura se puede apreciar que la rigidez efectiva del ciclo tiende a aumentar con el incremento de la presión vertical. Al aumentar la presión vertical en el dispositivo el lazo de histéresis tienen una mayor área encerrada y además la resistencia dispositivo aumenta, por esta razón posee una mayor rigidez. Ajustando la curva se puede aproximar el comportamiento de la rigidez efectiva con la presión vertical a una relación lineal. En la ecuación 3.8-2 se expresa la relación de la rigidez efectiva (K_{ef}) y la presión vertical (σ_v), todo en unidades de $kg-mm$.

$$K_{ef} = 14221.39\sigma_v \quad \dots(3.8-2)$$

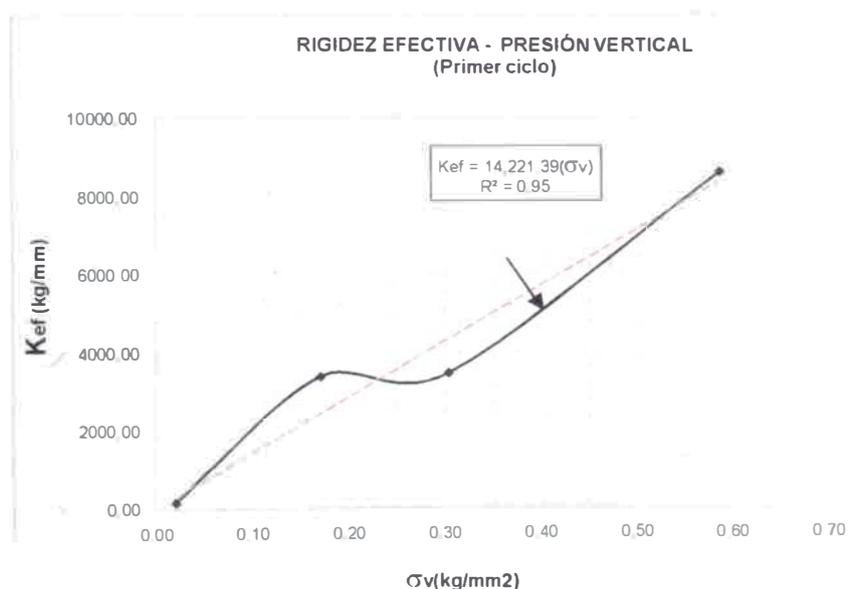


Figura 3.20 Variación de la rigidez efectiva con la presión vertical ($d_{max}=55mm$).

Se calcula el amortiguamiento equivalente en el primer ciclo para cada ensayo realizado. El amortiguamiento equivalente se determina igualando la energía disipada en el lazo de histéresis y la energía disipada para un modelo viscoso lineal. Entonces se determina el amortiguamiento con la ecuación 3.8-3 [8], donde:

- β_{eq} : Amortiguamiento equivalente en el ciclo.
- E_d : Energía disipada en el ciclo de histéresis.
- K_{ef} : Rigidez efectiva en el ciclo de histéresis.
- d : Desplazamiento máximo en el ciclo.

$$\beta_{eq} = \frac{E_d}{2\pi K_{ef} d^2} \quad \dots(3.8-3)$$

En la Figura 3.21 se muestra la variación del amortiguamiento equivalente con la variación de la presión vertical. Se observa que el amortiguamiento equivalente aumenta con el esfuerzo vertical, y esta variación tiene una tendencia exponencial. El crecimiento del amortiguamiento es lento, en comparación con la energía disipada. Se ajusta la curva para obtener una expresión para esta tendencia y se determina que la expresión para el amortiguamiento equivalente con respecto al esfuerzo vertical que se muestra en la ecuación 3.8-4, donde el esfuerzo vertical esta en Kg/mm^2 y el amortiguamiento en porcentaje.

$$\beta_{eq} = 0.73(\sigma_v)^{0.22} \quad \dots(3.8-4)$$

En esta parte se analiza la influencia de la presión vertical en el coeficiente de fricción estático, para lo cual se calcula el coeficiente de fricción para el primer ciclo de cada curva obtenida de los ensayos presentándose los resultados en la Tabla 3.4. El coeficiente de fricción decrece con el aumento de la presión vertical, lo cual demuestra que el coeficiente de fricción estático no es constante y debe de considerarse esta dependencia. Sin embargo el coeficiente de fricción depende además de otros parámetros importantes, como la velocidad de deslizamiento y el desgaste de la superficie.

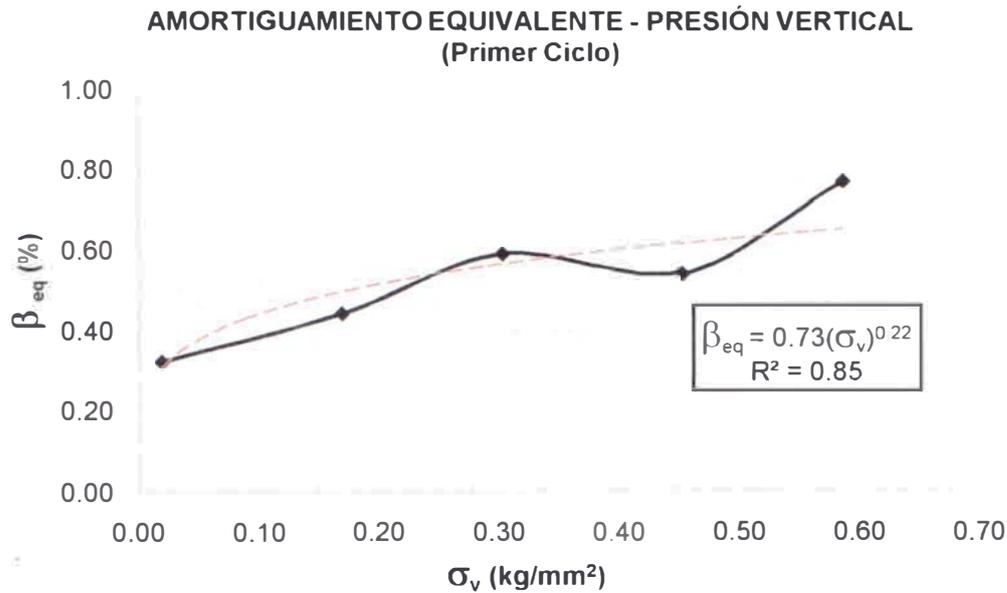


Figura 3.21 Variación del amortiguamiento equivalente con la presión vertical.

Si bien el desgaste en la superficie del dispositivo no fue medido, el fenómeno estuvo presente en los ensayos. Debido al desgaste en las superficies el coeficiente de fricción varía no solo con la presión sino además con el número de ciclos, es decir, que para los últimos ensayos el coeficiente de fricción es mayor que para los primeros. Por tanto el coeficiente de fricción se incrementa con el número de ciclos aplicado al dispositivo, ya que cada nuevo ciclo de carga y descarga desgasta la superficie.

Debido a la influencia del desgaste, no se tiene una variación uniforme del coeficiente de fricción conforme el esfuerzo vertical. Entonces para tener una mejor tendencia de esta variación se grafica los ensayos realizados continuamente. En la Figura 3.22 se muestra la curva de la variación del coeficiente de fricción para los tres primeros ensayos. Al aumentar la presión vertical el coeficiente de fricción disminuye por lo que al ajustar la curva se tiene una variación lineal gobernada por la ecuación 3.8-5 donde el esfuerzo vertical esta expresado en Kg/mm^2 .

$$\mu = 0.26\sigma_v^{-0.35} \quad \dots(3.8-5)$$

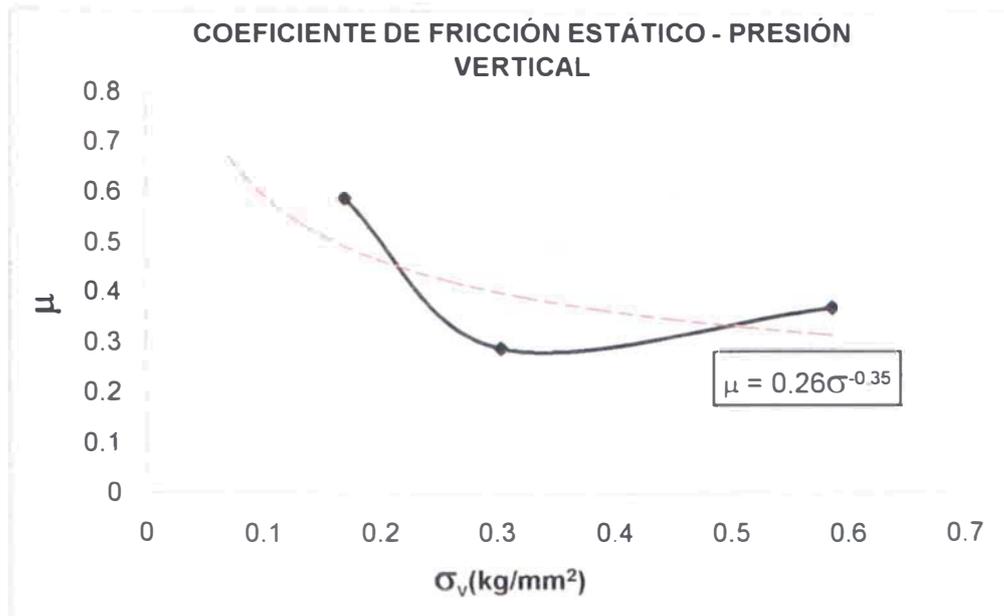


Figura 3.22 Variación del coeficiente de fricción con la presión vertical.

Para establecer las características de la curva de histéresis se estudia la dependencia de parámetros importantes como la rigidez inicial, la degradación de rigidez, y la fuerza de fluencia, todos ellos en función de la presión vertical.

En cuanto a la rigidez inicial se puede notar que es bastante alta. La variación de la rigidez inicial con respecto a la presión vertical tiene una tendencia lineal, además esta línea de tendencia refleja una pendiente alta lo que indica que a medida que se aumente la presión vertical la rigidez inicial aumenta a grandes valores, como se puede observar en la Figura 3.23. La tendencia de la rigidez inicial del dispositivo esta expresada por la ecuación (3.8-6) donde la presión vertical esta expresada Kg/mm^2 y la rigidez inicial en Kg/mm .

$$K_1 = 5990.03\sigma_v + 830.71 \quad \dots(3.8-6)$$

Asimismo la variación de la degradación de la rigidez con respecto a la presión vertical se grafica en la Figura 3.24, en donde se aprecia que la degradación aumenta conforme se incrementa la presión vertical. La tendencia de la degradación de rigidez es lineal y esta expresada por la ecuación 3.8-6, donde nuevamente la presión vertical esta en Kg/mm^2 .

$$K_2 \quad K_1 = 0.0072\sigma_v \quad \dots(3.8-7)$$

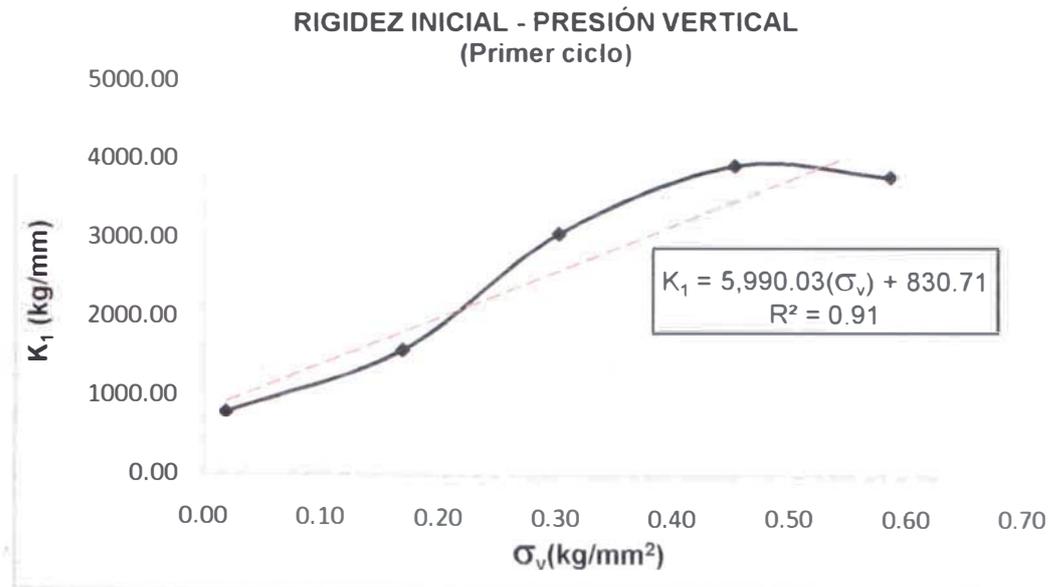


Figura 3.23 Variación de la rigidez inicial con la presión vertical ($d_{max}=55mm$).

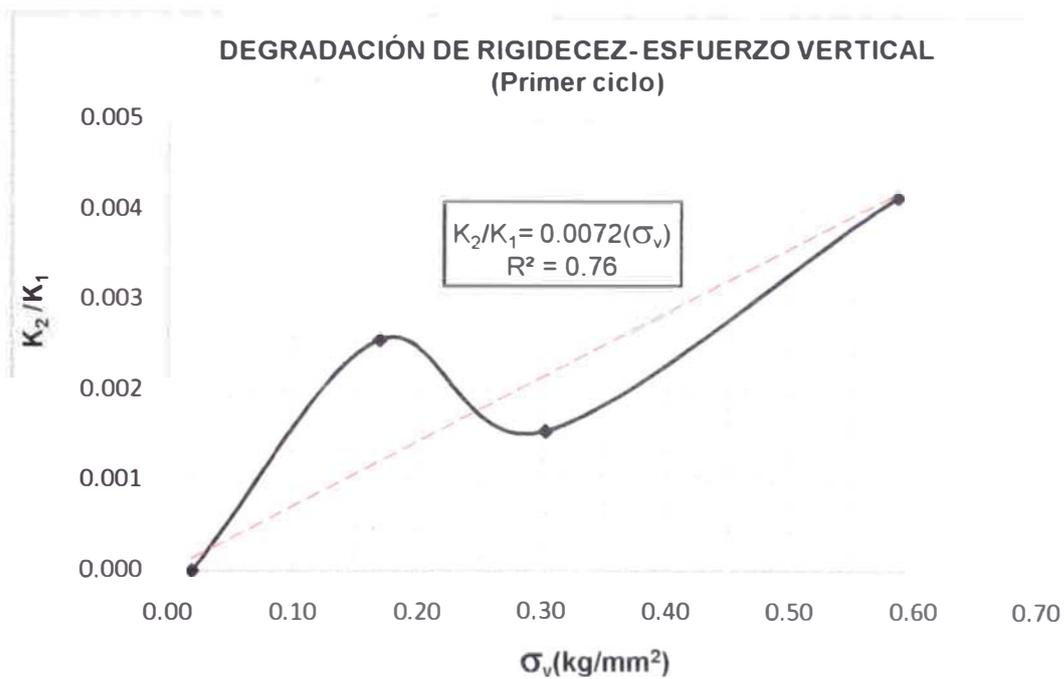


Figura 3.24 Variación de la degradación de rigidez con la presión vertical ($d_{max}=55mm$).

Ahora se analiza la variación de la fuerza de deslizamiento (F_1) con respecto a la presión vertical. En la Figura 3.25 se muestra la variación de la fuerza de deslizamiento con respecto a la presión vertical, en donde se puede observar una variación lineal de esta fuerza. La variación de la fuerza de deslizamiento F_1

se expresa en la ecuación 3.8-8 donde la presión vertical esta en unidades de Kg/mm^2 , y la fuerza F_1 se expresa en Kg .

$$F_1 = 6507.15\sigma_v \quad \dots(3.8-8)$$

Con estas expresiones se tienen caracterizada deslizamiento la curva de histéresis del dispositivo, con lo que se puede conocer las características de un dispositivo del mismo tipo sometido a una presión vertical determinada.

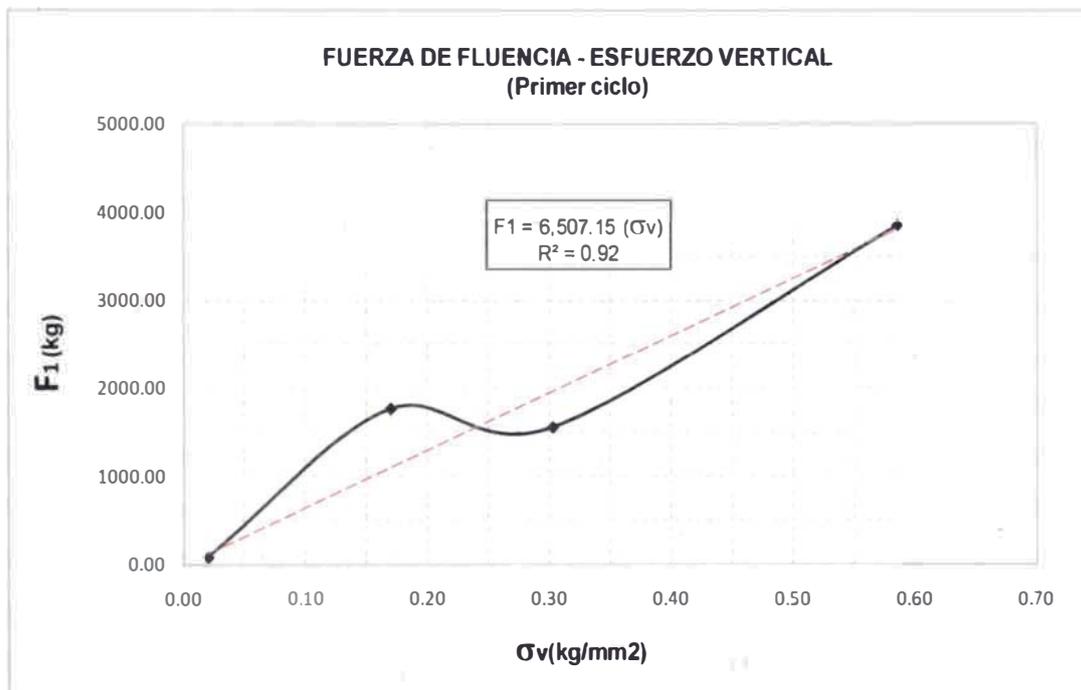


Figura 3.25 Variación de la fuerza de fluencia con la presión vertical ($d_{max}=55mm$).

CAPÍTULO 4 RESPUESTA DEL SISTEMA DE AISLAMIENTO EN VIVIENDAS

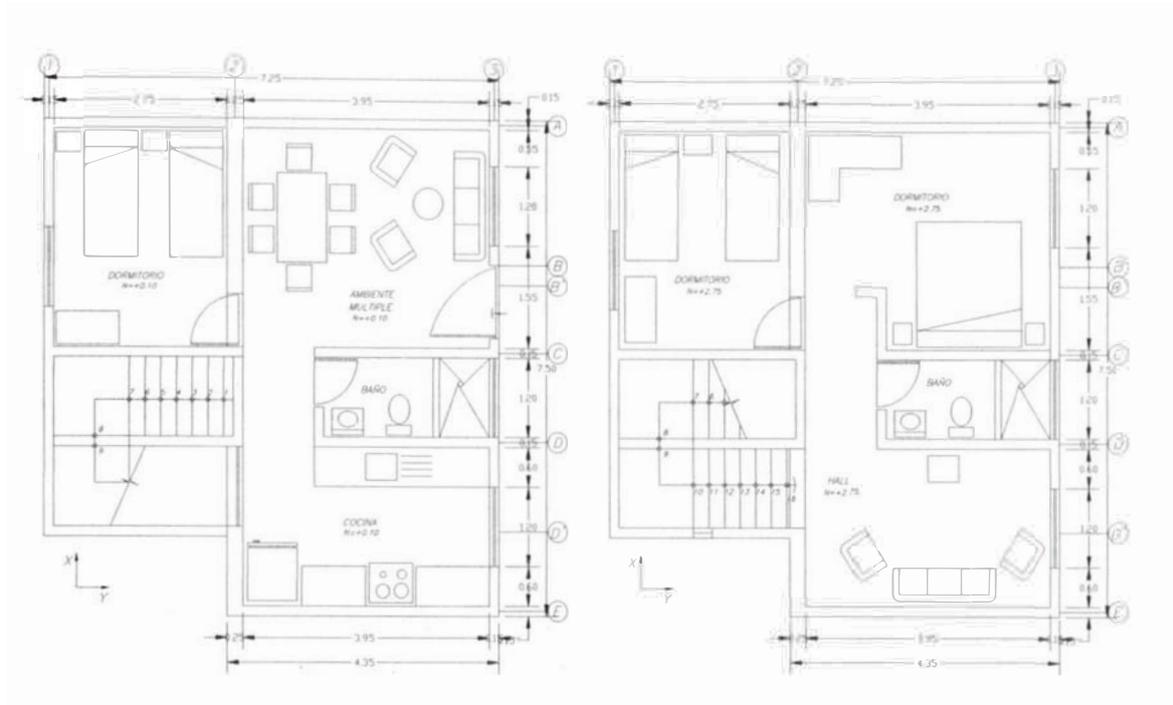
En el siguiente capítulo se estudia la respuesta de una estructura con base fija y se compara a la respuesta con base aislada, usando el sistema propuesto anteriormente. Para tal fin se presenta una metodología de diseño del sistema de aislamiento propuesto, basada en el diseño por capacidad.

4.1 Propiedades del modelo de vivienda estudiado

Se ha escogido un modelo de vivienda familiar típica en el medio local, además esta vivienda cumple con las necesidades vitales básicas. Esta vivienda fue parte del estudio realizado en el CISMID [28] en el año 2004 como parte de un proyecto de estudio de las viviendas de albañilería construidas con material artesanal. El proyecto contempló un ensayo pseudo estático a escala natural de la vivienda mencionada, para determinar su desempeño. En la Figura 4.1 se puede apreciar las dimensiones en planta del primer y segundo piso. La vivienda estudiada está compuesta de muros de albañilería confinada de ladrillos artesanales, con espesores de muros de albañilería de 15cm y 25cm, contando además con un muro de concreto armado de 25cm de espesor. El sistema de techos consiste en losas aligeradas de 20cm de espesor, apoyadas en una sola dirección, asimismo la estructura tiene dos pisos con una altura de entrepiso de 2.50m en cada piso. [28]

Las cargas aplicadas en la estructura corresponden al peso propio, carga muerta repartida, sobrecargas repartidas, y las cargas de sismos (CS). Las cargas del peso propio y carga muerta repartida se consideran como Carga Muerta (CM), la sobrecarga corresponde a la Carga Viva (CV). Para el cálculo de la Carga Muerta se considera que el peso específico de la albañilería es igual a 180kg/m^3 , el peso de la losa aligerada es igual 300kg/m^2 , y la carga repartida por acabados es de 100kg/m^2 . Para la sobrecarga se aplica una carga repartida igual a 200kg/m^2 en el primer piso y 100kg/m^2 en el último nivel. En el cálculo de los

pesos y las masas de las estructuras se considera además del peso propio la totalidad de la carga muerta repartida y el 25% de la sobrecarga actuante. [25]



a) Primer piso

b) Segundo piso

Figura 4.1 Dimensiones en planta de la vivienda estudiada. [28]

Para calcular las rigideces lineales de los muros se emplea un valor del módulo de elasticidad para el ladrillo artesanal de 22500kg/cm^2 . Las rigideces laterales de muros portantes se pueden calcular con la expresión 4.1-1 [24], donde:

- K_h : Rigidez lateral del muro.
- E_m : Módulo de elasticidad del material.
- t : Espesor efectivo del muro.
- h : Altura del muro.
- L : Longitud del muro.

$$K_h = \frac{E_m t}{\left(4\left(\frac{h}{L}\right)^3 + 3\left(\frac{h}{L}\right)\right)} \quad \dots(4.1-1)$$

Calculadas las rigideces laterales de los elementos se determinan las rigideces de entrepiso para cada dirección de análisis. En la Tabla 4.1 se muestran los valores de las masas y rigideces de entrepiso para cada dirección de análisis.

Tabla 4.1 Masas y rigideces laterales de la vivienda estudiada.

Nº PISO	W (tn)	M (tn.s ² /cm)	Kx (tn/cm)	Ky (tn/cm)
1	44.322	0.045	310.304	502.609
2	30.198	0.031	310.304	502.609

Una de las características más importantes de la estructura, son los periodos y los modos de vibración. Para poder determinar estos modos de vibración se considera a la estructura como un sistema de varios grados de libertad, asumiendo un modelo de edificio cortante de acoplamiento cercano donde el desplazamiento de cada piso corresponde a un grado de libertad. En la Tabla 4.2 se muestran los periodos fundamentales en cada dirección de análisis.

Tabla 4.2 Modos de vibración de la vivienda para cada dirección de análisis

Modo	DIR. X		DIR. Y	
	ϕ_1	ϕ_2	ϕ_1	ϕ_2
1	1.000	1.000	1.000	1.000
2	1.507	-0.974	1.507	-0.974
$\omega^2 =$	3385.79	20406.63	5484.06	33053.23
$\omega =$	58.19	142.85	74.05	181.81
T (s) =	0.11	0.04	0.08	0.03

4.2 Diseño preliminar del sistema de aislamiento empleado

4.2.1 Parámetros y propiedades principales

El sistema de aislamiento empleado para la vivienda, tiene las mismas características y propiedades que para en el estudio experimental (Figura 2.1 en la página 37). Se usa un dispositivo con dimensiones, acabado, materiales iguales que los del experimento para poder tener una buena representación de la respuesta de estos dispositivos.

Los parámetros principales del sistema de aislamiento son la presión vertical aplicada al dispositivo y el coeficiente de fricción. Basándose en estos

parámetros se pueden obtener otros parámetros importantes para el diseño de estructuras aisladas como la rigidez efectiva, amortiguamiento equivalente, degradación de rigideces.

Se determina entonces la presión vertical que actúa en el dispositivo, para lo cual se determina el peso que la estructura transmite a cada dispositivo. En la Figura 4.2 se muestra una vista en planta del nivel de aislamiento de la vivienda aislada, se puede apreciar además el área tributaria de cada dispositivo. Para poder asegurar que todos los dispositivos se muevan uniformemente es necesario adicionar a las estructuras una losa de piso de concreto armado (10cm de espesor) que realiza la función de diafragma para el nivel de aisladores.

A mayor número de dispositivos utilizados mejor se distribuirán los esfuerzos verticales y la fricción, pero en este estudio se considera un número reducido de dispositivos con el fin de representar de que el sistema de aislamiento puede funcionar aun con pocos dispositivos. Se clasifican los dispositivos en cuatro tipos de aisladores A-01, A-02, A-03 y A-04 de acuerdo al área tributaria y en la Tabla 4.3 se muestran los valores de área tributaria para cada tipo de aislador.

Con la información de los pesos de las estructuras y el área tributaria de cada tipo de aislador se calculan las presiones verticales. Es necesario además tener en cuenta el peso de la losa de piso, que está por encima de los aisladores, es de 13.5tn. Los valores de presión vertical calculados se resumen en la Tabla 4.4, en donde el área del disco del dispositivo es aproximadamente 17671.5mm². De la tabla se puede apreciar cómo varía el esfuerzo vertical con el número de pisos y además que es el aislador A-04 el que recibe mayor esfuerzo.

Tabla 4.3 Área tributaria de cada tipo de aislador.

Aislador	Área Tributaria (m²)	Número
A-01	4.55	3
A-02	6.90	4
A-03	8.91	1
A-04	10.80	1

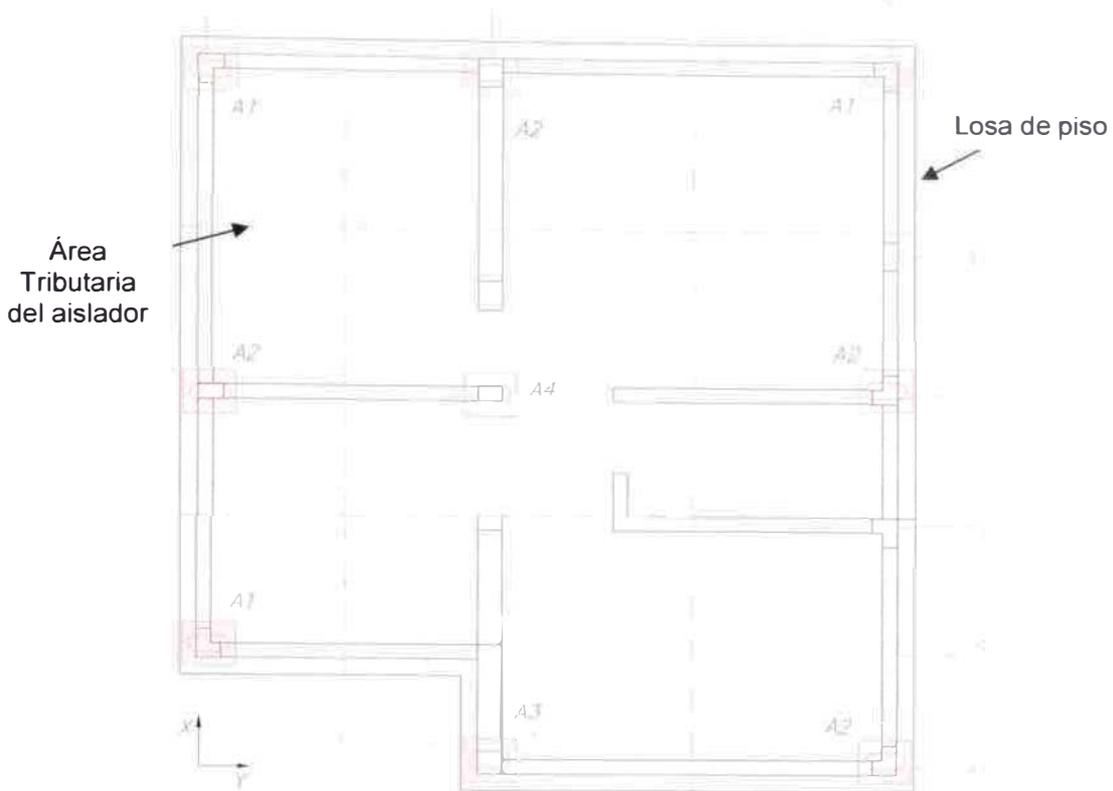


Figura 4.2 Vista en planta del nivel de aislamiento de la estructura.

Tabla 4.4 Presión vertical en los aisladores.

Aislador	Presión vertical (kg/mm ²)
A-01	0.404
A-02	0.611
A-03	0.790
A-04	0.957

En cuanto a los coeficientes de fricción, existen muchas propuestas de la dependencia de este parámetro del esfuerzo vertical y de la velocidad de deslizamiento. En el CAPÍTULO 3 del presente estudio se determinó una expresión simple para la variación del coeficiente estático del dispositivo con el esfuerzo vertical. Este coeficiente de fricción estático actúa hasta que el dispositivo empieza a deslizarse en el primer ciclo. Utilizando la expresión 3.8-5 se calcula el valor de coeficiente de fricción estático para cada tipo de aislador. En la Tabla 4.5 se resumen los valores del coeficiente de fricción estático en los

aisladores. Estos valores, muestran como el coeficiente de fricción del material (en este caso el acero) son modificados debido a la fricción.

Tabla 4.5 Coeficiente de fricción en los aisladores.

Aislador	Coeficiente de fricción
A-01	0.357
A-02	0.309
A-03	0.282
A-04	0.264

Para el diseño de estructuras aisladas es necesario conocer la rigidez efectiva y el amortiguamiento equivalente del sistema de aislamiento, con el objetivo de tener un conocimiento previo de la respuesta de la estructura. Para determinar el coeficiente equivalente de los aisladores usados, se emplea la expresión 3.8-2, presentada en el CAPÍTULO 3. Esta expresión relaciona la rigidez efectiva con la presión vertical, para un desplazamiento máximo de 55mm (Determinado en los ensayos). Entonces se calcula la rigidez efectiva de cada uno de los aisladores y se resumen en la Tabla 4.6, además se calcula la rigidez total del sistema de aislamiento, teniendo en cuenta de que los aisladores forman un sistema en paralelo. La rigidez de los aisladores es igual para ambas direcciones ya que tienen las mismas características en cada dirección.

Tabla 4.6 Rigidez efectiva del sistema de aislamiento.

Aislador	Rigidez Efectiva (kg/mm)
A-01	5739.15
A-02	8695.68
A-03	11228.77
A-04	13610.63
Total	76839.58

Otro parámetro necesario para el diseño preliminar de estructuras aisladas es el amortiguamiento equivalente, se determinan entonces los amortiguamientos equivalentes para cada aislador. En el cálculo del amortiguamiento efectivo se utiliza la expresión 3.8-4, que determina la variación del amortiguamiento en función de la presión vertical para un desplazamiento de diseño de 55mm.

Asimismo se calcula el amortiguamiento equivalente de todo el sistema de aislamiento. En la Tabla 4.7 se resumen los valores de amortiguamiento equivalente en cada aislador y en el sistema total, donde se puede observar que no se supera el 1% de amortiguamiento equivalente lo que indica que el sistema disipa una baja cantidad de energía.

Además se calculan los parámetros para modelar la curva de histéresis de los aisladores, para lo cual se emplean las expresiones presentadas en el capítulo previo. En la Tabla 4.8 se presentan los valores de rigidez inicial de los modelos no lineales de cada tipo de aislador, asimismo se muestra un ponderado que sería la rigidez inicial del sistema de aislamiento.

Tabla 4.7 Amortiguamiento equivalente del sistema de aislamiento.

Aislador	Amortiguamiento Eq. (%)
A-01	0.598
A-02	0.655
A-03	0.693
A-04	0.723
Total	0.660

Luego en la Tabla 4.9 se muestran los valores de degradación de rigidez para cada tipo de aislador y para el sistema total. Estos valores fueron obtenidos con la expresión 3.8-7 planteada en el capítulo previo del presente estudio. Los valores de degradación de rigidez son muy pequeños lo cual indica que una vez que se deslice el sistema no habrá mucha oposición al movimiento.

Tabla 4.8 Rigidez inicial del modelo no lineal de los aisladores.

Aislador	K₁ (kg/mm)
A-01	3248.03
A-02	4493.32
A-03	5560.25
A-04	6563.49
Total	39841.12

Tabla 4.9 Degradación de rigidez para cada tipo de aislador.

Aislador	K_2/K_1
A-01	0.003
A-02	0.004
A-03	0.006
A-04	0.007
Total	0.039

Finalmente se determina la fuerza de deslizamiento o fuerza de fluencia F_1 , para cada tipo de aislador mediante la expresión 3.8-8 y los resultados se resumen en la Tabla 4.10.

Tabla 4.10 Fuerza de deslizamiento para cada tipo de aislador.

Aislador	F_1 (kg)
A-01	2626.01
A-02	3978.80
A-03	5137.85
A-04	6227.69
Total	35158.78

4.3 Respuesta sísmica no lineal de la estructura aislada

Establecer el desempeño de una estructura es importante para conocer cómo se comporta esta estructura ante los eventos sísmicos. Desde hace varios años se han planteado filosofías para determinar el desempeño estructural mediante desplazamientos, las cuales son capaces de especificar el nivel de daño que se espera tenga la estructura ante cargas laterales

Si bien es cierto los métodos de evaluación por desempeño han sido usados en distintos países desde hace ya varios años, su aplicación ha sido solamente para estructuras de acero y de concreto reforzado, las cuales cuentan con una configuración estructural de pórticos resistentes. Sin embargo, esta metodología no ha sido igualmente usada en estructuras de mampostería en donde el sistema resistente esta basado en muros portantes, dado que el modelamiento no lineal en este caso es de mayor complejidad. La principal dificultad de

establecer evaluaciones por desempeño en estructuras de mampostería radica en la variabilidad del comportamiento del material, la complejidad del modelamiento no lineal, la no uniformidad de los elementos estructurales, entre otros. En el presente estudio se emplea una metodología propuesta por Zúñiga y Terán [31], el esquema de la metodología para estructuras de mampostería se muestra en la Figura 4.3.

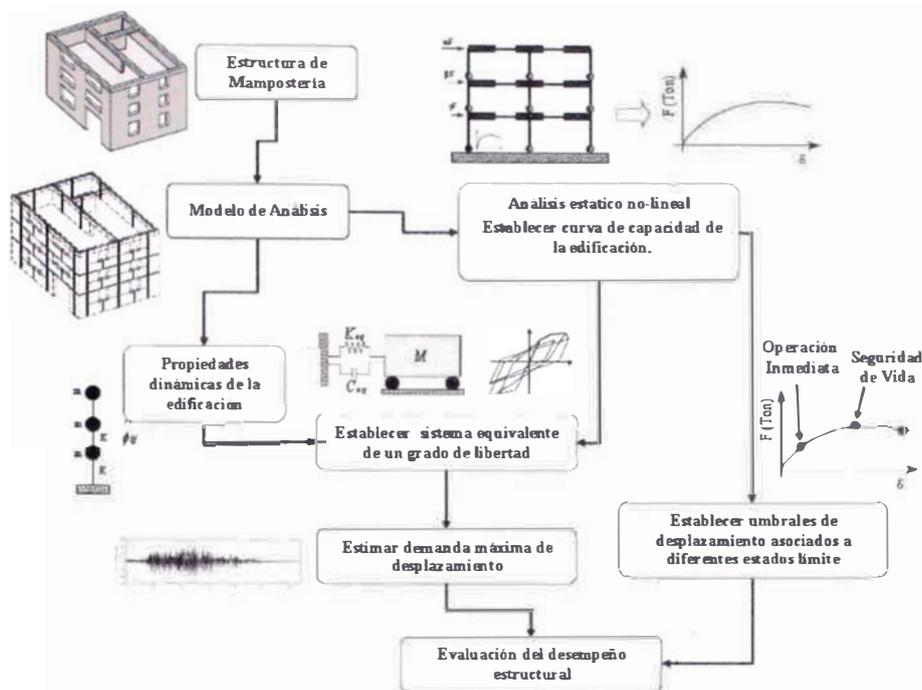


Figura 4.3 Metodología para evaluación del desempeño de estructuras de mampostería. [31]

Para establecer una medida de la reducción de la respuesta en estructuras aisladas se realiza un análisis no lineal de la estructura fija con el fin de obtener la curva de capacidad de la estructura. Esta curva se obtiene luego de un análisis pushover, el cual consiste en aplicar una distribución de cargas laterales a la estructura y hacerla crecer monótonicamente hasta alcanzar el desplazamiento deseado. La curva de capacidad permitirá establecer cuál es la respuesta exacta de la estructura y cuáles son los principales parámetros que determinan esta respuesta, además permite el uso de modelos simples para predecir el comportamiento dinámico de la estructura ante demandas sísmicas. [20]

Para poder realizar un análisis estático no lineal con carga monotónica creciente de una estructura de mampostería, es necesario establecer la dependencia del comportamiento no lineal de los elementos resistentes de mampostería confinada. Los elementos resistentes están basados en muros portantes, los cuales resisten la carga vertical y además trabajan mayormente a corte. Diversas investigaciones han comprobado el hecho de que el comportamiento de los muros de mampostería confinada está gobernado por las acciones de corte, es decir que la fuerza cortante es la que produce el comportamiento no lineal en el muro. [31]

Los muros portantes de mampostería confinada están compuestos por unidades de ladrillos de arcilla y un confinamiento de concreto reforzado, y según las normas de diseño actuales el confinamiento es diseñado solo para proveer ductilidad al muro [25]. Entonces la fuerza cortante será tomada en su totalidad por el muro de ladrillo mientras que el pórtico de confinamiento trabajará solamente a flexión.

Esta interacción entre el pórtico de confinamiento y el muro de ladrillos fue estudiado por Chang [7], donde se caracteriza a la mampostería confinada como la suma sus elementos, que considera que los ladrillos toman el efecto cortante y el confinamiento la flexión. En la Figura 4.4 se muestra el comportamiento de los muros de mampostería confinada, en donde el comportamiento no lineal a corte es brindado por el muro de ladrillos mientras que el pórtico de confinamiento trabaja a flexión linealmente aportándole ductilidad al sistema.

Como parte del estudio de Zavala [28] se realizaron una serie de ensayos a escala natural de los muros típicos a utilizarse en la vivienda final estudiada en esta parte. En la Figura 4.5 se muestra la curva de histéresis y la envolvente del comportamiento de uno de los muros ensayados en el CISMID en el año 2003 [28], donde se puede observar que el comportamiento del muro se ajusta al planteamiento mostrado anteriormente.

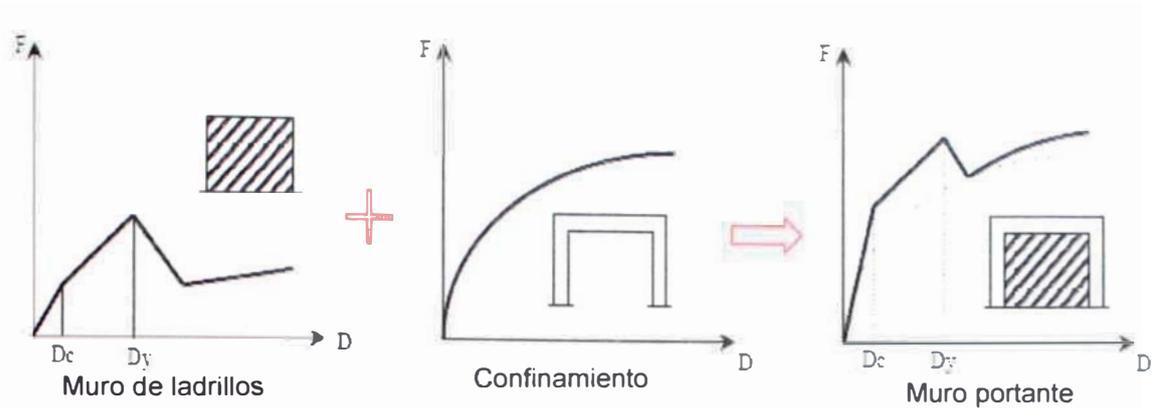


Figura 4.4 Comportamiento de los muros de mampostería confinada. [7]

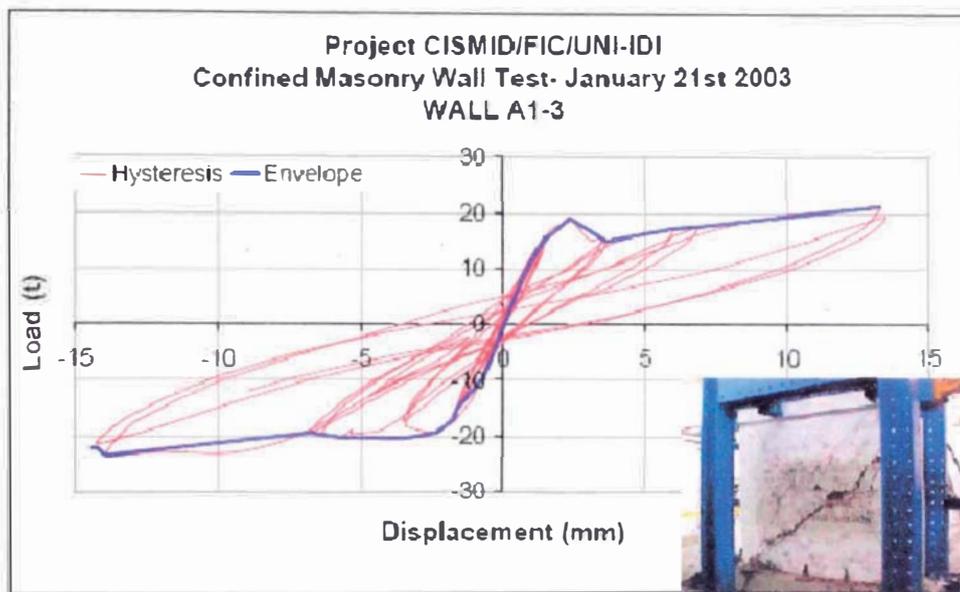


Figura 4.5 Comportamiento de un muro de mampostería confinada. [28]

El programa de computo STERA 3D codificado por Saito [23], es un programa de que permite realizar análisis estructural dinámico no lineal de estructuras tridimensionales. Este programa incluye modelos no lineales para la mampostería, los cuales consisten en modelar un muro de mampostería con resortes de corte en los cuales se concentran las propiedades del material. En este modelo se considera la mampostería como un panel de ladrillos, sin incluir el confinamiento de concreto armado, por lo que es necesario modelar las vigas y columnas de confinamiento para cada muro portante. En la Figura 4.6 se puede observar el modelo para la mampostería empleado en el programa STERA 3D.

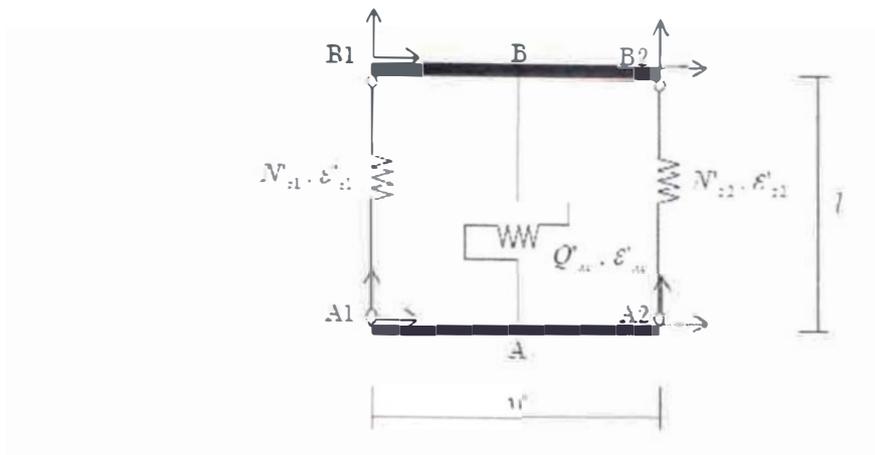


Figura 4.6 Modelo estructural de un muro de mampostería. [23]

Asimismo el programa concentra en el resorte a corte las características no lineales del panel de ladrillos, este modelo se puede apreciar en la Figura 4.7 donde el comportamiento de la mampostería es aproximada a un modelo trilineal.

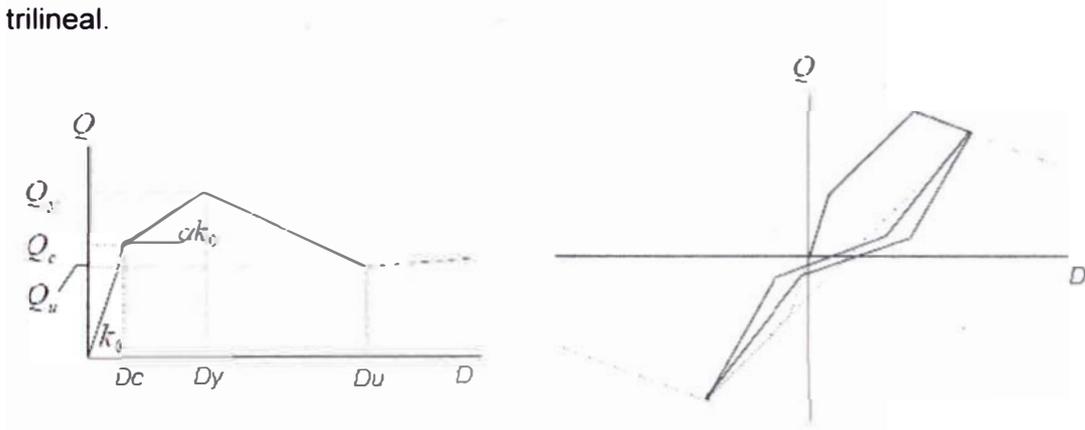


Figura 4.7 Modelo de histéresis para la mampostería usado en el STERA 3D. [23]

Chang [7] comparó la respuesta experimental de muros de mampostería confinada hechos con unidades artesanales, y el modelo empleado en el programa STERA 3D. En la Figura 4.8 se muestra la comparación de la curva de comportamiento no lineal experimental y la curva obtenida con el programa STERA 3D de un muro de mampostería confinada, donde se puede apreciar la buena aproximación de los modelos empleados y se puede decir que el programa nos brinda una buena aproximación para la mampostería.

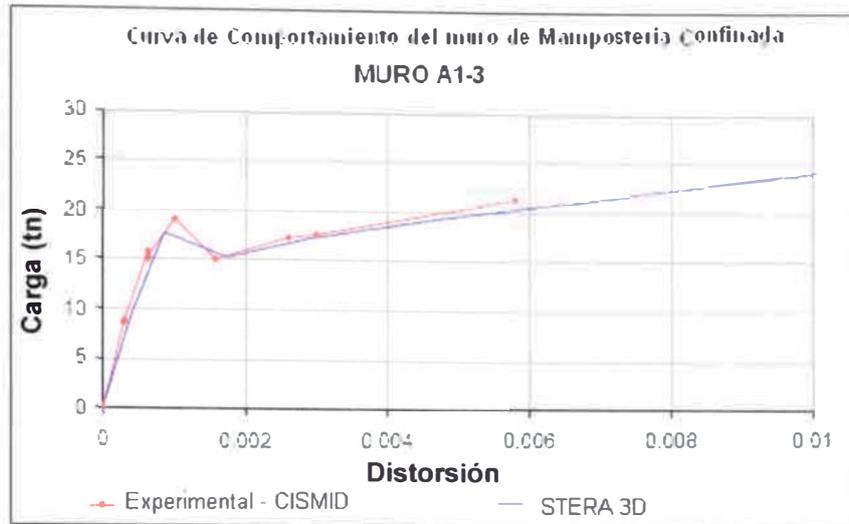


Figura 4.8 Comportamiento de un muro de mampostería. [7]

4.3.1 Curvas de capacidad de la estructura con base fija

Empleando el programa STERA 3D se realiza un análisis estático no lineal de la vivienda considerando que se encuentra con base fija. En el análisis se consideran todos los muros de mampostería y los dos pisos, aunque en este estudio se muestra solamente los resultados para la dirección Y porque los dispositivos se ubicaron en esa dirección. En la Figura 4.9 se muestra la ejecución de análisis no lineal en el programa STERA 3D.

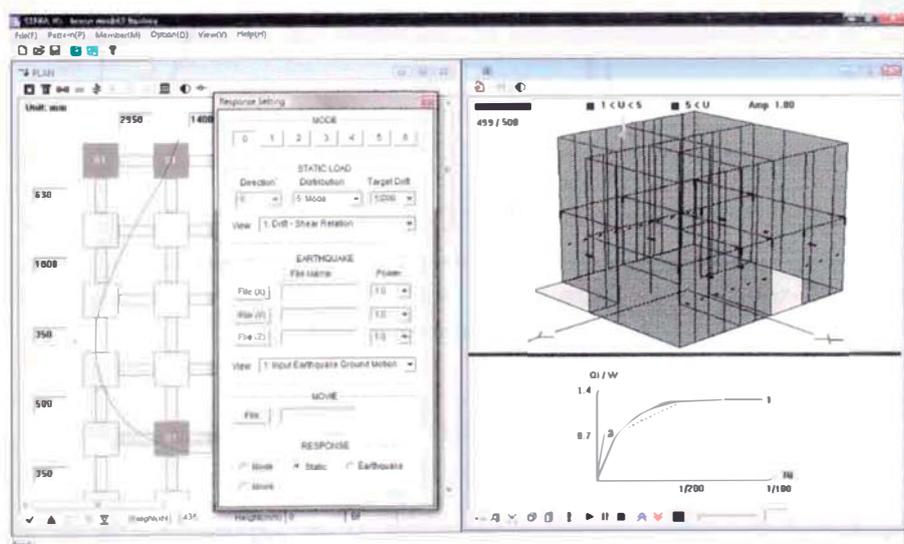


Figura 4.9 Análisis pushover de la vivienda en el programa STERA 3D.

Para realizar el análisis pushover se aplica un juego de desplazamientos en cada piso siguiendo la distribución de la primera forma de modo, donde los desplazamientos crecen monótonicamente hasta alcanzar la distorsión objetivo que es de 1/100 en el primer piso. Si bien es cierto el daño en estructuras de mampostería se concentra en el primer nivel, la distribución de cargas similar al primer modo nos brinda una buena aproximación para obtener la curva de capacidad.

En la Figura 4.10 se muestra la curva de capacidad para cada piso de la estructura en la dirección Y de análisis. Se puede notar claramente que el segundo piso se mantiene en el rango elástico (sin mayor daño), mientras que en el primer piso se concentra toda la distorsión y el daño en la estructura. Además se observa que el comportamiento en el primer piso se puede considerar como un modelo trilineal en donde la fuerza de fluencia es del orden de 144tn, la fuerza de agrietamiento es de 110tn, la distorsión de agrietamiento es del orden 0.0014, la distorsión de fluencia es 0.0035, y la fuerza última es de 118tn.

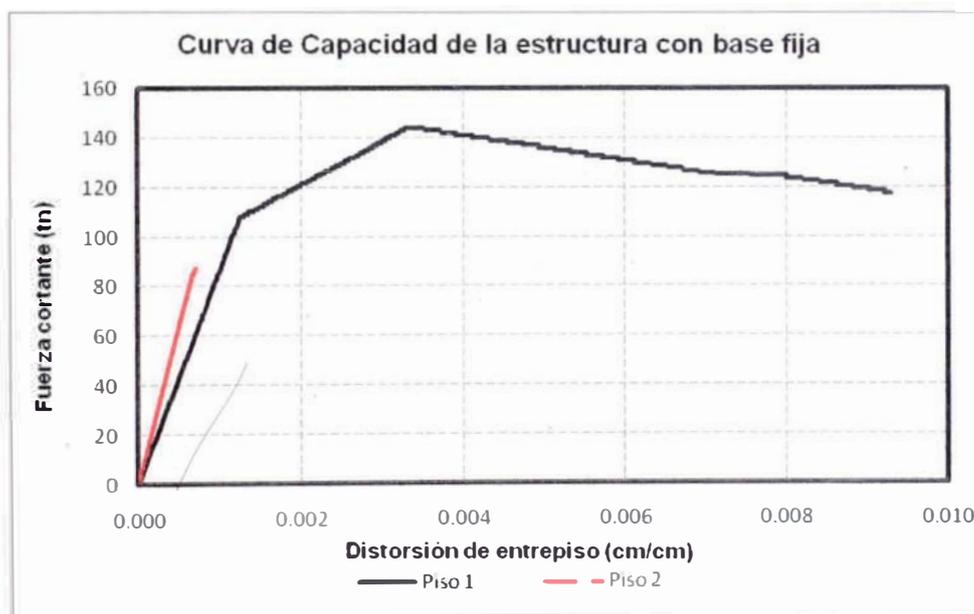


Figura 4.10 Curva de capacidad de la estructura con base fija.

Basados en la información de la curva de comportamiento de la estructura en cada piso, se puede conocer el desempeño de la estructura con base fija ante sismos utilizando métodos sencillos. Uno de los métodos más usados es el del

Espectro de Capacidad el cual consiste en determinar la respuesta de un sistema de 1GDL equivalente a la estructura analizada, utilizando las curvas de comportamiento [20]. Entonces la estructura queda reducida a un sistema de 1GDL el cual puede ser fácilmente analizado por cualquier método y así determinar la respuesta representativa, luego se retorna a las curvas de capacidad y se determina el nivel de daño y desplazamiento en cada nivel. [31]

Existen muchos métodos para la obtención de un sistema equivalente, en el presente estudio se emplea el método propuesto por Kuramoto [14]. Este método solamente toma en cuenta la influencia de la primera forma de modo de la estructura, lo cual es una buena aproximación en estructuras de mampostería, y reduce el sistema combinando la forma modal, el desplazamiento en cada piso obtenido del análisis pushover, las fuerzas inerciales aplicadas en cada paso del análisis pushover y las masas de la estructura. Las expresiones 4.4-1 y 4.4-2 presentadas por Kuramoto [14] son un resumen del método.

$$S_a^z = \frac{\sum_{i=1}^n m_i (\delta_i^z)^2}{\left(\sum_{i=1}^n m_i \delta_i^z \right)^2} Q_b^z \quad \dots(4.4-1)$$

$$S_d^z = \frac{\sum_{i=1}^n m_i (\delta_i^z)^2}{\left(\sum_{i=1}^n P_i^z \delta_i^z \right)^2} S_a^z \quad \dots(4.4-2)$$

Donde:

S_a^z : Aceleración espectral para el ciclo de carga z.

S_d^z : Desplazamiento espectral para el ciclo de carga z.

m_i : Masa concentrada del piso i .

n : Número de pisos.

δ_i^z : Desplazamiento lateral en el piso i en el ciclo de carga z (Del pushover).

P_i^z : Fuerza lateral aplicada en el piso i en el ciclo de carga z (Del pushover).

Q_b^z : Cortante en la base para el ciclo de carga z.

Estas expresiones representan que cada punto de las curvas de capacidad se convierte en un punto del Espectro de Capacidad. Empleando las expresiones 4.4-1 y 4.4-2 se obtiene entonces el Espectro de Capacidad de la estructura, la cual se muestra en la Figura 4.11.

Como era de esperarse el comportamiento del sistema equivalente es parecido al comportamiento del primer piso de la vivienda. Esto confirma el hecho de que el comportamiento de la estructura esta dominado por lo que sucede en el primer piso.

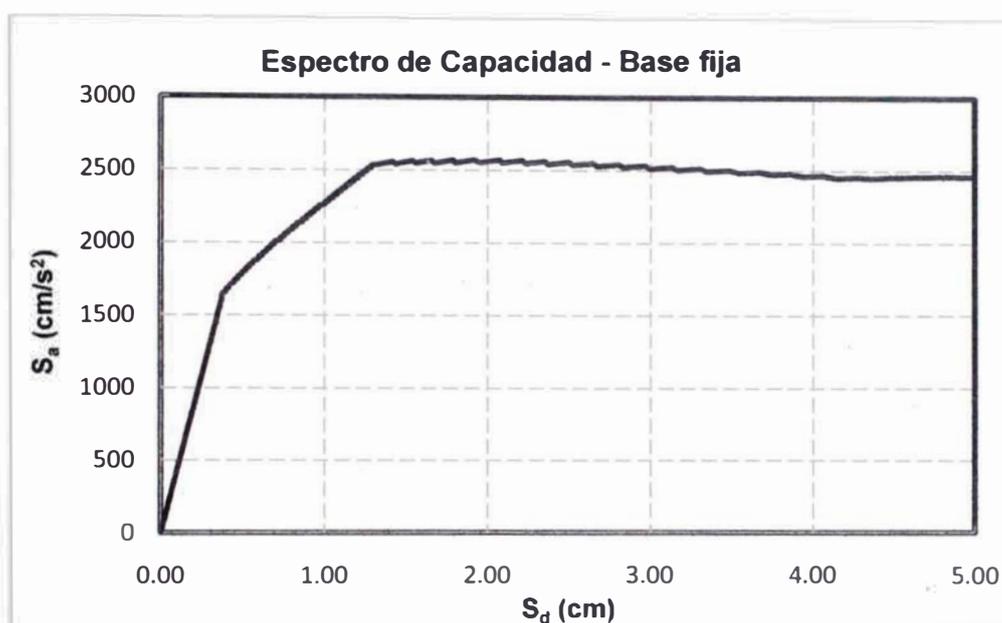


Figura 4.11 Espectro de Capacidad de la estructura con base fija.

4.3.2 Análisis dinámico de la estructura con base fija

Para poder utilizar el Espectro de Capacidad de la Figura 4.11 en un análisis dinámico es necesario transformar esta curva en una de fuerza versus desplazamiento, la cual corresponde al sistema equivalente de un grado de libertad (1GDL). Para lograr esta conversión es necesario multiplicar los valores de S_a por la masa del sistema en el rango elástico \bar{M}_{el} , donde esta masa es aquella que se usa en el análisis pushover pero en el rango elástico. La masa \bar{M} , del sistema en cada paso de cargas del análisis pushover se obtienen mediante

la expresión 4.4-3 y esta varía debido a la influencia de la no linealidad en la estructura como se puede apreciar en la Figura 4.12. [14]

$$\bar{M}^z = \frac{\left(\sum_{i=1}^n m_i \delta_i^z \right)^2}{\sum_{i=1}^n m_i (\delta_i^z)^2} \quad \dots(4.4-1)$$

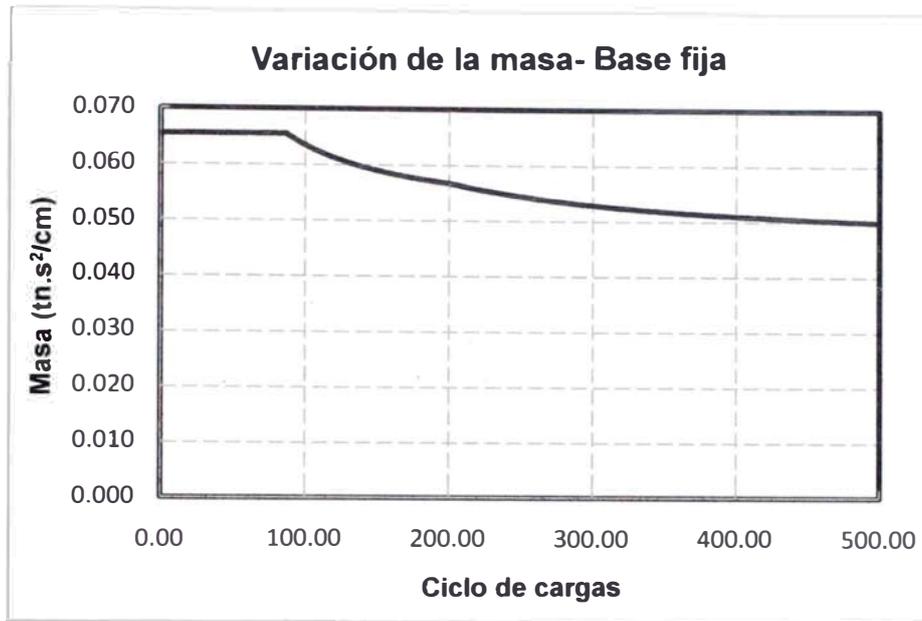


Figura 4.12 Variación de la masa durante el análisis pushover. [14]

Se toma el valor de \bar{M} que es constante y que corresponde a la parte elástica para poder obtener el sistema de 1GDL equivalente. Entonces se multiplican los valores de S_a del Espectro de Capacidad y se obtiene la curva de fuerza versus desplazamiento para el sistema de 1GDL equivalente como se muestra en la Figura 4.13 donde la masa corresponde al valor elástico \bar{M} .

Asimismo se realiza un ajuste de la curva del sistema de 1GDL para obtener un modelo trilineal del comportamiento de la estructura. Como se observa en la Figura 4.13 la aproximación es muy buena, por lo que este modelo servirá para realizar el análisis dinámico sin mayor inconveniente. En la Tabla 4.11 se presentan los valores más importantes del modelo trilineal del sistema equivalente de 1GDL.

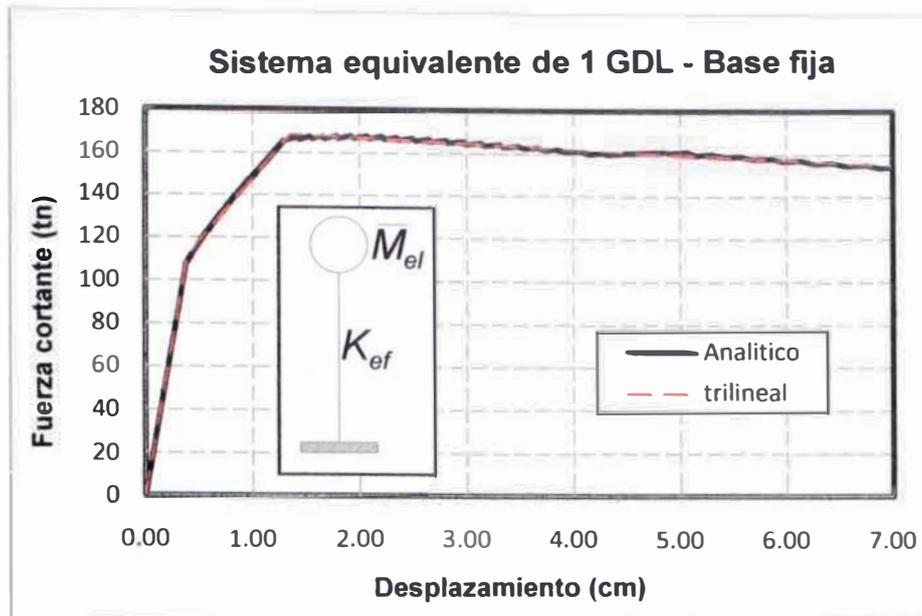


Figura 4.13 Sistema de 1GDL equivalente de la estructura con base fija.

Tabla 4.11 Parámetros principales del modelo trilineal del sistema 1GDL.

Dc (cm)	0.39
Dy (cm)	1.35
Qc (tn)	110.97
Qy (tn)	168.37
K1 (tn/cm)	284.20
K2/K1	0.21
K3/K1	-0.01

Una vez definidas las propiedades del sistema equivalente se procede a realizar el análisis tiempo historia, para lo cual se somete al sistema a distintos registros sísmicos para determinar la respuesta de la estructura con base fija. Los registros sísmicos utilizados corresponden a los distintos eventos sísmicos sucedidos en la ciudad de Lima en el siglo pasado, registrados en distintos tipos de suelos. Cada uno de estos registros fue escalado de tal manera que la estructura incurriera en el rango inelástico. En la Tabla 4.12 se muestran los registros sísmicos utilizados en el análisis dinámico y en la Figura 4.14 se muestran los espectros de respuesta de cada sismo usado.

Tabla 4.12 Catalogo de los registros sísmicos empleados en el análisis dinámico.

COD	FECHA	DENOMINACION	COMPONENTE	DATA	PGA	SUELO	ESCALA
1	31-may-70	SISMO LIMA- PQR 1970 - EO	HORZ. EO	9033	-104.82	Grava gruesa	4
2	31-may-70	SISMO LIMA-PQR 1970 - NS	HORZ. NS	9033	-97.75	Grava gruesa	4
3	31-ene-51	LIMA-ESTACION PQR	HORZ. EO	5913	-60.44	Grava gruesa	4
4	31-ene-51	LIMA-ESTACION PQR	HORZ. NS	5913	-45.47	Grava gruesa	4
5	17-oct-66	LIMA-ESTACION PQR	HORZ. EO	13129	-180.59	Grava gruesa	3
6	17-oct-66	LIMA-ESTACION PQR	HORZ. NS	13129	-269.34	Grava gruesa	3
7	29-oct-71	LIMA-ESTACION PQR	HORZ. EO	8033	53.55	Grava gruesa	4
8	29-oct-71	LIMA-ESTACION PQR	HORZ. NS	8033	86.54	Grava gruesa	4
9	3-oct-74	LIMA-ESTACION PQR	HORZ. EO	4899	-192.49	Grava gruesa	3
10	3-oct-74	LIMA-ESTACION PQR	HORZ. NS	4899	178.95	Grava gruesa	3
11	3-oct-74	LIMA-ESTACION SURCO	HORZ. EO	19513	192.35	Sedimento Aluvional	3
12	3-oct-74	LIMA-ESTACION SURCO	HORZ. NS	19513	-207.12	Sedimento Aluvional	3
13	9-nov-74	LIMA-ESTACION PQR	HORZ. EO	2392	46.21	Grava gruesa	4
14	9-nov-74	LIMA-ESTACION PQR	HORZ. NS	2392	-69.21	Grava gruesa	4
15	9-nov-74	LIMA-ESTACION LA MOLINA	HORZ. EO	1972	-116.79	Arcilla	4
16	9-nov-74	LIMA-ESTACION LA MOLINA	HORZ. NS	1972	-93.71	Arcilla	4

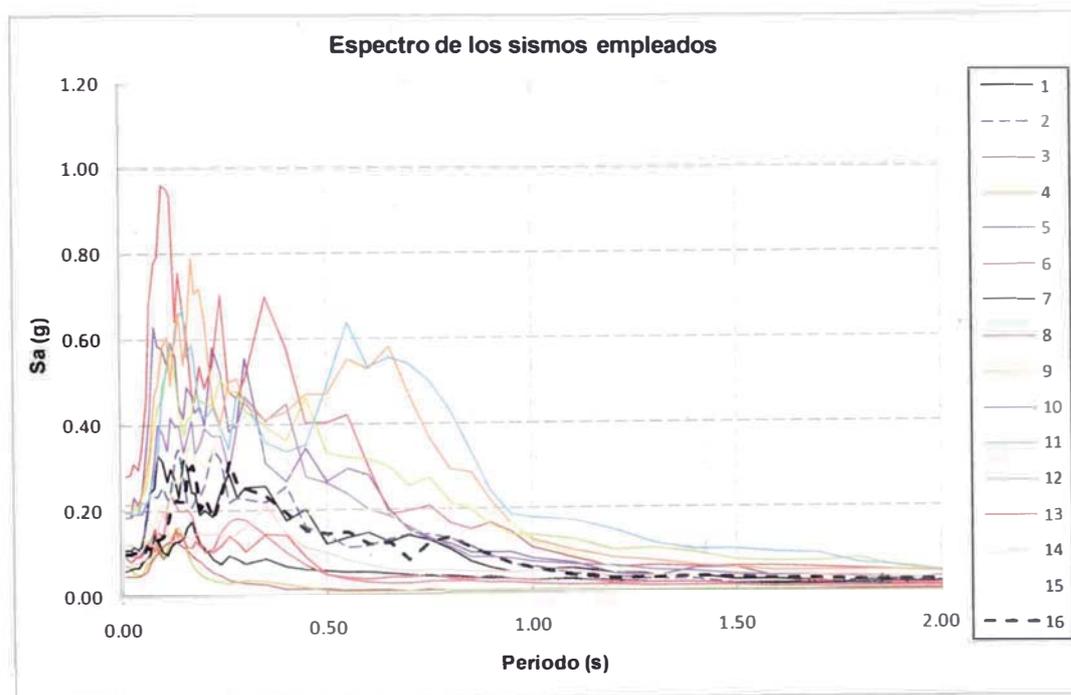


Figura 4.14 Espectro de respuesta de los sismos empleados.

Se realiza el análisis dinámico tiempo historia para el sistema de 1GDL empleando para ello el programa de computo NONLIN, y utilizando las características adecuadas para la mampostería. Los registros sísmicos son aplicados al sistema y se obtiene una respuesta máxima (en valor absoluto) para cada registro. Con esta respuesta máxima de desplazamiento se vuelve al

Espectro de Capacidad de la estructura y se localiza el ciclo de carga con el valor de desplazamiento más cercano, para finalmente ubicar este ciclo en las curvas de capacidad de cada piso de la estructura y leer los valores de carga y desplazamiento. En la Tabla 4.13 se muestran los valores máximos de respuesta de la estructura con base fija sometida a cada registro sísmico.

Tabla 4.13 Respuesta máxima de la estructura con base fija para cada registro sísmico.

COD	1 GDL		PISO 1		PISO 2	
	Def. (cm)	Fuerza (tn)	Def. (cm)	Corte (tn)	Def. (cm)	Corte (tn)
1	0.244	70.50	0.206	69.44	0.080	40.28
2	0.243	68.91	0.210	70.67	0.081	41.09
3	0.150	42.66	0.129	43.44	0.050	25.19
4	0.136	39.76	0.118	39.67	0.045	23.05
5	0.373	105.95	0.316	107.07	0.122	61.90
6	0.615	120.19	0.466	117.27	0.136	68.63
7	0.099	28.54	0.085	28.55	0.033	16.52
8	0.183	52.38	0.155	52.11	0.060	30.29
9	0.274	77.66	0.232	78.11	0.090	45.38
10	0.292	80.84	0.247	83.11	0.095	48.23
11	0.290	82.10	0.250	84.33	0.097	48.95
12	0.353	100.28	0.298	100.44	0.115	58.33
13	0.098	27.78	0.081	27.33	0.031	15.81
14	0.156	44.23	0.132	44.66	0.051	25.90
15	0.198	56.29	0.166	55.78	0.064	32.43
16	0.114	32.42	0.096	32.22	0.037	18.76

Se puede observar que la estructura sufre deformaciones considerables llegando a alcanzar un valor de 0.466cm en el primer piso que corresponde a una distorsión de 0.002, y a una fuerza cortante de 117.27tn en el primer piso. Estos valores corresponden a la respuesta ante el sismo 6 (Lima 1966-estación PQR-Dir NS). En la Figura 4.15 se muestran los desplazamientos de la estructura producto de los registros sísmico, donde se puede apreciar claramente que las deformaciones se concentran en el primer piso.

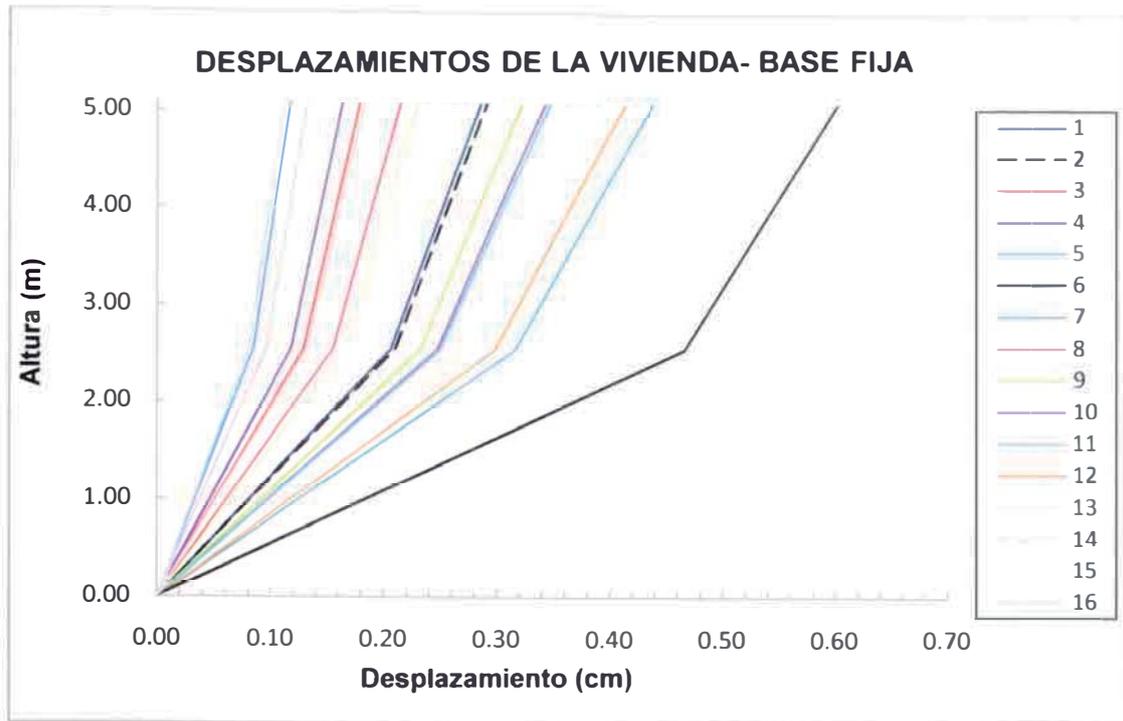


Figura 4.15 Desplazamientos de la estructura con base fija para cada sismo.

4.3.3 Análisis dinámico de la estructura con base aislada

Se procede ahora a calcular la respuesta de la estructura con base aislada para lo cual se utiliza el sistema equivalente de 1GDL usado anteriormente, con la diferencia que ahora el sistema equivalente es aislado en la base. El sistema de aislamiento utilizado, descrito anteriormente, es el equivalente de todos los dispositivos. Entonces el dispositivo de aislamiento usado en el análisis tiene propiedades equivalentes a todos los dispositivos usados en el sistema de aislamiento real. En la Figura 4.16 se muestra el esquema de cálculo de la respuesta de estructuras aisladas usando en el programa NONLIN, donde se usa las propiedades equivalentes para la estructura y para el sistema de aislamiento.

Se determina entonces la respuesta de la estructura con base aislada empleando el sistema propuesto y sometido a los mismos registros sísmicos usados anteriormente. En la Tabla 4.14 se muestra la respuesta de la estructura aislada sometida a los registros sísmicos utilizados anteriormente mostrados en Tabla 4.12.

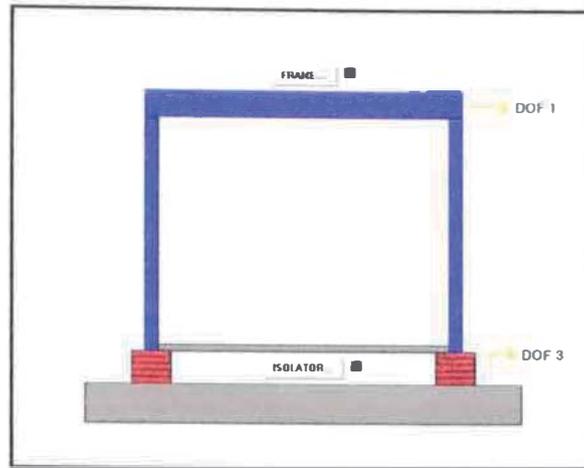


Figura 4.16 Análisis del sistema de 1GDL con base aislada.

Tabla 4.14 Respuesta máxima de la estructura aislada para cada registro sísmico.

COD	1 GDL		BASE		PISO 1		PISO 2	
	Def. (cm)	Fuerza (tn)	Des. (cm)	Corte (tn)	Def. (cm)	Corte (tn)	Def. (cm)	Corte (tn)
1	0.124	44.57	0.439	39.86	0.107	36.00	0.041	20.90
2	0.114	39.78	0.259	37.25	0.099	33.45	0.038	19.48
3	0.119	37.90	0.272	37.62	0.099	33.45	0.038	19.48
4	0.111	40.75	0.173	36.15	0.092	31.00	0.036	18.05
5	0.122	50.50	0.780	44.41	0.103	34.77	0.040	20.19
6	0.130	60.15	0.818	44.92	0.110	37.22	0.043	21.62
7	0.100	28.38	0.093	35.22	0.085	28.55	0.033	16.52
8	0.117	44.03	0.485	40.19	0.099	33.45	0.038	19.48
9	0.109	52.03	1.095	48.64	0.092	31.00	0.036	18.05
10	0.117	45.12	0.290	37.77	0.099	33.45	0.038	19.48
11	0.074	54.09	0.980	43.11	0.063	21.11	0.024	12.24
12	0.135	56.54	0.881	42.18	0.114	38.44	0.044	22.33
13	0.101	29.81	0.091	76.89	0.085	28.55	0.033	16.52
14	0.088	25.24	0.032	32.56	0.074	24.78	0.028	14.38
15	0.121	41.63	0.250	36.60	0.103	34.77	0.040	20.19
16	0.116	36.34	0.252	36.61	0.099	33.45	0.038	19.48

Se puede observar que la deformación en la estructura, tanto en el primer piso como en el segundo, se reduce para la mayoría de los sismos utilizados. Sin embargo el desplazamiento en el nivel de aislamiento es mucho mayor. Este hecho demuestra que el sistema de aislamiento es el que soporta gran parte de

la demanda sísmica, por lo que es en la base donde se concentran los desplazamientos mientras que en la estructura no se producen mayores deformaciones asemejándose al comportamiento de un cuerpo rígido. En la Figura 4.17 se muestran los desplazamientos de la estructura con base aislada para cada registro sísmico utilizado, donde claramente se puede apreciar el comportamiento de cuerpo rígido de la estructura aislada ya que es en el nivel de aislamiento donde se tienen los mayores desplazamientos.

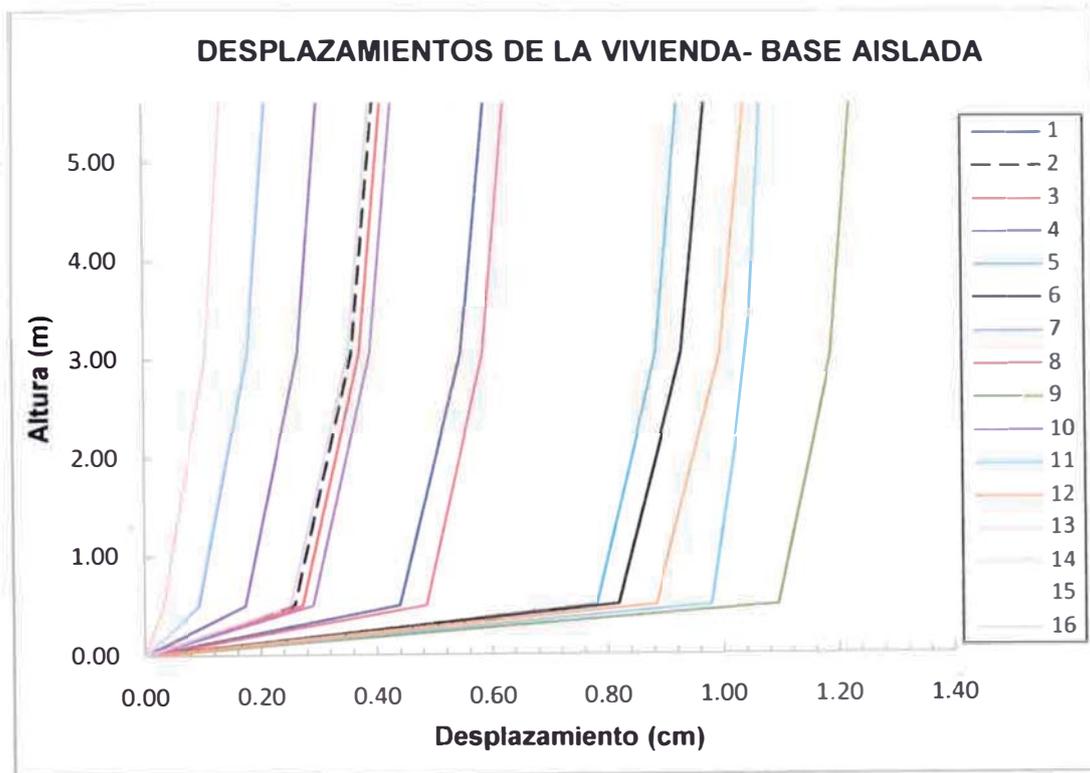


Figura 4.17 Desplazamientos de la estructura con base aislada.

El desplazamiento en la base varía para cada sismo utilizado, siendo estos desplazamientos los máximos alcanzados durante el evento sísmico. En la mayoría de los casos existe un desplazamiento remanente al final del evento sísmico, esto es la variación de la posición original y que en la mayoría de casos es menor al máximo alcanzado. En este caso el desplazamiento en la base máximo sucede con el sismo 9, que corresponde al sismo del 3 de Octubre de 1974 en la dirección Este-Oeste registrado en el Parque de la Reserva. El desplazamiento máximo en la base fue de aproximadamente 1.10cm para el sismo 9.

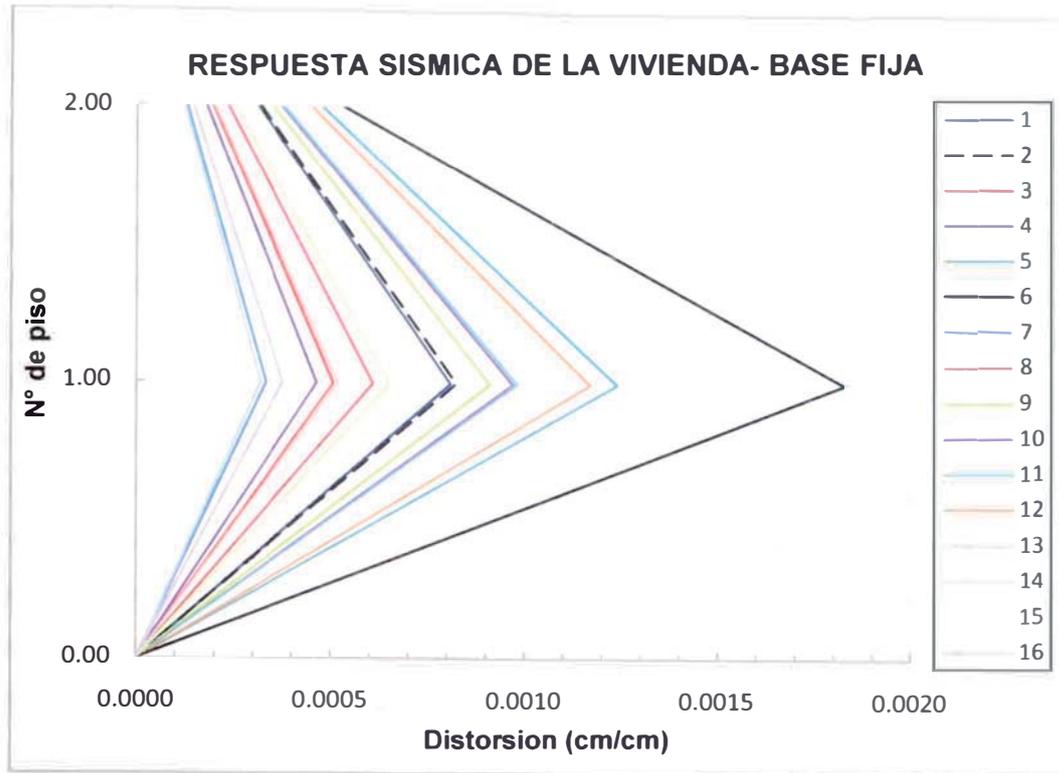


Figura 4.18 Distorsiones de entrepiso en la estructura con base fija.

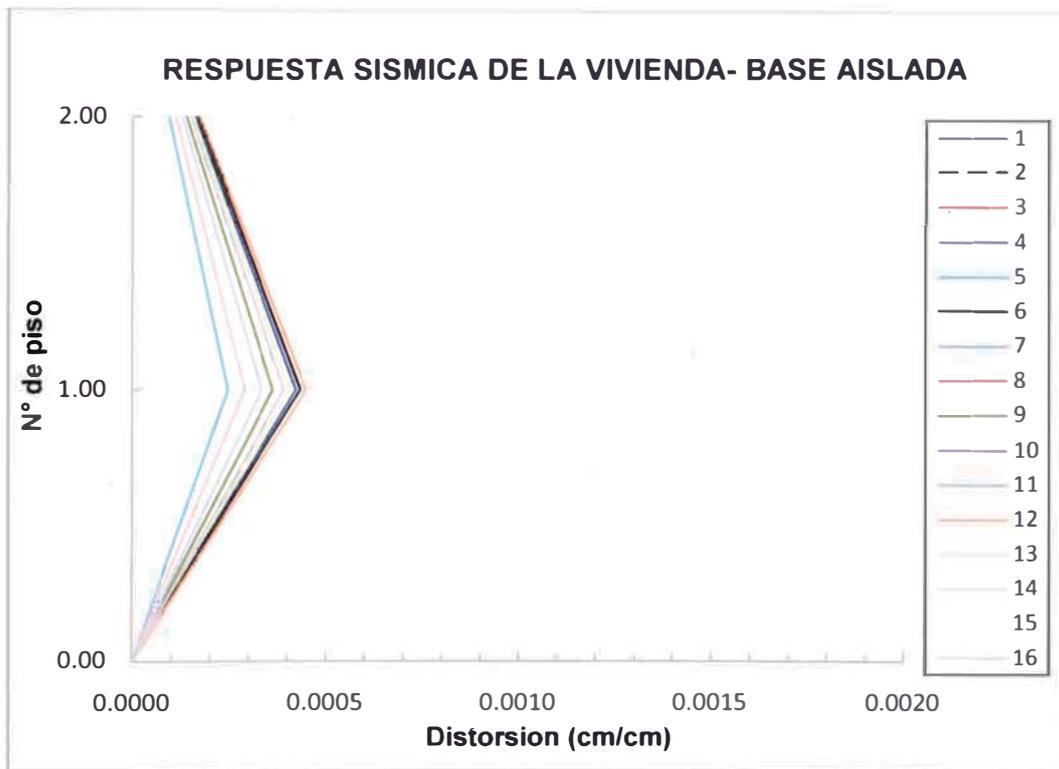


Figura 4.19 Distorsiones de entrepiso de la estructura aislada.

Para tener una buena apreciación de lo que le sucede cuando se aísla la vivienda, se comparan las distorsiones en la estructura con base fija y con base aislada. En la Figura 4.18 y la Figura 4.19 se pueden apreciar las distorsiones de entrepiso para la estructura con base fija y base aislada, en estas figuras se aprecia claramente la reducción de la respuesta gracias al sistema de aislamiento.

Para la estructura con base fija se obtiene la mayor distorsión con el sismo 6 (Lima 1966 PQR-NS), con el cual se obtuvo una distorsión de entrepiso máxima del orden de 0.0018. Sin embargo la estructura aislada tuvo una respuesta mucho menor para el mismo sismo, llegando a una distorsión de entrepiso del orden de 0.0004. En la Figura 4.20 se muestra la comparación de las distorsiones de entrepiso producto del sismo 6, donde se nota el nivel de la reducción en la respuesta de la estructura gracias al sistema de aislamiento.

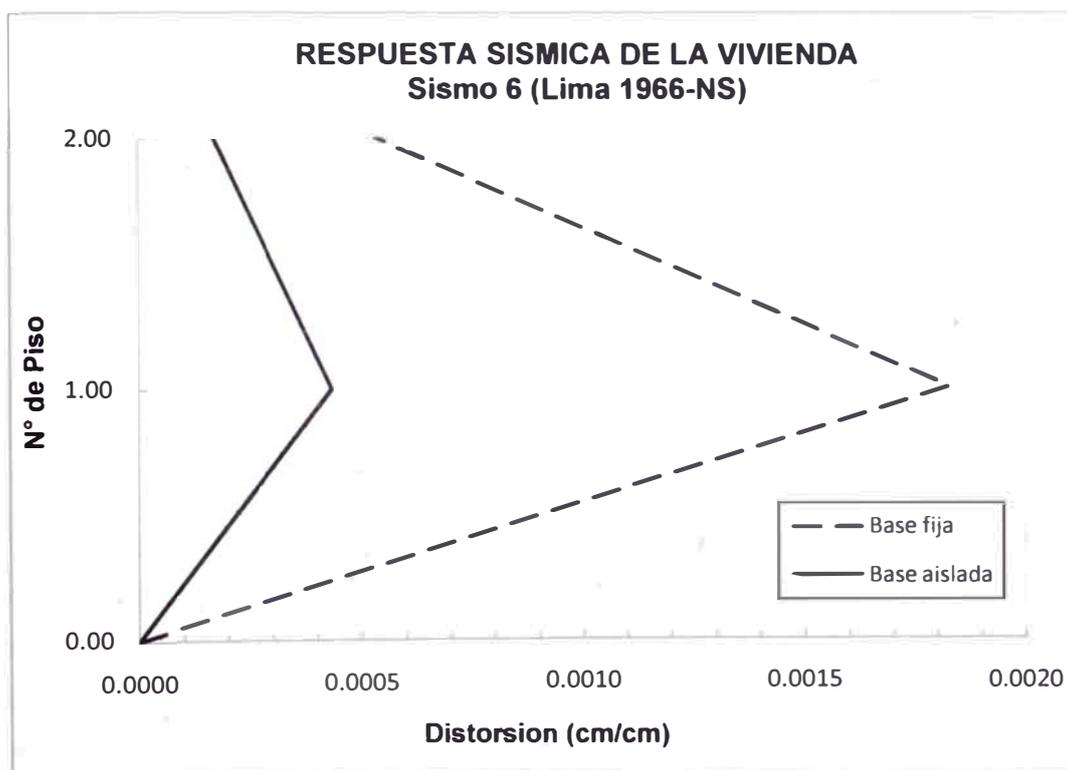


Figura 4.20 Comparación de las distorsiones para el sismo 6.

En la Tabla 4.15 se muestra el porcentaje de reducción de la respuesta en la estructura aislada para cada sismo empleado, donde los valores negativos indican el incremento de la respuesta. De la tabla se puede notar que en la

mayoría de casos la reducción de la respuesta es muy buena, sin embargo para ciertos sismos empleados la reducción en la respuesta es pequeña incluso incrementando la respuesta.

Tabla 4.15 Reducción de la respuesta sísmica de la estructura por el uso de aisladores.

SISMO	PISO 1 (%)	PISO 2 (%)
1	48.06	48.18
2	52.71	52.72
3	23.02	22.94
4	22.03	21.81
5	67.41	67.38
6	76.39	68.68
7	0.00	0.00
8	35.94	35.74
9	60.34	60.34
10	59.80	59.77
11	75.00	75.05
12	61.74	61.74
13	-4.57	-4.81
14	44.24	44.42
15	37.95	37.72
16	-3.76	-3.79

Para el sismo 16 la respuesta de la estructura aislada se incrementa, al igual que en el caso del sismo 13, mientras que con el Sismo 7 la respuesta de la estructura aislada no se reduce. Esto depende en gran medida del contenido de periodos del registro, ya que como se mencionó anteriormente el aislamiento sísmico no es muy efectivo en suelos blandos como en el caso del sismo 16.

En la Figura 4.14 se muestran los espectros de algunos de los sismos utilizados en el análisis. En la figura se puede ver que para los sismo 6 y 11 el pico principal de respuesta se encuentra para estructuras con bajo periodo, mientras que la respuesta disminuye para periodos que varían entre 0.50s y 1.00s. Por

esta razón el aislamiento sísmico es efectivo en estos sismo ya que la estructura pasa de un periodo bajo a un periodo que corresponde a la zona de menor demanda sísmica.

Por otro lado para los sismos 16, 13 y 7 se tienen una menor respuesta para periodos bajos, mientras que para los periodos que varían de 0.1s a 1s la respuesta se incrementa. Por esta razón el sistema de aislamiento no reduce la respuesta en estos casos, e incluso llega a deformar más a la estructura.

Es importante entonces comentar que el sistema de aislamiento propuesto es capaz de reducir la respuesta de la estructura de mampostería empleada como modelo. El sistema propuesto funcionó mejor para sismos en suelo rígido, y con periodos predominantes bajos.

CAPÍTULO 5 ESTUDIO PARAMÉTRICO DE LA RESPUESTA DE ESTRUCTURAS AISLADAS

En el presente capítulo se estudia la variación de la respuesta de estructuras aisladas sísmicamente con el sistema propuesto. Asimismo se estudian qué parámetros son los más influyentes en la respuesta sísmica de estructuras aisladas, valiéndose para ello de modelos lineales de 1GDL para las estructuras y reglas simples para representar el comportamiento del aislamiento.

5.1 Planteamiento del problema

Se tiene una estructura de 1GDL con una masa concentrada y una rigidez elástica constante, la cual es aislada sísmicamente como se aprecia en la Figura 5.1. El modelo estructural consiste en considerar un grado de libertad adicional para la base de la estructura y modelar el aislamiento propuesto por medio de una fuerza de rozamiento.

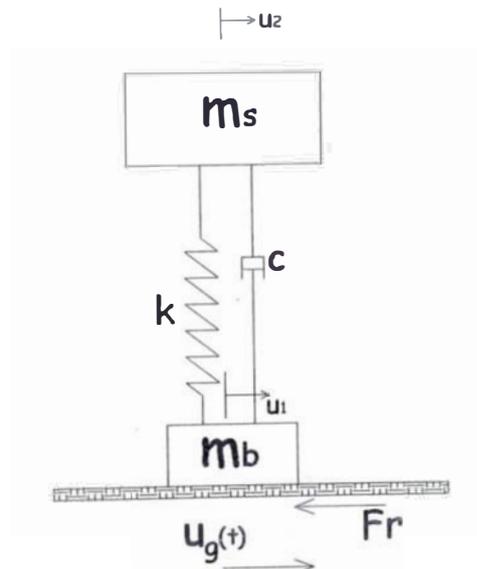


Figura 5.1 Modelo de 1GDL de una estructura aislada por fricción.

Las ecuaciones diferenciales del equilibrio del sistema (en desplazamientos totales) están dadas por:

$$\begin{aligned} m_b \ddot{u}_b + c(\dot{u}_b - \dot{u}_s) + k(u_b - u_s) &= Fr \\ m_s \ddot{u}_s + c(\dot{u}_s - \dot{u}_b) + k(u_s - u_b) &= 0 \end{aligned} \quad \dots (5.1-1)$$

La forma Matricial de la ecuación 5.1-1 está dada por

$$\begin{bmatrix} m_b & 0 \\ 0 & m_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{u}_b \\ \ddot{u}_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c & -c \\ -c & c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u}_b \\ \dot{u}_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k & -k \\ -k & k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_b \\ u_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Fr \\ 0 \end{bmatrix} \quad \dots (5.1-2)$$

Donde:

- Fr : Fuerza de rozamiento seco (amortiguamiento de Coulomb).
- m_b : Masa de la base o diafragma de los aisladores.
- m_s : Masa de la superestructura.
- k : Rigidez lateral de la superestructura
- c : Amortiguamiento viscoso del material
- u_b : Desplazamiento absoluto de la base.
- u_s : Desplazamiento absoluto de la estructura.
- u_g : Desplazamiento del terreno.
- W : Peso total sobre los aisladores.

Se considera para este análisis que la fuerza Fr está en función del peso que soporta el dispositivo y de la velocidad del movimiento de la base respecto de la velocidad del movimiento del terreno.

$$Fr = f(\mu, \dot{u}_b, \dot{u}_g) \quad \dots (5.1-3)$$

Donde el módulo de la fuerza Fr_0 esta dada por la siguiente expresión

$$Fr_0 = \mu W \quad \dots (5.1-4)$$

Se considera además que el sentido de aplicación de la fuerza de rozamiento depende de la velocidad de la base respecto a la velocidad del terreno, por lo que la fuerza de rozamiento queda expresada por

$$Fr = \pm Fr_0 \quad \dots (5.1-5)$$

Donde el signo de la fuerza está definido por la siguiente condición

$$\begin{aligned} \dot{u}_g > \dot{u}_b &\Rightarrow Fr = +Fr_0 \\ \dot{u}_g < \dot{u}_b &\Rightarrow Fr = -Fr_0 \\ \dot{u}_g = \dot{u}_b &\Rightarrow Fr = 0 \end{aligned} \quad \dots (5.1-6)$$

De las ecuaciones diferenciales mostradas anteriormente se observa que las matrices están acopladas, y la fuerza de rozamiento es dependiente de las velocidades, lo cual no permitiría realizar un análisis modal de las ecuaciones diferenciales. Por esta razón se propone resolver las ecuaciones integrándolas en el tiempo y realizando un análisis tiempo historia. Con lo que se puede analizar la influencia de la fuerza de rozamiento en el sistema.

5.2 Respuesta de la estructura ante movimientos en la base

Para esta parte del análisis se considera una aceleración en el suelo que varía en forma sinusoidal con el tiempo según la expresión 5.1-7, donde:

- Ω : Frecuencia del movimiento en la base.
- \ddot{u}_{g0} : Amplitud de la aceleración del terreno.
- \ddot{u}_g : Aceleración del terreno.
- t : Tiempo

$$u_g = u_{g0} \text{sen}(\Omega t) \quad \dots (5.1-7)$$

Para poder conocer la respuesta de la estructura en el tiempo, se integran las ecuaciones diferenciales en el tiempo empleando para ello el método de integración numérica de las diferencias centrales [8]. Entonces para un instante de tiempo "i", se tiene que

$$\begin{aligned} \dot{u}_{i+1} &\approx \dot{u}_{i+1/2} = \dot{u}_{i-1/2} + \ddot{u}_i \Delta t \\ u_{i+1} &= u_i + \dot{u}_{i+1/2} \Delta t \end{aligned} \quad \dots (5.1-8)$$

Para finalmente obtener la aceleración de la base y de la estructura en el siguiente paso con las expresiones siguientes

$$u_{b,i} = \frac{Fr_i - c(\dot{u}_{b,i-1/2} - \dot{u}_{s,i-1/2}) - k(u_{s,i} - u_{b,i})}{m_b}$$

$$u_{s,i} = \frac{-c(\dot{u}_{s,i-1/2} - \dot{u}_{b,i-1/2}) - k(u_{b,i} - u_{s,i})}{m_s} \dots (5.1-9)$$

El método de integración numerica es estable para un intervalo de tiempo lo suficiente mente pequeño que logre que el método converja a una solución aproximada. Diversos autores mencionan que el metodo tiene una buena aproximación si se toman intervalos de tiempo tal que $\Delta t \leq 0.1T_n$. [8]

Para tener una idea de la influencia del rozamiento en la respuesta de una estructura se estudia un caso en particular, del cual se tienen las siguientes características:

Periodo de la estructura	$T_s =$	0.103 s
Coeficiente de amortiguamiento	$\beta =$	0.05
Coeficiente de fricción	$\mu =$	0.5
Amplitud de la aceleración del suelo	$\ddot{u}_{go} =$	19.62 m/s²
Frecuencia del movimiento del suelo	$\Omega =$	10 Hz

Haciendo el análisis considerando el sistema inicialmente en reposo y un intervalo de tiempo para la integración de $\Delta t = 0.01$ obtenemos las siguientes respuestas con los valores máximos mostrados en la Tabla 5.1 donde se puede ver claramente que la estructura tiene una deformación pequeña mientras que la base se desplaza considerablemente.

De los valores se aprecia que las distorsiones en la estructura son bastante bajas y considerando una estructura de 2.50 metros de alto, el valor de la distorsión máxima de entre piso será de 0.0009. Este valor de distorsión de entrepiso nos hace ver que la estructura actúa como un cuerpo rígido encima del dispositivo de aislamiento y además la estructura se encuentra en el rango

elástico durante todo el movimiento del suelo. El valor de aceleración de la estructura también se mantiene bajo y si se considera la aceleración máxima del suelo dada inicialmente se tiene que la aceleración de la base ha sido reducida en un 58%, lo cual permitiría tener fuerzas sísmicas bajas y además proteger el contenido de la estructura.

Tabla 5.1 Valores máximos de respuesta de la estructura aislada.

	u_b (m)	u_s (m)	v_s (m/s)	a_s (m/s ²)	Def (m)	u_g (m)
Max	0.10	0.10	0.87	11.43	0.002	0.20
Min	-0.08	-0.08	-0.79	-11.41	-0.002	-0.20
Valores pico	0.10	0.10	0.87	11.43	0.002	0.20

Un punto que llama la atención negativamente respecto al aislamiento es que el valor del desplazamiento en la base es alto, siendo este valor lo que se va a desplazar el sistema a sus alrededores y es posible que se tengan problemas con las estructuras aledañas.

En la Figura 5.2 y la Figura 5.3 se muestran los desplazamientos en la base y la deformación en la estructura respectivamente. Se observa como la base es desviada de su posición original oscilando en un nuevo eje, lo que conllevaría a un desplazamiento final en la estructura. Asimismo la deformación de la estructura oscila en cada posición final de la base, es decir cada vez que la base alcanza su posición máxima la estructura se deforma con pequeñas oscilaciones. Este comportamiento permite que la estructura se mantenga en el rango elástico mientras el rozamiento disipa la energía del sistema.

Para comprobar cómo influye el rozamiento en la respuesta de la estructura se realiza una serie de análisis similares al anterior, de tal manera que se pueda observar la variación de la respuesta máxima. Manteniendo constante el factor de amortiguamiento y la amplitud de la aceleración en la base, se varían los valores de coeficiente de fricción así como la frecuencia de la aceleración en la base y los periodos de la estructura. Luego de realizar estos análisis se grafican las respuestas máximas obtenidas para cada tipo de sistema y de condiciones dando como resultado la Figura 5.4 y la Figura 5.5.

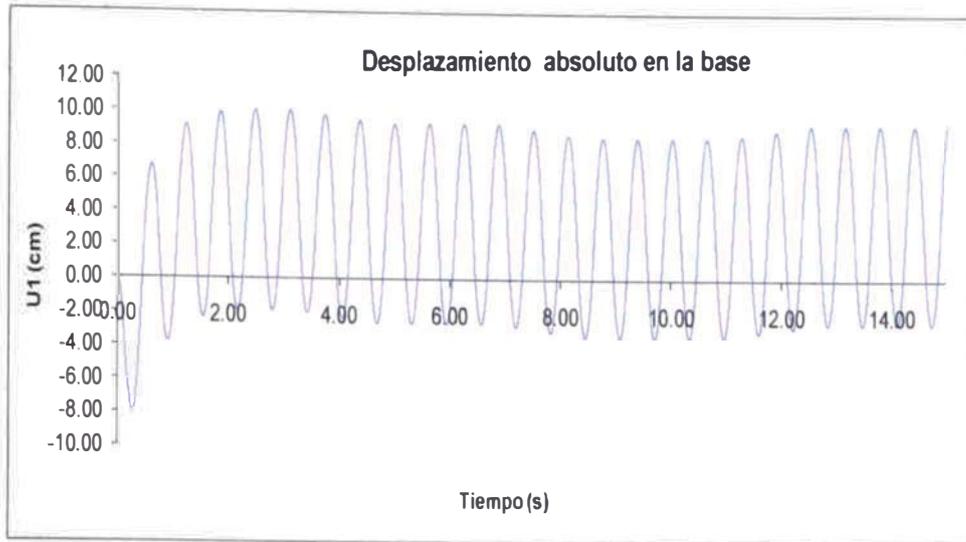


Figura 5.2 Desplazamiento en la base de la estructura ante un movimiento sinusoidal en la base.

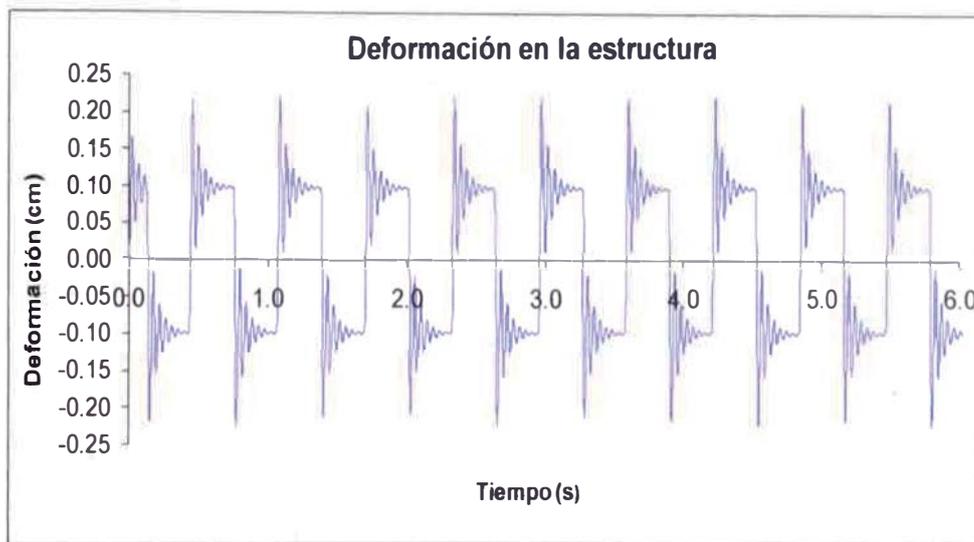


Figura 5.3 Deformación en la estructura aislada, sometida a un movimiento sinusoidal en la base.

De la Figura 5.4 y la Figura 5.5 se puede apreciar que el desacoplar la estructura de su base es favorable, ya que la amplificación de la aceleración en la estructura es menor. Además se puede apreciar que para sistemas rígidos la aceleración se amplifica mucho más que para el caso de los sistemas flexibles.

El coeficiente de fricción juega un rol importante en la respuesta de la estructura, ya que es este parámetro el que limita la fuerza que actúa en la estructura. De las graficas se observa que al reducir el coeficiente de fricción, se reduce

notablemente la respuesta en la estructura. Esto demuestra que la energía de entrada a la estructura se ve limitada solamente al valor de la fuerza de rozamiento, y es este valor el que controla la respuesta en el sistema aislado.

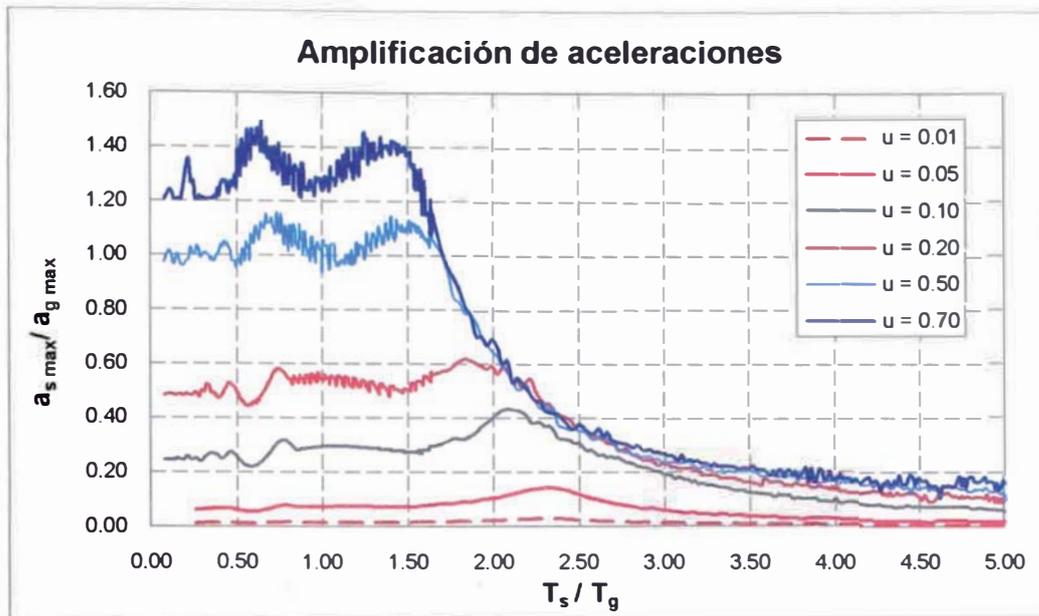


Figura 5.4 Amplificación de aceleraciones absolutas en la estructura aislada.

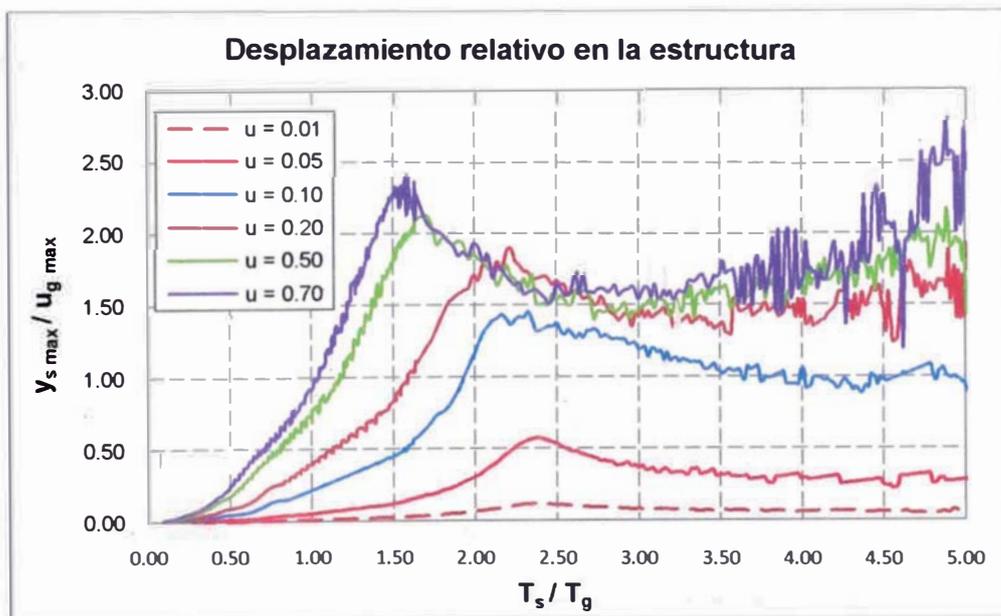


Figura 5.5 Desplazamiento relativo en la estructura aislada.

Para realizar una adecuada comparación y poder así determinar cuan efectivo resulta el aislamiento por fricción de la estructura; procedemos analizar con

métodos convencionales a la estructura con las mismas características pero con base fija y procedemos luego a obtener una grafica de los resultados obtenidos para diversos sistemas pero con el mismo factor de amortiguamiento de 5% usado anteriormente. Una vez realizado el análisis para la estructura con base fija procedemos a superponer esta grafica de respuesta junto con las graficas obtenidas para el sistema aislado, mostrándose en la Figura 5.6 la respuesta de estructuras aisladas junto con la respuesta de con base fija.

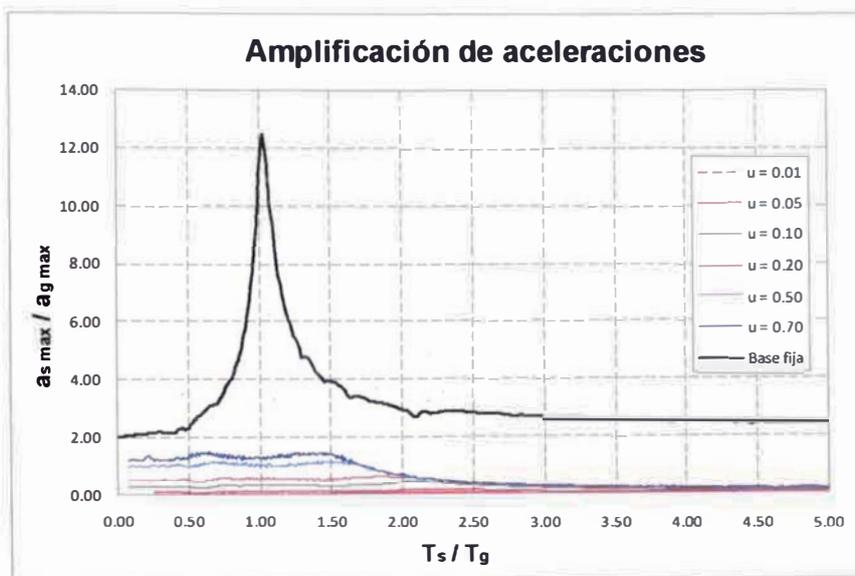


Figura 5.6 Comparación de la amplificación de la aceleración absoluta en estructuras aisladas y con base fija.

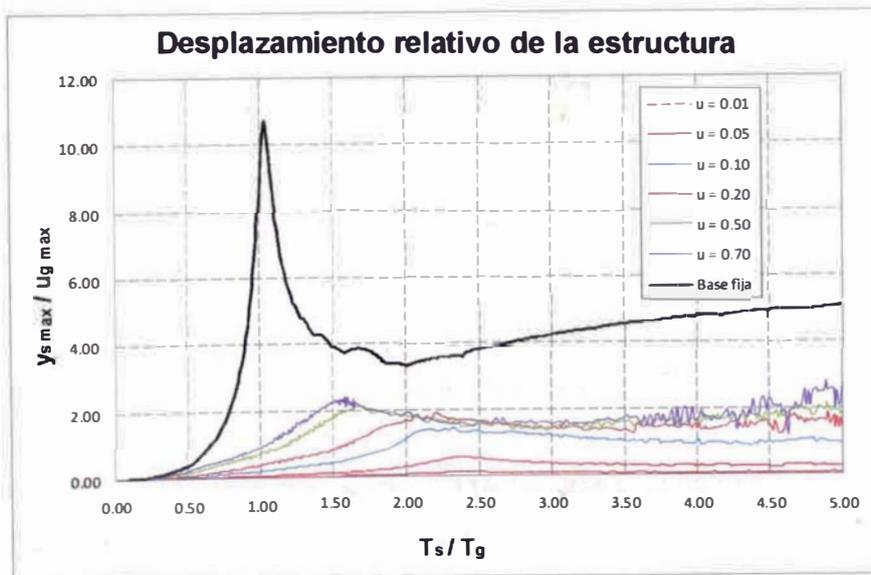


Figura 5.7 Comparación de desplazamientos relativos en estructuras aisladas y con base fija.

De la Figura 5.6 y la Figura 5.7 se puede notar que el sistema de aislamiento por fricción pura resulta eficaz. Este sistema reduce notablemente las amplificaciones en la aceleración de la estructura y además reduce las deformaciones de la estructura ante movimientos armónicos en la base. Se puede observar también que para la estructura con base fija se tiene un efecto de resonancia tanto en aceleración como en deformaciones cuando el periodo natural del sistema es igual al periodo de la excitación en la base, esta resonancia se ve reducida enormemente en las otras curvas con presencia del aislamiento, y en algunos casos el efecto de resonancia no es percibido.

Adicionalmente, las curvas tienden a desplazar sus picos hacia la derecha y a disminuir en amplitud; lo cual es producto de un aumento en el amortiguamiento del sistema como producto de la fuerza de rozamiento.

También debe mencionarse que para sistemas rígidos, como lo son la mayoría de edificaciones de mampostería, se reduce las deformaciones en la estructura siendo esto un gran beneficio puesto que se podría considerar que la superestructura se desliza como un cuerpo rígido. En contraste se puede observar, que para los mismos sistemas rígidos la aceleración tiene una especie de meseta o pico que aumenta con el aumento del coeficiente de rozamiento. Este aumento de aceleraciones en la superestructura, se puede explicar por el hecho de que en la fricción por rozamiento hay instantes de tiempo en que el sistema se detiene y cuando se vuelve a mover se genera pequeños impulsos, amplificando así las aceleraciones en la superestructura. Pero a pesar de estas aceleraciones extras, la aceleración de una estructura aislada resulta mucho menor que el caso de la estructura con base fija.

Se puede decir entonces que el rozamiento cumple eficientemente la función de desacoplar la estructura de su base y así reducir los efectos más dañinos del movimiento en la base. La reducción de la respuesta en la estructura es mejor cuando más bajo es el coeficiente de fricción, sin embargo habría que tener cuidado con el hecho de que la estructura no sea susceptible a perturbaciones pequeñas como el viento, movimiento de trenes, cuando se tiene coeficientes de fricción muy bajos.

CONCLUSIONES

El aislamiento sísmico es una técnica eficiente para la reducción de la respuesta sísmica de estructuras. Esta técnica permite reducir las deformaciones en la estructura principal, mientras que el sistema de aislamiento alcanza desplazamientos considerables.

La técnica de aislamiento sísmico resulta ser eficiente para estructuras con un periodo fundamental corto, además las estructuras deben de estar localizadas en suelos rígidos, de lo contrario se tendría una escasa reducción de la respuesta.

Se propone un sistema económico de aislamiento sísmico del tipo friccional, tal que sea aplicable en estructuras de mampostería. El sistema consiste en planchas de metal y un disco que deslizan entre sí, disipando energía por fricción.

De las pruebas experimentales se pudo observar que la presión vertical en el dispositivo influye de manera importante en el comportamiento del dispositivo, ya que su variación afecta las propiedades del sistema así como la forma de la curva de histéresis. Se determinó que la fuerza de inicio del deslizamiento en el dispositivo se incrementa con la presión vertical.

El dispositivo disipa energía por fricción entre sus placas, esta disipación genera un desgaste en las superficies del material. La energía disipada varía con la presión vertical aplicada alcanzando un valor de amortiguamiento equivalente del orden de 1% en las pruebas experimentales.

La curva de histéresis del dispositivo se ajusta a un modelo bilineal donde la primera rigidez es bastante alta, y la segunda rigidez es de un valor muy pequeño. Este modelo sencillo permite representar el comportamiento del sistema.

De los resultados experimentales se propusieron expresiones que permiten relacionar los parámetros principales del dispositivo con la presión vertical en el

mismo. Además estas expresiones muestran la tendencia en el comportamiento del sistema propuesto.

Se realizó un análisis por desempeño de una vivienda de mampostería con base fija y se comparó la respuesta de la misma usando el sistema de aislamiento propuesto. Para lo cual se analizó una vivienda con modelos simplificados y se ejecutaron análisis dinámicos con las correspondientes propiedades de los materiales.

De los análisis se observó que el sistema de aislamiento reduce la respuesta de la estructura analizada para la mayoría de eventos sísmicos usados. La reducción de la respuesta llega en algunos casos a valores del 70% de la respuesta con base fija.

Para los eventos sísmicos registrados en suelos blandos y los registros con contenido de periodos largos, la reducción de la respuesta con el sistema de aislamiento es bastante baja. En algunos casos el sistema de aislamiento amplifica la respuesta de la estructura con base fija.

El sistema de aislamiento resulta ser eficiente para reducir la respuesta de estructuras sometidas a movimientos en su base. Al usar el aislador se logra reducir las deformaciones y las aceleraciones en la estructura, lo cual no solo reduce el daño en la edificación sino también en el equipamiento del mismo.

Se pudo observar además que a medida que se reduce el coeficiente de fricción en el dispositivo, se logra reducir aún más la respuesta en estructuras de periodos cortos. Sin embargo el valor del coeficiente de fricción debe tener un valor tal que evite el movimiento en la estructura ante vibraciones pequeñas, como la de paso de vehículos pesados o viento.

RECOMENDACIONES

Una de las deficiencias del sistema propuesto es la carencia de una fuerza que restablezca al sistema a su posición original. Por lo tanto sería recomendable que el dispositivo de aislamiento propuesto se use conjuntamente con dispositivos basados en elastómeros, de tal manera que los elementos de caucho le provean una fuerza restauradora el sistema.

Se recomienda emplear el sistema en viviendas de mampostería de pocos niveles (hasta 4 pisos) ya que para altos niveles de presión vertical el dispositivo no es muy eficiente.

En el presente estudio se comprobó que el dispositivo sufría una rotación al aplicarle cargas laterales, por lo que es necesario realizar un estudio especial de los efectos de rotación del sistema con el fin de conocer su influencia en la respuesta sísmica de la estructura aislada con este sistema.

Es necesario realizar más ensayos para calibrar las expresiones experimentales propuestas en el presente estudio. Asimismo, estudiar la influencia de la velocidad de deslizamiento del dispositivo en las propiedades dinámicas del sistema de aislamiento.

Si bien es cierto que el dispositivo propuesto resultó ser eficiente sin ningún tipo de tratamiento en la superficie de deslizamiento, sería muy interesante estudiar el efecto del dispositivo con algún tipo de tratamiento (teflón, lubricante, etc) en la superficie que permita reducir el coeficiente de fricción y por lo tanto la fuerza sísmica en la estructura.

Como la respuesta en las estructuras aisladas con el sistema propuesto depende mucho del coeficiente de fricción, es importante conocer cual es el valor del coeficiente de fricción óptimo en el aislador tal que produzca la mayor reducción posible de la respuesta sísmica en la estructura.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Akiyama H., "Metodología de proyectos sismoresistentes de edificios basada en el Balance Energético", Reverte, Barcelona, 2003.
- [2] Biggs J. M., "Introduction to Structural Dynamics", McGraw-Hill, New York, 1964.
- [3] Bozzo L. M., Barbat A. H., "Diseño Sismoresistente de Edificios", Reverte S.A., Barcelona, 2000.
- [4] Buckle I. G., Mayes R. L., "Seismic Isolation: history, applications, and performance – a world view", Earthquake Spectra N° 6 (2), 161-202, 1990.
- [5] Building Seismic Safety Council, "NEHRP Recommended Provision for seismic regulations for new Buildings and other Structures (FEMA 450)", Federal Emergency Management Agency, Washington D.C. 2004.
- [6] Building Seismic Safety Council, "NEHRP Recommended Provision: Design Examples (FEMA 451)", Federal Emergency Management Agency, Washington D.C. 2006.
- [7] Chang L. G., "Numerical Integration Methods For Analyzing Fragile Failure Of Nonstructural Elements", Master Report, Building Research Institute, Tsukuba, Japan, 2006.
- [8] Chopra A. K., "Dynamics of Structures", 2nd Edition, Prentice Hall, New Jersey, 2001.
- [9] Higashino M., Okamoto S., "Response Control and seismic Isolation of Buildings", International Council for Research and Innovation in Building and Construction (CIB), Taylor & Francis, New York, 2006.
- [10] Huaco G. D., "Comportamiento de una Edificación de Albañilería construida con Ladrillo Artesanal frente a cargas laterales", Tesis de grado, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, 2005.
- [11] Japan Society of Seismic Isolation, "Introduction to Seismically Isolated Structures", Ohmu-sha Ltd., 1995.

- [12] Kelly J. M., "Dynamic and Failure characteristics of Bridgestone Isolation bearings", Report N°. UBC/EERC-91/04, Earthquake Engineering Research Center, University of California at Berkeley, 1991.
- [13] Kelly J.M., "Earthquake-Resistant Design with Rubber", 2nd Edition, Springer, New York, 1993.
- [14] Kuramoto H., Teshigawara M., Okuzono T., Koshika N., Takayama M., Hori T., "Predicting the earthquake response of buildings using Equivalent Single Degree of Freedom System", Proc. 12th World Conference on Earthquake Engineering, New Zealand, 2000.
- [15] Mayes R.L., "Seismic retrofit of buildings with base isolation", Proc. VIII Simposio Nacional de Ingeniería Sísmica, Tlaxcala, México, 2004.
- [16] Moreno D. M., Yamin L. E., Reyes J. C., "Estudio Experimental de Aisladores Sísmicos tipo Péndulo de Fricción en modelos a escala reducida", Universidad de Los Andes, Bogotá, 2000.
- [17] Naeim F., Kelly J.M., "Design of Seismic Isolated Structures", John Wiley & Sons Inc, New York, 1999.
- [18] Newmark N. M., Rosenblueth E., "Fundamentals of Earthquake Engineering", Prentice Hall, New Jersey, 1971.
- [19] Ozer M., "The linear formulation for the equations of the dynamic responses of rigid and flexible structures supported by Friction Pendulum Sliding (FPS)", Proc. Thirteenth World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, Canada, 2004.
- [20] Piqué J. R., "On the use of Simple Models in Nonlinear Dynamic Analysis", Report N°. R76-43, School of Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts, 1976.
- [21] Qamaruddin M., Al-Oraimi S.K., Al-Jabri K.S., "Worldwide development of Friction seismic Isolation Scheme for Masonry Buildings", Proc. Eleventh World Conference on Earthquake Engineering, Acapulco, México, 1996.
- [22] Romo M., Aguiar R., Bravo V., "Alternativas de modelamiento de estructuras con aisladores sísmicos mediante SAP 2000", Proc. II Congreso de Ciencia y Tecnología, Centro de Investigaciones Científicas, Escuela Politécnica del Ejército, Ecuador, 2007.

- [23] Saito T., "Structural Earthquake Response Analysis (STERA 3D) Technical Manual", Building Research Institute, Tsukuba, Japan, 2005.
- [24] San Bartolomé A., "Albañilería Confinada", Colección del Ingeniero Civil, Consejo Departamental de Lima, Colegio de Ingenieros del Perú, Lima, 1993.
- [25] SENCICO, Norma Técnica de Edificaciones, Reglamento Nacional de Construcciones, Lima, 2007.
- [26] UBC-97, "Uniform Building Code, 1997 Edition", International Conference of Building Officials, Whittier, California, 1997.
- [27] Wang Y.P., "Fundamentals of Seismic Base Isolation", Proc. International training programs for seismic design of buildings structures, Taiwan, 1997.
- [28] Zavala C. A. et al, "Project for construction monitoring and improvement techniques for masonry housing", Reporte Final, Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (CISMID), Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, 2004.
- [29] Zayas V. A., Low S. S., Bozzo L.M., Mahim S. A., "Feasibility and performance studies on improving the earthquake resistance of new and existing buildings using the Friction Pendulum System (FPS)", Report N°. UBC/EERC-89/09, Earthquake Engineering Research Center, University of California at Berkeley, California, 1989.
- [30] Zayas V. A., Low S. S., Mahim S. A., "The FPS earthquake resisting system. Experimental Report", Report N°. UBC/EERC-87/01, Earthquake Engineering Research Center, University of California at Berkeley, California, 1987.
- [31] Zuñiga O., Terán A., "Evaluación basada en desplazamientos de Edificaciones de Mampostería Confinada", Revista de Ingeniería Sísmica N° 79, 25-48, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, México, 2008.