

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
SECCIÓN DE POSGRADO Y SEGUNDA ESPECIALIZACIÓN**



**ANÁLISIS INELÁSTICO Y CONTROL DE
LA RESPUESTA SÍSMICA DE EDIFICIOS
UTILIZANDO DISIPADORES DE ENERGÍA**

TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

Para Optar el Título de Segunda Especialización Profesional en:

INGENIERÍA SISMORRESISTENTE

Presentado por:

ING. RICARDO RAMÓN OVIEDO SARMIENTO

Lima – Perú

2004

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi agradecimiento mas sincero al Ing. Roberto Morales Morales, por su asesoramiento y apoyo brindado para la realización y culminación del presente Trabajo de Investigación.

Agradezco principalmente el apoyo de mis padres, quienes en todo momento me han apoyado y me han brindado su voz de aliento en la realización de mis metas trazadas, las cuales en este país son difíciles de alcanzar.

Agradezco al Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres de la Universidad Nacional de Ingeniería, en las personas del Dr. Ing. Jorge Olarte Navarro, Dr. Ing. Zenón Aguilar Bardales, Dr. Ing. Gonzalo Vásquez Chicata, Ing. Jorge Gallardo, etc., quienes me han brindado su apoyo en todo momento de la realización del presente Trabajo de Investigación.

Agradezco a mis hermanos, Edda, Maribel y Freddy quienes en todo momento me han impulsado a culminar la elaboración del presente Trabajo de Investigación.

Finalmente, a todas mis amistades que de una u otra manera me han brindado su ayuda durante el tiempo que ha tomado la elaboración del presente trabajo de investigación.

RESUMEN

En el mundo desde 1755 más de 14 millones de personas han muerto en eventos sísmicos. Por esta razón es muy importante un buen comportamiento de las estructuras; esta es una buena manera de reducir la pérdida de vidas humanas y materiales.

En los libros hay bastante información sobre diseño elástico en comparación con la información sobre diseño inelástico con disipadores; esta es la razón porque nosotros estamos realizando la presente investigación. Esta investigación es una introducción al diseño de edificios con disipadores, cuya aplicación será particular; cada aplicación depende de varias características de la estructura y sus requerimientos para solucionar el problema específico.

El reforzamiento de estructuras es una actividad muy importante, porque cada edificio esta expuesto a un diferente evento sísmico en un diferente lugar del planeta.

En esta investigación se realizara el análisis dinámico no lineal de un edificio de concreto armado de 109.66 m. El programa de análisis estructural SAP2000 versión no lineal 8.2.5 fue utilizado. Inicialmente este programa fue desarrollado en la Universidad de Berkeley, pero actualmente solamente es desarrollado por Computers and Structures Inc (1984-2003) (14). Para obtener las rotulas plásticas se han tomado las secciones de los elementos con sus con sus especificadas áreas de acero de refuerzo longitudinal. El registro sísmico de octubre de 1966 fue usado y la aceleración sísmica fue escalada a 400 y 600 gals.

Después de realizar el análisis dinámico no lineal del edificio, el diseño de los disipadores fue hecho para obtener un amortiguamiento efectivo de 20% en la estructura. Después se procedió a realizar el análisis del edificio con los disipadores para obtener la respuesta con el amortiguamiento adicionado. Obtuvimos que con los disipadores se puede reducir la fuerza actuante en el edificio; también los desplazamientos, velocidades y aceleraciones de los entrepisos. Y finalmente, se obtiene la influencia de los disipadores en la energía del edificio.

Esta investigación esta dentro del programa de Segunda Especialización en Ingeniería Sismorresistente, de la Universidad Nacional de Ingeniería de Perú. La recolección de información fue hecha en el Centro de Computo del Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres – CISMID, y los análisis del modelo fueron realizados en la computadora de mi casa.

Ricardo R. OVIEDO SARMIENTO

Lima, Marzo 2004

ABSTRACT

In the world since 1755 more than 14 millions of persons had died in seismic events. For this reason is so important a good behaviour of the structures; this is a good way to reduce the lost of human lives and materials.

In the books there are several information about elastic design in comparison with the information about inelastic design with dampers; this is the reason because we are doing the present investigation. This investigation is an introduction of the design of buildings with dampers, which application will be particular; every application depends of several characteristics of the structure and their requirements to solve the specific problem.

The strengthening of structures is a very important activity, because each building is exposed to a different seismic event in a different place of the planet.

In this investigation we'll realize the dynamic nonlinear analysis of a building of reinforced concrete of 109.66 m. The structural analysis program SAP2000 Nonlinear Version 8.2.5 was used. Initially this program was developed in the university of Berkeley, but actually only is developed by Computer and Structures Inc (1984-2003) (14). For obtain the plastic hinges we have been taken the sections of the elements with their specified areas of longitudinal reinforcing steel. The seismic record of October of 1966 was used and the seismic acceleration was scaled to 400 and 600 gals.

After of realize the dynamic nonlinear analysis of the building, the design of the dampers was made for obtain an effective damping of 20% in the structure. After we proceed to realize the analysis of the building with the dampers for obtain the response with the added damping. We obtained that with the dampers we can reduce the force acting in the building; also reduce the displacements, velocities and accelerations of the interstories. And finally, we obtain the influence of the dampers in the energy of the building.

This Investigation is inside of the program of Second Specialization in Seismoresistant Engineering, of the National University of Engineering of Peru. The recollection of information was made in the Computation Center of the Japan Peru Center for Earthquake Engineering Research and Disaster Mitigation – CISMID, and the analysis of the model were realized in the computer of my house.

Ricardo R. OVIEDO SARMIENTO

Lima, March 2004

ÍNDICE

PRESENTACIÓN	III
DEDICATORIA	V
AGRADECIMIENTOS	VII
RESUMEN	IX
ABSTRACT	X
ÍNDICE	XI

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 GENERALIDADES	1
1.2 JUSTIFICACIÓN	4
1.3 OBJETIVOS	5
1.3 ORGANIZACIÓN	6

CAPÍTULO II

DISPOSITIVOS DISIPADORES DE ENERGÍA

2.1 SISTEMAS DE CONTROL ESTRUCTURAL ANTE ACCIONES SÍSMICAS	9
2.1.1 Sistemas de control activo	10
2.1.2 Sistemas de control híbrido	11
2.1.3 Sistemas de control semiactivo	12
2.1.4 Sistemas de control pasivo	13
2.1.4.1 Control pasivo con aislamiento de base	13
2.1.4.2 Control pasivo con sistemas inerciales acoplados	15
2.1.4.3 Control pasivo con disipadores de energía	16
2.2 DISPOSITIVOS DISIPADORES DE ENERGÍA	16
2.2.1 Disipadores histeréticos	16

2.2.1.1 Disipadores por plastificación de metales	16
2.2.1.1.1 Disipadores por flexión	17
2.2.1.1.2 Dispositivos a cortante	18
2.2.1.1.3 Disipadores basados en la extrusión de metales	20
2.2.1.2 Disipadores por fricción	20
2.2.2 Disipadores con comportamiento viscoelástico	21
2.3 DISEÑO SISMORRESISTENTE CON DISIPADORES DE ENERGÍA	23

CAPÍTULO III

ANÁLISIS TRIDIMENSIONAL INELÁSTICO DE ESTRUCTURAS

3.1 ANÁLISIS DINÁMICO TRIDIMENSIONAL	37
3.1.1 Equilibrio dinámico	37
3.1.2 Modelo computacional tridimensional	38
3.1.3 Formas de modo y frecuencias tridimensionales	39
3.2 ANÁLISIS TRIDIMENSIONAL NO LINEAL	39
3.2.1 Aceleración sísmica	40
3.2.2 Método de solución paso a paso	41
3.2.3 Método de integración numérica	42
3.2.4 Método de Newmark	42
3.2.5 El Método de Hilber, Hugues y Taylor	44
3.2.6 Amortiguamiento viscoso	45
3.2.7 Análisis dinámico no lineal	46
3.3 CARACTERÍSTICAS INELÁSTICAS DEL PROGRAMA SAP2000	47
3.3.1 Método de descarga de las rótulas	47
3.3.2 Tolerancias de agrupamiento del evento	47
3.3.3 Propiedades de las rótulas plásticas	48
3.3.4 Parámetros de integración en el tiempo	48
3.3.5 Brazos rígidos en los elementos	49
3.4 ELEMENTOS NOLINEALES	49
3.4.1 Propiedades de los elementos con rótulas plásticas	49
3.4.2 Propiedades plásticas generales	49
3.4.3 Propiedades de los disipadores de energía viscosos	51

CAPÍTULO IV**RESPUESTA INELÁSTICA DEL EDIFICIO INICIAL**

4.1 ESTRUCTURA A EVALUAR	57
4.1.1 Ubicación de la estructura	57
4.1.2 Características de la estructura	58
4.1.3 Geometría de la estructura	58
4.1.4 Detalles del reforzamiento	58
4.1.5 Características de los materiales	59
4.2 REGISTROS SÍSMICOS CONSIDERADOS	59
4.3 RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS	60
4.3.1 Influencia de la duración del sismo	60
4.3.2 Periodos naturales y modos de vibración	60
4.3.3 Influencia del nivel de aceleración	61
4.3.4 Influencia de la deformación máxima	61
4.3.5 Desplazamiento real de piso	62
4.3.6 Respuesta inelástica	62
4.3.7 Balance energético	62
4.3.8 Mecanismo de formación de rotulas plásticas	63

CAPÍTULO V**RESPUESTA INELÁSTICA CON DISIPADORES DE ENERGÍA**

5.1 INTRODUCCIÓN	105
5.2 OBJETIVOS	106
5.3 PROCEDIMIENTO Y LIMITACIÓN	107
5.4 DISEÑO DE LOS DISIPADORES DE ENERGÍA	107
5.4.1 Selección del tipo de disipador	107
5.4.2 Materiales de construcción	108
5.4.3 Modelamiento del disipador	109
5.4.4 Procedimiento de diseño	110
5.4.5 Disipadores de energía utilizados	111

5.5 ANÁLISIS INELÁSTICO CON LOS DISIPADORES DE ENERGÍA	112
5.5.1 Efectos en las fuerzas cortantes	113
5.5.2 Efecto en las distorsiones	113
5.5.3 Efecto en el desplazamiento, velocidad y aceleración	114
5.5.4 Efecto en la respuesta inelástica de piso	114
5.5.5 Efecto en el desplazamiento real de piso	115
5.5.6 Efecto en la velocidad real y aceleración real de piso	115
5.5.7 Fuerza desarrollada por el disipador	116
5.5.8 Balance energético	116
5.5.9 Efecto en el mecanismo de formación de rótulas plásticas	117

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES	171
6.1.1 Referente al análisis dinámico	171
6.1.2 Referente al mecanismo de formación de rótulas plásticas	171
6.1.3 Referente al comportamiento con disipadores de energía	172
6.2 RECOMENDACIONES	173
 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	 175

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 GENERALIDADES

El propósito de las previsiones sísmicas es la de primeramente evitar grandes daños estructurales, pérdidas de vidas humanas y mantener el funcionamiento de la estructura. Esto es lo que menciona la Norma UBC 1997, esto se debe al carácter económico: una estructura dúctil presenta aceleraciones absolutas inferiores y también esfuerzos menores a las producidas en comportamiento lineal y elástico y conduce a secciones de menor dimensión. El estado del arte en protección sísmica demanda prudentes y conservadoras prácticas en el proyecto (07, 25, 30):

El sistema resistente estructural debe tener una configuración regular y continua.

El sistema completo debe ser redundante, con sistemas resistentes primarios y de reserva.

El diseño debe ser inherentemente simple, fácil de analizar, fácil de construir y con un costo efectivo.

La energía total introducida por el sismo a la estructura E_i , puede ser absorbida por la suma de la energía cinética E_k , energía de deformación elástica E_{de} , energía disipada a través de deformaciones plásticas E_h , y amortiguamiento viscoso equivalente E_v . La ecuación de energía es la siguiente:

$$E_i = E_k + E_{de} + E_h + E_v \quad (1.1)$$

La energía de vibración elástica es la suma de la energía cinética y la energía de deformación elástica. Si se supone que para una estructura la energía de entrada E_i tiene

un valor constante, para lograr un diseño sismorresistente económico será necesario en la ecuación anterior disipar parte de la energía total introducida a través de un comportamiento inelástico, es decir, amortiguamiento viscoso E_v o histerético E_h , o una combinación de ambos.

Para tomarlo en cuenta los códigos han introducido de alguna forma este efecto, de manera de reducir la fuerza sísmica, aceptando que la estructura se comporte inelásticamente.

En este aspecto la Norma Peruana de Diseño Sismorresistente (56) establece que el cortante basal V es un factor del peso W de la edificación de la forma:

$$V = F W \quad (1.2)$$

Donde F es el factor que esta en función de la zona Z , del suelo S , de la categoría de las edificaciones U , del factor de amplificación sísmica C y del coeficiente de reducción de solicitaciones sísmicas R , tal como lo expresa la siguiente ecuación:

$$F = \frac{Z U S C}{R} \quad (1.3)$$

La ecuación anterior puede ser expresada de la forma:

$$C = Z U S C_r \quad (1.4)$$

Donde $C_r = C/R$, este factor sería equivalente al nivel de aceleraciones de un espectro para diferentes valores de ductilidad, que en este caso se obtendría de dividir el espectro elástico entre el factor de reducción por ductilidad requerido, ese es el llamado espectro inelástico de aceleraciones.

La Norma Peruana señala que los desplazamientos calculados deben ser multiplicados por el valor de R para obtener las deformaciones inelásticas.

El espectro utilizado en el diseño debe reflejar las características de la región. Esto implica que debe ser obtenido a partir de registros de eventos sísmicos de la zona. El espectro de diseño es presentado a través de un espectro suavizado, debido a que resulta bastante simple su obtención y su uso por los diseñadores.

El diseño convencional adoptado de forma común por las normas sismorresistentes se basa en los conceptos de ductilidad. La Norma UBC 1997 propone expresiones basadas en fundamentos dinámicos e información experimental, las cuales facilitan el cálculo de unas fuerzas estáticas equivalentes. Estas incluyen reducciones con respecto a las correspondientes a un comportamiento lineal y elástico en función de la ductilidad, atribuible a la tipología estructural empleada. En caso de edificios que presenten irregularidades, se permite la determinación de las fuerzas estáticas equivalentes a través de un análisis dinámico con comportamiento elástico. La misma norma admite el uso de análisis dinámico no lineal en el tiempo, sin embargo resulta un proceso poco viable; debido a que se exigen datos experimentales contrastados que avalen los análisis realizados, y una posterior revisión del sistema estructural por un equipo de ingenieros especialistas en las disciplinas implicadas en los métodos de análisis utilizados.

El daño estructural debido a eventos sísmicos pasados, ha obligado a cuestionar la efectividad de las estructuras convencionales y los métodos de análisis empleados para valorar su respuesta (26). Por ejemplo se ha cuestionado lo siguiente:

La imposibilidad de determinar a priori la demanda de ductilidad ante un evento sísmico y donde se va a producir.

La presencia de fallas frágiles en sistemas supuestamente dúctiles.

El elevado costo de reparación que supone un comportamiento dúctil basado en una disipación de la energía en el seno estructural.

Actualmente el diseño sismorresistente tiene la tendencia de buscar sistemas que localicen la demanda de ductilidad en elementos predeterminados. Esto obviamente supone claras ventajas:

Resulta más factible garantizar la demanda de ductilidad.

El control de calidad en los materiales y en ejecución puede ser más intenso en las zonas donde se establece la oferta de ductilidad.

El daño resulta más previsible y la reparación más económica que en los sistemas basados en el daño estructural disperso.

Algunos sistemas proponen que la oferta de ductilidad resida en zonas de la propia estructura, como es el caso de los pórticos excéntricos. Otra posibilidad consiste en el empleo de disipadores de energía externos a la estructura. Si bien forman parte del sistema estructural, se emplean como nexo y ello permite su fácil restitución en caso de sufrir daño.

1.2 JUSTIFICACIÓN

Existen numerosas propuestas para el reforzamiento de estructuras aporticadas de concreto armado ante una sollicitación sísmica. Esto es debido a su poca rigidez lateral que origina distorsiones muy grandes. Además se debe tener en consideración la baja resistencia y flexibilidad de las paredes de mampostería en su plano normal, que aconseja la rigidización en este plano. Ante la presencia de desplazamiento de entrepiso en ambas direcciones, los disipadores de energía concentrarían así la mayor parte del desplazamiento, desarrollando fuerzas acordes con la capacidad resistente de los elementos. Se debe tener en cuenta que al no considerar los muros de mampostería en el modelo resulta una simplificación excesiva y poco real, ya que los muros de mampostería aumentan de forma significativa la rigidez del edificio y modifican sus características dinámicas.

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo fundamental mostrar el comportamiento dinámico de estructuras con disipadores viscosos de energía, los cuales estarán unidos a la estructura principal. El disipador de energía se diseña para formar parte de un sistema sismorresistente dual no estándar, formada por una estructura principal flexible aporticada, la cual soporta las acciones gravitatorias, y por un sistema que se concentra en el proceso disipativo y del que forman parte los disipadores de energía.

Actualmente se han desarrollado numerosos disipadores de energía, pero presentan los siguientes inconvenientes:

Los disipadores que posibilitan fuerzas reducidas como el ADAS (Added Damping and Stiffness), diseñados para disipar energía a través de la deformación de fluencia a flexión de platos de acero. Requieren desplazamientos importantes para que se muestren efectivos en la reducción de la respuesta sísmica.

Los disipadores que se plastifican mediante esfuerzo cortante disponen de una elevada rigidez en comportamiento elástico y plastifican a partir de pequeños desplazamientos. Un espesor reducido de su cuerpo disipativo resulta fundamental para limitar la fuerza máxima a un rango de valores apropiado para su utilización como conectores. Para evitar la aparición de abolladura, los disipadores actuales acceden a espesores reducidos empleando rigidizadores soldados. Sin embargo, la utilización del proceso de soldadura como medio de la unión produce efectos adversos, mas aún en pequeños espesores, propiciando conductas frágiles y la aparición de fisuras.

Los disipadores presentan en su mayoría una rigidez relativamente alta en su plano normal al pórtico.

Una ventaja del uso de los disipadores de energía frente a otros sistemas convencionales es que sus costos de reparación estructural después de un sismo severo son menores (20, 22).

1.3 OBJETIVOS

La presente investigación atendiendo al estado del arte actual tiene como objetivos lo siguiente:

Estudiar el comportamiento sísmico dinámico inelástico de un modelo tridimensional de un edificio de concreto armado, de tal manera de brindar una óptica mas clara sobre el real comportamiento de la estructura.

Estudio de los conceptos del mecanismo de colapso y diseño sísmico que se producen en un edificio cuando se realiza la disipación de energía por

articulaciones plásticas para resistir eventos sísmicos, siempre que se desarrolle un mecanismo estable de formación de rótulas plásticas.

Estudio sobre los conceptos de disipación de energía en estructuras de concreto armado, estudio y evaluación del procedimiento de análisis y diseño de edificios con disipadores de energía utilizando un registro sísmico peruano, teniendo en consideración lo siguiente:

- Fuerza desarrollada por el disipador acorde con la resistencia de los elementos estructurales.
- Proceso disipativo estable.
- Fácil instalación y reemplazo.

1.4 ORGANIZACIÓN

La presente investigación se ha estructurado en 6 capítulos, y en la parte final se ha incluido el apartado de referencias bibliográficas.

El primer capítulo sitúa la presente investigación dentro del ámbito del diseño sismorresistente, y plantea los objetivos y acciones emprendidas en la presente investigación.

El segundo capítulo recoge el estado del arte en sistemas sismorresistentes avanzados. Una primera parte describe, de forma general, las distintas técnicas avanzadas de control estructural ante sismos. En la segunda parte del capítulo se presenta la investigación realizada hasta el momento, en diseño sismorresistente con dispositivos elastoplásticos.

En el tercer capítulo se presenta las consideraciones del análisis inelástico de la estructura estudiada. Se describen los modelos y el procedimiento de análisis. Así como la formulación para determinar los mecanismos de formación de las rótulas plásticas en la estructura.

En el cuarto capítulo, se mencionan las características geométricas y las propiedades de los materiales empleados. Las características de los elementos y las

hipótesis adoptadas. Se presentan los resultados de los análisis dinámicos inelásticos con la utilización de un registro sísmico peruano.

En el quinto capítulo se presentan los valores obtenidos del diseño de los disipadores. Se selecciona el tipo de disipador a utilizar y se describen sus características. Se presenta la mejor ubicación de ellos en la estructura, y luego se procede al análisis del edificio con la inclusión de los disipadores de energía seleccionados y diseñados para un determinado nivel de amortiguamiento. Se presentan los gráficos obtenidos del análisis realizando una comparación del comportamiento del edificio con y sin disipadores de energía.

En el capítulo seis se presentan las principales conclusiones de la presente investigación sobre el comportamiento estructural y los beneficios reportados por los disipadores de energía al sistema sismorresistente, así como las recomendaciones más importantes.

CAPÍTULO II

DISPOSITIVOS DISIPADORES DE ENERGÍA

2.1 SISTEMAS DE CONTROL ESTRUCTURAL ANTE ACCIONES SÍSMICAS

El control estructural ante solicitaciones sísmicas se está planteando como una alternativa al diseño sismorresistente convencional (Figura 2.1). Los sistemas sismorresistentes avanzados tienen por objetivo el control de desplazamientos de una estructura haciendo uso de alguno de los siguientes recursos (16, 30, 45):

Modificación de las propiedades dinámicas del edificio

Disipación de energía introducida al sistema a partir de dispositivos mecánicos

Control con dispositivos que ejerzan fuerzas que contrarresten la acción sísmica.

Los sistemas de control pasivo se basan en elementos que responden de forma inercial a la acción sísmica, a diferencia del resto de sistemas no precisan de aporte energético para funcionar. Los sistemas activos, semiactivos e híbridos están formados por actuadores de fuerza y/o elementos pasivos, controlador a tiempo real y dispositivos sensores instalados en la estructura (05, 11, 41).

Los sistemas pasivos se clasifican en sistemas de aislamiento de base, de disipación de energía y en osciladores resonantes. Los aisladores de base, situados sobre la cimentación y soportando al edificio, desacoplan parcialmente al edificio del suelo, disminuyendo la energía de entrada y por consiguiente su respuesta estructural. Los disipadores de energía no alteran la energía de entrada, que depende básicamente del período fundamental y de la masa del edificio, manifestando su eficiencia maximizando la energía disipada y disminuyendo la respuesta estructural (66). Los sistemas inerciales acoplados tales como el Tuned Mass Dampers (TMD) introducen masas adicionales, normalmente situadas en la parte alta de los edificios, cuya excitación absorbe parte de

la energía cinética introducida por el sismo. Las propiedades más valiosas de los sistemas pasivos son su robustez, no dependen de fuentes de energía, son mecánicamente simples y su costo es competitivo (37, 76). Existen actualmente cientos de edificios construidos en el mundo con estos sistemas.

Los sistemas activos contrarrestan los efectos del sismo directamente mediante actuadores. La gran demanda de energía que comporta su actuación ante un sismo severo y la complejidad de los algoritmos de control los convierte en sistemas poco robustos (37). Los sistemas híbridos y semiactivos, nacen ante la necesidad de respuesta en una banda amplia de frecuencias y de menor consumo energético. Los sistemas híbridos son muy similares a los sistemas activos, sin embargo en ellos intervienen elementos pasivos que permiten reducir el consumo energético del sistema ante un sismo. Los sistemas semiactivos emplean dispositivos de control pasivo, sin consumo energético, cuyas características resistivas permiten ser modificadas y controladas a tiempo real mediante actuadores de bajo consumo a través de sistemas de control parecidos a los empleados en los sistemas activos e híbridos.

2.1.1 Sistemas de control activo

Un sistema de control activo (Figura 2.2) consiste en:

- i) Sensores situados en la propia estructura empleados para medir variables correspondientes a la excitación externa, o variables de la respuesta estructural, o de ambos tipos.
- ii) Sistemas controladores que se basan en las medidas de los sensores y calculan la fuerza a aplicar por los actuadores para contrarrestar los efectos sísmicos;
- iii) Actuadores que habitualmente son alimentados por fuentes de energía externa para ejercer fuerzas.

El Active Mass Damper (AMD), es un ejemplo de un sistema de control activo. El cual es una masa auxiliar móvil usualmente inferior al 1% de la masa total de la estructura y es instalada en una de las últimas plantas del edificio, con un actuador conectado a ella (Figura 2.3). La fuerza inercial que presenta la masa oscilante debe

contrarrestar los efectos de la acción sísmica y reducir la respuesta estructural a valores aceptables.

En comparación con los sistemas pasivos, los sistemas activos presentan numerosas ventajas:

Mayor efectividad en control de respuesta estructural

Afectividad menos sensible a las condiciones locales del suelo y a las características del sismo.

Aplicación ante diversos eventos: viento o sismos.

Selección de los objetos de control.

Esto permite enfatizar el confort humano sobre aspectos del movimiento estructural en momentos no críticos, e incrementar la seguridad estructural ante una acción dinámica severa. Pero también presentan serios inconvenientes:

Elevado costo de mantenimiento

Dependencia respecto a las fuentes de alimentación.

La respuesta dinámica de edificios con muchos grados de libertad y un posible comportamiento lineal resulta imprevisible.

Su control a partir de un número limitado de sensores y actuadores plantea un problema dinámico complejo.

2.1.2 Sistemas de control híbrido

Los sistemas híbridos son la combinación de sistemas activos y los sistemas pasivos (Figura 2.4). Debido a que el control se consigue a partir de la actuación de un dispositivo pasivo, los sistemas híbridos suponen mejoras con relación a los activos:

En caso del fallo del componente activo, aunque de forma menos efectiva, el sistema pasivo sigue ejerciendo funciones de control y,

Los requerimientos energéticos son inferiores.

Los sistemas híbridos que han despertado mayor interés son el Hibrid Mass Damper (HMD) y el aislamiento de base con control activo del desplazamiento de base.

El HMD dispone de una masa oscilante pasiva que por si misma reduce la respuesta del edificio, y de un actuador activo, el cual mejora la eficiencia del sistema y además le da una mayor robustez frente a cambios dinámicos que afectan a la estructura (figura 2.5).

El comportamiento pasivo desacopla parcialmente la estructura del terreno, a costa de un desplazamiento significativo entre subestructura y superestructura. El objetivo del componente activo es el de controlar este movimiento mediante un actuador. Desde un punto de vista práctico, es importante que el control se consiga con una única fuerza, y que la demanda energética de esta se encuentre dentro de unos límites aceptables (34). Sin embargo, la evaluación de dicha fuerza de control entraña una cierta dificultad relacionada tanto con el comportamiento no lineal del aislamiento con las incertidumbres asociadas a la modelización del sistema global estructura-aislamiento y de la excitación.

2.1.3 Sistemas de control semiactivo

Los sistemas semiactivos tienen un esquema de funcionamiento muy similar a los sistemas activos, diferenciándose de estos en que el control estructural se obtiene a partir de dispositivos de carácter reactivo, cuyas características mecánicas (rigidez o amortiguamiento) son controlables, lo cual permite modificar las propiedades dinámicas de la estructura con costos energéticos muy reducidos (Figura 2.6) (60).

Algunas de las técnicas de control empleadas por los sistemas semiactivos son:

La fricción variable

El movimiento de masas de líquido en el interior de tanques (Tuned Sloshing Dampers) o columnas dentro del edificio (Tuned Liquid Column Dampers).

La incorporación de dispositivos hidráulicos de rigidez o amortiguamiento variable.

Amortiguadores con fluidos de viscosidad controlable a partir de campos eléctricos o magnéticos.

Se presenta un dispositivo de amortiguamiento variable (Variable Hydraulic Damper), a través de una válvula de flujo variable, la cual permite modificar la pérdida de carga entre ambas cámaras de un cilindro hidráulico, tal como se muestra esquemáticamente en la figura 2.7.

Los líquidos controlables tienen la propiedad de variar sus características reológicas ante campos eléctricos o ante campos magnéticos. La característica esencial de estos líquidos es su reversibilidad de fluido con viscosidad lineal a estado semisólido en milisegundos cuando son expuestos a un campo eléctrico o magnético. En la figura 2.8 se puede observar un dispositivo basado en el comportamiento de un fluido magnetoreológico. Se trata de un pistón de doble efecto, soportado por un eje con doble apoyo sobre la carcasa. El cilindro tiene la particularidad de formar parte de un circuito magnético. Entre pistón y cilindro se abre un paso entre ambas cámaras. El estado que presenta el fluido permite un desplazamiento restringido o relativamente libre, en función de que el campo magnético este o no activado (38, 78). Una posible integración del dispositivo en el seno estructural sería la que se indica en la figura 2.9.

2.1.4 Sistemas de control pasivo

Los dispositivos pasivos son elementos de carácter reactivo cuya respuesta no es controlable y depende únicamente de las condiciones de trabajo en que se encuentran. Estos intervienen alterando las propiedades dinámicas del edificio, provocando una reducción de su respuesta estructural (02, 33). Tiene ventajas competitividad económica. Los sistemas de control pasivo se pueden clasificar en:

- Control pasivo con aislamiento en la base.
- Control pasivo con sistemas inerciales acoplados
- Control pasivo con disipadores de energía

2.1.4.1 Control pasivo con aislamiento de base

El aislamiento de base es una estrategia de diseño que se fundamenta en el desacoplamiento de la estructura del movimiento del suelo para proteger a esta del

efecto de los sismos. Se consigue a partir de dispositivos flexibles al movimiento horizontal y rígido al desplazamiento vertical, ubicados entre los cimientos y la superestructura. Su presencia alarga el período fundamental, con lo cual desacopla de forma parcial la estructura del movimiento del terreno y limita la entrada de energía (01, 18, 78). Es reciente la introducción de amortiguamiento estructural para limitar los desplazamientos de la superestructura a valores aceptables.

El aislamiento de base es más recomendable en estructuras rígidas sobre terrenos firmes. El principal inconveniente que se presenta en estructuras con una elevada relación altura-ancho son los elevados momentos de volteo que pueden suponer la pérdida de equilibrio. Además, al incrementarse la altura las ventajas obtenidas al variar el período de vibración disminuyen.

Los aisladores de neopreno zunchado intercalan placas delgadas de acero en un bloque cúbico o cilindro de neopreno. Su rigidez vertical aumenta considerablemente, manteniendo su flexibilidad lateral. Estos dispositivos dotan de flexibilidad al edificio pero su capacidad disipativa resulta baja. Se han realizado pruebas con disipador de neopreno zunchado con núcleo de plomo (figura 2.10), logrando un aumento de la capacidad disipativa de su precursor que permite un mejor control en el desplazamiento de base (27).

Un segundo grupo de aisladores de base corresponde a los de fricción. Estos trabajan de forma distinta a los aisladores de neopreno, al limitar la fuerza máxima transmitida a la estructura mediante el coeficiente de fricción (figura 2.11). Su principal ventaja es el costo y no tener prácticamente limitación en la carga vertical que puede transmitir. Un inconveniente es la modelización de la fricción a lo largo del tiempo y en función de la velocidad de deslizamiento y de la presión actuante (33, 57, 72).

Un sistema de aislamiento basado en el movimiento pendular del edificio sobre las superficies cóncavas de los aisladores de base (figura 2.12). El período del péndulo es convertido en modo de vibración fundamental de la estructura y depende solamente del radio de curvatura de la superficie deslizante del aislador. El aislador proporciona una rigidez relativa al desplazamiento lateral directamente proporcional al peso de la estructura e inversamente proporcional al radio de curvatura. Uno de los elementos de

interés de este dispositivo es su capacidad de proporcionar períodos y desplazamientos largos manteniendo su capacidad portante de utilidad ante la presencia de sismos cercanos a la falla, caracterizados por pulsos largos (27, 32).

2.1.4.2 Control pasivo con sistemas inerciales acoplados

El Tuned Mass Damper (TMD) (figura 2.13) consta de los siguientes componentes:

Un oscilador de un grado de libertad.

Un mecanismo de muelle.

Un mecanismo de amortiguamiento.

Generalmente se instala en la parte superior de los edificios, y la masa y la rigidez del muelle se determinan de forma que la frecuencia de oscilación sea la misma que la frecuencia fundamental de la estructura.

El TMD también es efectivo para reducir la vibración del viento. La mayor desventaja es que requiere de una gran masa e importante disponibilidad de espacio para su instalación. Para compensar este problema recientemente se ha propuesto el uso de cubiertas con aislamiento respecto a la estructura inferior o tanques de agua para ser usados como masas pendulares (figura 2.13). Otro inconveniente del sistema es que su efectividad se reduce a una banda estrecha de frecuencias cercanas al período fundamental del edificio, y pueden presentarse situaciones en las que el edificio se sitúe fuera de su período fundamental:

En un edificio esbelto se pueden manifestar con distinta intensidad modos de vibración diferentes al fundamental, en función a las características de la excitación

Durante sismos severos la estructura puede llegar a comportarse plásticamente, alargando el período de la estructura y aportando una pérdida de sintonía con el TMD.

2.1.4.3 Control pasivo con disipadores de energía

Los disipadores de energía se pueden clasificar en disipadores histeréticos y viscoelásticos (01). Los dispositivos histeréticos se basan en:

La plastificación de metales por flexión, cortante o extrusión.
Fricción entre superficies.

Son dispositivos que dependen básicamente del desplazamiento. Los disipadores viscoelásticos pueden basarse en:

Sólidos viscoelásticos
Fluidos conducidos a través de orificios
Fluidos viscoelásticos.

Su comportamiento depende fundamentalmente de la velocidad.

2.2 DISPOSITIVOS DISIPADORES DE ENERGÍA

2.2.1 Disipadores histeréticos

2.2.1.1 Disipadores por plastificación de metales

La plastificación de metales en disipadores se puede producir a partir de esfuerzos estructurales o bien a partir del proceso de extrusión. Cualquier esfuerzo, sea de torsión, flexión, cortante o axial puede conducir a procesos de plastificación en metales. El acero ha sido sin duda el metal más empleado en disipadores. Entre sus virtudes están las posibilidades constructivas que ofrece, debido a que es de fácil mecanizado y soldabilidad, además tiene bajo costo y elevada ductilidad.

Existen resultados experimentales que indican que el acero ensayado bajo condiciones cuasiestáticas puede llegar a manifestar valores del límite de fluencia y de tensión máxima de rotura inferiores en un 17% y 3% respectivamente a los obtenidos

con velocidades de deformación del 10%/s. Pese a estos resultados se han venido realizando estos ensayos. Probablemente, dada la alta variabilidad de la acción sísmica, y observado el buen comportamiento de los modelos adoptados basándose en la caracterización estática, la observación de una caracterización dinámica aumenta la complejidad del problema de forma desproporcionada.

Se concluye que para reducir la respuesta estructural, es preferible disipar energía a partir de rangos bajos de fuerza y desplazamiento. Es por eso que se han ensayado disipadores con aceros de bajo límite elástico y con gran capacidad de alargamiento en relación a los aceros de construcción convencionales y de determinadas aleaciones de aluminio. Estos disipadores se han basado en la plastificación por esfuerzo cortante, dando como resultado dispositivos de elevada rigidez, esfuerzos de plastificación de valores reducidos y gran uniformidad en la distribución de la deformación plástica.

2.2.1.1.1 Disipadores por flexión

Se ha desarrollado numerosos dispositivos que plastifican debido a esfuerzos flectores. Se ha estudiado el comportamiento de dos placas en forma de U que disipan energía por flexión pura al enrollarse por efecto del desplazamiento relativo entre sus extremos (figura 2.14). Su comportamiento histerético se demostró muy estable.

Uno de los disipadores mas conocidos y estudiados es el conocido sistema con el nombre de ADAS (Added Damping And Stiffness). El cual es un dispositivo formado por un conjunto de chapas en paralelo, de espesor constante y sección variable en forma de X (figura 2.15). Este sistema frontalmente es similar a dos trapecios unidos por la base menor. El número frontal de chapas en paralelo resulta variable, permitiendo ajustar el disipador a las necesidades de la estructura a la cual se incorpora. Cada placa del dispositivo se encuentra impedida de giro en ambos extremos, de forma que un desplazamiento relativo entre estos en dirección perpendicular al plano de la placa produce una distribución de momentos flectores lineales, simétricos y con doble curvatura. El ancho del disipador se proporciona linealmente con la distribución de momentos flectores, lo cual deriva en una generalización de la plastificación en un corto intervalo de desplazamiento. La plastificación se produce de forma uniforme y estable,

optimizando el proceso de disipación de energía. Se muestra en la figura 2.16 su respuesta histerética en los primeros ciclos, manifestándose una notable flexibilidad en comportamiento elástico.

El dispositivo indicado en la figura es conocido como el sistema TADAS (figura 2.17) al igual que el ADAS, esta formado por un conjunto de placas trapezoidales de acero paralelas y de espesor constante. El hecho de que las placas se encuentren con un extremo empotrado y el otro articulado, condiciona la forma trapezoidal, que posibilita también una distribución global de la plastificación. La base menor de la placa se conecta al nivel de viga a una estructura aperticada, mientras que la otra se articula con una unión de bulón a dos contravientos dirigidos a la base de los pilares del pórtico. Con un desplazamiento relativo entre extremos de la placa perpendicular a su plano, se consigue la plastificación por flexión por curvatura simple. Al incorporar este sistema en un pórtico de acero a escala natural se ha observado que las reducciones en la respuesta son similares a las obtenidas con el ADAS.

También se ha investigado el comportamiento de un disipador construido en una placa de acero mecanizada con la geometría indicada en la figura 2.18. Debido a los espacios vacíos que deja entre disipadores se le conoce genéricamente como disipador de tipo panal, y se comercializa con el nombre de “honeycomb”. Su geometría tiene como objeto una plastificación lo mas uniforme posible en la zona disipativa. Su comportamiento histerético (figura 2.19) se ha revelado muy estable y de forma casi rectangular, con una respuesta mas próxima a la rígida-plástica que en el caso del ADAS, la cual es mas flexible.

También se ha desarrollado dos disipadores, uno establecido a partir de la flexión de pernos (figura 2.29) y el otro basado en la plastificación por cortante, que permiten ser colocados como diagonales de arriostramiento, logrando así unos elementos prácticamente independientes de las acciones verticales y que resultan muy fáciles de instalar. Los disipadores están avalados por una amplia campaña de ensayos, a partir de la cual se establecen modelos de predicción del comportamiento y de su capacidad última disipativa bajo la acción sísmica.

2.2.1.1.2 Dispositivos a cortante

El sistema estructural de los brazos excéntricos es el precursor de los disipadores a cortante. La mayoría de los disipadores adoptan una geometría similar: sección en doble T con alma rigidizada. Este sistema era de una gran ductilidad (la UBC97 considera a las estructuras que lo incorporan de máxima ductilidad), y que permitía ciclos histeréticos estables y de gran capacidad disipativa siempre que la rigidización fuera correcta. Se han establecido criterios simples para poder determinar la aparición de la abolladura en el alma del elemento, los cuales han sido posteriormente validados para dispositivos disipadores.

Los paneles de cortante son placas de acero rigidizadas (figura 2.21). Su estructura, con rigidizadores distanciados, obliga a espesores relativamente importantes para evitar el problema de la abolladura. Los aceros de alta ductilidad y bajo límite elástico (80 Mpa, 46-60 % de alargamiento) se muestran de gran interés para permitir espesores mayores a igualdad de esfuerzo cortante, con una inferior necesidad de rigidización.

En 1997 se ensaya un diseño preliminar del disipador de cortante. Su cuerpo disipativo está construido a partir de un solo bloque de acero de construcción (figura 2.22) mecanizado por fresado, lo que permite incluir rigidizadores de pequeñas dimensiones y sin necesidad de soldadura en la zona de plastificación. Los primeros resultados obtenidos señalaban una elevada rigidez bajo comportamiento elástico, un desplazamiento de inicio de plastificación pequeño (0.5 mm) y disipación de energía a partir de ciclos histeréticos estables.

En 1998 se analizan el comportamiento de un dispositivo de cortante con sección en doble T y alma rigidizada (figura 2.23), diseñado para actuar como nexo entre un pórtico y su arriostramiento en A. Su unión con los brazos de arriostramiento, mediante bulones, admite solo la acción horizontal, libre de momento y de acción vertical. Con ello se consigue desacoplar el sistema rígido del sistema flexible y reducir sollicitaciones de montaje.

En 1998 se desarrollan un dispositivo (figura 2.24) a partir de placas soldadas de aluminio mediante procedimiento TIG. El disipador permite cargas de plastificación reducidas con espesores superiores a los necesarios con acero dúctil. Para evitar problemas de fragilidad, los rigidizadores del alma están únicamente soldados a las alas, prácticamente además un normalizado final de tensiones. El resultado mas significativo es la elevada ductilidad que se consigue con algunas de las aleaciones usadas, que llega incluso al 30% en ensayo a tracción. Debido a una insuficiente rigidización, los dispositivos manifiestan abolladura del alma, la cual deriva en una disminución de su capacidad disipativa.

2.2.1.1.3 Disipadores basados en la extrusión de metales

Se diseña el PVD (Penguin Vibration Damper) en 1976, el cual permite disipar energía a partir de la extrusión del plomo. La figura 2.25 representa un esquema de este sistema, en el cual el plomo pasa por un orificio, y forzado a un cambio de sección, disipa energía (38, 50). Su respuesta histerética resulta muy estable, tras muchos ciclos de desplazamiento. Un modelo de 200 KN, apto para desplazamientos de hasta 10 mm y que disipa desde 0.05 mm, mantiene su curva histerética sin modificaciones apreciables tras 144000 ciclos a una amplitud de +/- 4 mm.

2.2.1.1.2 Disipadores por fricción

Los sistemas de fricción disipan energía, basándose en el rozamiento existente entre dos superficies en contacto bajo presión y en el deslizamiento entre ellas. La fuerza de fricción en cada conexión es igual al producto de la fuerza normal por el coeficiente de rozamiento.

Existen diversos dispositivos basados en la disipación por fricción. Un sistema (figura 2.26) que permite ser emplazado en la intersección de un arriostramiento en X. Sus curvas histeréticas son prácticamente rectangulares (figura 2.27) con lo cual la energía disipada por ciclo es máxima para un determinado valor de la fuerza de deslizamiento. El mecanismo desliza ante una carga predeterminada, regulable a partir de la presión ejercida por pernos a través de una llave dinamométrica. Existe un método simplificado de diseño sísmico para estructuras que incorporan este sistema disipativo.

A partir de un estudio paramétrico determinan la distribución en altura de la fuerza umbral óptimo de deslizamiento y establecen un espectro de diseño para su determinación práctica. En 1986 se plantea un dispositivo de fricción para ser empleado como conector entre una estructura aperturada y un muro de mampostería armada (figura 2.28), y establecen también un método de determinación de la fuerza umbral que proporciona la respuesta estructural óptima.

El mayor inconveniente que presentan estos dispositivos disipadores es que el coeficiente de fricción, durante el desplazamiento, depende de la velocidad, de la presión normal y de las condiciones de las superficies en contacto. Consecuentemente, resulta difícil garantizar un coeficiente de fricción independiente del tiempo y de las condiciones de los disipadores (09, 19, 50). Sin embargo, se ha observado que la variación del coeficiente de fricción durante el desplazamiento no afecta significativamente a la respuesta estructural si la estructura permanece en rango lineal elástico, mientras que esta influencia puede ser significativa si esta entra en rango no lineal.

En 1998 se diseña un disipador de fricción de concepción distinta a los dos anteriormente descritos. Mientras que los primeros generan las fuerzas de fricción a través de uniones atornilladas, este disipador las obtiene a partir del deslizamiento entre una serie de anillos interiores y exteriores (figura 2.29). El deslizamiento va acompañado de un aumento progresivo de la presión entre las superficies de contacto de los anillos, debido a la interferencia que se produce entre estos durante su desplazamiento. Resultados de los ensayos efectuados mostraron que el comportamiento histerético (figura 2.30) resulta estable, repetible y predecible. Su acción sobre la estructura es autocentradora y su respuesta fuerza – desplazamiento resulta prácticamente independiente del contenido frecuencial de la excitación sísmica (39, 41, 58). Sus características mecánicas y geométricas permiten la incorporación de disipadores en una diagonal rigidizadora o en un arriostramiento en X.

2.2.2 Disipadores con comportamiento viscoelástico

Los disipadores viscoelásticos han sido empleados con éxito, durante los últimos treinta años, para reducir la respuesta de edificios altos ante la acción del viento. De

forma más reciente se ha estudiado su utilización con fines sismorresistentes (04, 35). Los disipadores viscoelásticos sólidos están formados con chapas metálicas unidas con capas finas de material viscoelástico (figura 2.31) y presentan unos ciclos histeréticos característicos elípticos (figura 2.32).

Su acción disipativa se basa en el aumento del amortiguamiento estructural. Presentan algunas ventajas con relación a los disipadores histeréticos:

- i) No precisan de una fuerza umbral para disipar energía
- ii) No cambian su forma significativa los períodos de vibración, con lo cual resulta posible linealizar el comportamiento estructural y realizar una modelización más sencilla.

Como inconvenientes están:

- i) La poca variación del período fundamental no evita el comportamiento resonante.
- ii) Los materiales viscoelásticos, en general, son sensibles a los cambios de temperatura, frecuencia y deformación, y resulta necesario minimizar la influencia de estas variables en sus rangos de servicio en estructuras sismorresistentes para que su comportamiento resulte predecible;
- iii) Para conseguir un aumento del amortiguamiento estructural a valores que reduzcan significativamente la respuesta estructural ante un sismo severo es necesaria una gran cantidad de dispositivos.

En un estudio experimental llevado en 1990 se analizaba la actualización de disipadores viscoelásticos en una estructura de 9 plantas, en escala 1/4, solicitada en una mesa vibradora por señales procedentes de diversos sismos. Entre sus conclusiones destacan:

- i) Que las características dinámicas del edificio no varían de forma significativa: la frecuencia fundamental pasaba de 2.04 Hz a 2.76 Hz, para un aumento de la fracción de amortiguamiento del 0.74% al 8.07% con dispositivos.

- ii) El incremento en temperatura del dispositivo debido a la acción sísmica apenas afectaba a las propiedades dinámicas del sistema.
- iii) Que la teoría de viscoelástica lineal se puede aplicar para describir el comportamiento de los disipadores.

2.3 DISEÑO SISMORRESISTENTE CON DISIPADORES DE ENERGIA

Las estructuras sismorresistentes con disipadores cuentan con los siguientes elementos:

- i) Un sistema principal que conecta las acciones horizontales.
- ii) Un sistema secundario que soporta la mayor parte de las cargas verticales
- iii) Elementos de unión entre el sistema primario y el secundario, donde se sitúan los disipadores histeréticos.

En la figura 2.33, 2.34 y 2.35 se ilustran varias disposiciones posibles. La efectividad del sistema es un tanto mayor cuando mayor es la rigidez del sistema primario en relación al sistema secundario.

El sistema sismorresistente con disipadores, investigado de forma mas extensiva es el de la acción relativa (figura 2.33). Que consiste en una estructura principal flexible aporticada, la cual soporta acciones gravitatorias, y un sistema mas rígido resistente a las acciones horizontales, el cual concentra el proceso disipativo y del que forman parte los disipadores de energía (08, 37, 43, 73). A esta configuración se le denomina “Energy Concentration Type Flexible Stiff Mixed Structure”, y algunos investigadores la consideran como un sistema dual no estándar.

Normalmente, los disipadores se colocan cuando la estructura principal aporticada ya soporta la mayor parte de la carga vertical, de forma que el sistema disipativo se limita a resistir las acciones horizontales.

Tal como se indica en la figura 2.36, el sistema dual no estándar con disipadores, a efectos del análisis del comportamiento y dimensionamiento, se divide en dos subsistemas:

Uno constituido por la estructura principal convencional (subsistema flexible)
El otro consistente en el sistema disipativo (subsistema rígido).

Establecer que los dispositivos no están condicionados por las acciones verticales es una hipótesis adoptada con frecuencia, y que se cumple, en mayor o menor grado, en función de la configuración adoptada por el conjunto de sistemas disipativos (05, 42).

En la figura 2.37 se representan las configuraciones más recurridas. En algunos casos resulta conveniente efectuar el montaje del sistema disipativo con la mayor parte de la carga vertical presente, pues esta puede afectar negativamente al comportamiento de las diagonales y al de los propios disipadores.

El sistema A se ha propuesto y utilizado con los siguientes disipadores:

- i) Dispositivos tipo viscoelástico.
- ii) Disipadores con lámina curvada a flexión.
- iii) Sistema DUR.
- iv) Sistemas de fricción.

El sistema B se emplea básicamente en el dispositivo de fricción. Ambos sistemas presentan como ventajas:

- i) Independencia de las cargas verticales
- ii) Menor inclinación de las barras que en el arriostramiento en A, lo cual supone menores cargas en las diagonales y menores componentes verticales en los disipadores.

Como inconvenientes respecto a los arriostramientos en A se cuentan:

- i) La pérdida de diafanidad y poca capacidad de incluir aberturas
- ii) La mayor longitud de las diagonales y su mayor propensión al pandeo.

El sistema C se ha propuesto o empleado para la sujeción de una amplia variedad de dispositivos:

- i) Del sistema ADAS, con el dispositivo TADAS.
- ii) En varios tipos de disipadores por plastificación por cortante.

El sistema C facilita la inclusión de un paso en su seno, sin embargo supone inconvenientes:

- i) Las diagonales y los disipadores pueden verse afectados por cargas verticales debidas a flechas diferidas en el hormigón o debidas a cargas posteriores a la fijación del sistema, o por acciones verticales de origen sísmico, y
- ii) La mayor inclinación de las diagonales produce componentes verticales en los disipadores.

El sistema E impone una carga vertical considerable a los propios dispositivos, por lo cual deben manifestar una determinada resistencia respecto a este componente. Este sistema se ha propuesto, en el caso de los disipadores de tipo panal.

Las configuraciones D y E se proponen para la rehabilitación de edificios aporticados con particiones de mampostería, reforzando adecuadamente las mismas o partiendo de su capacidad real para su aprovechamiento como elementos estructurales frente a acciones sísmicas. En este último caso, los disipadores actuarían además limitando el valor máximo de las acciones transmitidas a los cerramientos de acuerdo con su capacidad. Para compatibilizar las deformaciones de la estructura aporticada y los cerramientos, se habilitarían espacios entre ambos rellenando con material flexible, tal como se aprecia en la figura 2.37.

Otro aspecto a considerar dentro de las disposiciones constructivas es la distribución vertical del sistema disipativo. En la figura 2.38 se pueden observar

disposiciones con arriostramiento en A y en diagonal. Si bien es cierto que los arriostramientos resultan eficientes para reducir los desplazamientos laterales, resulta que, en comportamiento elástico, aumentan notablemente el cortante de base. La introducción de mecanismos disipativos en el sistema de respuesta horizontal permite controlar de forma efectiva los desplazamientos de entrepiso con valores aceptables del cortante de base. Sin embargo, disposiciones como las de los pórticos 3 y 6, efectivas en la reducción de desplazamientos de entrepiso y en cortante de la base, distribuyen de forma no uniforme las acciones sobre los cimientos, acusando los pilares correspondientes a los pórticos arriostrados a mayores acciones normales y cortantes. Esta situación podría resultar asumible en terrenos firmes, pero puede resultar especialmente crítica en suelos blandos (06). Se analizó numéricamente el comportamiento de los pórticos 4, 5 y 6 asumiendo un comportamiento elastoplástico bilineal en todas sus diagonales y a partir de los acelerogramas correspondientes a un terreno con suelo blando, presentando los pórticos 4 y 5 momentos de volteo inferiores al 10% a los obtenidos con la configuración del pórtico 6.

Otro aspecto a considerar en la distribución vertical, en si resulta mas conveniente instalar disipadores en todas las plantas o solo en alguna de ellas (10, 31). Se realiza un estudio comparativo a partir del análisis numérico del comportamiento ante la acción sísmica de edificios en ambas situaciones:

- i) Con disipadores en cada planta
- ii) Con disipadores en cada 5 plantas y rigidización dela estructura en el resto de las plantas.

La comparación se realiza en tres edificios, de 5, 10 y 15 plantas, donde se adopta una configuración sismorresistente dual no estándar. Los resultados muestran un mejor comportamiento de las estructuras que presentan la segunda distribución, por varias razones:

- i) La entrada de energía resulta notablemente inferior con la distribución de disipadores cada 5 pisos.
- ii) Los disipadores concentrados en cada 5 plantas absorben un mayor porcentaje de la energía introducida al sistema.

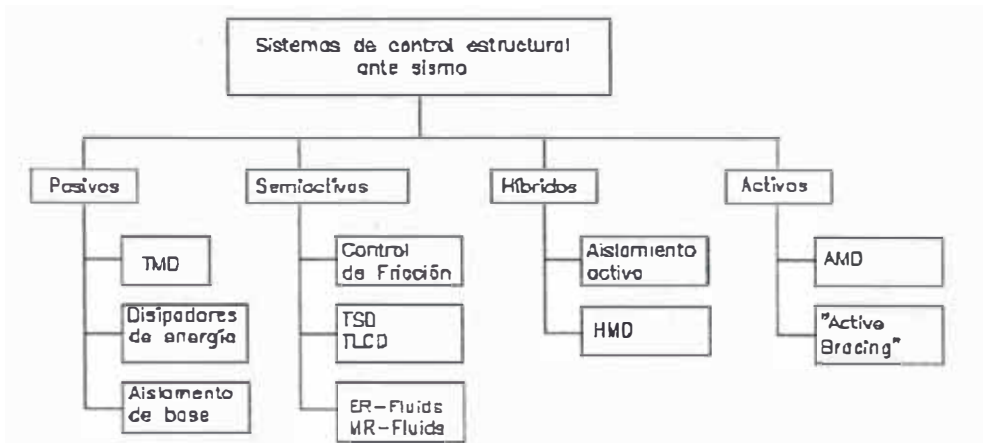


Figura 2.1 Sistemas de control estructural ante sismos



Figura 2.2 Esquema de funcionamiento de un sistema de control activo

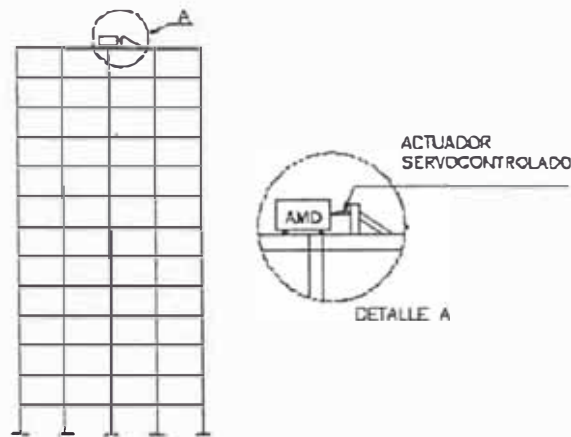


Figura 2.3 Edificio con control de desplazamientos mediante AMD



Figura 2.4 Esquema de funcionamiento de un sistema de control híbrido

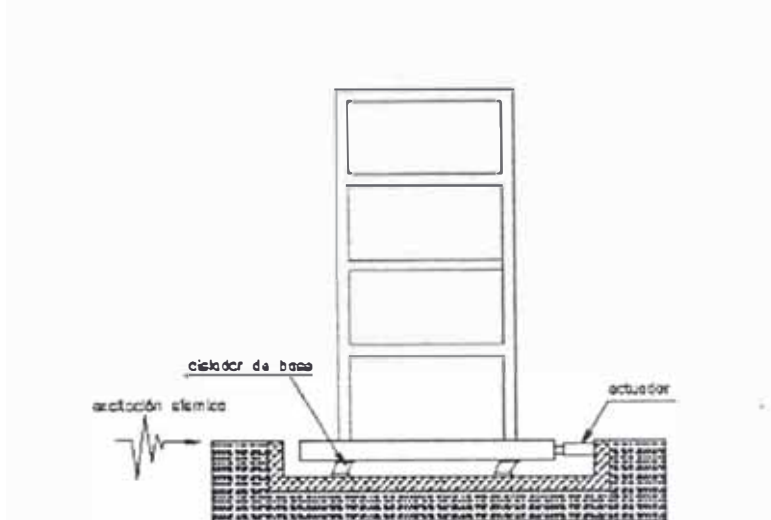


Figura 2.5 Aislamiento de base con control activo de desplazamiento

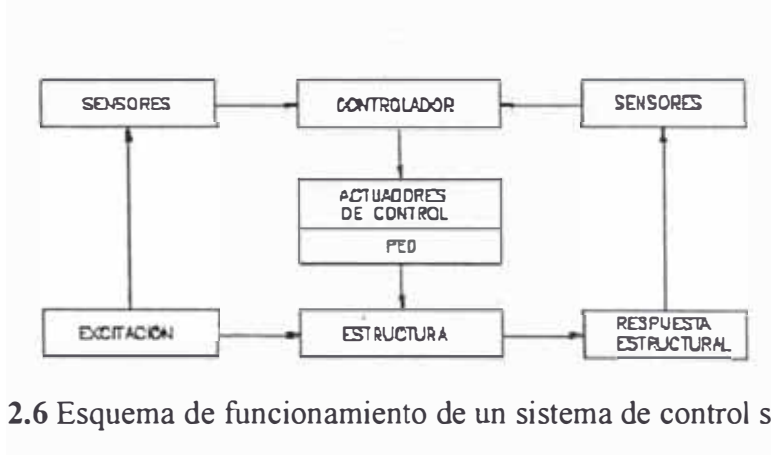


Figura 2.6 Esquema de funcionamiento de un sistema de control semiactivo

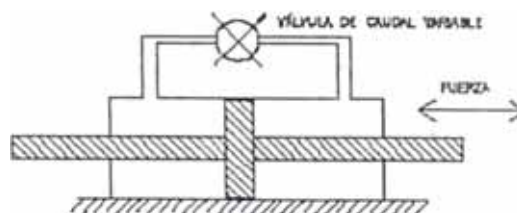


Figura 2.7 Dispositivo para control semiactivo

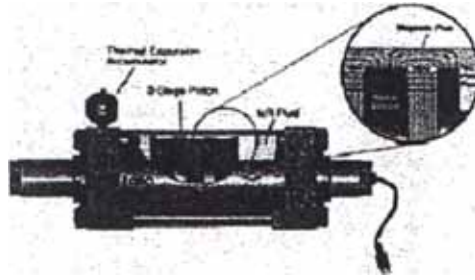


Figura 2.8 Esquema de un amortiguador

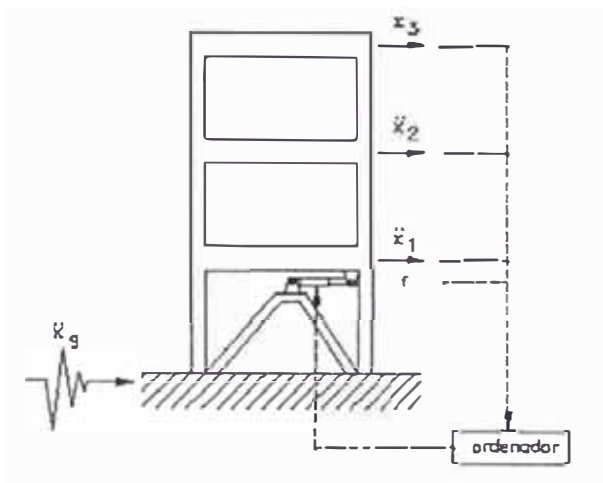


Figura 2.9 Dispositivo para control semiactivo

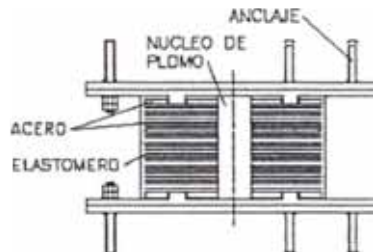


Figura 2.10 Dispositivo de neopreno zunchado con núcleo de plomo

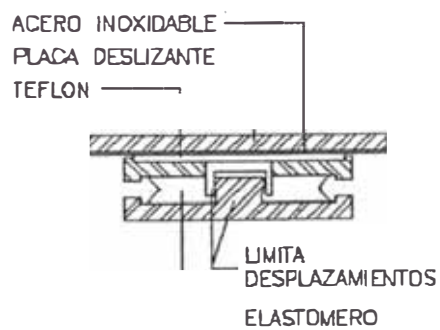
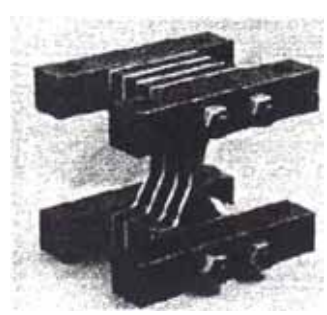
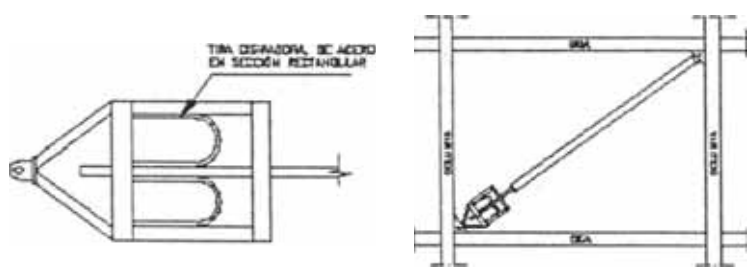
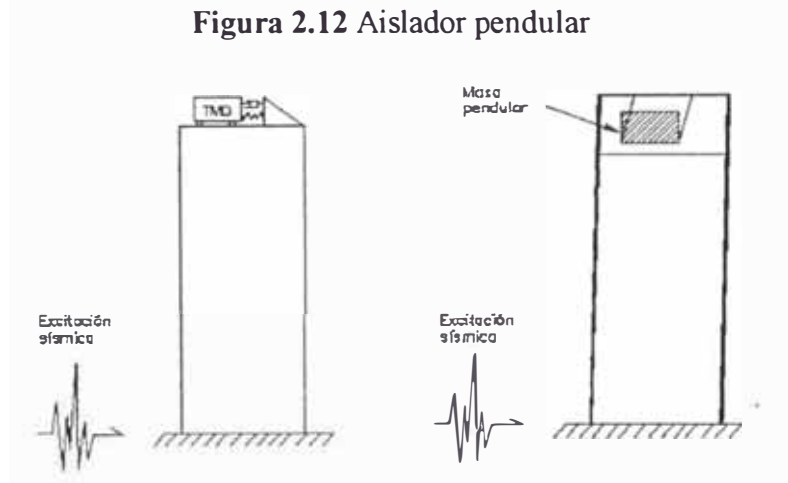
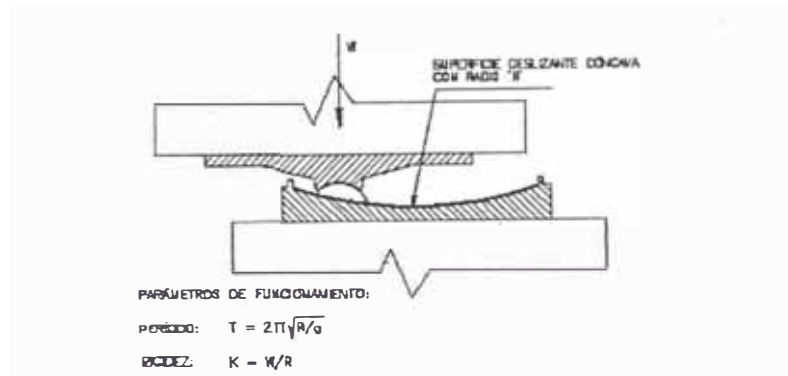


Figura 2.11 Aislamiento de base de fricción



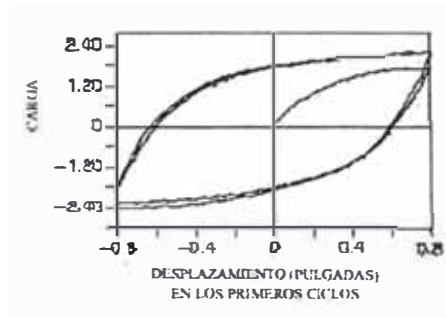


Figura 2.16 Respuesta histerética ADAS en los primeros ciclos de carga

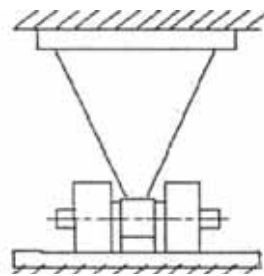


Figura 2.17 Sistema TADAS

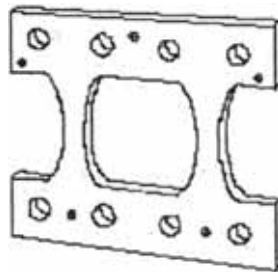


Figura 3.18 Disipador Honeycomb

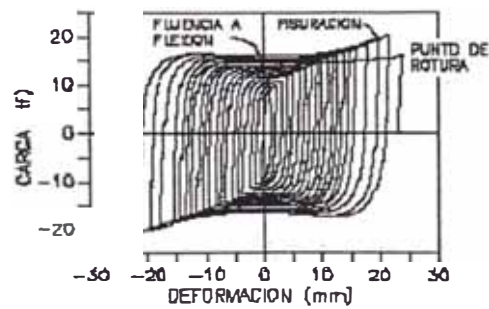


Figura 3.19 Respuesta histerética

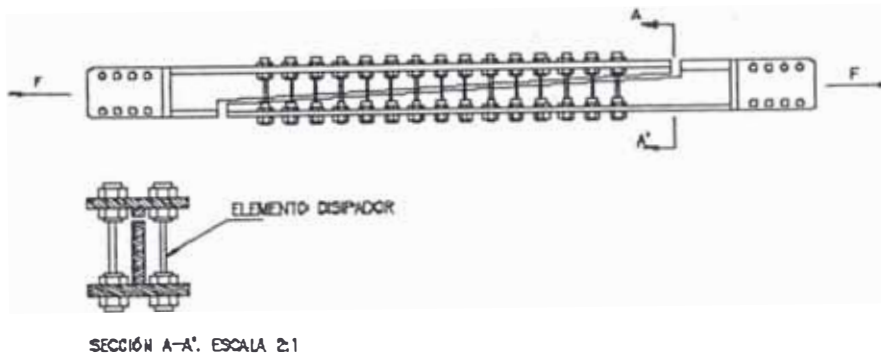


Figura 3.20 Sistema DUR

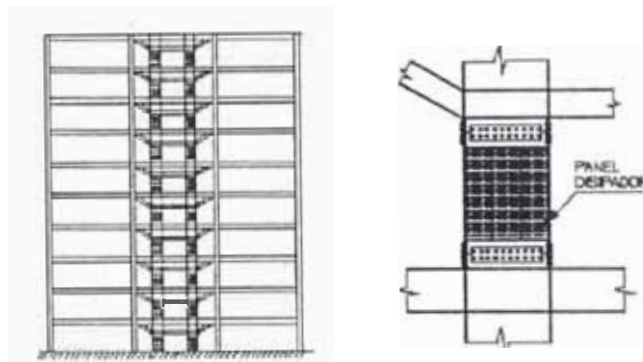


Figura 2.21 Disposición de paneles de cortante

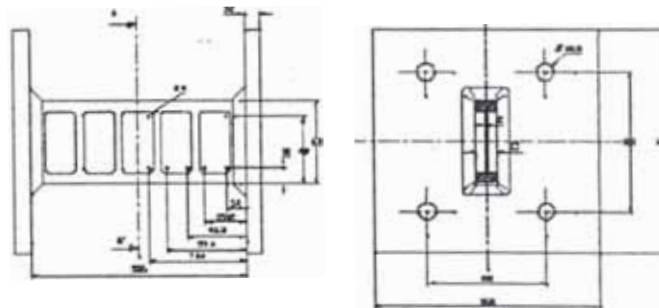


Figura 2.22 Disipador por cortante con su cuerpo disipador (Cahis et al)

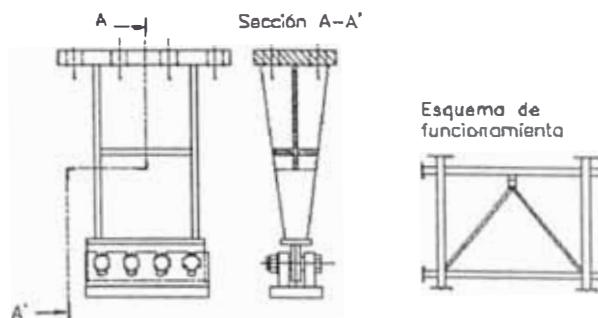


Figura 2.23 Disipador por cortante (Tsai et al)

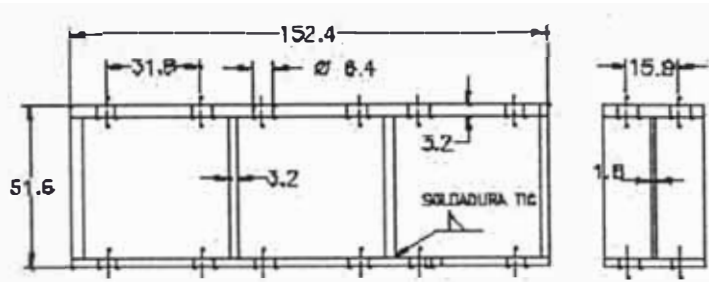


Figura 2.24 Disipador por cortante (Tsai et al)

PLOMO

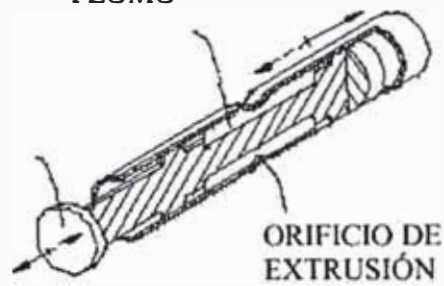


Figura 2.25 Disipador de extrusión

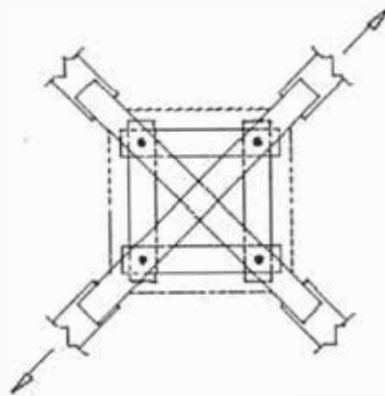


Figura 2.26 Disipador por fricción

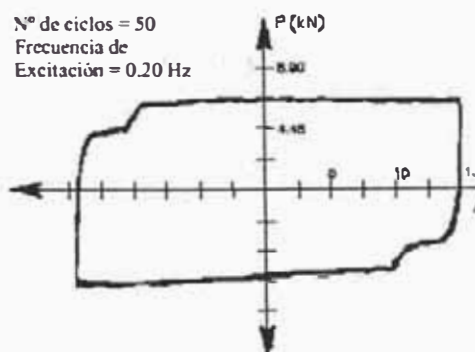


Figura 2.27 Respuesta histerética

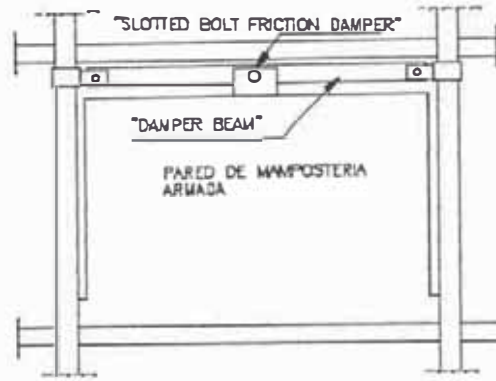


Figura 2.28 Slotted Bolt Friction Damper

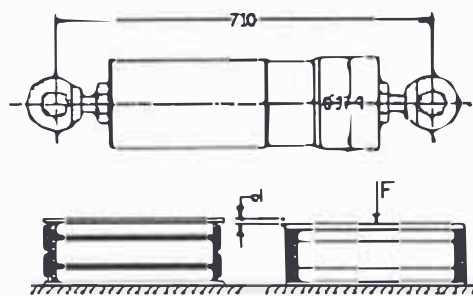


Figura 2.29 Disipador Shapia

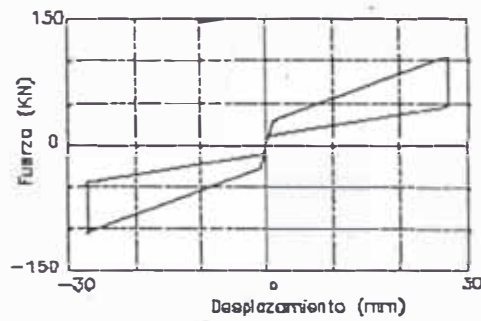


Figura 2.30 Relación carga - desplazamiento

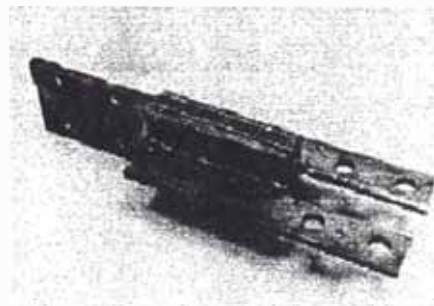


Figura 2.31 Dispositivo viscoelástico

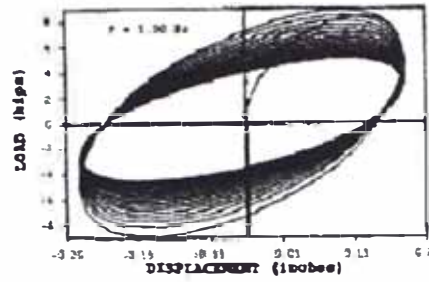


Figura 2.32 Respuesta histerética

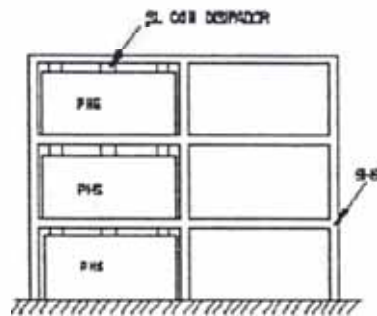


Figura 2.33 Acción relativa

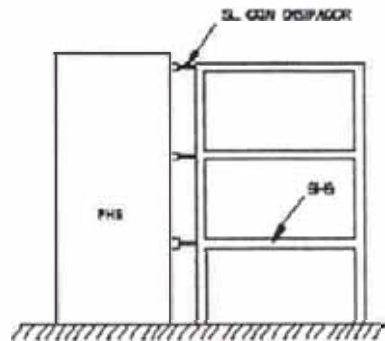


Figura 2.34 Acción absoluta

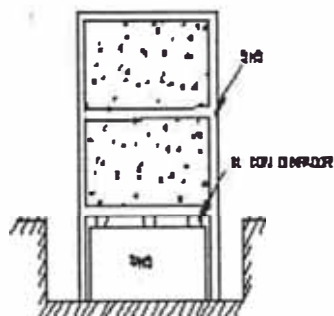


Figura 2.35 Aislamiento de base

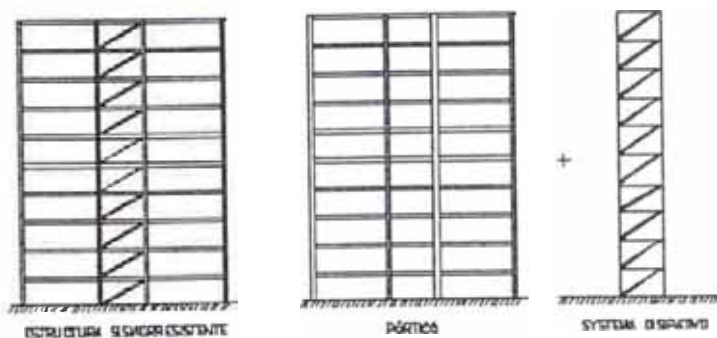


Figura 2.36 Subsistemas estructurales con disipadores de energía

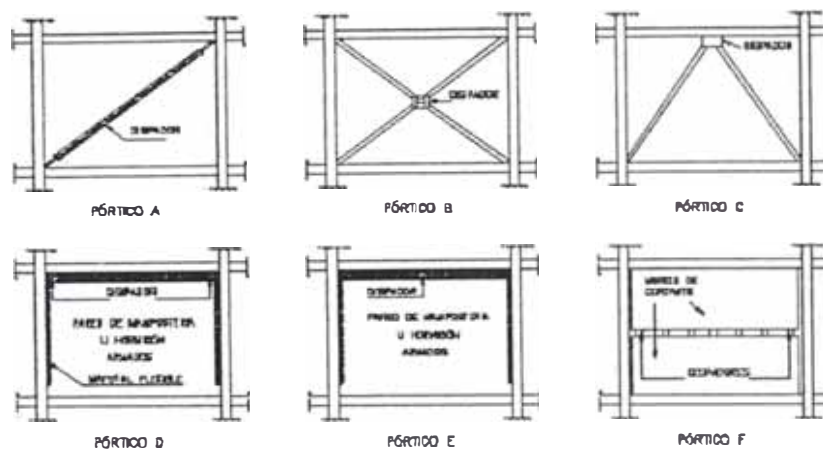


Figura 2.37 Subsistemas estructurales con disipadores de energía

A, B, C y F soluciones adoptadas

D y E soluciones propuestas

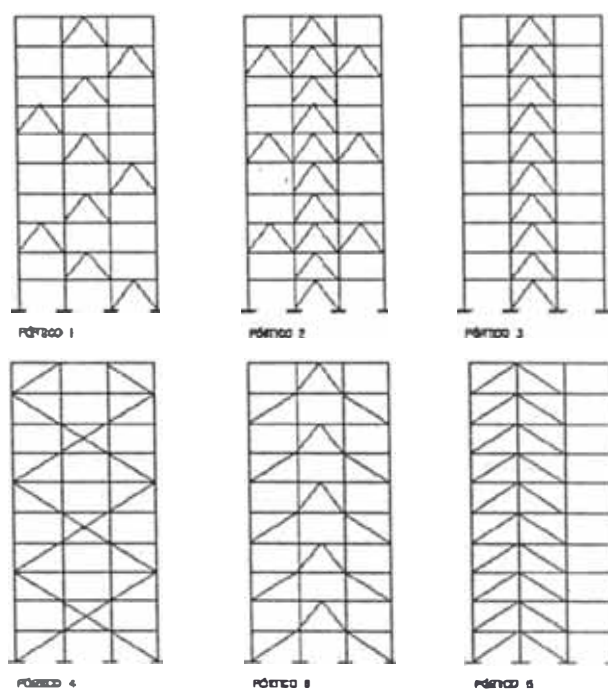


Figura 2.38 Distribución vertical sistema disipativo

CAPÍTULO III

ANÁLISIS TRIDIMENSIONAL INELÁSTICO DE ESTRUCTURAS

La fase mas crítica de un análisis estructural es crear un modelo en la computadora con un finito número de miembros con masas y un finito numero de desplazamientos nodales que simulen el real comportamiento de la estructura. Las masas pueden ser estimadas y las propiedades de rigidez también con adecuada aproximación gracias a los experimentos. Pero las cargas dinámicas, la disipación de energía y las condiciones de borde son difíciles de estimar. Debido a lo complejo del análisis dinámico sísmico inelástico se requieren de simplificaciones para obtener un modelo matemático soluble con las computadoras disponibles.

3.1 ANÁLISIS DINÁMICO TRIDIMENSIONAL

Es recomendable en un análisis tridimensional asociar la dirección principal con la que presenta el modo fundamental de vibración y la dirección secundaria con aquella que tenga 90 grados en relación a la principal.

3.1.1 Equilibrio dinámico

El equilibrio de la fuerza de un sistema de múltiples grados de libertad en función del tiempo puede ser expresado por la siguiente relación (79):

$$F(t)_I + F(t)_D + F(t)_S = F(t) \quad (3.1)$$

En donde los vectores de fuerza en un tiempo t son:

$F(t)_I$ = es un vector de las fuerzas de inercia actuando en las masas de los nudos.

$F(t)_D$ = es un vector del amortiguamiento viscoso, o fuerzas de disipación de energía .

$F(t)_S$ = es un vector de las fuerzas internas cargadas por la estructura

$F(t)$ = es un vector de las cargas externas aplicadas.

Esta ecuación esta basada en las leyes de la fisica y es valida para sistemas no lineales si el equilibrio es formulado con respecto a la geometría deformada de la estructura.

Es importante mencionar que los desplazamientos debidos a acciones sísmicas, los cuales son normalmente brindados por los programas de cómputo, usualmente son desplazamientos relativos; y que las cargas sísmicas en la estructura están aplicadas a la cimentación y no son cargas externas aplicadas a los nudos de la estructura.

3.1.2 Modelo computacional tridimensional

Los efectos torsionales y accidentales deben ser considerados en todas las estructuras. Todas las estructuras deben ser tratadas como sistemas tridimensionales. Las estructuras con planos irregulares, entrantes o pisos blandos pueden causar problemas adicionales si un modelo tridimensional realístico es modelado. Este modelo debe ser creado desde el inicio para luego ser sometido a cargas sísmicas (55).

Solamente los elementos estructurales con rigidez y ductilidad importante deben ser modelados. Los componentes no estructurales pueden ser obviados. Los cortantes y deformaciones axiales pueden ser considerados sin mayor esfuerzo por los programas de cómputo actuales. La rigidez de la losa rígida ha sido aceptada para la mayoría de las estructuras.

Los efectos P-delta deben ser incluidos en todos los modelos estructurales. Estos efectos en el análisis dinámico pueden producir pequeños incrementos en el período de los modos. Una ventaja es que los factores de amplificación del momento para todos los

miembros pueden ser tomados como la unidad en todos los subsecuentes chequeos de esfuerzos (36, 79).

La masa de la estructura puede ser estimada con gran precisión. La mayor suposición requerida es estimar la cantidad de carga viva a ser incluida en la masa. En el caso de utilizar la aproximación del diafragma rígido, el momento rotacional de inercia de la masa debe ser calculado.

3.1.3 Formas de modo y frecuencias tridimensionales

El primer paso en un análisis dinámico modal de un modelo estructural, es el cálculo de las formas de modo tridimensionales y las frecuencias naturales de vibración. Para el cálculo de las funciones de forma ortogonales se han utilizado los vectores Ritz de carga dependiente (79).

Cada forma de modo tridimensional de una estructura puede tener componentes de desplazamiento en todas direcciones. Las magnitudes de las fuerzas y los momentos no tienen significado porque la amplitud de una forma de modo no tiene valor.

3.2 ANÁLISIS TRIDIMENSIONAL NO LINEAL

El análisis dinámico no lineal de sistemas estructurales predefine un número de elementos no lineales que son asumidos que existen. Los vectores Ritz de carga dependiente de la masa y rigidez ortogonal del sistema estructural elástico son utilizados para reducir el tamaño del sistema no lineal a ser resuelto. Las fuerzas en los elementos no lineales son calculados por iteración al final de cada paso. Las ecuaciones modales desacopladas son resueltas exactamente para cada incremento de tiempo. Las ecuaciones de equilibrio son formadas y resueltas en cada incremento de carga (12, 79).

Las ecuaciones fundamentales de equilibrio de fuerza-deformación y compatibilidad son satisfechas. La fuerza exacta de equilibrio del modelo en computadora de una estructura en un tiempo t es expresada por la siguiente ecuación matricial:

$$M \ddot{u}(t) + C \dot{u}(t) + K u(t) + R(t)_{NL} = R(t) \quad (3.2)$$

Donde M, C y K son las matrices de masas, amortiguamiento proporcional y rigidez respectivamente. El tamaño de estas matrices cuadradas es igual al número total de puntos de desplazamientos nodales desconocidos. La matriz de rigidez elástica K no toma en cuenta la rigidez de los elementos no lineales. Los vectores dependientes del tiempo son la aceleración, velocidad y desplazamiento respectivamente. El vector $R(t)_{NL}$ es el vector de fuerza resultante de la suma de las fuerzas en los elementos no lineales y es calculado para cada iteración en cada instante de tiempo.

3.2.1 Aceleración sísmica

Normalmente, 50 puntos por segundo son utilizados para definir un registro de aceleración sísmica, y se asume que la función de aceleración es lineal en cada incremento de tiempo, tal como se muestra en la figura 3.1.

Las velocidades y los desplazamientos pueden entonces ser calculadas de la integración de las aceleraciones y velocidades en cada intervalo de tiempo (79):

$$\ddot{u} = \frac{1}{\Delta t} (\ddot{u}_i - \ddot{u}_{i-1}) \quad (3.3)$$

$$\ddot{u}(t) = \ddot{u}_{i-1} + t \ddot{u} \quad (3.4)$$

$$\dot{u}(t) = \dot{u}_{i-1} + t \ddot{u}_{i-1} + \frac{t^2}{2} \ddot{u} \quad (3.5)$$

$$u(t) = u_{i-1} + t \dot{u}_{i-1} + \frac{t^2}{2} \ddot{u}_{i-1} + \frac{t^3}{6} \ddot{u} \quad (3.6)$$

La evaluación de estas ecuaciones en $t = \Delta t$ produce el siguiente grupo de ecuaciones:

$$\ddot{u}_i = \frac{1}{\Delta t} (\dot{u}_i - \dot{u}_{i-1}) \quad (3.7)$$

$$\dot{u}_i = \dot{u}_{i-1} + \Delta t \ddot{u}_i \quad (3.8)$$

$$\dot{u}_i = \dot{u}_{i-1} + \Delta t \ddot{u}_{i-1} + \frac{\Delta t^2}{2} \ddot{u}_i \quad i=1,2,3\dots \quad (3.9)$$

$$u_i = u_{i-1} + \Delta t \dot{u}_{i-1} + \frac{\Delta t^2}{2} \ddot{u}_{i-1} + \frac{\Delta t^3}{6} \ddot{u}_i \quad (3.10)$$

La integración de los registros sísmicos en el suelo debería producir velocidad cero al final del registro. Excepto en los registros cercanos a la falla sísmica, donde desplazamientos cero podrían ser obtenidos al final del registro. Las aceleraciones sísmicas reales son normalmente corregidas para satisfacer estos requerimientos.

Los desplazamientos son funciones cúbicas en cada incremento de tiempo. Si los desplazamientos son usados como carga sísmica especificada, pequeños pasos o un método de solución de orden superior, basado en desplazamientos cúbicos, debe ser utilizado para el análisis dinámico estructural. Si las aceleraciones son utilizadas como la carga básica, un método de solución de bajo orden, basado en funciones lineales, puede ser usado para resolver el problema de respuesta dinámica.

3.2.2 Método de solución paso a paso

El método de solución más general para el análisis dinámico es un método incremental en donde las ecuaciones de equilibrio son resueltas a incrementos de tiempo Δt , $2\Delta t$, $3\Delta t$, etc. Existen un gran número de métodos de soluciones incrementales. En general, ellos envuelven una solución del juego completo de ecuaciones de equilibrio en cada incremento de tiempo. En el caso del análisis inelástico, puede ser necesario reformar la matriz de rigidez para el completo sistema estructural para cada paso en el tiempo (79). También, la interacción puede ser requerida en cada incremento de tiempo para satisfacer el equilibrio. Como un resultado de los grandes requerimientos

computacionales, puede tomar una significativa cantidad de tiempo resolver los sistemas estructurales con una gran cantidad de grados de libertad.

El amortiguamiento numérico o artificial debe ser añadido a la mayoría de los métodos de solución incremental para obtener soluciones estables. Por esta razón, los ingenieros deben ser muy cuidadosos en la interpretación de los resultados. Para algunas estructuras inelásticas sujetas a movimientos sísmicos, los métodos de solución incrementales son necesarios.

Para sistemas estructurales muy grandes, una combinación del método de superposición modal y el método incremental han resultado ser eficientes para sistemas con un pequeño número de elementos no lineales.

3.2.3 Método de integración numérica

La aproximación más general para resolver la respuesta dinámica de sistemas estructurales es la integración numérica directa de las ecuaciones de equilibrio dinámico. Esto involucra satisfacer el equilibrio dinámico a discretos puntos en el tiempo después de que la solución ha sido definida en el tiempo cero. La mayoría de los métodos usan intervalos iguales de tiempo. Los métodos explícitos no involucran la solución de un grupo de ecuaciones lineales en cada paso. Básicamente, estos métodos utilizan la ecuación diferencial en el tiempo " t " para predecir una solución en el tiempo " $t+\Delta t$ ". En general, todos los métodos explícitos son condicionalmente estables con respecto al tamaño del paso (79).

Los métodos implícitos pretenden satisfacer la ecuación diferencial en el tiempo " t " después de que la solución en el tiempo " $t-\Delta t$ " ha sido encontrada. Estos métodos requieren la solución de un grupo de ecuaciones lineales en cada paso. Los métodos implícitos pueden ser condicionalmente o incondicionalmente estables.

3.2.4 Método de Newmark

En 1959 Newmark presentó el método de integración de paso único para la solución de problemas dinámicos estructurales para cargas sísmicas. Durante los

pasados 40 años, el método de Newmark ha sido aplicado al análisis dinámico de muchas estructuras en ingeniería (79). También ha sido modificado y mejorado por otros investigadores. Para ilustrar el uso del método de integración numérica, consideremos la solución de la ecuación de equilibrio dinámico escrita de la siguiente manera:

$$M \ddot{u}_t + C \dot{u}_t + K u_t = F_t \quad (3.13)$$

El uso directo de las series de Taylor provee una rigurosa aproximación para obtener las siguientes dos ecuaciones adicionales:

$$u_t = u_{t-\Delta t} + \Delta t \dot{u}_{t-\Delta t} + \frac{\Delta t^2}{2} \ddot{u}_{t-\Delta t} + \dots \quad (3.14)$$

$$\dot{u}_t = \dot{u}_{t-\Delta t} + \Delta t \ddot{u}_{t-\Delta t} + \dots \quad (3.15)$$

Newmark truncó estas ecuaciones y las expresó de la siguiente forma:

$$u_t = u_{t-\Delta t} + \frac{\Delta t}{2} \dot{u}_{t-\Delta t} + \frac{\Delta t}{2} \ddot{u}_{t-\Delta t} + \beta \Delta t^2 \ddot{u} \dots \quad (3.16)$$

$$\dot{u}_t = \dot{u}_{t-\Delta t} + \Delta t \ddot{u}_{t-\Delta t} + \gamma \Delta t^2 \ddot{u} \dots \quad (3.17)$$

Si se supone que la aceleración es lineal en el paso, la siguiente ecuación puede ser escrita:

$$\ddot{u} = \frac{(\ddot{u}_t - \ddot{u}_{t-\Delta t})}{\Delta t} \quad (3.18)$$

La sustitución de la ecuación 3.8 en las ecuaciones 3.6 y 3.7 producen las ecuaciones de Newmark en la forma estándar:

$$u_t = u_{t-\Delta t} + \Delta t \dot{u}_{t-\Delta t} + (1/2 - \beta) \Delta t^2 \ddot{u}_{t-\Delta t} + \beta \Delta t^2 \ddot{u}_t \quad (3.19)$$

$$\dot{u}_t = \dot{u}_{t-\Delta t} + (1 - \gamma)\Delta t \ddot{u}_{t-\Delta t} + \gamma \Delta t \ddot{u}_t \quad (3.20)$$

Newmark resolvió ecuaciones (3.19, 3.20 y 3.13) por iteración para cada intervalo de tiempo, para cada desplazamiento de cada grado de libertad del sistema estructural. El término \ddot{u}_t fue obtenido de la ecuación 3.13, dividiendo la ecuación por la masa asociada con el grado de libertad.

En 1962 Newmark formulo el método de Newmark en notación matricial, adicionando rigidez y amortiguamiento proporcional a la masa, y elimino la necesidad de la iteración al introducir la solución directa de las ecuaciones en cada paso. Esto requiere que las ecuaciones 3.19 y 3.20 sean rescritas en la siguiente forma:

$$\ddot{u}_t = b_1 (u_t - u_{t-\Delta t}) + b_2 \dot{u}_{t-\Delta t} + b_3 \ddot{u}_{t-\Delta t} \quad (3.21)$$

$$\dot{u}_t = b_4 (u_t - u_{t-\Delta t}) + b_5 \dot{u}_{t-\Delta t} + b_6 \ddot{u}_{t-\Delta t} \quad (3.22)$$

La sustitución de las ecuaciones 3.21 y 3.22 en la ecuación 3.23 permite el equilibrio dinámico del sistema en el tiempo "t" a ser escrito en términos del desplazamiento desconocido del nudo u_t

$$(b_1 M + b_4 C + K) u_t = F_t + M (b_1 u_{t-\Delta t} - b_2 \dot{u}_{t-\Delta t} - b_3 \ddot{u}_{t-\Delta t}) + C (b_4 u_{t-\Delta t} - b_5 \dot{u}_{t-\Delta t} - b_6 \ddot{u}_{t-\Delta t}) \quad (3.23)$$

3.2.5 El método de Hilber, Hugues y Taylor

El método utiliza el método de Newmark para solucionar la siguiente ecuación modificada de movimiento:

$$M \ddot{u}_t + (1 + \alpha) C \dot{u}_t + (1 + \alpha) K u_t = (1 + \alpha) F_t - \alpha F_t + \alpha K \dot{u}_{t-\Delta t} + \alpha K u_{t-\Delta t} \quad (3.24)$$

Cuando α es igual a cero, el método se reduce al método de aceleración constante. El cual produce disipación de energía en los modos altos. Este método es actualmente utilizado en varios programas de cómputo (79). El desempeño del método es similar al uso del amortiguamiento proporcional de rigidez.

3.2.6 Amortiguamiento viscoso

El amortiguamiento estructural proporciona un amortiguamiento inherente en el sistema estructural. Los procedimientos de análisis aplican un 5% de amortiguamiento viscoso, este porcentaje lo asumen la mayoría de los códigos sísmicos. Comúnmente se asume un amortiguamiento del tipo viscoso por su simplicidad matemática.

El amortiguamiento viscoso especificado es el amortiguamiento de Rayleigh, donde la matriz de rigidez [C], es construida de la matriz de masas [M] y la matriz de rigidez [K]:

$$[C] = \alpha [M] + \beta [K] \quad (3.25)$$

Donde α y β , son coeficientes especificados por el usuario. Estas dos constantes pueden ser calculadas para dos periodos de respuesta, T_1 y T_2 , los cuales tienen asociados radios de amortiguamiento viscosos, λ_1 y λ_2 :

$$\alpha = \frac{4 (T_1 \lambda_1 - T_2 \lambda_2)}{(T_2^2 - T_1^2)} \quad (3.26)$$

$$\beta = \frac{T_1 T_2 (T_2 \lambda_1 - T_1 \lambda_2)}{(T_2^2 - T_1^2)} \quad (3.27)$$

El uso de estas dos constantes, α y β , permite especificar el amortiguamiento exactamente en dos periodos. Para todos los periodos entre estos dos periodos el amortiguamiento será menos que el especificado y para los periodos fuera del rango de estos dos periodos el amortiguamiento será mayor que el especificado. A cualquier periodo T , el amortiguamiento viscoso puede ser calculado como:

$$\lambda = \frac{\alpha T}{4 \pi} + \frac{\beta \pi}{T} \quad (3.28)$$

La figura 3.2 muestra el amortiguamiento total, de las componentes de la masa y la rigidez respectivamente, donde α y β han sido determinadas para proporcionar un amortiguamiento de 5%. El amortiguamiento de masa se incrementa con el incremento de los períodos y el amortiguamiento de rigidez decrece con el incremento del período. Se puede apreciar en la figura 3.2 que el amortiguamiento total se incrementa rápidamente para períodos menores y mayores que los valores especificados.

Cuando la matriz de amortiguamiento es proporcional al de la matriz de masas ($\alpha = 0$), el factor de amortiguamiento es pequeño para las frecuencias altas de vibración. Pero, si el amortiguamiento es proporcional a la matriz de rigidez ($\beta = 0$), el factor de amortiguamiento es mayor para las frecuencias altas de vibración.

3.2.7 Análisis dinámico no lineal

El método básico de aceleración constante de Newmark puede ser extendido al análisis dinámico no lineal. Este requiere que la iteración sea ejecutada en cada paso para satisfacer el equilibrio. También, la matriz de rigidez incremental debe ser formada y triangularizada antes de cada iteración en puntos selectivos en el tiempo. Varios diferentes trucos, incluyendo el método elemento por elemento, deben haber sido desarrollados para minimizar los requerimientos computacionales. También, la triangularización del matriz incremental de rigidez efectiva podría ser evitada introduciendo métodos de solución iterativos.

El método de aceleración constante de Newmark, con la adición de muy pequeñas cantidades de amortiguamiento proporcional de rigidez, es recomendado para el análisis no lineal de sistemas estructurales. Para todos los métodos de integración directa, gran cuidado se debe tomar para que la rigidez proporcional al amortiguamiento no sea eliminada en la respuesta a frecuencias altas (79). El amortiguamiento proporcional de masa no debe ser justificado porque causa fuerzas externas a ser aplicadas a la estructura que reducen el cortante en la base para cargas sísmicas.

En el área del análisis dinámico no lineal de estructuras, no se puede prever un método que siempre convenga. Uno debe siempre chequear el error en la conservación de energía para cada solución obtenida.

3.3 CARACTERÍSTICAS INELÁSTICAS DEL PROGRAMA SAP2000

3.3.1 Método de descarga de las rótulas

Si es necesario durante un análisis tiempo historia no lineal por integración directa, SAP2000 utilizara el método de redistribución local. Este método sólo descarga el elemento conteniendo la rótula a ser descargada. Cuando una rótula esta en un tramo negativo de la curva esfuerzo deformación y las cargas aplicadas causan que la deformación se invierta, el programa aplica una carga temporal, localizada, interna y equilibrada para descargar el elemento. Esto origina la descarga de la rótula. Una vez que la rótula es descargada, la carga temporal es invertida, transfiriendo la carga removida a los elementos vecinos (15). Este proceso es intentado para imitar como la fuerza de inercia puede estabilizar rápidamente un elemento descargándose.

3.3.2 Tolerancias de agrupamiento del evento

La solución del algoritmo no lineal utiliza una estrategia evento a evento para las rótulas en los elementos. Si se tiene una gran cantidad de rótulas en el modelo, esto podría resultar en una gran cantidad de pasos de solución. La tolerancia del agrupamiento del evento es utilizado para agrupar eventos juntos y reducir el tiempo de solución. La tolerancia del agrupamiento del evento es utilizada para la tolerancia de la fuerza del evento y para la tolerancia de deformación del evento (15). La tolerancia de la fuerza del evento y la tolerancia de deformación del evento son radios que son utilizados para determinar cuando un evento actualmente ocurre para una rótula. Esto se puede observar en la figura 3.3

3.3.3 Propiedades de las rótulas plásticas

Para cualquier grado de libertad de un elemento Frame, se pueden asignar las propiedades de las rótulas. El programa SAP2000 calcula las propiedades fuerza deformación basándose en el refuerzo asignado a los extremos del elemento.

Las propiedades de las rótulas por defecto son computadas de las propiedades de la sección del elemento al cual son asignadas. Estas son típicamente basadas en los criterios del FEMA-273 y/o ATC-40 (03, 23).

Las características de las rótulas (15), se muestran en la figura 3.4 y son:

La pendiente entre los puntos B y C es tomada como el 10% de la deformación total por endurecimiento del acero.

Los puntos C, D y E están basados en el ATC-40, tabla 9.6. Los cuatro refuerzos son promediados.

El M_y está basado en el refuerzo del elemento o mínimo refuerzo requerido.

La curva P-M-M tomada es la misma que el momento curvatura en conjunto con la definición de las curvas de interacción de momento-carga axial.

3.3.4 Parámetros de integración en el tiempo

Una variedad de métodos están disponibles para el análisis tiempo historia por integración directa. Debido a que estos están bien documentados no se describirán.

El método utilizado fue el método “Hilber-Hughes-Taylor” (HHT), el cual utiliza un simple parámetro llamado alpha. Este parámetro puede tomar valores entre 0 y $-1/3$. Para valores de $\alpha=0$, el método es equivalente al método de Newmark con valores de $\Gamma=0.5$ y $\beta=0.25$, el cual es lo mismo que el método de la aceleración promedio (también llamado regla trapezoidal). Utilizando valores de $\alpha=0$ ofrece los valores mas altos de precisión de los métodos disponibles, pero puede permitir excesiva vibración en los modos con frecuencias altas (15).

3.3.5 Brazos rígidos en los elementos

El programa puede calcular los brazos rígidos de la conectividad entre las propiedades de los elementos en el modelo. Se puede especificar factores de zona rígida en los elementos. Este es un factor utilizado para definir el porcentaje de la zona especificada a ser tratada como totalmente rígida (15). Las características de los brazos rígidos utilizados se pueden apreciar en la figura 3.5.

3.4 ELEMENTOS NOLINEALES

Los aisladores en la base son uno de los elementos no lineales más comunes utilizados en diseño sismorresistente. Pero también son bastante utilizados los disipadores mecánicos de energía y las rótulas plásticas en los elementos.

3.4.1 Propiedades de los elementos con rótulas plásticas

Son elementos tridimensionales donde el usuario debe definir un sistema de ejes locales de referencia 1-2-3 para definir las propiedades locales no lineales del elemento y así interpretar los resultados. Los tres desplazamientos y las tres rotaciones son posibles en ambos puntos I y J y pueden ser expresados en el sistema de referencias global X-Y-Z o en el local 1-2-3. Las matrices de transformación de fuerza y desplazamiento para este elemento no lineal son las mismas que para el elemento viga (79). Cada elemento tridimensional tiene seis desplazamientos de cuerpo rígido, y el equilibrio del elemento puede ser expresado en términos de los seis desplazamientos relativos.

3.4.2 Propiedades plásticas generales

El modelo plástico está basado en el comportamiento histérico propuesto por Wen (1976), el cual permite una mayor flexibilidad y precisión (06). En este modelo cada grado de libertad de deformación puede especificarse independientemente de las propiedades plásticas uniaxiales. Todas las deformaciones internas son independientes (figura 3.6).

Si no se especifican las propiedades no lineales para un grado de libertad, este grado de libertad se comporta linealmente utilizando la rigidez efectiva, la cual puede ser cero.

El elemento general plástico puede ser usado para modelar varios tipos diferentes de materiales con propiedades plásticas (79). Las propiedades fundamentales y el comportamiento del elemento se ilustran en la figura 3.7. Donde k_e es la rigidez lineal inicial, k_y es la rigidez de fluencia y d_y es la deformación de fluencia.

La relación fuerza-deformación es calculada de la siguiente expresión:

$$F = k_y d + (k_e + k_y) e \quad (3.25)$$

Donde d es la deformación total y e es el término de la deformación elástica y tiene un rango de $\pm d_y$. Es calculado en cada paso por integración numérica de una de las siguientes ecuaciones:

$$\text{Si } d'e \geq 0 \quad \dot{e} = (1 - \left| \frac{e}{d_y} \right|^n) d' \quad (3.26)$$

$$\text{Si } d'e < 0 \quad \dot{e} = d' \quad (3.27)$$

La siguiente aproximación de diferencias finitas para cada paso puede ser hecha:

$$\frac{d' = d_t - d_{t-\Delta t}}{\Delta t} \quad (3.28)$$

$$\dot{e} = \frac{e_t - e_{t-\Delta t}}{\Delta t} \quad (3.29)$$

El algoritmo de solución numérica para un elemento plástico en cada incremento de tiempo Δt , en el tiempo t para la iteración i , se muestra a continuación:

Cambio en la deformación para cada paso Δt en el tiempo t para la iteración i :

$$v = d_i^{(i)} - d_{t-\Delta t} \quad (3.29)$$

Cálculo de la deformación elástica para la iteración i :

$$Si \quad v e_i^{(i-1)} \leq 0 \quad e_i^{(i)} = e_{t-\Delta t} + v \quad (3.30)$$

$$Si \quad v e_i^{(i-1)} > 0 \quad e_i^{(i)} = e_{t-\Delta t} + \left(1 - \left| \frac{e_{t-\Delta t}}{dy} \right|^n \right) v \quad (3.31)$$

$$Si \quad e_i^{(i)} > dy \quad e_i^{(i)} = dy \quad (3.32)$$

$$Si \quad e_i^{(i)} < -dy \quad e_i^{(i)} = -dy \quad (3.33)$$

Cálculo de la fuerza iterativa:

$$f_i^{(i)} = ky d_i^{(i)} + (ke - ky) e_i^{(i)} \quad (3.34)$$

3.4.3 Propiedades de los disipadores de energía viscosos

Cada grado de libertad de deformación se puede especificar independiente de las propiedades de amortiguamiento (13). Las propiedades del amortiguamiento están basados en el modelo de Maxwell (Malvern, 1969) teniendo un disipador en serie con un resorte, tal como se muestra en la figura 3.8.

La relación fuerza-deformación no lineal del disipador esta dado por:

$$F = k d_k = c d_c c^{exp} \quad (3.35)$$

Donde K es la constante de rigidez del resorte, c es el coeficiente de amortiguamiento, c^{exp} es el exponente de amortiguamiento, dk es la deformación a lo

largo del resorte, y d_c es la deformación en el disipador. El exponente de amortiguamiento debe ser positivo y su rango puede variar de 0.2 a 2.0.

Si el comportamiento físico es entendido, es posible que un algoritmo de solución iterativo sea desarrollado para simular el comportamiento del dispositivo disipador de energía. La deformación total en el disipador debe ser calculada para evaluar el equilibrio en el elemento en cada paso (79). La ecuación de diferencias finitas es usada para estimar la deformación del disipador en el tiempo t :

$$e_t^{(i)} = e_{t-\Delta t} + \int_{t-\Delta t}^t \dot{e}_t^{(i)} dt = e_{t-\Delta t} + \frac{\Delta t}{2} (\dot{e}_{t-\Delta t} + \dot{e}_t^{(i)}) \quad (3.36)$$

Un resumen del algoritmo iterativo numérico es mostrado a continuación:

- Fuerza estimada del disipador desde la última iteración:

$$f_s^{(i)} = k_s (d_t^{(i)} - e_t^{(i-1)}) \quad (3.37)$$

- Velocidad estimada del disipador:

$$\dot{e}_t^{(i)} = \left(\frac{f_s^{(i)}}{c} \right)^{1/N} \text{seno} (f_s^{(i)}) \quad (3.38)$$

- Deformación estimada del disipador:

$$e_t^{(i)} = e_{t-\Delta t} + \frac{\Delta t}{2} (\dot{e}_{t-\Delta t} + \dot{e}_t^{(i)}) \quad (3.39)$$

- Cálculo de la fuerza iterativa total:

$$f_t^{(i)} = k_p d_t^{(i)} + k_s (d_t^{(i)} - e_t^{(i)}) \quad (3.40)$$

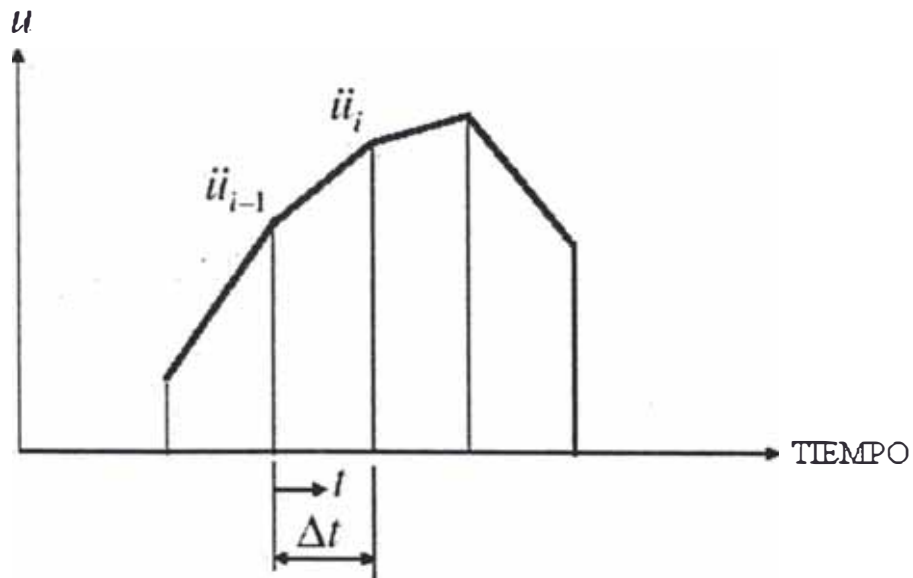


Figura 3.1 Incremento de tiempo en el registro sísmico

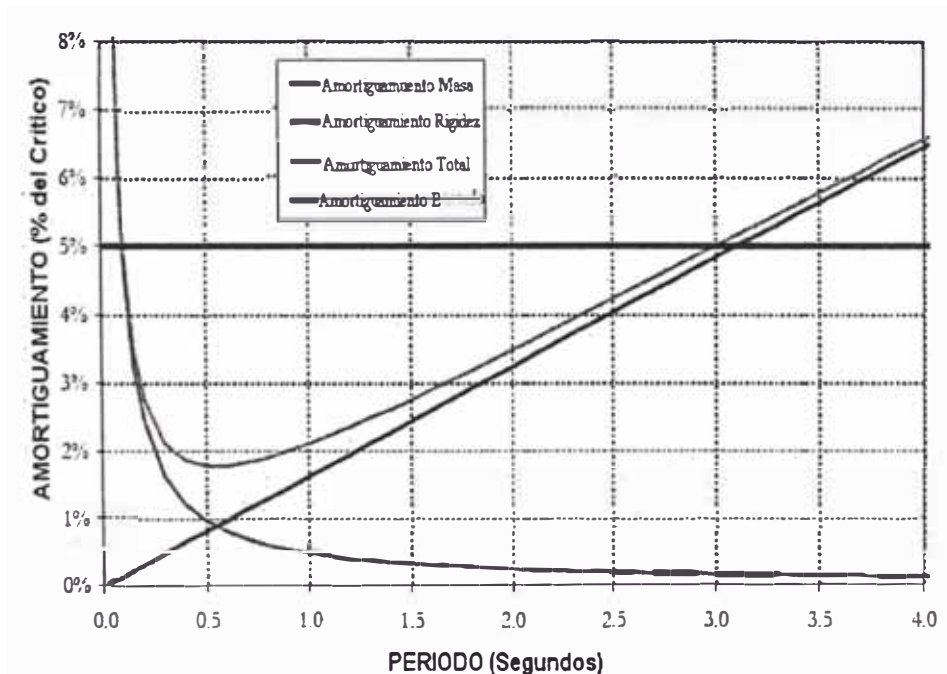


Figura 3.2 Amortiguamiento viscoso de Rayleigh

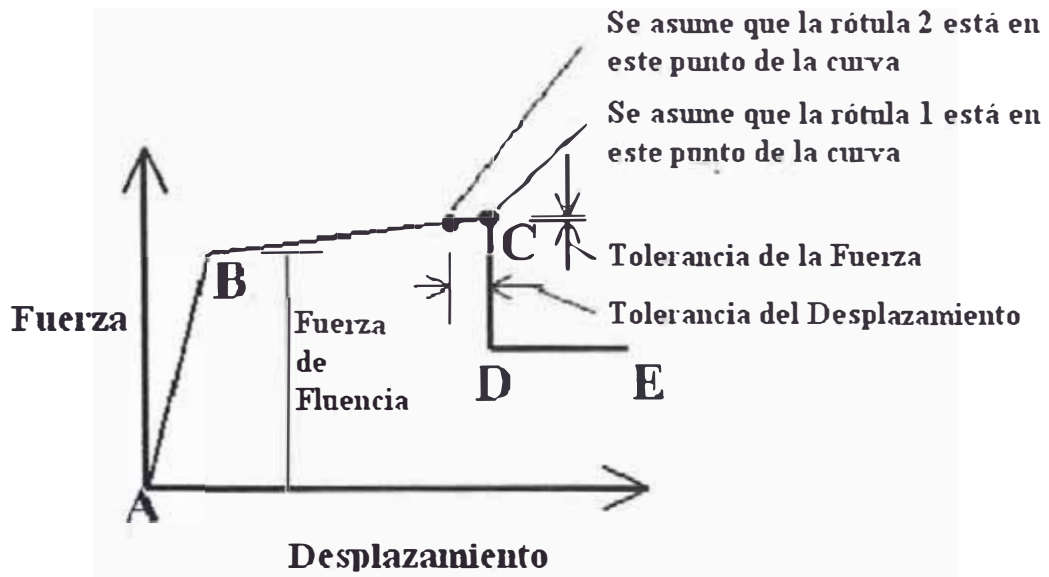


Figura 3.3 Tolerancia de agrupamiento del evento

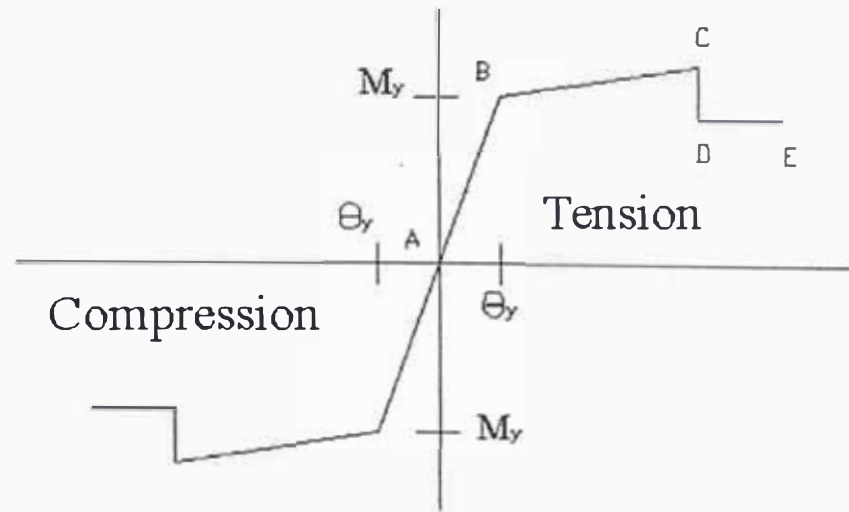


Figura 3.4 Curva momento-rotación de las rótulas plásticas

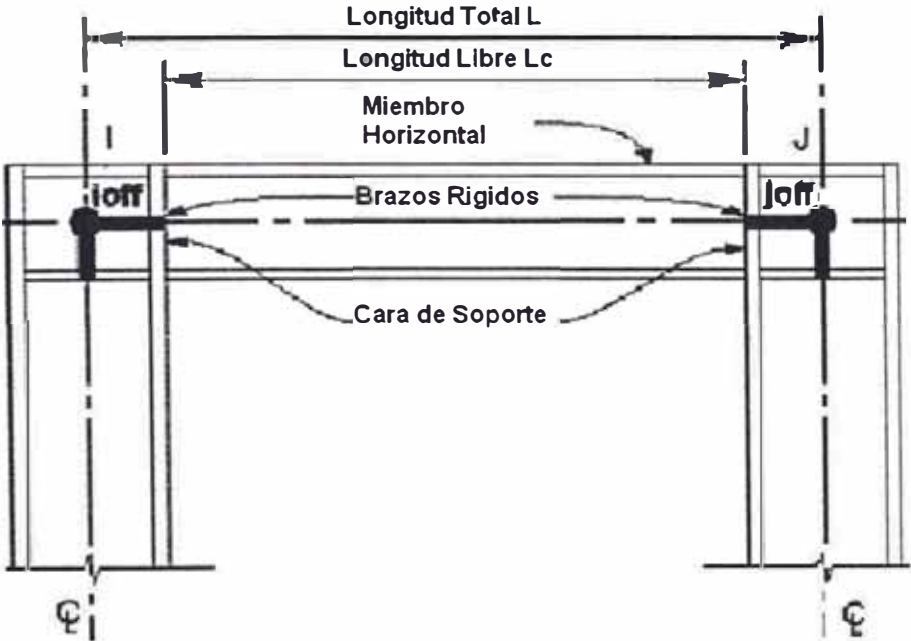


Figura 3.5 Brazos rígidos en los elementos

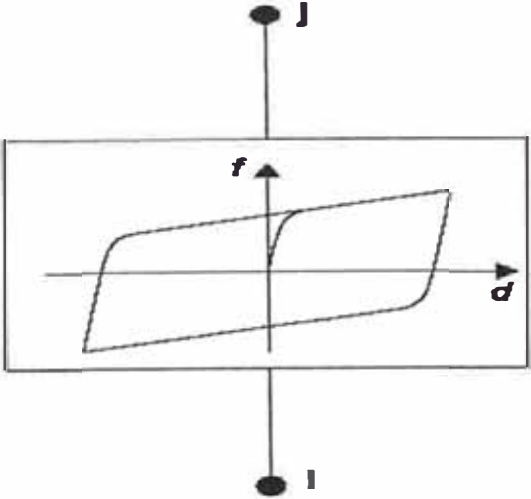


Figura 3.6 Comportamiento histerético del modelo de Wen

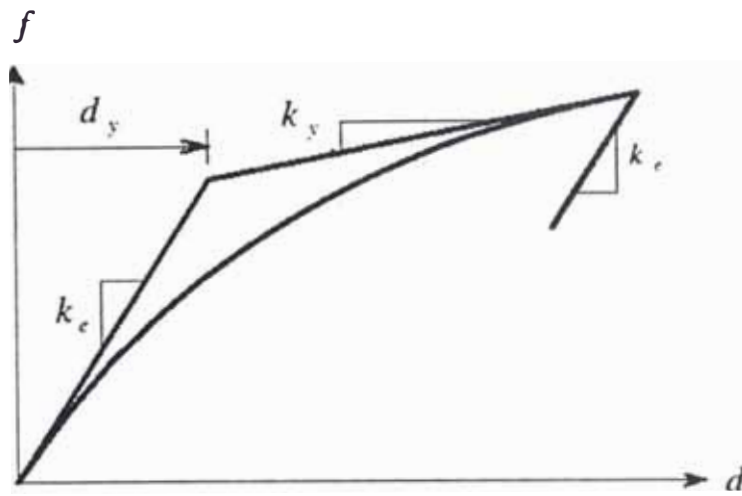


Figura 3.7 Comportamiento fundamental del elemento plástico

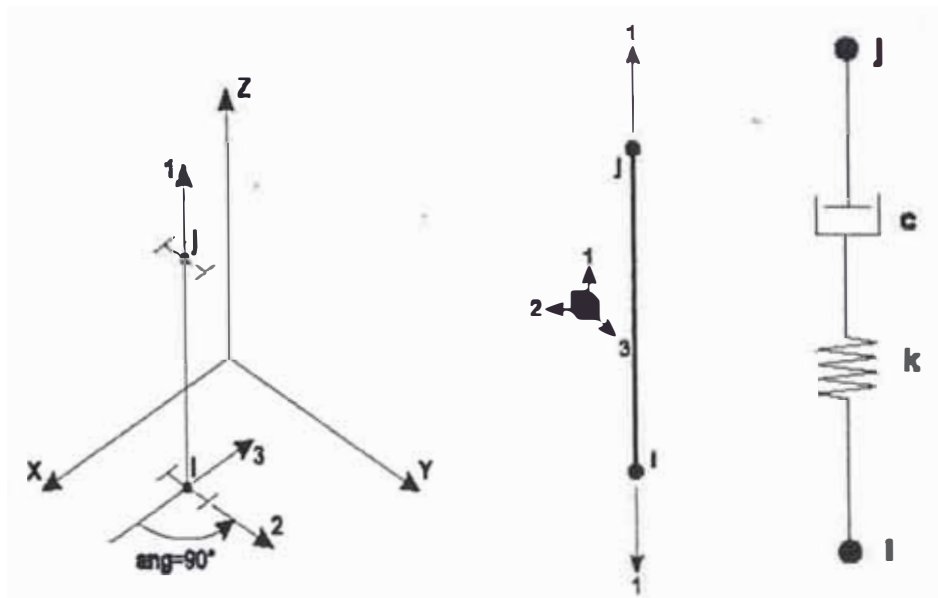


Figura 3.8 Características del modelo del disipador viscoso

CAPITULO IV

RESPUESTA INELÁSTICA DEL EDIFICIO INICIAL

4.1 ESTRUCTURA A EVALUAR

Para el presente trabajo de investigación se escogió un edificio de concreto armado ya construido (Figura 4.1). La finalidad es realizar un análisis dinámico inelástico tiempo historia de una estructura real, modelándola de tal manera que brinde una visión mas clara del comportamiento real de una estructura, en comparación a lo que se obtendría al realizar un análisis de una estructura ideal; además, las características y las geometría de los elementos estructurales son típicas en lo referente al diseño y construcción empleados en el Perú (52).

El edificio analizado estará sujeto a un registro sísmico de aceleración peruano. Primeramente se evaluó el registro completo y luego el registro en forma parcial. También se normalizo el registro sísmico a un valor máximo de aceleración de 400 y de 600 gals. Se utilizó la aceleración de 400 gals debido a que es la aceleración máxima del terreno para la costa peruana con una probabilidad de 10% a ser excedida en 50 años. Y se utilizó la aceleración de 600 gals, debido a que es la aceleración anterior afectada por un factor de 1.5, el cual es el más alto factor que se puede aplicar a las edificaciones según su categoría. (56)

4.1.1 Ubicación de la estructura

El edificio analizado se encuentra ubicado en la cuadra 13 de la avenida Arenales, distrito de Jesús Maria, en el departamento de Lima - Perú.

4.1.2 Características de la estructura

La estructura de concreto armado tiene 31 niveles y esta compuesta de pórticos y muros de corte. Comprende 03 niveles de sótano, 03 niveles para locales comerciales y 23 pisos típicos, estos últimos similares. La altura del modelo considerando sótanos es de 109.66 m.

El proyecto estructural original se desarrolló en 1969, de acuerdo a las Normas de Diseño Sismorresistente vigentes a la fecha (80). En 1980 se reforzó la estructura adecuándola a la Norma de Diseño Sismorresistente vigente de 1977.

4.1.3 Geometría de la estructura

La planta de los niveles de sótano de toda la estructura de concreto armado se muestra en la figura 4.2 y las plantas típicas de los niveles superiores se aprecian en la figura 4.3, así como las direcciones consideradas para el análisis sísmico.

Las alturas de entrepiso, pesos y masas utilizados en el modelo se muestran en la tabla 4.1. Las dimensiones de los elementos se muestran en la tabla 4.2.

4.1.4 Detalles del reforzamiento

Las dimensiones de las vigas y las áreas de acero utilizadas en los elementos de la estructura se muestran en la tabla 4.3 (80). Estas áreas de acero corresponden al refuerzo longitudinal por flexión y son suficientes para definir las propiedades plásticas de la sección (75).

Se sobreentiende que para el diseño final es necesario definir el refuerzo por corte de manera que se garantice un comportamiento adecuado de la estructura. Los momentos de fluencia en los extremos de las vigas se presentan en la misma tabla.

Las áreas de acero utilizados en las columnas, necesarios para la determinación de las rotulas plásticas en los extremos de los elementos, se presentan en la tabla 4.4

4.1.5 Características de los materiales

Las características del concreto y del acero especificadas para el diseño son:

$f'c = 350 \text{ kg/cm}^2$	(elementos verticales en sótanos)
$f'c = 280 \text{ kg/cm}^2$	(elementos verticales en locales)
$f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$	(elementos verticales en pisos típicos y todos los elementos horizontales)

$$E_c = 15000 \sqrt{f'c}$$

$$G_c = 83604.23, 96537.69 \text{ y } 107932.31 \text{ kg/cm}^2$$

$$\mu = 0.30$$

$$f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$$

$$E_s = 2000000 \text{ kg/cm}^2$$

Se consideraron zonas rígidas en vigas, equivalente al 100% de la distancia del eje a la cara de la columna para cada extremo de la viga (73). También se considera como inercia de las vigas el 80% de la inercia de la sección bruta para tomar en cuenta el agrietamiento (44).

4.2 REGISTROS SISMICOS CONSIDERADOS

En el análisis inelástico la onda sísmica es un parámetro importante. Se realizó el análisis dinámico inelástico del edificio considerando el siguiente registro sísmico:

Sismo Lima-Perú, 17 de Octubre de 1966, Componente N08E, aceleración máxima de 269.3 gals.

El gráfico de este registro sísmico se muestra en la figura 4.4, habiéndose escogido la componente que presenta la máxima aceleración en la base de los eventos sísmicos registrados en Lima-Perú.

Debido a la gran cantidad de pasos de un registro sísmico completo, lo cual genera mucho tiempo y espacio de cómputo, se ha considerado un registro con una

duración de 15 segundos, el cual se muestra en la figura 4.5. El tramo fue escogido de tal manera que la aceleración máxima del sismo esté contenida en el registro parcial y que la respuesta elástica de los registros completo y parcial sea similar. Para lo cual se obtuvieron los espectros de respuesta de velocidad de ambos registros, mostrados en las figuras 4.6 y 4.7. Así mismo se obtuvieron los espectros de respuesta de aceleración, mostrados en las figuras 4.8 y 4.9. Observándose una respuesta muy aproximada en el tiempo.

4.3 RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS

4.3.1 Influencia de la duración del sismo

En las figuras 4.6 y 4.7 se presentan los espectros de respuesta elástico para el registro sísmico completo y para el registro parcial. Ambos espectros muestran una pseudo velocidad espectral similar, no existiendo variación importante entre ambos. Esto debido a que en el tramo escogido ha tomado las excitaciones más importantes.

Se presentan en las figuras 4.8 y 4.9 los espectros de aceleraciones del registro parcial y del completo. Ambos presentan pseudo aceleraciones espectrales similares, para los diferentes niveles de amortiguamiento.

De las figuras 4.10 y 4.11, se puede observar que las distorsiones lineales de entrepiso son bastante similares a lo largo de la estructura, notándose una pequeña variación en la altura de los entrepisos superiores en el sentido Y. De los figuras mostradas, se puede afirmar que los desplazamientos son bastantes similares, no existiendo mucha diferencia entre ambas respuestas.

4.3.2 Periodos naturales y modos de vibración

Se realizó en análisis modal considerando tres grados de libertad por nivel. En la tabla 4.4, se muestran los períodos, frecuencias y masas participativas del modelo estructural (Figura 4.12 a 4.19). Encontrándose un mayor periodo en el sentido X siendo este el mas flexible, seguido del eje Y; Además de una participación importante del

tercer modo que es el torsional. Se presentan los resultados considerando aquellos modos de vibración cuya suma de masas efectivas sea por lo menos 90% de la masa de la estructura (56).

4.3.3 Influencia del nivel de aceleración

Del análisis considerando los registros parciales se comparan las respuestas para los tres niveles de aceleración del sismo, el correspondiente al máximo corregido, luego amplificado a 400 gals y finalmente a 600 gals. Esto con el objetivo de simular la severidad de los sismos. Los resultados se presentan en las figuras 4.20 y 4.21.

En la tabla 4.5 se presentan las variaciones de las fuerzas cortantes en cada nivel del edificio sometido a los diversos niveles de aceleración en la base. Se observa su incremento importante al pasar de 400 a 600 gals.

El efecto del nivel de aceleración y velocidad es muy importante debido a que su incremento modifica la formulación de rótulas plásticas en la estructura, lo que hace posible un mejor estudio del mecanismo de formulación de rótulas plásticas. Los resultados se presentan en las figuras 4.26 a 4.29.

4.3.4 Influencia de la deformación máxima

Para los registros parciales se han comparado los desplazamientos máximos positivos, donde se puede observar una importante diferencia en los desplazamientos en relación a la altura, tal como se puede observar en la figura 4.24 y 4.25.

En las figura 4.22 se aprecia que las distorsiones son mayores a la altura media del edificio en el eje X, debido a su esbeltez. En la figura 4.23, se puede apreciar que las distorsiones en los niveles superiores son mayores que la de los niveles inferiores, para los tres niveles de aceleración. Esto debido a la rigidez de los niveles inferiores. Además, existe una mayor deformación en el sentido del eje X, tal como lo muestran las tablas 4.6 y 4.7. La definición adoptada para la deformación máxima debe depender de la reducción en la capacidad de transmisión de carga que se pueda tolerar, o el grado de daño que pueda tolerarse a la estructura.

4.3.5 Desplazamiento real de piso

El programa utilizado cuando realiza el cómputo del desplazamiento del análisis dinámico inelástico, lo calcula a cada intervalo de tiempo. Haciendo un análisis detallado se puede observar en las figuras 4.36 a 4.41, que cada nivel de piso tiene una respuesta tiempo-historia de desplazamiento diferente. Debido a esto existe una marcada diferencia entre la envolvente de desplazamientos máximos y los desplazamientos máximos de cada piso que ocurren a distintos tiempos.

Todos los niveles de piso no se desplazan simultáneamente al mismo tiempo, tampoco los momentos máximos de resistencia se presentan simultáneamente en todas las secciones. Esto hace complicado el entendimiento del mecanismo de formación de rótulas plásticas y posible mecanismo de colapso de la estructura.

4.3.6 Respuesta inelástica

Ahora se discutirá la respuesta inelástica en el tiempo de las fuerzas cortantes, para lo cual se presentan las figuras 4.30 a 4.35 correspondientes a la respuesta tiempo-historia para los diferentes niveles de aceleración del sismo utilizado.

Lo que se ha podido observar en las páginas anteriores se ve reflejado de alguna manera en la respuesta tiempo-historia para el caso del registro sísmico considerado. Se aprecia tanto en velocidades como aceleraciones reales de piso que la respuesta máxima ocurre en relación a la excitación a la que es sometida la estructura en el tiempo de exposición (Figuras 4.42 a 4.53)

4.3.7 Balance energético

Mediante el software disponible bajo el enfoque del análisis dinámico, se puede conocer la energía almacenada y disipada en la estructura.

En las figuras 4.54 a la 4.56, se presenta la energía del sismo y los distintos tipos de energía, tales como la Energía Cinética, Energía Potencial y Energía de

Amortiguamiento Modal. Se presentan estas energías para los distintos niveles de aceleración a los que fue sometida la estructura.

En los gráficos se presenta la energía de amortiguamiento modal, que fue especificada en 5% del amortiguamiento crítico. Esta energía es importante para compararla con la cantidad de la energía disipada por los disipadores de energía a utilizarse. Esto es importante debido a que la disipación de energía representa daño estructural en el sistema.

Se puede advertir que la energía cinética y la energía potencial presentan un bajo porcentaje de la energía del sismo. La energía cinética es más importante entre los 5.0 y los 9 segundos aproximadamente. La energía potencial es más importante entre los 6.5 y los 10.0 segundos aproximadamente. Entonces la energía disipada por la estructura debido al amortiguamiento modal es de mayor significación que estas energías.

4.3.8 Mecanismo de formación de rótulas plásticas

Se ha estudiado el mecanismo de formación de rótulas plásticas para el registro empleado con una aceleración máxima de 269.3 gals, luego se escaló a 400 y 600 gals, para simular la severidad de los sismos. El proceso se presenta en la figura 4.57, para una aceleración de 269.34 gals. No se obtuvieron rotulas plásticas para esta aceleración.

Para los niveles de aceleración de 400 y de 600 gals, se analizaron en cada instante de tiempo donde ocurra una formación de rótulas plásticas importante, con la finalidad de tener una idea del proceso del mecanismo durante la duración del evento sísmico. Lo cual se muestra en las figuras 4.58 a 4.61. De esta manera se puede comparar de una manera objetiva los mecanismos de formación de rótulas plásticas para los tres niveles de aceleración del mismo evento sísmico, se puede apreciar una diferencia entre dichos procesos, lo cual es debido al nivel de aceleración.

Se puede afirmar que el mecanismo de formación de las rótulas plásticas en el edificio analizado sometido a los niveles de aceleración mencionados es estable, y por lo tanto la estructura no llega al colapso.

Tabla 4.1 Alturas, pesos, masas e inercias rotacionales (MR3)

NIVEL	ALTURA (m)	PESO (t)	MASA (t.s ² /m)	MR3 (t.s ² .m)
Techo	2.65	729.659	74.455	14299.732
Tanque	2.85	888.037	90.616	17403.597
Azotea	3.50	1417.276	144.620	35395.479
Piso 22	3.50	1597.077	162.967	39885.884
Piso 21	3.50	1597.077	162.967	39885.884
Piso 20	3.50	1597.077	162.967	39885.884
Piso 19	3.50	1597.077	162.967	39885.884
Piso 18	3.50	1597.077	162.967	39885.884
Piso 17	3.50	1597.077	162.967	39885.884
Piso 16	3.50	1597.077	162.967	39885.884
Piso 15	3.50	1597.077	162.967	39885.884
Piso 14	3.50	1597.077	162.967	39885.884
Piso 13	3.50	1597.077	162.967	39885.884
Piso 12	3.50	1597.077	162.967	39885.884
Piso 11	3.50	1597.077	162.967	39885.884
Piso 10	3.50	1597.077	162.967	39885.884
Piso 09	3.50	1597.077	162.967	39885.884
Piso 08	3.50	1597.077	162.967	39885.884
Piso 07	3.50	1597.077	162.967	39885.884
Piso 06	3.50	1597.077	162.967	39885.884
Piso 05	3.50	1597.077	162.967	39885.884
Piso 04	3.50	1597.077	162.967	39885.884
Piso 03	3.50	1597.077	162.967	39885.884
Piso 02	3.50	1597.077	162.967	39885.884
Piso 01	7.03	1956.678	199.661	48866.668
Mecánico	3.53	2697.048	275.209	67356.892
Mezanine	2.75	151.743	15.484	3789.676
Plaza	2.75	151.743	15.484	3789.676
Arenales	3.60	3253.825	332.023	268697.061
Sótano 1	3.75	4340.900	442.949	338972.258
Sótano 2	3.75	4616.594	471.081	360500.655
TOTAL	109.66	53742.120	5483.890	1996675.248

Tabla 4.2 Dimensiones de los elementos (cm)

NIVEL	VIGAS (bxh)	PLACAS (bxh)	COLUMNAS	
			(bxh)	(As)
Sótano 2 a Arenales	(50x70)	(30x1058)	(50x60)	38.7 cm ²
	(40x70)	(40x788)	(80x90)	116.1 cm ²
		(45x848)	(80x180)	269.7 cm ²
		(80x340)		
Plaza a Mecánico	(50x80)	(45x848)	(80x180)	232.2 cm ²
	(40x80)	(80x340)		
Piso 01 a Techo	(50x80)	(45x848)	(50x60)	38.7 cm ²
	(40x80)	(80x340)	(80x180)	387.0 cm ²

Tabla 4.3 Áreas de acero y momentos de fluencia en vigas

NIVEL	ELEM.	SECCION (b x h) [cm]	Extremo i		Extremo j		Extremo i		Extremo j		LABELS ID FRAMES
			Az sup [cm ²]	Az inf [cm ²]	Az sup [cm ²]	Az inf [cm ²]	My + [t-m]	My - [t-m]	My + [t-m]	My - [t-m]	
Sotano 2 a Arenales	Viga I	(50x70)	55.88	30.48	40.64	20.32	71.69	117.00	49.69	91.21	331
Sotano 2 a Arenales	Viga II	(50x70)	55.88	30.48	30.48	20.32	48.97	48.97	48.97	48.97	330
Sotano 2 a Arenales	Viga III	(50x70)	30.48	10.16	30.48	10.16	25.86	71.47	25.86	71.47	329
Sotano 2 a Arenales	Viga IV	(50x70)	30.48	10.16	30.48	10.16	25.86	71.47	25.86	71.47	304
Sotano 2 a Arenales	Viga V	(50x70)	30.48	10.16	20.32	10.16	25.86	71.47	25.86	49.69	289
Sotano 2 a Arenales	Viga VI	(50x70)	20.32	10.16	20.32	10.16	25.86	49.69	25.86	49.69	319
Sotano 2 a Arenales	Viga A	(40x70)	60.96	15.24	30.48	15.24	37.46	123.26	37.46	69.17	392
Sotano 2 a Arenales	Viga B	(40x70)	50.80	15.24	30.48	15.24	37.46	102.54	37.46	69.17	375
Sotano 2 a Arenales	Viga C	(40x70)	40.64	10.16	25.40	10.16	25.61	87.13	25.61	59.24	369
Sotano 2 a Arenales	Viga D	(40x70)	35.56	10.16	35.56	10.16	25.61	78.47	25.61	78.47	387
Sotano 2 a Arenales	Viga E	(40x70)	30.48	15.24	30.48	15.24	37.46	69.17	37.46	69.17	381
Sotano 2 a Arenales	Viga F	(40x70)	25.40	10.16	25.40	10.16	25.61	59.24	25.61	59.24	384
Plaza a Piso 04	Viga I	(50x80)	76.80	50.80	76.80	50.80	68.84	121.71	68.84	121.71	455
Plaza a Piso 04	Viga II	(50x80)	81.28	66.66	81.28	66.66	179.18	185.65	179.18	185.65	430
Plaza a Piso 04	Viga III	(50x80)	86.98	60.96	86.98	60.96	163.86	200.96	163.86	200.96	423
Plaza a Piso 04	Viga IV	(50x80)	101.60	86.98	81.28	46.33	233.82	240.25	124.54	185.64	417
Plaza a Piso 04	Viga V	(50x80)	101.60	86.98	101.60	86.98	233.80	240.25	233.80	240.25	422
Plaza a Piso 04	Viga A	(40x80)	50.80	25.40	50.80	25.40	68.84	121.74	68.84	121.74	435
Plaza a Piso 04	Viga B	(40x80)	50.80	25.40	50.80	25.40	68.84	121.74	68.84	121.74	435
Plaza a Piso 04	Viga C	(40x80)	50.80	25.40	50.80	25.40	68.84	121.74	68.84	121.74	435
Plaza a Piso 04	Viga D	(40x80)	50.80	25.40	50.80	25.40	68.84	121.74	68.84	121.74	435
Plaza a Piso 04	Viga E	(40x80)	50.80	25.40	50.80	25.40	68.84	121.74	68.84	121.74	435
Plaza a Piso 04	Viga F	(40x80)	50.80	35.56	50.80	35.56	95.59	121.74	95.59	121.74	439
Plaza a Piso 04	Viga G	(40x80)	50.80	25.40	50.80	25.40	68.84	121.74	68.84	121.74	435
Plaza a Piso 04	Viga H	(40x80)	50.80	25.40	50.80	25.40	68.84	121.74	68.84	121.74	435
Plaza a Piso 04	Viga i	(40x80)	50.80	25.40	50.80	25.40	68.84	121.74	68.84	121.74	435

Piso 05 a Piso 12	Viga I	(50x80)	71.10	40.64	71.10	40.64	109.24	165.05	109.24	165.05	693
Piso 05 a Piso 12	Viga II	(50x80)	76.20	60.96	76.20	60.96	163.86	173.05	163.86	173.05	694
Piso 05 a Piso 12	Viga III	(50x80)	81.28	50.80	81.28	50.80	136.55	185.65	136.55	185.65	699
Piso 05 a Piso 12	Viga IV	(50x80)	101.60	86.98	76.20	60.96	233.80	240.26	163.86	173.05	701
Piso 05 a Piso 12	Viga V	(50x80)	101.60	86.98	101.60	86.98	233.80	240.25	233.80	240.25	705
Piso 05 a Piso 12	Viga A - B	(40x80)	60.96	40.64	60.96	40.64	109.24	138.44	109.24	138.44	674
Piso 05 a Piso 12	Viga F	(40x80)	66.66	46.34	66.66	46.34	124.56	152.91	124.56	152.91	678
Piso 05 a Piso 12	Viga G	(40x80)	60.96	40.64	60.96	40.64	109.24	138.44	109.24	138.44	674
Piso 05 a Piso 12	Viga H	(40x80)	60.96	40.64	60.96	40.64	109.24	138.44	109.24	138.44	674
Piso 05 a Piso 12	Viga I	(40x80)	60.96	40.64	60.96	40.64	109.24	138.44	109.24	138.44	674
Piso 13 a Piso 20	Viga I	(50x80)	60.96	30.48	60.96	30.48	82.99	147.62	82.99	147.62	976
Piso 13 a Piso 20	Viga II	(50x80)	76.20	60.96	76.20	60.96	163.86	173.05	163.86	173.05	979
Piso 13 a Piso 20	Viga III	(50x80)	71.12	40.64	71.12	40.64	109.24	165.08	109.24	165.08	980
Piso 13 a Piso 20	Viga IV	(50x80)	97.14	71.12	76.20	60.96	191.17	228.27	163.86	173.05	987
Piso 13 a Piso 20	Viga V	(50x80)	97.14	71.12	97.14	71.12	191.17	228.27	191.17	228.27	989
Piso 13 a Piso 20	Viga A -	(40x80)	71.12	50.80	71.12	50.80	136.55	164.89	136.55	164.89	957
Piso 21 a Piso 22	Viga I	(50x80)	50.80	20.32	50.80	20.32	57.37	128.12	57.37	128.12	1264
Piso 21 a Piso 22	Viga II	(50x80)	76.82	46.34	76.82	46.34	124.56	173.98	124.56	173.98	1267
Piso 21 a Piso 22	Viga III	(50x80)	50.80	40.64	50.80	40.64	109.24	128.12	109.24	128.12	1268
Piso 21 a Piso 22	Viga IV	(50x80)	76.82	46.34	76.82	46.34	124.56	173.98	124.56	173.98	1274
Piso 21 a Piso 22	Viga V	(50x80)	76.82	46.34	76.82	46.34	124.56	173.98	124.56	173.98	1276
Piso 21 a Piso 22	Viga A -	(40x80)	71.12	50.80	71.12	50.80	136.55	164.89	136.55	164.89	1246
Azotes	Viga I	(50x80)	40.64	15.24	40.64	15.24	43.79	106.57	43.79	106.57	1375
Azotes	Viga II	(50x80)	60.96	30.48	60.96	30.48	82.99	147.62	82.99	147.62	1379
Azotes	Viga III	(50x80)	50.80	20.32	50.80	20.32	57.37	128.12	57.37	128.12	1387
Azotes	Viga IV	(50x80)	60.96	30.48	60.96	30.48	82.99	147.62	82.99	147.62	1343
Azotes	Viga V	(50x80)	81.28	56.50	81.28	56.50	151.87	185.65	151.87	185.65	1348
Azotes	Viga A a	(40x80)	66.66	46.34	66.66	46.34	124.56	152.91	124.56	152.91	1316
Tanque	Viga I - V	(50x80)	66.66	30.48	66.66	30.48	82.99	157.67	82.99	157.67	1394
Tanque	Viga A -	(40x80)	71.12	50.80	71.12	50.80	124.56	138.44	124.56	138.44	1354
Techo	Viga I - V	(50x80)	66.66	30.48	66.66	30.48	82.99	157.67	82.99	157.67	1423
Techo	Viga A -	(40x80)	60.96	46.34	60.96	46.34	124.56	138.44	124.56	138.44	1411

Tabla 4.4 Periodos, frecuencias y masas participativas

Modo	Periodo (Seg)	Frecuencia (Cic/seg)	UX	UY	RZ	SumUX	SumUY	SumRZ
1	3.2543	0.3073	0.6112	0.0011	0.0000	0.0020	0.9874	0.0000
2	2.2756	0.4394	0.0015	0.5619	0.0000	0.9714	0.9894	0.0000
3	1.6211	0.6169	0.0000	0.0000	0.3739	0.9714	0.9894	0.3739
4	0.8693	1.1503	0.1070	0.0001	0.0000	0.9715	0.9909	0.3739
5	0.4768	2.0972	0.0000	0.1576	0.0000	0.9929	0.9909	0.3739
6	0.4007	2.4959	0.0467	0.0000	0.0000	0.9929	0.9916	0.3739
7	0.3506	2.8525	0.0000	0.0000	0.1008	0.9929	0.9916	0.4746
8	0.2295	4.3574	0.0331	0.0000	0.0000	0.9929	0.9920	0.4746
9	0.1980	5.0517	0.0000	0.0571	0.0000	0.9969	0.9920	0.4747
10	0.1498	6.6739	0.0347	0.0000	0.0000	0.9969	0.9923	0.4747
11	0.1469	6.8053	0.0000	0.0000	0.0411	0.9969	0.9923	0.5158
12	0.1165	8.5838	0.0000	0.0393	0.0000	0.9982	0.9923	0.5158
13	0.1087	9.2011	0.0444	0.0000	0.0000	0.9982	0.9935	0.5158
14	0.0875	11.4340	0.0000	0.0002	0.0345	0.9982	0.9935	0.5503
15	0.0846	11.8150	0.0414	0.0000	0.0000	0.9982	0.9948	0.5503
16	0.0824	12.1350	0.0000	0.0483	0.0000	0.9991	0.9948	0.5503
17	0.0679	14.7370	0.0244	0.0000	0.0000	0.9991	0.9960	0.5503
18	0.0661	15.1180	0.0000	0.0586	0.0043	0.9997	0.9960	0.5547
19	0.0634	15.7770	0.0000	0.0014	0.0602	0.9997	0.9960	0.6149
20	0.0556	17.9810	0.0000	0.0299	0.0065	0.9999	0.9960	0.6213
21	0.0555	18.0270	0.0118	0.0001	0.0000	0.9999	0.9966	0.6214
22	0.0529	18.9020	0.0000	0.0022	0.2055	0.9999	0.9966	0.8268
23	0.0473	21.1630	0.0000	0.0105	0.0074	1.0000	0.9966	0.8343
24	0.0467	21.3980	0.0000	0.0028	0.0919	1.0000	0.9966	0.9261

Tabla 4.5 Cortantes inelásticos de entrepiso

Niveles	269.34 Gals		400.00 Gals		600.00 Gals	
	CORTE X (t)	CORTE Y (t)	CORTE X (t)	CORTE Y (t)	CORTE X (t)	CORTE Y (t)
Techo	83.55	148.45	124.49	221.19	186.60	330.99
Tanque	176.80	312.84	263.44	466.13	394.63	697.53
Azotea	307.99	544.97	458.91	812.01	686.85	1215.11
22	430.89	764.61	639.68	1139.27	954.93	1704.83
21	547.61	941.70	796.58	1403.13	1162.20	2099.67
20	647.30	1076.20	940.79	1603.54	1304.10	2399.57
19	730.16	1168.77	1060.35	1741.46	1454.52	2605.95
18	797.84	1220.76	1158.24	1818.93	1591.66	2721.86
17	852.07	1234.27	1236.24	1839.07	1701.97	2751.98
16	893.79	1212.11	1296.04	1806.05	1823.57	2702.57
15	942.29	1157.72	1369.46	1725.01	2003.34	2581.28
14	1017.01	1075.09	1484.68	1601.88	2167.56	2397.02
13	1085.47	981.61	1589.83	1462.60	2312.61	2188.57
12	1143.70	947.60	1679.63	1411.93	2435.32	2112.74
11	1197.80	1043.69	1752.05	1555.10	2533.33	2326.96
10	1291.00	1195.43	1869.37	1781.19	2671.54	2665.33
9	1371.57	1378.74	1984.72	2054.32	2857.81	3074.03
8	1447.86	1561.54	2091.73	2326.70	3015.44	3481.69
7	1503.91	1765.53	2170.61	2630.65	3147.35	3936.50
6	1547.40	1962.48	2228.73	2924.10	3232.83	4375.74
5	1573.30	2123.96	2263.02	3164.70	3298.67	4735.69
4	1577.21	2329.31	2264.98	3470.68	3315.72	5193.57
3	1586.35	2502.41	2270.92	3728.61	3307.84	5579.71
2	1598.93	2650.23	2286.35	3948.82	3338.14	5907.83
1	1616.28	2903.17	2353.58	4325.69	3496.22	6471.58
Mecánico	1729.25	3179.77	2515.68	4737.82	3738.89	7088.11
Mezanine	1739.60	3192.87	2531.08	4757.33	3752.56	7117.30
Plaza	1749.82	3204.05	2546.28	4773.99	3775.24	7142.22
Arenales	1958.98	3677.87	2857.56	5480.03	4240.31	8199.22
Sótano 1	2486.85	4370.56	3705.40	6512.14	5545.66	9743.88
Sótano 2	3658.06	5119.53	5450.51	7628.11	8157.47	11414.10

Tabla 4.6 Distorsiones de entrepiso

Niveles	269.34 Gals		400.00 Gals		600.00 Gals	
	Dist. X	Dist. Y	Dist. X	Dist. Y	Dist. X	Dist. Y
Techo	0.0007	0.0012	0.0010	0.0018	0.0015	0.0027
Tanque	0.0009	0.0012	0.0013	0.0019	0.0019	0.0028
Azotea	0.0011	0.0013	0.0016	0.0019	0.0022	0.0028
22	0.0012	0.0012	0.0017	0.0019	0.0024	0.0028
21	0.0013	0.0013	0.0019	0.0019	0.0027	0.0028
20	0.0014	0.0013	0.0020	0.0019	0.0029	0.0028
19	0.0015	0.0013	0.0022	0.0019	0.0031	0.0028
18	0.0016	0.0013	0.0023	0.0019	0.0033	0.0028
17	0.0017	0.0013	0.0024	0.0019	0.0035	0.0028
16	0.0017	0.0012	0.0026	0.0018	0.0037	0.0028
15	0.0018	0.0012	0.0027	0.0018	0.0039	0.0027
14	0.0019	0.0012	0.0028	0.0018	0.0040	0.0027
13	0.0019	0.0012	0.0028	0.0018	0.0042	0.0027
12	0.0020	0.0012	0.0029	0.0018	0.0043	0.0026
11	0.0020	0.0011	0.0029	0.0017	0.0044	0.0025
10	0.0021	0.0010	0.0030	0.0015	0.0045	0.0023
9	0.0021	0.0010	0.0030	0.0015	0.0046	0.0023
8	0.0021	0.0010	0.0030	0.0015	0.0046	0.0022
7	0.0021	0.0010	0.0031	0.0015	0.0046	0.0022
6	0.0021	0.0010	0.0030	0.0015	0.0046	0.0022
5	0.0021	0.0009	0.0030	0.0014	0.0046	0.0021
4	0.0020	0.0009	0.0029	0.0014	0.0045	0.0020
3	0.0019	0.0009	0.0028	0.0013	0.0043	0.0019
2	0.0019	0.0008	0.0027	0.0012	0.0041	0.0018
1	0.0016	0.0007	0.0023	0.0010	0.0035	0.0016
Mecánico	0.0013	0.0006	0.0019	0.0008	0.0028	0.0013
Mezanine	0.0010	0.0005	0.0015	0.0007	0.0023	0.0011
Plaza	0.0008	0.0004	0.0011	0.0006	0.0017	0.0009
Arenales	0.0004	0.0002	0.0006	0.0002	0.0009	0.0004
Sótano 1	0.0003	0.0001	0.0004	0.0002	0.0006	0.0003
Sótano 2	0.0001	0.0001	0.0002	0.0001	0.0002	0.0002
Suelo	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

Tabla 4.7 Desplazamientos relativos máximos

Niveles	269.34 Gals		400.00 Gals		600.00 Gals	
	Desp. X (m)	Despl. Y (m)	Desp. X (m)	Despl. Y (m)	Desp. X (m)	Despl. Y (m)
Techo	0.1659	0.1035	0.2416	0.1541	0.3595	0.2306
Tanque	0.1640	0.1002	0.2388	0.1494	0.3555	0.2235
Azotea	0.1615	0.0967	0.2351	0.1441	0.3502	0.2156
22	0.1577	0.0923	0.2296	0.1375	0.3424	0.2058
21	0.1536	0.0879	0.2236	0.1310	0.3338	0.1961
20	0.1491	0.0836	0.2171	0.1245	0.3245	0.1863
19	0.1442	0.0791	0.2100	0.1179	0.3144	0.1764
18	0.1390	0.0747	0.2024	0.1113	0.3035	0.1666
17	0.1334	0.0703	0.1943	0.1047	0.2918	0.1567
16	0.1276	0.0659	0.1857	0.0981	0.2795	0.1468
15	0.1215	0.0615	0.1768	0.0917	0.2665	0.1372
14	0.1152	0.0572	0.1675	0.0852	0.2530	0.1275
13	0.1087	0.0529	0.1578	0.0789	0.2389	0.1180
12	0.1020	0.0487	0.1479	0.0725	0.2243	0.1085
11	0.0950	0.0445	0.1377	0.0663	0.2091	0.0993
10	0.0879	0.0406	0.1274	0.0604	0.1937	0.0904
9	0.0807	0.0370	0.1170	0.0551	0.1779	0.0824
8	0.0733	0.0334	0.1064	0.0498	0.1619	0.0745
7	0.0660	0.0299	0.0957	0.0445	0.1457	0.0666
6	0.0586	0.0264	0.0850	0.0393	0.1295	0.0589
5	0.0513	0.0230	0.0744	0.0343	0.1133	0.0513
4	0.0440	0.0197	0.0638	0.0293	0.0972	0.0438
3	0.0370	0.0165	0.0536	0.0246	0.0815	0.0367
2	0.0302	0.0134	0.0437	0.0200	0.0663	0.0300
1	0.0237	0.0106	0.0343	0.0158	0.0520	0.0236
Mecánico	0.0124	0.0057	0.0180	0.0084	0.0271	0.0126
Mezanine	0.0079	0.0037	0.0114	0.0055	0.0172	0.0082
Plaza	0.0051	0.0023	0.0073	0.0035	0.0110	0.0052
Arenales	0.0029	0.0013	0.0043	0.0019	0.0064	0.0028
Sótano 1	0.0014	0.0007	0.0021	0.0010	0.0031	0.0015
Sótano 2	0.0004	0.0003	0.0006	0.0004	0.0009	0.0006
Suelo	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

Tabla 4.8 Velocidades relativas máximas

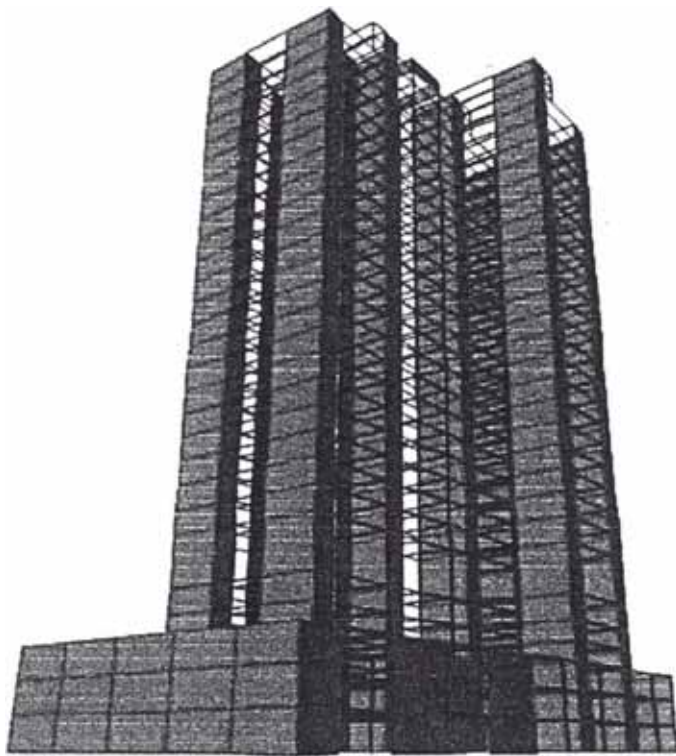
Niveles	269.34 Gals		400.00 Gals		600.00 Gals	
	Vel. X (m/s)	Vel. Y (m/s)	Vel. X (m/s)	Vel. Y (m/s)	Vel. X (m/s)	Vel. Y (m/s)
Techo	0.4000	0.2946	0.5811	0.4389	0.8658	0.6557
Tanque	0.3919	0.2863	0.5694	0.4265	0.8483	0.6373
Azotea	0.3812	0.2772	0.5539	0.4130	0.8250	0.6171
22	0.3655	0.2659	0.5313	0.3961	0.7912	0.5919
21	0.3486	0.2545	0.5068	0.3792	0.7546	0.5666
20	0.3305	0.2430	0.4807	0.3621	0.7155	0.5411
19	0.3115	0.2315	0.4533	0.3449	0.6745	0.5154
18	0.2918	0.2199	0.4304	0.3276	0.6326	0.4896
17	0.2838	0.2083	0.4237	0.3103	0.6232	0.4637
16	0.2790	0.1966	0.4161	0.2929	0.6125	0.4378
15	0.2737	0.1849	0.4076	0.2755	0.6005	0.4119
14	0.2678	0.1823	0.3983	0.2716	0.5873	0.4064
13	0.2614	0.1814	0.3882	0.2703	0.5730	0.4045
12	0.2545	0.1788	0.3775	0.2663	0.5577	0.3986
11	0.2472	0.1743	0.3662	0.2597	0.5416	0.3887
10	0.2394	0.1681	0.3544	0.2505	0.5247	0.3749
9	0.2312	0.1602	0.3420	0.2387	0.5069	0.3572
8	0.2225	0.1534	0.3287	0.2286	0.4878	0.3421
7	0.2129	0.1482	0.3143	0.2208	0.4670	0.3304
6	0.2020	0.1434	0.2983	0.2136	0.4436	0.3197
5	0.1896	0.1362	0.2798	0.2029	0.4166	0.3037
4	0.1751	0.1267	0.2584	0.1888	0.3849	0.2826
3	0.1581	0.1151	0.2333	0.1715	0.3477	0.2567
2	0.1384	0.1015	0.2042	0.1513	0.3044	0.2264
1	0.1186	0.0863	0.1750	0.1286	0.2613	0.1925
Mecánico	0.0812	0.0535	0.1200	0.0798	0.1795	0.1194
Mezanine	0.0608	0.0375	0.0899	0.0559	0.1345	0.0837
Plaza	0.0455	0.0275	0.0674	0.0409	0.1009	0.0613
Arenales	0.0320	0.0188	0.0474	0.0281	0.0709	0.0420
Sótano 1	0.0186	0.0127	0.0276	0.0189	0.0413	0.0282
Sótano 2	0.0069	0.0060	0.0103	0.0090	0.0154	0.0134
Suelo	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

Tabla 4.9 Aceleraciones absolutas máximas

Niveles	269.34 Gals		400.00 Gals		600.00 Gals	
	Acel X (m/s ²)	Acel Y (m/s ²)	Acel X (m/s ²)	Acel Y (m/s ²)	Acel X (m/s ²)	Acel Y (m/s ²)
Techo	1.1522	2.0301	1.7168	3.0249	2.5693	4.5266
Tanque	1.0612	1.8443	1.5811	2.7481	2.3638	4.1123
Azotea	0.9416	1.6279	1.4030	2.4256	2.0950	3.6297
22	0.8252	1.3616	1.2005	2.0289	1.7108	3.0360
21	0.7242	1.0916	1.0519	1.6264	1.4435	2.4338
20	0.6235	0.8214	0.9053	1.2239	1.2828	1.8315
19	0.5988	0.5729	0.8771	0.8537	1.2949	1.2774
18	0.6215	0.5691	0.9042	0.8480	1.3154	1.2689
17	0.6860	0.7091	1.0221	1.0565	1.5288	1.5810
16	0.7564	0.9013	1.1270	1.3429	1.6857	2.0094
15	0.7878	1.0700	1.1530	1.5942	1.7245	2.3855
14	0.8152	1.2485	1.1830	1.8602	1.7273	2.7835
13	0.8241	1.3924	1.1939	2.0746	1.7565	3.1044
12	0.8186	1.4968	1.1835	2.2303	1.7344	3.3375
11	0.7992	1.5761	1.1526	2.3484	1.6952	3.5140
10	0.7768	1.6447	1.1189	2.4507	1.6399	3.6671
9	0.7419	1.6750	1.0658	2.4957	1.5556	3.7347
8	0.7255	1.6645	1.0810	2.4800	1.6162	3.7114
7	0.7833	1.6454	1.1671	2.4516	1.7442	3.6678
6	0.8809	1.6336	1.3126	2.4341	1.9622	3.6415
5	0.9629	1.5975	1.4347	2.3803	2.1435	3.5608
4	1.0360	1.5371	1.5437	2.2902	2.3070	3.4260
3	1.1404	1.5344	1.6992	2.2862	2.5431	3.4216
2	1.3313	1.6302	1.9837	2.4290	2.9689	3.6354
1	1.5409	1.8799	2.2960	2.8011	3.4362	4.1923
Mecánico	2.0329	2.2916	3.0290	3.4144	4.5333	5.1102
Mezanine	2.3437	2.4173	3.4921	3.6018	5.2264	5.3907
Plaza	2.5135	2.5852	3.7451	3.8520	5.6050	5.7651
Arenales	2.6030	2.7733	3.8785	4.1322	5.8047	6.1845
Sótano 1	2.7755	2.8785	4.1355	4.2889	6.1893	6.4190
Sótano 2	2.9314	2.9545	4.3678	4.4022	6.5370	6.5885
Suelo	3.0410	3.0410	4.5311	4.5311	6.7815	6.7815



(a)



(b)

Figura 4.1 Geometría del modelo estructural, (a) Real y (b) Modelo

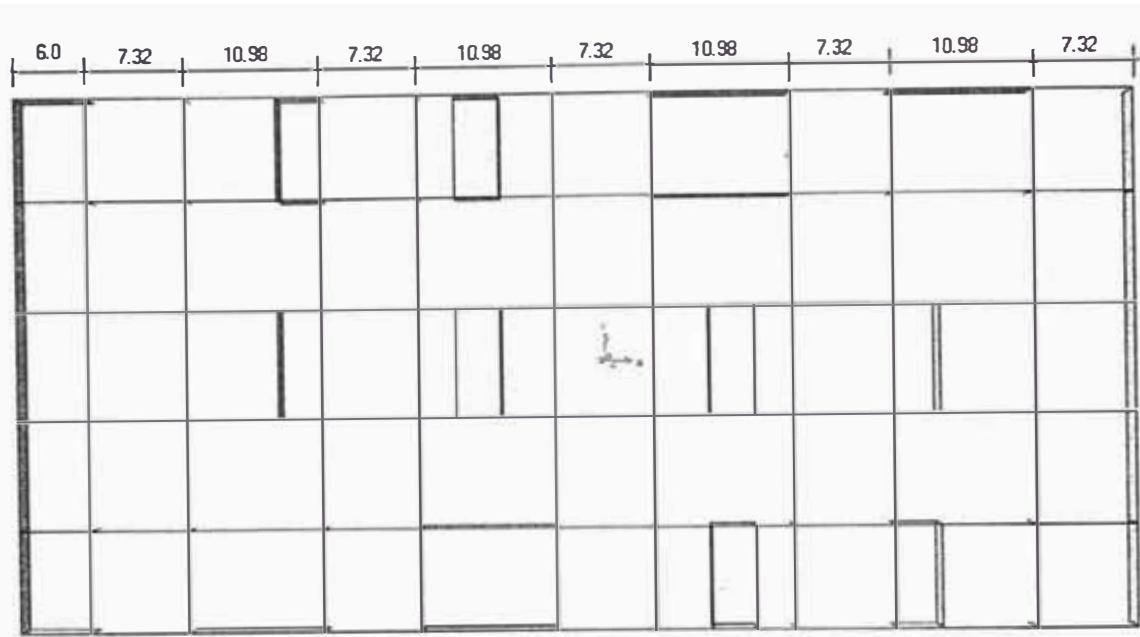


Figura 4.2 Planta típica - nivel sótano 2 a arenales

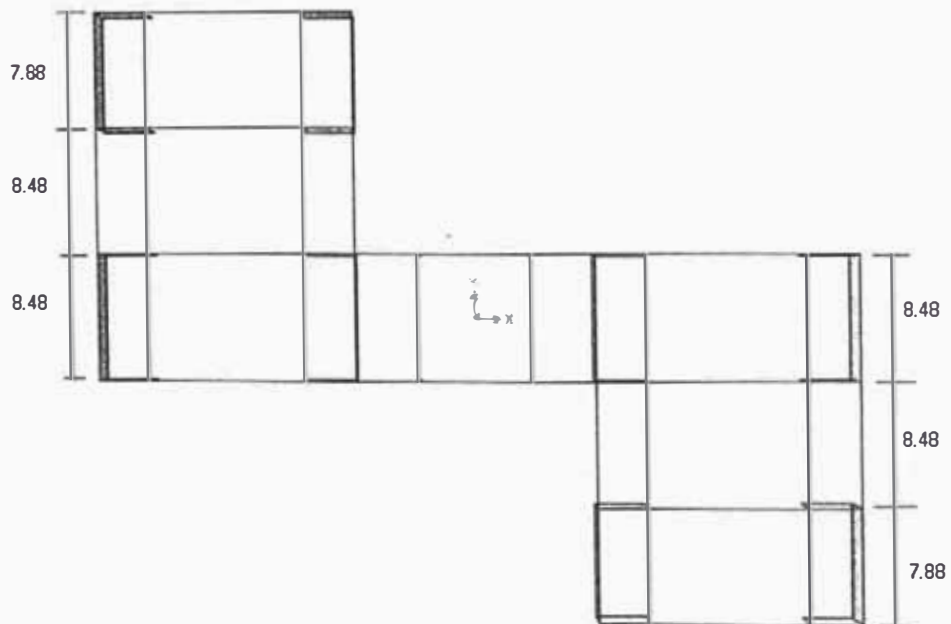


Figura 4.3 Planta típica - nivel plaza a techo

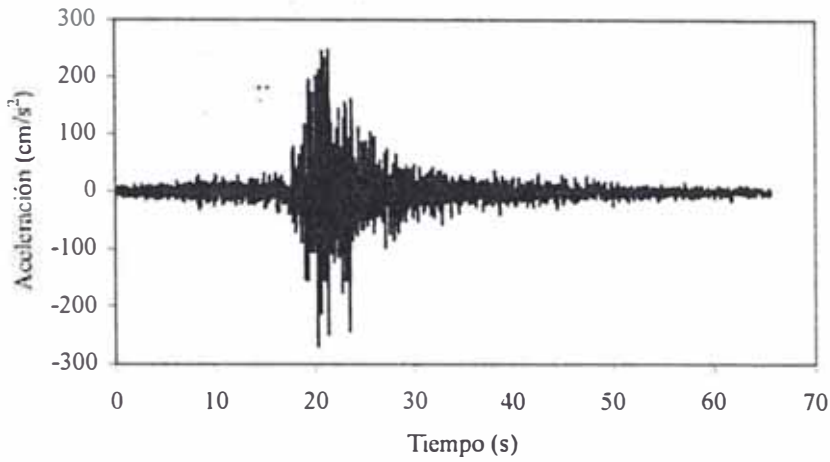


Figura 4.4 Registro completo de Lima, Perú, I.G.P. 17/10/66 comp. N08E
D=16.3 cm, V=21.6 cm/s, A=269.3 cm/s²

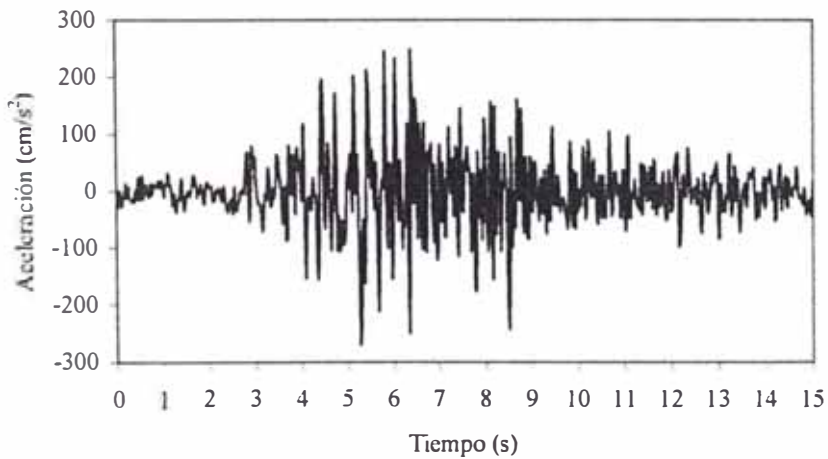


Figura 4.5 Registro parcial de Lima, Perú, I.G.P. 17/10/66 comp. N08E
Ti=15.00 s, Tf=30.00 s, A=269.3 cm/s²

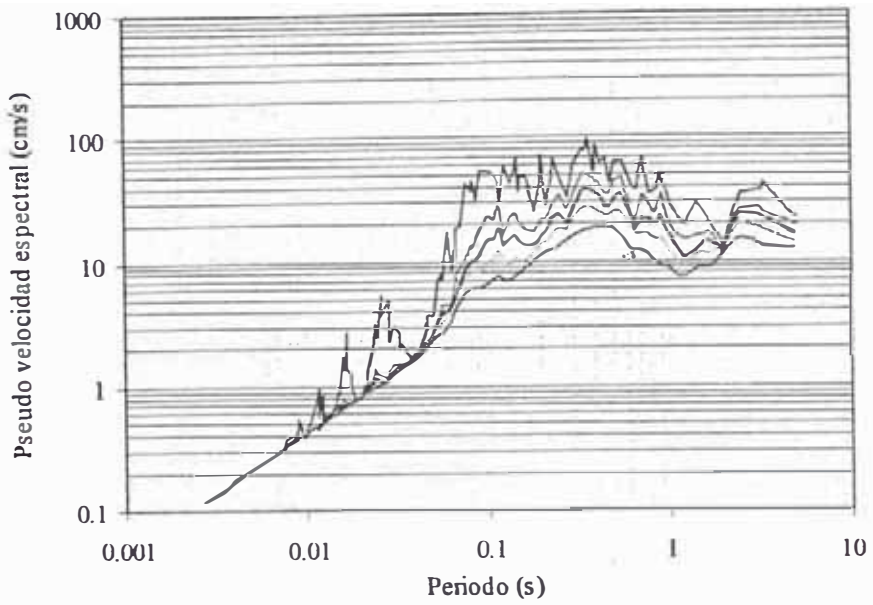


Figura 4.6 Espectro de respuesta elástico
Lima, Perú, I.G.P. 17/10/66 comp. N08E
Amortiguamientos: 0%, 2%, 5%, 10% y 20%
Registro completo

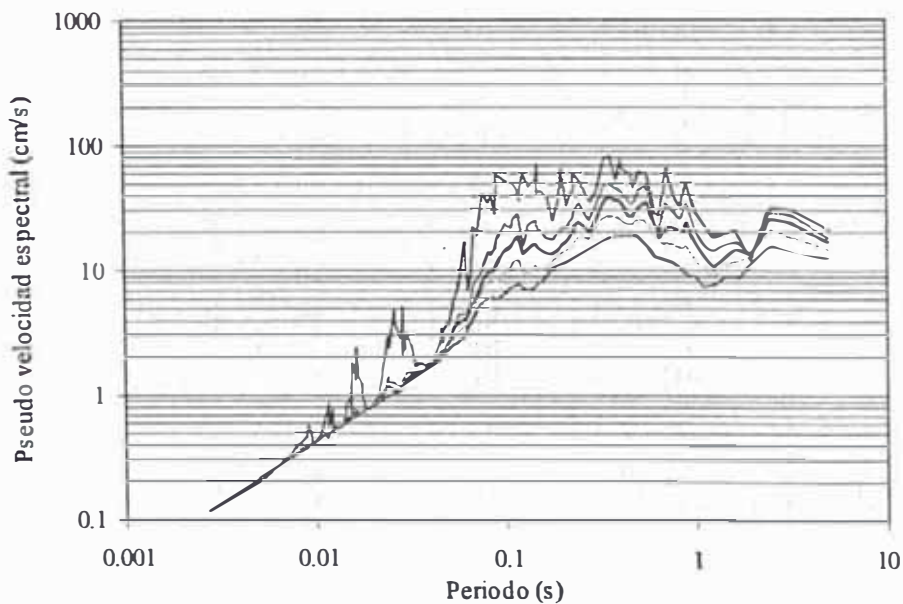


Figura 4.7 Espectro de respuesta elástico
Lima, Perú, I.G.P. 17/10/66 comp. N08E
Amortiguamientos: 0%, 2%, 5%, 10% y 20%
Registro parcial

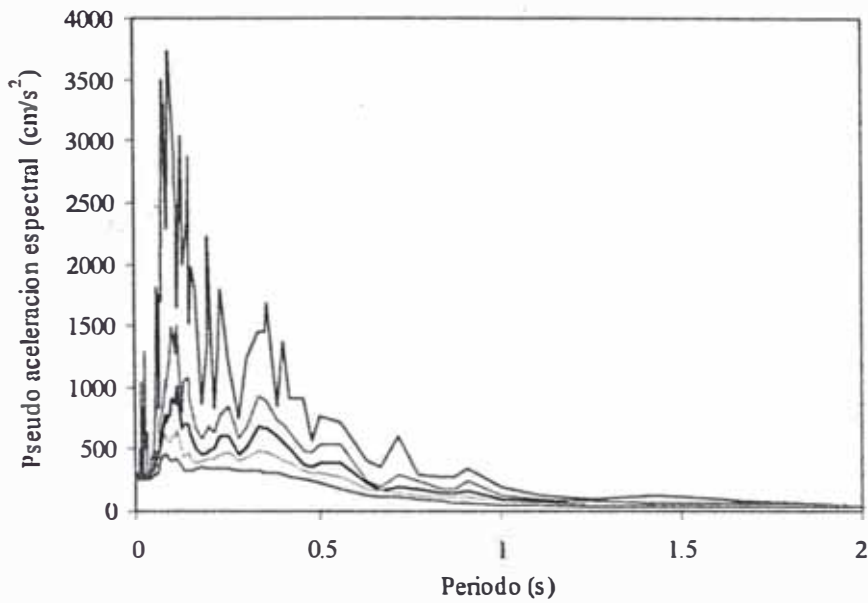


Figura 4.8 Espectro de aceleraciones
Lima, Perú, I.G.P. 17/10/66 comp. N08E
Amortiguamientos: 0%, 2%, 5%, 10% y 20%
Registro completo

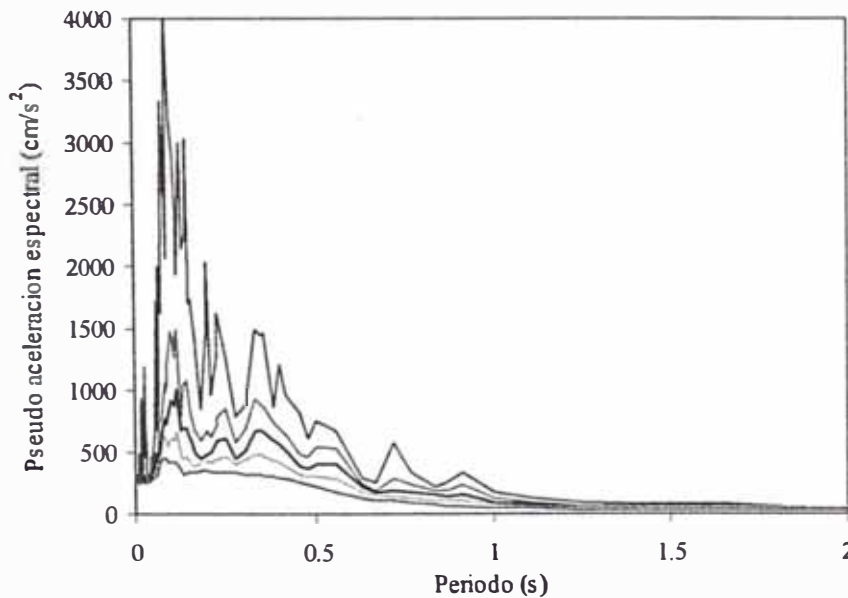


Figura 4.9 Espectro de aceleraciones
Lima, Perú, I.G.P. 17/10/66 comp. N08E
Amortiguamientos: 0%, 2%, 5%, 10% y 20%
Registro parcial

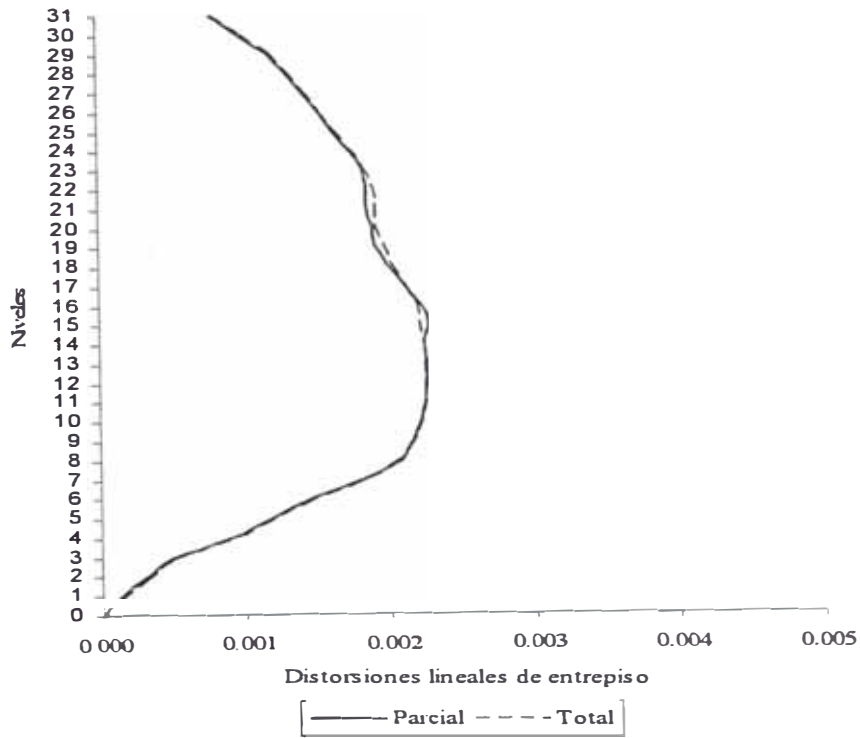


Figura 4.10 Efecto de la duración del sismo
Distorsiones Lineales Eje X
($A=269.34$ Gals)

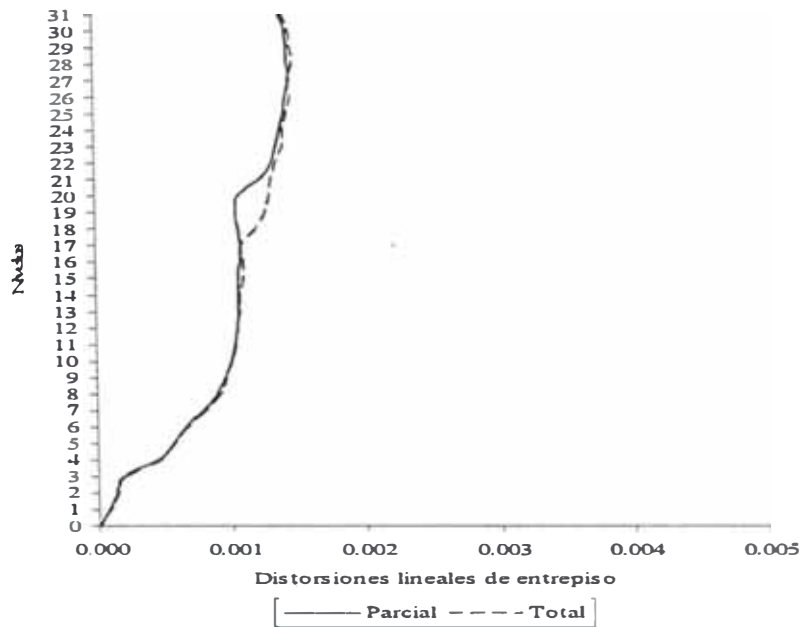


Figura 4.11 Efecto de la duración del sismo
Distorsiones Lineales Eje Y
($A=269.34$ Gals)

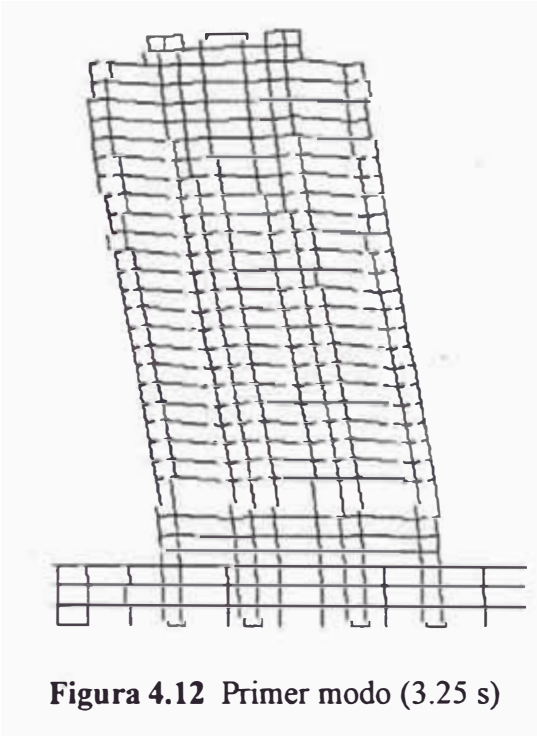


Figura 4.12 Primer modo (3.25 s)

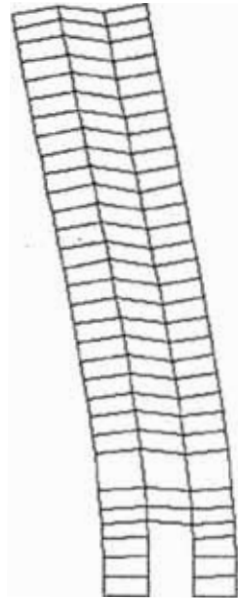


Figura 4.13 Segundo modo (2.27 s)

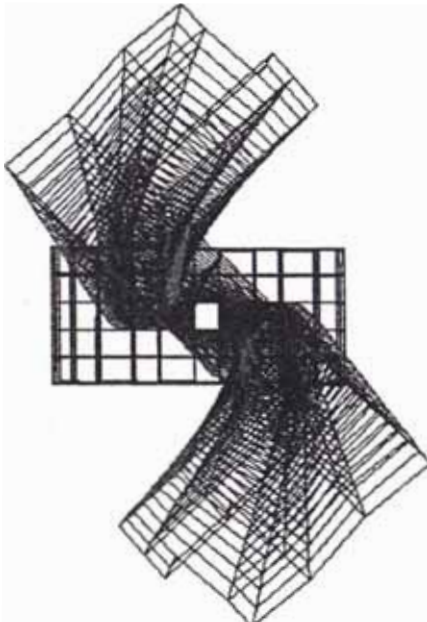


Figura 4.14 Tercer modo (1.62 s)

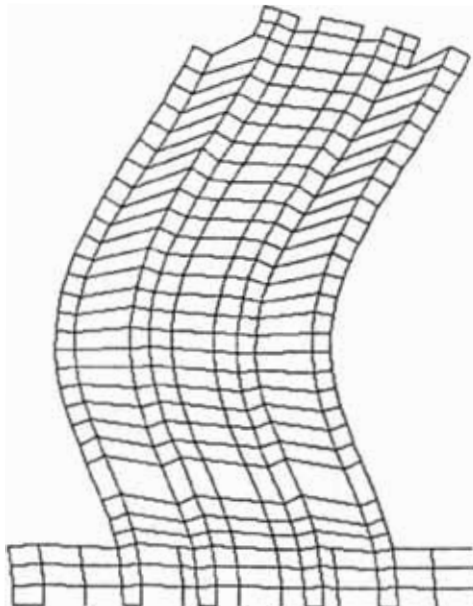


Figura 4.15 Cuarto modo (0.86 s)

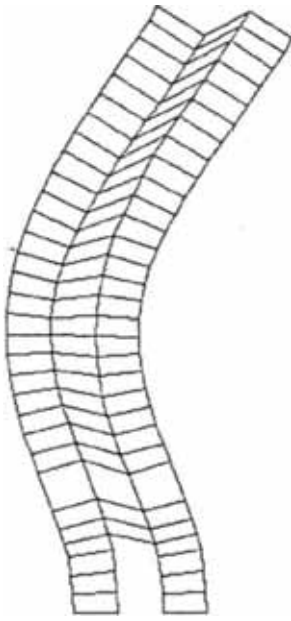


Figura 4.16 Quinto modo (0.47 s)

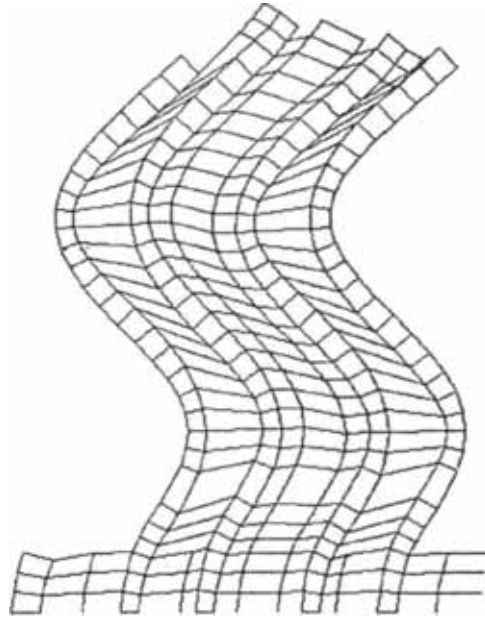


Figura 4.17 Sexto modo (0.40 s)

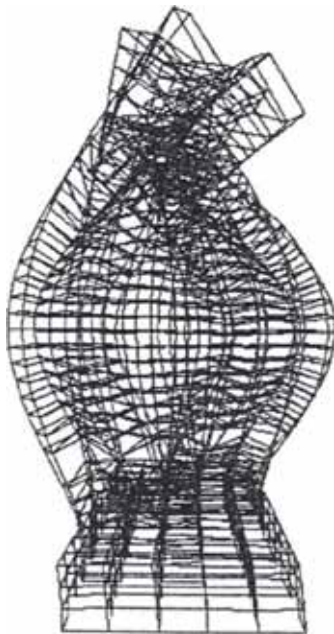


Figura 4.18 Séptimo modo (0.35 s)

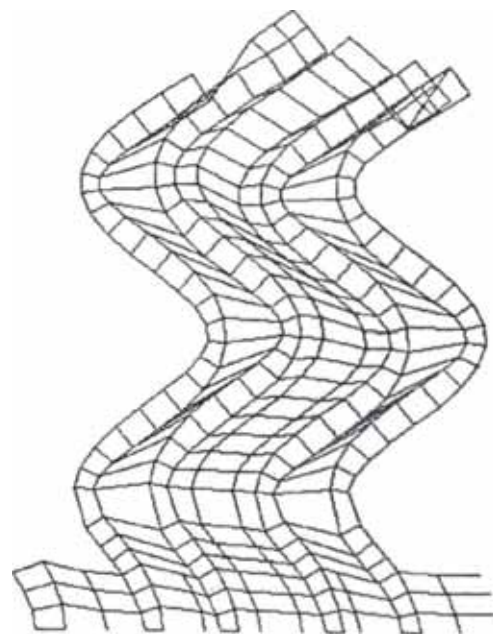


Figura 4.19 Octavo modo (0.22 s)

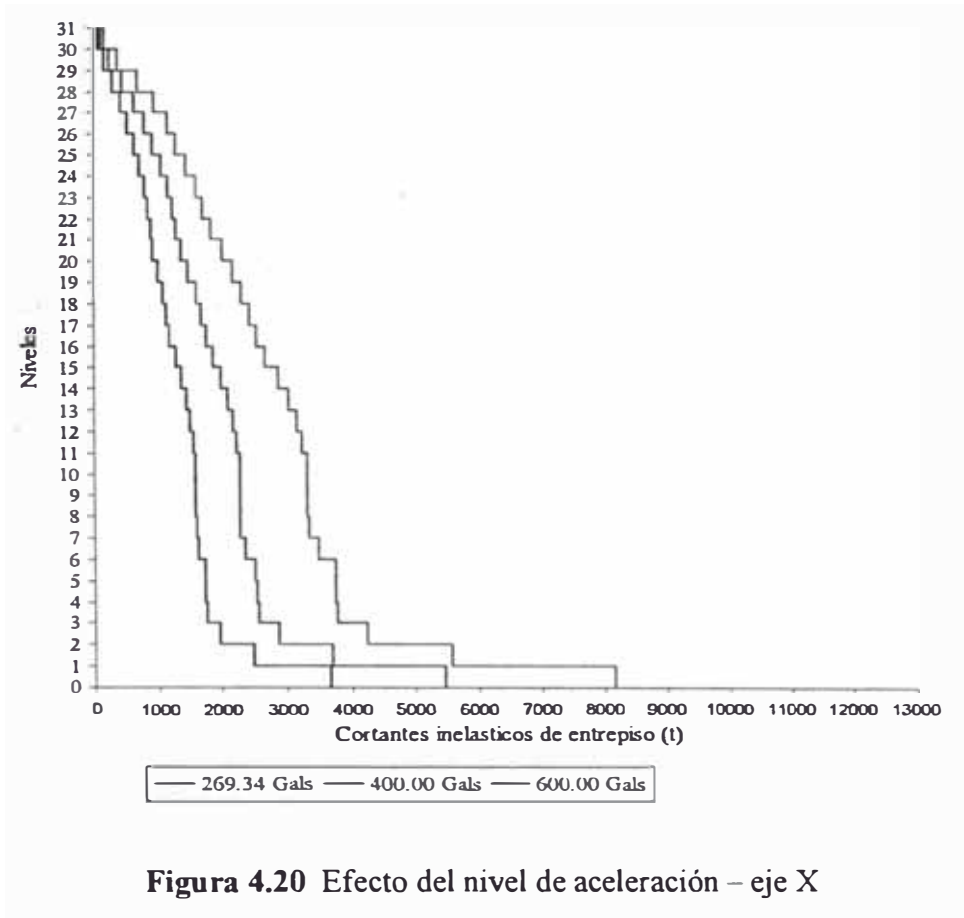


Figura 4.20 Efecto del nivel de aceleración – eje X

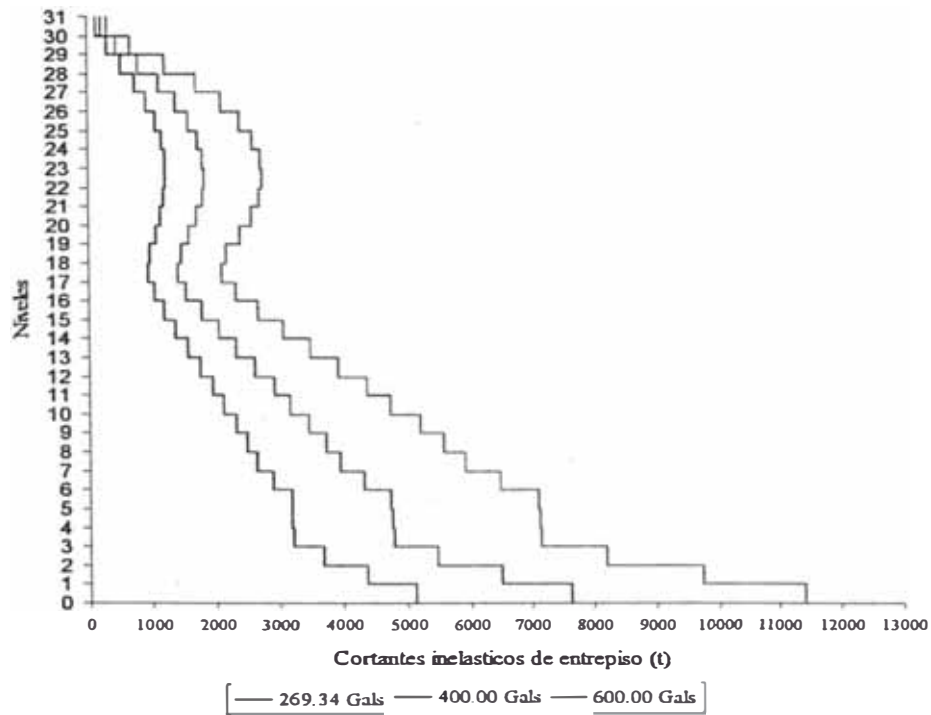


Figura 4.21 Efecto del nivel de aceleración – eje Y

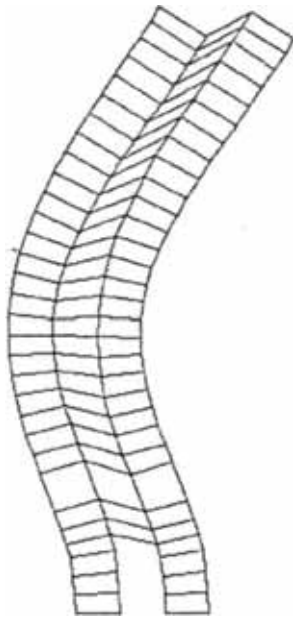


Figura 4.16 Quinto modo (0.47 s)

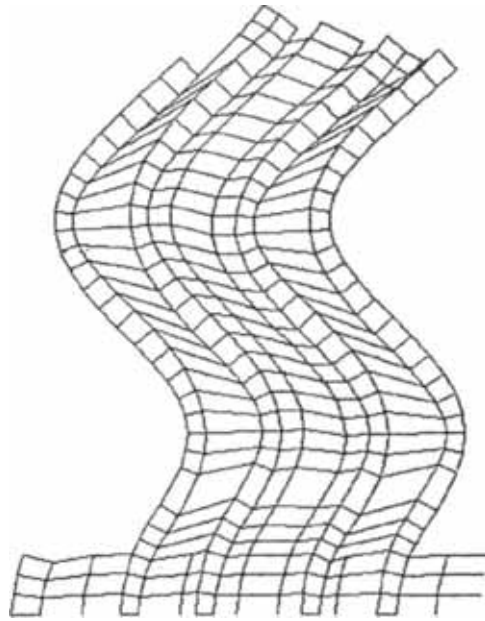


Figura 4.17 Sexto modo (0.40 s)

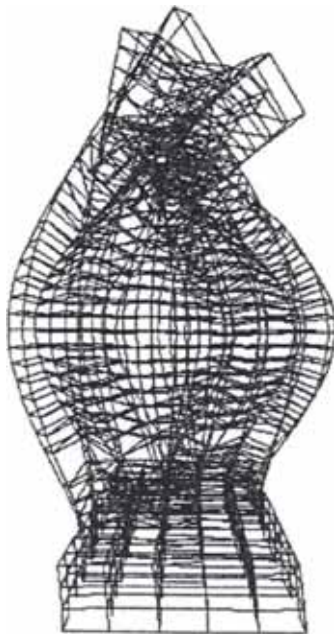


Figura 4.18 Séptimo modo (0.35 s)

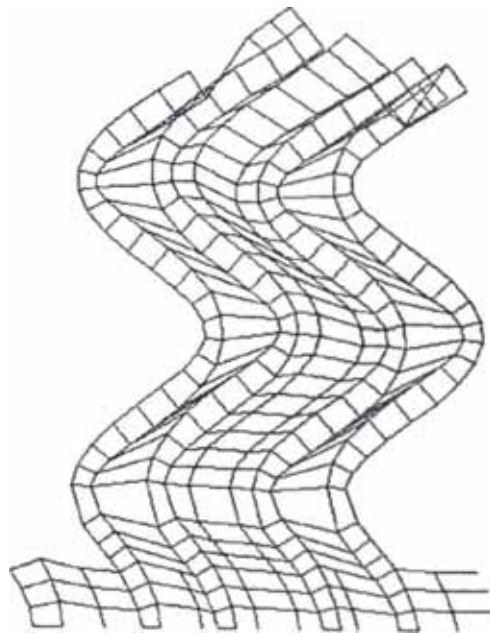


Figura 4.19 Octavo modo (0.22 s)

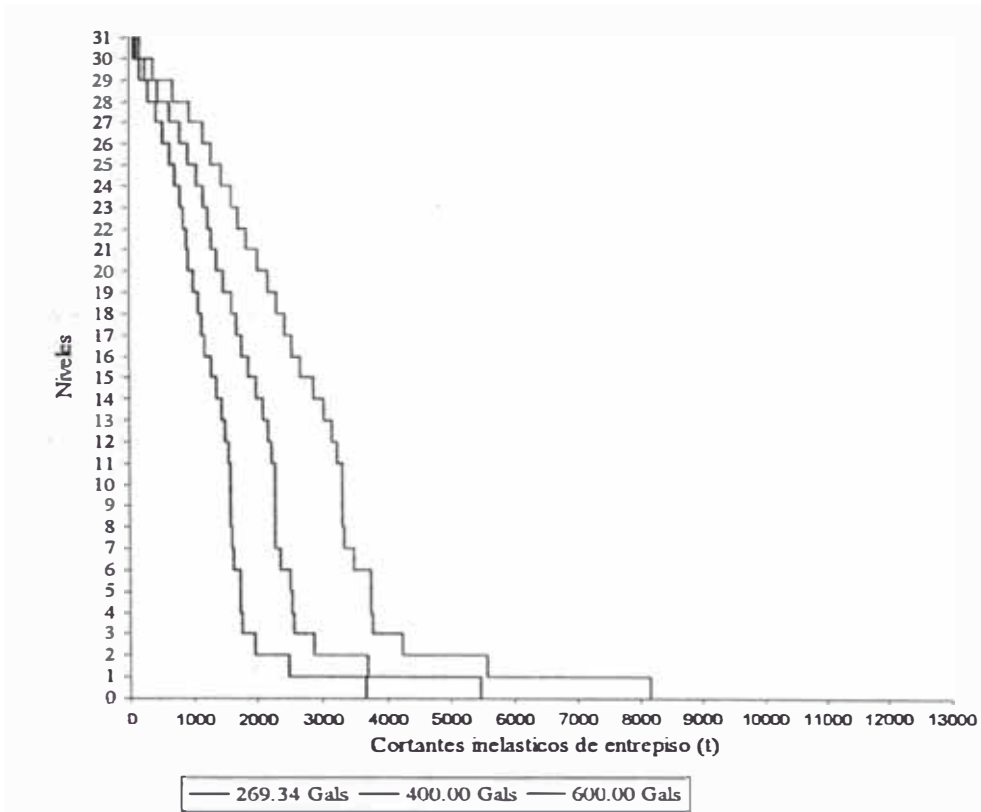


Figura 4.20 Efecto del nivel de aceleración – eje X

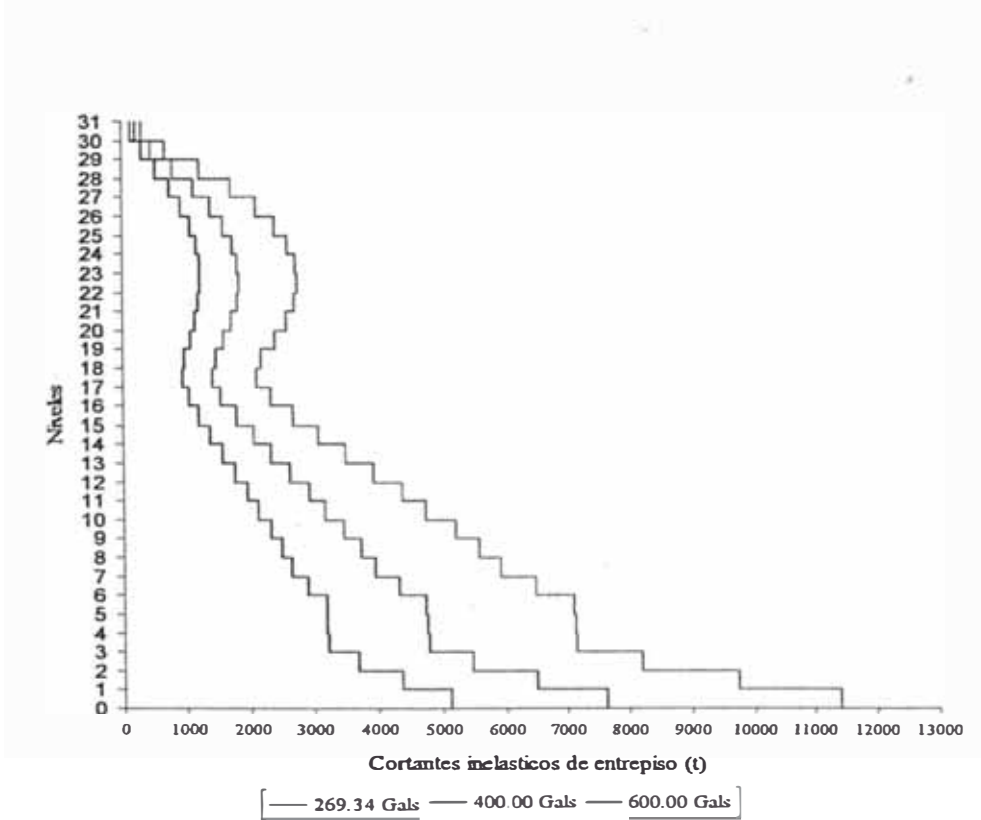


Figura 4.21 Efecto del nivel de aceleración – eje Y

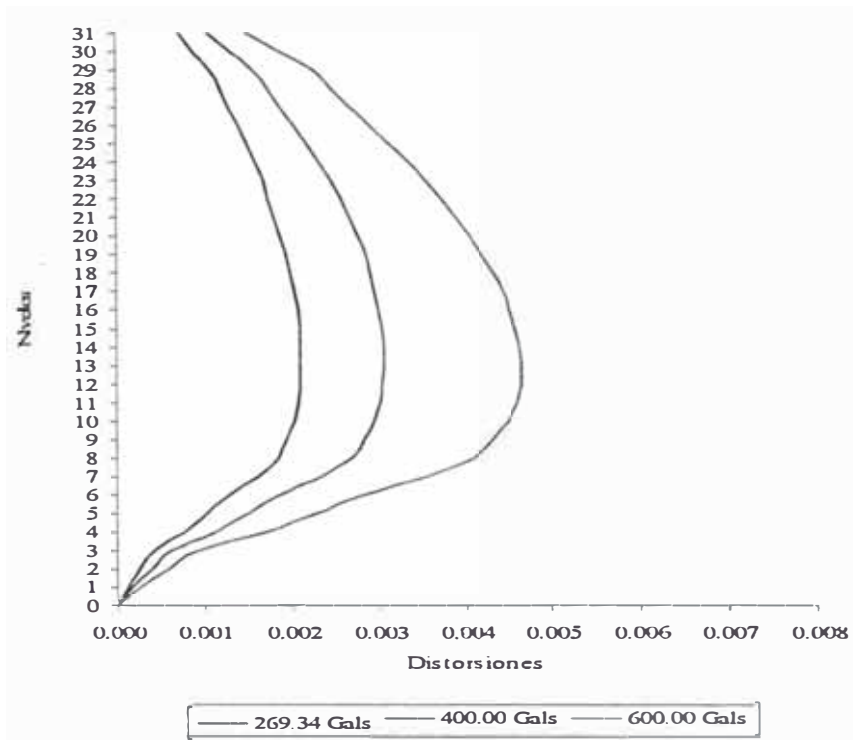


Figura 4.22 Distorsiones de entrepiso – eje X

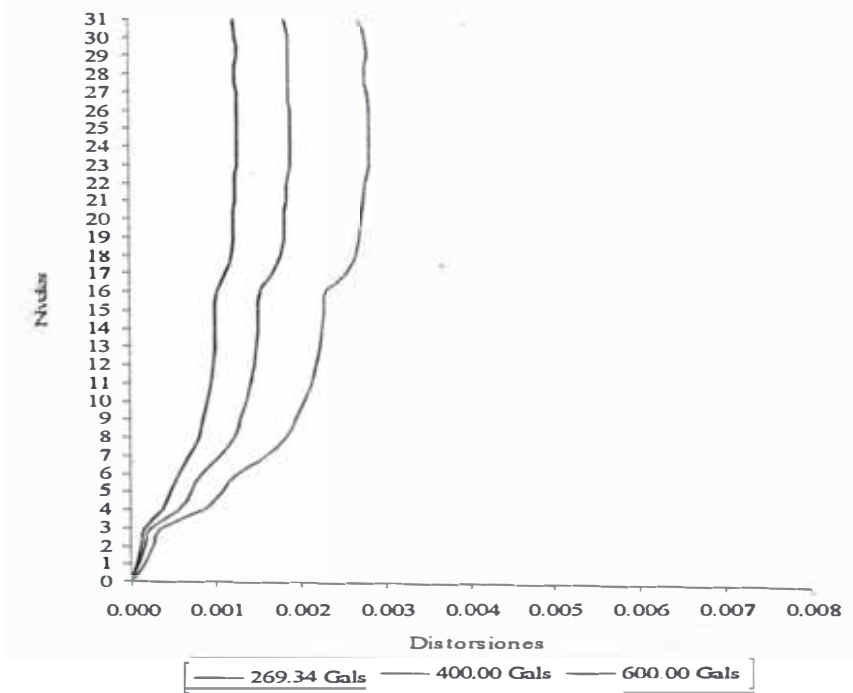


Figura 4.23 Distorsiones de entrepiso – eje Y

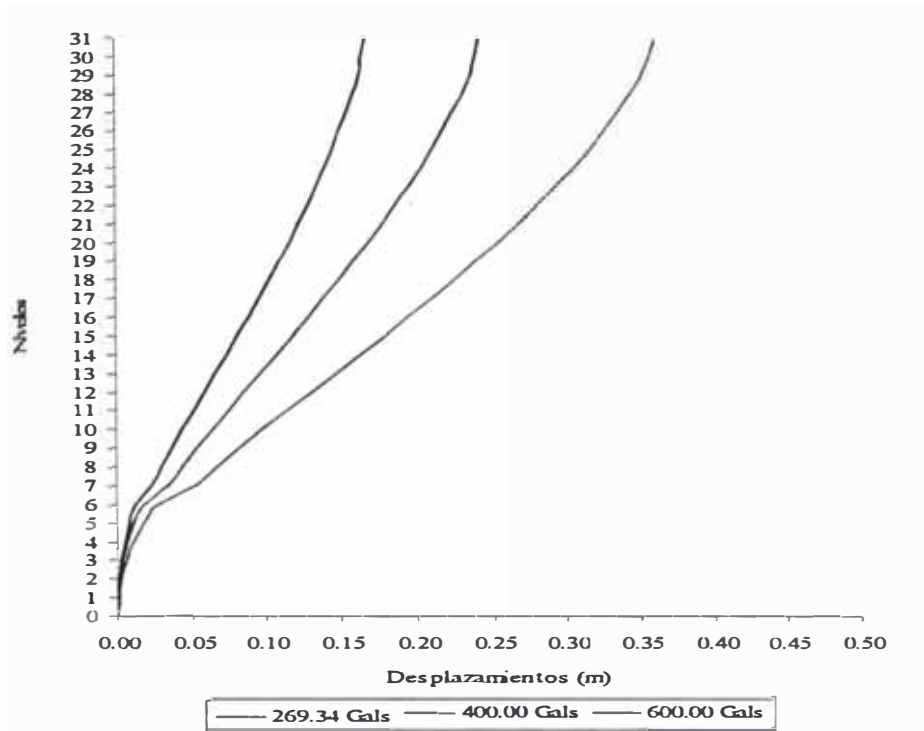


Figura 4.24 Desplazamientos relativos máximos – eje X

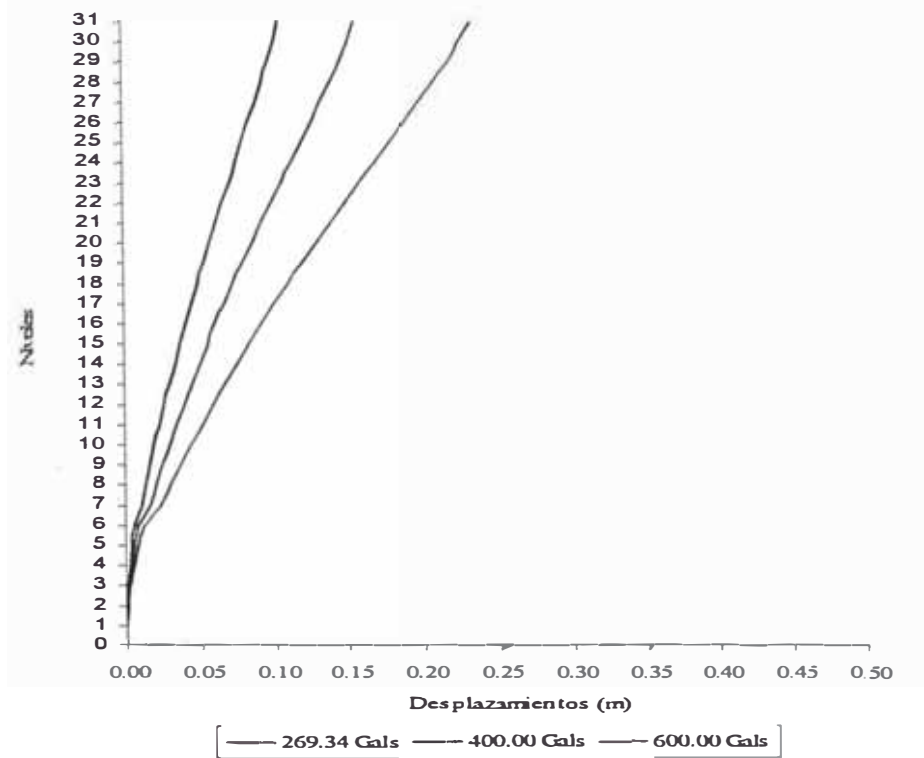


Figura 4.25 Desplazamientos relativos máximos – eje Y

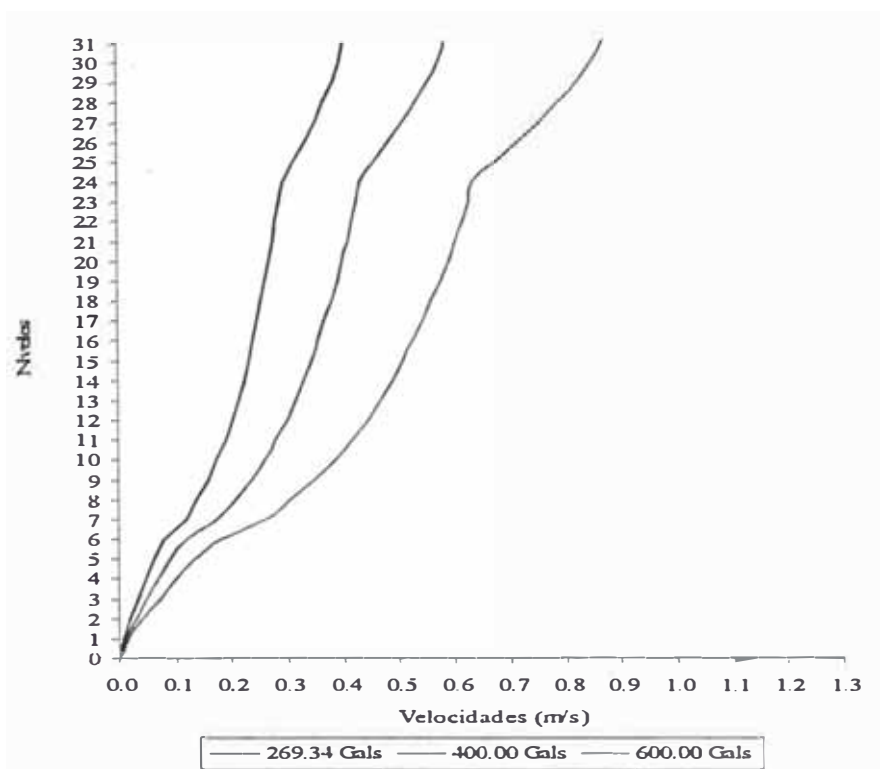


Figura 4.26 Velocidades relativas máximas – eje X

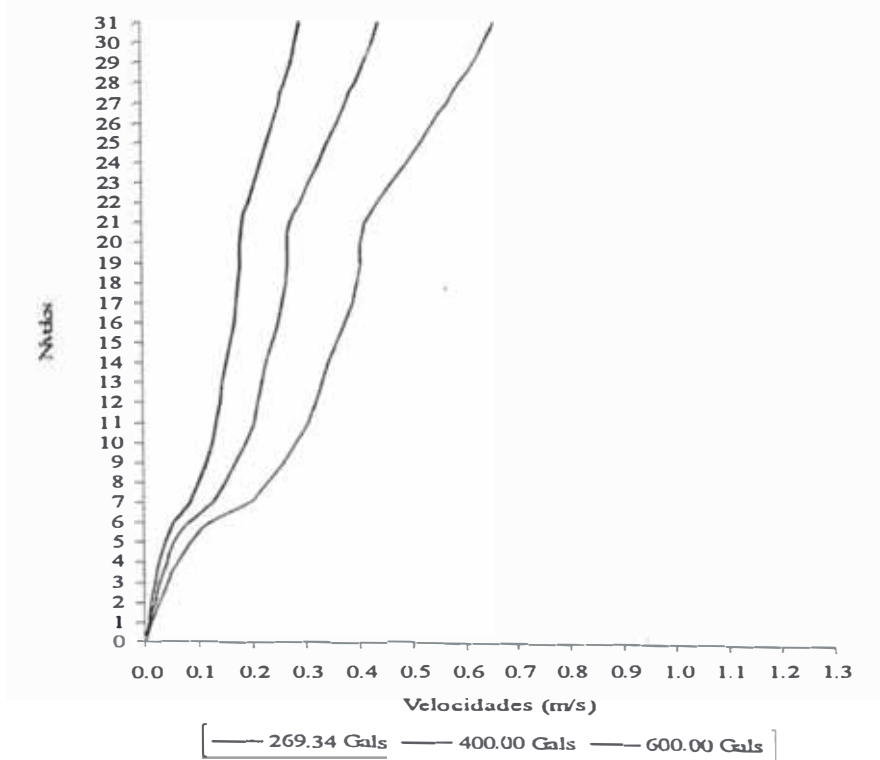


Figura 4.27 Velocidades relativas máximas – eje Y

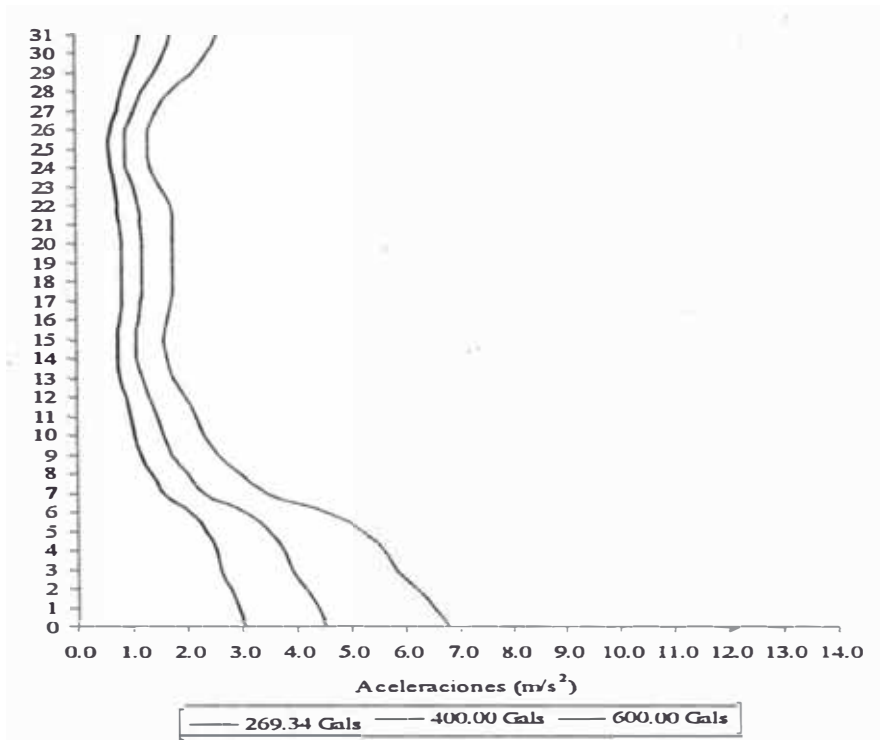


Figura 4.28 Aceleraciones absolutas máximas – eje X

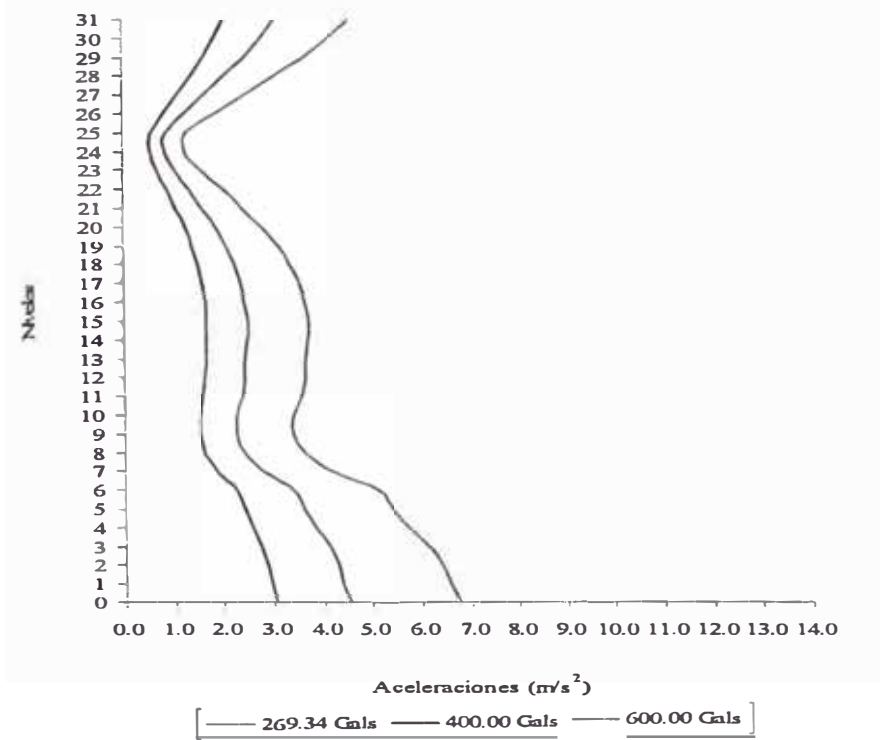


Figura 4.29 Aceleraciones absolutas máximas – eje Y

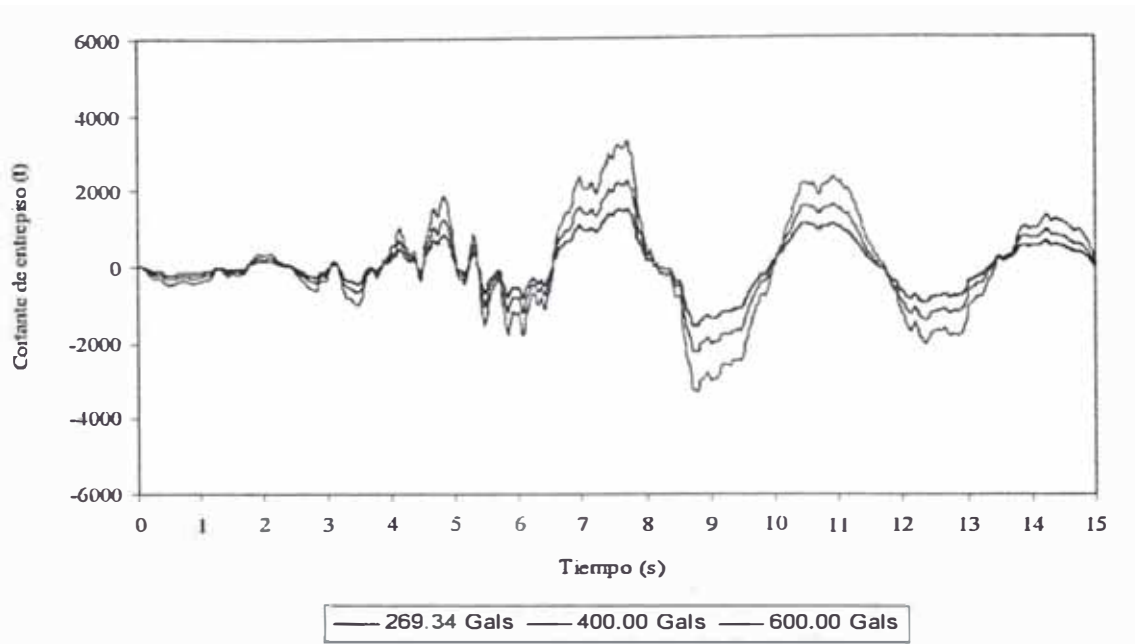


Figura 4.30 Respuesta tiempo historia
Nivel 10 – eje X

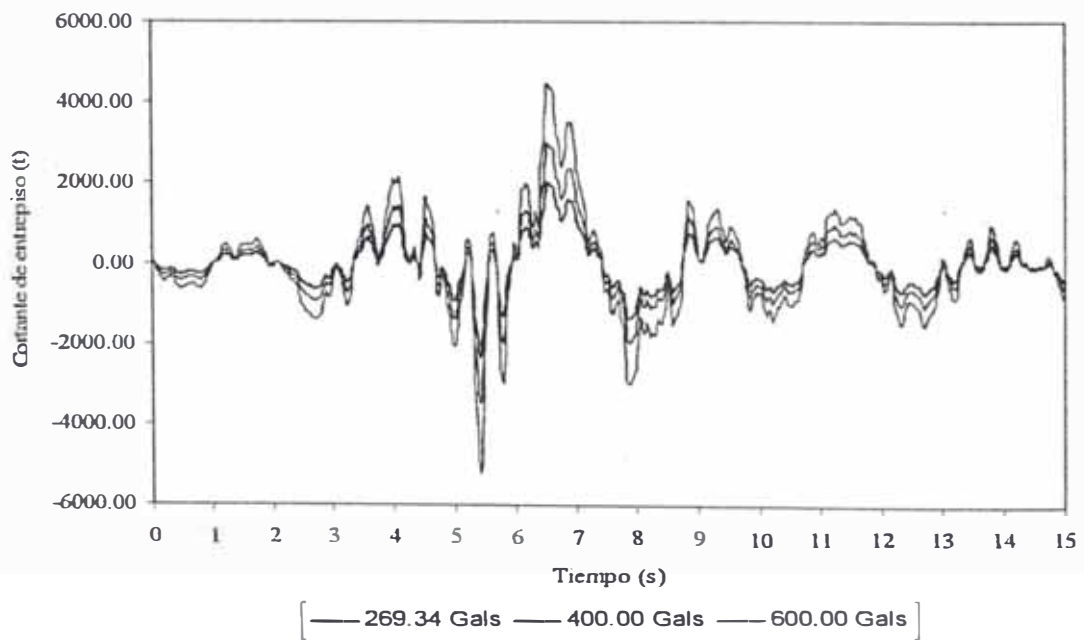


Figura 4.31 Respuesta tiempo historia
Nivel 10 – eje Y

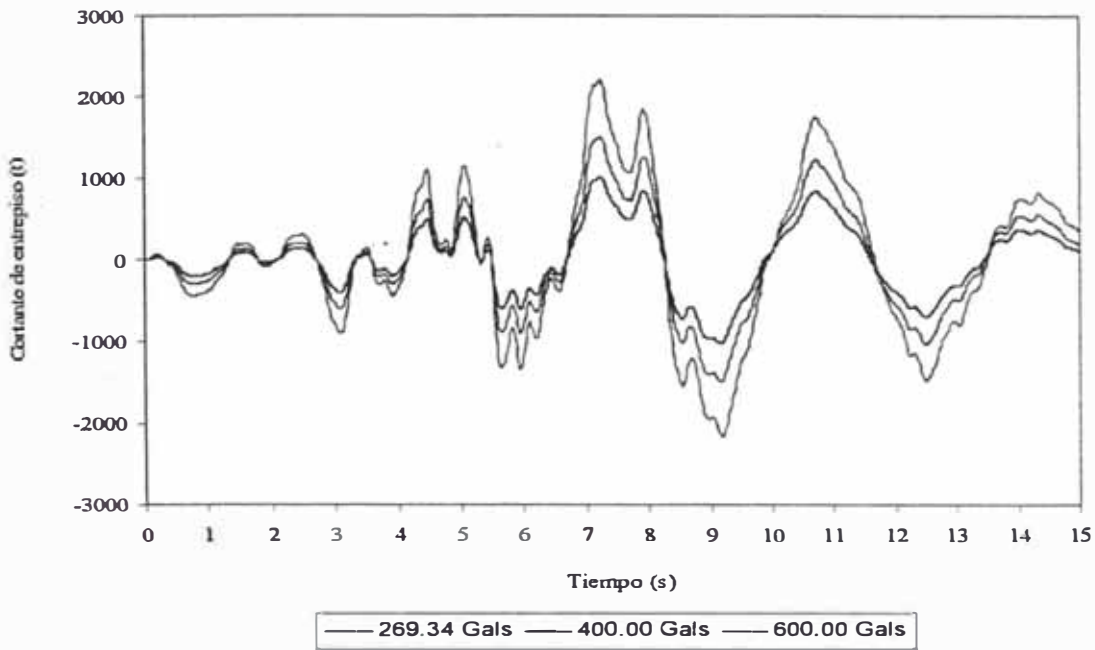


Figura 4.32 Respuesta tiempo historia
Nivel 20 – eje X

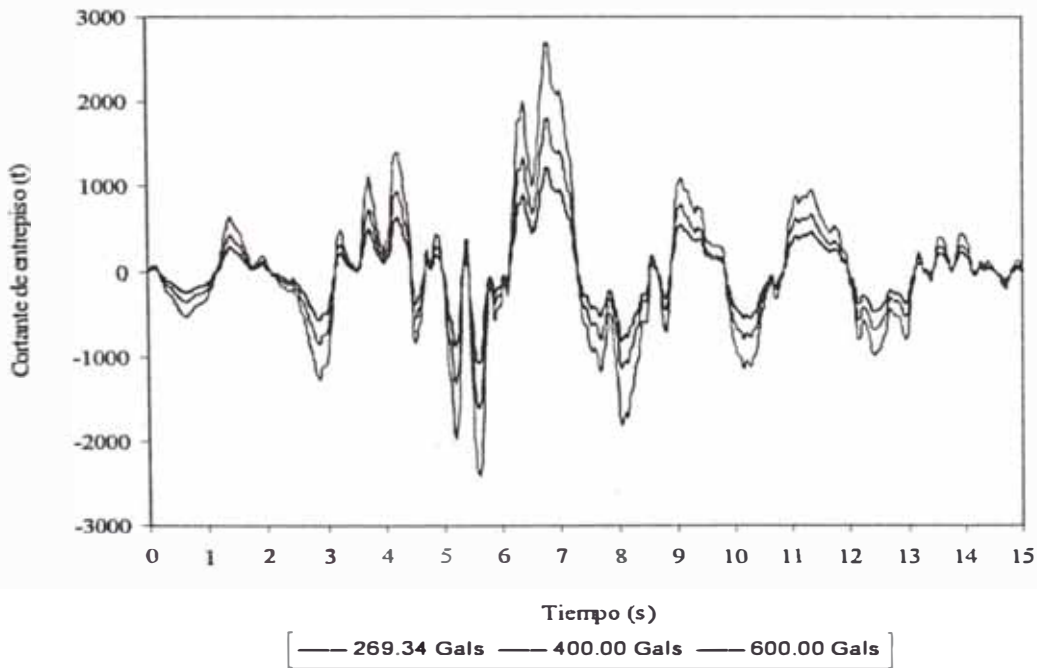


Figura 4.33 Respuesta tiempo historia
Nivel 20 – eje Y

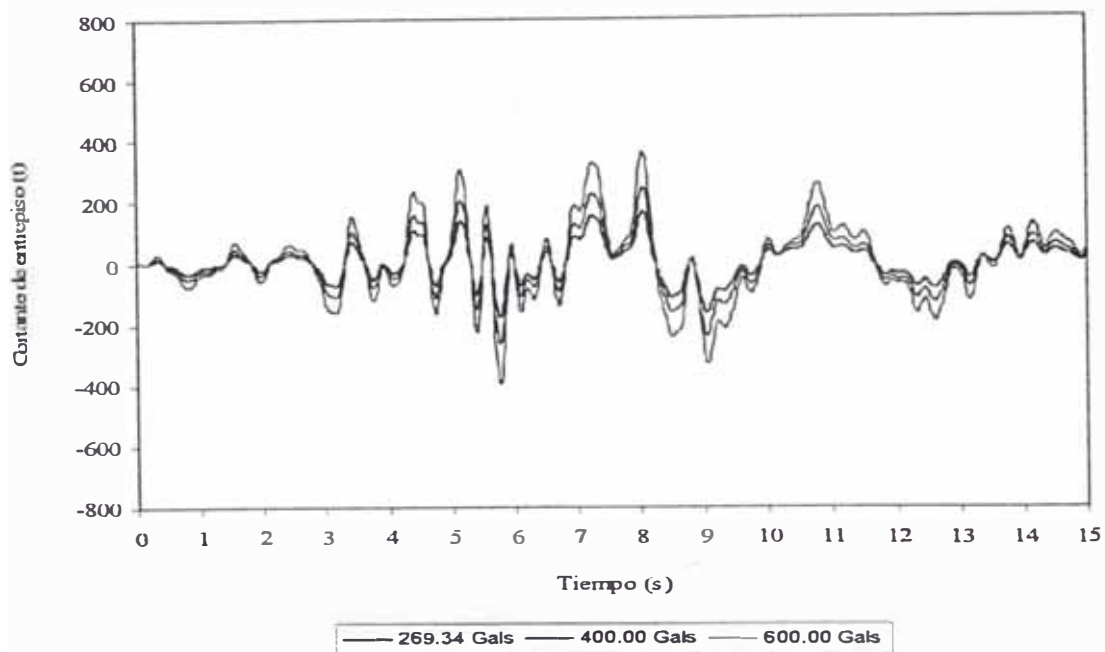


Figura 4.34 Respuesta tiempo historia Nivel 30 – eje X

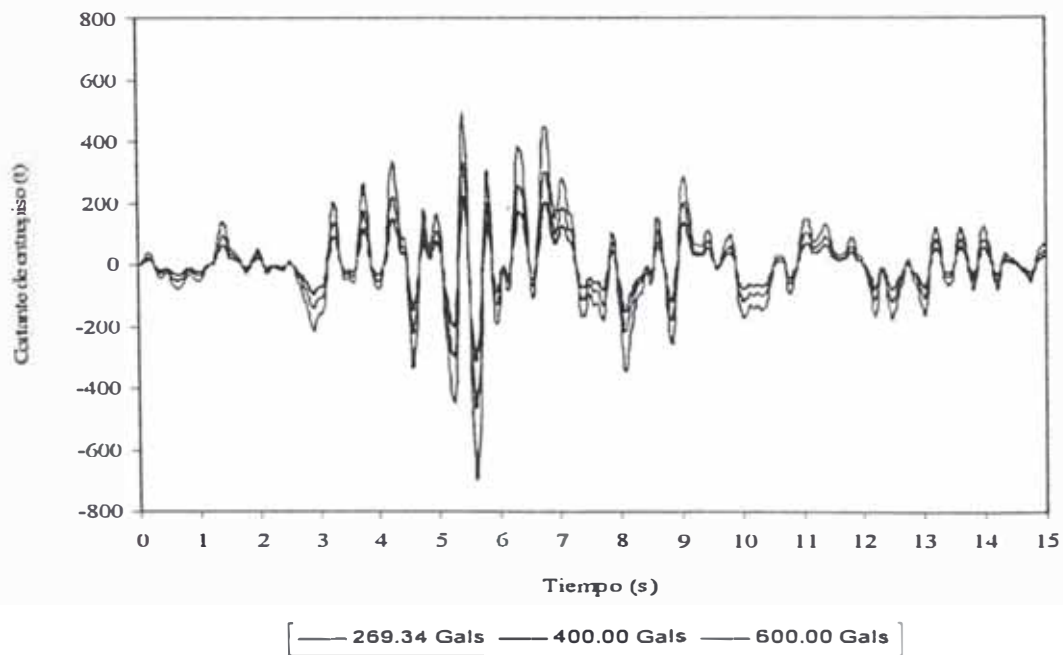


Figura 4.35 Respuesta tiempo historia Nivel 30 – eje Y

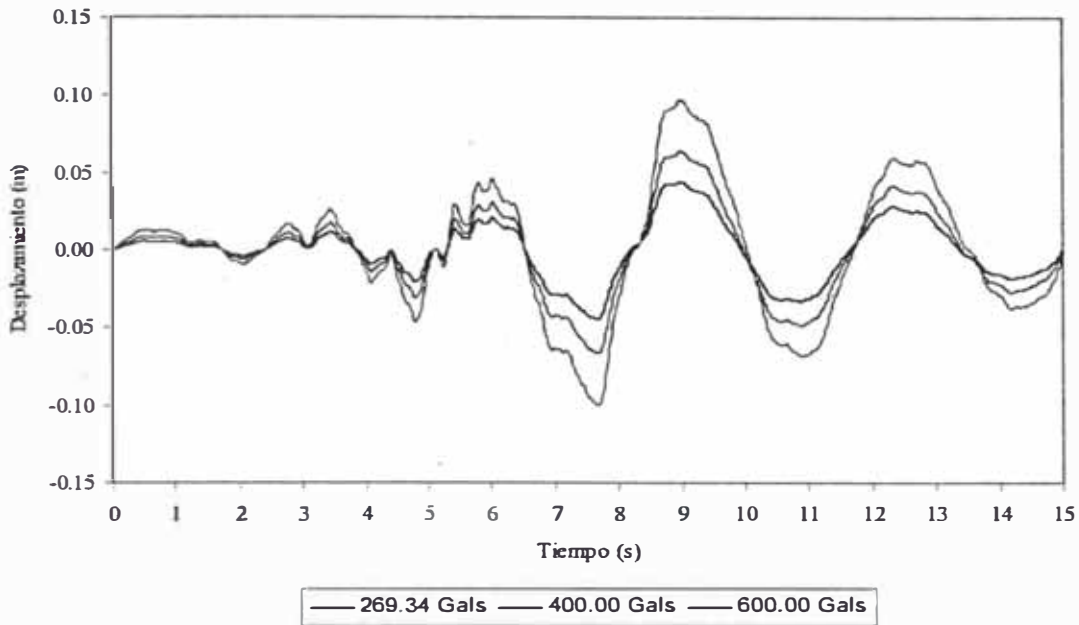


Figura 4.36 Respuesta tiempo historia
Nivel 10 – eje X

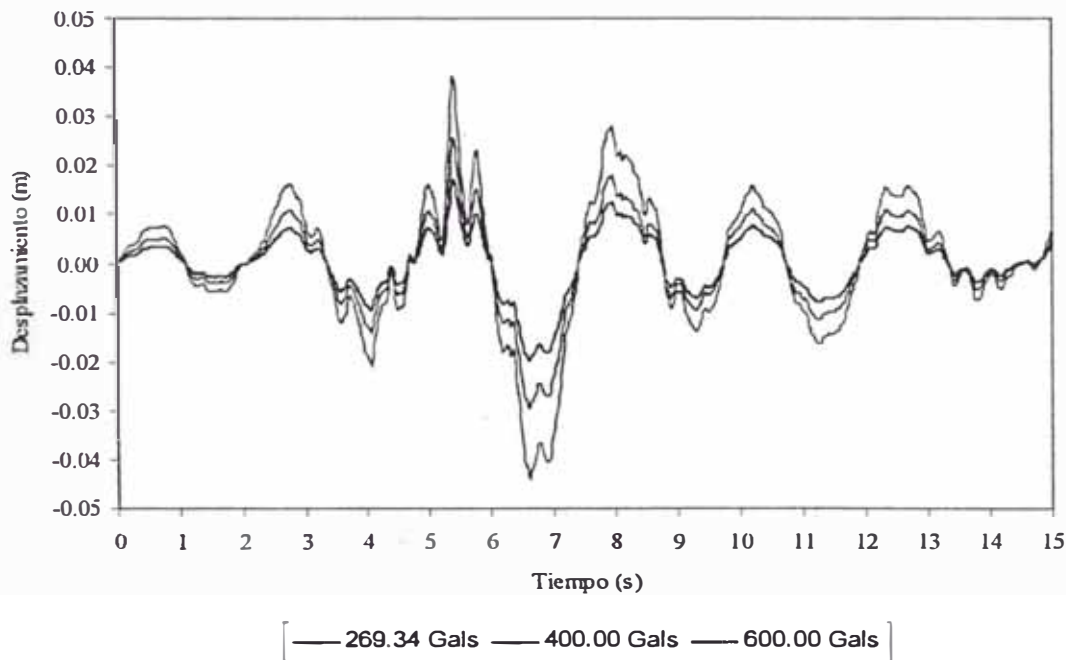


Figura 4.37 Respuesta tiempo historia
Nivel 10 – eje Y

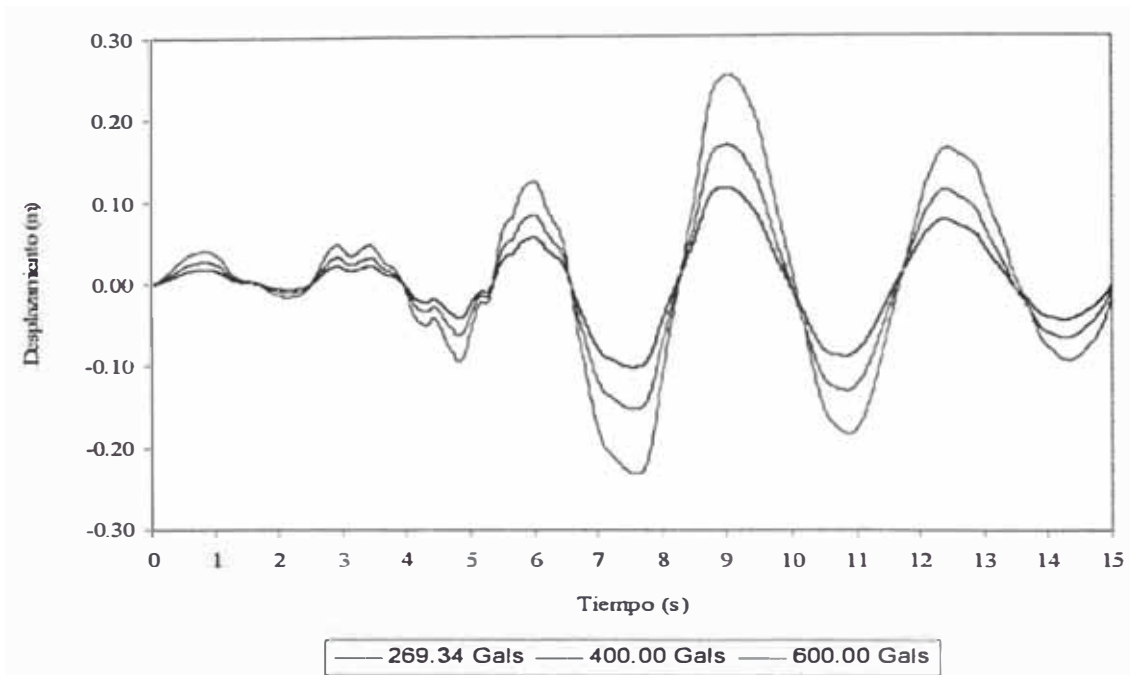


Figura 4.38 Respuesta tiempo historia
Nivel 20 – eje X

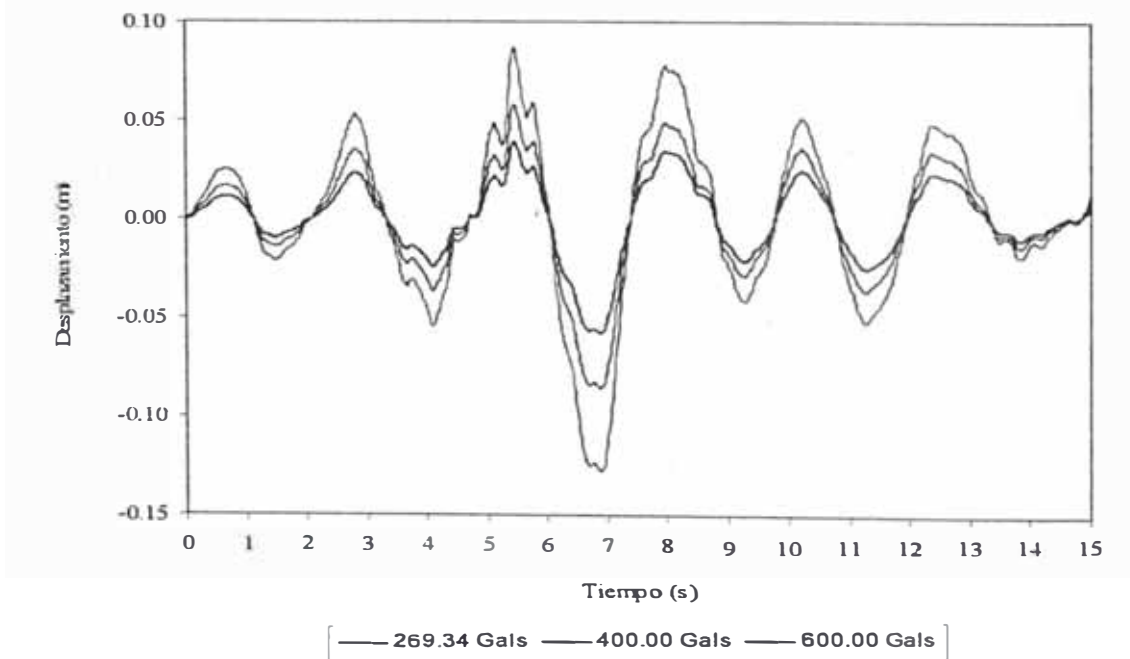


Figura 4.39 Respuesta tiempo historia
Nivel 20 – eje Y

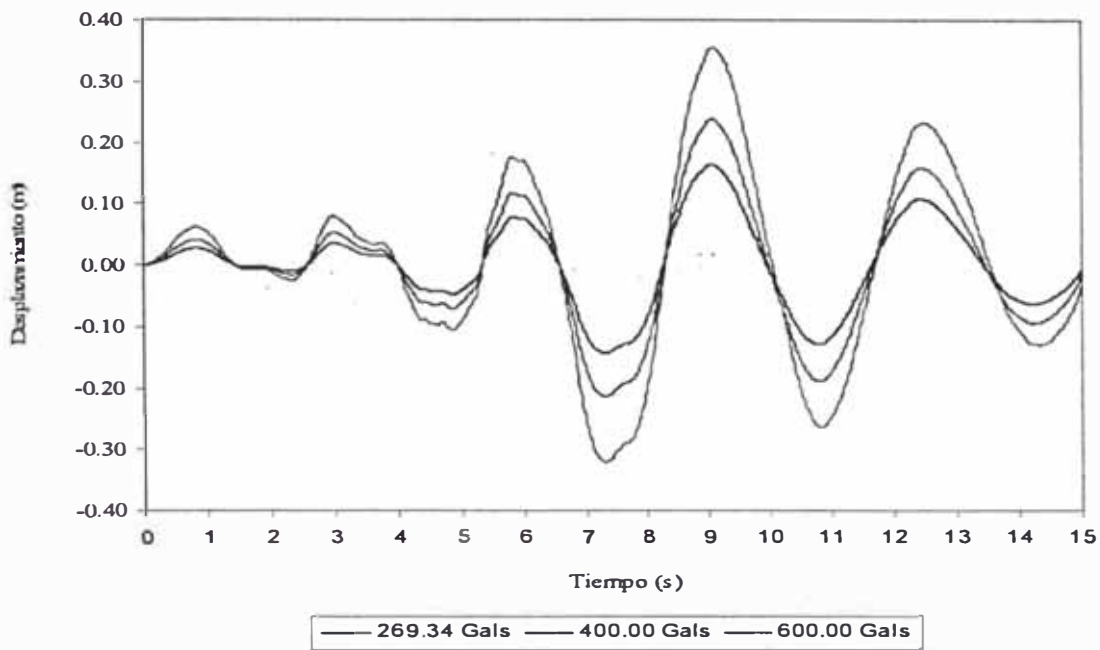


Figura 4.40 Respuesta tiempo historia
Nivel 30 – eje X

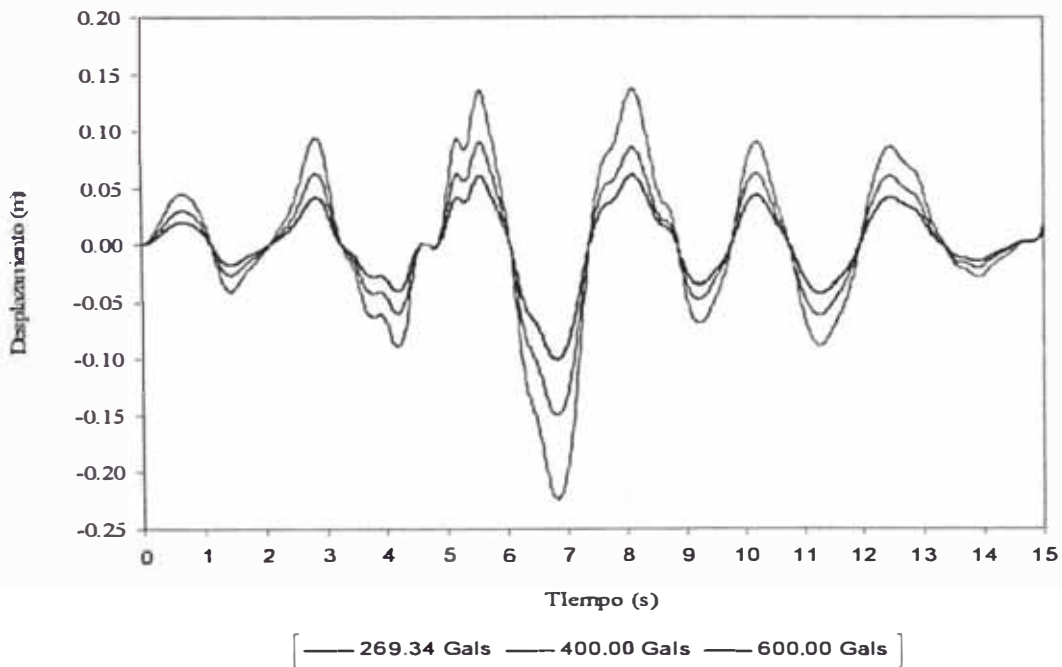


Figura 4.41 Respuesta tiempo historia
Nivel 30 – eje Y

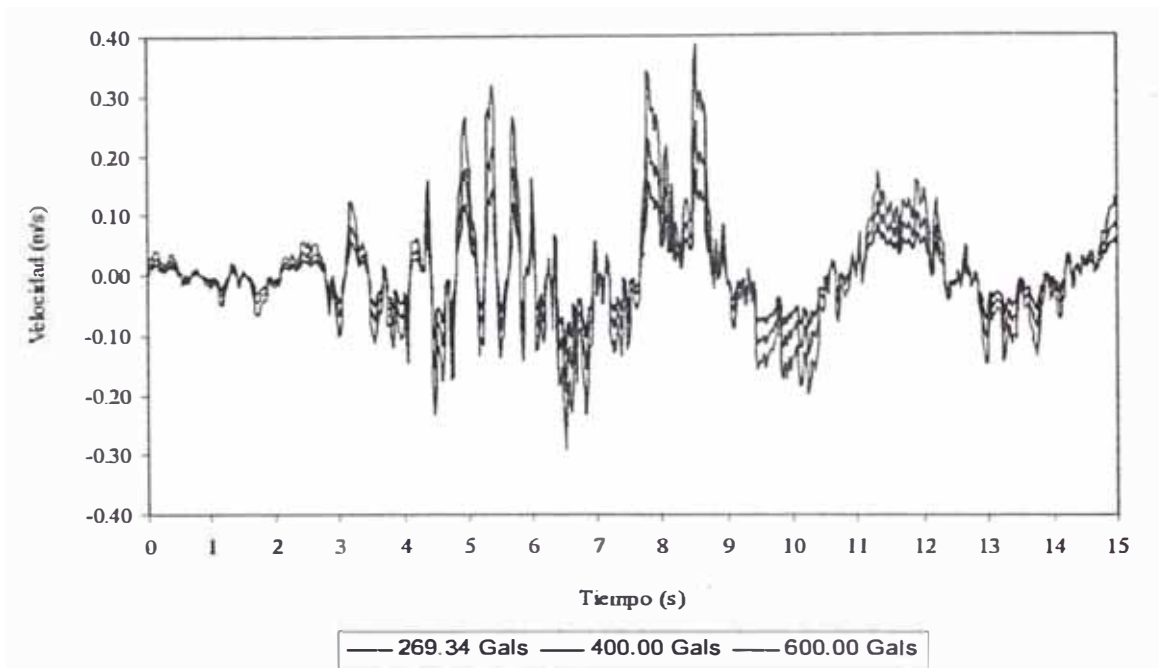


Figura 4.42 Respuesta tiempo historia
Nivel 10 – eje X

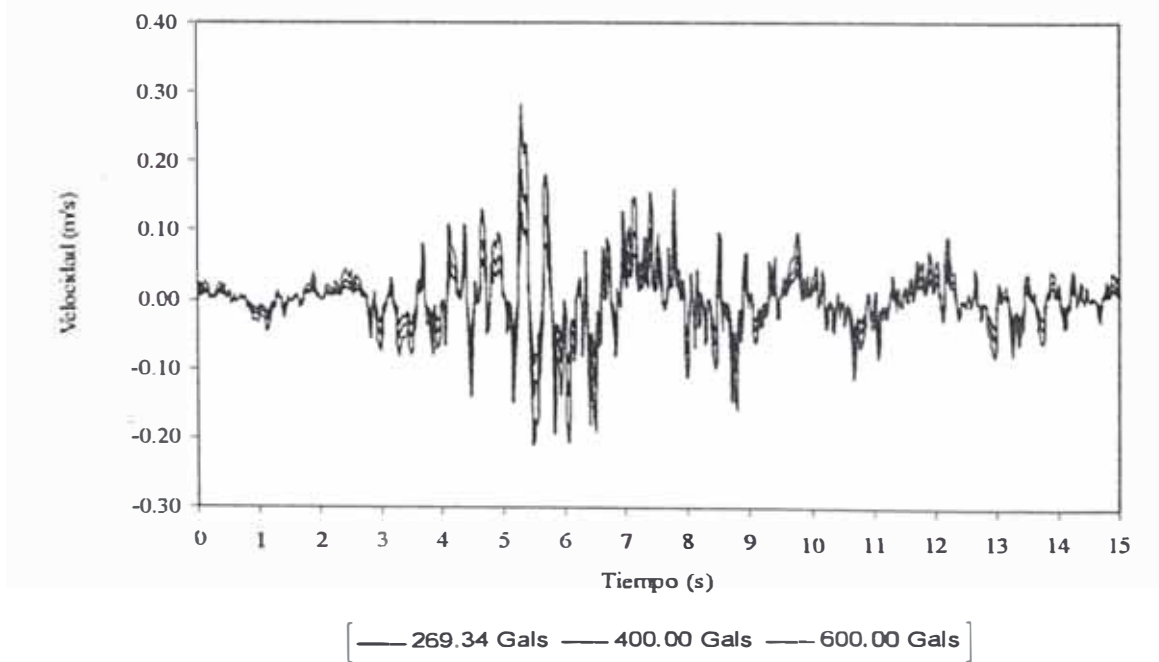


Figura 4.43 Respuesta tiempo historia
Nivel 10 – eje Y

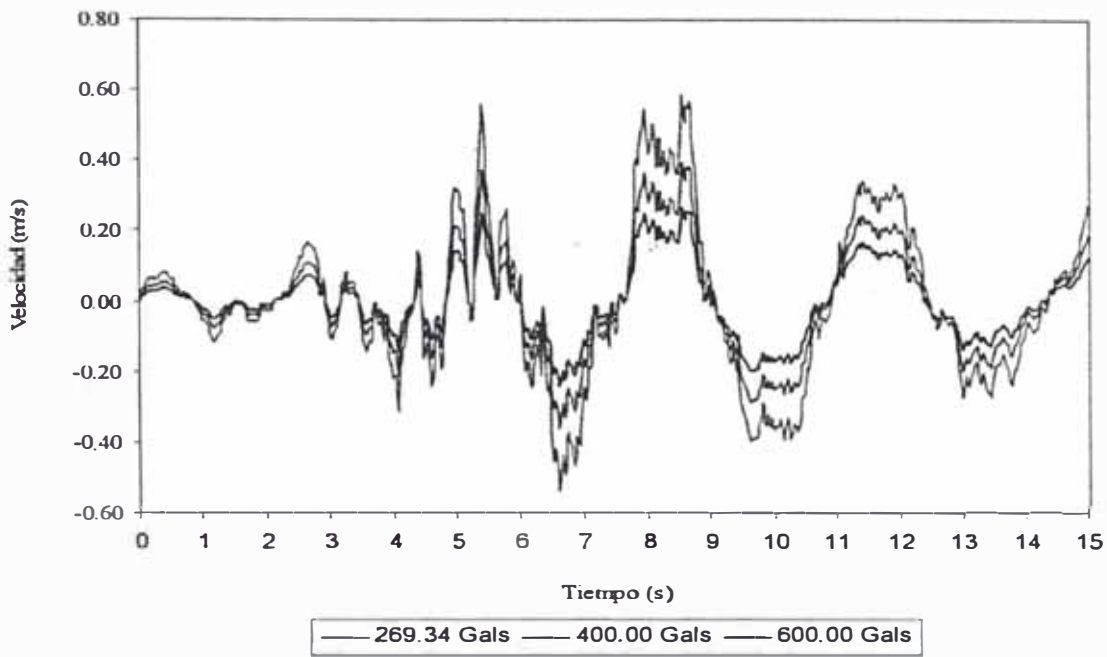


Figura 4.44 Respuesta tiempo historia
Nivel 20 – eje X

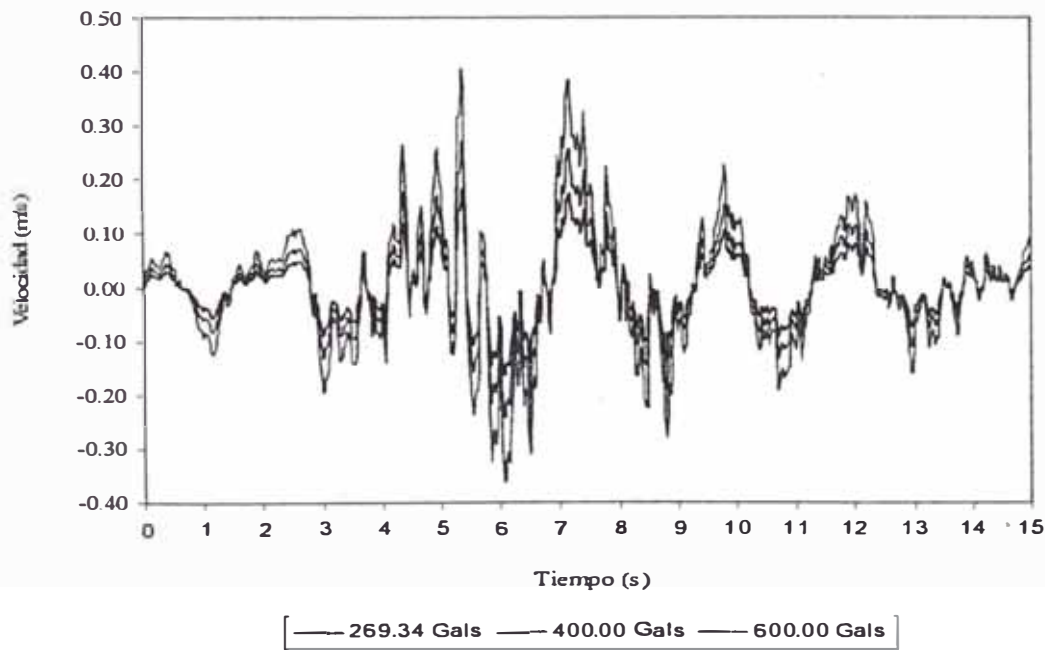


Figura 4.45 Respuesta tiempo historia
Nivel 20 – eje Y

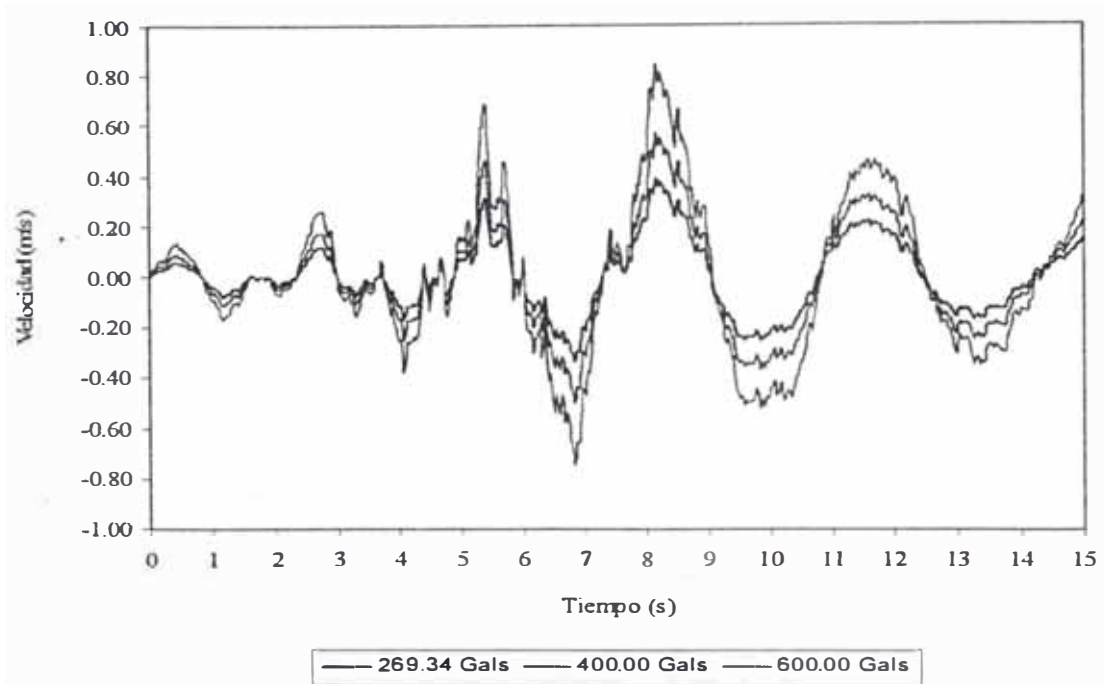


Figura 4.46 Respuesta tiempo historia
Nivel 30 – eje X

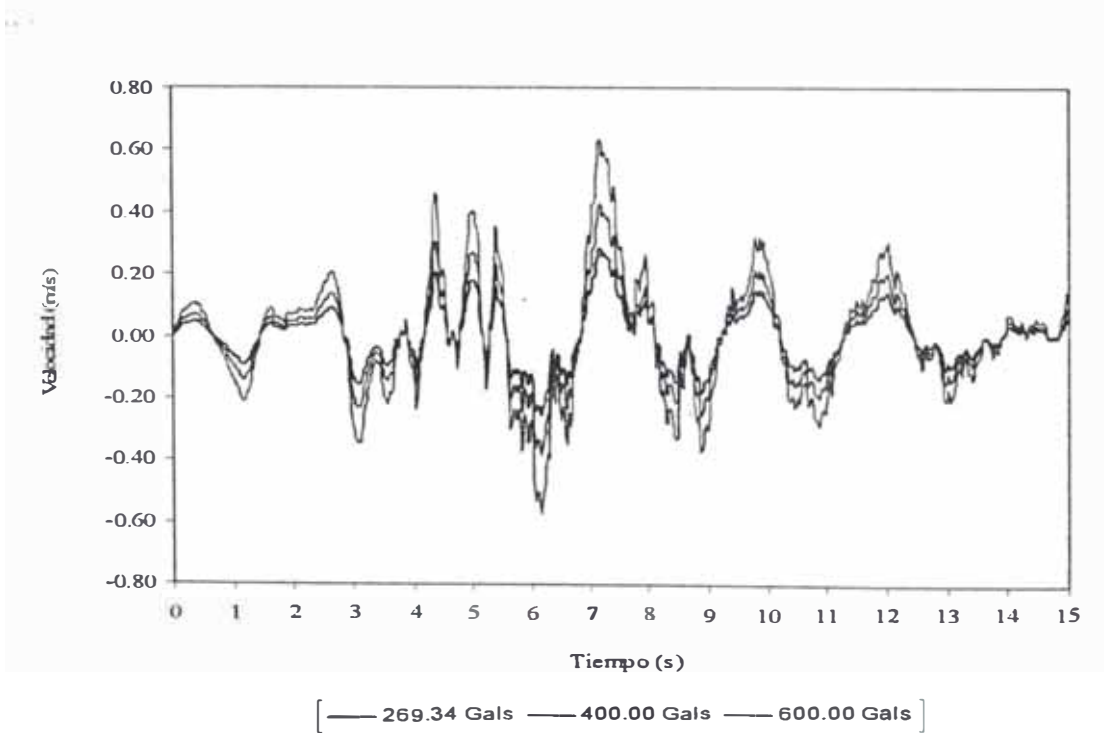


Figura 4.47 Respuesta tiempo historia
Nivel 30 – eje Y

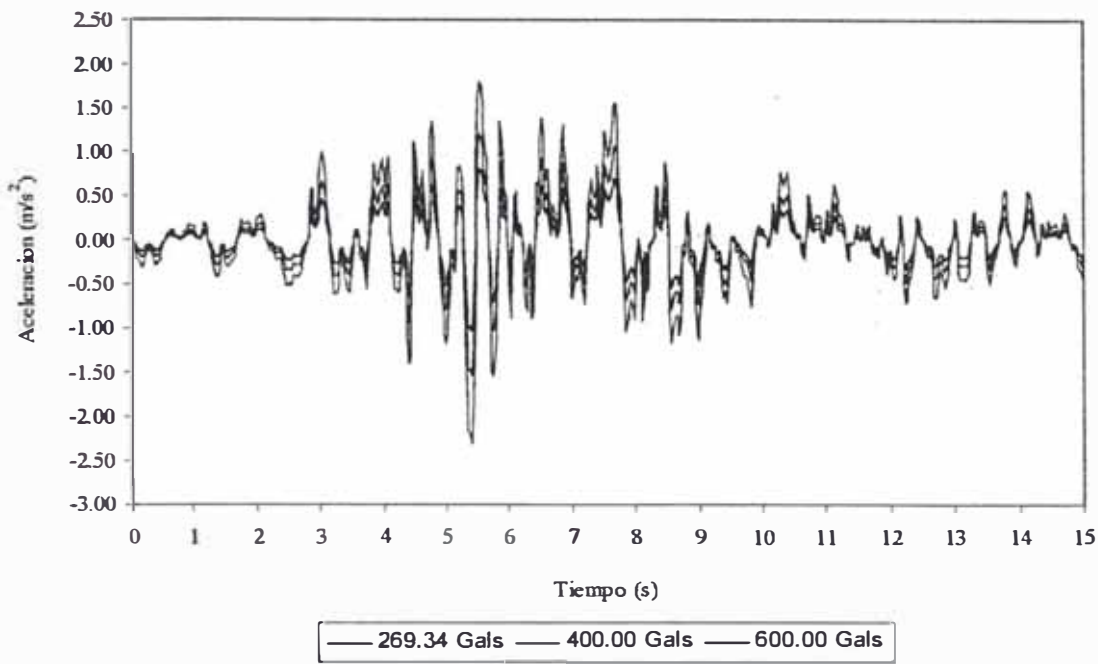


Figura 4.48 Respuesta tiempo historia
Nivel 10 – eje X

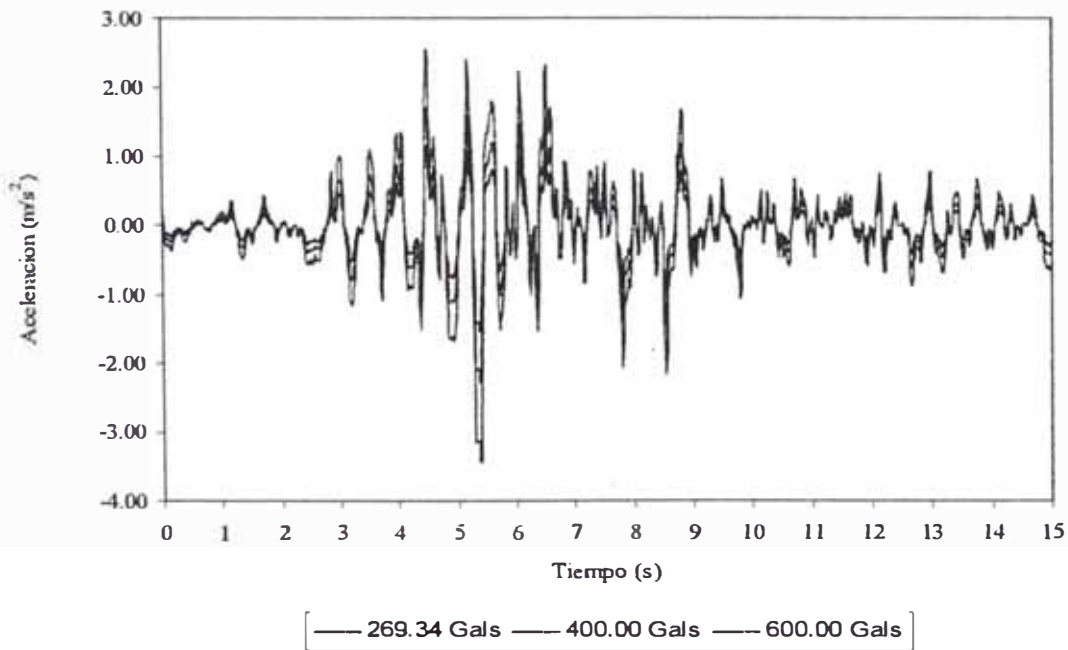


Figura 4.49 Respuesta tiempo historia
Nivel 10 – eje Y

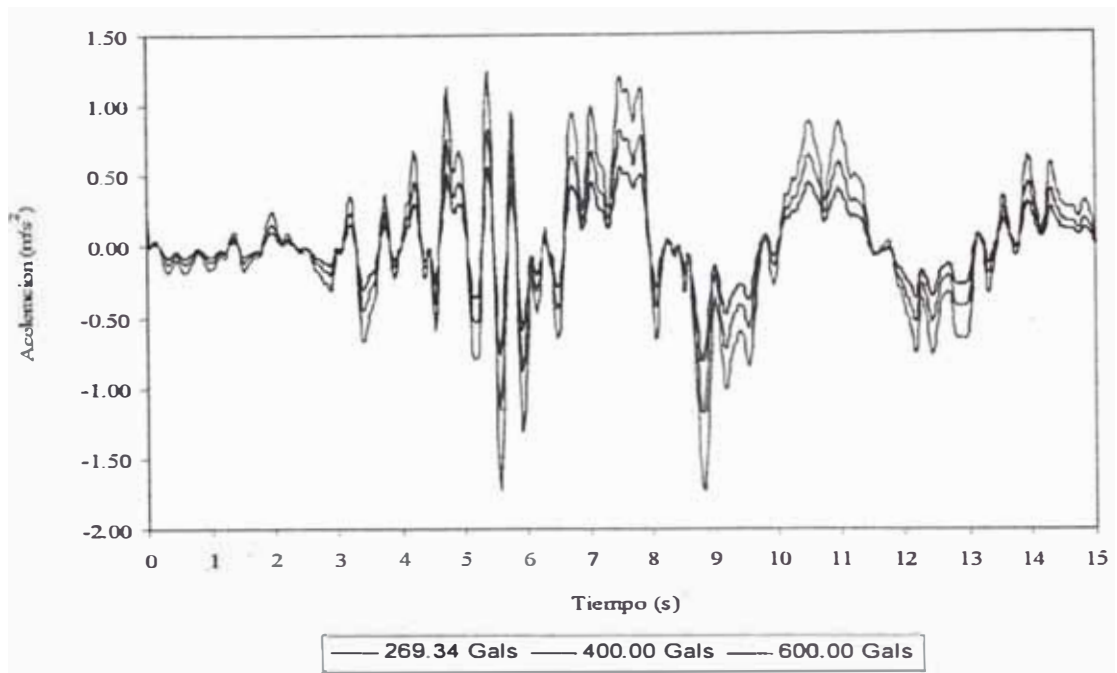


Figura 4.50 Respuesta tiempo historia
Nivel 20 – eje X

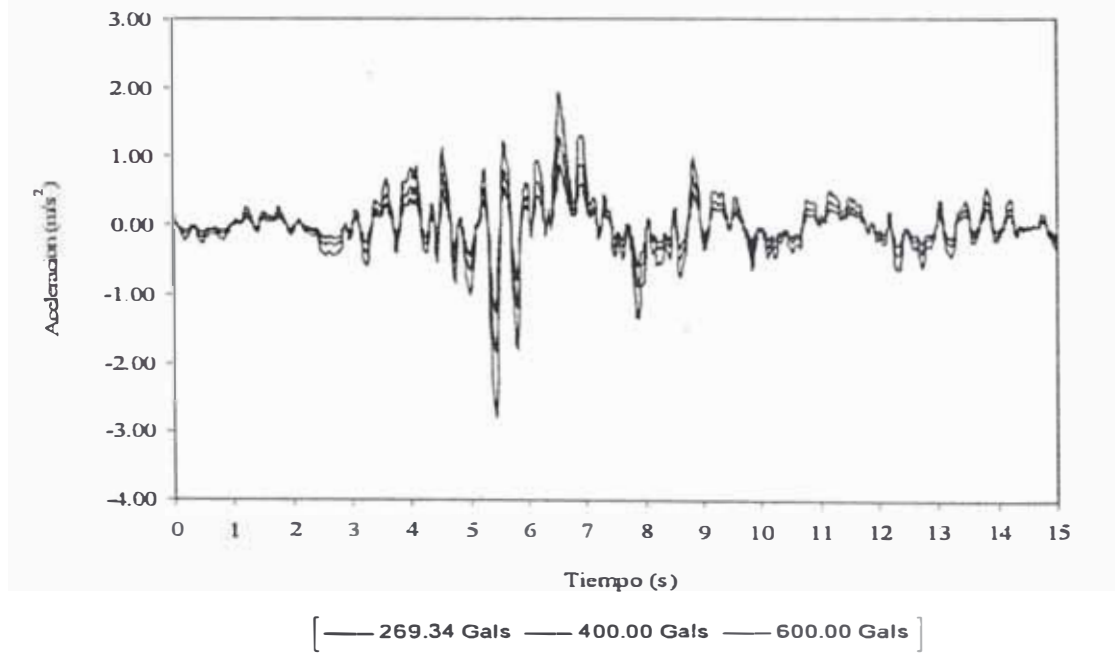


Figura 4.51 Respuesta tiempo historia
Nivel 20 – eje Y

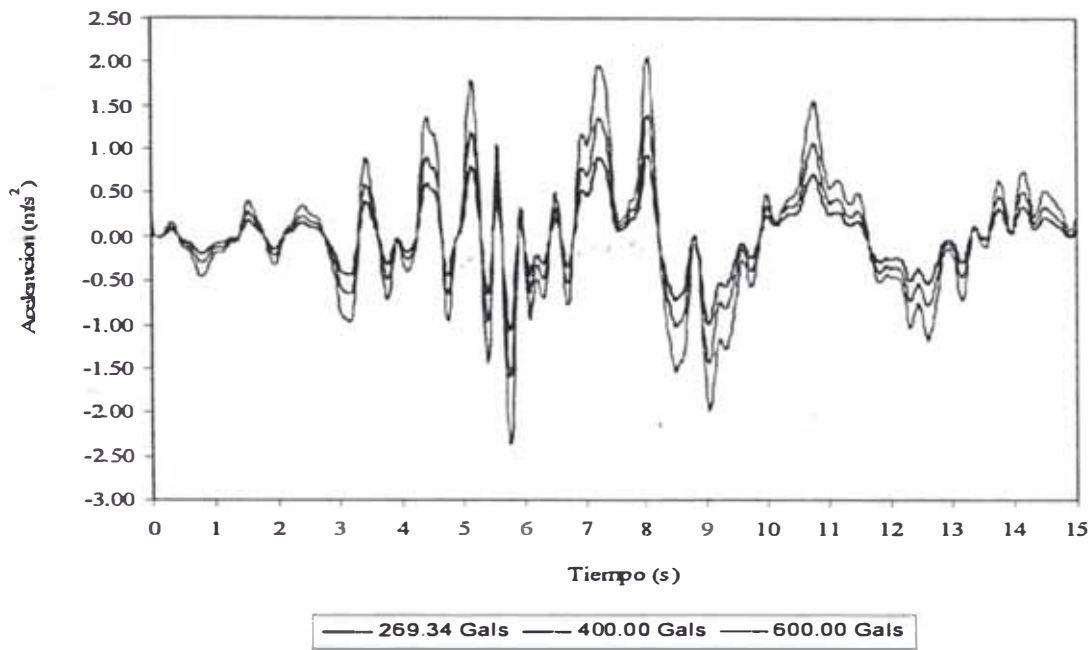


Figura 4.52 Respuesta tiempo historia
Nivel 30 – eje X

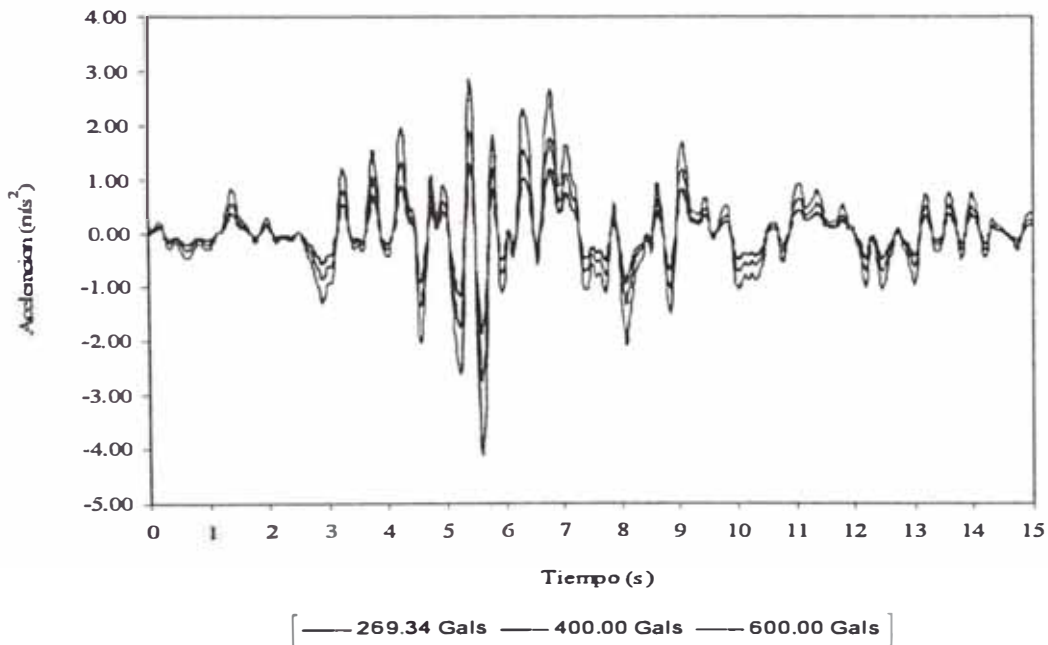


Figura 4.53 Respuesta tiempo historia
Nivel 30 – eje Y

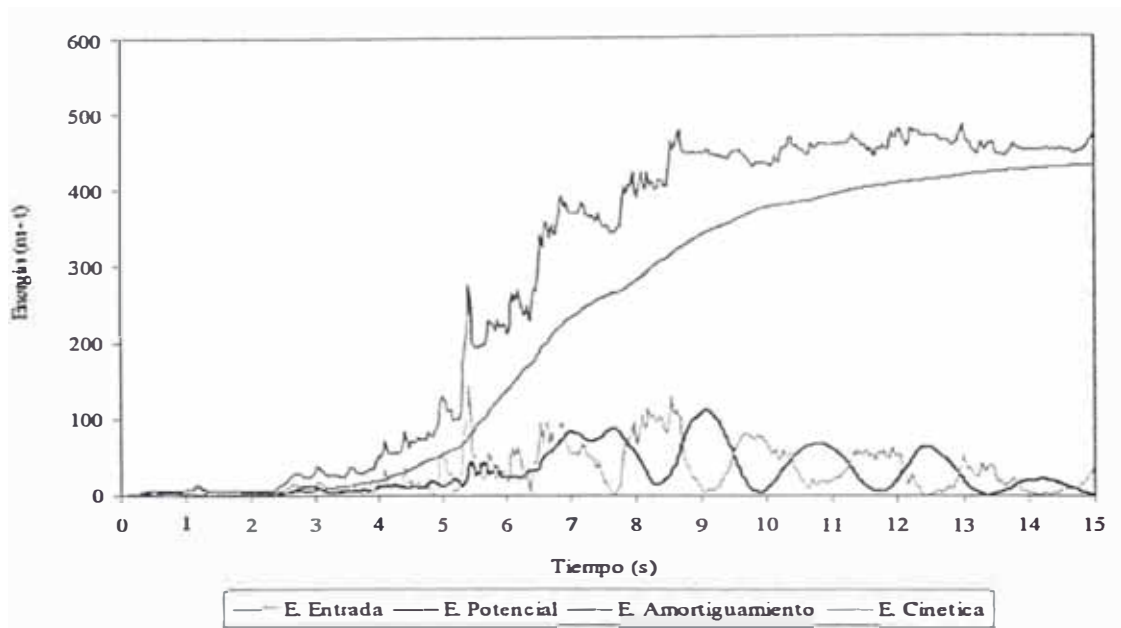


Figura 4.54 Balance energético
Acel. = 269.34 gals

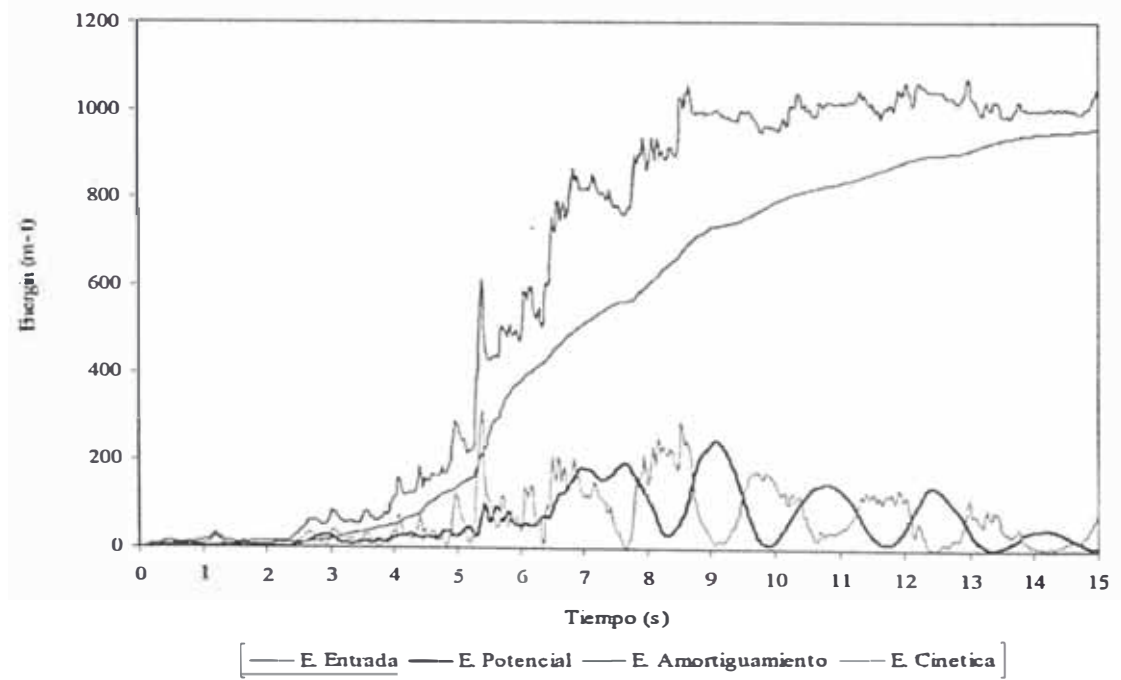


Figura 4.55 Balance energético
Acel. = 400.00 gals

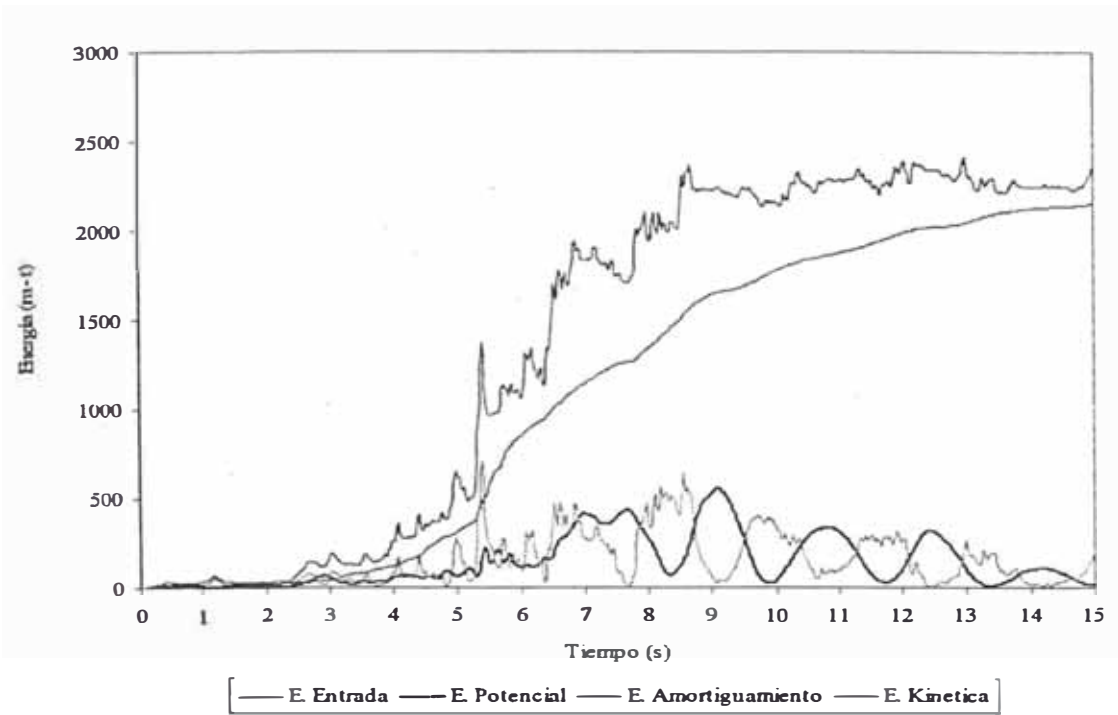


Figura 4.56 Balance energético
Acel. = 600.00 gals

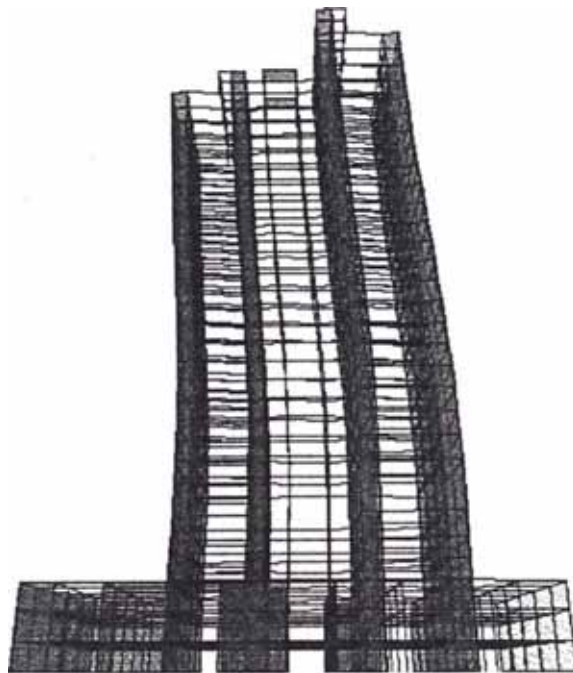
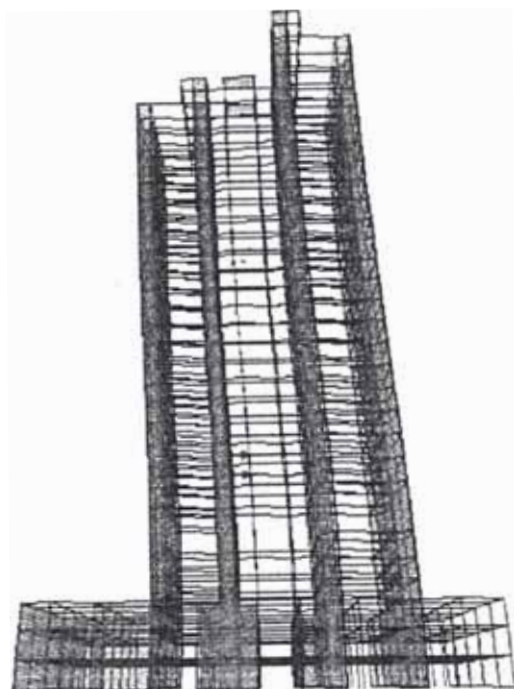
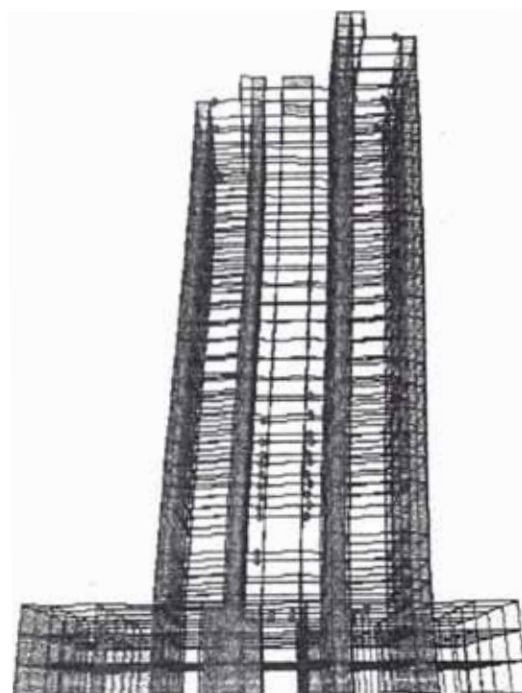


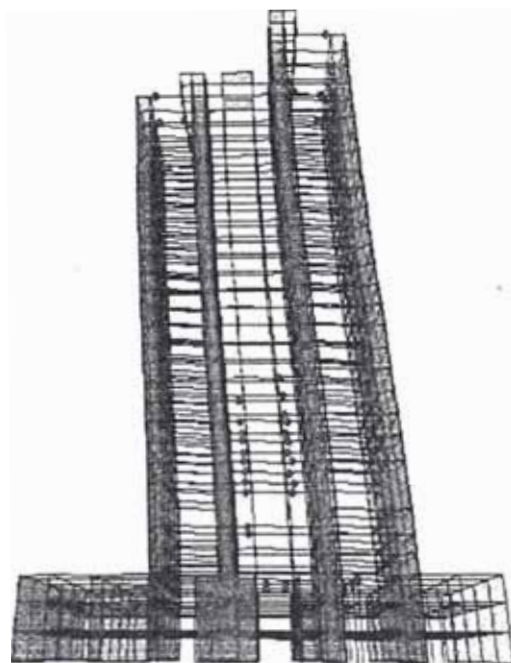
Figura 4.57 Mecanismo de formación de rótulas plásticas
Sismo 17/10/66. Acel. = 269.34 gals



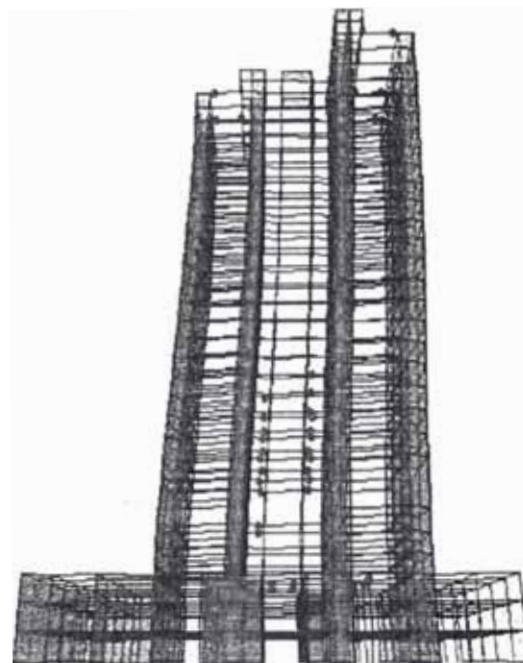
(a) Para $t = 7.0$ s



(b) Para $t = 9.0$ s



(c) Para $t = 11.0$ s



(d) Para $t = 13.0$ s

Figura 4.58 Mecanismo de formación de rótulas plásticas
Sismo 17/10/66. Acel. = 400.00 gals

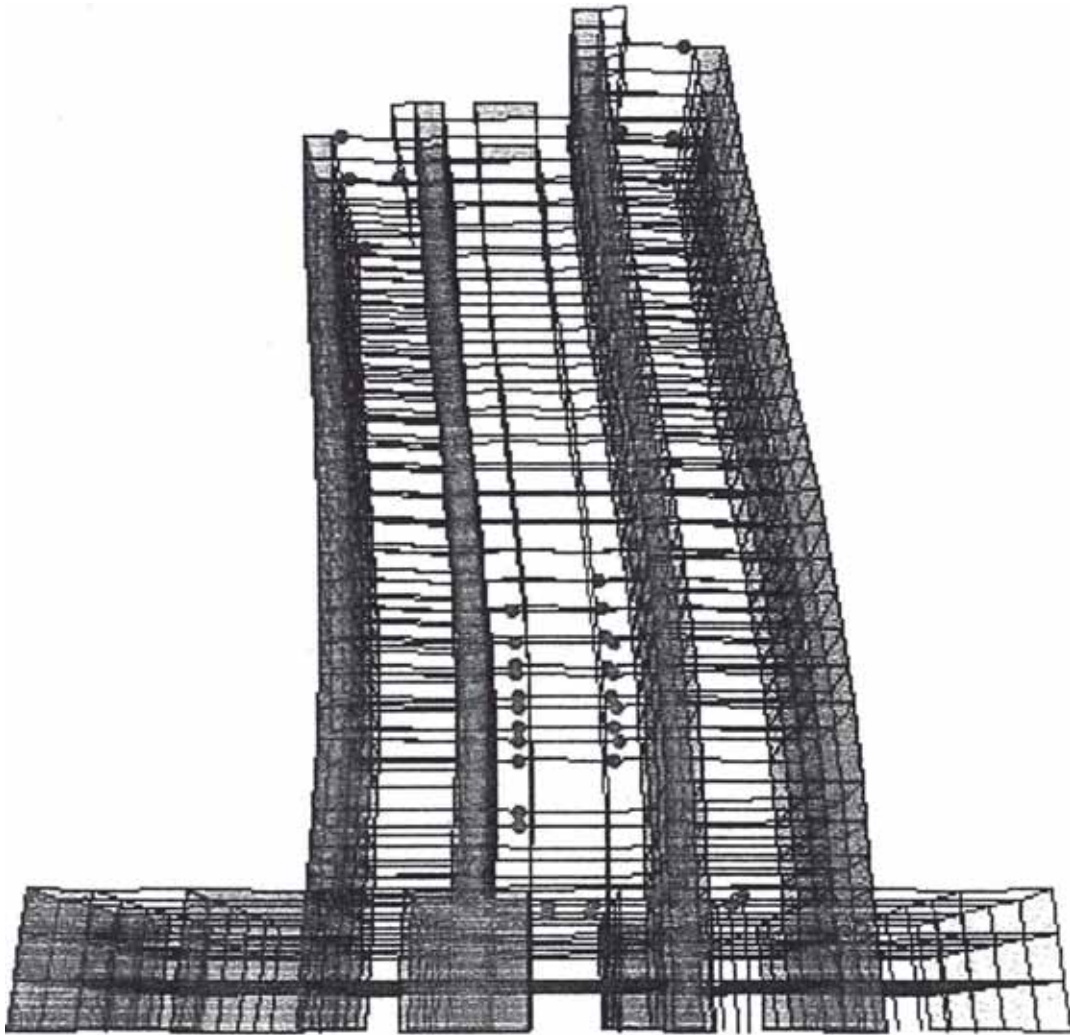
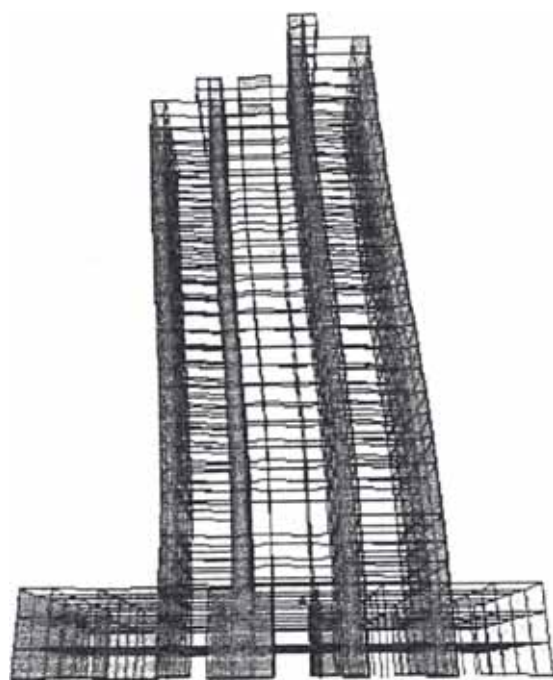
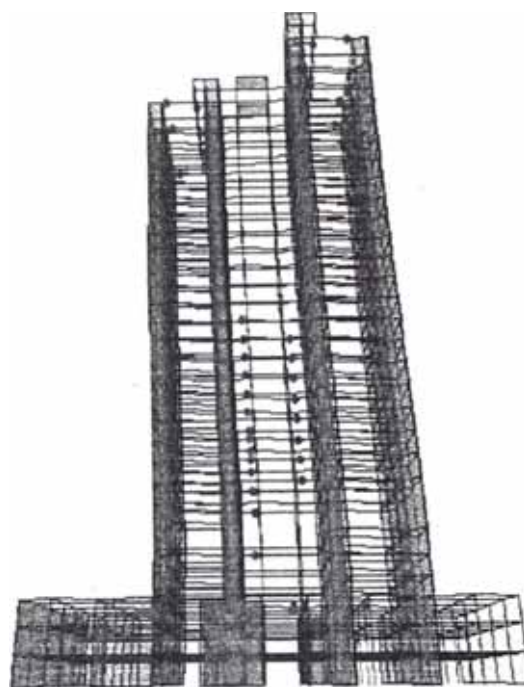


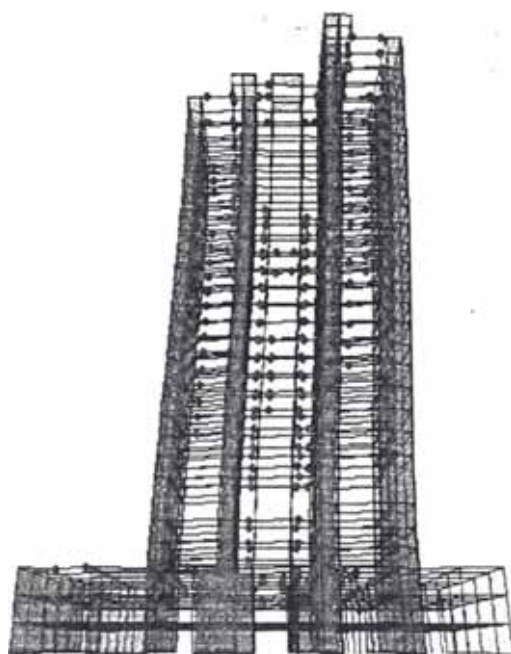
Figura 4.59 Total de Rótulas plásticas formadas ($t = 15.0$ s)
Sismo 17/10/66. Acel. = 400.00 gals



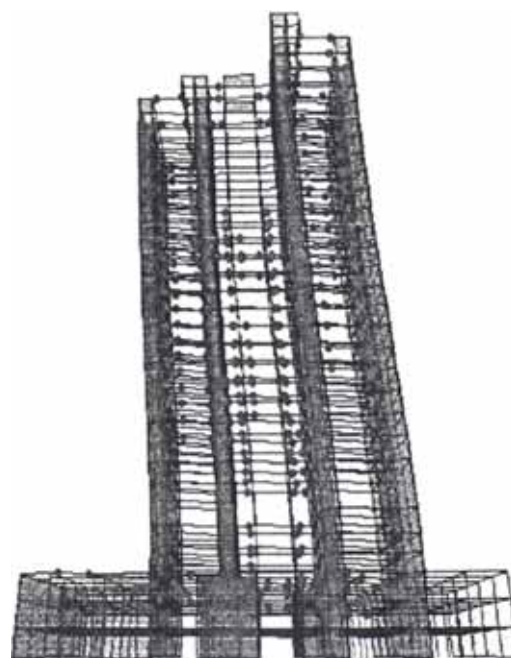
(a) Para $t = 5.0$ s



(b) Para $t = 7.0$ s



(c) Para $t = 9.0$ s



(d) Para $t = 11.0$ s

Figura 4.60 Mecanismo de formación de rótulas plásticas
Sismo 17/10/66. Acel. = 600.00 gals

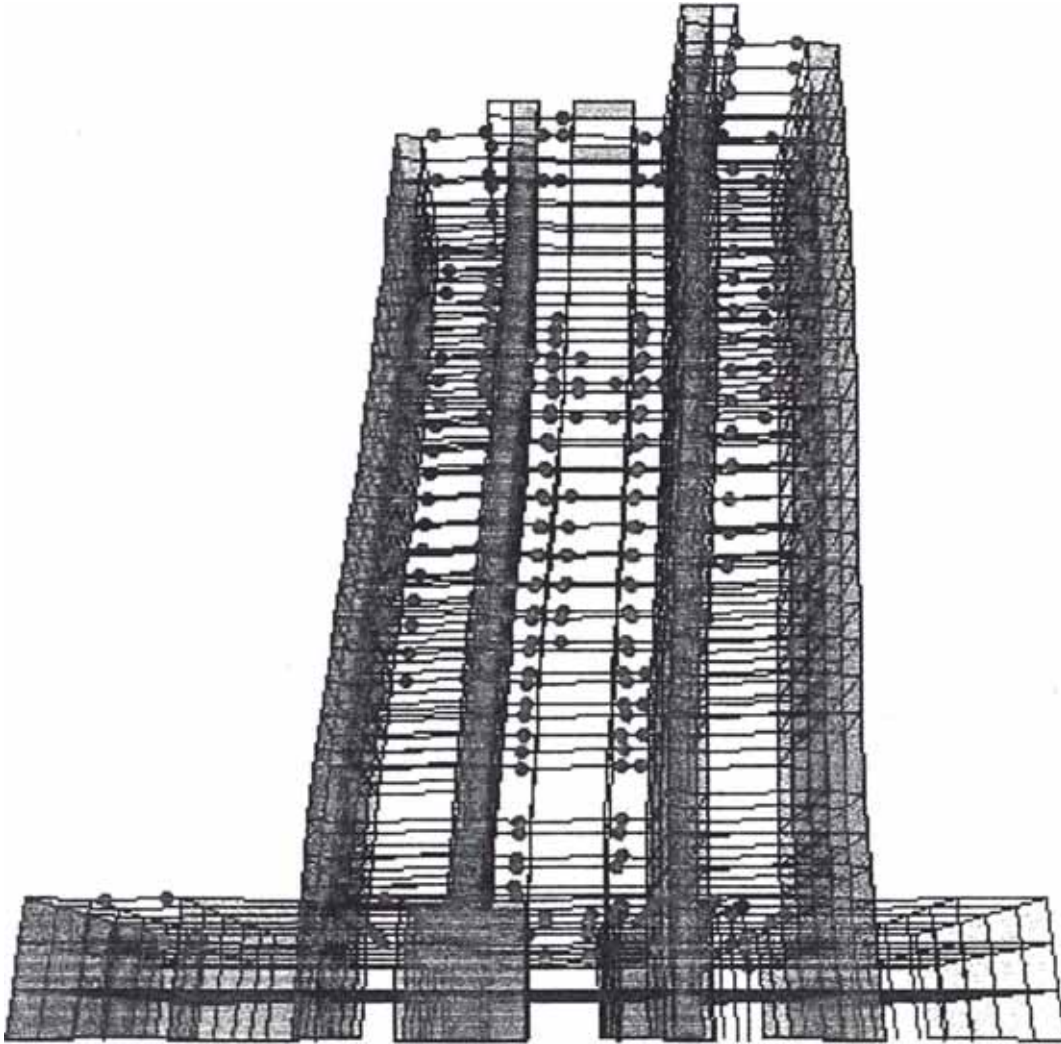


Figura 4.61 Total de Rótulas plásticas formadas ($t = 15.0$ s)
Sismo 17/10/66. Acel. = 600.00 gals

CAPÍTULO V

RESPUESTA INELÁSTICA CON DISIPADORES DE ENERGÍA

5.1 INTRODUCCIÓN

El edificio de concreto armado utilizado sometido a los sismos utilizados se comportó en el rango inelástico con la consiguiente disipación de energía, a través de las rótulas plásticas. Los métodos de análisis deberían tener en consideración el comportamiento inelástico de las estructuras.

El propósito de emplear disipadores de energía es tratar de que la estructura tenga un mejor comportamiento frente a sismos, con la finalidad de reducir las pérdidas de vidas humanas y materiales. Una forma es la inclusión de estos disipadores de energía en la estructura y lograr un nivel preestablecido de amortiguamiento acorde a las características propias de la estructura y así poder limitar sus deformaciones inelásticas (40, 47, 53).

Los requerimientos de diseño convencionales requieren que la estructura resista los sismos a través de la combinación de fuerza, deformación y absorción de energía. El nivel de amortiguamiento en estas estructuras es típicamente bajo y la cantidad de energía disipada durante el comportamiento elástico también. Durante sismos importantes estas estructuras se deforman hacia los límites elásticos y se mantienen debido a su habilidad de deformación inelástica (21, 29, 49). Estas deformaciones inelásticas toman la forma de rótulas plásticas las cuales resultan en un incremento de la flexibilidad y disipación de energía.

Una alternativa para la mitigación de los efectos de los sismos es la consideración de la distribución de energía dentro de la estructura. Durante un sismo una cantidad finita de energía es introducida a la estructura. Esta energía de entrada es

transformada en energía cinética y potencial la cual debe ser absorbida o disipada a través del calor. Si no existiera amortiguamiento las vibraciones podrían existir infinitamente. Existe un nivel de amortiguamiento inherente de la estructura que reduce la amplitud de la vibración (19, 24).

El comportamiento de la estructura puede mejorarse si una porción de la energía de entrada puede ser absorbida no por la estructura misma, sino por algún dispositivo disipativo. Esto se vera más claro considerando la relación de la conservación de energía, la cual se muestra a continuación:

$$E = E_k + E_s + E_h + E_d \quad (5.1)$$

La energía de entrada absoluta (E), es la suma de la energía cinética (Ek), mas la energía de deformación elástica recuperable (Es), energía disipada irrecuperable por el sistema estructural a través de la deformación inelástica (Eh), y la energía disipada por amortiguamiento suplementario (Ed). Con la adición de sistemas de amortiguamiento suplementario a todo lo alto de la estructura, se mejoraría la respuesta sísmica y el control de daño.

5.2 OBJETIVOS

Mejorar el comportamiento estructural del edificio ante sollicitaciones sísmicas, con la inclusión de dispositivos disipadores de energía, los cuales brindaran un amortiguamiento adicional a la estructura.

Disminuir los desplazamientos de entrepiso así como las velocidades, aceleraciones y cortantes en toda la estructura.

Reducir la cantidad de rótulas plásticas en el sistema a través de la disipación de energía por medio de estos dispositivos.

5.3 PROCEDIMIENTO Y LIMITACIÓN

Normalmente los edificios típicos tienen un amortiguamiento interno estructural del 5% del crítico. Un óptimo rendimiento de un edificio con disipadores de fluido viscoso puede tener un amortiguamiento adicional en el rango del 20 al 25% del crítico (01, 62). Experimentos con modelos de edificios han indicado mejoras en su comportamiento con amortiguamientos de hasta el 50% del crítico, pero su desventaja son los altos costos (17).

La magnitud del amortiguamiento adicional a la estructura para el control de la respuesta sísmica en estructuras esta usualmente en el rango del 5 al 45% del amortiguamiento crítico. Este es un rango bastante amplio y varia con el tipo de la estructura y la excitación (28, 43, 64). Obviamente la cantidad de amortiguamiento seleccionado esta bajo la responsabilidad del ingeniero especialista.

Existen niveles de amortiguamientos generalizados de proyectos previos localizados en suelo blando (65). Estos se encuentran tabulados en la tabla 5.1.

Al edificio analizado se decidió adicionarle un amortiguamiento adicional de 15% del crítico, por ser una estructura alta.

5.4 DISEÑO DE LOS DISIPADORES DE ENERGÍA

Para realizar el diseño de los disipadores de energía se ha considerado la misma estructura inicial estudiada en el Capítulo IV, con las mismas características de los materiales, el mismo refuerzo en las secciones y sus mismas dimensiones.

5.4.1 Selección del tipo de disipador

Los disipadores de fluido viscoso tienen la habilidad de reducir simultáneamente los esfuerzos y las deflexiones de la estructura. Esto es debido a que los disipadores de fluido varían su fuerza solamente con la velocidad, la cual provee una respuesta que es inherentemente fuera de fase con los esfuerzos debido a la flexibilidad de la estructura

(17, 68). Otros disipadores pueden normalmente ser clasificados como histeréticos, donde una fuerza de amortiguamiento es generada bajo una deflexión, o los viscoelásticos que son disipadores con un complejo resorte combinado con un amortiguamiento (16, 23).

La figura 5.1, muestra comportamientos representativos de estos tres disipadores debido a una excitación de una onda seno. Inclusive en estos disipadores no fluidos tienen elementos de fluencia, fricción, rótulas plásticas. Ninguno de estos dispositivos tiene una respuesta fuera de fase debido a esfuerzos estructurales de flexión. Esto es simplemente porque estos dispositivos son dependientes de otros parámetros aparte de la velocidad (64, 69). Los disipadores no fluidos disminuirán las deflexiones en la estructura pero al mismo tiempo incrementan los esfuerzos en las columnas. Los esfuerzos en las columnas tienen su máximo cuando el edificio llega a su deformación máxima. Si se adiciona un disipador de fluido viscoso, la fuerza de amortiguamiento se reduce a cero en este punto de máxima deformación. Esto es debido a que la velocidad del disipador se torna cero en este punto.

5.4.2 Materiales de construcción

Los disipadores de fluido viscoso son esencialmente mecanismos llenos de fluido el cual debe ser capaz de mantenerse en servicio durante grandes periodos de tiempo sin mantenimiento. Los requerimientos de los materiales son que deben ser resistentes a la corrosión, resistencia al desportillamiento, libre de esfuerzos de ruptura, y alta resistencia al impacto (63). Esto es especialmente cierto para el cilindro del disipador, el cual debe resistir esfuerzos triaxiales.

En la industria americana varios estándares de materiales existen, de diversas organizaciones independientes. Algunas de estas organizaciones se muestran a continuación:

Sociedad de Ingenieros Automovilísticos “Aerospace Materials Specifications” (AMS).

Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos “ASME Standards”.

Departamento de Defensa de los Estados Unidos, MIL – Handbook 5, “Metallic Materials and Elements for Aerospace Vehicle Structures”.

NASA, Goddard Space Flight Center “Materials Selection Guide”.

Un ejemplo de los materiales típicos metálicos utilizados en la fabricación de los disipadores de energía se muestra en la tabla 5.2.

5.4.3 Modelamiento del disipador

Un disipador de fluido viscoso es un dispositivo que disipa energía aplicando una fuerza resistiva a un desplazamiento finito. La fuerza de salida del disipador es resistiva, y actúa en la dirección opuesta al movimiento de entrada. Debido a que el disipador se comporta de acuerdo a las leyes de la mecánica de fluidos, el valor de la fuerza resistiva varía con respecto a la velocidad traslacional del disipador en cualquier punto en el tiempo (28, 31, 58, 67). La energía disipada por el disipador es igual a:

$$E_D = \int |F| dx \quad (5.2)$$

Donde F es la función fuerza de salida del disipador, y x es el desplazamiento.

La energía mecánica disipada por el disipador causa calor en las partes mecánicas y fluidas del disipador, esta energía calorífica es transferida al medio ambiente, usualmente por convección y conducción.

La fuerza del disipador viscoso de energía es proporcional a la velocidad del desplazamiento:

$$F = C.V^K \quad (5.3)$$

Donde C es la constante de amortiguamiento, V es la velocidad y K es el exponente de la velocidad que tiene un rango de valores entre 0.3 a 1.0 (62, 71).

5.4.4 Procedimiento de diseño

El uso de este procedimiento permite analizar dispositivos disipadores de energía que son dependientes de la velocidad.

Se debe cumplir que la máxima resistencia de todos los dispositivos disipadores de energía en un nivel y en una misma dirección no debe de exceder del 50% de la resistencia del pórtico. Además, los efectos ambientales deben ser considerados en el cálculo de la resistencia máxima de los dispositivos disipadores de energía.

El efecto del amortiguamiento puede ser calculado con la siguiente ecuación:

$$\beta_{ef} = \beta + \frac{\sum_j W_j}{4 \pi W_k} \quad (5.4)$$

Donde β es el amortiguamiento del sistema estructural, W_j debe ser tomado como el trabajo realizado por el dispositivo j en un ciclo completo correspondiente al desplazamiento de piso δ_i , la sumatoria se extiende sobre todos los dispositivos j . W_k es la máxima energía de deformación en el pórtico, determinado por la ecuación 5.5.

$$W_k = \frac{1}{2} \sum_i F_i \delta_i \quad (5.5)$$

Donde F_i debe ser tomado como la fuerza de inercia del piso en el nivel i , y la sumatoria se extiende a todos los niveles de piso.

El trabajo realizado por el dispositivo viscoso j en un ciclo completo de carga debe ser calculado según la siguiente ecuación:

$$W_j = \frac{2 \pi \xi_j}{T} C_j \delta_j^2 \quad (5.6)$$

Donde T es el periodo fundamental del edificio rehabilitado incluyendo los disipadores de energía, C_j es la constante de amortiguamiento para el dispositivo j , y δ_j es el desplazamiento relativo entre los extremos del dispositivo j a lo largo de su eje.

Para el cálculo del amortiguamiento efectivo con dispositivos viscosos lineales se puede aplicar la siguiente ecuación:

$$\beta_{ef} = \beta + \frac{T \sum_i C_i \cos^2 \theta_i \Phi_i^2}{4 \pi \sum_i (w_i / g) \Phi_i^2} \quad (5.7)$$

Donde θ_j es el ángulo de inclinación del dispositivo j con respecto a la horizontal, Φ_j es el desplazamiento relativo del primer modo entre los extremos del dispositivo j en la dirección horizontal, w_i es el peso del nivel i , Φ_i es el desplazamiento del primer modo en el nivel i , y los demás términos ya han sido definidos.

Con las formulas mostradas se procedió al diseño de los disipadores, teniendo en consideración las características de los mismos así como su ubicación y numero a emplearse. Se utilizaron 2 disipadores por nivel con un valor de constante de amortiguamiento de cada disipador de 1650.66 t-s/m (92.43 kips-s/inch). El diseño utilizado fue para obtener un amortiguamiento adicional con los disipadores del 15% en el sistema. Los resultados del diseño inicial con el cual se procedió al análisis se muestran en la tabla 5.3. Así mismo se muestra en esta misma tabla los resultados de los valores obtenidos por el análisis, y además se propone una uniformidad en las características de los disipadores a ser utilizada en la estructura final. Esto con la finalidad de no fabricar disipadores con características diferentes para cada nivel de la estructura. Los valores finales no han sido afectados por los requerimientos para este tipo de dispositivos.

5.4.5 Disipadores de energía utilizados

Se utilizaron los disipadores de fluido viscoso (figura 5.2 y 5.3), los cuales consisten en un pistón de acero con una cabeza de bronce con orificios y un acumulador el cual esta lleno de aceite de silicona. El flujo del orificio es compensado por un termostato pasivo bi-metálico que permite la operación del dispositivo a un rango de temperatura de -40 °C a 70 °C. La configuración del orificio, la construcción mecánica, el fluido y el termostato utilizado fue utilizada en una aplicación clasificada del Stealth Bomber B-2 de la Fuerza Aérea de los Estados Unidos.

La fuerza que es generada por el fluido del disipador es debido a la diferencia de presiones a lo largo de la cabeza del pistón. En pruebas del dispositivo no se ha mostrado medidas de rigidez para movimientos del pistón con frecuencias menores a los 4 Hz. (40). En general, esta frecuencia depende del diseño del acumulador y puede ser especificado en el diseño. La fuerza en el disipador puede ser expresado como:

$$P = b.p_{12} \quad (5.8)$$

Donde p_{12} es la diferencia de presión entre las cámaras. La constante b es una función del área de la cabeza del pistón, A_p es el área de la cabeza del pistón, A_o área del orificio, n numero de orificios, A_d área del control de válvulas, C_{d1} coeficiente de descarga del orificio, y C_{d2} la válvula de control. ρ es la densidad del fluido y \dot{u} es la velocidad del pistón. La presión diferencial a lo largo del pistón para orificios cilíndricos esta dado por:

$$P_{12} = \rho (A_p / A_1)^2 \dot{u}^2 .sen(\dot{u}) / (2n^2 C^2 d_1) \quad (5.9)$$

La relación fuerza/velocidad de estos dispositivos puede ser caracterizado por $F=CV^n$, donde F es la fuerza de salida, V es la velocidad relativa a lo largo del disipador, C es la constante determinada por el diámetro del disipador y el área del orificio, y n es una constante que puede tomar valores desde 0.10 a 1.95.

En la tabla 5.3, se presentan las especificaciones obtenidas del diseño de los disipadores utilizados en el análisis del edificio estudiado (23, 28, 50).

5.5 ANALISIS INELASTICO CON LOS DISIPADORES DE ENERGIA

El edificio analizado en el capítulo anterior es más flexible y por lo tanto presenta una mayor deformación en el sentido del eje X. Así mismo el periodo natural de la estructura es mayor en ese sentido. Por ese motivo se colocaran los dispositivos disipadores de energía en ese sentido y con una cantidad de 02 por nivel, dando un total de 60 unidades, el detalle de la instalación se muestra en la figura 5.4.

El análisis dinámico sísmico inelástico con la inclusión de los disipadores de energía fue llevado a cabo con el programa de análisis estructural tridimensional inelástico SAP2000 v.8.2.5-2003 (14, 74). El registro parcial de octubre de 1966 con 15 segundos de duración fue utilizado para el análisis de la respuesta sísmica, el cual tiene una aceleración máxima de 269.34 Gals. La cual fue escalada a una aceleración máxima de 400.00 Gals y 600.00 Gals. Esto debido a que con la aceleración de 269.34 gals, la respuesta inelástica del edificio sin disipadores no presento formación de rótulas.

5.5.1 Efectos en las fuerzas cortantes

Del análisis considerando los disipadores de energía se comparan las respuestas para los niveles de aceleración del sismo, amplificadas a 400 gals y finalmente 600 gals. Esto con el objetivo conocer la respuesta de la estructura ante eventos sísmicos severos. Los resultados se presentan en las figuras 5.5 a 5.8. Donde se comparan las respuestas del edificio con la inclusión de los disipadores de energía y la respuesta inelástica del edificio sin disipadores.

En la tabla 5.6 se presentan las variaciones de las fuerzas cortantes en cada nivel del edificio sometido a los diversos niveles de aceleración en la base. Se observa que parte de la fuerza actuante es asumida por los disipadores, esto debido a la variación de los valores de las fuerzas cortantes en comparación con las del edificio inicial. Se aprecia la variación de la disminución de las fuerzas cortantes, la cual no es constante en la altura, alcanzando un valor promedio de 4.43% para los 400 gals y de 7.71% para los 600 gals. Se aprecia que a la mediana altura del edificio el porcentaje de reducción del cortante es mayor debido a las mayores deformaciones a esa altura del edificio.

También se presenta variación muy pequeña en el sentido donde no se colocaron los disipadores de energía, esto debido a la torsión de la estructura que originó que los disipadores trabajen un porcentaje en la dirección perpendicular a su ubicación

5.5.2 Efecto en las distorsiones

De las figuras 5.09 y 5.12, se puede observar que las distorsiones de entrepiso disminuyen de acuerdo al porcentaje de amortiguamiento diseñado y que fue adicionado

a la estructura por medio de los disipadores de energía. La tabla 5.7 muestra los porcentajes de variación de las distorsiones de la estructura inicial y la estructura con disipadores. Obteniéndose una disminución en promedio del 3.15% a los 400 gals y de 9.26% a los 600 gals. De los valores obtenidos, se puede afirmar que la disminución de las distorsiones a los 600 gals, son bastantes cercanos al porcentaje adicionado.

5.5.3 Efecto en el desplazamiento, velocidad y aceleración

Para las aceleraciones consideradas del registro sísmico, se han comparado los desplazamientos máximos positivos, donde se puede observar una importante diferencia en los desplazamientos en relación a la altura, producto de la incorporación de los disipadores. Tal como se puede observar en las figuras 5.13 a 5.16. Se ha obtenido una disminución en promedio de los desplazamientos de 3.52% a los 400 gals y una disminución en promedio de 10.57% a los 600 gals. Observándose un mejor comportamiento a una mayor aceleración, reflejada en los valores obtenidos.

En las figuras 5.17 a 5.20, se puede apreciar la variación no uniforme de las velocidades en los niveles de la estructura. Se aprecia que los valores disminuyen con un valor en promedio de 3.80% para los 400 gals y de 4.21% para los 600 gals. En el sentido Y se aprecia una pequeña variación en las velocidades, debido a la torsión del edificio. Los valores se muestran en las tablas 5.9.

En las figuras 5.21 a 5.24, se puede apreciar una variación no uniforme mas marcada en los niveles de la estructura. Los valores disminuyen con un valor en promedio de 2.87% para los 400 gals y de 3.72% para los 600 gals. La variación en las aceleraciones en el otro sentido es mínima. Los valores se muestran en las tablas 5.10.

5.5.4 Efecto en la respuesta inelástica de piso

Ahora se discutirá la respuesta inelástica en el tiempo, para lo cual se presentan las figuras 5.25 a 5.36 correspondientes a la respuesta tiempo-historia analizada.

Se presentan las variaciones de los cortantes de entrepiso en un nivel bajo, intermedio y alto, tal como lo expresado anteriormente. Se ha podido observar que la

variación en las fuerzas es debido a que los disipadores absorben parte de esa fuerza y la otra porción de la fuerza es disipada por el comportamiento inelástico del sistema. El disipador permite una menor formación de rótulas plásticas, por la disminución de la energía inelástica disipada.

5.5.5 Efecto en el desplazamiento real de piso

La variación del desplazamiento de entrepiso debido a un análisis detallado a cada intervalo de tiempo se puede observar en las figuras 5.37 a 5.48. Debido a que cada nivel de piso tiene una respuesta tiempo-historia de desplazamiento diferente y el edificio presenta varios niveles, no se presentaron todos por lo cual se optó por graficar un nivel bajo, intermedio y alto. El nivel bajo pertenece al piso 04 (nivel 10), el intermedio al piso 14 (nivel 20) y el alto al tanque (nivel 30).

Se puede apreciar en las figuras presentadas la disminución del desplazamiento en el tiempo con la inclusión de los disipadores de energía. Los disipadores han sido localizados solo en el sentido X, pero también trabajan en el sentido perpendicular, esto debido a la torsión importante en la estructura, tal como mencionó anteriormente.

5.5.6 Efecto en la velocidad real y aceleración real de piso

Se puede observar en las figuras 5.49 a 5.60, que cada nivel de piso tiene una respuesta tiempo-historia de velocidades diferente, las cuales son muy similares en forma a las del edificio inicial sin disipadores, pero con la diferencia que las velocidades han disminuido.

Las figuras 5.61 a 5.72, muestran la variación de las aceleraciones que se presentan a nivel de entrepiso. Los disipadores permiten una variación en las velocidades y aceleraciones de entrepiso conjuntamente, y de una manera similar a cada nivel de aceleración. Los disipadores se diseñan para una fuerza, la cual varía con la velocidad, esto quiere decir que a mayor velocidad mayor fuerza disipativa, lo cual se puede observar en las figuras presentadas, para los distintos niveles de aceleración y a diversas alturas.

5.5.7 Fuerza desarrollada por el disipador

Las figuras 5.73 a 5.78 muestra el comportamiento histerético no lineal del disipador, obteniéndose una fuerza máxima variable con el tiempo y a un desplazamiento axial variable, el cual nos servirá para especificar los requerimientos de fabricación del disipador y permitir una variación para que no falle ante un evento sísmico. La forma de la curva histerética esta de acuerdo al modelo predefinido de Wen. Se muestra en la figuras el comportamiento histerético no lineal de la fuerza desarrollada por el disipador en el nivel 10, 20 y 30 respectivamente. En todas las figuras se observa un adecuado comportamiento del disipador desarrollando una fuerza acorde al diseño inicial que se muestra en la tabla 5.3 y 5.4. Se obtuvieron pequeñas variaciones en los valores obtenidos en relación a los del diseño, debido a la mayor exactitud en los valores obtenidos con el análisis dinámico tridimensional de la estructura.

5.5.8 Balance energético

Se estudió la estructura mediante el software disponible bajo el enfoque del análisis dinámico, que permite conocer la energía almacenada y disipada en la estructura.

En las figuras 5.79 y 5.80, se presenta la energía del sismo y los distintos tipos de energía, tales como la energía cinética, energía potencial, la energía de amortiguamiento modal y la energía de los disipadores. Se presentan estas energías para los distintos niveles de aceleración a los que fue sometida la estructura.

En los gráficos se presenta la energía de amortiguamiento modal, que fue especificada en 5% del amortiguamiento crítico. Esta energía es importante para compararla con la cantidad de la energía disipada por los disipadores de energía a utilizarse.

Se puede advertir que la energía cinética presenta un bajo porcentaje de la energía del sismo y es más importante entre los 6.5 y los 9.0 segundos aproximadamente. La energía potencial es más importante entre los 6.2 y 10 segundos

aproximadamente. Entonces la energía disipada por la estructura debido a la deformación modal es de mayor significación que estas energías.

Se demuestra gráficamente la fundamental modificación del comportamiento estructural del sistema con la inclusión de los disipadores de energía. Se muestra la distribución de la energía de entrada en el tiempo. Como se puede apreciar en el gráfico, una cantidad de energía es disipada por la acción de los disipadores de energía. Los disipadores de energía, disipan una cantidad de la energía, dejando la energía restante a ser disipada por la acción inelástica de los elementos de concreto de la estructura.

La disipación inelástica representa daño estructural, el cual es impredecible y es bastante detallado de especificar. La estructura disipa gran cantidad de la energía de entrada con los disipadores de energía, los cuales son diseñados directamente para la disipación de energía y son más confiables para controlar el daño estructural.

5.5.9 Efecto en el mecanismo de formación de rótulas plásticas

El proceso de formación de rótulas plásticas para la aceleración máxima de 400 gals se presenta en las figuras 5.81 a 5.82. Se puede observar la formación de las rótulas plásticas en la estructura, y la aparición en el tiempo de estas en la estructura varían con la incorporación de los disipadores de energía en la estructura.

Para el nivel de aceleración de 600 gals también se realiza un proceso similar, lo cual se muestra en las figuras 5.83 a 5.84. Se ha observado también que la aparición de las rótulas plásticas a un mismo intervalo de tiempo ha disminuido, no como en el caso anterior, esto debido a la diferencia en el nivel de aceleración. Los disipadores de energía permiten una menor formación de las rótulas plásticas en la estructura, para los distintos niveles de aceleración. Parte de la energía inelástica disipada por fluencia, es tomada por los disipadores, sumadas ambas forman la energía inelástica disipada total.

Para estructuras, la inclusión de disipadores de energía influye positivamente en el mecanismo de formación de rótulas plásticas, haciendo que el edificio analizado sometido a diversos niveles de aceleración sea más estable; incluso podría disminuir la cantidad de rotulas plásticas en la estructura y retardar su aparición en la misma.

Tabla 5.1 Niveles de amortiguamiento adicionado

TIPO DE ESTRUCTURA	PORCENTAJE DE AMORTIGUAMIENTO ADICIONADO
Edificios Altos (Sismos y Viento)	5 – 15 %
Edificios 1-15 Niveles (Sismos)	15 – 25 %
Puentes – No Suspendidos (Sismos)	30 – 45 %
Puentes – Suspendidos (Sismos y Viento)	15 – 25 %

Tabla 5.2 Materiales empleados en los disipadores

PART	MATERIAL	SPECIFICATION
Piston Rod	15-5 PH Stainless Steel, Wrought Bar 160ksi Minimum Yield Stress	MIL-HDBK-5 and AMS 5659
Cylinder	AISI 4340 Tubing 120 ksi Minimum Yield Stress	MIL-HDBK-5
Piston Head	Bearing Bronze, Bar Stock 50 ksi Minimum Yield Stress	AMS 4640
Seal Retainer	AISI 4340 Wrought Bar 120 ksi Minimum Yield Stress	MIL-HDBK-5

Tabla 5.3 Valores de diseño de los disipadores para una aceleración de 400 gals.

Niveles	Diseño Inicial		Resultados Obtenidos		Valores Finales	
	Fuerza (t)	Deformacion (mm)	Fuerza (t)	Deformacion (mm)	Fuerza (t)	Deformacion (mm)
Tanque	14.89	+/- 2.34	8.31	+/- 3.26	20.00	+/- 5.00
Azotea	21.25	+/- 3.34	19.90	+/- 4.28	20.00	+/- 5.00
22	23.36	+/- 3.67	17.66	+/- 4.79	20.00	+/- 5.00
21	25.55	+/- 4.01	28.45	+/- 5.88	30.00	+/- 10.00
20	27.83	+/- 4.37	22.84	+/- 6.25	30.00	+/- 10.00
19	30.19	+/- 4.74	35.38	+/- 7.37	40.00	+/- 10.00
18	32.52	+/- 5.10	26.20	+/- 7.52	40.00	+/- 10.00
17	34.84	+/- 5.47	40.30	+/- 8.68	40.00	+/- 10.00
16	37.03	+/- 5.81	30.05	+/- 8.54	40.00	+/- 10.00
15	39.10	+/- 6.14	43.09	+/- 9.83	50.00	+/- 10.00
14	41.03	+/- 6.44	34.35	+/- 9.26	50.00	+/- 10.00
13	42.80	+/- 6.72	43.46	+/- 10.77	50.00	+/- 15.00
12	44.34	+/- 6.96	36.80	+/- 9.66	50.00	+/- 15.00
11	45.68	+/- 7.17	48.96	+/- 11.39	50.00	+/- 15.00
10	46.67	+/- 7.33	36.74	+/- 10.11	50.00	+/- 15.00
9	47.36	+/- 7.43	52.63	+/- 11.65	50.00	+/- 15.00
8	47.79	+/- 7.50	40.29	+/- 10.50	50.00	+/- 15.00
7	47.74	+/- 7.49	52.29	+/- 11.51	50.00	+/- 15.00
6	47.36	+/- 7.43	41.22	+/- 10.65	50.00	+/- 15.00
5	46.50	+/- 7.30	49.34	+/- 10.96	50.00	+/- 15.00
4	45.08	+/- 7.08	39.52	+/- 10.28	50.00	+/- 15.00
3	43.14	+/- 6.77	50.70	+/- 9.93	50.00	+/- 15.00
2	40.52	+/- 6.36	36.87	+/- 14.09	50.00	+/- 15.00
1	56.36	+/- 8.85	74.50	+/- 6.81	50.00	+/- 15.00
Mecanico	27.01	+/- 4.24	29.63	+/- 4.66	30.00	+/- 5.00
Mezzanine	17.35	+/- 2.72	29.08	+/- 3.38	30.00	+/- 5.00
Plaza	12.90	+/- 2.03	16.15	+/- 2.60	20.00	+/- 5.00
Arenales	8.56	+/- 1.34	21.24	+/- 1.60	20.00	+/- 5.00
Sotano 1	5.39	+/- 0.85	13.93	+/- 0.65	20.00	+/- 5.00
Sotano 2	2.08	+/- 0.33	10.86	+/- 0.61	20.00	+/- 5.00

Tabla 5.4 Valores de diseño de los disipadores para una aceleración de 600 gals.

Niveles	Diseño Inicial		Resultados Obtenidos		Valores Finales	
	Fuerza (t)	Deformación (mm)	Fuerza (t)	Deformación (mm)	Fuerza (t)	Deformación (mm)
Tanque	22.33	+/- 3.50	29.17	+/- 2.67	30.00	+/- 5.00
Azotea	31.87	+/- 5.00	26.26	+/- 4.79	30.00	+/- 5.00
22	35.03	+/- 5.50	41.67	+/- 5.85	40.00	+/- 10.00
21	38.32	+/- 6.02	33.98	+/- 7.03	40.00	+/- 10.00
20	41.74	+/- 6.55	51.94	+/- 8.02	50.00	+/- 10.00
19	45.29	+/- 7.11	39.01	+/- 9.16	50.00	+/- 10.00
18	48.78	+/- 7.66	59.82	+/- 10.02	60.00	+/- 10.00
17	52.26	+/- 8.20	43.44	+/- 11.04	60.00	+/- 15.00
16	55.55	+/- 8.72	64.05	+/- 11.78	70.00	+/- 15.00
15	58.65	+/- 9.21	49.41	+/- 12.55	70.00	+/- 15.00
14	61.55	+/- 9.66	64.40	+/- 13.33	70.00	+/- 15.00
13	64.19	+/- 10.08	52.63	+/- 13.60	70.00	+/- 15.00
12	66.52	+/- 10.44	72.91	+/- 14.57	80.00	+/- 15.00
11	68.52	+/- 10.76	54.71	+/- 14.16	80.00	+/- 15.00
10	70.00	+/- 10.99	78.32	+/- 15.38	80.00	+/- 20.00
9	71.03	+/- 11.15	60.29	+/- 14.62	80.00	+/- 20.00
8	71.68	+/- 11.25	77.77	+/- 15.70	80.00	+/- 20.00
7	71.61	+/- 11.24	61.71	+/- 15.17	80.00	+/- 20.00
6	71.03	+/- 11.15	73.44	+/- 15.60	80.00	+/- 20.00
5	69.74	+/- 10.95	59.11	+/- 15.40	80.00	+/- 20.00
4	67.61	+/- 10.61	70.02	+/- 14.80	80.00	+/- 20.00
3	64.71	+/- 10.16	55.38	+/- 14.92	80.00	+/- 20.00
2	60.78	+/- 9.54	105.55	+/- 13.42	80.00	+/- 20.00
1	84.54	+/- 13.27	43.94	+/- 20.44	50.00	+/- 20.00
Mecanico	40.52	+/- 6.36	42.31	+/- 9.19	50.00	+/- 10.00
Mezzanine	26.03	+/- 4.09	23.89	+/- 6.76	30.00	+/- 10.00
Plaza	19.35	+/- 3.04	31.47	+/- 4.57	30.00	+/- 5.00
Arenales	12.84	+/- 2.02	20.78	+/- 3.74	20.00	+/- 5.00
Sotano 1	8.09	+/- 1.27	16.22	+/- 2.18	20.00	+/- 5.00
Sotano 2	3.12	+/- 0.49	10.86	+/- 0.94	20.00	+/- 5.00

Tabla 5.5 Períodos, frecuencias y masas participativas con disipadores

Modo	Periodo (Sec)	Variación (%)	Frecuencia (Cyc/sec)	UX (Unitless)	UY (Unitless)	RZ (Unitless)	SumUX (Unitless)	SumUY (Unitless)	SumRZ (Unitless)
1	3.2547	0.01	0.3073	0.6112	0.0011	1.6E-08	0.6112	0.0011	0.0000
2	2.2759	0.01	0.4394	0.0015	0.5619	5.9E-06	0.6127	0.5630	0.0000
3	1.6212	0.00	0.6168	0.0000	0.0000	3.7E-01	0.6127	0.5630	0.3739
4	0.8694	0.01	1.1502	0.1070	0.0001	4.1E-11	0.7197	0.5631	0.3739
5	0.4769	0.01	2.0970	0.0000	0.1576	8.6E-06	0.7197	0.7207	0.3739
6	0.4007	0.00	2.4959	0.0468	0.0000	8.8E-07	0.7665	0.7207	0.3739
7	0.3484	0.61	2.8700	0.0000	0.0000	1.0E-01	0.7665	0.7207	0.4776
8	0.2295	0.00	4.3575	0.0331	0.0000	1.1E-06	0.7996	0.7207	0.4776
9	0.1974	0.29	5.0665	0.0000	0.0578	4.2E-05	0.7996	0.7786	0.4777
10	0.1498	0.02	6.6754	0.0347	0.0000	7.3E-05	0.8344	0.7786	0.4778
11	0.1300	11.52	7.6911	0.0002	0.0000	4.7E-02	0.8346	0.7786	0.5246
12	0.1117	4.14	8.9546	0.0000	0.0540	1.1E-03	0.8346	0.8326	0.5257
13	0.1085	0.14	9.2144	0.0444	0.0000	7.7E-05	0.8790	0.8326	0.5258
14	0.0844	3.44	11.8420	0.0416	0.0000	6.5E-06	0.9206	0.8326	0.5258
15	0.0738	12.81	13.5510	0.0000	0.0905	4.0E-03	0.9206	0.9231	0.5298
16	0.0676	17.94	14.7880	0.0241	0.0003	2.9E-04	0.9447	0.9234	0.5301
17	0.0590	12.99	16.9370	0.0005	0.0153	3.0E-01	0.9452	0.9387	0.8270
18	0.0551	16.77	18.1640	0.0117	0.0003	8.7E-03	0.9568	0.9390	0.8357
19	0.0458	27.76	21.8410	0.0049	0.0000	5.9E-03	0.9617	0.9390	0.8416
20	0.0397	28.61	25.1860	0.0006	0.0205	4.6E-02	0.9623	0.9595	0.8874
21	0.0385	30.61	25.9780	0.0022	0.0014	6.9E-04	0.9645	0.9609	0.8880
22	0.0328	37.98	30.4760	0.0023	0.0008	2.8E-03	0.9668	0.9617	0.8908
23	0.0286	39.46	34.9550	0.0006	0.0008	5.8E-03	0.9674	0.9625	0.8966
24	0.0268	42.69	37.3420	0.0169	0.0005	3.4E-03	0.9844	0.9630	0.9001

Tabla 5.6 Cortantes inelásticos de entrepiso con disipadores

Niveles	400.00 Gals				600.00 Gals			
	CORTE X (t)	VARIACION X (%)	CORTE Y (t)	VARIACION Y (%)	CORTE X (t)	VARIACION X (%)	CORTE Y (t)	VARIACION Y (%)
Techo	111.38	-11.76	221.42	0.11	167.39	-10.29	331.35	0.11
Tanque	226.74	-16.19	466.70	0.12	333.16	-15.58	698.37	0.12
Azotea	409.07	-12.18	813.09	0.13	584.08	-14.96	1216.71	0.13
22	596.36	-7.26	1140.89	0.14	827.99	-13.29	1707.22	0.14
21	761.16	-4.65	1405.28	0.15	1053.87	-9.32	2102.82	0.15
20	902.95	-4.19	1606.19	0.16	1246.77	-4.40	2403.45	0.16
19	1024.84	-3.46	1744.60	0.18	1411.90	-2.93	2610.55	0.18
18	1125.47	-2.91	1822.53	0.20	1546.88	-2.81	2727.16	0.19
17	1206.00	-2.51	1843.12	0.22	1653.55	-2.85	2757.98	0.22
16	1270.33	-2.02	1810.55	0.25	1740.58	-4.55	2709.24	0.25
15	1325.40	-3.32	1729.94	0.28	1816.45	-9.33	2588.62	0.28
14	1396.11	-6.34	1607.23	0.33	1921.99	-11.33	2405.02	0.33
13	1492.71	-6.51	1467.80	0.35	2052.23	-11.26	2196.22	0.35
12	1579.21	-6.36	1416.56	0.33	2181.15	-10.44	2119.70	0.33
11	1680.58	-4.25	1559.66	0.29	2362.54	-6.74	2333.81	0.29
10	1803.63	-3.64	1786.19	0.28	2539.95	-4.93	2672.83	0.28
9	1915.47	-3.62	2059.27	0.24	2691.46	-5.82	3081.31	0.24
8	2020.53	-3.52	2331.99	0.23	2836.30	-5.94	3489.41	0.22
7	2102.42	-3.24	2635.55	0.19	2939.15	-6.61	3943.63	0.18
6	2168.00	-2.80	2929.22	0.17	3023.60	-6.47	4383.06	0.17
5	2211.89	-2.31	3169.86	0.16	3067.42	-7.01	4743.17	0.16
4	2234.08	-1.38	3475.20	0.13	3115.80	-6.03	5200.09	0.13
3	2262.89	-0.35	3733.22	0.12	3158.68	-4.51	5586.21	0.12
2	2304.15	0.77	3952.44	0.09	3197.29	-4.22	5913.83	0.10
1	2304.58	-2.13	4329.34	0.08	3195.74	-8.59	6477.71	0.09
Mecanico	2411.31	-4.33	4741.50	0.08	3288.76	-12.04	7094.40	0.09
Mezzanine	2420.37	-4.57	4761.05	0.08	3314.22	-11.68	7123.67	0.09
Plaza	2424.61	-5.02	4777.75	0.08	3337.81	-11.59	7148.65	0.09
Arenales	2719.51	-5.08	5482.79	0.05	3799.97	-10.38	8203.45	0.05
Sotano 1	3671.04	-0.94	6514.96	0.04	5439.77	-1.91	9748.19	0.04
Sotano 2	5392.37	-1.08	7631.00	0.04	8067.03	-1.11	11418.52	0.04

Tabla 5.7 Distorsiones de entrepiso con disipadores

Niveles	400.00 Gals				600.00 Gals			
	Dist. X	Var. (%)	Dist. Y	Var. (%)	Dist. X	Var. (%)	Dist. Y	Var. (%)
Techo	0.0010	-1.34	0.0018	0.89	0.0014	-5.27	0.0027	0.84
Tanque	0.0013	-2.32	0.0019	0.88	0.0017	-6.10	0.0028	0.85
Azotea	0.0015	-2.78	0.0019	0.59	0.0021	-6.55	0.0028	0.61
22	0.0017	-2.95	0.0019	0.87	0.0023	-6.67	0.0028	0.86
21	0.0018	-3.04	0.0019	0.88	0.0025	-6.81	0.0028	0.84
20	0.0020	-3.06	0.0019	0.84	0.0027	-6.96	0.0028	0.85
19	0.0021	-3.08	0.0019	0.84	0.0029	-7.18	0.0028	0.83
18	0.0022	-3.04	0.0019	0.84	0.0031	-7.44	0.0028	0.82
17	0.0024	-3.03	0.0019	-0.64	0.0033	-7.78	0.0028	0.66
16	0.0025	-2.99	0.0019	0.78	0.0034	-8.57	0.0028	0.85
15	0.0026	-2.98	0.0019	0.82	0.0035	-9.27	0.0028	0.82
14	0.0027	-2.95	0.0018	-0.19	0.0037	-9.17	0.0028	0.82
13	0.0028	-2.84	0.0018	-0.54	0.0038	-9.05	0.0027	0.79
12	0.0028	-2.16	0.0018	-0.18	0.0039	-9.08	0.0027	0.72
11	0.0029	-1.91	0.0017	3.76	0.0040	-9.00	0.0026	3.03
10	0.0029	-2.22	0.0016	5.25	0.0041	-8.96	0.0023	0.90
9	0.0029	-2.86	0.0015	0.60	0.0042	-9.26	0.0023	0.60
8	0.0030	-3.01	0.0015	0.57	0.0042	-9.34	0.0023	0.58
7	0.0030	-3.19	0.0015	0.57	0.0042	-9.93	0.0022	0.55
6	0.0029	-3.32	0.0015	0.53	0.0042	-10.30	0.0022	0.54
5	0.0029	-3.46	0.0014	0.52	0.0041	-10.82	0.0021	0.51
4	0.0028	-3.15	0.0014	0.48	0.0040	-11.34	0.0020	0.49
3	0.0027	-3.48	0.0013	0.48	0.0038	-11.32	0.0019	0.47
2	0.0026	-3.80	0.0012	0.47	0.0036	-11.26	0.0018	0.44
1	0.0022	-3.95	0.0011	0.45	0.0031	-11.49	0.0016	0.45
Mecanico	0.0018	-4.07	0.0008	0.40	0.0025	-11.66	0.0013	0.38
Mezzanine	0.0014	-4.11	0.0007	0.35	0.0020	-11.77	0.0011	0.37
Plaza	0.0011	-3.83	0.0006	0.31	0.0015	-12.09	0.0009	0.33
Arenales	0.0006	-4.32	0.0002	0.34	0.0008	-11.42	0.0004	0.31
Sotano 1	0.0004	-4.19	0.0002	0.47	0.0005	-11.06	0.0003	0.42
Sotano 2	0.0002	-4.06	0.0001	0.00	0.0002	-10.18	0.0002	0.00
Suelo	0.0000	0.00	0.0000	0.00	0.0000	0.00	0.0000	0.00

Tabla 5.8 Desplazamientos relativos máximos con disipadores

Niveles	400.00 Gals				600.00 Gals			
	Desp. X (m)	Var. (%)	Despl. Y (m)	Var. (%)	Desp. X (m)	Var. (%)	Despl. Y (m)	Var. (%)
Techo	0.2341	-3.09	0.1554	0.78	0.3256	-9.42	0.2324	0.78
Tanque	0.2314	-3.11	0.1505	0.78	0.3219	-9.47	0.2252	0.78
Azotea	0.2278	-3.12	0.1452	0.78	0.3169	-9.52	0.2172	0.77
22	0.2224	-3.13	0.1386	0.78	0.3096	-9.58	0.2074	0.78
21	0.2166	-3.13	0.1321	0.78	0.3016	-9.66	0.1976	0.78
20	0.2103	-3.13	0.1255	0.78	0.2929	-9.74	0.1877	0.77
19	0.2034	-3.14	0.1188	0.77	0.2835	-9.83	0.1778	0.77
18	0.1960	-3.14	0.1122	0.77	0.2734	-9.93	0.1678	0.77
17	0.1882	-3.14	0.1055	0.76	0.2626	-10.03	0.1579	0.76
16	0.1799	-3.15	0.0990	0.86	0.2512	-10.12	0.1480	0.77
15	0.1712	-3.16	0.0925	0.86	0.2394	-10.20	0.1382	0.76
14	0.1622	-3.17	0.0860	0.86	0.2271	-10.25	0.1285	0.76
13	0.1528	-3.18	0.0796	0.95	0.2142	-10.31	0.1189	0.75
12	0.1431	-3.20	0.0733	1.08	0.2009	-10.40	0.1094	0.75
11	0.1332	-3.28	0.0671	1.19	0.1872	-10.49	0.1000	0.75
10	0.1231	-3.39	0.0610	0.93	0.1731	-10.61	0.0909	0.53
9	0.1129	-3.49	0.0554	0.49	0.1588	-10.76	0.0828	0.49
8	0.1026	-3.56	0.0500	0.48	0.1442	-10.91	0.0749	0.48
7	0.0922	-3.62	0.0448	0.47	0.1296	-11.08	0.0669	0.46
6	0.0819	-3.67	0.0395	0.46	0.1150	-11.22	0.0591	0.45
5	0.0716	-3.72	0.0344	0.45	0.1004	-11.35	0.0515	0.44
4	0.0614	-3.76	0.0294	0.43	0.0861	-11.44	0.0440	0.43
3	0.0515	-3.88	0.0247	0.43	0.0721	-11.46	0.0369	0.42
2	0.0420	-3.97	0.0201	0.41	0.0587	-11.50	0.0301	0.41
1	0.0329	-4.02	0.0159	0.40	0.0460	-11.56	0.0237	0.40
Mecanico	0.0172	-4.08	0.0085	0.35	0.0240	-11.63	0.0126	0.35
Mezzanine	0.0110	-4.09	0.0055	0.33	0.0152	-11.61	0.0082	0.33
Plaza	0.0070	-4.07	0.0035	0.31	0.0098	-11.52	0.0052	0.31
Arenales	0.0041	-4.24	0.0019	0.31	0.0057	-11.12	0.0029	0.28
Sotano 1	0.0020	-4.15	0.0010	0.29	0.0028	-10.80	0.0015	0.26
Sotano 2	0.0006	-4.06	0.0004	0.00	0.0008	-10.18	0.0006	0.00
Suelo	0.0000	0.00	0.0000	0.00	0.0000	0.00	0.0000	0.00

Tabla 5.9 Velocidades relativas máximas con disipadores

Niveles	400.00 Gals				600.00 Gals			
	Vel. X (m/s)	Var. (%)	Vel. Y (m/s)	Var. (%)	Vel. X (m/s)	Var. (%)	Vel. Y (m/s)	Var. (%)
Techo	0.5583	-3.92	0.4386	-0.07	0.8140	-5.98	0.6580	0.35
Tanque	0.5470	-3.93	0.4262	-0.07	0.7973	-6.01	0.6395	0.34
Azotea	0.5323	-3.90	0.4126	-0.10	0.7758	-5.96	0.6192	0.34
22	0.5112	-3.78	0.3957	-0.10	0.7449	-5.85	0.5940	0.35
21	0.4885	-3.61	0.3786	-0.16	0.7116	-5.70	0.5685	0.33
20	0.4642	-3.43	0.3614	-0.19	0.6762	-5.49	0.5429	0.33
19	0.4388	-3.20	0.3442	-0.20	0.6390	-5.26	0.5171	0.33
18	0.4129	-4.07	0.3268	-0.24	0.6005	-5.07	0.4912	0.33
17	0.3938	-7.06	0.3094	-0.29	0.5811	-6.76	0.4653	0.34
16	0.3876	-6.85	0.2920	-0.31	0.5743	-6.24	0.4392	0.32
15	0.3806	-6.62	0.2746	-0.33	0.5674	-5.51	0.4132	0.31
14	0.3741	-6.08	0.2723	0.26	0.5598	-4.68	0.4075	0.27
13	0.3680	-5.20	0.2710	0.26	0.5506	-3.91	0.4056	0.27
12	0.3602	-4.58	0.2670	0.26	0.5389	-3.37	0.3996	0.25
11	0.3501	-4.40	0.2604	0.27	0.5238	-3.29	0.3897	0.26
10	0.3371	-4.88	0.2511	0.24	0.5043	-3.89	0.3758	0.24
9	0.3243	-5.18	0.2393	0.25	0.4824	-4.83	0.3581	0.25
8	0.3126	-4.90	0.2290	0.17	0.4619	-5.31	0.3428	0.20
7	0.2997	-4.65	0.2212	0.18	0.4433	-5.07	0.3310	0.18
6	0.2852	-4.39	0.2139	0.14	0.4222	-4.82	0.3202	0.16
5	0.2683	-4.11	0.2032	0.15	0.3975	-4.58	0.3041	0.13
4	0.2483	-3.91	0.1891	0.16	0.3681	-4.36	0.2830	0.14
3	0.2247	-3.69	0.1717	0.12	0.3332	-4.17	0.2570	0.12
2	0.1971	-3.48	0.1514	0.07	0.2923	-3.98	0.2266	0.09
1	0.1713	-2.11	0.1288	0.16	0.2543	-2.68	0.1927	0.10
Mecanico	0.1182	-1.50	0.0798	0.00	0.1758	-2.06	0.1195	0.08
Mezzanine	0.0888	-1.22	0.0560	0.18	0.1322	-1.71	0.0838	0.12
Plaza	0.0668	-0.89	0.0410	0.24	0.0995	-1.39	0.0613	0.00
Arenales	0.0470	-0.84	0.0281	0.00	0.0701	-1.13	0.0420	0.00
Sotano 1	0.0275	-0.36	0.0189	0.00	0.0410	-0.73	0.0282	0.00
Sotano 2	0.0102	-0.97	0.0090	0.00	0.0153	-0.65	0.0135	0.74
Suelo	0.0000	0.00	0.0000	0.00	0.0000	0.00	0.0000	0.00

Tabla 5.10 Aceleraciones absolutas máximas con disipadores

Niveles	400.00 Gals				600.00 Gals			
	Acel X (m/s ²)	Var. (%)	Acel Y (m/s ²)	Var. (%)	Acel X (m/s ²)	Var. (%)	Acel Y (m/s ²)	Var. (%)
Techo	1.5379	-10.42	3.0285	0.12	2.3166	-9.84	4.5323	0.13
Tanque	1.4156	-10.47	2.7515	0.13	2.1185	-10.38	4.1176	0.13
Azotea	1.3158	-6.21	2.4289	0.14	1.8741	-10.55	3.6346	0.14
22	1.1821	-1.53	2.0320	0.16	1.6307	-4.68	3.0407	0.15
21	1.0400	-1.13	1.6295	0.19	1.4292	-0.99	2.4384	0.19
20	0.9066	0.15	1.2269	0.25	1.2473	-2.77	1.8359	0.24
19	0.8397	-4.26	0.8561	0.28	1.1789	-8.96	1.2809	0.27
18	0.8785	-2.84	0.8502	0.26	1.2552	-4.57	1.2722	0.26
17	0.9651	-5.58	1.0587	0.21	1.4384	-5.91	1.5842	0.21
16	1.0580	-6.12	1.3449	0.15	1.5760	-6.51	2.0124	0.15
15	1.1137	-3.41	1.5960	0.11	1.6593	-3.78	2.3880	0.11
14	1.1187	-5.43	1.8619	0.09	1.6571	-4.06	2.7859	0.09
13	1.1379	-4.69	2.0763	0.08	1.6367	-6.82	3.1067	0.07
12	1.1430	-3.42	2.2319	0.07	1.6406	-5.41	3.3395	0.06
11	1.1290	-2.05	2.3493	0.04	1.6192	-4.48	3.5153	0.04
10	1.1000	-1.69	2.4515	0.03	1.5775	-3.80	3.6682	0.03
9	1.0620	-0.35	2.4965	0.03	1.5288	-1.72	3.7355	0.02
8	1.0847	0.34	2.4807	0.03	1.6227	0.40	3.7119	0.01
7	1.1540	-1.12	2.4516	0.00	1.7199	-1.39	3.6680	0.01
6	1.2797	-2.51	2.4340	0.00	1.9081	-2.76	3.6417	0.01
5	1.3892	-3.17	2.3801	-0.01	2.0718	-3.34	3.5610	0.01
4	1.4886	-3.57	2.2901	-0.01	2.2215	-3.70	3.4263	0.01
3	1.6500	-2.89	2.2849	-0.06	2.4694	-2.90	3.4197	-0.06
2	1.9305	-2.68	2.4277	-0.06	2.8847	-2.83	3.6333	-0.06
1	2.2579	-1.66	2.8000	-0.04	3.3869	-1.44	4.1906	-0.04
Mecanico	3.0052	-0.78	3.4138	-0.02	4.5031	-0.67	5.1092	-0.02
Mezzanine	3.4718	-0.58	3.6014	-0.01	5.1985	-0.53	5.3901	-0.01
Plaza	3.7287	-0.44	3.8517	-0.01	5.5814	-0.42	5.7646	-0.01
Arenales	3.8667	-0.30	4.1320	0.00	5.7870	-0.31	6.1842	0.00
Sotano 1	4.1304	-0.12	4.2888	0.00	6.1831	-0.10	6.4188	0.00
Sotano 2	4.3659	-0.04	4.4022	0.00	6.5346	-0.04	6.5885	0.00
Suelo	4.5311	0.00	4.5311	0.00	6.7815	0.00	6.7815	0.00

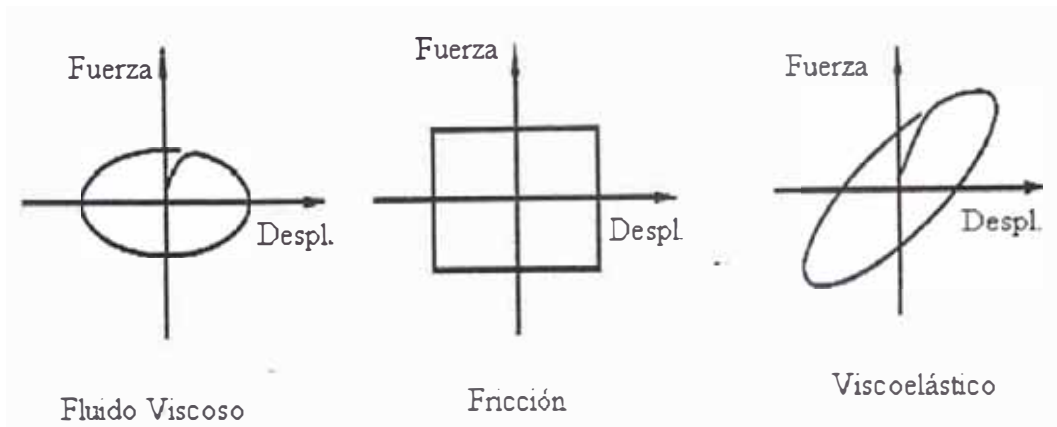


Figura 5.1 Respuesta de los tres tipos de disipadores

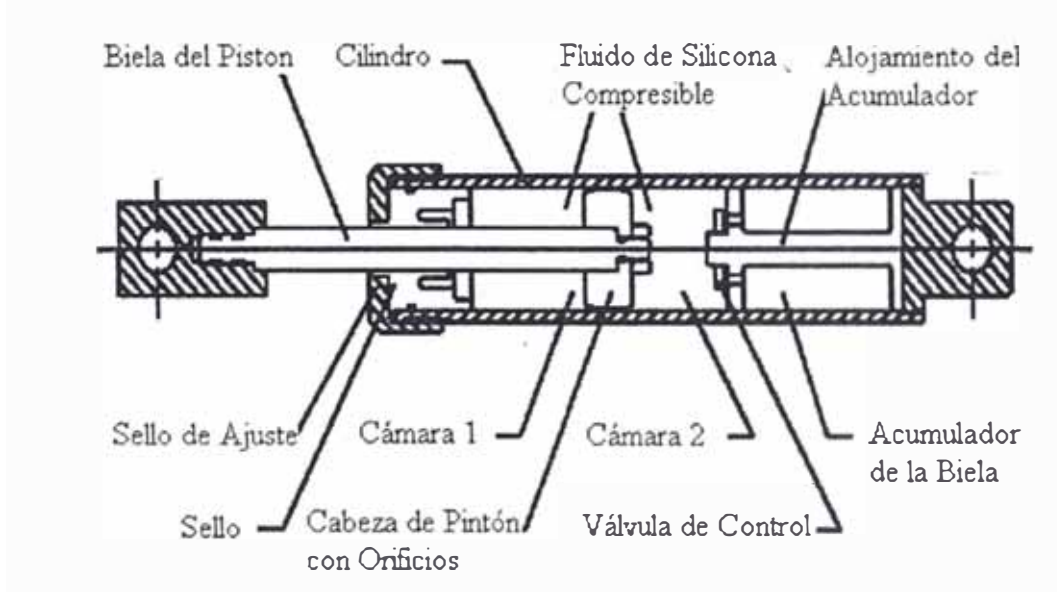


Figura 5.2 Vista interior del disipador

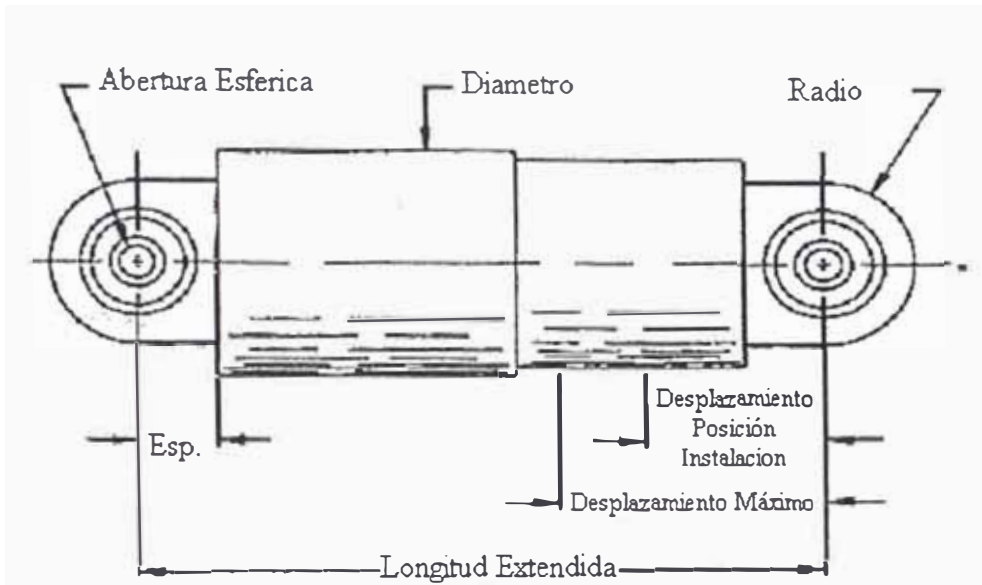


Figura 5.3 Vista exterior del disipador

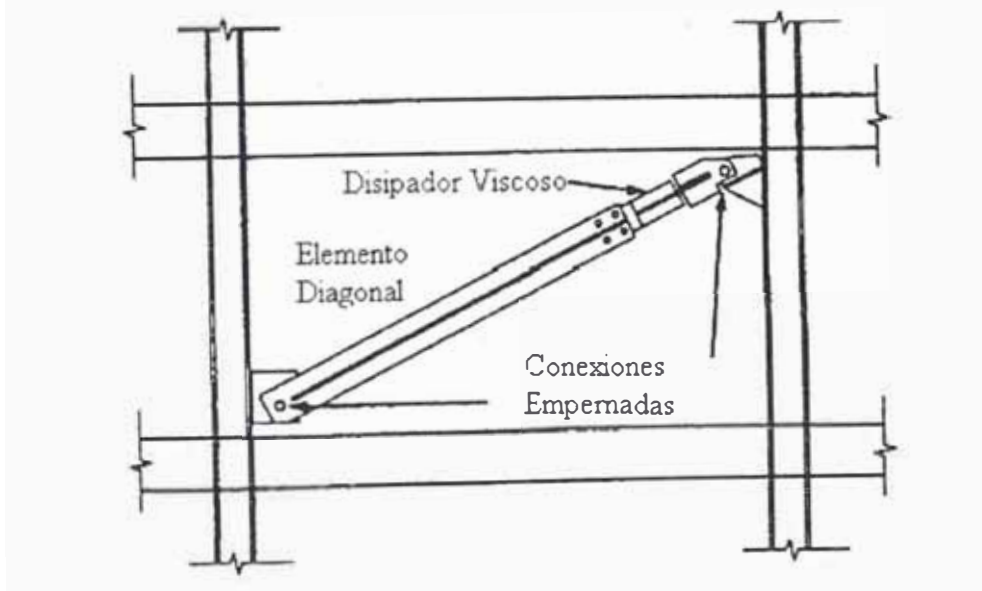


Figura 5.4 Detalle de la instalación del disipador

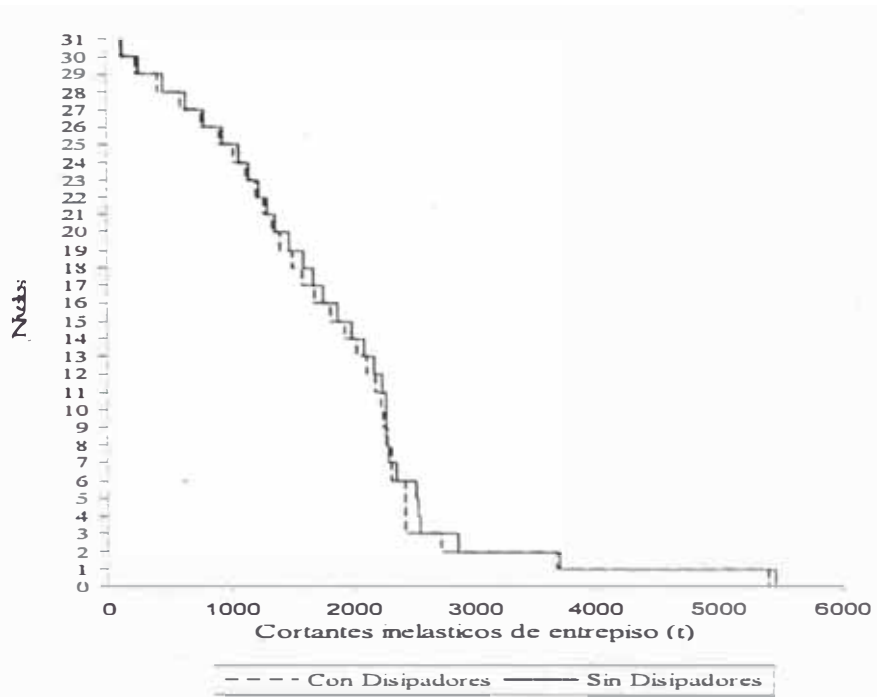


Figura 5.5 Efecto del nivel de aceleración (400 gals) – eje X

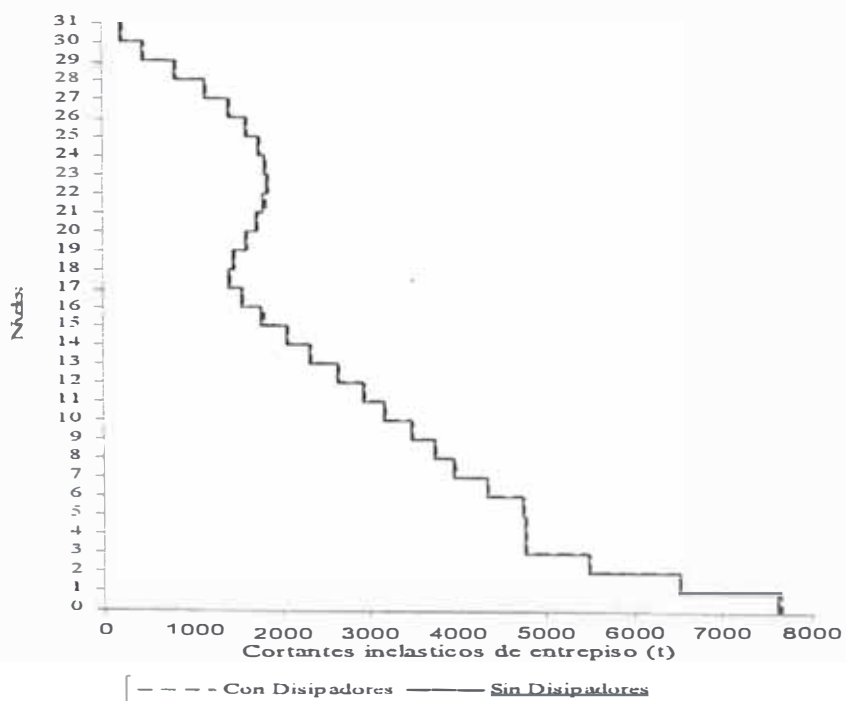


Figura 5.6 Efecto del nivel de aceleración (400 gals) – eje Y

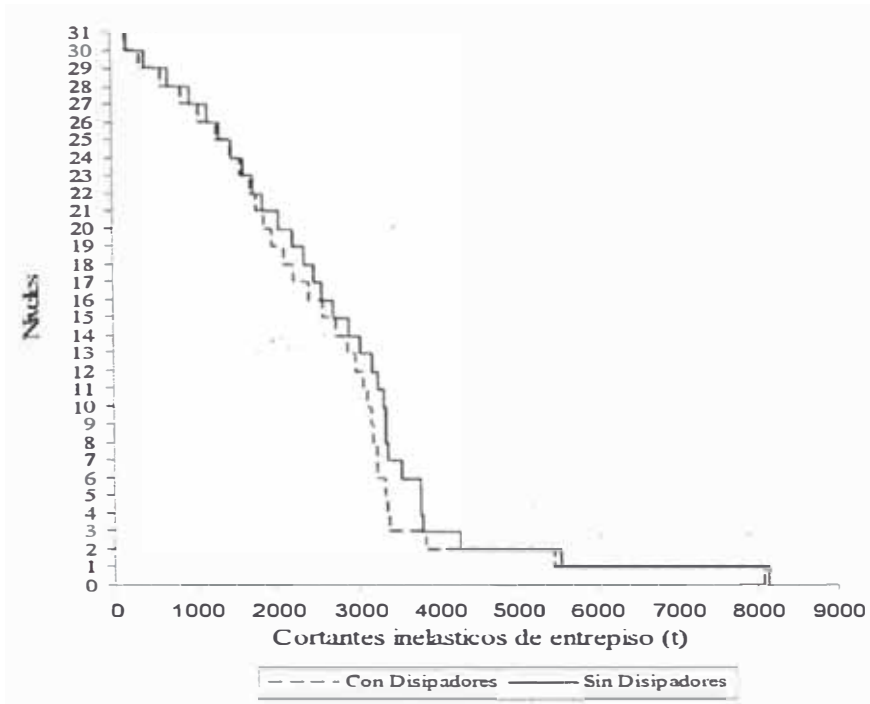


Figura 5.7 Efecto del nivel de aceleración (600 gals) – eje X

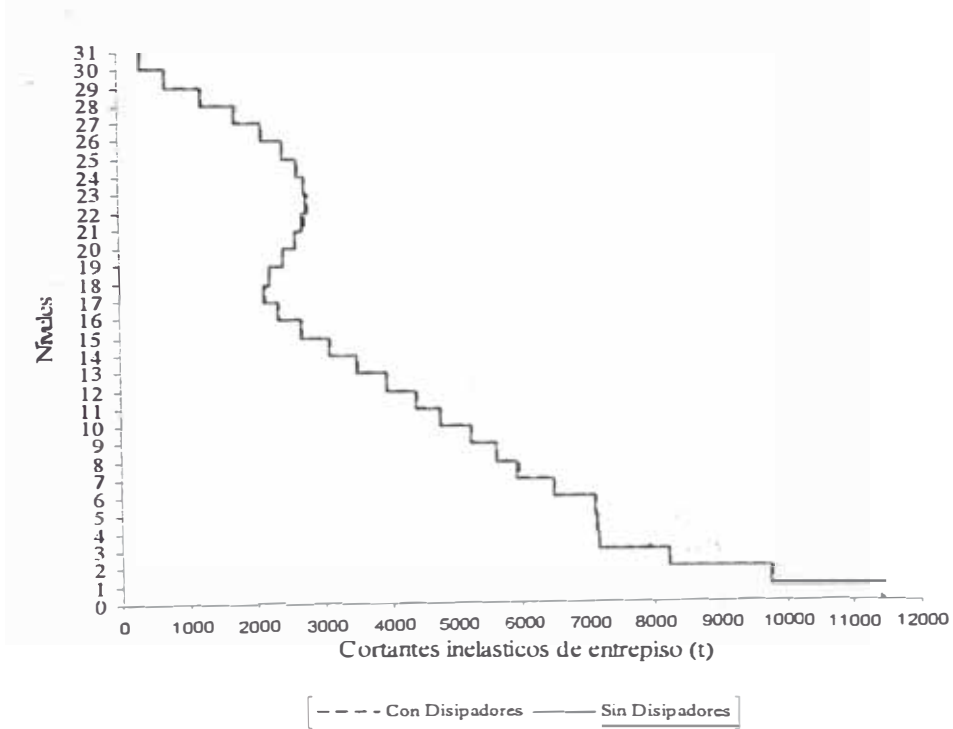


Figura 5.8 Efecto del nivel de aceleración (600 gals) – eje Y

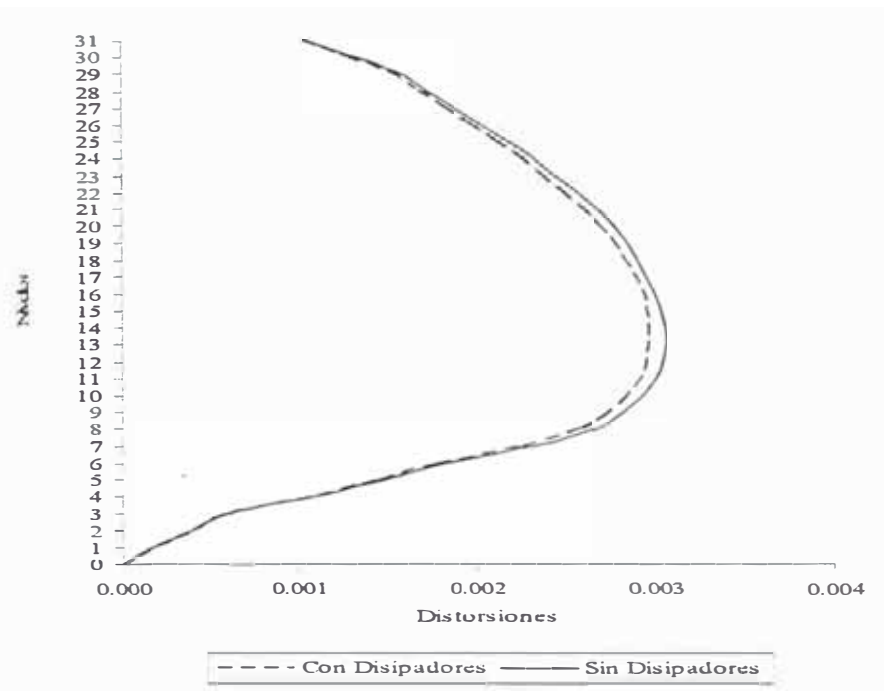


Figura 5.9 Distorsiones de entrepiso a 400 gals – eje X



Figura 5.10 Distorsiones de entrepiso a 400 gals – eje Y

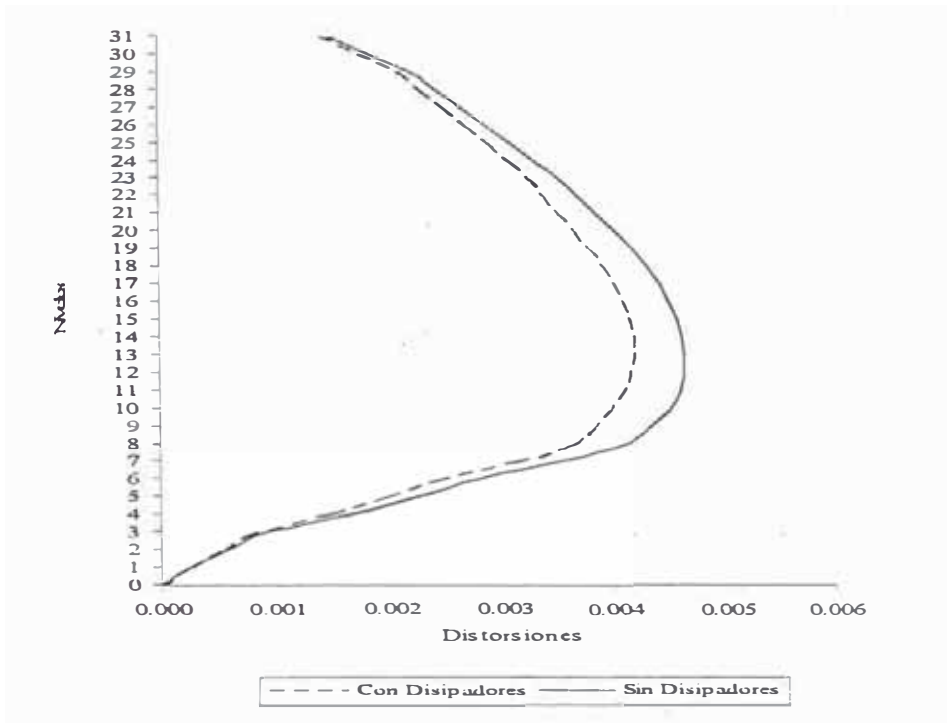


Figura 5.11 Distorsiones de entrecimiento a 600 gals – eje X

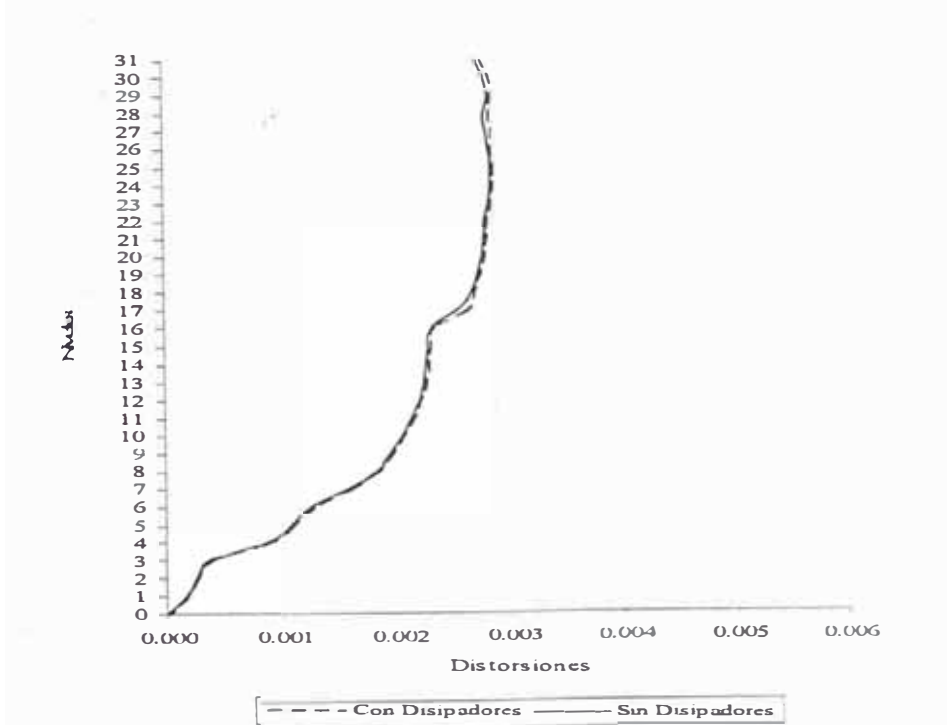


Figura 5.12 Distorsiones de entrecimiento a 600 gals – eje Y

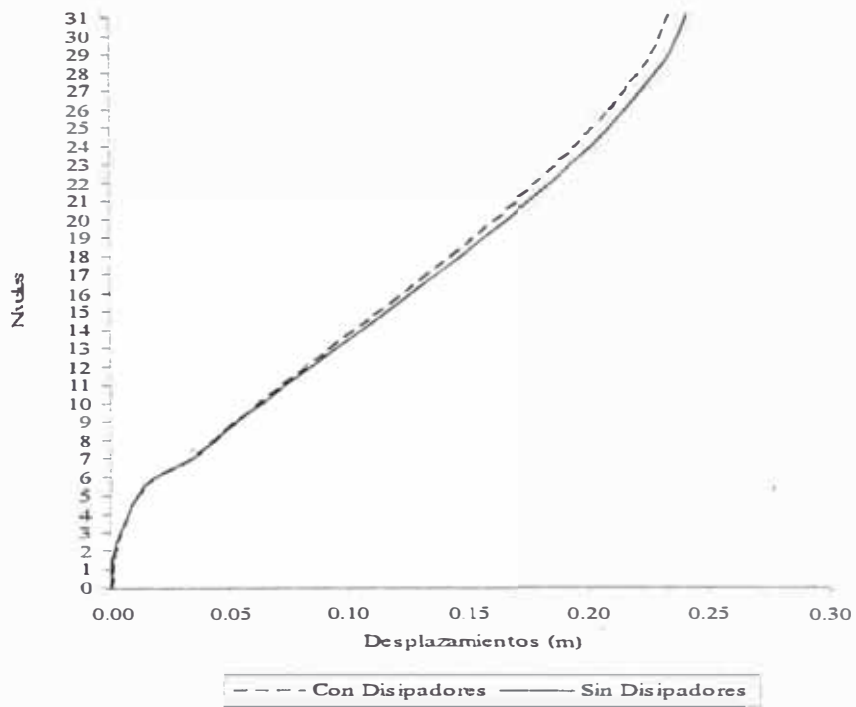


Figura 5.13 Desplazamientos relativos máximos a 400 gals – eje X

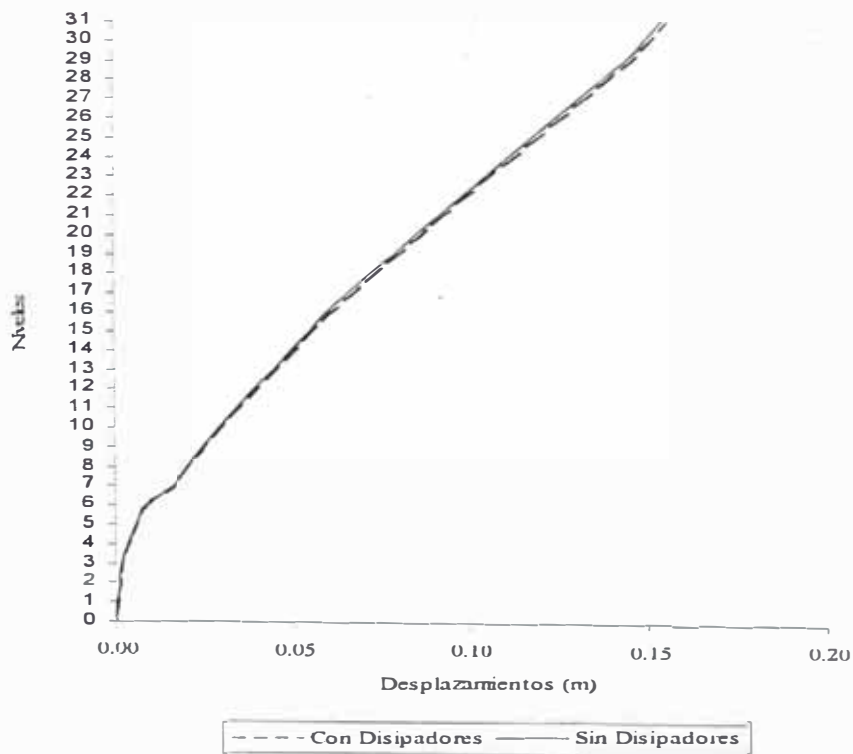


Figura 5.14 Desplazamientos relativos máximos a 400 gals – eje Y

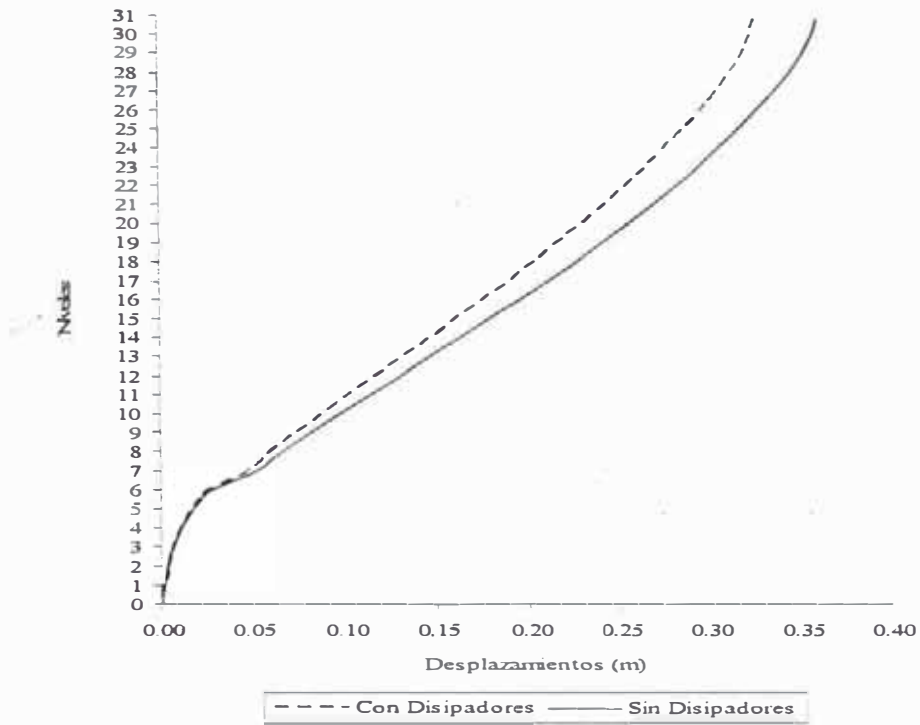


Figura 5.15 Desplazamientos relativos máximos a 600 gals – eje X

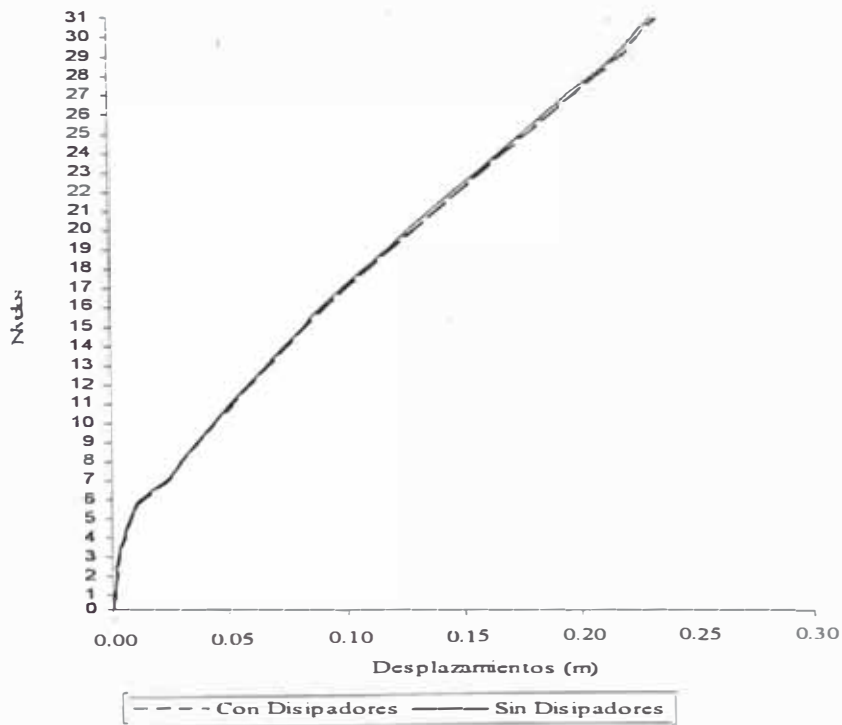


Figura 5.16 Desplazamientos relativos máximos a 600 gals – eje Y

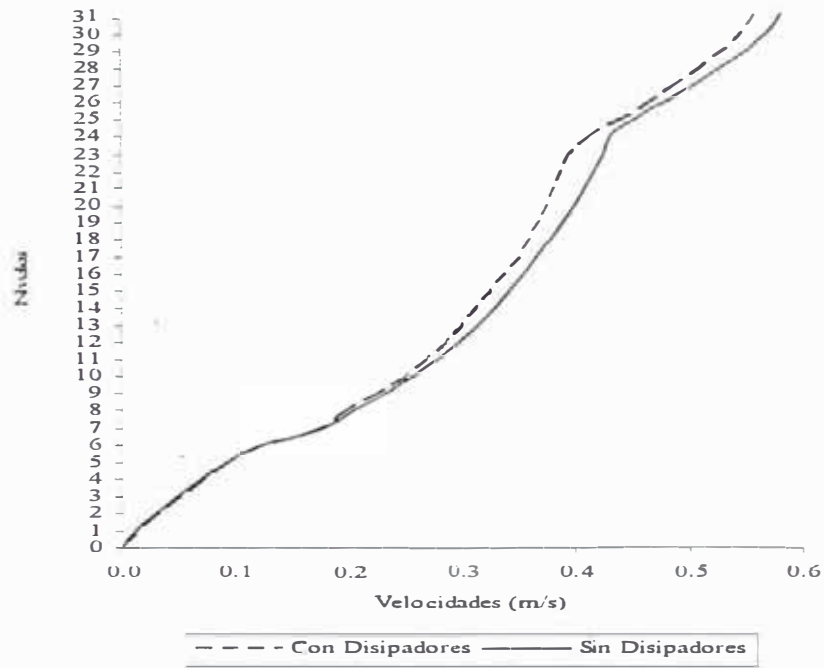


Figura 5.17 Velocidades relativas máximas a 400 gals – eje X

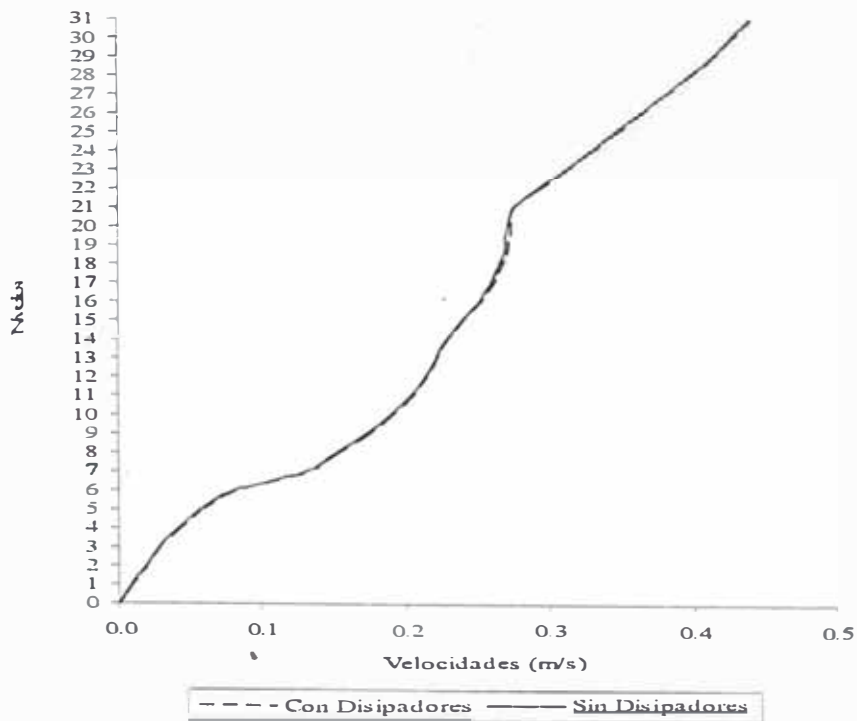


Figura 5.18 Velocidades relativas máximas a 400 gals – eje Y

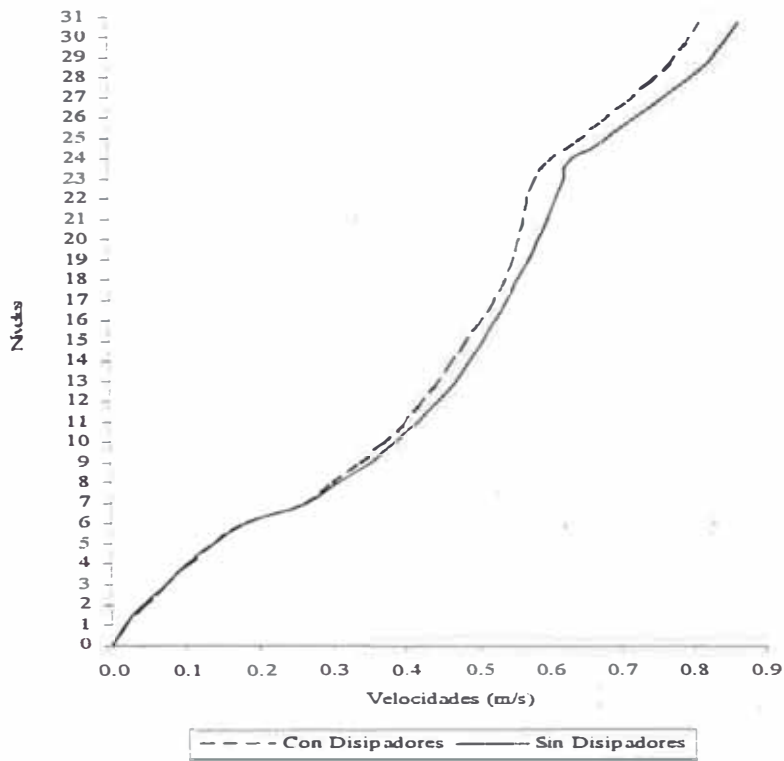


Figura 5.19 Velocidades relativas máximas a 600 gals – eje X

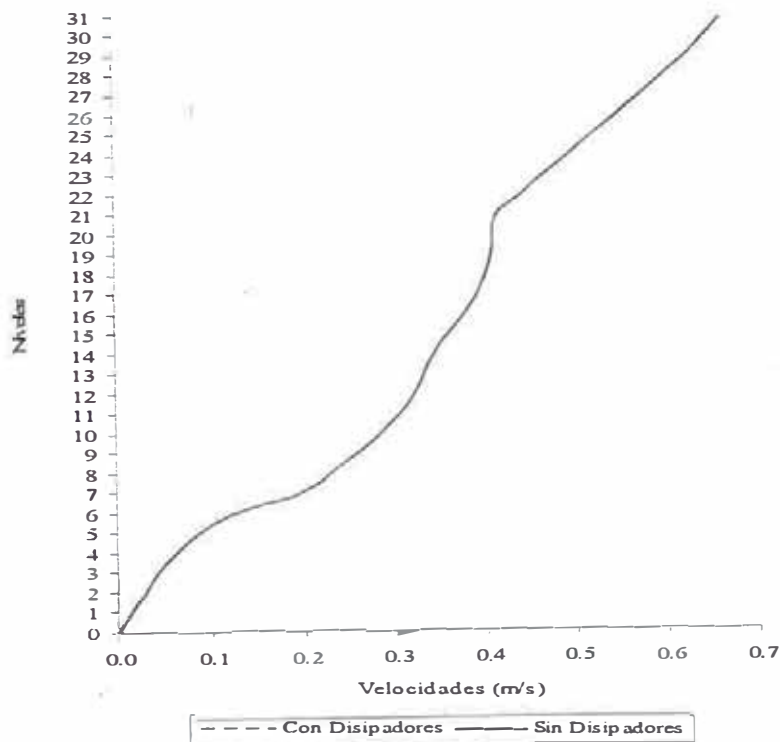


Figura 5.20 Velocidades relativas máximas a 600 gals – eje Y

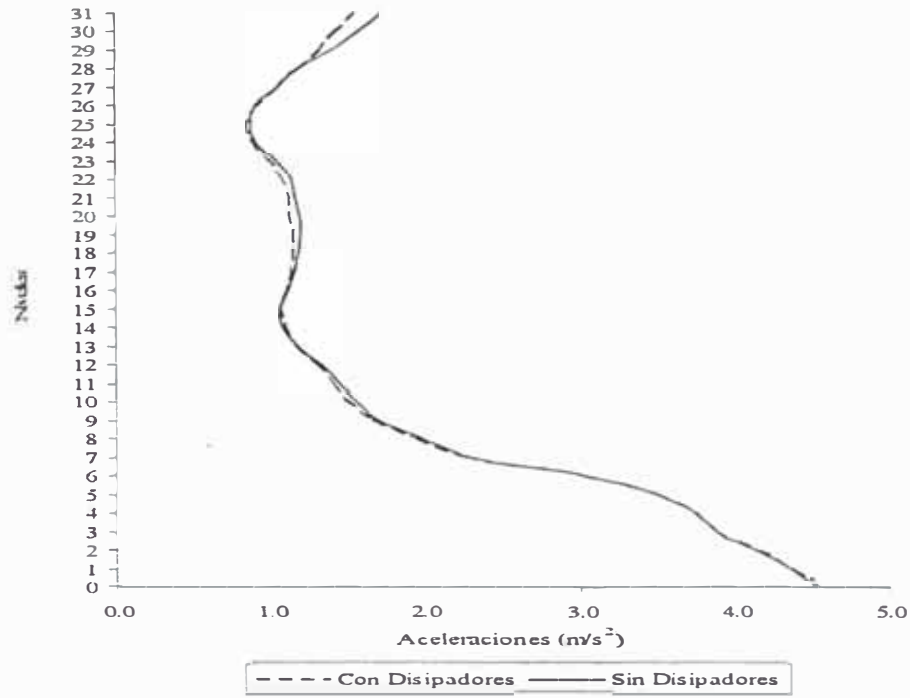


Figura 5.21 Aceleraciones absolutas máximas a 400 gals – eje X

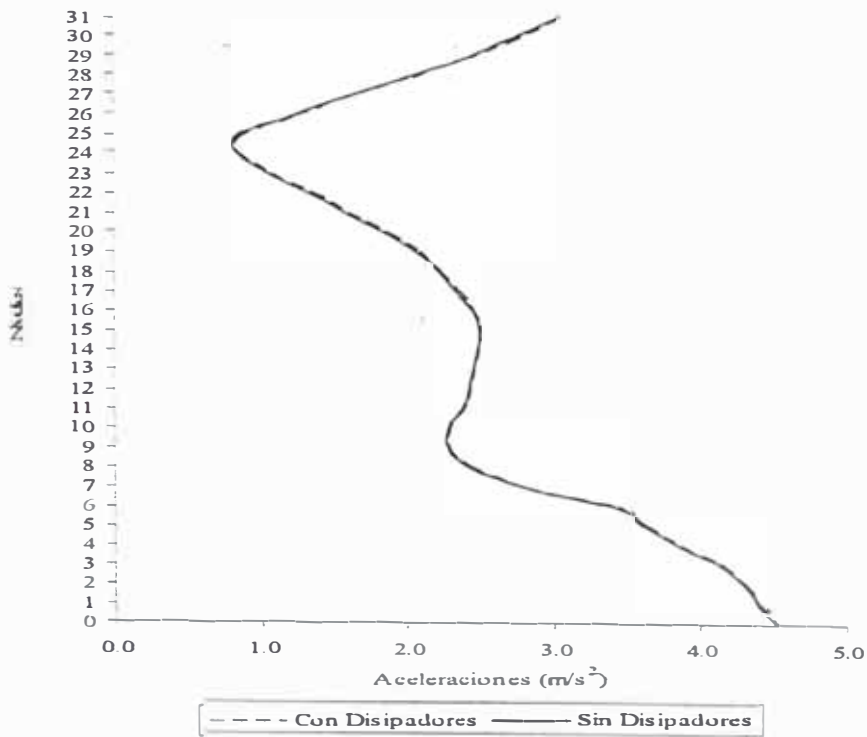


Figura 5.22 Aceleraciones absolutas máximas a 400 gals – eje Y

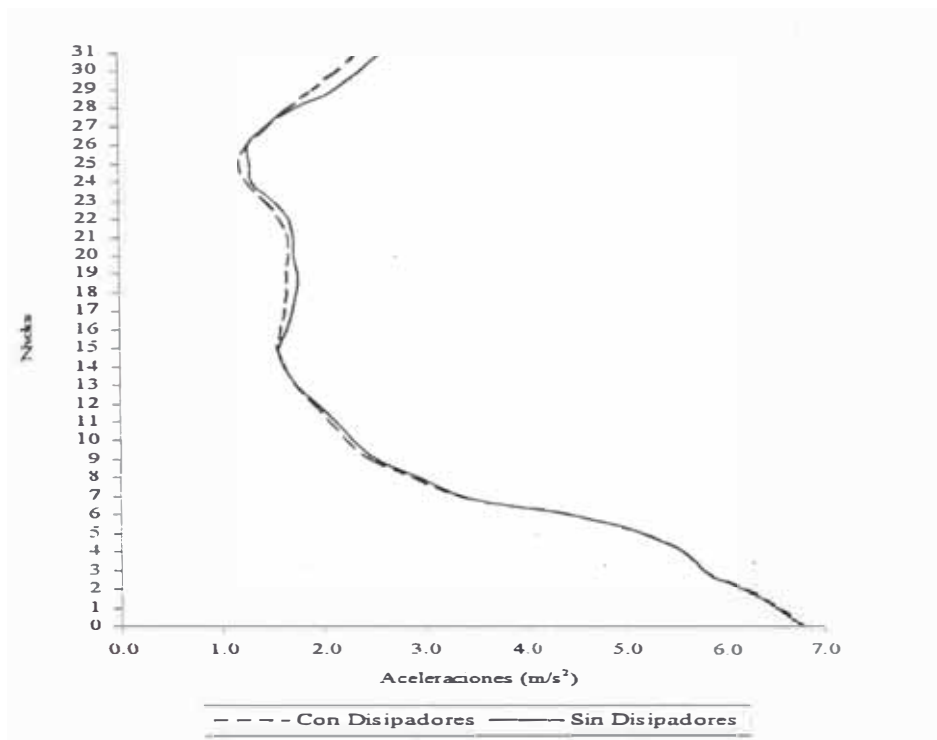


Figura 5.23 Aceleraciones absolutas máximas a 600 gals – eje X

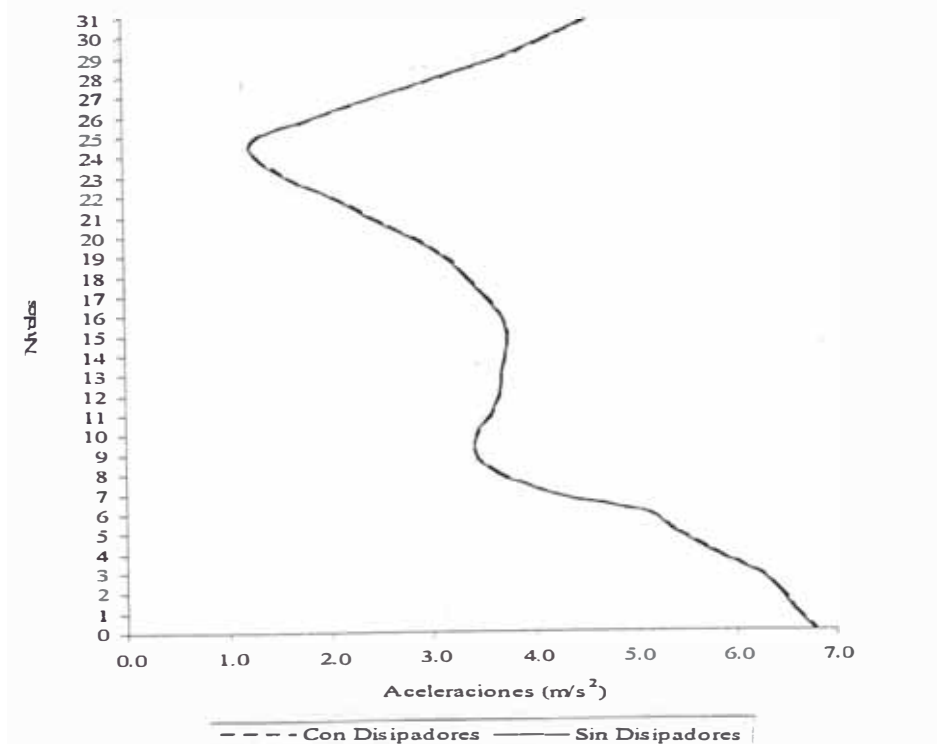


Figura 5.24 Aceleraciones absolutas máximas a 600 gals – eje Y

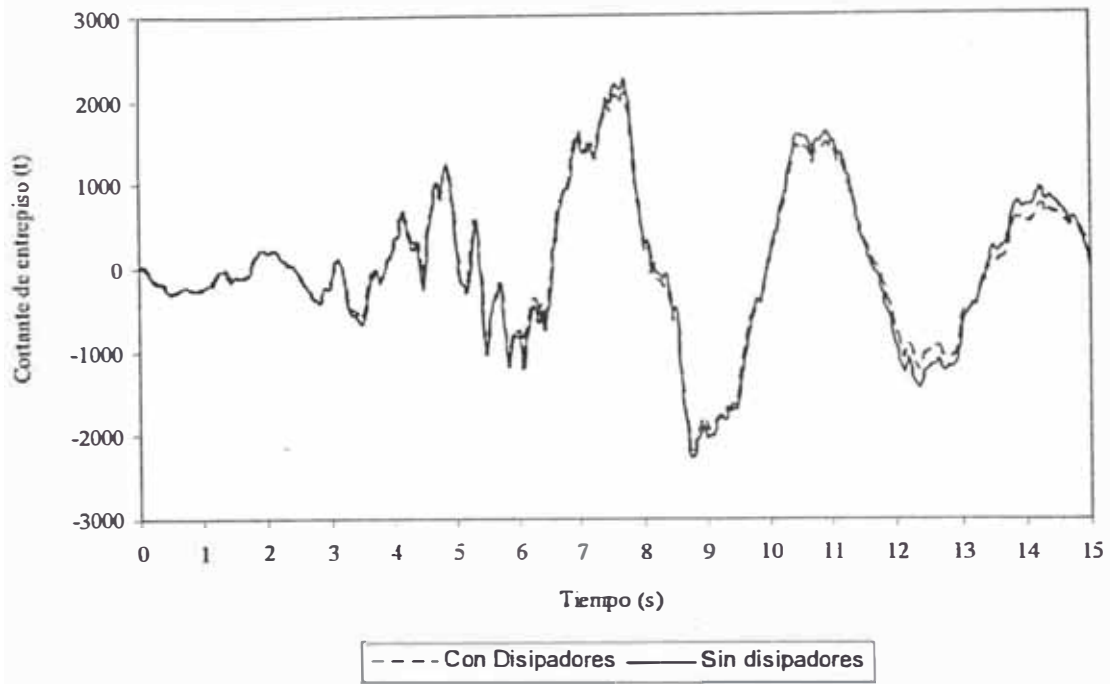


Figura 5.25 Respuesta tiempo historia a 400 gals
Nivel 10 – eje X

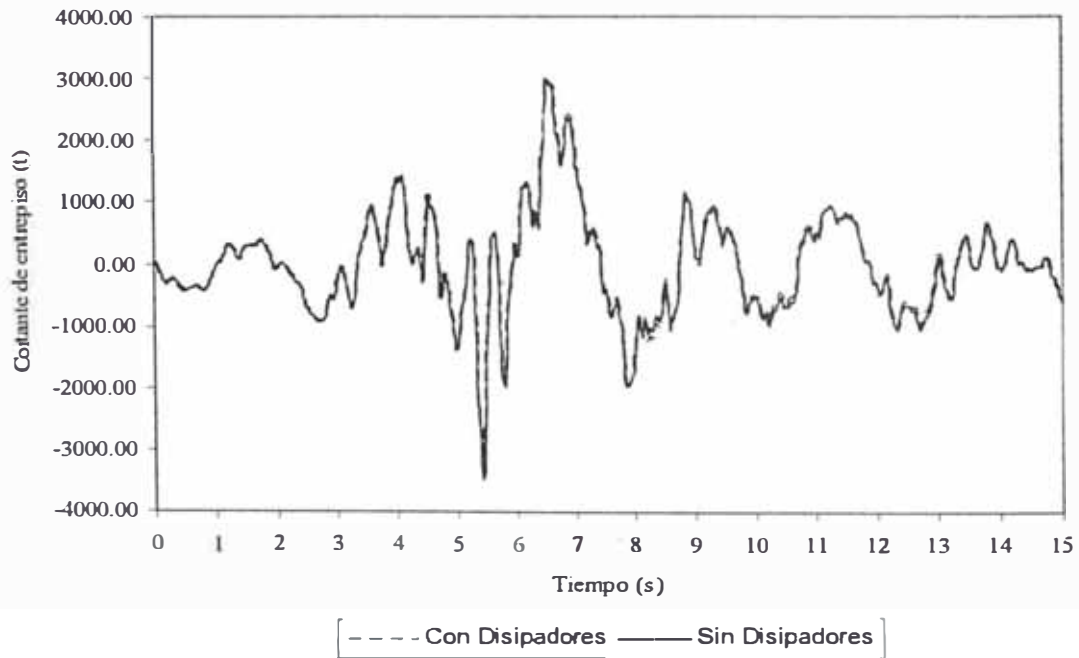


Figura 5.26 Respuesta tiempo historia a 400 gals
Nivel 10 – eje Y

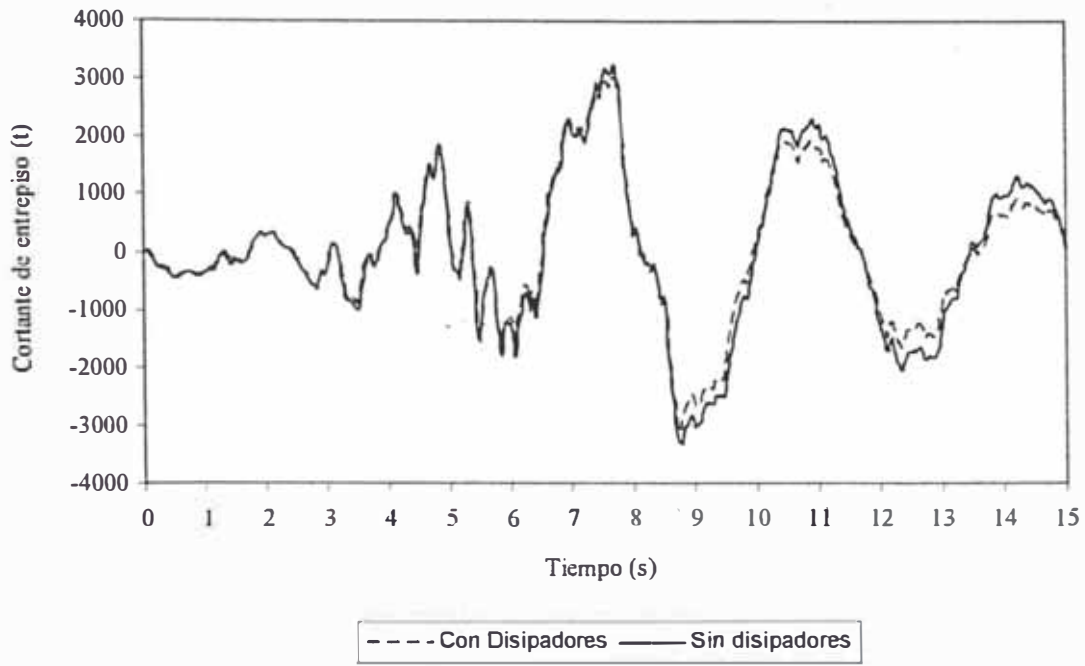


Figura 5.27 Respuesta tiempo historia a 600 gals
Nivel 10 – eje X

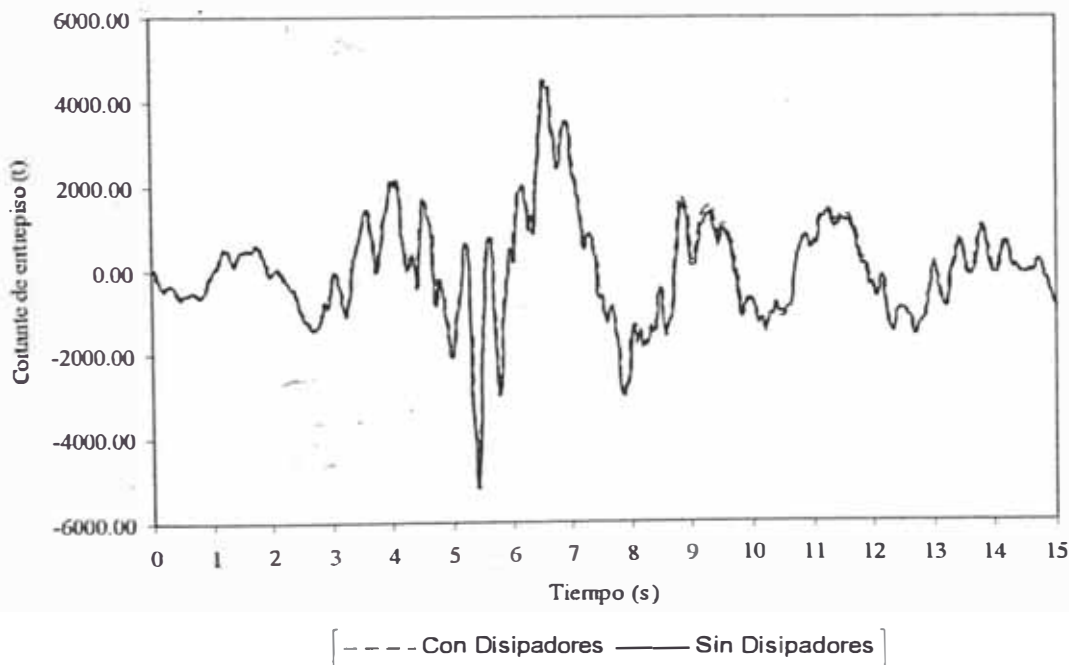


Figura 5.28 Respuesta tiempo historia a 600 gals
Nivel 10 – eje Y

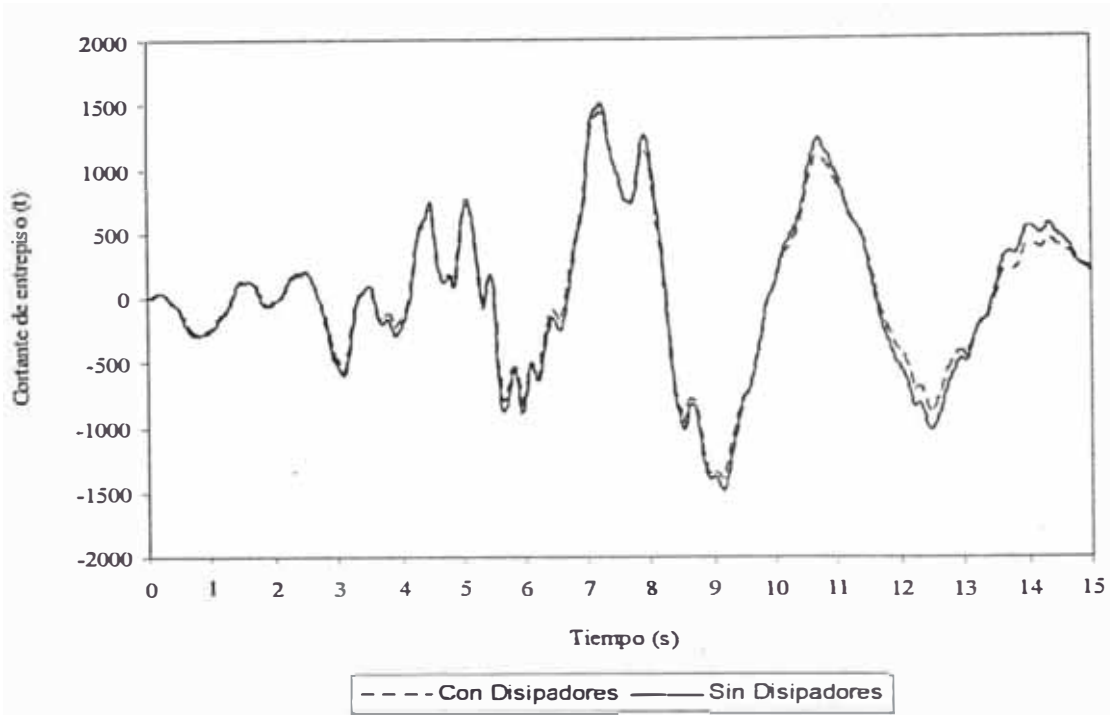


Figura 5.29 Respuesta tiempo historia a 400 gals
Nivel 20 – eje X

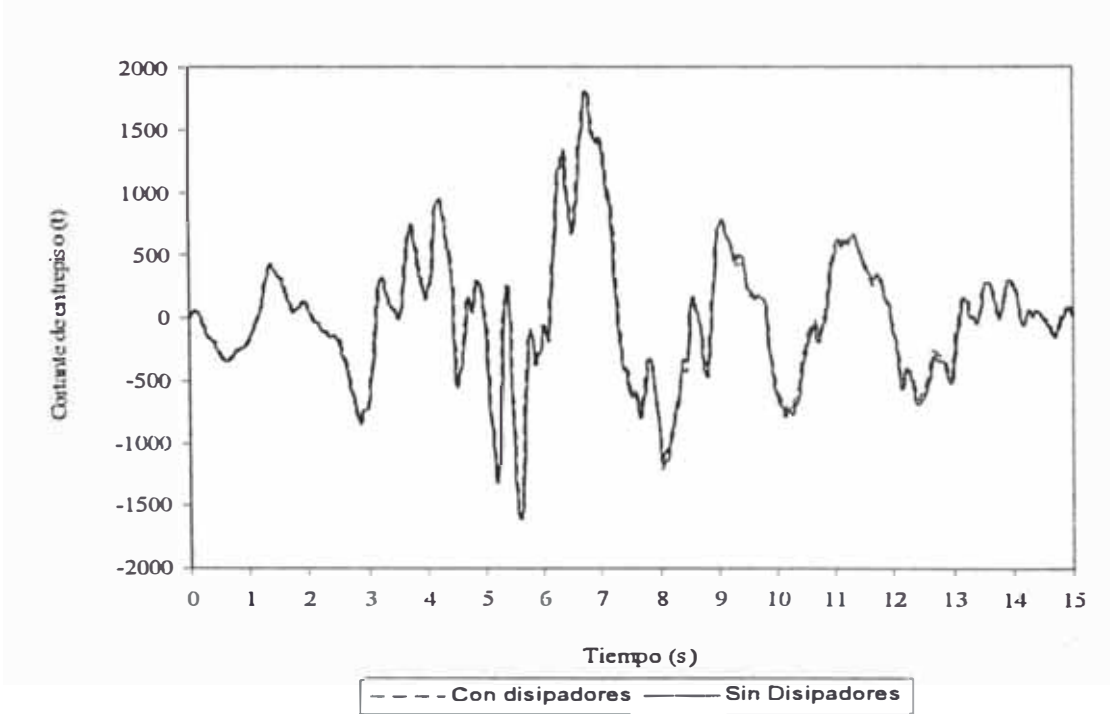


Figura 5.30 Respuesta tiempo historia a 400 gals
Nivel 20 – eje Y

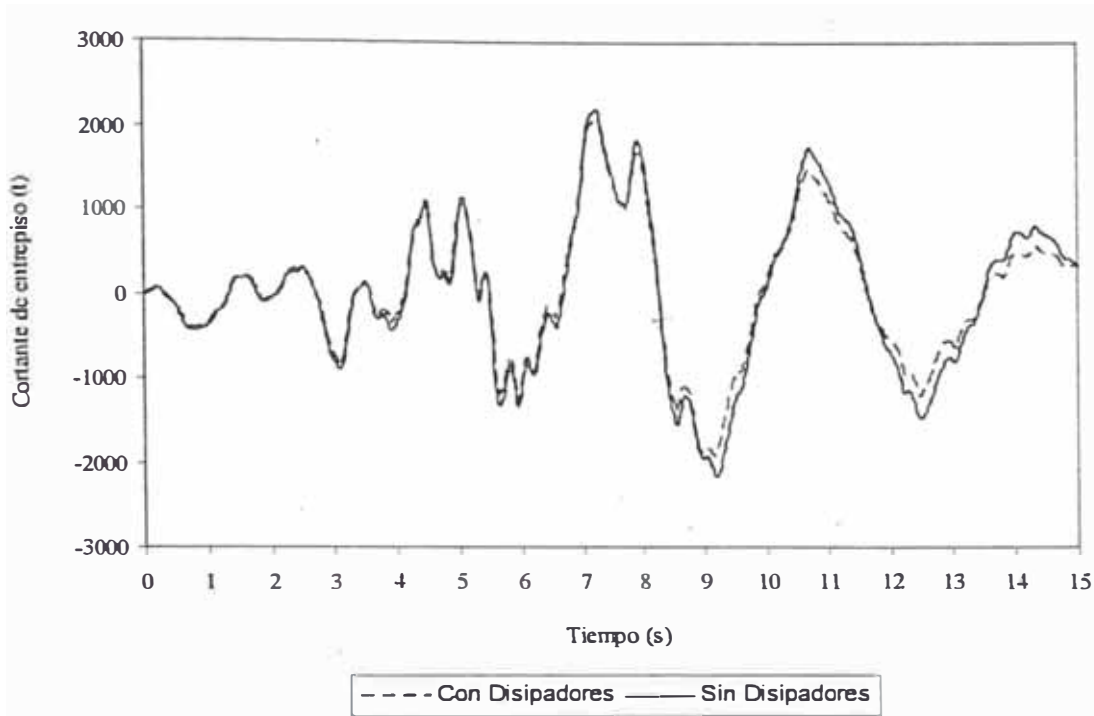


Figura 5.31 Respuesta tiempo historia a 600 gals
Nivel 20 – eje X

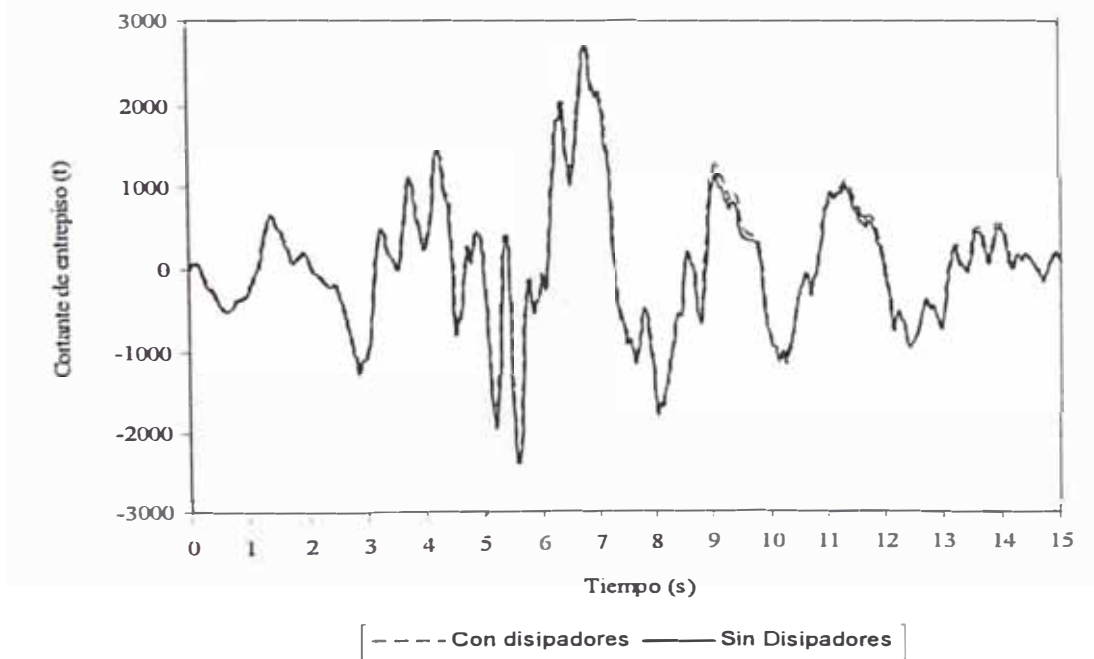


Figura 5.32 Respuesta tiempo historia a 600 gals
Nivel 20 – eje Y

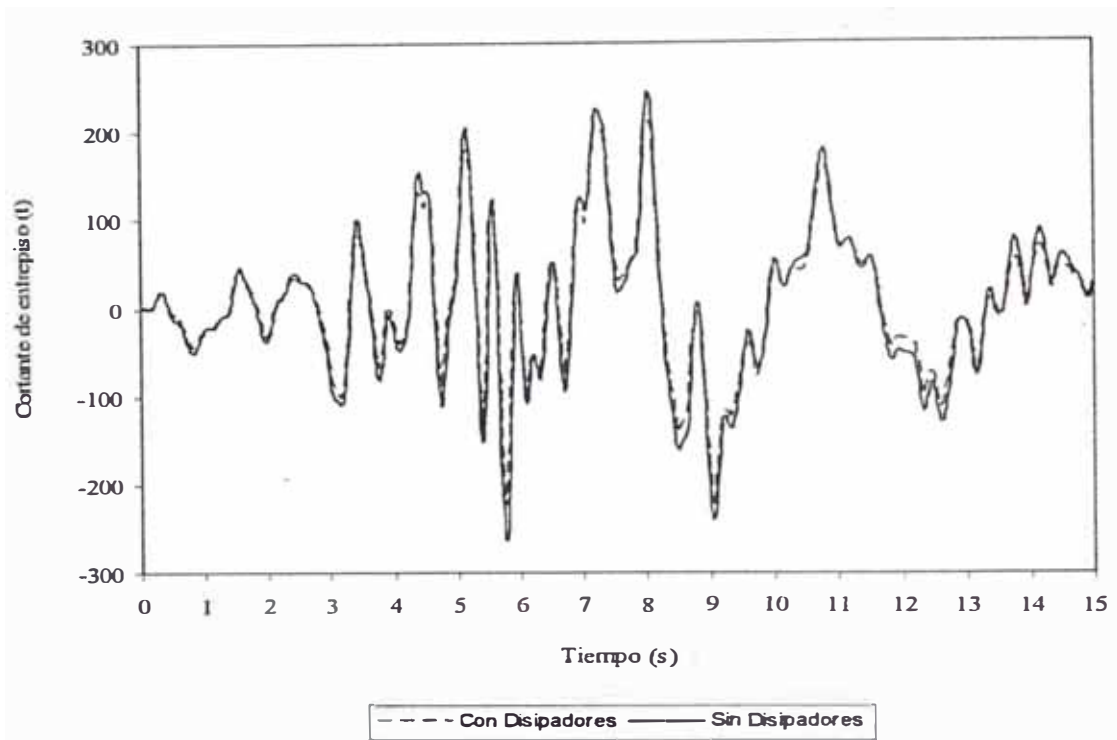


Figura 5.33 Respuesta tiempo historia a 400 gals
Nivel 30 – eje X

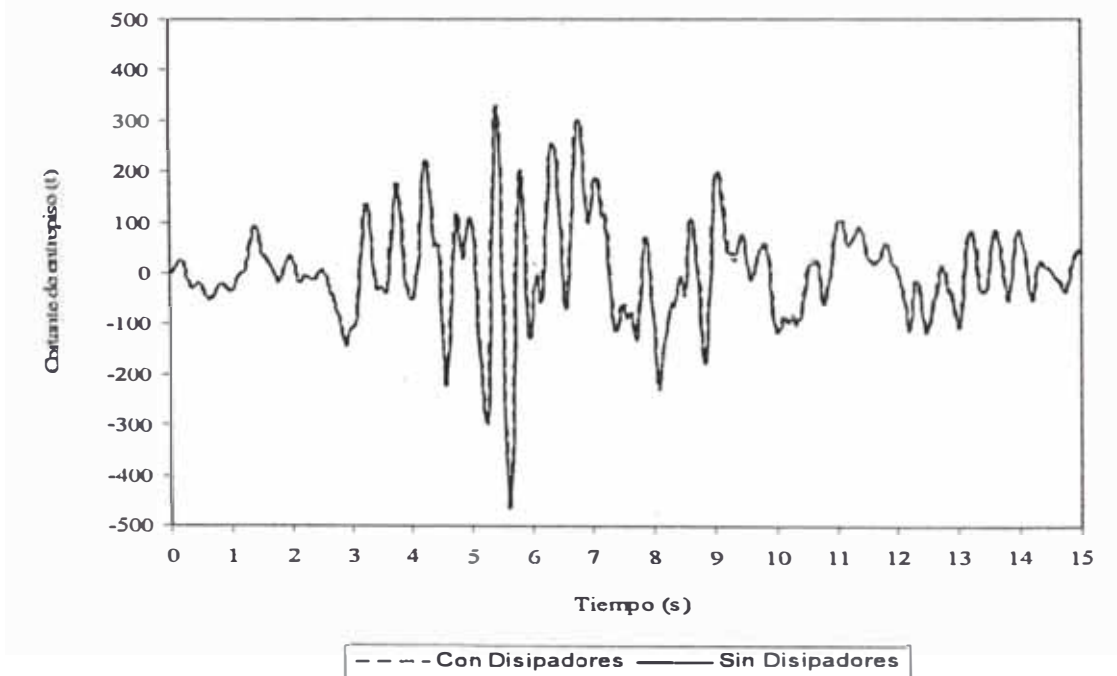


Figura 5.34 Respuesta tiempo historia a 400 gals
Nivel 30 – eje Y

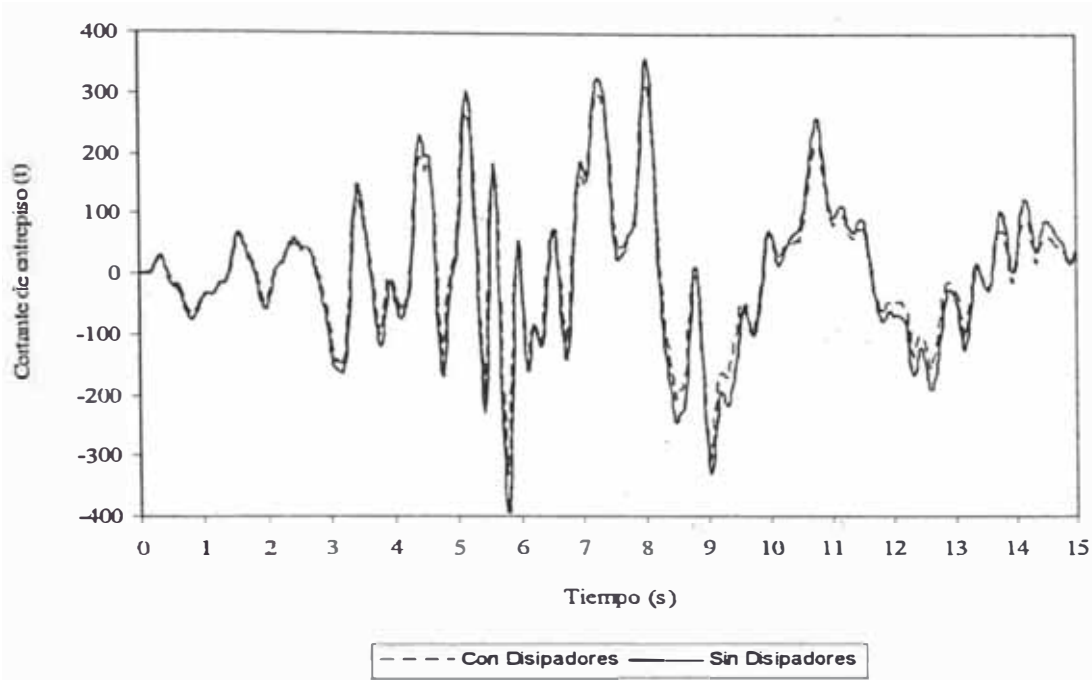


Figura 5.35 Respuesta tiempo historia a 600 gals
Nivel 30 – eje X

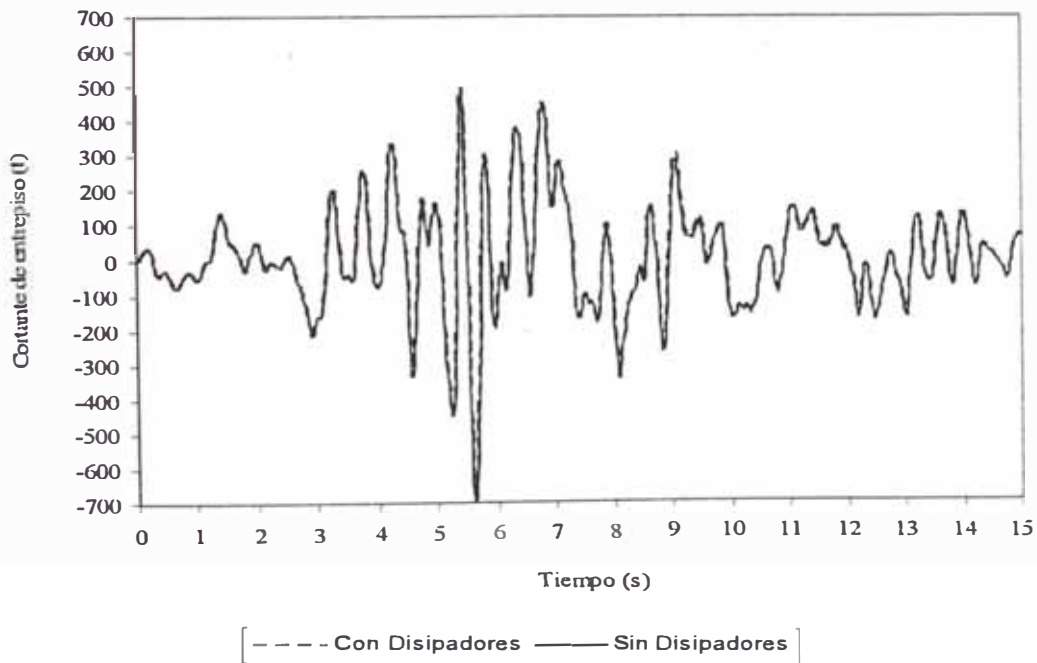


Figura 5.36 Respuesta tiempo historia a 600 gals
Nivel 30 – eje Y

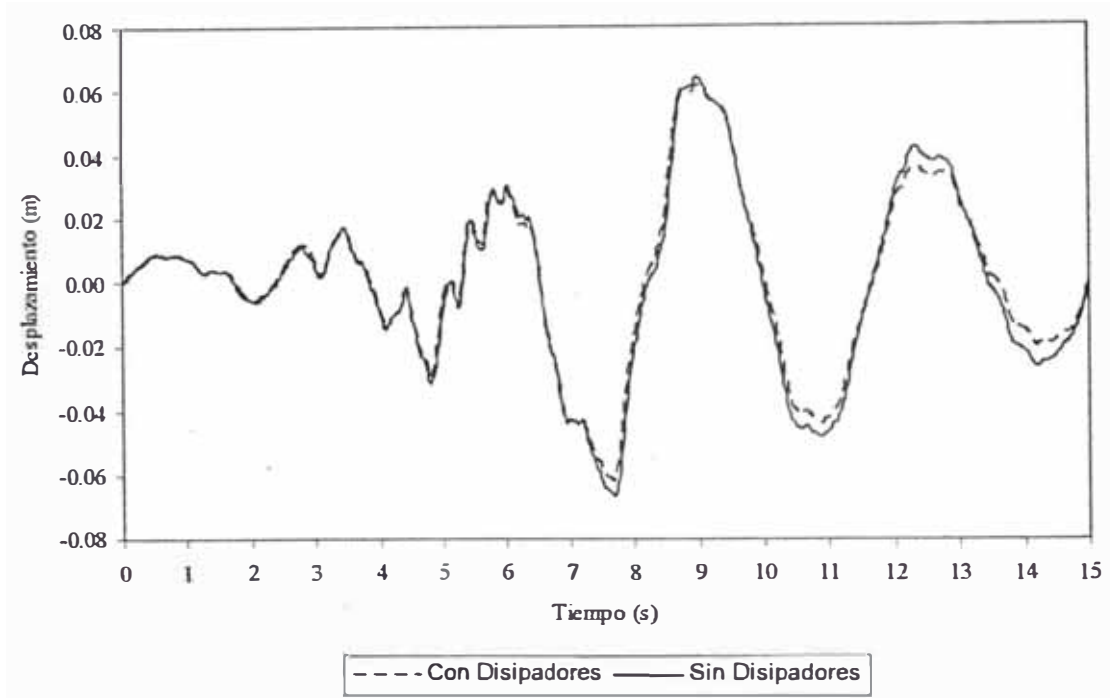


Figura 5.37 Respuesta tiempo historia a 400 gals
Nivel 10 – eje X

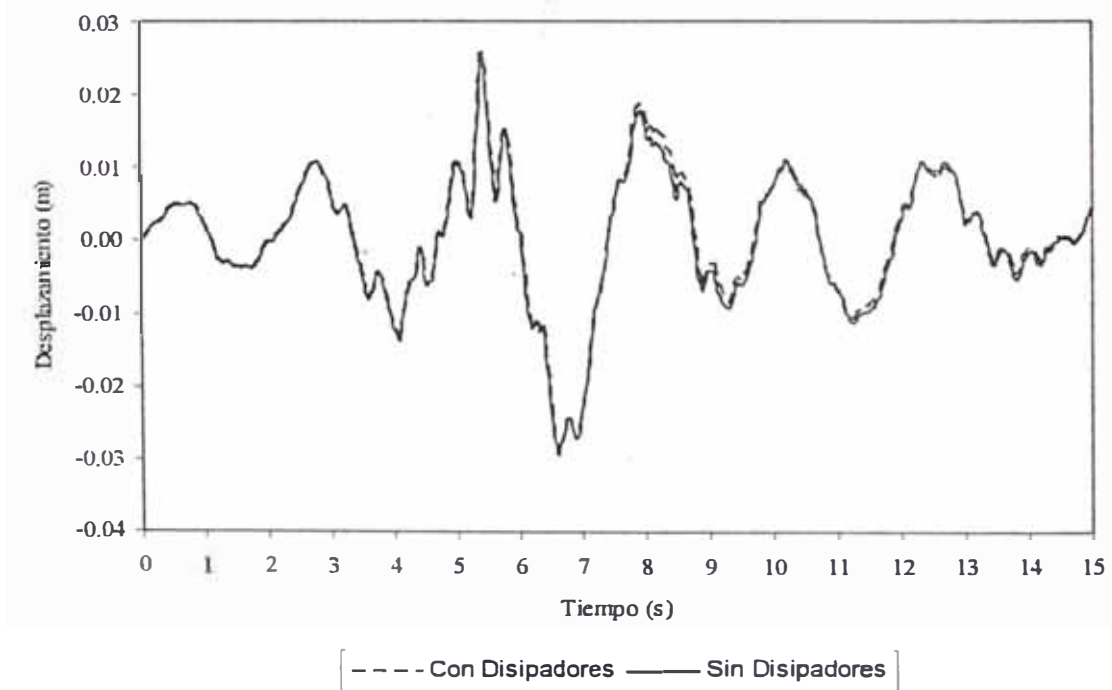


Figura 5.38 Respuesta tiempo historia a 400 gals
Nivel 30 – eje Y

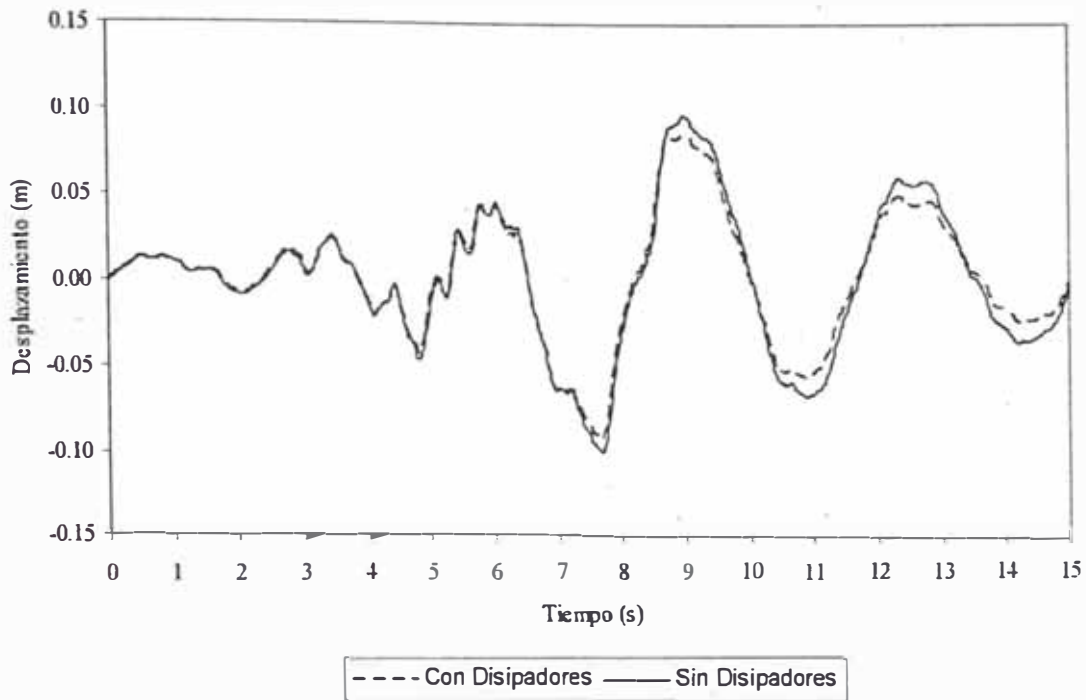


Figura 5.39 Respuesta tiempo historia a 600 gals
Nivel 10 – eje X

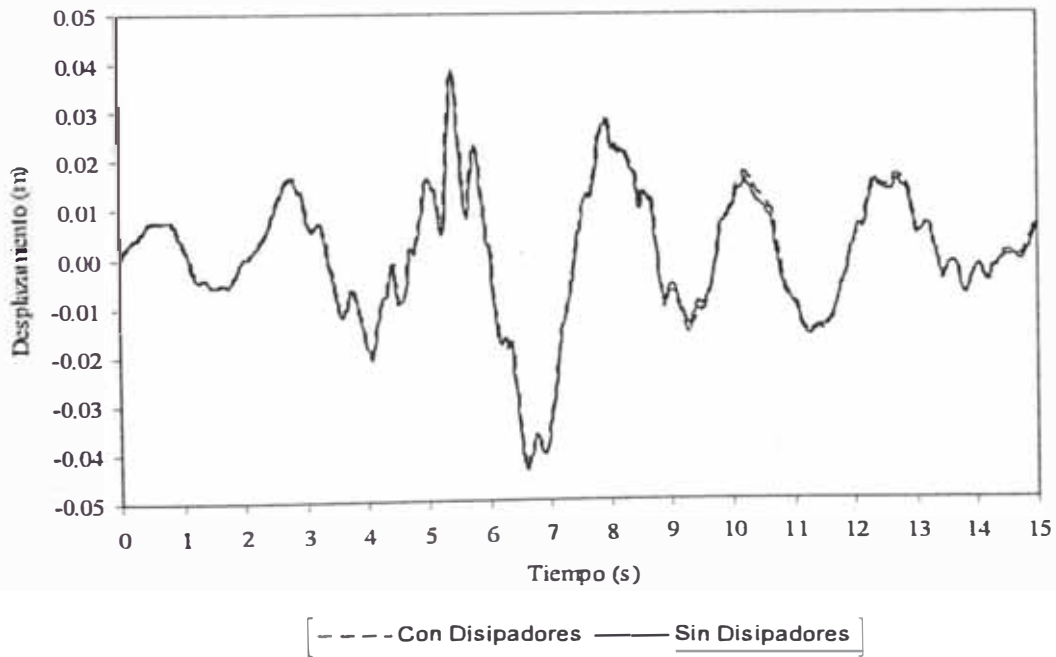


Figura 5.40 Respuesta tiempo historia a 600 gals
Nivel 10 – eje X

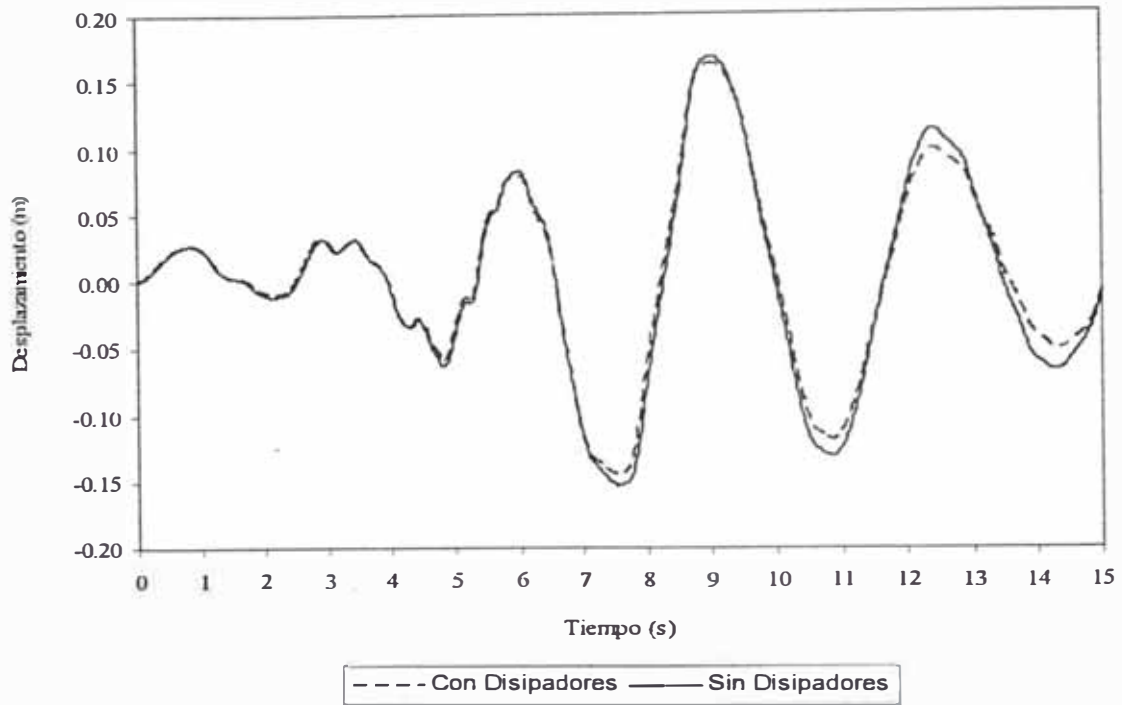


Figura 5.41 Respuesta tiempo historia a 400 gals
Nivel 20 – eje X

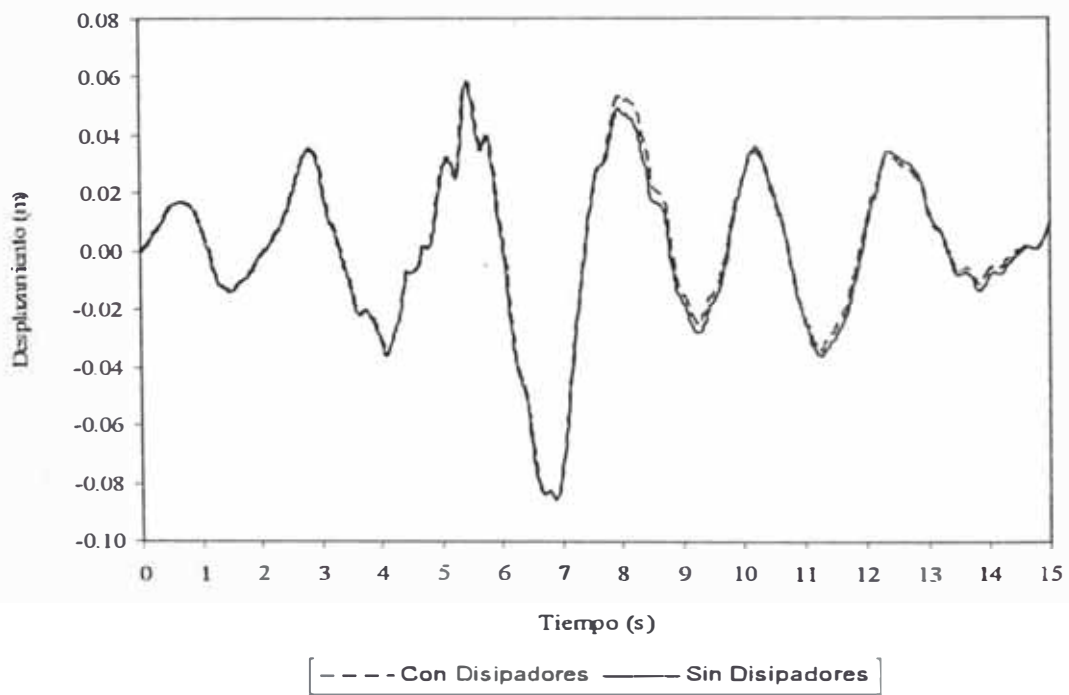


Figura 5.42 Respuesta tiempo historia a 400 gals
Nivel 20 – eje Y

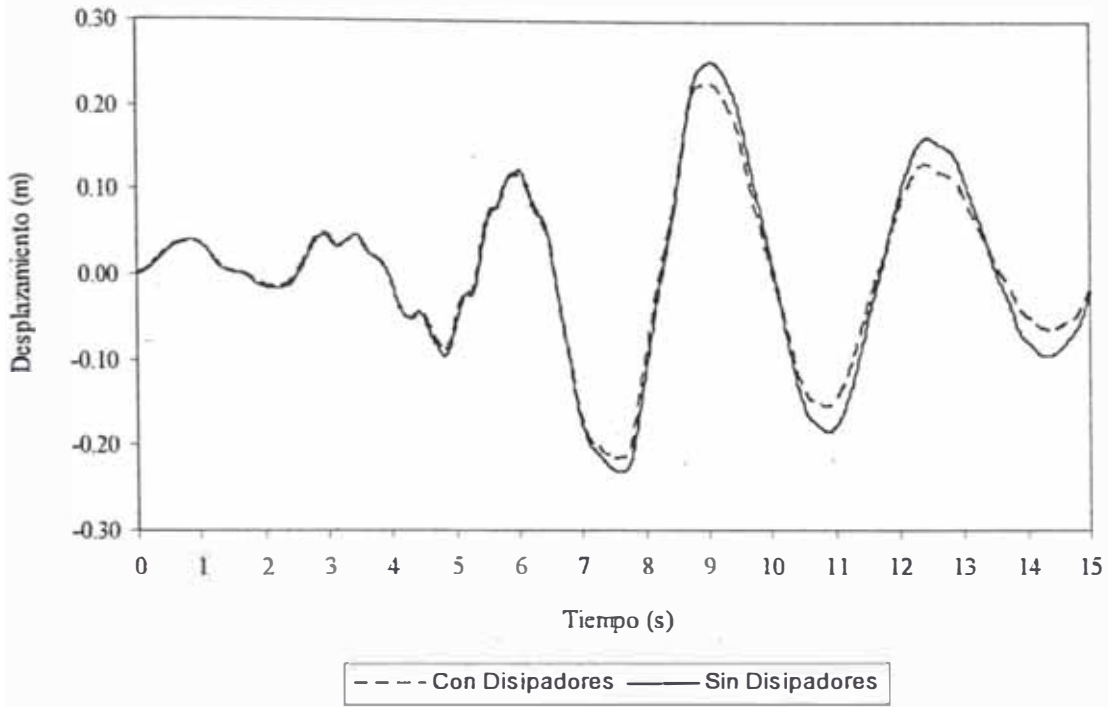


Figura 5.43 Respuesta tiempo historia a 600 gals
Nivel 20 – eje X

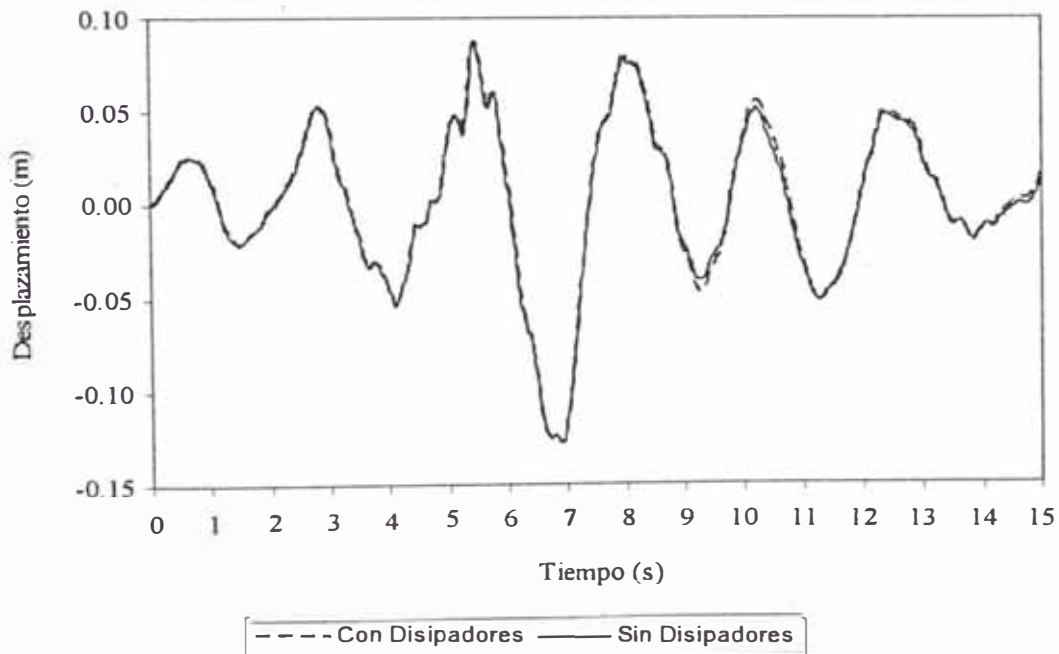


Figura 5.44 Respuesta tiempo historia a 600 gals
Nivel 20 – eje Y

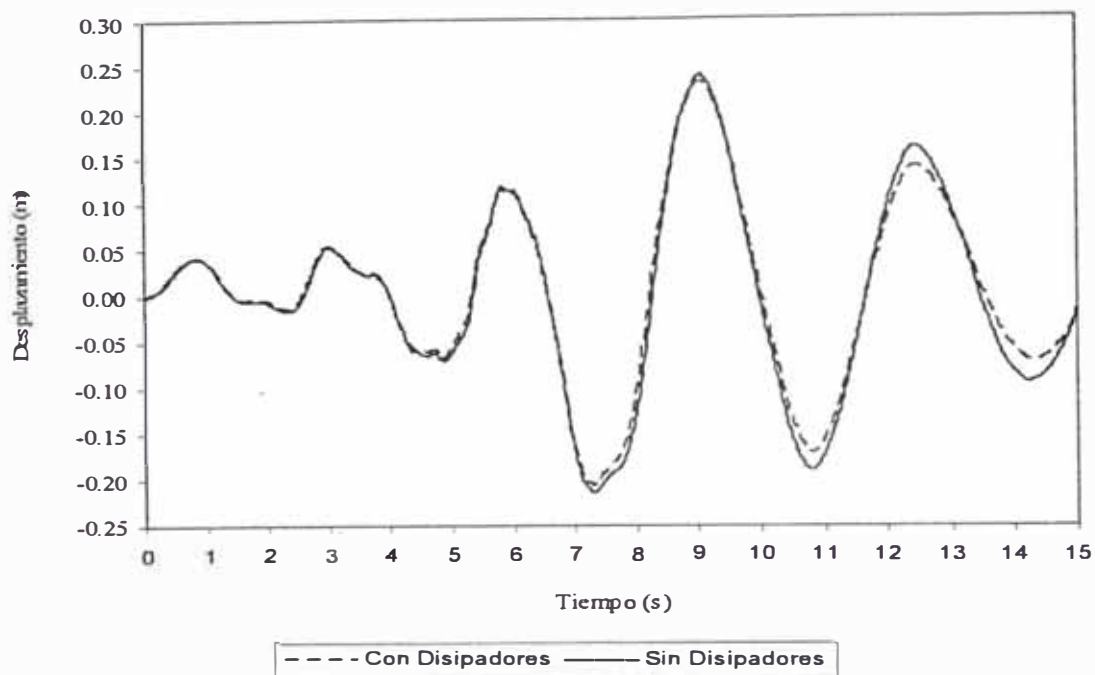


Figura 5.45 Respuesta tiempo historia a 400 gals
Nivel 30 – eje X

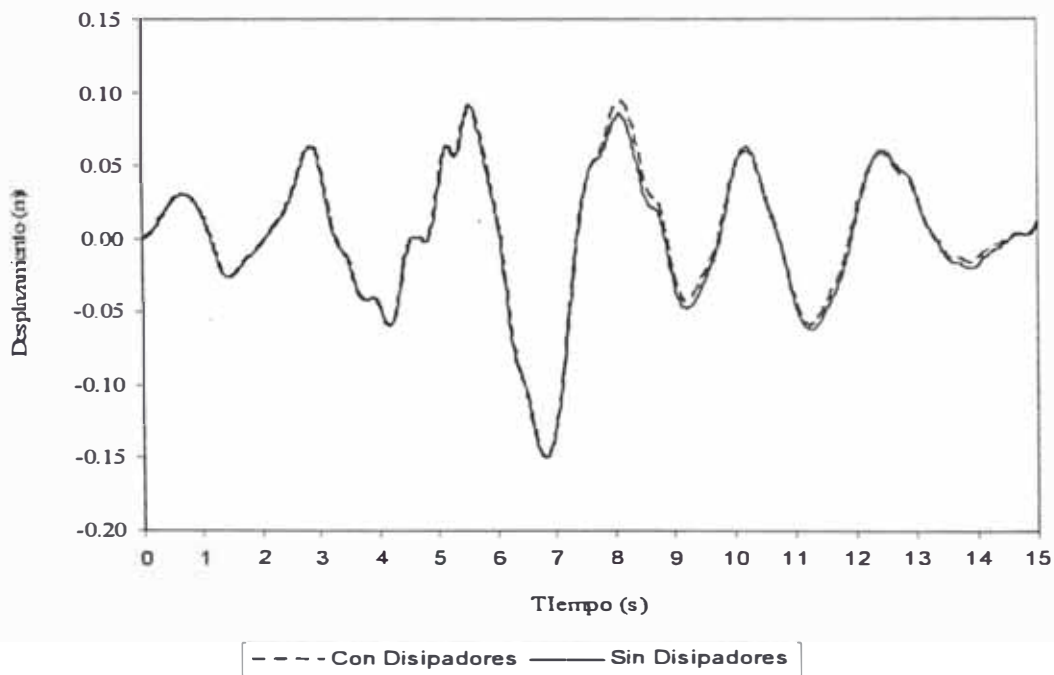


Figura 5.46 Respuesta tiempo historia a 400 gals
Nivel 30 – eje Y

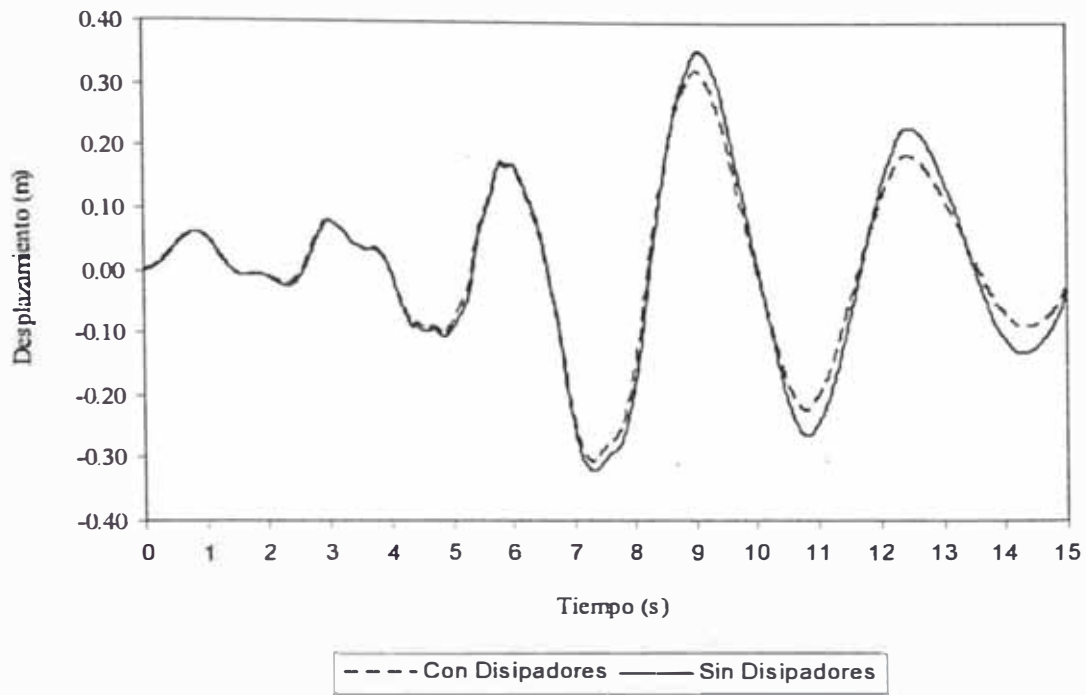


Figura 5.47 Respuesta tiempo historia a 600 gals
Nivel 30 – eje X

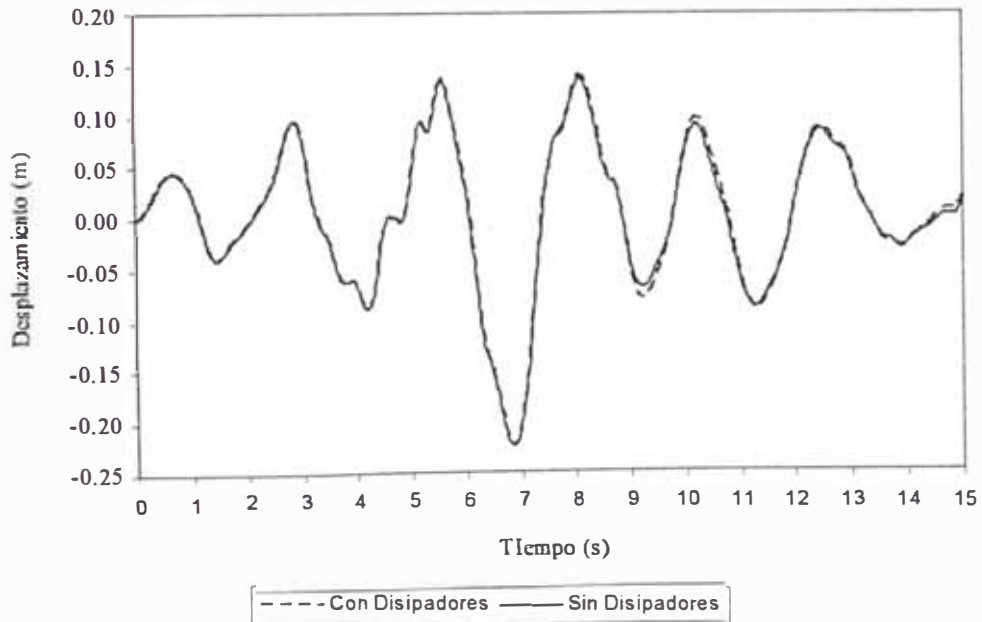


Figura 5.48 Respuesta tiempo historia a 600 gals
Nivel 30 – eje Y

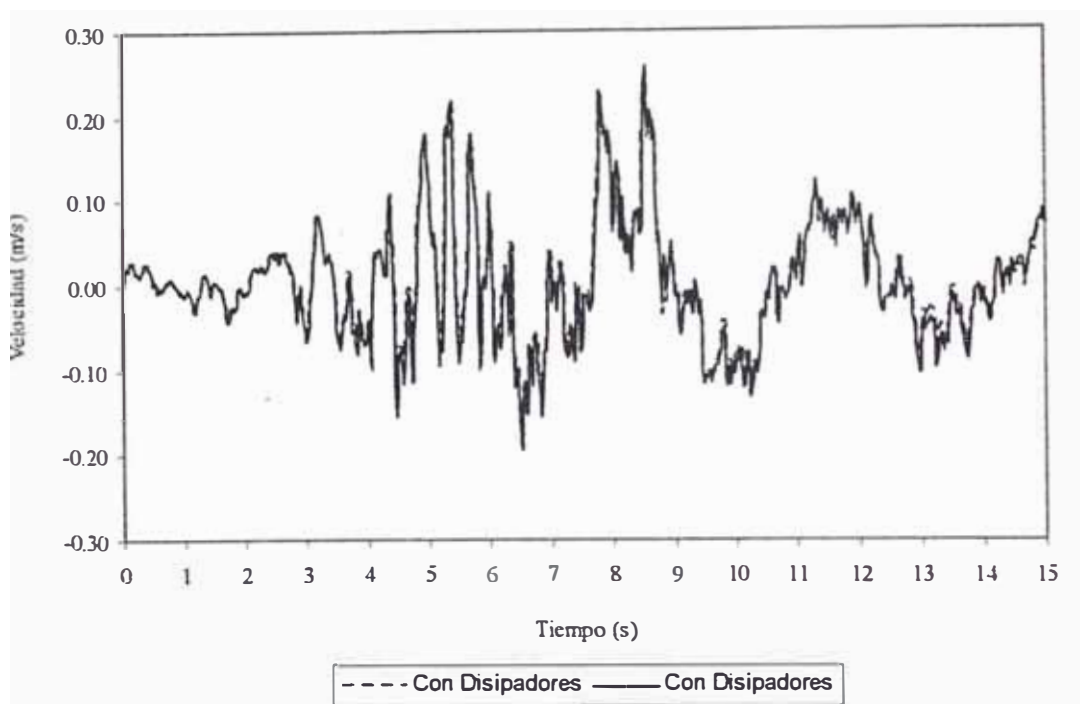


Figura 5.49 Respuesta tiempo historia a 400 gals
Nivel 10 – eje X

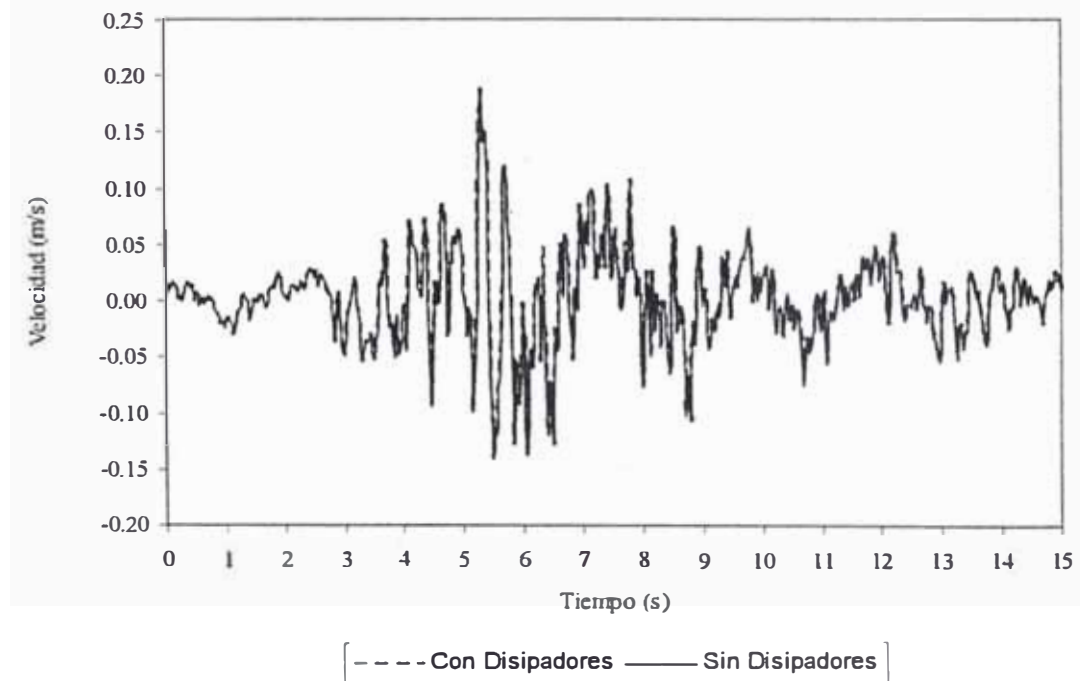


Figura 5.50 Respuesta tiempo historia a 400 gals
Nivel 10 – eje Y

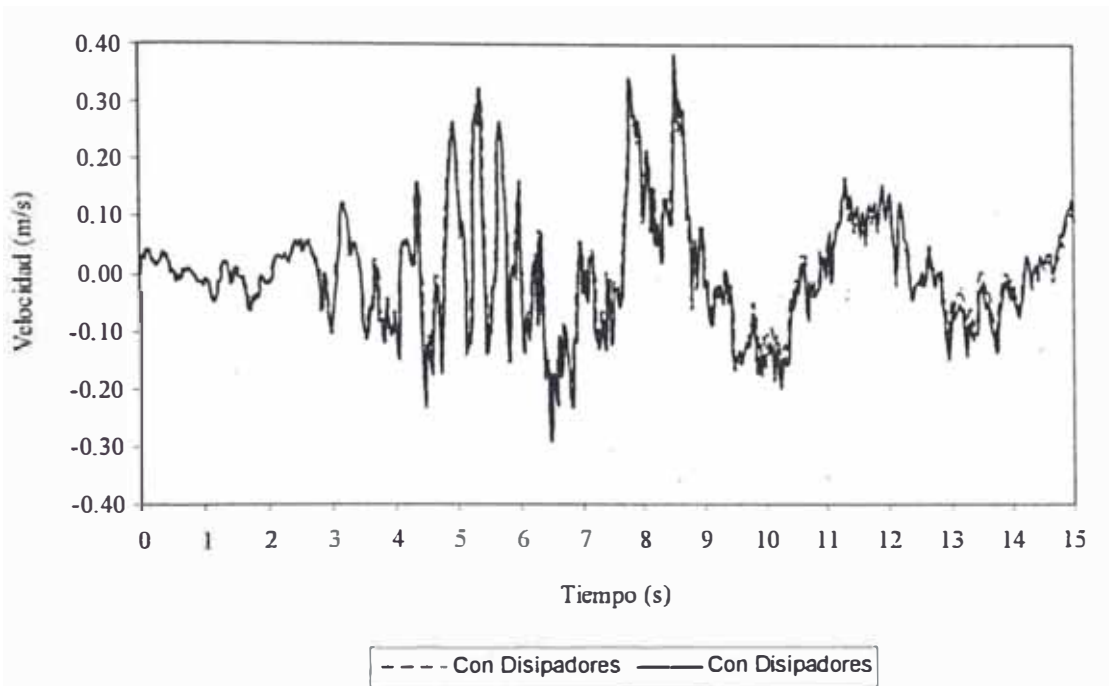


Figura 5.51 Respuesta tiempo historia a 600 gals
Nivel 10 – eje X

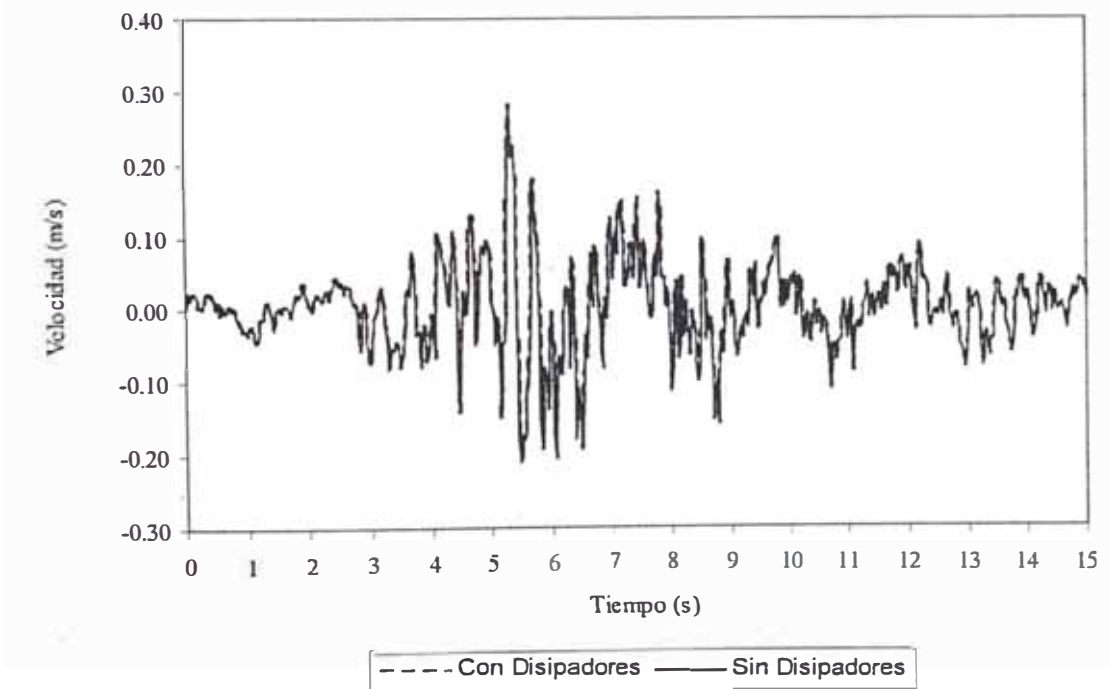


Figura 5.52 Respuesta tiempo historia a 600 gals
Nivel 10 – eje Y

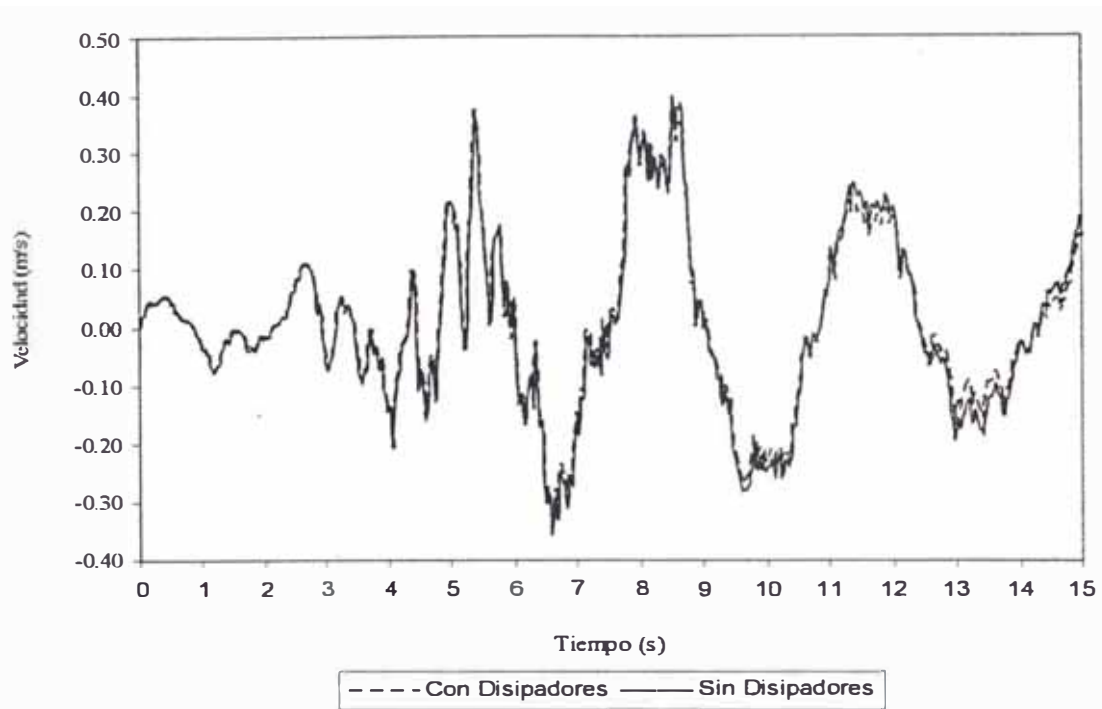


Figura 5.53 Respuesta tiempo historia a 400 gals
Nivel 20 – eje X

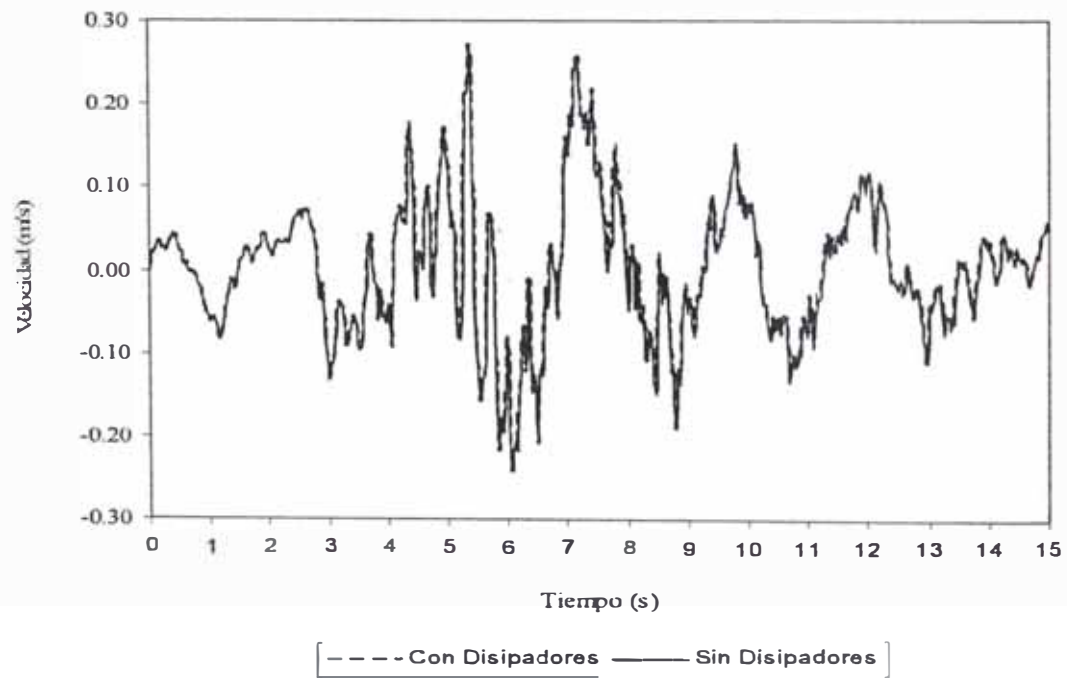


Figura 5.54 Respuesta tiempo historia a 400 gals
Nivel 20 – eje Y

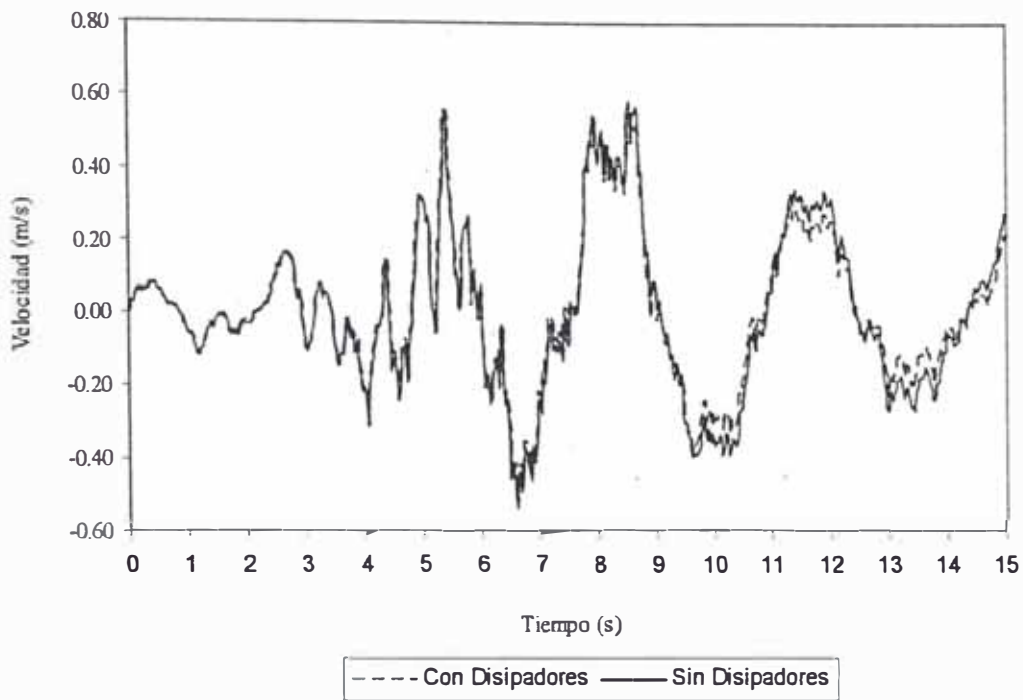


Figura 5.55 Respuesta tiempo historia a 600 gals
Nivel 20 – eje X

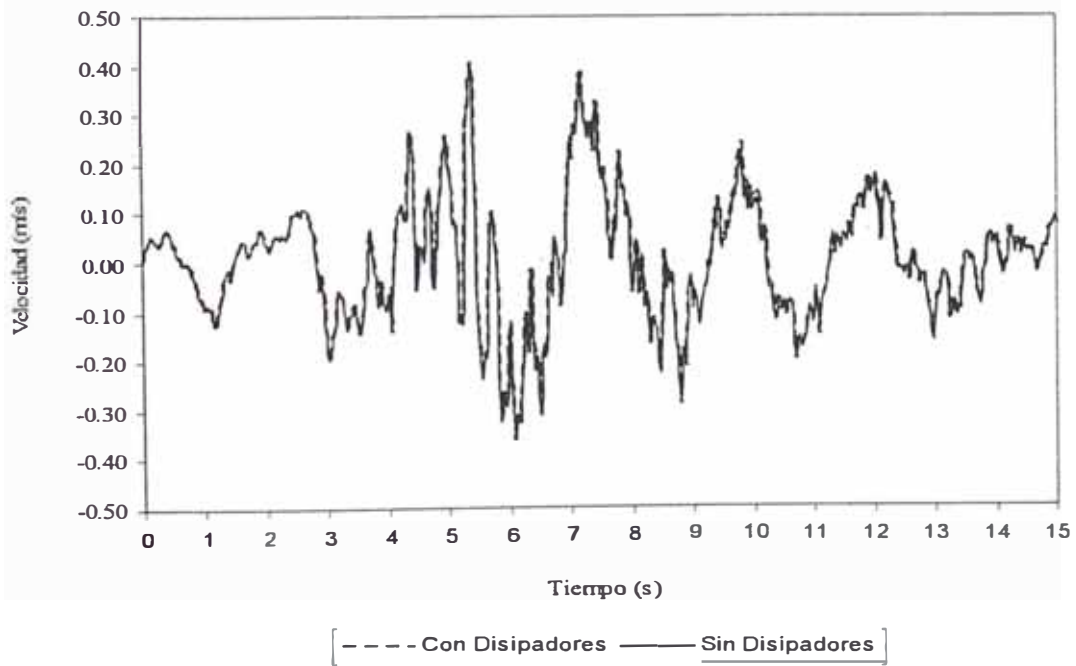


Figura 5.56 Respuesta tiempo historia a 600 gals
Nivel 20 – eje Y

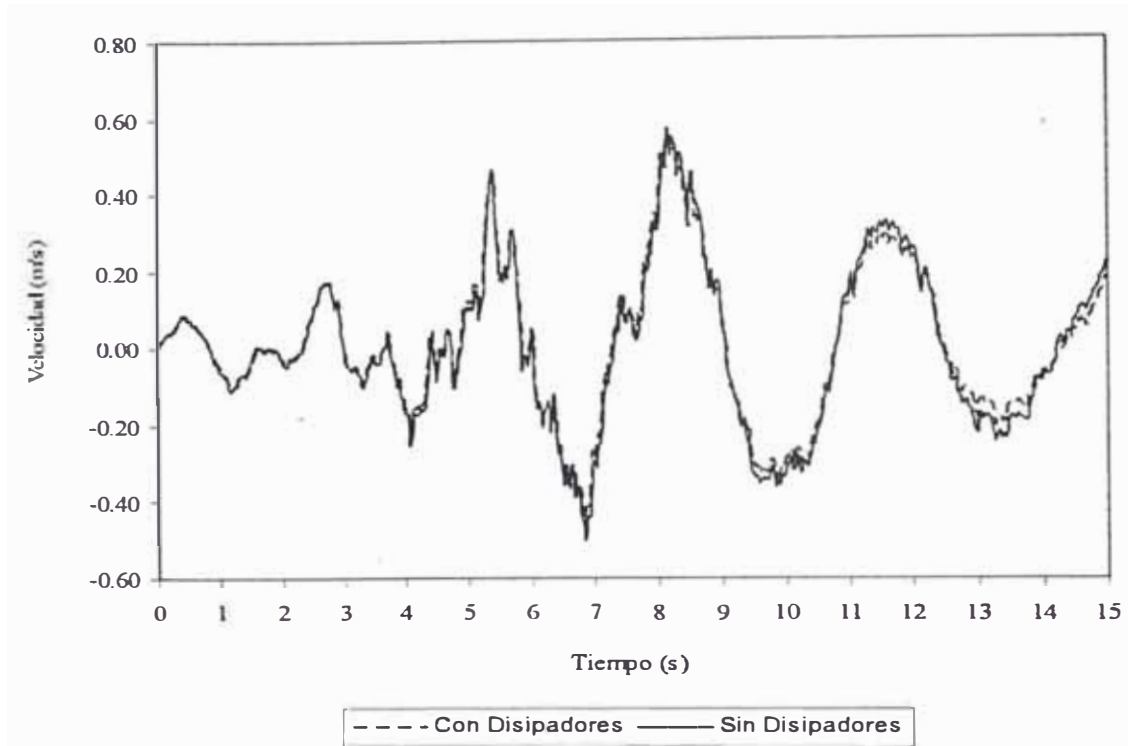


Figura 5.57 Respuesta tiempo historia a 400 gals
Nivel 30 – eje X

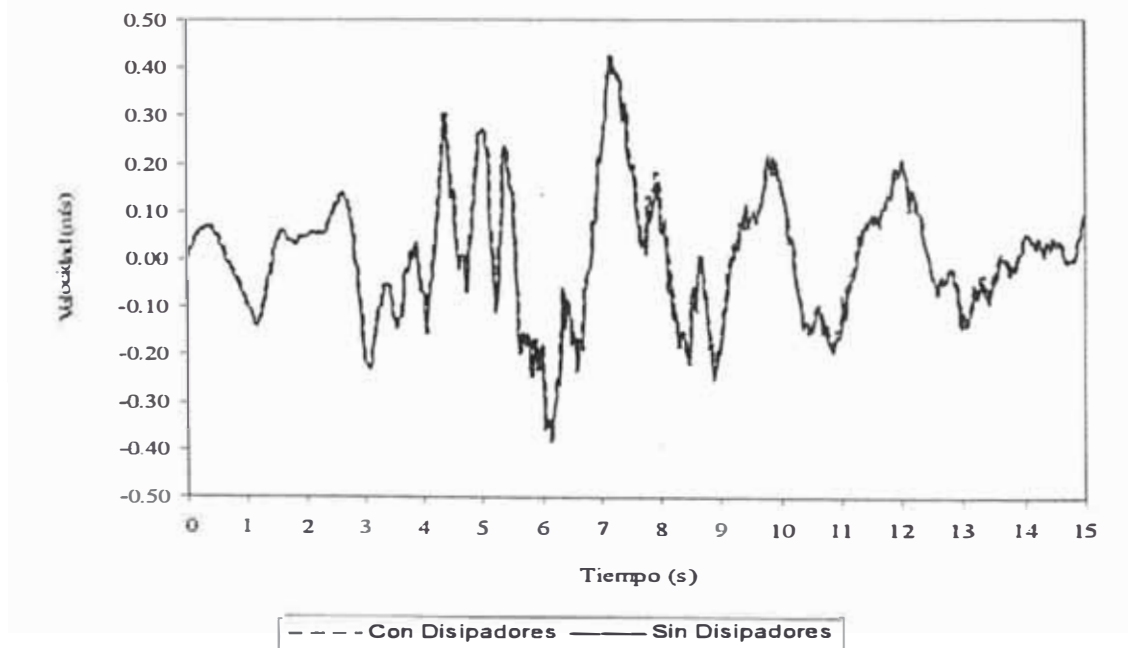


Figura 5.58 Respuesta tiempo historia a 400 gals
Nivel 30 – eje Y

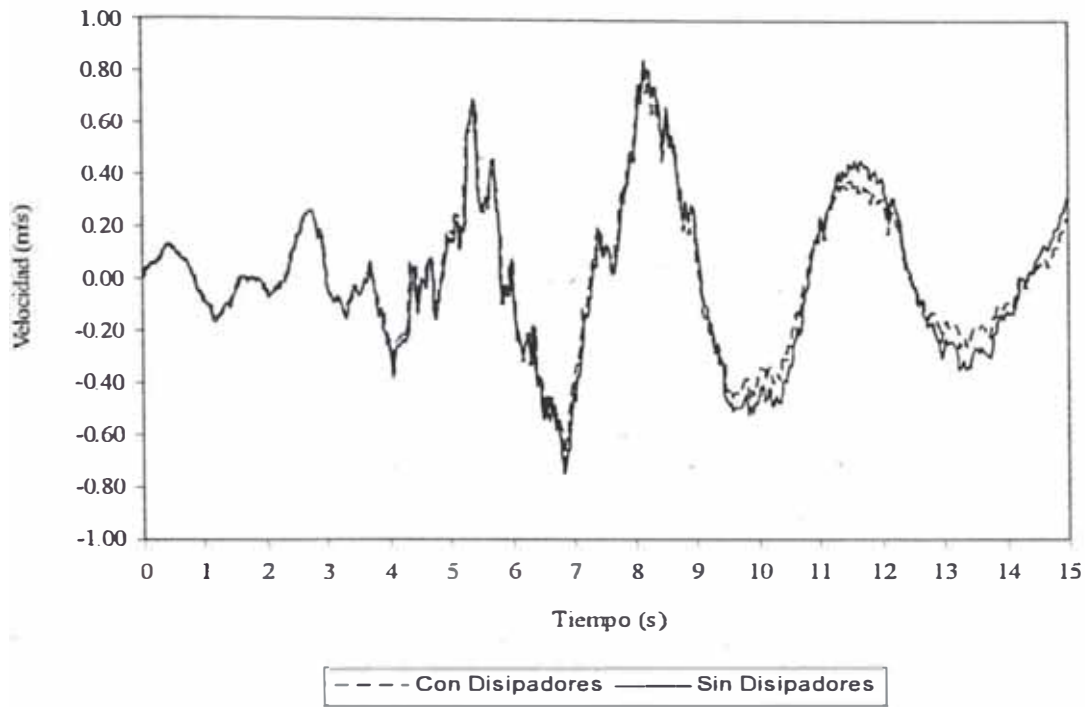


Figura 5.59 Respuesta tiempo historia a 600 gals
Nivel 30 – eje X

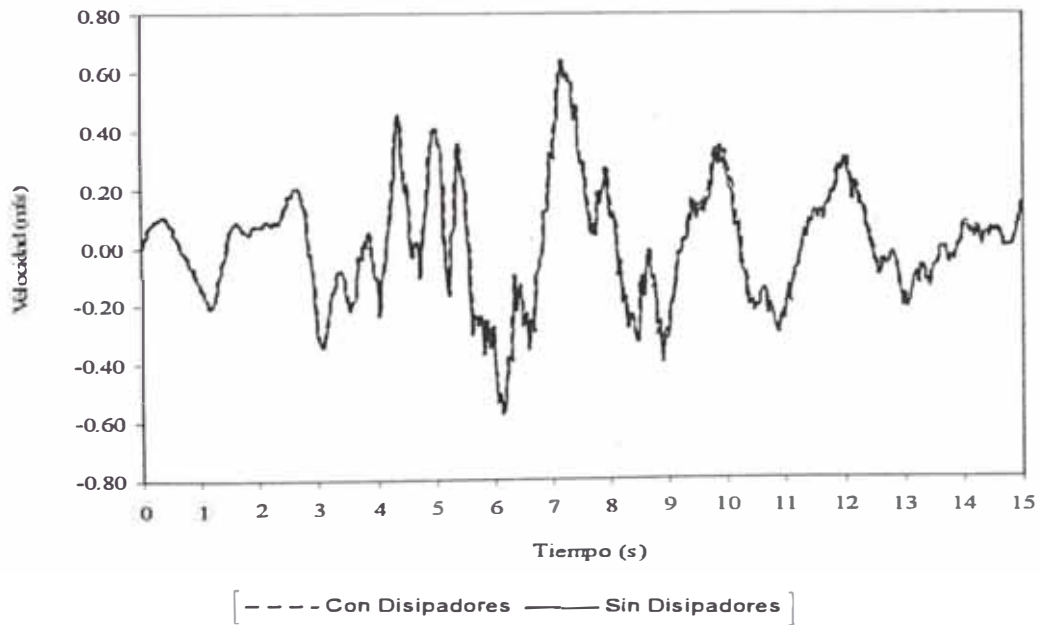


Figura 5.60 Respuesta tiempo historia a 600 gals
Nivel 30 – eje Y

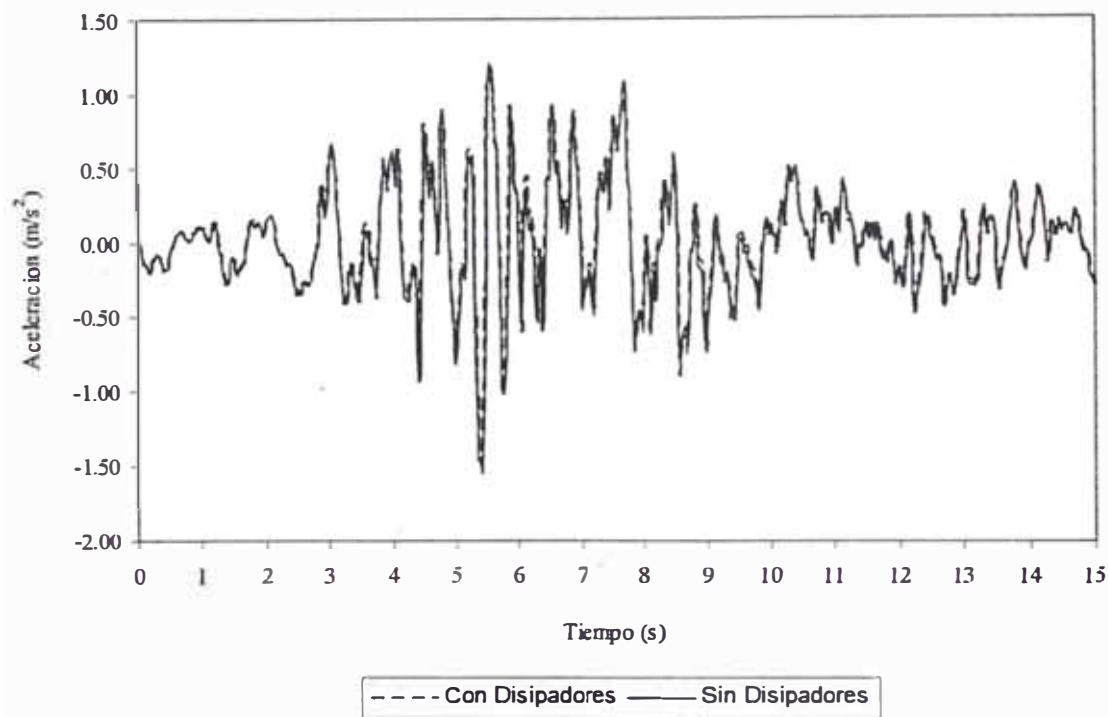


Figura 5.61 Respuesta tiempo historia a 400 gals
Nivel 10 – eje X

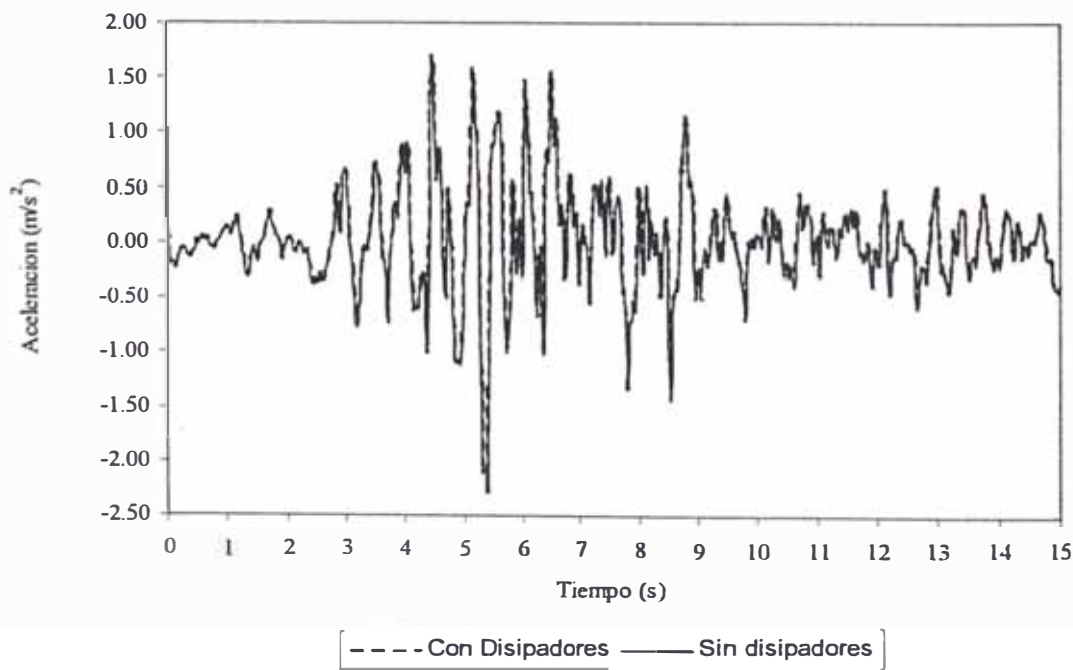


Figura 5.62 Respuesta tiempo historia a 400 gals
Nivel 10 – eje Y

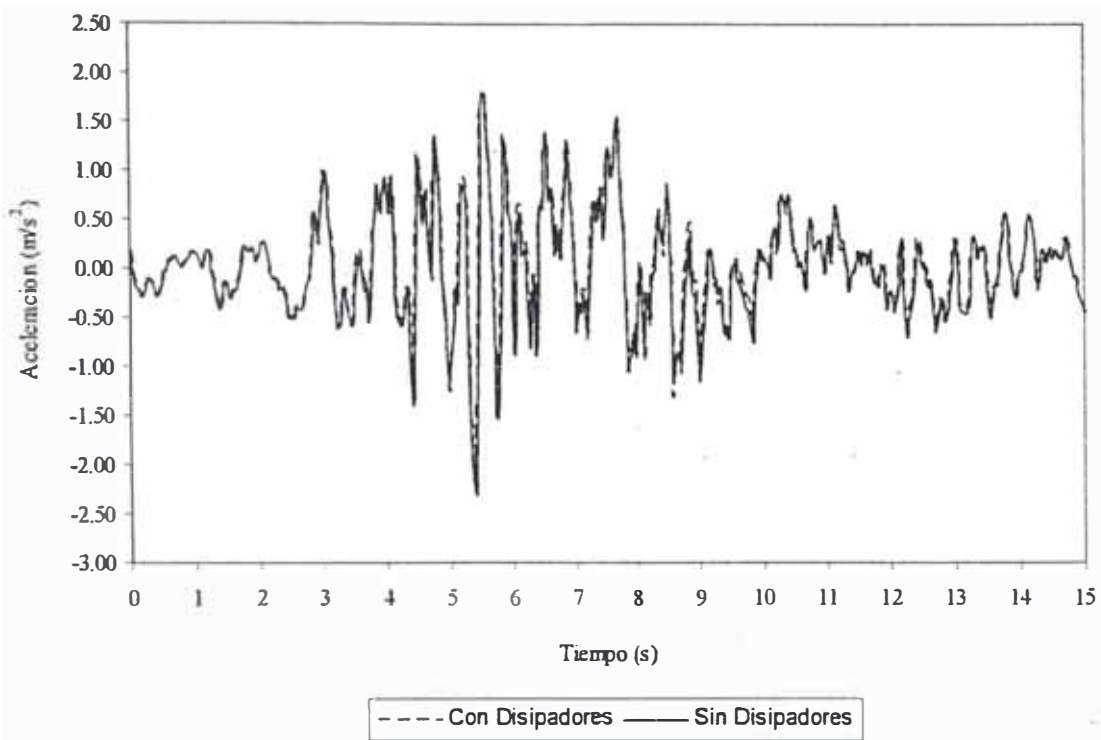


Figura 5.63 Respuesta tiempo historia a 600 gals
Nivel 10 – eje X

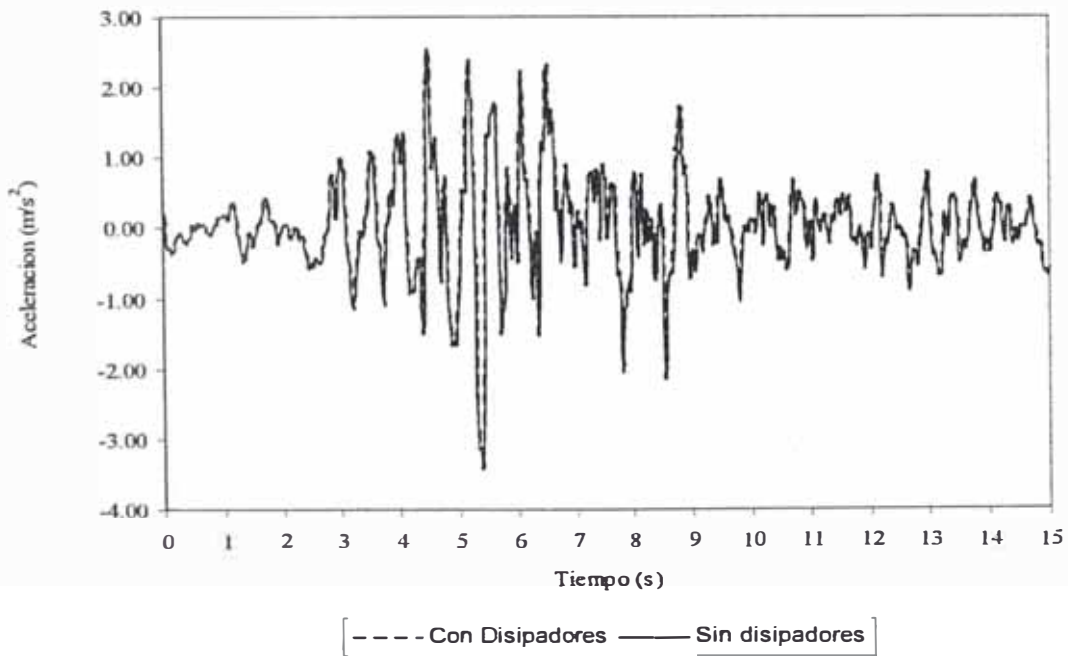


Figura 5.64 Respuesta tiempo historia a 600 gals
Nivel 10 – eje Y

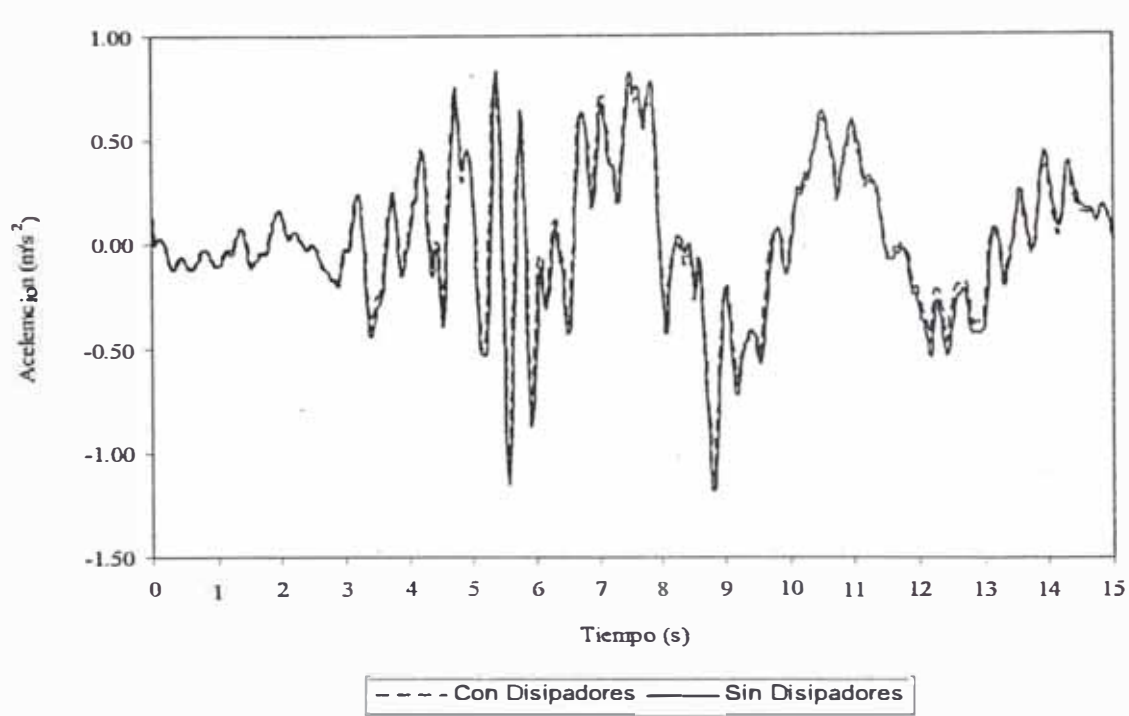


Figura 5.65 Respuesta tiempo historia a 400 gals
Nivel 20 – eje X

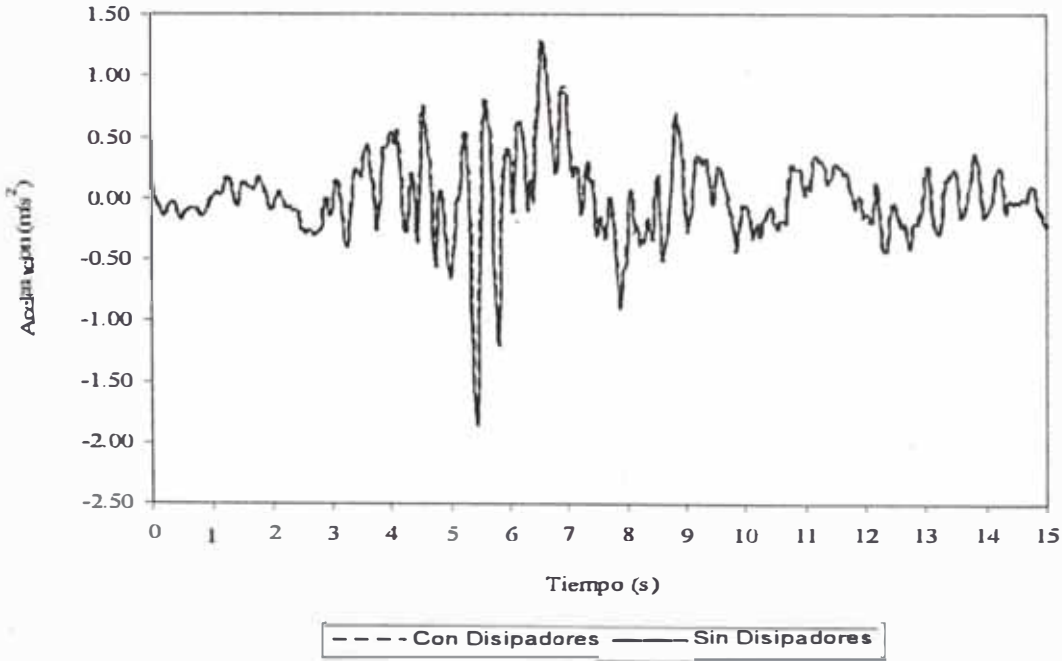


Figura 5.66 Respuesta tiempo historia a 400 gals
Nivel 40 – eje Y

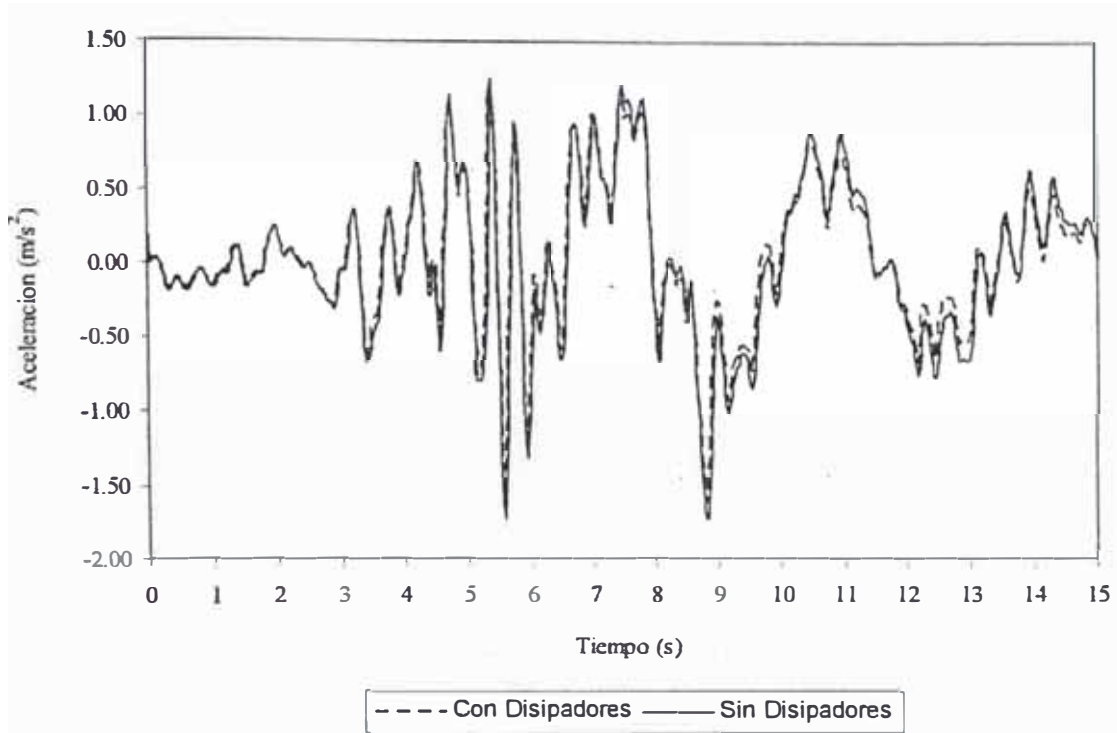


Figura 5.67 Respuesta tiempo historia a 600 gals
Nivel 20 – eje X

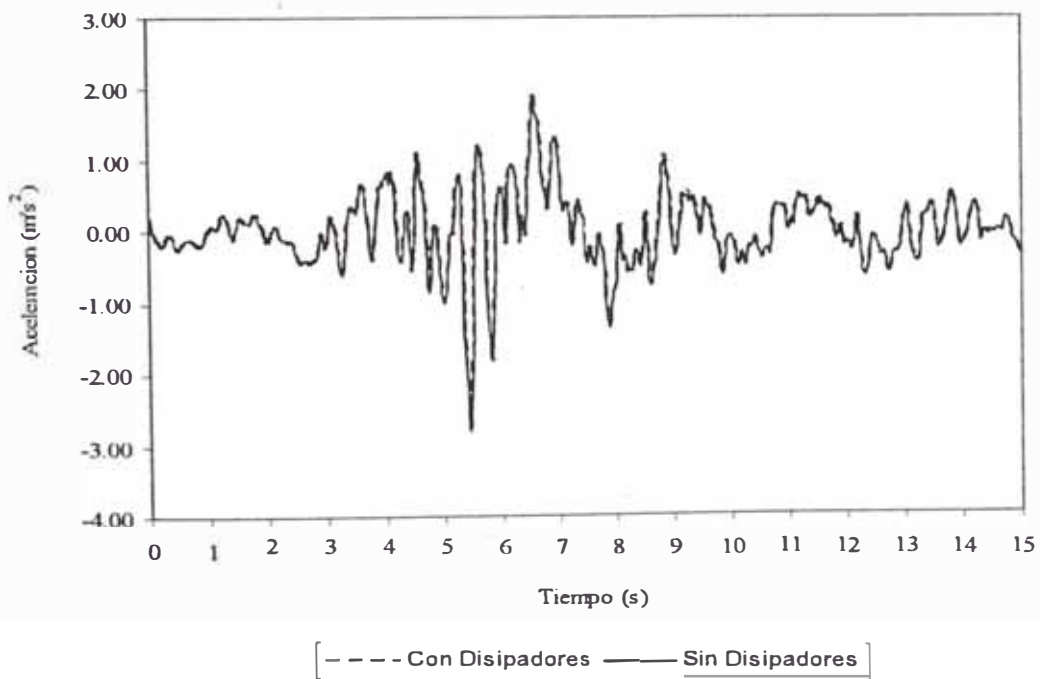


Figura 5.68 Respuesta tiempo historia a 600 gals
Nivel 20 – eje Y

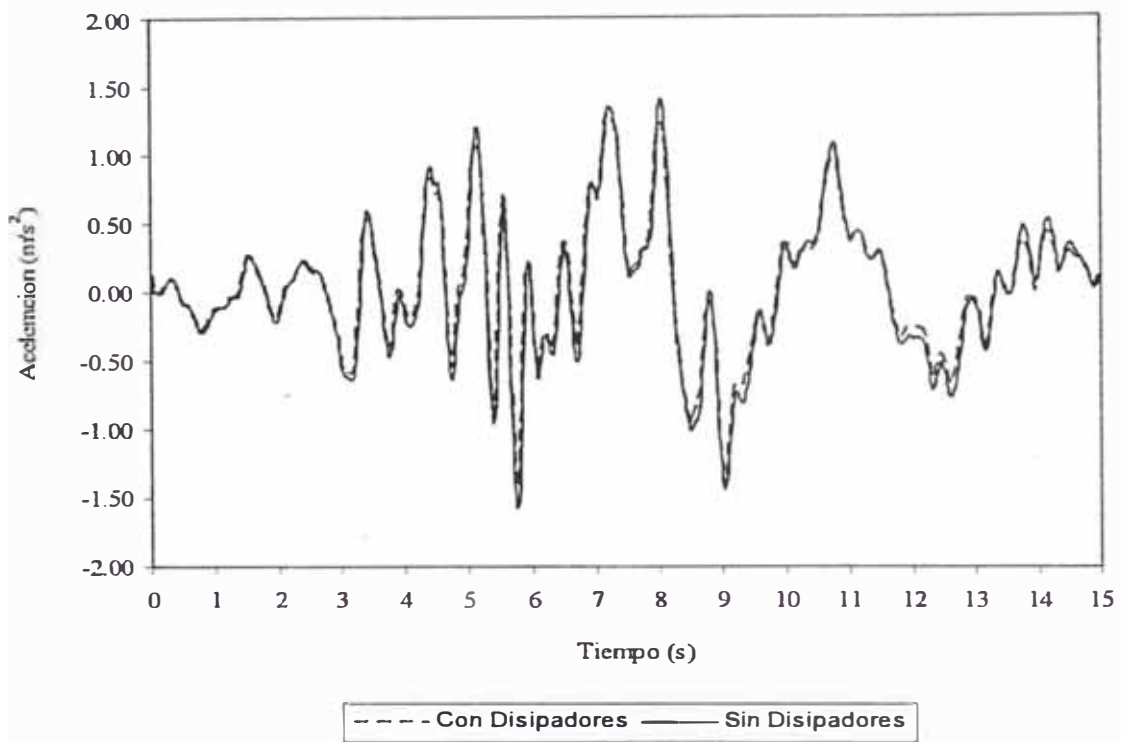


Figura 5.69 Respuesta tiempo historia a 400 gals
Nivel 30 – eje X

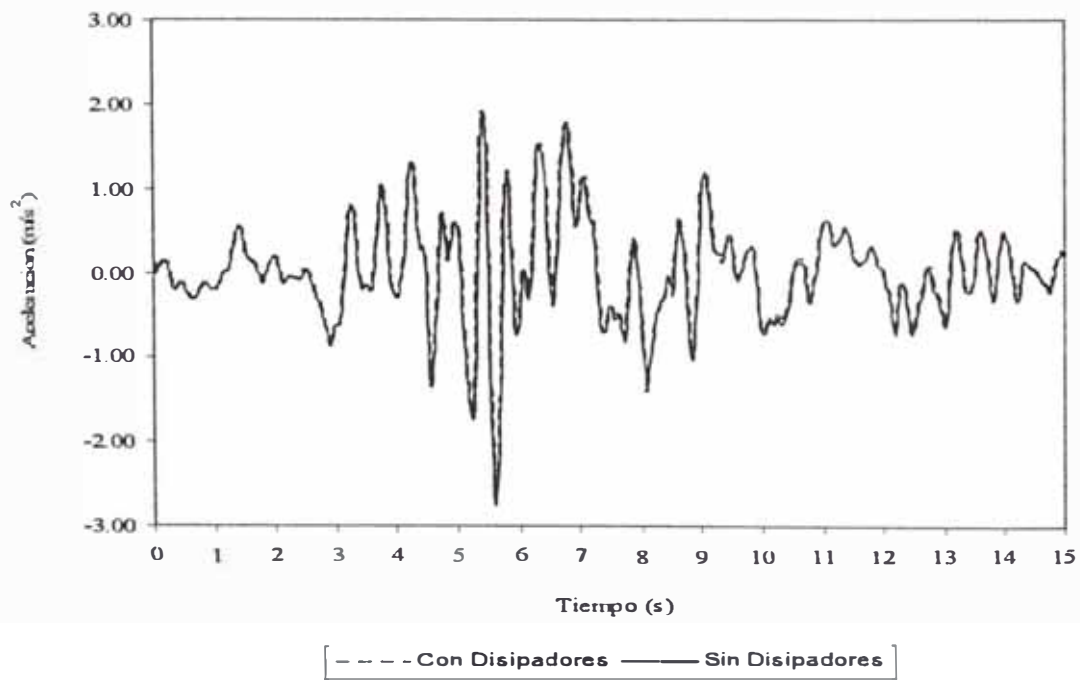


Figura 5.70 Respuesta tiempo historia a 400 gals
Nivel 30 – eje Y

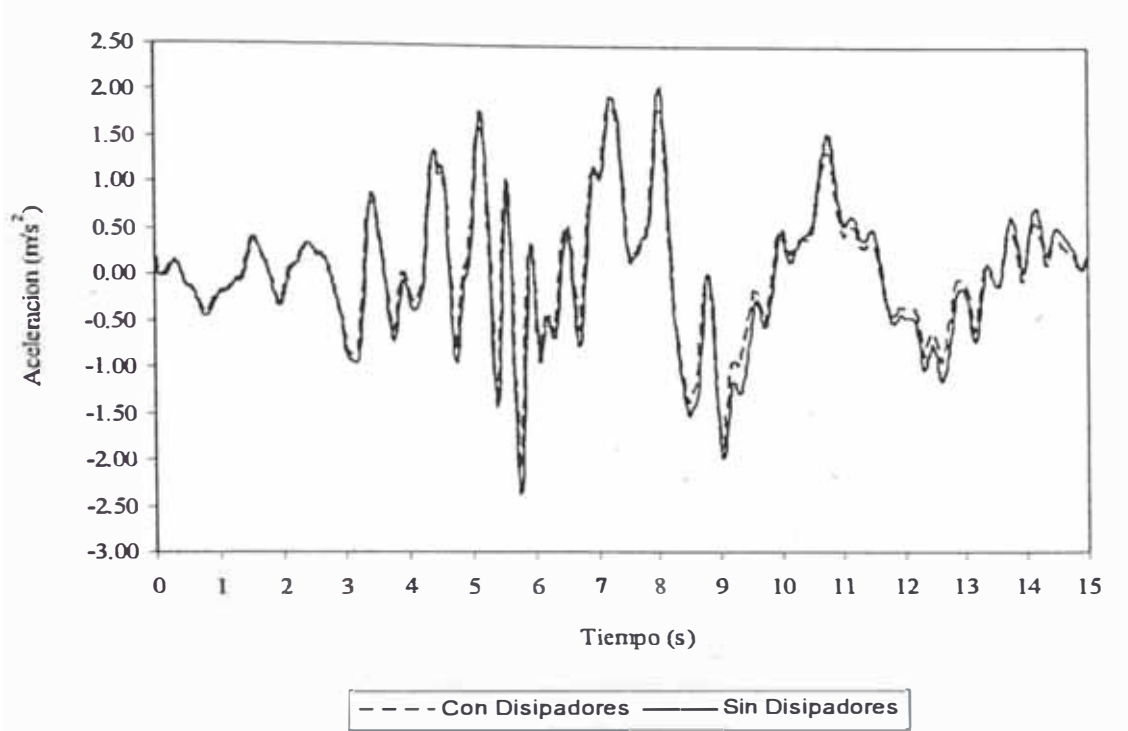


Figura 5.71 Respuesta tiempo historia a 600 gals
Nivel 30 – eje X

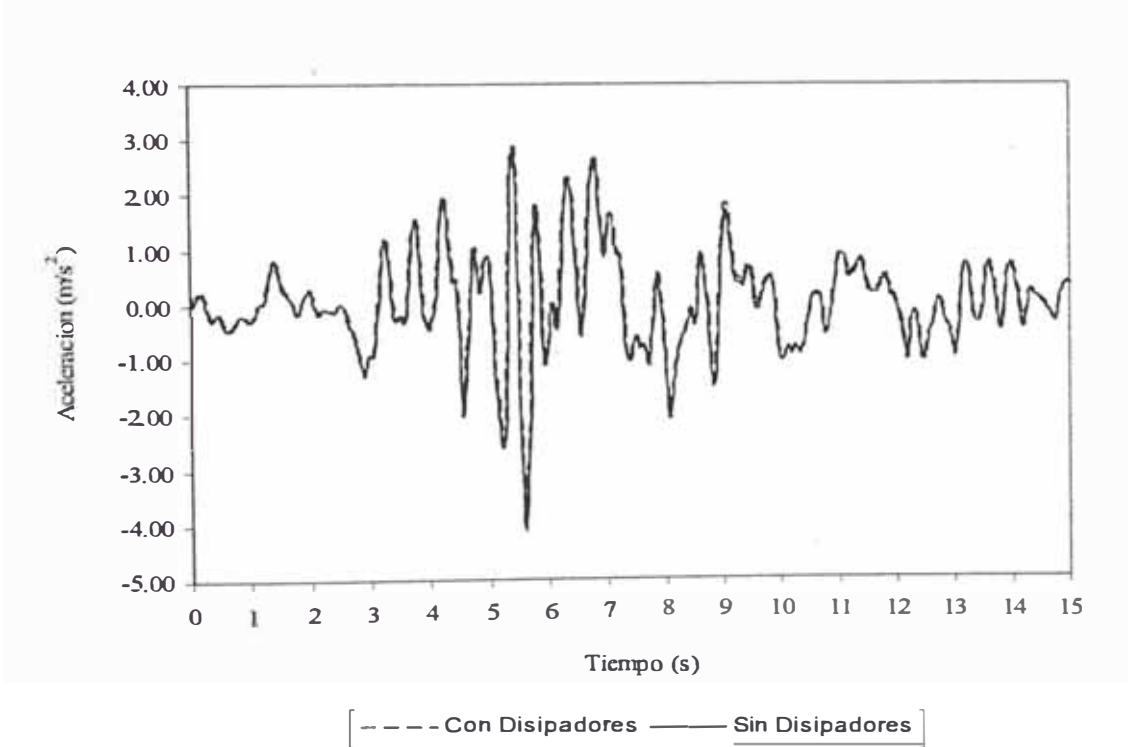


Figura 5.72 Respuesta tiempo historia a 600 gals
Nivel 30 – eje Y

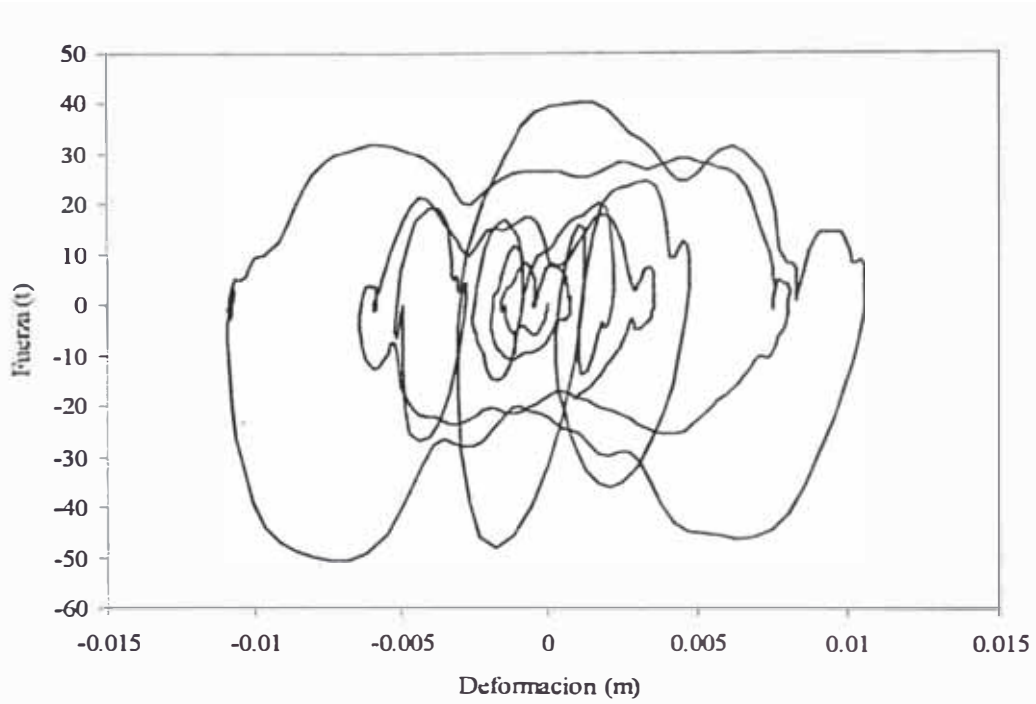


Figura 5.73 Comportamiento del disipador
Acel.= 400.00 gals - nivel 10 - eje X

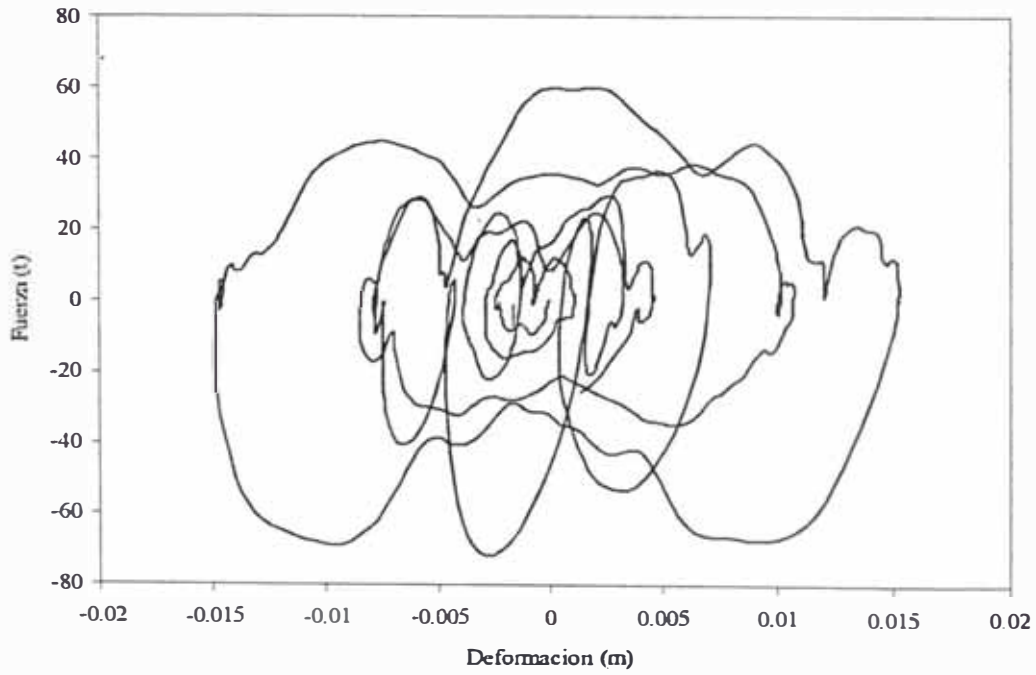


Figura 5.74 Comportamiento del disipador
Acel.= 600.00 gals - nivel 10 - eje X

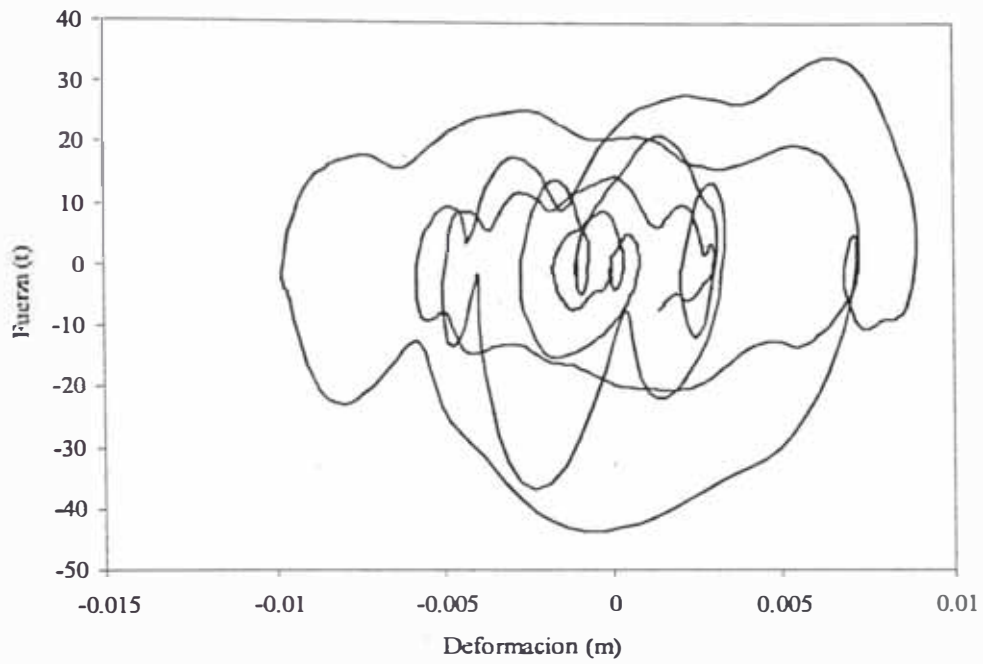


Figura 5.75 Comportamiento del disipador
Acel.= 400.00 gals - nivel 20 - eje X

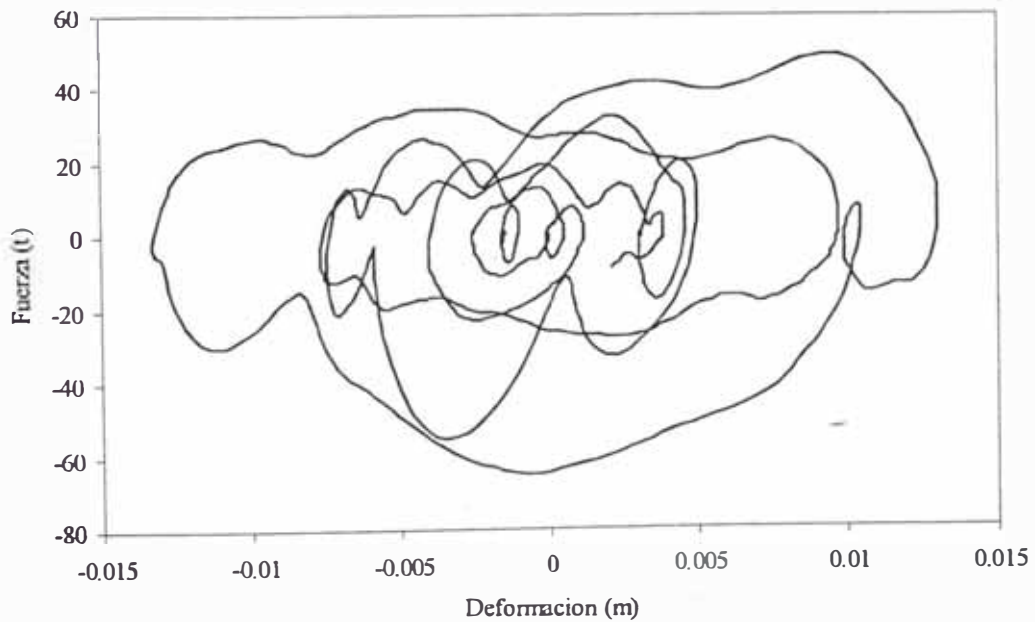


Figura 5.76 Comportamiento del disipador
Acel.= 600.00 gals - nivel 20 - eje X

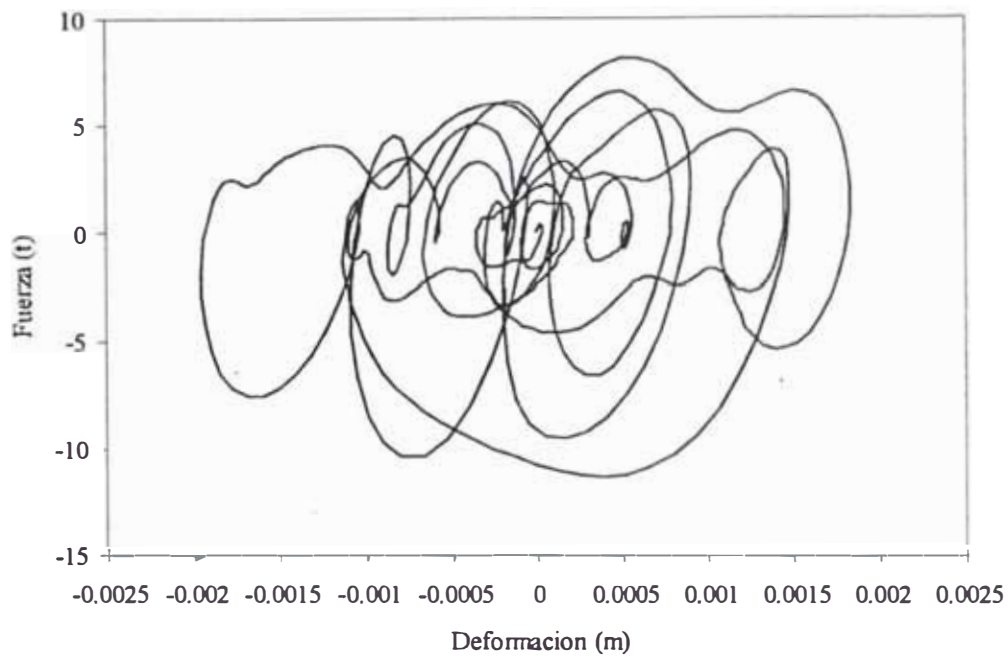


Figura 5.77 Comportamiento del disipador
Acel.= 400.00 gals - nivel 30 - eje X

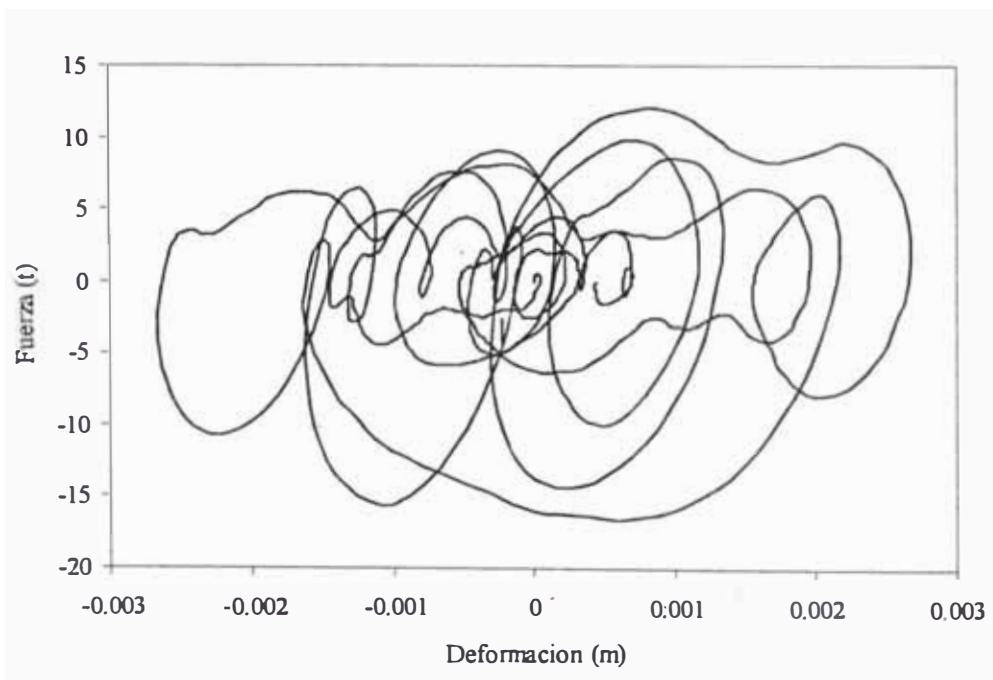


Figura 5.78 Comportamiento del disipador
Acel.= 600.00 gals - nivel 30 - eje X

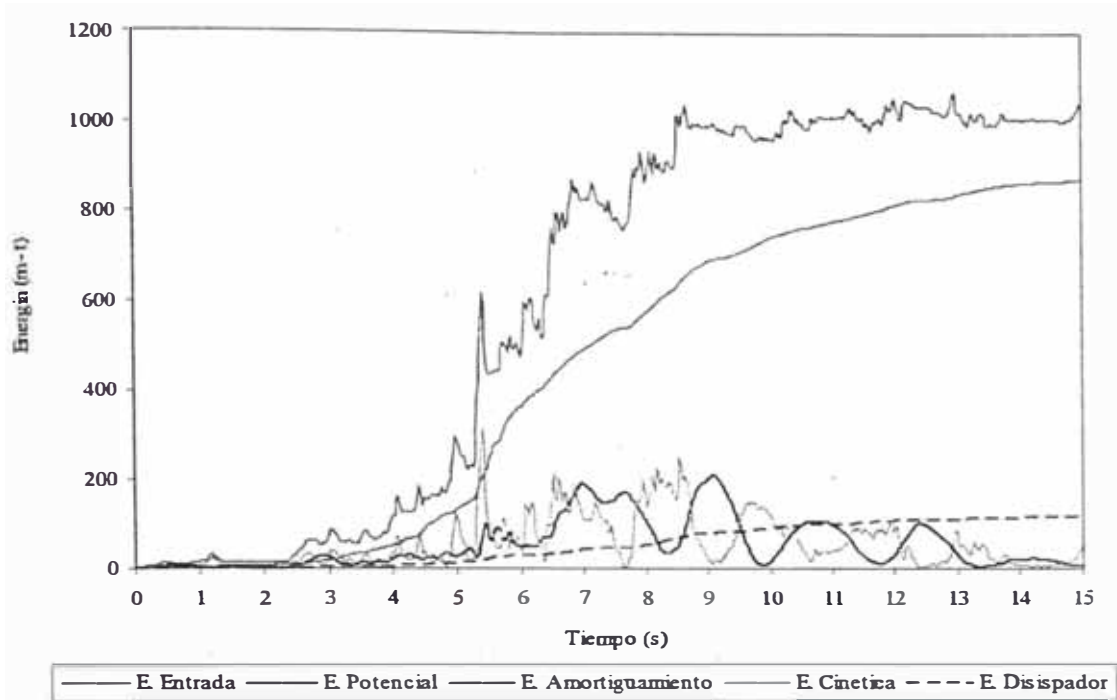


Figura 5.79 Balance energético
Acel. = 400.00 gals

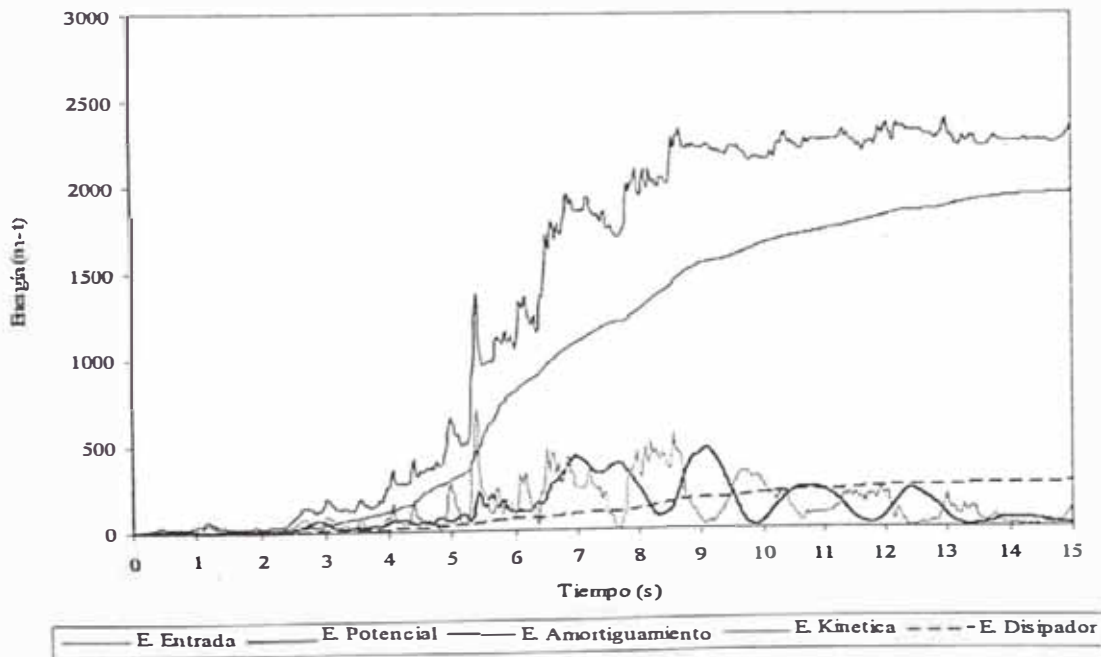


Figura 5.80 Balance energético
Acel. = 600.00 gals

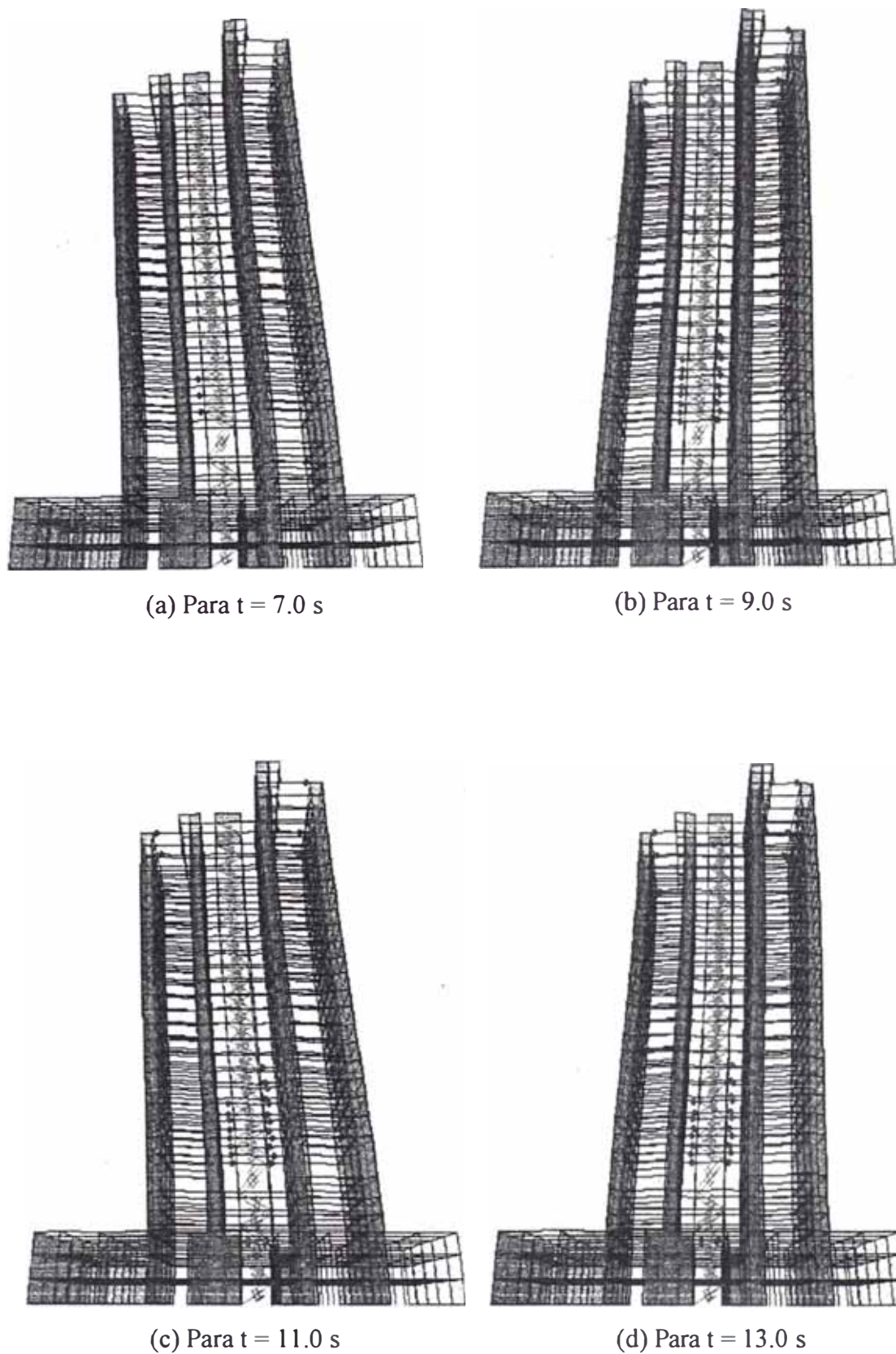


Figura 5.81 Mecanismo de formación de rótulas plásticas
Sismo 17/10/66. Acel. = 400.00 gals

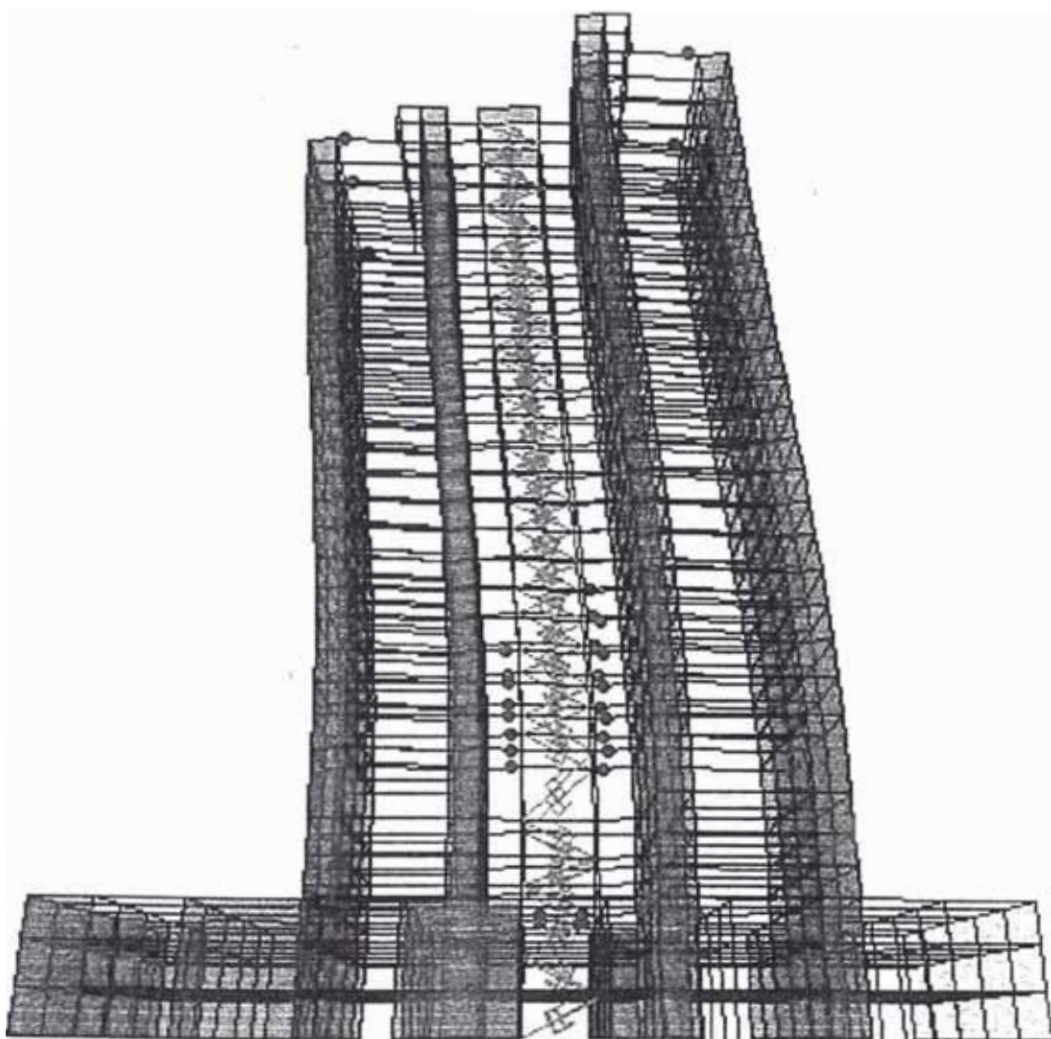


Figura 5.82 Total de Rótulas plásticas formadas ($t = 15.0$ s)
Sismo 17/10/66. Acel. = 400.00 gals

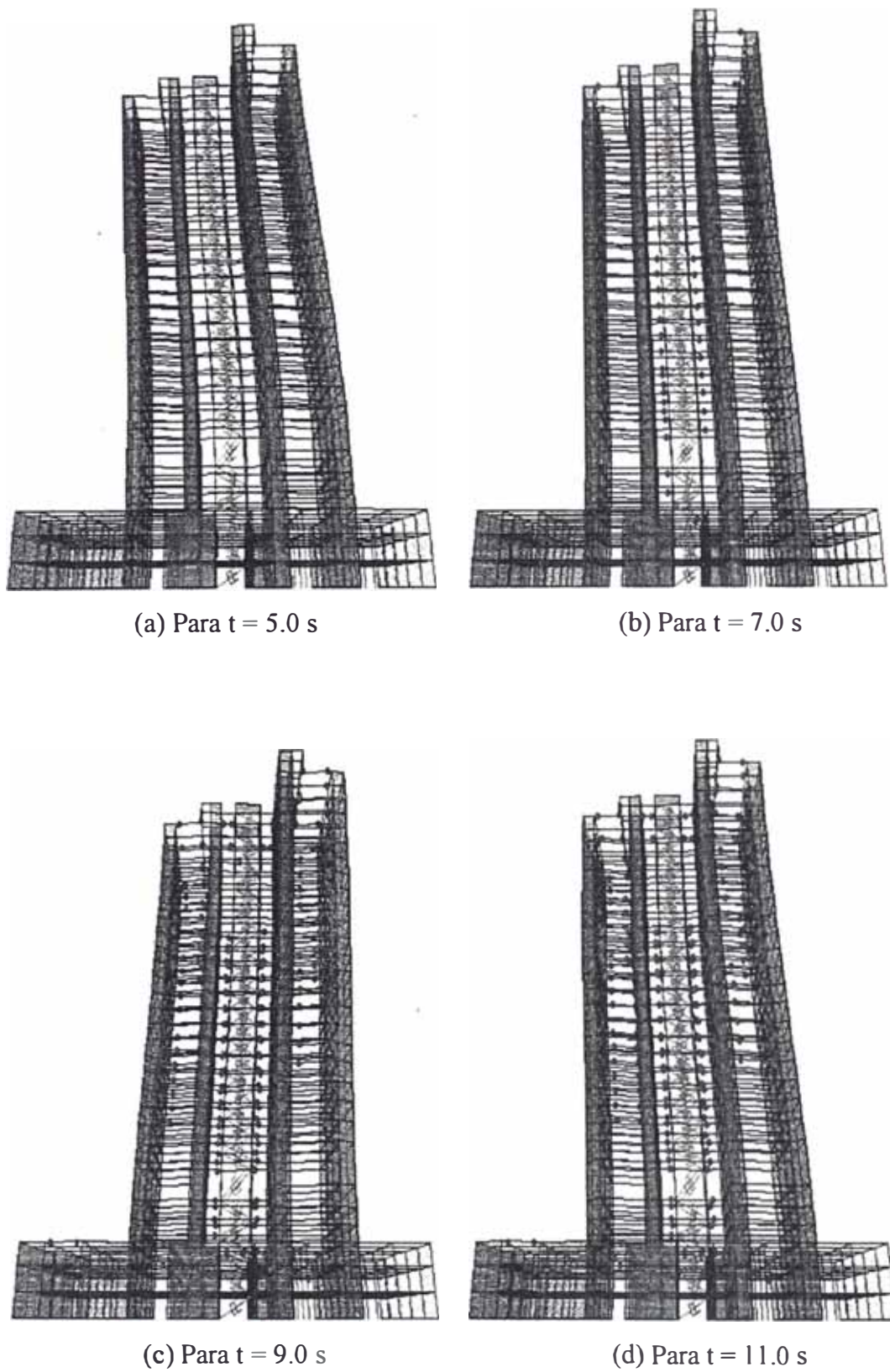


Figura 5.83 Mecanismo de formación de rótulas plásticas
Sismo 17/10/66. Acel. = 600.00 gals

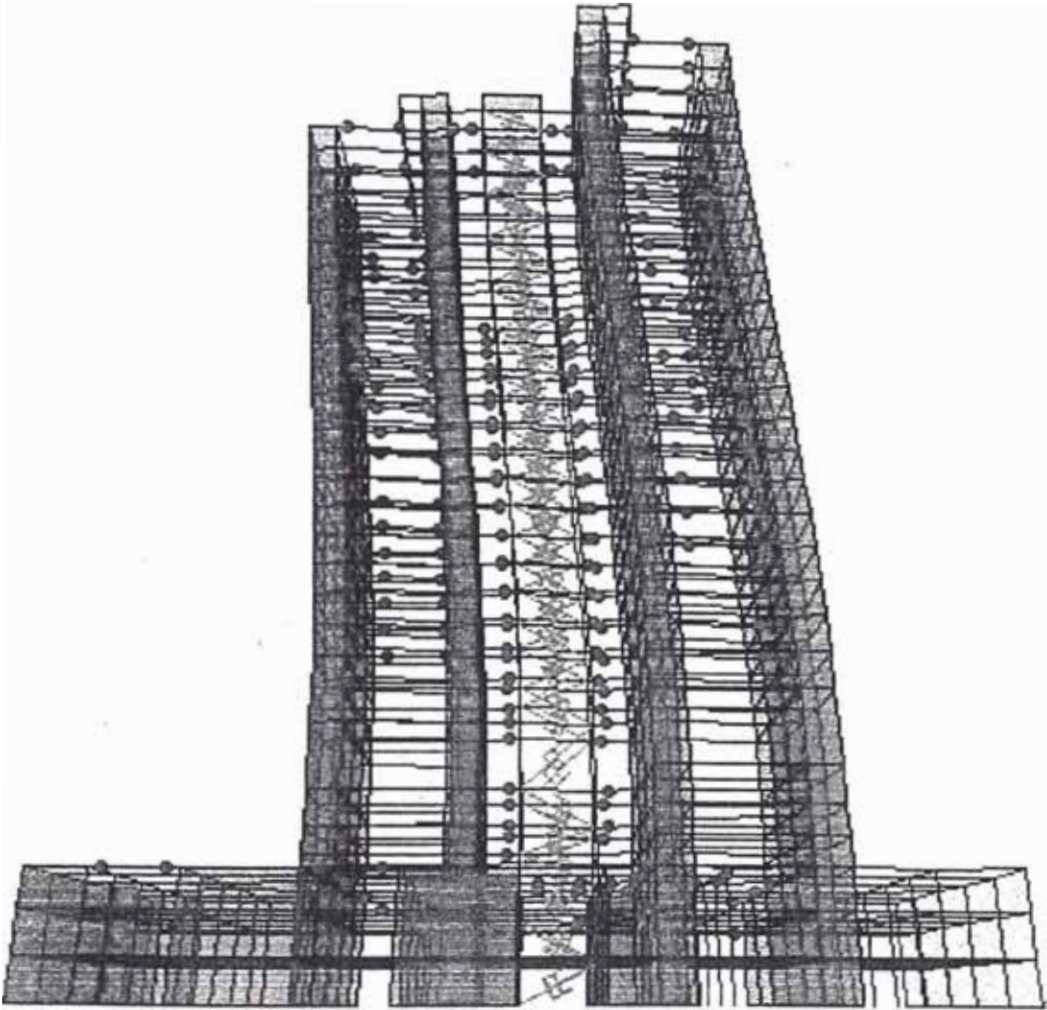


Figura 5.84 Total de Rótulas plásticas formadas ($t = 15.0$ s)
Sismo 17/10/66. Acel. = 600.00 gals

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

6.1.1 Referente al análisis dinámico

Después de comparar la respuesta dinámica considerando el registro parcial y total, se ha podido observar que ambas respuestas son similares. En todos los niveles no se presenta mayor diferencia en la respuesta. Existiendo una pequeña variación en los niveles intermedios en el sentido Y del edificio.

El utilizar un registro parcial de 15 segundos de duración frente a un registro parcial de una menor duración nos brinda la posibilidad de considerar todas las aceleraciones más importantes y por ende las frecuencias predominantes del registro considerado.

La realización de un análisis inelástico tridimensional nos da una mayor aproximación al comportamiento real de la estructura ante un evento sísmico. La respuesta tiempo historia en cada nivel de la estructura varía con respecto al tiempo. Los esfuerzos en los elementos varían respecto al tiempo lo cual permite formar el mecanismo de formación de rótulas plásticas del sistema.

6.1.2 Referente al mecanismo de formación de rótulas plásticas

Se ha podido observar que las rótulas plásticas se forman predominantemente en las vigas. Lo cual es adecuado si se tiene en consideración que se debe evitar el mecanismo de colapso de columna.

Según los resultados obtenidos se puede afirmar que para los niveles de aceleración utilizados la estructura desarrolla un mecanismo estable. La estructura no colapsaría ante sismos severos.

El mecanismo de formación de las rótulas plásticas nos permite conocer las zonas más vulnerables de la estructura y donde se debería poner mayor énfasis en el proceso de diseño o posible incorporación de mecanismos disipadores.

6.1.3 Referente al comportamiento con disipadores de energía

Se demuestra una modificación en el comportamiento estructural del edificio con los disipadores de energía. Siendo mayor a los 600 gals de aceleración. Una cantidad de energía de entrada es disipada por la acción de los disipadores de energía y otra por el amortiguando de la estructura.

La disipación de energía inelástica representa daño estructural, es impredecible y necesita un detallado especial para asegurar un buen comportamiento. Las estructuras con disipadores de energía son diseñados directamente para la disipación de energía y tiene una más alta confiabilidad en el control de daños.

Las excesivas distorsiones producen esfuerzos importantes en los elementos los cuales pueden ser reducidos con los disipadores de energía. Se concluye que no solo las distorsiones se deben verificar en el diseño, también se debe de tener en consideración la acción inelástica en la estructura.

Los sistemas disipativos friccionantes, por fluencia del acero y visco elásticos inducen fuerzas axiales adicionales a las columnas, debido a que ocurren en fase con las deformaciones pico. Esto no ocurre con los dispositivos disipadores de energía de fluido viscoso.

Los disipadores de energía adicionados al edificio disminuyen los cortantes, desplazamientos, distorsiones, velocidades y aceleraciones en altura en relación al nivel de amortiguamiento diseñado y al nivel de aceleración al que ha sido sometido la estructura.

Los disipadores de energía de fluido viscoso no afectan los periodos de los modos principales de la estructura.

Con el empleo de los dispositivos disipadores de energía se provee una limitación de la deformación plástica del sistema estructural, lo cual provee una reducción en la incertidumbre del comportamiento.

Para estructuras altas no se deben considerar niveles de amortiguamiento mayores al 15% con la ayuda de los disipadores de energía. Esto debido a que a mayores porcentajes de amortiguamiento no se obtienen disminuciones considerables en el desempeño de la estructura; además, los costos de los disipadores de energía aumentarían considerablemente.

6.2 RECOMENDACIONES

Se hace necesaria realizar estudios con una mayor cantidad de registros sísmicos y otros tipos de estructuras, para obtener una idea mas precisa del comportamiento de estructuras con disipadores de energía.

El amortiguamiento suplementario en las estructuras, es un método efectivo que es recomendable su utilización para resistir las fuerzas sísmicas en estructuras. El autor cree que los disipadores de energía será una de las principales soluciones para la protección sísmica de estructuras en el presente siglo.

Se recomienda estudios en el uso de los disipadores de energía en puentes para el mejoramiento de su comportamiento bajo cargas dinámicas. La introducción de amortiguamiento en el sistema reduce las fuerzas y los desplazamientos, esto podría resultar en conexiones más simples y costos más bajos de construcción.

Se recomienda realizar investigaciones con otros tipos de disipadores de energía, tales como los viscoelásticos, por fricción, por fluencia de metales, etc. Con la finalidad de tener un mejor conocimiento de su desempeño, ventajas y posibilidades de aplicación es el diseño sismorresistente de estructuras.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

01. AIKEN, I. 1998. "*Testing of Seismic Isolators and Dampers Considerations and Limitations*", Proceedings, Structural Engineering World Congress, San Francisco, California. USA.
02. AIKEN, I., DOUGLAS, K., NIMS, K., WITTAKER, A., and KELLY, J. 1993. "*Testing of Passive Energy Dissipation Systems*", Earthquake Spectra, Vol.9, N. 03. Earthquake Engineering Research Institute California. USA.
03. APPLIED TECHNOLOGY COUNCIL, 1996. "*Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings*", ATC40, Report N. SSC 96-01. Redwood City, California. USA.
04. BOZZO, L. 2002. "*Análisis y Diseño de Estructuras Equipadas con Disipadores de Energía SL*", Artículo Publicado por el Instituto de la Construcción y Gerencia. Perú.
05. BOZZO, L. y ORDOÑEZ, D. 2001. "*Disipadores Mecánicos de Energía*", Investigaciones Publicadas por la Revista Bit. España.
06. BOZZO, M. AND BARBAT, H. 2002. "*Diseño Sismorresistente de Estructuras*", Fondo Editorial del Instituto de la Construcción y Gerencia. Lima - Perú.
07. BROCKENBROUGH, R. and MERRITT, F. 1997. "*Manual de Diseño de Estructuras de Acero*", Segunda Edición, McGraw-Hill Interamericana. Colombia.
08. BUCKLE, I. 2000. "*Passive Control of Structures for Seismic Loads*", 12th World Conference on Earthquake Engineering. Auckland. New Zealand.
09. BUTTERWORTH, J. 1999. "*Seismic Damage Limitation in Steel Frames Using Friction Energy Dissipators*", 6th International Conference on Steel & Space Structures. Singapur.
10. CAHIS, X. 2000. "*Desarrollo de un Nuevo Disipador de Energía para Diseño Sismorresistente. Análisis Numérico y Validación Experimental de su Comportamiento*", Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona. España.
11. CHANG, S., and MAKRIS, N. 2000. "*Effect of Various Energy Dissipation Mechanisms in Suppressing Structural Response*", 12th World Conference on Earthquake Engineering. Auckland. New Zealand.
12. COMINETTI, S., and CRUZ, E. 2000. "*Elastic and Inelastic Response of Three-Dimensional Buildings Models, a Comparison of Different Models for Analysis*", 12th World Conference on Earthquake Engineering. Auckland. New Zealand.

Bibliografía

13. COMPUTERS AND STRUCTURES, INC. 2002 “*SAP2000 Analysis Reference Manual*”, Computers and Structures, Inc. Berkeley, California, USA.
14. COMPUTERS AND STRUCTURES, INC. 2003 “*SAP2000 Version 8.2.7, A Computer Program for Linear and Nonlinear Static and Dynamic Analysis and Design of Three Dimensional Structures*”, Berkeley, California, USA.
15. COMPUTERS AND STRUCTURES, INC. 2003. “*SAP2000 Help*”, Computers and Structures, Inc. Berkeley, California, USA.
16. CONSTANTINOU, M., and SYMANS, M. 1993. “*Seismic Response of Structures with Supplemental Damping*”, Journal of Structural Design of Tall Buildings, Vol. 2, pp. 93-132. USA.
17. CONSTANTINOU, M., SYMANS, M., and TSOPELAS, P. 2002. “*Fluid Viscous Dampers in Applications of Seismic Energy Dissipation and Seismic Isolation*”, Proc. Of ATC-17-1 Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation, and Active Control, San Francisco, CA, pp. 584-591. USA.
18. DANNEMANN, R. 2001. “*Aisladores y Disipadores Sísmicos*”, Investigaciones Publicadas por la Revista Bit. España.
19. DE LA CRUZ, S., LOPEZ, F., BOZZO, L. y PUJADES, L. 2001 “*Estudio Paramétrico de la Eficacia de Disipadores Friccionales para Protección Antisísmica de Edificios*”, 2do Congreso Iberoamericano de Ingeniería Sísmica. España.
20. DE LA ROSA, A. 1999. “*Disipadores de Energía en Muros de Albañilería*”, Tesis de Maestría, Sección de Post Grado, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Ingeniería. Lima – Perú.
21. EDELSTEIN, R. 2002. “*Diseño Estructural, No Linealidad y Balance Energético*”, XVII Jornada Argentina de Ingeniería Estructural, Rosario – Santa Fe. Argentina.
22. ELSESSER, E., JOKERST, M., and NAASEH, S. 1997. “*Historic Upgrades in San Francisco*”, ASCE Civil Engineering Magazine, Volume 65, Reston, VA.USA.
23. FEMA. 1997. “*NEHRP Guidelines and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings*”, Reports N°. 273 and 274, October, Washington, D.C. USA.
24. GOEL, R. 2000. “*Passive Control of Earthquake-Induced Vibrations in Asymmetric Buildings*”, 12th World Conference on Earthquake Engineering. Auckland. New Zealand.
25. GOLDBAUM, E. 2000. “*UB Engineers Develop Unique Design to Seismically Modernize New Airport Terminal in Istanbul*”, News State University of New York, Department of Civil Engineering, University at Buffalo, NY, USA.

26. HANZAWA, T., SATO, T. AND TERADA, T. 2000. "*Proposal of Soft-Elastic Building Structure with High Capacity Damper*", 12th World Conference on Earthquake Engineering. Auckland. New Zealand.
27. HUSSAIN, S., LEE, D., and RETAMAL, E. 1994. "*Viscous Damping for Base Isolated Structures*", Saif Hussain & Associates, Woodland Hills, CA. USA.
28. HWANG, J. 2000. "*Seismic Design of Structures with Viscous Dampers*", International Training Programs for Seismic Design of buildings Structures Hosted by National Center for Research on Earthquake Engineering, Sponsored by Department of International Programs, National Science Council. Taiwan.
29. JARA, J., GAYALA, A., and MIRANDA, E. 2000. "*Seismic Behavior of Structures with Energy Dissipating Systems in Mexico*", 12th World Conference on Earthquake Engineering. Auckland. New Zealand.
30. JOKERST, M. 1995. "*State of the Art*", ASCE, Civil Engineering Magazine, Volume 67, Reston, VA. USA.
31. KELLY, T. 2001. "*In-Structure Damping and Energy Dissipation*", Design Guidelines Published by Holmes Consulting Group, Wellington. New Zealand.
32. KIM, D., KWON, H., and JEONG, M. 2000. "*An Experimental Study of the Dynamic Characteristics of Viscous Fluid Dampers for Base Isolated Buildings*", 12th World Conference on Earthquake Engineering. Auckland. New Zealand.
33. KLEMBEZYK, A., and MOSHER, M. 2001. "*Applications of Hermetically Sealed Fluid Dampers for Low Level, Wide Bandwidth Vibration Isolation*", Tayco Developments, Inc, North Tonawanda, NY. USA.
34. KLEMBEZYK, A., and BREUKELMAN, B. 2000. "*Structural Control of High Rise Building Using a Tuned Mass With Integral Hermetically Sealed, Frictionless Hydraulic Dampers*", Issue #6, RWDI Newsletter Article, Guelph, Ontario. Canada.
35. KORUDA, H., ARIMA, F., BABA, K., and INOUE, Y. 2000. "*Principles and Characteristics of Viscous Damping Devices, the Damping Forces with are Highly Amplified by Converting the Axial Movement to Rotary One*", 12th World Conference on Earthquake Engineering. Auckland. New Zealand.
36. LUBLINER, J. 1990. "*Plasticity Theory*", Macmillan Publishing Company, New York. USA.
37. MAKRIS, N., and TAYLOR, D. 2000. "*Development and Testing of an Electronically Controlled Shock and Vibration Damper Having an Electrorheological Fluid Medium*", Department of Civil Engineering and Environmental Science, University of California at Berkeley, California. USA.

Bibliografia

38. MARAZZI, F., MAGONETTE, G., and RENDA, V. 2001. "*From Active to Semi-Active Control: Theoretical and Implementation Aspects*", Article Publisher by European Commission, Joint Research Centre. Italy.
39. MARSH, C. 2000. "*The Control of Building Motion by Friction Dampers*", 12th World Conference on Earthquake Engineering. Auckland. New Zealand.
40. MCNAMARA, R. 2000. "*Use of Motion Amplification Devices and Fluid Dampers to Reduce the Wind Induced Response of Tall Buildings*", Technical Paper, McNamara/Salvia, Inc. Boston, MA. USA.
41. MCNAMARA, R. 2003. "*Seismic Damage Control with Passive Energy Devices: A Case Study*", McNamara/Salvia, Inc. Consulting Structural Engineers. Boston.
42. MIYAMOTO, H., and SCHOLL, R. 1995. "*Seismic Rehabilitation of a Historic Non-Ductile Soft Story Concrete Structure Using Fluid Viscous Dampers*", Procedures of the American Concrete Institute, Fall Meeting, Montreal, PQ.
43. MIYAMOTO, H., and TAYLOR, D. 2001. "*Structural Control of Dynamic Blast Loading Using Fluid Viscous Dampers*", Marr Shaffer & Miyamoto, Inc. Sacramento, California. USA.
44. MORALES, R. 1992. "*Diseño Sísmico de Edificios de Concreto Armado*", Informe de Investigación, CISMID - Universidad Nacional de Ingeniería. Lima - Perú.
45. NAKANO, Y. 1998. "*Recent Seismic Retrofit Techniques of Existing RC Buildings in Japan*", INCEDE Report 19, Kobe Earthquake, University of Tokyo. Japan.
46. NAWROTZKI, P. 2002. "*Reduction of Seismic Structural Responses using Spring Elements and Viscodampers*", SEI - ASCE, Structures Congress & Exposition, Denver, CO. USA.
47. OLARIU, I., OLARIU, F., and SARBU, D. 2000. "*Base Isolation Versus Energy Dissipation for Seismic Retrofitting of Existing Structures*", 12th World Conference on Earthquake Engineering. Auckland. New Zealand.
48. OMIKA, Y., SUGANO, T., OHKAWA, J., YOSHIMATSU, T., YAMAMOTO, Y., and TSUJI, Y. 2000. "*Seismic Design of a Super Frame Structural System with Passive Energy Dissipation Devices*", 12th World Conference on Earthquake Engineering. Auckland. New Zealand.
49. PONG, W. 2001. "*Design Parameters for Multi-Story Structures with Damping Devices*", CTBUH Review/Vol. 01. N.03. School of Engineering, San Francisco state University. USA.
50. POPOV, E., and GRIGORIAN, C. 1994. "*Energy Dissipation with Slotted Bolted Connections*", Report UCB/EERC-94/02. Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California at Berkeley. USA.

51. PRZEMIENIECKI, J. 1985. *"Theory of Matrix Structural Analysis"*, Dover Publications, Inc, New York. USA.
52. REQUENA, S. 1995. *"Análisis Inelástico y Redistribución de Momentos en Diseño Sismorresistente de Estructuras de Concreto Armado"*, Tesis de Grado, UPRP, Perú.
53. RUIZ, S., BADILLO, H., SILVA, F., and ESTEVA, L. 2000. *"Seismic Design Criteria for Retrofitting of Buildings with Hysteretic Energy Dissipators"*, 12th World Conference on Earthquake Engineering. Auckland. New Zealand.
54. SADEK, F., MOHRAZ, B., and RILEY, M. 2000. *"Improved Linear Procedures for Analysis of Structures with Passive Energy Dissipation Devices"*, 12th World Conference on Earthquake Engineering. Auckland. New Zealand.
55. SANCHEZ, P. y SONZOGNI, V. 2002. *"Análisis Sísmico No Lineal de Estructuras de Edificios"*, XVII Jornada Argentina de Ingeniería Estructural, Rosario – Santa Fe. Argentina.
56. SENCICO. 2003. *"Norma Técnica de Estructuras E-030 Diseño Sismorresistente"*, Publicada por SENCICO en Abril del 2003. Lima – Perú.
57. SHUSTOV, V. 2001. *"Modal Performance Factor Testing Procedure for Base Isolation Systems"*, Paper Published by Department of Civil & Manufacturing Engineering, College of Engineering & Computer Science, California State University Northridge. USA.
58. SINGH, M., and MORESCHI, L. 1999. *"Optimal Design of Building Structures with Friction Dampers"*, National Science Foundation, Virginia Tech, Blacksburg. USA.
59. SODA, S., and IWATA, N. 2000. *"Seismic Design of Low to Mid-Rise Building with a Soft First Storey Subject to Semi-Active Viscous Damping Control"*, 12th World Conference on Earthquake Engineering. Auckland. New Zealand.
60. SOONG, T., and SPENCER, B. 2000. *"Active, Semi-Active and Hybrid Control of Structures"*, 12th World Conference on Earthquake Engineering. Auckland. New Zealand.
61. SYMANS, M., CONSTANTINOU, M., and GARNJOST, K. 1993. *"Semi-Active Fluid Viscous Dampers for Seismic Response Control"*, State University of New York, Department of Civil Engineering, Buffalo, NY, USA.
62. TAYLOR DEVICES, INC. 2003. *"Commonly Asked Questions and Answers about Taylor Devices' Fluid Viscous Dampers"*, Taylor Devices, Inc. NY. USA.
63. TAYLOR DEVICES, INC. 2003. *"Sample Technical Specifications for Viscous Damping Devices"*, Technical Paper for Design. North Tonawanda, NY. USA.

Bibliografía

64. TAYLOR DEVICES, INC. 2003. “*Structural Applications of Fluid Viscous Dampers*”, Taylor Devices, Inc. North Tonawanda, NY. USA.
65. TAYLOR, D. 1999. “*Buildings: Design for Damping*”, Proceedings of the Boston Society of Civil Engineers, BSCES, Lecture Series, “Dynamics of Structures”. USA.
66. TAYLOR, D. 2000. “*Fluid Lock-Up Devices – A Robust Means to Control Multiple Mass Structural Systems Subject to Seismic or Wind Inputs*”, Technical Paper, Taylor Devices, Inc. North Tonawanda, NY. USA.
67. TAYLOR, D. 2001. “*Energy Management Utilizing the Hydraulic Shock Absorber*”, Taylor Devices, Inc. North Tonawanda, NY. USA.
68. TAYLOR, D., and CONSTANTINOU, M. 1993. “*Testing Procedures for High Output Fluid Viscous Dampers used in Structures to Dissipate Seismic Energy*”, State University of New York, Department of Civil Engineering, Buffalo, NY, USA.
69. TAYLOR, D., and CONSTANTINOU, M. 1997. “*Development and Testing of an Improved Fluid Damper Configuration for Structures Having High Rigidity*” State University of New York, Department of Civil Engineering, Buffalo, NY, USA.
70. TSAI, M., and CHANG, K. 2000. “*A Study on Modal Strain Energy Method for Viscoelastically Damped Structures*”, 12th World Conference on Earthquake Engineering. Auckland. New Zealand.
71. TSUJI, M., NAGANO, Y., OHSAKI, M., and UETANI, K. 2000. “*Optimum Design Method for High-Rise Building Frame with Viscous Dampers*”, 12th World Conference on Earthquake Engineering. Auckland. New Zealand.
72. UBC. 2000. “*Seismically Isolated Structures Design Requirements – Commentary*”, NEHRP Recommended Provisions for New buildings. Uniform Building Code.
73. UBC. 2000. “*Structures with Damping Systems – Commentary*”, NEHRP Recommended Provisions for New buildings. Uniform Building Code.
74. VASQUEZ, D. y SUAREZ, L. 2002. “*Introducción Visual a SAP2000*”, Primera Edición, Fondo Editorial ICG. Lima – Perú.
75. VASQUEZ, G. 1992. “*Análisis Inelástico de Estructuras Aperticadas*”, Informe de Investigación, CISMID – Universidad Nacional de Ingeniería, Lima – Perú.
76. VERA, R., RAMÍREZ H., MARTINEZ, J. y MIRANDA, S. 2001. “*Prueba Experimental de un Dispositivo Disipador de Energía de Tipo Marco Interior ante Cargas Laterales*”, 2do Congreso Iberoamericano de Ingeniería Sísmica. España.

77. VULCANO, A., and MAZZA, F. 2000. "*Comparative Study of the Seismic Performance of Frames using Different Dissipative Braces*", 12th World Conference on Earthquake Engineering. Auckland. New Zealand.
78. WHITTAKER, A. 2000. "*Seismic Protective Systems*", CIE 619 Earthquake Engineering and Structural Dynamics. USA.
79. WILSON, E. 2002. "*Three Dimensional Static and Dynamic Analysis of Structures*", A Physical Approach with Emphasis on Earthquake Engineering, Computer and Structures, Inc. Berkeley, California, USA.
80. ZUÑIGA, R. 2000. "*Evaluación y Reforzamiento Estructural de una Edificación de 25 Niveles*", Tesis Para Optar el Título Profesional de Ingeniero Civil, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima – Perú.