

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



**ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LAS CARACTERISTICAS
DINAMICAS DE UN DISPOSITIVO DISIPADOR VISCOSO A
ESCALA REDUCIDA**

TESIS

Para optar el Titulo Profesional de:

INGENIERO CIVIL

WORK YSRRAEL PINAUD RICCI

Lima- Perú

2014

Digitalizado por:

**Consortio Digital del
Conocimiento MebLatam,
Hemisferio y Dalse**

Dedicatoria:

Dedico este trabajo a mis padres y hermanas, quienes son mi motivación para esforzarme y por todo el apoyo que siempre me han dado para alcanzar mis metas.

Agradecimiento

Un agradecimiento muy especial al Dr. Carlos Zavala Toledo, asesor del presente trabajo de investigación, por toda su colaboración y motivación que hizo que esta tesis sea posible.

Así mismo agradezco a todo el personal del CISMID (Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres) que desinteresadamente me ayudaron. En especial al Dr. Miguel Díaz Figueroa y al Ing. Luis Lavado Durand por toda su colaboración con los ensayos de laboratorio.

ÍNDICE

RESUMEN.....	4
LISTA DE CUADROS	6
LISTA DE FIGURAS	8
LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS Y ABREVIATURAS	14
INTRODUCCIÓN.....	20
CAPÍTULO I: SISTEMAS DE UN GRADO DE LIBERTAD	24
1.1 MOVIMIENTO AMORTIGUADO EN VIBRACION LIBRE	24
1.1.1 Movimiento sub-amortiguado ($\xi < 1$).....	25
1.1.2 Movimiento críticamente amortiguado ($\xi = 1$).....	25
1.1.3 Movimiento sobre-amortiguado ($\xi > 1$).....	25
1.2 MOVIMIENTO AMORTIGUADO FORZADO	25
1.2.1 Movimiento sinusoidal.....	25
1.2.2 Movimiento sísmico.....	27
1.3 BALANCE DE ENERGIA DEL SISTEMA.....	28
1.4 MÉTODOS EXPERIMENTALES PARA OBTENER EL AMORTIGUAMIENTO INHERENTE.....	31
1.4.1 Método decremento logarítmico [16].....	31
1.4.2 Método de energía [4].....	32
CAPÍTULO II: DISIPADORES DE ENERGIA DE FLUIDO VISCOSO	33
2.1 CONTROL ESTRUCTURAL USANDO DISIPADORES DE ENERGIA	33
2.2 TIPOS DE DISIPADORES VISCOSOS.....	35
2.2.1 Disipador tipo muro.....	35
2.2.2 Disipador rotatorio.....	36
2.2.3 Disipador cilíndrico.....	36
2.2.4 Disipador de pistón	37
2.3 ESTUDIO SIMPLIFICADO DEL DISIPADOR PISTÓN	38
2.3.1 Leyes fundamentales en dinámica de fluidos [19].....	39
2.3.2 Fuerza de Amortiguamiento	40
2.4 MODELOS MATEMÁTICOS	44
2.4.1 Modelo lineal.....	45
2.4.2 Modelo no lineal.....	45
2.4.3 Modelo Maxwell de derivada fraccional.....	46
2.5 ANÁLISIS DE UN PÓRTICO CON DISPOSITIVO DISIPADOR VISCOSO ..	48
2.5.1 Descripción general del sistema.....	48

2.5.2 Modelo lineal.....	48
2.5.3 Modelo no lineal.....	51
2.5.4 Modelo Maxwell de derivada fraccional.....	53
2.6 REQUERIMIENTOS DE ESTUDIOS EXPERIMENTALES PARA DISIPADORES SEGÚN ASCE-07-10	55
CAPÍTULO III: ESTUDIO DEL PROTOTIPO Y MODELO	57
3.1 ANALISIS DIMENSIONAL Y SIMILITUD	57
3.1.1 Generalidades.....	57
3.1.2 Análisis dimensional.....	58
3.1.3 Factores de Escala	59
3.2 ESTUDIO DEL MODELO A.....	62
3.2.1 Consideraciones sobre el factor de escala longitudinal.....	62
3.2.2 Dimensiones del modelo.....	62
3.2.3 Materiales y propiedades mecánicas de la viga y columna.....	64
3.2.4 Metrado de cargas.....	66
3.2.5 Características dinámicas de la estructura.....	67
3.2.6 Observaciones al modelo A.....	68
3.3 ESTUDIO DEL MODELO B.....	69
3.3.1 Materiales y propiedades mecánicas de viga y columna.....	70
3.3.2 Características dinámicas de la estructura.....	71
3.3.3 Capacidad de la estructura en el rango elástico.....	72
3.3.4 Propuesta de demanda para el modelo B.....	73
3.3.5 Prototipo para el modelo B.....	75
CAPÍTULO IV: ESTUDIO DEL DISPOSITIVO DISIPADOR VISCOSO.....	76
4.1 ALCANCES	76
4.2 CONFIGURACIÓN DEL DISPOSITIVO	76
4.3 ANALISIS DIMENSIONAL Y SIMILITUD.....	77
4.4 MATERIALES Y DIMENSIONES DEL DISIPADOR.....	79
4.5 MATERIALES Y DIMENSIONES DE LOS BRAZOS.....	83
4.6 DETALLES DE CONEXIONES	85
4.7 LIQUIDO VISCOSO	85
4.7.1 Aceite de silicona.....	86
4.7.2 Glicerina líquida.....	87
4.7.3 Aceite de motor.....	87
CAPÍTULO V: ESTUDIO EXPERIMENTAL	89

5.1 ENSAYOS REALIZADOS AL LÍQUIDO	89
5.1.1 Viscosidad	89
5.2 ENSAYO PRELIMINAR DEL DISPOSITIVO	90
5.2.1 Descripción del ensayo	91
5.2.2 Procedimiento del ensayo	92
5.2.3 Análisis del ensayo	92
5.3 ENSAYO DINAMICO EN MESA VIBRADORA	93
5.3.1 Ensayo del modelo sin disipadores	93
5.3.2 Ensayo del modelo con disipadores	96
CAPÍTULO VI: ANALISIS DE RESULTADOS EXPERIMENTALES	99
6.1 ENSAYO PARA LOS LIQUIDOS	99
6.1.1 Ensayo de viscosidad	99
6.2 ENSAYO PRELIMINAR	101
6.2.1 Cálculos previos.....	101
6.2.2 Resultados típicos.....	103
6.2.3 Curvas de comportamiento	105
6.3 ENSAYO DINAMICO EN MESA VIBRADORA	108
6.3.1 Sistema sin disipadores – Modelo A	108
6.3.2 Sistema sin disipadores – Modelo B	111
6.3.3 Sistema con disipadores – Modelo B	124
6.3.4 Reducción en la respuesta – Modelo B.....	145
6.3.5 Condición de Falla del disipador	151
6.3.6 Estimación de la respuesta para el prototipo del modelo B.....	158
CAPÍTULO VII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	162
7.1 CONCLUSIONES	162
7.2 RECOMENDACIONES	163
BIBLIOGRAFÍA.....	165
ANEXOS.....	167

RESUMEN

En el presente trabajo se propone un disipador viscoso a escala reducida (1:5) fabricado con materiales disponibles en el mercado nacional y se estudia su comportamiento tanto en un ensayo de carga monotónica como en un ensayo dinámico sobre mesa vibradora. En el ensayo dinámico el dispositivo se incorpora a un modelo tridimensional, que puede ser idealizado como un sistema de un grado de libertad. Así mismo se estudia la reducción en la respuesta del modelo tridimensional comparando el ensayo sin disipadores contra el ensayo con disipadores.

Se propone un disipador viscoso del tipo pistón de una configuración simple. Se elige a la glicerina como líquido viscoso a usar en base a los resultados del ensayo de carga monotónica.

El modelo tridimensional consta de dos pórticos de acero con una losa de concreto. Se propuso un modelo flexible de tal forma que la reducción en la respuesta al incluir el disipador pueda comprobarse visualmente.

El ensayo dinámico en mesa vibradora se realizó con dos tipos de movimiento: sinusoidal y sísmico. En el movimiento sinusoidal se barrieron tres frecuencias menores a la frecuencia natural del modelo y tres frecuencias superiores a esta. En el movimiento sísmico se usó el registro del sismo del 3 de octubre de 1974 (PGA=192.5 cm/s², mb=6.6).

Los resultados tanto en el ensayo de carga monotónica (denominado ensayo preliminar) y ensayo dinámico indican un comportamiento bilineal para la fuerza de amortiguamiento. Sin embargo se obtuvo un mayor amortiguamiento en el ensayo de carga monotónica, debido a dos factores: El primero está relacionado a que el flujo del líquido dentro del disipador en el ensayo en mesa vibradora no se desarrolla en toda la región anular (comprendida entre la cabeza del pistón y la capsula) ya que el disipador no está completamente lleno del líquido; por tanto la presión en la cabeza del pistón es menor que la desarrollada en el ensayo de carga monotónica, en el cual por la orientación vertical del disipador el flujo si se desarrolla en toda la región anular. El segundo factor está relacionado a las características del flujo, es decir mientras en el ensayo preliminar el flujo se desarrolla en un solo sentido en el ensayo en mesa vibradora el movimiento es cíclico. En un flujo en una dirección se puede establecer condiciones de

uniformidad y continuidad mientras que en el movimiento cíclico se desarrollan turbulencias y discontinuidades, lo cual implica que el fluido se mueva en varias direcciones reduciendo la presión en la dirección del movimiento del pistón y como consecuencia reduciendo también el amortiguamiento.

En base a los resultados del ensayo con movimiento sinusoidal en mesa vibradora no se encontró relación entre las frecuencias de movimiento y el comportamiento de la fuerza de amortiguamiento del disipador, puesto que las curvas de fuerza de amortiguamiento vs velocidad para las diferentes frecuencias de movimiento no tiene variaciones apreciables como para establecer algún tipo de relación, por el contrario dichas curvas tienen prácticamente la misma forma.

En el ensayo dinámico sobre mesa vibradora con movimiento sísmico se obtuvo una reducción promedio de 74% en el desplazamiento relativo, 68% en la velocidad relativa, 41% en aceleración relativa y 57% en aceleración absoluta.

LISTA DE CUADROS

Tabla 3.1 Factores de Escala	62
Tabla 3.2 Características del modelo A.....	68
Tabla 3.3 Características del modelo B.....	72
Tabla 3.4 Propuesta de demanda para el modelo B	74
Tabla 3.5 Respuesta a la propuesta de demanda para el modelo B	74
Tabla 3.6 Características del Prototipo correspondiente al modelo B	75
Tabla 4.1 Dimensiones de Disipadores comerciales Taylor [10]	80
Tabla 4.2 Propiedades de Aceite de silicón de uso cosmético [23]	86
Tabla 4.3 Propiedades de la Glicerina [2]	87
Tabla 4.4: Viscosidad de aceite de motor SAE [22].....	88
Tabla 5.1 Valores ingresados en el software PROYECTO01- Vibración sinusoidal	94
Tabla 5.2 Valores ingresados en el software PROYECTO01 - vibración sísmica	96
Tabla 6.1: Viscosidad dinámica a 40° C- Aceite de Silicón y glicerina.....	99
Tabla 6.2: Tabla de viscosidades a 40°C.....	99
Tabla 6.3: Viscosidad de la glicerina a diferentes velocidades angulares	100
Tabla 6.4: Viscosidad de la glicerina a diferentes temperaturas.....	101
Tabla 6.5: Registro de pesos de plancha, vástago y pistón.....	101
Tabla 6.6: Registro de los pesos de las cargas.....	101
Tabla 6.7: Combinación de cargas.....	102
Tabla 6.8: Cargas para los diferentes tipos de líquido.....	103
Tabla 6.9: Valores de f para posibles valores de temperatura en el ensayo.....	108
Tabla 6.10: Respuesta experimental del modelo para cargas sinusoidales sin disipadores.	113
Tabla 6.11: Amortiguamiento Lineal Equivalente – Sin disipadores	116
Tabla 6.12: Distribución de Energía – Mov. Sinusoidal sin disipadores.....	117
Tabla 6.13: Respuesta teórica – Mov. Sinusoidal sin disipadores.....	118
Tabla 6.14: Respuesta teórica - aceleración en la base de 235.215 cm/s ²	118
Tabla 6.15: Factor de amplificación dinámica – Sin disipadores	118
Tabla 6.16: Respuesta experimental – Mov. Sísmico sin disipador.....	121
Tabla 6.17: Distribución de energía - Mov sísmico – sin disipadores	121
Tabla 6.18 Respuesta teórica para movimiento sísmico del ensayo – Modelo sin disipadores	124

Tabla 6.19: Respuesta experimental – Mov. Sinusoidal con disipadores.....	126
Tabla 6.20: Amortiguamiento Lineal Equivalente - Mov sinusoidal con disipadores	128
Tabla 6.21: Variación del valor de f en el rango de temperaturas del ensayo...	135
Tabla 6.22: Distribución de Energía – Mov. Sinusoidal con disipadores.....	136
Tabla 6.23: Respuesta teórica – Mov. Sinusoidal con disipadores.....	137
Tabla 6.24: Respuesta teórica para una amplitud de la aceleración en la base de 256.09 cm/s^2	137
Tabla 6.25: Factor de amplificación dinámica – Modelo con disipadores	138
Tabla 6.26: Respuesta experimental - Mov. Sísmico con disipadores.....	140
Tabla 6.27: Distribución de energía - Mov sísmico con disipadores.....	141
Tabla 6.28: Error del cálculo teórico respecto del experimental-Modelo con disipadores	145
Tabla 6.29: Variación en la aceleración en la base con y sin disipadores – Movimiento sinusoidal.....	146
Tabla 6.30: Reducción de la respuesta – Movimiento Sinusoidal.....	147
Tabla 6.31: Variación en la aceleración en la base para movimientos sísmicos con y sin disipador	150
Tabla 6.32: Reducción de la respuesta – Movimiento Sísmico	151
Tabla 6.33: Distribución de tramos - Ensayo barrido de frecuencias.....	152
Tabla 6.34: Respuesta del prototipo para cargas sinusoidales	159
Tabla 6.35: Respuesta prototipo para movimiento sísmico escalado.....	160
Tabla 6.36: Respuesta teórica para movimientos sinusoidales en el Prototipo	161
Tabla 6.37: Respuesta teórica para movimientos sísmicos en el Prototipo	161

LISTA DE FIGURAS

Figura N° 1.1 Sistema de un grado de libertad: (a) Pórtico e (b) Idealización	24
Figura N° 1.2 Curvas de movimientos amortiguados	25
Figura N° 1.3 Curvas del FAD para diferentes valores de amortiguamiento [18]	26
Figura N° 1.4 Registro Sísmico de aceleraciones [18]	27
Figura N° 1.5 Espectro de Respuesta (a) aceleraciones (b) desplazamiento [5]	28
Figura N° 1.6 Sistema de un grado de libertad con aceleración en la base.....	29
Figura N° 1.7 Curvas de comportamiento(a) Rigidez (b) Amortiguamiento	30
Figura N° 1.8 Decremento Logarítmico.....	31
Figura N° 2.1 Sistemas de Control Estructural [25]	33
Figura N° 2.2 Disipador dependiente de desplazamiento por plastificación [10].	34
Figura N° 2.3 Disipador Viscoso [10]	35
Figura N° 2.4 Disipador Visco-elástico [24].....	35
Figura N° 2.5 Esquema del Disipador tipo muro [24].....	36
Figura N° 2.6 Esquema del Disipador Rotatorio [8].....	36
Figura N° 2.7 Esquema del Disipador cilíndrico [24]	37
Figura N° 2.8 Esquema del Disipador de pistón [11].....	37
Figura N° 2.9 Esquema del Disipador de pistón con orificios [24]	38
Figura N° 2.10 Elementos del disipador con orificios [24]	38
Figura N° 2.11 Conexión de disipadores con brazos metálicos.....	38
Figura N° 2.12 Esfuerzo cortante vs velocidad de deformación en fluidos [19] ..	39
Figura N° 2.13 Geometría del disipador tipo pistón simple [24].....	40
Figura N° 2.14 Esquema del movimiento dentro del disipador	40
Figura N° 2.15 Esquema de Volumen de control	41
Figura N° 2.16 Flujo desarrollado en tubos [19]	42
Figura N° 2.17 Fuerza de amortiguamiento en el disipador.....	44
Figura N° 2.18 Curva de histéresis para disipador – modelo lineal [11]	45
Figura N° 2.19 Curva de histéresis para disipador - modelo bilineal [11].....	46
Figura N° 2.20 Curva de histéresis para disipador - modelo exponencial [12]....	46
Figura N° 2.21 Curva de histéresis comportamiento visco elástico	47
Figura N° 2.22 Pórtico simple con disipador viscoso.....	48
Figura N° 2.23 Idealización del sistema para un modelo lineal	48
Figura N° 2.24 Configuraciones del sistema brazo –disipador [3]	51
Figura N° 2.25 Idealización del sistema modelo exponencial.....	51
Figura N° 2.26 Curva de comportamiento segmentada.....	52

Figura N° 2.27 Influencia del brazo en el sistema	54
Figura N° 3.1 Pórtico simple con excitación basal [15].....	57
Figura N° 3.2 Modelo A (planta y sección A-A)	63
Figura N° 3.3 Modelo A (sección B-B y detalle 01)	64
Figura N° 3.4 Pórtico simple	67
Figura N° 3.5 Modelo B (Dimensiones en metros)	69
Figura N° 3.6 Curva de Capacidad (a) Cortante Basal (b) Aceleración Absoluta.....	73
Figura N° 3.7 Curva de capacidad y demanda.....	74
Figura N° 4.1 Modelo a escala reducida- Componentes	76
Figura N° 4.2 Análisis dimensional del modelo	77
Figura N° 4.3 Inflador de bicicleta	79
Figura N° 4.4 Reten de válvula de carro	80
Figura N° 4.5 Modelo inicial de disipador (a) vista general (b) detalle del retén ..	80
Figura N° 4.6 Dispositivo propuesto (a) elementos (b) Dimensiones (mm)	81
Figura N° 4.7 Capsula, pistón y tapa de capsula fabricados	81
Figura N° 4.8 Tapa sin reten, reten y tapa con reten.....	82
Figura N° 4.9 Vista general de los dos disipadores.....	82
Figura N° 4.10 Dimensiones del vástago (mm).....	82
Figura N° 4.11 Transmisión de fuerzas a los brazos	84
Figura N° 4.12 Detalles de conexiones	85
Figura N° 4.13 Presentación de aceite de silicón (a) cosmético (b) lubricante ...	86
Figura N° 4.14 Presentación de Glicerina	87
Figura N° 4.15 Presentación de la grasa.....	88
Figura N° 5.1 Viscosímetro Brookfield (Foto del ensayo)	90
Figura N° 5.2 Disposición del dispositivo en el ensayo preliminar.....	92
Figura N° 5.3 Diagrama de cuerpo libre del ensayo preliminar	93
Figura N° 6.1 Variación de la viscosidad con la temperatura –Glicerina.....	100
Figura N° 6.2 Respuesta típica para cargas pequeñas (a) Identificación del ensayo (b) Gráfica Posición (c) Registro de desplazamientos (d) Registro de velocidad	104
Figura N° 6.3 Respuesta típica para cargas altas (a) Identificación del ensayo (b) Gráfica Posición vs tiempo (c) Registro de desplazamiento (d) Registro de velocidad (e) Registro de aceleración	105
Figura N° 6.4 Fuerza – Velocidad por líquido y disipador para fuerzas hasta 5kgf	106

Figura N° 6.5 Fuerza – Velocidad por líquido y disipador para Fuerzas de hasta 18kgf.....	106
Figura N° 6.6 Ajuste bilineal y exponencial- Ensayo preliminar.....	107
Figura N° 6.7 Ensayo Vibración Libre 01 – Modelo A. (a) Registro de Desplazamiento en la Losa. (b) Espectro de Fourier.....	109
Figura N° 6.8 Ensayo Vibración Libre 01 – Modelo A. (a) Registro de Desplazamiento en la Losa. (b) Espectro de Fourier.....	109
Figura N° 6.9 Aceleración en la base – Frecuencia: 4Hz.....	110
Figura N° 6.10 Desplazamiento Relativo – Frecuencia: 4Hz.....	110
Figura N° 6.11 Desplazamiento Relativo máximo en Movimiento sinusoidal – Modelo A sin disipadores.....	111
Figura N° 6.12 Ensayo Vibración Libre 01 – Modelo B. (a) Registro de Desplazamiento en la Losa. (b) Espectro de Fourier.....	111
Figura N° 6.13 Ensayo Vibración Libre 02 – Modelo B. (a) Registro de Aceleración en la Losa. (b) Espectro de Fourier.....	112
Figura N° 6.14 Decremento logarítmico Ensayo Vibración Libre 01.....	112
Figura N° 6.15 Decremento logarítmico Ensayo Vibración Libre 02.....	112
Figura N° 6.16 (a) Amplitud de la aceleración en la base y (b) Desplazamiento Relativo para cada frecuencia de movimiento.....	113
Figura N° 6.17 Fuerza de Amortiguamiento F_v vs Velocidad Relativa para cada frecuencia de Movimiento.....	114
Figura N° 6.18 Fuerza de Amortiguamiento F_v vs Desplazamiento Relativo para cada frecuencia de Movimiento.....	115
Figura N° 6.19 Factor de Amplificación Dinámica – Modelo sin disipadores.....	119
Figura N° 6.20 Aceleración en la Base - Mov. Sísmico sin disipador.....	119
Figura N° 6.21 Desplazamiento Relativo – Mov. Sísmico sin Disipador.....	120
Figura N° 6.22 Velocidad Relativa – Mov. Sísmico sin Disipador.....	120
Figura N° 6.23 Aceleración Relativa – Mov. Sísmico sin Disipador.....	120
Figura N° 6.24 Aceleración Absoluta – Mov. Sísmico sin Disipador.....	120
Figura N° 6.25 Energía vs Tiempo – Mov. Sísmico sin Disipador.....	121
Figura N° 6.26 Desplazamiento Relativo (a) todo el registro (b) entre 20-30 s.....	122
Figura N° 6.27 Velocidad Relativa (a) todo el registro (b) entre 20-30 s.....	122
Figura N° 6.28 Aceleración Relativa (a) todo el registro (b) entre 20-30 s.....	123
Figura N° 6.29 Aceleración Absoluta (a) todo el registro (b) entre 20-30 s.....	123

Figura N° 6.30 Desplazamiento Relativo – Ensayo vibración libre con disipadores	124
Figura N° 6.31 Ajuste a curvas sobre y sub amortiguadas del movimiento en vibración libre con disipador.....	125
Figura N° 6.32 Aceleración en la base(a) y Desplazamiento Relativo (b) para cada frecuencia de Movimiento	126
Figura N° 6.33 Fuerza de Amortiguamiento F_d vs Desplazamiento Relativo para cada frecuencia de Movimiento	127
Figura N° 6.34 Porcentaje de Amortiguamiento Lineal Equivalente (a) Método Energía (b) Método ASCE 07	128
Figura N° 6.35 Coeficiente de Amortiguamiento Lineal Equivalente (a) Método Energía (b) Método ASCE 07	129
Figura N° 6.36 Fuerza de Amortiguamiento vs Velocidad Relativa en movimiento sinusoidal– Modelo con disipadores	130
Figura N° 6.37 Comportamiento de la Fuerza de Amortiguamiento para todos los movimientos sinusoidales (a) tramos laterales (b) tramo central.....	131
Figura N° 6.38 Comparación de los ajustes regresiones lineales.....	132
Figura N° 6.39 Comportamiento de la fuerza de amortiguamiento para cada disipador	133
Figura N° 6.40 Orientación del disipador y ubicación de los ejes positivo y negativo usados en la medición de desplazamientos y aceleraciones.	133
Figura N° 6.41 Comparación de regresiones del ensayo preliminar con el ensayo en mesa vibradora (a) rango de velocidades del ensayo preliminar (b) rango de velocidades del ensayo en mesa vibradora.....	134
Figura N° 6.42 Factor de Amplificación Dinámica – Modelos con disipadores .	138
Figura N° 6.43 Aceleración en la base – Mov. Sísmico con disipadores	139
Figura N° 6.44 Desplazamiento relativo - Mov. Sísmico con disipadores	139
Figura N° 6.45 Velocidad relativa - Mov. Sísmico con disipadores.....	139
Figura N° 6.46 Aceleración relativa – Mov. Sísmico con disipadores	140
Figura N° 6.47 Aceleración Absoluta – Mov. Sísmico con disipadores.....	140
Figura N° 6.48 Historia de Energía - Mov. Sísmico con disipadores	141
Figura N° 6.49 Curva de histéresis de los disipadores – Mov. Sísmico.....	141
Figura N° 6.50 Fuerza de Amortiguamiento vs Velocidad – Mov. Sísmico	142
Figura N° 6.51 Desplazamiento Relativo (a) todo el registro (b) entre 20-30 s.	142

Figura N° 6.52 Velocidad Relativa (a) todo el registro (b) entre 22-26 s.....	143
Figura N° 6.53 Aceleración Relativa (a) todo el registro (b) entre 23-26s.....	143
Figura N° 6.54 Aceleración Absoluta (a) todo el registro (b) entre 23-26s.....	144
Figura N° 6.55 Curva de Histéresis – Mov. Sísmico con disipadores	144
Figura N° 6.56 Aceleraciones en la Base experimentales con y sin disipadores – Movimiento sinusoidal.....	145
Figura N° 6.57 Desplazamientos relativos experimentales para diferentes frecuencias de movimiento con y sin disipadores	146
Figura N° 6.58 Desplazamiento relativo con y sin disipador - 1.67Hz	147
Figura N° 6.59 Desplazamiento relativo con y sin disipador – 2.23Hz.....	147
Figura N° 6.60 Desplazamiento relativo con y sin disipador – 2.78Hz.....	147
Figura N° 6.61 Desplazamiento relativo con y sin disipador – 4.44Hz.....	148
Figura N° 6.62 Desplazamiento relativo con y sin disipador – 5.18Hz.....	148
Figura N° 6.63 Desplazamiento relativo con y sin disipador – 5.93Hz.....	148
Figura N° 6.64 Variación del FAD	149
Figura N° 6.65 Aceleración en la Base Movimiento con y sin disipador (a) todo el registro (b) 23-26s	149
Figura N° 6.66 Desplazamiento Relativo con y sin disipadores – Mov. Sísmico	150
Figura N° 6.67 Velocidad Relativa con y sin disipadores – Mov. Sísmico	150
Figura N° 6.68 Aceleración Relativa con y sin disipadores – Mov. Sísmico	150
Figura N° 6.69 Aceleración Absoluta con y sin disipadores – Mov. Sísmico ...	151
Figura N° 6.70 Frecuencias vs Tiempo – Ensayo barrido de frecuencias.....	152
Figura N° 6.71 Aceleración en la base – Ensayo barrido de frecuencias	152
Figura N° 6.72 Desplazamiento Relativo – Ensayo barrido de frecuencias	152
Figura N° 6.73 Fuerza de Inercia vs Desplazamiento – Tramo 6	154
Figura N° 6.74 Choque entre el vástago y la capsula.....	155
Figura N° 6.75 Comportamiento fuerza de amortiguamiento en Tramo 1 y 2. 155	
Figura N° 6.76 Comportamiento fuerza de amortiguamiento en Tramo 3 y 4. 156	
Figura N° 6.77 Comportamiento fuerza de amortiguamiento en Tramo 5 y 6. 156	
Figura N° 6.78 Comportamiento fuerza de amortiguamiento en Tramo 7 y 8. 156	
Figura N° 6.79 Comportamiento fuerza de amortiguamiento e histéresis en Tramo 9	157
Figura N° 6.80 Variación del amortiguamiento– Ensayo barrido de frecuencias	157

Figura N° 6.81 Comportamiento de la fuerza de amortiguamiento para cada prototipo de disipador	158
Figura N° 6.82 Comportamiento de la fuerza de amortiguamiento para los dos prototipos de disipador.....	159
Figura N° 6.83 Amortiguamiento y coeficiente de amortiguamiento para movimiento sinusoidal para cada prototipo de disipador.....	160

LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS Y ABREVIATURAS

CAPÍTULO I y II

- a : Aceleración
- \bar{A} : Amplitud del desplazamiento relativo
- A, B, c_1, c_2 : Constantes de integración
- a_n, b_n : Coeficientes de Fourier
- C, C_L : Coeficiente de amortiguamiento
- C_1, C_2 : Constantes de integración
- C_0 : Coeficiente de amortiguamiento a frecuencia cero
- C_{NL} : Coeficiente de amortiguamiento no lineal
- C_i, c : Coeficiente de amortiguamiento inherente del sistema
- C_n : Coeficiente de amortiguamiento natural del pórtico
- C_{eq} : Amortiguamiento equivalente
- C_{di} : Coeficiente de amortiguamiento en cada paso
- dA : Diferencial de Área de la superficie de control
- dV : Diferencial del Volumen de control
- E : Energía
- E_d : Energía disipada en un ciclo de movimiento
- E_{av} : Energía disipada por un comportamiento viscoso
- E_{def} : Energía de deformación elástica
- F : Fuerza
- F_a : Fuerza de amortiguamiento del disipador
- FAD : Factor de Amplificación dinámica
- \mathcal{F} : Operador de transformada de Fourier
- F^+, F^- : Fuerzas positivas y negativas para los desplazamientos Δ^+, Δ^- respectivamente
- f : Factor de reducción de la fuerza de amortiguamiento
- G^* : Modulo complejo
- G' : Modulo de ganancia
- G'' : Modulo de perdida
- g_x, g_y, g_z : Componentes de la gravedad
- H : Altura del pórtico
- $H^*\{i\omega\}$: Función de transferencia del sistema

- h : Separación entre la cabeza del pistón y las paredes internas de la capsula
- \hat{i} : Vector unitario en la dirección x
- \hat{j} : Vector unitario en la dirección y
- K_1 : Rigidez de almacenamiento
- K_2 : Rigidez de pérdida
- K_b : Rigidez de brazos de conexión
- K, K_i, K_L : Rigidez lateral
- \bar{K}_i : Rigidez efectiva
- K_{eq}, K_b^* : Rigidez equivalente
- K_{eff} : Rigidez efectiva del disipador
- \hat{k} : Vector unitario en la dirección z
- L : Luz del pórtico
- M, m : Masa del sistema
- N : Número de puntos del registro
- \hat{n} : Vector normal a la superficie de control
- L_p : Longitud de la cabeza de pistón
- P, p : Presión
- P_m : Presión promedio
- q : Orden de derivada
- R : Radio interno de la capsula
- R_p : Radio de la cabeza del pistón
- r : Variable de coordenada, orden de derivada
- $s.c$: Superficie de control
- t : Tiempo
- T_o : Temperatura
- T_D : Periodo amortiguado
- U : Amplitud de la aceleración en la base
- u : Componente x de velocidad
- u_g : Desplazamiento en la base
- \ddot{u}_g : Aceleración en la base
- V : Velocidad del fluido
- v : Componente y de velocidad
- $v.c$: Volumen de control

- v_z, v_θ : Componentes de velocidad
 W : Trabajo
 w : Componente z de velocidad
 ϖ, w : Frecuencia de movimiento
 ω : Frecuencia, frecuencia natural del sistema
 ω_d : Frecuencia natural amortiguada
 x_0 : Desplazamiento inicial
 x_p : Solución particular
 x_h : Solución homogénea
 \dot{x}_0 : Velocidad inicial
 x : Variable de coordenada, Desplazamiento relativo del sistema
 \dot{x}_i, \dot{x}_{i+1} : Velocidad relativa
 \ddot{x} : Aceleración relativa
 \ddot{x}_{abs} : Aceleración absoluta del sistema
 x_b, z_i : Desplazamiento relativo del brazo
 x_d, x_i : Desplazamiento relativo del disipador
 x, u_i : Desplazamiento relativo del pórtico
 \dot{x}_b, \dot{z}_i : Velocidad relativa del brazo
 \dot{x}_d, \dot{x}_i : Velocidad relativa del disipador
 \dot{x}, \dot{u}_i : Velocidad relativa del pórtico
 \ddot{x}_i : Aceleración relativa del disipador
 y : Variable de coordenada
 $y(t)$: Carga arbitraria
 z : Variable de coordenada
 \ddot{z}_i : Aceleración relativa del brazo
 ρ : Densidad del líquido, frecuencia de movimiento en la base
 $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}$: Componentes de esfuerzo normal
 $\tau_{xy}, \tau_{zy}, \tau_{yw}$: Componentes de esfuerzo tangencial
 μ : Viscosidad dinámica
 μ^* : Viscosidad compleja
 λ : Tiempo de relajación
 θ : Variable de coordenada
 α : Exponente de la velocidad
 ϕ : Frecuencia de movimiento en la base, ángulo de fase

- β : Relación de frecuencias, parámetro del método de Newmark
 β_{eff} : Porcentaje de amortiguamiento efectivo del disipador
 ξ : Porcentaje de amortiguamiento inherente del sistema
 ξ_{eq} : Porcentaje de amortiguamiento equivalente
 φ : Angulo de fase
 δ : Decremento logarítmico
 γ : Parámetros del método de Newmark
 Δ : Incremento
 $\Delta \bar{P}_i$: Fuerza incremental efectiva
 Δ^+, Δ^- : Desplazamientos máximos positivo y negativo
 Δ_m : Desplazamiento máximo promedio

CAPÍTULO III y IV

- A : Área
 a_b : Aceleración en la base
 b : Ancho
 b_{eff} : Ancho efectivo
 $B_{eff,tran}$: Ancho efectivo transformado
 C, c : Coeficiente de amortiguamiento
 D : Diámetro, Diámetro interno de capsula
 d : Diámetro del pistón
 E : Modulo de elasticidad
 F : Fuerza
 F_a, F_u : Fuerza de amortiguamiento
 F_{cr} : Tensión de pandeo por flexión
 F_e : Tensión crítica de pandeo elástico
 F_y : Limite de fluencia
 f : Frecuencia
 $f'c$: Resistencia a la compresión del concreto
 g : Gravedad
 h : Altura del portico
 I, I_c, I_v : Momento de inercia, Momento de inercia de columna, Momento de inercia de la viga
 K : Rigidez lateral, Factor de longitud efectiva
 K_L, k : Rigidez lateral
 K_c : Rigidez lateral de la columna

- K_{LB} : Rigidez lateral de los brazos
 L : Longitud del portico, Altura de columna
 M, M_e : Momento elástico
 M_{peso} : Momento debido al peso
 $M_{P\text{-DELTA}}$: Momento debido a efectos P-DELTA
 m, m_s : Masa del modelo
 n : Factor de escala
 P_n : Resistencia nominal
 r : Radio de giro
 T : Periodo, Fuerza de tensión y compresión en el brazo
 t : Espesor
 V : Velocidad, Cortante
 Vol : Volumen
 W : Carga distribuida
 ω : Frecuencia natural angular
 Y_{cg} : Centro de gravedad, eje neutro
 π_n : Adimensional n
 Δ_s : Desplazamiento relativo del modelo
 ξ : Porcentaje de amortiguamiento
 γ : Peso específico
 μ : Viscosidad
 ρ : Densidad
 σ : Esfuerzo
 Ω : Frecuencia de movimiento
 ϕ : Factor de reducción de la Resistencia

CAPÍTULO V y VI

- Abs. : Absoluta
Acel. : Aceleración
 C_n : Coeficiente de amortiguamiento natural
Desp. : Desplazamiento
 $E_{C.ABS}$: Energía cinética absoluta
 $E_{C.RELAT}$: Energía cinética relativa
 E_{DEF} : Energía de deformación elástica
 $E_{E.ABS}$: Energía de entrada absoluta
 $E_{E.RELAT}$: Energía de entrada relativa

E_{FD}	: Energía disipada por los disipadores
E_{FV}	: Energía disipada por la fuerza de amortiguamiento inherente
f	: factor de reducción de la fuerza de amortiguamiento
FAD	: Factor de amplificación dinámica
F_a	: Fuerza de amortiguamiento
F_d	: Fuerza de amortiguamiento del disipador
F_I	: Fuerza de inercia
Frec.	: Frecuencia
F_v	: Fuerza de amortiguamiento viscosa, Fuerza de amortiguamiento inherente
g	: Gravedad
K_L	: Rigidez lateral
M	: Masa
Mov.	: Movimiento
P	: Carga impuesta
Relat.	: Relativo (a)
\ddot{u}_g	: Aceleración en la base
Vel.	: Velocidad
W	: Peso de plancha + vástago
\ddot{x}	: Aceleración de la plancha, aceleración relativa
x	: Desplazamiento relativo
\dot{x}	: Velocidad relativa
\ddot{x}	: Aceleración relativa
ν	: Viscosidad cinemática
μ	: Viscosidad dinámica
ρ	: Densidad
ξ, ξ_n	: Porcentaje de amortiguamiento, Porcentaje de amortiguamiento natural

INTRODUCCIÓN

En los últimos años se evidencia en el país un mayor interés en el desarrollo de proyectos estructurales que incluyan los denominados sistemas de control de respuesta pasiva, como aisladores sísmicos y disipadores de energía, para mejorar el comportamiento estructural frente a cargas de viento y sismo.

Los disipadores de energía son dispositivos que van conectados a la estructura generalmente por medio de brazos metálicos. Estos dispositivos tienen como función disipar gran parte de la energía de entrada (originada por el sismo) y así reducir la energía que deba tomar la estructura. Esta reducción implica reducir el desplazamiento y reducir la cantidad de energía disipada mediante el comportamiento histerético en los elementos estructurales, lo que conlleva a reducir el daño. La disipación de energía en estos dispositivos se da por el trabajo realizado por las fuerzas de amortiguamiento que se generan en estos cuando son sometidos a un movimiento cíclico (como sismos o viento). De acuerdo a la naturaleza de la fuerza se clasifica a los disipadores como dependientes del desplazamiento y/o dependientes de la velocidad. Los disipadores dependientes de la velocidad (también denominados viscosos), pero a diferencia de los otros tipos no solo reducen el desplazamiento, sino que también la fuerza de amortiguamiento del disipador no incrementa los esfuerzos en los elementos estructurales.

A pesar de que en el país existen ya trabajos sobre metodologías de diseño y análisis de estructuras con disipadores viscosos, la implementación de esta tecnología en el Perú se reduce a una cantidad muy limitada de estructuras con disipadores viscosos como el caso del Aeropuerto Jorge Chávez, el Centro Comercial El Quinde – Ica, el Edificio de Oficinas el Reducto (en proceso de construcción) y el proyecto de reforzamiento en las oficinas de la SUNAT, principalmente debido a que los costos para su implementación aun es alto para la gran mayoría de proyectos. Este costo está relacionado a que estos disipadores son importados de una cantidad reducida de compañías que prácticamente controlan el mercado. Por tanto existe necesidad de incentivar investigaciones orientadas al diseño, experimentación y fabricación de estos dispositivos usando materiales que se encuentren en el mercado nacional, los cuales puedan reducir los costos de fabricación, y de este modo se desarrollaría tecnología propia para el beneficio del país, del mismo modo como se viene desarrollando en otros países de Latinoamérica como en Chile, en el cual ya

existen prototipos de estos dispositivos en etapas de investigación muy avanzadas.

La presente investigación no tiene un objetivo tan ambiciosos como diseñar un dispositivo disipador a escala real que cumpla con todos los requisitos para aplicaciones en estructuras y esté listo para su producción y venta sino más bien está orientada a realizar una investigación que pueda servir como base para posteriores investigaciones que puedan lograr objetivos tan ambiciosos como los mencionados. En ese sentido la presente investigación tiene como objetivo general proponer un disipador viscoso a escala reducida (1:5) fabricado con materiales disponibles en el mercado nacional capaz de comportarse adecuadamente frente a movimientos cíclicos. De este objetivo general se desprenden los siguientes objetivos específicos:

- Determinar el tipo de configuración, dimensiones y materiales adecuados para que el dispositivo disipador funcione correctamente.
- Buscar los posibles líquidos viscosos disponibles en mercado nacional y basados en ensayos de laboratorio elegir el más conveniente.
- Estudiar el comportamiento de la fuerza de amortiguamiento tanto para un ensayo de carga monotónica como para un ensayo dinámico en mesa vibradora.
- Estudiar la reducción de la respuesta en un modelo tridimensional a escala 1:5 cuando se incorpora los disipadores viscosos. Para ello se compara las respuestas del modelo con y sin el disipador viscoso, sometido a un ensayo dinámico sobre mesa vibradora, tanto para un movimiento sísmico como sinusoidal.

En la presente investigación se propone una configuración simple para el disipador por dos razones: el primero relacionado a que una configuración simple es menos costosa que una configuración con muchos detalles y elementos; y el segundo relacionado a analizar las deficiencias que pueda tener esta configuración y se pueda proponer mejoras en investigaciones posteriores.

La presente tesis de investigación ha sido dividida en siete capítulos y cuatro anexos.

En el Capítulo I se hace una revisión de los principales conceptos y formulaciones en un sistema de un grado de libertad, dichas formulaciones serán usadas en el Capítulo III cuando se estudie teóricamente el modelo tridimensional. También se da un alcance de los métodos experimentales para

calcular las características de la estructura como el amortiguamiento natural, dichos métodos serán usados en el capítulo VI cuando se procesen los resultados del ensayo en vibración libre y sinusoidal del modelo tridimensional sin disipadores.

En el Capítulo II se presenta los conceptos referentes a disipadores de energía de fluido viscoso, como las diferentes configuraciones que existen, de las cuales se escoge una de ellas para la propuesta de disipador. Así mismo se presenta un estudio simplificado de disipador pistón en el cual se relaciona la fuerza de amortiguamiento con las características geométricas y viscosidad del líquido, las formulaciones obtenidas serán usadas para compararlas con los resultados experimentales en el Capítulo VI. También se presenta los modelos matemáticos usados para relacionar la fuerza de amortiguamiento y la velocidad, y se hace un análisis teórico de la respuesta de un sistema de un grado de libertad con los diferentes modelos estudiados. En esta sección se estudia el método numérico paso a paso que será usado para realizar los análisis teóricos en el Capítulo VI. Adicionalmente se describe los requerimientos para estudios experimentales de disipadores según el ASCE-7-10[1], en el cual también se describen las formulaciones para obtener el amortiguamiento lineal equivalente del disipador, que será calculado en el Capítulo VI.

En el Capítulo III se estudia las características del modelo tridimensional como dimensiones, masa, rigidez y los materiales que serán usados para construirla. También se hace el análisis de similitud para encontrar los factores de escala y calcular las propiedades del prototipo correspondiente a este modelo. En este capítulo se determinan los valores máximos de aceleración absoluta en la losa del modelo y cortante basal al que puede estar sometido para que se comporte dentro del rango elástico. Estos valores serán usados en el Capítulo VI para verificar que el modelo no ha incursionado en el rango inelástico.

En el Capítulo IV se estudia el dispositivo disipador viscoso comenzando con un análisis de similitud, en el cual se encuentra el factor de escala de la viscosidad. Se propone la configuración, dimensiones y materiales a usar tanto para el dispositivo disipador. Además se describen los detalles de conexión entre el modelo tridimensional y el disipador, así como las dimensiones y materiales del brazo de conexión. En este capítulo se presenta los líquidos viscosos escogidos con sus respectivos valores de viscosidad obtenidos en las referencias

bibliográficas, dichos valores serán determinados con mayor precisión en los ensayos de viscosidad presentados en el Capítulo VI.

En el Capítulo V se describen todos los ensayos realizados (ensayo de viscosidad, ensayo de carga monotónica o preliminar y ensayo dinámico sobre mesa vibradora). Se detalla el alcance, los procedimientos, los instrumentos y detalles de cómo serán analizados en el Capítulo VI.

En el Capítulo VI se presentan los siguientes resultados: Viscosidad dinámica a 18°C y 40°C de los líquidos ensayados; Curvas de Fuerza de amortiguamiento vs Velocidad en el ensayo preliminar, los cuales sirvieron de base para determinar el líquido a usarse en el disipador; Valores experimentales de rigidez y amortiguamiento natural para el modelo tridimensional; Curvas de Fuerza de Amortiguamiento vs Velocidad del disipador en el ensayo dinámico sobre mesa vibradora y se hace una comparación con las curvas obtenidas en el ensayo preliminar; Coeficiente de amortiguamiento lineal equivalente para movimientos sinusoidales del ensayo dinámico en mesa vibradora; Respuestas del modelo tridimensional con y sin disipador para los movimientos sinusoidales y sísmicos; Porcentaje de reducción en la respuesta para los movimientos sinusoidales y sísmicos; y por último se presentan los resultados del ensayo dinámico adicional con barrido de frecuencias en el cual el disipador llega a una etapa de falla.

En el Capítulo VII se presenta las conclusiones y recomendaciones

En el Anexo I se presenta los certificados de ensayo de viscosidad y propiedades de la glicerina

En el Anexo II se presenta la instrumentación, ubicación y verificación de sensores

En el Anexo III se presenta un método analítico aproximado para resolver un sistema de un grado de libertad con amortiguamiento suplementario del tipo exponencial bajo un movimiento sinusoidal. Este anexo es complementario a los análisis teóricos presentados en el Capítulo II.

En el Anexo IV se presenta un registro fotográfico

CAPÍTULO I SISTEMAS DE UN GRADO DE LIBERTAD

En este capítulo se revisa brevemente los principales conceptos y formulaciones que se utilizan en el estudio de sistemas de un grado de libertad. La importancia de este capítulo reside en que en los capítulos siguientes se hacen referencias a fórmulas contenidas en este capítulo.

Se estudia el movimiento de un pórtico plano sometido a un movimiento en su base (Figura N° 1.1a). La idealización de este pórtico se muestra en la Figura N° 1.1b, en la cual se colocan todas las variables que intervienen en el movimiento como: la masa M , la rigidez lateral K , el coeficiente de amortiguamiento inherente del pórtico C , la aceleración en la Base \ddot{u}_g .

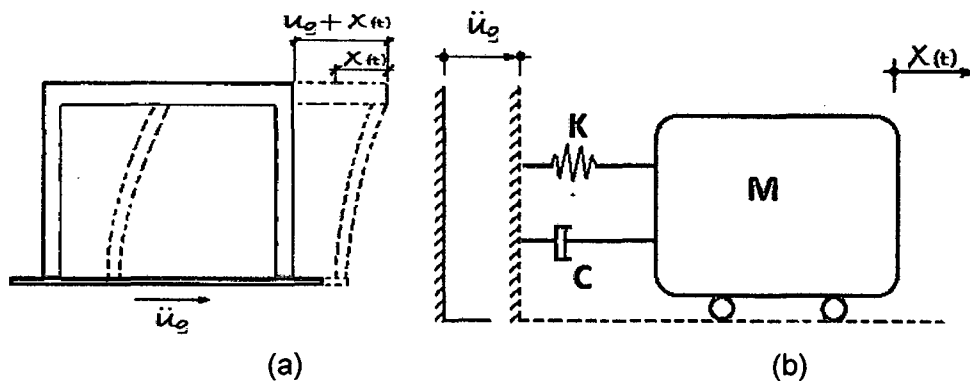


Figura N° 1.1 Sistema de un grado de libertad: (a) Pórtico e (b) Idealización

La ecuación de movimiento para este sistema es el siguiente:

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = -M\ddot{u}_g \quad (1.1)$$

A esta última ecuación se le denomina ecuación de movimiento de un sistema de un grado libertad amortiguada sometida a una vibración forzada (referido a la aceleración en la base). Antes de ver la solución de este sistema es conveniente ver el movimiento amortiguado en vibración libre.

1.1 MOVIMIENTO AMORTIGUADO EN VIBRACION LIBRE

La vibración libre ocurre cuando la excitación que inicio la vibración (en nuestro caso la aceleración en la base) desaparece. La ecuación de movimiento en vibración libre es:

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = 0 \quad (1.2)$$

La solución depende del valor del porcentaje de amortiguamiento ξ :

$$\xi = \frac{C}{2M\omega} \quad (1.3a)$$

$$\omega = \sqrt{\frac{K}{M}} \quad (\text{frecuencia natural de vibración}) \quad (1.3b)$$

1.1.1 Movimiento sub-amortiguado ($\xi < 1$)

$$x = e^{-\xi\omega t} \left[x_0 \cos\omega_d t + \left(\frac{\dot{x}_0 + \omega x_0 \xi}{\omega_d} \right) \text{sen}\omega_d t \right] \quad (1.4)$$

Este tipo de solución corresponde a un movimiento oscilatorio en el cual la amplitud decrece exponencialmente con el tiempo (Ver Figura N° 1.2).

1.1.2 Movimiento críticamente amortiguado ($\xi = 1$)

$$x = e^{-\xi\omega t} [x_0 + (\dot{x}_0 + \omega x_0)t] \quad (1.5)$$

Este tipo de movimiento no es oscilatorio y la amplitud decae muy rápido.

1.1.3 Movimiento sobre-amortiguado ($\xi > 1$)

$$x = \left[\frac{x_0(-\xi\omega - \omega_d) - \dot{x}_0}{-2\omega_d} \right] e^{(-\xi\omega + \omega_d)t} + \left[\frac{\dot{x}_0 - x_0(-\xi\omega + \omega_d)}{-2\omega_d} \right] e^{(-\xi\omega - \omega_d)t}, \quad \omega_d = \sqrt{\xi^2 - 1} \quad (1.6)$$

Al igual que el movimiento críticamente amortiguado, este tampoco es un movimiento oscilatorio, pero la diferencia es que la amplitud no decae tan rápido.

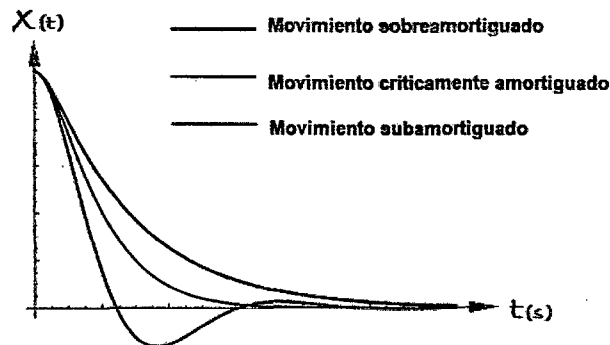


Figura N° 1.2 Curvas de movimientos amortiguados

1.2 MOVIMIENTO AMORTIGUADO FORZADO

En esta sección se revisa el movimiento forzado generado por un movimiento en la base sinusoidal y sísmica.

1.2.1 Movimiento sinusoidal

En este caso \ddot{u}_g es una función seno de amplitud U y frecuencia angular ρ . Por tanto la ecuación de movimiento es:

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = -MU\text{sen}(\rho t) \quad (1.7)$$

La solución está formada por: la solución homogénea y la solución particular. La solución homogénea es la solución del movimiento en vibración libre y la solución particular es:

$$x_p = \frac{\frac{MU}{K}}{\sqrt{(1-\beta^2)^2 + (2\beta\xi)^2}} \text{sen}(\rho t - \varphi) \quad (1.8)$$

Dónde:

$$\text{Tan}(\varphi) = \frac{2\beta\xi}{1-\beta^2} \text{ y } \beta = \frac{\rho}{\omega} \quad (1.9)$$

Por tanto la solución general para la ecuación (1.7) es:

$$x = x_h + \frac{\frac{MU}{K}}{\sqrt{(1-\beta^2)^2 + (2\beta\xi)^2}} \text{sen}(\rho t - \varphi) \quad (1.10)$$

La solución homogénea también es llamada solución **transitoria** del sistema porque decrece muy rápido con el tiempo y la solución particular es llamada solución **permanente** y es la que gobierna el movimiento del sistema, es por ello que tiene mayor importancia en el análisis.

Usando la amplitud de la solución permanente se calcula el factor de amplificación dinámica (FAD):

$$FAD = \frac{\text{Desplazamiento Dinamico}}{\text{Desplazamiento estatico}} = \frac{x}{\left(\frac{MU}{K}\right)} \quad (1.11)$$

$$FAD = \frac{1}{\sqrt{(1-\beta^2)^2 + (2\beta\xi)^2}} \quad (1.12)$$

El FAD para diferentes valores de frecuencia natural y amortiguamiento se muestra en la Figura N° 1.3. En esta gráfica se observa que el incremento de amortiguamiento reduce drásticamente la respuesta.

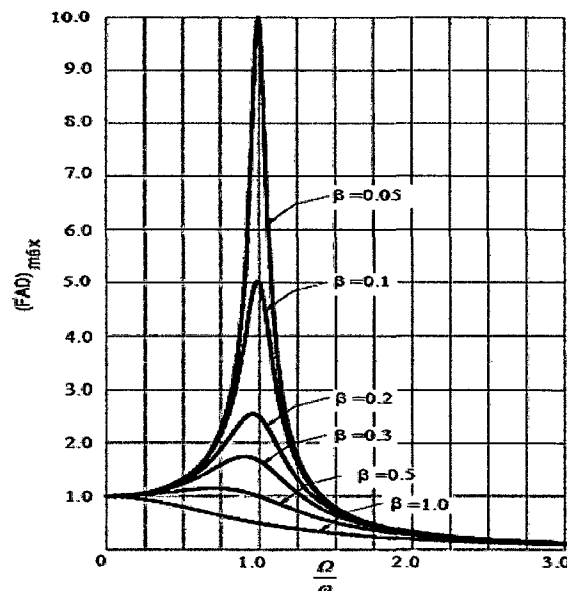


Figura N° 1.3 Curvas del FAD para diferentes valores de amortiguamiento [18]

1.2.2 Movimiento sísmico

El registro sísmico está formado por un conjunto de valores de aceleración registrados cada cierto intervalo de tiempo (Ver Figura N° 1.4).En esta sección se revisara el método numérico paso a paso para determinar la respuesta.

Este es un método muy eficiente para sistemas complejos como sistemas no lineales y con entrada arbitraria, como es el caso. El método consiste en analizar el sistema en intervalos pequeños de tiempo (paso). En cada paso: se evalúa la ecuación de equilibrio dinámico del sistema; se considera constantes la rigidez y amortiguamiento (se usan los valores tangentes o secante en sistemas no lineales); y se establecen relaciones entre los incrementos de desplazamiento, velocidad y aceleración en cada paso. La precisión del método aumenta al hacer más pequeño el intervalo de tiempo.

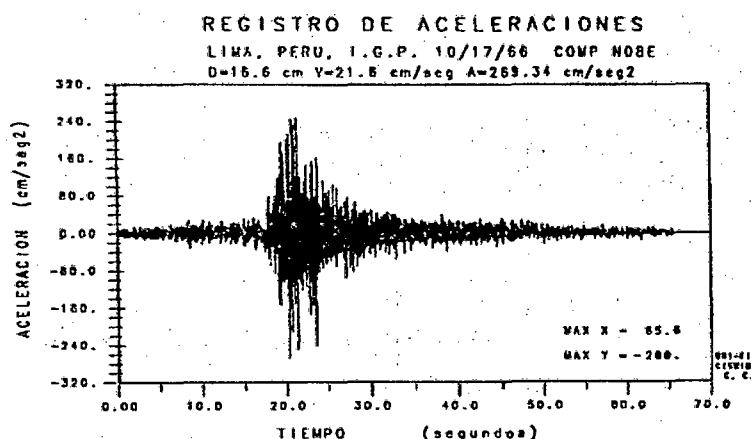


Figura N° 1.4 Registro Sísmico de aceleraciones [18]

Existen diferentes métodos que nos proporcionan las relaciones entre los incrementos de desplazamiento, velocidad y aceleración. En esta sección se revisara brevemente el método de Newmark.

En el tiempo t_i se definen los siguientes valores:

$$\Delta x_i = x_{i+1} - x_i \text{ (Incremento de desplazamiento)} \quad (1.13a)$$

$$\Delta \dot{x}_i = \dot{x}_{i+1} - \dot{x}_i \text{ (Incremento de velocidad)} \quad (1.13b)$$

$$\Delta \ddot{x}_i = \ddot{x}_{i+1} - \ddot{x}_i \text{ (Incremento de aceleración)} \quad (1.13c)$$

El método de Newmark utiliza dos parámetros (γ y β) para relacionar el incremento de desplazamiento, velocidad y aceleración. Se recomienda utilizar $\gamma = 1/2$ y $\beta = 1/4$ [16] para que el método sea incondicionalmente estable.

Dichas relaciones son las siguientes:

$$\Delta \dot{x}_i = \ddot{x}_i \Delta t + \frac{\Delta \ddot{x}_i}{2} \Delta t \quad ; \quad \Delta x_i = \dot{x}_i \Delta t + \frac{\ddot{x}_i}{2} \Delta t^2 + \frac{\Delta \ddot{x}_i}{4} \Delta t^2 \quad (1.14)$$

La ecuación incremental de movimiento definido para el tiempo t_i es:

$$M\Delta\ddot{x}_i + C\Delta\dot{x}_i + K\Delta x_i = -M\Delta\ddot{u}_{g i} \quad (1.15)$$

El incremento de desplazamiento en cada paso se calcula como [16]:

$$\Delta x_i = \frac{\Delta P_i}{\bar{K}_i} \quad (1.16)$$

$$\Delta P_i = -M\Delta\ddot{u}_{g i} + \left[\frac{4M}{\Delta t} + 2 \right] \dot{x}_i + 2M\ddot{x}_i ; \bar{K}_i = K + \frac{4M}{\Delta t^2} + 2 \frac{C}{\Delta t} \quad (1.17)$$

En cada paso debemos obtener los valores de ΔP_i y \bar{K}_i para obtener el valor de Δx_i , el cual es utilizado para obtener de acuerdo a las ecuaciones (1.13) los valores de desplazamiento y velocidad al final del intervalo. Para asegurar el equilibrio en todos los pasos el valor de la aceleración se calcula de:

$$M\ddot{x}_{i+1} + C\dot{x}_{i+1} + Kx_{i+1} = -M\ddot{u}_{g i+1} \quad (1.18)$$

El procedimiento se repite en todo el intervalo de duración del sismo para obtener la respuesta estructural completa (desplazamiento, velocidad y aceleración absoluta).

Con los valores máximos se grafican los espectros de respuesta para un determinado sismo (Ver Figura N° 1.5).

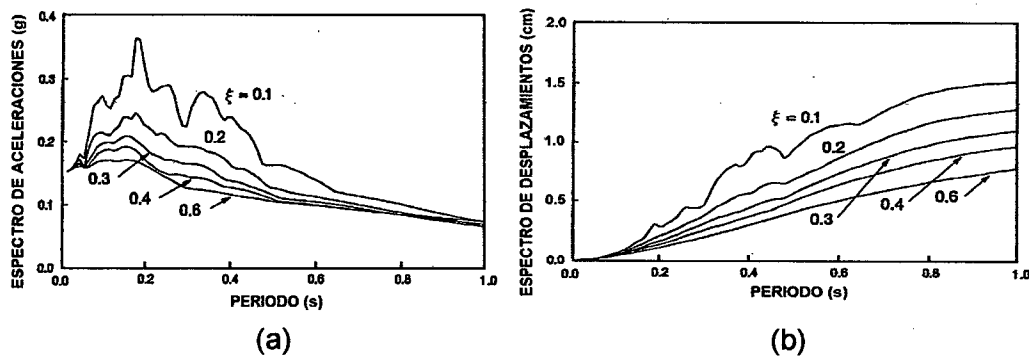


Figura N° 1.5 Espectro de Respuesta (a) aceleraciones (b) desplazamiento [5]

Se observa que un aumento en el amortiguamiento conlleva a una reducción tanto en desplazamiento como en la aceleración. Mientras que un aumento en la rigidez o que es lo mismo a una reducción del periodo también conduce a una reducción del desplazamiento sin embargo puede ocurrir un aumento en la aceleración.

1.3 BALANCE DE ENERGIA DEL SISTEMA

Se hará el análisis desde el punto de vista energético. Para ello referenciamos el análisis del sistema a la Figura N° 1.6. Estando el sistema la posición A, se genera un movimiento en la base \ddot{u}_g , la cual desplaza todo el sistema al punto B.

La masa adquiere un desplazamiento relativo x y un desplazamiento absoluto $x_{abs} = x + u_g$. La masa adquiere una aceleración absoluta $\ddot{x}_{abs} = \ddot{x} + \ddot{u}_g$.

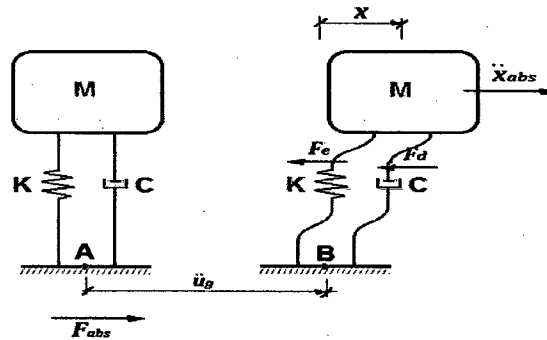


Figura N° 1.6 Sistema de un grado de libertad con aceleración en la base

Es posible interpretar que el movimiento en la base es generado por una fuerza en la base, la cual debe tener una magnitud tal que provoca la aceleración \ddot{x}_{abs} de la masa y se calcula aplicando la segunda ley de Newton:

$$F_{abs} = m\ddot{x}_{abs} \quad (1.19)$$

El trabajo de dicha fuerza es igual a su magnitud por el desplazamiento en la base (esta fuerza es aplicada de A hacia B). Este trabajo se puede interpretar como la energía de entrada al sistema:

$$E_{entrada} = W_{u_g}^{F_{abs}} = \int m\ddot{x}_{abs} du_g \quad (1.20)$$

Esta energía es llamada energía absoluta de entrada. La conservación de energía implica que esta energía se transforma a otros tipos de energía que a continuación se describe.

Parte de la energía de entrada se transforma en energía cinética, esta es la responsable de que la masa adquiere cierta velocidad. La energía cinética absoluta es calculada con la siguiente expresión:

$$E_{cinetica} = \frac{m\dot{x}_{abs}^2}{2} \quad (1.21)$$

Otra parte de la energía de entrada se transforma en Energía de deformación, que es la responsable de que el elemento resorte se deforme. Para calcular la energía de deformación es necesario conocer la fuerza que produce esta deformación. Considerando un comportamiento lineal elástico para el elemento resorte (Ver Figura N° 1.7), la fuerza de deformación elástica es igual a la rigidez del sistema por el desplazamiento relativo. La energía de deformación es igual al trabajo de dicha fuerza:

$$E_{deformacion} = \int K x dx = \frac{Kx^2}{2} \quad (1.22)$$

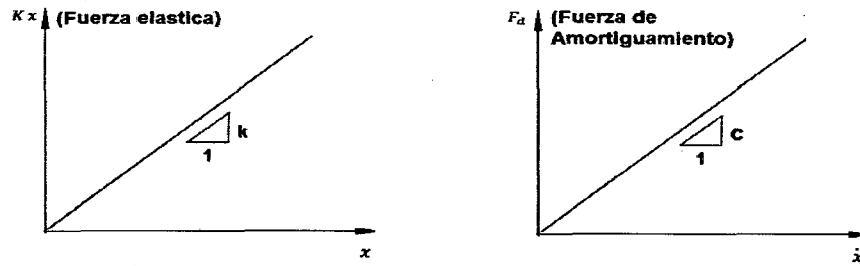


Figura N° 1.7 Curvas de comportamiento(a) Rigidez (b) Amortiguamiento

Por otro lado otra parte de la energía de entrada se disipa debido a que el sistema cuenta con un elemento disipador. La energía disipada es igual al trabajo realizado por la fuerza de amortiguamiento. Dependiendo del tipo de amortiguamiento la fuerza adquiere diferentes tipos de comportamiento. Considerando un amortiguamiento viscoso (Figura N° 1.7) la energía disipada es:

$$E_{disipada} = W_x^{F_{amort}} = \int c \dot{x} dx \quad (1.23)$$

Ahora escribamos la ecuación de balance de energía, en la cual por un lado tengamos la energía de entrada y por otro los diferentes tipos de energía de salida:

$$E_{cinetica} + E_{disipada} + E_{deformacion} = E_{entrada} \quad (1.24)$$

$$\frac{m\dot{x}_{abs}^2}{2} + \int c \dot{x} dx + \frac{Kx^2}{2} = \int m\ddot{x}_{abs} du_g \quad (1.25)$$

En esta expresión se tiene la energía cinética y de entrada absolutas. Es posible derivar las expresiones para la energía cinética y de entrada relativas. Para ello primero se escribe la energía cinética absoluta en su forma equivalente:

$$\frac{m\dot{x}_{abs}^2}{2} = \int m\dot{x}_{abs} d\dot{x}_{abs} \quad (1.26)$$

Reemplazando en la ecuación (1.25) se obtiene:

$$\int m\dot{x}_{abs} d\dot{x}_{abs} + \int c \dot{x} dx + \frac{Kx^2}{2} = \int m\ddot{x}_{abs} du_g \quad (1.27)$$

Expandiendo todos los términos y haciendo uso de las siguientes expresiones:

$$\dot{x} = \frac{dx}{dt} ; \ddot{x} = \frac{d\dot{x}}{dt} ; \ddot{u}_g = \frac{d\dot{u}_g}{dt} \quad (1.28)$$

Se obtiene:

$$\int m(\ddot{x}) dx + \int c \dot{x} dx + \frac{Kx^2}{2} = - \int m\ddot{u}_g dx \quad (1.29)$$

En esta ecuación el primer término se denomina energía cinética relativa y el único término de lado derecho, energía de ingreso relativo.

1.4 MÉTODOS EXPERIMENTALES PARA OBTENER EL AMORTIGUAMIENTO INHERENTE

En esta sección describiremos los métodos experimentales para obtener el amortiguamiento inherente de un sistema de un grado de libertad.

1.4.1 Método decremento logarítmico [16]

Este método se basa en inducir una vibración libre en el sistema, esto es posible aplicando una carga en un instante pequeño como si fuese un pulso, y registrar la respuesta luego de que entre en vibración libre. De este modo si el sistema es sub amortiguado el registro de desplazamiento relativo obtenido será como se muestra en la **Figura N° 1.8** y su ecuación de movimiento, es decir la ecuación (1.4) se puede reducir a:

$$x = \bar{A}e^{-\xi\omega t} \cos(\omega_D t - \alpha), \quad \omega_D = \omega\sqrt{1 - \xi^2} \quad (1.30)$$

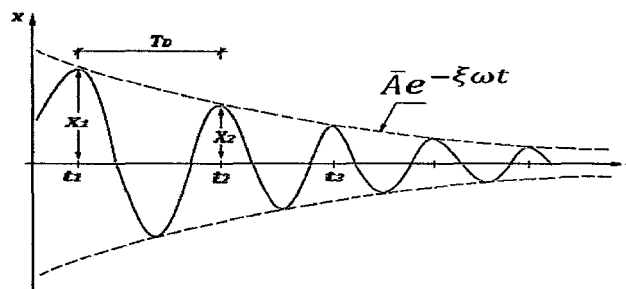


Figura N° 1.8 Decremento Logarítmico

Los puntos de la curva donde las amplitudes son máximas siguen la curva $y = \bar{A}e^{-\xi\omega t}$. El periodo de tiempo entre dos máximos (T_D) es el periodo amortiguado y en base a la siguiente relación se calcula la frecuencia angular amortiguada ω_D :

$$T_D = 2\pi/\omega_D \quad (1.31)$$

Si tomamos dos amplitudes máximas consecutivas x_1 y x_2 se establece que:

$$x_1 = \bar{A}e^{-\xi\omega t_1}; \quad x_2 = \bar{A}e^{-\xi\omega(t_1+T_D)} \quad (1.32)$$

Al dividir estas dos expresiones y tomarle logaritmo neperiano obtenemos lo que se denomina decremento logarítmico:

$$\delta = \ln \frac{x_1}{x_2} = \xi\omega T_D \quad (1.33)$$

$$\delta = \frac{2\pi\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \cong 2\pi\xi \quad (1.34)$$

La última aproximación se justifica cuando se tiene porcentajes de amortiguamiento muy pequeños sin embargo es posible usarla en su forma no simplificada para porcentajes de amortiguamiento más grandes.

Otra forma alternativa de calcular el amortiguamiento haciendo uso de la gráfica desplazamiento vs tiempo experimental es haciendo un ajuste exponencial a los valores máximo. Esto nos daría una ecuación para la curva de ajuste igual a:

$$X_{max} = Ae^{-Bt} \quad (1.35)$$

Comparando esta ecuación con la ecuación (1.32) se obtiene que:

$$\xi = B/\omega \quad (1.36)$$

1.4.2 Método de energía [4]

Este método se utiliza para encontrar el amortiguamiento lineal equivalente en sistemas cuyo amortiguamiento no sea del tipo viscoso. El método se basa en que la energía disipada debe ser igual a la energía disipada por un sistema de amortiguamiento viscoso. Primero se calcula cual es la energía disipada por un amortiguamiento viscoso bajo un movimiento sinusoidal. Para ello se considera que el desplazamiento relativo del sistema es:

$$x = \bar{A} \operatorname{sen} \rho t \quad (1.37)$$

En este caso fuerza de amortiguamiento viscosa es:

$$F_v = C_{eq} \dot{x} = C_{eq} \bar{A} \rho \cos \rho t \quad (1.38)$$

La energía disipada se calcula como el trabajo de la fuerza de amortiguamiento:

$$E_{dv} = \int C_{eq} \bar{A} \rho \cos \rho t dx = \int_0^{\frac{2\pi}{\rho}} C_{eq} \bar{A}^2 \rho^2 \cos^2 \rho t dt = C_{eq} \bar{A}^2 \rho \pi \quad (1.39)$$

Luego se debe calcular la energía real disipada (E_d) por el sistema, para ello se debe graficar la curva Fuerza de amortiguamiento vs Desplazamiento relativo. El área bajo esa curva nos proporciona el trabajo realizado por la fuerza de amortiguamiento, es decir la energía disipada. Una vez calculada esa área se iguala a la ecuación (1.39) para establecer la igualdad de energías. Despejando el coeficiente de amortiguamiento equivalente se obtiene:

$$C_{eq} = \frac{E_d}{\bar{A}^2 \rho \pi} \rightarrow \xi_{eq} = \frac{E_d}{2m\bar{A}^2 \rho \pi \omega} \quad (1.40)$$

Usando la ecuación de la energía de deformación elástica E_{def} :

$$E_{def} = \frac{K\bar{A}^2}{2} = \frac{m\omega^2 \bar{A}^2}{2} \quad (1.41)$$

El amortiguamiento puede ser expresado como:

$$\xi_{eq} = \frac{E_d \omega}{4\pi E_{def} \rho} \quad (1.42)$$

Y cuando la frecuencia de movimiento tiene es igual a la frecuencia natural se obtiene:

$$\xi_{eq} = \frac{E_d \omega}{4\pi E_{def} \rho} \quad (1.43)$$

CAPÍTULO II

DISIPADORES DE ENERGIA DE FLUIDO VISCOSO

2.1 CONTROL ESTRUCTURAL USANDO DISIPADORES DE ENERGIA

El objetivo del diseño sísmico es reducir la respuesta de la estructura a niveles aceptable dependiendo el tipo de estructura. Existen dos enfoques para la reducción de la respuesta: el enfoque tradicional y el enfoque moderno.

El enfoque tradicional consiste en proveer a la estructura mayor rigidez (por tanto menores desplazamientos) y una ductilidad adecuada en algunas zonas de la estructura para que se comporten en el rango inelástico ante una sollicitación extrema y se pueda disipar la energía debido al comportamiento histerético.

El enfoque moderno consiste en introducir elementos externos a la estructura. Al conjunto de dichos elementos se le denomina sistemas de control estructural. La parte de la mecánica estructural que maneja estos conceptos es denominada control estructural [25]. Los sistemas de control estructural se clasifican en pasivos, semiactivos, híbridos y activos (Ver Figura N° 2.1). Los disipadores de energía se encuentran dentro de la clasificación de sistemas de control estructural pasivo.

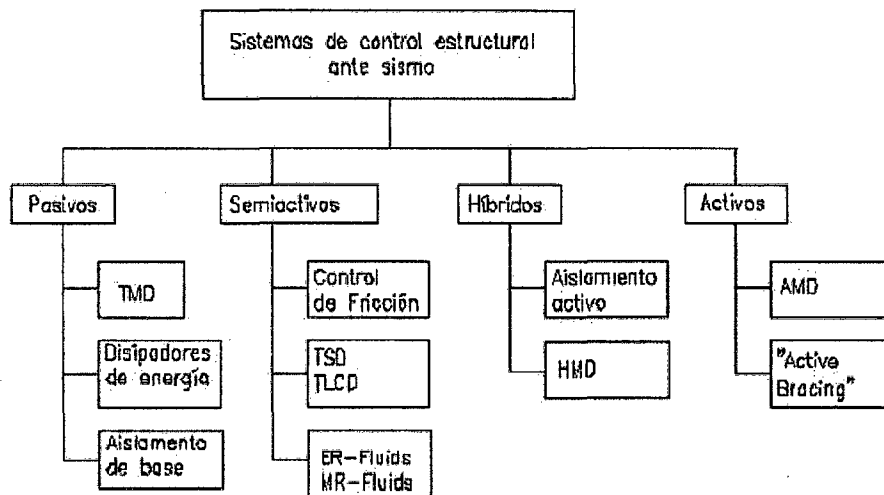


Figura N° 2.1 Sistemas de Control Estructural [25]

Los disipadores de energía son dispositivos capaces de proporcionar fuerzas de amortiguamiento adicional a la estructura que ayudan a reducir la respuesta.

Desde el punto de vista energético al incluir la energía de disipación de los disipadores en el balance energético del sistema y manteniendo la energía de

entrada constante, se reducen los otros términos de la energía como: energía de amortiguamiento natural, energía cinética y de deformación elástica (reduciendo los desplazamientos y velocidades) como se muestra en la siguiente ecuación.

$$\frac{m\dot{x}_{abs}^2}{2} + \int c\dot{x} dx + \frac{Kx^2}{2} + \int F_a dx = \int m\ddot{x}_{abs} d(u_g) \quad (2.1)$$

En donde F_a es la fuerza de amortiguamiento del disipador y $\int F_a dx$ es el trabajo realizado por la fuerza de amortiguamiento o energía de disipación suplementaria.

Dependiendo de la naturaleza de la fuerza de amortiguamiento los disipadores se clasifican en: Dependientes del desplazamiento, dependientes de la velocidad y dependientes del desplazamiento y la velocidad.

Los disipadores dependientes del desplazamiento generalmente aumentan la rigidez de la estructura por tanto reducen el periodo. De acuerdo a la sección 1.2.2, en relación a los espectros de respuesta, se puede decir que estos disipadores reducen el desplazamiento y la velocidad pero no la aceleración absoluta. Estos disipadores se basan en la plastificación de metales o la fuerza de fricción originada en la interfaz de dos superficies en movimiento. Un disipador del tipo plastificación de metales se muestra en la Figura N° 2.2.

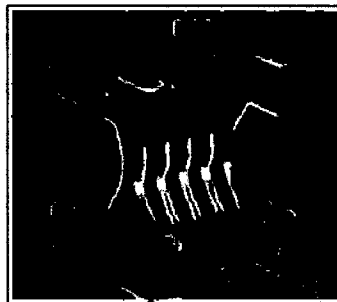


Figura N° 2.2 Disipador dependiente de desplazamiento por plastificación [10]

Los disipadores dependientes de la velocidad aumentan solo el amortiguamiento de la estructura por tanto contribuyen a reducir el desplazamiento, velocidad y aceleración absoluta. Comúnmente se les denomina viscosos y en general la fuerza de amortiguamiento es originada por la oposición de un líquido viscoso al movimiento de un pistón (Ver Figura N° 2.3).

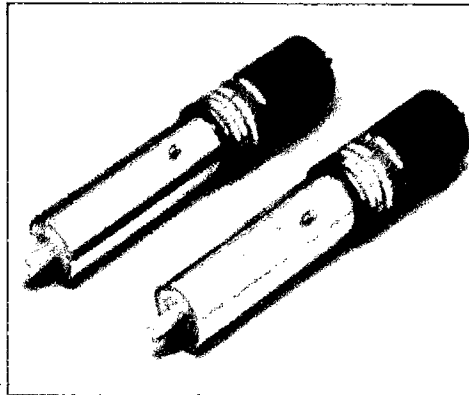


Figura N° 2.3 Disipador Viscoso [10]

Los disipadores dependientes de la velocidad y el desplazamiento se denominan visco-elásticos y se basan principalmente en solidos o líquidos visco elásticos (Ver Figura N° 2.4)

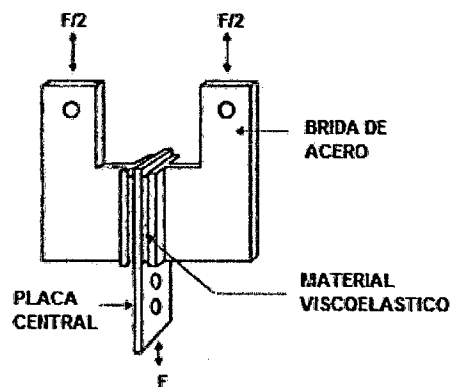


Figura N° 2.4 Disipador Visco-elástico [24]

2.2 TIPOS DE DISIPADORES VISCOSOS

El principio fundamental es que parte de la energía de entrada es convertida en energía cinética necesaria para que el líquido y el pistón se muevan. Luego la energía cinética se convierte a energía calorífica debido al choque y rozamiento del líquido viscoso con el pistón. Se han desarrollado varios tipos de configuraciones que ofrecen este comportamiento. Se presenta 4 tipos de configuraciones muy utilizados:

2.2.1 Disipador tipo muro

En esta configuración se utiliza un recipiente como el mostrado en la Figura N° 2.5 en la cual se llena el líquido viscoso. Este recipiente se conecta al piso inferior. Se añade un plato en el interior del recipiente y este plato se conecta a la parte superior. El movimiento relativo entre los dos pisos provoca que el plato

superior tenga que moverse en el interior del líquido viscoso, provocando esfuerzos de corte (amortiguamiento) en las superficies de contacto.

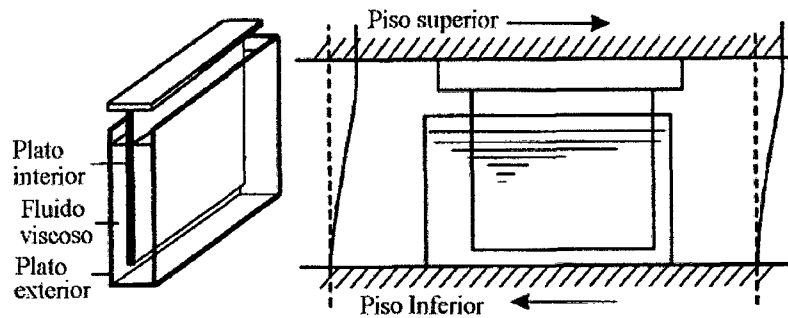


Figura N° 2.5 Esquema del Disipador tipo muro [24]

2.2.2 Disipador rotatorio

El principio de su funcionamiento es transformar el movimiento traslacional en movimiento rotatorio. Este dispositivo contiene una capsula interna con líquido viscoso, en el cual existe un pistón interno tipo cilindro (Ver Figura N° 2.6), este está conectado a otro elemento con un mecanismo de hélice que transforma el movimiento traslacional de un extremo a un movimiento rotacional, este movimiento rotación provoca que el cilindro interior rote alrededor del líquido viscoso. Por tanto es en la superficie de este último elemento donde se producen los esfuerzos de corte que amortiguan el movimiento rotatorio.

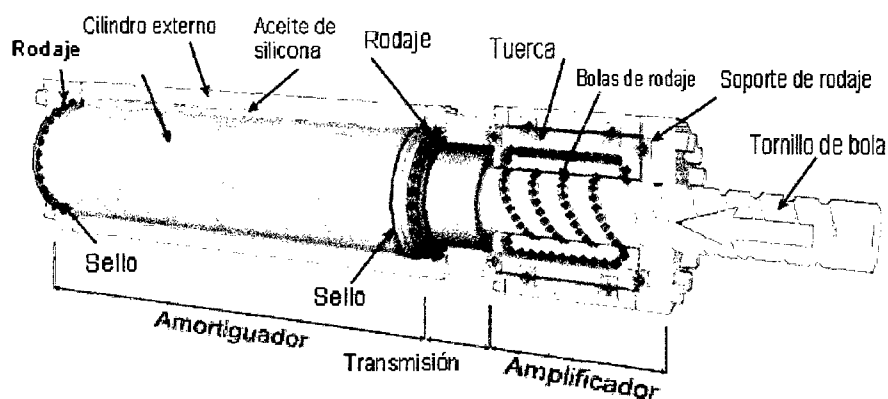


Figura N° 2.6 Esquema del Disipador Rotatorio [8]

2.2.3 Disipador cilíndrico

Este tipo de disipador es muy usado como parte sistemas de protección contra vibraciones en plantas químicas como parte de su sistema de protección sísmica. Este tipo de disipador se muestra en la Figura N° 2.7. El funcionamiento

es muy similar al disipador tipo muro, sin embargo estos disipador pueden amortiguar los movimientos horizontales y verticales.

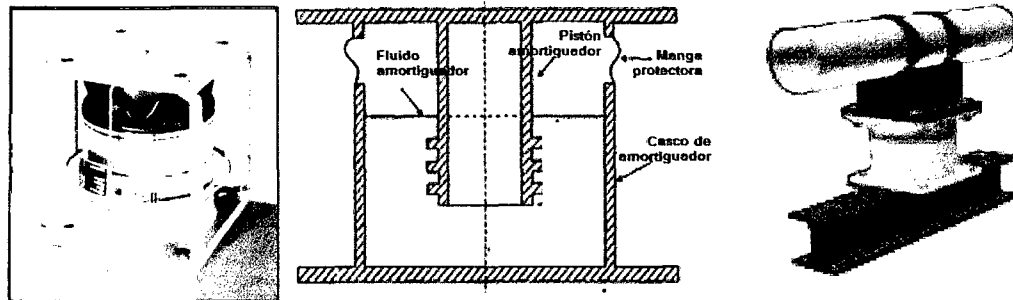


Figura N° 2.7 Esquema del Disipador cilíndrico [24]

El dispositivo consta de un recipiente cilíndrico conectado al piso, en la parte superior se tiene una plancha para conectarla a la tubería, se añade al centro de esa plancha otro elemento cilíndrico que hace la función de pistón y como muestra la Figura N° 2.7 en los bordes se coloca una manga protectora. Bajo esta configuración el cilindro superior puede moverse horizontal y verticalmente.

2.2.4 Disipador de pistón

Este dispositivo tiene una capsula cilíndrica con líquidos viscoso en su interior. Interiormente tiene un pistón capaz de deslizarse a través de la capsula (Ver Figura N° 2.8). La fuerza de amortiguamiento se produce cuando la cabeza del pistón se mueve a través del fluido, es entonces que se produce una diferencia de presión en la cabeza del pistón, y esfuerzos de corte entre las superficie interna de la capsula y la cabeza del pistón debido al movimiento del fluido.

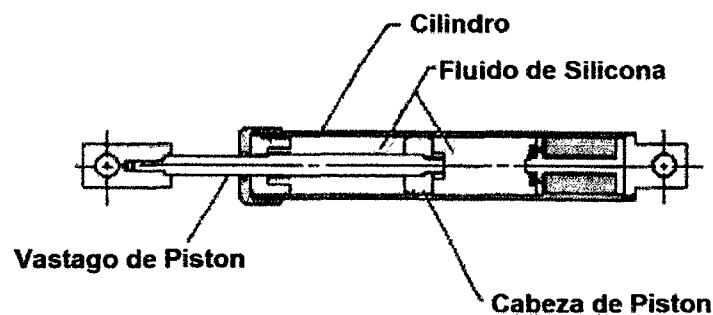


Figura N° 2.8 Esquema del Disipador de pistón [11]

Se han desarrollado cabezas de pistón con orificios (Ver Figura N° 2.9), los cuales tiene la particularidad que la fuerza de amortiguamiento depende de la velocidad elevada a un exponente. La configuración de dichos orificios ajusta el valor del exponente de velocidad [24].

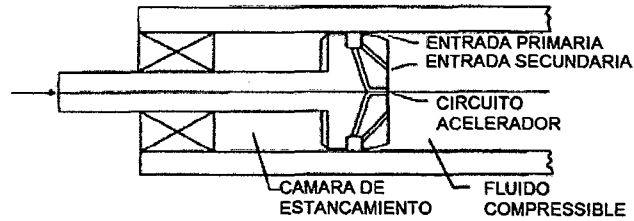


Figura N° 2.9 Esquema del Disipador de pistón con orificios [24]

Debido a que el ingreso del pistón provoca cambios de volumen en el interior de la capsula se colocan válvulas de control y acumuladores para compensar esos cambios de volumen. La configuración completa de estos dispositivos se muestra en la Figura N° 2.10 en el cual se describe sus todos sus elementos:

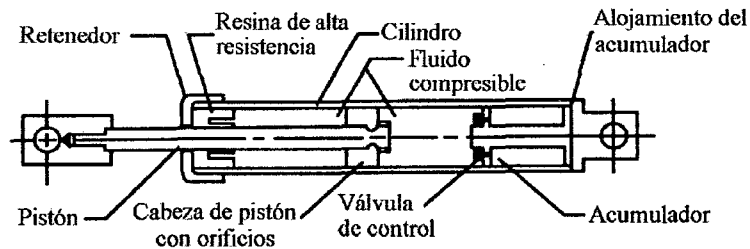


Figura N° 2.10 Elementos del disipador con orificios [24]

La conexión de los disipadores a la estructura se realiza por medio de brazos metálicos como se muestra en la Figura N° 2.11.

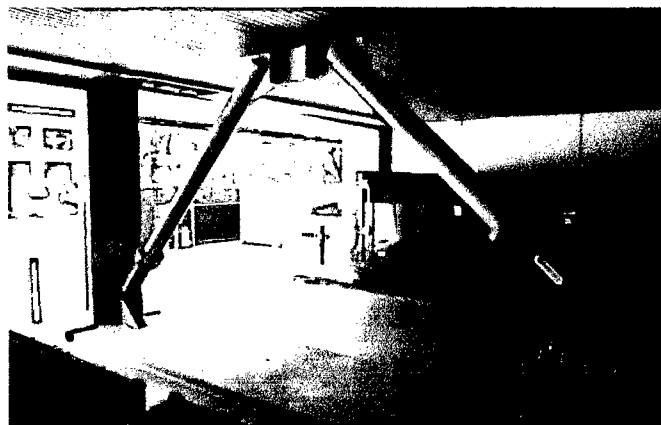


Figura N° 2.11 Conexión de disipadores con brazos metálicos

El movimiento relativo de entrepiso provoca el movimiento necesario en el disipador para genera la fuerza de amortiguamiento.

2.3 ESTUDIO SIMPLIFICADO DEL DISIPADOR PISTÓN

Para estudiar el comportamiento de estos dispositivos se comenzara por presentar las leyes fundamentales de la dinámica de fluidos en fluidos viscosos

newtonianos. Luego se relacionan dichas leyes con la geometría del disipador para obtener la fuerza de amortiguamiento en estos disipadores. En el análisis se harán algunas simplificaciones y estará limitada a ciertas condiciones establecidas en [24].

2.3.1 Leyes fundamentales en dinámica de fluidos [19]

La ecuación integral de conservación de la masa para un volumen de control en un flujo continuo (densidad constante) es:

$$\int_{s.c} \rho \hat{n} \cdot \mathbf{V} dA = 0 \quad (2.2)$$

La ecuación diferencial de cantidad de movimiento para una dirección en coordenadas cartesianas es:

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) - \left(\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right) - \rho g_x = 0 \quad (2.3)$$

En un fluido viscoso existe una relación entre el esfuerzo de corte y la velocidad de deformación. Cuando esta relación es lineal se dice que el fluido es Newtoniano (en la cual la pendiente es la igual a la viscosidad), de lo contrario se tendrá un fluido no newtoniano (Ver Figura N° 2.12).

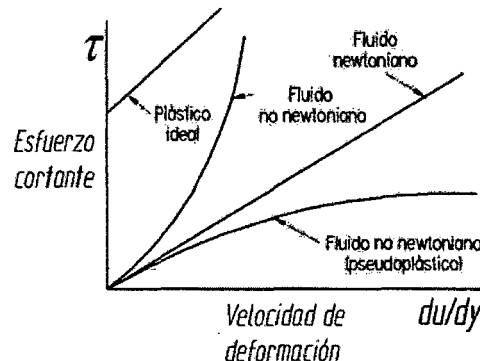


Figura N° 2.12 Esfuerzo cortante vs velocidad de deformación en fluidos [19]

Las relaciones constitutivas para los fluidos newtonianos para una dirección en coordenadas cartesianas son:

$$\sigma_{xx} = -p + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3}\mu \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) ; \quad \tau_{xy} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (2.4)$$

Reemplazando las ecuaciones constitutivas en las ecuaciones diferenciales de cantidad de movimiento se obtiene las **ecuaciones de Navier-Stokes**. Se presenta la ecuación de Navier-Stokes para una dirección en coordenadas cartesianas.

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{\partial p}{\partial x} - \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) - \rho g_x = 0 \quad (2.5)$$

2.3.2 Fuerza de Amortiguamiento

Las características geométricas se presentan en la Figura N° 2.13. Las variables mostradas son: R =Radio interno de la capsula, R_p =Radio de la cabeza del pistón, h =separación entre la cabeza del pistón y las paredes internas de la capsula y L_p =Longitud de la cabeza de pistón. El líquido tiene viscosidad dinámica μ .

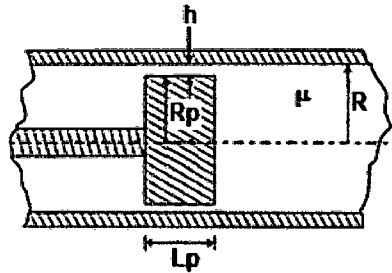


Figura N° 2.13 Geometría del disipador tipo pistón simple [24]

Ahora se analiza el flujo de líquido a través de la región anular. En el análisis se considera que el pistón está en posición fija y la capsula se mueve con velocidad V (Ver Figura N° 2.14). El movimiento de la capsula empuja al líquido a pasar por la región anular.

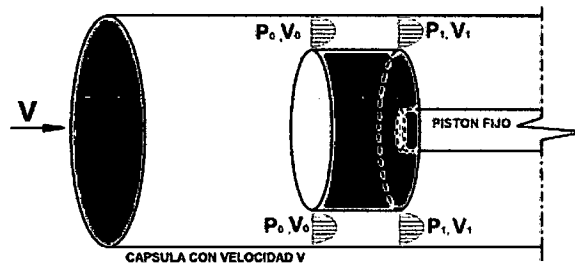


Figura N° 2.14 Esquema del movimiento dentro del disipador

Debido a las características geométricas se usa un sistema de coordenadas cilíndrico. La ecuación de Navier-Stokes solo en la dirección z (ya que se considera un flujo unidireccional) es:

$$\rho \frac{\partial v_z}{\partial t} + \rho \left(v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) + \frac{\partial p}{\partial z} - \mu \left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_z}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right) - \rho g_z = 0 \quad (2.6)$$

Debido al flujo unidireccional $v_r = 0$ y $v_\theta = 0$. También debido a la simetría $\frac{\partial^2 v_z}{\partial \theta^2} = 0$. Por ultimo $g_z = 0$. Entonces la ecuación (2.6) se reduce a:

$$\rho \frac{\partial v_z}{\partial t} + \rho \left(v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) + \frac{\partial p}{\partial z} - \mu \left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right) = 0 \quad (2.7)$$

Donde v_z es velocidad del fluido en la dirección z .

Ahora se considera dos casos particulares

2.3.2.1 Caso no viscoso

Para este caso se supondrá viscosidades muy pequeñas, espaciamiento "h" relativamente largo, conducto de flujo corto "Lp" o alta velocidad de flujo [24]. Con estas características se puede considerar como un fluido inviscido. Además se considera una aceleración pequeña ($\frac{\partial v}{\partial t}=0$). Entonces la ecuación diferencial de cantidad de movimiento (2.7) se convierte a:

$$\rho \left(v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial z} \quad (2.8)$$

Ahora integramos la ecuación a lo largo del pasaje Lp y se obtiene:

$$\frac{\rho}{2} V_1^2 - \frac{\rho}{2} V_0^2 = P_0 - P_1 = \Delta P \quad (2.9)$$

Como V_0 es la velocidad del líquido al ingresar a la región anular, se puede considerar que dicha velocidad es igual a la velocidad de la capsula "V". (Ver Figura N° 2.14).

Ahora se aplica la conservación de la masa en el volumen de control mostrado en la Figura N° 2.15. Eso conduce a establecer:

$$-\pi R^2 V + \pi(R^2 - R_p^2) V_1 = 0 \quad (2.10)$$

$$V_1 = V \left(\frac{R^2}{R^2 - R_p^2} \right) \quad (2.11)$$

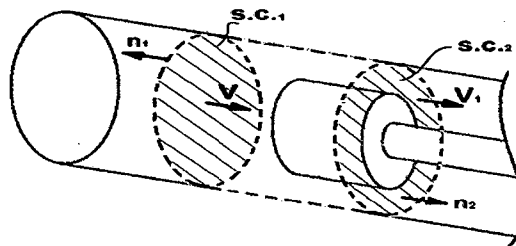


Figura N° 2.15 Esquema de Volumen de control

Reemplazando (2.11) en (2.9) se obtiene:

$$\Delta P = \frac{\rho}{2} V^2 \left[\left(\frac{R^2}{R^2 - R_p^2} \right)^2 - 1 \right] \quad (2.12)$$

Esta diferencia de presión multiplicada por el área de la cabeza de pistón nos da la fuerza de amortiguamiento:

$$F_{no\ viscoso} = \frac{\rho}{2} \left[\left(\frac{R^2}{R^2 - R_p^2} \right)^2 - 1 \right] \pi R_p^2 V^2 \quad (2.13)$$

2.3.2.2 Caso viscoso

Este caso es el opuesto al anterior: altas viscosidades, pequeño espaciamento "h", conducto de flujo largo "Lp" o bajas velocidades de flujo [24]. Bajo estas condiciones se puede asumir un flujo desarrollado en la región anular.

Un flujo desarrollado es aquel en que el perfil de velocidades no varía a lo largo del conducto Lp. Para que esta condición sea aplicable debe existir un conducto Lp lo suficientemente largo en comparación con el espaciamento h. La variación del perfil a lo largo del conducto se muestra en la Figura N° 2.16 .

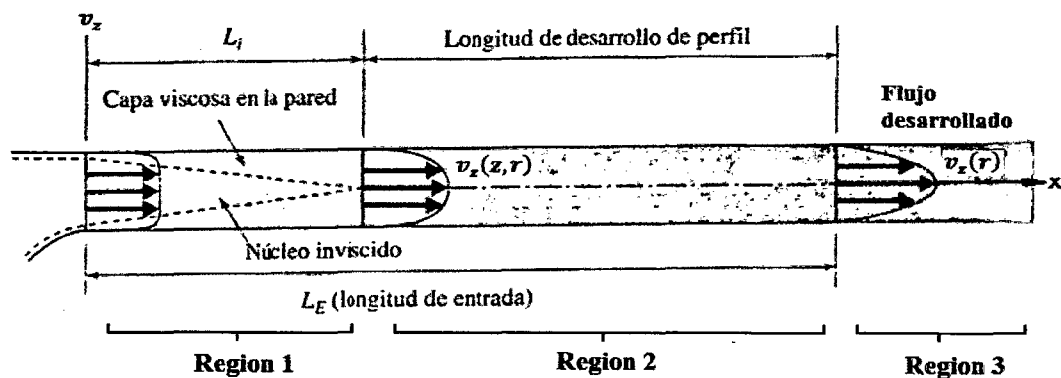


Figura N° 2.16 Flujo desarrollado en tubos [19]

En relación a la Figura N° 2.16:

- Región 1: Existe una parte del fluido que es inviscido, esta parte varia hasta llegar a cero
- Región 2: Desaparece el núcleo inviscido y el perfil de velocidad se va estabilizando. Esta es la región de transición
- Región 3: El perfil de velocidad se estabiliza. Esto implica que $\frac{\partial v_z}{\partial z} = 0$

Por simplicidad se considera que el flujo está desarrollado en toda la longitud Lp y aceleraciones pequeñas ($\frac{\partial v_z}{\partial t} = 0$). Bajo estas condiciones la ecuación de cantidad de movimiento se reduce a:

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \mu \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) \quad (2.14)$$

Resolviendo se obtiene:

$$v_z = \left(\frac{-\Delta P}{4\mu L_p}\right) r^2 + C_1 \ln r + C_2 \quad (2.15)$$

Dónde: $\Delta P = P_0 - P_1$

Estableciendo las condiciones de no deslizamiento en los bordes ($v_z(r=R_p) = 0$ y $v_z(r=R) = V$) y se obtiene:

$$C_1 = \frac{V}{\ln\left(\frac{R}{R_p}\right)} - \left(\frac{-\Delta P}{4\mu L_p}\right) \frac{(R^2 - R_p^2)}{\ln\left(\frac{R}{R_p}\right)} \quad (2.16a)$$

$$C_2 = -\left(\frac{-\Delta P}{4\mu L_p}\right) R^2 - \left[\frac{V}{\ln\left(\frac{R}{R_p}\right)} - \left(\frac{-\Delta P}{4\mu L_p}\right) \frac{(R^2 - R_p^2)}{\ln\left(\frac{R}{R_p}\right)} \right] \ln(R) \quad (2.16b)$$

Ahora se aplica la conservación de la masa en el volumen de control mostrado en la Figura N° 2.15. Eso conduce a:

$$\int_{s.c1} \rho \hat{n}_1 \cdot V dA + \int_{s.c2} \rho \hat{n}_2 \cdot v_z dA = 0 \quad (2.17)$$

$$\pi R^2 V = \int_{R_p}^R \left[\left(\frac{-\Delta P}{4\mu L_p}\right) r^2 + C_1 \ln r + C_2 \right] 2\pi r dr \quad (2.18)$$

Resolviendo esta última ecuación se obtiene una relación entre la velocidad V y la diferencia de presión ΔP :

$$\Delta P = \frac{4\mu L_p V}{\ln\left(\frac{R}{R_p}\right) \left[R^2 + R_p^2 - \frac{(R^2 - R_p^2)}{\ln\left(\frac{R}{R_p}\right)} \right]} \quad (2.19)$$

Así mismo se calcula el esfuerzo cortante en $r = R_p$:

$$\tau_{Rp} = \mu \left[\left(\frac{-\Delta P}{2\mu L_p}\right) R_p + \frac{C_1}{R_p} \right] \quad (2.20)$$

El cual se reduce a:

$$\tau_{Rp} = \frac{\mu V}{R_p \ln\left(\frac{R}{R_p}\right)} \left[\frac{R^2 - R_p^2}{R^2 + R_p^2 - \frac{(R^2 - R_p^2)}{\ln\left(\frac{R}{R_p}\right)}} \right] \quad (2.21)$$

La fuerza de amortiguamiento que se transmite al pistón es debido a la presión en la cabeza del pistón y al esfuerzo cortante a lo largo de L_p como se muestra en la Figura N° 2.17. Por tanto la Fuerza de amortiguamiento con un comportamiento viscoso es:

$$F_{viscoso} = \pi R_p^2 \Delta P + \tau_{Rp} 2\pi R_p L_p \quad (2.22)$$

$$F_{viscoso} = 2\pi\mu L_p \left[\frac{R^2 + R_p^2}{(R^2 + R_p^2) \ln\left(\frac{R}{R_p}\right) - (R^2 - R_p^2)} \right] V \quad (2.23)$$

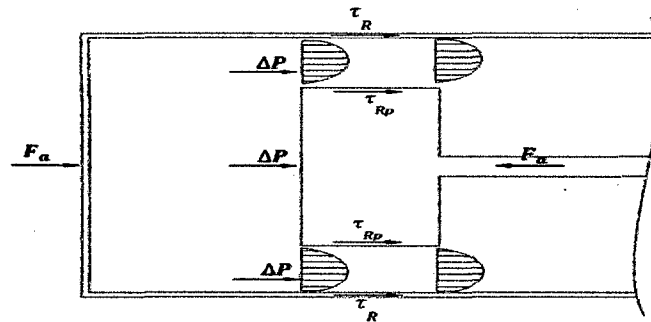


Figura N° 2.17 Fuerza de amortiguamiento en el disipador

Observación:

En condiciones de flujos reales en el cual el flujo no es desarrollado en toda la región anular se puede decir lo siguiente:

- La diferencia de presión es menor debido a que existe una parte de fluido inviscido (Ver Figura N° 2.16). En un flujo inviscido se necesita menos presión para mover el líquido debido a que no existe oposición por parte de esfuerzos cortante
- El esfuerzo cortante calculado en la ecuación (2.21) solo actúa a lo largo de la longitud real de desarrollo. En la zona en la cual el flujo no está desarrollado, el cálculo del esfuerzo se hace más complejo.

De lo mencionado se puede establecer que para flujos reales la fuerza de amortiguamiento debería estar afectada por un factor de reducción que considere la variación de los valores de diferencia de presión y esfuerzo cortante debido a la verdadera magnitud de la longitud de desarrollo. Por tanto:

$$F_{viscoso} = f2\pi\mu L_p \left[\frac{R^2 + R_p^2}{(R^2 + R_p^2) \ln\left(\frac{R}{R_p}\right) - (R^2 - R_p^2)} \right] V \quad (2.24)$$

El factor f podría ser determinado a partir de datos experimentales. De acuerdo a la ecuación (2.24) el coeficiente de amortiguamiento (C_L) es:

$$C_L = f2\pi\mu L_p \left[\frac{R^2 + R_p^2}{(R^2 + R_p^2) \ln\left(\frac{R}{R_p}\right) - (R^2 - R_p^2)} \right] \quad (2.25)$$

2.4 MODELOS MATEMÁTICOS

En la sección anterior se estudió el caso de un disipador pistón muy especial, en el cual se determinó la fuerza de amortiguamiento bajo ciertas condiciones. En

ese caso particular se determinó que la fuerza puede depender de la velocidad al cuadrado o solo la velocidad. En esta sección se mostrara los principales modelos matemáticos usados para relacionar la fuerza de amortiguamiento con la velocidad en disipadores viscosos.

2.4.1 Modelo lineal

Es el modelo más sencillo en el cual la fuerza de amortiguamiento (F_a) varia linealmente con la velocidad.

$$F_a = C_L \frac{dx}{dt} \quad (2.26)$$

Este es un modelo adoptado en disipadores hidráulicos [11]. La curva de histéresis par este modelo es una elipse (Ver Figura N° 2.18)

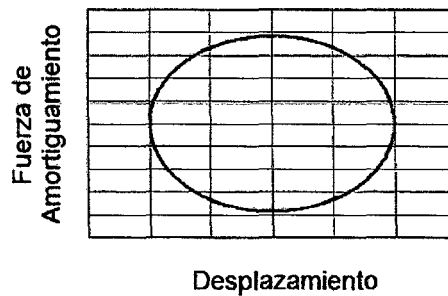


Figura N° 2.18 Curva de histéresis para disipador – modelo lineal [11]

2.4.2 Modelo no lineal

Para disipadores viscosos el modelo no lineal puede tener dos variantes: el modelo bilineal y el exponencial.

El modelo bilineal es adoptado en disipadores hidráulicos [11]. En este modelo se tienen dos coeficientes de amortiguamiento (C_1 y C_2) y una velocidad (V_1) que determina el límite para la aplicación de C_1 o C_2 . Por tanto:

$$F_a = C_1 \frac{dx}{dt} \quad ; \quad \frac{dx}{dt} < V_1 \quad (2.27)$$

$$F_a = C_1 V_1 + C_2 \left(\frac{dx}{dt} - V_1 \right) \quad ; \quad \frac{dx}{dt} > V_1 \quad (2.28)$$

La curva de histéresis para un modelo bilineal se muestra en la Figura N° 2.19

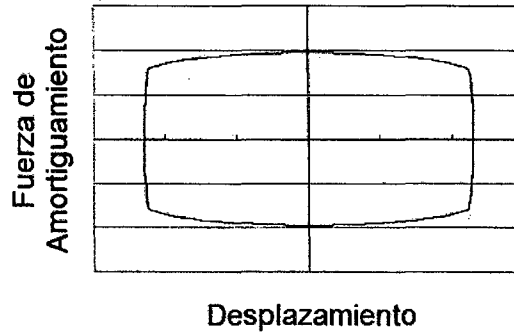


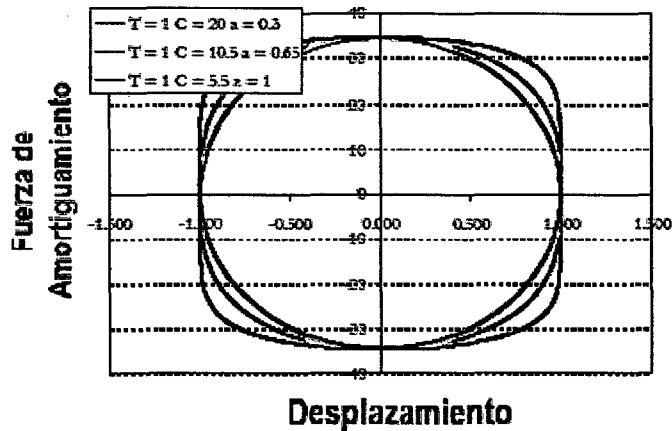
Figura N° 2.19 Curva de histéresis para disipador - modelo bilineal [11]

El modelo exponencial es adoptado para disipadores con cabeza de pistón con orificios (Ver sección 2.2.4). En este modelo la fuerza varía con la velocidad elevada a un exponente. La expresión matemática considera los valores negativos que puede tener la velocidad. Por tanto:

$$F_a = C_{NL} \operatorname{sgn}\left(\frac{dx}{dt}\right) \left|\frac{dx}{dt}\right|^\alpha \quad (2.29)$$

Donde $\operatorname{sgn}()$ es la función signo y C_{NL} es el coeficiente de amortiguamiento no lineal

La curva de histéresis de un modelo exponencial para diferentes valores de α se muestra en la Figura N° 2.20



Nota: las equivalencias de símbolos usados en el texto y la figura son: $C=C_{NL}$ y $a=\alpha$, T es la temperatura

Figura N° 2.20 Curva de histéresis para disipador - modelo exponencial [12]

2.4.3 Modelo Maxwell de derivada fraccional

Otro modelo utilizado para disipadores viscosos es el modelo Maxwell de derivada fraccional [13]. De acuerdo a ese modelo la fuerza de amortiguamiento está determinada por la siguiente expresión:

$$F_a + \lambda \frac{d^r F}{dt^q} = C_0 \frac{d^q x}{dt^q} \quad (2.30)$$

Si aplicamos la transformada de Fourier, obtenemos:

$$F\{i\omega\} = \frac{C_0(i\omega)^q}{1 + \lambda(i\omega)^r} X\{i\omega\} \quad (2.31)$$

Reemplazando $i = \cos \frac{\pi}{2} + i \operatorname{sen} \frac{\pi}{2} = e^{i\frac{\pi}{2}}$:

$$F\{i\omega\} = \frac{C_0(\omega)^q \left[\cos \frac{q\pi}{2} + i \operatorname{sen} \frac{q\pi}{2} \right]}{1 + \lambda(\omega)^r \left[\cos \frac{r\pi}{2} + i \operatorname{sen} \frac{r\pi}{2} \right]} X\{i\omega\} \quad (2.32)$$

Expandiendo y aplicando la transformada inversa de Fourier se obtiene:

$$F_a = K_{1(\omega)} x + \frac{K_{2(\omega)} dx}{\omega dt} \quad (2.33)$$

$$K_1 = \frac{C_0 \omega^q \cos \frac{q\pi}{2} (1 + \lambda \omega^r \cos \frac{r\pi}{2}) + C_0 \lambda \omega^{r+q} \operatorname{sen} \frac{r\pi}{2} \operatorname{sen} \frac{q\pi}{2}}{1 + \lambda^2 \omega^{2r} + 2\lambda \omega^r \cos \frac{r\pi}{2}} \quad (2.34)$$

$$K_2 = \frac{C_0 \omega^q \operatorname{sen} \frac{q\pi}{2} (1 + \lambda \omega^r \cos \frac{r\pi}{2}) - C_0 \lambda \omega^{r+q} \cos \frac{q\pi}{2} \operatorname{sen} \frac{r\pi}{2}}{1 + \lambda^2 \omega^{2r} + 2\lambda \omega^r \cos \frac{r\pi}{2}} \quad (2.35)$$

Donde K_1 es llamada **rigidez de almacenamiento** y K_2 **rigidez de perdida** [5].

De la ecuación (2.33) se puede concluir que la fuerza de amortiguamiento tiene un comportamiento visco-elástico (depende del desplazamiento y la velocidad). Además se observa que el coeficiente de amortiguamiento (que es el término que acompaña a la velocidad) depende de la frecuencia de vibración. De aquí que este modelo es utilizado para disipadores con comportamiento dependiente de la frecuencia de vibración. Los valores de C_0, λ, q y r deben determinarse experimentalmente.

Al igual que para modelos de disipadores visco elásticos, la curva de histéresis para este modelo es una elipse inclinada (Ver Figura N° 2.21), donde la inclinación está determinada por la rigidez efectiva [12], en este caso denominada rigidez de almacenamiento ($K_{1(\omega)}$)

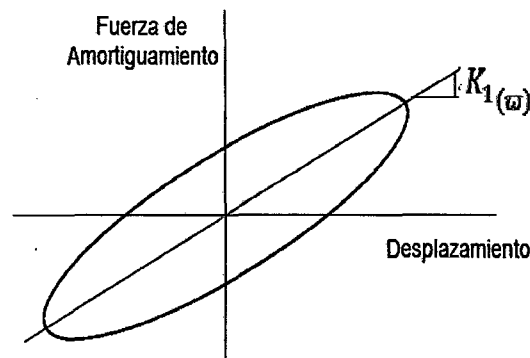


Figura N° 2.21 Curva de histéresis comportamiento visco elástico

2.5 ANÁLISIS DE UN PÓRTICO CON DISPOSITIVO DISIPADOR VISCOSO

2.5.1 Descripción general del sistema

Se analiza el sistema formado por un pórtico simple de un piso al cual se le ha incorporado un dispositivo disipador. El dispositivo disipador se incorpora a la estructuras por medio de brazos metálicos (Figura N° 2.22). Los brazos tienen una rigidez lateral K_b , El pórtico tiene una rigidez lateral K_L , las características del disipador dependerán del modelo usado. El pórtico tiene un coeficiente de amortiguamiento inherente C_n y masa M . La idealización del modelo se muestra en la Figura N° 2.22, en el cual los brazos y el disipador están conectados en serie.

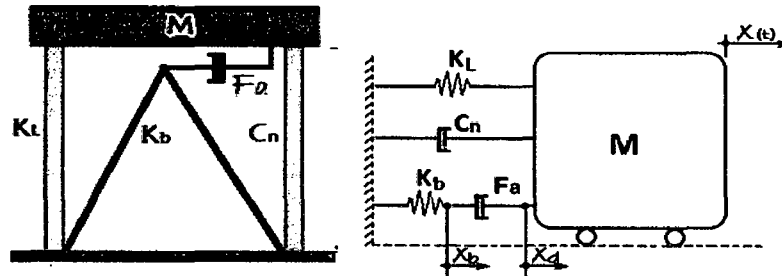


Figura N° 2.22 Pórtico simple con disipador viscoso

La ecuación de movimiento para un movimiento en la base (\ddot{u}_g) es:

$$M\ddot{x} + C_n\dot{x} + K_Lx + F_a = -M\ddot{u}_g \quad (2.36)$$

A continuación el sistema se analizará para los modelos descritos en la sección 2.4 y bajo un movimiento sinusoidal y/o sísmico en la base.

2.5.2 Modelo lineal

Para un modelo lineal del disipador la idealización del sistema se muestra en la Figura N° 2.23

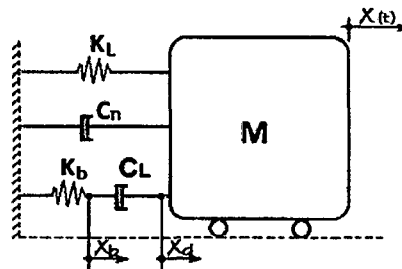


Figura N° 2.23 Idealización del sistema para un modelo lineal

Las ecuaciones de compatibilidad de desplazamientos y velocidades son:

$$x_b + x_d = x \quad (2.37a)$$

$$\dot{x}_b + \dot{x}_d = \dot{x} \quad (2.37b)$$

Y la fuerza de amortiguamiento está dada por la siguiente expresión:

$$F_a = C_L \dot{x}_d = K_b x_b \quad (2.38)$$

A partir de estas ecuaciones podemos obtener:

$$\dot{F}_a = K_b \dot{x}_b = K_b (\dot{x} - \dot{x}_d) = K_b \left(\dot{x} - \frac{F_a}{C_L} \right) = K_b \dot{x} - K_b \frac{F_a}{C_L} \quad (2.39)$$

$$F_a + \frac{C_L}{K_b} \dot{F}_a = C_L \dot{x} \quad (2.40)$$

Aplicando la transformada de Fourier a la ecuación (2.40) se obtiene:

$$F_a \{i\omega\} = \left[\frac{C_L(i\omega)}{1 + \frac{C_L}{K_b}(i\omega)} \right] X \{i\omega\} \quad (2.41)$$

Esta ecuación puede expresarse como:

$$F_a = K_{1(\omega)} x + \frac{K_{2(\omega)}}{\omega} \dot{x} \quad (2.42)$$

Los términos K_1 y K_2 se definen como sigue:

$$K_1 = \frac{\frac{C_L^2}{K_b} \omega^2}{1 + \left(\frac{C_L}{K_b}\right)^2 \omega^2} \quad (2.43)$$

$$K_2 = \frac{C_L \omega}{1 + \left(\frac{C_L}{K_b}\right)^2 \omega^2} \quad (2.44)$$

2.5.2.1 Respuesta a un movimiento sinusoidal en la base

Para el movimiento sinusoidal de amplitud \ddot{u}_g y de frecuencia ϕ se establece la ecuación de equilibrio dinámico:

$$M\ddot{x} + C_n \dot{x} + K_L x + F_a = -M\ddot{u}_g \text{sen}(\phi t) \quad (2.45)$$

Reemplazando la ecuación (2.42) en (2.45):

$$M\ddot{x} + \left(C_n + \frac{K_{2(\omega)}}{\omega} \right) \dot{x} + \left(K_L + K_{1(\omega)} \right) x = -M\ddot{u}_g \text{sen}(\phi t) \quad (2.46)$$

Para encontrar la solución permanente se reemplaza $\omega = \phi$, ya que bajo esas condiciones todo el sistema (incluyendo el disipador) se mueven con la misma frecuencia del movimiento en la base, entonces tenemos que:

$$M\ddot{x} + \left(C_n + \frac{K_{2(\phi)}}{\phi} \right) \dot{x} + \left(K_L + K_{1(\phi)} \right) x = -M\ddot{u}_g \text{sen}(\phi t) \quad (2.47)$$

Por similitud con la ecuación (1.7), el desplazamiento relativo es igual a:

$$x = \frac{\frac{M\ddot{u}_g}{(K_L+K_1(\phi))}}{\sqrt{(1-\beta^2)^2+(2\beta\xi)^2}} \text{sen}(\rho t - \varphi) \quad (2.48)$$

Dónde:

$$\beta = \frac{\rho}{\omega}, \quad \omega = \sqrt{\frac{K_L+K_1(\phi)}{M}}, \quad \xi = \frac{(C_n+\frac{K_2(\phi)}{\phi})}{2M\omega}, \quad \text{Tan}(\varphi) = \frac{2\beta\xi}{1-\beta^2} \quad (2.49)$$

2.5.2.2 Influencia de la rigidez del brazo

Al estar conectados el brazo y el disipador en una configuración en serie, el desplazamiento del disipador va estar influido por el desplazamiento de la masa y la deformación del brazo. Esta deformación del brazo depende de la rigidez de este elemento. En consecuencia esta rigidez influye en la velocidad relativa en el disipador y en consecuencia en la fuerza de amortiguamiento. A continuación se muestra como la rigidez del brazo también influye en la eficiencia del disipador. Para ello se reescribe la ecuación (2.42) de este modo:

$$F_d = K_{eq}x + C_{eq}\dot{x} \quad (2.50)$$

Para analizar como varía la rigidez y amortiguamiento equivalente adicional con la variación de la rigidez del brazo se considera dos casos límites para el valor de la rigidez del brazo, manteniendo constante el valor de C_L y la frecuencia de vibración ω :

Para $K_b = 0$:

$$K_{eq} = 0 \quad (2.51a)$$

$$C_{eq} = 0 \quad (2.51b)$$

Para $K_b \approx \infty$:

$$K_{eq} = 0 \quad (2.52a)$$

$$C_{eq} = C_L \quad (2.52b)$$

Se deduce que si deseamos solo aumentar el amortiguamiento deberíamos usar un brazo lo suficientemente rígido como para alcanzar valores de un amortiguamiento equivalente cercanos al amortiguamiento del disipador.

2.5.2.3 Modelo lineal con brazo rígido

Este es el modelo más simple. Con este modelo en la ecuación de equilibrio solo se incrementa el amortiguamiento. Este modelo simplificado es muy usado en los procesos de diseño ya que ayuda a reducir los cálculos cuando se tiene sistemas de muchos grados de libertad.

Existen muchas configuraciones para los brazos como se muestra en la Figura N° 2.24. La fuerza de amortiguamiento en esos casos tiene la siguiente forma:

$$F_a = f C_L \dot{x} \quad (2.53)$$

Donde el término f depende del tipo de configuración y está relacionado solo a la geometría de la configuración.

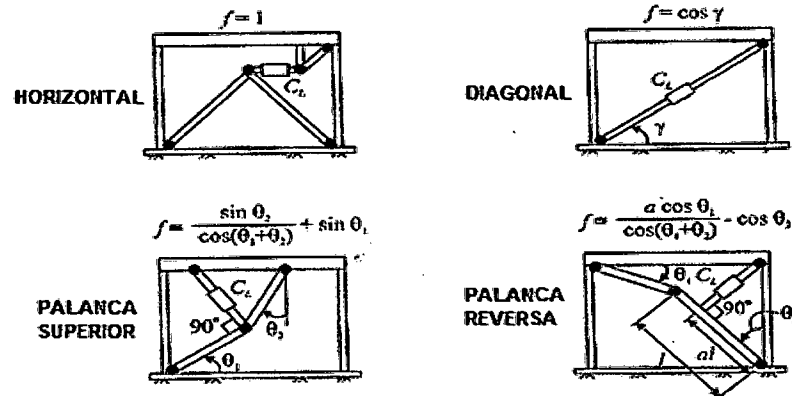


Figura N° 2.24 Configuraciones del sistema brazo –disipador [3]

2.5.3 Modelo no lineal

Como se mencionó el modelo no lineal puede ser bilineal o exponencial. En este caso usaremos un modelo no lineal de forma arbitraria, que fácilmente puede ser adaptada para al modelo bilineal o exponencial. La idealización del modelo se muestra en la Figura N° 2.25

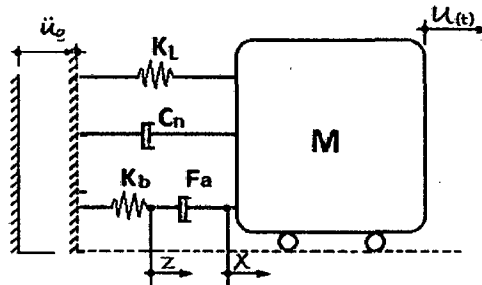


Figura N° 2.25 Idealización del sistema modelo exponencial

Se hará un análisis numérico paso a paso para un movimiento en la base arbitrario.

2.5.3.1 Respuesta a un movimiento arbitrario en la base

Al igual que en la sección 1.2.2 se aplicara el método de Newmark ($\gamma = 1/2$ y $\beta = 1/4$). Primero se debe conocer la curva de comportamiento del disipador y luego se divide esta curva en segmentos lineales pequeños. Para cada segmento se calcula los valores de F_{0i} y C_{di} (Ver Figura N° 2.26)

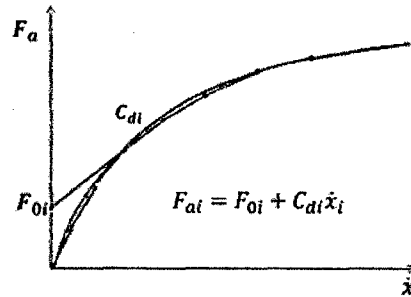


Figura N° 2.26 Curva de comportamiento segmentada

La fuerza de amortiguamiento está dado por:

$$F_{ai} = F_{0i} + C_{di}\dot{x}_i \quad (2.54)$$

Es decir en cada paso se debe evaluar el valor de la velocidad \dot{x}_i y calcular los valores de F_{0i} y C_{di} que le corresponda.

Las ecuaciones de movimiento incrementales son:

$$M\Delta\ddot{u}_i + C_n\Delta\dot{u}_i + K_L\Delta u_i + \Delta F_a = -M\Delta\ddot{u}_{gi} \quad (2.55a)$$

$$\Delta F_a = C_{di}\Delta\dot{x}_i = K_b\Delta z_i \quad (2.55b)$$

Las ecuaciones de compatibilidad son:

$$\Delta z_i + \Delta x_i = \Delta u_i \quad (2.56a)$$

$$\Delta \dot{z}_i + \Delta \dot{x}_i = \Delta \dot{u}_i \quad (2.56b)$$

$$\Delta \ddot{z}_i + \Delta \ddot{x}_i = \Delta \ddot{u}_i \quad (2.56c)$$

Las relaciones de variación de aceleración, velocidad y desplazamiento del método de Newmark son:

$$\Delta \dot{x}_i = \frac{2\Delta x_i}{\Delta t} - 2\dot{x}_i \quad (2.57a)$$

$$\Delta \dot{u}_i = \frac{2\Delta u_i}{\Delta t} - 2\dot{u}_i \quad (2.57b)$$

$$\Delta \ddot{u}_i = \frac{4\Delta u_i}{\Delta t^2} - \frac{4\dot{u}_i}{\Delta t} - 2\ddot{u}_i \quad (2.57c)$$

$$\Delta u_i = u_{i+1} - u_i ; \Delta \dot{u}_i = \dot{u}_{i+1} - \dot{u}_i ; \Delta \ddot{u}_i = \ddot{u}_{i+1} - \ddot{u}_i \quad (2.57d)$$

Combinando (2.57a), (2.56a) y (2.55b) se obtiene:

$$\Delta x_i = \frac{(K_b\Delta u_i + 2C_L\dot{x}_i)\Delta t}{2C_L + K_b\Delta t} \quad (2.58)$$

Luego (2.58) y (2.56a) en (2.55b):

$$\Delta F_a = K_b\Delta u_i \left(1 - \frac{K_b\Delta t}{2C_L + K_b\Delta t}\right) - \frac{2C_L K_b \dot{x}_i \Delta t}{2C_L + K_b\Delta t} \quad (2.59)$$

Remplazando (2.59), (2.57b-d) en (2.55a) obtenemos:

$$\Delta u_i = \frac{\Delta \bar{P}_i}{\bar{K}_i} \quad (2.60a)$$

$$\Delta \bar{P}_i = -M\Delta \ddot{u}_{g i} + \frac{2C_L K_b \dot{x}_i \Delta t}{2C_L + K_b \Delta t} + \left[\frac{4M}{\Delta t} + 2C_n \right] \dot{u}_i + [2M] \ddot{u}_i \quad (2.60b)$$

$$\bar{K}_i = K_L + K_b \left(1 - \frac{K_b \Delta t}{2C_L + K_b \Delta t} \right) + \frac{4M}{\Delta t^2} + \frac{2C_n}{\Delta t} \quad (2.60c)$$

En cada paso se debe obtener los valores de ΔP_i y \bar{K}_i para obtener el valor de Δu_i , el cual es utilizado para obtener de acuerdo a las ecuaciones (2.57b) y (2.57d) los valores de desplazamiento y velocidad al final del intervalo (u_{i+1} , \dot{u}_{i+1}). El valor de \dot{x}_{i+1} se calcula a partir de (2.57a), (2.58) y la siguiente relación:

$$\Delta \dot{x}_i = \dot{x}_{i+1} - \dot{x}_i \quad (2.61)$$

Para asegurar el equilibrio en cada paso, la aceleración \ddot{u}_{i+1} se calcula de la siguiente ecuación:

$$\ddot{u}_{i+1} = \frac{(-M\ddot{u}_{g i+1} - C_n \dot{u}_{i+1} - K_L u_{i+1} - F_{0i+1} - C_{di+1} \dot{x}_{i+1})}{M} \quad (2.62)$$

Y para asegurar la compatibilidad de fuerzas en el brazo y disipador en cada paso, el desplazamiento en el brazo se calcula como:

$$z_{i+1} = \frac{F_{0i+1} + C_{di+1} \dot{x}_{i+1}}{K_b} \quad (2.63)$$

También:

$$\dot{z}_{i+1} = \dot{u}_{i+1} - \dot{x}_{i+1} \quad (2.64a)$$

$$\Delta \ddot{x}_i = \frac{4\Delta \dot{x}_i}{\Delta t^2} - \frac{4\dot{x}_i}{\Delta t} - 2\ddot{x}_i \quad (2.64b)$$

$$\Delta \ddot{x}_i = \ddot{x}_{i+1} - \ddot{x}_i \quad (2.64c)$$

$$\ddot{z}_{i+1} = \ddot{u}_{i+1} - \ddot{x}_{i+1} \quad (2.64d)$$

Con todas esas variables se continúa el cálculo para el siguiente paso.

En el anexo III se describe un método analítico aproximado para resolver este sistema con modelo exponencial para un movimiento sinusoidal en la base.

2.5.4 Modelo Maxwell de derivada fraccional

Se usará las expresiones para la fuerza de amortiguamiento calculado en la sección 2.4.3 con la observación de que se reemplaza x por x_d . La idealización del modelo se presenta en la Figura N° 2.27.

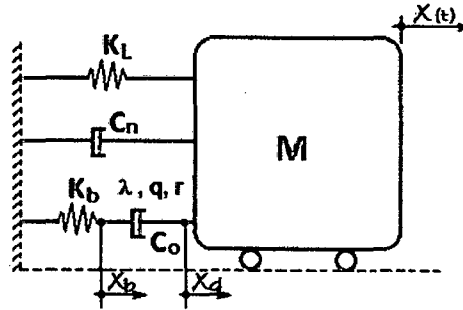


Figura N° 2.27 Influencia del brazo en el sistema

La fuerza generada por el brazo está dada por:

$$F_b = K_b x_b \quad (2.65a)$$

$$F_b\{i\omega\} = K_b X_b\{i\omega\} \quad (2.65b)$$

La compatibilidad de desplazamientos implica que:

$$x_b + x_d = x \quad (2.66a)$$

$$X_b\{i\omega\} + X_d\{i\omega\} = X\{i\omega\} \quad (2.66b)$$

Combinando (2.33), (2.65b) y (2.66b)

$$\frac{F_b\{i\omega\}}{K_b} + \frac{F_a\{i\omega\}}{[K_1(\omega) + iK_2(\omega)]} = X\{i\omega\} \quad (2.67)$$

Ya que la fuerza de amortiguamiento es igual a la fuerza en el brazo por estar en serie:

$$F_a\{i\omega\} \left[\frac{1}{K_b} + \frac{1}{[K_1(\omega) + iK_2(\omega)]} \right] = X\{i\omega\} \quad (2.68a)$$

$$F_a\{i\omega\} = H\{i\omega\} X\{i\omega\} \quad (2.68b)$$

$$H\{i\omega\} = \frac{[K_1(\omega) + iK_2(\omega)] K_b}{[K_1(\omega) + iK_2(\omega)] + K_b} \quad (2.68c)$$

Ahora establecemos la ecuación de movimiento del sistema ante una carga arbitraria $y(t)$

$$M\ddot{x} + C_n\dot{x} + K_L x + F_a = y(t) \quad (2.69)$$

Aplicando transformada de Fourier y considerando la ecuación (2.68b):

$$X\{i\omega\} [M(i\omega)^2 + C_n(i\omega) + K_L] + F_a\{i\omega\} = Y\{i\omega\} \quad (2.70a)$$

$$X\{i\omega\} = H^*\{i\omega\} Y\{i\omega\} \quad (2.70b)$$

$$H^*\{i\omega\} = \frac{1}{M(i\omega)^2 + C_n(i\omega) + K_L + H\{i\omega\}} \quad (2.70c)$$

La función $H^*\{i\omega\}$ es la **función de transferencia del sistema** [9]. Esta función relaciona la entrada (carga arbitraria) y la salida (desplazamiento)

Es posible expresar la función $H\{i\omega\}$ en su forma compleja:

$$H\{i\omega\} = \alpha_1 + \alpha_2 i \quad (2.71)$$

Dónde:

$$\alpha_1 = \frac{K_b^2 K_1 + K_1^2 K_b + K_b K_2^2}{K_2^2 + (K_b + K_1)^2} ; \alpha_2 = \frac{K_b^2 K_2}{K_2^2 + (K_b + K_1)^2} \quad (2.72)$$

Reemplazando (2.71) en (2.70c):

$$H^*\{i\omega\} = \frac{1}{[\alpha_1 + K_L - M(\omega)^2] + i[\omega C_n + \alpha_2]} \quad (2.73)$$

Así mismo se calcula el modulo y argumento de $H^*\{i\omega\}$:

$$|H^*\{i\omega\}| = \frac{1}{\sqrt{(\alpha_1 + K_L - M(\omega)^2)^2 + (\omega C_n + \alpha_2)^2}} \quad (2.74)$$

$$\arg(H^*\{i\omega\}) = -\arctan\left[\frac{\omega C_n + \alpha_2}{\alpha_1 + K_L - M(\omega)^2}\right] \quad (2.75)$$

2.5.4.1 Respuesta a un movimiento sinusoidal en la base

Si la entrada arbitraria $y(t)$ es sinusoidal, con amplitud \ddot{u}_g y frecuencia ϕ :

$$y(t) = -M\ddot{u}_g \text{sen}(\phi t) \quad (2.76)$$

La salida en estado estacionario que es lo mismo que decir el desplazamiento permanente se puede calcular como [9]:

$$x(t) = -M\ddot{u}_g |H^*\{i\phi\}| \text{sen}[\phi t + \arg(H^*\{i\phi\})] \quad (2.77)$$

2.6 REQUERIMIENTOS DE ESTUDIOS EXPERIMENTALES PARA DISIPADORES SEGÚN ASCE-07-10

Según el reglamento ASCE 07-10 [1] las características fuerza-velocidad-deformación de los dispositivos disipadores se basara en cargas cíclicas y la rigidez efectiva se calculara para cada ciclo de deformación usando la siguiente formula:

$$K_{eff}(\text{rigides efecctiva}) = \frac{|F^+| + |F^-|}{|\Delta^+| + |\Delta^-|} \quad (2.78)$$

$$\beta_{eff}(\text{razon de amoetiguamiento efectivo}) = \frac{2}{\pi K_{eff}} \frac{E_d}{(|\Delta^+| + |\Delta^-|)^2} \quad (2.79)$$

Donde E_d se refiere a la energía disipada en un ciclo.

Para determinar si el dispositivo es adecuado se tendrá que cumplir 5 condiciones. Las condiciones para un dispositivo dependiente de la velocidad son:

1.- Bajo el ensayo a no se producirá daños como escapes, fluencia o rotura

- 2.- Para disipadores con rigidez, la rigidez efectiva para cada ciclo no variara más de 15% del promedio para todos los ciclos.
- 3.- La fuerza máxima y mínima a desplazamiento cero para algún ciclo no variara en más de 15% el promedio máximo y mínimo calculado para todos los ciclos.
- 4.- La energía disipada por ciclo no variara en más de 15% la energía disipada promedio para todos los ciclos
- 5.- La energía disipada y fuerzas no diferirán en más de 15% de los valores objetivo del disipador para la estructura en estudio.

Observación: La ecuación (2.79) nos proporciona el porcentaje de amortiguamiento cuando el ensayo se hace con la frecuencia natural. Ahora podemos usar esta ecuación para obtener el valor del porcentaje de amortiguamiento para frecuencias diferentes a la natural. Primero se reordena ecuación (2.79):

$$\beta_{eff}(\text{razon de amortiguamiento efectivo}) = \frac{E_d}{4\pi\left(\frac{1}{2}K_{eff}\left(\frac{|\Delta^+|+|\Delta^-|}{2}\right)^2\right)}$$

$$\beta_{eff}(\text{razon de amortiguamiento efectivo}) = \frac{E_d}{4\pi\left(\frac{1}{2}K_{eff}(\Delta_m)^2\right)}$$

Dónde:

$$\frac{1}{2}K_{eff}(\Delta_m)^2 = E_{deformacion}$$

Se observa que la ecuación (2.79) es igual a la ecuación (1.43). Por tanto usamos la expresión para la Energía de deformación y la reemplazamos en la ecuación (1.42) y se obtiene:

$$\xi_{eq} = \frac{E_d\omega}{4\pi\frac{1}{2}K_{eff}(\Delta_m)^2\rho}$$

$$\xi_{eq} = \frac{2}{\pi K_{eff}} \frac{E_d\omega}{(|\Delta^+|+|\Delta^-|)^2\rho} \quad (2.80)$$

Que es la expresión para calcular el porcentaje de amortiguamiento cuando se ensaya a frecuencias diferentes a la frecuencia natural.

CAPÍTULO III ESTUDIO DEL PROTOTIPO Y MODELO

Se inicia estudiando los factores de escala basados teorema π de Buckingham y similitud. Apoyados en esos factores se propone un modelo y su respectivo prototipo.

3.1 ANALISIS DIMENSIONAL Y SIMILITUD

3.1.1 Generalidades

Según el teorema π Buckingham la relación entre las variables que están involucradas en un determinado fenómeno puede ser expresado por una relación entre cantidades adimensionales denominadas π .

Según la teoría de similitudes [19] para que exista similitud completa se debe cumplir que los adimensionales, que se hallaron con la aplicación de teorema de Buckingham, sean iguales, es decir:

$$(\pi_n)_{prototipo} = (\pi_n)_{modelo} \quad (3.1)$$

A partir del cumplimiento de esta consideración se puede conocer resultados en el prototipo correlacionándolo con resultados en el modelo

Según estos dos enunciados y con el objeto de encontrar las relaciones entre las magnitudes del modelo y del prototipo, se presenta el fenómeno en estudio:

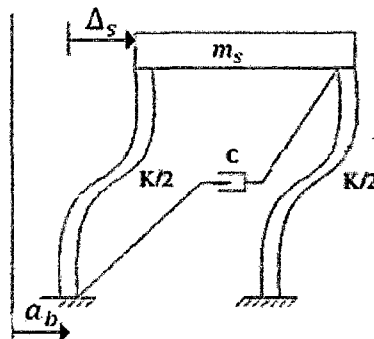


Figura N° 3.1 Pórtico simple con excitación basal [15]

El fenómeno en estudio es el movimiento (Δ_s) de un sistema de un grado de libertad sometido a una excitación basal (aceleración a_b), este sistema tiene una rigidez lateral K , una masa " m_s " y una constante de amortiguamiento lineal " C " (Ver Figura N° 3.1).

Si bien es cierto la ecuación de movimiento relacionando todas las magnitudes descritas es conocida, denominaremos a f como la función que relaciona todas las magnitudes:

$$f(k, \Delta_s, m_s, a_b, c) = 0 \quad (3.2)$$

Para encontrar las magnitudes adimensionales π se debe hacer el análisis dimensional.

3.1.2 Análisis dimensional

Identificamos las magnitudes de las variables.

- $[\Delta_s] = L$
- $[k] = MT^{-2}$
- $[m_s] = M$
- $[a_b] = LT^{-2}$
- $[c] = MT^{-1}$

Ahora se debe escoger los términos independientes. Se escoge a Δ_s, k, a_b . La cantidad de adimensionales π se determina restando a la cantidad de variables la cantidad de términos independientes. Se tiene 5 variables y 3 términos independientes así que la cantidad de números adimensionales π es 2. El siguiente paso es relacionar los términos independientes con cada uno de los términos restantes a fin de obtener los adimensionales π .

A. Relacionando Δ_s, k, a_b con m_s :

$$\pi_1 = D^a * k^b * a_b^c * m_s^e$$

$$\pi_1 = L^a * (MT^{-2})^b * (LT^{-2})^c * (M)^e$$

$$\pi_1 = L^{a+c} * M^{b+e} * T^{-2b-2c}$$

Dado que las exponentes de las dimensiones (M, L, T) deben ser cero para que π sea adimensional:

$$a = 1, b = 1, c = -1, e = -1 \quad \rightarrow \quad \pi_1 = \frac{\Delta_s * k}{a_b * m_s} \quad (3.3)$$

B. Relacionando Δ_s, k, a_b con c :

$$\pi_2 = \Delta_s^a * k^b * a_b^c * c^e$$

$$a = 1, b = 2, c = -1, e = -2 \quad \rightarrow \quad \pi_2 = \frac{\Delta_s * k^2}{a_b * c^2} \quad (3.4)$$

Este procedimiento logra expresar como una relación de términos adimensionales la relación inicial de variables es decir:

$$f(k, \Delta_s, m_s, a_b, c) = 0 \rightarrow f'(\pi_1, \pi_2) \quad (3.5)$$

3.1.3 Factores de Escala

Se procede a encontrar los factores de escala para cada variable considerando que se debe cumplir la similitud completa es decir los términos π deben ser iguales para el prototipo y el modelo. A continuación se analiza los factores de escala que son consecuencia del factor de escala longitudinal "n". El factor de escala longitudinal establece una relación constante entre las dimensiones del modelo y prototipo, esto quiere decir:

$$\frac{Longitud_{Prot.}}{Longitud_{Mod.}} = n \quad (3.6)$$

Al cumplirse esto se deduce que el desplazamiento Δ_s también tiene factor de escala n, además se puede establecer los factores de escala de área y volumen:

$$\frac{Area_{Prot.}}{Area_{Mod.}} = n^2; \frac{Volumen_{Prot.}}{Volumen_{Mod.}} = n^3 \quad (3.7)$$

Además es posible usarlo para determinar el factor de escala de la rigidez lateral así como sigue:

$$k_{Prot.} = \frac{Q * E_{Prot.} * I_{Prot.}}{h_{Prot.}^3}; Q \text{ es una constante} \quad (3.8)$$

La variable E se refiere al módulo de elasticidad de la columna. Dado que se usará el mismo material este término es igual para el modelo. La variable I es el momento de inercia, esta cantidad varía con las dimensiones de la sección elevado a la cuarta así que tiene factor de escala de n^4 . La variable h es la altura de la columna, y dado que es una longitud este término tiene factor de escala n. Con estas consideraciones obtenemos el factor de escala de la rigidez lateral:

$$k_{Prot.} = \frac{Q * E_{Mod.} * I_{Mod.} * n^4}{h_{Mod.}^3 * n^3}$$

$$k_{Prot.} = k_{Mod.} * n$$

$$\frac{k_{Prot.}}{k_{Mod.}} = n \quad (3.9)$$

Debido a que se usará en el modelo los mismos materiales del prototipo, el factor de escala de densidad es igual a 1. Esto conduce a que el factor de escala de la masa m_s esta dada por:

$$\frac{m_{sProt.}}{m_{sMod.}} = \frac{Vol_{Prot.} * Densidad_{Prot.}}{Vol_{Mod.} * Densidad_{Mod.}} = n^3 \quad (3.10)$$

Para cumplir con la teoría de similitudes debemos igualar los números adimensionales. Esto a su vez conducirá a encontrar otros factores de escala.

Para el primer adimensional π_1 tenemos:

$$\begin{aligned}
 (\pi_1)_{Prototipo} &= (\pi_1)_{Modelo} \\
 \left(\frac{\Delta_s * k}{a_b * m_s} \right)_{Prototipo} &= \left(\frac{\Delta_s * k}{a_b * m_s} \right)_{Modelo} \\
 \frac{\Delta_{sMod} * n * k_{Mod} * n}{a_{bProt} * m_{sMod} * n^3} &= \frac{\Delta_{sMod} * k_{Mod}}{a_{bMod} * m_{sMod}} \\
 \frac{a_{bProt}}{a_{bMod}} &= \frac{1}{n}
 \end{aligned} \tag{3.11}$$

El resultado implica que para que las respuestas en el modelo sean comparables con la aceleración en el prototipo debe ser la enésima parte de la aceleración en el modelo.

Para el segundo adimensional tenemos π_2 :

$$\begin{aligned}
 (\pi_2)_{Prototipo} &= (\pi_2)_{Modelo} \\
 \left(\frac{\Delta_s * k^2}{a_b * c^2} \right)_{Prototipo} &= \left(\frac{\Delta_s * k^2}{a_b * c^2} \right)_{Modelo} \\
 \frac{\Delta_{sMod} * n * k_{Mod}^2 * n^2}{a_{bProt} * \frac{1}{n} * C_{Prot}^2} &= \frac{\Delta_{sMod} * k_{Mod}^2}{a_{bMod} * C_{Mod}^2} \\
 \frac{C_{Prot}}{C_{Mod}} &= n^2
 \end{aligned} \tag{3.12}$$

Antes de evaluar el factor de escala del porcentaje de amortiguamiento determinamos los siguientes factores de escala:

- Periodo del sistema (T)

$$\begin{aligned}
 T_{Prot} &= \sqrt{\frac{m_{sProt}}{k_{Prot}}} = \sqrt{\frac{m_{sMod} * n^3}{k_{Prot} * n}} = n * \sqrt{\frac{m_{sMod}}{k_{Mod}}} \\
 T_{Prot} &= n * T_{mod}
 \end{aligned} \tag{3.13}$$

- Frecuencia circular natural del sistema (ω)

$$\begin{aligned}
 \omega_{Prot} &= \frac{2\pi}{T_{Prot}} = \frac{2\pi}{n * T_{Mod}} \\
 \omega_{Prot} &= \omega_{Mod} * \frac{1}{n}
 \end{aligned} \tag{3.14}$$

Designando como P al factor de escala del porcentaje de amortiguamiento:

$$P = \frac{\xi_{Prot}}{\xi_{Mod.}} = \frac{\frac{C_{Prot}}{2 * m_{sProt} * \omega_{Prot}}}{\frac{C_{Mod}}{2 * m_{sMod} * \omega_{Mod}}} = \frac{\frac{C_{Mod} * n^2}{m_{sMod} * n^3 * \omega_{Mod} * \frac{1}{n}}}{\frac{C_{Mod}}{m_{sMod} * \omega_{Mod}}}$$

$$\frac{\xi_{Prot}}{\xi_{Mod.}} = 1 \quad (3.15)$$

Se determina también otros factores de escala con procedimientos similares

- Fuerzas

El factor de escala de fuerzas obtenemos considerando la fuerza de inercia:

$$F_{Prot} = m_{sProt} * a_{bProt}$$

$$F_{Prot} = m_{sMod} * n^3 * a_{bMod} * \frac{1}{n}$$

$$F_{Prot} = n^2 * F_{Mod} \quad (3.16)$$

Esta relación se cumple para la fuerza de inercia, de amortiguamiento y elástica.

- Velocidad (V)

La velocidad se puede expresar como:

$$V_{Prot} = \Delta_{sProt} * \omega_{Prot}$$

$$V_{Prot} = \Delta_{sMod} * n * \omega_{mod} * \frac{1}{n}$$

$$V_{Prot} = V_{Mod} \quad (3.17)$$

- Peso específico (γ)

$$\gamma_{Prot} = \frac{\rho_{prot}}{\rho_{prototipo}}; \quad g: \text{gravedad}$$

Como la gravedad no podemos variarla y las densidades son las mismas:

$$\gamma_{Prot} = \frac{\rho_{mod}}{\rho_{mod}} = \gamma_{mod} \quad (3.18)$$

- Cargas distribuidas (W)

$$W_{Prot} = \frac{Peso_{Prot}}{Area_{Prot}} = \frac{Masa_{Prot} * g}{Area_{Prot}}$$

$$W_{Prot} = \frac{n^3 * Masa_{mod} * g}{n^2 * Area_{mod}}$$

$$W_{Prot} = n * W_{mod} \quad (3.19)$$

Se resumen los factores de escala en la Tabla 3.1

Tabla 3.1 Factores de Escala

MAGNITUD	SIMBOLO	FACTOR DE ESCALA
Desplazamiento	Δ_s	n
Longitud	L, h	n
Masa del sistema	m_s	n^3
Rigidez lateral	k	n
Aceleración basal	a_b	1/n
Periodo del sistema	T	n
Frecuencia circular natural	ω	1/n
Fuerza (inercia, amortiguamiento y elástica)	Fi, Fa, Fe	n^2
Velocidad	V	1
Coefficiente de amortiguamiento	C	n^2
Porcentaje de amortiguamiento	ξ	1
Peso específico	γ	1
Gravedad	g	1
Cargas distribuidas	w	n

3.2 ESTUDIO DEL MODELO A

3.2.1 Consideraciones sobre el factor de escala longitudinal

Para determinar el valor del factor de escala se debe tener en cuenta las dimensiones de la mesa vibradora: 1.20mx1.00m. Otra variable a considerar es el peso máximo que soporta la mesa vibradora: 500 kgf.

3.2.2 Dimensiones del modelo

Se propone un modelo conformado por una losa de concreto armado, vigas y columnas de acero.

Se propone un modelo que ocupe que ocupe gran parte del área de la mesa y que sus columnas puedan ubicarse en zonas adecuadas para no interfieran con los pernos de anclaje. Esto conduce a proponer un modelo de dimensiones 72.5cmx68.5cm y una altura de 50cm. Considerando un factor de escala longitudinal de 5 obtenemos que las dimensiones en el prototipo sería de 362.5cmx342.5cm, los cuales son luces típicas de estructuras reales.

Antes de calcular el peso del modelo se calcula el peso del prototipo considerando las cargas usualmente utilizadas en edificaciones:

Peso de Losa aligerada: $3.625 \times 3.425 \times 300 \text{ kgf/cm}^2 = 3724.7 \text{ kgf}$

Peso de tabiquería: $3.625 \times 3.425 \times 150 \text{ kgf/cm}^2 = 1862.3 \text{ kgf}$

Peso de Acabados: $3.625 \times 3.425 \times 100 \text{ kgf/cm}^2 = 1241.6 \text{ kgf}$

Sobrecarga: $3.625 \times 3.425 \times 200 \text{ kgf/cm}^2 = 2483.1 \text{ kgf}$

Peso Total Prototipo: 9311.7 kgf

Usando el factor de escala del peso (n^3) se obtiene un peso para el modelo de 74.5 kgf.

El peso calculado se usa para dimensionar la losa de concreto del modelo. Esta losa llevara una malla de varillas de $\frac{1}{4}$, la cual se amarrará a studs soldados en las vigas. Usando la densidad del concreto armado (2400 kgf/m^3) calculamos el peralte de la losa:

$$\text{Peralte} = 74.5 \times 100 / (2400 \times 0.725 \times 0.685) = 6.25 \text{ cm}$$

Se propuso la sección de la columna y de la viga considerando la sección de acero estructural de acero LAC cuadrada más pequeña disponible en el mercado. Se usó este tipo de acero debido a que sus propiedades estructurales son dadas por el fabricante. La sección cuadrada más pequeña disponible es de $2.5 \text{ cm} \times 2.5 \text{ cm} \times 2 \text{ mm}$. Se propone también colocar una viga secundaria de sección L de $2.5 \text{ cm} \times 2.5 \text{ cm} \times 2 \text{ mm}$ y dejar un volado en la losa. Los detalles del modelo se detallan en la Figura N° 3.2 y Figura N° 3.3:

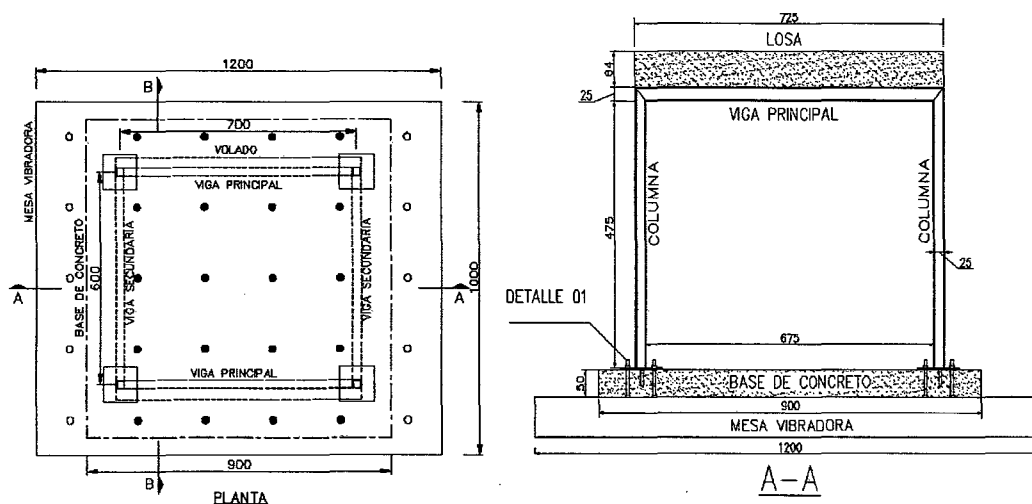


Figura N° 3.2 Modelo A (planta y sección A-A)

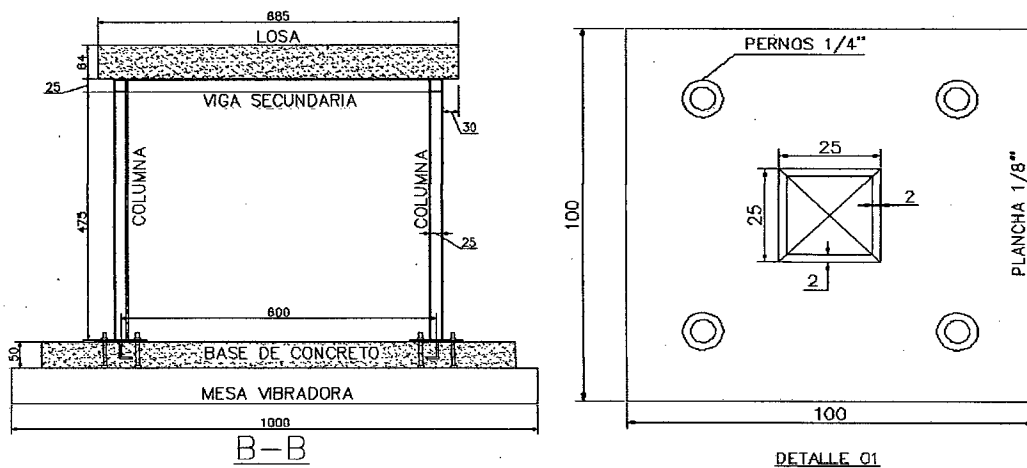


Figura N° 3.3 Modelo A (sección B-B y detalle 01)

3.2.3 Materiales y propiedades mecánicas de la viga y columna

Como se mencionó se usó acero estructural LAC, cuyas propiedades se detallan a continuación:

- E (módulo de elasticidad)=29000 ksi (2.04×10^6 kgf/cm²)
- Fy(Resistencia de fluencia)= 269 MPa (2743 kgf/cm²)
- Peso por unidad de Volumen=7850 kgf/m³

Estas propiedades han sido obtenidas de la información que brinda el fabricante [6].

La losa de concreto tiene las siguientes propiedades:

- f'_c (Resistencia a compresión)=210 kgf/cm²
- E (módulo de elasticidad) = $15000 \sqrt{f'_c} = 2.17 \times 10^5$ kgf/cm²
- Peso por unidad de volumen=2400 kgf/m³

Ahora se determina las propiedades mecánicas de la columna y vigas

3.2.3.1 Columna

a) Sección

La sección es tubular de lado 2.5 cm y espesor 0.2cm

b) Área.

$$A=1.84 \text{ cm}^2$$

c) Centro de Gravedad

El centro de gravedad respecto al lado inferior es:

$$Y_{cg}=1.25 \text{ cm}$$

d) Momento de Inercia

$$I=1.635 \text{ cm}^4$$

e) Momento elástico ($M = \frac{Fy \cdot I}{Y_{cg}}$)

$$M=3587.84 \text{ kgf-cm}$$

3.2.3.2 Viga de sección compuesta

a) Sección

Al estar la losa unida a la viga, este conjunto se comporta como una sección compuesta caracterizada por un ancho efectivo.

b) Ancho efectivo de la losa de concreto (b_{eff})

La contribución de la losa a la rigidez de la sección compuesta está dada por el ancho efectivo. Según la Norma E-090 Estructuras Metálicas el ancho efectivo a cada lado del eje de la viga no será mayor que:

- 1/8 de la luz de la viga, entre centro de apoyos= $70/8=8.75$ cm
- La mitad de la distancia entre ejes de vigas adyacentes= $60/2=30$ cm
- La distancia al borde de la losa= $2.5/2+3=4.25$ cm

Por tanto el ancho efectivo total es= $4.25 \times 2=8.5$ cm

c) Ancho efectivo transformado ($B_{\text{eff.tran}}$)

El ancho efectivo transformado se usa para poder encontrar el centro de gravedad y el momento de inercia de la sección compuesta. El cálculo se basa en transformar a la sección de concreto en una de acero con el uso de la relación de módulos de elasticidad.

$$B_{\text{eff.tran}} = \frac{E_{\text{concreto}}}{E_{\text{acero}}} b_{\text{eff}} = 0.11 \times 8.5 = 0.935 \text{ cm}$$

d) Eje neutro

Se calcula el eje neutro para la sección compuesta, en la cual el concreto está en la condición límite de agrietamiento por tracción (se considera un módulo de rotura de 29 kgf/cm^2 para el concreto). Bajo esta condición en toda la sección se desarrollan los esfuerzos y el eje neutro se calcula como el centro de gravedad de la sección compuesta.

El eje neutro es calculado con respecto a la parte inferior de la viga.

$$\text{Eje neutro } (Y_{cg}) = 4.578 \text{ cm}$$

e) Momento de Inercia

El momento de Inercia de la sección compuesta con respecto al eje neutro es:

$$I_{\text{COMPUESTA}} = 47.44$$

f) Momento elástico

Se calcula considerando que el concreto en tracción está desarrollando un esfuerzo igual al módulo de rotura.

$$M = \frac{29 * 47.44 * 0.11}{(4.578 - 2.5)} = 6018.72 \text{ kgf} - \text{cm}$$

Bajo este momento el esfuerzo máximo en el acero y el concreto son:

$$\sigma_{\text{acero}} = \frac{6018.72 * 4.578}{47.44} = 580.81 \text{ kgf/cm (Tracción)}$$

$$\sigma_{\text{concreto}} = \frac{6018.72 * (8.75 - 4.578)}{47.44} = 58.22 \text{ kgf/cm (Compresión)}$$

Los cuales indican que están debajo de los límites de elasticidad tanto en el concreto como en el acero.

3.2.3.3 Viga Secundaria

a) Sección

La viga secundaria es un perfil ángulo de dimensiones 2.5cmx2.5cmx2mm:

b) Área

$$A = 0.96 \text{ cm}^2$$

3.2.4 Metrado de cargas

Considerando las dimensiones y detalles de la estructura se obtiene:

- Losa de concreto ($\gamma = 2400 \text{ kgf/m}^3$) = $2400 \times 0.725 \times 0.685 \times 0.0625 = 74.5 \text{ kgf}$
- Peso Vigas Principal ($\gamma = 7850 \text{ kgf/m}^3$) = $7850 \times 1.84 \times 10^{-4} \times 0.725 \times 2 = 2.1 \text{ kgf}$
- Peso Columnas ($\gamma = 7850 \text{ kgf/m}^3$) = $7850 \times 1.84 \times 10^{-4} \times 0.475 \times 4 = 2.7 \text{ kgf}$
- Peso Vigas Sec. ($\gamma = 7850 \text{ kgf/m}^3$) = $7850 \times 0.96 \times 10^{-4} \times 0.575 \times 2 = 0.9 \text{ kgf}$
- Peso Total = 80.2 kgf
- Masa = 0.082 kgf/cm-s²

El peso calculado anteriormente es teórico. Luego de elaborar el modelo el peso obtenido fue de 90 kgf. El peso aumento debido a que variaciones en el peralte de la losa y la cantidad de varillas que se usó en la malla. Por tanto se obtiene el peso y masa real:

- Peso Total = 90 kgf
- Masa = 0.092 kgf-s²/cm

3.2.5 Características dinámicas de la estructura

3.2.5.1 Rigidez lateral de la estructura

Considerando un pórtico plano como el mostrado en la Figura N° 3.4 la rigidez lateral está dada por la siguiente ecuación:

$$K_L = \frac{12 EI_C}{h^3} \left(\frac{6\gamma + 1}{3\gamma + 2} \right); \quad \gamma = \frac{EI_V/L}{EI_C/h} \quad (3.20)$$

Dónde:

I_C : Momento de Inercia de la columna

I_V : Momento de Inercia de la columna

L : Longitud del portico

h : Altura del pórtico (Altura de columna + Y_{cg} de la viga)

E : Módulo de elasticidad

Considerando las dimensiones y secciones del pórtico tenemos:

$$\gamma = \frac{Ex46.64/70.00}{Ex1.635/50.9} = 20.74$$

$$K_L = \frac{12 \times 2.04 \times 10^6 \times 1.635}{50.9^3} \left(\frac{6 \times 20.74 + 1}{3 \times 20.74 + 2} \right) = 592.5 \text{ kgf/cm (para un portico)}$$

$$K_L = 1185 \text{ kgf/cm (considerando los dos porticos del modelo)}$$

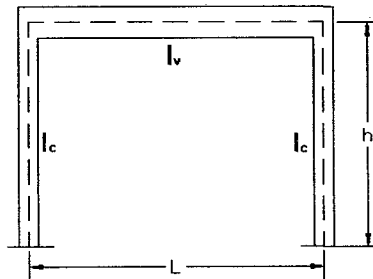


Figura N° 3.4 Pórtico simple

3.2.5.2 Periodo, frecuencia natural y frecuencia natural angular

- T (Periodo) = $2\pi \sqrt{\frac{M}{K}} = 2\pi \sqrt{\frac{0.092 \text{ kgf/cm-s}^2}{1185 \text{ kgf/cm}}} = 0.055 \text{ s}$
- f (frecuencia) = $1/T = 18.18 \text{ Hz}$
- ω (frecuencia natural angular) = 114.2 rad/s

El resumen con las principales características del modelo A se presentan en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2 Características del modelo A

PARAMETRO	VALOR	UNIDAD
Altura de columna	47.5	cm
Longitud de Viga	72.5	cm
Peralte de losa	6.25	cm
Peralte de viga	2.5	cm
Espesor de pared de viga	0.2	cm
Distancia de volado	3.0	cm
Momento de Inercia de Columna	1.635	cm ⁴
Momento elástico Columna	3587.84	kgf-cm
Peso	90	kgf
Masa	0.092	kgf-s ² /cm
Rigidez Lateral	1185	kgf/cm
Periodo	0.055	s
Frecuencia	18.18	Hz
Frecuencia natural angular	114.2	rad/s

3.2.6 Observaciones al modelo A

Luego de construir el modelo A se procedió a realizar los ensayos correspondientes a vibración libre y forzada sin disipadores. Los resultados de estos ensayos se detallan en el capítulo VI. El problema de este modelo fue que aun con las aceleraciones que la mesa vibradora podía reproducir el desplazamiento relativo de la losa era tan pequeño que no alcanzaba el valor de un milímetro. Esto era perjudicial en cuanto a la apreciación de la reducción de la respuesta cuando se colocarían los disipadores, pues uno podía pensar que esa reducción podía provenir de otros factores o algún tipo de ruido presente en las mediciones. Es por estos motivos que se optó por cambiar el modelo por otro más flexible y que pueda alcanzar desplazamientos más grandes. Y a su vez teniendo en cuenta que las columnas deben de comportarse en el rango elástico para que no ocurra disipación histerética y afectar en el cálculo del amortiguamiento del dispositivo disipador.

3.3 ESTUDIO DEL MODELO B

Como se explicó el modelo B debe ser más flexible para ello mantenemos constante la masa del sistema que en su mayor parte está dado por la losa, es decir la losa se mantiene igual al modelo A. Esto también se hace para aprovechar que tenemos una masa importante. Para hacer más flexible el modelo se cambia la sección y altura de las columnas. Se cambia la sección cuadrada por unas platinas de espesores pequeños. Las dimensiones y detalles del modelo propuesto se muestran en la Figura N° 3.5.

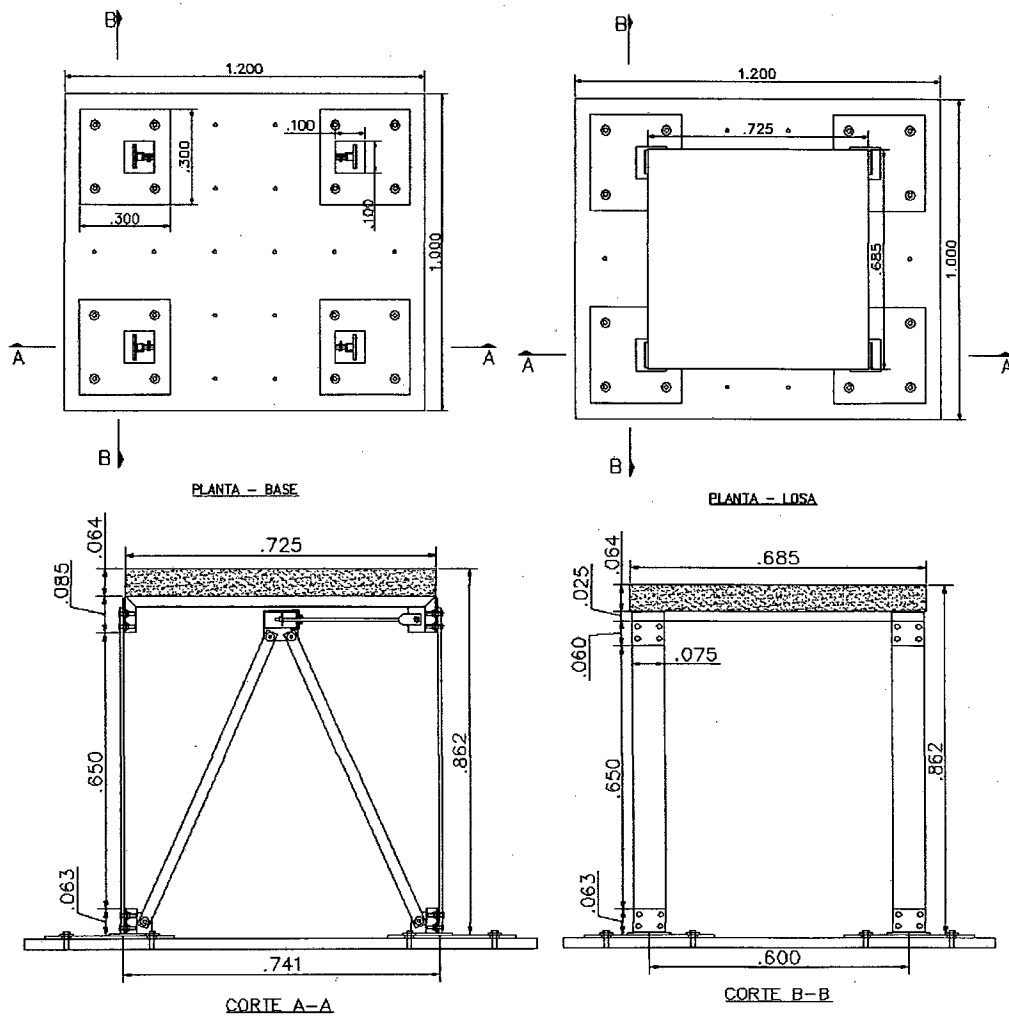


Figura N° 3.5 Modelo B (Dimensiones en metros)

Como se puede observar tenemos una columna formada por tres tramos: dos tramos extremos pequeños muy rígidos y el tramo intermedio flexible. El tramo intermedio que es la más larga y flexible aporta la altura de columna que debe de considerarse en el análisis, ya que la inclusión de los tramos extremos no modificaría sustancialmente a rigidez de toda la columna. Se optó por una unión con pernos en lugar de soldadura para poder realizar algún cambio si ocurriese

algún tipo de falla en la columna. Esto conlleva a tener una sección muy ancha para que se puedan colocar los pernos de sujeción.

Otro cambio es la manera de conectar el modelo a la mesa vibradora. En este caso solo se usa una plancha lo suficientemente grande para colocar 4 pernos de sujeción, con esta configuración ya no es necesario usar la base de concreto del modelo A.

3.3.1 Materiales y propiedades mecánicas de viga y columna

Para este modelo las columnas son platinas, las cuales tiene una resistencia a la fluencia de 2530 kgf/cm² según información dada por el fabricante [6].

3.3.1.1 Columna

En este caso se está calculando los valores para la sección intermedia

a) Sección

La sección es una platina de lado 7.5 cm y espesor 0.635cm

b) Área.

$$A=4.76 \text{ cm}^2$$

c) Momento de Inercia

$$I=0.16 \text{ cm}^4$$

d) Momento elástico ($M = \frac{F_y * I}{y_{cg}}$)

$$M=1274.96 \text{ kgf-cm}$$

e) Verificación por pandeo (según AISC 2005)

K=0.5 (condición de apoyos empotrados)

r(radio de giro)=0.18cm

L(altura de columna)=65cm

$$KL/r=177.29$$

b(ancho)=7.5cm

t(espesor)=0.635cm

$$b/t=11.81$$

$$F_e \text{ (tensión crítica de pandeo elástico)} = \frac{\pi^2 * E}{(KL/r)^2} = 627.96 \text{ kgf/cm}^2$$

$$4.71 * \sqrt{E/F_y} = 132.27 < KL/r$$

$$F_{cr} = 0.877 F_e = 550.71$$

$$P_n = A_x F_{cr} = 2622.79 \text{ kgf}$$

Podemos concluir que teóricamente el peso de la losa no provocaría pandeo en la columna

3.3.1.2 Viga de sección compuesta y viga secundaria

Estas secciones no han cambiado con respecto al modelo A.

3.3.2 Características dinámicas de la estructura

3.3.2.1 Rigidez lateral de la estructura

A diferencia del cálculo realizado en el modelo A en este caso primero se calcula la rigidez lateral de la una columna. Debido a que la inercia de la viga es 296.5 veces la inercia de la columna se puede considerar que la columna esta empotrada en la parte superior. Adicionalmente la conexión de la columna a la base esta tan rígida que también se considera un empotramiento en la parte inferior. Por tanto la rigidez latera de la columna es:

$$K_c = \frac{12 EI_c}{h^3} = 13.985 \text{ kgf/cm}$$

Y la rigidez de la estructura es 4 veces la rigidez de una columna:

$$K_L = 4 \times 13.985 = 55.94 \text{ kgf/cm}$$

3.3.2.2 Periodo, frecuencia natural y frecuencia natural angular

Antes de calcular el periodo se menciona que a pesar del cambio en la sección de la columna el peso del modelo no ha variado significativamente. Por tanto se mantiene el valor de 90kgf.

- T (Periodo) = $2\pi \sqrt{\frac{M}{K_{Lr}}} = 2\pi \sqrt{\frac{0.092 \text{ kgf/cm-s}^2}{55.94 \text{ kgf/cm}}} = 0.255 \text{ s}$
- f (frecuencia) = $1/T = 3.92 \text{ Hz}$
- ω (frecuencia natural angular) = 24.63 rad/s

El resumen con las principales características del modelo B se presenta en la Tabla 3.3

Tabla 3.3 Características del modelo B

PARAMETRO	VALOR	UNIDAD
Altura de columna	65	cm
Ancho de columna	7.5	cm
Espesor de columna	0.635	cm
Longitud de Viga	72.5	cm
Peralte de losa	6.25	cm
Peralte de viga	2.5	cm
Distancia de volado	3.0	cm
Momento de Inercia de Columna	0.16	cm ⁴
Momento elástico Columna	1274.96	kgf-cm
Peso	90	kgf
Masa	0.092	kgf-s ² /cm
Rigidez Lateral	55.94	kgf/cm
Periodo	0.255	s
Frecuencia	3.92	Hz
Frecuencia natural angular	24.63	rad/s

3.3.3 Capacidad de la estructura en el rango elástico

Se calcula el desplazamiento, cortante y aceleración máxima que la estructura puede desarrollar en el rango elástico considerando el momento elástico máximo calculado anteriormente.

$$V_{MAX}=2Me/h=39.23\text{kgf (Para una columna)}$$

$$V_{MAX}=4 \times 39.23=156.92\text{kgf (Para toda la estructura)}$$

Usando la rigidez lateral calculamos el desplazamiento máximo:

$$Desp_{MAX}= V_{MAX}/K_L=2.81\text{cm}$$

Se ha calculado el desplazamiento máximo considerando solo el momento debido a un desplazamiento lateral. Como siguiente paso se calcula los momentos debido al peso del modelo y el momento debido a efectos P-DELTA:

$$M_{\text{peso}}=1.93\text{kgf-cm}$$

$$M_{P-DELTA}=90 \times 2.81/4=63.225\text{kgf-cm}$$

$$M_{\text{maximo}}=Me-M_{\text{peso}}-M_{p-\text{delta}}=1213.065\text{ kgf-cm}$$

Por tanto el nuevo cortante basal máximo en la estructura es:

$$V_{MAX}=8 \times M_{maximo}/h=148.9 \text{kgf}$$

$$Desp_{MAX}= V_{MAX}/K_L=2.66 \text{cm}$$

Se calcula la aceleración absoluta máxima en la losa como sigue (Esto se cumple cuando el amortiguamiento es pequeño):

$$A_{max}= V_{MAX}/m=1618.5 \text{ cm/s}^2 \text{ (1.65G)}$$

Basados en que luego de alcanzar el límite de fluencia el acero se comporta plásticamente se grafica las curvas de capacidad para el cortante basal y la aceleración absoluta en la losa (Ver Figura N° 3.6)

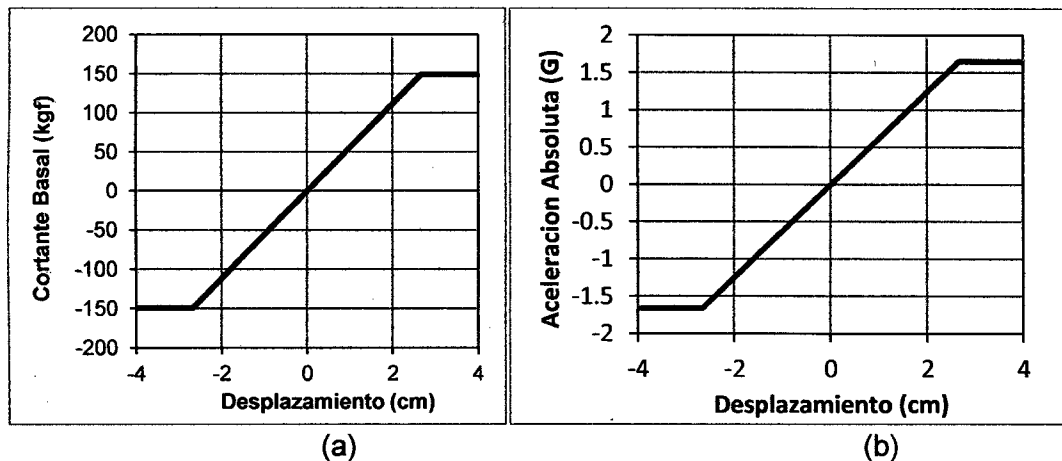


Figura N° 3.6 Curva de Capacidad (a) Cortante Basal (b) Aceleración Absoluta

Se puede decir que el modelo B es más flexible y con capacidad para tener desplazamiento importantes dentro del rango elástico. En el capítulo VI se detallara bajo qué condiciones este modelo alcanzo un desplazamiento de 1cm, lo cual es una mejora muy importante respecto al modelo A, sobre todo porque es posible apreciar visualmente la reducción del desplazamiento al incorporar los disipadores.

3.3.4 Propuesta de demanda para el modelo B

En esta sección se propone movimientos sinusoidales y sísmicos para el modelo considerando que no se debe de alcanzar el límite elástico (Ver Tabla 3.4 y Tabla 3.5). El amortiguamiento natural considerado para el análisis es el que se obtuvo en el ensayo del modelo A – vibración libre (ver capítulo VI).

Tabla 3.4 Propuesta de demanda para el modelo B

ITEM	MOVIMIENTO	ACELERACIÓN (cm/s ²)	FRECUENCIA (Hz)
1	SINUSOIDAL A	450.00	1.68
2	SINUSOIDAL B	450.00	2.24
3	SINUSOIDAL C	450.00	2.80
4	SINUSOIDAL D	450.00	4.47
5	SINUSOIDAL E	450.00	5.22
6	SINUSOIDAL F	450.00	5.97
7	MOVIMIENTO SISMO 74 (E-W)	192.49	-

Tabla 3.5 Respuesta a la propuesta de demanda para el modelo B

ITEM	DESPLAZAMIENTO RELATIVO (cm)	VELOCIDAD RELATIVA (cm/s)	ACELERACION RELATIVA (cm/s ²)	ACELERACION ABSOLUTA (cm/s ²)
1	0.93	10.28	114.2640	564.25
2	1.15	17.08	253.1192	703.09
3	1.69	31.24	578.4962	1028.41
4	1.68	49.68	1472.1913	1022.33
5	0.77	26.57	918.6693	468.70
6	0.47	18.69	738.4380	288.45
7	1.82	43.01	1088.15	1107.59

Basado en los datos de la Tabla 3.4 y Tabla 3.5 se grafica la demanda junto a la curva de capacidad (Ver Figura N° 3.7).

Se debe indicar que en el ensayo experimental se ensayó con esas frecuencias de movimiento, sin embargo no se usó una aceleración constante, sino variable para cada frecuencia. Los detalles y los niveles de aceleración se explicaran en el capítulo VI.

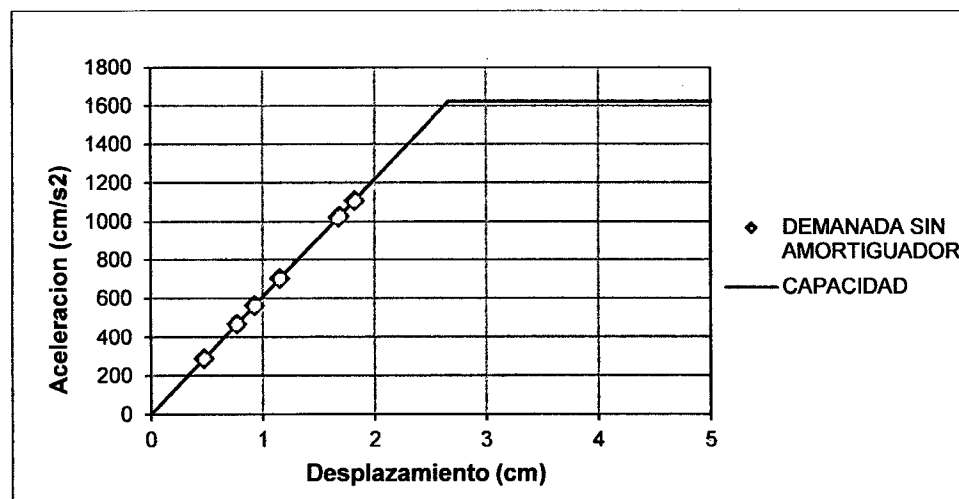


Figura N° 3.7 Curva de capacidad y demanda

3.3.5 Prototipo para el modelo B

Basados en los factores de escala se calcula las dimensiones y principales propiedades que le corresponderían al prototipo (Ver Tabla 3.6)

Tabla 3.6 Características del Prototipo correspondiente al modelo B

PARAMETRO	VALOR	UNIDAD
Altura de columna	325	cm
Ancho de columna	37.5	cm
Espesor de columna	3.175	cm
Longitud de Viga	362.5	cm
Peralte de losa	31.25	cm
Peralte de viga	12.5	cm
Distancia de volado	15.0	cm
Momento de Inercia de Columna	100	cm ⁴
Momento elástico Columna	6374.8	kgf-cm
Peso	11250	kgf
Masa	11.47	kgf-s ² /cm
Rigidez Lateral	279.7	kgf/cm
Periodo	1.275	s
Frecuencia	0.784	Hz
Frecuencia natural angular	4.926	rad/s

CAPÍTULO IV

ESTUDIO DEL DISPOSITIVO DISIPADOR VISCOSO

4.1 ALCANCES

El estudio del dispositivo disipador consiste en determinar la configuración, materiales y dimensiones del dispositivo en el modelo a escala.

4.2 CONFIGURACIÓN DEL DISPOSITIVO

El dispositivo está configurado por una capsula llena de líquido viscoso, un pistón capaz de moverse dentro de la capsula, el vástago que conecta el pistón con la estructura y un retén que impide la salida del líquido como se muestra en la Figura N° 4.1

El mecanismo consiste en transmitir el movimiento del sistema al pistón por medio del vástago. El movimiento del pistón genera el movimiento del líquido. Debido al movimiento del líquido a través de la región anular, entre la capsula y el pistón, se genera un diferencial de presión y esfuerzos de corte. El diferencial de presión en la cabeza del pistón y los esfuerzos de corte en la superficie del pistón son los que dan origen a la fuerza de amortiguamiento, que impide el libre movimiento del pistón, y se transmite al sistema a través del vástago.

Para que el mecanismo sea adecuado es necesario restringir el movimiento de la capsula, para ello se la une a la parte inferior del pórtico por medio de brazos. Las conexiones de los brazos y el vástago a la estructura se hacen empernando estos elementos a planchas de conexión que van soldadas en la estructura como se muestra en la Figura N° 4.1.

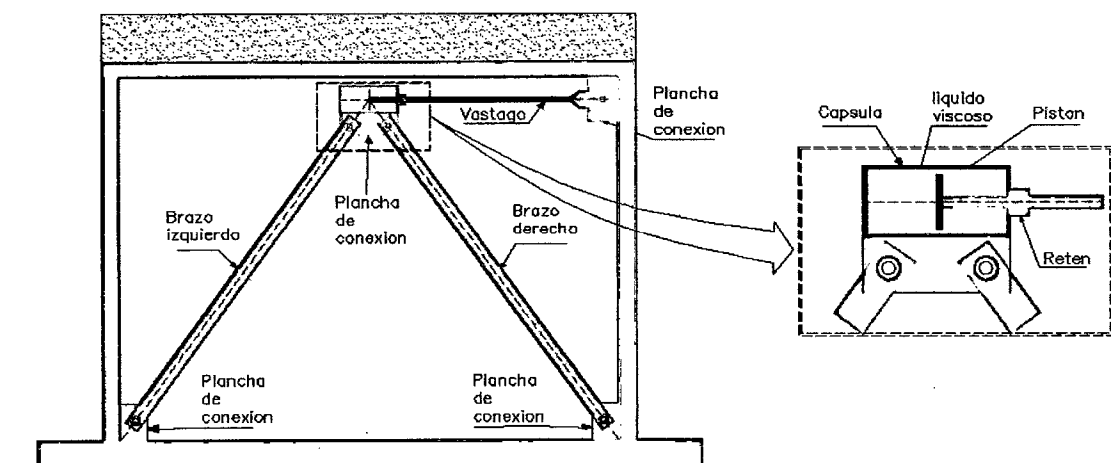


Figura N° 4.1 Modelo a escala reducida- Componentes

4.3 ANALISIS DIMENSIONAL Y SIMILITUD

Es necesario ahora hacer un análisis dimensional y similitud que considere todas las variables que intervienen en el mecanismo de disipación del disipador (Ver Figura N° 4.2). Del estudio simplificado del disipador pistón mostrado en la sección 2.3 se sabe que la fuerza de amortiguamiento depende de la velocidad V , diámetro de la cabeza del pistón R_p , diámetro interno de la capsula R , longitud de la cabeza de pistón L_p y la viscosidad dinámica del líquido μ . Por tanto en la forma más general podemos establecer la siguiente formulación para la fuerza de amortiguamiento.

$$F_a = f(\mu, R_p, R, L_p, V) \quad (4.1)$$

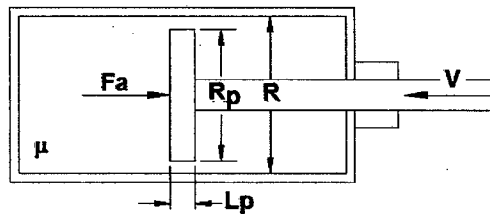


Figura N° 4.2 Análisis dimensional del modelo

Ahora se hace una análisis dimensional de las variables consideradas para encontrar los términos adimensionales " π ":

- $[F_a] = MLT^{-2}$
- $[R] = L$
- $[R_p] = L$
- $[L_p] = L$
- $[\mu] = ML^{-1}T^{-1}$
- $[V] = LT^{-1}$

Escogemos las variables independientes F_a, R, V y calculamos la cantidad términos adimensionales:

Cantidad de $\pi_s = 6(\text{Cantidad de variables}) - 3(\text{variables independientes})$

Cantidad de $\pi_s = 3$

- Determinamos el adimensional π_1 relacionando las variables independientes con R_p :

$$\pi_1 = F_a^a * R^b * R_p^c * V^e$$

$$\pi_1 = (MLT^{-2})^a * (L)^b * (L)^c * (LT^{-1})^e$$

Resolviendo:

$$a = 0, b = -1, c = 1, e = 0 \rightarrow \pi_1 = \frac{Rp}{R} \quad (4.2)$$

- Determinamos el adimensional π_2 relacionando las variables independientes con Lp :

$$\pi_1 = Fa^a * R^b * Lp^c * V^e$$

$$\pi_1 = (MLT^{-2})^a * (L)^b * (L)^c * (LT^{-1})^e$$

Resolviendo:

$$a = 0, b = -1, c = 1, e = 0 \rightarrow \pi_2 = \frac{Lp}{R} \quad (4.3)$$

- Determinamos el adimensional π_3 relacionando las variables independientes con μ :

$$\pi_1 = Fa^a * R^b * \mu^c * V^e$$

$$\pi_1 = (MLT^{-2})^a * (L)^b * (ML^{-1}T^{-1})^c * (LT^{-1})^e$$

Resolviendo:

$$a = 1, b = -1, c = -1, e = -1 \rightarrow \pi_3 = \frac{Fa}{R * V * \mu} \quad (4.4)$$

Ahora para que exista similitud completa se debe cumplir que los términos π sean los mismos tanto para el modelo como para el prototipo:

- Similitud para π_1 :

$$(\pi_1)_{Mod.} = (\pi_1)_{Prot.}$$

$$\left(\frac{Rp}{R}\right)_{Mod.} = \left(\frac{Rp}{R}\right)_{Prot.}$$

$$\frac{R_{Prot}}{R_{Mod}} = \frac{Rp_{Prot.}}{Rp_{Mod.}} = n$$

Esta relación indica que debe se debe emplear el mismo factor de escala dimensional para el radio del pistón y el radio interno de la capsula.

- Similitud para π_2 :

$$(\pi_2)_{Mod.} = (\pi_2)_{Prot.}$$

$$\left(\frac{Lp}{R}\right)_{Prot.} = \left(\frac{Lp}{R}\right)_{Mod}$$

$$\frac{R_{Prot}}{R_{Mod}} = \frac{Lp_{Prot.}}{Lp_{Mod.}} = n$$

Al igual que en el anterior análisis el factor de escala dimensional para la longitud del pistón también debe ser n .

- Similitud para π_3 :

$$\left(\frac{Fa}{R * V * \mu} \right)_{Prot.} = \left(\frac{Fa}{R * V * \mu} \right)_{Mod.}$$

Se debe tener en cuenta que el factor de escala de fuerza y velocidad se determinó en el capítulo III, entonces:

$$\frac{Fa_{Mod} * n^2}{d_{Mod} * n * V_{Mod} * 1 * \mu_{Prot}} = \frac{Fa_{Mod}}{d_{Mod} * V_{Mod} * \mu_{Mod}}$$

$$\frac{\mu_{Prot}}{\mu_{Mod}} = n \quad (4.5)$$

Esta última relación implica que para que exista correlación entre los resultados del modelo y resultados en el prototipo se debe usar un líquido cuya viscosidad se "n" veces la viscosidad del líquido del modelo.

4.4 MATERIALES Y DIMENSIONES DEL DISIPADOR

Como base para el disipador a escala reducida se usó las partes de un inflador de bicicletas (Figura N° 4.3) por su similitud con la configuración propuesta, ya que este también consta de un pistón, capsula y vástago. La diferencia con la configuración propuesta es que no lleva reten, ni liquido viscoso en su interior.

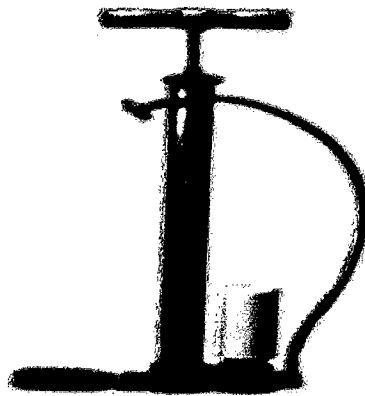


Figura N° 4.3 Inflador de bicicleta

Sobre el diámetro que debería tener la capsula se encuentra que los disipadores en escala real tienen diámetros entre 11.4cm y 42.5cm (Ver Tabla 4.1). Entonces si usamos el mismo diámetro del inflador para el modelo, que es de 4cm, a escala del prototipo seria de 20cm y este valor está dentro del rango señalado. La longitud de la capsula está relacionada con el desplazamiento máximo que el modelo pueda desarrollar. Como se espera que el modelo no pase los 2.66 cm a cada lado un valor de 8 cm es adecuado.

Tabla 4.1 Dimensiones de Disipadores comerciales Taylor [10]

Capacidad de Fuerza (kN)	Diámetro de Cilindro (cm)
250	11.4 máx.
500	15.0 máx.
750	18.4 máx.
1000	21.0 máx.
1500	24.1 máx.
2000	29.2 máx.
3000	35.0 máx.
4000	42.5 máx.

Adicionalmente se debe colocar una reten para evitar la salida del líquido. Para ello se soldó a la tapa un elemento llamado bocina en el cual se puede alojar el retén. El retén usado es el que se usa en el campo automotriz como reten de válvula para autos (Ver Figura N° 4.4).

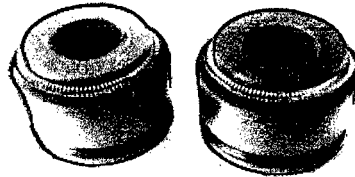


Figura N° 4.4 Reten de válvula de carro

En el modelo inicial del disipador se conservó el mismo diámetro del pistón del inflador y el mismo vástago. La Figura N° 4.5 muestra como era el modelo inicial.

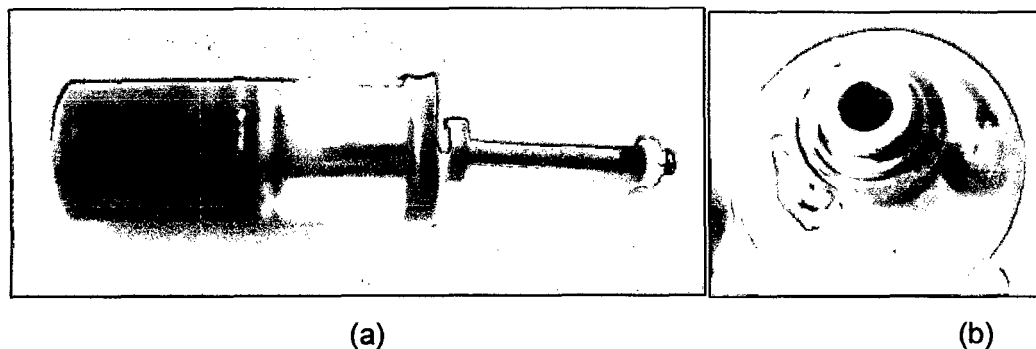


Figura N° 4.5 Modelo inicial de disipador (a) vista general (b) detalle del retén
Debido a que la pared de la cápsula era muy delgada no se pudo colocar una adecuada soldadura (originaba filtraciones). Por tanto se vio la necesidad de fabricar esta capsula con un pared más gruesa. La fabricación de la capsula conlleva a que la tapa de la capsula también se deba fabricar originando una

mejora en la colocación del retén ya que no será necesario fabricar una bocina y soldar a la tapa. Cabe indicar que la tapa es necesaria para poder cambiar el líquido y si se desea se puede cambiar el tipo de pistón. La otra modificación que se hizo fue en la cabeza del pistón. La cabeza de pistón que tenía el inflador era muy delgada y de diámetro pequeño. Se cambió esta por una más ancha y de diámetro muy cercano al diámetro interno de la capsula, ya que cuando se tiene un espacio más pequeño para el flujo del líquido se obtiene una mayor fuerza de amortiguamiento. El elemento que no sufre cambio es el vástago. La Figura N° 4.6 muestra los detalles del disipador propuesto.

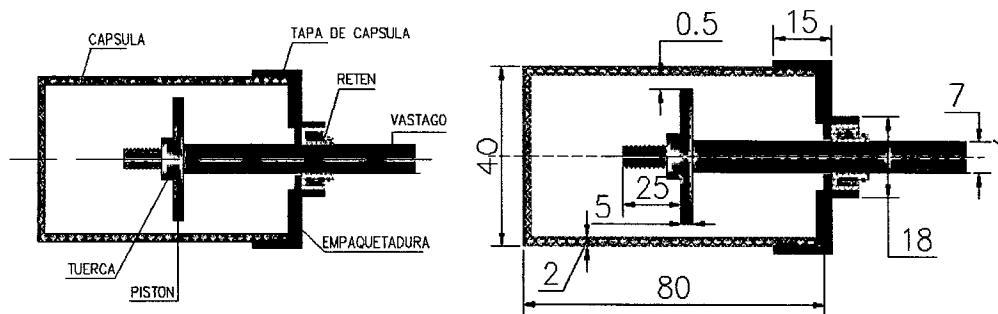


Figura N° 4.6 Dispositivo propuesto (a) elementos (b) Dimensiones (mm)

Como se observa también se añadió una empaquetadura en el interior para evitar fugas en la interfaz de la tapa.

La fabricación de los elementos se realizó en una tornería. En la cual a base de un material bruto de acero van dándole forma con maquinaria especializada capaz de fabricar elementos con precisión. Los detalles cada elemento fabricado y el disipador completo se muestra de la Figura N° 4.7 a la Figura N° 4.9:



Figura N° 4.7 Capsula, pistón y tapa de capsula fabricados

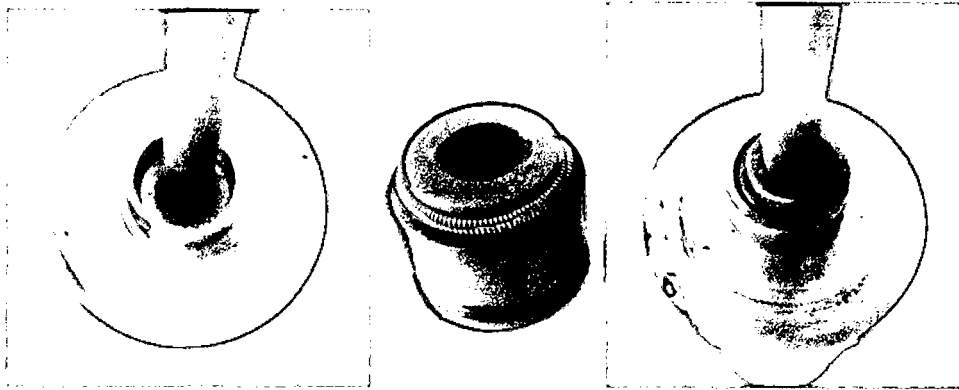


Figura N° 4.8 Tapa sin reten, reten y tapa con reten

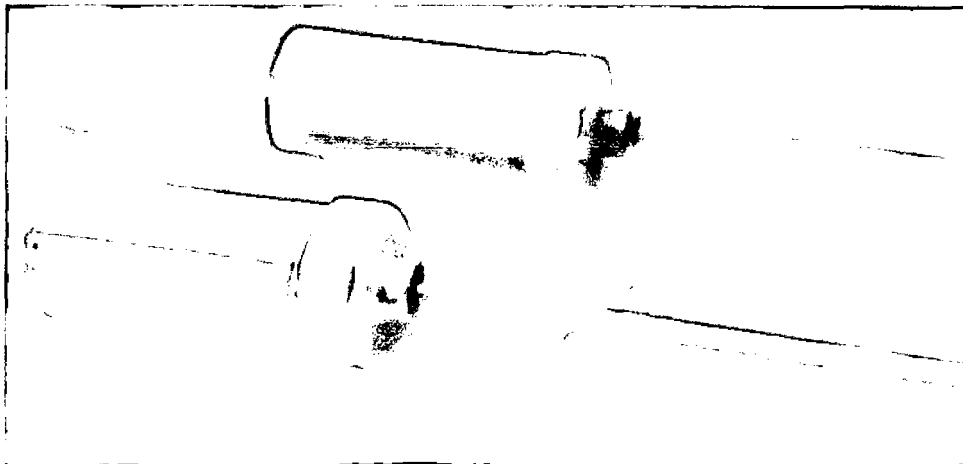


Figura N° 4.9 Vista general de los dos disipadores

Se calcula la resistencia del vástago para conocer cual es la fuerza de amortiguamiento máximo que puede transmitir antes de que falle. En la Figura N° 4.10 se presenta un esquema con las dimensiones del vástago.

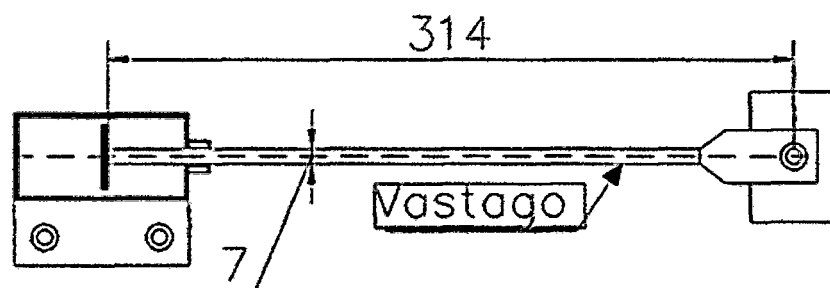


Figura N° 4.10 Dimensiones del vástago (mm)

Se Verifica por tracción en condiciones de fluencia

- Area (A)=0.38 cm²
- $\phi_{Pan} = \phi_{Aft} = 0.9 \times 0.38 \times 2536.2 \text{ kg/cm}^2 = 878 \text{ kgf}$

Se Verifica por pandeo en compresión

- $r(\text{radio de giro})=D/4=0.18 \text{ cm}$
- $K(\text{Factor de longitud efectiva})= 1$
- $L(\text{Longitud})=31.4$
- $KL/r=179.43$
- $4.71 \sqrt{\frac{E}{F_y}}=133.68 < KL/r$ entonces $F_{cr}=0.877F_e$
- $F_e=\frac{\pi^2 E}{(KL/r)^2}=626.32$
- $\phi P_{an}=\phi \times 0.877 \times F_e \times A=0.9 \times 0.877 \times 626.32 \times 0.38=190.25 \text{ kgf}$

Considerando la cortante máxima calculada de 149.3kgf y que esta deba ser resistida únicamente por los disipadores. A cada disipador le correspondería una fuerza de 74.65 kgf. Por tanto podemos decir que aun en la condición más crítica el vástago no fallaría.

Es importante también calcular la rigidez de este elemento para verificar que las deformaciones son insignificantes comparadas con el desplazamiento que el modelo pueda desarrollar.

- $K_{VASTAGO}=EA/L=2.04 \times 10^6 \times 0.38/31.4=49375.8 \text{ kgf/cm}$

Considerando la fuerza de amortiguamiento máxima calculada anteriormente se obtiene la siguiente deformación:

- $Def_{VASTAGO}=74.65/49375.8=0.0015 \text{ cm}$

Este resultado indica que la deformación en el vástago es muy insignificante comparado con el desplazamiento máximo para la condición crítica (2.66cm).

4.5 MATERIALES Y DIMENSIONES DE LOS BRAZOS

Los brazos son los elementos que sirven de conexión entre la capsula y la parte inferior del modelo. Este elemento al igual que el vástago debe ser lo suficientemente rigido para que las deformaciones en este elemento sean muy pequeñas talque no reduzcan la eficiencia del disipador como se explico en la seccion 2.5.2.2. El material propuesto para estos elementos es acero estructural. Estos elementos estan comformados por platinas de 1"x3/16" (Ver Figura N° 4.11). La longitud esta determinada por la geometria del modelo.

Como paso siguiente se procede a verificar por resistencia para la misma condición crítica calculada para el vástago. Se considera en este cálculo el peso proveniente de la capsula (Ver Figura N° 4.11).

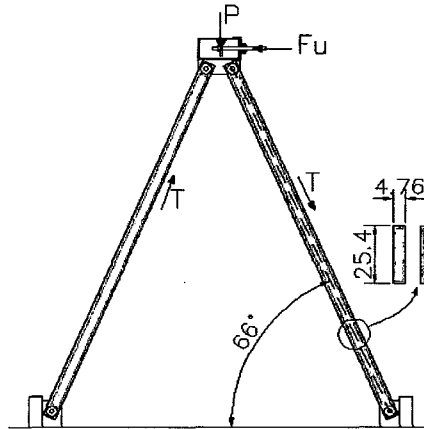


Figura N° 4.11 Transmisión de fuerzas a los brazos

Peso de capsula más líquido=0.262kgf

Fuerza Fu=74.65 kgf

Angulo de Inclinación=66°

Por tanto la fuerza T en cada sección formada por dos platinas es:

$$T = \frac{Fu}{2\cos\theta} + \frac{P}{2\sin\theta} = \frac{74.65}{2\cos 66} + \frac{0.262}{2\sin 66} = 91.91\text{kgf}$$

Ahora se verifica por tracción y compresión

a) Verificación por tracción

- Área (A)=2.42 cm²
- $\phi P_n = \phi A_x F_y = 0.9 \times 2.42 \times 2536.2 \text{ kg/cm}^2 = 6132 \text{ kgf} > T \quad \dots \text{ Ok}$

b) Verificación por compresión

- Momento de Inercia (I)= $2 \times 0.476 \times 2.54^3 / 12 = 1.3 \text{ cm}^4$
- r (radio de giro)= $(I/A)^{0.5} = 0.73 \text{ cm}$
- K (Factor de longitud efectiva)= 1
- L (Longitud)=76 cm
- KL/r=104.1
- $4.71 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 133.68 > KL/r$ entonces $F_{cr} = F_y \times 0.658^{(F_y/F_e)}$
- $F_e = \frac{\pi^2 E}{(KL/r)^2} = 1857.9 \text{ kgf/cm}^2$
- $F_{cr} = 1432.3 \text{ kgf/cm}^2$
- $\phi P_n = \phi F_{cr} A = 3119.5 \text{ kgf} > T \quad \dots \text{ Ok}$

Como último paso se calcula la rigidez para los dos brazos. Para ello utilizamos la siguiente formula:

$$K_{LB} = \frac{2EA\cos^2\theta}{L} = \frac{2 \cdot 2.04 \cdot 10^6 \cdot \cos^2 66}{76} = 8881.23 \text{ kgf/cm}$$

Para la condición crítica se obtiene una deformación lateral de:

$$- \text{Def}_{\text{BRAZO}} = 74.65 / 8881.23 = 0.0084 \text{ cm}$$

Por tanto es también muy pequeña comparado con el desplazamiento máximo en esa condición.

4.6 DETALLES DE CONEXIONES

Ya que el mismo modelo será usado para el ensayo con y sin disipadores, los disipadores deberán estar conectados a la estructura por medio de un mecanismo que permita su instalación y desinstalación. Para lograr el objetivo antes mencionado las conexiones del dispositivo se harán por medio de pernos. Para ello se suelda a la estructura planchas de conexión con agujeros. Se adapta el vástago, soldando una pequeña plancha con un agujero para poder conectarla a la plancha. Y se hace lo mismo con los brazos como se muestra en la Figura N° 4.12

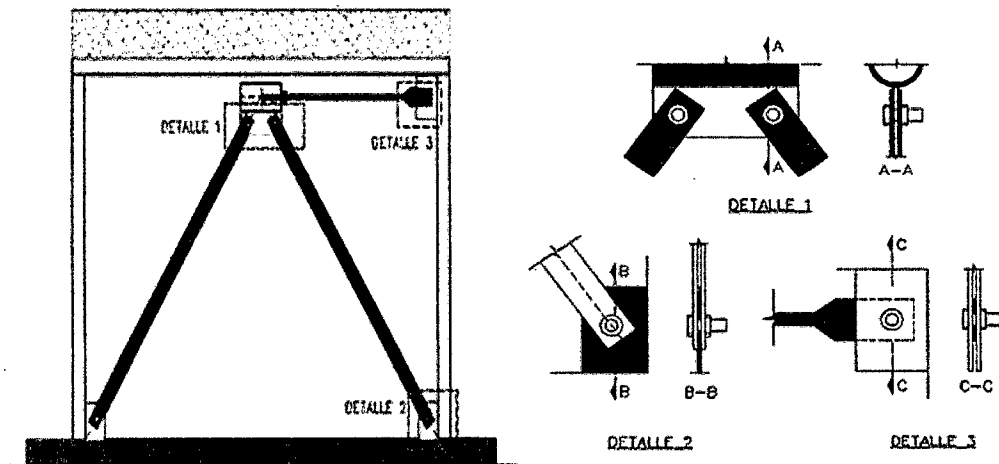


Figura N° 4.12 Detalles de conexiones

4.7 LIQUIDO VISCOSO

La elección del líquido viscoso depende de su viscosidad y su disponibilidad en el mercado. Siendo el variable más crítica la disponibilidad, como primer paso se

buscó los líquidos viscosos que se comercializan en el mercado. A continuación se muestra los líquidos propuestos:

4.7.1 Aceite de silicona

Es el líquido viscoso utilizado en los disipadores [25] debido a que es muy estable altas temperaturas, es decir sus propiedades físicas no cambian. El aceite de silicona tiene muchas aplicación tanto en medicina, industria de alimentación, como para uso cosmético y lubricante. Dependiendo de su uso varía su viscosidad.

En el mercado se encuentra dos variedades de aceite de silicona: como producto para el cuidado de cabello y como lubricante, siendo el más económico el usado como lubricante. Sin embargo de estos productos no vienen con especificaciones sobre el valor de su viscosidad. Solo se encontró en la web un valor de viscosidad para un aceite de silicona del tipo cosmético (Ver Figura N° 4.13a y Tabla 4.2)

Tabla 4.2 Propiedades de Aceite de silicón de uso cosmético [23]

VISCOSIDAD				
LIQUIDO	Temperatura (°C)	Cinemática	Dinámica	
		cSt	cP	Kgf-s/cm ²
Aceite de silicona (Silok 2430)	25	35	35	3.5×10^{-7}

Nota: la fuente indica solo la viscosidad cinemática. El cálculo de la viscosidad dinámica se basó en asumir una gravedad específica de uno.

El aceite de silicona escogido es el de tipo lubricante (Ver Figura N° 4.13b) por tener un costo menor al del tipo para el cuidado del cabello.

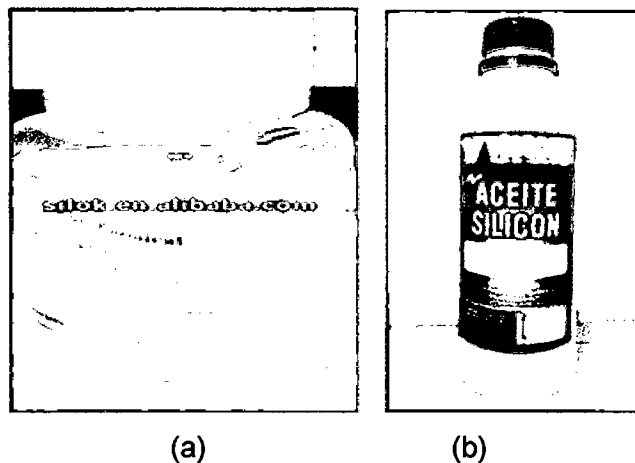


Figura N° 4.13 Presentación de aceite de silicón (a) cosmético (b) lubricante

Según las especificaciones de este producto tiene buena viscosidad (no indica cantidad), Bajo peligro al fuego y buena estabilidad al calor. También indica alta compresibilidad.

4.7.2 Glicerina líquida

Usado para fabricación de medicinas y por ser no tóxico se usa como lubricante de máquinas procesadoras de alimentos. Ver presentación en la Figura N° 4.14

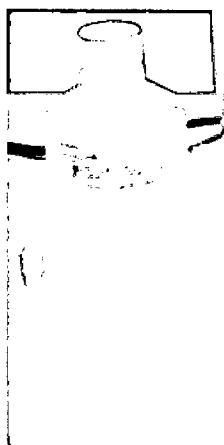


Figura N° 4.14 Presentación de Glicerina

Para este producto se tiene información sobre sus propiedades físicas y químicas como: Contenido de glicerol, gravedad específica, agua, cloruros, etc. (Ver Anexo I) obtenidas del fabricante. De estos datos el más importante encontrado es el que se refiere a su gravedad específica, la cual es igual a 1.249 (a 25°C). Sin embargo tampoco se tiene información sobre su viscosidad. Un valor referencial para el valor de la viscosidad para la glicerina se presenta en la Tabla 4.3

Tabla 4.3 Propiedades de la Glicerina [2]

VISCOSIDAD DINAMICA				
LIQUIDO	Temperatura (°C)	(mPa-s)	cP (centipoise)	Kgf-s/cm ²
Glicerina (100%)	20	1500	1500	1.5x10 ⁻⁵

4.7.3 Aceite de motor

En general tiene una baja inflamabilidad y toxicidad media, se comercializa en diferentes grados de viscosidad. Se usará aceite de motor SAE 40 y SAE50 los cuales tienen las más altas viscosidades. El fabricante proporciona valores para la viscosidad cinemática. En base a esos valores y considerando como densidad

especifica igual a uno se obtienen los valores de viscosidad dinámica, las cuales se presentan en la Tabla 4.4.

Adicionalmente se propone utilizar una grasa de auto (Ver Figura N° 4.15) por ser muy viscosa.

Tabla 4.4: Viscosidad de aceite de motor SAE [22]

GRADO SAE	SAE 40	SAE 50
Viscosidad Dinámica a 40°C (cP)	146.7	220.9



Figura N° 4.15 Presentación de la grasa

De esta grasa no se tiene información de su viscosidad, sin embargo es evidente que es más alta que los líquidos y tiene bastante pegajosidad. Lo que lo hace un material difícil de fluir.

Inicialmente se pretendía utilizar todos los líquidos en el ensayo en mesa vibradora. Sin embargo se optó por determinar mediante otro ensayo que líquido sería el más conveniente para el modelo, es decir el que mostraba un mejor amortiguamiento y comportamiento. Este ensayo se le denominó ensayo preliminar o de carga monótonica y está detallado en el capítulo V. Adicionalmente se realizaron ensayos de viscosidad al aceite de silicón y glicerina a 40°C (Ver capítulo VI), para poder comparar esas viscosidades con las viscosidades de los aceites de motor, las cuales si están dadas por el fabricante. Luego del ensayo preliminar se optó por utilizar la glicerina (los detalles se presentan en el capítulo VI). A partir de ello se decidió realizar otro ensayo de viscosidad a la glicerina, pero esta vez a una temperatura ambiente de 18°C (Ver capítulo VI), para tener valores de viscosidad entre 18°C y 40°C que sería un rango de temperatura probable de la glicerina cuando se realice el ensayo en mesa vibradora.

CAPÍTULO V

ESTUDIO EXPERIMENTAL

En esta sección se dará un alcance de todos los ensayos a realizar: descripción, procedimientos y la forma de analizarlos. En resumen los ensayos realizados se dividen en 3 grupos. El primer grupo engloba los ensayos realizados solo al líquido viscoso, el segundo grupo es el ensayo realizado a los disipadores y por último el tercer grupo es el ensayo dinámico en la mesa vibradora.

El primer grupo de ensayos fueron realizados en el Laboratorio N° 13, perteneciente a la Facultad de Ciencias, ubicado en la Facultad de Química. Los otros dos grupos se realizaron en el Laboratorio de Estructuras del CISMID-UNI.

5.1 ENSAYOS REALIZADOS AL LÍQUIDO

5.1.1 Viscosidad

Se definen dos tipos de viscosidades: viscosidad dinámica (μ) y viscosidad cinemática (ν). Estos dos tipos están relacionados por la densidad (ρ):

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (5.1)$$

Dependiendo del tipo del líquido se utiliza diferentes técnicas de medición. Para líquidos no muy viscosos se suele ensayar con un viscosímetro que mide la viscosidad dinámica. Para otros tipos de líquidos es preferible utilizar otros instrumentos y hallar la viscosidad cinemática.

En los ensayos realizados se utilizó el viscosímetro brookfield (Ver Figura N° 5.1), el cual mide la viscosidad dinámica.

El viscosímetro Brookfield es del tipo rotacional y mide indirectamente la viscosidad cuando una ajuga (varilla con terminación en disco, denominado splin) ubicado en el interior de un recipiente, gira a determinada velocidad angular. La viscosidad del líquido dentro del recipiente está relacionada con la fuerza necesaria para girar la aguja a determinada velocidad. Además de poder ajustar la velocidad angular es posible medir la temperatura del líquido gracias a unos sensores conectados. La viscosidad se registra automáticamente en la pantalla.

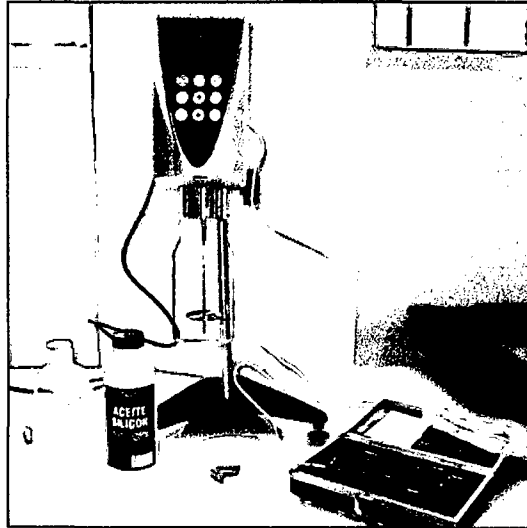


Figura N° 5.1 Viscosímetro Brookfield (Foto del ensayo)

El procedimiento consiste en colocar el líquido en el recipiente, conectar la aguja correspondiente, comprobar la temperatura, definir la velocidad angular y leer la medida que indica la pantalla.

5.2 ENSAYO PRELIMINAR DEL DISPOSITIVO.

Antes de realizar el ensayo del modelo de pórtico con los dispositivos disipadores instalados es necesario conocer con que líquido se va ensayar. Si bien es cierto es posible realizar el ensayo en la mesa vibradora con los 5 tipos de líquidos, este procedimiento no es conveniente porque el ensayo en mesa vibradora tomaría mucho más tiempo y la disponibilidad para este ensayo no es tan alta. Por tanto se decidió realizar un ensayo preliminar con el fin de seleccionar el líquido más apropiado, es decir con el que se pueda obtener un mayor amortiguamiento. Por otra parte este ensayo, por ser individual para cada disipador) nos mostrara cual es la variación en el comportamiento para los dos dispositivos fabricados, ya que estos por defectos de construcción tienen una pequeña variación geométrica en el diámetro de la capsula y pistón.

Para poder discriminar que líquido es más conveniente, el primer filtro sería la viscosidad del líquido; esta medida conllevaría a utilizar el líquido más viscoso; sin embargo también debemos de observar el buen comportamiento del disipador con ese líquido.

Lo más conveniente sería realizar un ensayo cíclico y se necesitarían actuadores para cargas muy pequeñas ya que es un modelo a escala; sin embargo en el

laboratorio del CISMID solo se cuenta con actuadores para cargas muy elevadas del orden de toneladas. Esto conduce a idear otro tipo de ensayo donde se use cargas pequeñas, pero que no son cíclicas. Debido a que este ensayo es un ensayo preliminar que solo busca encontrar el líquido más apropiado los comportamientos que se obtengan no serán los definitivos. El comportamiento definitivo se calculara en base el ensayo en mesa vibradora en la cual si se puede ensayar bajo cargas cíclicas, pero al sistema en conjunto pórtico-disipador.

El ensayo propuesto básicamente busca medir dos cosas: la velocidad en el pistón bajo una carga constante (por ello es también denominado ensayo de carga monotónica) y la fuerza de amortiguamiento que se genera. Para encontrar estos valores se usaran los registros de un transductor de desplazamiento, registro de las cargas aplicadas y las ecuaciones de movimiento para este sistema.

5.2.1 Descripción del ensayo

El ensayo consiste en colocar el dispositivo en posición vertical como se muestra en la Figura N° 5.2. Para fijar el dispositivo se utiliza un bloque de madera, el cual tiene un orificio en la parte central de la misma forma que la sección del dispositivo tal que el dispositivo pueda entrar en el a presión, además este bloque contiene dos orificios para pasar los pernos que lo anclaran a una viga de acero. En el otro extremo del vástago se coloca una plancha horizontal, en la cual se colocaran las cargas. Para estabilizar el movimiento vertical del vástago se coloca un listón con un orificio en el centro para que sirva como una guía e impedir que ocurra un movimiento en otra dirección que no sea la vertical.

Para la medición del desplazamiento se colocaron dos transductores de desplazamiento como se muestra en la Figura N° 5.2.

Se seleccionara 5 tipos de carga según el líquido a ensayar. Se utilizarán los siguientes fluidos viscosos:

- a) ACEITES SAE 40
- b) ACEITE SAE 50
- c) ACEITE SILICON

d) GLICERINA

e) GRASA

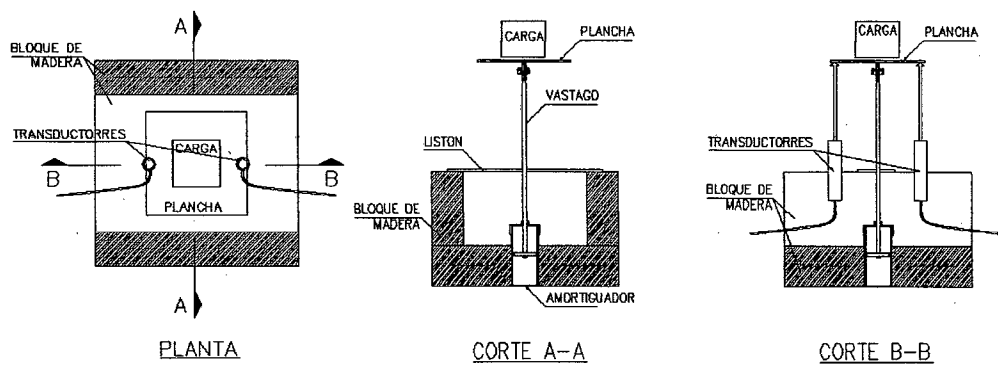


Figura N° 5.2 Disposición del dispositivo en el ensayo preliminar

El ensayo consiste en aplicar una carga conocida en la parte superior del vástago y medir el desplazamiento de este en el tiempo con ayuda del transductor de desplazamiento. Y repetir este procedimiento para diferentes cargas, diferentes tipos de líquidos y para cada uno de los dos disipadores. En el anexo III se muestran las fotos referenciales del ensayo.

5.2.2 Procedimiento del ensayo

- a. Se registra el peso del vástago, el pistón, la plancha y las pesas disponibles
- b. Colocar el líquido en la capsula del dispositivo
- c. Seleccionar los 5 tipos de cargas
- d. Colocar el transductor de desplazamiento en posición
- e. Conectar todos los instrumentos a la computadora
- f. Colocar la carga en la plancha y soltarla
- g. Registrar el movimiento del transductor de desplazamiento y guarda el archivo
- h. Repetir los pasos de f a g para cada tipo de carga y para cada líquido.

5.2.3 Análisis del ensayo

El movimiento del vástago está dado por la segunda ley de Newton. Por tanto debemos de considerar todas las fuerzas que interactúan con el vástago, para ello hacemos un diagrama de cuerpo libre (Ver Figura N° 5.3):

$$P + W - Fa = \left(\frac{W}{g}\right) * \ddot{x} \quad (5.2)$$

Dónde:

- W : Peso de la plancha + vástago

- P : carga impuesta
- F_a : Fuerza de amortiguamiento

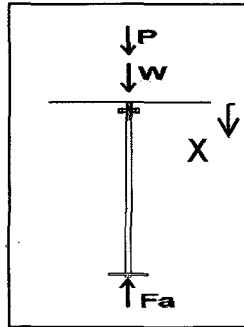


Figura N° 5.3 Diagrama de cuerpo libre del ensayo preliminar

Despejamos la fuerza de amortiguamiento:

$$F_a = P + W - \left(\frac{W}{g}\right) * \ddot{x} \quad (5.3)$$

La aceleración será calculada a partir del registro de desplazamientos en el tiempo. Y también se puede tener el registro de velocidad derivado del registro de desplazamientos. Con estos datos podemos establecer una relación entre fuerza de amortiguamiento y velocidad para cada uno de los ensayos.

5.3 ENSAYO DINAMICO EN MESA VIBRADORA

La instrumentación, ubicación de sensores y manejo del programa para envío de señal se detallan en el Anexo II

5.3.1 Ensayo del modelo sin disipadores

El ensayo para el modelo sin disipadores consistirá en tres tipos de ensayos. El primero corresponde a un ensayo en vibración libre para poder obtener la frecuencia natural del modelo y el amortiguamiento natural. Y el segundo corresponde a movimientos sinusoidales. Y el tercero es un movimiento registro sísmico.

5.3.1.1 Ensayo de vibración libre

Consiste en aplicar al modelo un pequeño golpe que haga que se mueva lo suficiente para tener un registro de aceleraciones y desplazamientos aceptable.

La evaluación del periodo de movimiento se hace calculando el espectro de Fourier del movimiento y se calcula la frecuencia dominante, la cual es la

frecuencia natural. El amortiguamiento natural se calcula de acuerdo al método de decremento logarítmico (Ver sección 1.4.1)

5.3.1.2 Ensayo en vibración forzada – Movimiento sinusoidal

Consiste en aplicar un movimiento sinusoidal a la mesa vibradora. Se ensayara con 6 tipos de movimientos sinusoidales con diferente frecuencia. Se escoge 3 frecuencias menores a la frecuencia natural y 3 frecuencias superiores. Los valores ingresados en el software PROYECTO01 (Ver Anexo II) y el ajuste de perillas (MIXING LEVEL SET-AUX y OUTPUT LEVEL) en el tablero de control de vibración aleatoria (RANDOM VIBRATION EQUALIZER) de la mesa vibradora se muestran en la Tabla 5.1. Dichas perillas ajustan el nivel de salida de la señal [20].

Tabla 5.1 Valores ingresados en el software PROYECTO01- Vibración sinusoidal

Frec. Mov. (Hz)	Frecuencia Angular (ω)	Tiempo (s)	Diferencia de voltaje máxima	Dt	Ajuste en la perilla	
					MIXING LEVEL SET - AUX	OUTPUT LEVEL
1.671	10.5	30	5.0	0.001	5	5
2.22	14.0	30	5.0	0.001	5	5
2.78	17.5	30	5.0	0.001	5	5
4.44	27.9	30	5.0	0.001	5	5
5.18	32.55	30	5.0	0.001	5	5
5.921	37.2	30	5.0	0.001	5	5

Se debe indicar que el valor de 5.0 en el diferencial de voltaje se determinó luego de probar diferentes valores con una frecuencia de 5.9Hz. Con este valor se obtuvo una aceleración máxima en la base de 0.2G el cual es un valor inferior al propuesto en la sección 3.3.4 para dichas frecuencias, por tanto con ese valor el modelo se mantendrá en el rango elástico. Para valores mayores a 5.0 se generaban ciertos saltos en el movimiento que podían llegar a 1.0G, lo que generaba un movimiento distorsionado por tanto se optó por el valor de 5.0.

Otro punto a considerar es el correspondiente a que manteniendo el mismo diferencial de voltaje y variando la frecuencia la mesa vibradora reproducirá aceleraciones diferentes, estas van a ser mayores a medida que se aumente la frecuencia. El proceso normal es encontrar la relación de aceleración en la base con el diferencial de voltaje para cada frecuencia. A partir de esas relaciones se

puede obtener una ecuación que relacione la frecuencia de vibración, la aceleración esperada y el valor de diferencial de voltaje a colocar. Sin embargo por razones prácticas se optó por utilizar el método descrito en el párrafo anterior. Las implicaciones de seguir este método se explicaran en el capítulo VI.

El objetivo del ensayo es: registrar la respuesta del sistema para los movimientos aplicados, calcular la distribución de energías (sección 1.3) y calcular el amortiguamiento natural del sistema haciendo uso del método de energía. De acuerdo al método de energía es necesario graficar la curva fuerza de amortiguamiento vs desplazamiento relativo. Para este movimiento denominaremos a la fuerza de amortiguamiento como fuerza viscosa (F_v). La fuerza de amortiguamiento se calculó usando ecuación (1.1) y considerando que $F_v = C\dot{x}$. Entonces se despeja la fuerza viscosa:

$$F_v = -M(\ddot{u}_g + \ddot{x}) - Kx \quad (5.4)$$

El desplazamiento relativo se obtiene de la diferencia del registro de desplazamiento en la base y losa. $\ddot{u}_g + \ddot{x}$ es la aceleración absoluta en la losa y se obtiene del registro del acelerómetro en la losa.

El cálculo de la velocidad relativa, por derivación del desplazamiento relativo, permitirá graficar la fuerza de amortiguamiento vs velocidad. Esta curva nos proporciona otro método para calcular el amortiguamiento natural, ya que calculando la pendiente obtenemos el coeficiente de amortiguamiento natural C_n .

Se elegirá un valor para el amortiguamiento natural (ξ_n, C_n), a partir de los datos de los tres métodos descritos, para ser usado en los cálculos siguientes.

Se calcula las respuestas teóricas para frecuencias no ensayadas (incluyendo la frecuencia natural) y calcular el factor de amplificación dinámica para todos los movimientos.

5.3.1.3 Ensayo en vibración forzada – Movimiento sísmico

El registro utilizado para este ensayo fue el del sismo del 3 de octubre de 1974 direcciones E-W estación Parque de la Reserva. Al igual que en el movimiento sinusoidal se varió el diferencial de voltaje hasta registrar una aceleración lo suficientemente alta para producir desplazamientos relativos considerablemente grandes (sin salirse del rango elástico) y obtener un registro limpio sin saltos. El registro con saltos se obtuvo con diferenciales de voltaje mayores a 5.0 por tanto

se optó por usar, el valor de 5.0. La aceleración máxima registrada fue de 425 cm/s², el cual es mayor al registro real de 192.489 cm/s². Tabla 5.2 muestra un resumen con los valores ingresados en el software PROYECTO01 y el ajuste de perillas en el tablero de control de vibración aleatoria (RANDOM VIBRATION EQUALIZER) de la mesa vibradora.

Tabla 5.2 Valores ingresados en el software PROYECTO01 - vibración sísmica

DT constante	Factor de escala de aceleración	Factor de escala de tiempo	Diferencia de voltaje máxima	Dt	Ajuste en la perilla	
					MIXING LEVEL SET - AUX	OUTPUT LEVEL
0.02	1	1	5.0	0.02	5	5

El objetivo es registrar la respuesta, calcular la distribución de energía y realizar una verificación teórica sobre el valor adoptado como amortiguamiento natural en la sección anterior.

5.3.2 Ensayo del modelo con disipadores

Al igual que en el ensayo del modelo sin disipadores se realizaron tres tipos de ensayos.

5.3.2.1 Ensayo en vibración libre

Para poder realizar este ensayo se golpeó al espécimen con un mazo, debido a que el modelo con disipador es más difícil de mover. Se buscara encontrar, al igual que en el movimiento sin disipadores, el valor del periodo y amortiguamiento.

5.3.2.2 Ensayo en vibración forzada – Movimiento sinusoidal

El objetivo del ensayo es registrar las respuestas del modelo bajo los mismos movimientos del ensayo sin disipadores para poder hacer comparaciones entre los dos comportamientos. Así mismo se calculara la distribución de energías (sección 2.1). La variación de frecuencias se hace para determinar si las características del disipador dependen de la frecuencia de movimiento.

Se calcula el amortiguamiento lineal equivalente para cada movimiento usando el método de energía y el método ASCE (Ver sección 2.6). Para ello se debe obtener la Fuerza de amortiguamiento en el disipador (F_d), el cual se calcula despejando dicho término en la ecuación (2.36). En este caso cambiaremos la

denominación Fa por Fd para referirnos a la fuerza de amortiguamiento del disipador.

$$F_d = -M(\ddot{u}_g + \ddot{x}) - K_L x - C_n \dot{x} \quad (5.5)$$

Al igual que en el movimiento sin disipador se graficara la curva F_d vs \dot{x} para obtener la curva de comportamiento del disipador para cada frecuencia. Así mismo nos basaremos en estas curvas para obtener un comportamiento promedio que resuma los comportamientos de todas las frecuencias ensayadas.

El comportamiento promedio, las aceleraciones experimentales en la base, así como los parámetros dinámicos del modelo serán usados para calcular respuestas teóricas para cada movimiento y compararlas con las respuestas experimentales.

Adicionalmente se calcularan respuestas teóricas para frecuencias no ensayadas (incluyendo la frecuencia natural) y se calculara el Factor de amplificación dinámica

5.3.2.3 Ensayo en vibración forzada - Movimiento sísmico

Al igual que el movimiento sinusoidal se utiliza el mismo input del movimiento sísmico sin disipadores.

El objetivo es registrar la respuesta, calcular la distribución de energía y realizar una verificación si el comportamiento del disipador calculado en el ensayo anterior es aplicable para un movimiento sísmico. Para ello se realiza un análisis teórico y se compara con los experimentales.

5.3.2.4 Ensayo en vibración forzada – Barrido de Frecuencia

Este ensayo tuvo como objetivo reproducir un movimiento sinusoidal con barrido de frecuencias sin detener el ensayo. Esto para barrer la mayor cantidad de frecuencia y obtener el comportamiento del disipador para aquellas frecuencias aun no ensayadas previamente. Se optó por enviar la señal directamente desde el controlador de la mesa vibradora, de este modo se podía cambiar manualmente la frecuencia.

Cuando se envía una señal por el controlador y solo controlas el dial de la frecuencia, ocurre que cuando cambias la frecuencia la amplitud también se ve

afectada, por tanto en este ensayo se registraron diferentes amplitudes para diferentes frecuencias.

Bajo este ensayo se produjo la falla del disipador que se explicara en la sección 6.3.5

CAPÍTULO VI

ANALISIS DE RESULTADOS EXPERIMENTALES

6.1 ENSAYO PARA LOS LIQUIDOS

6.1.1 Ensayo de viscosidad

De acuerdo a lo descrito en la sección 5.1.1 se realizaron los ensayos de viscosidad. Inicialmente se realizaron solo ensayos a la glicerina y el aceite de silicón debido a que se tenía valores referenciales para los aceites de motor SAE. Como estos valores se referían a viscosidades a temperatura de 40° C, se tuvo que realizar ensayos de viscosidad también a este grado de temperatura para poder compararlos (Ver Tabla 6.1)

Tabla 6.1: Viscosidad dinámica a 40° C- Aceite de Silicón y glicerina

LIQUIDO	TEMPERATURA, °C	VISCOSIDAD DINAMICA (cP)
Aceite de silicón	40	283.2
Glicerina Liquida	40	287.2

Ahora podemos comparar estos valores con las viscosidades de los aceites de motor SAE (Ver Tabla 6.2)

Tabla 6.2: Tabla de viscosidades a 40°C

LIQUIDO VISCOSO	VISCOSIDAD DINÁMICA (cP)
Glicerina Liquida	287.2
Aceite de silicona	283.2
SAE 50	220.9
SAE 40	146.7
GRASA	-

Los valores de viscosidad para los aceites de motor en la Tabla 6.2 son las que se mostraron en la sección 4.7.3. De acuerdo a los resultados del ensayo preliminar (Ver sección siguiente) se seleccionó a la glicerina como líquido a usar en el ensayo en mesa vibradora. Además se observó un comportamiento no lineal. Uno de los factores que podía originar este comportamiento era que la viscosidad del líquido variaba con la velocidad. Es por estas razones que se optó por realizar otro ensayo a la glicerina. En este nuevo ensayo se iba medir la viscosidad para diferentes valores de velocidad angular del disco (splin) del viscosímetro Brookfield. La Tabla 6.3 muestra los resultados del ensayo.

Tabla 6.3: Viscosidad de la glicerina a diferentes velocidades angulares

TEMPERATURA AMBIENTE (°C)	NUMERO DE REVOLUCIONES POR MINUTO	VISCOSIDAD (cP)
18	0.3	1200
18	0.6	1267
18	1	1360
18	1.5	1360
18	2	1360
18	2.5	1360
18	3	1360
18	4	1360
18	5	1360
18	6	1353
18	10	1360
18	12	1350
18	20	1354

De la Tabla 6.3 se observa que la viscosidad tiene a mantenerse en un valor a 1360cP. Su variación no es muy significativa, por lo menos no dentro del rango de velocidades permisible para el viscosímetro. De acuerdo a esto podemos decir que la viscosidad de la glicerina a 18°C es 1360cP.

Usando los valores de viscosidad de la glicerina a 18°C y 40°C se puede obtener una curva de variación lineal de la viscosidad con la temperatura (Ver Figura N° 6.1). Para así obtener valores referenciales de viscosidad a temperaturas dentro de ese rango (Ver Tabla 6.4)

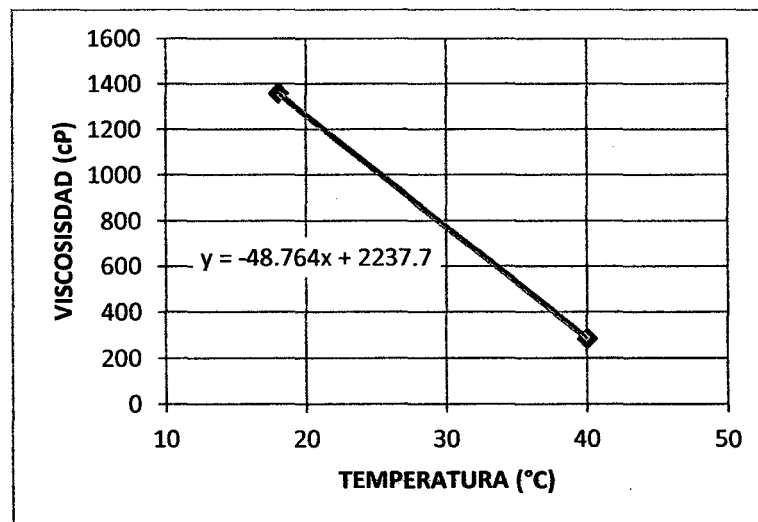


Figura N° 6.1 Variación de la viscosidad con la temperatura –Glicerina

Tabla 6.4: Viscosidad de la glicerina a diferentes temperaturas

TEMPERATURA °C	VISCOSIDAD (cP)	VISCOSIDAD kgf-s/cm ²
18	1360.00	1.39E-05
20	1262.42	1.29E-05
22	1164.89	1.19E-05
24	1067.36	1.09E-05
26	969.84	9.88E-06
28	872.31	8.89E-06
30	774.78	7.90E-06
32	677.25	6.90E-06
34	579.72	5.91E-06
36	482.20	4.91E-06
38	384.67	3.92E-06
40	287.02	2.92E-06

6.2 ENSAYO PRELIMINAR

6.2.1 Cálculos previos

La Tabla 6.5 muestra los pesos de las planchas y el vástago. Se seleccionaron las cargas a ser usadas (Ver Fotos en anexo III) y se obtuvieron sus respectivos pesos (Ver Tabla 6.6)

Tabla 6.5: Registro de pesos de plancha, vástago y pistón.

DISPOSITIVO	PESO DE PLANCHA (gf)	PESO DE VASTAGO +PISTON (gf)	PESO TOTAL (gf)	OBSERVACION
AM-01	302.00	169.90	471.90	Mayor dimensión
AM-02	300.76	165.42	466.18	Menor dimensión

Tabla 6.6: Registro de los pesos de las cargas

ID PESA	PESO (gf)	ID PESA	PESO (gf)
1	923.55	10	780.31
2	878.03	11	779.96
3	915.65	12	779.92
4	877.24	13	778.16
5	243.47	14	777.07

ID PESA	PESO (gf)	ID PESA	PESO (gf)
6	241.24	15	779.29
7	239.31	16	9000.00
8	242.53	17	4200.00
9	242.96	18	4100.00

Dependiendo el tipo de líquido se seleccionan las combinaciones de carga a usar (Ver Tabla 6.7 y Tabla 6.8). Esto se hace debido a que si se elige cargas pequeñas para líquidos muy viscosos el tiempo que demore el movimiento será grande. Se tomaron estas combinaciones para tener una duración alrededor de 5 segundos para cada ensayo. Se tomaron 100 datos por segundo en el transductor de desplazamientos.

Tabla 6.7: Combinación de cargas

ID CARGA	COMB. PESAS	PESO TOTAL (gf)
A	5	243.47
B	5+6	484.71
C	5+6+7	724.02
D	1	923.55
E	5+6+10	1265.02
F	1+5+6	1408.26
G	1+2+7	2040.89
H	1+2+10	2581.89
I	1+2+3+5	2960.7
J	1+2+3+4	3594.47
K	1+2+3+4+10	4374.78
L	1+2+3+4+5+10	4618.25
M	1+2+3+4+10+11	5154.74
N	1+2+3+4+10+11+12	5934.66
Ñ	1+2+3+4+10+11+12+13+5	6956.29
O	1+2+3+4+10+11+12+13+14+15	8269.18
P	16	9000.00
Q	16+01+02	10801.58
R	16+17	13200.00
S	16+17+01+02	15001.58
T	16+17+18	17300.00

Tabla 6.8: Cargas para los diferentes tipos de líquido

LIQUIDO	CARGA (gf)	LIQUIDO	CARGA (gf)
ACEITE SAE 40	724.02 (C)	GLICERINA	1408.26 (F)
	923.55 (D)		2040.89 (G)
	1265.02 (E)		2581.89 (H)
	1408.26 (F)		3594.47 (J)
	2040.89 (G)		4374.78 (K)
ACEITE SAE 50	923.55 (D)	GRASA	9000.00(P)
	1265.02 (E)		10801.58(Q)
	1408.26 (F)		13200.00 (R)
	2040.89 (G)		15001.58 (S)
	2581.89 (H)		17300.00(T)
ACEITE SILICON	923.55 (D)		
	1408.26 (F)		
	2040.89 (G)		
	2581.89 (H)		
	2960.70 (I)		

6.2.2 Resultados típicos

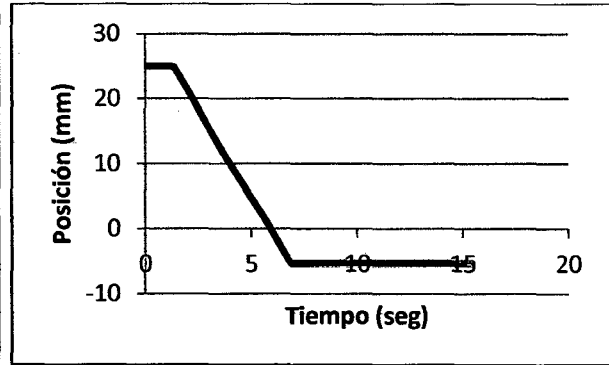
El conjunto de ensayos muestras dos tipos de resultados típicos que se describen a continuación:

6.2.2.1 Respuesta con aceleración cero

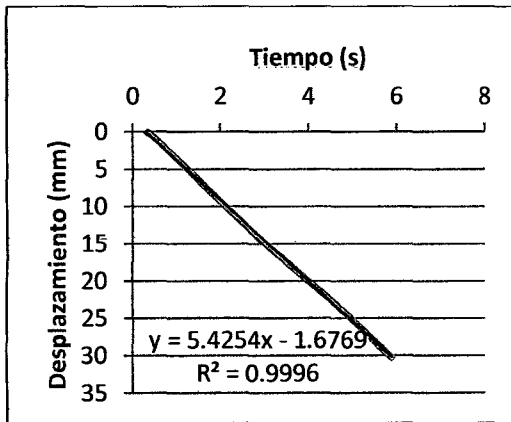
Este tipo de resultado se presentó para las cargas pequeñas, en la cual se obtuvo curvas de desplazamiento lineal en la mayor parte del movimiento (Ver Figura N° 6.2c), lo cual evidencia una velocidad constante y por tanto una aceleración cero. Para esta respuesta es fácil predecir la fuerza de amortiguamiento. Basados en la ecuación 5.3 se concluye que la fuerza de amortiguamiento es igual a la carga impuesta. Por otro lado la velocidad se obtiene de la pendiente de ajuste al registro de desplazamientos (Ver Figura N° 6.2c) esta velocidad también es posible encontrarla graficando la velocidad vs el tiempo (Ver Figura N° 6.2d). Obtenido estos datos podemos tener para cada ensayo una coordenada de la gráfica fuerza de amortiguamiento vs velocidad.

ENSAYO AM02-GLICER-CARGA G		
CARGA	2040.89	gr-f
PESO PROPIO	466.18	gr-f
PESO TOTAL	2507.07	gr-f
MASA TOTAL	0.25556269	gr-f -s ² /mm

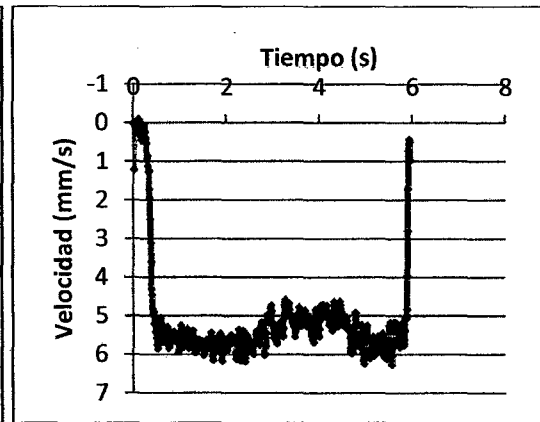
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura N° 6.2 Respuesta típica para cargas pequeñas (a) Identificación del ensayo (b) Gráfica Posición (c) Registro de desplazamientos (d) Registro de velocidad

6.2.2.2 Respuesta con aceleración constante

Para cargas más grandes se obtuvo una curva de desplazamientos parabólica (Ver Figura N° 6.3b) lo que evidencia un movimiento en caída libre. Para este movimiento se calcula la aceleración en base al ajuste polinomial del registro de desplazamientos (Ver Figura N° 6.3c). Luego se obtiene la fuerza de amortiguamiento con la ecuación (5.3). Se toma la velocidad promedio del ajuste polinomial al registro de desplazamientos. En la Figura N° 6.3 se muestra el registro de velocidad y aceleraciones para este tipo de movimiento, se puede observar bastante variación en la aceleración y la velocidad por ello es conveniente calcular estos valores basados en la curva de ajuste del desplazamiento.

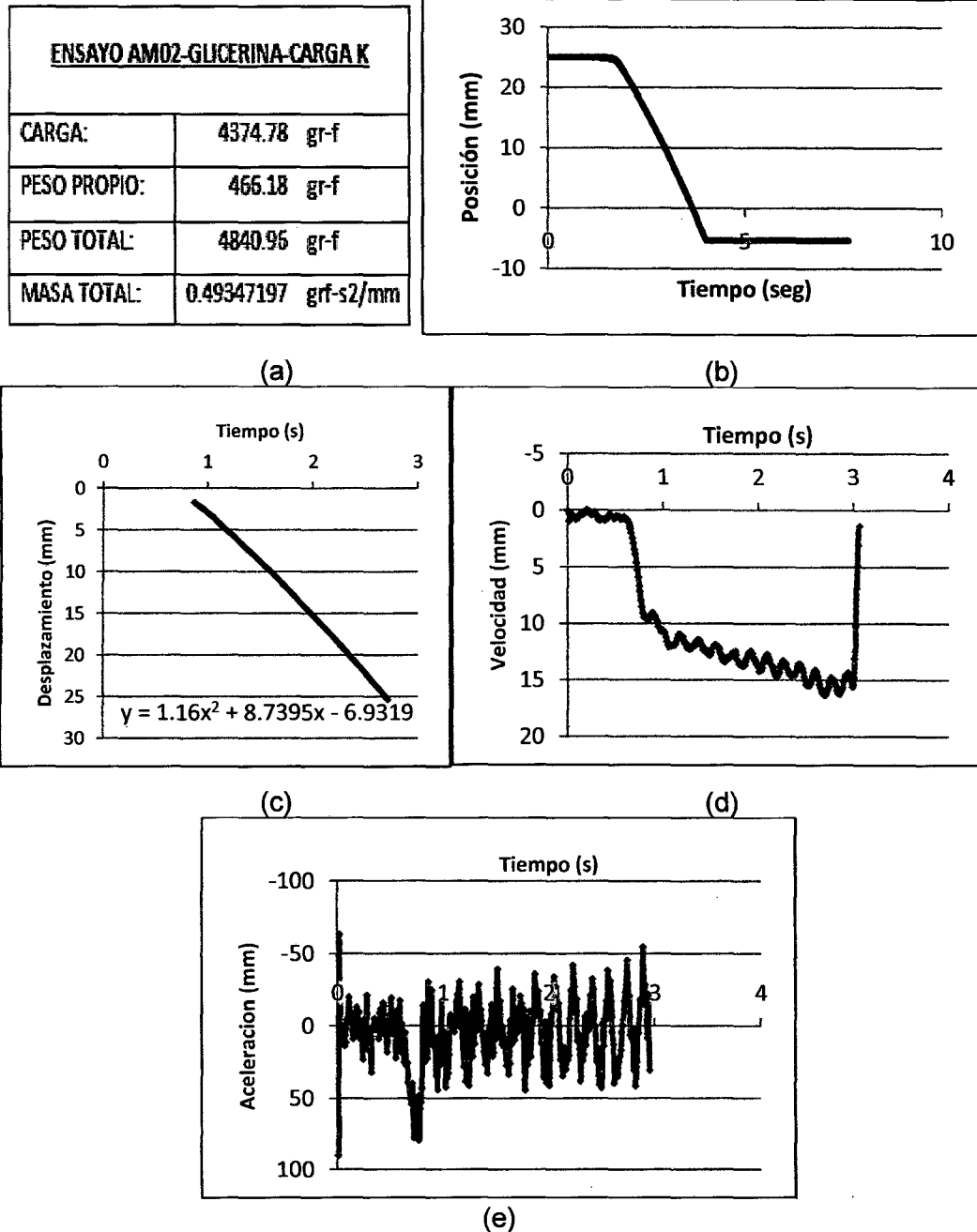


Figura N° 6.3 Respuesta típica para cargas altas (a) Identificación del ensayo (b) Gráfica Posición vs tiempo (c) Registro de desplazamiento (d) Registro de velocidad (e) Registro de aceleración

6.2.3 Curvas de comportamiento

Luego de procesar todos los ensayos se obtiene las curvas de fuerza de amortiguamiento vs velocidad para cada líquido y para cada dispositivo. En Figura N° 6.4 y Figura N° 6.5 se muestran dichas curvas. Se dibuja en línea continua para el dispositivo AM-02 y en línea discontinua para el dispositivo AM-01.

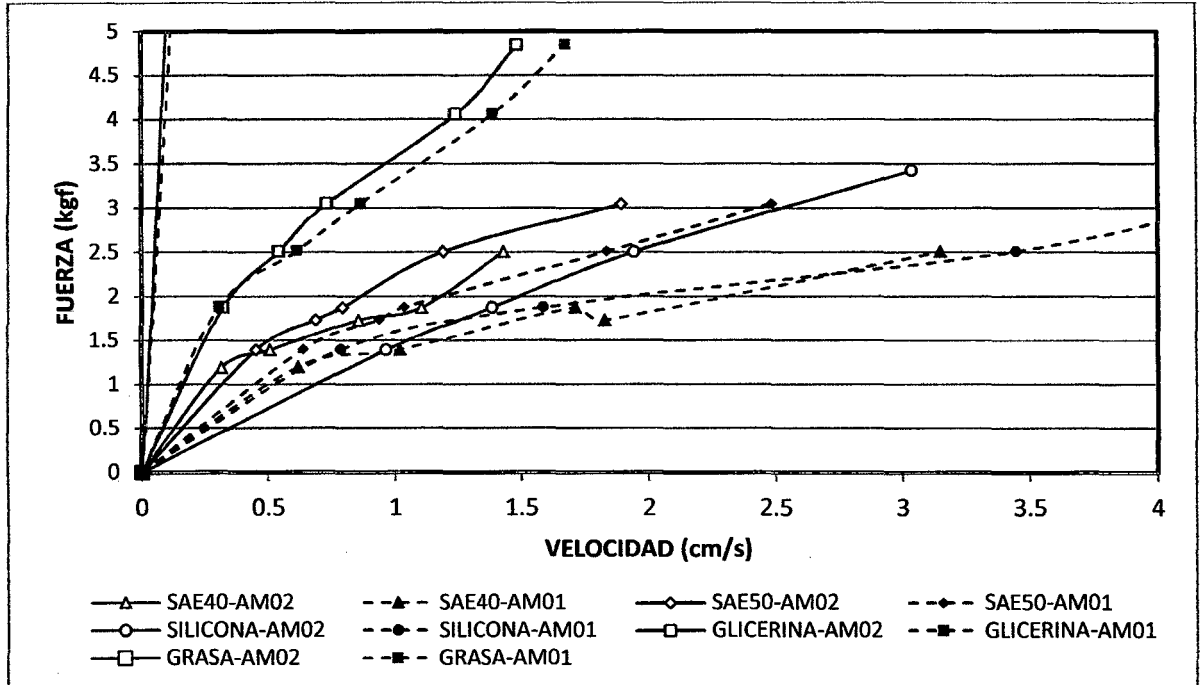


Figura N° 6.4 Fuerza – Velocidad por líquido y disipador para fuerzas hasta 5kgf

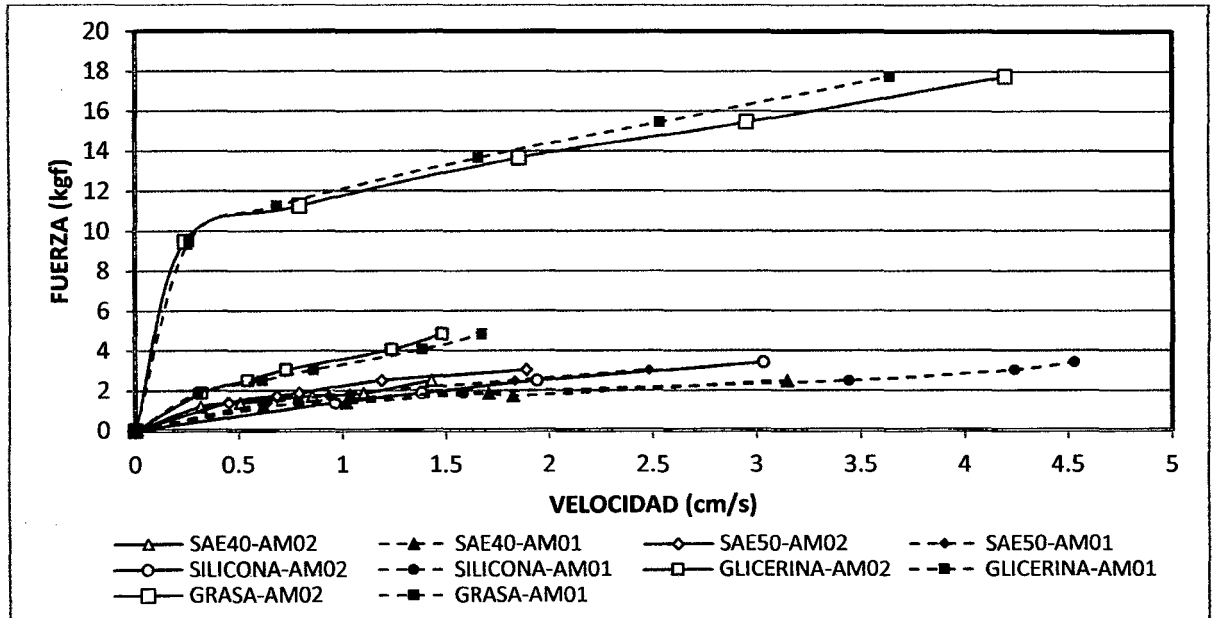


Figura N° 6.5 Fuerza – Velocidad por líquido y disipador para Fuerzas de hasta 18kgf

Como primera observación se tiene que tanto para la glicerina como para la grasa las curvas para los dos disipadores (AM01 y AM02) no difieren mucho en relaciona las curvas para el aceite SAE40, SAE50 y aceite de silicón.

El orden descendiente respecto a con que líquidos se originan mayores fuerzas de amortiguamiento es el siguiente: grasa, glicerina, SAE50, SAE40 y aceite de

silicón. Respecto a estos dos últimos líquidos el orden no está bien definido. Es de esperar que para líquidos más viscosos, la fuerza de amortiguamiento es mayor, sin embargo de acuerdo a la Tabla 6.2, el aceite de silicón es el único que no cumple con esa regla, ya que debería ofrecer mayor amortiguamiento que el aceite SAE40 y SAE50. Este fenómeno puede explicarse porque la tabla de viscosidades es para una temperatura de 40°C y el ensayo se realizó a una temperatura ambiente (alrededor de 20°C a 26°C), esta variación de temperatura puede variar la relación entre las viscosidades de los líquidos.

Por otro lado cuando se usó la grasa fue difícil lograr que llene por completo la capsula, ya que muchas veces se generan espacios, y se debe forzar a sacar el aire alojado en ellos. Este fenómeno puede ser muy perjudicial cuando se ensaye bajo carga cíclica ya que esos espacios crean discontinuidades, las cuales reducen la fuerza de amortiguamiento global del disipador. A pesar de que la grasa ofrecía mayor amortiguamiento, debido a las observaciones del párrafo anterior, quedo descartado su uso. Ahora ya que la glicerina es el segundo en el orden de amortiguamiento es el que se usará en el ensayo en mesa vibradora.

Usando todos los puntos de la glicerina (AM01 y AM02) podemos graficar dos tipos de tendencia: una bilineal y la otra exponencial (Ver Figura N° 6.6). Lo cual representaría el posible comportamiento para el disipador en el ensayo cíclico en mesa vibradora.

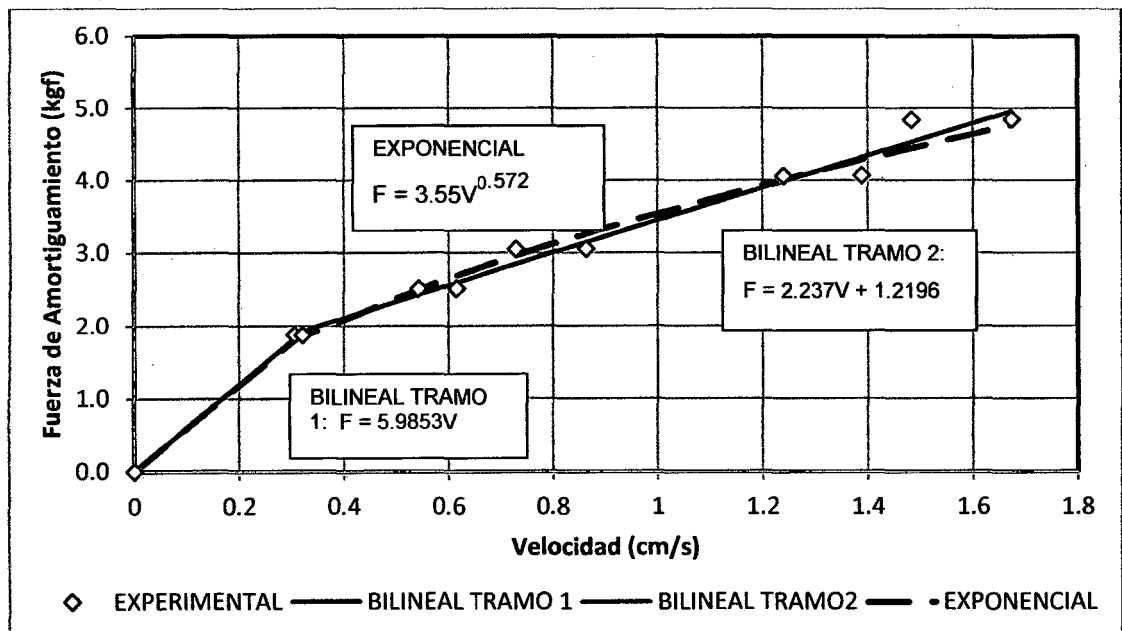


Figura N° 6.6 Ajuste bilineal y exponencial- Ensayo preliminar

De la Figura N° 6.6 se puede decir que tanto la tendencia bilineal como la exponencial son aceptables para ese rango de velocidades. Adicionalmente en el rango de velocidades de 0 a 0.4 cm/s se tiene una amortiguamiento mayor al resto del rango, este incremento puede deberse a la influencia del retén, ya que este elemento también ejerce cierta fuerza cuando el vástago se desplaza, esta influencia no aumentaría para velocidades mayores a 0.4 cm/s. Por tanto se puede decir que el tramo 2 de la regresión bilineal representa el amortiguamiento debido principalmente a la presión y esfuerzo de corte en el pistón.

De acuerdo a la conclusión del párrafo anterior la pendiente del tramo 2 representaría el coeficiente de amortiguamiento debido al movimiento del fluido viscoso. Entonces se usa ese valor para compararlo con el coeficiente de amortiguamiento teórico de la ecuación (2.25) y obtener los valores del parámetro f para este ensayo. Para ello se debe conocer la viscosidad del líquido, sin embargo en este ensayo no se midió la temperatura, por ello se usa valores de temperaturas posiblemente presentadas en el ensayo (20°C - 26°C). Los valores de viscosidad se obtienen de la **Tabla 6.4**. La **Tabla 6.9** resume los valores encontrados para f .

Tabla 6.9: Valores de f para posibles valores de temperatura en el ensayo

Temperatura (°C)	20	22	24	26	Promedio
Viscosidad (kgf-s/cm ²)	1.29×10^{-5}	1.19×10^{-5}	1.09×10^{-5}	9.88×10^{-6}	1.14×10^{-5}
f	0.49	0.53	0.58	0.64	0.56

De los valores obtenidos para f podemos deducir que para este ensayo las condiciones establecidas en la sección 2.3.2.2 para encontrar el coeficiente de amortiguamiento se cumplen parcialmente, es decir no se puede establecer que flujo es desarrollado en toda la longitud de la cabeza de pistón.

6.3 ENSAYO DINAMICO EN MESA VIBRADORA

6.3.1 Sistema sin disipadores – Modelo A

Se presenta los resultados que se obtuvieron al ensayar el Modelo A, que como se dijo en la sección 3.2.6 fue descartada.

6.3.1.1 Frecuencia natural

En base al registro de aceleraciones y su espectro de Fourier (Ver Figura N° 6.7) se calcula lo siguiente:

Frecuencia = 14.8 Hz

Periodo = 0.0676 s

Rigidez = 793.335 kgf/cm

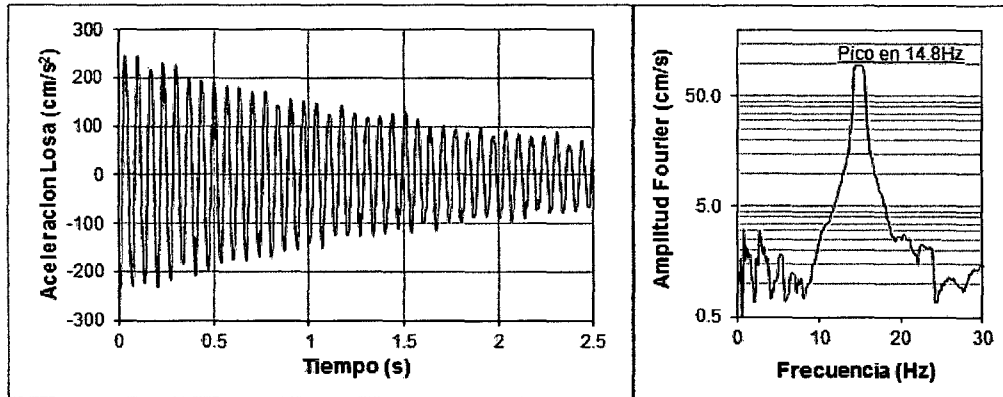


Figura N° 6.7 Ensayo Vibración Libre 01 – Modelo A. (a) Registro de Desplazamiento en la Losa. (b) Espectro de Fourier

Se obtiene una variación alrededor del 20% respecto a los valores teóricos

6.3.1.2 Amortiguamiento inherente del modelo

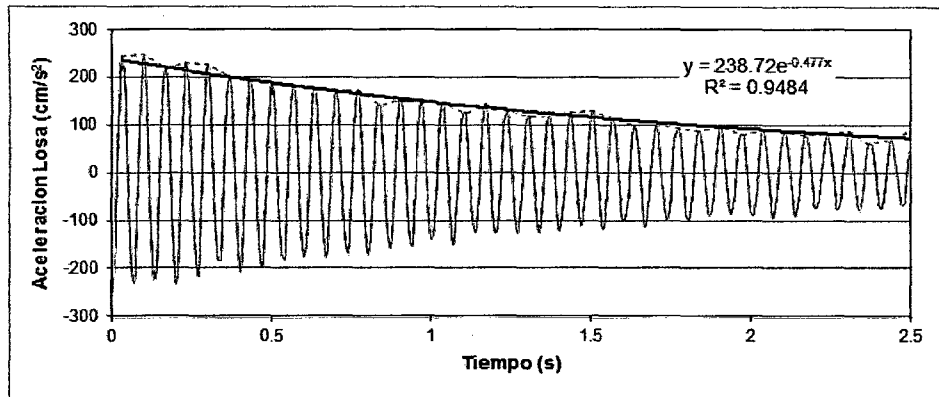


Figura N° 6.8 Ensayo Vibración Libre 01 – Modelo A. (a) Registro de Desplazamiento en la Losa. (b) Espectro de Fourier

Usando la ecuación (1.36) calculamos el porcentaje de amortiguamiento:

$$\xi_1(\%) = \frac{0.477}{92.99} * 100 = 0.51$$

6.3.1.3 Respuesta - movimiento sinusoidal

A pesar de enviar señales sinusoidales a la mesa vibradora el registro de aceleraciones muestran una señal muy distorsionada. La Figura N° 6.9 muestra la aceleración en la base registrada cuando se envió una señal sinusoidal de frecuencia 4Hz. Esta distorsión implica que el movimiento no puede ser tratado

como movimiento sinusoidal. Esa distorsión obviamente influencio en el desplazamiento relativo (Ver Figura N° 6.10), el cual tampoco puede ser denominado movimiento sinusoidal

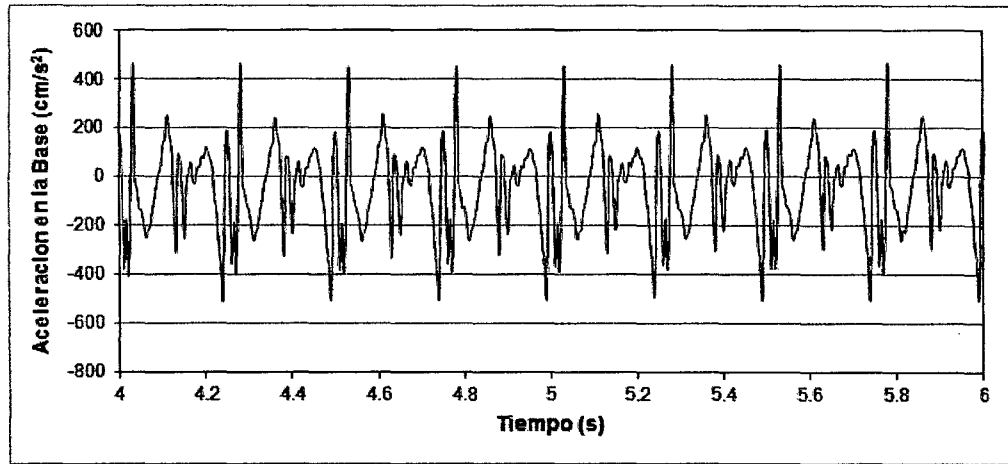


Figura N° 6.9 Aceleración en la base – Frecuencia: 4Hz

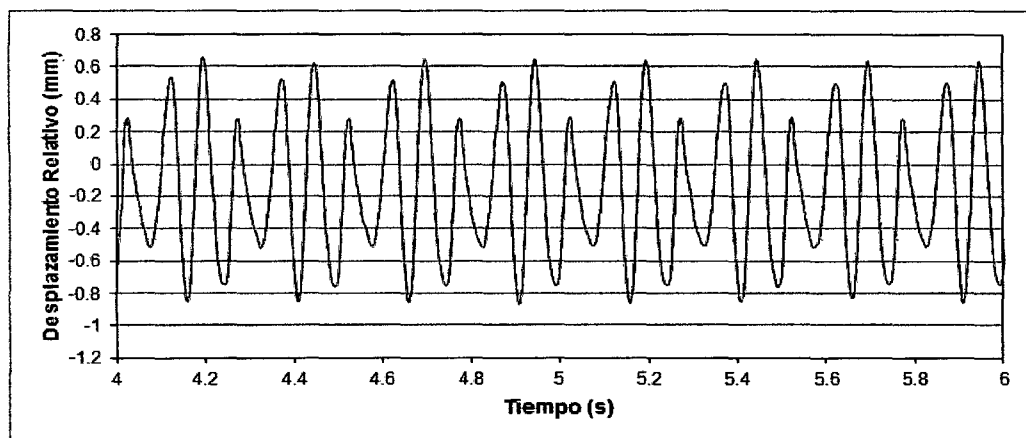


Figura N° 6.10 Desplazamiento Relativo – Frecuencia: 4Hz

Adicionalmente se presenta los valores máximos de desplazamiento relativo obtenidos para todos los movimientos (Ver Figura N° 6.11).

Se observa que el valor máximo es 0.9mm. Cabe señalar que se varió el diferencial de voltaje para alcanzar desplazamientos mayores, sin embargo los máximos desplazamientos relativos son los que se muestra en la figura anterior. Los pequeños desplazamiento relativos (debido a que el modelo es muy rígido), la poca posibilidad de aumentarlos ya que se usó valores altos para el diferencial de voltaje, y la forma de los movimientos registrado (muy diferentes a un movimiento sinusoidal) conlleva a que el modelo se descarte y se tenga la necesidad de hacer otro (El modelo B).

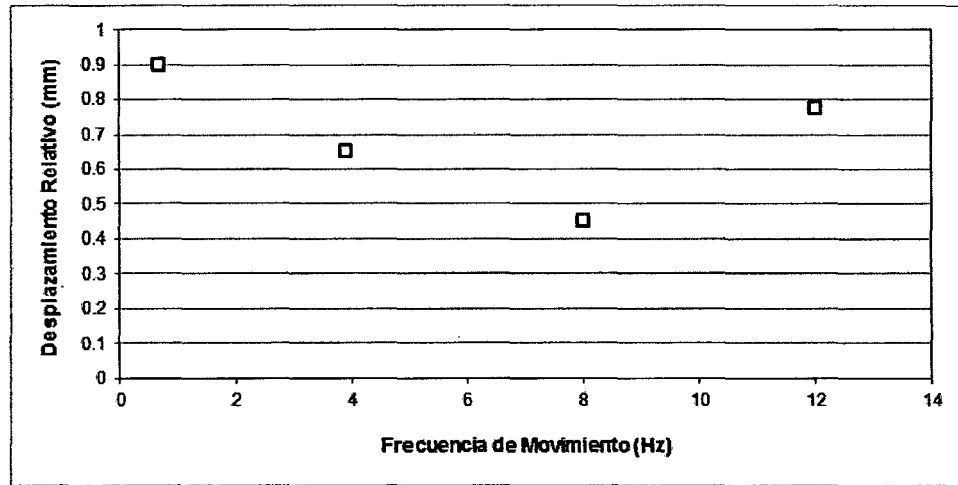


Figura N° 6.11 Desplazamiento Relativo máximo en Movimiento sinusoidal – Modelo A sin disipadores

6.3.2 Sistema sin disipadores – Modelo B

6.3.2.1 Frecuencia natural

En base al registro de vibración libre se usó el programa “Degtra” para obtener el espectro de Fourier del movimiento (Ver Figura N° 6.12 y Figura N° 6.13), con ello se obtuvo la frecuencia dominante, es decir la frecuencia natural del sistema. A continuación de muestra los resultados de los dos ensayos realizados (en el primero se utiliza los datos de desplazamiento y en el segundo los datos de aceleración).

Frecuencia = 3.7 Hz

Periodo = 0.27 s

Frecuencia circular = 23.248 rad/s

Rigidez = 49.583 kgf/cm

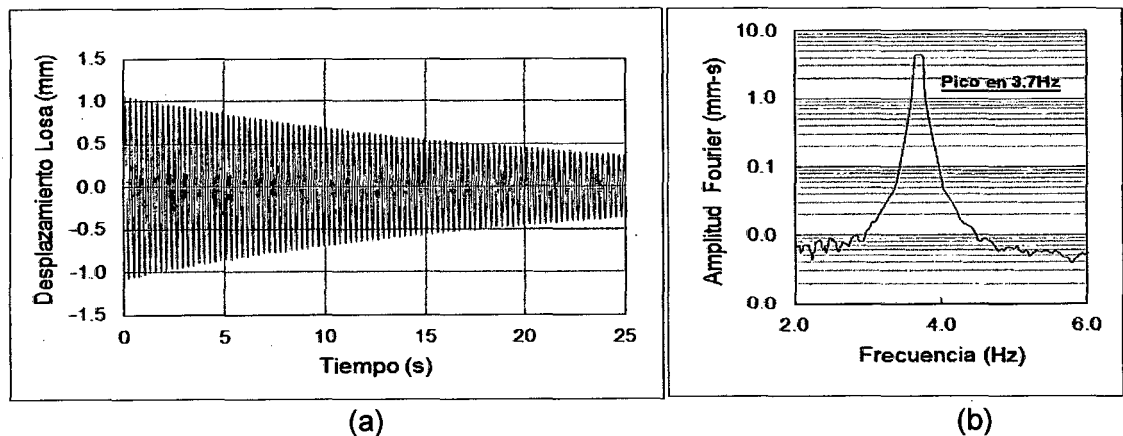
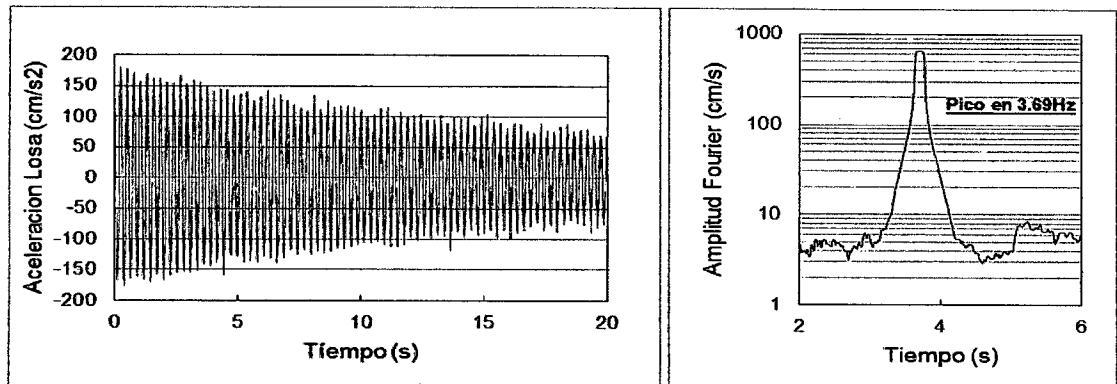


Figura N° 6.12 Ensayo Vibración Libre 01 – Modelo B. (a) Registro de Desplazamiento en la Losa. (b) Espectro de Fourier



(a) (b)
 Figura N° 6.13 Ensayo Vibración Libre 02 – Modelo B. (a) Registro de Aceleración en la Losa. (b) Espectro de Fourier

6.3.2.2 Amortiguamiento inherente del modelo

Se realizó un ajuste exponencial con los valores de los picos de respuesta (desplazamiento o aceleración según el ensayo) y se obtuvo la curva de decrecimiento logarítmico.

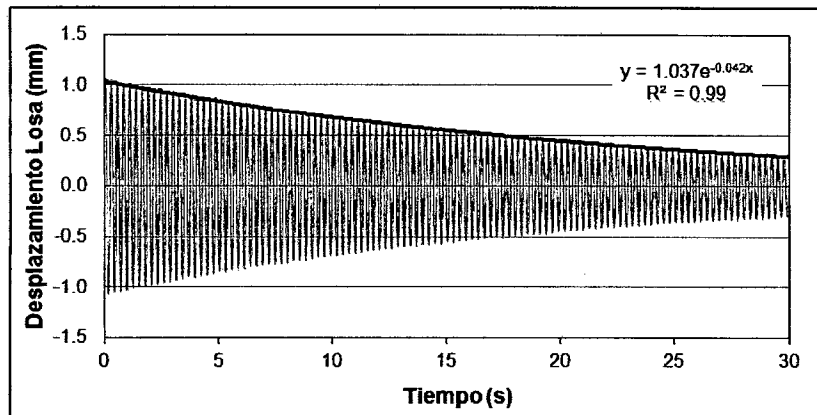


Figura N° 6.14 Decremento logarítmico Ensayo Vibración Libre 01

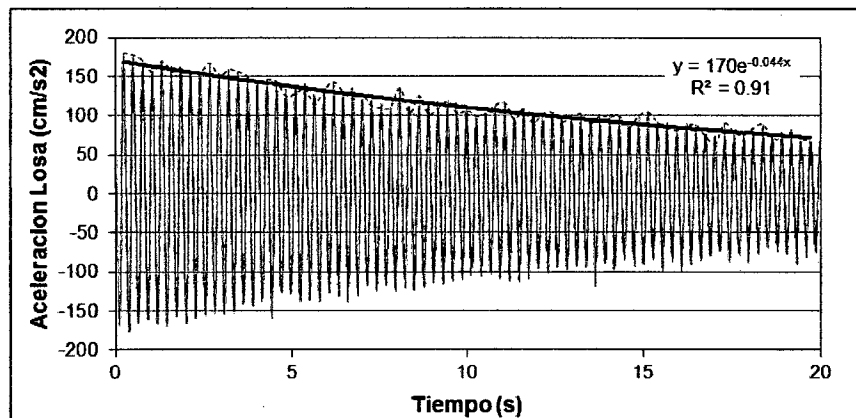


Figura N° 6.15 Decremento logarítmico Ensayo Vibración Libre 02

Usando la ecuación (1.36) calculamos el porcentaje de amortiguamiento:

$$\xi_1(\%) = \frac{0.042}{23.248} * 100 = 0.18; \quad \xi_2(\%) = \frac{0.044}{23.248} * 100 = 0.19$$

Por tanto el porcentaje de amortiguamiento del sistema es 0.185 %

6.3.2.3 Respuesta - movimiento sinusoidal

En la Tabla 6.10 y Figura N° 6.16 se presenta las aceleraciones en la base y las respuestas en el modelo (desplazamientos, velocidades y aceleraciones) para los movimientos sinusoidales aplicados. Los datos se obtienen luego de pasar un filtro pasa banda a los registros del acelerómetro y del láser para reducir el ruido y obtener señales solo con la frecuencia de movimiento.

Tabla 6.10: Respuesta experimental del modelo para cargas sinusoidales sin disipadores.

Frec. Mov. (Hz)	Acel. Base (cm/s ²)	Respuesta máxima			
		Desp. Relat. (cm)	Vel. Relat. (cm/s)	Acel. Relat. (cm/s ²)	Acel. Abs. (cm/s ²)
1.671	113.78	0.28	2.94	30.85	144.91
2.222	158.03	0.47	6.86	99.75	246.96
2.783	190.26	0.86	15.05	263.29	453.54
4.443	280.17	1.16	32.39	902.92	623.40
5.176	336.68	0.66	21.45	695.35	356.84
5.933	389.47	0.47	17.43	647.28	258.29

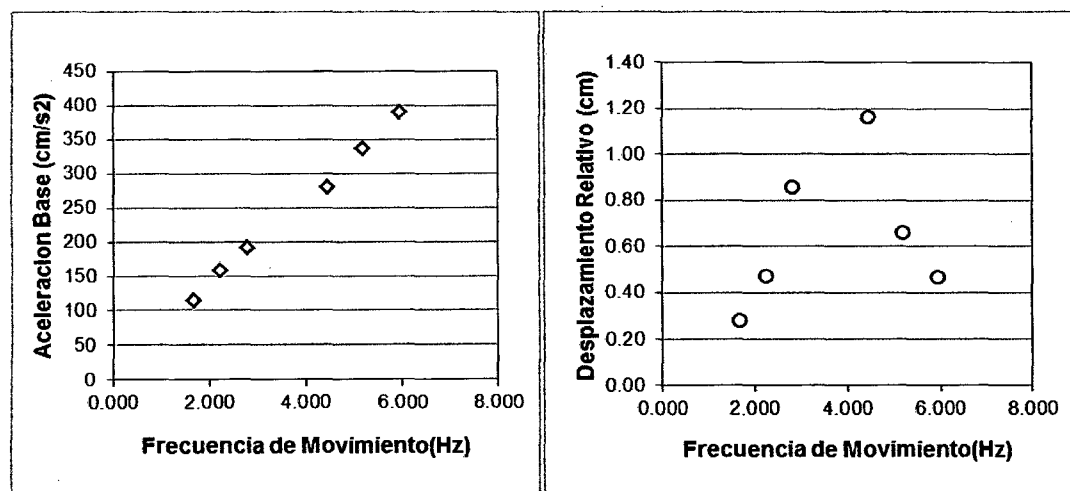


Figura N° 6.16 (a) Amplitud de la aceleración en la base y (b) Desplazamiento Relativo para cada frecuencia de movimiento

Se obtuvo la fuerza de amortiguamiento inherente (F_v) para cada movimiento usando la ecuación (5.4). Con este dato se obtiene las gráficas de Fuerza vs

Velocidad Relativa (Ver Figura N° 6.17) y Fuerza vs Desplazamiento Relativo (Ver Figura N° 6.18). En la Figura N° 6.17 se presenta la regresión lineal para cada gráfica. La pendiente de dicha recta corresponde al coeficiente de amortiguamiento natural.

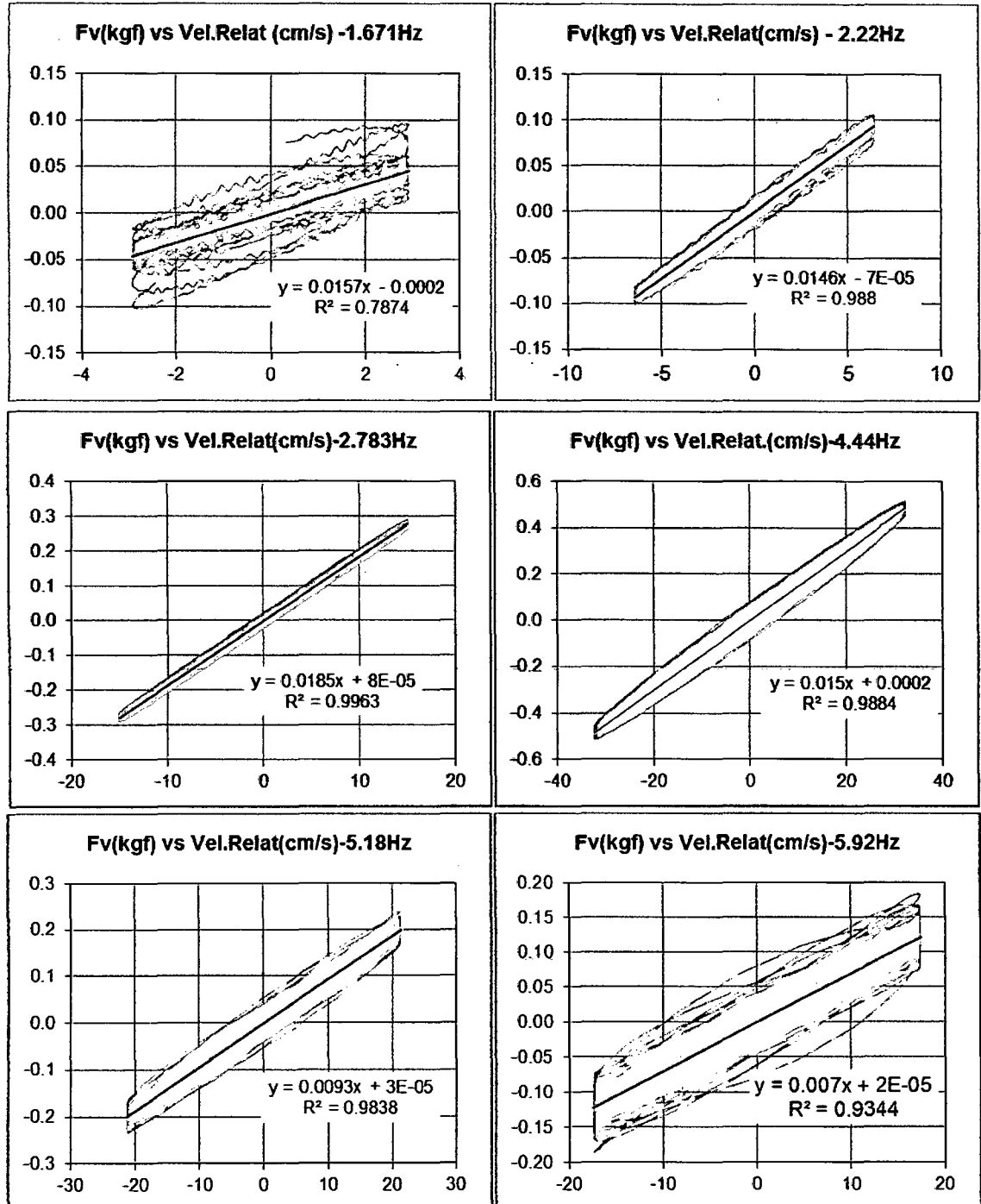


Figura N° 6.17 Fuerza de Amortiguamiento Fv vs Velocidad Relativa para cada frecuencia de Movimiento

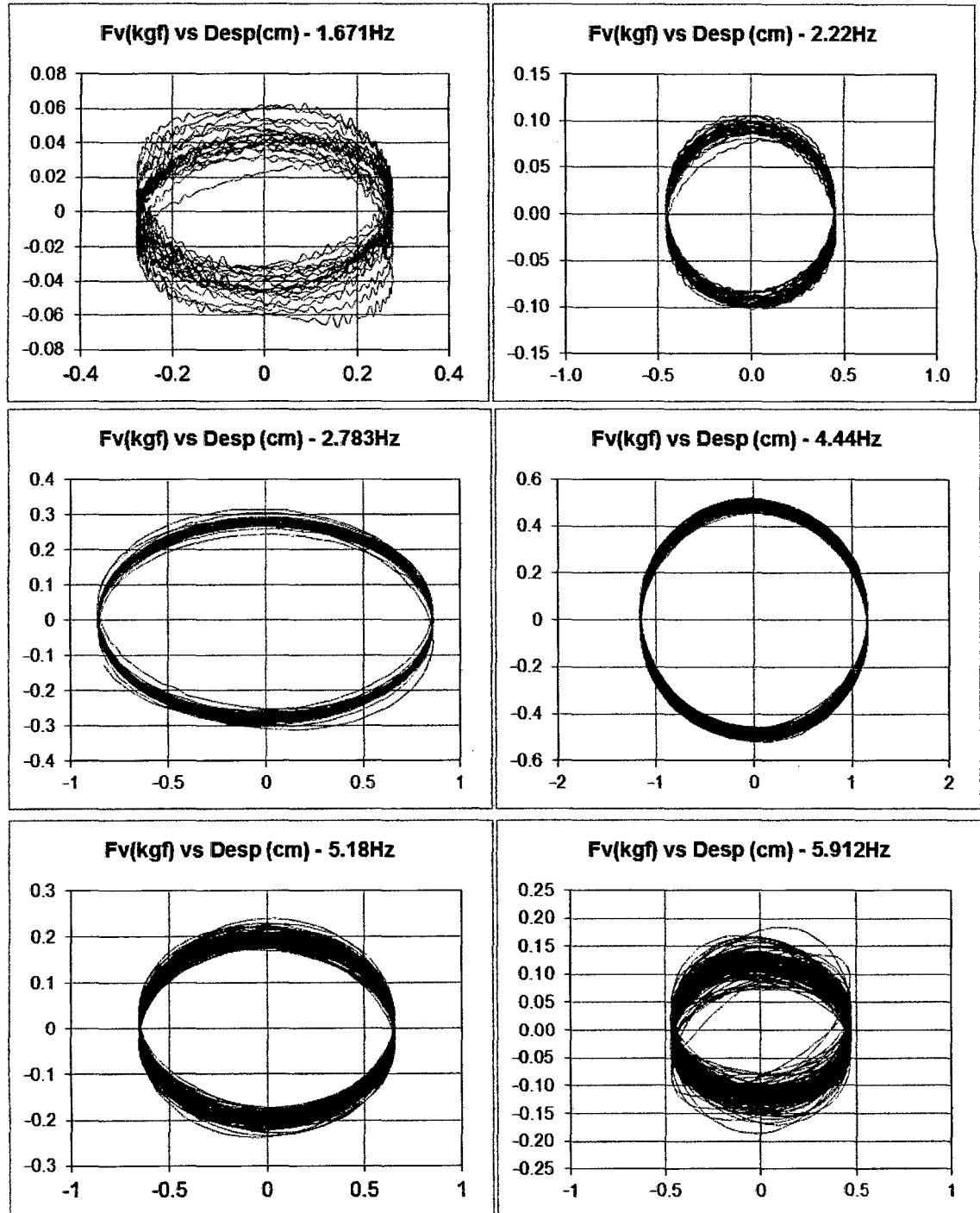


Figura N° 6.18 Fuerza de Amortiguamiento Fv vs Desplazamiento Relativo para cada frecuencia de Movimiento

A partir de las curvas Fuerza vs Desplazamiento de la Figura N° 6.18 se puede calcular el amortiguamiento lineal equivalente con el método de energía. En la Tabla 6.11 se presenta los valores de amortiguamiento para cada frecuencia de movimiento.

Tabla 6.11: Amortiguamiento Lineal Equivalente – Sin disipadores

Frec. Mov. (Hz)	Porcentaje de Amortiguamiento Lineal Equivalente (%)	Coefficiente de Amortiguamiento Lineal Equivalente (kgf-s/cm)
1.671	0.4786	0.0204
2.22	0.3545	0.0151
2.783	0.4585	0.0196
4.44	0.3489	0.0149
5.18	0.2298	0.0098
5.933	0.1672	0.0071
PROMEDIO	0.3396	0.0145

Se observa que los valores de coeficiente de amortiguamiento de la Tabla 6.11 comparados con lo calculado con la regresión lineal de la Figura N° 6.17 son prácticamente los mismo en la mitad de los casos, en la otra mitad la variación es cercana a 30%.

Otra observación es que el amortiguamiento aumento con respecto al de vibración libre. Este fenómeno se puede explicar considerando que el amortiguamiento inherente depende de muchas variables y no es estrictamente lineal como fue considerado en cada uno de los métodos que se utilizó. Para los cálculos posteriores se usará el valor promedio calculado en la Tabla 6.11 (Amortiguamiento=0.3396%) para considerar un mayor amortiguamiento del modelo y no sobrestimar el amortiguamiento que podría aportar el disipador.

Se calcula los diferentes tipos de energía (Energía disipada por la fuerza de amortiguamiento inherente E_{FV} , Energía de deformación elástica E_{DEF} , Energía de entrada absoluta $E_{E.ABS}$, Energía cinética absoluta $E_{C.ABS}$, Energía de entrada relativa $E_{E.RELAT}$ y Energía cinética relativa $E_{C.RELAT}$) para el final del movimiento, los cuales son mostrados en la Tabla 6.12. El objetivo de este procedimiento es obtener el porcentaje de error en el balance de energías. Un balance de energías alto significaría que los datos contienen aun un ruido significativo y por tanto este error se propagaría a los demás resultados, invalidando todas las conclusiones.

Tabla 6.12: Distribución de Energía – Mov. Sinusoidal sin disipadores

Frecuencia (Hz)	Energía al final del movimiento (kgf-cm)						Error Balance de Energía (%)	
	E _{FV}	E _{DEF}	E _{E.ABS}	E _{C.ABS}	E _{E.RELAT}	E _{C.RELAT}	Abs.	Relat.
1.671	1.780	0.000	1.695	0.000	1.646	0.000	-4.973	-8.129
2.22	8.797	0.601	22.630	12.790	10.768	1.780	1.954	-3.809
2.783	63.767	0.000	63.294	0.000	63.486	0.000	-0.747	-0.443
4.44	237.882	0.000	238.993	0.000	237.652	0.000	0.465	-0.097
5.18	62.894	0.000	62.492	0.000	61.428	0.000	-0.644	-2.388
5.921	31.702	0.000	31.673	0.000	31.625	0.000	-0.092	-0.244

Con fin el validar el valor de amortiguamiento natural promedio adoptado se realiza un cálculo teórico basado en los siguientes datos:

- Se utiliza un porcentaje de amortiguamiento natural de 0.3396%.
- Se usan la masa y rigidez ya calculadas.
- Se utiliza una aceleración en la base sinusoidal con los mismas amplitudes y frecuencias del ensayo para el movimiento en la base (Ver Tabla 6.10)
- Se utiliza el análisis paso a paso

La Tabla 6.13 muestra los resultados del cálculo teórico y el error en las respuestas respecto de los datos experimentales. Como se observa en dicho cuadro la variación en la respuesta, sobretodo en desplazamiento relativo y aceleración absoluta, no pasa del 6%. Lo cual indica una buena aproximación del amortiguamiento adoptado. En base a esto se calcula las respuestas para un rango de frecuencias no ensayadas (incluyendo la frecuencia natural), considerando una amplitud igual a 235.215 cm/s² (Esta es la amplitud promedio de los movimientos de 2.783Hz y 4.443Hz). La Tabla 6.14 muestra las respuestas para dichos movimientos.

Tabla 6.13: Respuesta teórica – Mov. Sinusoidal sin disipadores

Frec. Mov. (Hz)	Acel. Base (cm/s ²)	Máxima Respuesta				Error respecto del experimental (%)			
		Desp. Relat. (cm)	Vel. Relat. (cm/s)	Acel. Relat. (cm/s ²)	Acel. Abs. (cm/s ²)	Desp. Relat.	Vel. Relat.	Acel. Relat.	Acel. Abs.
1.671	113.78	0.26	2.78	29.15	142.93	-5.78	-5.59	-5.50	-1.36
2.222	158.03	0.46	6.38	89.14	247.16	-3.54	-6.94	-10.64	0.08
2.783	190.26	0.81	14.17	247.85	438.10	-5.79	-5.82	-5.86	-3.41
4.443	280.17	1.17	32.74	913.94	633.85	0.83	1.08	1.22	1.68
5.176	336.68	0.65	21.17	688.46	351.82	-1.17	-1.30	-0.99	-1.41
5.933	389.47	0.46	17.10	637.32	247.88	-2.24	-1.89	-1.54	-4.03

Tabla 6.14: Respuesta teórica - aceleración en la base de 235.215 cm/s².

Frec. Mov. (Hz)	Máxima Respuesta			
	Desp. Relat. (cm)	Vel. Relat. (cm/s)	Acel. Relat. (cm/s ²)	Acel. Abs. (cm/s ²)
3.30	2.13	44.10	914.42	1149.55
3.60	8.10	183.21	4144.17	4377.70
3.70	64.08	1489.75	34633.28	34634.08
3.80	7.88	188.15	4492.41	4259.18
3.90	3.91	95.85	2348.82	2114.15

Usando los valores de la Tabla 6.10 (experimentales) y Tabla 6.14 (teóricas) se calcula el Factor de amplificación dinámica (Ver sección 1.2.1). La Tabla 6.15 y la Figura N° 6.19 resumen los resultados

Tabla 6.15: Factor de amplificación dinámica – Sin disipadores

Frec. Mov. (Hz)	FAD	Datos
1.671	1.33	Experimentales
2.222	1.62	Experimentales
2.783	2.44	Experimentales
3.3	4.89	Teóricos
3.6	18.61	Teóricos
3.7	147.24	Teóricos
3.8	18.11	Teóricos
3.9	8.99	Teóricos
4.443	2.24	Experimentales
5.176	1.06	Experimentales
5.933	0.65	Experimentales

Nota: La columna datos se refiere a que si el FAD fue calculado en base a datos experimentales o teóricos

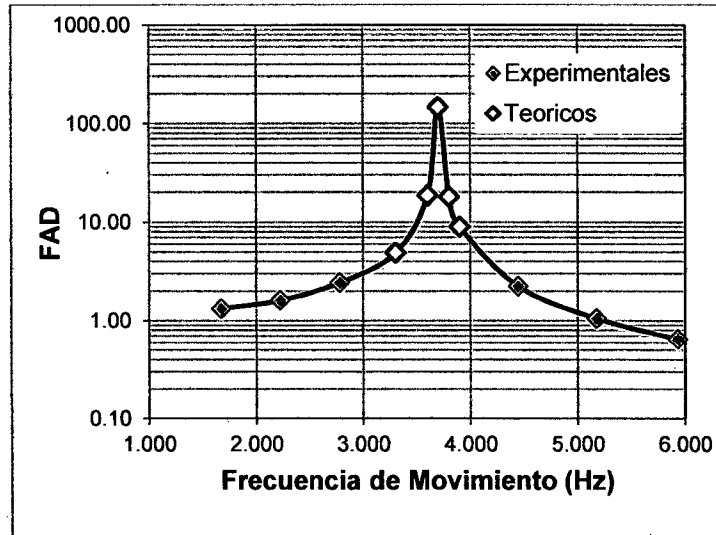


Figura N° 6.19 Factor de Amplificación Dinámica – Modelo sin disipadores

6.3.2.4 Respuesta - movimiento sísmico

La aceleración en la base registrada por el acelerómetro se muestra en la Figura N° 6.20

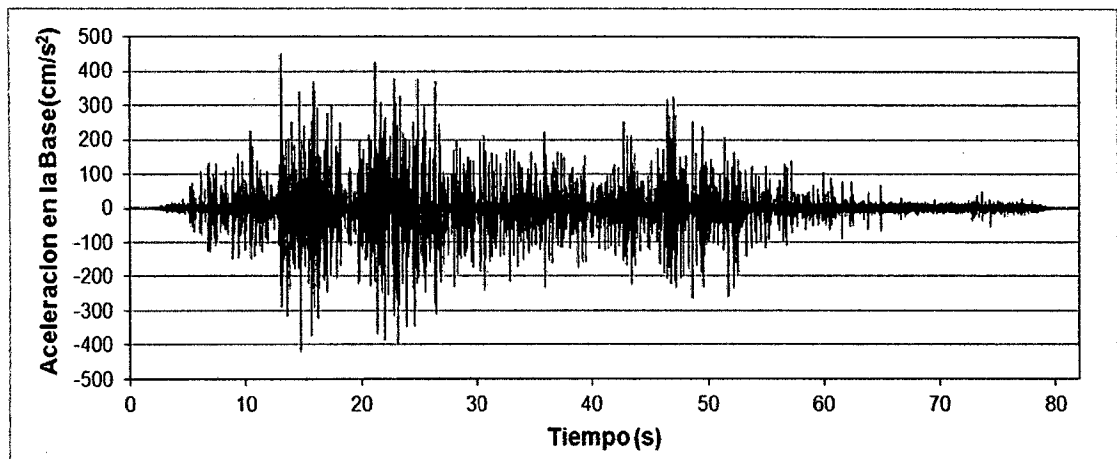


Figura N° 6.20 Aceleración en la Base - Mov. Sísmico sin disipador

El registro tiene la forma del sismo de 1974; sin embargo esta amplificado aproximadamente 2.8 veces para los valores positivo ya que tiene un pico de 450.35cm/s^2 y el registro ingresado 158.767 ; y 2.17 veces para los valores negativos ya que tiene un pico de -419.25cm/s^2 y el registro ingresado -192.489cm/s^2 .

La respuesta del modelo se presenta de la Figura N° 6.21 a la Figura N° 6.24. En la Tabla 6.16 se muestra el resumen de dichas respuestas.

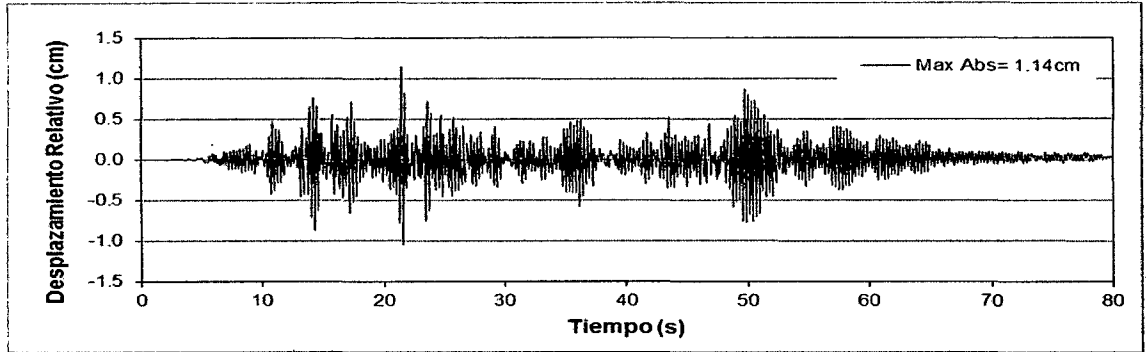


Figura N° 6.21 Desplazamiento Relativo – Mov. Sísmico sin Disipador

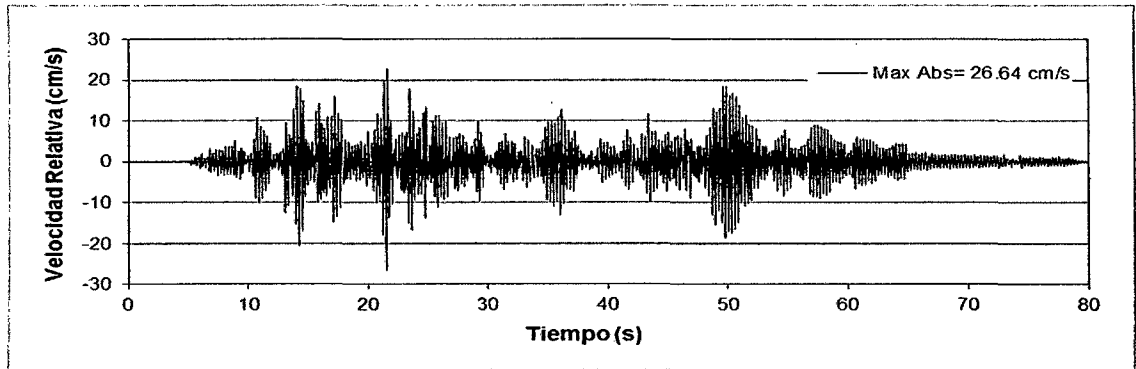


Figura N° 6.22 Velocidad Relativa – Mov. Sísmico sin Disipador

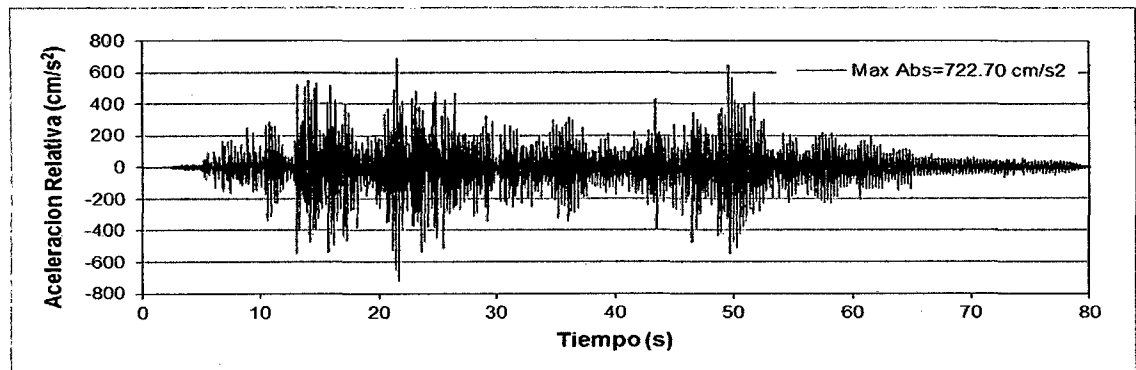


Figura N° 6.23 Aceleración Relativa – Mov. Sísmico sin Disipador

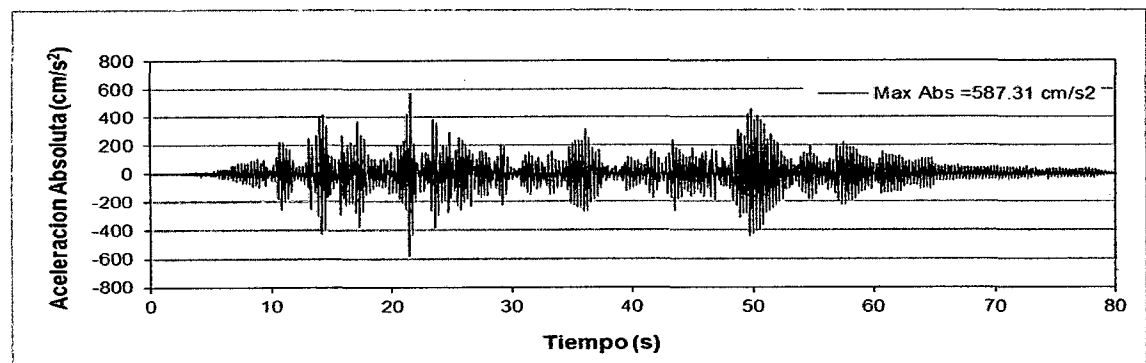


Figura N° 6.24 Aceleración Absoluta – Mov. Sísmico sin Disipador

Tabla 6.16: Respuesta experimental – Mov. Sísmico sin disipador

Respuesta	Desp. Relat. (cm)	Vel. Relat. (cm/s)	Acel. Relat. (cm/s ²)	Acel. Abs. (cm/s ²)
Máxima	1.14	22.77	693.07	576.21
Mínima	-1.05	-26.64	-722.70	-587.31

La gráfica de distribución de energía se muestra en la Figura N° 6.25. Así mismo se presenta el resumen en la Tabla 6.17

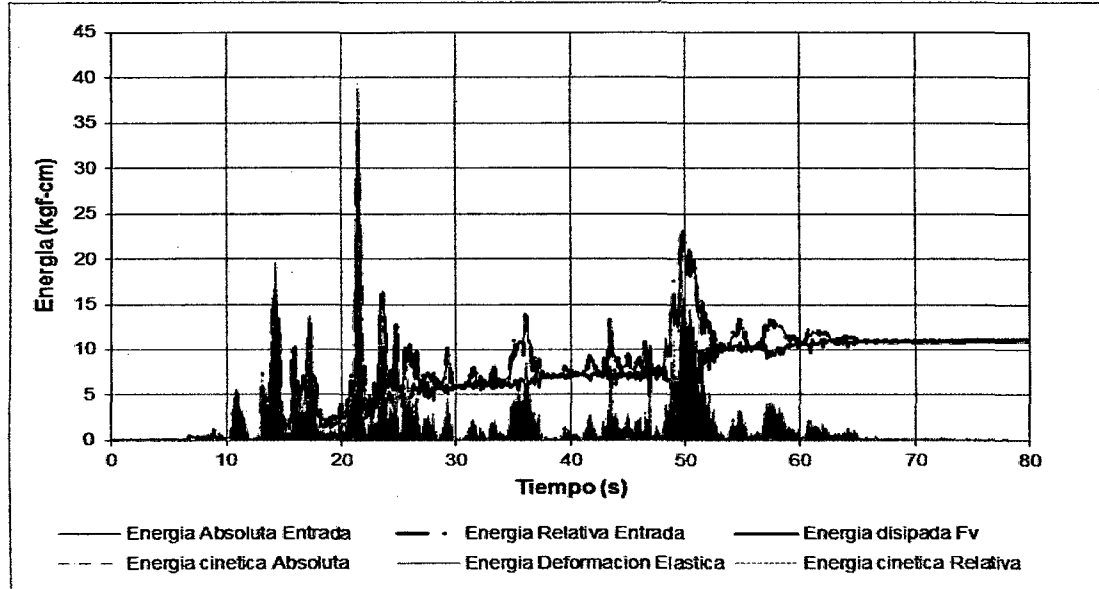
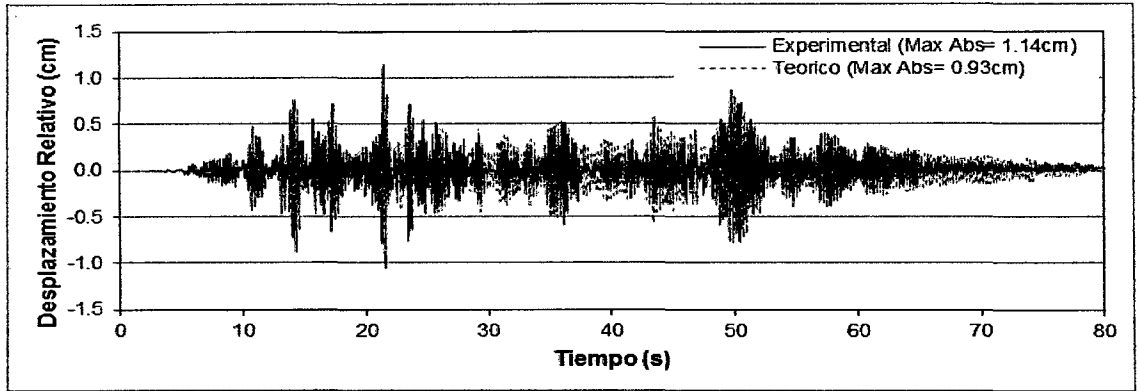


Figura N° 6.25 Energía vs Tiempo – Mov. Sísmico sin Disipador

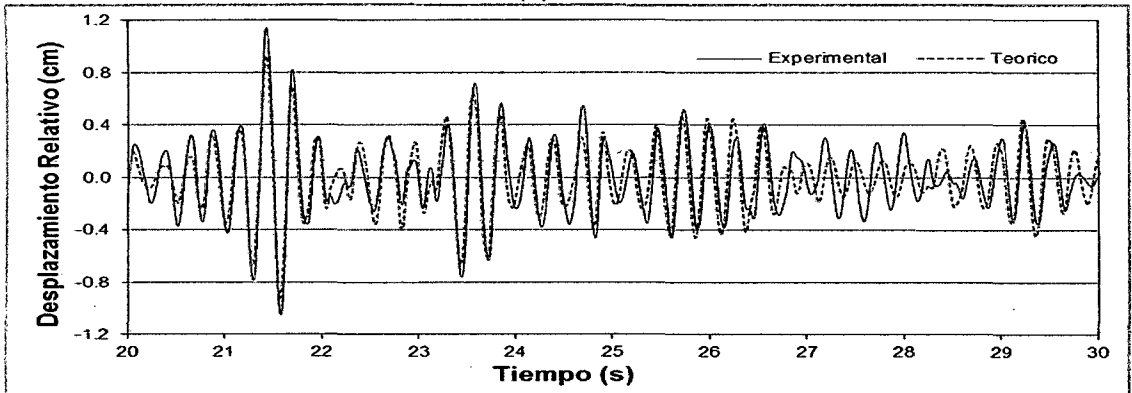
Tabla 6.17: Distribución de energía - Mov sísmico – sin disipadores

Energía al final del movimiento (kgf-cm)						Error Balance de Energía (%)	
E _{FV}	E _{DEF}	E _{E.ABS}	E _{C.ABS}	E _{E.RELAT}	E _{C.RELAT}	Abs.	Relat.
11.213	0.024	10.919	0.000	10.942	0.001	-2.914	-2.702

Al igual que en el movimiento sinusoidal se hace un análisis teórico considerando la aceleración en la base registrada experimentalmente y los parámetros dinámicos del modelo. De la Figura N° 6.26 a la Figura N° 6.29 se muestra las gráficas de la respuesta teórica junto a las experimentales.

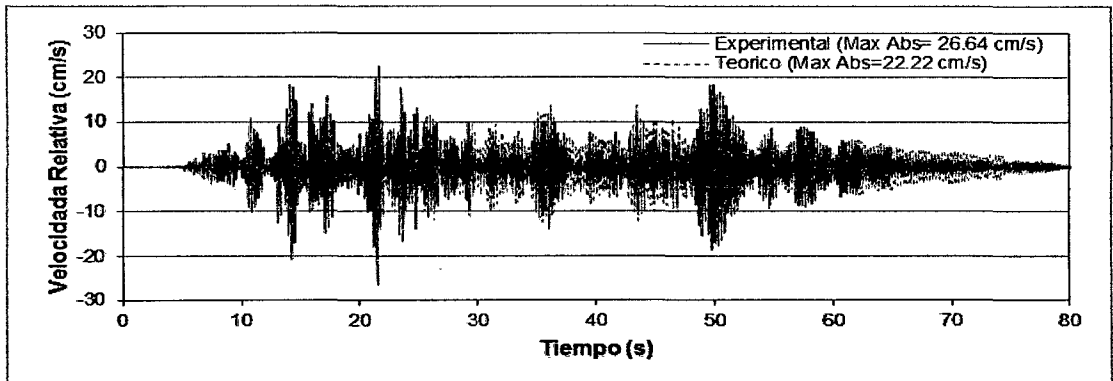


(a)

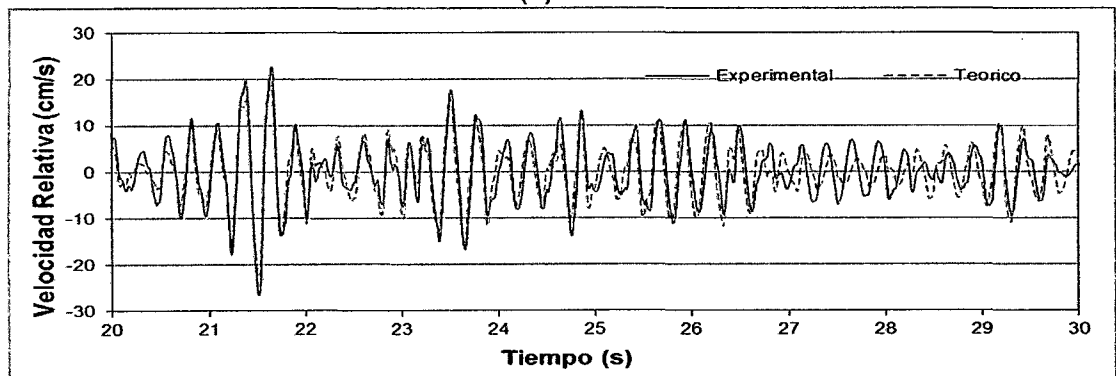


(b)

Figura N° 6.26 Desplazamiento Relativo (a) todo el registro (b) entre 20-30 s.



(a)



(b)

Figura N° 6.27 Velocidad Relativa (a) todo el registro (b) entre 20-30 s.

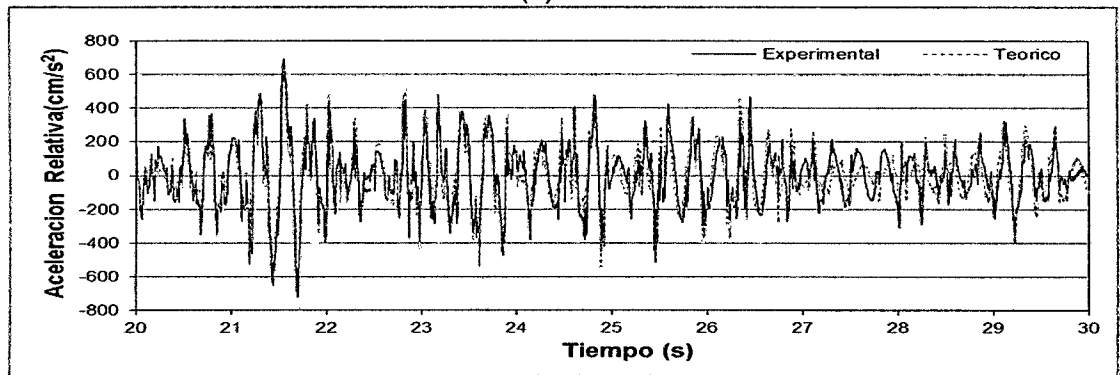
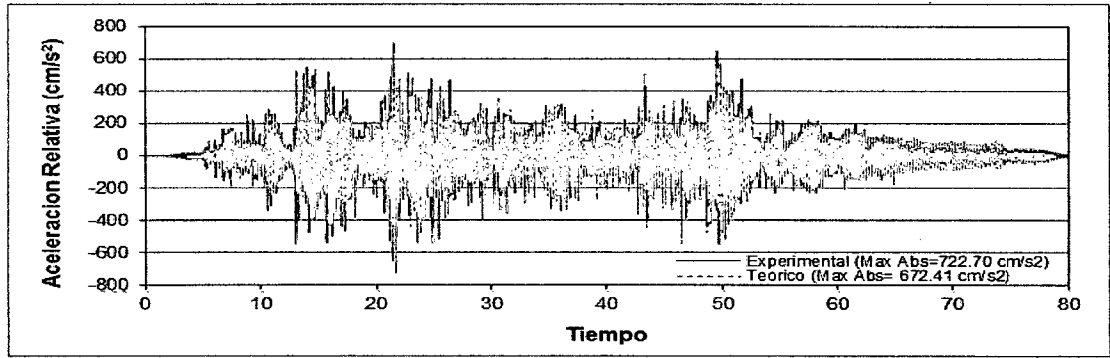


Figura N° 6.28 Aceleración Relativa (a) todo el registro (b) entre 20-30 s.

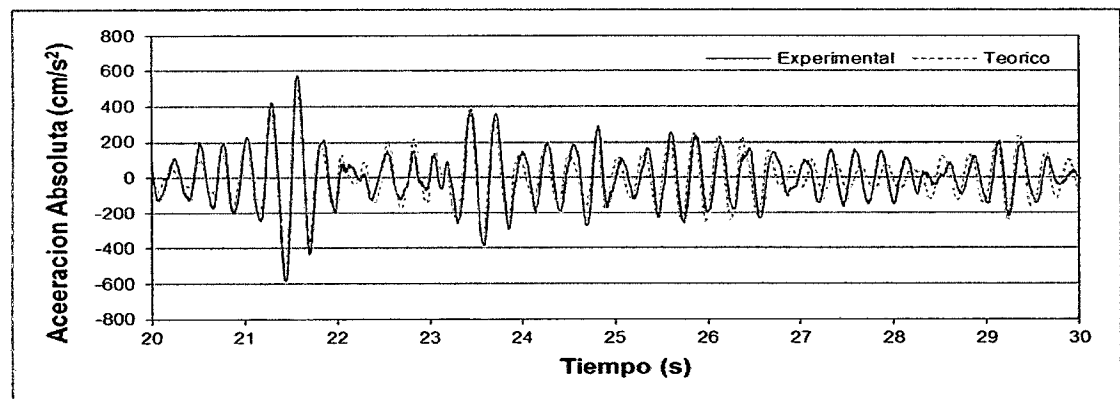
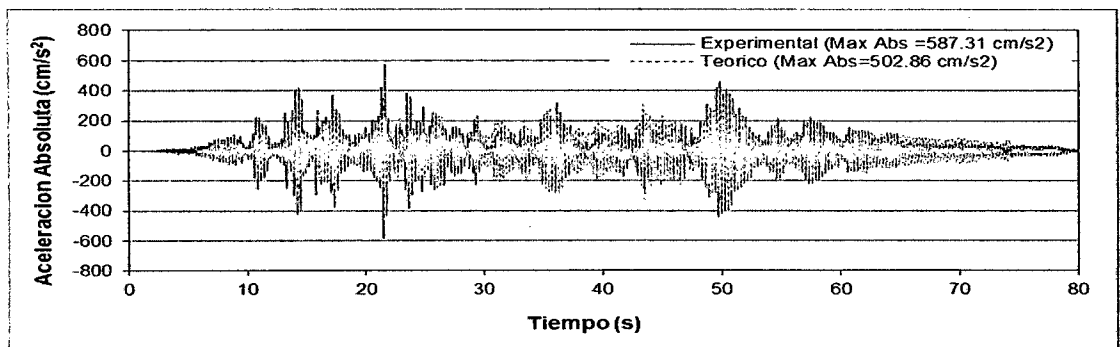


Figura N° 6.29 Aceleración Absoluta (a) todo el registro (b) entre 20-30 s.

El resumen de las máximas respuestas teóricas y el error respecto a las experimentales se presenta en la Tabla 6.18 .

Tabla 6.18 Respuesta teórica para movimiento sísmico del ensayo – Modelo sin disipadores

Valores	Máxima Respuesta				Error respecto del experimental (%)			
	Desp. Relat. (cm)	Vel. Relat. (cm/s)	Acel. Relat. (cm/s ²)	Acel. Abs. (cm/s ²)	Desp. Relat.	Vel. Relat.	Acel. Relat.	Acel. Abs.
Max.	0.93	18.83	633.39	499.46	18.70	17.28	8.61	13.32
Min.	-0.92	-22.22	-672.41	-502.86	12.31	16.62	6.96	14.38

De la Tabla 6.18 se observa que existe un aumento en los porcentajes de error con respecto a los porcentajes de error presentados en el movimiento sinusoidal.

6.3.3 Sistema con disipadores – Modelo B

6.3.3.1 Ensayo vibración libre

El registro de desplazamientos para los 3 ensayos realizados se presenta en la Figura N° 6.30.

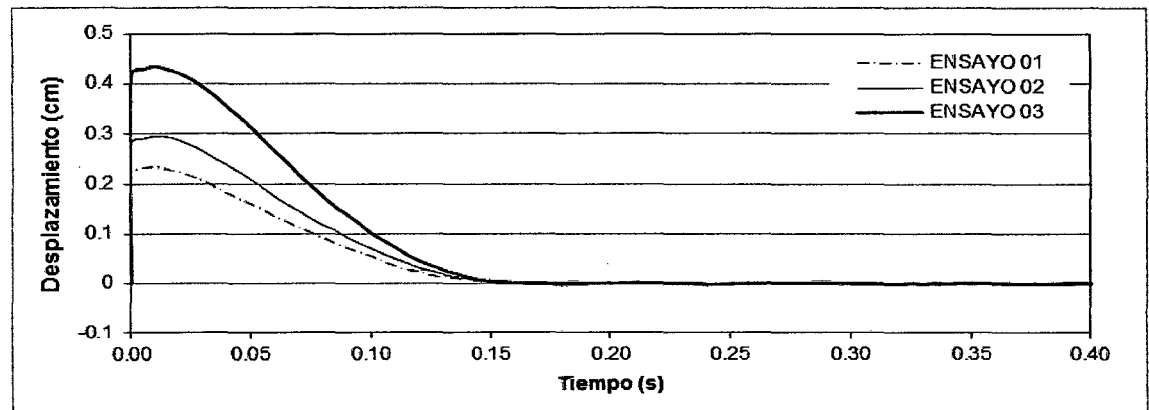


Figura N° 6.30 Desplazamiento Relativo – Ensayo vibración libre con disipadores

Lo que se puede observar es que se tiene un movimiento similar a los movimientos críticamente y sobre amortiguado (Ver Figura N° 1.2)

Basado en las ecuaciones para movimiento sub-amortiguado y sobre-amortiguado y variando los valores del coeficiente de amortiguamiento se encontró curvas teóricas que se ajusten a las curvas experimentales (Ver Figura N° 6.31).

Se puede apreciar que la curva que más se ajusta es la sub-amortiguada para gran parte del movimiento. Sin embargo no se puede concluir que el coeficiente de amortiguamiento calculado sea el correcto ya que la última parte del movimiento no están bien definidas las ondulaciones típicas. Las cuales también nos ayudarían a encontrar el periodo del sistema.

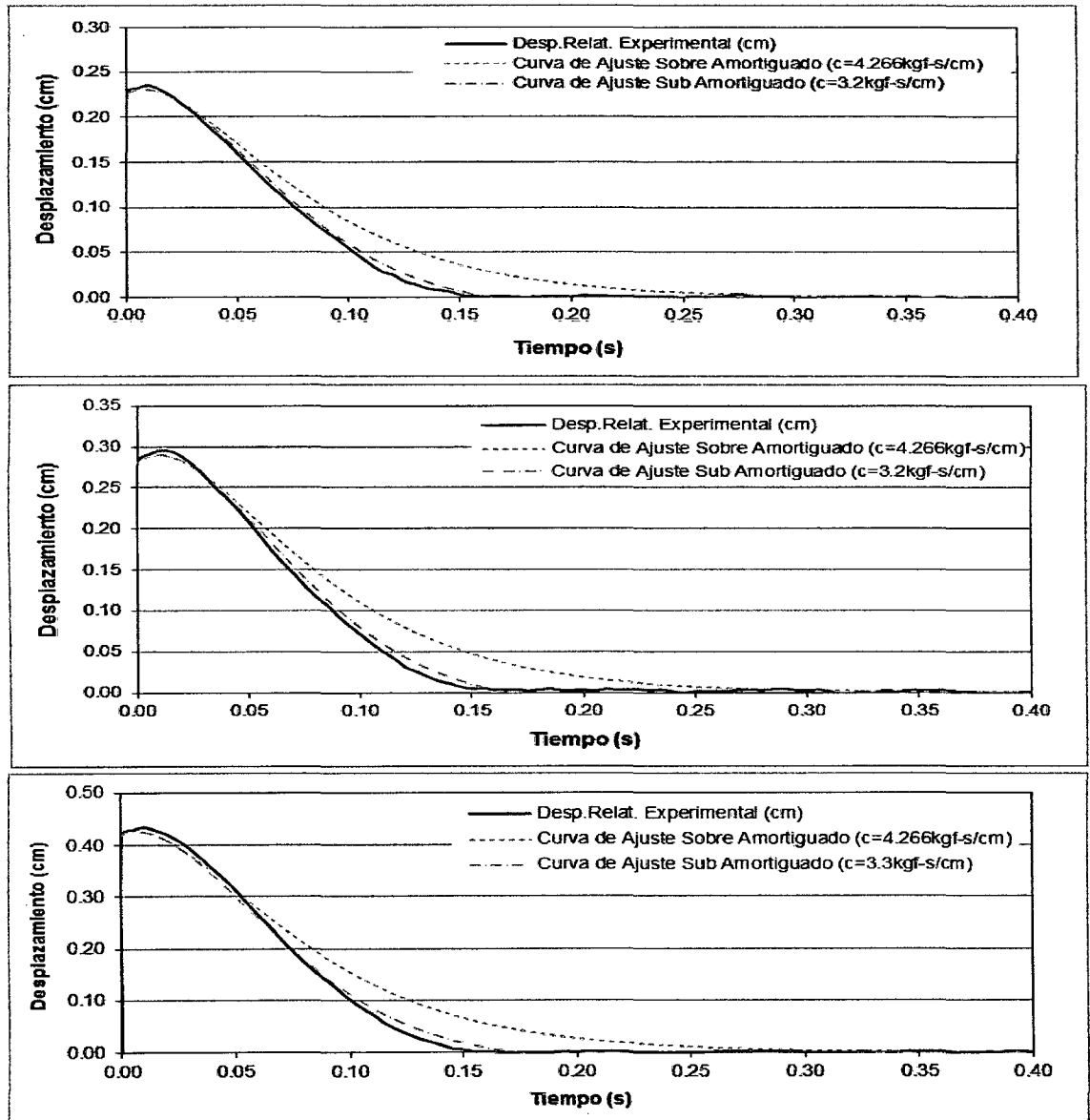


Figura N° 6.31 Ajuste a curvas sobre y sub amortiguadas del movimiento en vibración libre con disipador

6.3.3.2 Respuesta - movimiento sinusoidal

La Tabla 6.19 presenta el cuadro de aceleraciones en la base y la respuesta en el modelo (desplazamientos, velocidades y aceleraciones) para los movimientos

sinusoidales con diferente frecuencia. Los datos se obtienen luego de pasar un filtro a los registros del acelerómetro y del láser para reducir el ruido. A diferencia del ensayo sin disipadores no fue necesario utilizar un filtro tal que la señal solo tenga la frecuencia de movimiento, ya que con un filtro pasa banda más ancho se pudo obtener señales aceptables (esto se verifica cuando se calcula el error en el balance de energías).

Tabla 6.19: Respuesta experimental – Mov. Sinusoidal con disipadores.

Frec. Mov. (Hz)	Respuesta Máxima				
	Acel. Base (cm/s ²)	Desp. Relat. (cm)	Vel. Relat. (cm/s)	Acel. Relat. (cm/s ²)	Acel. Abs. (cm/s ²)
1.672	124.83	0.23	2.41	26.62	143.50
2.234	167.11	0.33	4.58	67.01	213.82
2.783	204.44	0.45	7.80	139.75	296.27
3.186	217.16	0.56	11.22	226.33	364.89
4.443	295.02	0.50	14.01	395.03	386.69
5.176	337.13	0.43	13.84	452.93	348.27
5.933	385.37	0.36	13.55	507.58	320.36

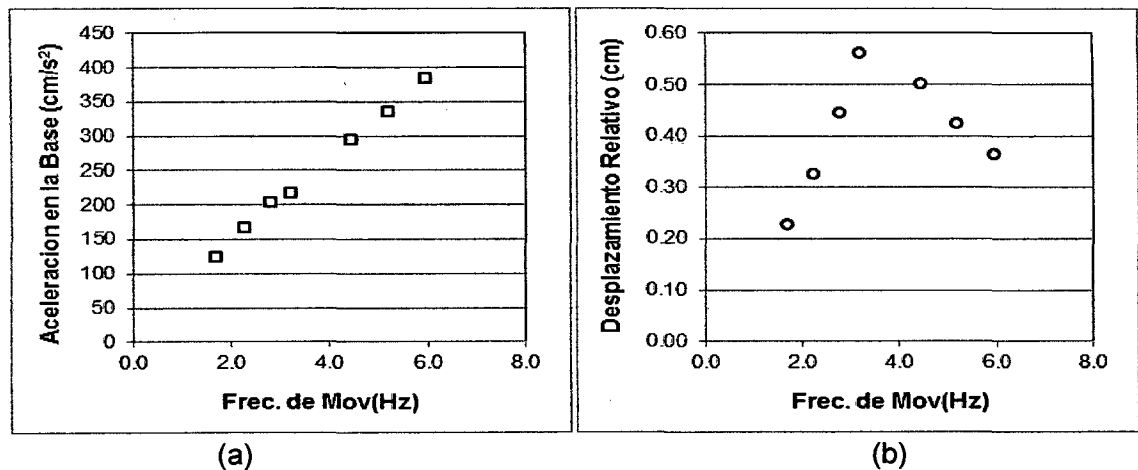


Figura N° 6.32 Aceleración en la base(a) y Desplazamiento Relativo (b) para cada frecuencia de Movimiento

Se obtuvo la fuerza de amortiguamiento proporcionado por los dos disipadores (F_d) para cada movimiento usando la ecuación (5.5). Con este dato se obtiene las gráficas de Fuerza vs Desplazamiento Relativo (Ver Figura N° 6.33).

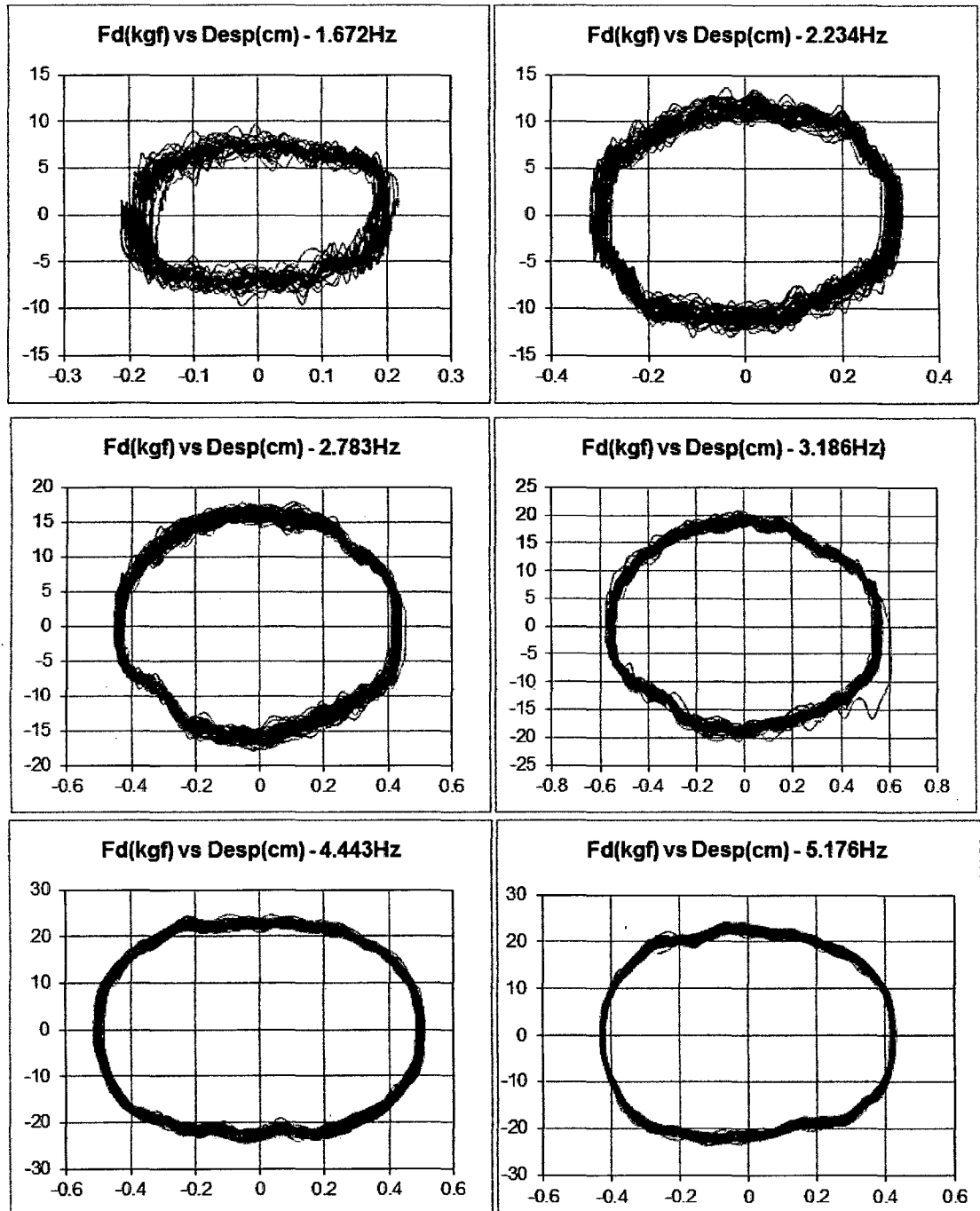


Figura N° 6.33 Fuerza de Amortiguamiento F_d vs Desplazamiento Relativo para cada frecuencia de Movimiento

Se observa curvas sin ningun tipo de inclinacion lo que supone que el sistema brazo-disipador no se comporta como un modelo viscoelastico (Ver seccion 2.4.3 y 2.5.2.2). Por tanto la rigidez del brazo es tan grande y la compresibilidad del liquido es muy baja tal que la fuerza F_d esta solamente esta influenciado por el amortiguamiento del disipador.

A partir de las curvas de histeresis se calcula el amortiguamiento lineal equivalente por los metodos mencionados en la seccion 1.4.2 y 2.6. Se calcularon dichos valores por ciclo y se presenta en la Tabla 6.20 el valor promedio para cada movimiento.

Tabla 6.20: Amortiguamiento Lineal Equivalente - Mov sinusoidal con disipadores

Frec. Mov. (Hz)	Porcentaje de Amortiguamiento Lineal Equivalente (%)		Coeficiente de Amortiguamiento Lineal Equivalente (kgf-s/cm)	
	Método Energía	Método ASCE 07*	Método Energía	Método ASCE 07
1.672	88.965	104.444	3.795	4.455
2.234	64.655	81.128	2.758	3.461
2.783	50.180	64.688	2.141	2.759
3.186	39.659	56.534	1.692	2.412
4.443	41.616	44.191	1.775	1.885
5.176	40.981	37.904	1.748	1.617
5.933	39.465	32.454	1.683	1.384

* Se utilizó la ecuación (2.80)

En la Figura N° 6.34 y Figura N° 6.35 se muestran las gráficas de porcentaje de amortiguamiento lineal equivalente y coeficiente de amortiguamiento lineal equivalente respectivamente.

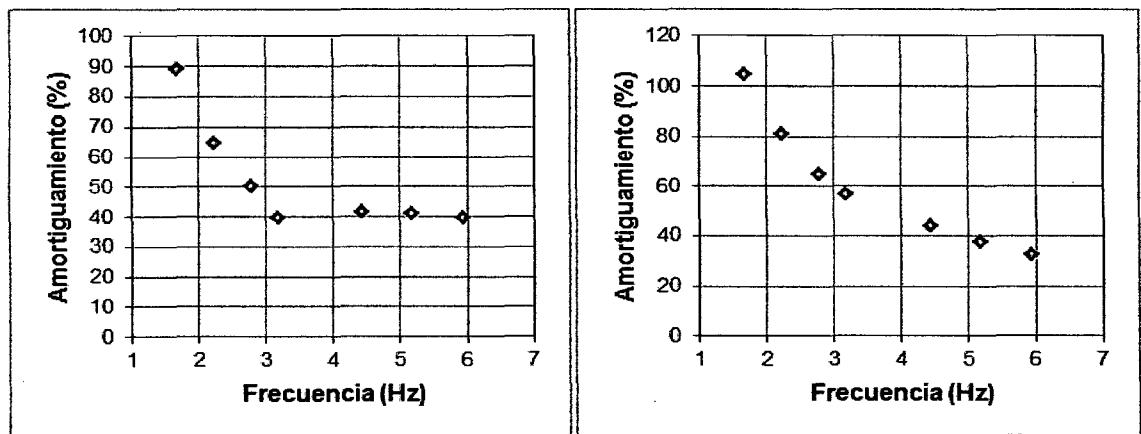
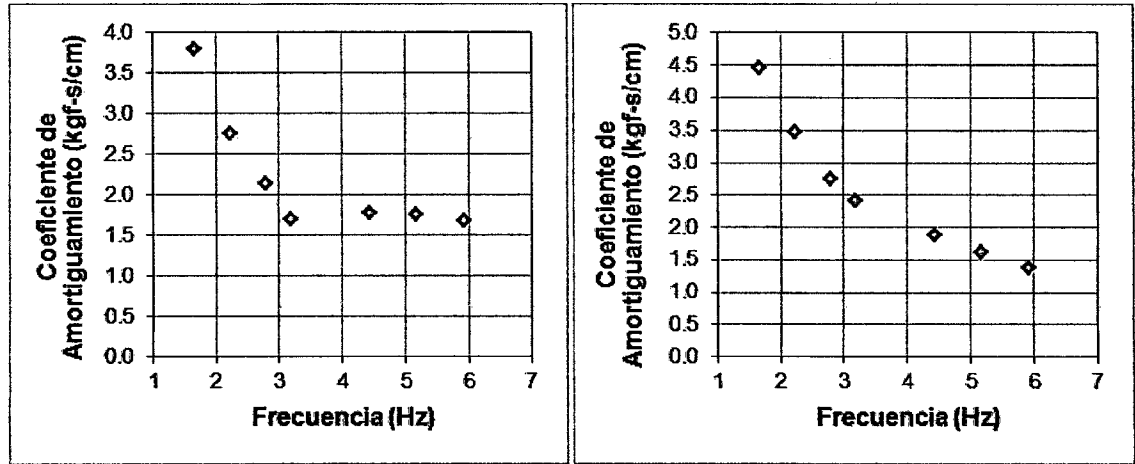


Figura N° 6.34 Porcentaje de Amortiguamiento Lineal Equivalente (a) Método Energía (b) Método ASCE 07



(a)

(b)

Figura N° 6.35 Coeficiente de Amortiguamiento Lineal Equivalente (a) Método Energía (b) Método ASCE 07

Se observa que existe una tendencia a ser constante el amortiguamiento para valores mayores a 3.186 Hz según el método de energía; sin embargo con el método de ASCE 07 la tendencia indica que seguiría decreciendo. En este punto podríamos empezar a analizar la tendencia y decir que a medida que la frecuencia de movimiento va aumentando el amortiguamiento del disipador disminuye pero debemos tener en cuenta que en cada movimiento la amplitud de aceleración en la base es diferente, así que este factor puede estar influyendo en este comportamiento.

Por otro lado es posible obtener el comportamiento del disipador graficando la Fuerza de amortiguamiento vs la velocidad relativa. La Figura N° 6.36 muestra esas gráficas. También se muestra la regresión lineal para los tramos bien definidos, ya que existe un tramo cercano a velocidad cero no muy bien definido.

Al igual que en el ensayo preliminar se observa que existe un comportamiento distinto para pequeñas velocidades (la pendiente es mayor), debido a la influencia de la fuerza desarrollada en el retén. Por tanto también se concluye que para velocidades mayores la fuerza de amortiguamiento es principalmente influenciado solo por la presión y esfuerzo de corte en el pistón.

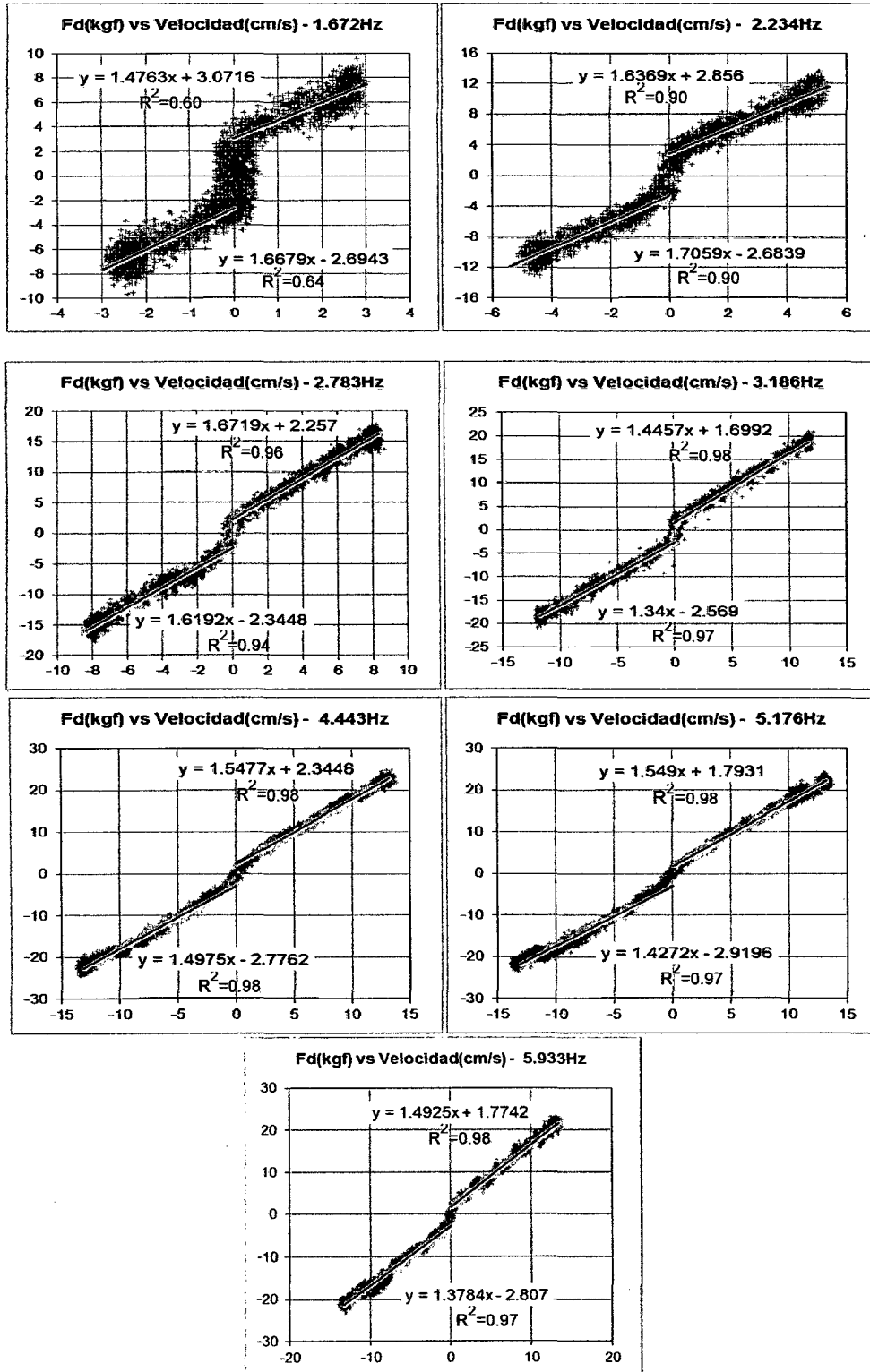
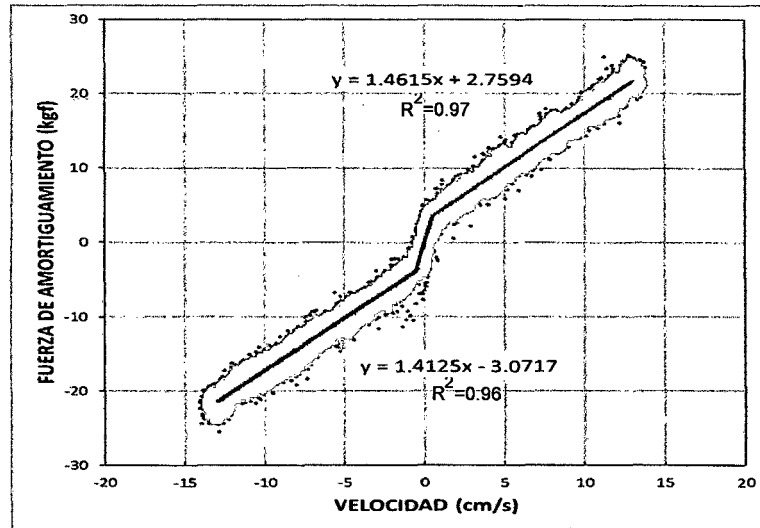


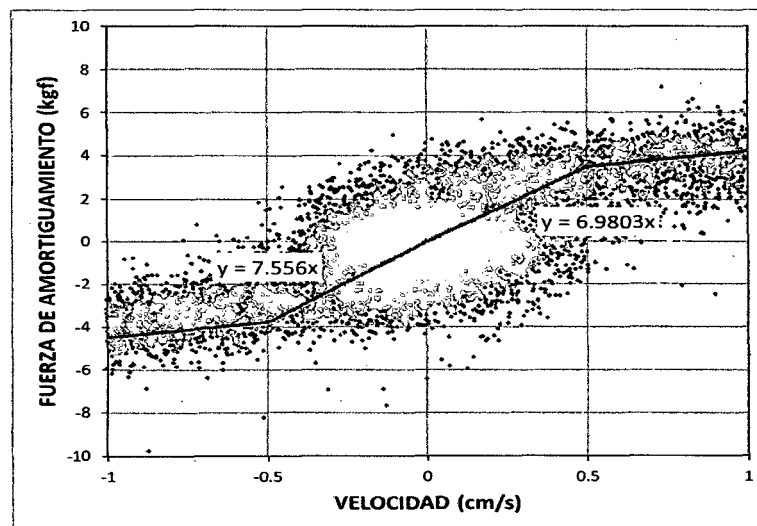
Figura N° 6.36 Fuerza de Amortiguamiento vs Velocidad Relativa en movimiento sinusoidal- Modelo con disipadores

A continuación se juntan todos los puntos de todos los movimientos y se realiza una regresión lineal por tramos. Se divide en tres tramos. Se tiene un tramo central correspondiente a valores de velocidad entre -0.5cm/s y 0.5cm/s ya que

es en esta región donde la distribución de los puntos no tiene una tendencia clara. También se tiene un tramo a la derecha correspondiente a valores positivo y otro a la izquierda correspondiente a valores negativos. En estos tramos se tiene una tendencia clara lineal, por ello se realiza una regresión lineal con esos puntos. El tramo central se divide en dos, uno para valores positivos y el otro para negativos, en estos sub-tramos se une el origen con la línea de regresión que corresponde a los tramos laterales (Ver Figura N° 6.37).



(a)



(b)

Figura N° 6.37 Comportamiento de la Fuerza de Amortiguamiento para todos los movimientos sinusoidales (a) tramos laterales (b) tramo central

La Figura N° 6.38 muestra las regresiones de todos los movimiento en una sola gráfica para observar si existe alguna tendencia.

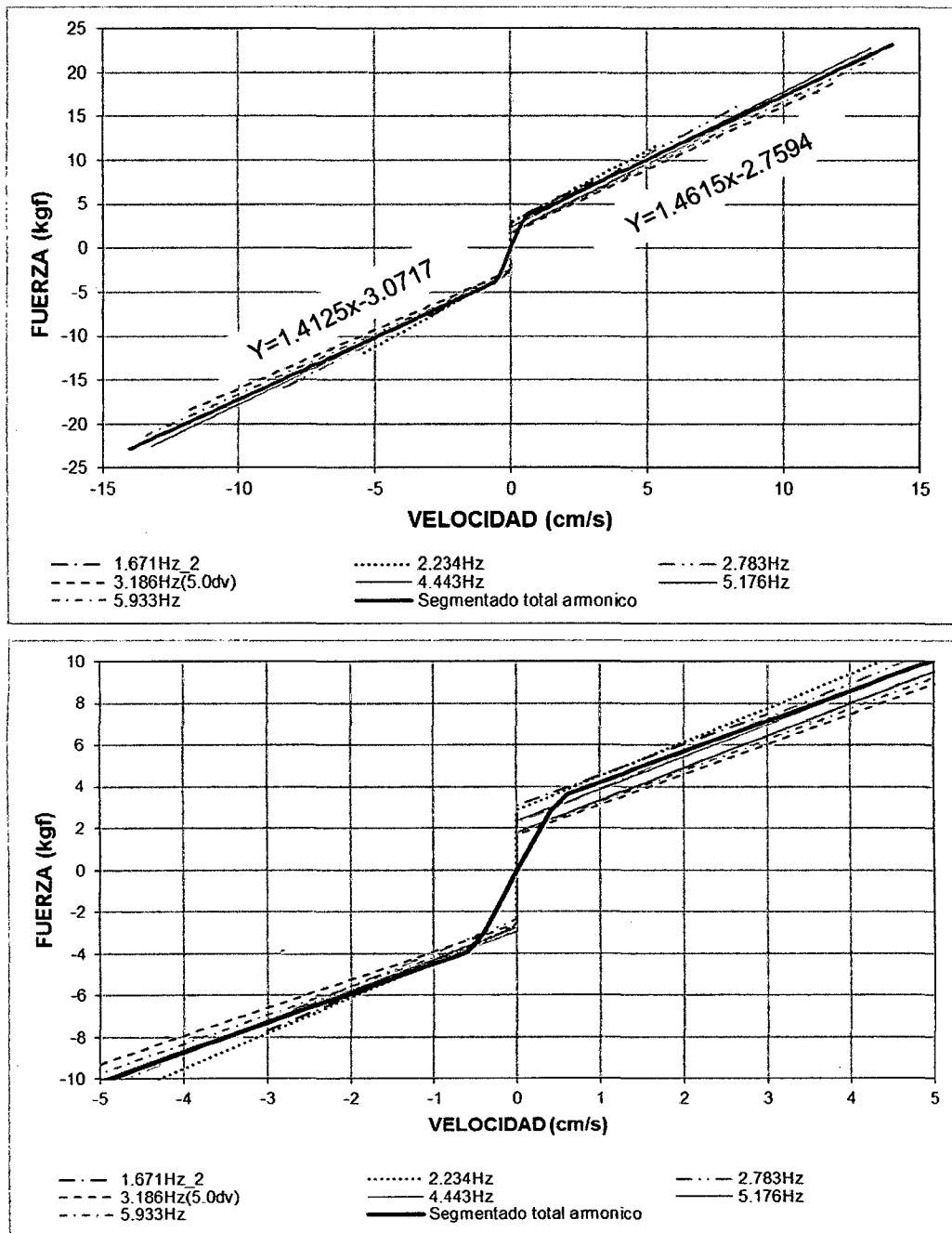


Figura N° 6.38 Comparación de los ajustes regresiones lineales

Lo que se observa es que no existe una tendencia clara entre las frecuencias de movimiento y las pendientes. De acuerdo a la Figura N° 6.35 se esperaría que para frecuencias mayores la pendiente disminuya o la línea se desplace hacia abajo para tener menor amortiguamiento, pero eso no sucede. Por el contrario se observa que la línea de frecuencia a frecuencia se desplaza sin ningún orden claro. Adicionalmente se puede decir que la variación no esta tan significativa por lo que se puede usar como comportamiento promedio la curva de la Figura N° 6.37.

A partir de la curva de comportamiento promedio calculamos la curva de comportamiento por disipador (Ver Figura N° 6.39). Considerando que a cada disipador le corresponde la mitad de la fuerza de amortiguamiento.

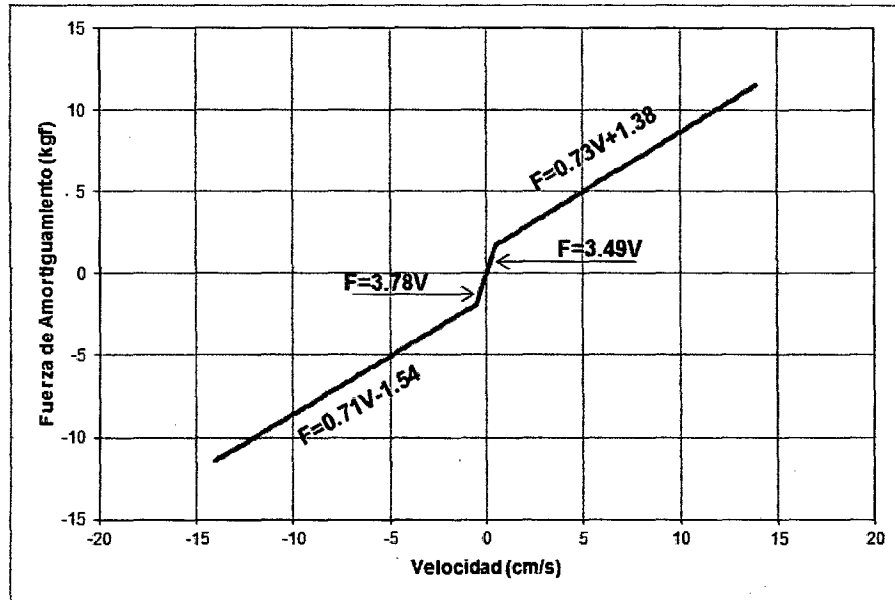


Figura N° 6.39 Comportamiento de la fuerza de amortiguamiento para cada disipador

Otro punto importante a discutir es en la ligera variación del amortiguamiento cuando la velocidad cambia de sentido. Las pendientes en el lado positivo son mayores que en el lado negativo, esto indica un mayor amortiguamiento. Este fenómeno puede explicarse usando la Figura N° 6.40. En esta figura se muestra al disipador y los ejes positivo y negativo de acuerdo a como han sido tomado los datos de desplazamiento y aceleración. De acuerdo a esta figura la velocidad positiva se da cuando pistón se mueve en dirección contraria a donde a la ubicación del vástago y el negativo en sentido contrario. Cuando el movimiento es en el sentido positivo el área de presión es toda la cara del pistón; y cuando el movimiento es en sentido contrario el área de presión se reduce debido a la presencia del vástago. Esa diferencia de áreas produce las ligeras diferencias en el amortiguamiento.

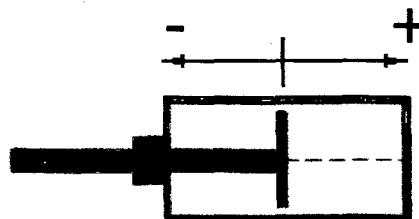
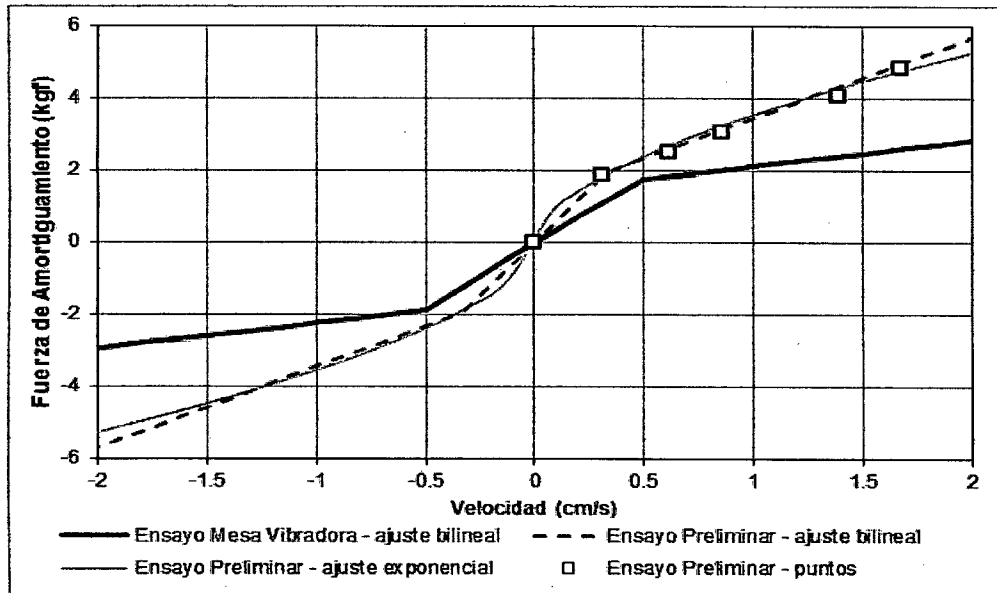
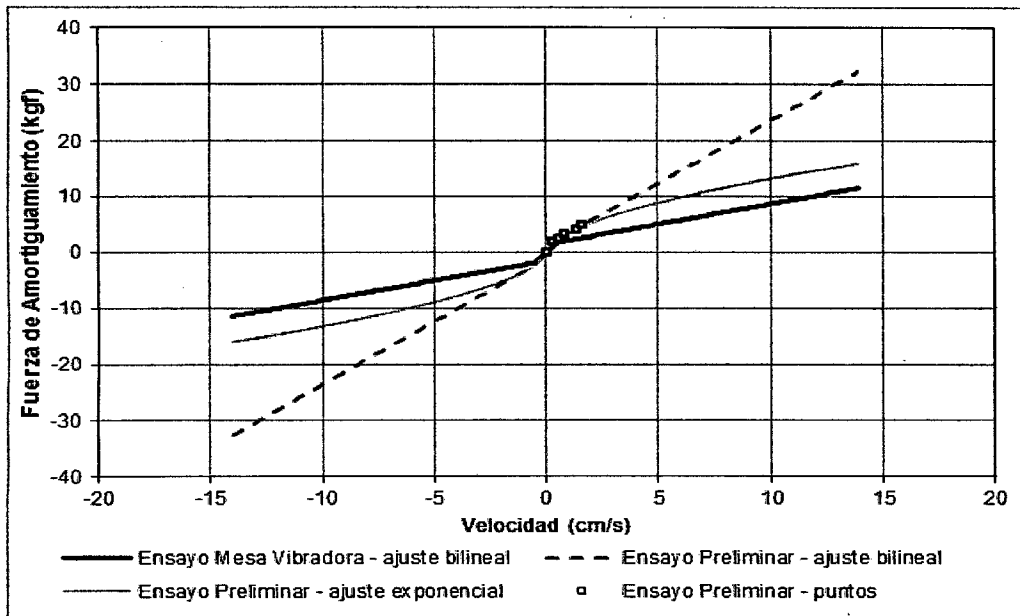


Figura N° 6.40 Orientación del disipador y ubicación de los ejes positivo y negativo usados en la medición de desplazamientos y aceleraciones.

Por otro lado se usara la Figura N° 6.39 para compararlo con la gráfica que se obtuvo en el ensayo preliminar. En la Figura N° 6.41 se muestra dicha comparación para valores de velocidad en el rango del ensayo preliminar y para el rango del ensayo en mesa vibradora. En este caso se asume que para valores negativos de velocidad el comportamiento en el ensayo preliminar es simétrico a los valores positivos, para ello se coloca la pendiente promedio. Adicionalmente se colocan los puntos hallados en el ensayo preliminar.



(a)



(b)

Figura N° 6.41 Comparación de regresiones del ensayo preliminar con el ensayo en mesa vibradora (a) rango de velocidades del ensayo preliminar (b) rango de velocidades del ensayo en mesa vibradora

Se puede observar que en ambos rangos de velocidades la fuerza de amortiguamiento en el ensayo preliminar es mayor que en el ensayo en mesa vibradora. Además se observa que la regresión exponencial se acerca mucho más que la regresión lineal; sin embargo no se puede decir que una mejor aproximación es exponencial porque los ensayos en mesa vibradora indican una clara tendencia bilineal.

La diferencia entre estos dos comportamientos demuestra que las condiciones de flujo dentro del disipador cambiaron en el ensayo en mesa vibradora. Se debe recordar que en el ensayo preliminar el flujo se da solo en una dirección, mientras que en el ensayo en mesa vibradora es un ensayo cíclico por tanto se puede crear turbulencias, flujo de burbujas de aire y discontinuidades que reduzcan el amortiguamiento. Adicionalmente en el ensayo en mesa vibradora la capsula no está completamente llena, ya que debe existir cierto volumen dentro para ser ocupado por el vástago cuando este ingrese. Por el diámetro y distancia que recorre el vástago este volumen es pequeño, sin embargo influye en el flujo.

Por otro lado al igual que en el ensayo preliminar se calcula el valor de f en la ecuación (2.25). Se utiliza el valor promedio de las pendientes de los tramos derecho e izquierdo de la curva de comportamiento del disipador (Figura N° 6.39) para compararlo con el coeficiente de amortiguamiento de la ecuación (2.25). El valor promedio es 0.72kgf-s/cm

De acuerdo a registros de la temperatura en la glicerina antes y después del ensayo se obtuvo valores de 28 °C y 36 °C respectivamente. De acuerdo a la Tabla 6.4 se obtiene los valores de viscosidad dinámica (μ). Esos valores y las dimensiones del disipador se reemplazan en la ecuación (2.25) para obtener el valor de f tal que se tenga un coeficiente de amortiguamiento igual a 0.72 kgf-s/cm. Los valores de f se presentan en la Tabla 6.21

Tabla 6.21: Variación del valor de f en el rango de temperaturas del ensayo

Temp. (°C)	28.00	30.00	32.00	34.00	36.00	PROMEDIO
μ (kgf-s/cm ²)	8.89×10^{-6}	7.90×10^{-6}	6.90×10^{-6}	5.91×10^{-6}	4.91×10^{-6}	6.902×10^{-6}
f	0.229	0.257	0.294	0.344	0.414	0.308

El valor de f calculado es menor que en el ensayo preliminar. Esto quiere decir que las condiciones se alejan más de las establecidas en la sección 2.3.2.2, lo

que origina que el amortiguamiento disminuya. Esta conclusión ya fue prevista cuando se comparó las curvas de comportamiento de los dos ensayos.

Cabe mencionar cuando se dice que la temperatura de 36°C fue registrada después del ensayo no se refiere a después del ensayo con movimiento sinusoidal, sino al termino de todos los ensayos realizados en ese día, en el cual luego del ensayo sinusoidal se realizó el ensayo con movimiento sísmico y el ensayo de barrido de frecuencias. Este último duro 10 minutos por tanto el aumento de temperatura es importante, lo cual reduce el rango de temperatura en el ensayo analizado.

Se calcula la distribución de energías para cada movimiento (Ver Tabla 6.22). En la Tabla 6.22 el valor de E_{FD} es la energía disipada por los disipadores. El objetivo de este procedimiento es obtener el porcentaje de error en el balance de energías. Un balance de energías alto significaría que los datos contienen aun un ruido significativo y por tanto este error se propagaría a los demás resultados, invalidando todas las conclusiones.

Tabla 6.22: Distribución de Energía – Mov. Sinusoidal con disipadores.

Frec. Mov. (Hz)	Energía al final del movimiento (kgf-cm)							Error Balance de Energía (%)	
	E_{FD}	E_{FV}	E_{DEF}	$E_{E.ABS}$	$E_{C.ABS}$	$E_{E.RELAT}$	$E_{C.RELAT}$	Abs.	Relat.
1.671	238.26	0.80	0.01	243.27	0.00	239.08	0.00	1.73	0.01
2.230	705.20	4.43	0.00	746.77	0.00	740.71	0.00	4.97	4.20
2.783	1797.15	12.88	0.00	1812.33	0.00	1810.06	0.00	0.84	0.71
3.186	3056.84	26.91	0.00	3085.22	0.00	3083.86	0.00	0.92	0.88
4.443	5057.26	41.45	0.00	5098.66	0.00	5098.71	0.00	0.81	0.81
5.180	4789.78	40.48	0.00	4842.22	0.00	4830.40	0.00	1.08	0.84
5.933	4428.48	38.52	0.00	4467.40	0.00	4466.91	0.00	0.87	0.86

Con objetivo de validar la curva de comportamiento del disipador (Figura N° 6.39) se calcula las respuestas teóricas utilizando una aceleración en la base tipo sinusoidal con los mismas amplitudes y frecuencias del ensayo registradas experimentalmente (Ver Tabla 6.19). La Tabla 6.23 muestra las respuestas máximas y el porcentaje de error respecto a las respuestas experimentales.

Tabla 6.23: Respuesta teórica – Mov. Sinusoidal con disipadores

Frec. Mov. (Hz)	Acel. Base (cm/s ²)	Máxima Respuesta				Error respecto del experimental (%)			
		Desp. Relat. (cm)	Vel. Relat. (cm/s)	Acel. Relat. (cm/s ²)	Acel. Abs. (cm/s ²)	Desp. Relat.	Vel. Relat.	Acel. Relat.	Acel. Abs.
1.67	124.83	0.22	2.89	36.13	159.58	-3.04	19.79	35.72	11.21
2.23	167.11	0.35	5.24	86.35	238.53	6.35	14.48	28.87	11.56
2.78	204.44	0.47	8.50	165.98	323.83	6.49	9.06	18.77	9.31
3.19	217.16	0.52	10.54	230.18	360.35	-7.75	-6.03	1.70	-1.24
4.44	295.02	0.52	14.43	426.60	394.94	2.68	2.96	7.99	2.13
5.18	337.13	0.42	13.71	469.62	348.89	-0.77	-0.94	3.68	0.18
5.93	385.37	0.35	13.09	512.55	315.36	-3.55	-3.37	0.98	-1.56

Se observa que respecto a los desplazamientos relativos el error no pasa de 8%, pero hay mayor variación en aceleración relativa para frecuencias bajas. En general se tienen valores pequeños en el error lo cual indica una buena aproximación al usar la curva de amortiguamiento global.

En base a que con respecto a los desplazamientos los errores no son muy grandes se calcula las respuestas teóricas para un rango de frecuencias no ensayadas (incluyendo la frecuencia natural), considerando una amplitud igual a 256.09 cm/s² (Esta es la amplitud promedio de los movimientos a 3.19Hz y 4.44Hz). La Tabla 6.14 muestra las respuestas para dichos movimientos.

Se usa la Tabla 6.24 y la Tabla 6.19 para calcular el factor de amplificación dinámica (sección 1.2.1) para todos los movimientos. La Tabla 6.25 y la Figura N° 6.42 resumen los resultados

Tabla 6.24: Respuesta teórica para una amplitud de la aceleración en la base de 256.09 cm/s².

Frec. Mov. (Hz)	Desp. Relat. (cm)	Vel. Relat. (cm/s)	Acel. Relat. (cm/s ²)	Acel. Abs. (cm/s ²)
3.30Hz	0.63	13.13	293.75	431.70
3.60Hz	0.60	13.67	330.51	423.79
3.70Hz	0.59	13.69	339.41	418.29
3.80Hz	0.57	13.64	349.24	409.88
3.90Hz	0.55	13.54	354.40	400.71

Tabla 6.25: Factor de amplificación dinámica – Modelo con disipadores

ITEM	Frec. Mov. (Hz)	FAD	Datos
1	1.672	0.99	Experimentales
2	2.234	1.06	Experimentales
3	2.783	1.18	Experimentales
4	3.186	1.40	Teóricos
5	3.300	1.32	Teóricos
6	3.600	1.27	Teóricos
7	3.700	1.23	Teóricos
8	3.800	1.20	Teóricos
9	3.900	1.16	Teóricos
10	4.443	0.92	Experimentales
11	5.176	0.68	Experimentales
12	5.933	0.51	Experimentales

Nota: La columna datos se refiere a que si el FAD fue calculado en base a datos experimentales o teóricos

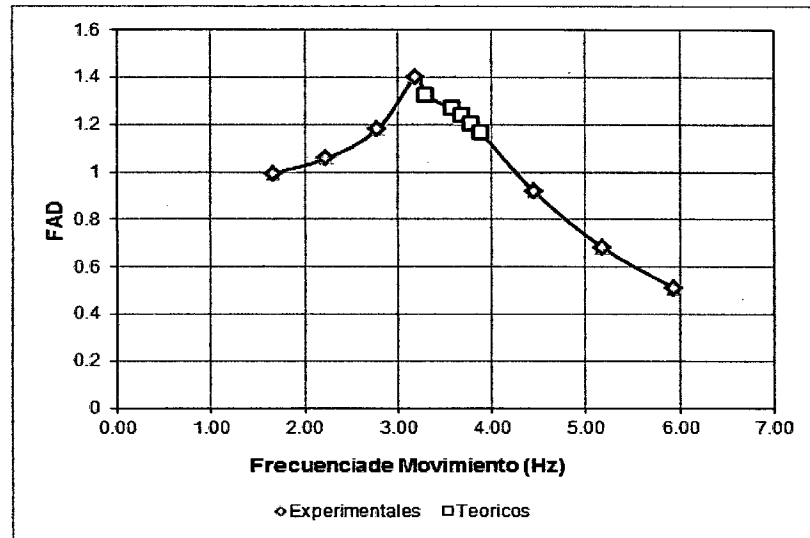


Figura N° 6.42 Factor de Amplificación Dinámica – Modelos con disipadores

Se observa un cambio brusco en el punto que corresponde a la frecuencia 3.186Hz, que es también el punto donde la porcentaje de error entre la respuesta experimental y teórica es mayor (Ver Tabla 6.23), este puede ser un factor por el cual se produce el cambio brusco.

6.3.3.3 Respuesta - movimiento sísmico

El registro de la aceleración en la base se muestra en la Figura N° 6.43

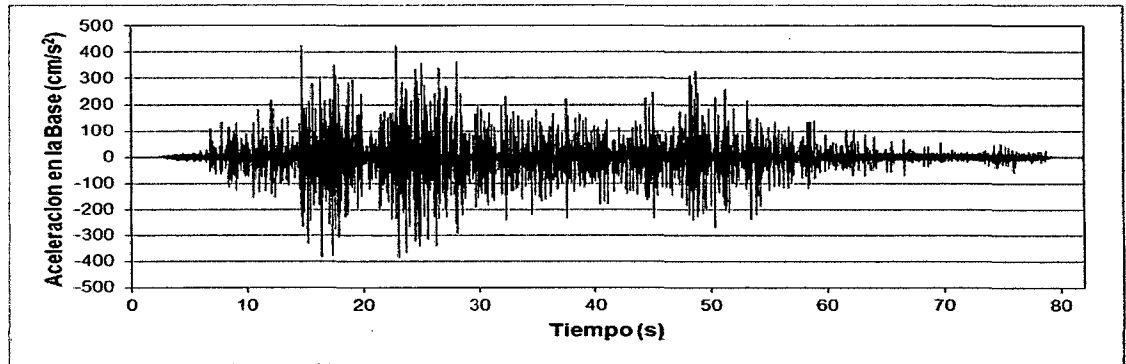


Figura N° 6.43 Aceleración en la base – Mov. Sísmico con disipadores

El registro tiene la forma del sismo de 1974; sin embargo esta amplificado aproximadamente 2.68 veces para los valores positivo ya que tiene un pico de 425.41 cm/s^2 y el registro ingresado 158.767 ; y 2.00 veces para los valores negativos ya que tiene un pico -384.51 cm/s^2 y el registro ingresado -192.489 cm/s^2 . La respuesta del modelo se presenta de la Figura N° 6.44 a la Figura N° 6.47. En la Tabla 6.26 se muestra el resumen de dichas respuestas.

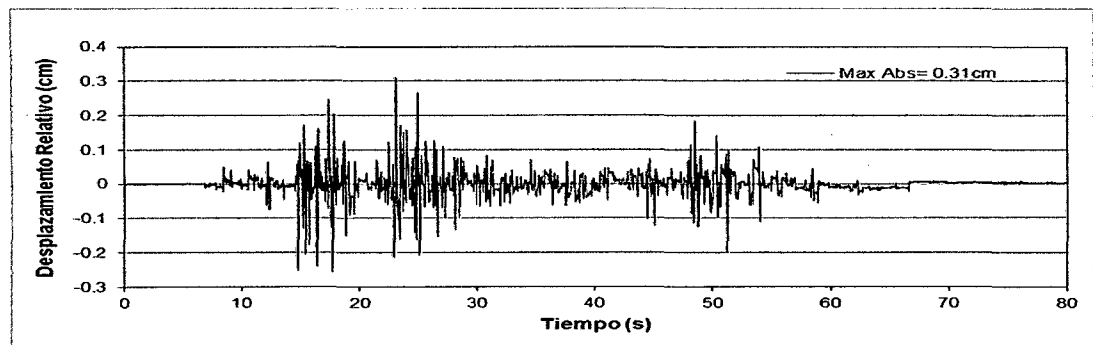


Figura N° 6.44 Desplazamiento relativo - Mov. Sísmico con disipadores

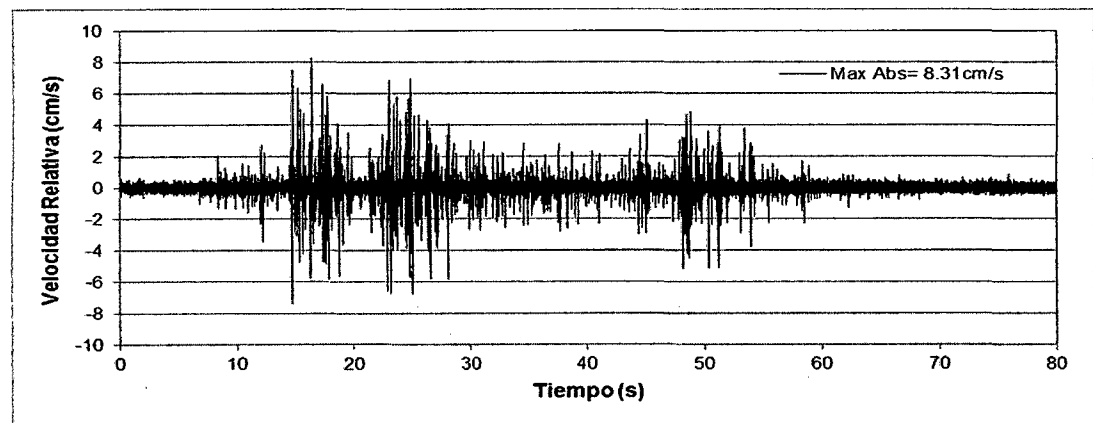


Figura N° 6.45 Velocidad relativa - Mov. Sísmico con disipadores

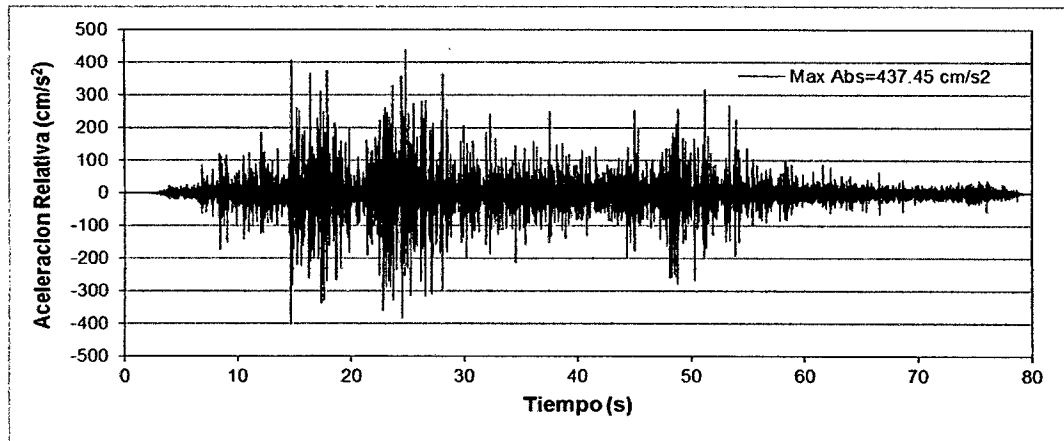


Figura N° 6.46 Aceleración relativa – Mov. Sísmico con disipadores

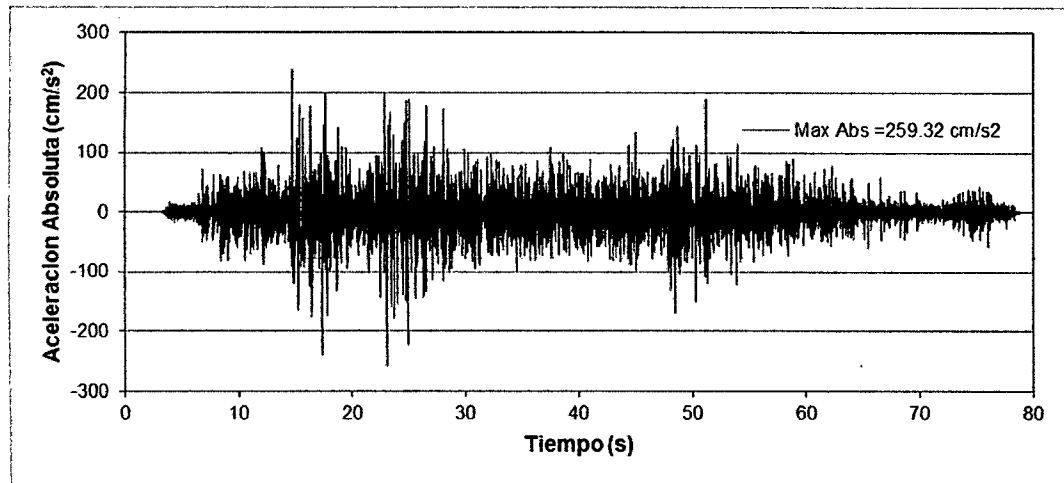


Figura N° 6.47 Aceleración Absoluta – Mov. Sísmico con disipadores

Tabla 6.26: Respuesta experimental - Mov. Sísmico con disipadores

Respuesta	Desp. Relat. (cm)	Vel. Relat. (cm/s)	Acel. Relat. (cm/s ²)	Acel. Abs. (cm/s ²)	Fd (kgf)
Máxima	0.312	8.313	437.340	238.790	14.06
Mínima	-0.258	-7.438	-401.585	-259.320	-13.77

La gráfica de distribución de energía se muestra en la Figura N° 6.48. Así mismo se presenta el resumen en la Tabla 6.27.

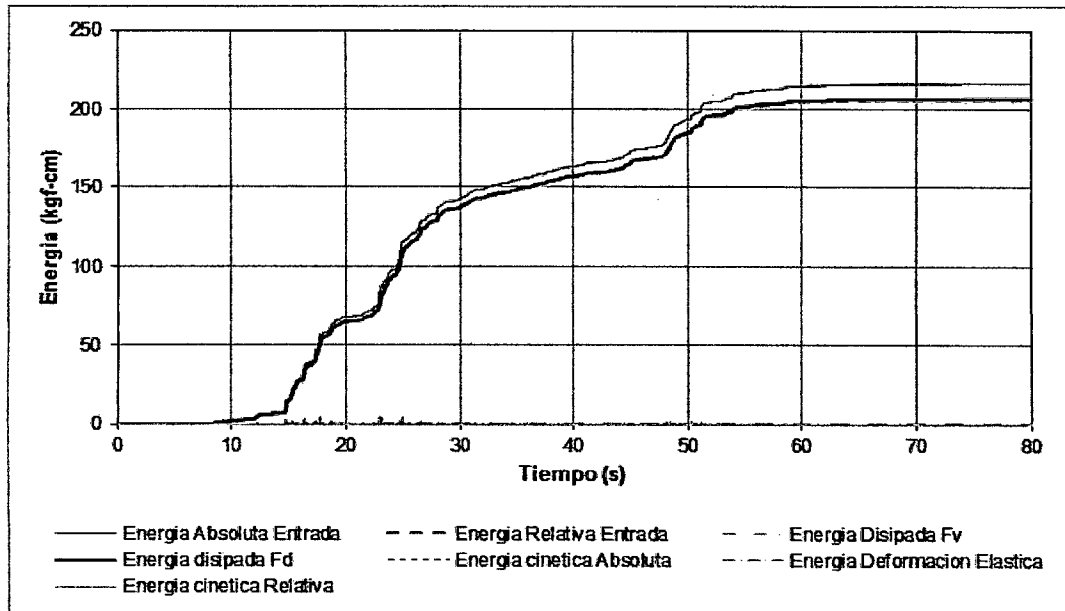


Figura N° 6.48 Historia de Energía - Mov. Sísmico con disipadores

Tabla 6.27: Distribución de energía - Mov sísmico con disipadores

Energía al final del Movimiento(kgf-cm)							Error Balance de Energía (%)	
E_{FD}	E_{FV}	E_{DEF}	$E_{E.ABS}$	$E_{C.ABS}$	$E_{E.RELAT}$	$E_{C.RELAT}$	Abs.	Relat.
206.64	0.788	0.000	216.47	0.824	205.63	0.006	4.161	-0.496

Ahora se presenta la curva de histéresis (Ver Figura N° 6.49) y la gráfica fuerza de amortiguamiento vs Velocidad (Ver Figura N° 6.50), así mismo se hace una regresión lineal en esta última gráfica en los tramos positivos y negativos.

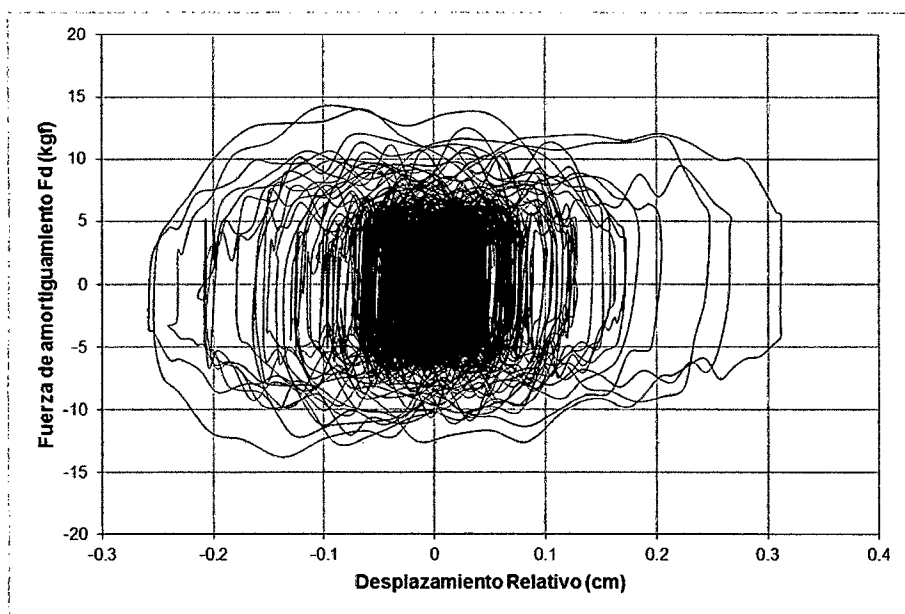


Figura N° 6.49 Curva de histéresis de los disipadores – Mov. Sísmico

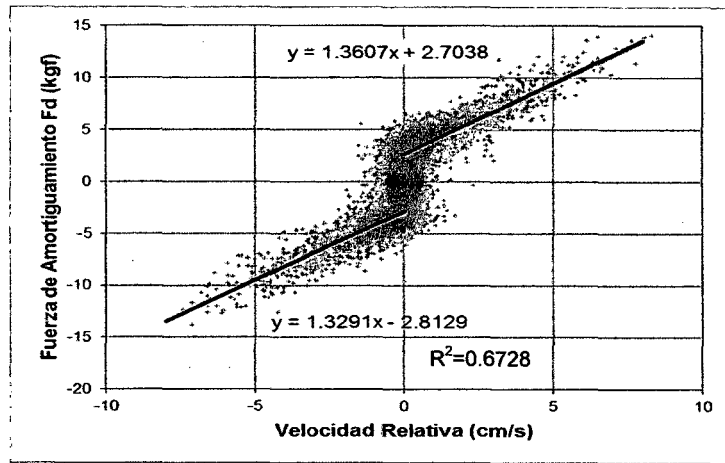
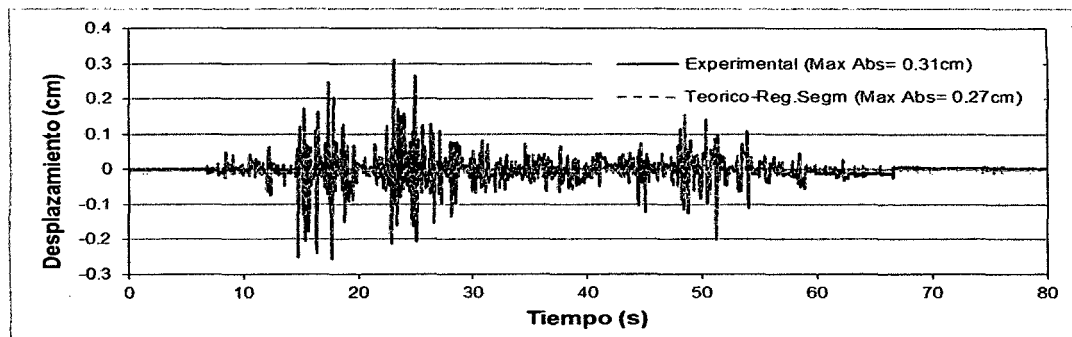


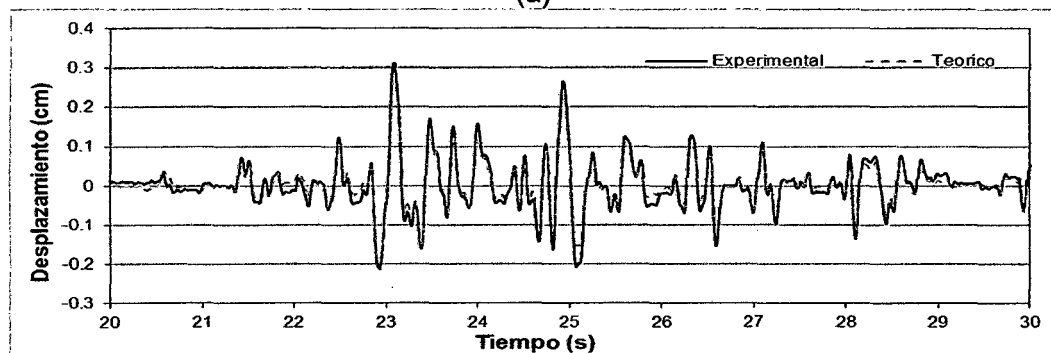
Figura N° 6.50 Fuerza de Amortiguamiento vs Velocidad – Mov. Sísmico

Se puede observar que para este movimiento la tendencia lineal no es tan marcada como en los movimientos sinusoidales. Las pendientes tanto en el lado positivo como en el negativo son menores a los calculados en el movimiento sinusoidal.

Al igual que en el movimiento sinusoidal se hace un análisis teórico considerando la aceleración en la base registrada experimentalmente y el comportamiento bilineal de los disipadores (Figura N° 6.39). De la Figura N° 6.51 a la Figura N° 6.54 se muestra las gráficas de la respuesta teórica junto a las experimentales.

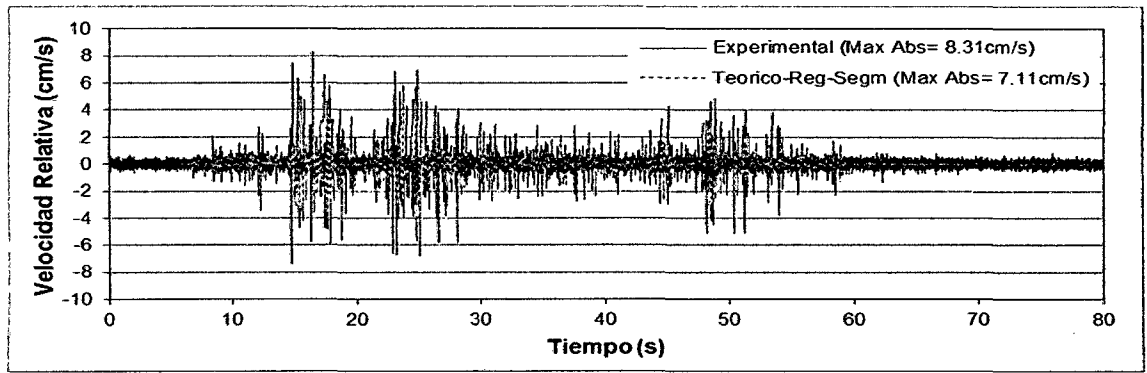


(a)

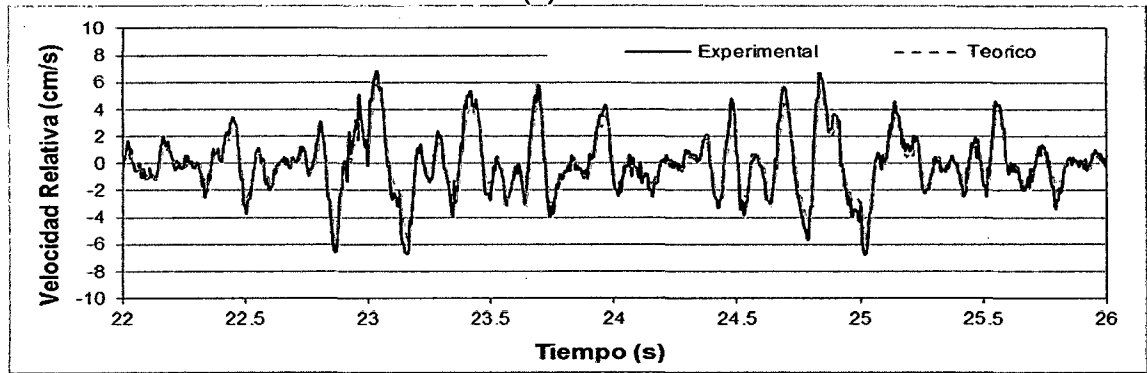


(b)

Figura N° 6.51 Desplazamiento Relativo (a) todo el registro (b) entre 20-30 s.

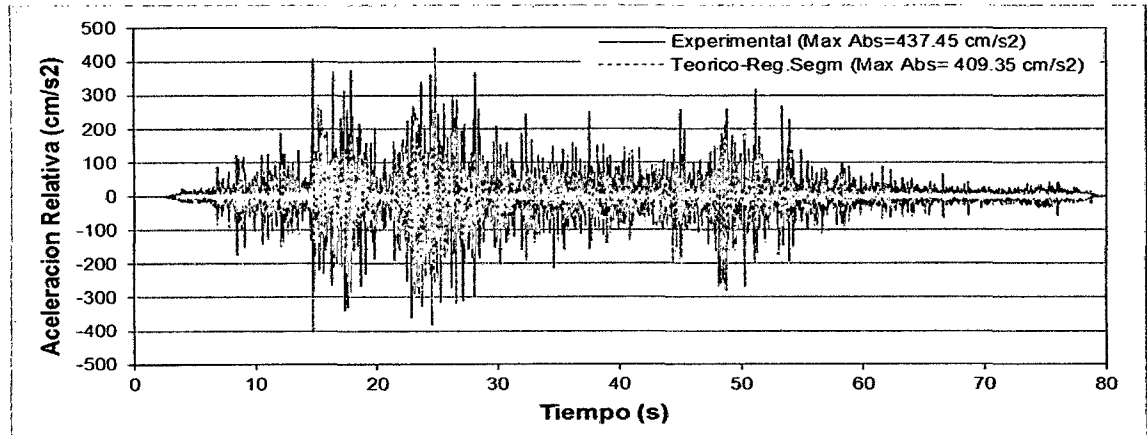


(a)

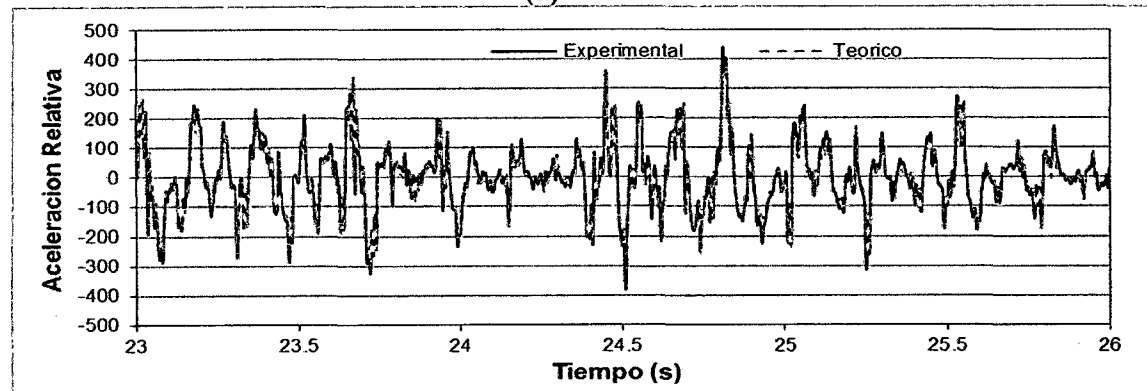


(b)

Figura N° 6.52 Velocidad Relativa (a) todo el registro (b) entre 22-26 s.

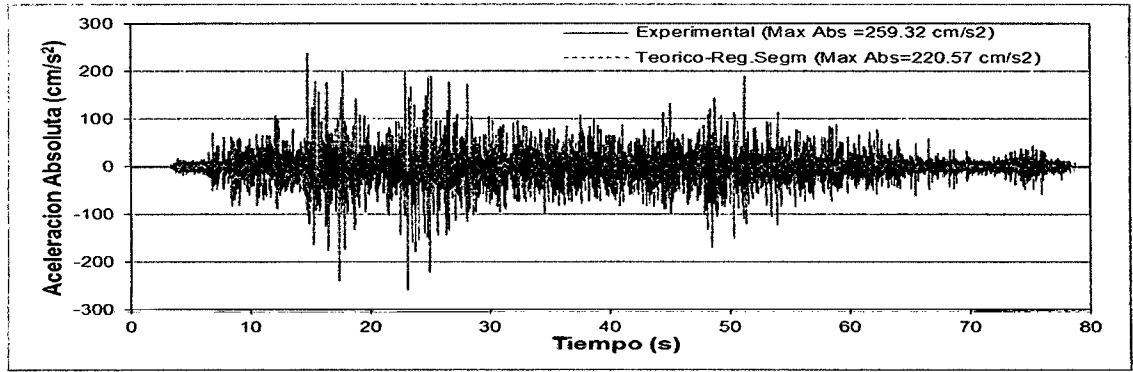


(a)

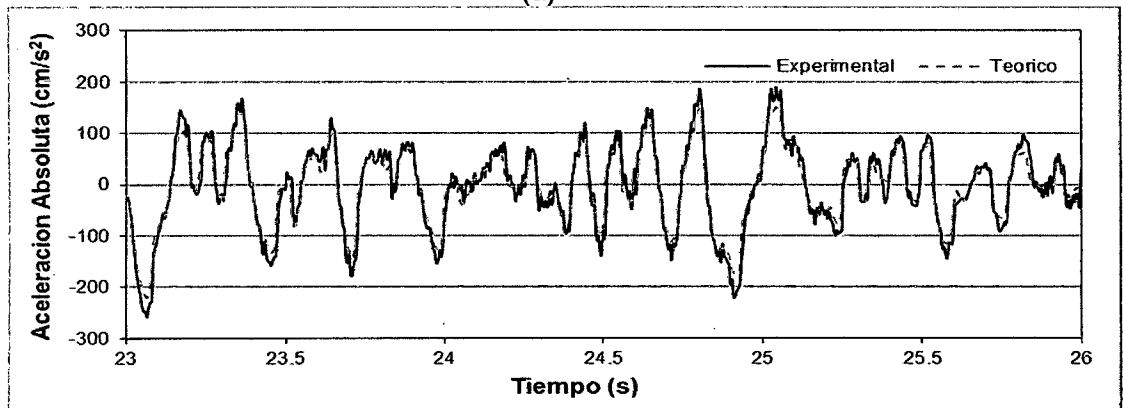


(b)

Figura N° 6.53 Aceleración Relativa (a) todo el registro (b) entre 23-26s.



(a)



(b)

Figura N° 6.54 Aceleración Absoluta (a) todo el registro (b) entre 23-26s.

Así mismo se grafica la curva de histéresis teórica (Ver Figura N° 6.55) junto a la experimental.

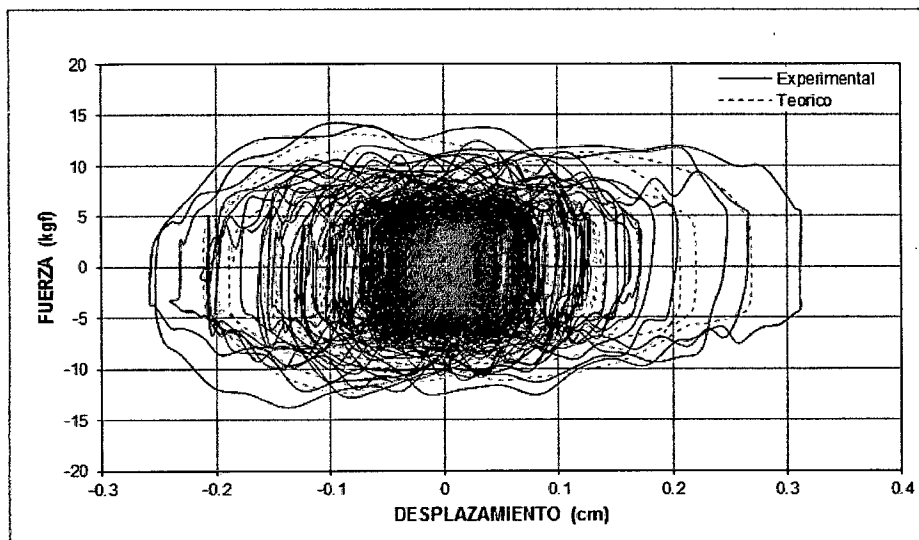


Figura N° 6.55 Curva de Histéresis – Mov. Sísmico con disipadores

Se observa que la respuesta teórica no se ajusta muy bien a la experimental en los picos, esto se hace evidente en la curva de histéresis. Este comportamiento

se explica cuando se compara las pendientes de la curva Fd vs velocidad para el sismo (Figura N° 6.50) con las pendientes de la curva asumido para el cálculo teórico y se observa que para el sismo se tienen menor pendiente. Esta variación indica que el amortiguamiento es menor en el movimiento sísmico.

El resumen de las máximas respuestas teóricas y el error respecto a las experimentales se presenta en la Tabla 6.28. En ella se observa que existe un aumento en los porcentajes de error con respecto a los porcentajes de error presentados en el movimiento sinusoidal.

Tabla 6.28: Error del cálculo teórico respecto del experimental-Modelo con disipadores

Valores	Respuesta					Error respecto del experimental (%)				
	Desp. Relat. (cm)	Vel. Relat. (cm/s)	Acel. Relat. (cm/s ²)	Acel. Abs. (cm/s ²)	Fd (kgf)	Desp. Relat.	Vel. Relat.	Acel. Relat.	Acel. Abs.	Fd
Max.	0.27	7.11	409.85	193.60	13.15	13.90	14.43	6.29	18.92	6.42
Min.	-0.21	-6.52	-402.42	-220.57	-12.33	18.14	12.27	0.21	14.94	10.45

6.3.4 Reducción en la respuesta – Modelo B

6.3.4.1 Movimiento sinusoidal

Antes de mostrar la variación en la respuesta se debe calcular la variación en la amplitud de entrada para todos los movimientos a comparar. La Figura N° 6.56 y la Tabla 6.29 muestran dichos resultados.

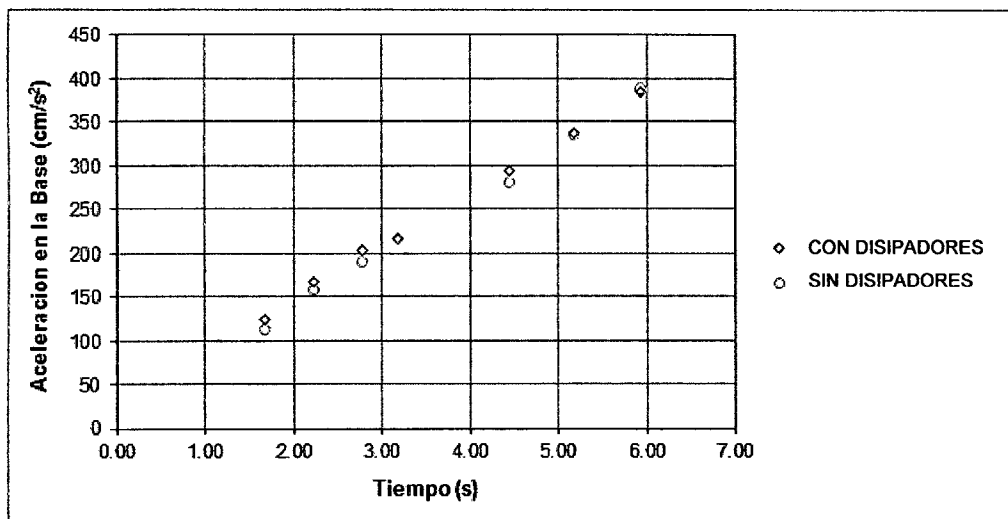


Figura N° 6.56 Aceleraciones en la Base experimentales con y sin disipadores – Movimiento sinusoidal

Tabla 6.29: Variación en la aceleración en la base con y sin disipadores – Movimiento sinusoidal

Frec. Mov. (Hz)	Con disipador	Sin disipador	%Variación
1.67	124.83	113.78	9.71
2.23	167.11	158.03	5.75
2.78	204.44	190.26	7.45
4.44	295.02	280.17	5.30
5.18	337.13	336.68	0.13
5.93	385.37	389.47	-1.05

Se observa que para el movimiento con frecuencia 1.67 Hz la variación es considerable, sin embargo para los demás movimientos podemos decir que el input es el mismo. Por tanto es posible hacer las comparaciones.

En la Figura N° 6.58 se muestra la gráfica comparativa de cómo ha variado el desplazamiento relativo en cada movimiento. Y en la Tabla 6.30 se calcula el porcentaje de reducción en el desplazamiento como consecuencia de colocar disipadores al modelo.

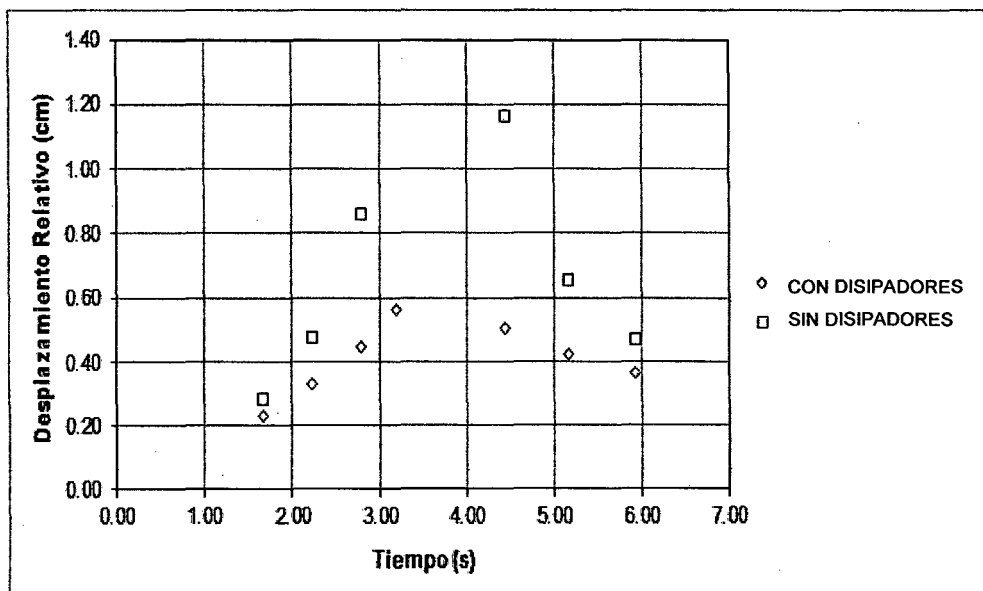


Figura N° 6.57 Desplazamientos relativos experimentales para diferentes frecuencias de movimiento con y sin disipadores

Adicionalmente se presenta de la Figura N° 6.58 a la Figura N° 6.63 la historia de desplazamientos relativos para los movimientos sinusoidales con y sin disipador

Tabla 6.30: Reducción de la respuesta – Movimiento Sinusoidal

Frec. Mov. (Hz)	Desplazamiento Relativo (cm)		Reducción (%)
	Con disipadores	Sin disipadores	
1.67	0.23	0.28	18
2.23	0.33	0.47	31
2.78	0.45	0.86	48
4.44	0.50	1.16	57
5.18	0.43	0.66	35
5.93	0.36	0.47	22

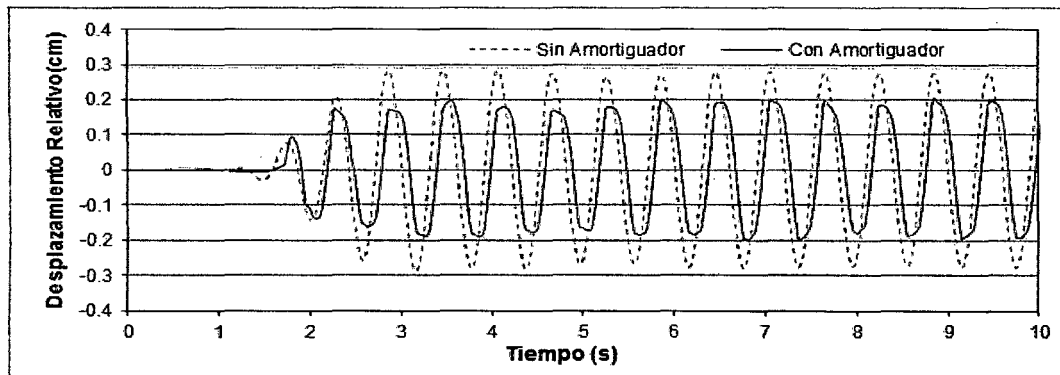


Figura N° 6.58 Desplazamiento relativo con y sin disipador - 1.67Hz

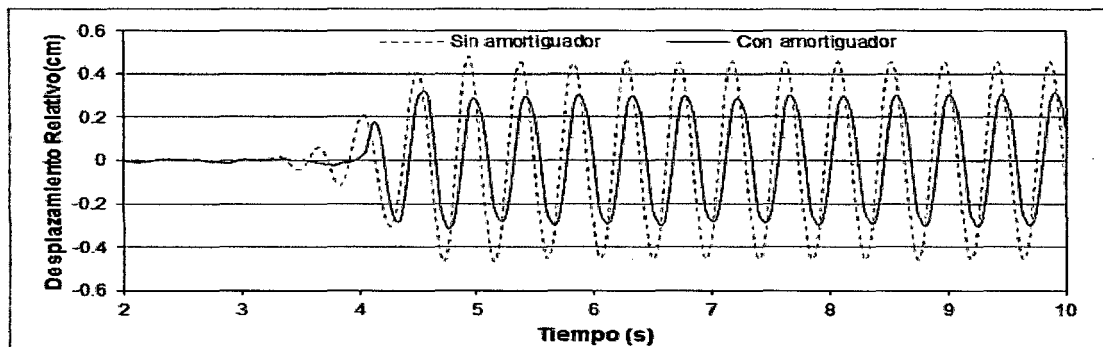


Figura N° 6.59 Desplazamiento relativo con y sin disipador – 2.23Hz

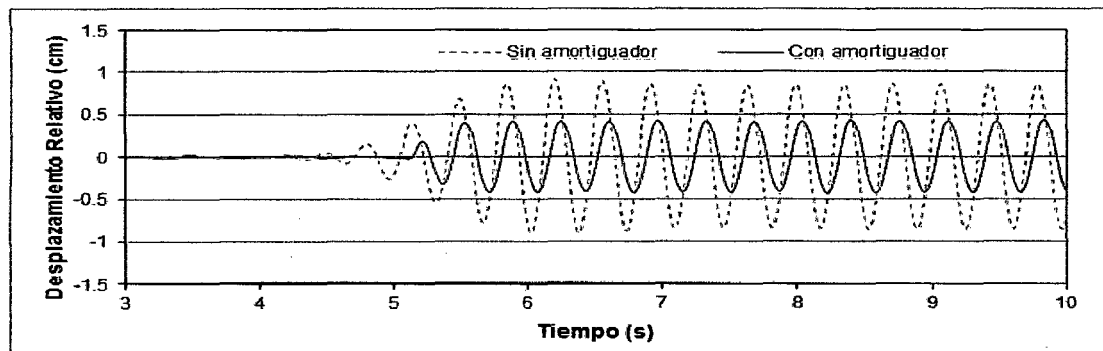


Figura N° 6.60 Desplazamiento relativo con y sin disipador – 2.78Hz

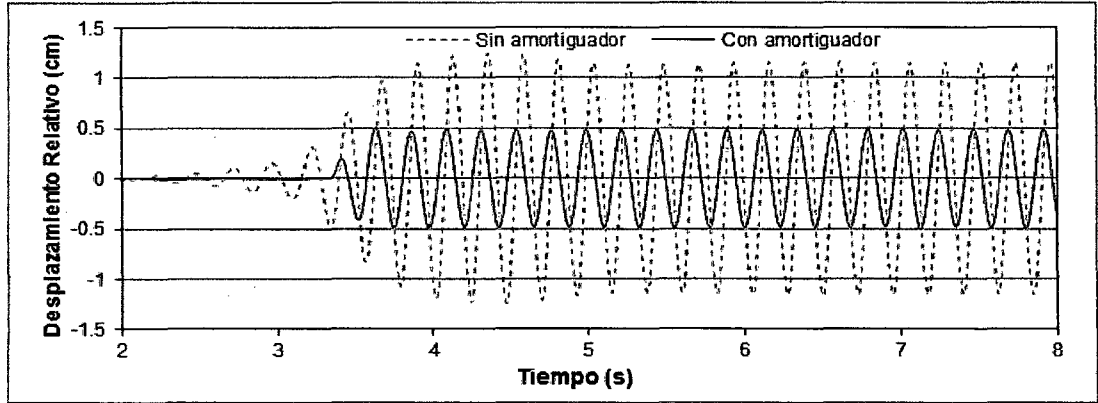


Figura N° 6.61 Desplazamiento relativo con y sin disipador – 4.44Hz

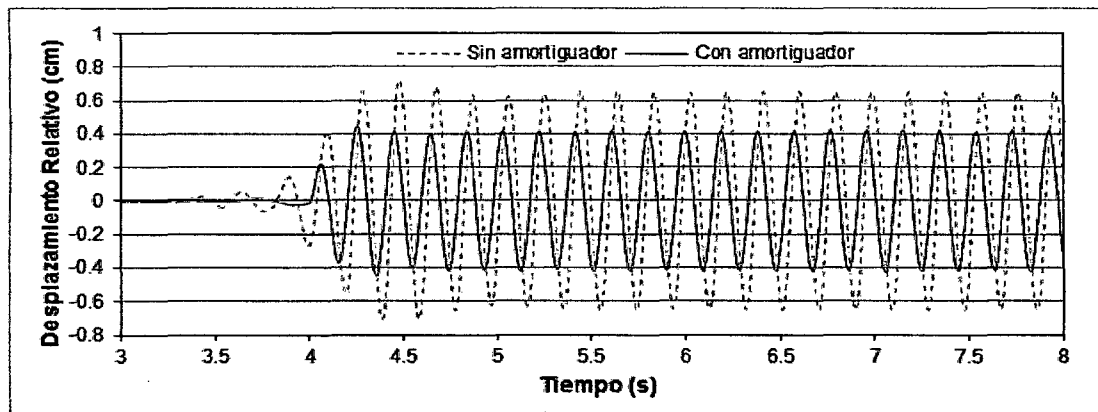


Figura N° 6.62 Desplazamiento relativo con y sin disipador – 5.18Hz

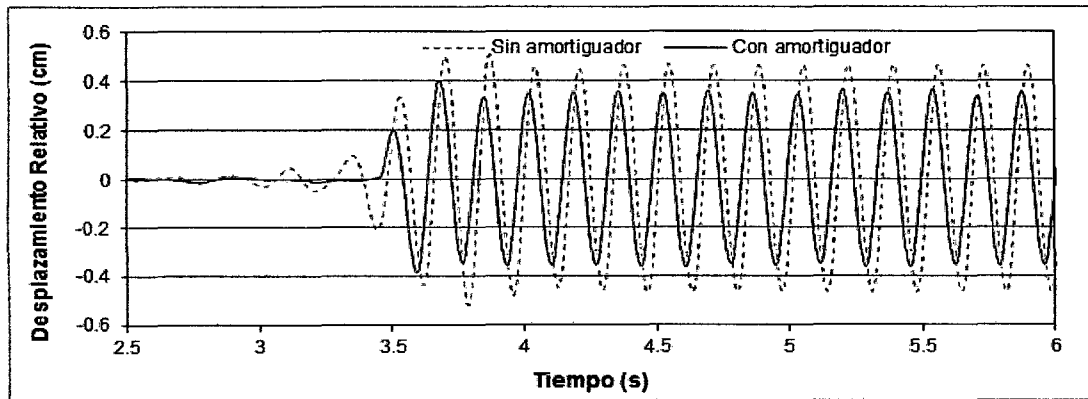


Figura N° 6.63 Desplazamiento relativo con y sin disipador – 5.93Hz

En la Figura N° 6.64 se muestra como ha variado el factor de amplificación dinámica (FAD) al incorporar los disipadores al modelo.

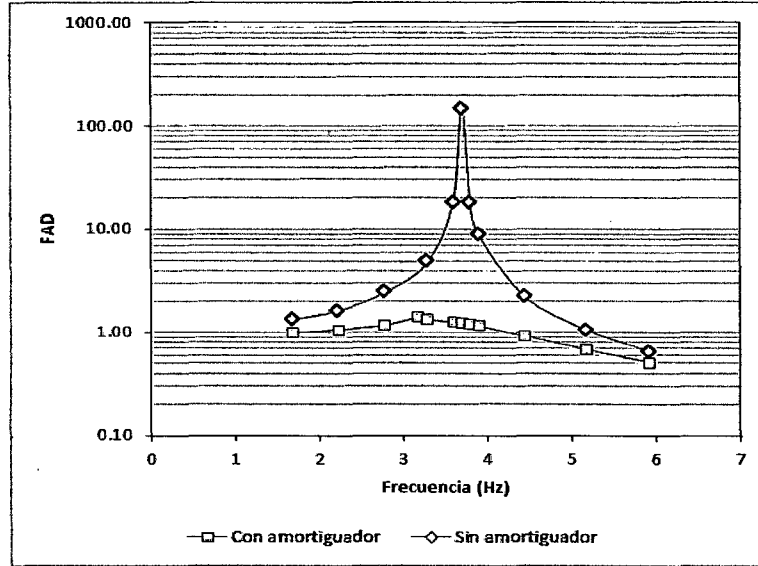
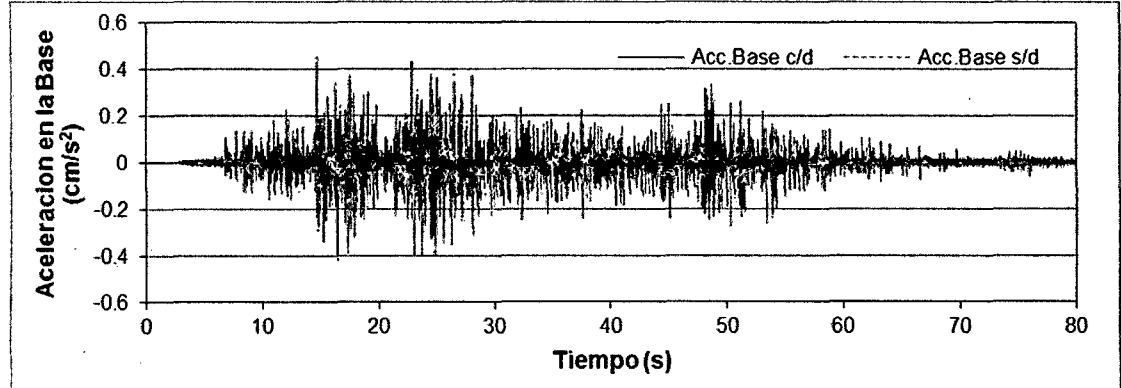


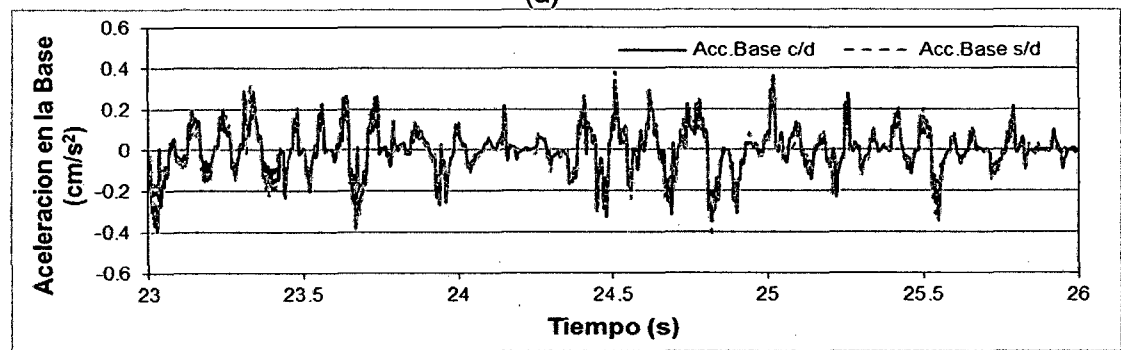
Figura N° 6.64 Variación del FAD

6.3.4.2 Movimiento sísmico

Antes de mostrar la variación en la respuesta se debe calcular la variación en la aceleración en la base para los movimientos sísmicos con y sin disipador. La Figura N° 6.65 y la Tabla 6.31 muestran dichos resultados.



(a)



(b)

Figura N° 6.65 Aceleración en la Base Movimiento con y sin disipador (a) todo el registro (b) 23-26s

Tabla 6.31: Variación en la aceleración en la base para movimientos sísmicos con y sin disipador

Aceleración en la base	Movimiento con disipador	Movimiento sin disipador	%error
Máximo	425.41 cm/s ²	450.35 cm/s ²	5.86
Mínimo	-384.51 cm/s ²	-419.25 cm/s ²	9.03

Se observa que la variación es mínima por tanto es posible comparar los resultados. De la Figura N° 6.66 a la Figura N° 6.69 se muestra las gráficas respuesta vs tiempo con y sin disipador. Y en la Tabla 6.32 se presenta el cálculo de la reducción en la respuesta.

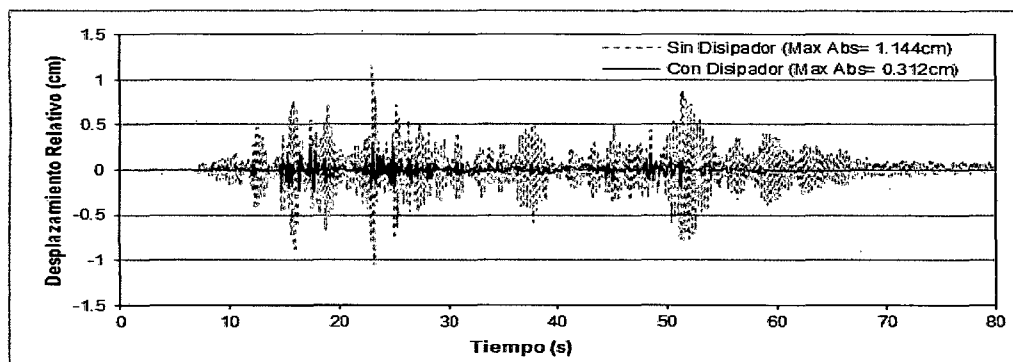


Figura N° 6.66 Desplazamiento Relativo con y sin disipadores – Mov. Sísmico

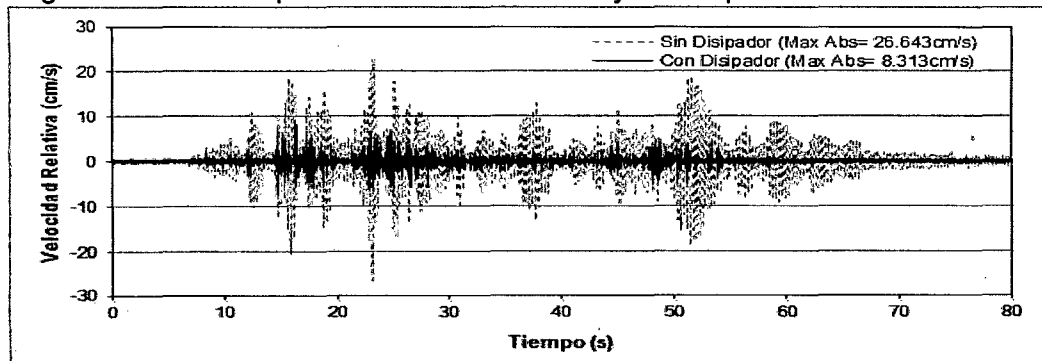


Figura N° 6.67 Velocidad Relativa con y sin disipadores – Mov. Sísmico

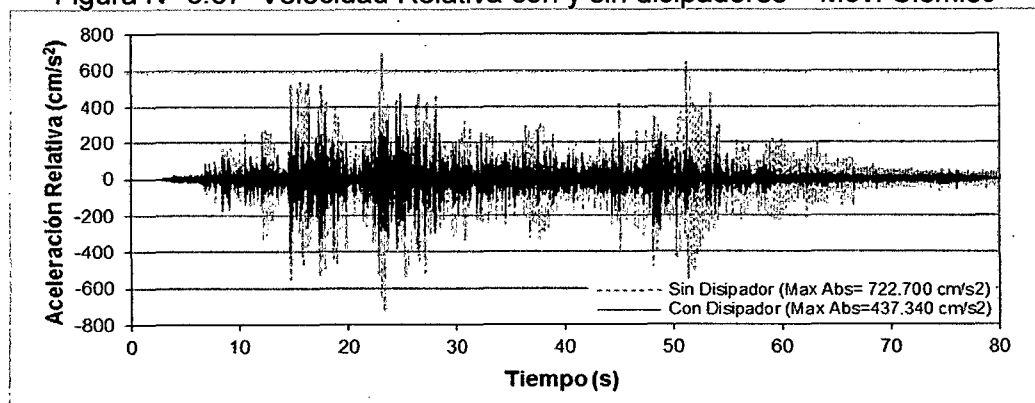


Figura N° 6.68 Aceleración Relativa con y sin disipadores – Mov. Sísmico

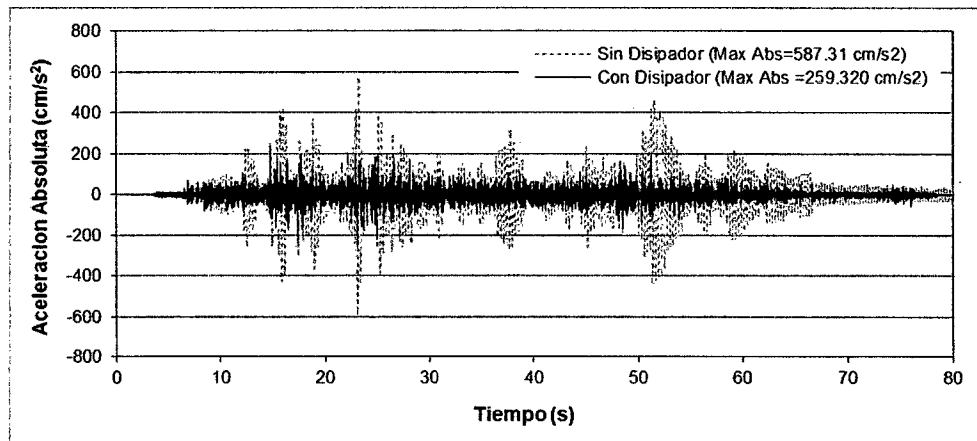


Figura N° 6.69 Aceleración Absoluta con y sin disipadores – Mov. Sísmico

Tabla 6.32: Reducción de la respuesta – Movimiento Sísmico

Respuesta	Sin disipadores		Con disipadores		Reducción (%)	
	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo
Desp. Relat.(cm)	1.14	-1.05	0.31	-0.26	73	76
Vel. Relat. (cm/s)	22.77	-26.64	8.31	-7.44	63	72
Acel. Relat. (cm/s ²)	693.07	-722.70	437.34	-401.59	37	44
Acel. Abs. (cm/s ²)	576.21	-587.31	238.79	-259.32	59	56

6.3.5 Condición de Falla del disipador

Como se describió en la sección 5.3.2.4(Ensayo en vibración forzada – Barrido de Frecuencia) el movimiento registrado está compuesto por varios intervalos en los cuales se tiene diferentes frecuencias y amplitudes de la aceleración de la base, y por tanto variación en las amplitudes del desplazamiento relativo (Ver Figura N° 6.70, Figura N° 6.71 y Figura N° 6.72)

El registro se ha dividido por intervalos (1 al 9) y por zonas (A, B, C y D). En cada tramo se tiene el mismo comportamiento para la fuerza de amortiguamiento, es decir la curva fuerza de amortiguamiento vs velocidad es la misma (Ver de Figura N° 6.75 a Figura N° 6.79). La Tabla 6.33 describe las frecuencias e intervalos de tiempo en cada tramo.

Tabla 6.33: Distribución de tramos - Ensayo barrido de frecuencias

Tramo	Tiempo Inicio (min)	Tiempo Fin (min)	Frec. Mov. (Hz)
1	0	2.2	1.31 y 1.89
2	2.2	3	2.91
3	3	3.8	5.36
4	3.8	4.4	8.4
5	4.4	5.2	4
6	5.2	6.41	3.55 y 3.7
7	6.41	7.7	Varia de 3.7 a 3.5
8	7.7	8.7	2.2
9	8.7	10	1.37

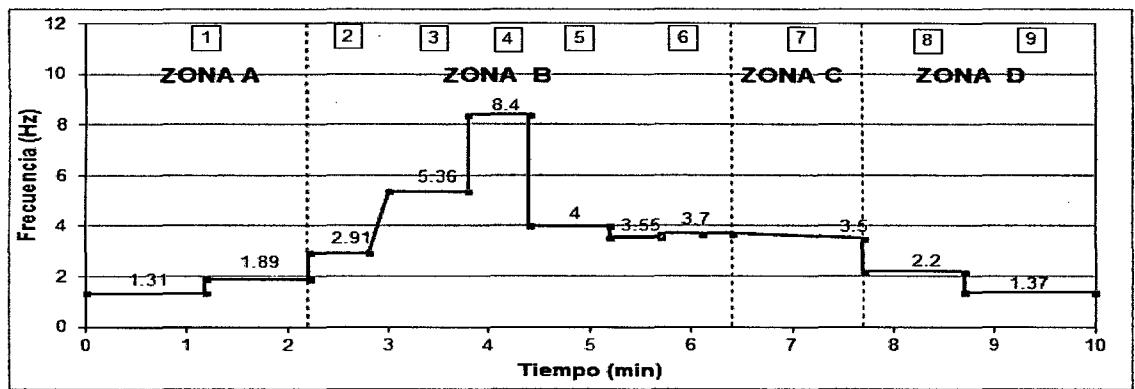


Figura N° 6.70 Frecuencias vs Tiempo – Ensayo barrido de frecuencias

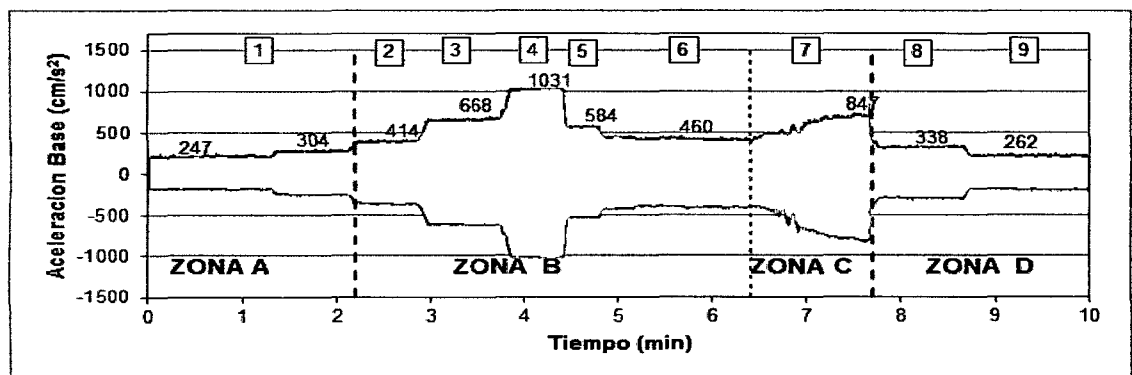


Figura N° 6.71 Aceleración en la base – Ensayo barrido de frecuencias

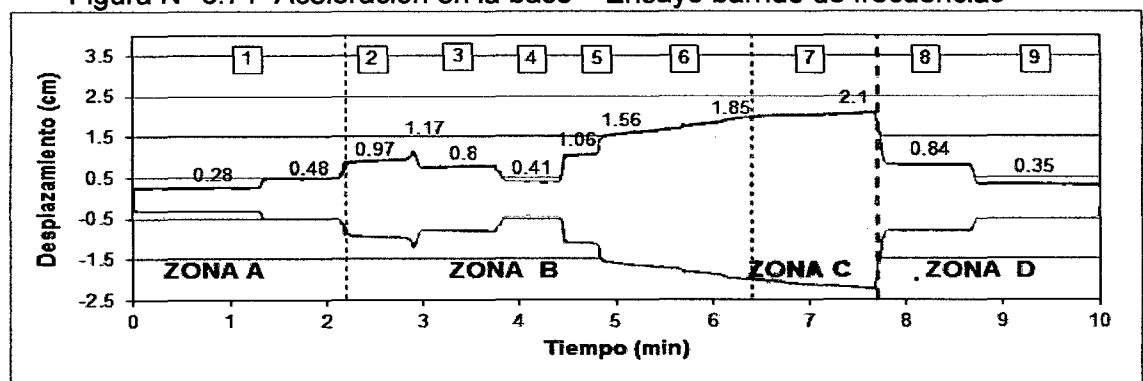


Figura N° 6.72 Desplazamiento Relativo – Ensayo barrido de frecuencias

A continuación se describe cada zona:

a) Zona A.- En esta zona se tiene dos niveles de frecuencia y por tanto dos de desplazamiento relativo. El máximo desplazamiento relativo en esta zona es 0.48cm. Tanto en el nivel de frecuencias como el nivel de desplazamientos están dentro del rango ya observado en el ensayo sinusoidal de la sección 6.3.3.2, por tanto era previsible que se tenga una curva de comportamiento para el disipador (Ver Figura N° 6.75) similar al ya calculado en los ensayos anteriores (Ver Figura N° 6.37).

b) Zona B.- En esta zona comprendida por los intervalos 2, 3, 4 5 y 6. En esta zona se ve un gradual disminución en el amortiguamiento suplementario.

En el tramo 2 y 3 se observa que los desplazamientos relativos aumentan gradualmente, aun considerando que en estos tramos la aceleración en la base y la frecuencia son los mismos. Considerando que la rigidez del sistema no se deteriora (se demostrara más adelante) se puede decir que el factor causante del aumento de desplazamiento relativo es la disminución en el amortiguamiento suplementario (Ver Figura N° 6.75 y Figura N° 6.76). En estos tramos se observó las primeras fugas de la glicerina (en pequeñas cantidades), por tanto ese puede ser un factor para la disminución del amortiguamiento.

En el tramo 4 no se observa una disminución gradual del desplazamiento (se mantiene constante). No se presentaron fugas, probablemente porque el desplazamiento es menor que el anterior. Sin embargo se puede observar que las fugas en el intervalo cuando se pasa del tramo 3 al 4 produjeron otra disminución del amortiguamiento (Ver Figura N° 6.76).

En el tramo 5 vuelven a presentarse fugas y por tanto el amortiguamiento disminuye (Ver Figura N° 6.77).

En el tramo 6 como consecuencia de que la frecuencia alcanzo la frecuencia natural la amplitud inicial del desplazamiento relativo llego a 1.5cm. Y como consecuencia de estos niveles de desplazamiento las fugas se hacen más descontroladas, el amortiguamiento disminuye (Ver Figura N° 6.77) lo cual conlleva a mayores desplazamientos, y esto en mayores fugas hasta alcanzar un nivel de desplazamiento relativo de 1.85 cm. Y todo esto ocurre bajo la misma amplitud en la aceleración.

Para poder afirmar que el aumento en el desplazamiento solo se debe a cambios en el amortiguamiento se debe demostrar que la rigidez de la

estructura no ha cambiado. Para ello se debe usar el siguiente método para obtener la rigidez del sistema. Se reescribe la ecuación de movimiento del sistema como sigue:

$$F_I = -M(\ddot{u}_g + \ddot{x}) = F_d(\dot{x}) + K_L x + C_n \dot{x} \quad (6.1)$$

La fuerza F_I sería la fuerza de inercia. Entonces observamos que la fuerza de inercia depende de la velocidad y desplazamiento relativo. Además como se observa en la curva de comportamiento de la fuerza de amortiguamiento (Ver Figura N° 6.77), esta tiende a ser lineal con la velocidad, eso quiere decir que la esta fuerza de inercia puede considerarse visco elástica. Entonces si graficamos la curva de histéresis (Fuerza –desplazamiento) se obtendrá una elipse inclinada. En la cual la de la inclinación es igual a la rigidez K_L . Entonces para el tramo 6 se grafica la fuerza F_I vs desplazamiento (Ver Figura N° 6.73) se obtiene que la rigidez es 49.504 kgf/cm, la cual es prácticamente la misma calculada en el movimiento en vibración libre del modelo sin disipador. Por tanto se puede decir que la rigidez no ha variado y el aumento del desplazamiento se debe solo a una disminución del amortiguamiento.

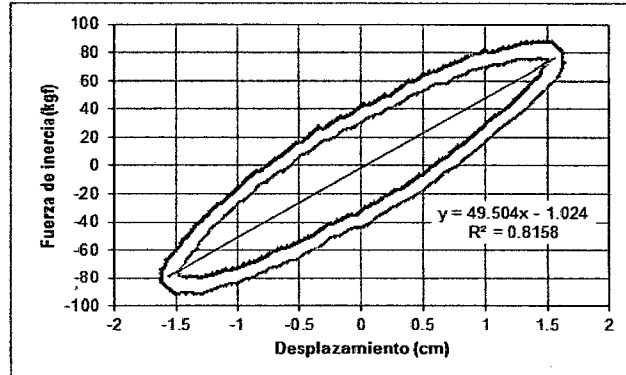


Figura N° 6.73 Fuerza de Inercia vs Desplazamiento – Tramo 6

- c) Zona C.- Esta zona solo comprende el intervalo 7. En esta zona como producto del aumento en el desplazamiento, el extremo del vástago empezó a chocar con las paredes de la capsula como se muestra en la Figura N° 6.74. El choque con la capsula conlleva a que salga más líquido y que el amortiguamiento siga perdiéndose.

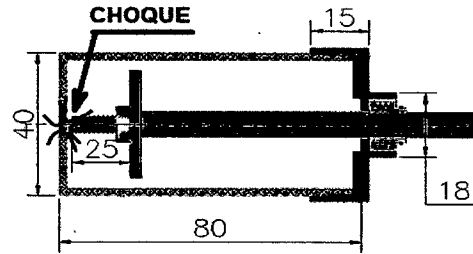


Figura N° 6.74 Choque entre el vástago y la capsula

La fuerza de choque origina que en la curva de fuerza de amortiguamiento vs desplazamiento (Ver Figura N° 6.78) se observen saltos muy altos, que solo se da en una dirección lo que explica que el choque solo se produce en un lado de la capsula.

En la Figura N° 6.78 se puede observar que la fuerza de amortiguamiento tiende a tener una forma cuadrática. Adicionalmente se observa que posiblemente producto de esta fuerza de choque, que se transmite de la capsula al brazo y luego a la mesa, la aceleración en la base varié como se observa en la Figura N° 6.71.

- d) Zona D.- Esta zona comprende el tramo 8 y 9 donde debido a la amplitud y frecuencia de la aceleración en la base se tienen desplazamientos menores a la anterior zona. En esta zona se observa una variación muy radical en la curva de comportamiento de la fuerza de amortiguamiento (Ver Figura N° 6.78 y Figura N° 6.79), sobre todo en el tramo 9 en el cual se observa un amortiguamiento muy reducido. Adicionalmente se graficó la curva de histéresis de la fuerza de amortiguamiento para el tramo 8 (Ver Figura N° 6.78), donde se puede ver que el comportamiento ha cambiado radicalmente. En esta etapa se puede decir que el dissipador ha llegado a fallar.

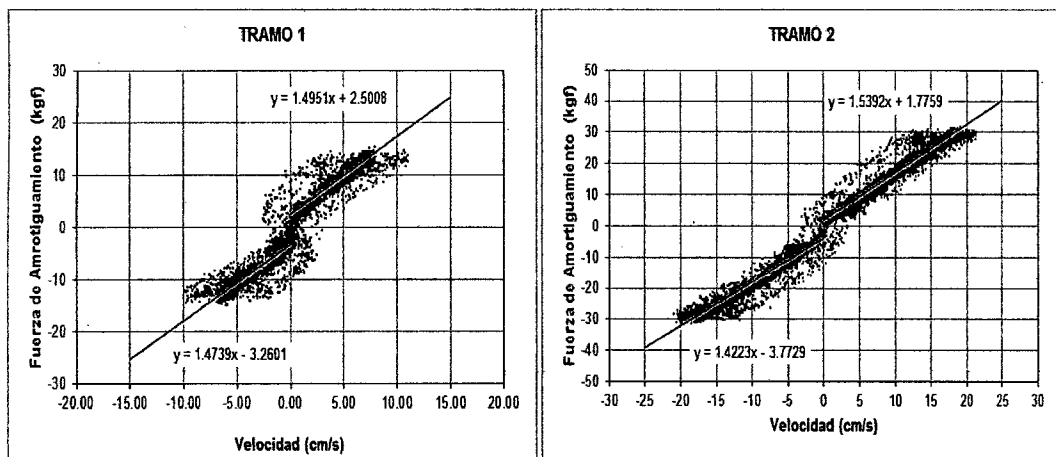


Figura N° 6.75 Comportamiento fuerza de amortiguamiento en Tramo 1 y 2

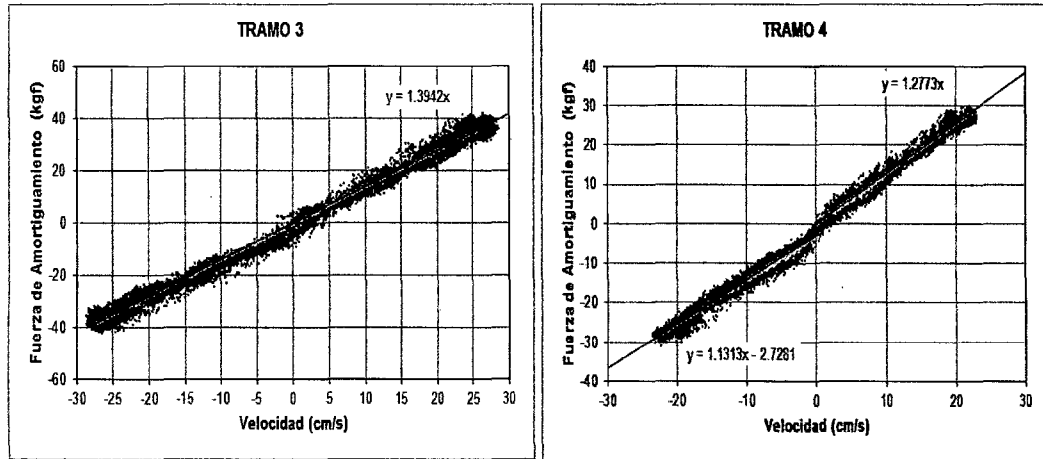


Figura N° 6.76 Comportamiento fuerza de amortiguamiento en Tramo 3 y 4

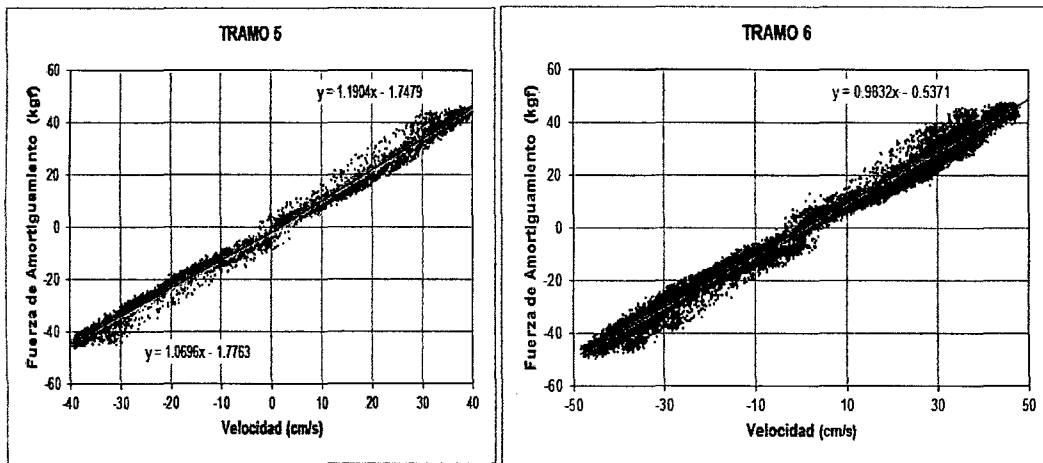


Figura N° 6.77 Comportamiento fuerza de amortiguamiento en Tramo 5 y 6

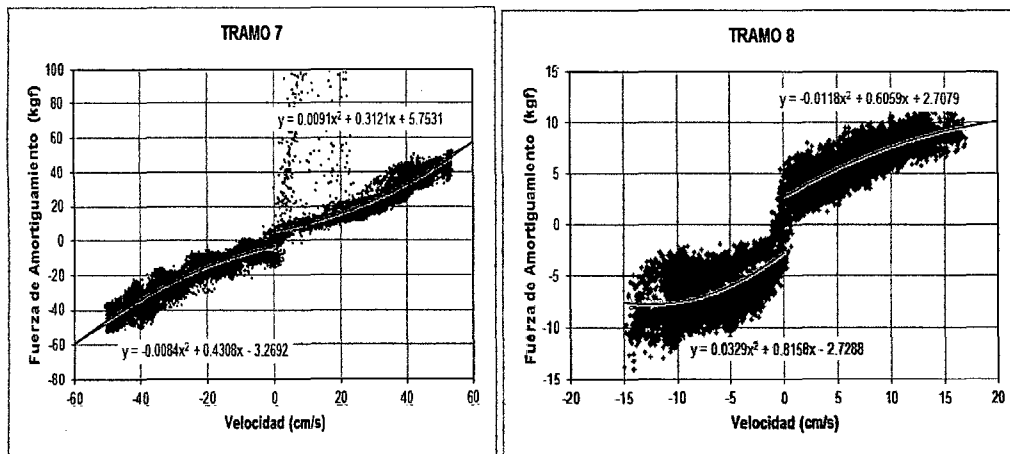


Figura N° 6.78 Comportamiento fuerza de amortiguamiento en Tramo 7 y 8

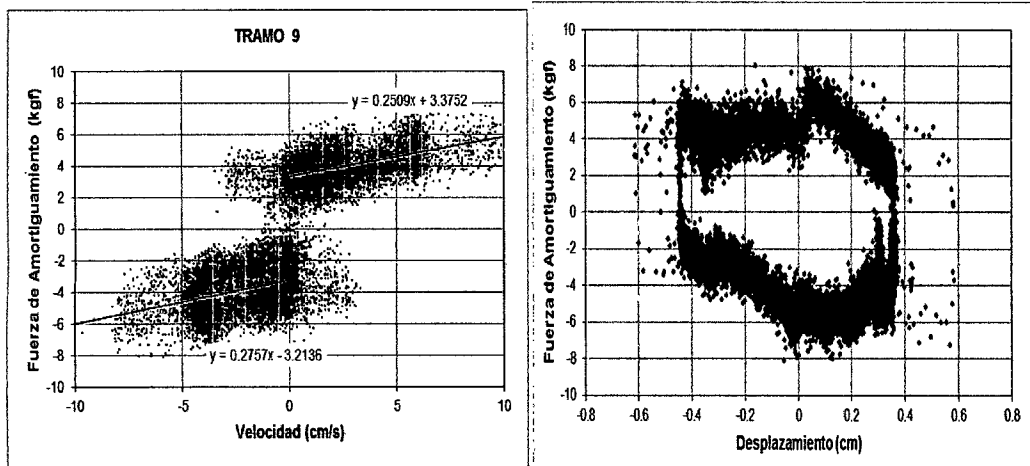


Figura N° 6.79 Comportamiento fuerza de amortiguamiento e histéresis en Tramo 9

Con el objeto de apreciar mejor la variación en la fuerza de amortiguamiento se coloca en una misma gráfica (Ver Figura N° 6.80) todas las regresiones lineales o cuadráticas, según corresponda, para todos los intervalos.

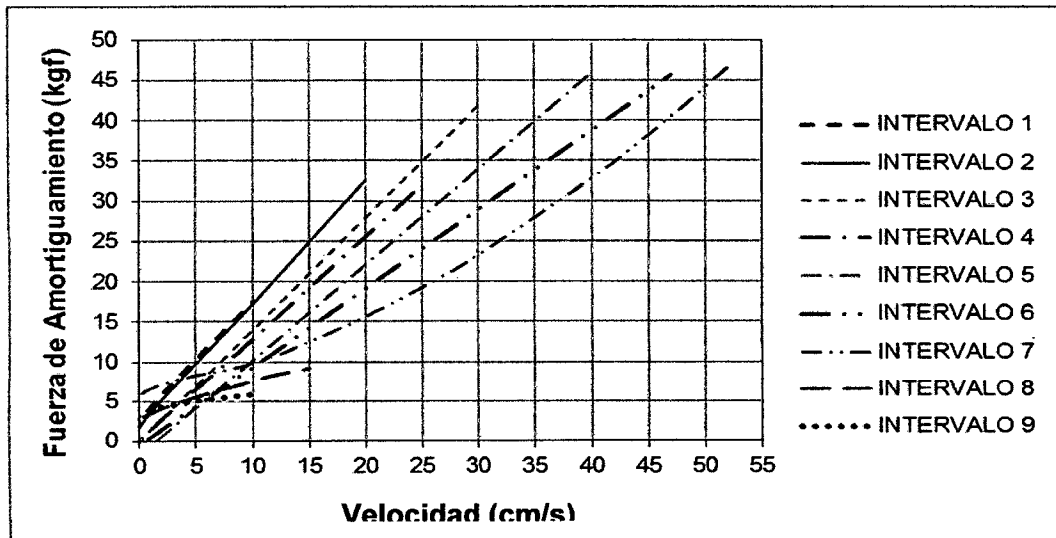


Figura N° 6.80 Variación del amortiguamiento– Ensayo barrido de frecuencias

Se observa la variación drástica del amortiguamiento hasta llegar a los niveles del intervalo 9.

Finalizado el ensayo se midió la temperatura del líquido, obteniendo un valor de 36°C. Era de esperar que la temperatura aumentara considerablemente ya que el ensayo duro cerca 10 minutos. En los párrafos anteriores se atribuyó la disminución de amortiguamiento a la pérdida de líquido, sin embargo también se

atribuye al aumento de temperatura y consecuente reducción de la viscosidad del líquido, la pérdida del amortiguamiento en el disipador.

Respecto a la pérdida de líquido se mencionó que se debió al aumento en los desplazamientos, esto hace que el recorrido del pistón aumente y se acerca más a los bordes de la capsula y libere el líquido; sin embargo se puede decir también que ocurre un desgaste del retén debido a la duración y las frecuencias más altas a las que estuvo sometido en comparación con el ensayo sinusoidal controlado por la P_c .

6.3.6 Estimación de la respuesta para el prototipo del modelo B

Para estimar la respuesta en el prototipo se usan los factores de escala. Esto también implica escalar el input, es decir los valores encontrados serán las respuestas a entradas (sinusoidales o sísmicas) escaladas. A continuación se presenta las principales características del prototipo escaladas:

- Peso: 11250 kgf
- Rigidez Lateral: 251.7 kgf/cm
- Periodo: 1.34 s
- Amortiguamiento inherente: 0.3396%

También se escala el comportamiento de la fuerza de amortiguamiento para cada disipador y para los dos disipadores (Ver Figura N° 6.81 y Figura N° 6.82). Se debe recalcar que el líquido en el prototipo debe tener 5 veces la viscosidad del líquido del prototipo.

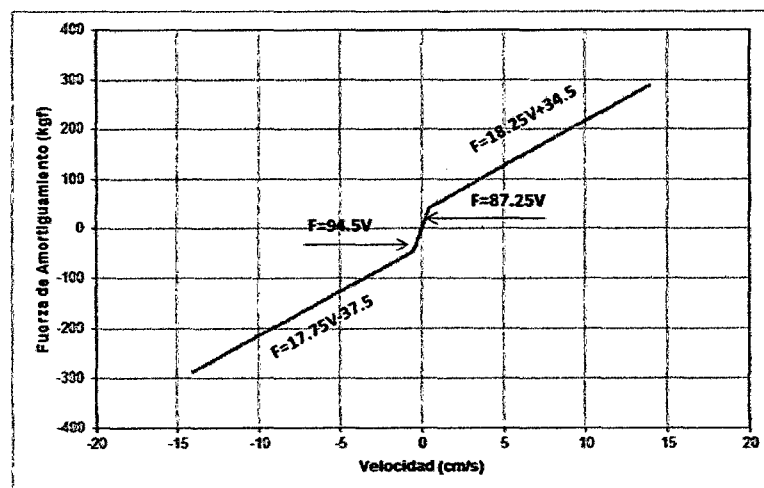


Figura N° 6.81 Comportamiento de la fuerza de amortiguamiento para cada prototipo de disipador

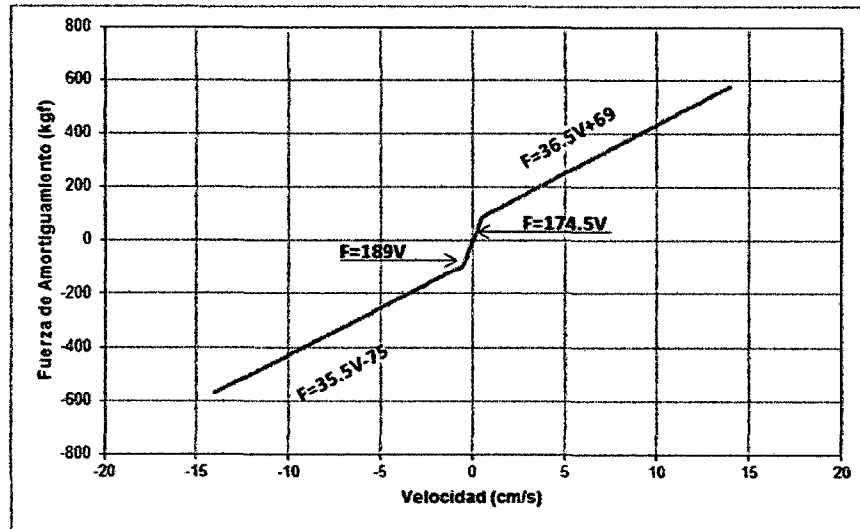


Figura N° 6.82 Comportamiento de la fuerza de amortiguamiento para los dos prototipos de disipador

En base a los factores de escala y la Tabla 6.19 calculamos cuales serían las respuestas en el prototipo para los movimientos sinusoidales escalados (Ver Tabla 6.34)

Tabla 6.34: Respuesta del prototipo para cargas sinusoidales

Frec. Mov. (Hz)	Respuesta Máxima				
	Acel. Base (cm/s ²)	Desp. Relat. (cm)	Vel. Relat. (cm/s)	Acel. Relat. (cm/s ²)	Acel. Abs. (cm/s ²)
0.3344	24.966	1.15	2.41	5.324	28.7
0.4468	33.422	1.65	4.58	13.402	42.764
0.5566	40.888	2.25	7.80	27.95	59.254
0.6372	43.432	2.8	11.22	45.266	72.978
0.8886	59.004	2.5	14.01	79.006	77.338
1.0352	67.426	2.15	13.84	90.586	69.654
1.1866	77.074	1.8	13.55	101.516	64.072

También se presenta en la Figura N° 6.83 los valores escalados para el porcentaje de amortiguamiento y el coeficiente de amortiguamiento del prototipo de disipador (se usará los valores del método de energía). Los valores mostrados son por disipador y no para los dos como se presentó en la sección 6.3.2.3(Respuesta - movimiento sinusoidal).

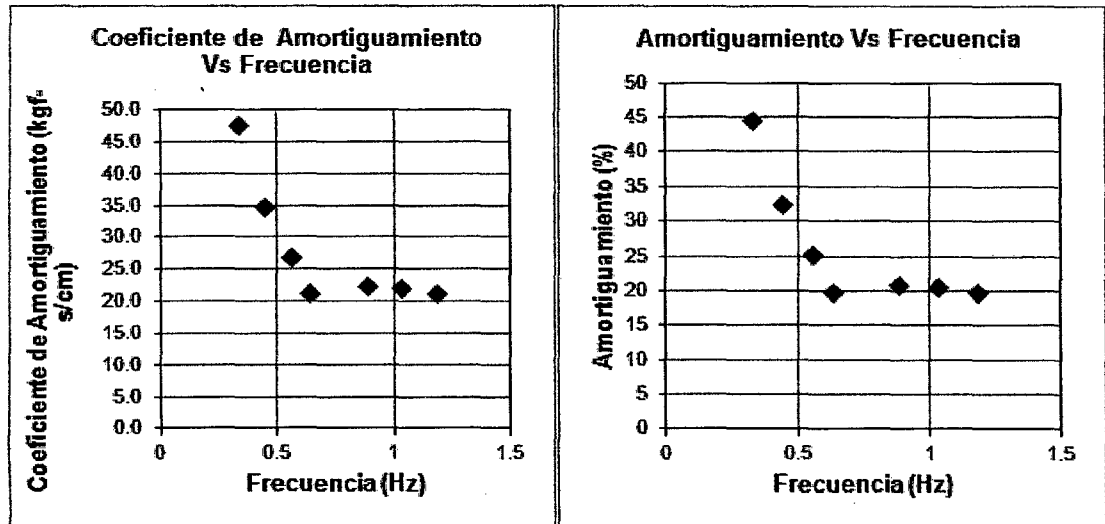


Figura N° 6.83 Amortiguamiento y coeficiente de amortiguamiento para movimiento sinusoidal para cada prototipo de disipador.

Del mismo modo se calcula la respuesta para la carga sísmica. Antes de eso se debe escalar el registro. Esto implica que la aceleración máxima positiva será 85.082cm/s^2 , la aceleración máxima negativa será -76.902cm/s^2 y el delta de tiempo será 0.025s . Con ese input la respuesta del prototipo se muestra en la Tabla 6.35.

Tabla 6.35: Respuesta prototipo para movimiento sísmico escalado

Respuesta	Desp. Relat. (cm)	Vel. Relat. (cm/s)	Acel. Relat. (cm/s ²)	Acel. Abs. (cm/s ²)	Fd (kgf)
Máximo	1.56	8.313	87.468	47.758	351.5
Mínimo	-1.29	-7.438	-80.317	-51.864	-344.25

Ahora con el objetivo de validar esos resultados realizamos un análisis teórico en usando las propiedades escaladas y el input escalado. Para el movimiento sinusoidal las respuesta y el error respecto al calculado usando los factores de escala se muestra en la Tabla 6.36.

En general el error es pequeño en cuanto a desplazamiento, sin embargo existen errores más grandes en velocidad relativa y aceleración relativa. Ahora se debe recordar que ya en la sección 6.3.2.3 (Respuesta - movimiento sinusoidal) también se hizo una comparación entre el análisis teórico y el experimental y se llegaron porcentajes de error similares a los de esta tabla. Por tanto se puede decir que se validan los valores calculados con los factores de escala

Tabla 6.36: Respuesta teórica para movimientos sinusoidales en el Prototipo

Frec. Mov. (Hz)	Acel. Base (cm/s ²)	Máxima Respuesta				Error respecto al calculado con los factores de escala (%)			
		Desp. Relat. (cm)	Vel. Relat. (cm/s)	Acel. Relat. (cm/s ²)	Acel. Abs. (cm/s ²)	Desp. Relat.	Vel. Relat.	Acel. Relat.	Acel. Abs.
0.3344	24.966	1.0976	2.8482	7.1672	31.8166	-4.56	18.18	34.62	10.86
0.4468	33.422	1.7129	5.1643	17.0539	47.5949	3.81	12.76	27.25	11.30
0.5566	40.888	2.3409	8.3682	32.8569	64.6386	4.04	7.28	17.56	9.09
0.6372	43.432	2.5694	10.4053	46.1055	72.2057	-8.24	-7.26	1.85	-1.06
0.8886	59.004	2.6060	14.7572	86.0538	80.4841	4.24	5.33	8.92	4.07
1.0352	67.426	2.1286	14.7459	95.0758	70.9952	-1.00	6.55	4.96	1.93
1.1866	77.074	1.7627	15.0127	104.1086	63.9120	-2.07	10.79	2.55	-0.25

Para el movimiento sísmico las respuesta y el error respecto al calculado usando los factores de escala se muestra en la Tabla 6.37. Al igual que en el caso de movimiento sinusoidal, los porcentajes de errores son similares a los calculados en la sección 6.3.3.3(Respuesta - movimiento sísmico) cuando se hizo la comparación entre análisis teórico y experimental.

Tabla 6.37: Respuesta teórica para movimientos sísmicos en el Prototipo

Valores	Máxima Respuesta					Error respecto del experimental (%)				
	Desp. Relat. (cm)	Vel. Relat. (cm/s)	Acel. Relat. (cm/s ²)	Acel. Abs. (cm/s ²)	Fd (kgf)	Desp. Relat.	Vel. Relat.	Acel. Relat.	Acel. Abs.	Fd
Max.	1.34	7.14	82.35	39.37	329.93	-14.01	-14.00	-5.85	-	-6.13
Min.	-1.05	-6.54	-81.14	-44.44	-310.29	-18.17	-12.02	1.027	-	-9.86

CAPÍTULO VII

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 CONCLUSIONES

- El disipador se comportó de manera adecuada (sin fugas de líquido) en el ensayo dinámico con movimiento sinusoidal y sísmico, en los cuales se el desplazamiento máximo fue de 0.56cm. También se obtuvo un adecuado comportamiento en el ensayo adicional con barrido de frecuencias para desplazamientos menores a 1cm.
- La configuración propuesta tiene la ventaja de que permite el cambio o recarga del líquido viscoso, el cambio del retén si se presentase alguna tipo de desgaste e incluso poder cambiar el tipo de cabeza de pistón. Sin embargo esta configuración tiene la desventaja de que el líquido viscoso no puede ocupar la totalidad del espacio en la capsula, ya que se debe reservar el volumen a ser ocupado por el vástago en el proceso de movimiento.
- El retén usado funciona correctamente para valores de desplazamiento del pistón menor o igual a 1cm, para desplazamientos mayores el retén permite la fuga del líquido viscoso. Al ser este un elemento crítico, el material del retén debe ser cambiado.
- La glicerina tiene la ventaja de tener mayor viscosidad en relación a los otros líquidos usados (aceite de silicón y aceite de motor); sin embargo la desventaja está en que no es estable a la variación de temperatura. Su viscosidad se reduce de 1360cP a 18°C hasta 287cP a 40°C.
- Los resultados en el ensayo de carga monotónica y el ensayo dinámico sobre mesa vibradora indican que la curva fuerza de amortiguamiento vs velocidad se puede idealizar a un modelo bilineal.
- En el ensayo de carga monotónica se desarrollan mayores fuerzas de amortiguamiento que en el ensayo dinámico debido a que las condiciones de flujo son más favorables.
- En el primer tramo de la curva bilineal, que corresponde a velocidades menores a 0.5cm/s, la fuerza de amortiguamiento es originada por la resistencia del retén; mientras que en el segundo tramo se debe a la presión y esfuerzos de corte en la cabeza del pistón.

- Las condiciones de flujo que se usaron en el estudio simplificado del disipador se acercan más a la condiciones de flujo en el ensayo de carga monotónica que en el ensayo dinámico.
- Dentro del rango de frecuencias y amplitudes del ensayo dinámico con movimiento sinusoidal, el comportamiento de la fuerza de amortiguamiento del disipador se mantiene prácticamente constante.
- Se presenta un ligero aumento en el amortiguamiento cuando el pistón se mueve en sentido opuesto a la posición del vástago que cuando se mueve hacia la posición del vástago debido a la variación en el área de presión.
- Se obtiene una notable reducción en la respuesta al incorporar los disipadores viscosos tanto en el ensayo dinámico con movimiento sinusoidal como con movimiento sísmico. En el ensayo con movimiento sinusoidal esa reducción está en el orden de 18% a 57%. Para movimiento sísmico se obtiene una reducción promedio de 74% en el desplazamiento relativo, 68% en la velocidad relativa, 41% en aceleración relativa y 57% en aceleración absoluta.
- Por último se concluye que la presente investigación no solo ha servido para estudiar el comportamiento del disipador propuesto y mostrar solo sus virtudes, sino también para develar sus deficiencias, contribuyendo de este modo a incentivar investigaciones que mejoren el disipador propuesto.

7.2 RECOMENDACIONES

Para mejorar el comportamiento del disipador propuesto se recomienda:

- Aumentar la longitud del pistón, con el fin de obtener condiciones de flujo más uniformes dentro de la región anular, lo cual implica un aumento en el coeficiente de amortiguamiento.
- Extender el vástago de tal modo que atraviese el otro lado de la capsula. Con esta configuración el movimiento del vástago no implicaría ninguna reducción en el volumen de la capsula que deba ser ocupado por el líquido viscoso, por tanto se podría llenar completamente la capsula con el líquido y como consecuencia obtener mayor amortiguamiento.
- Realizar ensayos de viscosidad al aceite de silicón a diferentes temperaturas con el fin comprobar si son estables a los cambios de

temperatura y pueda reemplazar a la glicerina, la cual no presenta esa característica.

En relación a los ensayos de laboratorio se sugiere:

- Diseñar un ensayo en el cual se someta únicamente al disipador a cargas cíclicas, para reproducir las mismas condiciones de movimiento del ensayo dinámico sobre mesa vibradora.
- Someter al disipador a ensayos con movimiento sinusoidal variando no solo la frecuencia, sino también la amplitud para obtener un modelo completo de como varia el comportamiento de la fuerza de amortiguamiento.

Para finalizar se recomienda elaborar trabajos que sigan esta misma línea de investigación, orientados al objetivo final de desarrollar un prototipo de disipador viscoso de bajo costo, que reúna todos los requisitos para su aplicación en estructuras reales y que impulse el nacimiento de un nuevo tipo de industria en el país.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] **ASCE**, "Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures ASCE/SEI 7-10", Virginia, EEUU, 2010.
- [2] **Chhabra, R.P. & Richardson, J.F.**, "Non-Newtonian Flow in the Process Industries", Butterworth-Heinemann, Gran Bretaña, 1999
- [3] **Christopoulos, C. & Filiatrault, A.**, "Principles of Passive Supplemental Damping and Seismic Isolation", IUSS Press, Pavia, Italia, 2006.
- [4] **Clough, R.W. & Penzien, J.**, "Dynamics of Structures", 3ra Ed., Computers & Structures, Inc., Berkeley-USA, 2003.
- [5] **Constantinou, M.C. & Symans, M.D.**, "Experimental and analytical investigation of seismic response of structures with supplemental fluid viscous dampers", State University of New York at buffalo - Department of Civil Engineering, New York-USA, 1992.
- [6] **Corporación Aceros Arequipa**, "*Catálogo de productos*", Lima – Perú, Abril 2013
- [7] **Craig Jr., R.R.**, "Structural Dynamics An Introduction to computer Methods.", 1era Edition, Ed. John Wiley & sons, 1981
- [8] **Department of Architecture and Building Science – Tohoku University**, "Adaptive Design Engineering Laboratory" [Página web], consultado: 02 de marzo 2013, http://www.archi.tohoku.ac.jp/labs-pages/kozo/addgn/E_index.html
- [9] **Glyn, J.**, "Matemáticas avanzadas para ingeniería", 2da Edición, Pearson Education, México, 2002.
- [10] **Guevara, D.N. & Torres P.O.**, "Diseño de un edificio aporticado con disipadores de fluido-viscoso en disposición diagonal.", Tesis PUCP-Faculta de Ciencia e Ingeniería, Lima-Perú, 2012.
- [11] **Higashino, M. & Okamoto, S.**, "Response Control and Seismic Isolation of Buildings", 1ra Edition, Abingdon - Inglaterra, 2006.
- [12] **Kelly, T.**, "In structure damping and Energy dissipation", 2001
- [13] **Makris, N. & Constantinou M.C.**, "Fractional-Derivative Maxwell Model for Viscous Dampers", Paper, ASCE, 1991
- [14] **Oviedo, R.**, "Disipadores Viscosos vs Disipadores Viscoelásticos", II Congreso de Ingeniería Estructural, Sísmica y Puentes ICG, Lima – Perú, 2006.

- [15] **Pardo, J.P.**, "Control de la respuesta dinámica de estructuras mediante el uso de disipadores de energía de fluido viscoso del tipo lineal.", Tesis Universidad Austral de Chile-Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Valdivia - Chile, 2007
- [16] **Paz, M.**, "Dinámica Estructural", Editorial Reverté, 3ra Edición, España, 1992.
- [17] **Piersol, A. & Paez, T.**, "Harris' Shock and Vibration Handbook", 6ta Edition, McGraw-Hill, EEUU, 2010.
- [18] **Pique, J. & Scaletti, H.**, "Análisis sísmico de edificios", 1era Edición, CIP, Lima - Perú, 1991.
- [19] **Potter M. C. & Wiggert, D. C.**, " Mecánica de Fluidos", 3ra edición- Cengage Learning Editores, México, D.F. - México, 2002
- [20] **Rivera, M.P.**, "Verificación Experimental del Estado Limite de una Estructura Aperticada Típica sometida a un Sismo", 1ra Edición, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima-Perú, 2001
- [21] **Shames, I.H.**, "Mecánica de fluidos", 3era Edición, McGRAW-HILL, Bogotá, Colombia, 1995.
- [22] **Shell Lubricantes del Perú**, "Hoja de seguridad Hélix HX3", Marzo 2002
- [23] **Silok Chemical**, "Product Information Personal Care Silok 2430" [Página web], consultado: 14 de enero 2013, <http://silok.com/p.asp?classID=3>
- [24] **Soong, T.T. & Dargush, G.F.**, "Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering", Jhon Wiley & Sons, UK, 1997.
- [25] **Villarreal, G. & Oviedo, R.**, "Edificaciones con Disipadores de Energía", Asamblea Nacional de Rectores, Lima – Perú, 2009

ANEXOS

ANEXO I: CERTIFICADOS DE ENSAYOS DE VISCOSIDAD	168
ANEXO II: INSTRUMENTACION MESA VIBRADORA.....	171
2.1 INSTRUMENTACIÓN	171
2.2 UBICACIÓN DE SENSORES	174
2.3 VERIFICACIÓN DE SENSORES	176
2.4 MANEJO DEL PROGRAMA PROYECTO01	177
ANEXO III: MÉTODO ANALÍTICO APROXIMADO PARA UN MOVIMIENTO SINUSOIDAL EN UN SISTEMA CON AMORTIGUAMIENTO SUPLEMENTARIO DEL TIPO EXPONENCIAL.....	180
ANEXO IV: FOTOS	183

ANEXO I: CERTIFICADOS DE ENSAYOS DE VISCOSIDAD



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE CIENCIAS
LABORATORIO N° 12
ANÁLISIS QUÍMICO, CONSULTORÍA E INVESTIGACIÓN

INFORME TÉCNICO N° 0234 - 13 - LAB. 12

1. **DATOS DEL SOLICITANTE**
 - 1.1 NOMBRE DEL SOLICITANTE : WORK YSRRAEL PINAUD RICCI
2. **FECHA DE EMISIÓN** : 27 / 03 / 2013
3. **ANÁLISIS SOLICITADO** : DETERMINACIÓN DE VISCOSIDAD DINÁMICA
4. **DATOS REFERENCIALES DE LA MUESTRA**
 - 4.1 IDENTIFICACIÓN DE LAS MUESTRAS : 02 FRASCOS CON MUESTRAS LÍQUIDAS

MUESTRA	NOMBRE
M1	ACEITE SILICON
M2	GLICERINA LIQUIDA

5. **LUGAR DE RECEPCIÓN** : LABORATORIO N°12 - FACULTAD DE CIENCIAS
6. **CONDICIONES AMBIENTALES** : Temperatura: 26 °C; Humedad relativa: 54%
7. **EQUIPO UTILIZADO** : VISCOSIMETRO BROOKFIELD
LVDV-II + PRO
8. **RESULTADO**

MUESTRA	Número de Spindle	Temperatura, °C	Número de revoluciones por minuto, RPM	Viscosidad (cP)
M1	2	40	100	283.2
M2	2	40	100	287.2

9. **VALIDEZ DEL INFORME TÉCNICO***
El Informe técnico es válido solo para la muestra y las condiciones indicadas en los ítems del uno (1) al cuatro (4) del presente informe técnico.



Mónica Acha de la Cruz
Jefa de Laboratorio
LABICER - FC - UNI
QP N° 202

El Laboratorio no se responsabiliza del muestreo ni de la procedencia de la muestra.

Página 1 de 1

Av. Túpac Amaru 210 - Lima 25. Teléfono (51-1) 382 0500. Contáctenos: <http://labicer.uni.pe>



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE CIENCIAS
LABICER (Laboratorio N° 12)
ANÁLISIS QUÍMICO, CONSULTORÍA E INVESTIGACIÓN




INFORME TÉCNICO N° 1041 – 13 – LAB. 12

1. DATOS DEL SOLICITANTE
- 1.1 NOMBRE DEL SOLICITANTE : WORK PINAUD RICCI
2. FECHA DE EMISIÓN : 07 / 10 / 2013
3. ANÁLISIS SOLICITADO : ANÁLISIS DE VISCOSIDAD
4. DATOS REFERENCIALES DE LA MUESTRA
- 4.1 IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA : 01 MUESTRA DE GLICERINA
5. LUGAR DE RECEPCIÓN : LABORATORIO N°12 - FACULTAD DE CIENCIAS
6. CONDICIONES AMBIENTALES : Temperatura: 20 °C; Humedad relativa: 70%
7. EQUIPO UTILIZADO : VISCOSÍMETRO BROOKFIELD LVDV-II + PRO
8. RESULTADOS

Número de spindle	Temperatura ambiente, °C	Número de revoluciones por minuto, RPM	Viscosidad (cP)
2	18	0.3	1200
2	18	0.6	1267
2	18	1	1360
2	18	1.5	1360
2	18	2	1360
2	18	2.5	1360
2	18	3	1360
2	18	4	1360
2	18	5	1360
2	18	6	1353
2	18	10	1360
2	18	12	1350
2	18	20	1354

9. VALIDEZ DEL INFORME TÉCNICO

El Informe técnico es válido solo para la muestra y las condiciones indicadas en los ítems del uno (1) al cuatro (4) del presente informe técnico.


M.Sc. Otilia Peña de la Cruz
Jefa de Laboratorio
Responsable del análisis
CQP N° 202

El Laboratorio no se responsabiliza del muestreo ni de la procedencia de la muestra.

Página 1 de 1

Av. Túpac Amaru 210 Lima 31, Perú. Central: 481 1070 anexo 316. Telefax: 382 0500. E-mail: otilia@uni.edu.pe



Servicio al Cliente
0-800-12542 (sin costo) ó 5950444
atencionclientes@licorp.com.pe

Alicorp S.A.A
Planta Copasa

Av. Argentina 4793
Carmen de la Legua Reynoso
Lima 100 - Perú
T (511) 3150800
http://www.alicorp.com.pe

N° Correlativo: 3213

CERTIFICADO DE CALIDAD N° 3213 ✓

PRODUCTO : COPSARINE USP

DESCRIPCIÓN	
DESCRIPCIÓN / PRESENTACIÓN	GLICERINA USP / CILINDRO 250 Kg.
LOTE	3213
FECHA DE PRODUCCIÓN	05.08.13 al 12.08.13
FECHA DE VENCIMIENTO	Aprox. 2 Años

RESULTADOS OBTENIDOS				
CARACTERISTICA	UNIDADES	ESPECIFICACIONES	RESULTADOS	METODO ANALITICO (*)
VALORACIÓN : % GLICEROL	%	Mín. 99.5	99.52	USP 34
COLOR USP ***	-	No más oscuro que estándar	Pasa	USP 34
COLOR APHA	Unidades HAZEN	Máx. 20	10.4	PCO-A-CA-00-020
GRAVEDAD ESPECIFICA 25/25 °C ***	-	Mín. 1.249	> 1.249	USP 34
RESIDUO DE INCINERACIÓN ***	%	Máx. 0.01	< 0.01	USP 34
AGUA	%	Máx. 5	0.20	USP 34
CLORUROS	%	Máx. 0.001	< 0.001	USP 34
SULFATOS	%	Máx. 0.002	< 0.002	USP 34
METALES PESADOS ***	ppm	Máx. 5	< 5	USP 34
LÍMITE DE COMPUESTOS CLORADOS ***.	% de Cl	Máx. 0.003	< 0.003	USP 34
IDENTIFICACION A: ABSORCIÓN AL IR ***	-	Pasa la prueba	Pasa	USP 34
IDENTIFICACION B: LIMITE DE DIETILENGLICOL Y ETILENGLICOL ***	%	Máx. 0.1	< 0.1	USP 34
IDENTIFICACION C: CROMATOGRAMA **	-	Pasa la prueba	Pasa	USP 34
ACIDOS GRASOS Y ESTERES **	ml de NaOH 0.5N	Máx. 1	0.30	USP 34
COMPUESTOS RELACIONADOS ***	%	Máx. 1% Impurezas Totales Máx. 0.1% Impurezas Individuales	< 1 < 0.1	USP 34

(*) Métodos Analíticos basados en la Norma USP 34

(**) Expresado en % de Na2O: 0.009 (ESP. <= a 0.032)

(***) Según Frecuencia de Análisis Especiales

Nuestro producto Copsarine USP no contiene trazas de ninguno de los disolvente residuales indicados en el capítulo general <467> de la USP34

Ing. Reynaldo Díaz M.
Gerente de Calidad Oleos Lima

drocersa
Droguería Ricardo Céspedes Román S.A.

Q.F. Celinda Tipiani Muñoz
COORDINADORA TÉCNICA

ANEXO II: INSTRUMENTACION MESA VIBRADORA

2.1 INSTRUMENTACIÓN

Para la realización del ensayo en la mesa vibradora requerimos ciertos instrumentos y sensores que nos van a permitir hacer todas las mediciones necesarias. A continuación se detallan las principales características de estos equipos:

2.1.1 Mesa Vibradora

La mesa vibradora es un equipo capaz de reproducir movimientos en un tablero de 1.20m x 1.00m. El movimiento de este tablero requiere un generador de vibración ubicado detrás del tablero, a su vez este generador de vibración está controlado por una consola que se ubica a un lado de este. El peso máximo que se puede colocar sobre el tablero es de 500 kg. Los límites de desplazamiento, velocidad y aceleración son: 80mmp-p, 60cm/ y 5G respectivamente [20]. La frecuencia de movimiento que se puede enviar esta entre 0.5-200Hz.

El envío de la señal se puede realizar directamente por la consola (para el caso de señales sinusoidale) o conectándola a la PC y enviar a través de un controlador (software). El envío de la señal por la consola se puede hacer para señales tipo aceleración, velocidad o desplazamiento. Para envío de señales más sofisticadas como un sismo se utiliza la conexión a la PC y se utiliza un software elaborado en el CISMID denominado "PROYECTO01", el cual fue desarrollado en Visual Basic 6.0.

2.1.2 Grabadora Universal EDX-100A

Este es un equipo capaz de recibir las señales enviadas por los diferentes tipos de sensores (láser, acelerómetros, transductores de deformación y desplazamiento) y hacer la conexión a la PC. Puede recibir hasta un máximo de 10 sensores (tiene 10 canales). Para la recepción de estas señales se hace necesaria la ejecución del software DCS-100A en la PC. Con este programa se puede convertir las señales que originalmente se reciben en voltaje a valores de aceleración, velocidad o desplazamiento según el sensor conectado. Además es posible guardar el registro de todos los sensores al mismo tiempo y configurar la frecuencia de tiempo con la que se guarda la información.

2.1.3 Bornera

Este pequeño instrumento hace el medio de conexión entre la PC y la consola cuando se utiliza el programa Proyecto 01 para enviar señales desde la computadora.

2.1.4 Transductor de Aceleración KYOWA AS-5GA

Permite la medición de la aceleración en la mesa vibradora y del espécimen. Tiene una orientación definida para su medición, si se coloca en sentido vertical puede medir la aceleración de la gravedad (esta característica permite la calibración de este instrumento). Su capacidad máxima de medición es 5g.

2.1.5 Láser

Se utiliza para registrar el desplazamiento tanto de la mesa como del espécimen. Su operación requiere que esté conectado a una fuente de energía para ello tiene un pequeño transformador de 24V al que se conecta al transformador de 200 V. Adicionalmente tiene un controlador que permite la salida de la señal a través de un cable que se conecta hacia la grabadora universal EDX-100A. Este equipo puede registrar un máximo de 5cm y requiere que el punto de medición este a 35cm del láser.

2.1.6 Computadora

Es indispensable tanto para el envío como para la recepción de las señales. La Figura N° A-01, Figura N° A-02 y Figura N° A-03 muestran esquemas de las conexiones que se hacen para enviar señales a la mesa vibradora y recibir las señales de los sensores.

2.1.7 Otros

Adicionalmente se usa un transformador de 200V para regular el ingreso de corriente eléctrica tanto para la computadora como para el transformador de los láseres.

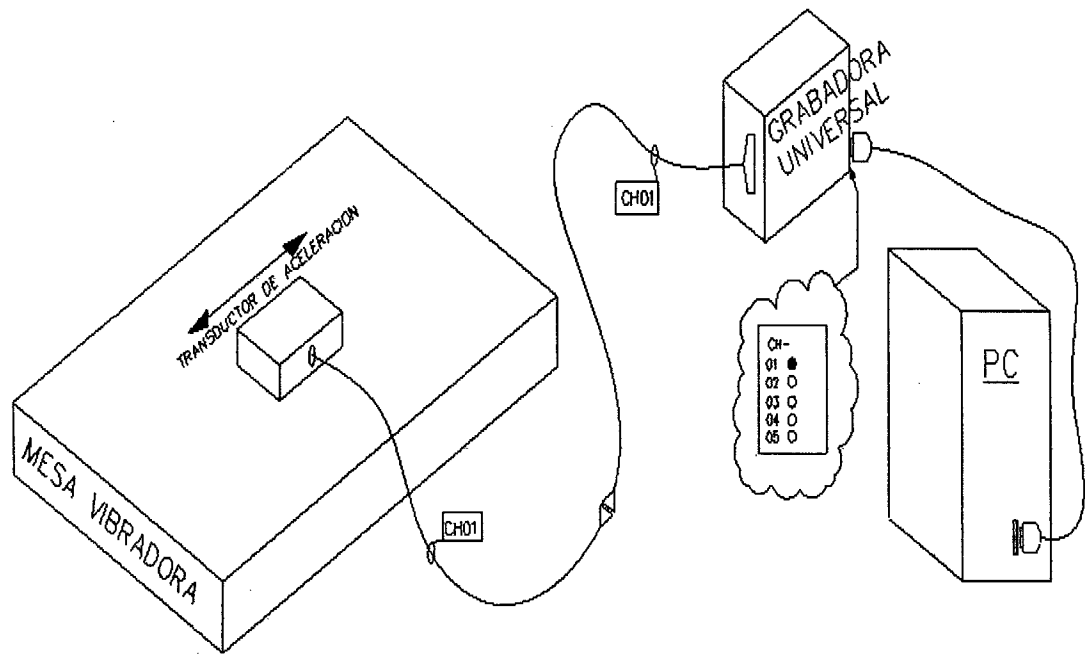


Figura N° A-01: Conexión de acelerómetro a computadora

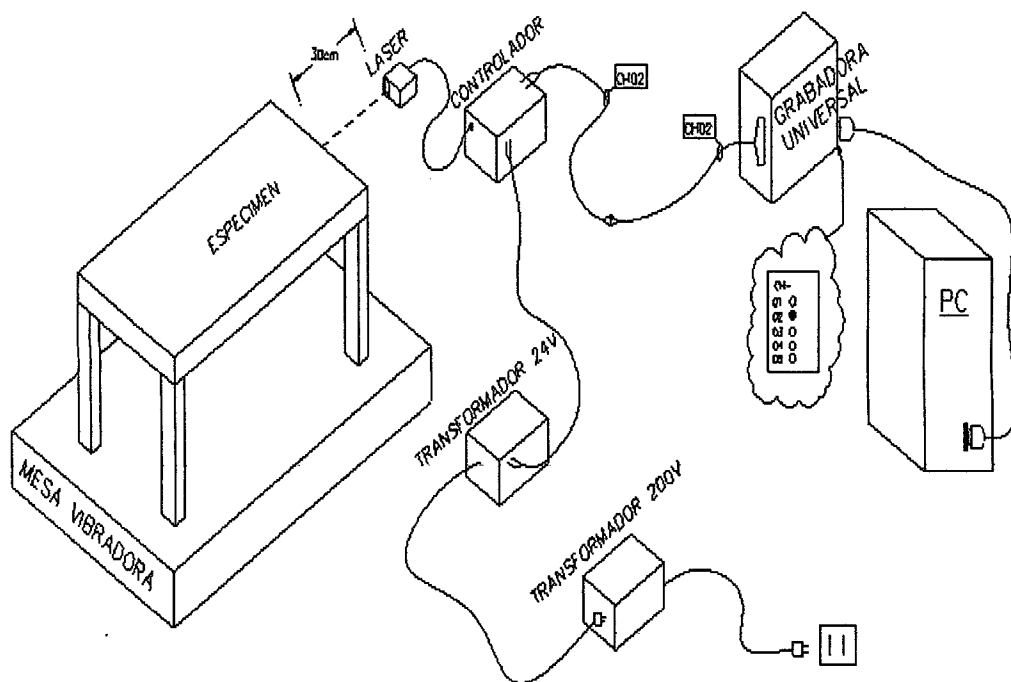


Figura N° A-02: Conexión del láser a computadora

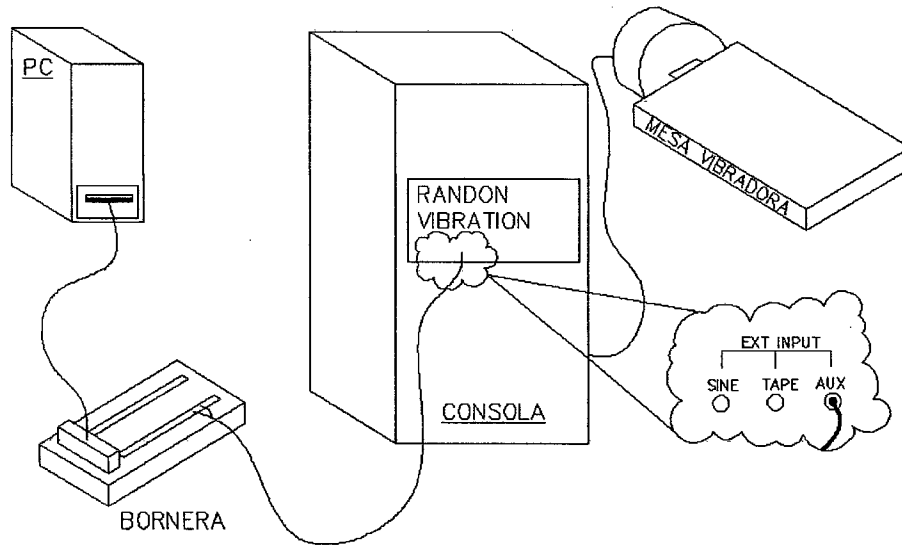


Figura N° A-03: Conexión de PC a mesa vibradora

2.2 UBICACIÓN DE SENSORES

De la Figura N° A-04 a la Figura N° A-07 muestra la zona en las que se ubica tanto los acelerómetros como los láseres.

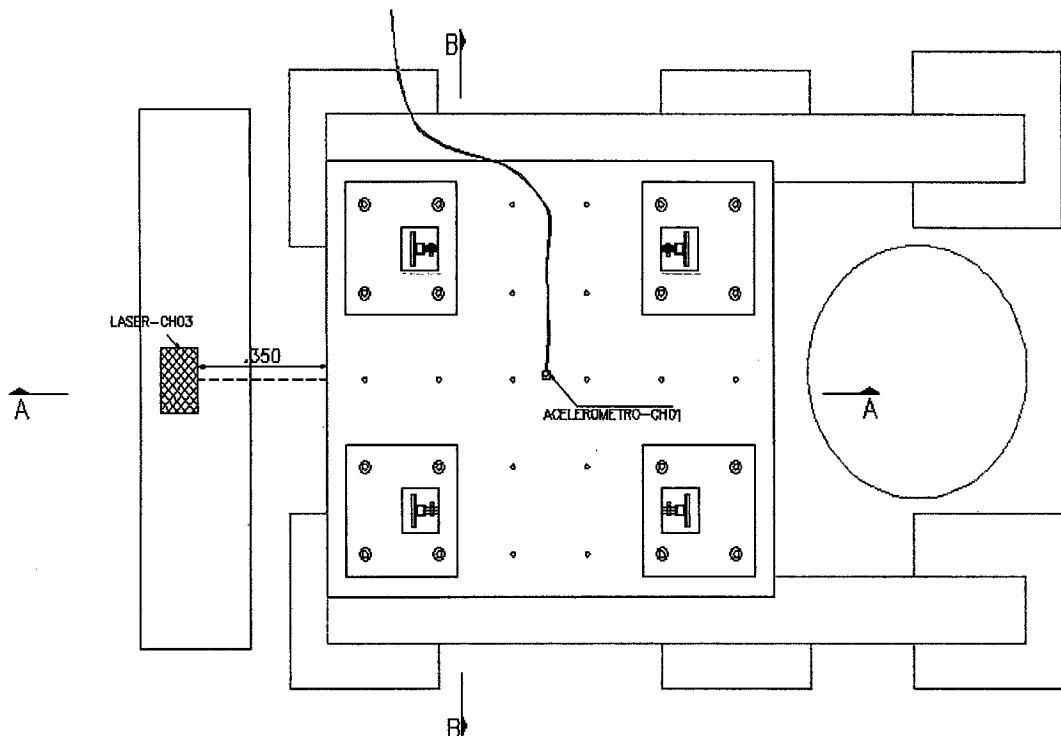


Figura N° A-04: Ubicación de sensores a nivel de base (dimensiones en metros)

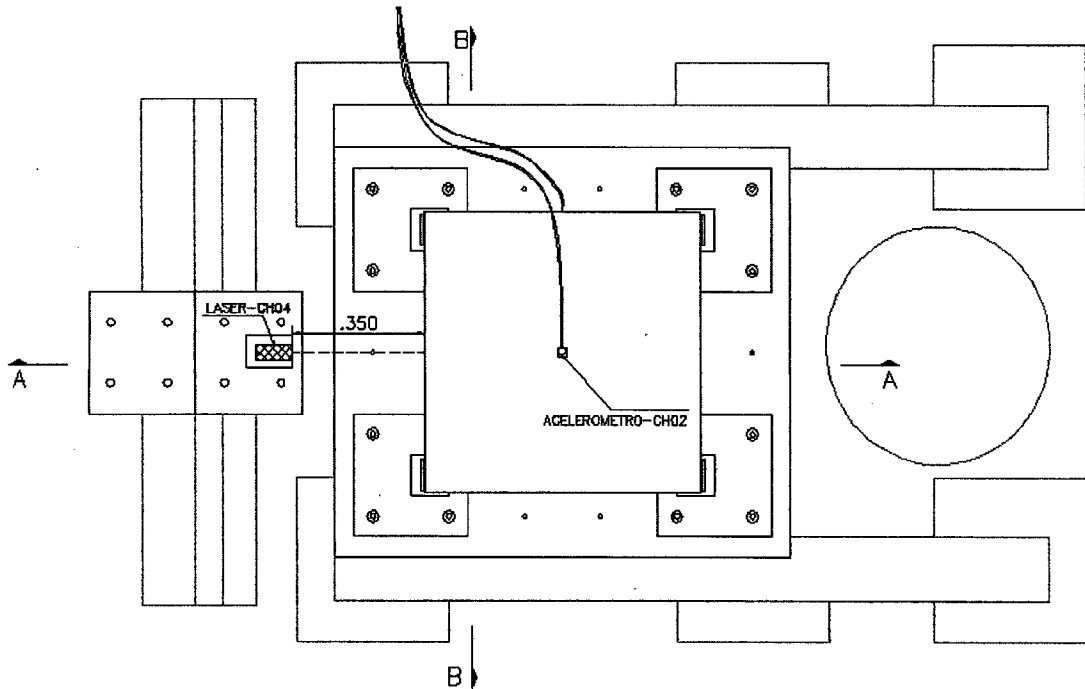


Figura N° A-05: Ubicación de sensores a nivel de Losa (dimensiones en metros)

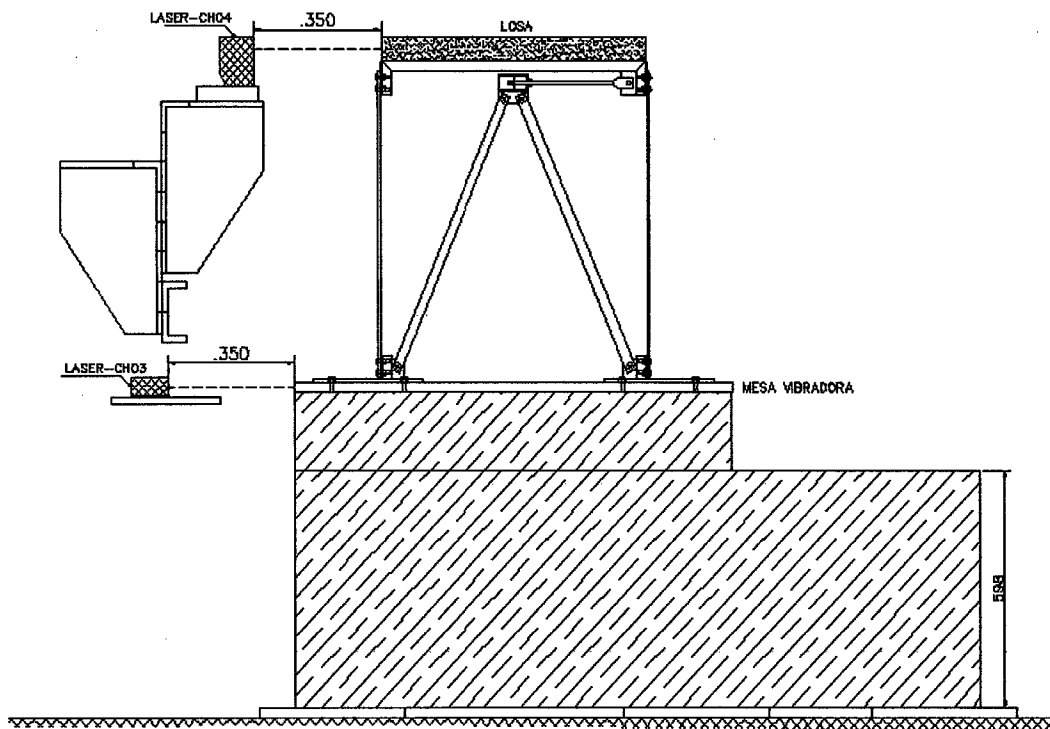


Figura N° A-06: Sección A-A ubicación de sensores (dimensiones en metros)

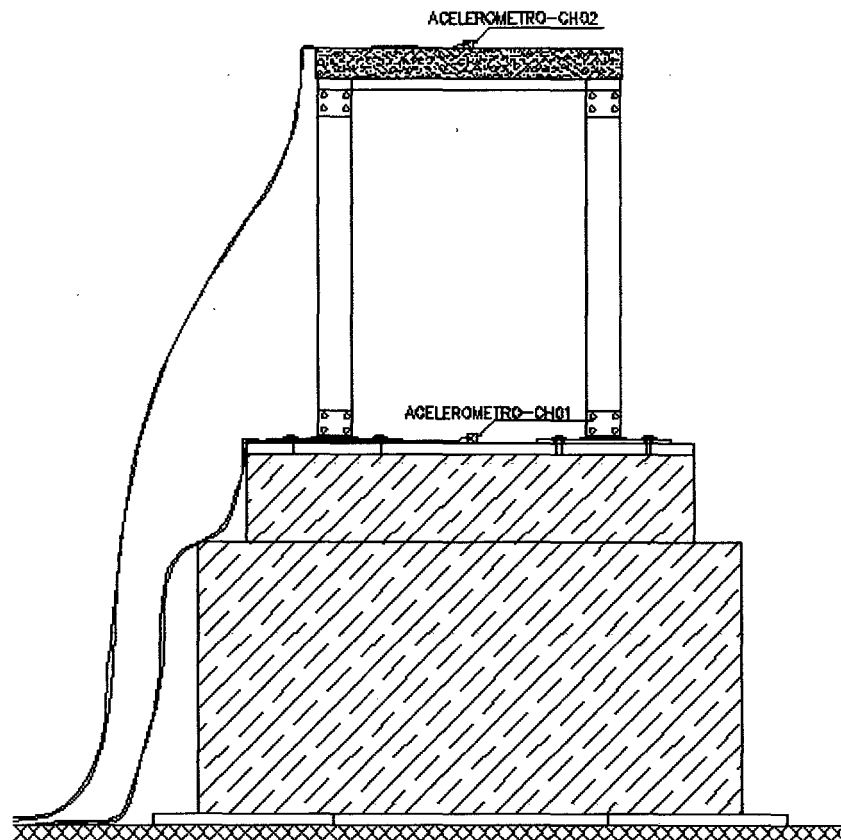


Figura N° A-07: Sección B-B ubicación de sensores (dimensiones en metros)

2.3 VERIFICACIÓN DE SENSORES

2.3.1 Verificación de acelerómetro

Todo acelerómetro viene de fábrica con una constante de calibración y un rango de salida. Estos valores se colocan en el programa usado para monitorear (DS100A) para obtener el equivalente en aceleración respecto a lo realmente se mide, es decir diferencia de voltaje. Una forma de conocer si estos valores ingresados son correctos es hacer uso de una característica de estos acelerómetros que si los colocamos en una posición girada 90 o -90 grados de su posición normal de medición, se deben obtener los valores de la aceleración de la gravedad. Si obtenemos esos valores diremos que la calibración es correcta, caso contrario se deberá cambiar. La Figura N° A-08 muestra como colocar el acelerómetro y que valores se deberían obtener en la pantalla de la computadora.

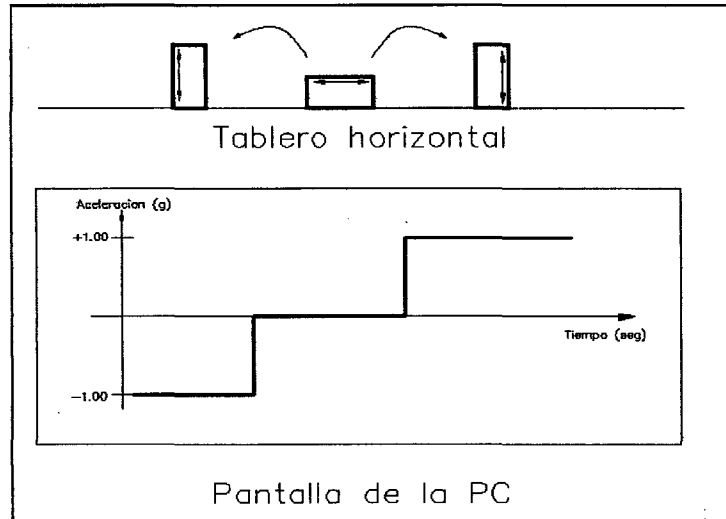


Figura N° A-08: Calibración de acelerómetros

2.3.2 Verificación de láser

Al igual que la calibración del acelerómetro esta calibración consiste en comprobar si los valores ingresados al programa son los correctos. En esta calibración se coloca un objeto de ancho conocido sobre la superficie a donde se mide el desplazamiento. El valor del ancho del objeto debe de reflejarse en la pantalla de la PC ya que este procedimiento simula que la superficie se movió esa cantidad (Ver Figura N° A-09)

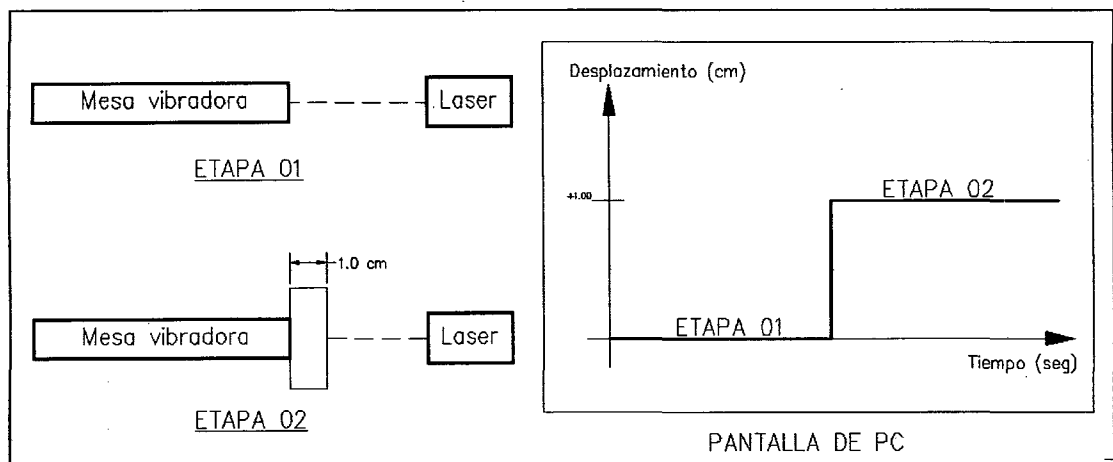


Figura N° A-09: Calibración de Láser

2.4 MANEJO DEL PROGRAMA PROYECTO01

El programa Proyecto01 es utilizado para poder enviar señales sísmicas, sinusoidales o lineales al tablero de control de la mesa vibradora para generar el

tipo de movimiento deseado. En este apartado se explica la forma de mandar una señal sísmica y sinusoidal.

Al ingresar al programa Proyecto1 abre una ventana una ventana de Microsoft visual Basic. A continuación se debe hacer clic en el botón ejecutar para abrir la ventana donde se ingresan los datos (Ver Figura N° A-10).

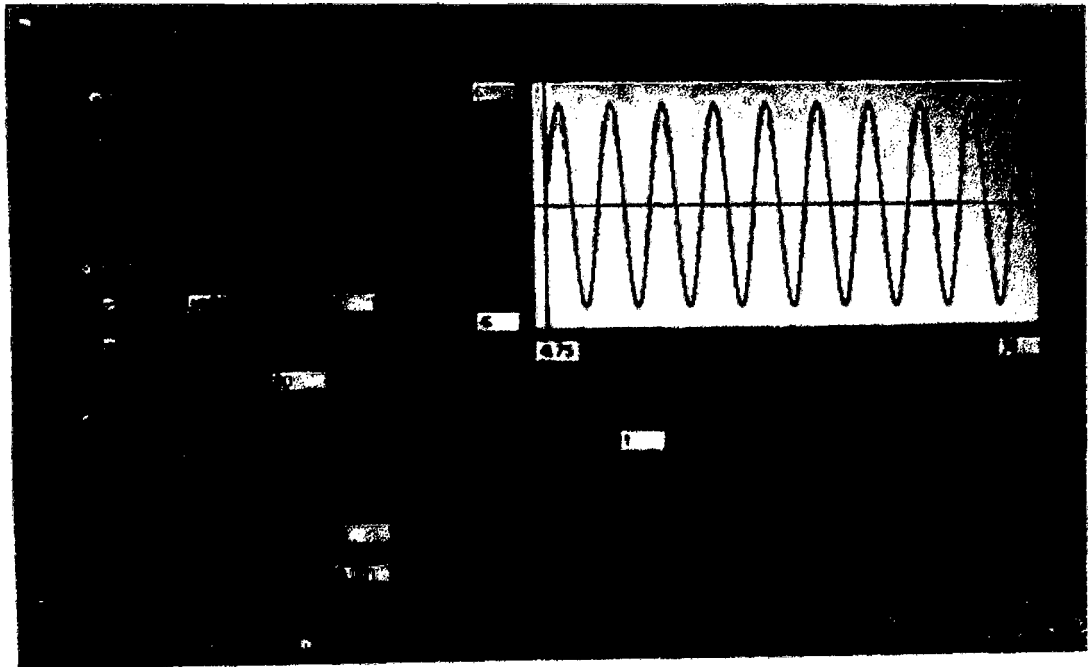


Figura N° A-10: Ventana para colocar los datos – función sinusoidal

Se explicara cómo se ingresan los datos para un movimiento sinusoidal. Como se muestra en la Figura N° A-10 se debe activar el botón perteneciente a $Funci=aSen(cx)+bCos(dx)$. Debido a que solo se quiere ingresar una señal seno se activa solo la primera casilla para poder rellenar los valores de a y c. El valor de a representa la amplitud de la aceleración, sin embargo este valor es solo referencial, ya que esta amplitud está controlada solo por el diferencial de voltaje máximo. La relación entre el diferencial de voltaje máximo y la aceleración dependen de la masa, frecuencia de vibración y tipo de señal. El valor de c corresponde a la frecuencia angular del movimiento. Se completa a casilla de tiempo que indica cuanto va a durar el movimiento. El valor que se coloca en la casilla Dt indica cual es el diferencial de tiempo en el cual se envía la señal, es decir controla la frecuencia de envío de la señal. Es posible colocarlas cuantas veces deseamos que se repita la señal en la casilla #de veces, por defecto este

valor se mantiene en 1. Una vez completados todas las casilla se hace clic en aceptar y el programa grafica la señal de envi6. Como paso final se hace clic en *Enviar se.*

Ahora se explicara c6mo se ingresan los datos para un movimiento s6smico. Para ello mostramos la ventana que aparece luego de hacer clic en ejecutar.

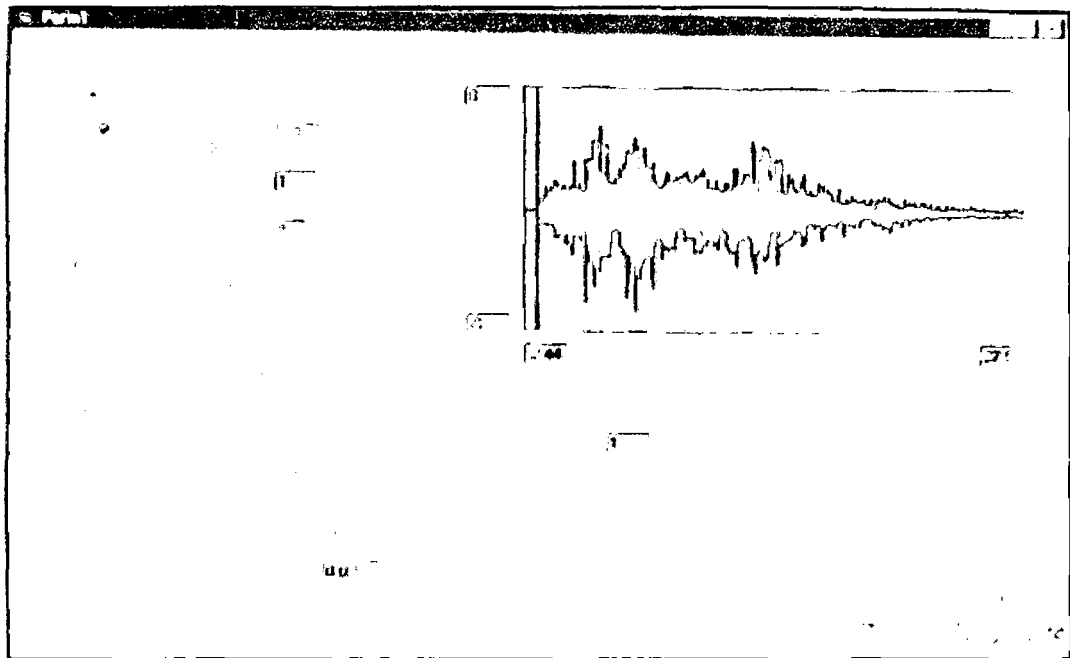


Figura N° A-11: Ventana para colocar los datos – funci6n registro s6smico

Ahora se explicara c6mo se ingresan los datos para un movimiento s6smico. Se activa e bot6n de ingreso de archivo (Ver Figura N° A-11). Se activa la casilla de dT constante, el valor a colocar se refiere al diferencial de tiempo del registro s6smico. Los valores de Factor de escala de aceleraci6n y tiempo se mantienen en uno porque no se har6 ning6n escalado para la se6al. A igual que el movimiento sinusoidal la amplitud m6xima de aceleraci6n que se va reproducir en la mesa vibradora depender6 del valor colocado en Diferencial de voltaje. El valor colocado en Dt representa el diferencial de tiempo en el cual se env6a la se6al, si colocamos un valor menor a dT constante el programa realizara interpolaciones para obtener una se6al con ese valor de Dt. Luego de completar las casillas mencionadas damos clic en Aceptar y abrir6 la ventana de explorador para abrir el registro deseado y luego el programa graficara dicho registro. Como 6ltimo para se da clic en *Enviar se.*

ANEXO III: MÉTODO ANALÍTICO APROXIMADO PARA UN MOVIMIENTO SINUSOIDAL EN UN SISTEMA CON AMORTIGUAMIENTO SUPLEMENTARIO DEL TIPO EXPONENCIAL

El procedimiento descrito es una adaptación del procedimiento de análisis de sistemas con amortiguamiento general y fuerzas de restauración general detallado en [17]. En este caso se especifica que es para un amortiguamiento del tipo exponencial.

Considerando la forma de la fuerza de amortiguamiento y ecuaciones de compatibilidad de fuerzas y desplazamientos para el brazo y disipador se obtiene:

$$F_a = C_{NL}\dot{x}_d^\alpha = K_b x_b \quad [A.1a]$$

$$x = \dot{x}_d + \dot{x}_b \quad [A.1b]$$

La fuerza de amortiguamiento puede relacionarse directamente con el desplazamiento y la velocidad del sistema combinado las ecuaciones [A.1a] y [A.1b]

$$F_a^{\frac{1}{\alpha}} - C_{NL}^{\frac{1}{\alpha}}\dot{x} + \frac{C_{NL}^{\frac{1}{\alpha}}}{K_b}\dot{F}_a = 0 \quad [A.2]$$

La ecuación de movimiento es:

$$M\ddot{x} + C_n\dot{x} + K_L x + F_a + M\ddot{u}_g \text{sen}(\phi t) = 0 \quad [A.3]$$

Estas dos últimas ecuaciones forman el sistema de ecuaciones diferenciales no lineales a resolver. Entre uno de los métodos para analizar vibración no lineal como está el método de Ritz [17], en este método se busca una solución "promedio" para lograr esto lo que se hace es multiplicar a la ecuación diferencial por una "función de peso" e integrar este producto en un periodo de movimiento. Por ejemplo si tenemos la ecuación diferencial "E=0" debemos resolver la siguiente integral:

$$\int_0^{2\pi} E(\bar{x}) \cdot \psi_n(t) dt = 0 \quad [A.4]$$

Donde la ecuación diferencial esta evaluada en la solución promedio \bar{x} y la función de peso $\psi_n(t)$ se una de las funciones independientes que generan la solución promedio:

$$\bar{x} = a_1\psi_1 + a_2\psi_2 + \dots + a_n\psi_n \quad [A.5]$$

En nuestro caso tenemos dos ecuaciones diferenciales y dos soluciones promedio, una para la variable x y la otra para la fuerza de amortiguamiento F_a , para las cuales formulamos las siguientes formas promedio:

$$\bar{x} = A\text{sen}(\phi t - \theta) = A[\text{sen}(\phi t)\cos(\theta) - \cos(\phi t)\text{sen}(\theta)] \quad [A.6]$$

$$\bar{F}_d = B\text{sen}(\phi t - \varphi) = B[\text{sen}(\phi t)\cos(\varphi) - \cos(\phi t)\text{sen}(\varphi)] \quad [A.7]$$

Ahora aplicamos el método:

- $\psi_1 = \text{sen}(\phi t)$ en la ecuación diferencial [A.2]

$$\int_0^{2\pi} \left\{ [B\text{sen}(\phi t - \varphi)]^{\frac{1}{\alpha}} + \frac{C_{NL}\frac{1}{\alpha}}{K_b} [B\phi\cos(\phi t - \varphi)] - C_{NL}\frac{1}{\alpha} [A\phi\cos(\phi t - \theta)] \right\} \text{sen}(\phi t) dt = 0 \quad [A.8]$$

- $\psi_1 = \text{sen}(\phi t)$ en la ecuación diferencial [A.3]

$$\int_0^{2\pi} \{ m[-A\phi^2\text{sen}(\phi t - \theta)] + C_n[A\phi\cos(\phi t - \theta)] + K_L[A\text{sen}(\phi t - \theta)] + B\text{sen}(\phi t - \varphi) + m\ddot{u}_g\text{sen}(\phi t) \} \text{sen}(\phi t) dt = 0 \quad [A.9]$$

- $\psi_2 = \cos(\phi t)$ en la ecuación diferencial [A.2]

$$\int_0^{2\pi} \left\{ [B\text{sen}(\phi t - \varphi)]^{\frac{1}{\alpha}} + \frac{C_{NL}\frac{1}{\alpha}}{K_b} [B\phi\cos(\phi t - \varphi)] + C_{NL}\frac{1}{\alpha} [A\phi\cos(\phi t - \theta)] \right\} \cos(\phi t) dt = 0 \quad [A.10]$$

- $\psi_2 = \cos(\phi t)$ en la ecuación diferencial [A.3]

$$\int_0^{2\pi} \{ m[-A\phi^2\text{sen}(\phi t - \theta)] + C_n[A\phi\cos(\phi t - \theta)] + K_L[A\text{sen}(\phi t - \theta)] + B\text{sen}(\phi t - \varphi) + m\ddot{u}_g\text{sen}(\phi t) \} \cos(\phi t) dt = 0 \quad [A.11]$$

Desarrollando estas ecuaciones se puede llegar a las siguientes ecuaciones:

$$B\frac{1}{\alpha}[4S_\alpha] \cos(\varphi) + B \left[\frac{\phi C_{NL}\frac{1}{\alpha}\pi}{K_b} \right] \text{sen}(\varphi) - A \left[C_{NL}\frac{1}{\alpha}\phi\pi \right] \text{sen}(\theta) = 0 \quad [A.12a]$$

$$A[-m\phi^2] \cos(\theta) + A[C_n\phi] \text{sen}(\theta) + A[K_L] \cos(\theta) + B\cos(\varphi) + m\ddot{u}_g = 0 \quad [A.12b]$$

$$B\frac{1}{\alpha}[-4S_\alpha] \text{sen}(\varphi) + B \left[\frac{\phi C_{NL}\frac{1}{\alpha}\pi}{K_b} \right] \cos(\varphi) - A \left[C_{NL}\frac{1}{\alpha}\phi\pi \right] \cos(\theta) = 0 \quad [A.12c]$$

$$A[m\phi^2] \text{sen}(\theta) + A[C_n\phi] \cos(\theta) - A[K_L] \text{sen}(\theta) - B\text{sen}(\varphi) = 0 \quad [A.12d]$$

$$\text{Dónde: } S_\alpha = \int_0^{\pi/2} (\text{sen}\sigma)^{1+1/\alpha} d\sigma$$

Tenemos cuatro ecuaciones con cuatro incógnitas por tanto es posible encontrar solución para cada una. Ahora reducimos un poco para relacionar las amplitudes A y B:

$$A = \frac{\left[\left(\frac{1}{B\bar{\alpha}4S_{\alpha}} \right)^2 + \left(\frac{B\phi C_{NL} \frac{1}{\bar{\alpha}\pi}}{K_b} \right)^2 \right]}{\sqrt{\left\{ B \left[\phi C_{NL} \frac{1}{\bar{\alpha}\pi} \right] \left[\frac{\phi C_{NL} \frac{1}{\bar{\alpha}\pi}}{K_b} \right]^2 + \left\{ \left[\phi C_{NL} \frac{1}{\bar{\alpha}\pi} \right] \left[\frac{1}{B\bar{\alpha}4S_{\alpha}} \right] \right\}^2}} \quad [\text{A.13a}]$$

$$[A\{[m\phi^2 - K_L]^2 + [C_n\phi]^2\} - B[m\phi^2 - K_L] \cos(\beta) + B[C_n\phi] \text{sen}(\beta)]^2 + [B[m\phi^2 - K_L] \text{sen}(\beta) + B[C_n\phi] \cos(\beta)]^2 = [m\ddot{u}_g[m\phi^2 - K_L]]^2 \quad [\text{A.13b}]$$

$$\cos(\beta) = \frac{AB \left[\phi C_{NL} \frac{1}{\bar{\alpha}\pi} \right] \left[\frac{\phi C_{NL} \frac{1}{\bar{\alpha}\pi}}{K_b} \right]}{\left(\frac{1}{B\bar{\alpha}4S_{\alpha}} \right)^2 + \left(\frac{B\phi C_{NL} \frac{1}{\bar{\alpha}\pi}}{K_b} \right)^2}; \text{sen}(\beta) = \frac{AB\bar{\alpha} \left[\phi C_{NL} \frac{1}{\bar{\alpha}\pi} \right] [4S_{\alpha}]}{\left(\frac{1}{B\bar{\alpha}4S_{\alpha}} \right)^2 + \left(\frac{B\phi C_{NL} \frac{1}{\bar{\alpha}\pi}}{K_b} \right)^2}; \beta = \theta - \varphi \quad [\text{A.13c}]$$

Reemplazando [A.13c] y [A.13a] en [A.13b] obtenemos una ecuación en B, de la cual al resolver obtenemos B y este valor reemplazándolo en [A.13a] obtenemos A. Esto nos permite también obtener β si reemplazamos los valores de A y B en [A.13c]. Para completar el análisis calculamos el ángulo θ de:

$$\tan(\theta) = \frac{-\{B[m\phi^2 - K_L] \text{sen}(\beta) + B[C_n\phi] \cos(\beta)\}}{A\{[m\phi^2 - K_L]^2 + [C_n\phi]^2\} - B[m\phi^2 - K_L] \cos(\beta) + B[C_n\phi] \text{sen}(\beta)} \quad [\text{A.14}]$$

De este modo obtenemos la solución promedio $\bar{x} = A \text{sen}(\phi t - \theta)$.

ANEXO IV: FOTOS



Foto 1.- Pesas - Ensayo Preliminar

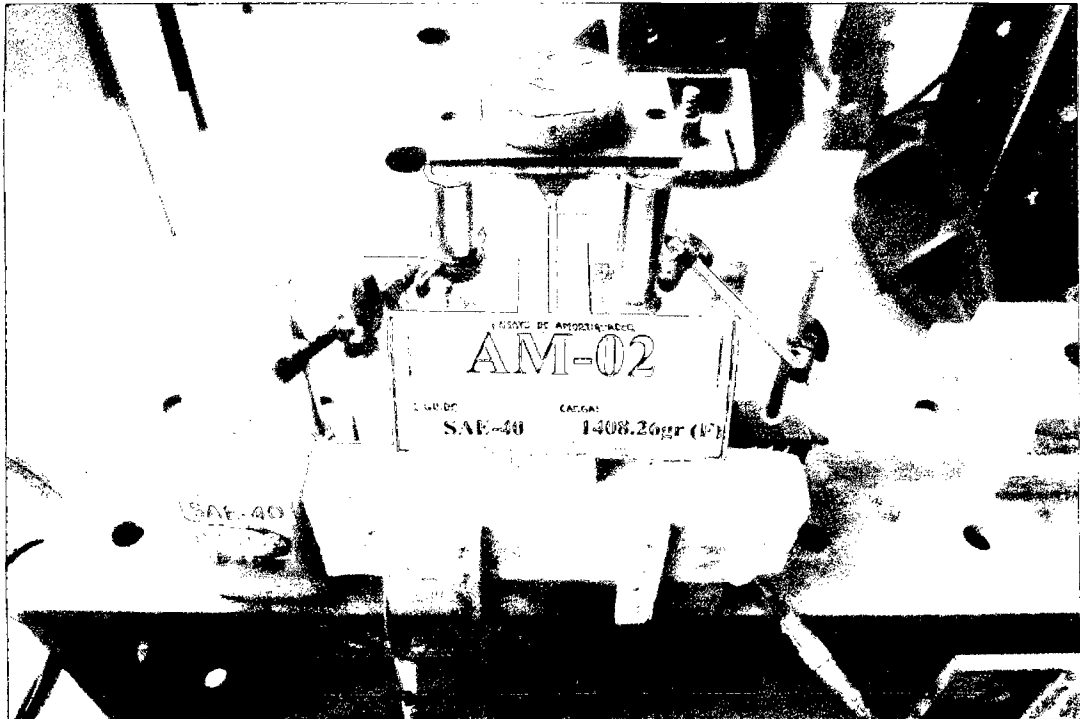


Foto 2.- Vista 1 - Ensayo Preliminar



Foto 3.- Vista 2 - Ensayo Preliminar

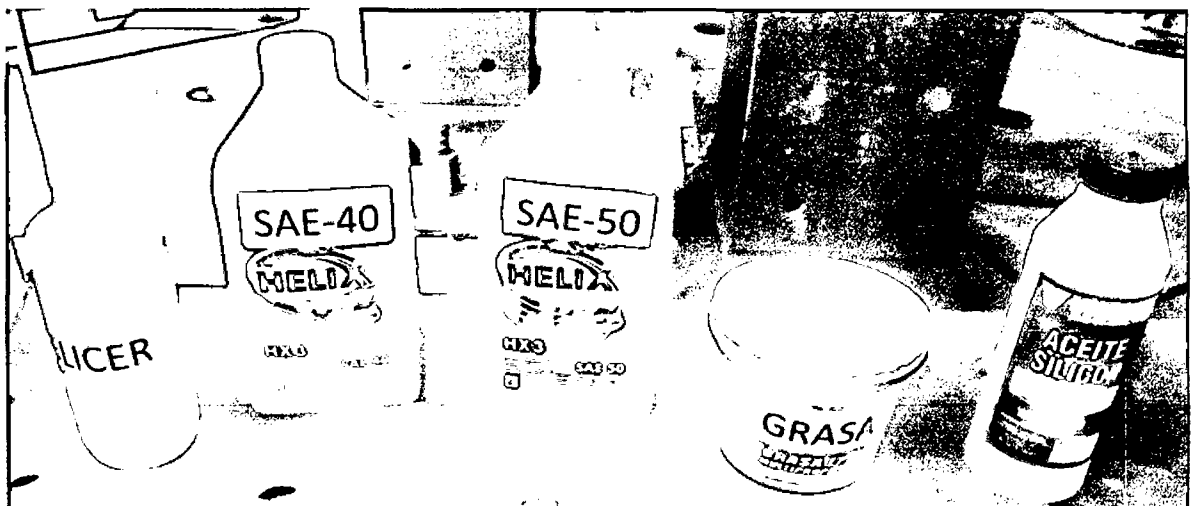


Foto 4.- Líquidos usados en el ensayo preliminar

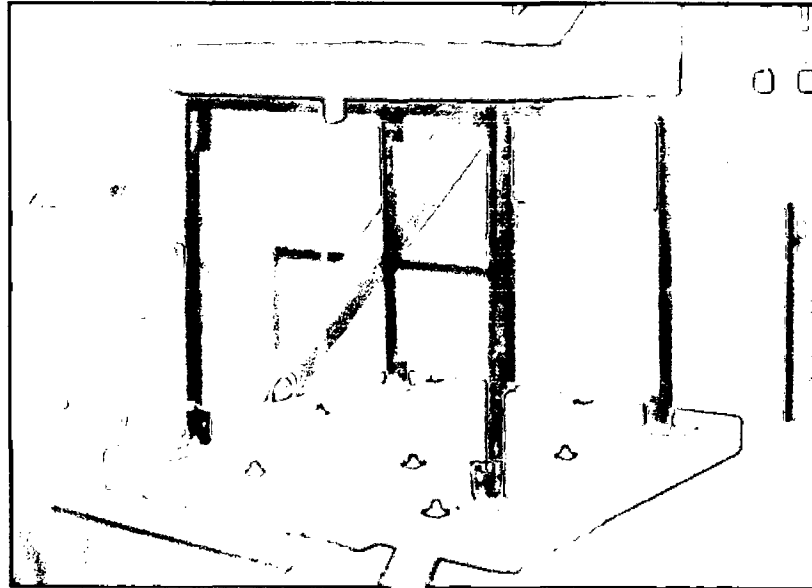


Foto 5.- Modelo A sobre mesa vibradora con los transductores instalados

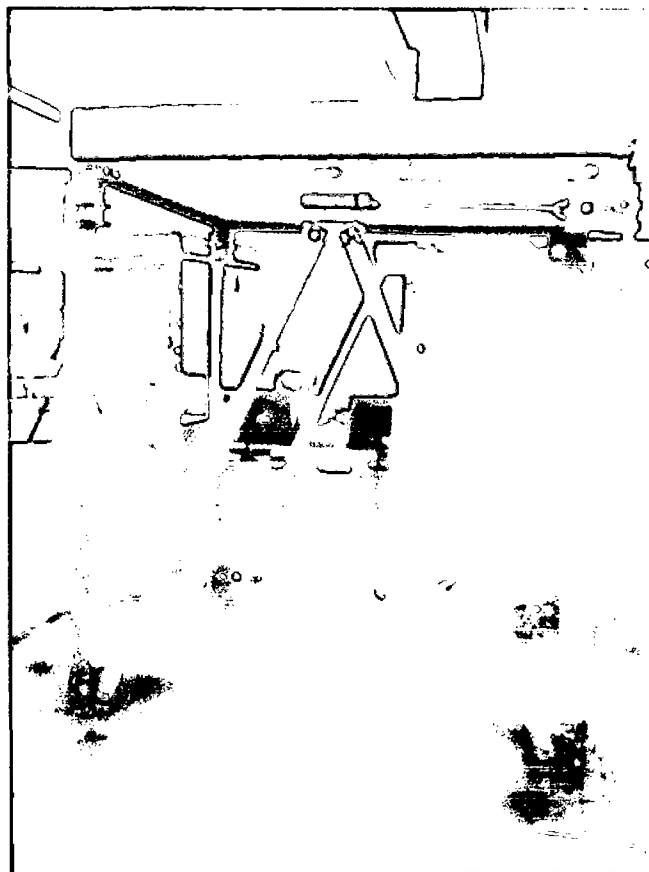


Foto 6.- Modelo B sobre mesa vibradora con los disipadores conectados

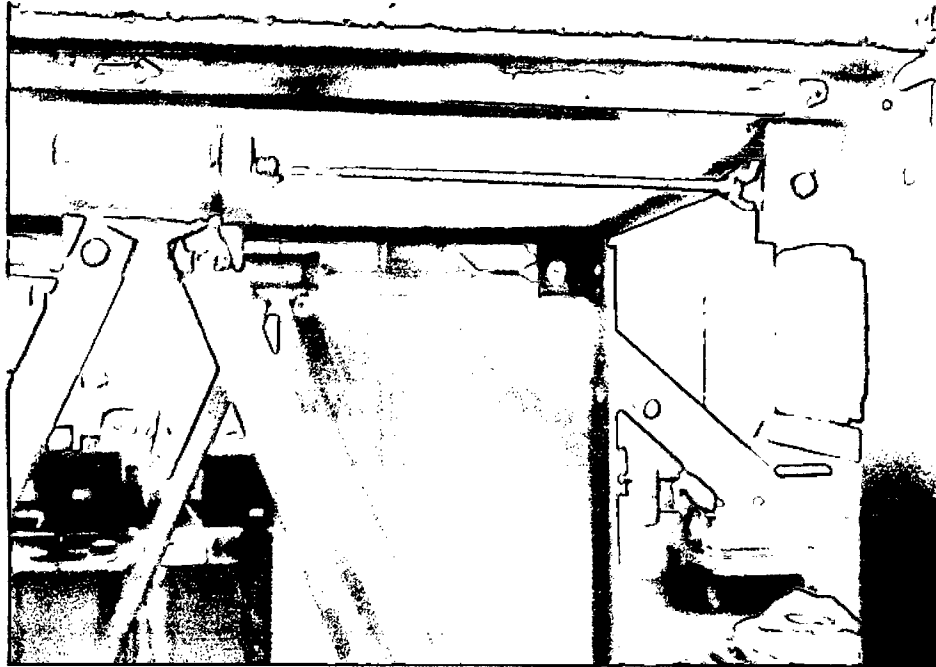


Foto 7.- Detalle de la conexión del disipador al modelo

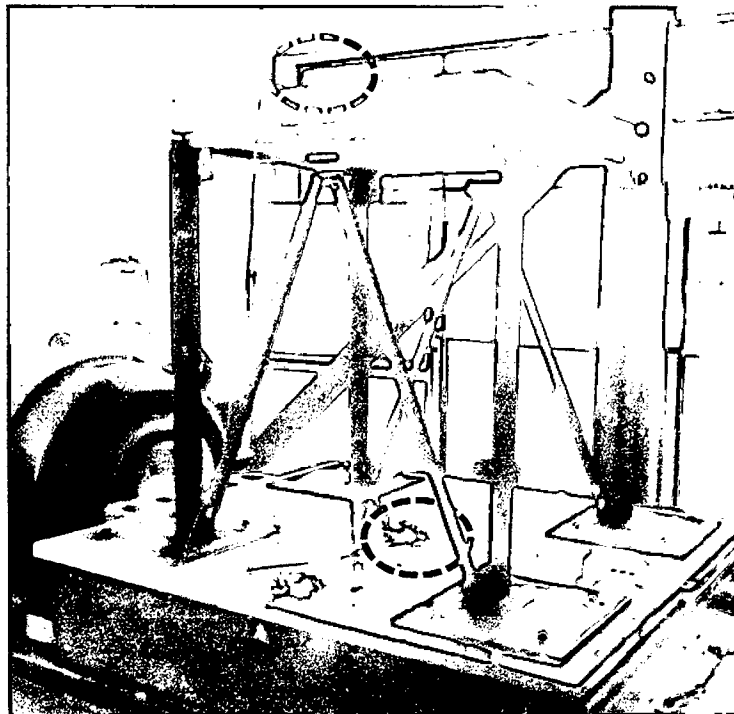


Foto 8.- Ubicación de acelerómetros

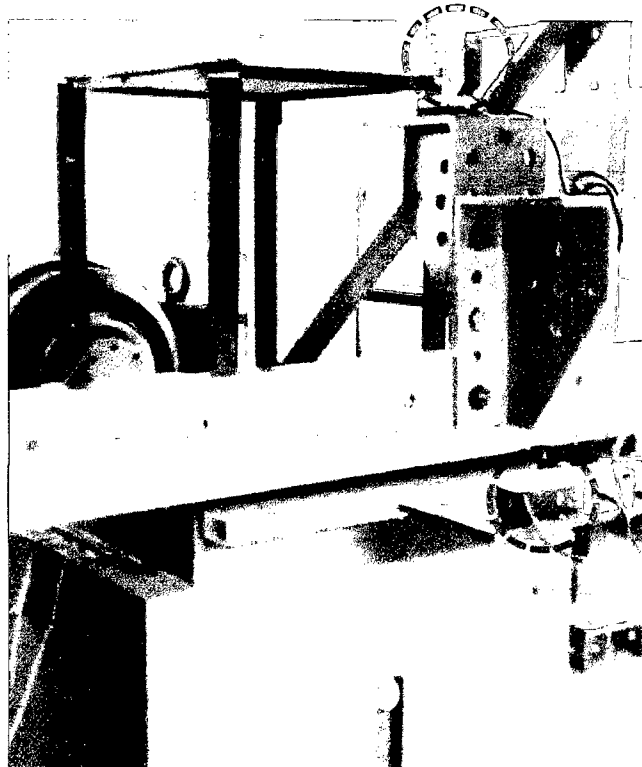


Foto 9.- Ubicación de los láseres

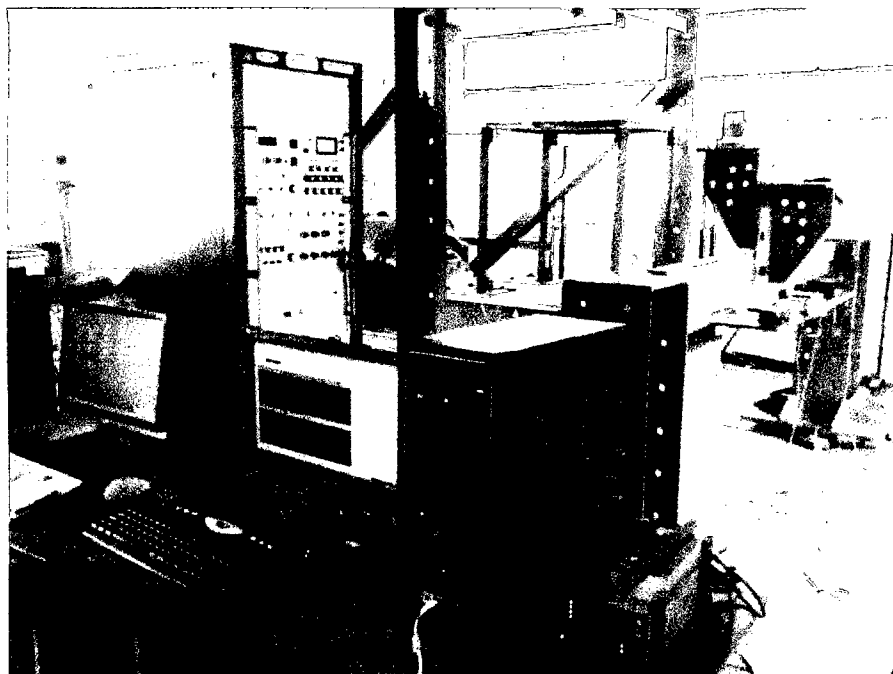


Foto 10.- Vista general 1 de la disposición de los instrumentos

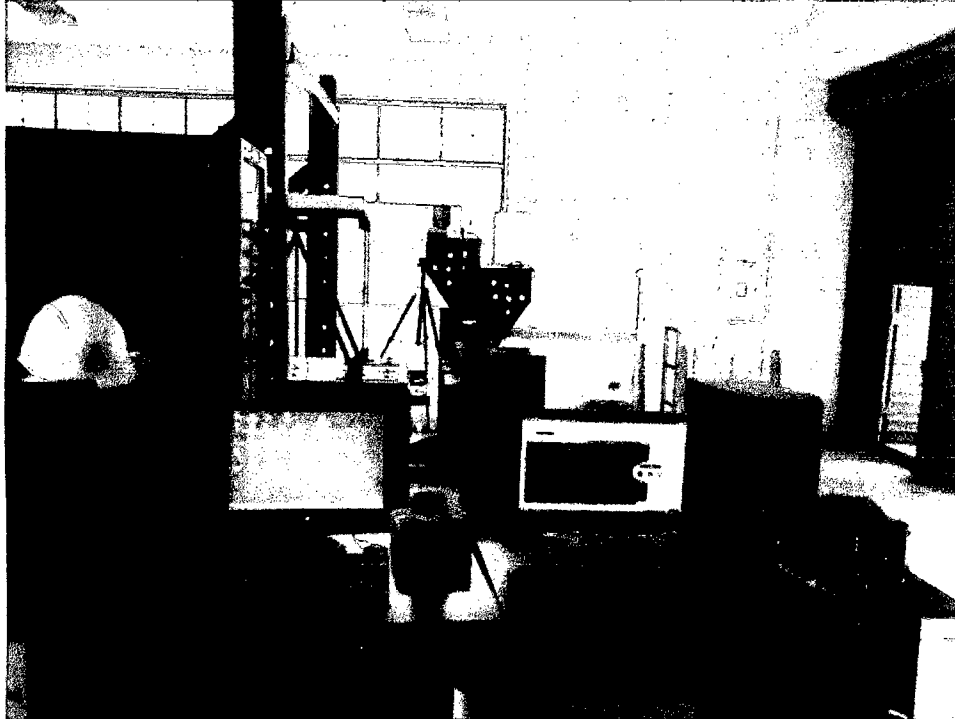


Foto 11.- Vista general 2 de la disposición de los instrumentos

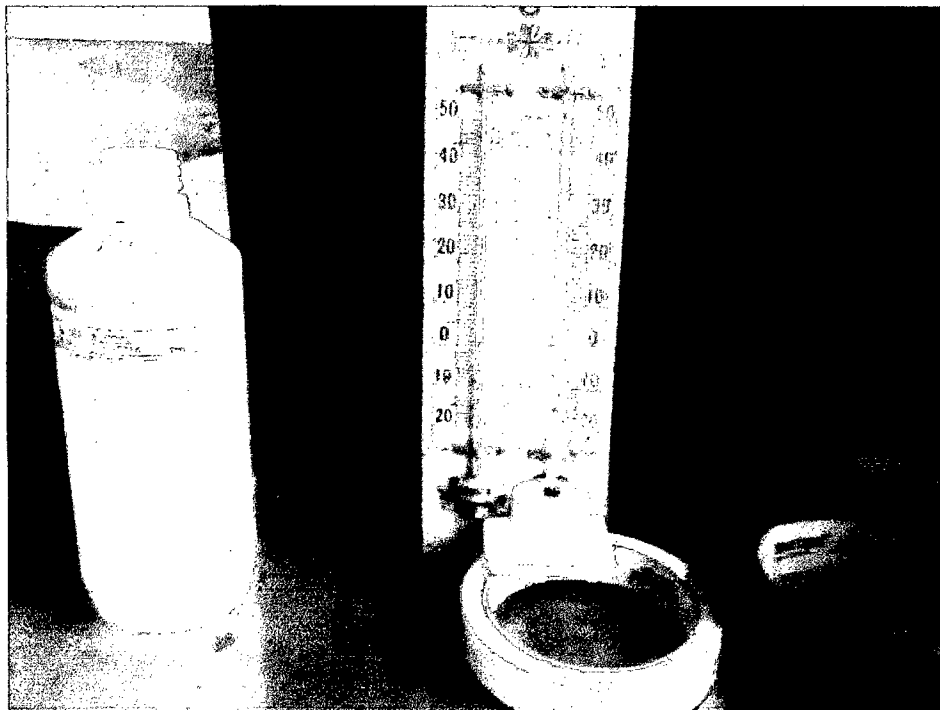


Foto 12.- Registro de la temperatura antes del ensayo

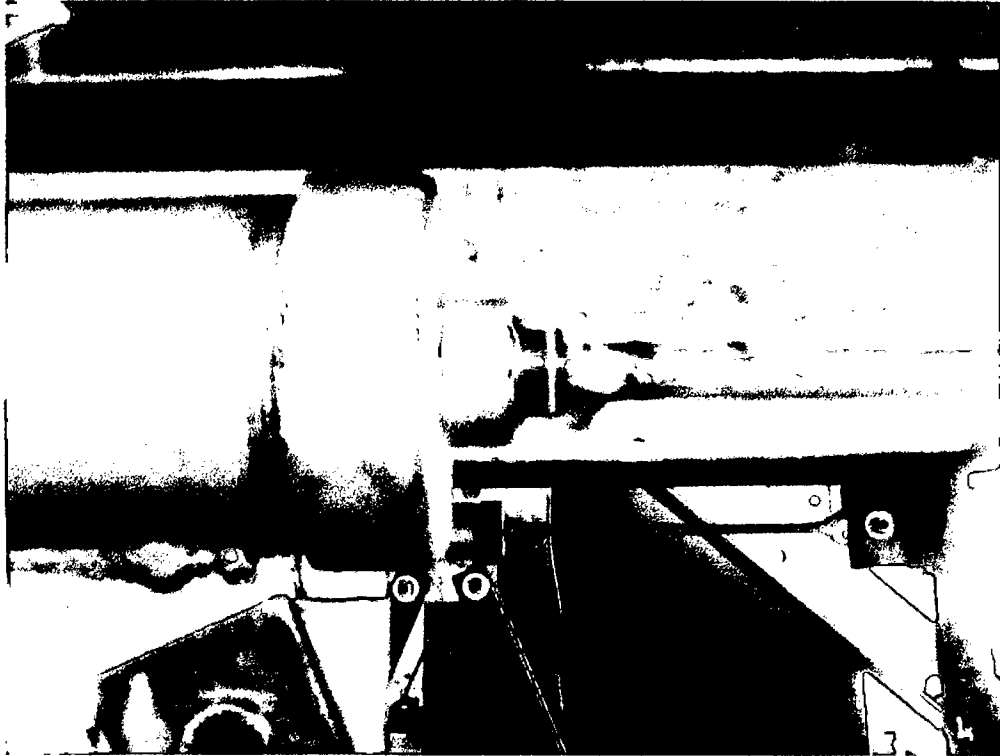


Foto 13.- Fuga de líquido viscoso del disipador durante el ensayo

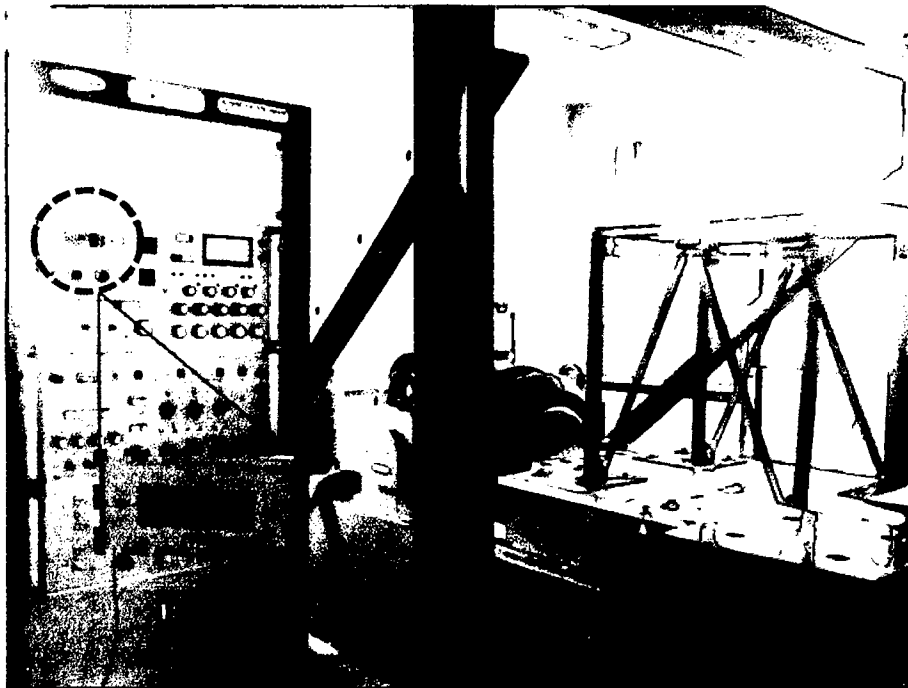


Foto 14.- Registro del movimiento sinusoidal con la frecuencia natural del modelo

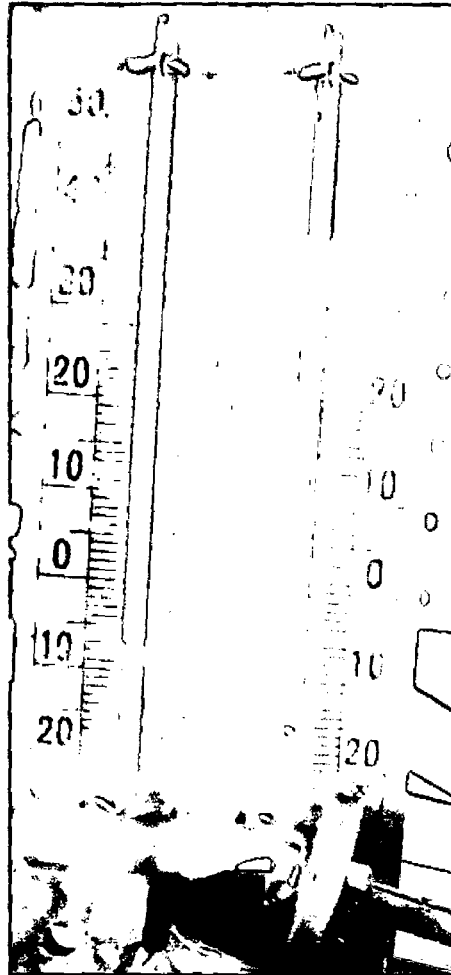


Foto 14.- Registro de la temperatura después del ensayo

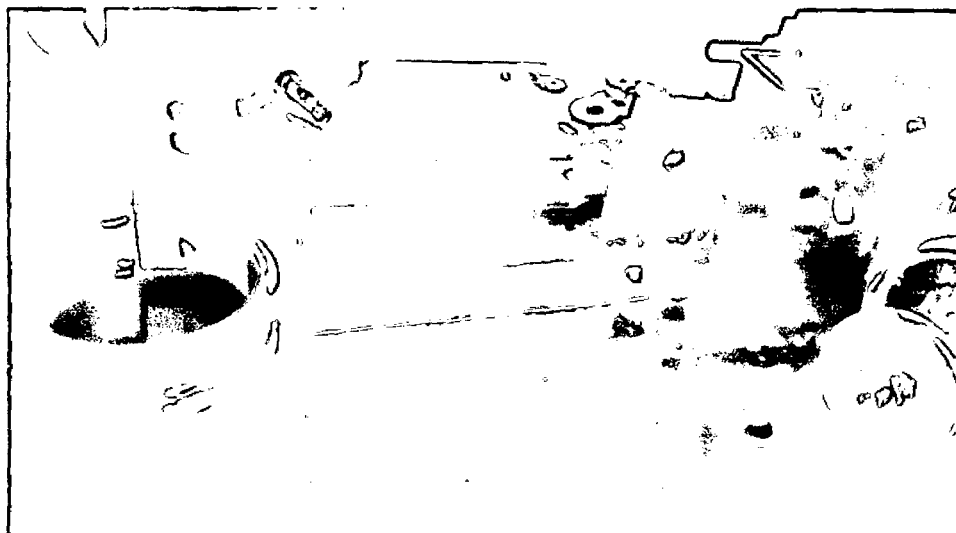


Foto 15.- Evidencias de la pérdida de líquido viscoso del disipador