

DESEMPEÑO DEL AISLADOR FPT8833/12-12/8-6 EMPLEADO EN LA CONSTRUCCIÓN DEL CENTRO DE INVESTIGACIONES DE UFA-ESPE MEDIANTE ANALISIS NO LINEAL

PERFORMANCE OF THE FPT8833/12-12/8-6 DEVICE USED IN THE NEW RESERCH CENTER OF THE UNIVERSITY OF THE ARMED FORCES - ESPE THROUGH NONLINEAR DYNAMIC ANALYSIS

Roberto Aguiar

Departamento de Ciencias de la Tierra y la Construcción
Universidad de Fuerzas Armadas ESPE
Av. Gral. Rumiñahui s/n, Valle de los Chillos.
Correo Electrónico: rraguiar@espe.edu.ec

Enrique Morales

Department of Civil, Structural
University of New York at Buffalo

RESUMEN

El objetivo principal de este estudio es determinar el desempeño que tendrá el aislador FPT8833/12-12/8-6 utilizado en el nuevo Centro de Investigaciones Científicas de la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE. Análisis no lineal fue realizado como método más exacto fin determinar respuestas dinámicas de los aisladores. En el análisis no lineal se utilizó el modelo de tres fases propuesto por McVitty y Constantinou (2015) para aisladores de triple péndulo de fricción. Un set de apropiados siete sismos fueron seleccionado en perfiles de suelo parecido, y con rangos de magnitudes a las que se esperan en Quito y el Valle de los Chillos.

Los sismos fueron escalados o normalizados utilizando el Modelo de Escalamiento denominado: Promedio con Pesos Ponderados utilizando varios periodos y modificando solo amplitudes; considerando fallas activas en una distancia menor a 5 km al proyecto.

Palabras Claves: Escalamiento de sismos. Aisladores de Triple Péndulo de Fricción.

ABSTRACT

The main objective of this study is to determine the performance of the FPT8833/12-12/8-6 friction pendulum device used in the of the new Reserch Center of Universidad de Fuerzas Armadas-Espe. The nonlinear dynamic response history was implemented, method that represents the most accurate analysis in order to

determine the dynamic responses. In this analysis the model of McVitty and Constantinou (2015) was implemented. A set of seven appropriate ground motions were used, and have been registered in soil profiles and with similar magnitude ranges expected in Quito and Valle de Chillos.

The ground motions were scaled or normalized using a “weighted average” scaling process in which several periods are considered and only the amplitude of the seed of motion is modified for sites within 5km from active faults to the project.

Keyword: Scalet of earthquake. Triple Pendulum isolators friction.

1. INTRODUCCIÓN

En el diseño del nuevo Centro de Investigaciones Científicas de la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, se consideraron dos espectros, el de diseño denominado **DBE**, que corresponde al prescrito en la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC-15, para San Rafael ($z = 0.4$) en un perfil de suelo “C” (Bonifaz 2015) y el sismo máximo considerado **MCE**, que se obtiene multiplicando el espectro DBE por 1.4 (Constantinou *et al.* 2016). En la figura 1, se presentan estos espectros.

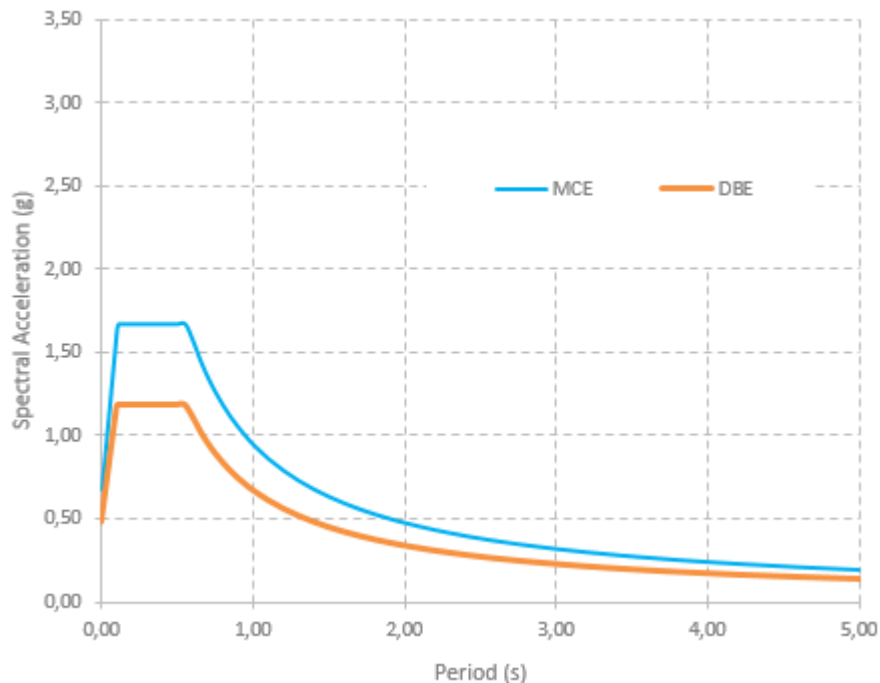


Figura 1 Espectros de Diseño **DBE** y máximo sismo considerado **MCE** para el Centro de Investigaciones Científicas y de Post Grado de UFA-ESPE.

El análisis sísmico de los diferentes bloques estructurales se realizó aplicando el Método Espectral, empleando los espectros indicados en la figura 1. Aguiar *et al.* (2015, 2016)

Ahora, interesa encontrar el comportamiento no lineal del aislador friccional triple péndulo tipo FPT8833/12-12/8-6, con el que se está construyendo el Proyecto, ante sismos impulsivos que tienen un pulso de velocidad muy alto, los mismos que se indicarán posteriormente. Los espectros que se obtienen con los acelerogramas de los sismos seleccionados tienen que ser semejantes al espectro **MCE** en cierto rango de interés para lo cual se aplica la técnica de escalamiento de sismos. En la figura 2 se indica la geometría del aislador y los parámetros utilizados para hallar la respuesta no lineal.

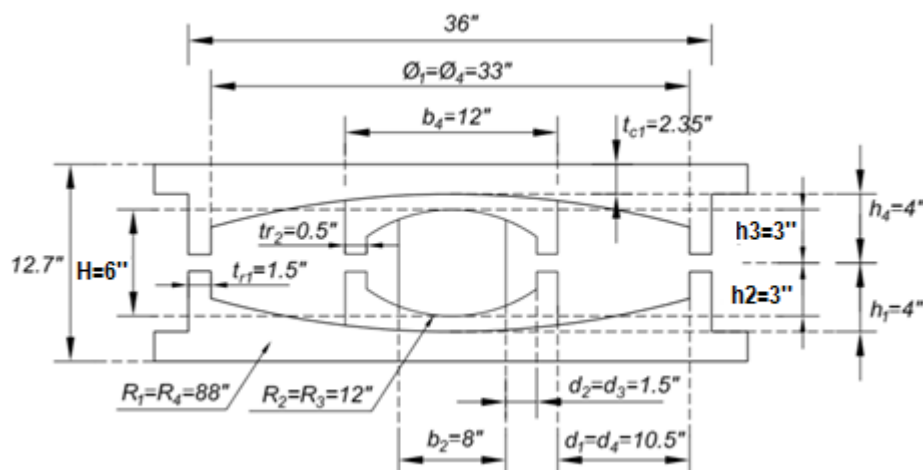


Figura 2 Aislador FPT8833/12-12/8-6, utilizado en la construcción del nuevo Centro de Investigaciones Científicas de UFA-ESPE.

Tabla 1 Coeficientes de roce

Propiedad	$\mu_2 = \mu_3$	μ_1	μ_4
Valor Superior UB	0.015	0.07	0.08
Valor Inferior LB	0.008	0.05	0.06
Valor Nominal	0.01	0.06	0.07

En la tabla 1, se indican los coeficientes de roce del aislador FPT8833/12-12/8-6. Para el análisis no lineal que se presenta en este artículo, se trabajó con los valores nominales, indicados en la última fila de la tabla 1.

2. SISMOS SELECCIONADOS

Los registros que se utilizarán en el análisis no lineal de respuesta en el tiempo, son los presentados en la sección 10 del reporte "LRFD-based Analysis and Design Procedures for Bridge Bearings in Seismic Isolators", MCEER-11-0004, estos terremotos fueron rotados a lo largo de la dirección paralela y normal a la falla; y son los indicados en la tabla 2. La selección de los registros sísmicos se debe a las siguientes consideraciones:

- Los registros son de fallas cercanas a las fallas.
- Los registros del sismo de Gazli de 1976, provienen de una región tipo “backward-directivity”. Los restantes registros son de regiones “forward-directivity”.
- La magnitud de los registros se encuentra entre 6.7 y 7.1.
- Las distancias a la fuente R_{rup} se encuentran entre 3 y 12 km,
- Los registros fueron obtenidos en suelos tipo “C” y “D”
- Los registros de Gazli de 1976 y el de Loma Prieta de 1989, son considerados como registros estándar con alto contenido de frecuencia.
- Los sismos de Northridge de 1994 y Kobe de 1995 son sismos impulsivos y son considerados por su cercanía a la falla.
- Se incluye el sismo de Turquía de 1999 porque fue altamente destructivo.

Tabla 2 Registros de sismos utilizados

Cod.	Nombre del sismo	Estación	M_w	R	Suelo Tipo	PGV (cm/s)
EQ1	1976 Gazli, URRS	Karakyr	6.69	5.46	C	61.50
EQ2	1989 Loma Prieta	LGPC	6.93	3.88	C	77.15
EQ3	1989 Loma Prieta	Saratoga-W Valley Coll	6.93	9.31	C	57.09
EQ4	1994 Northridge	Jensen Filter Plan	6.69	5.43	C	73.99
EQ5	1994 Northridge	Sylmar-Coverter Sta. East	6.69	5.19	C	95.07
EQ6	1995 Kobe, Japón	Takarazuka	6.90	3.00	D	75.88
EQ7	1999 Duzce, Turquía	Bolu	7.14	12.41	D	59.68

En la tablas 3 a 5 se presentan los valores máximos de aceleración, velocidad y desplazamiento registrados y el tiempo en el que se dieron esos valores; la tabla 3 corresponde a los registros de los sismos de Gazli de 1976 y de Loma Prieta de 1989; la tabla 4 a los registros del sismo de Northridge de 1994 y la tabla 5 contiene los parámetros de los sismos de Kobe de 1995 y de Turquía de 1997.

Tabla 3 Propiedades de los registros EQ1, EQ2 y EQ3

Sismo	EQ1 (1976 Gazli)		EQ2 (1989 L.P)		EQ3 (1989 L.P)	
	FN	FP	FN	FP	FN	FP
PGA (g)	0.60	0.71	0.94	0.54	0.40	0.26
Tiempo Max Aceleración (seg)	7.12	8.64	9.57	10.37	5.12	6.23
Max. Velocidad (cm/seg)	64.88	70.96	96.84	72.01	71.21	59.94
Tiempo Max Velocidad (seg.)	7.79	9.90	8.79	7.98	5.00	6.13

Max. Desplazamiento (cm.)	24.14	24.82	62.62	30.50	20.81	29.75
Tiempo Max Desplazamiento (seg.)	8.68	9.00	10.59	8.34	6.45	6.47

Tabla 4 Propiedades de los registros EQ4 y EQ5

Sismo	EQ4 (1994 Northridge-Jensen Filter Plant)		EQ5 (1994 Northridge-Sylmar Coverter Sta East)	
	FN	FP	FN	FP
Componente	FN	FP	FN	FP
PGA (g)	0.52	1.07	0.84	0.49
Tiempo Max Aceleración (seg)	7.12	6.70	3.50	6.59
Max. Velocidad (cm/seg)	67.58	64.59	116.21	78.23
Tiempo Max Velocidad (seg.)	3.21	3.15	3.43	6.19
Max. Desplazamiento (cm.)	42.09	21.11	39.32	29.19
Tiempo Max Desplazamiento (seg.)	2.97	5.39	3.02	5.71

Tabla 5 Propiedades de los registros EQ6 y EQ7

Sismo	EQ6 (1995 Kobe-Takarazuka)		EQ7 (1997 Turquía-Bolu)	
	FN	FP	FN	FP
Componente	FN	FP	FN	FP
PGA (g)	0.65	0.70	0.78	0.78
Tiempo Max Aceleración (seg)	6.17	6.00	10.76	10.80
Max. Velocidad (cm/seg)	72.64	83.21	55.01	62.63
Tiempo Max Velocidad (seg.)	5.27	5.93	11.28	11.10
Max. Desplazamiento (cm.)	20.73	26.68	22.68	13.55
Tiempo Max Desplazamiento (seg.)	5.75	6.12	15.96	11.31

2.1 Acelerogramas seleccionados

En las figuras 3 a 9 se presentan los acelerogramas de los sismos seleccionados, a la izquierda se indica la componente normal a la falla y a la derecha el registro de la componente paralela a la falla, se aprecia que el tiempo de duración en promedio está alrededor de los 30 seg., y que tienen pulsos muy altos, por lo que causaron mucho daño en las estructuras, cuando se registraron.

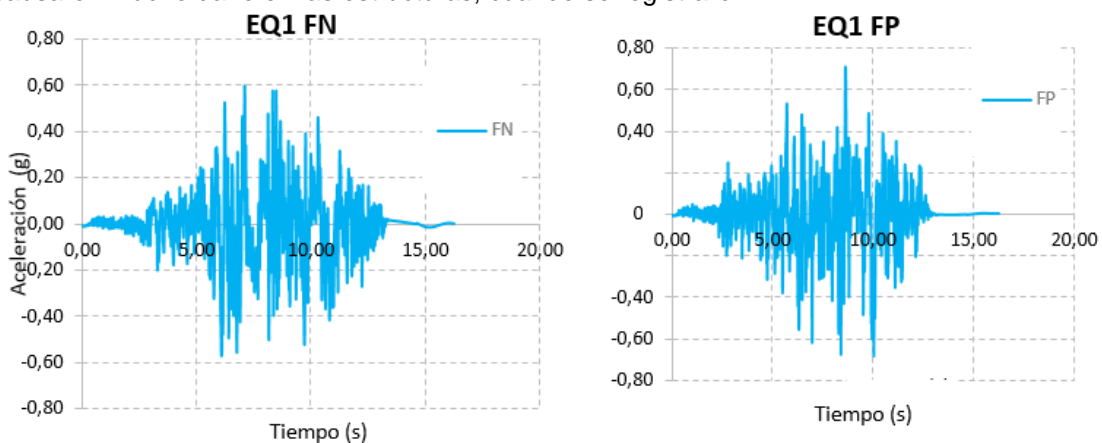


Figura 3 Acelerogramas Normal y Perpendicular a la falla del sismo de Gazli, de 1976 en URSS. Registro: Karaky

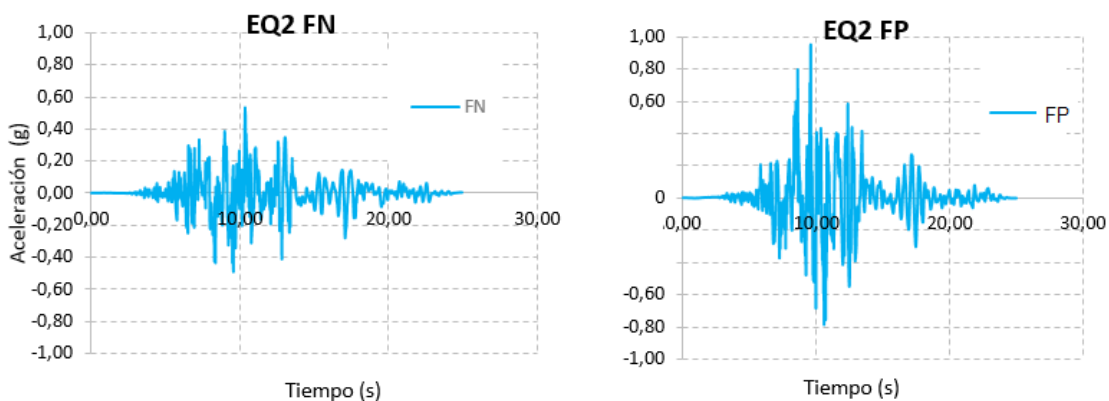


Figura 4 Acelerogramas Normal y Perpendicular a la falla del sismo de Loma Prieta de 1989 Registro LGPC

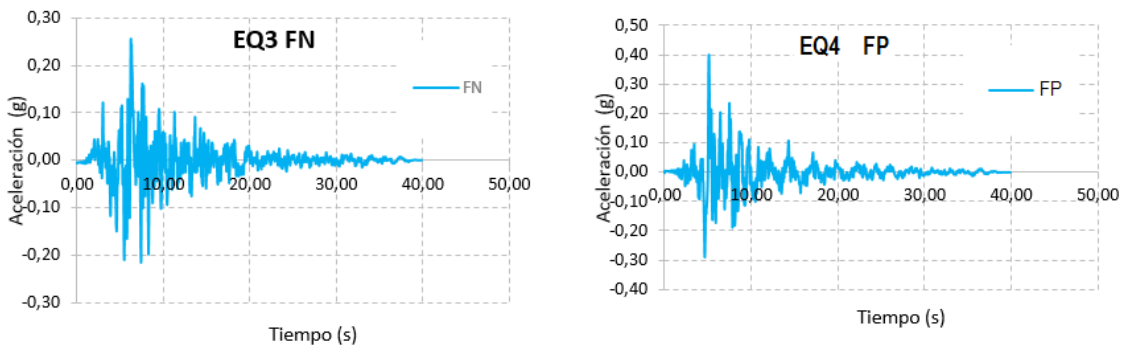


Figura 5 Acelerogramas Normal y Perpendicular a la falla del sismo de Loma Prieta de 1989 Registro Saratoga-W. Valley Coll.

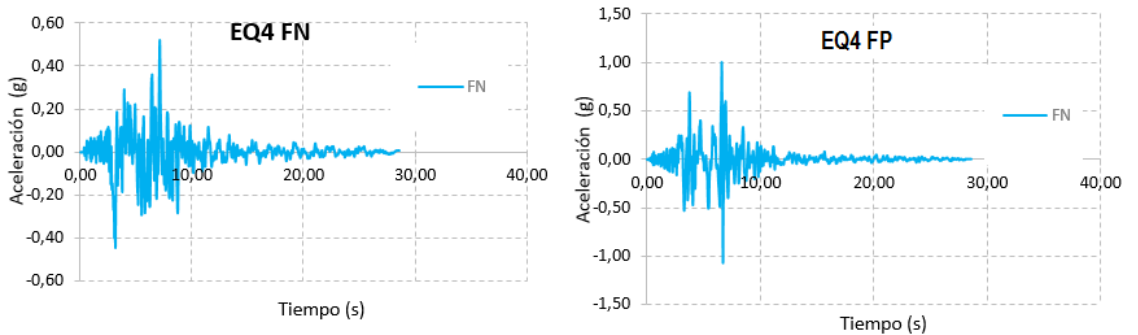


Figura 6 Acelerogramas Normal y Perpendicular a la falla del sismo de Northridge de 1994 Registro: Jensen Filter Plant

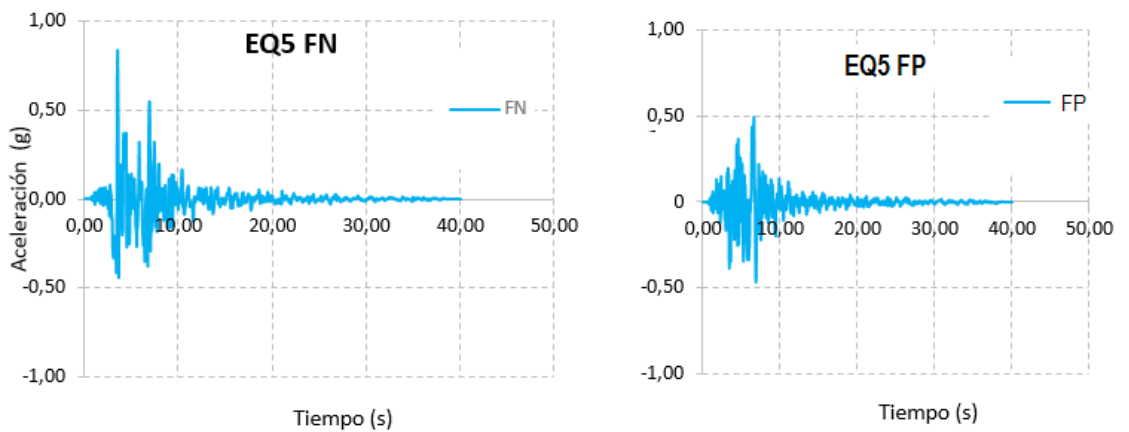


Figura 7 Acelerogramas Normal y Perpendicular a la falla del sismo de Northridge de 1994 Registro: Sylmar-Coverter Sta East.

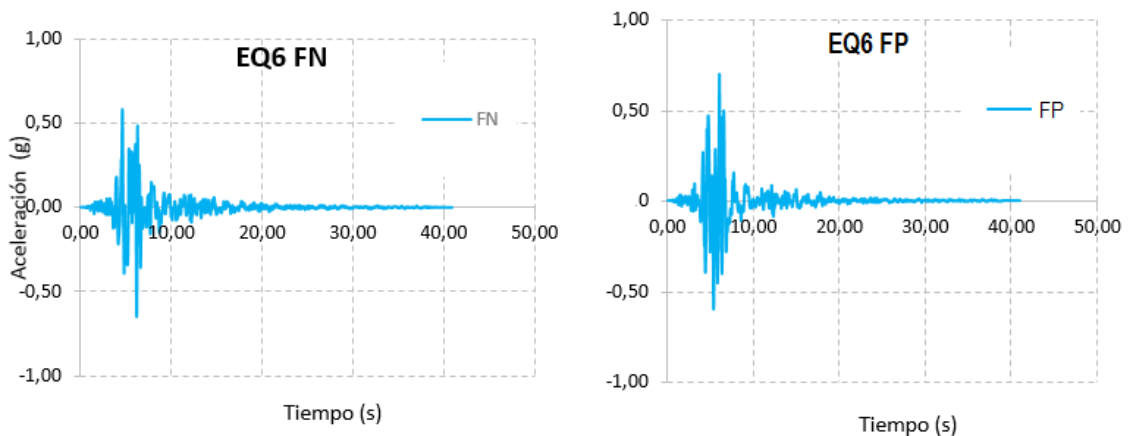


Figura 8 Acelerogramas Normal y Perpendicular a la falla del sismo de Kobe de 1995 Registro: Takarazuka

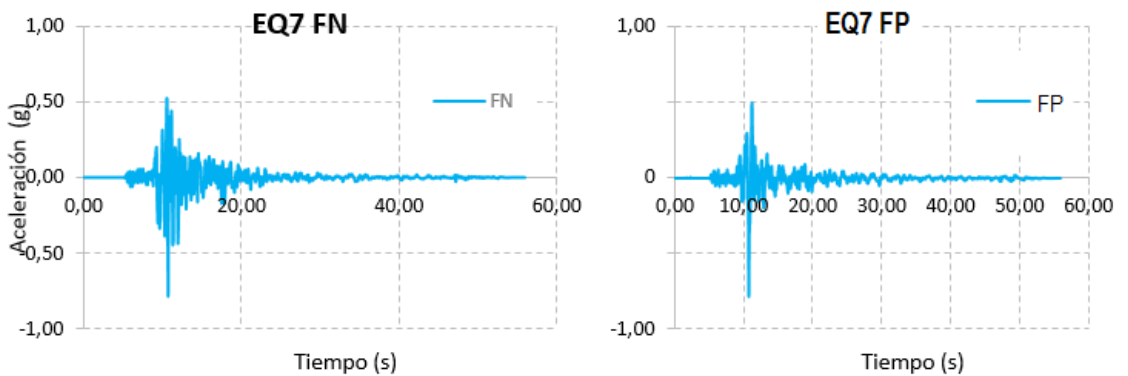


Figura 9 Acelerogramas Normal y Perpendicular a la falla del sismo de Turquía de 1999. Registro: Bolu

2.2 Espectros de respuesta elásticos

En la figura 10, se presentan los espectros de respuesta elástica para un factor de amortiguamiento del 5%, que se obtuvieron con cada uno de los acelerogramas indicados en apartado anterior. Con línea de mayor espesor se presenta el espectro promedio, que tiene 50% de nivel de confianza.

Ahora bien en la figura 11 se presentan nuevamente los espectros indicados en la figura 1 pero se ha añadido el espectro promedio de los 14 registros correspondientes a los 7 sismos seleccionados, se aprecia una buena coincidencia con el espectro **DBE**, para el rango de períodos entre 2 y 5 segundos. Pero para el sismo **MCE**, está bastante bajo para el rango de períodos indicados por lo que se deben escalar los registros para que las ordenadas espectrales sean compatibles en el rango de interés seleccionado.

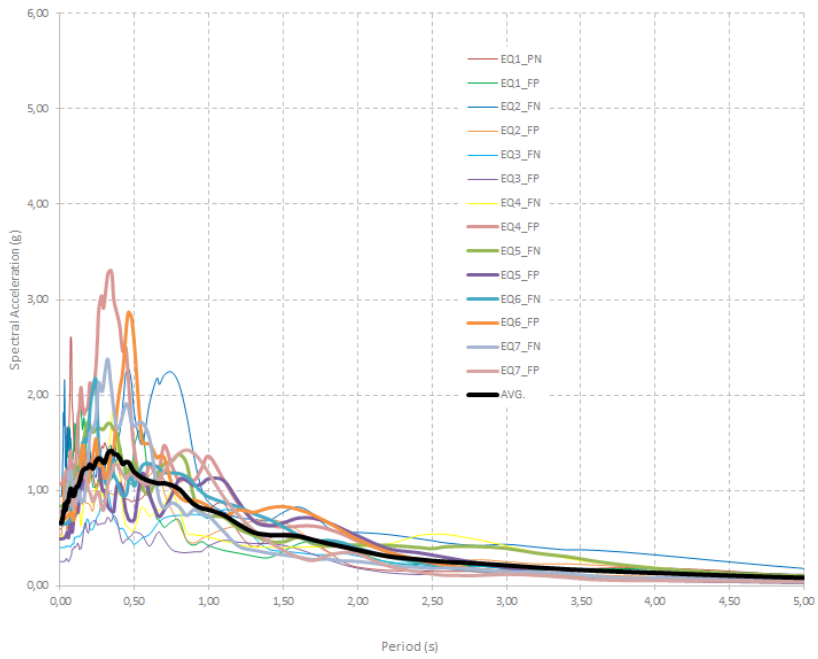


Figura 10 Espectros de respuesta elástica de los sismos considerados.

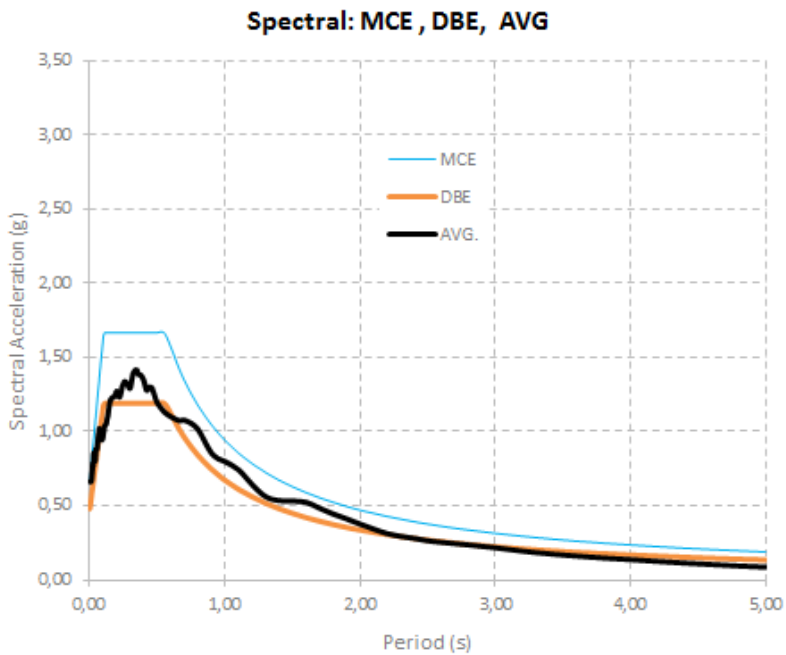


Figura 11 Espectros de diseño DBE, máximo considerado MCE y promedio de los sismos seleccionado.

3. ESCALAMIENTO DE SISMOS

La Norma de Chile de aislación sísmica NCh2745 (2013), recomienda trabajar con por lo menos tres eventos sísmicos, cuyos registros deben tener magnitudes, distancia a la falla, fuentes del mecanismo focal y tipo de suelo en que fueron registrados consistentes con el espectro de diseño seleccionado.

Por otra parte, para cada par de registros, se debe encontrar el espectro de respuesta elástica para 5% de amortiguamiento y combinarlos con el criterio de la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados (SRSS). Los registros deben escalarse de tal manera que el promedio de los espectros sea mayor que 1.17 ($1.3 - 0.1 \cdot 1.3$) veces el espectro del sismo de diseño para un factor de amortiguamiento de 0.05; o 1.17 veces el sismo máximo considerado. Todo esto en el rango de períodos: $0.5 T_D$ a $1.25 T_M$. Donde T_D es el período de la estructura para el sismo DBE y T_M es el período para el sismo MCE.

Algo muy importante, para complementar lo indicado sobre el escalamiento sísmico es lo que recomienda el ASCE-7-10, referente a estructuras que se hallan a menos de 5 km., del plano de ruptura de una falla activa y se refiere a que los factores de escalamiento deben ser obtenidos únicamente con los registros de la componente Normal a la falla. Para otros casos se debe trabajar con el criterio SRSS con las dos componentes.

4. MÉTODO DEL PROMEDIO CON PESOS PONDERADOS

El procedimiento denominado: "Procedimiento con pesos ponderados" (weighted average) utiliza la información sobre la aceleración espectral en un número determinado de períodos (se trabajará con 4 períodos). El procedimiento se aplica en los siguientes pasos:

- a) El primer valor de escalamiento en amplitud F_J ($J=1$ hasta 7) tiene la finalidad de disminuir el error entre la componente normal escalada y el Espectro MCE_R , la definición de error que esta dado en la siguiente ecuación:

$$E_J = \sum_{i=1}^4 w_i \left[S_{MCE_R}(T_i) - F_J S_{FN}(T_i) \right]^2 \quad (1)$$

Es decir, el error es la suma ponderada de los cuadrados de la diferencia entre la aceleración espectral MCE_R y la aceleración espectral de la componente normal escalada en cuatro períodos. Esta ecuación da como resultado la siguiente expresión directa del (Factor de escalamiento):

$$F_J = \frac{\sum_{i=1}^4 w_i S_{MCE_R}(T_i) S_{FN}(T_i)}{\sum_{i=1}^4 w_i S_{FN}^2(T_i)} \quad (2)$$

Los periodos y factores de peso están dados en la tabla 6.

Tabla 6 Pesos considerados para cuatro periodos

Periodo T_i (seg)	1.0	2.0	3.0	4.0
Peso factor w_i	0.1	0.3	0.3	0.3

- b) Las componentes normales del paso anterior no cumplen con el criterio del ASCE 7-10. Por lo tanto se debe construir el promedio de las siete componentes escaladas y comparar con el espectro MCE_R en el rango de periodos $0.5T_D$ a $1.25T_M$. Calcular los valores del periodo utilizando el procedimiento de ELF. El espectro promedio no debe ser menor que el espectro MCE_R en el rango de los periodos de interés. Para cumplir con este criterio, se determina un F_1 factor de escalamiento, que se aplica a todos los movimientos. Factor final que representa el producto de los dos factores $F_J F_1$.

5. SISMOS ESCALADOS PARA ESTRUCTURAS UFA-ESPE

El periodo promedio de vibración de los 6 bloques estructurales de la UFA-ESPE, que tienen aisladores sísmicos es $T_D = 3.0 s$, para el sismo DEB y para el sismo MCE es $T_M = 3.4 s$. De tal manera que el rango de periodos de escalamiento se encuentra entre 1.5 y 4.25 s., $0.5 T_D - 1.25 T_M$. En la tabla 7 se resume el cálculo de los factores de escalamiento.

Tabla 7 Cálculo de factores de escalamiento mediante el método del Promedio de Pesos Ponderados.

FACTORES DE ESCALAMIENTO							
	EQ1	EQ2	EQ3	EQ4	EQ5	EQ6	EQ7
$S_{MCE}(t=1)$	0,941	0,941	0,941	0,941	0,941	0,941	0,941
$S_{FN}(t=1)$	0,815	0,873	0,710	0,512	0,732	0,933	0,729
$S_{MCE}(t=2)$	0,471	0,471	0,471	0,471	0,471	0,471	0,471
$S_{FN}(t=2)$	0,198	0,561	0,314	0,411	0,429	0,396	0,257
$S_{MCE}(t=3)$	0,314	0,314	0,314	0,314	0,314	0,314	0,314
$S_{FN}(t=3)$	0,162	0,436	0,176	0,421	0,394	0,147	0,147
$S_{MCE}(t=4)$	0,235	0,235	0,235	0,235	0,235	0,235	0,235
$S_{FN}(t=4)$	0,191	0,326	0,078	0,195	0,186	0,071	0,084
F_J	1,375	0,869	1,461	1,128	1,084	1,144	1,528
F_1	1,200	1,200	1,200	1,200	1,200	1,200	1,200
$F_1 F_J =$	1,650	1,042	1,754	1,353	1,301	1,373	1,833

En la figura 12 se presentan los espectros encontrados con los registros de las componentes normales multiplicados por los valores de la última fila de la tabla 7. Se indica además el espectro promedio y se observa que los espectros que se hallan con los registros EQ1 (Gazly 1976) y EQ7 (Turquía 1999) se encuentran por debajo del espectro promedio para el rango de períodos de interés.

Ahora, en la figura 13 se presenta el espectro promedio escalado y se compara con el espectro MCE_R , se aprecia que en el rango de interés 1.5-4.25 s. El espectro promedio escalado se aproxima bastante bien al espectro MCE_R .

Por lo tanto, para hallar la respuesta no lineal del sistema de aislamiento cada uno de los acelerogramas se multiplicarán por el último valor de Tabla 7. A continuación se indica el modelo constitutivo de los aisladores FPT.

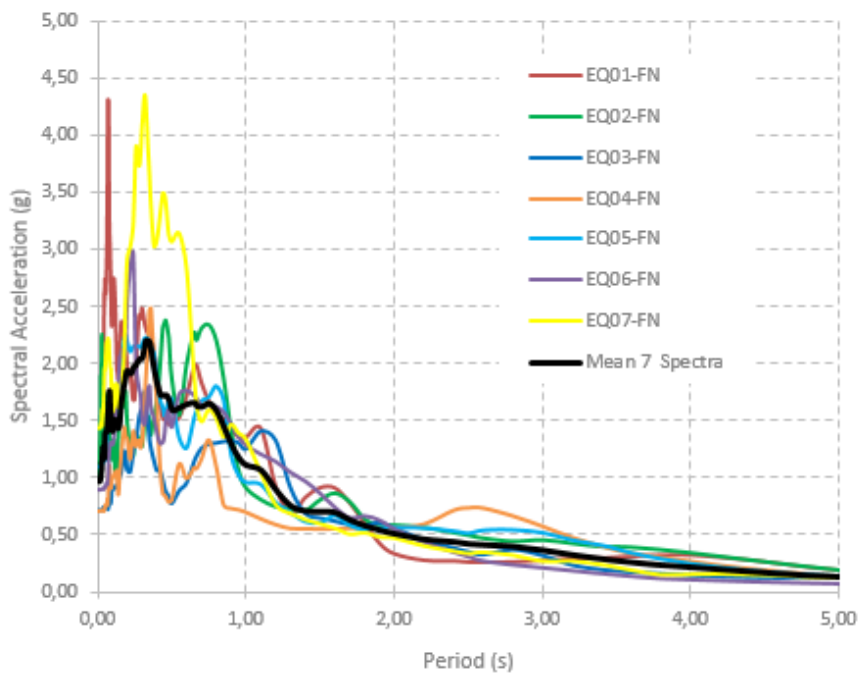


Figura 12 Espectros de respuesta elástica para 5% de amortiguamiento., encontrados con acelerogramas escalados y espectro promedio.

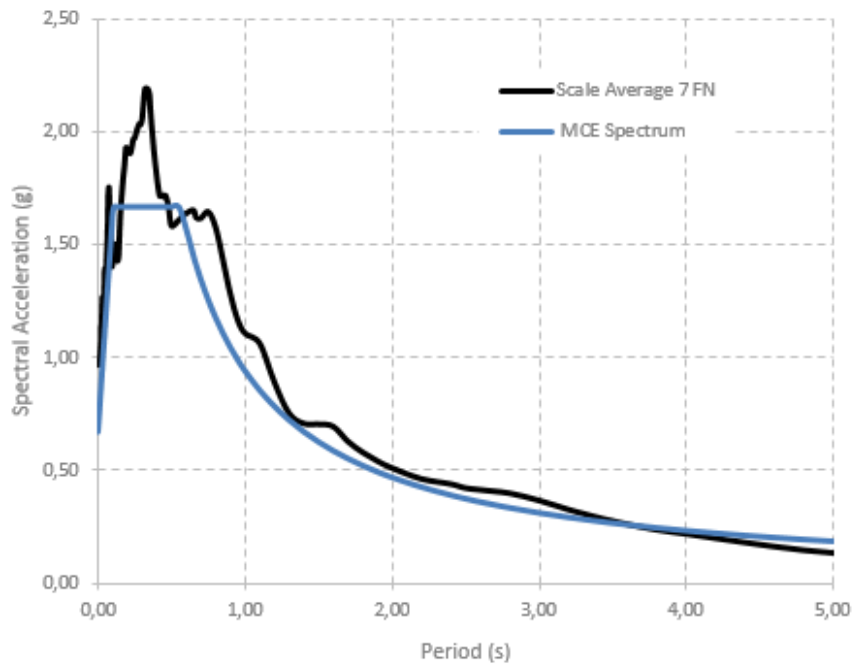


Figura 13 Espectro promedio escalado en el rango de 1.5 a 4.25 seg., y espectro MCE.

6. MODELO DE TRES FASES

En la figura 2 se presentó, la nomenclatura del aislador de triple péndulo de fricción; las dimensiones allí indicadas corresponden al FPT8833/12-12/8-6, que es el aislador tipo del nuevo Centro de Investigaciones de la UFA-ESPE.

Para el aislador de triple péndulo, Fenz y Constantinou (2007, 2008); Fadi y Constantinou (2010) presentaron un modelo de desempeño de cinco etapas. En base a los 12 parámetros geométricos y cuatro coeficientes de roce, que definen al aislador. Normalmente, se tiene:

- $R_1 = R_4 \gg R_2 = R_3$
- $\mu_2 = \mu_3 < \mu_1 = \mu_4$
- $d_1 = d_4$ y $d_2 = d_3$
- $h_1 = h_4$ y $h_2 = h_3$

Con lo que se reduce el número de parámetros geométricos a 6 y los coeficientes de roce a 2. Esto conduce a tener un nuevo modelo de desempeño del aislador FTP de 3 fases. McVitty y Constantinou (2015). Para describir el modelo de tres fases, se necesita presentar las siguientes ecuaciones:

$$R_{i,eff} = R_i - h_i \quad \text{Para } i \text{ de } 1 \text{ a } 4. \quad (3)$$

$$d_i^* = \frac{R_{i,eff}}{R_i} \quad (4)$$

Donde R_i es el radio de curvatura; h_i es la altura, presentada en la figura 2; $R_{i,eff}$ es el radio de curvatura efectivo; d_i^* es la capacidad de desplazamiento. El subíndice i , varía de 1 a 4. A continuación se indican las 3 fases o regímenes del modelo.

- **Régimen I**

El desplazamiento se da solamente en las placas 2 y 3.

$$0 \leq u \leq u^*$$

$$u^* = 2 (\mu_1 - \mu_2) R_{2,eff} \quad (5)$$

$$F = \frac{W}{2 R_{2,eff}} u + \mu_2 W \quad (6)$$

Donde u es el desplazamiento lateral del aislador; F es la fuerza lateral aplicada; W es el peso que gravita sobre el aislador. A la izquierda de la figura 14 se aprecia al aislador interior desplazándose en las superficies 2 y 3; a la derecha se muestra el diagrama de histéresis correspondiente.

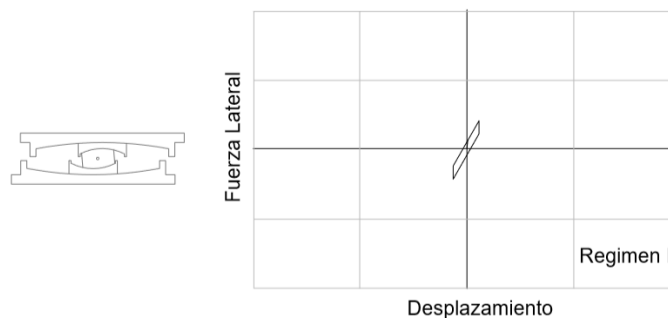


Figura 14 Desempeño de aislador en Régimen I.

Fuente: Mc Vitty y Constantinou (2015)

- **Régimen II**

El movimiento en el aislador interior llega a los topes y empieza a desplazarse en las superficies 1 y 4. Normalmente es en este régimen en que trabaja un aislador ante un sismo de intensidad moderada y alta. Las ecuaciones se indican a continuación y en la figura 15 se presenta la curva de histéresis correspondiente.

$$u^* \leq u \leq u^{**}$$

$$u^{**} = u^* + 2 d_1^* \tag{7}$$

$$F = \frac{W}{2 R_{1,eff}} (u - u^*) + \mu_1 W \tag{8}$$

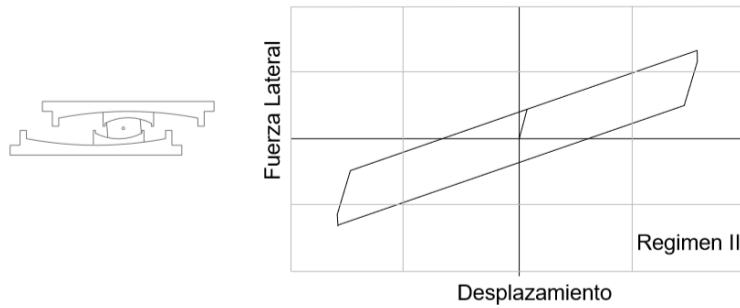


Figura 15 Desempeño de aislador en Régimen II.
Fuente: Mc Vitty y Constantinou (2015)

- **Régimen III**

Este régimen se presenta cuando el sismo es extremadamente fuerte y el aislador interior se topa con los topes exteriores, en estas condiciones empieza a deslizarse el aislador interior en las superficies 2 y 3. Las ecuaciones de cálculo y el desempeño se indica en la figura 16.

$$u^{**} \leq u \leq u_{cap}$$

$$u_{cap} = 2 d_1^* + 2 d_2^* \tag{9}$$

$$F = \frac{W}{2 R_{2,1ff}} (u - u^{**}) + \frac{W}{2 R_{1eff}} (u^{**} - u^*) + \mu_1 W \tag{10}$$

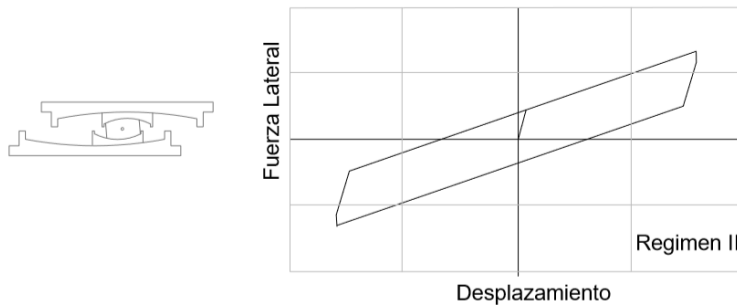


Figura 16 Desempeño de aislador en Régimen III.
Fuente: Mc Vitty y Constantinou (2015)

7. ANÁLISIS NO LINEAL

Para el análisis no lineal se plantea un modelo bilineal, para encontrar el desempeño sísmico del aislador, el mismo que no contempla degradación de rigidez en la descarga ni degradación de resistencia; muy similar al indicado a la derecha de la figura 15.

El punto de fluencia del modelo bilineal, se halla con las ecuaciones que definen la fuerza y desplazamiento en el régimen I; y el punto último se encuentra con la ecuación que determina la fuerza y desplazamiento para el régimen II. Es un modelo conservador ya que se pudo considerar como punto último las ecuaciones del régimen III.

En este apartado se describe brevemente los aspectos fundamentales del análisis no lineal, para el modelo constitutivo bilineal.

A la izquierda de la figura 5 se definen las 5 ramas que considera el modelo, en la rama uno trabaja exclusivamente en el rango elástico con una rigidez K_e que es la pendiente de esta recta, cuando se supera la fuerza de fluencia F_y se ingresa a la rama dos denominada post fluencia cuya pendiente es la rigidez K_p . En la rama dos se va controlando la velocidad, cuando esta llega a cero se alcanza el punto de control 2, que se indica a la derecha de la figura 5; ingresando a la rama de descarga definida por 3 con una rigidez K_e .

La rama 4 es similar a la rama 2 y la rama 5 a la rama 3, pero actuando el sismo en sentido contrario.

En análisis no lineal, es muy importante la determinación de los puntos de quiebre, en forma exacta y para lograr este objetivo se disminuye el incremento de tiempo Δt , como se ve más adelante. (Aguiar 2012, Freire y Ortíz 2014)

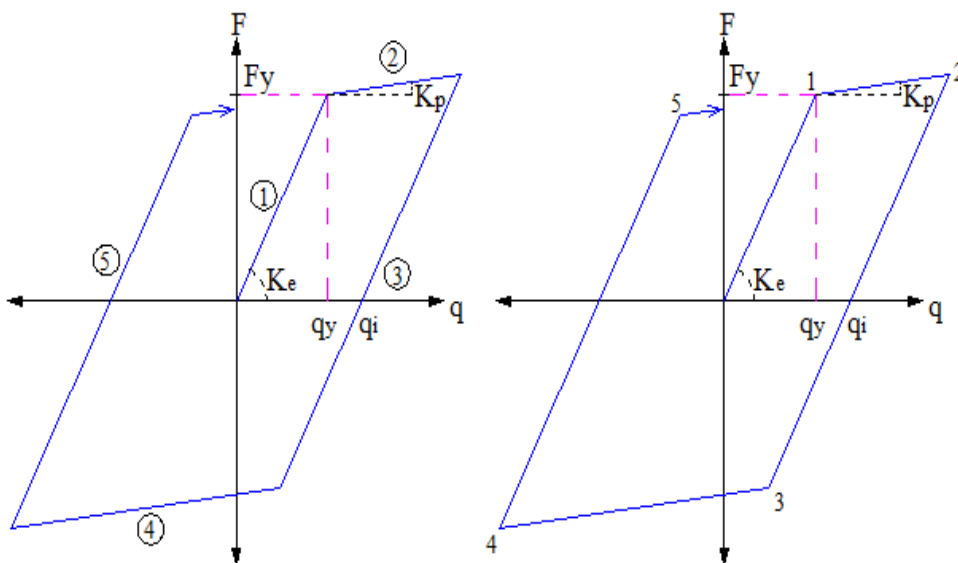


Figura 17 Identificación de ramas y puntos de quiebre del modelo bilineal.

En la figura 18 se presenta que para el tiempo t_i sobre el sistema gravita una fuerza F_i , que está muy próxima a la fuerza de fluencia F_Y , al encontrar la respuesta para un nuevo incremento de tiempo Δt , se tiene el tiempo t_{i+1} y se halla la fuerza F_{i+1} que es mayor a la de fluencia F_Y . En este caso, se debe retornar al punto t_i y volver a calcular la respuesta con un menor incremento de tiempo, Δt^* .

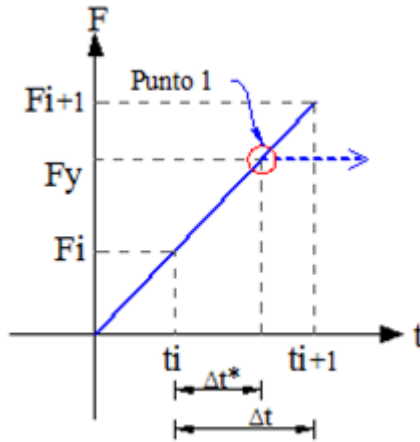


Figura 18 Determinación del punto de quiebre 1.

El nuevo incremento de tiempo Δt^* se obtiene por triángulos semejantes en función de las fuerzas o en función de los desplazamientos.

$$\Delta t^* = \frac{F_Y - F_i}{F_{i+1} - F_i} \Delta t \tag{11}$$

$$\Delta t^* = \frac{q_Y - q_i}{q_{i+1} - q_i} \Delta t \tag{12}$$

La aceleración en Δt^* se encuentra con la siguiente ecuación, cuya deducción es muy similar a la anterior.

$$\ddot{u}^* = \ddot{u}^i + \frac{\Delta t^*}{\Delta t} (\ddot{u}_{i+1} - \ddot{u}_i) \tag{13}$$

Donde: $\ddot{u}_i, \ddot{u}_{i+1}, \ddot{u}^*$, son las aceleraciones del suelo en los tiempos t_i, t_{i+1} y en $t_i + \Delta t^*$. Normalmente se hacen varias iteraciones para llegar al punto de quiebre 1 y se ingresa a la rama 2.

En la rama 2, se cambia la rigidez del sistema a K_p , se determina un nuevo amortiguamiento $c = 2 \xi \sqrt{m K_p}$. Donde ξ es el factor de amortiguamiento y m es la masa del sistema y se restablece el valor de Δt .

Como se indicó en la rama 2 se controla la velocidad, estrictamente el punto en que cambia de signo la velocidad, ese caso significa que se pasó por la velocidad

igual a cero, cuando esto sucede, se retorna nuevamente al tiempo t_i , y se calcula el nuevo Δt^* , con la siguiente expresion, que se obtiene de triángulos semejantes considerando que en el punto de quiebre 2 la velocidad es cero.

$$\Delta t^* = \frac{\dot{q}_i}{\dot{q}_i - \dot{q}_{i+1}} \Delta t \quad (14)$$

Donde: \dot{q}_i, \dot{q}_{i+1} , son las velocidades en los tiempos t_i, t_{i+1} . De igual manera para este menor incremento de tiempo Δt^* se determina la aceleración del suelo \ddot{u}^* y se procede en forma similar a la determinación del punto de quiebre 1.

En resumen para la determinación de los puntos de quiebre 2 y 4 se controla que la velocidad sea cero y para los puntos de quiebre 3 y 5 que la fuerza del sistema sea F_y .

El procedimiento de cálculo presentado es válido para el modelo bilineal indicado en la figura 17.

8. MÉTODO β DE NEWMARK

El marco teórico del método β de Newmark, se halla descrito en Aguiar (2012), Chopra (2001). Aquí se presenta el procedimiento para el análisis no lineal. Partiendo de que inicialmente se halla en la rama 1; en este caso y al inicio del programa para $t = 0$, las condiciones iniciales son nulas. Con esta introducción el procedimiento de cálculo es el siguiente.

- i) Se determina la rigidez equivalente \hat{k}

$$\hat{k} = k + \frac{1}{\beta \Delta t^2} m + \frac{\gamma}{\beta \Delta t} c \quad (15)$$

Donde: m, c, k , son la masa, amortiguamiento y rigidez del sistema; Δt es el incremento de tiempo con que se halla la respuesta; $\gamma = 0.5$; β vale 1/6 para cuando se considera aceleración lineal; 1/4 para aceleración constante y 1/8 para aceleración escalonada.

- ii) Se encuentra el incremento de cargas $\Delta \hat{Q}$

$$\Delta \hat{Q} = -m \ddot{u}_{i+1} + m \left[\frac{1}{\beta \Delta t} \dot{q}_i + \left(\frac{1}{2\beta} - 1 \right) \ddot{q}_i \right] - c \left[\left(1 - \frac{\gamma}{\beta} \right) \dot{q}_i + \left(1 - \frac{\gamma}{2\beta} \right) \Delta t \ddot{q}_i \right] - k q_i \quad (16)$$

- iii) Se halla el incremento de desplazamiento Δq . Para un sistema de un grado de libertad se tiene:

$$(17)$$

$$\Delta q = \frac{\Delta \hat{Q}}{\hat{k}}$$

- iv) Se determina el desplazamiento y velocidad en el nuevo incremento de tiempo.

$$q_{i+1} = q_i + \Delta q \quad (18)$$

$$\dot{q}_{i+1} = \frac{\gamma}{\beta \Delta t} \Delta q_{i+1} + \left(1 - \frac{\gamma}{\beta}\right) \dot{q}_i + \left(1 - \frac{\gamma}{2\beta}\right) \Delta t \ddot{q}_i \quad (19)$$

- v) Como se desea generalizar el cálculo a las otras ramas del modelo bilineal, es preferible calcular la aceleración en el nuevo incremento de tiempo utilizando la ecuación diferencial del movimiento.

$$\ddot{q}_{i+1} = -\frac{m \ddot{u}_{i+1} + c \dot{q}_{i+1} + k q_{i+1}}{m} \quad (20)$$

Se destaca que:

$$f_{s_{i+1}} = k q_{i+1} \quad (21)$$

$$f_{a_{i+1}} = c \dot{q}_{i+1} \quad (22)$$

Donde f_s, f_a son las fuerzas asociadas a la rigidez (elasticidad) y amortiguamiento del sistema, que van cambiando de acuerdo a la rama en que se hallan en el modelo bilineal.

- vi) Se determina la fuerza $f_{s_{i+1}} = k q_{i+1}$; y se compara con la fuerza de fluencia F_y . Si es menor significa que se continúa en la rama 1 y se continúa trabajando con la misma rigidez y amortiguamiento. Cuando la fuerza en el sistema es mayor que F_y se determina el punto de quiebre 1, en la forma indicada en el apartado anterior.
- vii) Cuando ya se ha ingresado a la rama 2, se vuelve a calcular con el incremento de tiempo Δt , se cambia la rigidez y amortiguamiento, como se indicó en el apartado anterior y se halla la respuesta en el tiempo pero esta vez lo que se va controlando es la velocidad. Cuando la velocidad es cero pasa a la rama 3, etc. La forma de cálculo del punto de quiebre 2 se indicó en el apartado anterior.

9. RESULTADOS

En base a la geometría del aislador, indicada en la figura 2 y considerando los siguientes coeficientes de roce $\mu_1 = \mu_4 = 0.07$; $\mu_2 = \mu_3 = 0.01$. Se obtuvo los

parámetros del modelo de tres fases de Mc Vitty y Constantinou (2015) para un peso total que llega al aislador $W = 268 T$.

El peso indicado es el valor promedio que llega a los aisladores. Con los valores de fuerzas y desplazamiento lateral, correspondientes a las dos primeras fases se halló la rigidez elástica y la de post fluencia; así como los desplazamientos de fluencia y último (Pero asociado a la segunda fase) con lo que se tiene definido todo el modelo bilineal.

Finalmente los acelerogramas considerados se multiplicó por los coeficientes encontrados en el escalamiento de los sismos y se halló la respuesta en el tiempo, la misma que se presenta a partir de la figura 19 hasta la figura 25.

Antes de comentar los resultados, se debe destacar que los sismos considerados fueron muy fuertes y causaron mucho daño en las estructuras. A manera de ejemplo basta indicar que luego del sismo de Northridge de 1994, se creó el Comité VISION 2000 para definir la nueva filosofía de diseño sísmico, en ese entonces para el nuevo siglo XXI. Esto debido a las grandes pérdidas humanas y económicas que tuvieron.

Ahora, para ver el desempeño del aislador utilizado en la construcción del nuevo Centro de Investigaciones Científicas de la UFA-ESPE, a los acelerogramas de esos sismos se les ha multiplicado por los factores indicados en la tabla 7, que se encuentran entre 1 y 2. De tal manera que los acelerogramas resultantes corresponden a verdaderos mega sismos y sin embargo de ello el desplazamiento lateral máximo encontrado es de 48 cm., asociado al sismo de Loma Prieta de 1989, con el registro de Saratoga.

En las figuras 19 a 25 se indica a la izquierda el comportamiento no lineal del aislador y a la derecha se tiene las respuestas de desplazamiento, velocidad y aceleración del aislador.

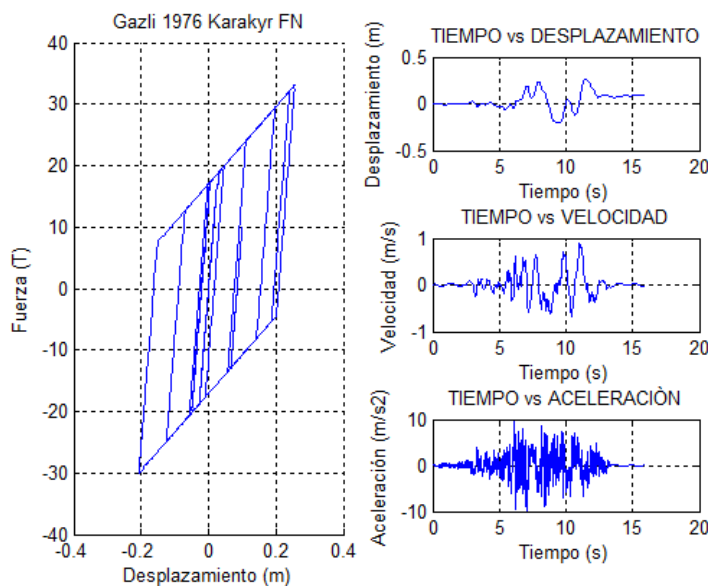


Figura 19 Comportamiento del aislador y respuestas de desplazamiento, velocidad y aceleración ante el sismo de Gazli 1976. Registro Karakyr.

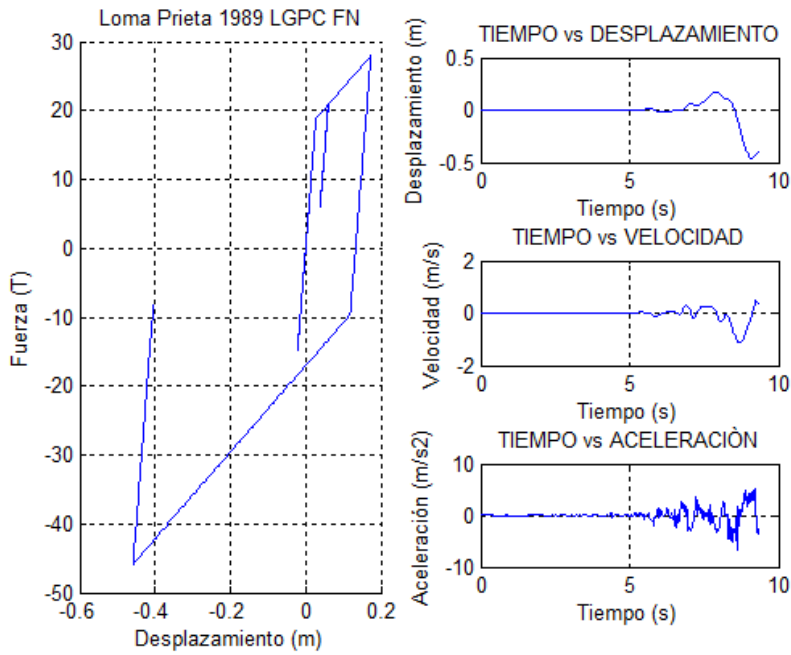


Figura 20 Comportamiento del aislador y respuestas de desplazamiento, velocidad y aceleración ante el sismo de Loma Prieta 1989. Registro LGPC.

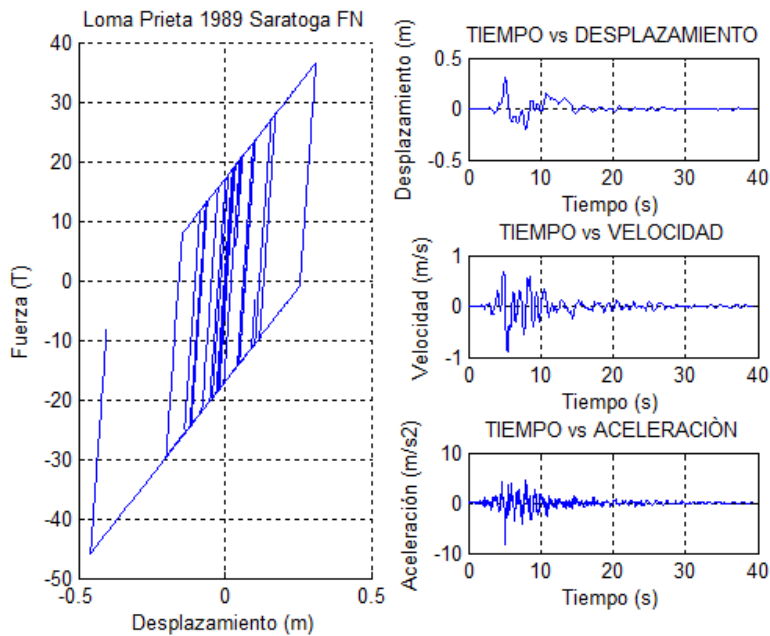


Figura 21 Comportamiento del aislador y respuestas de desplazamiento, velocidad y aceleración ante el sismo de Loma Prieta 1989. Registro Saratoga.

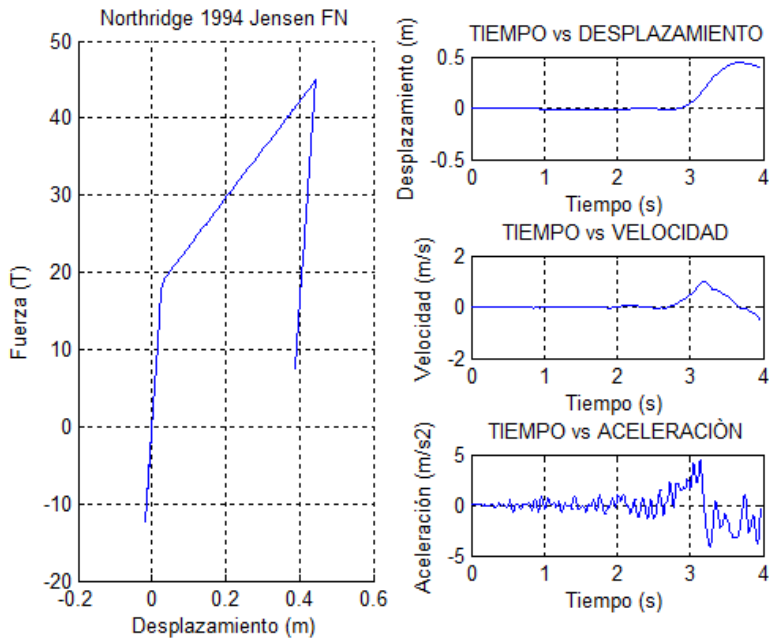


Figura 22 Comportamiento del aislador y respuestas de desplazamiento, velocidad y aceleración ante el sismo de Northridge 1994. Registro Jensen.

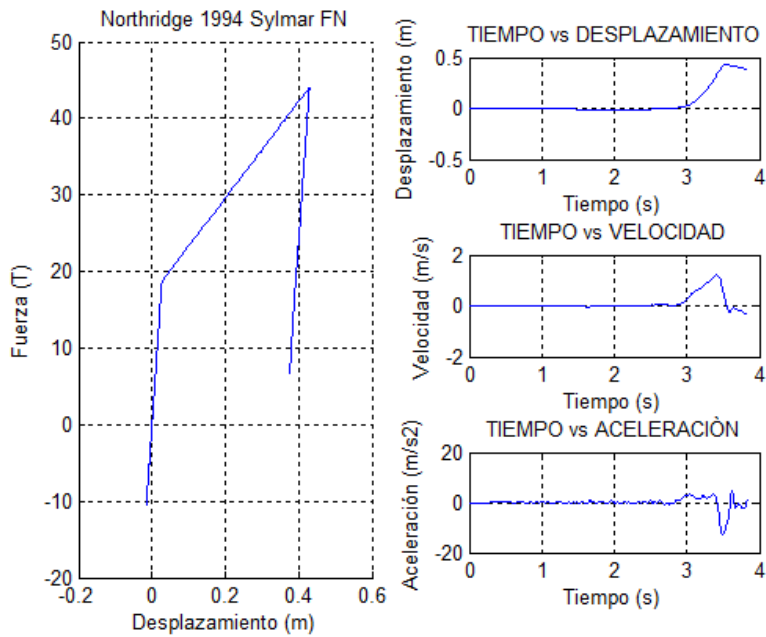


Figura 23 Comportamiento del aislador y respuestas de desplazamiento, velocidad y aceleración ante el sismo de Northridge 1994. Registro Sylmar.

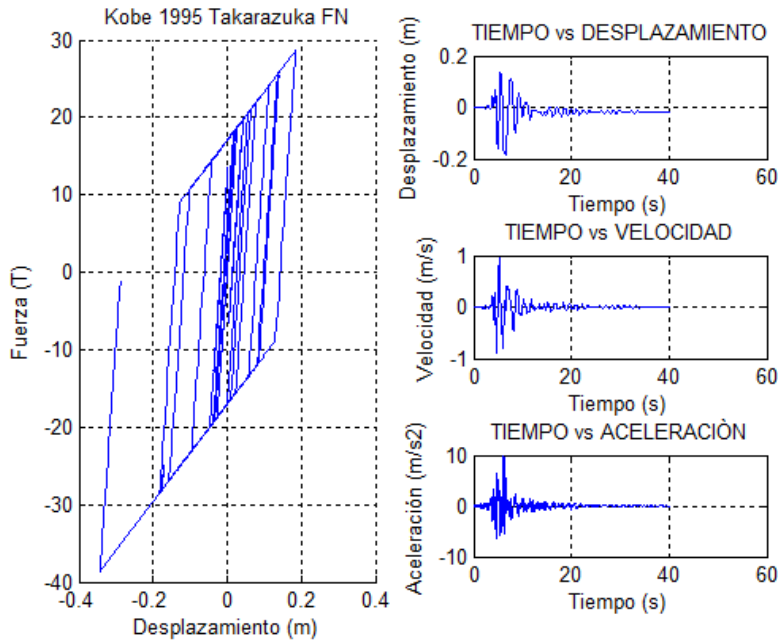


Figura 24 Comportamiento del aislador y respuestas de desplazamiento, velocidad y aceleración ante el sismo de Kobe 1995. Registro Takarazuka.

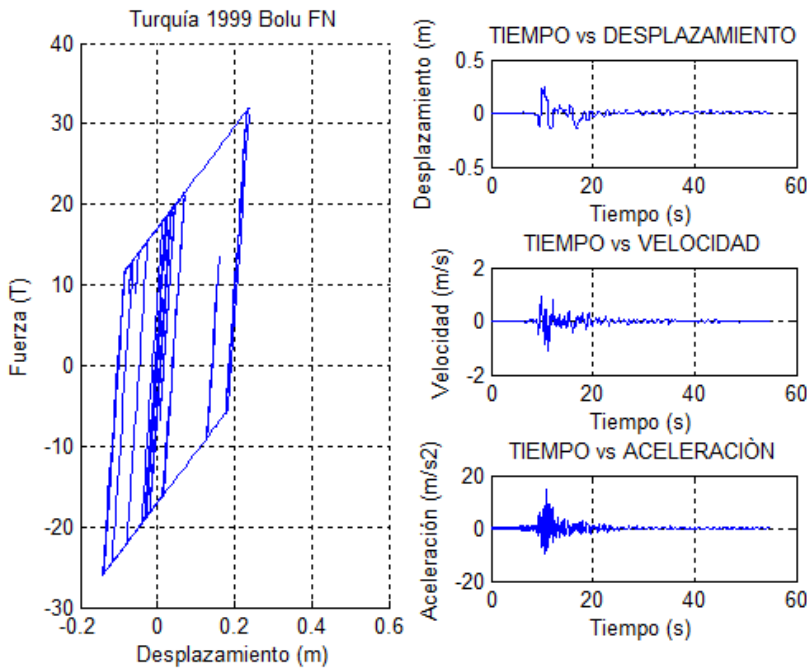


Figura 25 Comportamiento del aislador y respuestas de desplazamiento, velocidad y aceleración ante el sismo de Turquía 1999. Registro Bolu.

El desplazamiento del aislador FPT8833/12-12/8-6, es de 56.89 cm. (Constantinou *et al.* 2015) cantidad mayor a los 48 cm., que se esperaría con el sismo de Loma Prieta de 1989 (Registro de Saratoga) multiplicado por 1.754. Este sismo es de alta frecuencia y prácticamente se ha duplicado su registro, a pesar de ello el aislador resiste satisfactoriamente.

10. CONCLUSIONES

Se ha presentado el marco teórico del modelo denominado: Promedio con Pesos Ponderados para el escalamiento de sismos por tratarse de un modelo nuevo; de igual manera y con la misma razón se ha indicado el modelo de tres fases desarrollado por McVitty y Constantinou (2015) para definir el comportamiento no lineal de un aislador de triple péndulo de fricción.

Es importante que se conozcan los modelos indicados en el párrafo anterior ya que representan el estado del arte, en los dos temas anotados. Únicamente para complementar el marco teórico se describió con bastante detalle el análisis no lineal de un sistema de un grado de libertad para un modelo bilineal.

Pero el objetivo central de este artículo era conocer el desempeño del aislador FPT8833/12-12/8-6, que será colocado en el nuevo Centro de Investigaciones de la UFA-ESPE, ante siete sismos impulsivos que causaron mucho daño a nivel mundial; los mismos que han sido amplificados por los factores de escalamiento encontrados en el estudio, para que sean compatibles con el espectro máximo considerado, con esta amplificación se convierten en mega sismos y sin embargo de ello la capacidad de desplazamiento del aislador FPT8833/12-12/8-6, es mayor a la demanda encontrada. Por lo tanto, se comportan satisfactoriamente.

REFERENCIAS

1. Aguiar R., Morales E., Guaygua B., Rodríguez M., (2016), "Variante propuesta a los métodos simplificados para el análisis sísmico de estructuras con aisladores FPS de la tercera generación", *Revista Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería*, En revisión arbitral.
2. Aguiar R., Guaygua B., (2015), "Análisis sísmico de Bloque Estructural 3 del nuevo Centro de Investigaciones de la UFA-ESPE, con aisladores FPS de la tercera generación" *Revista Ciencia*, **17 (3)**, 425-440. <http://revista.ciencia.espe>
3. Aguiar Roberto, (2012), *Dinámica de Estructuras con CEINCI-LAB*, Instituto Panamericano de Geografía e Historia, IPGH. Segunda edición, 416 p., Quito.

4. ASCE/SEI 7-10, (2010), *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*. American Society of CML Engineers, ASCE. SEI Structural Engineering Institute, 658 p.
5. Bonifaz Hugo, (2015), *Informe de suelos. Edificio de Investigaciones*. Laboratorio de Ensayo de Materiales LEM-ESPE, 33 p., Sangolquí.
6. Chopra A. K. (2001), *Dynamic of structures: Theory and applications to earthquake engineering*, 2nd edn. Prentice Hall: Saddle River New York.
7. Constantinou, M.C, Kalpakidisk, I., Filiatrault A., Ecker R.A., (2011), *LRFD-Based Analysis and Design Procedures for Bridge Bearings and Seismic Isolators*, MCEER Report 11-0004.
8. Constantinou M., Aguiar R., Morales E., Caiza P., (2016), "Desempeño de aislador FPT8833/12-12/8-5 en el análisis sísmico del Centro de Investigaciones y de Post Grado", *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, en Revisión Arbitral.
9. Fadi F., and Constantinou M. (2010), "Evaluation of simplified methods of analysis for structures with triple friction pendulum isolators", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 39, 5-22
10. Fenz D., Constantinou M., (2007), Mechanical behavior of multi-spherical sliding bearings, Technical Report MCEER-08-0007, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research. *Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research*. Available at <http://mceer.buffalo.edu/publications/catalog/reports/Mechanical-Behavior-of-Multi-Spherical-Sliding-Bearings-MCEER-08-0007.html>
11. Fenz, D.M. and Constantinou, M.C., (2008), *Development, implementation and verification of Dynamic Analysis Models for Multi-Spherical sliding bearings*. Report No. **MCEER-08-0018**, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, NY. Available at <http://mceer.buffalo.edu/publications/catalog/reports/Development-Implementation-and-Verification-of-Dynamic-Analysis-Models-for-Multi-Spherical-Sliding-Bearings-MCEER-08-0018.html>
12. Freire A., Ortíz M., (2014), *Análisis no lineal de estructuras*, Tesis de grado para obtener título de Ing. Civil, Universidad de Fuerzas Armadas ESPE.
13. McVitty W.J., and Constantinou M.C., (2015), "Property Modification Factors for Seismic Isolators: Design Guidance for Buildings", MCEER Report. 15-0005, 242 p. Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo, Buffalo, NY, 2015. Available at <http://mceer.buffalo.edu/publications/catalog/reports/Property-Modification-Factors-for-Seismic-Isolators-Design-Guidance-for-Buildings-MCEER-15-0005.html>

14. NEC-15 (2015) *Norma Ecuatoriana de la Construcción, SE-DS, Cargas Sísmicas. Diseño Sismo Resistente*. 138 p. Quito.
15. Norma Ch2745, (2013), *Análisis y diseño de edificios con aislación sísmica*, Norma Chilena, Segunda Edición, 88 p., Santiago.