

RESPUESTA EN EL TIEMPO DE BLOQUE ESTRUCTURAL 3 CON AISLADORES FPT DE UFA- ESPE ANTE SISMOS INTERPLACA TIPO THRUST

TIME RESPONSE ANALYSIS FOR STRUCTURAL BLOCK 3 OF UFA-ESPE BUILDING, USING FPT INSULATORS IN CASE OF INTERPLATE THRUST EARTHQUAKES

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: rraquiara@espe.edu.ec

Majorie Arias

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: marjorieariass26@hotmail.com

Gregory Pachacama

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: glpachacama@espe.edu.ec

Evelyn Iza

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: evelyniza_1e6@hotmail.com

RESUMEN

Se han seleccionado cinco sismos interplaca tipo thrust, los mismos que han sido escalados al espectro de la Norma Ecuatoriana de la Construcción de 2015, que corresponde al sismo de diseño DBE y al espectro máximo considerado MCE; para encontrar la respuesta en el tiempo, mediante análisis no lineal de cada uno de los pórticos del Bloque Estructural 3.

Se seleccionaron cuatro sismos ocurridos en Perú y son los registrados en 1966, 1970, 1974 y 2007. El quinto corresponde al sismo de Bahía de Caráquez de 1998, en estos sismos se aplicó la técnica "weighted average" para el escalamiento de acuerdo a lo que propone el ASCE 7-10.

Estos sismos son de larga duración, con una o dos fases intensas y con varios pulsos fuertes de energía que los convierten en sismos muy destructivos, por lo que era necesario conocer las respuestas en aceleraciones y desplazamientos del aislador y de cada uno de los pisos de la estructura. Por otra parte se determinó espectros de piso que servirán para estudios futuros de cálculo de pérdidas.

Palabras claves: Escalamiento de sismos. Respuesta en el tiempo. Método “weighted average”.

ABSTRACT

Five interplate thrust earthquakes were selected, The seism were scaled to the spectrum of the “Norma Ecuatoriana de la Construcción 2015”, that corresponds to the design seism, DBE and to the maximum considered seism, MCE; to find the time response using inelastic analysis of each frames structural block 3.

We selected four seism of Perú that were registered in 1966, 1970, 1974 and 2007. The fifth seism corresponds to Bahía de Caraquez of 1998, for the scaling of these seism we apply the “weighted average” method, recommended by ASCE 7-10.

These earthquakes are long period, with one or two intense times and some strong pulses of energy that convert in seism more destructive, for this reason we need to know the accelerations and displacements of the insulator and each floor of the structure. On the other hand we found Spectrum of floor that will be using to future studies of calculating losses.

Keywords: Scaling of earthquakes. Time response. Weighted average method.

1 INTRODUCCIÓN

En términos sencillos se puede decir que los aisladores sísmicos desacoplan a la estructura del suelo ya que se crea una interfaz entre éstas. Interfaz creada por los aisladores que tienen una rigidez lateral muy pequeña que ocasiona una flexibilización de la estructura y por ende un mayor período natural de vibración.

Al tener un mayor período de vibración se ingresa a una zona del espectro donde las ordenas espectrales son muy bajas pero las ordenadas del espectro de desplazamiento son muy altas.

Para ilustrar lo expuesto en la figura 1 se presentan los espectros de aceleraciones, a la izquierda y de desplazamientos a la derecha para un Proyecto Estructural ubicado en la ciudad de Quito, el espectro de aceleraciones se obtuvo utilizando la Norma Ecuatoriana de la Construcción, NEC-15, en un perfil “D”. En

cambio el espectro de desplazamientos se obtuvo de un estudio de peligrosidad sísmica para ese sitio, en que se modificó la forma del espectro de desplazamientos.

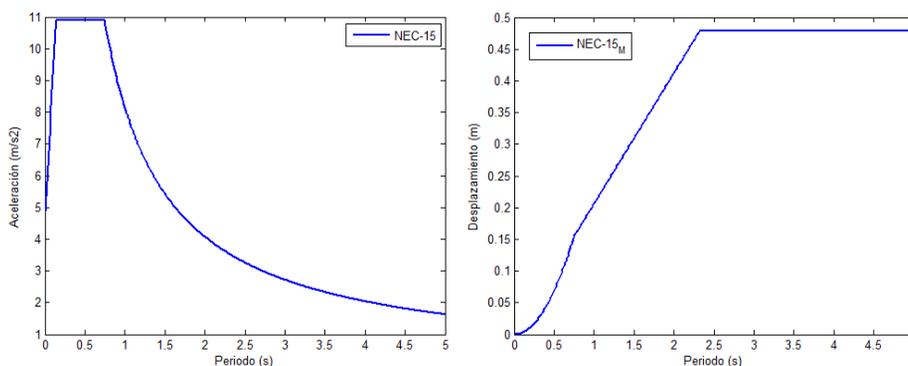


Figura 1 Espectro de Aceleraciones y de Desplazamientos, para un Proyecto Estructural de la Ciudad de Quito. Fuente: Aguiar y Morales (2015)

Lo que se desea ilustrar es que si el período de vibración de la estructura con aisladores es 3 segundos, por ejemplo, la aceleración espectral es baja, alrededor de 2.5 m/s^2 pero el desplazamiento espectral es aproximadamente de 48 cm. De tal manera que las fuerzas son bajas pero los desplazamientos laterales son altos, en el sistema de aislación, lo que debe ser cubierto con un aislador que tenga una capacidad de desplazamiento mayor a la demanda.

Los aisladores sísmicos incorporan amortiguamiento a la estructura, en una cantidad considerable, claro está dependiendo de las características y tipo de aislador, tema que se hablará posteriormente. Por ahora, lo que se desea dejar claro es que este amortiguamiento de los aisladores conduce a menores ordenadas tanto en el espectro de aceleraciones como en el espectro de velocidades. Aguiar *et al.* (2008).

Entonces, lo que preocupa en las estructuras con aisladores es conocer en primer lugar la respuesta que van a tener ante la acción de diferentes sismos y segundo si el aislador seleccionado tiene la capacidad de desplazarse lo que la demanda sísmica le impone.

De ahí la importancia de realizar estudios de peligrosidad sísmica de un sitio del proyecto, para definir sismos con fuente similar, y encontrar la respuesta no lineal de la estructura a sabiendas que son los aisladores los que van a incursionar en el rango no lineal, tema que será abordado en los siguientes apartados de este artículo.

Es importante destacar que a nivel mundial, existe conciencia de que la mejor forma de diseñar las estructuras es mediante la incorporación de sistemas de control pasivo a la estructura. Sean estos aisladores sísmicos como en el presente caso (Retamales *et al.* 2015; Constantinou *et al.* 2011; Sarkisian *et al.* 2011). O mediante la incorporación de disipadores de energía. (Bozzo y Barbat, 1999; Hurtado y Bozzo, 2008; Nuzzo *et al.* 2015).

2 SISMOS INTERPLACA TIPO THRUST

El último sismo fuerte, interplaca tipo thrust (en inglés) o con bajo ángulo de buzamiento, con magnitud mayor a 7, registrado en el Ecuador es el de Bahía de Caráquez del 4 de agosto de 1998, que tuvo una magnitud de 7.2 y una profundidad focal de 22 km. La Intensidad en la Escala de Mercalli Modificada de este sismo en la zona epicentral fue de VIII, como se observa en la figura 2; la isosista de intensidad VII cubrió una buena parte de Manabí; la curva de intensidad VI llegó hasta Guayaquil, que se encuentra aproximadamente a 250 km., del epicentro.

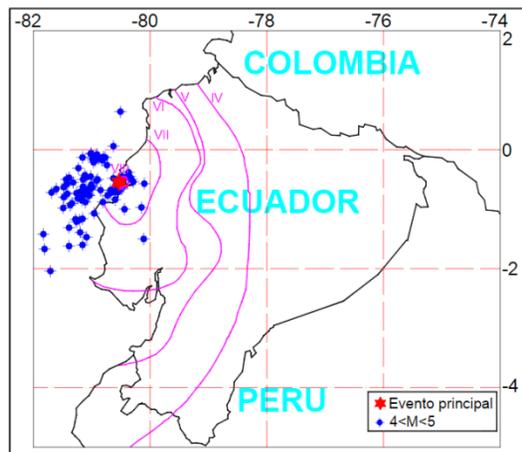


Figura 2 Isosistas del sismo del 4 de agosto de 1998 y réplicas hasta diciembre de 1998. Fuente: Egred (2009).

Lo que se quiere destacar con lo expuesto en el párrafo anterior, es que los sismos interplaca tipo thrust no solo causan daño en la región epicentral, sino que también producen daño a grandes distancias.

El sismo de Guayaquil de 1942, es otro sismo interplaca tipo thrust, su epicentro fue en Manabí y tuvo una magnitud de 7.9. Se conoce con el nombre de una ciudad distante del epicentro por el gran daño que causó en las pocas construcciones de hormigón armado de esa época, a tal punto que se llegó a pensar que este tipo de material no es apto para zonas sísmicas.

El sismo de Maule del 27 de febrero de 2010, que tuvo una magnitud de 8.8, es otro ejemplo de que el daño no solo se produce en la zona epicentral sino que alcanza grandes distancias. En efecto este sismo llevó al colapso el edificio de altura Alto Río ubicado en Concepción y generó mucho daño en otros edificios altos de Santiago, ubicados a 400 km., del epicentro. (Aguiar 2010; FCFM 2012).

Los sismos interplaca tipo thrust de magnitud mayor a 7, se caracterizan por:

- Ser sismos de gran duración.
- Generan daño a grandes distancias del epicentro.

- Tienen varias fases de movimiento intenso.
- Sus espectros en la zona descendente tienen varios picos característicos, en los que se incrementa la aceleración espectral.

En el Ecuador se tienen cuatro registros del Sismo de Bahía de Caráquez de 1998, dos de ellos fueron registrados en Manta y Salinas pero tuvieron problemas y no sirven ya que llegan a un valor máximo de $0.6 g$; no es que este sismo tuvo aceleraciones espectrales mayores al 60% de la gravedad, sino que hubo algún desperfecto en el registro.

Otro de los registros fue obtenido por la red sísmica del Austro en Cuenca, pero tiene valores muy bajos de aceleración. Finalmente el último registro y es el que se utiliza en este estudio fue hallado en la Universidad Católica Santiago de Guayaquil por el Instituto de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería Civil. Se tienen las dos componentes horizontales que tuvieron aceleraciones máximas de 120.9 gals, en la componente Norte Sur y 191.9 gals en la componente Este Oeste. La componente vertical tuvo una aceleración máxima de 85.6 gals. La duración de estos registros fue de 90 segundos.

En este artículo, interesa encontrar la respuesta en el tiempo del Bloque Estructural 3 de la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, ante algunos sismos interplaca tipo thrust cuya fuente tectónica sea similar a la de Ecuador y lo más apropiado para este efecto es trabajar con los sismos registrados en el Perú y que se indican en la figura 3. Por dos motivos, el primero de ellos por su cercanía con el Ecuador y el segundo porque fueron de magnitudes entre 7.9 y 8.1, similares a las que se esperan en el Ecuador para el sismo de diseño. DBE.

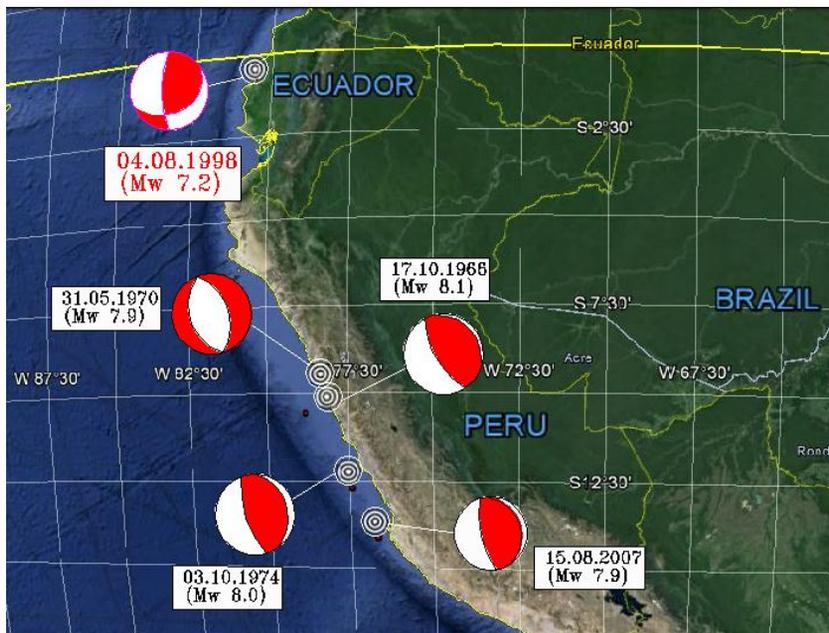


Figura 3 Sismos Interplaca Tipo Thrust seleccionados en este estudio.

En la tabla 1 se presenta información sismológica básica de los sismos seleccionados; las zonas afectadas y el número de víctimas de estos terremotos. Los sismos de Perú de 1966, 1970 y 1974 fueron utilizados en la elaboración de la norma sísmica de Perú de 1997. Completa la lista de sismos seleccionados el de Pisco de 2007, que acabó con muchas construcciones de adobe.

Tabla 1 Año, ubicación, magnitud, profundidad focal y afectación de los sismos de 1998, 1966, 1970, 1974 y 2007

| AÑO | FECHA | COORDENADAS DEL EPICENTRO | MAGNITUD M_w | PROFUNDIDAD FOCAL | ZONAS AFECTADAS | VICTIMAS |
|--------------|---------------|-----------------------------------|----------------|-------------------|---|---|
| ECUADOR-1998 | 4 de agosto | 0° 33' 0" S, 80° 31' 0" W | 7.1 | 22 | Bahía de Caráquez, Canoa; San Vicente | 1 muerto, 100 heridos |
| PERÚ-1966 | 17 de octubre | 10° 7' 0" S, 7° 0' 0" W | 8.1 | 37 | Costa del departamento de Lima, entre Lima y Supe | 220 muertos, 1.800 heridos |
| PERÚ- 1970 | 31 de mayo | 9° 28' 12" S, 78° 18' 36" W | 7.9 | 64 | Áncash, La Libertad, Huánuco y Lima | 70 000 muertos, 50 000 muertos y 20 000 desaparecidos |
| PERÚ-1974 | 3 de octubre | 12° 15' 0" S, 77° 31' 12" W | 8 | 21 | LIMA, CALLAO, COSTA CENTRAL | 252 muertos, 3600 heridos |
| PERÚ-2007 | 15 de agosto | 13° 21' 10.8" S, 76° 30' 36" W | 7.9 | 40 | Costa central del Perú | 595 muertos, 2 291 heridos, 431 000 damnificados |

A continuación en la figura 4 se presentan los acelerogramas de los sismos seleccionados, a la izquierda se tiene la componente Este-Oeste y a la derecha la componente Norte-Sur. Se aprecia que son sismos de larga duración. En el de Bahía de Caráquez de 1998, en el de Callao de 1974 y en el de Pisco de 2007 se observa en el registro, como que se habrían dado dos sismos en uno solo; en efecto se ve que una vez que termina la fase intensa y parece que el sismo finaliza, nuevamente se activa con otra fase intensa.

En todos los sismos seleccionados la fase intensa es de larga duración. El sismo de Pisco de 2007 duró alrededor de 3 minutos. Por cierto, su registro fue obtenido en la Universidad San Luis Gonzaga de la ciudad de Ica, situada aproximadamente a 240 km, del epicentro.

Interesa conocer cuál va a ser la respuesta de la estructura del Bloque 3 ante estos sismos que son de larga duración, con fases intensas muy grandes y que son dos sismos en uno. Interesa ver la respuesta no lineal.

En la tabla 2 se indica la nomenclatura con la cual se va a identificar cada uno de los registros, las aceleraciones máximas y mínimas y el tiempo de duración. Las aceleraciones son bajas porque los registros fueron obtenidos a distancias grandes de la fuente y para utilizar en la evaluación de la respuesta no lineal del Bloque Estructural 3, de la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, tienen que ser escalonadas (incrementadas) para que sean mayores que las ordenadas espectrales de la Norma Ecuatoriana de la Construcción, NEC-15, que

es el sismo DBE y mayor que las ordenadas espectrales del sismo MCE que se obtuvo multiplicando el espectro del DBE por 1.4

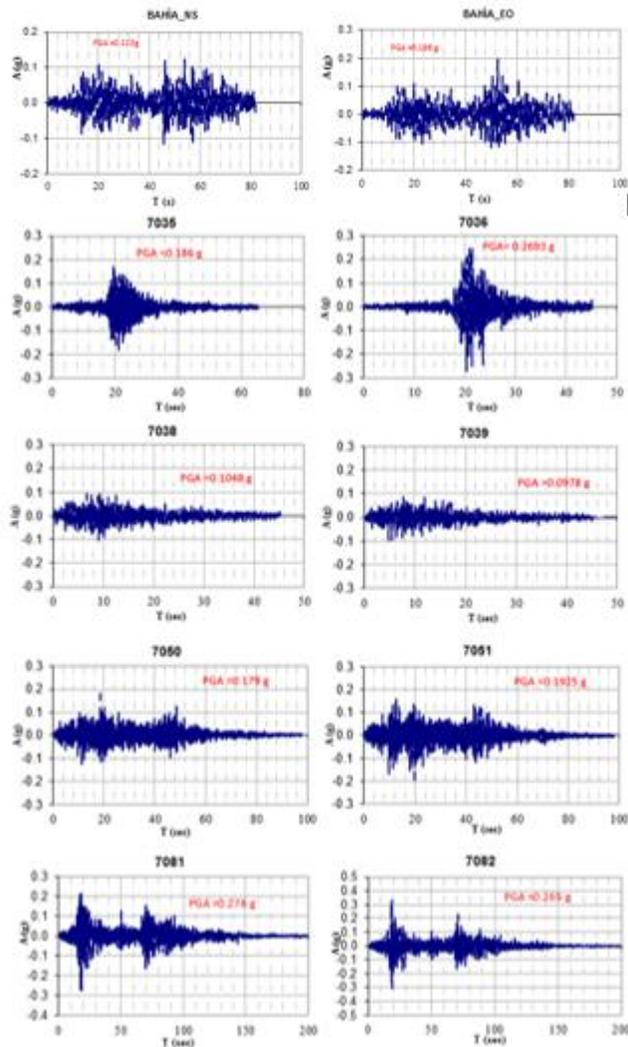


Figura 4 Acelerogramas de sismos interplaca tipo thrust seleccionados para encontrar la respuesta no lineal de las Estructuras del Bloque 3.

Tabla 2 Aceleración máximas y mínimas de los registros considerados en el estudio y nomenclatura que se utiliza en el artículo.

| Registro | Año | A_{max} (gals) | A_{min} (gals) | Tiempo (seg.) |
|-------------|------|---------------------|---------------------|------------------|
| Bahía_NS-88 | 1998 | 121 | 115 | |
| Bahía_EO-88 | 1998 | 192 | 115 | |
| 7035-66 | 1966 | 168 | 181 | 65,66 |
| 7036-66 | 1966 | 247 | 269 | 65,66 |
| 7038-70 | 1970 | 93,8 | 105 | 45,12 |
| 7039-70 | 1970 | 91,2 | 97,8 | 45,12 |
| 7050-74 | 1974 | 179 | 127 | 97,86 |
| 7051-74 | 1974 | 159 | 192 | 97,86 |
| 7081-07 | 2007 | 272 | 260 | 163,68 |
| 7082-07 | 2007 | 334 | 301 | 163,68 |

3 ESCALAMIENTO DE SISMOS

En la figura 5 se presentan los espectros de respuesta elástica para 5% de amortiguamiento de los sismos seleccionados; para cada una de sus componentes horizontales de movimiento del suelo. Se aprecia que todos ellos tienen varios picos característicos en la zona descendente del espectro y el de Perú de 2007 tiene valores altos en la zona de períodos comprendidos entre 2 y 4 segundos; este comportamiento no consideran la mayor parte de normativas sísmicas por esto es que Saragoni y Ruiz (2012) recomienda tener espectros con dos plataformas de aceleración máxima para los sismos interplaca tipo thrust.

En la parte inferior de la figura 5, se presentan todos los espectros de respuesta y se ha encontrado el espectro promedio, el mismo que se compara en la figura 6 con el espectro que se halla al aplicar el NEC-15 en un suelo tipo C (Espectro de diseño).

Se aprecia que el espectro promedio de los 10 registros considerados se halla bastante distante (menor) que el espectro del NEC-15 por lo que los registros tienen que ser escalados para que sean mayor o igual al espectro del NEC-15 pero no en todo el rango de períodos sino en el rango que recomienda el ASCE 7-10.

En efecto, el ASCE 7-10 recomienda que para estructuras con aisladores sísmicos el rango de interés se encuentra entre $0,5 T_{DBE} \leq T \leq 1,25 T_{MCE}$; siendo T_{DBE} el período del sismo de diseño y T_{MCE} el período del sismo máximo considerado.

El periodo de vibración del Bloque Estructural 3 que tiene aisladores sísmicos es $T = 3.5393 s$ para el sismo DEB y para el sismo MCE es $T = 3.6263 s$. Por lo tanto el rango de interés para el escalamiento es: $1.769 s \leq T \leq 4.532 s$.

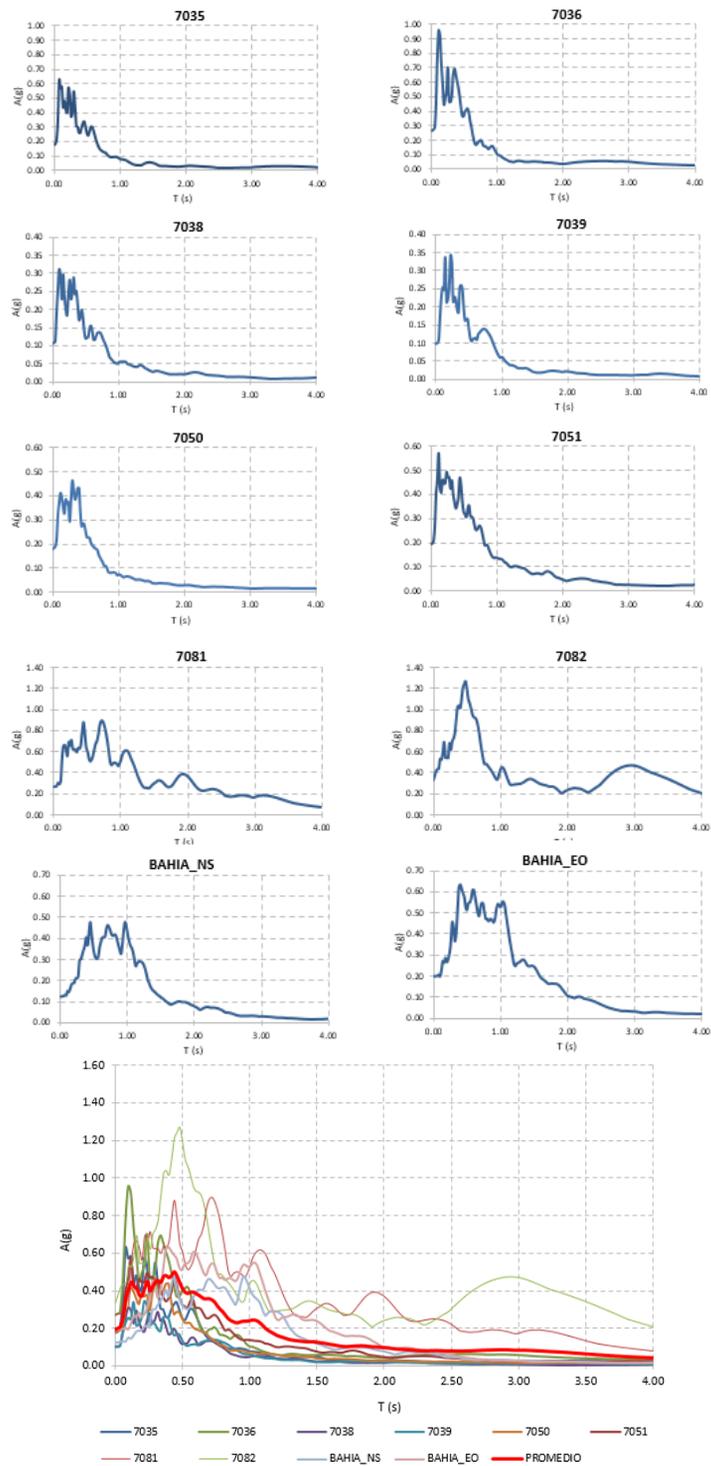


Figura 5 Espectros de respuesta elástica de los sismos considerados y Espectro promedio.

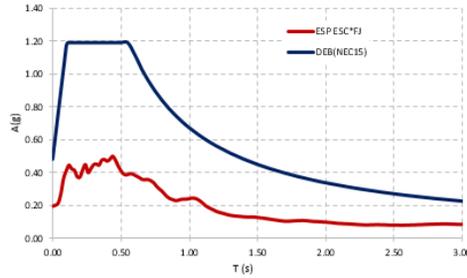


Figura 6 Promedio de los espectros de respuesta elástica de los sismos considerados y espectro de la Norma Ecuatoriana NEC-15, expresados como una fracción de la gravedad (espectro de diseño **DBE**).

Para minimizar la diferencia que existe entre espectro objetivo \hat{A} (espectro de diseño del NEC-15 para el sismo DBE) y el espectro de respuesta A se calcula el factor F_j . La manera como se obtiene es la que da origen a los métodos de escalamiento. Así el ASCE/SEI 7, propone que se obtenga con la siguiente ecuación. Reyes y Kalkan (2012)

$$E_j = \min_{F_1} \|\log(\hat{A}) - \log(F_j A)\| \quad (1)$$

Donde $\|\cdot\|$ es la norma Euclidiana. Se requiere para este propósito un método numérico que minimice las funciones escalares de una variable. La minimización asegura que cada espectro de respuesta escalado se encuentra muy cerca del espectro objetivo, como se muestra a la izquierda de la figura 7.

Un procedimiento más específico para calcular los factores F_j , que se utilizará en este artículo es el denominado “weighted average” en este caso se tiene:

$$E_j = \sum_{i=1}^4 w_i [\hat{A}(T_i) - F_j A(T_i)]^2 \quad (2)$$

Donde w_i son pesos que se asignan para los períodos seleccionados T_i ; $\hat{A}(T_i)$ aceleración del espectro objetivo en el período seleccionado T_i ; $A(T_i)$ aceleración del espectro a escalar en el período T_i . Al desarrollar la minimización del error E_j se llega a la siguiente ecuación para calcular F_j

$$F_j = \frac{\sum_1^4 w_i \hat{A}(T_i) \sqrt{A_x^2(T_i) + A_y^2(T_i)}}{\sum_1^4 w_i (A_x^2(T_i) + A_y^2(T_i))} \quad (3)$$

Donde A_x, A_y son las ordenadas de los espectros a escalar en sentido X (Este-Oeste), Y (Norte-Sur), respectivamente.

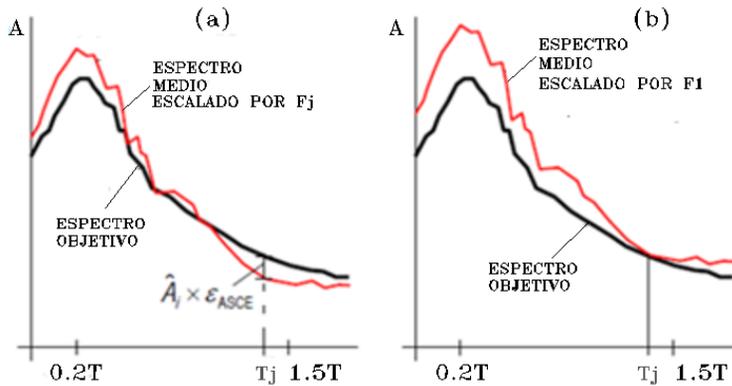


Figura 7 Modificación del espectro escalado por el factor F_i y F_1

Los periodos y factores de peso están dotados en la tabla 3.

Tabla 3 Periodos y Pesos considerados para el escalamiento de sismos.

| | | | | |
|-------------|-----|-----|-----|-----|
| T_i (seg) | 1.8 | 2.0 | 3.0 | 4.0 |
| w_i | 0,1 | 0,3 | 0,3 | 0,3 |

En caso de que el espectro promedio sea menor que el espectro objetivo en el rango de los periodos de interés se multiplica el espectro por un factor de escalamiento F_1 , en la gráfica que se encuentra a la derecha de la figura 7 se aprecia el espectro escalado multiplicado por F_1 y se ve que todas las ordenadas espectrales son mayores que el espectro objetivo en el rango de interés de los periodos. El factor final de escalamiento será el producto de los dos factores $F_j F_1$.

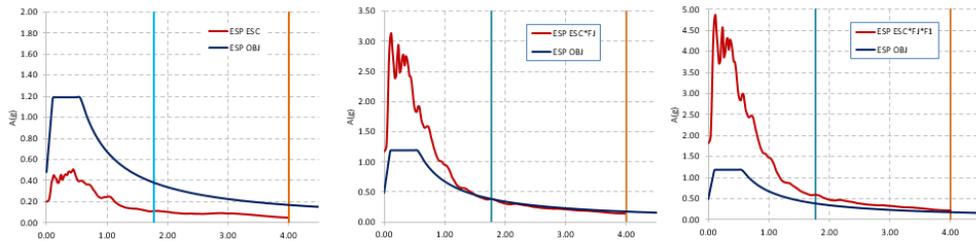


Figura 8 Escalamiento de registros sísmicos de estudio al espectro con el sismo de diseño DBE. A la izquierda se indica el espectro a escalar y el objetivo; al centro el espectro objetivo y el espectro escalado multiplicado por F_j y a la derecha el espectro escalado multiplicado por $F_j F_1$.

3.1 Escalamiento para el sismo DBE

En la figura 8 se presenta en forma gráfica el procedimiento “weighted average”; a la izquierda se observa el espectro promedio de los sismos a escalar y el espectro objetivo que es el de diseño encontrado con el NEC-15, las líneas perpendiculares es el rango de periodos de interés; al centro de la figura 8 se

aprecia el espectro escalado multiplicado por F_j se observa que hay ordenadas espectrales con valores menores al objetivo por lo que se multiplica por F_1 .

A la derecha de la figura 8 se tiene el espectro promedio multiplicado por los dos factores y se aprecia que en el rango de interés, todas sus ordenadas espectrales son mayores que las del espectro objetivo. En la zona de períodos cortos la diferencia entre estos dos espectros es notable pero esa no es la zona de interés, se pudo haber tenido valores menores que el espectro objetivo.

En la tabla 4 se ha utilizado la nomenclatura de EQ1, EQ2, EQ3, EQ4 y EQ5 a los sismos de 1966 (Mw 8,1), 1970 (Mw 7,9), 1974 (Mw 8,0), 2007 (Mw 7,9) y 1998 (Mw=7.2) En la última fila de la tabla se indica el producto de los factores F_j F_1 y en la figura 9 se presentan los acelerogramas ya escalados al espectro de la Norma Ecuatoriana (NEC-15), con los cuales se encontrará la respuesta en el tiempo para el sismo DBE.

Tabla 4 Cálculo de los factores de escalamiento para los sismos de Perú y Ecuador con el sismo de diseño **DBE**.

| FACTORES DE ESCALAMIENTO | | | | | |
|--------------------------|-------|--------|-------|-------|-------|
| | EQ1 | EQ2 | EQ3 | EQ4 | EQ5 |
| $SD_{NEC15}t=1.8$ | 0.373 | 0.373 | 0.373 | 0.373 | 0.373 |
| $S_{FNormal} t=1.8$ | 0.027 | 0.019 | 0.032 | 0.315 | 0.098 |
| $S_{FParalel} t=1.8$ | 0.050 | 0.022 | 0.077 | 0.267 | 0.161 |
| $SD_{NEC15}t=2$ | 0.336 | 0.336 | 0.336 | 0.336 | 0.336 |
| $S_{FNormal} t=2$ | 0.032 | 0.019 | 0.028 | 0.370 | 0.077 |
| $S_{FParalel} t=2$ | 0.041 | 0.021 | 0.045 | 0.242 | 0.103 |
| $SD_{NEC15}t=3$ | 0.224 | 0.224 | 0.224 | 0.224 | 0.224 |
| $S_{FNormal} t=3$ | 0.023 | 0.011 | 0.014 | 0.173 | 0.029 |
| $S_{FParalel} t=3$ | 0.056 | 0.010 | 0.023 | 0.471 | 0.028 |
| $SD_{NEC15}t=4$ | 0.168 | 0.168 | 0.168 | 0.168 | 0.168 |
| $S_{FNormal} t=4$ | 0.022 | 0.010 | 0.014 | 0.078 | 0.017 |
| $S_{FParalel} t=4$ | 0.032 | 0.008 | 0.023 | 0.208 | 0.017 |
| F_j | 4.983 | 12.692 | 5.880 | 0.632 | 2.613 |
| F_1 | 1.700 | 1.700 | 1.600 | 1.500 | 1.500 |
| $F_1 F_j =$ | 8.471 | 21.577 | 9.408 | 0.948 | 3.919 |

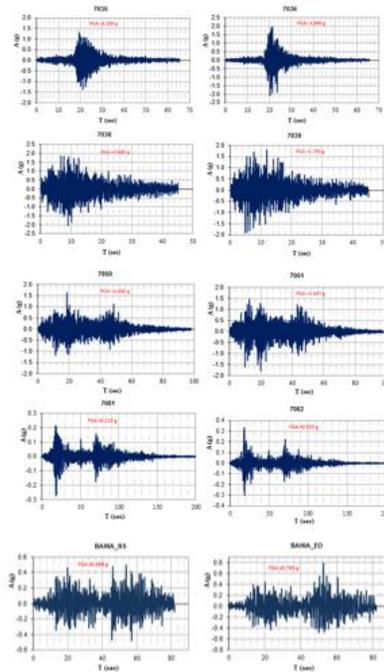


Figura 9 Acelerogramas escalados que se utilizaran para encontrar la respuesta en el tiempo ante el sismo DBE.

3.2 Escalamiento para el sismo MCE

Se procede en forma similar a la indica en el apartado anterior, teniendo presente que el espectro del sismo máximo considerado MCE se obtiene multiplicando las ordenadas espectrales por 1.4.

La figura 10 es similar a la figura 8 y en ella se aprecia en forma gráfica el escalamiento para el nuevo espectro objetivo. En la tabla 5 se resume en cálculo de los factores de escalamiento.

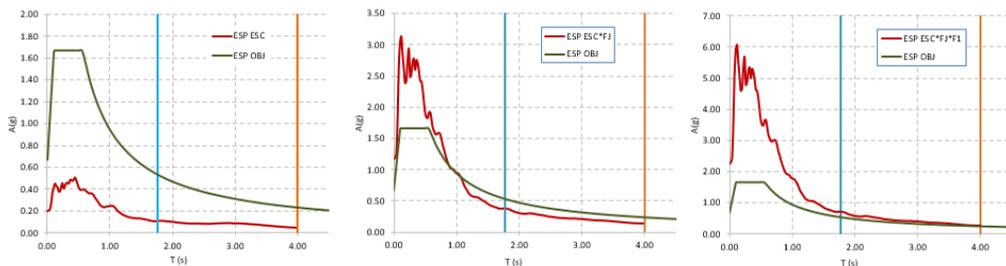


Figura 10 Escalamiento de registros sísmicos en estudio al espectro con el sismo máximo considerado MCE. A la izquierda se indica el espectro a escalar y el objetivo; al centro el espectro objetivo y el espectro escalado multiplicado por F_j y a la derecha el espectro escalado multiplicado por $F_j F_1$.

Tabla 5 Cálculo de los factores de escalamiento para los sismos de Perú y Ecuador con el sismo máximo considerado MCE.

| FACTORES DE ESCALAMIENTO | | | | | |
|--------------------------|-------|--------|-------|-------|-------|
| | EQ1 | EQ2 | EQ3 | EQ4 | EQ5 |
| $SD_{NEC15t=1.8}$ | 0.373 | 0.373 | 0.373 | 0.373 | 0.373 |
| $S_{FNormal} t=1.8$ | 0.027 | 0.019 | 0.032 | 0.315 | 0.098 |
| $S_{FParalel} t=1.8$ | 0.050 | 0.022 | 0.077 | 0.267 | 0.161 |
| $SD_{NEC15t=2}$ | 0.336 | 0.336 | 0.336 | 0.336 | 0.336 |
| $S_{FNormal} t=2$ | 0.032 | 0.019 | 0.028 | 0.370 | 0.077 |
| $S_{FParalel} t=2$ | 0.041 | 0.021 | 0.045 | 0.242 | 0.103 |
| $SD_{NEC15t=3}$ | 0.224 | 0.224 | 0.224 | 0.224 | 0.224 |
| $S_{FNormal} t=3$ | 0.023 | 0.011 | 0.014 | 0.173 | 0.029 |
| $S_{FParalel} t=3$ | 0.056 | 0.010 | 0.023 | 0.471 | 0.028 |
| $SD_{NEC15t=4}$ | 0.168 | 0.168 | 0.168 | 0.168 | 0.168 |
| $S_{FNormal} t=4$ | 0.022 | 0.010 | 0.014 | 0.078 | 0.017 |
| $S_{FParalel} t=4$ | 0.032 | 0.008 | 0.023 | 0.208 | 0.017 |
| F_j | 4.983 | 12.692 | 5.880 | 0.632 | 2.613 |
| F_1 | 2.000 | 2.000 | 1.700 | 1.700 | 1.700 |
| $F_1 F_j =$ | 9.966 | 25.385 | 9.996 | 1.074 | 4.442 |

4 ESTRUCTURA DE ANÁLISIS

En Agosto de 2015 la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, empezó a construir en el campus del Valle de los Chillos, los nuevos Bloques Estructurales donde funcionarán los Centros de Investigación y de Post Grado. Una panorámica de los edificios que se están construyendo se presenta en la figura 11, para divisar el Bloque Estructural 3 que será analizado en los siguientes apartados.



Figura 11 Panorámica del nuevo campo de Investigación Científica y de Post Grado de la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE.

En el Bloque Estructural 3 funcionará el Centro de Investigación de Nanotecnología; es una estructura irregular en elevación que tiene 4 pisos en un

sector (donde está el número 3, en la figura 11) y 5 pisos en otro sector, como se aprecia en la figura 12.

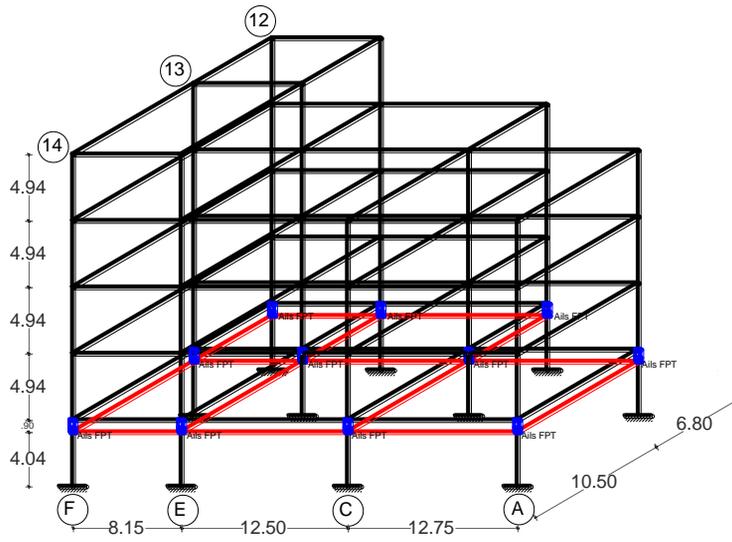


Figura 12 Vista en elevación del Bloque Estructural 3, de la UFA-ESPE

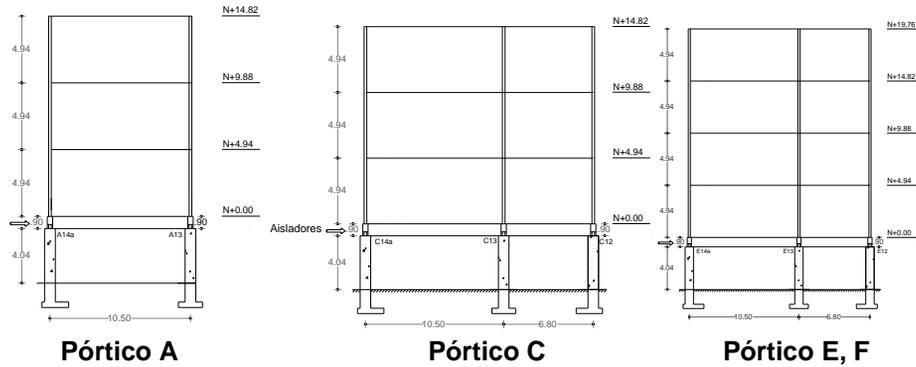


Figura 13 Pórticos en sentido Y de Bloque Estructural 3.

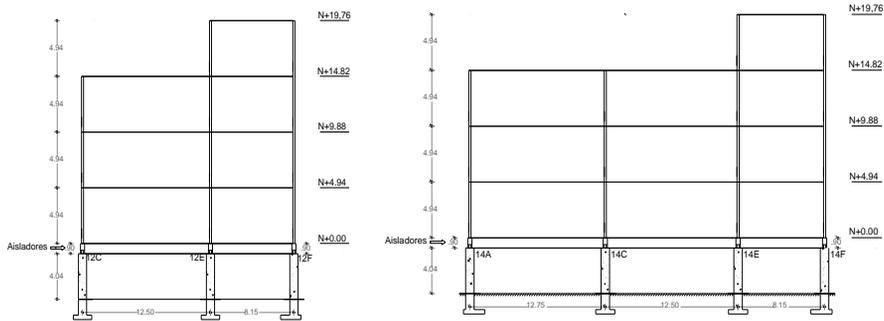


Figura 14 Pórticos en sentido X de Bloque Estructural 3.

Las columnas del primer piso son de hormigón armado de 80/80 cm, sobre cada una de ellas va el aislador de triple péndulo de fricción, como se aprecia en las figuras 12 a 14. Sobre el aislador se tiene la losa de aislación que es la losa del primer piso y de este piso al tope las columnas y vigas son de acero. En la figura 13 se presentan los pórticos en sentido X, y en la figura 14 los pórticos en sentido Y.

El aislador con el que se va a construir el Bloque Estructural 3 es el FTP8833/12-12/8-6, descrito con detenimiento en Constantinou *et al.* (2016) y que se indica en la figura 15. El aislador como tal es circular con un diámetro de 91.44 cm, pero en su parte superior e inferior tiene una placa cuadrada de un metro de longitud, como se aprecia en la figura 16 que corresponde a un aislador que estaba siendo ensayado en EPS (Earthquake Protection System)

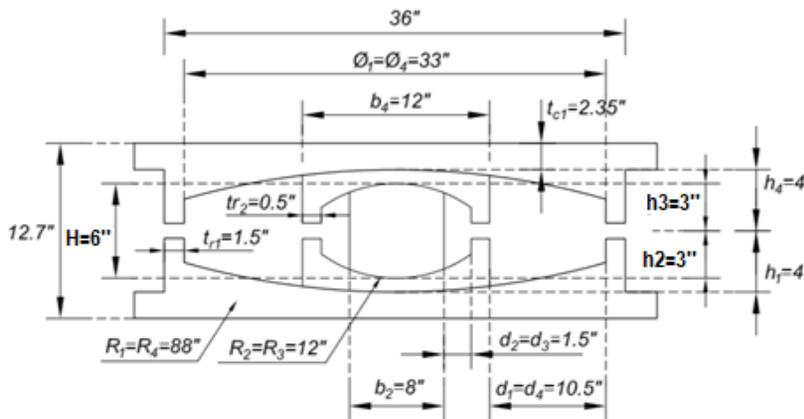


Figura 15 Aislador FPT8833/12-12/8-6, utilizado en la construcción del nuevo Centro de Investigaciones Científicas de UFA-ESPE.

El aislador de la figura 16 está sin el recubrimiento de goma exterior con el que vienen los aisladores de tal manera que se puede visualizar el aislador interior que se desliza sobre las placas exteriores.



Figura 16 Aislador FPT durante el ensayo realizado en EPS.

Se había indicado que las columnas cuadradas sobre las que se asienta el aislador son de hormigón armado de 80 cm de lado y al tener un aislador de 1.00 de lado, para que no quede ningún lado en voladizo se construyó una canastilla cuadrada de hormigón de 1.20 m, de longitud que se indica en la figura 17.

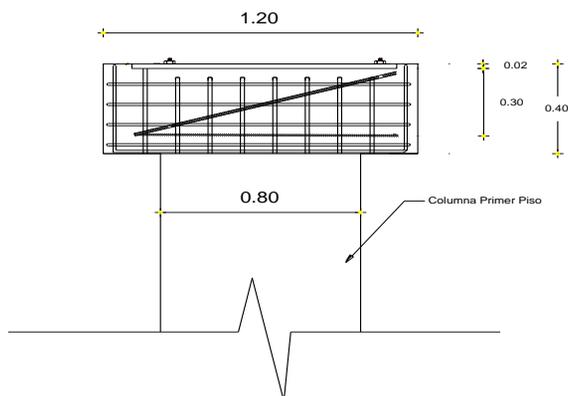


Figura 17 Canastilla de hormigón de 1.20 m, de lado sobre columnas cuadradas de hormigón armado de 80 cm, de lado.

Finalmente para acabar con la descripción de los elementos estructurales principales del Bloque Estructural 3, en la figura 18 se presentan las secciones de las columnas y vigas. Se destaca que existen vigas secundarias, terciarias y cuaternarias de menores dimensiones a la viga "I" indicada en la figura 18 pero que no se las considera en el análisis sísmico de tal manera que esto contribuye a la sobre resistencia de la estructura.

| Sección de Columnas de H. A. | Sección de Columna de Acero Tubular | Sección de Viga de Acero Tipo I |
|------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|
| | | |

Figura 18 Sección transversal de los elementos estructurales del Bloque 3.

5 MARCO TEÓRICO

La estructura va a trabajar en el rango elástico, solo los aisladores son los que van a incursionar en el rango no lineal. Por este motivo en el presente

apartado se presenta el modelo de tres fases propuesto por Mc Vitty y Constantinou (2015) que se utilizó para encontrar la respuesta en el tiempo.

Para describir el modelo de tres fases, se necesita presentar las siguientes ecuaciones:

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

$$d_i^* = \frac{R_{i,eff}}{R_i} \tag{5}$$

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 el aislador interior en las placas que tienen radios de curvatura R_2, R_3 , ver figura 15

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

$$u^* = 2 (\mu_1 - \mu_2) R_{2,eff} \tag{6}$$

$$F = \frac{W}{2 R_{2,eff}} u + \mu_2 W \tag{7}$$

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 19 se aprecia la base rígida del aislador interior desplazándose en las superficies 2 y 3; a la derecha se muestra el diagrama de histéresis correspondiente, que relaciona la fuerza lateral con el desplazamiento horizontal.

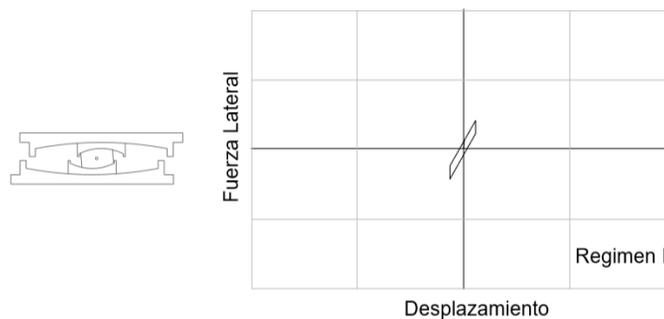


Figura 19 Desempeño de aislador en Régimen I.
Fuente: Mc Vitty y Constantinou (2015)

- **Régimen II**

El movimiento de la base rígida del 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, en las estructuras. Las ecuaciones se indican a continuación y en la figura 20 se presenta la curva de histéresis correspondiente.

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

$$u^{**} = u^* + 2 d_1^* \quad (8)$$

$$F = \frac{W}{2 R_{1,eff}} (u - u^*) + \mu_1 W \quad (9)$$

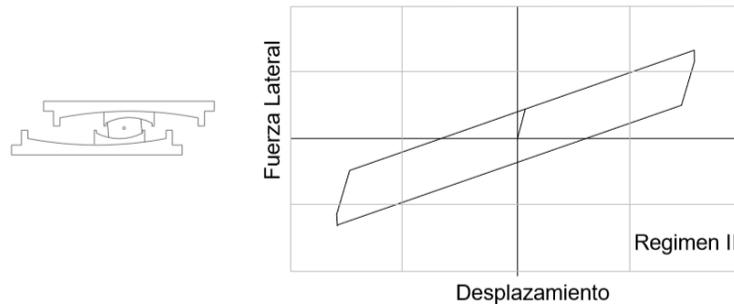


Figura 20 Desempeño de aislador en Régimen II.

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 la base rígida del aislador interior en las superficies 2 y 3. Las ecuaciones de cálculo y el desempeño se indica en la figura 21.

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

$$u_{cap} = 2 d_1^* + 2 d_2^* \quad (10)$$

$$F = \frac{W}{2 R_{2,1ff}} (u - u^{**}) + \frac{W}{2 R_{1eff}} (u^{**} - u^*) + \mu_1 W \quad (11)$$

Dependiendo de la fase en que se encuentra el aislador se determina la rigidez efectiva y con ella se procede a encontrar la respuesta en el tiempo. No solo que se encuentra la rigidez efectiva sino también que se halla el factor de amortiguamiento equivalente ξ_{eq}

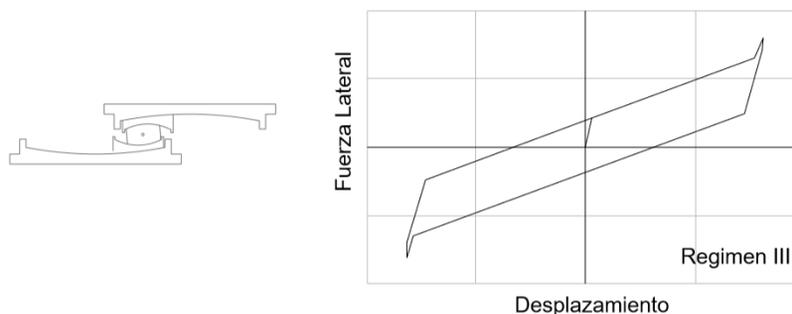


Figura 21 Desempeño de aislador en Régimen III.

Fuente: Mc Vitty y Constantinou (2015)

$$\xi_{eq} = \frac{E_D}{4 \pi E_s} \quad (12)$$

Donde E_D es la energía disipada; E_s es la energía elástica. Ante el sismo DBE, como se verá más adelante el desplazamiento lateral de la estructura estuvo alrededor de los 30 cm, por lo que se verificó que el factor de amortiguamiento que se obtiene con el modelo de tres fases, sea parecido al que se halló experimentalmente. (EPS, 2015). El factor de amortiguamiento depende de la carga vertical aplicada.

En la figura 22 se presentan valores de amortiguamiento encontrados experimentalmente, para una carga vertical sobre el aislador de 250 T., y sometida a un desplazamiento lateral de 12" (30.48 cm). Para el Proyecto de la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, se compraron 81 aisladores los mismos que fueron ensayados con diferentes valores de carga vertical, en concordancia con las que van a trabajar.

En la figura 22 se compara los factores de amortiguamiento encontrados experimentalmente con los valores que se hallan con un modelo propuesto por Aguiar *et al.* (2016).

El factor de amortiguamiento equivalente es el amortiguamiento para el primer modo de vibración pero para encontrar la matriz de amortiguamiento considerando todos los modos de vibración utilizando el modelo de Wilson, se necesita definir el factor de amortiguamiento para todos los modos de vibración (Aguiar, 2012).

Se sabe que en estructuras con aisladores, en los primeros modos trabaja el sistema de aislación y en los modos superiores la estructura que tiene un amortiguamiento de 0.05. Con esta hipótesis se obtuvieron los factores de amortiguamiento para todos los modos de vibración, calculando en forma lineal.

En la figura 22 se tienen valores nominales, máximos y mínimos del factor de amortiguamiento, lo propio sucede a nivel de coeficientes de roce. En este artículo se está trabajando con valores nominales o promedio dejando a futuro el análisis ante valores mínimos y máximos del coeficiente de roce.

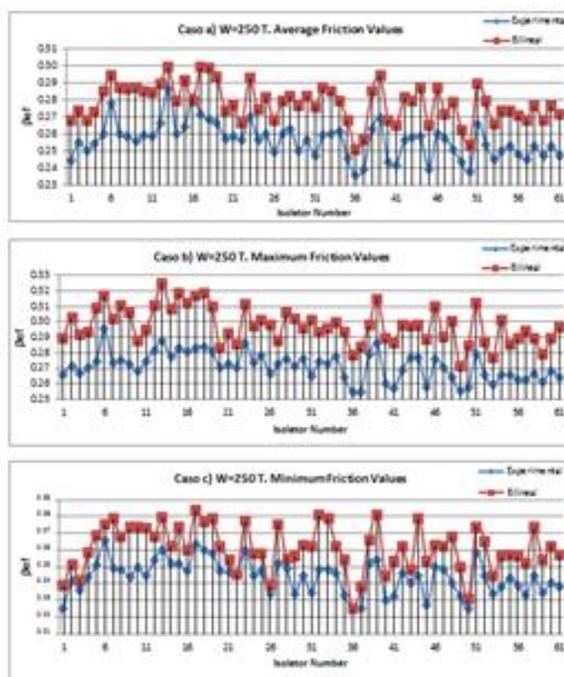


Figura 22 Valores de amortiguamiento encontrados experimentalmente y hallados con un nuevo modelo propuesto. Fuente: Aguiar *et al.* (2016)

6 RESULTADOS

Para encontrar la respuesta en el tiempo se utilizó el Método β de Newmark para múltiples grados de libertad. Como se va a encontrar la respuesta en cada uno de los pórticos del Bloque Estructural 3, para 10 registros sísmicos, se elaboró un programa en MATLAB que permite calcular con una sola corrida todos los sismos y exportar los resultados a una tabla de Excel. Por considerarlo de interés este programa se lo presenta en el Anexo A.

Primero se va a presentar la respuesta de desplazamientos, tanto para el sismo DBE como para el sismo MCE, en los aisladores y desde el segundo al quinto piso. Se recuerda que los aisladores se hallan sobre las columnas del primer piso. En el subsuelo los desplazamientos laterales son muy bajos.

Posteriormente se indica los espectros de pisos, de igual manera para el sismo DBE y para el sismo MCE.

6.1 Desplazamientos encontrados para sismo DBE

En las figuras 23 y 24 se presentan las respuestas de desplazamiento para los pórticos en sentido X: A y C, que tienen 4 pisos. En la parte superior izquierda se tiene la respuesta del aislador y en las restantes figuras de cada uno de los pisos de la superestructura.

Pórtico A

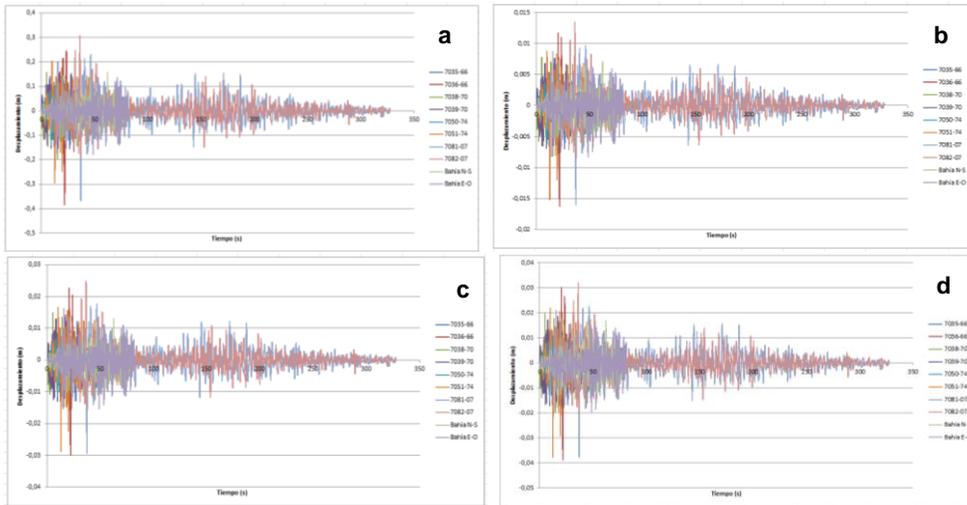


Figura 23 a) Desplazamientos del aislador, b) desplazamientos del segundo piso, c) desplazamiento del tercer piso, d) desplazamientos del cuarto piso.

Pórtico C

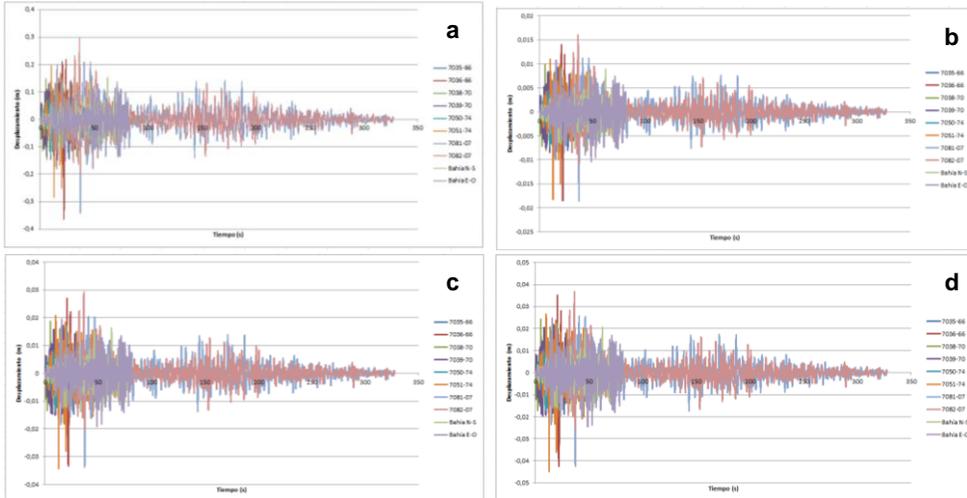


Figura 24 a) Desplazamientos del aislador, b) desplazamientos del segundo piso, c) desplazamiento del tercer piso, d) desplazamientos del cuarto piso.

Se destaca que los desplazamientos de los pisos 2 en adelante se encuentran en **coordenadas absolutas**.

En las figuras 25 y 26 se presentan los desplazamientos de los pórticos de 5 pisos: E, F. Con lo que finaliza las respuestas de los pórticos en sentido X.

Pórtico E

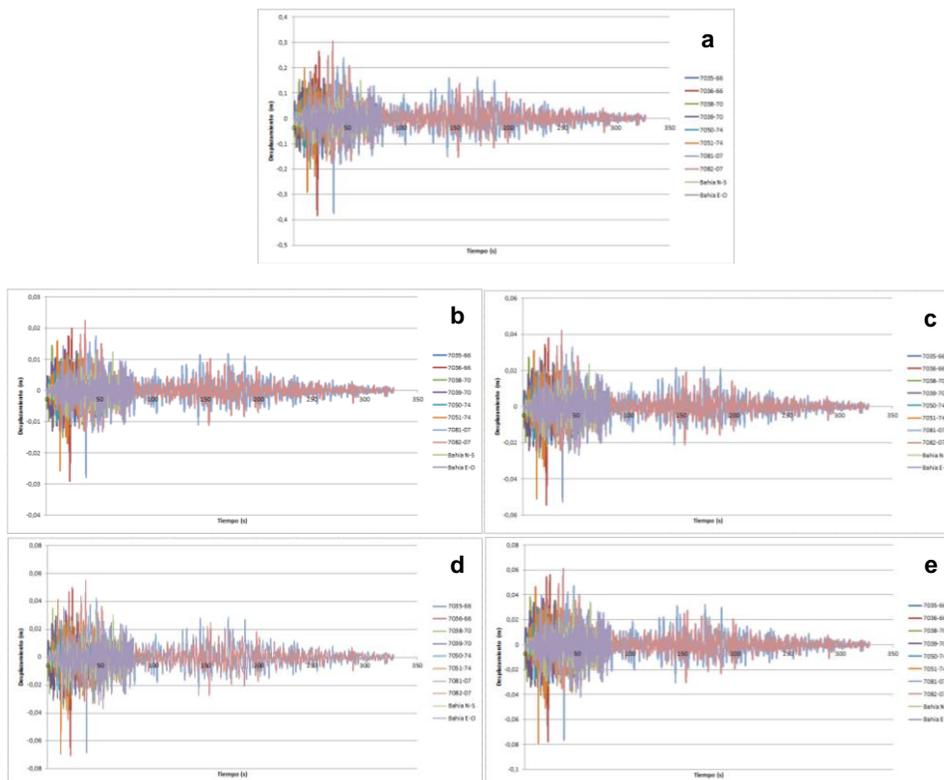


Figura 25 a) Desplazamientos del aislador, b) desplazamientos del segundo piso, c) desplazamiento del tercer piso, d) desplazamientos del cuarto piso, e) desplazamientos del quinto piso.

En sentido Y, se tienen tres pórticos y son los identificados por los números: 12, 13 y 14. Las respuestas de desplazamientos de estos pórticos, se hallan en las figuras 27 a 29.

En la tabla 6 se presentan los desplazamientos máximos encontrados en cada uno de los pórticos, en los aisladores y el sismo con el cual se obtuvo ese máximo. Los valores máximos de los máximos se hallan con las dos componentes del sismo de Pisco de 2007 y son de 35.57 cm (mayor valor positivo) y 46.73 cm (mayor valor negativo).

La capacidad de desplazamiento del aislador FPT8833/12-12/8-6 es de 54 cm. De tal manera que van a tener un buen desempeño sísmico ante estos sismos de larga duración, con dos fases intensas y con varios picos característicos en la zona descendente del espectro. En otras palabras los aisladores van a tener un buen desempeño ante estos sismos que tienen un alto potencial destructivo.

Pórtico F

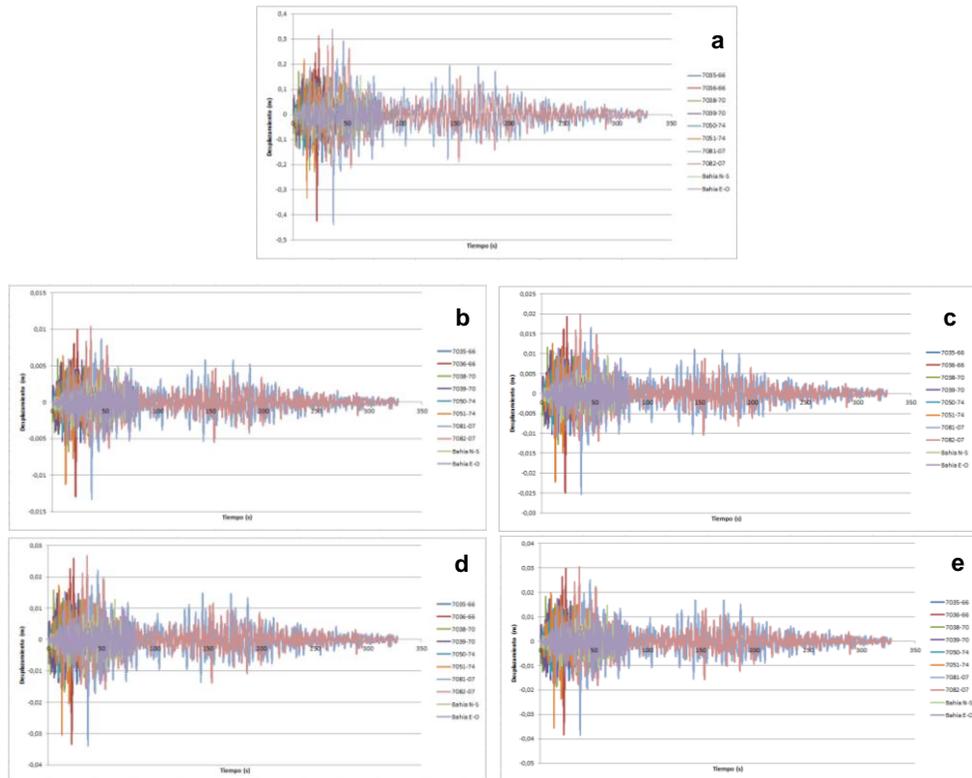
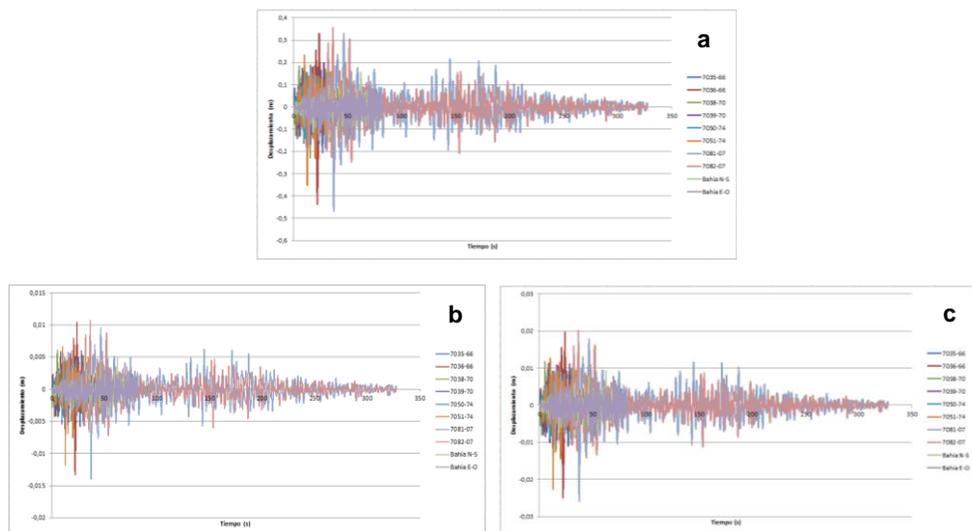


Figura 26 a) Desplazamientos del aislador, b) desplazamientos del segundo piso, c) desplazamiento del tercer piso, d) desplazamientos del cuarto piso, e) desplazamientos del quinto piso.

Pórtico 12



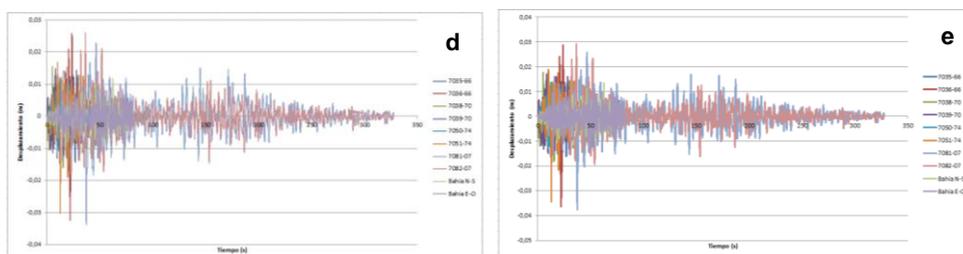


Figura 27 a) Desplazamientos del aislador, b) desplazamientos del segundo piso, c) desplazamiento del tercer piso, d) desplazamientos del cuarto piso, e) desplazamientos del quinto piso.

Pórtico 13

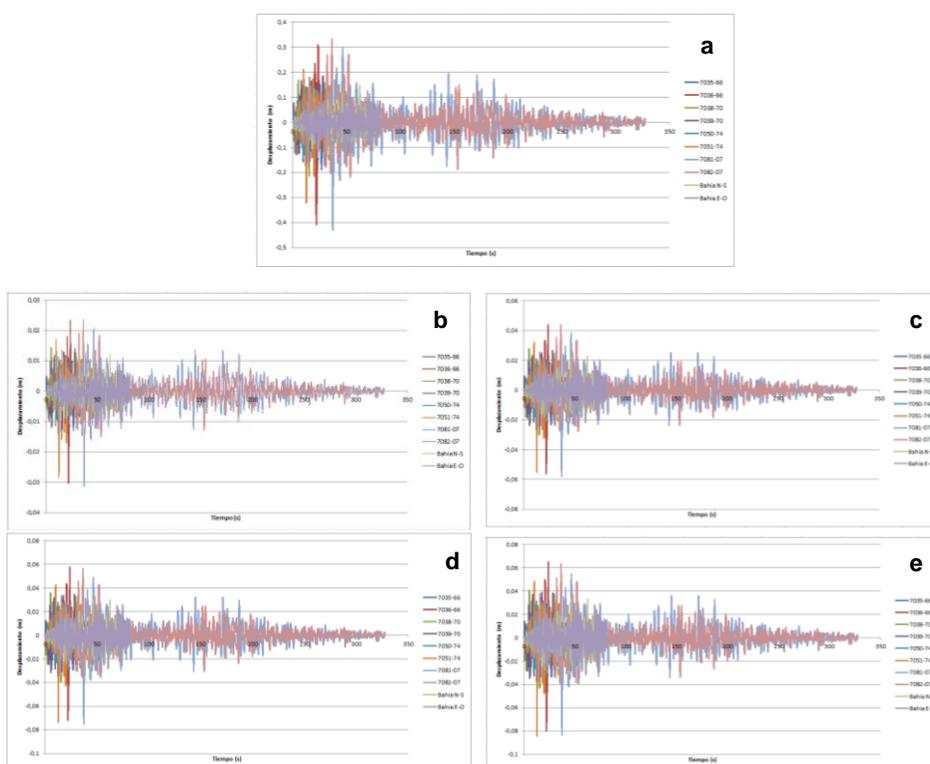


Figura 28 a) Desplazamientos del aislador, b) desplazamientos del segundo piso, c) desplazamiento del tercer piso, d) desplazamientos del cuarto piso, e) desplazamientos del quinto piso.

En las tablas 7 a 10 se presentan los desplazamientos laterales máximos positivos y negativos, relativos, con respecto al desplazamiento del aislador y se aprecia que son valores pequeños. Lo que demuestra que efectivamente la superestructura va a trabajar en el rango elástico. Por este motivo se diseñó una conexión estándar en la unión de las columnas de acero tubulares con las vigas de acero tipo "I".

Pórtico 14

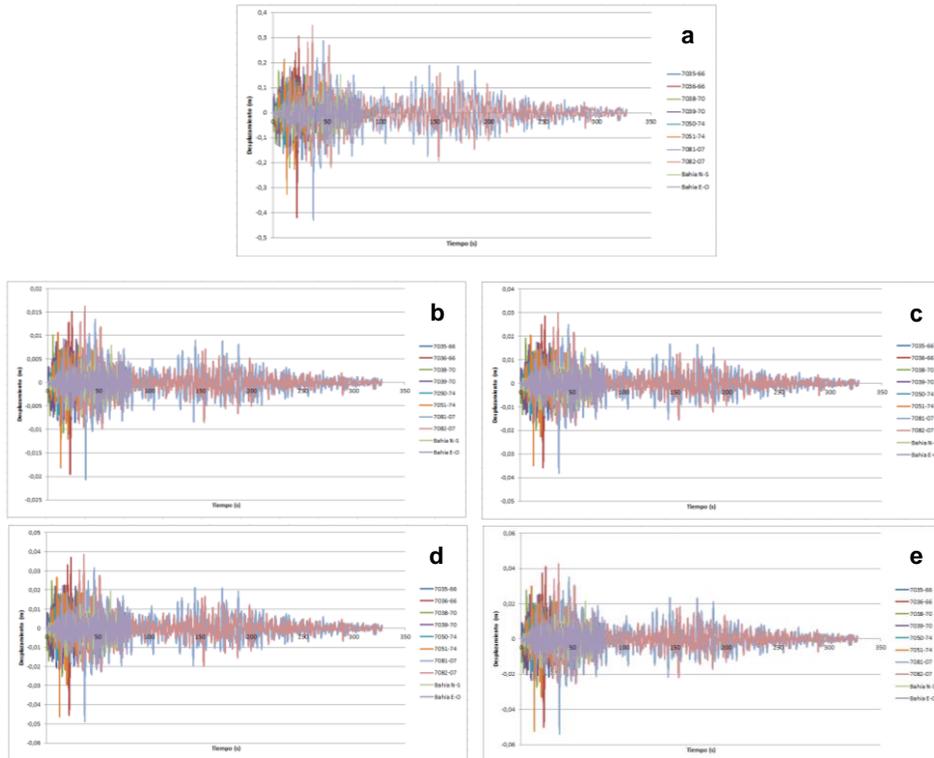


Figura 29 a) Desplazamientos del aislador, b) desplazamientos del segundo piso, c) desplazamiento del tercer piso, d) desplazamientos del cuarto piso, e) desplazamientos del quinto piso.

Tabla 6 Valores de desplazamientos máximos: positivos y negativos para sismo DBE, en el aislador

| Piso | Pórtico | q.max(+) (cm) | Sismo | q.max (-) (cm) | Sismo |
|-----------|---------|------------------|---------|-------------------|---------|
| Aislación | A | 30,93 | 7082-07 | 38,57 | 7036-66 |
| | C | 29,65 | 7082-07 | 36,34 | 7036-66 |
| | E | 30,57 | 7082-07 | 38,28 | 7036-66 |
| | F | 33,96 | 7082-07 | 43,76 | 7081-07 |
| | 12 | 35,57 | 7082-07 | 46,73 | 7081-07 |
| | 13 | 33,19 | 7082-07 | 43,03 | 7081-07 |
| | 14 | 35,09 | 7082-07 | 43,08 | 7081-07 |

Tabla 7 Valores de desplazamientos máximos: positivos y negativos para sismo DBE en el segundo piso

| Piso | Pórtico | q.max(+) (cm) | Sismo | q.max (-) (cm) | Sismo |
|------|---------|------------------|---------|-------------------|---------|
| 2 | A | 1,35 | 7082-07 | 1,62 | 7036-66 |
| | C | 1,6 | 7082-07 | 1,86 | 7036-66 |
| | E | 2,24 | 7082-07 | 2,91 | 7036-66 |
| | F | 1,04 | 7082-07 | 1,33 | 7081-07 |
| | 12 | 1,07 | 7082-07 | 1,39 | 7081-07 |
| | 13 | 2,36 | 7082-07 | 3,12 | 7081-07 |
| | 14 | 1,62 | 7082-07 | 2,07 | 7081-07 |

Tabla 8 Valores de desplazamientos máximos: positivos y negativos para sismo DBE en el tercer piso

| Piso | Pórtico | q.max(+) (cm) | Sismo | q.max (-) (cm) | Sismo |
|------|---------|------------------|---------|-------------------|---------|
| 3 | A | 2,48 | 7082-07 | 2,99 | 7036-66 |
| | C | 2,92 | 7082-07 | 3,45 | 7051-74 |
| | E | 4,22 | 7082-07 | 5,44 | 7036-66 |
| | F | 1,99 | 7082-07 | 2,54 | 7081-07 |
| | 12 | 2,01 | 7082-07 | 2,6 | 7081-07 |
| | 13 | 4,4 | 7036-66 | 5,8 | 7081-07 |
| | 14 | 3,01 | 7082-07 | 3,82 | 7081-07 |

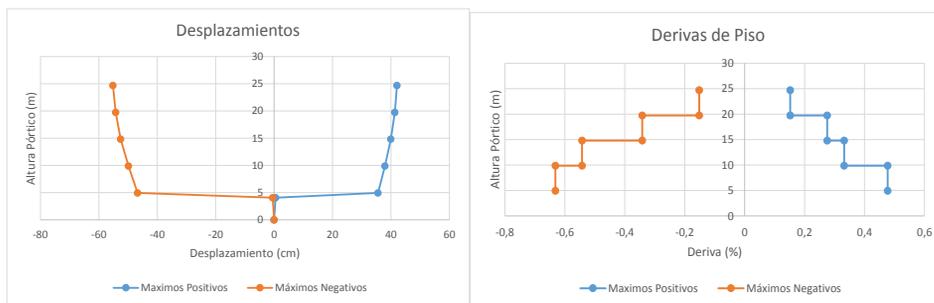
Tabla 9 Valores de desplazamientos máximos: positivos y negativos para sismo DBE en el cuarto piso

| Piso | Pórtico | q.max(+) (cm) | Sismo | q.max (-) (cm) | Sismo |
|------|---------|------------------|---------|-------------------|---------|
| 4 | A | 3,19 | 7082-07 | 3,87 | 7036-66 |
| | C | 3,68 | 7082-07 | 4,49 | 7051-74 |
| | E | 5,52 | 7082-07 | 7,04 | 7036-66 |
| | F | 2,67 | 7082-07 | 3,39 | 7081-07 |
| | 12 | 2,61 | 7082-07 | 3,37 | 7081-07 |
| | 13 | 5,76 | 7036-66 | 7,49 | 7081-07 |
| | 14 | 3,86 | 7082-07 | 4,89 | 7081-07 |

Tabla 10 Valores de desplazamientos máximos: positivos y negativos para sismo DBE en el quinto piso

| Piso | Pórtico | q.max(+) (cm) | Sismo | q.max (-) (cm) | Sismo |
|------|---------|------------------|---------|-------------------|---------|
| 5 | E | 6,14 | 7082-07 | 7,89 | 7051-74 |
| | F | 3,06 | 7082-07 | 3,87 | 7081-07 |
| | 12 | 2,92 | 7082-07 | 3,76 | 7081-07 |
| | 13 | 6,51 | 7036-66 | 8,46 | 7081-07 |
| | 14 | 4,28 | 7082-07 | 5,41 | 7081-07 |

En base a los datos de las tablas 6 a 10 en la figura 30 se presenta los desplazamientos máximos, en la parte izquierda de la figura 30, tanto positivos (a la derecha) como negativos (a la izquierda). A la derecha de la figura 30 se presentan las derivas de piso máximas encontradas, de igual manera en los dos sentidos.

**Figura 30** Desplazamientos y Derivas de Piso máximas encontradas en el Bloque Estructural 3 de la UFA-ESPE, ante el sismo DBE.

6.2 Desplazamientos encontrados para sismo MCE.

Con formato similar a los resultados presentados en el apartado anterior, en las figuras 31 a 37 se presentan las respuestas en el tiempo de cada uno de los pisos y de cada pórtico de la estructura del Bloque Estructural 3 de la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE pero en este caso ante el sismo máximo considerado MCE, que es un mega sismo.

Nótese, en la última fila de la tabla 5, los factores por los cuales se han multiplicado los registros, para realizar el análisis sísmico, son factores muy altos. De tal manera que se va a encontrar la respuesta ante sismos extremadamente fuertes y de larga duración.

Pórtico A

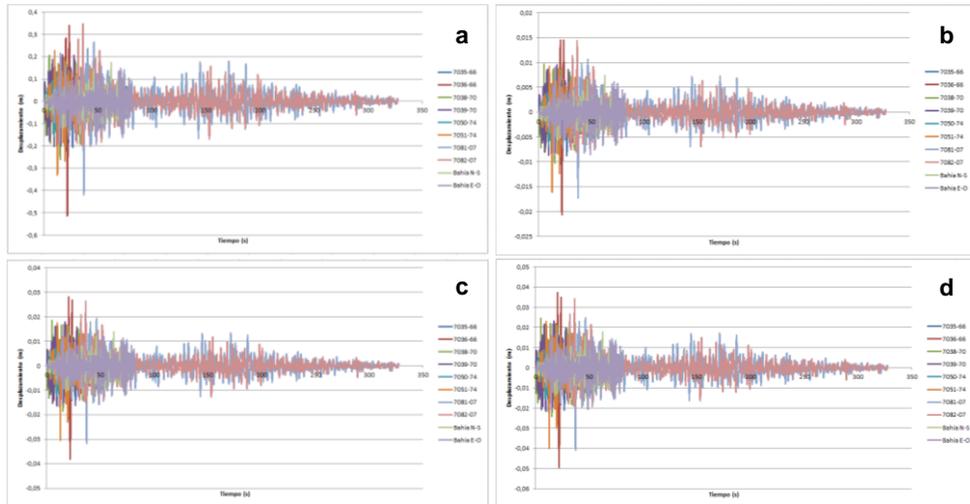


Figura 31 Desplazamientos de: **a)** aislador, **b)** segundo piso, **c)** tercer piso, **d)** cuarto piso. Para sismo MCE.

Pórtico C

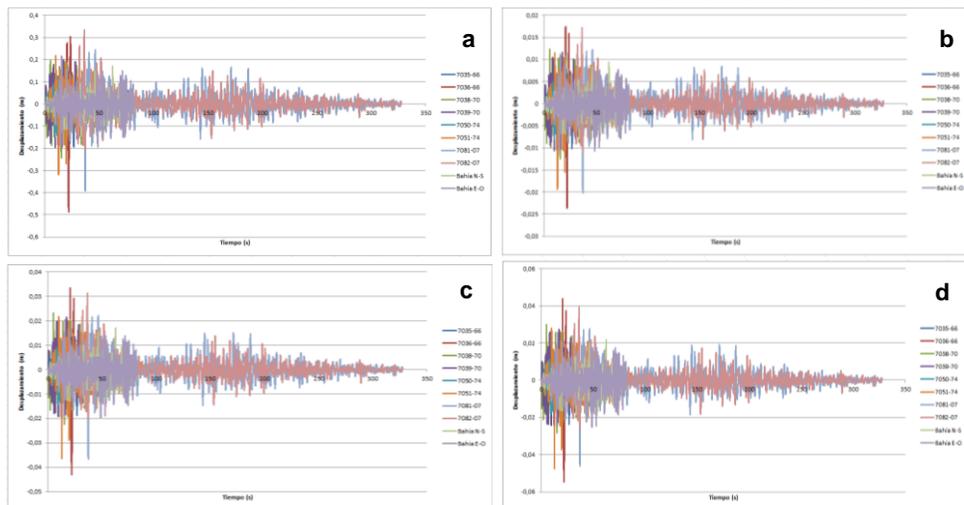


Figura 32 Desplazamientos de: **a)** aislador, **b)** segundo piso, **c)** tercer piso, **d)** cuarto piso, para el sismo MCE

Pórtico E

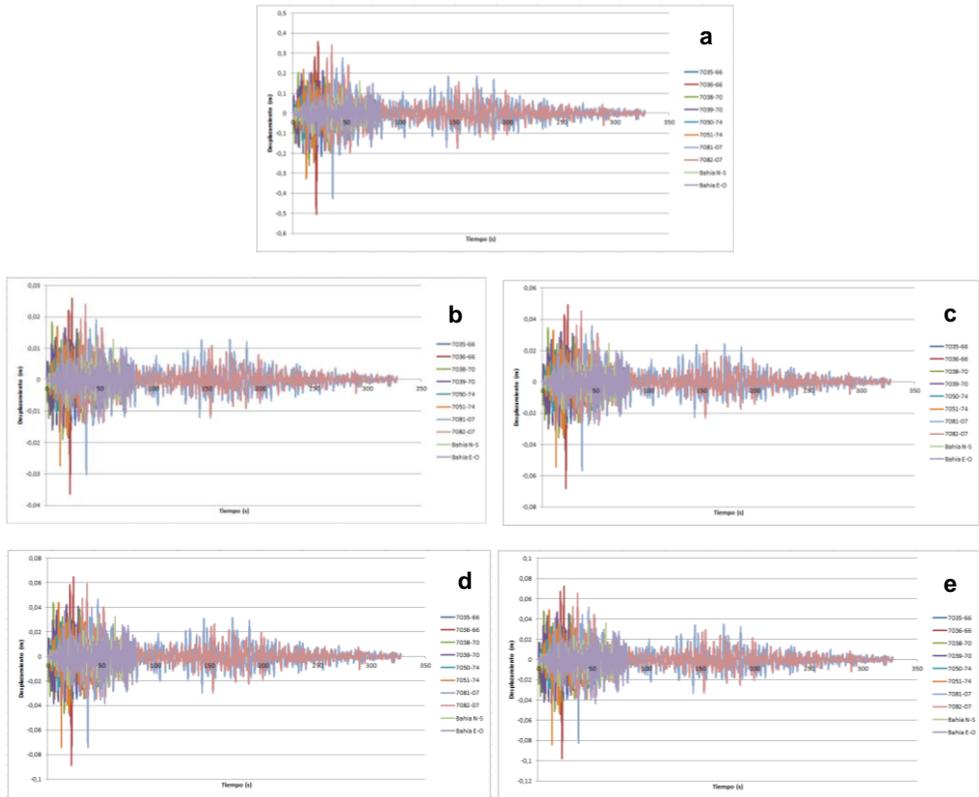
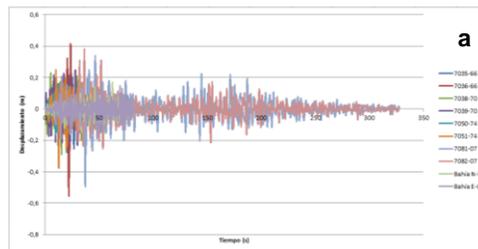


Figura 33 Desplazamientos de: a) aislador, b) segundo piso, c) tercer piso, d) cuarto piso, e) quinto piso. Para el sismo MCE

Pórtico F



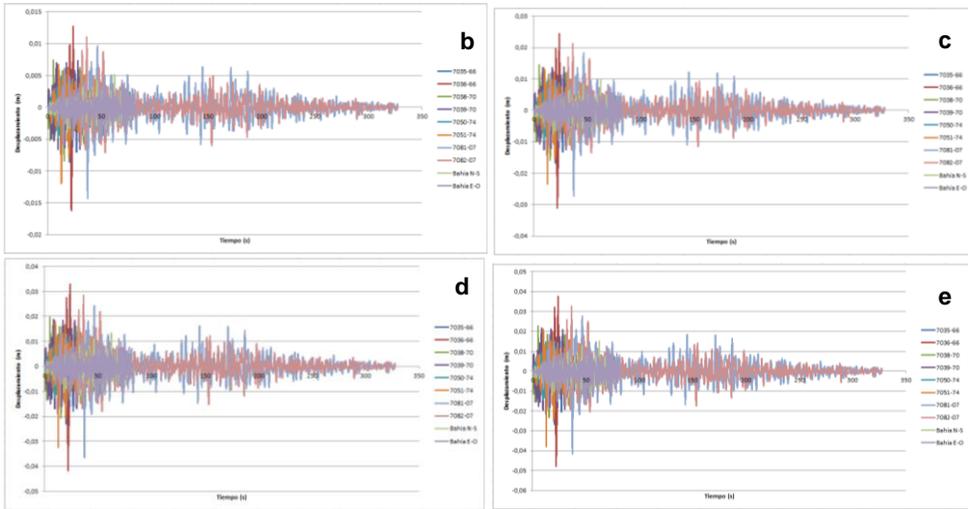


Figura 34 Desplazamientos de: a) aislador, b) segundo piso, c) tercer piso, d) cuarto piso, e) quinto piso. Para el sismo MCE

Pórtico 12

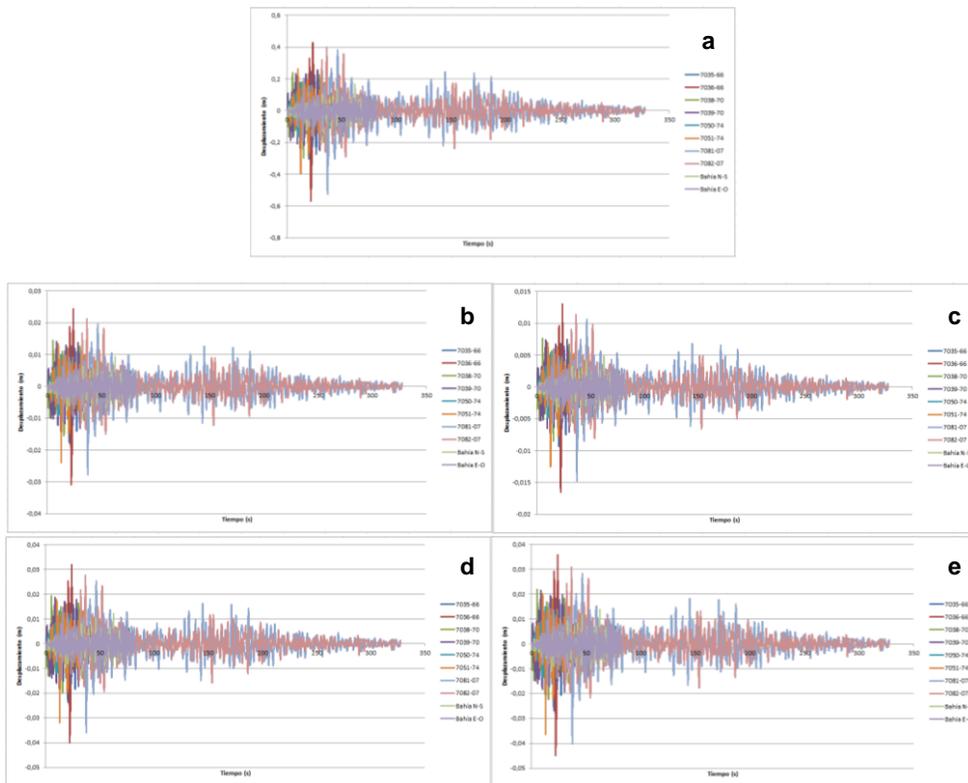


Figura 35 Desplazamientos de: a) aislador, b) segundo piso, c) tercer piso, d) cuarto piso, e) quinto piso. Para el sismo MCE

Pórtico 13

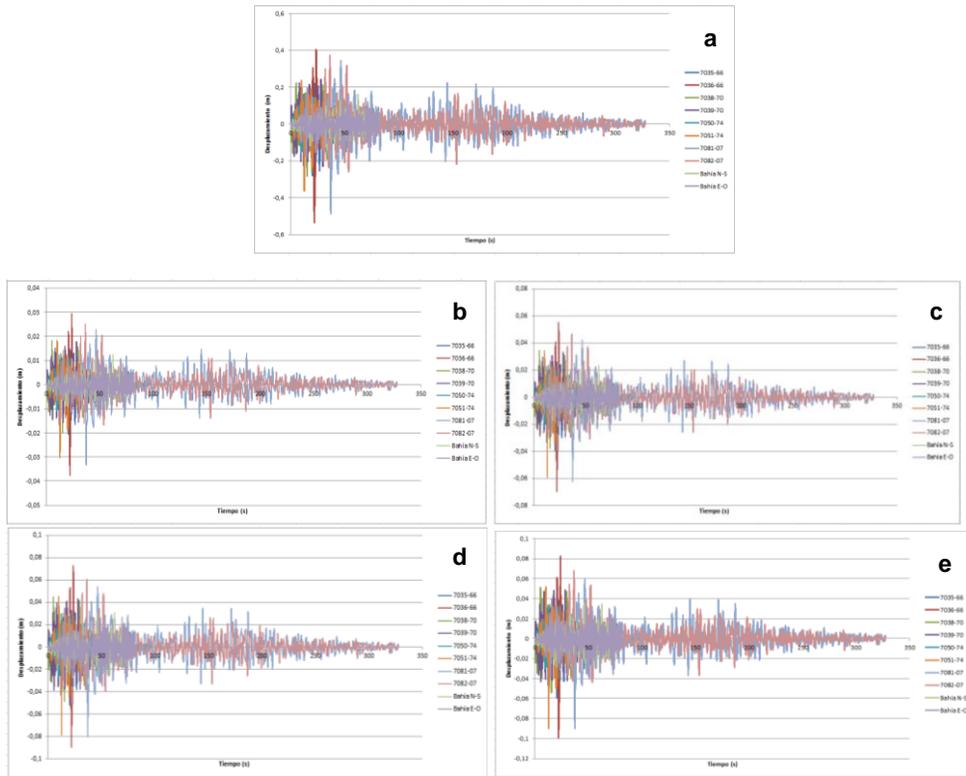


Figura 36 Desplazamientos de: **a)** aislador, **b)** segundo piso, **c)** tercer piso, **d)** cuarto piso, **e)** quinto piso. Para el sismo MCE

Pórtico 14

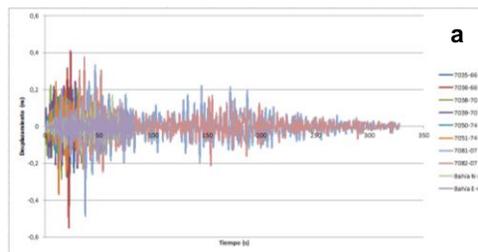


Tabla 12 Valores de desplazamientos máximos: positivos y negativos para sismo MCE en el segundo piso

| Piso | Pórtico | q.max (+) (cm) | Sismo | q.max (-) (cm) | Sismo |
|------|---------|-------------------|---------|-------------------|---------|
| 2 | A | 1,45 | 7082-07 | 2,07 | 7036-66 |
| | C | 1,74 | 7082-07 | 2,36 | 7036-66 |
| | E | 2,59 | 7082-07 | 3,64 | 7036-66 |
| | F | 1,27 | 7082-07 | 1,62 | 7036-66 |
| | 12 | 1,3 | 7082-07 | 1,66 | 7036-66 |
| | 13 | 2,94 | 7082-07 | 3,76 | 7036-66 |
| | 14a | 1,93 | 7082-07 | 2,44 | 7036-66 |

Tabla 13 Valores de desplazamientos máximos: positivos y negativos para sismo MCE en tercer piso

| Piso | Pórtico | q.max (+) (cm) | Sismo | q.max (-) (cm) | Sismo |
|------|---------|-------------------|---------|-------------------|---------|
| 3 | A | 2,8 | 7082-07 | 3,82 | 7036-66 |
| | C | 3,35 | 7082-07 | 4,3 | 7036-66 |
| | E | 4,9 | 7082-07 | 6,82 | 7036-66 |
| | F | 2,44 | 7082-07 | 3,12 | 7036-66 |
| | 12 | 2,45 | 7082-07 | 3,09 | 7036-66 |
| | 13 | 5,54 | 7036-66 | 6,97 | 7036-66 |
| | 14a | 3,62 | 7082-07 | 4,48 | 7036-66 |

Tabla 14 Valores de desplazamientos máximos: positivos y negativos para sismo MCE en cuarto piso

| Piso | Pórtico | q.max (+) (cm) | Sismo | q.max (-) (cm) | Sismo |
|------|---------|-------------------|---------|-------------------|---------|
| 4 | A | 3,73 | 7082-07 | 4,93 | 7036-66 |
| | C | 4,39 | 7082-07 | 5,46 | 7036-66 |
| | E | 6,49 | 7082-07 | 8,85 | 7036-66 |
| | F | 3,29 | 7082-07 | 4,18 | 7036-66 |
| | 12 | 3,2 | 7082-07 | 4,01 | 7036-66 |
| | 13 | 7,27 | 7036-66 | 8,95 | 7036-66 |
| | 14a | 4,7 | 7036-66 | 5,7 | 7036-66 |

Tabla 15 Valores de desplazamientos máximos: positivos y negativos para sismo MCE en quinto piso

| Piso | Pórtico | q.max (+) (cm) | Sismo | q.max (-) (cm) | Sismo |
|------|---------|-------------------|---------|-------------------|---------|
| 5 | E | 7,27 | 7082-07 | 9,79 | 7036-66 |
| | F | 3,77 | 7082-07 | 4,79 | 7036-66 |
| | 12 | 3,58 | 7082-07 | 4,49 | 7036-66 |
| | 13 | 8,23 | 7036-66 | 9,92 | 7036-66 |
| | 14a | 5,22 | 7082-07 | 6,29 | 7036-66 |

Al igual que en la figura 30, ahora en la figura 38 se presentan los desplazamientos máximos de los máximos, a la izquierda y a la derecha las derivadas de piso.

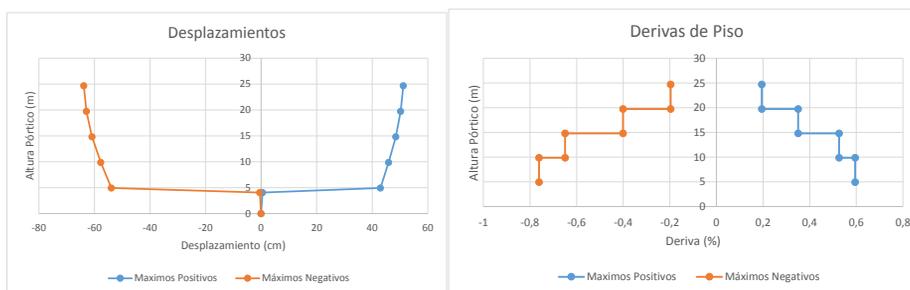


Figura 38 Desplazamientos y Derivas de Piso máximas encontradas en el Bloque Estructural 3 de la UFA-ESPE, ante el sismo DBE.

Las derivas de piso son valores bajos, menores al 0.8%, que demuestra que tendrá un buen comportamiento sísmico la estructura y los desplazamientos laterales máximos superan ligeramente los 60 cm, en el tope del edificio.

6.3 Espectros de piso para el sismo DBE

En el análisis no lineal, se halló las respuestas de desplazamiento, velocidad y aceleración en cada uno de los pisos. La respuesta en desplazamiento ha sido presentada en los apartados anteriores. Ahora con la respuesta de aceleración se encontró su espectro, los mismos que se indican en este apartado para el sismo DBE y en el siguiente para el sismo MCE.

De la figura 39 a la 45 se presenta los espectros de piso, encontrados para el sismo DBE en cada uno de los pisos y con cada uno de los 10 registros. Se empieza colocando los resultados a partir del segundo piso hacia arriba.

Pórtico 12

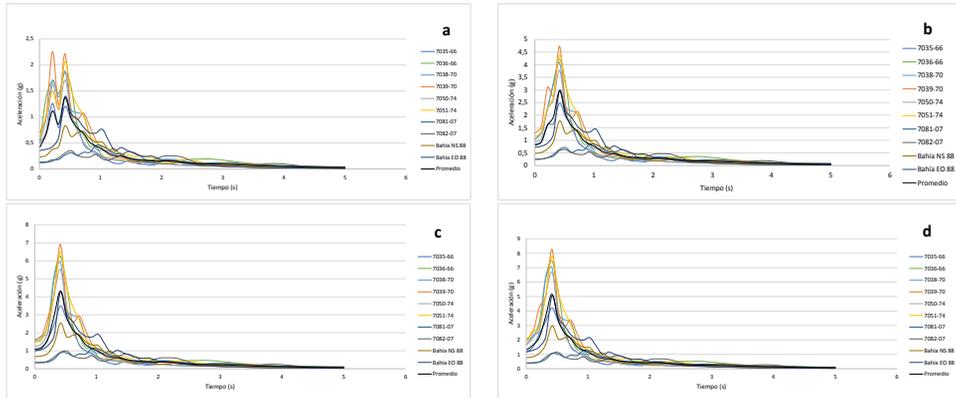


Figura 39 a) Aceleración Espectral piso 2, b) Aceleración Espectral piso 3, c) Aceleración Espectral piso 4, d) Aceleración Espectral piso 5.

Pórtico 13

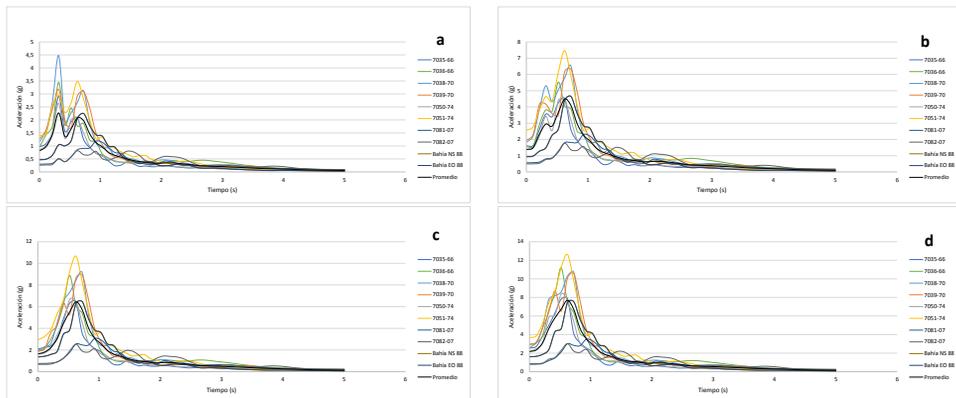
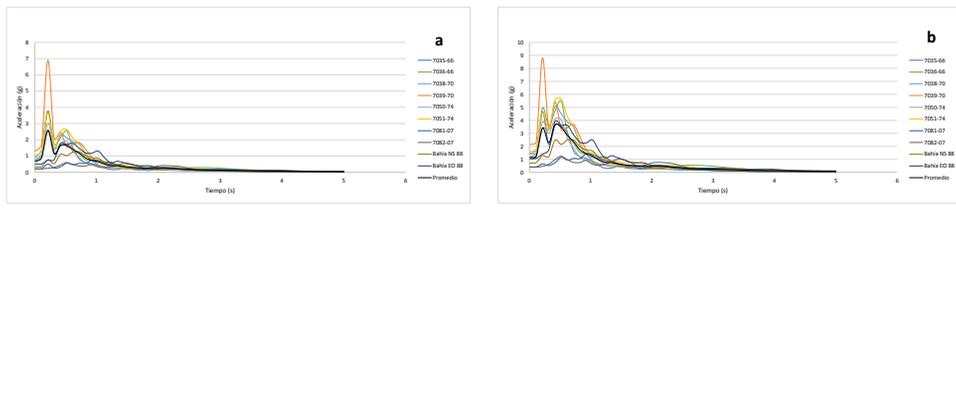


Figura 40 a) Aceleración Espectral piso 2, b) Aceleración Espectral piso 3, c) Aceleración Espectral piso 4, d) Aceleración Espectral piso 5.

Pórtico 14



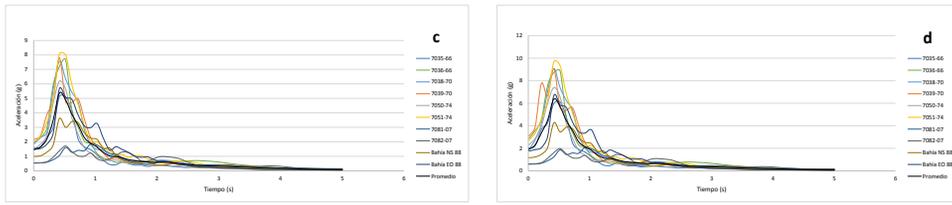


Figura 41 a) Aceleración Espectral piso 2, b) Aceleración Espectral piso 3, c) Aceleración Espectral piso 4, d) Aceleración Espectral piso 5.

Pórtico A

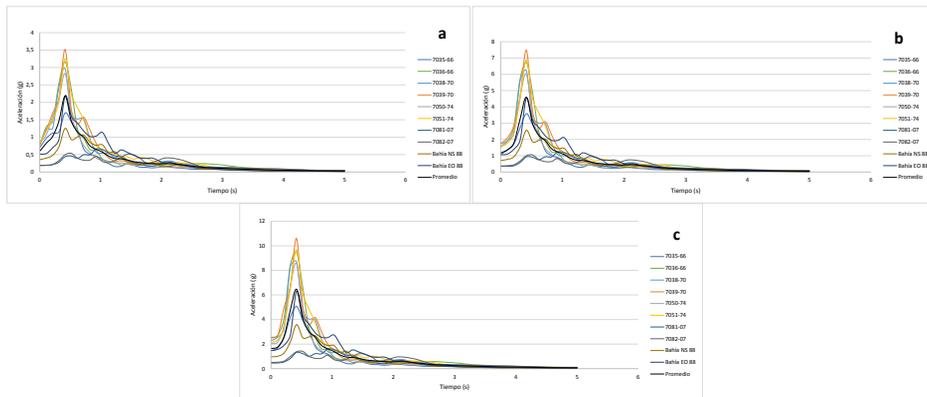


Figura 42 a) Aceleración Espectral piso 2, b) Aceleración Espectral piso 3, c) Aceleración Espectral piso 4.

Pórtico C

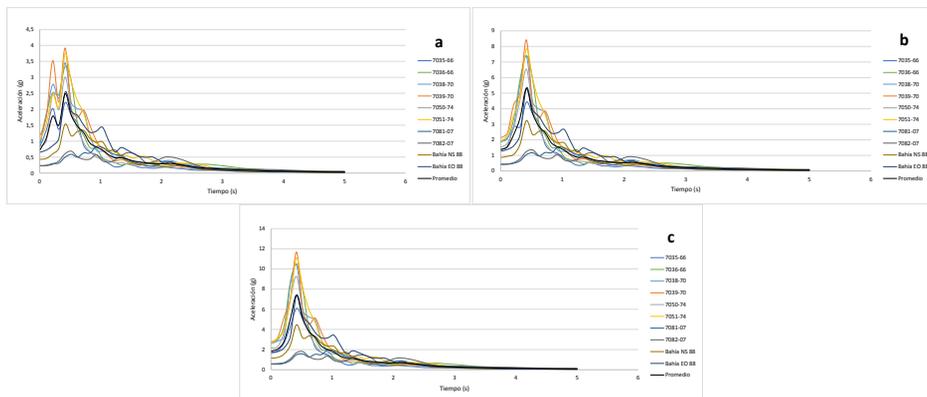


Figura 43 a) Aceleración Espectral piso 2, b) Aceleración Espectral piso 3, c) Aceleración Espectral piso 4.

Pórtico F

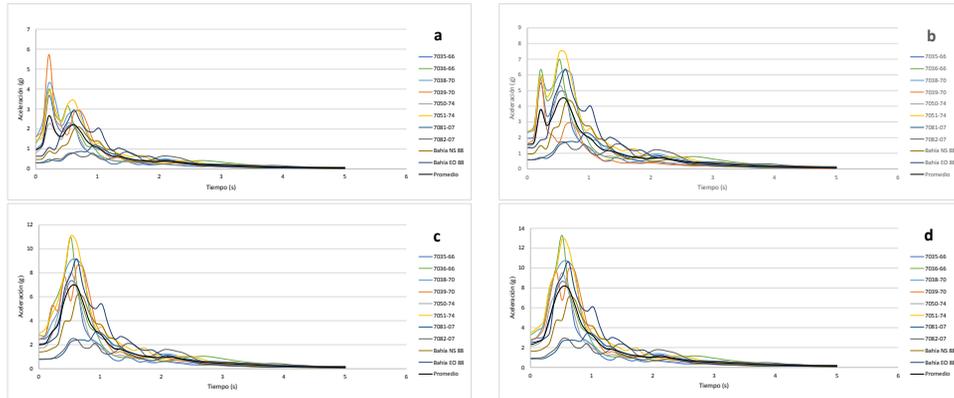


Figura 44 a) Aceleración Espectral piso 2, **b)** Aceleración Espectral piso 3, **c)** Aceleración Espectral piso 4, **d)** Aceleración Espectral piso 5.

Pórtico E

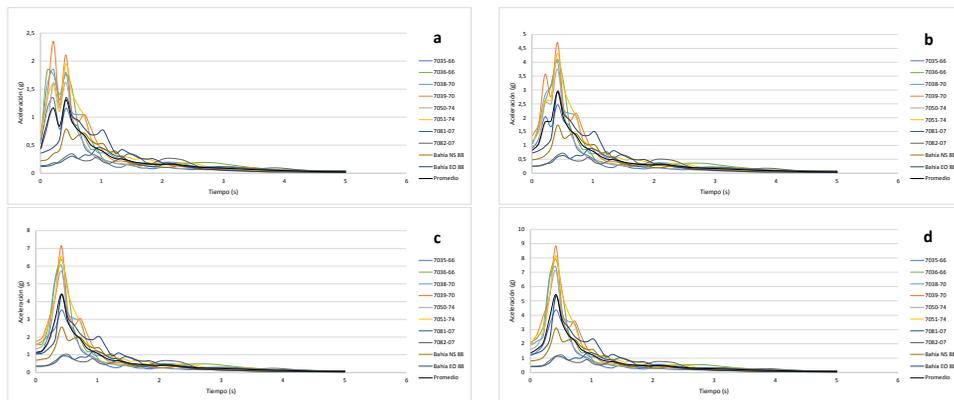


Figura 45 a) Aceleración Espectral piso 2, **b)** Aceleración Espectral piso 3, **c)** Aceleración Espectral piso 4, **d)** Aceleración Espectral piso 5.

En las figuras 39 a 45 se ha colocado el promedio de los espectros hallados con los 10 sismos. Ahora interesa ver los espectros en cada piso pero con los valores promedios de cada pórtico; esto se presenta en las figuras 46 a 49. Nuevamente se obtiene el espectro promedio con los valores promedios de cada piso y de esa forma se tiene un solo valor.

En la tabla 16 se resume los valores obtenidos. En efecto, se presenta en primer lugar los valores máximos del espectro promedio encontrado en cada pórtico y en cada piso. Al final de cada grupo de datos se presenta el valor promedio de las ordenadas espectrales de los pórticos.

Segundo Piso

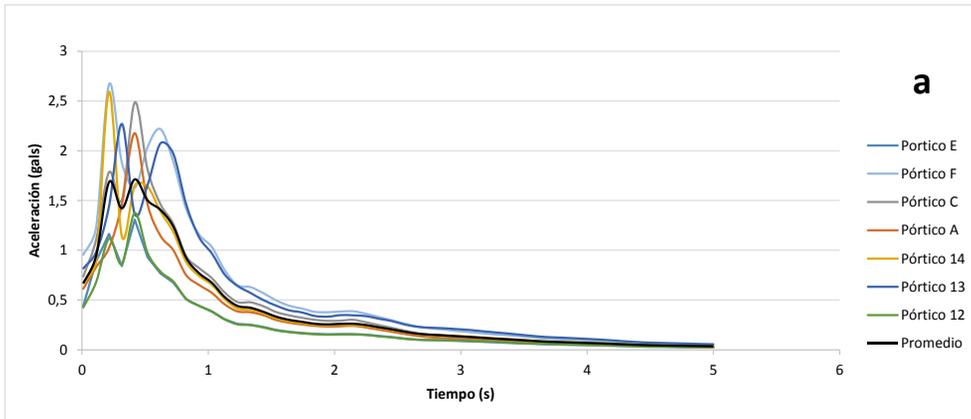


Figura 46 a) Contiene Espectros promedios del segundo piso de todos los pórticos del Bloque Estructural 3.

Tercer Piso

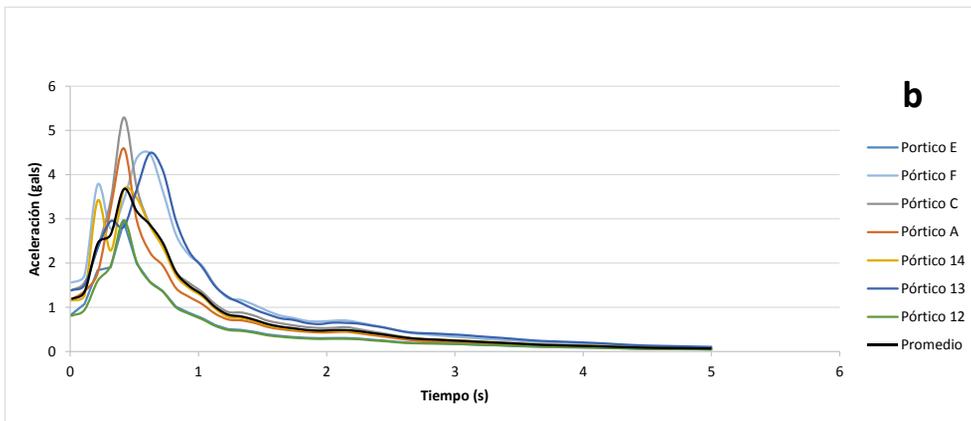


Figura 47 b) Contiene Espectros promedios del tercer piso de todos los pórticos del Bloque Estructural 3.

Cuarto piso

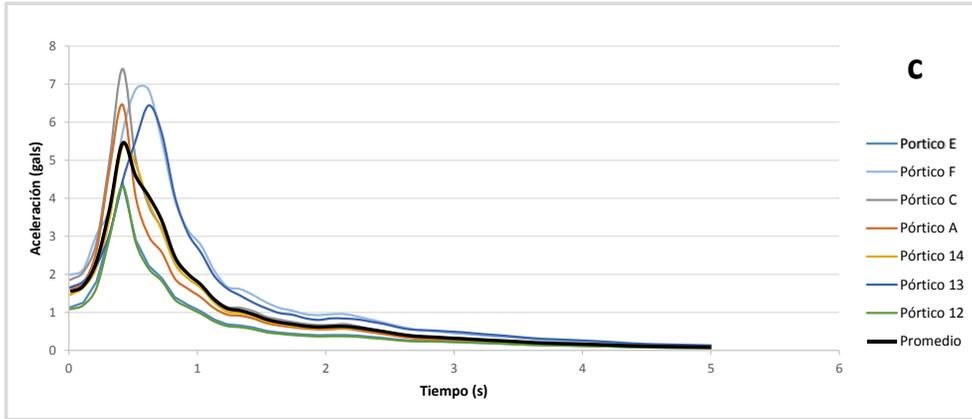


Figura 48 c) Contiene Espectros Promedios del cuarto piso de todos los pórticos del Bloque Estructural 3.

Quinto piso

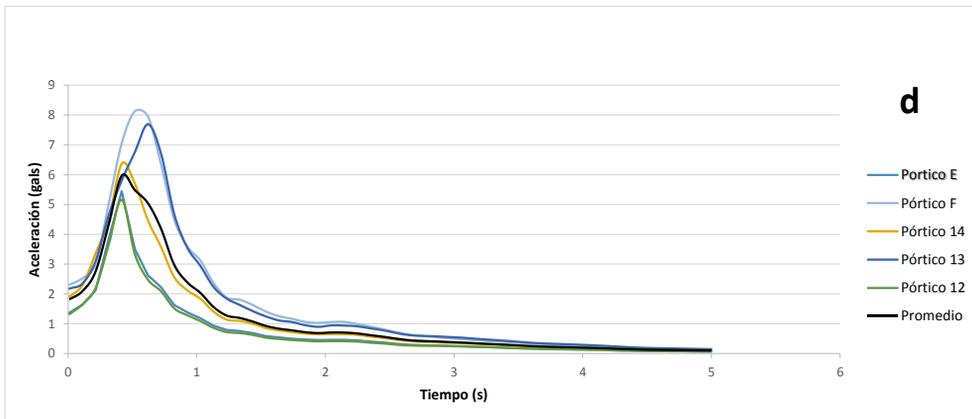


Figura 49 d) Contiene Espectros del quinto piso de todos los pórticos del Bloque Estructural 3.

Tabla 16 Valores máximos de los promedios de los espectros de piso y valor promedio de los promedios. Sismo DBE

| Piso | Pórtico | A.max (g) | Sismo |
|-----------------|--------------|-----------|---------|
| 2 | A | 3,51 | 7039-70 |
| | C | 3,92 | 7039-70 |
| | E | 2,35 | 7039-70 |
| | F | 5,73 | 7039-70 |
| | 12 | 2,25 | 7039-70 |
| | 13 | 4,47 | 7038-70 |
| | 14a | 6,9 | 7039-70 |
| Promedio | 4,16 | | |
| Piso | Pórtico | A.max (g) | Sismo |
| 3 | A | 5,54 | 7039-70 |
| | C | 8,42 | 7039-70 |
| | E | 4,71 | 7039-70 |
| | F | 7,45 | 7051-74 |
| | 12 | 4,73 | 7039-70 |
| | 13 | 7,47 | 7051-74 |
| | 14a | 8,81 | 7039-70 |
| Promedio | 6,73 | | |
| Piso | Pórtico | A.max (g) | Sismo |
| 4 | A | 6,62 | 7039-70 |
| | C | 11,67 | 7039-70 |
| | E | 7,15 | 7039-70 |
| | F | 11,05 | 7051-74 |
| | 12 | 6,91 | 7039-70 |
| | 13 | 10,66 | 7051-74 |
| | 14a | 8,05 | 7051-74 |
| Promedio | 8,87 | | |
| Piso | Pórtico | A.max (g) | Sismo |
| 5 | E | 8,83 | 7039-70 |
| | F | 13,27 | 7036-76 |
| | 12 | 8,27 | 7039-70 |
| | 13 | 10,66 | 7051-74 |
| | 14a | 9,67 | 7051-74 |
| Promedio | 10,14 | | |

6.4 Espectros de piso para el sismo MCE

En las figuras 50 a 56 se presentan los espectros de piso, en cada pórtico, en cada piso, para cada uno de los 10 registros y se halla los espectros promedios. Esta gráfica sirve para saber los valores máximos de los espectros de piso y el sismo con el que se encuentran esos máximos.

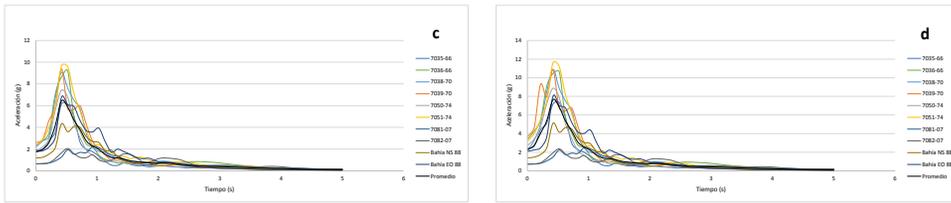


Figura 52 a) Aceleración Espectral piso 2, b) Aceleración Espectral piso 3, c) Aceleración Espectral piso 4, d) Aceleración Espectral piso 5. Sismo MCE

Pórtico A

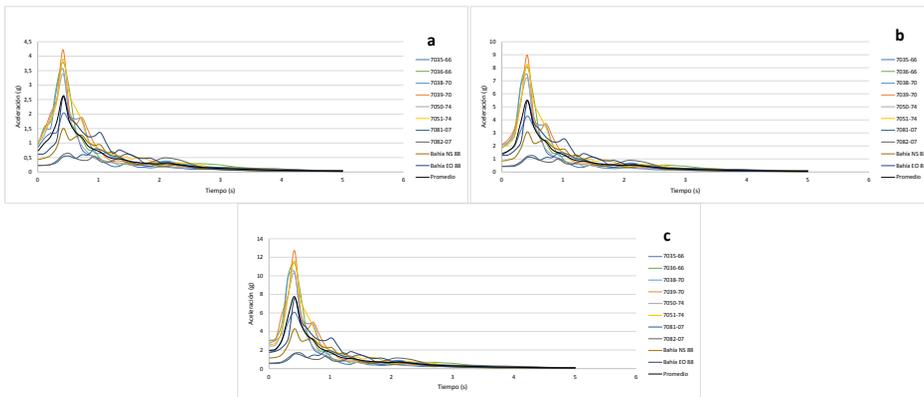


Figura 53 a) Aceleración Espectral piso 2, b) Aceleración Espectral piso 3, c) Aceleración Espectral piso 4. Sismo MCE.

Pórtico C

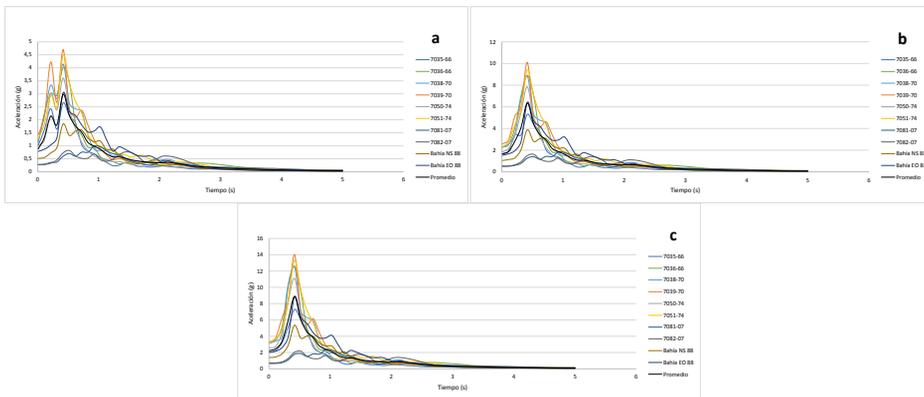


Figura 54 a) Aceleración Espectral piso 2, b) Aceleración Espectral piso 3, c) Aceleración Espectral piso 4. Sismo MCE

Pórtico F

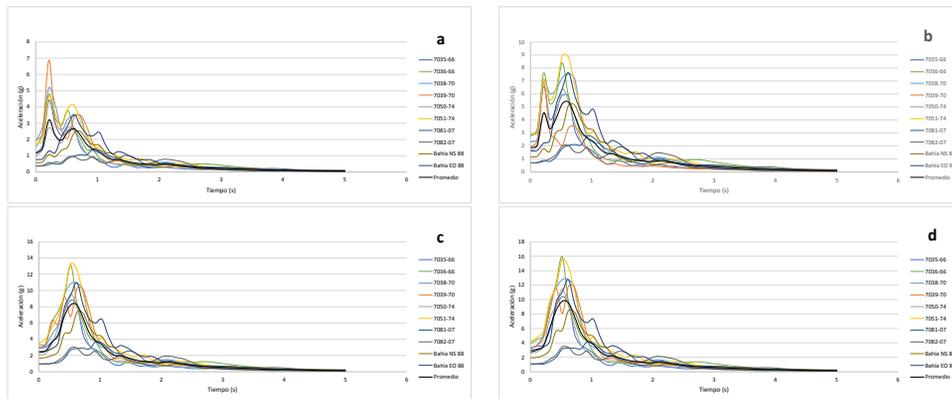


Figura 55 a) Aceleración Espectral piso 2, b) Aceleración Espectral piso 3, c) Aceleración Espectral piso 4, d) Aceleración Espectral piso 5. Sismo MCE

Pórtico E

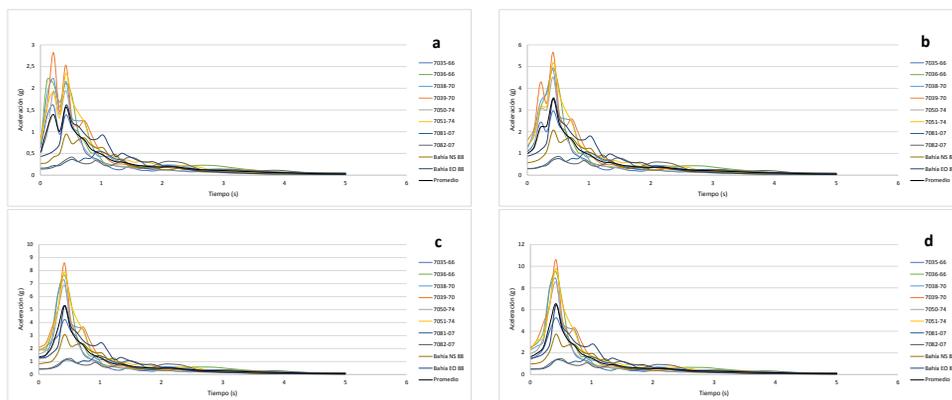


Figura 56 a) Aceleración Espectral piso 2, b) Aceleración Espectral piso 3, c) Aceleración Espectral piso 4, d) Aceleración Espectral piso 5. Sismo MCE

Ahora, en las figuras 57 a 60 se presentan los espectros medios hallados en cada pórtico y de estos se obtiene un nuevo espectro medio, denominado en las gráficas como “promedio”.

Todos los valores máximos de los espectros promedios se indican en la tabla 17, en forma similar a la tabla 16

Segundo piso

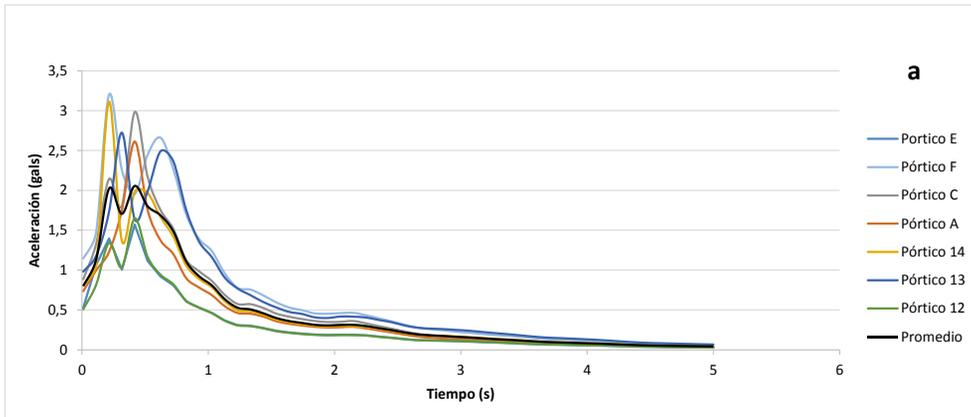


Figura 57 a) Contiene Espectros del segundo piso de todos los pórticos del Bloque Estructural 3.

Tercer Piso

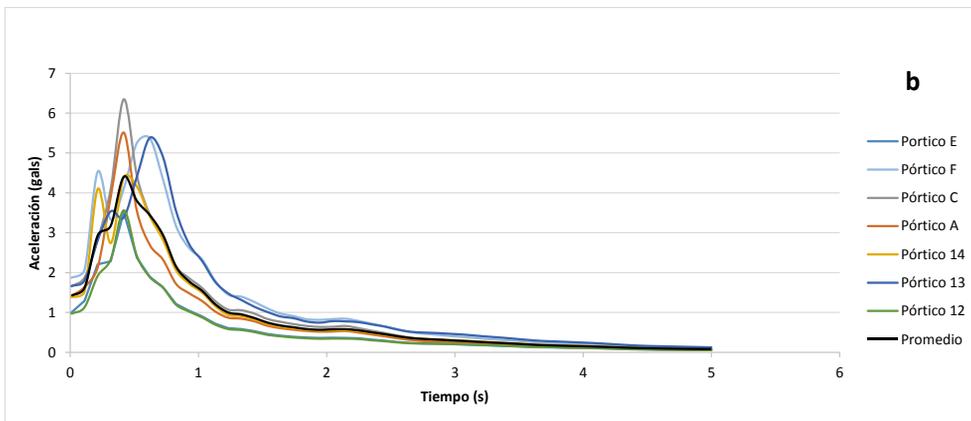


Figura 58 b) Contiene Espectros del tercer piso de todos los pórticos del Bloque Estructural 3.

Cuarto piso

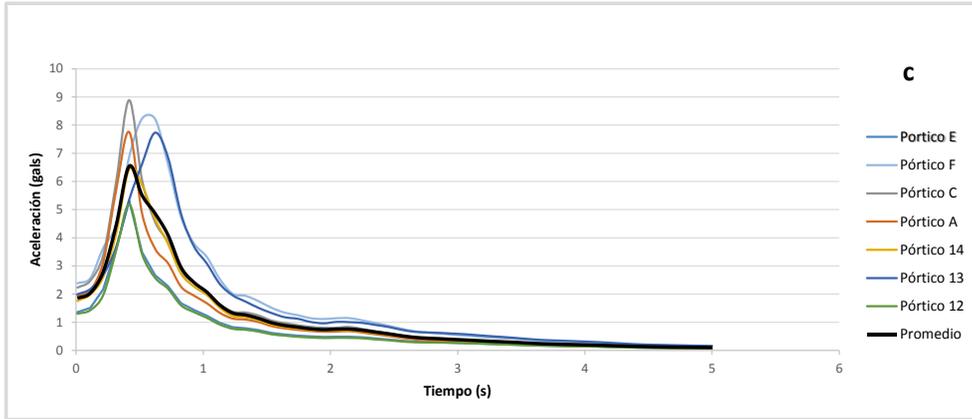


Figura 59 c) Contiene Espectros del cuarto piso de todos los pórticos del Bloque Estructural 3.

Quinto piso

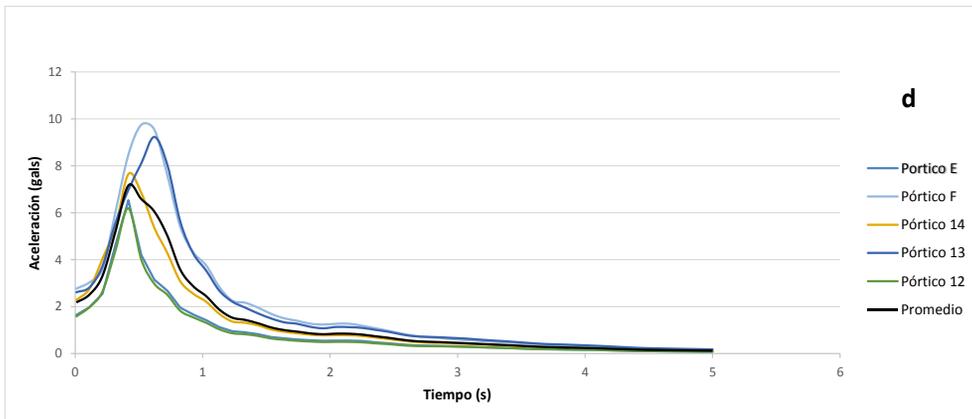


Figura 60 d) Contiene Espectros del quinto piso de todos los pórticos del Bloque Estructural 3.

Tabla 17 Valores máximos de los espectros promedios y valores máximos del espectro promedio de los promedio. Sismo MCE

| Piso | Pórtico | A.max (g) | Sismo |
|-----------------|----------------|------------------|--------------|
| 2 | A | 4,212 | 7039-70 |
| | C | 4,704 | 7039-70 |
| | E | 2,82 | 7039-70 |
| | F | 6,876 | 7039-70 |
| | 12 | 2,7 | 7039-70 |
| | 13 | 5,364 | 7038-70 |
| | 14a | 8,28 | 7039-70 |
| Promedio | 4,99 | | |
| Piso | Pórtico | A.max (g) | Sismo |
| 3 | A | 6,648 | 7039-70 |
| | C | 10,104 | 7039-70 |
| | E | 5,652 | 7039-70 |
| | F | 8,94 | 7051-74 |
| | 12 | 5,676 | 7039-70 |
| | 13 | 8,964 | 7051-74 |
| | 14a | 10,572 | 7039-70 |
| Promedio | 8,08 | | |
| Piso | Pórtico | A.max (g) | Sismo |
| 4 | A | 7,944 | 7039-70 |
| | C | 14,004 | 7039-70 |
| | E | 8,58 | 7039-70 |
| | F | 13,26 | 7051-74 |
| | 12 | 8,292 | 7039-70 |
| | 13 | 12,792 | 7051-74 |
| | 14a | 9,66 | 7051-74 |
| Promedio | 10,65 | | |
| Piso | Pórtico | A.max (g) | Sismo |
| 5 | E | 10,596 | 7039-70 |
| | F | 15,924 | 7036-76 |
| | 12 | 9,924 | 7039-70 |
| | 13 | 12,792 | 7051-74 |
| | 14a | 11,604 | 7051-74 |
| Promedio | 12,17 | | |

7. COMENTARIOS Y CONCLUSIONES

Se encontró la respuesta no lineal de cada uno de los pórticos del Bloque Estructural 3, ante 5 sismos cuya fuente es interplaca tipo thrust, los mismos que primeramente fueron escalados al espectro de diseño y espectro máximo considerado con que se realizó el diseño estructural, para que sean compatibles en el rango de períodos estipulado por el ATC-07 10, en estructuras con aisladores sísmicos. Para el escalamiento se utilizó la técnica “weighted average”.

La no linealidad de los aisladores fue representada con el modelo de tres fases de Mc Vitty y Constantinou (2015). Se encontró las respuestas de desplazamientos en el sistema de aislación y en cada uno de los pisos, ante los 10 registros considerados y ante el sismo DBE los aisladores tienen la capacidad de desplazarse lo que les demanda estos terremotos trabajando en la segunda fase del modelo. Ante el sismo MCE los aisladores van a trabajar en la tercera fase pero la capacidad de desplazamiento es mayor que la demanda.

Se seleccionaron 4 sismos registrados en Perú y que dejaron mucho daño en las estructuras y son los registrados en 1966, 1970, 1974 y 2007. El quinto sismo seleccionado fue el de Bahía de Caráquez registrado en Ecuador en 1998. Pero como se indicó anteriormente fueron escalados (incrementados) sus aceleraciones del suelo por factores bastante altos.

En resumen el Bloque Estructural 3 va a tener un buen desempeño estructural ante sismos interplaca tipo thrust que pueden presentarse en la costa ecuatoriana. Las derivas de piso máximas que se hallaron fueron menores a 0.62% para el sismo DBE y 0.78% para el sismo MCE.

REFERENCIAS

1. Aguiar R., Almazán J. L., Dechent P., Suárez V., *Aisladores de base Elastoméricos y FPS*, Centro de Investigaciones Científicas, Escuela Politécnica del Ejército, ESPE, 302 p., Quito.
2. Aguiar R., (2010), “Analysis of three inter-plate seism of the thrust type, registered in Chile 2010, Peru 2007, *Revista Sul Americana de Engenharia Estrutural*, **7**, (2/3), 74-104, Passo Fundo, Brasil.
3. Aguiar R. (2012), *Dinámica de Estructuras con CEINCI-LAB*, Instituto Panamericano de Geografía e Historia, IPGH. Segunda edición, 416 p., Quito.
4. ASCE 7-10, *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*, American Society of Civil Engineers, 608 p.
5. Bozzo Luis y Barbat Alex, (1999), *Diseño sismo resistente en edificios. Técnicas Convencionales y avanzadas*, Editorial Reverte, Barcelona.
6. 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*, **21**, 1, 1-25. Disponible en: <http://www.riie.espe.edu.ec>

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. Egred J., (2009) *Isosistas de los sismos registrados en el Ecuador*. Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional.
9. EPS (2015), *Production Bearing test results for Ecuador University Building (ESPE), Triple Pendulum Bearing FPT8833/12-12/8-6*, Earthquake Protection Systems, Inc, 94 p., Vallejo, California.
10. FCFM (2012), *Mw=8.8 Terremoto en Chile, 27 de Febrero 2010*, Departamento de Ingeniería Civil de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile.
11. Hurtado Francisco, Bozzo Luis, (2008), "Numerical and experimental analysis of a shear-link energy dissipator for seismic protection of building", *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*, 8 p., Beijing, China.
12. McVitty, W.J. and Constantinou, M.C., (2015), *Property modification factors for seismic isolators: Design Guidance for Buildings*, Technical Report No. **MCEER-15-0005**, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo, Buffalo, NY, 2015.
13. NEC-15 (2015) Norma Ecuatoriana de la Construcción, SE-DS, Cargas Sísmicas. Diseño Sismo Resistente. 138 p. Quito.
14. Norma Técnica de Edificación E-30, (1997), *Diseño Sismo resistente*. Lima Perú.
15. Nuzzo Yolanda, Losanno Daniele, Serino Giorgio, Bozzo Luis, (2015), "A seismic-resistant Precast r.c. System equipped with Shear Link Dissipators for Residential Building", *International Journal of Civil and Structures Engineering, IJCE*, **2 (1)**, 270-275.
16. Retamales R. Boroschek R., Contreras V., Lagos R., Lafontaine M., (2015), "Aislación sísmica edificio Ñuñoa Capital", ACHISINA 2015, Paper 185, 10 p., Santiago de Chile.
17. Reyes J.C., Kalkan E., (2012), "How many records should be used in an ASCE/SEI-7 ground motion scaling procedures?", *Earthquake Spectra*, **28 (3)**, 1223-1242.EERI.
18. Saragoni R., Ruiz S., (2012) *Implicaciones y nuevos desafíos de diseño sísmico de los acelerogramas del terremoto del 2010*, Capítulo 6 del libro: "Mw=8.8 Terremoto en Chile, 27 de Febrero 2010", Departamento de Ingeniería Civil de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile.
19. Sarkisian, M., Lee, P., Hu, L. Doo, C., and Tsui, A. (2011). "Enhanced Seismic Performance of the New San Bernardino Justice Center," *SEAOC 2011 Convention Proceedings*, SEAOC.

ANEXO A

Se realizó un aporte al sistema de computación **CEINCI-LAB** con el programa **newmarklineal2** el cual reporta una tabla con los valores de las aceleraciones y desplazamientos en cada piso para cualquier tipo de pórtico, es decir pórticos de varios números de piso; igualmente el programa presenta una tabla con los valores máximos de aceleraciones, desplazamientos y velocidades en cada piso, todo esto para el registro del sismo que se desee analizar.

Los datos de entrada que requiere el programa son los siguientes:

- [Tabla,Tabla1]=**Newmarklineal2**(ux,M,C,K,J,dt,beta)

ux: Vector que contiene los registros del acelerograma en m/s²

M: Matriz de masas del sistema (T s²/m)

C: Matriz de amortiguamiento del sistema (T s/m)

K: Matriz de rigidez del sistema (T/m)

J: Vector unitario para caso plano.

dt: Incremento de tiempo con el cual se calcula la respuesta.

beta: Valor de 1/4 para aceleración constante, 1/6 para aceleración lineal y 1/8 escalonada.

Los datos de salida del programa se describen a continuación:

Tabla: empezando de izquierda a derecha imprime una columna con el resumen de tiempo, aceleraciones y desplazamientos dependiendo del número de pisos que tenga el pórtico para un sismo determinado.

Tabla1: imprime el número de piso, las aceleraciones máximas, los desplazamientos máximos y las velocidades máximas de cada piso, es decir que escoge el valor absoluto máximo de cada piso dado en la tabla anterior.

Ejemplo del uso del programa para obtener los resultados en un pórtico:

- 1) Se carga el sismo que se desee analizar

```

disp('Sismo de Huacho Perú 1966 componente Norte-Sur = 1')
disp('Sismo de Huacho Perú 1966 componente Este-Oeste = 2')
disp('Sismo de Chimbote Perú 1970 componente Norte-Sur = 3')
disp('Sismo de Chimbote Perú 1970 componente Este-Oeste = 4')
disp('Sismo de Lima Perú 1974 componente Norte-Sur = 5')
disp('Sismo de Lima Perú 1974 componente Este-Oeste = 6')
disp('Sismo de Perú 2007 componente Norte-Sur = 7')
disp('Sismo de Perú 2007 componente Este-Oeste = 8')
disp('Sismo de Bahía 1998 componente Norte-Sur = 9')
disp('Sismo de Bahía 1998 componente Este-Oeste = 10')

sismo = 'n/d'; %Nombre con el que se generará la hoja de excel

j=input('Ingrese el sismo que desea analizar ')

if j==1 %Sismo de Huacho Perú 1966 componente Norte-Sur
load ns_huachoperu
sismo = 'ns_huachoperu';
np=length(ns_huachoperu);
dT=0.02; % Incremento de Tiempo
for i=1:np
    t(i)=i*dT;
    ux1(i)=7.723*9.8*ns_huachoperu(i);
    ux=ux1;
end
end
end

```

- 2) Se ingresa el valor de beta
- 3) Se cargan los archivos de la matriz de rigidez lateral y de masas. Obtenidos en otro programa.
- 4) Se obtienen las propiedades dinámicas, periodos, frecuencias y modos de vibración. Utilizando el programa **orden_eig** de la galería de programas de CEINCI-LAB.
- 5) Hallamos la matriz de amortiguamiento con el programa **amortiguamiento2**.
- 6) Finalmente llamamos a la función **newmarklineal2** para que nos reporte las tablas antes mencionadas.

```

beta=1/6; % Aceleracion lineal
% Matriz de rigidez
load KL142
% Matriz de Masas
load M142
[T,fi,OM]=orden_eig(KL14,M14);
%zeda del hormigón=0.05, zeda del acero=0.03
z1=[0.2028; 0.1164; 0.03; 0.03; 0.03; 0.03]; %ingresar los valores de zeda para cada modo
[C]=amortiguamiento2(M14,fi,OM,z1)
J=[1;1;1;1;1;1];
[tabla,tabla1]=Newmarklineal2(ux,M14,C,KL14,J,dT,beta);
tabla %Valores de la tabla: me reporta tiempo, aceleraciones de c/piso, desplazamientos de c/piso
tabla1 %Me reporta el número de piso, aceleración máxima y desplazamiento máximo

```

Con los datos que se obtienen al correr los registros de los 10 sismos en los 7 pórtricos que forman el bloque estructural 3 se procedió a realizar el análisis de los resultados, obtener las figuras presentadas anteriormente y los valores de desplazamientos máximos para cada pórtrico en cada piso, igualmente se obtuvieron los espectros de piso.

Los programas del sistema de computación **CEINCI-LAB** se hallan publicados en el portal de la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, ULEAM, dentro de la carpeta de Investigaciones se encuentra la carpeta Centro de Investigaciones en Ingeniería Sísmica y dentro de esta se halla otra denominada **CEINCI-LAB**