



II JORNADAS DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

EL MEGA SISMO DE CHILE DE 2010 Y SISMOS RECIENTES

Roberto Aguiar Falconí
Centro de Investigaciones Científicas
Escuela Politécnica del Ejército
Av. Gral. Rumiñahui s/n. Valle de los Chillos
raguiar@espe.edu.ec

RESUMEN

Se presentan varias lecciones dejadas por el Mega Sismo de Chile de 2010 en el campo de la Sismología y de la Ingeniería Sismo Resistente, las mismas que debemos asimilarlas y aplicarlas a nuestro entorno para reducir la alta vulnerabilidad sísmica que tienen las construcciones de Ecuador.

En el Ecuador se puede registrar un sismo similar al del 27 de febrero de 2010 que tuvo una magnitud de 8.8, que afectó a todo el País pero también puede presentarse un sismo asociado a fallas ciegas como lo fue el sismo de Nueva Zelanda del 21 de febrero de 2011 o un sismo impulsivo como el de Lorca del 11 de mayo de 2011. Por este motivo se analizan también estos eventos sísmicos ya que no estamos exentos a que tengamos un evento similar, habida cuenta que el gran desarrollo que han experimentado las grandes ciudades ha llevado a tener construcciones muy próximas a fallas geológicas activas.

La no ocurrencia de sismos severos en Quito en las últimas décadas ha llevado a que una buena parte de sus construcciones sean muy vulnerables, especialmente aquellas que fueron construidas por la década de los años sesenta del siglo pasado. Es muy importante tener en cuenta todo esto y proceder al reforzamiento de las mismas.

La forma más segura de construir en zonas de alta peligrosidad sísmica es con aisladores de base o disipadores de energía, dependiendo de las características de la estructura y del sismo de diseño, por este motivo en este artículo se indica el desempeño que tuvieron estas estructuras en el Mega Sismo de Chile de 2010.

PALABRAS CLAVES.- Falla Ciega. Sismo Impulsivo. Aisladores de Base. Sismo de Lorca.

1. INTRODUCCIÓN

El mundo se consternó con el sismo de Haití, del 12 de enero de 2010, que tuvo una magnitud de 7.0 y que causó demasiado daño en toda su infraestructura ingenieril, dejando una pérdida estimada de 14000 millones de dólares. A este evento se lo conoce con el nombre del sismo de la pobreza porque no es posible que en el siglo XXI se tengan construcciones tan vulnerables. (1).

Posteriormente, el mundo vio aterrado el daño dejado por el Mega Sismo de Chile del 27 de febrero de 2010, que tuvo una magnitud de 8.8. No podíamos creer como en un País que tiene un elevado nivel de Ingeniería Sísmica las pérdidas económicas hayan alcanzado los 30000 millones de dólares. (2)

Pero todavía no termina los sobresaltos que hemos tenido con la ocurrencia de grandes terremotos. Si nos admiramos con lo sucedido en Chile que decir con lo que pasó en el sismo del 11 de marzo del 2011 en Japón cuando un sismo de magnitud 8.9 dejó 235000 millones de dólares de pérdidas. Se entendía y se entiende que Japón es uno de los Países con más alto nivel de Ingeniería Sísmica del mundo.



II JORNADAS DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

Es importante destacar que la recuperación de los desastres es ante todo un asunto nacional, ya que la ayuda internacional por lo regular es mínima comparada con las pérdidas dejadas por el sismo. Tal vez la excepción constituye el caso de Haití donde la ayuda externa fue de 4600 millones de dólares pero en Chile la ayuda externa fue de 74 millones de dólares y en el caso de Japón de 704 millones de dólares.

De tal manera que el tener estructuras vulnerables ante la acción de los sismos a la larga se convierte en un problema para los gobernantes ya que son los propios Países afectados los que deben obtener los recursos necesarios para recuperar lo perdido en 2 o 3 minutos, a lo sumo. En el Ecuador existen edificaciones construidas en los años sesenta del siglo pasado que son muy vulnerables, que están a tiempo de ser reforzadas para evitar lo que ha sucedido en otras partes del mundo. En la figura 1 se muestra un ejemplo de ello, a la izquierda se presentan dos estructuras vulnerables y a la derecha se indica cual es el comportamiento que tuvieron estructuras similares durante el sismo del Perú de 2007. (3).



Figura 1 Estructuras vulnerables de Quito a la izquierda y fallas registradas en el sismo de Perú de 2007.

En la parte superior izquierda se muestra la falla denominada “Columna Corta” en un Centro Educativo de la ciudad de Quito y a la derecha se aprecia como falló un Centro de Salud con este tipo de falla en Pisco, durante el sismo del Perú del 2007. En la parte inferior izquierda se presenta un Colegio construido a mediados del siglo pasado con ladrillos macizos, aparentemente se la ve bastante fuerte pero a la derecha se muestra una estructura similar de la ciudad de Ica que estuvo a punto de colapsar durante el sismo del Perú de 2007 ya que el ladrillo trabaja muy bien a compresión y nada más no tiene capacidad para deformarse lateralmente ante acciones sísmicas.



Lo mostrado en la figura 1 es solamente un pequeño ejemplo de la vulnerabilidad sísmica que tienen las edificaciones de Quito y quizá nunca digamos lo que están diciendo los españoles de Lorca luego del sismo de mayo de 2011, “hemos tenido un Haití en nuestras construcciones”.

2. SISMOS INTERPLACA TIPO THRUST

En la figura 2 se presenta con una estrella el epicentro del Mega Sismo de Chile de 2010, en la parte superior se indica las coordenadas geográficas y profundidad focal de acuerdo al USGS. (4). El rectángulo representa el área de ruptura del sismo que tuvo un ancho aproximado de 150 km. Y un largo de 450 km. Es importante destacar que este sismo causó gran daño en Santiago de Chile que se halla a 400 km., del epicentro; se entiende que a esta distancia las ondas sísmicas ya se atenúan pero los sismos interplaca tipo thrust tienen esta característica de que afectan a una gran extensión que se encuentran en la dirección de la ruptura del suelo.

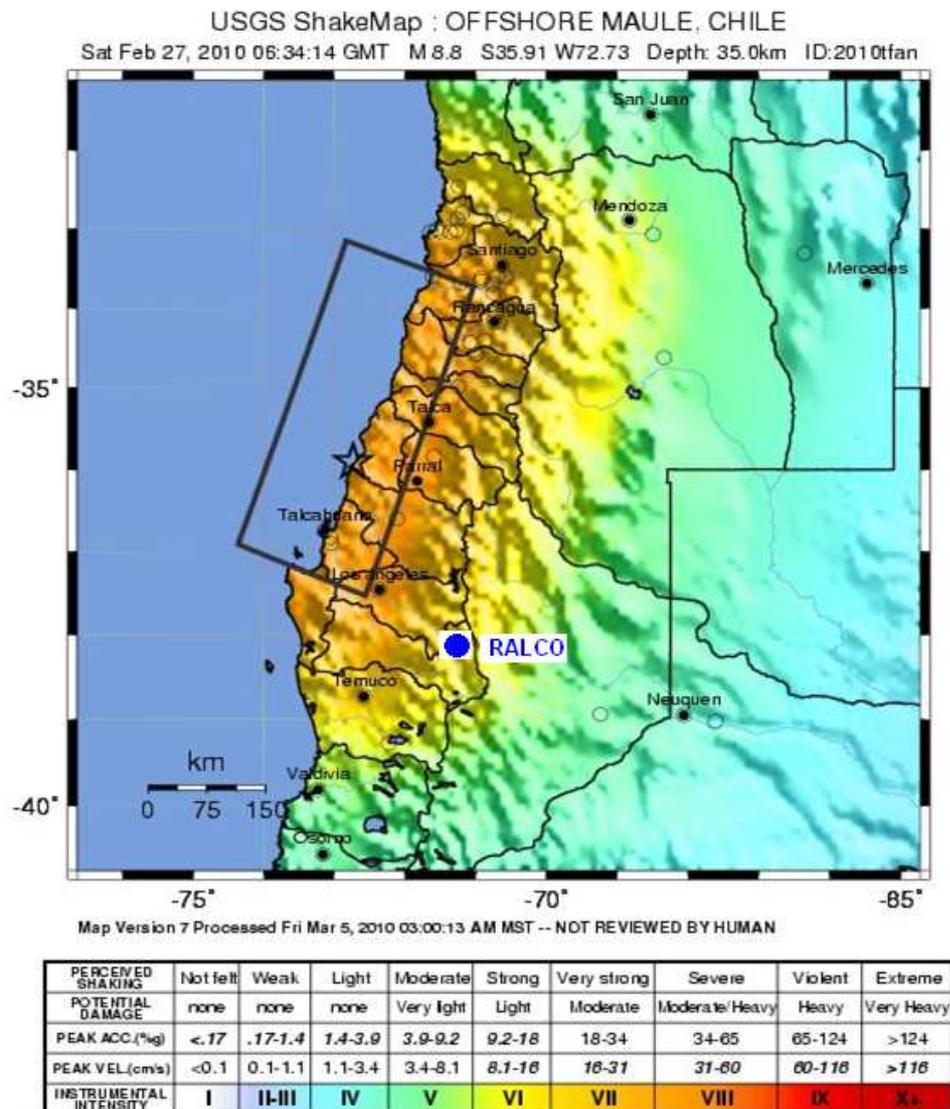


Figura 2 Datos sísmológicos del Mega Sismo de Chile de 2010.



II JORNADAS DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

En la figura 2 se muestra la ubicación de la Presa Ralco, construida con Hormigón Rodillado en Chile; es una Presa que tiene 155 m., de alto, una longitud de 360 m., en su corona y en la cual se han colocado 1.5 millones de metros cúbicos de hormigón. Tiene ventajas y desventajas el uso de Hormigón Rodillado pero antes vale la pena recordar que un metro cúbico de hormigón rodillado se obtiene con 1.5 a 3 sacos de cemento, a diferencia del Hormigón Normal en que el mismo volumen de hormigón se obtiene con 5 a 7 sacos de cemento.

Los efectos de temperatura son menores en el Hormigón Rodillado pero tienen menores resistencias, es por ello que en sus diseños se especifica hormigones con resistencias entre 140 y 180 kg/cm². Es muy preocupante la construcción de Presas de gran altura con Hormigón Rodillado, en zonas de alta peligrosidad sísmica por ese motivo era una inquietud conocer el comportamiento sísmico de la Presa Ralco que se indica en la figura 3.



Central Hidroeléctrica Ralco, por [EndesaChile](#)

Figura 3 Presa Ralco construida en Chile con Hormigón Rodillado.

La Presa Ralco no tuvo problemas durante el sismo de Chile de 2010 y esto en parte se debe a que la ruptura del sismo fue en dirección nor este. En la figura 4 se muestra las isosistas del sismo de 2010 y se aprecia que la Presa estuvo ubicada en una zona donde la Intensidad Sísmica en la escala MSK fue de 5. De tal manera que persiste la inquietud del comportamiento sísmico de las Presas con Hormigón Rodillado, en esta oportunidad no pasó nada debido a que en la zona de la Presa la Intensidad Sísmica fue baja y esto es debido a la forma de ruptura del sismo.

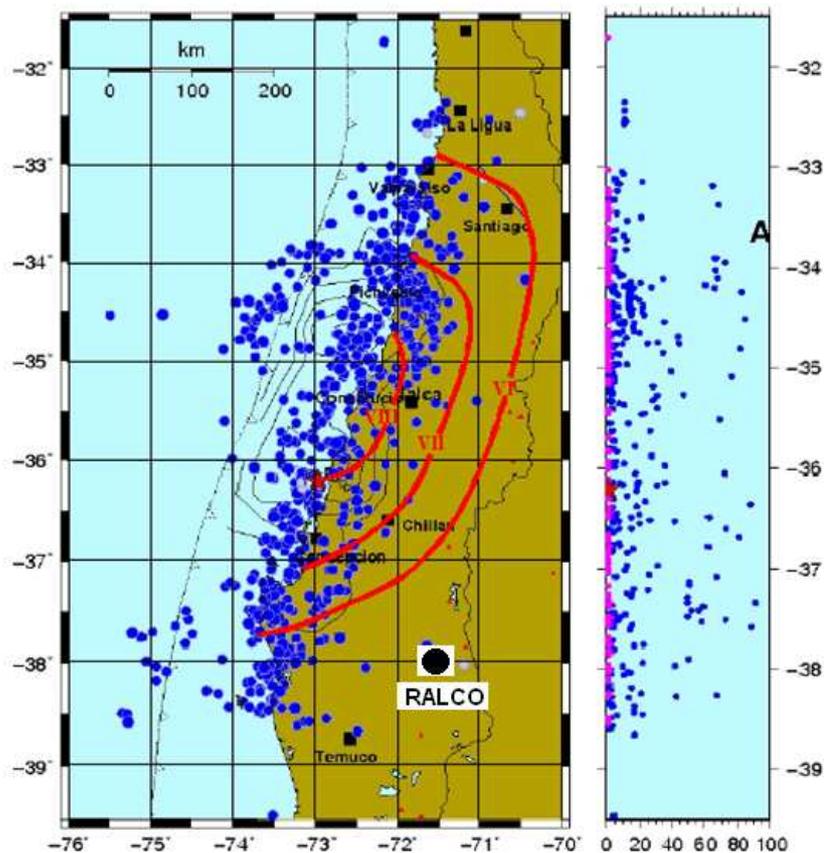
En la figura 4 con línea más gruesa se indica las curvas de igual Intensidad. Nótese que en la región epicentral la intensidad máxima fue de VIII esto nos debe llevar a reflexionar sobre la necesidad de volver a estudiar los sismos históricos de Ecuador (registrados antes de 1900) que tienen intensidades epicentrales de IX o X y esto fue muy probablemente al mal comportamiento que tuvieron las Iglesias coloniales construidas con adobe.

En la figura 4 también se aprecia, con línea más fina, las curvas de ruptura del sismo obtenidas por el USGS y se observa que la curva de mayor ruptura se aproxima de mejor forma a la isosista de intensidad VII. Esta información es muy importante para definir en forma aproximada la longitud de ruptura de un sismo a partir de la información macro sísmica, en sismos de subducción con bajo ángulo de buzamiento. (5).

En la figura 5 se muestra los registros de aceleraciones, hallados en la Universidad de Chile del Mega Sismo de 2010 y se observa que el sismo duró 140 segundos. Es decir que se trató de un sismo extremadamente largo, con una gran cantidad de pulsos de energía.



II JORNADAS DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL



Aguiar R., Astroza M., (2010) XXXIV Jornadas Sudamericanas de Estructuras, San Juan, Argentina.

Figura 4 Superficie de Ruptura; información macro sísmica y réplicas del sismo de Chile de 2010.

En la figura 5 también se aprecia que la fase intensa, la que produce daño tuvo una duración que está entre 45 y 50 segundos. Mientras más dura el sismo mayor es el daño esperado.

En resumen los sismos interplaca tipo thrust de gran magnitud afectan grandes extensiones de territorio, son sismos sumamente largos, con una fase intensa considerable y que tienen muchos pulsos de energía todo esto los convierte en sismos sumamente peligrosos.

En el Ecuador, se tienen varios sismos de las mismas características, por mencionar a algunos se indican los registrados en 1906, que también tuvo una magnitud de 8.8; el Sismo de Guayaquil de 1942 con una magnitud de 7.9, se conoce con el nombre de sismo de Guayaquil a pesar de que se registró frente a las costas de Jama, en Manabí por el gran daño que dejó en varios edificios de Hormigón Armado, también se pudo haber llamado sismo de Guaranda porque en la mencionada ciudad también dejó un considerable daño.

El sismo más reciente de los interplaca tipo thrust es el de Bahía de Caráquez de 1998 que tuvo una magnitud de 7.1 y que puso a prueba que tan buena era la Ingeniería Sismo Resistente en el Ecuador, habida cuenta de que en la ciudad de Bahía de Caráquez se habían terminado de construir varios edificios de Hormigón Armado. La magnitud del sismo no fue tan alta sin embargo de ello causó el colapso de un edificio durante el sismo y cuatro más fueron derrocados por sus dueños debido al gran daño que experimentaron.



II JORNADAS DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

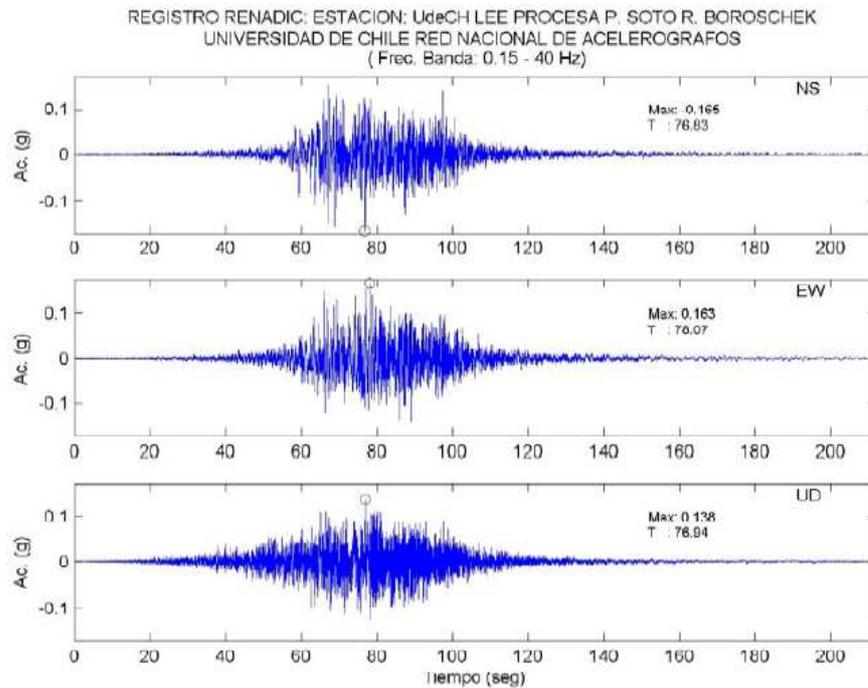


Figura 5 Acelerogramas del Mega Sismo de Chile de 2010 registrados en la Universidad de Chile.

3. SISMOS ASOCIADOS A FALLAMIENTO LOCAL

Pero no solamente los sismos de magnitud alta y de subducción son los que causan gran daño en las estructuras. También los sismos de magnitud baja o moderada pero que se encuentren en el campo cercano ocasionan grandes daños en las estructuras. Para ilustrar lo anotado se presentan dos sismos, el uno registrado en Nueva Zelanda y el otro en España, los dos son en el 2011.

El 3 de septiembre de 2010 se registro un sismo de magnitud 7.1, a 45 Km., de la ciudad de Christchurch en Nueva Zelanda y se obtuvieron aceleraciones máximas de 1.26 g., fuera de la ciudad y de 0.80 g., dentro de la ciudad. Siendo "g" la aceleración de la gravedad.



Figura 6 Epicentros de los sismos de Nueva Zelanda.



Posteriormente, el 21 de febrero de 2011 se dio una réplica de este sismo con una magnitud de 6.3, pero esta vez el epicentro se hallaba más cerca de la ciudad de Christchurch, como se observa en la figura 6. La distancia epicentral en este caso es de 10.5 Km., y las aceleraciones máximas fuera de la ciudad fueron de 2.20 g., y dentro de la ciudad de 1.80 g.

Tabla 1 Datos de los sismos de Nueva Zelanda de 2010 y 2011.

Sismo	Magnitud Mw	Profundidad Focal (km.)	Distancia Epicentral (km.)	Aceleración Máxima	
				Fuera ciudad	Dentro ciudad
3-09-2010	7.1	11	45	1.26 g.	0.80 g.
21-02-2011	6.3	5	10.5	2.20 g.	1.80 g.

Nótese que a pesar de tener menor magnitud pero por estar más cerca de Christchurch se obtuvieron mayores aceleraciones espectrales y por ende más daño en las estructuras. Estos dos sismos están asociados a una falla ciega. En la tabla 1 se muestran los datos de estos dos sismos, cuya conclusión es que los sismos asociados a fallas geológicas locales pueden ser más severos que los sismos de subducción.

Otro caso, se tuvo muy recientemente con el sismo de Lorca, en España del 11 de Mayo de 2011, cuando a las 17h05 se registró un sismo de magnitud 4.5 y a las 18h47 se dio el sismo de magnitud de 5.1 que causó daños asociados a la directividad de la falla. Es decir los daños no fueron en toda la ciudad de Lorca sino en sitios muy específicos como se aprecia a la derecha de la figura 7. A la izquierda se presentan los dos epicentros asociados a la Falla de Alhama de Murcia.

Un terreno inestable



Figura 7 Epicentros del Sismo de Lorca del 15 de Mayo de 2011

El sismo de Lorca es un típico sismo impulsivo y como tal se puso de manifiesto la directividad de la falla en el daño registrado. En la figura 8 se muestran los registros de las tres componentes del sismo de Lorca, se aprecia en primer lugar que el sismo fue de tipo impulsivo es decir que liberó una gran cantidad de energía sísmica en 2 segundos. Otra cosa que se aprecia es que para la componente N-S la aceleración máxima registrada fue de 0.367 g., cantidad sumamente alta para un sismo de magnitud 5.1 y todo esto se debe a la cercanía en que se encontraba la estación sísmica.

De tal manera que un sismo de baja magnitud puede ser muy peligroso para las estructuras que se hallan en el campo cercano.

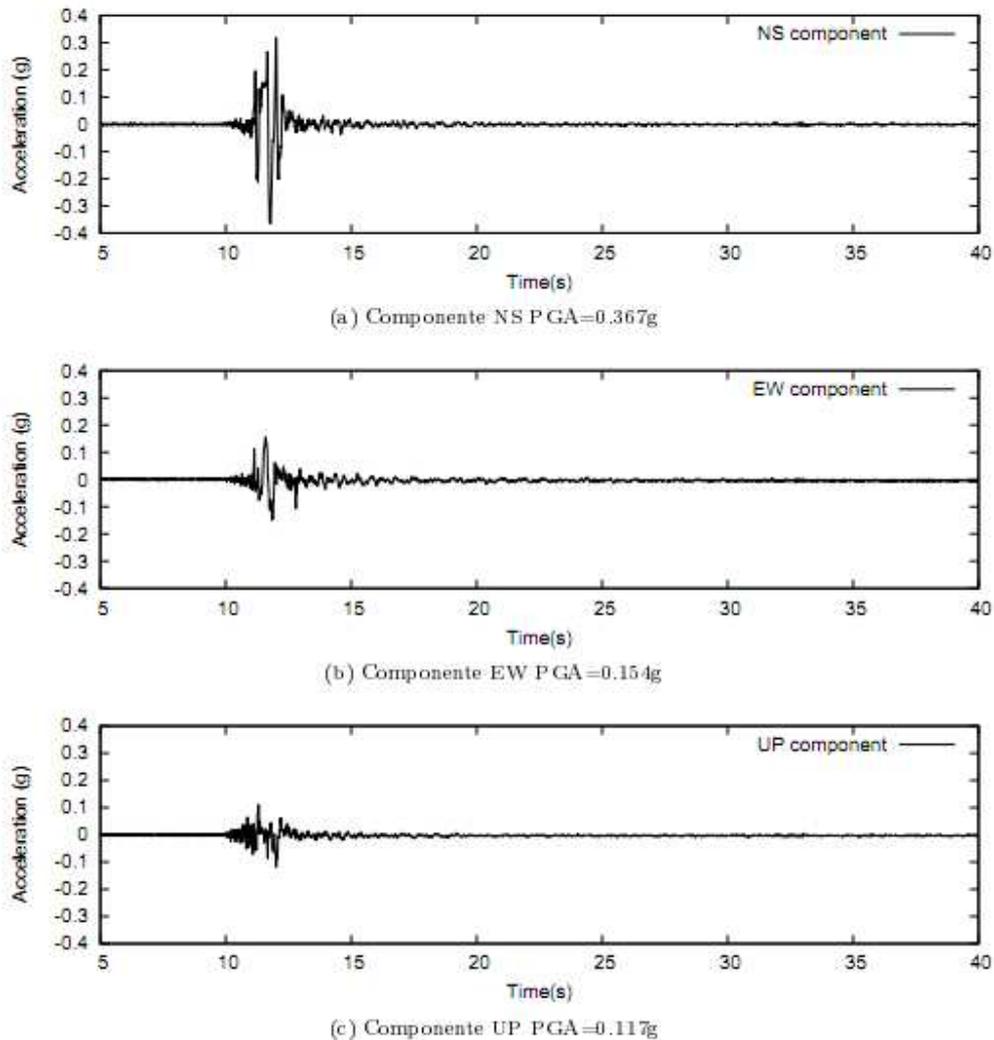


Figura 8 Registros del Sismo de Lorca del 11 de Mayo de 2011.

Lo indicado en el presente apartado tiene especial importancia para la ciudad de Quito que se halla sobre una serie de fallas ciegas que están activas (7) de tal manera que un sismo de magnitud moderada o baja puede ocasionar demasiado daño en las estructuras que están sobre la falla o muy próximas a las mismas.

En la figura 9 se muestran las fallas ciegas que atraviesan el Distrito Metropolitano de Quito. Lo importante de todo esto es conocer su existencia, saber que están activas que pueden generar sismos de magnitud moderada y sobre todo encontrar los posibles espectros que estas puedan generar aplicando metodologías como las propuestas por Campbell (8) o Abrahamson (9).

4. ESTRUCTURAS CON AISLADORES DE BASE

En el Mega Sismo de Chile de 2010, quedó en evidencia que las estructuras que fueron construidas con aisladores de base, tuvieron un excelente comportamiento sísmico, debido a que los aisladores trabajan como un filtro en el sentido de que filtran las altas frecuencias, reducen notablemente la aceleración que ingresa a la estructura ya que una buena parte de la energía sísmica que ingresa a la estructura es disipada por los aisladores.

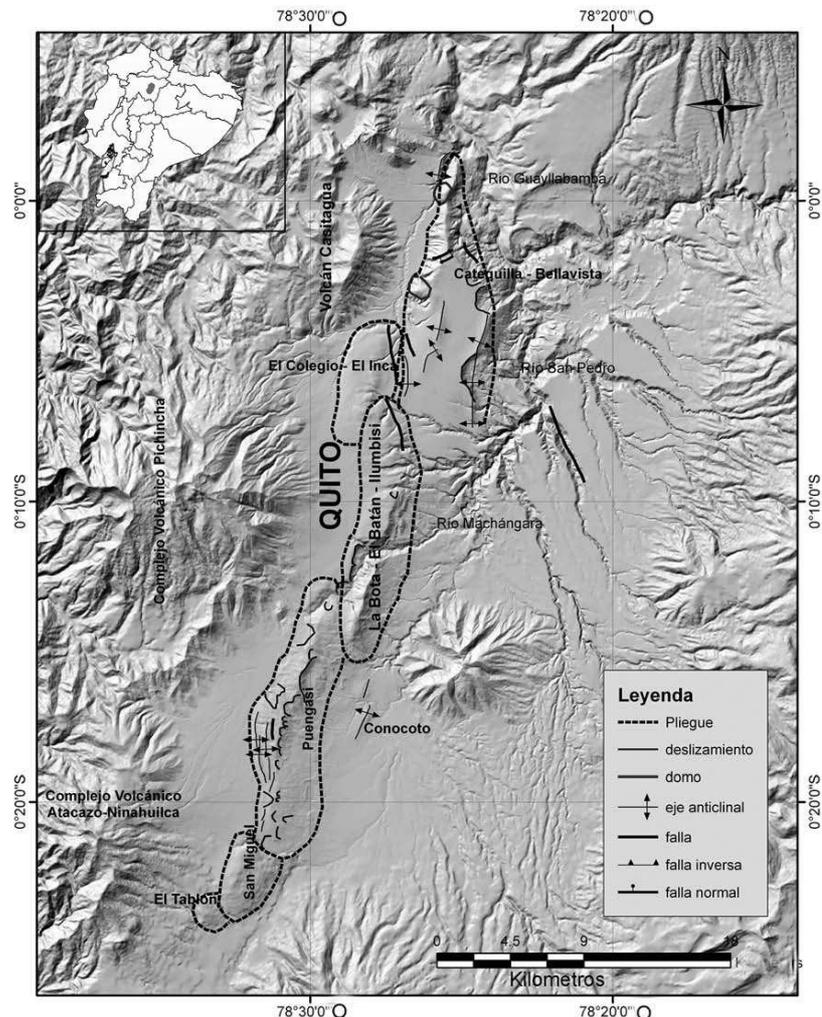


Figura 9 Fallas Ciegas de la ciudad de Quito. Fuente: Alvarado 2009.

El primer edificio construido en Chile con aisladores de base elastoméricos es el edificio ubicado en la Comunidad Andalucía que se indica en la figura 10. Se construyeron dos edificios gemelos, el uno sin aisladores y el otro con aisladores. De tal manera que se puede comparar los registros en estos dos edificios. En la cuarta planta de los dos edificios se colocaron acelerógrafos y en la figura 11 se indica lo que se registró en cada uno de ellos.

En la parte superior de la figura 12 se muestran el registro de la componente longitudinal del edificio sin aisladores de base, se aprecia que la aceleración máxima superó los 1000 gals. En cambio en la parte inferior se tiene el registro del edificio con aisladores de base y se observa que la aceleración máxima no llegó a los 250 gals. (10).

Algo similar se obtuvo para la componente horizontal en sentido transversal con lo que queda demostrado la eficiencia de construir edificaciones con aisladores de base. Es importante destacar que no se tuvo similares resultados con la componente vertical, en este caso los dos edificios, con y sin aisladores de base tuvieron registros similares.

Los edificios y puentes con aisladores de base tuvieron un excelente comportamiento durante el Mega sismo de Chile de 2010. (2).



II JORNADAS DE
INGENIERÍA CIVIL
Y AMBIENTAL



Figura 10 Edificios de la Comunidad Andalucía con y sin aisladores de base.

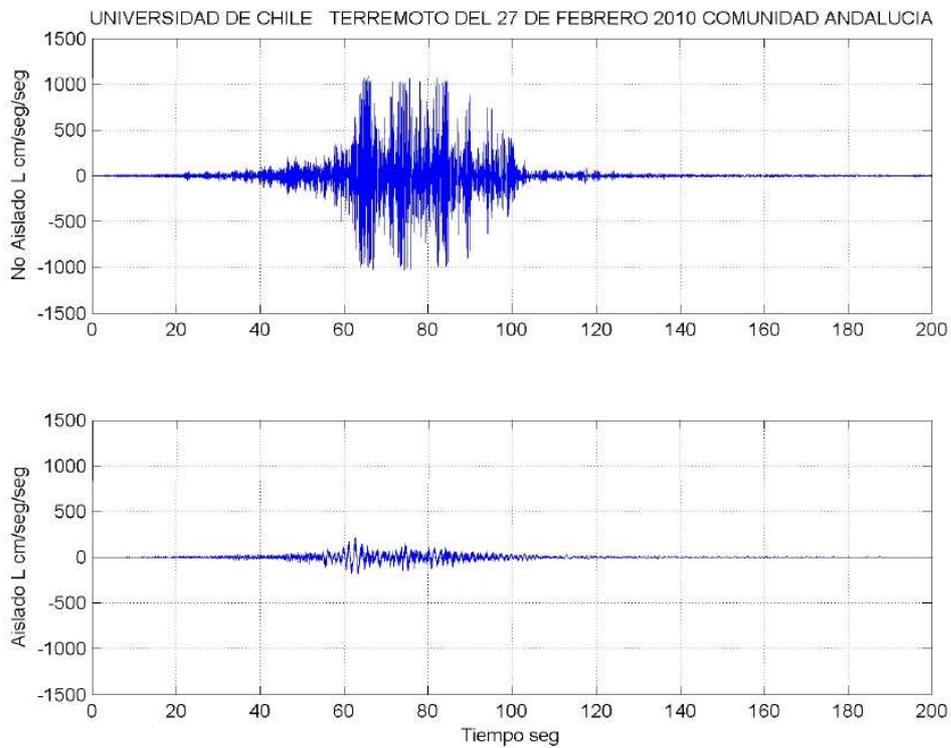


Figura 11 Acelerogramas registrados en el cuarto piso de los edificios gemelos.



5. CONCLUSIONES

Se ha presentado los aspectos sismológicos más destacados del Mega Sismo de Chile de 2010, que es un sismo interplaca de bajo ángulo de subducción, similar al registrado en Ecuador en 1906 y también se han presentado dos sismos recientes de Nueva Zelanda y de España de 2011 que están asociados a fallas geológicas que pasan muy cerca de las ciudades de Christchurch y de Lorca, respectivamente.

Todo esto debido a que el Distrito Metropolitano de Quito se halla en algunos sitios muy cerca y en otros sobre fallas ciegas que están activas, con un gran agravante de que en la ciudad existen construcciones construidas a mediados del siglo pasado que son muy vulnerables y en las cuales no existen ningún plan de contingencia ante los desastres naturales a pesar de que son lugares públicos que albergan a más de 2000 estudiantes, con lo que se incrementa el riesgo sísmico. Del estudio realizado, se desprenden las siguientes conclusiones:

- Los sismos interplaca tipo thrust de gran magnitud como el de Chile de 2010 son eventos demasiado largos, con una fase intensa que está alrededor de los 50 segundos, que tienen muchos pulsos de energía. En resumen son sismos que causan mucho daño en las estructuras que se hallan en la zona epicentral, a distancias moderadas y a grandes distancias si se encuentran las edificaciones en suelos de poca resistencia.
- Los sismos de magnitud moderada y baja causan demasiado daño en el campo cercano y en el caso de los sismos impulsivos la directividad de las ondas sísmicas juega un papel fundamental en la respuesta sísmica de las estructuras.
- Se debe disminuir la vulnerabilidad sísmica de las estructuras ubicadas en el Distrito Metropolitano de Quito, sobre todo aquellas que fueron construidas a mediados del siglo pasado y que dan cabida a más de 2000 estudiantes, debido a que la ciudad se halla sobre o muy cerca de fallas ciegas.
- Las estructuras con aisladores de base demostraron en el Mega Sismo de Chile que son una solución para tener estructuras seguras por lo que se debe propiciar su desarrollo. En edificios de altura lo más adecuado es construir con disipadores de energía.

REFERENCIAS

- (1) Aguiar R., (2010), "Fallas frecuentes durante los terremotos", *Revista ESPECTATIVA*, N.- 4, 10-11, Escuela Politécnica del Ejército, Sangolquí, Ecuador.
- (2) Aguiar R., (2011), *El Mega Sismo de Chile de 2010 y lecciones dejadas para el Ecuador*, Centro de Investigaciones Científicas. Instituto Panamericano de Geografía e Historia, IPGH, 184 p., Quito, Ecuador.
- (3) Tavera H. Bernal J., Salas H., (2008), *El terremoto de Pisco del 15 de agosto de 2007: Aspectos Sismológicos*. Libro El Sismo de Pisco de 2007. Editor H. Tavera. Instituto Geofísico del Perú, Lima.
- (4) Barrientos S., (2010), *Terremoto Cauquenes 27 de febrero de 2010. Informe Técnico actualizado al 27 de mayo de 2010*. Servicio Sismológico. Universidad de Chile, 20 p., Santiago.
- (5) Aguiar R., Astroza M., (2010), "Dos lecciones del mega sismo de Chile de 2010 a ser tomadas en cuenta en estudios de Peligrosidad Sísmica de Ecuador", *XXXIV Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural*, 14 p. San Juan, Argentina.
- (6) Frau C., *Demanda sísmica incluyendo efectos de directividad en zonas near-fault de Argentina*, Tesis para obtener el título de Doctor en Ciencias. Universidad Tecnológica Nacional, Regional Mendoza, 371 p., Mendoza, Argentina.



II JORNADAS DE
**INGENIERÍA CIVIL
Y AMBIENTAL**

- (7) Alvarado A., (2009), "Sistema Quito, Ecuador", un capítulo del libro: Atlas de Deformaciones Cuaternarias de los Andes. Proyecto Multinacional Andino: Geociencia para las Comunidades Andinas. 311 p., Impreso en Canadá.
- (8) Campbell K., Bozorgnia Y., (2008), "NGA Ground Motion Model for the Geometric Mean Horizontal Component of PGA, PGV, PGD and 5% Damped linear elastic response spectra for periods ranking from 0.01 to 10 s.", *Earthquake Spectra, EERI*, **24 (1)**, 139-171.
- (9) Abrahamson N., Silva W., (2008), "Summary of the Abrahamson & Silva NGA Ground-Motion relations", *Earthquake Spectra, EERI*, **24 (1)**, 67-97.
- (10) Moroni M., Sarrazin M., (2010), "Primer edificio con aislación sísmica en Chile, *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, **15 (2)**, 119-132.