

## Efectos De La Interacción Suelo- Estructura En El Diseño Sismorresistente De Muros De Cortante.

Javier Andrade Silva<sup>1</sup>; Fredy Carrillo M.<sup>2</sup>; Vinicio Suarez<sup>3</sup>;  
Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Civil Ambiental, Quito, Ecuador  
Corresponding Autor: Javier Gustavo Andrade Silva

**ABSTRACT.** The shear walls are a structural seismic system that has been shown to perform efficiently under seismic attack. In the common design practice, it is considered that the walls are embedded in the level of the foundation. In this study, the effects of soil-wall interaction on the performance of buildings with shear walls is evaluated. This is achieved through a parametric study in which walls embedded in its base are designed with the method of Direct Design Based on Displacements (DDBD) and then its performance is evaluated through nonlinear analysis of history in time where the soil if it is modeled. The height of the walls varies between 9 and 24m and three soil profiles with properties compatible with that of the profiles typified in the earthquake resistant design codes are considered. In the investigation it is observed that the interaction soil structure produces two main effects that affect the response of the walls: (1) Addition of flexibility (rotation in the base) and (2) Increase of damping due to the energy dissipated in the soil. The detailed analysis and summary of the results obtained is presented.

**KEYWORDS:** Earthquake resistant, soil-structure interaction, DDBD, cutting walls.

Received 23 February, 2019; Accepted 13 March, 2019 © The author(s) 2019.

Published with open access at [www.questjournals.org](http://www.questjournals.org)

### I. INTRODUCTION

El objetivo principal de esta investigación es determinar los efectos de la Interacción Suelo Estructura (ISE) en el diseño de muros de corte.

Para investigar los efectos ISE, se diseñó seis muros empotrados en su base utilizando DDBD, luego se investiga los efectos de ISE a través de un análisis no lineal de historia en el tiempo, de los muros que están soportados por tres tipos de suelos tipificados en el código UBC97.

### II. MARCO TEÓRICO/METODOLOGÍA

Para demostrar la investigación propuesta, se describe el modelo a utilizarse: El edificio en análisis se presenta en la Fig1, los muros de corte ubicados al contorno de la planta del edificio, resisten las cargas laterales producidas por excitaciones sísmicas, seis muros de 3m de longitud con un espesor de 0.40m, no se considera la contribución de los 3 muros perpendiculares, los muros en cantiliver se encuentran sobre una cimentación rígida, el número de pisos varía de 3 a 8, con altura de 3m de entrepiso.

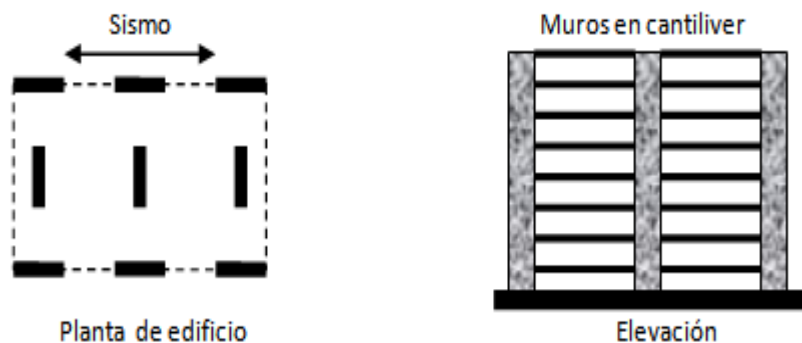


Figura.1 Planta y elevación de pórtico de modelo de estudio.

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1. Análisis momento curvatura

Concluido el diseño del muro de corte (seccion3), se determina el cortante de fluencia  $E_{c1}$  luego se obtiene el momento de fluencia con la  $E_{c2}$

$$V_y = \frac{V_b}{ru - r + 1} \quad (1)$$

$$M_y = V_y H_{eff} \quad (2)$$

En el modelo bilineal Fig2, la primera pendiente pertenece a la rigidez inicial a flexión de la sección transversal en el rango elástico ( $EI_{cr}$ ), la segunda pendiente pertenece a la rigidez en el rango plástico. Dentro de la región de la rótula plástica, el factor bilineal  $r$  es calculada con la  $E_{c3}$ , para los elementos de hormigón se usó la regla de histéresis de Takeda, Fig4.

$$r = \frac{EI_{cr}}{EI_{cr}} \quad (3)$$

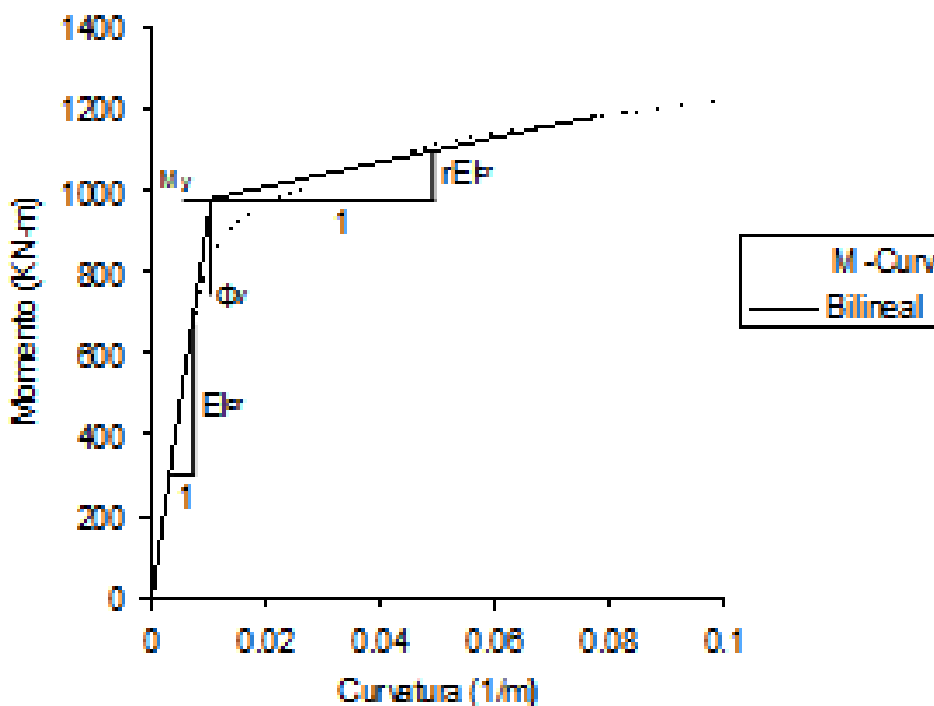
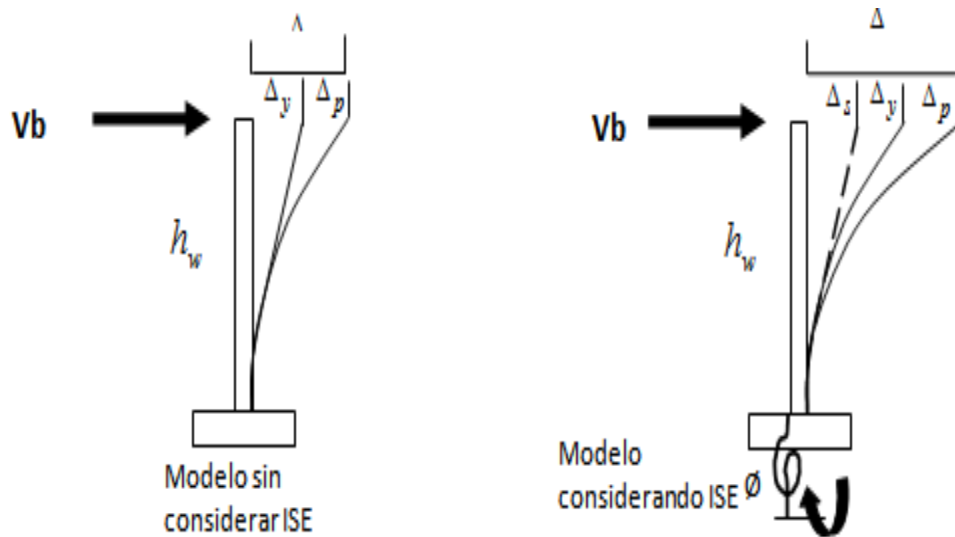


Figura.2 Momento curvatura de la sección transversal del muro.

#### 3.2. Interacción suelo estructura (ISE)

Los efectos ISE que se originan en la superficie del suelo consideran: la flexibilidad que los suelos adicionan a la estructura (rotación en la base), reduciendo la ductilidad bajo cargas sísmicas Fig3. La rotación en la base origina un desplazamiento adicional en el tope de la estructura, que se suma al desplazamiento de fluencia  $E_{c4}$ . Originando un aumento en el desplazamiento fluencia, disminuyendo la ductilidad  $c_6$ .



**Figura.3** Modelo de estudio en el análisis ISE.

La adición de flexibilidad, genera un aumento en el desplazamiento total de la estructura Ec5.

$$\Delta_s = \phi_s h_w \quad (4)$$

$$\Delta_d = \Delta_s + \Delta_y + \Delta_p \quad (5)$$

$$\mu = \frac{\Delta_d}{\Delta_s + \Delta_y} \quad (6)$$

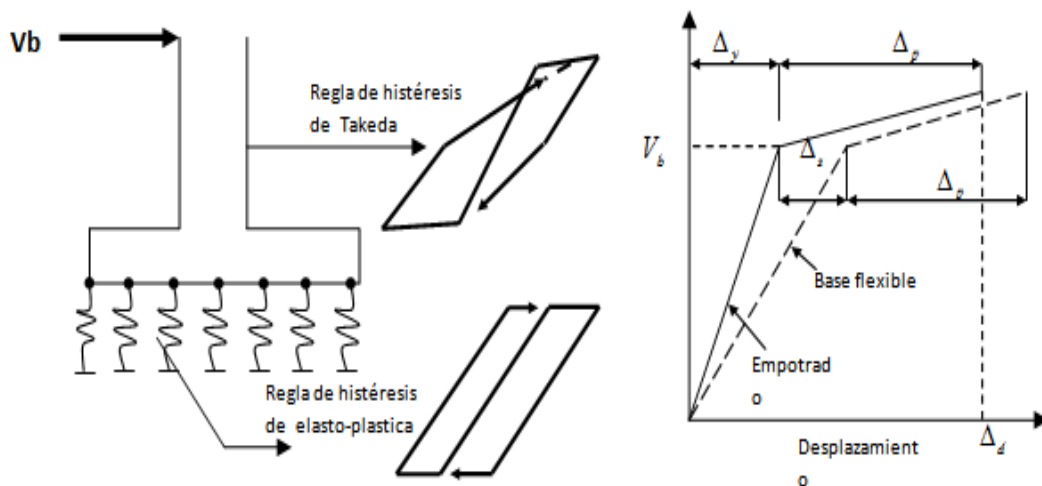
La rotación en la base del muro depende de la rigidez y resistencia de la cimentación de la estructura, el modelo de suelo se lo representa en base a la teoría de resortes de Winkler, resortes bajo una regla de histéresis elastoplástica, de rigidez  $K_x$  a compresión, la rigidez de cada resorte depende de su posición en la cimentación Ec7.

$$K_x = K * B * l \quad (7)$$

$$F_y = K_x * 0.025 \quad (8)$$

La constante **K** es el módulo de reacción de suelo o coeficiente de balasto representado en unidades de fuerza, aplicada en un área, sobre un asentamiento determinado, coeficiente que se encuentra en función de la capacidad admisible del suelo, siendo **B** el ancho de cimentación y **l** la separación entre resortes bajo la cimentación.

De la misma manera se calculó la fuerza de fluencia del resorte, en función de la rigidez  $K_x$ , bajo un asentamiento tolerable de la cimentación, igual a 0.025m. Durante un sismo, la cimentación de los muros experimenta ciclos de deformación no lineal y esto se puede sumar a la formación de rotulas plásticas en el muro. La combinación de estos efectos resulta en disipación de energía y atenuación de respuesta.



**Figura.4** Modelo de análisis interacción suelo estructura ISE

#### IV. DISEÑO DIRECTO BASADO EN DESPLAZAMIENTOS (DDBD)

El método de Diseño Directo Basado en Desplazamientos (Priestley1993) es una herramienta de diseño basado en desempeño, método de diseño que a sido probado ser efectivo en el diseño sismorresistente de columnas para puentes (Kowalsky1995), puentes continuos sobre pilas en fundaciones rígidas (Dwairi-Kowalsky2006), en edificios de hormigón armado (SEAOC 2004, Priestley– Kowalsky2000).

$$d_i = \frac{d_i - d_{i-1}}{h_i} \quad (9)$$

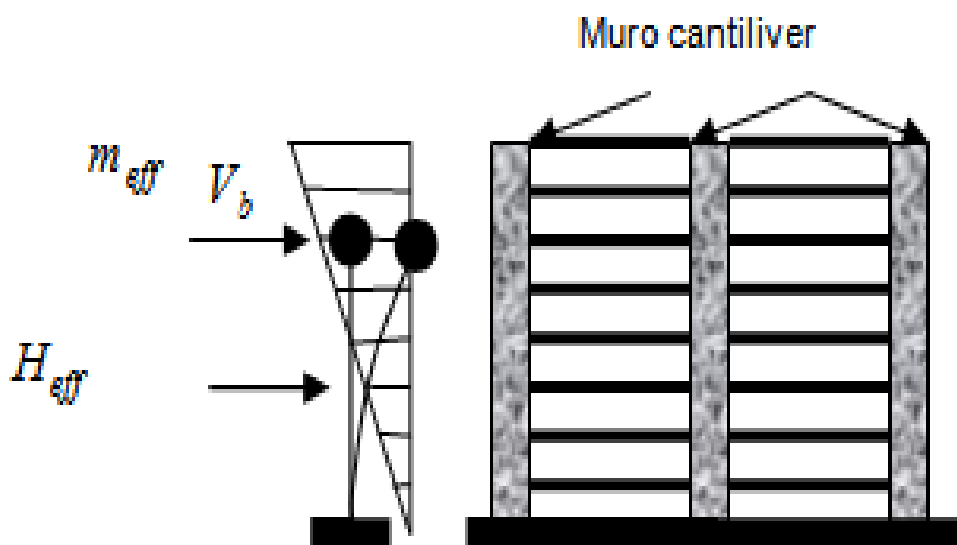
Para el diseño con DDBD se considero derivas para un nivel de desempeño SP-3 (sismo raro con un periodo de retorno medio de 200-800 años), de acuerdo a la relación  $h_w/l_w$  del muro analizado. Los valores de deriva máxima en muros de corte, se tomo de las tablas que presenta la asociación de ingenieros de California (SEAOC2004), donde  $h_w$  altura del muro y  $l_w$  es la longitud del muro, deriva se define como la relación entre desplazamiento relativo de un piso con respecto al piso inferior ( $d_i - d_{i-1}$ ) Ec9. El procedimiento del método DDBD para un sistema de un grado de libertad se lo realiza de siguiente manera.

1. Determinar el desplazamiento meta. ( $\Delta_d$ ).
2. Estimar Amortiguamiento Viscoso Equivalente (AVE).
3. Determinar el periodo efectivo de la estructura ( $T_{eff}$ ).
4. Evaluar la rigidez equivalente ( $K_{eff}$ ) y el cortante de diseño ( $V_b$ ).

Desplazamiento meta

El desplazamiento total de sistema de un grado de libertad es la suma de desplazamiento fluencia  $\Delta_y$  y el desplazamiento plástico ( $\Delta_p$ ).

$$\Delta_i = (\Delta_{yi} + \Delta_{pi}) \quad (10)$$



**Figura.5 Muros cantiliver en elevación.**

El desplazamiento elástico se lo determina al final del rango elástico Ec11, como se muestra en la Fig7. La curvatura de fluencia aproximada sin necesidad de la relación momento curvatura se la determina con la Ec12 (Kowalsky2001), la deformación de acero en el punto de fluencia Ec13.

$$\Delta_{yi} = \frac{\phi_y h_i^2}{3} * \left( 1.5 - \frac{h_i}{2h_w} \right) \quad (11)$$

$$\phi_y = \frac{2 * \epsilon_y}{l_w} \quad (12)$$

$$\varepsilon_y = \frac{f_y}{E_s} \quad (13)$$

El desplazamiento plástico Ec14 resulta de la rotación plástica  $\theta_p$  una vez desarrollada la rotula plástica, la proporción entre la  $\theta_p$  y la curvatura plástica  $\phi_p$  es el punto de máximo momento de la longitud de la rotula plástica  $l_p$ , desarrollada en la base del muro (Paulay –Priestley1992). En la Ec14 la  $\theta_{lim}$  es la deriva límite que se considero en el diseño es 0.028,  $\theta_{et}$  es la rotación elástica en el piso tope,  $h_i$  altura de cada piso. La longitud de la rotula plástica Ec16 que se considero en el diseño fue propuesta por Priestley1996, donde  $f_y$  fluencia del acero y  $d_{bl}$  es el diámetro del refuerzo colocado en la sección.

$$\Delta_{pi} = (\theta_{lim} - \theta_{et}) * \left( h_i - \frac{l_p}{2} \right) \quad (14)$$

$$\theta_{et} = \frac{\phi_y * h_w}{2} \quad (15)$$

$$L_{p2} = 0.08h_w + 0.022f_y d_{bl} \quad (16)$$

El desplazamiento del sistema de un grado de libertad  $\Delta_{sys}$  Ec17 es la relación entre la sumatoria de masa por desplazamiento en cada piso al cuadrado y la sumatoria de la masa por el desplazamiento en cada piso.

$$\Delta_{sys} = \frac{\sum m_i * \Delta_i^2}{\sum m_i * \Delta_i} \quad (17)$$

Masa efectiva  $m_{eff}$  Ec18 es la relación entre desplazamiento de piso y el desplazamiento del sistema. La altura efectiva  $H_e$  Ec19 del sistema de un grado de libertad.

$$m_{eff} = m_i \frac{\sum \Delta_i}{\Delta_{sys}} \quad (18)$$

$$H_e = \frac{\sum m_i * \Delta_i * h_i}{\sum m_i * \Delta_i} \quad (19)$$

Ductilidad  $\mu_\Delta$  Ec20 es la capacidad de una estructura para deformarse sometida a diferentes ciclos de deformación inelástica sin pérdida importante de resistencia, es un indicador de daño y disipación de la energía en la estructura, se determina con la relación entre el desplazamiento meta  $\Delta_d$  y el desplazamiento de fluencia  $\Delta_y$ .

$$\mu_\Delta = \frac{\Delta_d}{\Delta_y} \quad (20)$$

Amortiguamiento viscoso equivalente (AVE)

El concepto de amortiguamiento viscoso generalmente usado para representar la energía disipada por la estructura en el rango inelástico. Tal disipación esta dada por varios mecanismos como el agrietamiento, rotula plástica, interacción con elementos no estructurales, y la interacción suelo-estructura (Dwairi2004). La reducción en respuesta por la formación de rotulas plásticas a sido relacionada a la ductilidad y el periodo por medio amortiguamiento viscoso equivalente. (Dwairi2005). O con el uso de de reducciones R,  $\mu$ , T. (reducción de fuerza, ductilidad y periodo) (Veletsos, A, Newmark1968). El AVE se calcula con la Ec21 en función de la ductilidad  $\mu$  y el amortiguamiento viscoso (típicamente de 2 a 5%).

$$AVE = \xi_v + C_{ST} \left( \frac{\mu - 1}{\pi \mu} \right) \% \quad C_{ST} = 50 + 40(1 - T_{eff}) \quad T_{eff} < 1seg. \quad (21)$$

$$C_{ST} = 50 \quad T_{eff} < 1seg.$$

**Periodo efectivo ( $T_{eff}$ )**

El periodo efectivo se lo obtiene con el desplazamiento máximo ( $\Delta d$ ) de la estructura, para lo cual se reduce el espectro de aceleraciones a espectro de desplazamiento Fig6, definido por distintos niveles de AVE. El EuroCode(1998) determino un coeficiente, que se encuentra dentro del radical en la Ec22, para encontrar desplazamiento máximo en cualquier nivel AVE.

$$\Delta_{\xi} = \Delta_{5\%} \sqrt{\left(\frac{7}{2+\xi}\right)} \quad (22)$$

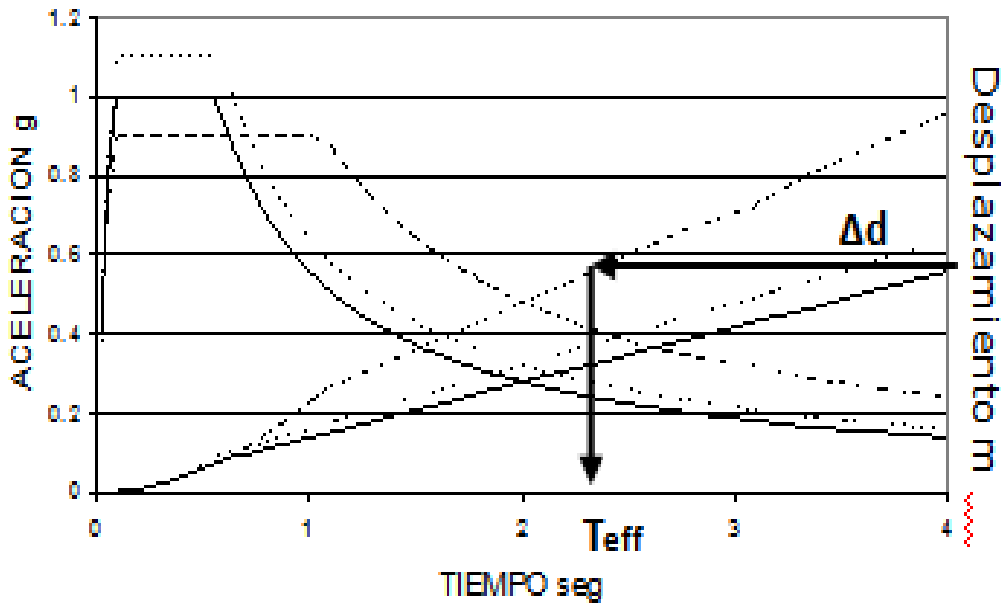


Figura.6 Espectro de aceleraciones, espectro de desplazamiento en tres tipos de suelo, para un nivel de amortiguamiento del 5%

**Rigidez efectiva ( $K_{eff}$ )**

Con el periodo efectivo, masa efectiva del sistema, se determina la rigidez efectiva de un sistema equivalente a un grado de libertad Fig7.

$$K_{eff} = \frac{4 * \pi^2 * m_{eff}}{T_{eff}^2} \quad (23)$$

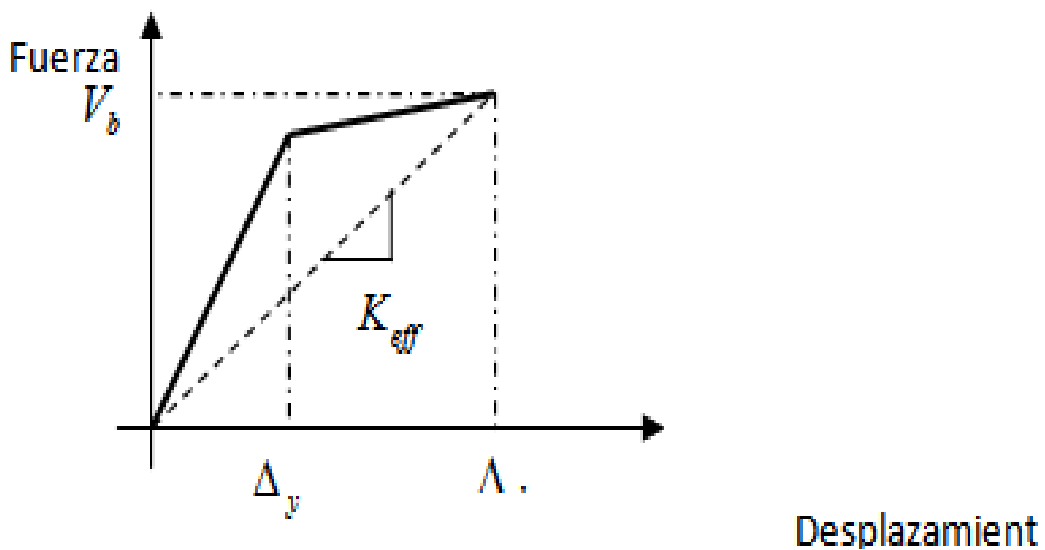


Figura.7 Rigidez efectiva

### Fuerza lateral de diseño

Partiendo de un desplazamiento meta y el nivel de ductilidad tenemos la fuerza cortante actuante en la estructura de un grado de libertad.

## V. ESTUDIO PARAMÉTRICO

### 5.1 Modelo de muros

Para investigar los efectos de interacción suelo estructura, se diseñó muros de corte de tres a ocho pisos, (6 muros), empotrados en su base diseñados por el método DDBD.

**Tabla 4 Parámetros utilizados en el estudio ISE.**

Altura (m)	Cimentación
9	1-SC
12	2-SD
15	3-SE
18	
21	
24	

### Tipos de suelo

Se consideran tres perfiles de suelo con propiedades compatibles con la de los perfiles tipificados en el código UBC97. La Tabla 5 presenta la clasificación de perfiles de suelo de acuerdo al UBC97, el estudio se lo realizo para los siguientes perfiles de suelo: SC, SD, SE, las propiedades definidas para estos perfiles presentamos en la Tabla 6.

**Tabla 5. Perfiles de suelo de acuerdo al codigo UBC.**

Tipo de perfil de suelo	Nombre de perfil de suelo	Propiedades de suelo promedio para tope (30-480mm)		
		Velocidad de ondas de corte v (m/s)	SPT para cohesión	Esfuerzo a corte no drenado Su (KPa)
SA	Roca dura	>1500	-	-
SB	Roca	760-1500		
SC	Roca suave y suelo muy denso	360-760	>50	>100
SD	Suelo duro	180-760	15-50	50-100
SE*	Suelo Blando	<180	<15	<50
SF	Suelo que requiere una evaluación específicas del sitio.			

**Tabla 6 Propiedades de perfiles de definidas para el estudio.**

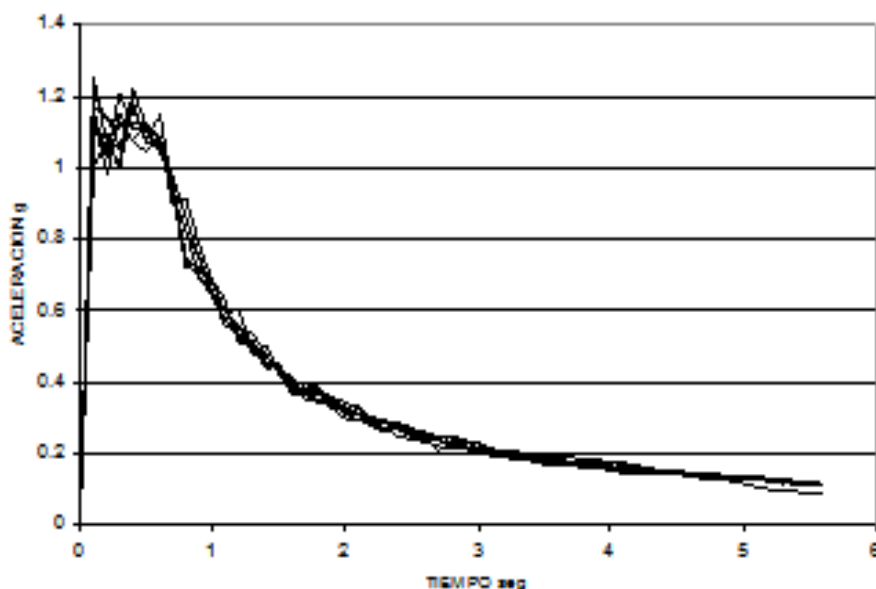
Perfil suelo		SC	SD	SE
Cohesión	Mpa	0.030	0.060	0.12
Angulo de fricción interna	°	37	20	10
Peso específico	MN/m <sup>3</sup>	0.024	0.02	0.015
Modulo elástico del suelo	Mpa	70	35	10
Relación de poisson		0.24	0.22	0.20

### 5.2.1 Registros de aceleración

Sismo	Fecha	Nombre de sismo	Magnitud	Nombre de estacion	PGA
			(Ms)		(cm/s <sup>2</sup> )
EQ1	17/01/1994	Northridge	6.8	Santa Monica City Hall	866.2
EQ2	15/10/1979	Imperial Valley	6.8	Calexico, Fire Station	269.6
EQ3	09/02/1971	San Fernando	6.5	Los Angeles, Hollywood Storage Bldg.	207
EQ4	28/06/1992	Landers	7.5	Yermo, Fire Station	240
EQ5	12/09/1994	Double Springs	5.9	CDMG 65398 Woodfords	70.73
EQ6	28/06/1992	Landers	7.5	Palm Springs, Airport	87.2
EQ7	17/10/1989	Loma Prieta	7.1	Gilroy 3, Sewage Treatment Plant	531.7
EQ8	24/04/1984	Morgan Hill	6.1	Gilroy #2, Keystone Rd.	207.9
EQ9	17/10/1989	Loma Prieta	7.1	Gilroy 2, Hwy 101 Bolsa Road Motel	394.2

En este estudio se utilizó nueve sismos, compatibles a un espectro UBC97, espectros que están función de los tipos de perfiles de suelo. En la Fig8 se presenta sismos compatibles para un tipo de suelo Duro SD.

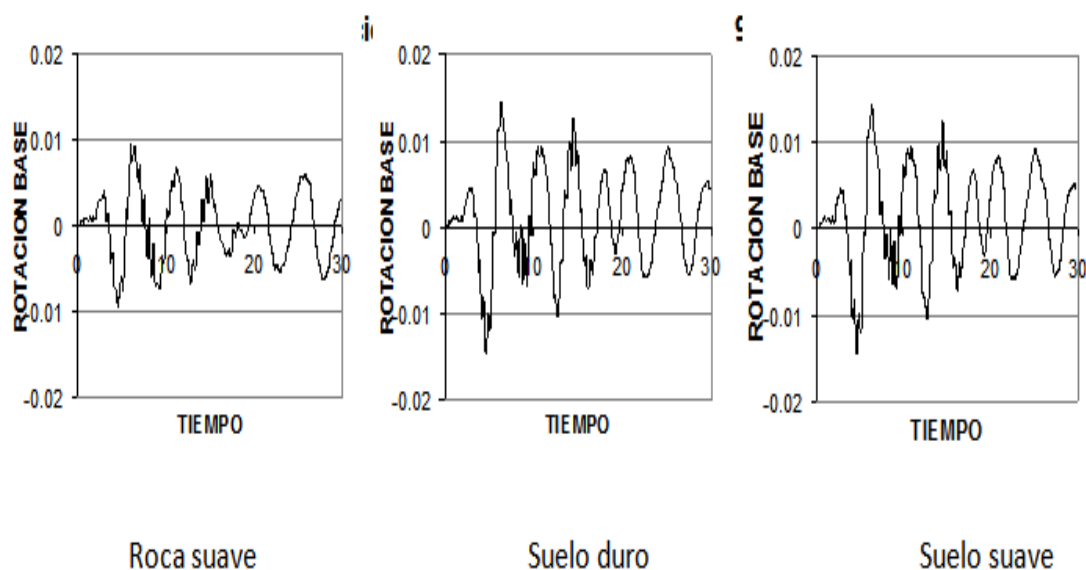
**Figura.8** Sismos compatibles para un espectro de perfil de suelo SD Suelo Duro.



## VI. ANÁLISIS DE VERIFICACIÓN

1. Finalizado el diseño de cada uno de los muros, se determinó el momento último de diseño del producto del cortante basal y la altura efectiva, donde se determinó el momento de fluencia para cada uno de los muros.
2. Para el diseño de la cimentación se usó, la fórmula de capacidad admisible desarrollada por Vesic(1973) (Coduto2005), para cada tipo de suelo presentado en la Tabla 6.



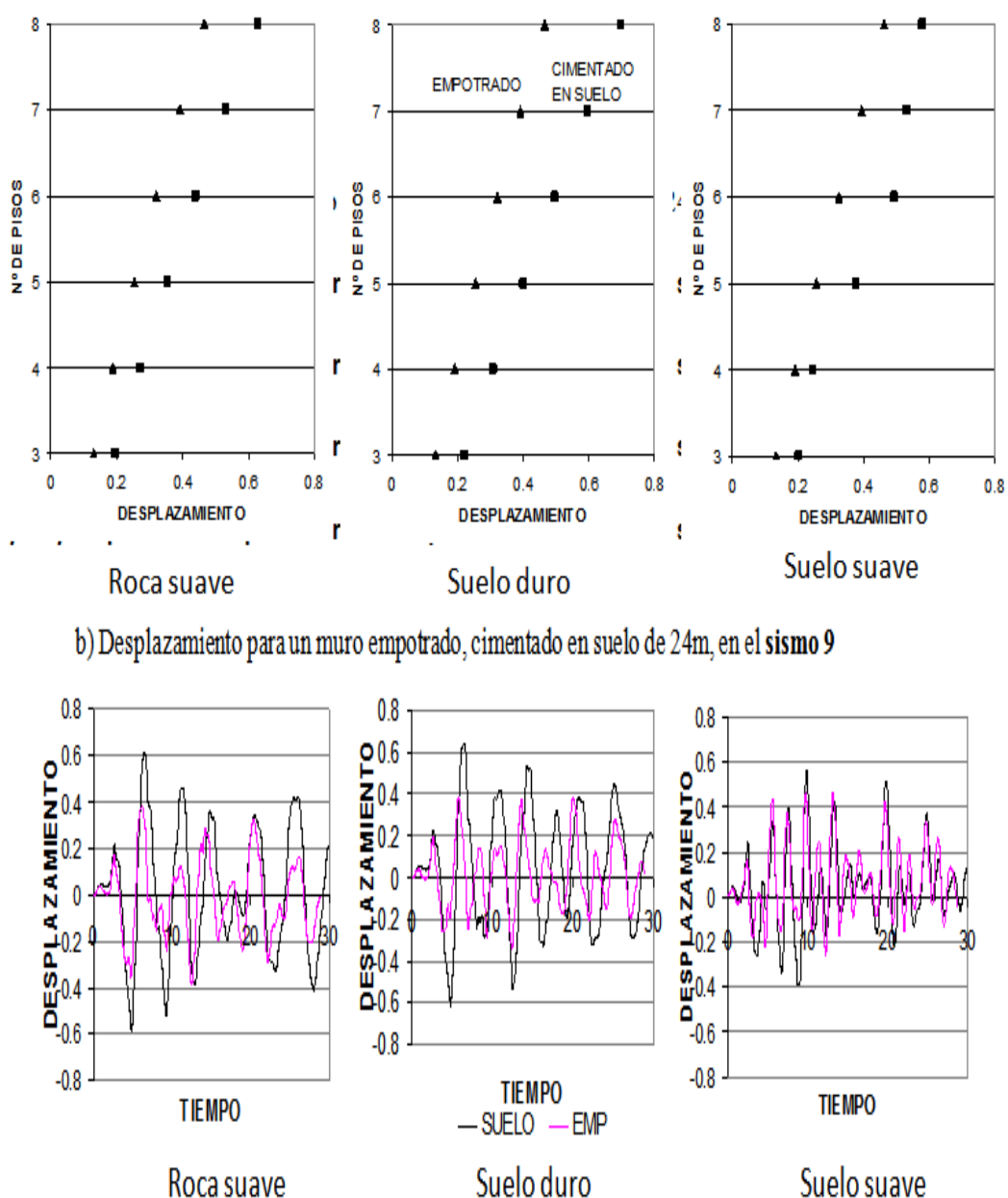


**Figura.9** Rotación máxima en base del muro en tres tipos de suelo.

3. Los efectos ISE, son idealizados en un modelo suelo-muro Fig4, cimentado en un sitio específico, donde el diseño elástico del espectro de respuesta, se basa en la geología, tectónica, sismología y características de suelo asociadas con el sitio específico, usando valores  $C_a$  y  $C_v$  consistentes a sitios específicos.
4. Al realizar un Análisis No lineal de Historia en el tiempo (ANHT), se obtienen rotación en la base, desplazamientos, fuerzas, y momentos de cada uno de los elementos a lo largo del sismo, en tres tipos de suelo, la rotación en la base registrados por Ruamuko (Carr, 1996), registro que se muestra en la Fig9. En esta figura se interpreta la rotación máxima producida a lo largo de la historia del sismo, el aumento de la rotación depende de la rigidez del suelo, a mayor rigidez menor rotación en la base del muro, es evidente que en suelos blandos la rotación es mayor.
5. Una medida de evaluar los efectos ISE, es analizando los desplazamientos máximos en el tope de la estructura, empotrados en su base y cimentados en tres tipos de suelos, en distinta altura, sometidos a un ANHT. La Fig10 presenta los desplazamientos máximos de la estructura, empotrada en su base, y cimentados sobre roca suave o suelo granular, la variación está en un Orden del 40%.

Las estructuras más vulnerables son las que se encuentran cimentadas sobre suelos blandos, la capacidad admisible de estos suelos es baja, por lo se reduce la rigidez y la fuerza de fluencia del suelo. La flexibilidad en estos suelos es mucho mayor que la originada en roca o suelo granular, aumentado considerablemente los desplazamientos, que están en un orden del 60%, exigiendo un minucioso estudio en estos tipos de suelo.

- a) Desplazamientos en muros empotrados y cimentados en suelo a diferente nivel de piso.



**Figura. 10 Desplazamientos en muros**

6. De los desplazamientos máximos en los muros, analizamos las derivas de piso Fig13, empotrado en su base, podemos observar que los diseños son conservadores respecto al DDBD. Si a los muros los cimentamos sobre los diferentes tipos de suelo, observamos que la deriva aumenta debido a la flexibilidad del suelo.

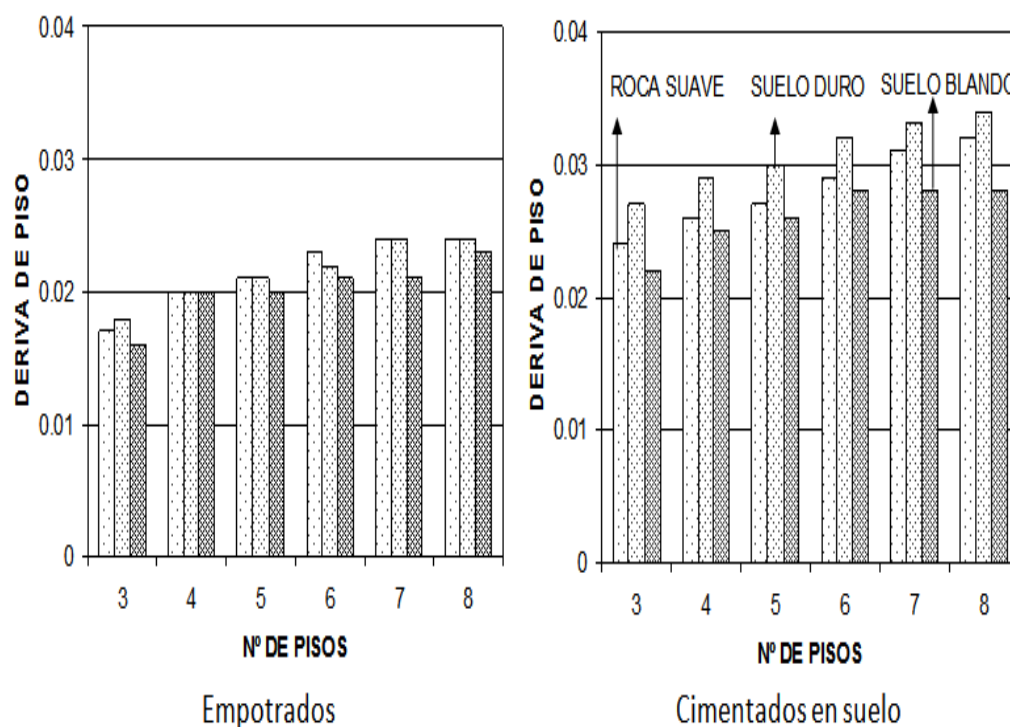


Figura 11. Deriva en muros de corte, empotrado en su base y cimentados en suelo.

#### IV. POSIBLE SOLUCIÓN DEL PROBLEMA

Para facilitar el proceso de estudio de los efectos de interacción suelo estructura, se aplico líneas de tendencia, a la variación existente entre muros cimentados en suelo y los muros empotrados, que se encuentra en función del número de pisos, los efectos de ISE, son evaluados mediante estas ecuaciones que se presenta en la Fig12. Permitiendo simplificar el estudio de los efectos ISE y aplicarlos en los diseños sismorresistentes.

#### V. CONCLUSION

Luego de realizar ANHT se observa que el diseño por DDBD es eficiente para muros de corte empotrados en la base, las derivas reales de los muros se muestran conservadoras ante las derivas de diseño.

El aumento de las derivas en muros cimentados en suelo, están en un orden del 50%, esto indica que los efectos de interacción suelo estructura deben ser estudiados e incluidos en todos los diseños sismorresistentes, para tener un comportamiento lo más cercano a la realidad.

La rigidez de la cimentación de la estructura varía de acuerdo al tipo de suelo, ancho de la cimentación, lugar de cimentación, es notable que en los suelos blandos la rigidez es baja, debido a su baja capacidad admisible.

#### REFERENCIAS

- [1]. BARAJA DAS 2001 "CIMENTACIONES"
- [2]. CARP ATHOL J 2004 "RUAUMOKO-PROGRAM TOR INELASTIC DINAMIC ANALYSIS".DEPT. OF. CIVIL ENGINEERING, UNIVERSITY OF CANTERBURY
- [3]. Carr, Athol J 2004 "Ruaumoko Users Manual, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand Dwairi 2004 "Equivalent damping support of DDBD with application to multi -span bridges" A dissertation submitted to the graduate. Faculty of North Carolina State University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy
- [4]. Coduto 2005 "Design foundation principals and practices" 2da edition 2001
- [5]. Dwairi 2004 "Equivalent damping support of DDBD with application to multi -span bridges" A dissertation submitted to the graduate Faculty of North Carolina State University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy
- [6]. Dwairi H., Kowalsky, M.J. and Nau J.M. (2007). Equivalent Damping in Support of Direct Displacement Based. Design. Journal of Earthquake Engineering
- [7]. EuroCode 8. "Structure is seismic regions - Design. Part 1" General and Building. May 1988 Edition, Report EUR 8849 EN, Commission of European Communities
- [8]. Gullcan, P. and Sozen, M.A., Dec. 1974 " In-elastic Responses of Reinforced Concrete Structures to Earthquake Motions", Proceedings of the ACI, Vol. 71, No. 12, pp605-610
- [9]. Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC 2015
- [10]. Ordoñez José 2015 " Diseño sísmico basado en desplazamientos de estructuras de hormigón armado aporticadas y estructuras con muros de corte"
- [11]. Ortiz Oswaldo 2013 "Algunas Consideraciones respecto de los efectos de los modos superiores en estructuras aporticadas

- [12]. Paulay-Priestley 1992 "Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings" John Wiley and Sons, 744, p, USA
- [13]. Priestley y Kowalsky (2000), " Performance Based Seismic Design"
- [14]. M.J.N.Priestley, D.N.Grant, and C.A.Blandon, 2005 "European School for Advanced Studies in Reduction of Seismic Risk, (Rose School) Pavia, Italy
- [15]. Shibata, A, and Sozen, M., January 1976 " Substitute Structure Method for Seismic Design in R/C", Journal of the Structural Division, ASCE, Vol.102, No.ST1, pp1-18.
- [16]. SEOAC 2005 " Revised Interrim Guidelines performance-based Seismic Engineering Structural Engineers Association of California"
- [17]. Sullivan 2002 " The current limitations of displacement based desing" MSc Dissertation, European School of Advanced Studies in Reduction of Seismic Risk (ROSE School), University of Pavia, Italy
- [18]. Veletsos.A, Newmark, N.M., 1960 " Effect of inelastic behavior on the response of simple systems to earquake motions" Proceedings of "nd World Conference on Earthquake Engineering.
- [19]. UBC(1997) "Uniform Building Code" International Conference of Building Officials, Vol2.

Javier Gustavo Andrade Silva" Efectos De La Interacción Suelo- Estructura En El Diseño Sismorresistente De Muros De Cortante." Quest Journals Journal Of Software Engineering And Simulation, Vol. 05, No. 01, 2019, Pp. 32-43