

**ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE ALEATORIA DE LA
DERIVA SÍSMICA DE UN PÓRTICO DE CONCRETO REFORZADO
CONSIDERANDO LA VARIABILIDAD DE LA GEOMETRÍA Y LAS
PROPIEDADES DEL SUELO.**

LAURAMARCELA TOVAR JIMÉNEZ



**PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL
2013**



**ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE ALEATORIA DE LA
DERIVA SÍSMICA DE UN PÓRTICO DE CONCRETO REFORZADO
CONSIDERANDO LA VARIABILIDAD DE LA GEOMETRÍA Y LAS
PROPIEDADES DEL SUELO.**

LAURA MARCELA TOVAR JIMENEZ

Proyecto de grado para optar al título de Ingeniero Civil

Director:

DANIEL MAURICIO RUIZ VALENCIA
Ingeniero Civil M.s.c



**PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL
2013**



REGLAMENTO DE LA PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA

Art. 23 de la resolución No. 13 del 6 de Julio de 1964

“La Universidad no se hace responsable por los conceptos emitidos por sus alumnos en sus trabajos de tesis. Solo velará porque no se publique nada contrario al dogma y la moral católica y porque las tesis no contengan ataques o polémicas puramente personales; antes bien, se ve en ellas el anhelo de buscar la verdad y la justicia”.

Bogotá, 25 de Junio de 2013

Señores

BIBLIOTECA GENERAL

Pontificia Universidad Javeriana

Ciudad

Respetados Señores,

Autorizo a los interesados, consultar y reproducir (parcial o totalmente) el contenido del trabajo de grado titulado: “ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE ALEATORIA DE LA DERIVA SÍSMICA DE UN PÓRTICO DE CONCRETO REFORZADO CONSIDERANDO LA VARIABILIDAD DE LA GEOMETRÍA Y LAS PROPIEDADES DEL SUELO.”, presentado por la estudiante Laura Marcela Tovar Jiménez como requisito para optar por el título de Ingeniera Civil, en el año 2013, siempre que mediante la correspondiente cita bibliográfica se les dé crédito al trabajo de grado y a sus autores.

Atentamente,



Laura Marcela Tovar Jiménez

C.C.:1.032.433.437

AGRADECIMIENTOS

La autora agradece sinceramente a:

A **DIOS** que siempre me ha guiado por el camino del bien y sé que con él a mi lado podre superar cualquier obstáculo que se presente en mi vida.

A **GABRIEL TOBAR PERDOMO** (Ingeniero civil) y **OLGA LUCERO JIMÉNEZ** (Abogada), padres amorosos, respetuosos, mis guía durante toda mi vida en el ámbito profesional y personal, gracias por su paciencia, comprensión, dedicación y confianza ante los obstáculos presentados durante mi vida.

A **GABRIEL ALEJANDRO TOBAR JIMENEZ** (Ingeniero civil) y **DIANA MARIA TOBAR JIMENEZ** (Administradora de Empresas), hermanos pacientes, amorosos, gracias por ayudarme siempre en los momentos de crisis, con sabiduría siempre me guiaban por el camino adecuado.

A **DANIEL MAURICIO RUÍZ VALENCIA** (Ingeniero civil y Director de Trabajo de Grado), porque más que ser un Director, ha sido mi amigo, compañero, guía. Gracias Daniel, por la confianza depositada en mí desde el principio, por tu paciencia, por tus enseñanzas durante todo este proceso, créeme que van a ser guía en mi vida Profesional. Dios te bendiga.

A mi familia que con su amor, me hicieron lo que soy hoy en día.

Todo se logra con mucho amor y paciencia.

“No Dejen de Soñar Nunca”



TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	16
1.1.	Objetivos.....	18
1.2.	Alcance	18
2.	MARCO TEÓRICO	19
2.1.	Análisis Lineal.....	19
2.2.	Análisis No Lineal	20
2.3.	Materiales	21
2.3.1.	Concreto.....	21
2.3.2.	Acero de Refuerzo	22
2.4.	<i>Diagrama de Momento Curvatura</i>	23
2.5.	Diagrama De Interacción	24
2.6.	<i>Rótulas Plásticas</i>	24
2.7.	Geometría de una Edificación.....	25
2.8.	Dinámica de Suelos	26
2.8.1.	Grado de Sobreconsolidación (OCR-Over Consolidation Ratio):	29
2.9.	Módulo de Rigidez o Módulo de Corte en un Suelo	30
2.9.1.	Curva de Degradación del Módulo de Rigidez	33
2.10.	Amortiguamiento Máximo de un Suelo	34
2.11.	Respuesta Sísmica y Efectos Locales.....	36
2.11.1.	Modelo Lineal Equivalente.....	40
2.11.2.	PROGRAMA EERA (Earthquake site Response Analyses of Layered Soil Deposits).....	41
2.12.	Simulaciones De Montecarlo.....	44
2.12.1.	Variables Aleatorias	44
3.	METODOLOGÍA EMPLEADA.....	45
3.1.	Fase I: Revisión Bibliográfica	45
3.2.	Fase II: Evaluación de la aleatoriedad de la Geometría y del módulo elástico del suelo y su amortiguamiento (ensayos de laboratorio).	46



Estimación de la incertidumbre aleatoria de la deriva sísmica de un
Pórtico de concreto reforzado considerando la variabilidad
De la geometría y las propiedades del suelo

3.2.1.	Geometría	46
3.2.2.	Suelo	46
3.2.3.	Sismo	47
3.3.	Fase III: Respuesta Sísmica	48
3.4.	Fase IV. Análisis de resultados	48
3.5.	Fase V: Conclusiones y recomendaciones	48
4.	DESARROLLO EXPERIMENTAL	48
4.1.	Variación de la Geometría	48
4.2.	Variación De Características Dinámico-Mecánicas del Suelo	55
4.3.	Sismo de Entrada	64
5.	DISEÑO ESTRUCTURAL DE PÓRTICOS DE CONCRETO REFORZADO BAJO ESTUDIO	65
5.1.	Espectro de Diseño	67
5.2.	Avalúo de Carga	69
5.2.1.	Carga Muerta	69
5.2.2.	Carga Viva	71
5.3.	Metodología de Análisis	71
5.4.	Dimensiones de Elementos Estructurales	72
5.5.	Diseño de Acero de Refuerzo	74
6.	CREACIÓN INTERFACE SAP2000-MICROSOFT EXCEL	77
6.1.	Análisis Lineal	78
6.2.	Análisis No Lineal	78
6.2.1.	Derivas Máximas	79
7.	RECURSOS COMPUTACIONALES	79
7.1.	Análisis Lineal	79
7.2.	Análisis no Lineal	80
8.	RESULTADOS	81
8.1.	Análisis Lineal	81
8.2.	Análisis No Lineal	82
9.	ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES	83



10.	RECOMENDACIONES.....	84
11.	ANEXOS.....	85
11.1.	Código En Visual Basic Análisis Lineal	85
11.2.	Código En Visual Basic Análisis No Lineal.....	91
11.3.	Código En Visual Basic Derivas.....	97
12.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	99



INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Derivas (helid.digitalcollection, 2013)	19
Figura 2. Diferencia de la respuesta entre análisis lineal y no lineal. (solidworks, 2013)	20
Figura 3. Curva esfuerzo-deformación para el concreto confinado. (Xtract, 2004)	21
Figura 4. Curva esfuerzo-deformación para el acero. (Xtract, 2004).....	22
Figura 5. Diagrama Momento de Curvatura. (Borrero, 2011)	24
Figura 6. Consistencia y condiciones de comportamiento del suelo (geotecnia-sor, 2013)	27
Figura 7. Ciclo de histéresis Esfuerzo-Deformación. (Bran et al., 2009)	31
Figura 8. Equipo Bender Elements (adatec, 2013).....	32
Figura 9. Curva de Degradación del Módulo de Rigidez.	34
Figura 10. Representación esquemática del procedimiento para el método de prueba Triaxial Cíclico. (Bran et al., 2009)	35
Figura 11. Esquema del Equipo Triaxial cíclico de carga o deformación controlada. (ASTM D3999, 2013).....	36
Figura 12. Tipos de fronteras existentes (dinámica del paisaje, 2013).....	37
Figura 13. Ondas de Volumen (iesfuentenueva, 2013)	38
Figura 14. Ondas Superficiales (iesfuentenueva, 2013).....	39
Figura 15. Modelo de Histéresis (Bran et al., 2005)	40
Figura 16. Variación del módulo de rigidez a cortante (G) y la razón de amortiguamiento (ξ) con la deformación de corte (γ). (EERA, 1998)	41
Figura 17. Iteración del módulo de corte y relación de amortiguamiento con deformación por esfuerzo cortante en el análisis lineal equivalente. (EERA, 1998)	43



Figura 18. Esquema explicativo de la respuesta sísmica	43
Figura 19. Grafica G/Go vs γ	47
Figura 20. Ubicación de los Edificios Don Guillermo Castro y Pedro Arrupe en el campus de la PUJ. (Javeriana, 2013).	48
Figura 21. Ubicación y desarrollo de Columnas en el Ed. Don Guillermo Castro (115).....	50
Figura 22. Despiece Columna XI Ed. Pedro Arrupe (94).....	51
Figura 23. Distribución de Probabilidad para todos los datos obtenidos.	53
Figura 24. Distribución de Probabilidad de los datos para la modelación.	55
Figura 25. Perfil del suelo seleccionado	56
Figura 26. Amortiguamiento para el Estrato I	58
Figura 27. Módulo de Elasticidad para el Estrato I	58
Figura 28. Amortiguamiento para el Estrato II	59
Figura 29. Módulo de Elasticidad para el estrato II	59
Figura 30. Amortiguamiento para el Estrato III	60
Figura 31. Módulo de Elasticidad para el estrato III	60
Figura 32. 50 curvas obtenidas para el estrato I	61
Figura 33. 50 curvas obtenidas para el estrato II	61
Figura 34. 50 curvas obtenidas para el estrato III	62
Figura 35. Datos de Entrada de las características del perfil de suelo (EERA, 2000)	63
Figura 36. Señal sísmica obtenida con el programa EERA.....	63
Figura 37. Espectro de Fourier (EERA, 1998).....	64
Figura 38. Espectro de Respuesta en Aceleración (EERA, 1998).	65
Figura 39. Espectro de Respuesta en Desplazamiento (EERA, 1998).	65



Estimación de la incertidumbre aleatoria de la deriva sísmica de un
Pórtico de concreto reforzado considerando la variabilidad
De la geometría y las propiedades del suelo

Figura 40. Planta Típica adaptada de García (1996)	66
Figura 41. Mapa de zonificación de la ciudad de Bogotá. (DPAE, 2010)	67
Figura 42. Espectros de Diseño para la ciudad de Santafé de Bogotá. (DPAE, 2010)	68
Figura 43. Corte Transversal del Entrepiso	69
Figura 44. Distribución y aplicación de la carga muerta en el programa SAP2000.	70
Figura 45. Distribución y aplicación de la carga viva en SAP2000	71
Figura 46. Combinaciones de Carga de diseño. (NSR, 2010).....	72
Figura 47. Plano en Planta de la ubicación de las columnas.	73
Figura 48. Ubicación de los elementos estructurales en SAP2000	74
Figura 49. Refuerzo Estructural Columna Central	75
Figura 50. Distribución de Refuerzo Estructural Columna Esquinera.....	75
Figura 51. Distribución de Refuerzo Viga pisos 1-2-3-4	76
Figura 52. Distribución de Refuerzo Viga piso 5	76
Figura 53. Distribución de Probabilidad Análisis Lineal	81
Figura 54. Distribución de Probabilidad Análisis No Lineal	82



INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Coeficientes de Variación debido a las variaciones de los Materiales (Borrero, 2011).....	17
Tabla 2. Procedimiento para la obtención del valor "factor" del Ed. Don Guillermo Castro (115)	50
Tabla 3. Procedimiento para la obtención del valor "factor" del Ed. Pedro Arrupe (94).....	51
Tabla 4. Características Estratigráficas del perfil seleccionado.....	56
Tabla 5. Resultados Ensayo Bender Elements para el estrato I	57
Tabla 6. Resultados Ensayo Bender Elements para el estrato II	57
Tabla 7. Resultados Ensayo Bender Elements para el estrato III	57
Tabla 8. Características de los materiales.	66
Tabla 9. Características geológicas y geotécnicas del suelo en la zona Piedemonte B. (DPAE, 2010).....	68
Tabla 10. Características para una respuesta sísmica. (DPAE, 2010).....	69
Tabla 11. Dimensiones del Entrepiso.....	69
Tabla 12. Carga Muerta	70
Tabla 13. Carga Muerta para pórticos con carga	70
Tabla 14. Carga Viva.....	71
Tabla 15. Combinación de Carga B.2.4-2	73
Tabla 16. Combinación de Carga B.2.4-5	73
Tabla 17. Dimensiones de los elementos Estructurales del pórtico	74
Tabla 18. Acero de Refuerzo en los elementos estructurales	75
Tabla 19. Datos de Entrada para cada Interface.....	77



Estimación de la incertidumbre aleatoria de la deriva sísmica de un
Pórtico de concreto reforzado considerando la variabilidad
De la geometría y las propiedades del suelo

Tabla 20. Tiempo en Analizar el programa SAP2000 la totalidad de modelaciones para el Análisis Lineal.	80
Tabla 21. Tiempo en Analizar el programa SAP2000 la totalidad de modelaciones para el Análisis No Lineal.	80
Tabla 22. Resultados Estadísticos Análisis Lineal	82
Tabla 23. Resultados Estadísticos Análisis No Lineal.....	83



1. INTRODUCCIÓN

En el diseño estructural de edificaciones en concreto reforzado el comportamiento sísmico juega un papel determinante. En su evaluación es pertinente revisar dos variables fundamentales: la capacidad de la edificación (resistencia) y los movimientos del terreno (fuerzas externas) donde se encuentre localizada.

Para valorar las diferentes variables de resistencia, se debe tener en cuenta características tales como: la geometría, la resistencia del concreto ($f'c$) y el esfuerzo de fluencia del acero (f_y). Por otra parte, para evaluar las fuerzas externas se debe saber las características del suelo donde se va construir la estructura, entre otros. (AIS, 2010).

Múltiples estudios de confiabilidad estructural se han realizado en el mundo, los cuales buscan establecer el grado de incertidumbre que estos factores pueden llegar a tener para llegar a un diseño confiable. A partir de ellos se ha concluido que las incertidumbres sobre las curvas de capacidad (en fuerza y desplazamiento) dependen de variables como: las dimensiones de los elementos estructurales, cimentación, las cargas actuantes en la historia de la estructura y las características mecánicas de los materiales (resistencia y flexibilidad). (Borrero et al., 2011).

A partir de lo anterior podemos reconocer que el índice de confiabilidad es un criterio decisivo para la definición de los factores de carga y resistencia en los códigos de diseño. Dicho valor se obtendrá a partir del tipo de elemento analizado (viga, columna, unión) y de la relación entre todas las posibles combinaciones de sollicitación para las cuales se realiza el diseño. (Sánchez, 2005)

Respecto a las variable de la resistencia en el diseño estructural se realizó un estudio donde se presenta la variación del módulo de elasticidad E , la resistencia a la compresión del concreto $F'c$ y el esfuerzo de fluencia del acero, para determinar las derivas máximas de dos edificios de cinco pisos, en las zonas de Lacustre 500 y Piedemonte B en la ciudad de Bogotá (Ruiz et al., 2011). En dicha evaluación se presentaron datos de derivas en edificaciones, los cuales son en promedio un 147% de las derivas de diseño. A partir de ello se concluyó que la fórmula que se sugiere para estimar el valor del módulo de elasticidad E en (AIS 2010) presenta inconsistencias para las zonas estudiadas. Razón por la cual el autor estimó que 67 de cada 100 edificios de cinco pisos construidos en ciertas zonas de Bogotá pueden llegar al colapso a la llegada de un sismo. En la tabla 1. Se pueden ver los coeficientes de variación en las derivas sísmicas, resultado del cambio de la resistencia y deformabilidad de los materiales (acero y concreto).



Estimación de la incertidumbre aleatoria de la deriva sísmica de un Pórtico de concreto reforzado considerando la variabilidad De la geometría y las propiedades del suelo

Coefficientes de Variación (COV)

	<i>Inelastica</i>			<i>Elástica</i>	
	<i>Piedemonte B</i>	<i>Lacustre 500</i>		<i>Piedemonte B</i>	<i>Lacustre 500</i>
B	15.71%	10.11%	Espectro	28.69%	28.68%
IO	13.33%	9.04%	FHE	28.66%	28.72%
LS	5.71%	5.70%	-	-	-

Tabla 1. Coeficientes de Variación debido a las variaciones de los Materiales (Borrero, 2011)

Lo anterior lleva a cuestionarse e investigar sobre la microzonificación sísmica de la ciudad de Bogotá. Estudios realizados por la (DPAE, 2010) expresan que Bogotá se encuentra dividida por diferentes zonas, debido a las características y tipo de suelo. Es así como el comportamiento de una estructura de concreto va a variar según un comportamiento del suelo diferente dependiendo su localización.

Los factores que afectan el desempeño sísmico de una estructura son variables aleatorias, por lo tanto se podría afirmar que dicho desempeño estructural es una variable aleatoria. De acuerdo con Prieto et al. (2005) el conocimiento de estas incertidumbres involucradas en el proceso de estimación del punto de desempeño estructural es esencial tanto para el diseño como para la estimación de riesgo y pérdidas esperadas por futuros sismos.

Por otra parte, la probabilidad es la mejor herramienta para manejar la incertidumbre en esta situación. Tomando la información disponible, es posible estimar a partir de los que se conoce. Esto se puede realizar mediante simulaciones y análisis de confianza para funciones de distribución de probabilidad diferentes a la normal para obtener resultados satisfactorios. (Ang, A.H.-S. 1973)

Teniendo en cuenta la anterior información sabemos que se han realizado estudios, en donde se varía las variables aleatorias que afectan una estructura (la geometría, la resistencia del concreto ($f'c$), el esfuerzo de fluencia del acero (f_y), las características del suelo donde se va fundir la estructura, entre otras). Pero a nivel nacional, dentro de nuestras investigaciones no se ha encontrado un estudio en donde se evalué el comportamiento de la estructura en donde se varíe la geometría (secciones y alturas) y el tipo de suelo, en un edificio de mediana altura, con un tipo de sismo; por lo tanto este es el estudio que se realizara en el proyecto y así poder estudiar el comportamiento y los desplazamientos lineales y no-lineales que se pueden presentar en la estructura.



1.1. Objetivos

Objetivo General:

Determinar la función de distribución de probabilidad de la deriva sísmica de un pórtico de concreto reforzado diseñado con la MZS 2010 y la NSR-10 considerando la variabilidad de las características dinámico-mecánicas (de laboratorio) de un estrato de suelo y la geometría de la estructura.

Objetivos Específicos:

- Determinar la variabilidad de la geometría de pórticos de concreto reforzado al comparar las dimensiones de los planos de diseño (ancho y alto de secciones transversales) con respecto al edificio construido.
- Estimar las funciones de distribución de probabilidad de los desplazamientos elásticos e inelásticos de un pórtico de concreto reforzado mediante análisis contra el tiempo para una señal sísmica.

1.2. Alcance

El alcance de este trabajo se define por los siguientes lineamientos:

- Sólo es aplicable a estructuras construidas en concreto reforzado de acuerdo con el Reglamento Colombiano De Construcción Sismo Resiste NSR-10 y la Microzonificación Sísmica Para la ciudad de Santafé de Bogotá (2010).
- Los análisis de las edificaciones se hicieron con modelos computacionales teóricos, por lo cual no existe verificación experimental alguna de los mismos.
- El análisis se efectuó para pórticos planos y no se tuvo en cuenta los efectos tridimensionales de las edificaciones.



2. MARCO TEÓRICO

2.1. Análisis Lineal

El análisis estructural lineal es el tipo de evaluación más aplicado en la revisión de estructuras de cualquier material. Dicho análisis consiste en la determinación del efecto de las acciones sobre las estructuras con el fin de comprobar los estados de servicio y estados límites de la edificación, dentro del rango elástico. La gran particularidad en este tipo de análisis es la linealidad de la respuesta a la aplicación de fuerzas sobre los elementos estructurales. De esta manera se perciben los desplazamientos como respuestas de los elementos ante la aplicación de determinada fuerza.

De esta manera el análisis estructural proporciona resultados globales de reacciones y desplazamientos de la edificación. Así mismo a nivel local proporciona las fuerzas internas y las posibles deformaciones de los diferentes elementos estructurales.

En el desarrollo de este proyecto un aspecto decisivo del análisis lineal estático es la determinación de la deriva como se puede observar en la Figura 1., la cual se define como la deformación relativa que sufre el entrepiso por la acción sísmica de la edificación. Cabe recordar que según (AIS, 2010) el índice de deriva máximo para edificaciones en concreto no debe superar el 1%. Éste índice corresponde a la relación entre la deriva y la altura de piso.

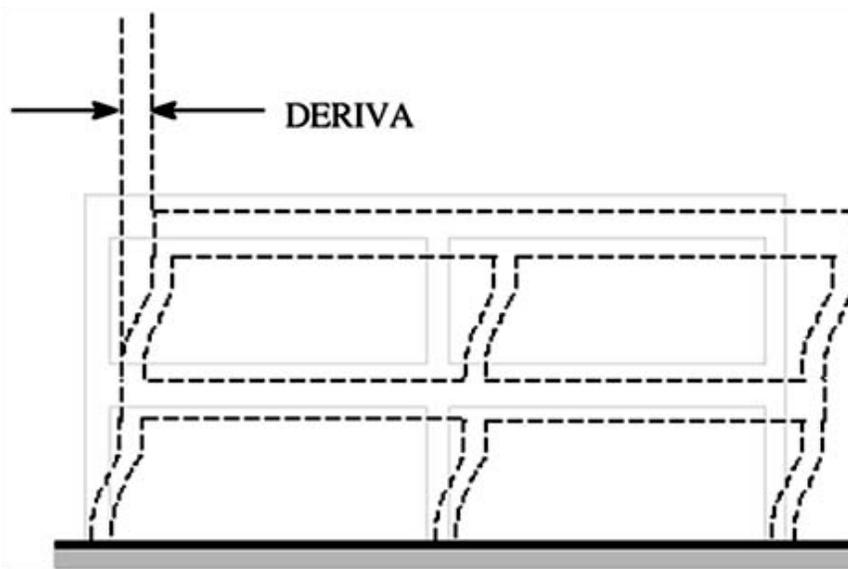


Figura 1. Derivas (helid.digitalcollection, 2013)

2.2. Análisis No Lineal

Tal como se habla en el capítulo 2.1., el análisis lineal asume que la relación entre cargas y desplazamientos resultantes es lineal. Sin embargo, las estructuras no tienen un desempeño lineal, es decir, se comportan de forma no lineal a partir de un cierto nivel de la carga. Muchas veces un análisis lineal como el que se realiza normalmente es adecuado para la evaluación de una estructura, sin embargo en otras ocasiones la solución lineal producirá resultados erróneos, en cuyo caso se deberá realizar un análisis no lineal, tomando en cuenta la fluencia y la falla de los elementos, este ejemplo se puede ver en la Figura 2.

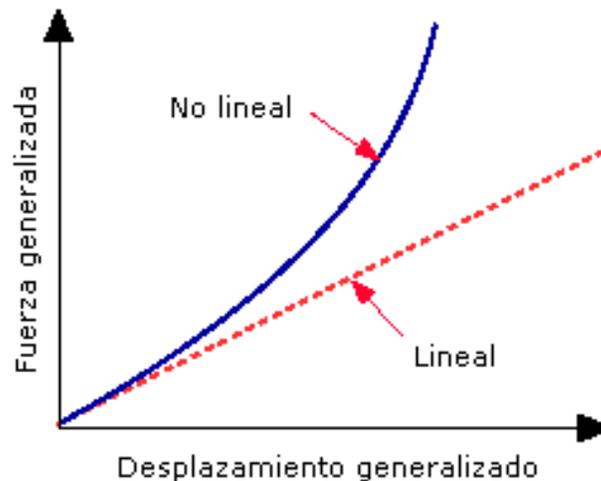


Figura 2. Diferencia de la respuesta entre análisis lineal y no lineal. (solidworks, 2013)

Una importante causa de no linealidad ocurre cuando el material no sigue la Ley de Hook, es decir, los esfuerzos no son directamente proporcionales a las deformaciones. Los materiales tienen comportamientos lineales si sus deformaciones relativas son pequeñas; sin embargo cuando éstas aumentan, la relación pasa a ser no lineal. Por otra parte el historial de la carga, la duración de la carga y la temperatura son también factores que intervienen en la no linealidad del material.

La no linealidad objeto de esta investigación corresponde a la variabilidad de la respuesta en la sección transversal, con base a las características de los materiales y las características geométricas, variabilidad que se ocasionen por los desplazamientos y el comportamiento de los diferentes elementos de la estructura.



2.3. Materiales

2.3.1. Concreto

Todos los elementos que componen la estructura de las edificaciones en concreto deberán ser de concreto reforzado, y según (AIS, 2010), es necesario colocar siempre refuerzo en la sección transversal al eje del elemento. De no requerir este refuerzo, el elemento deberá contar con el área de acero aportada por la cuantía mínima. De esta manera el concreto confinado en la sección axial de los elementos hace que la resistencia a la compresión sea mayor a la esperada. A continuación se muestra en la Figura 3. la curva de esfuerzo vs. deformación para un concreto confinado.

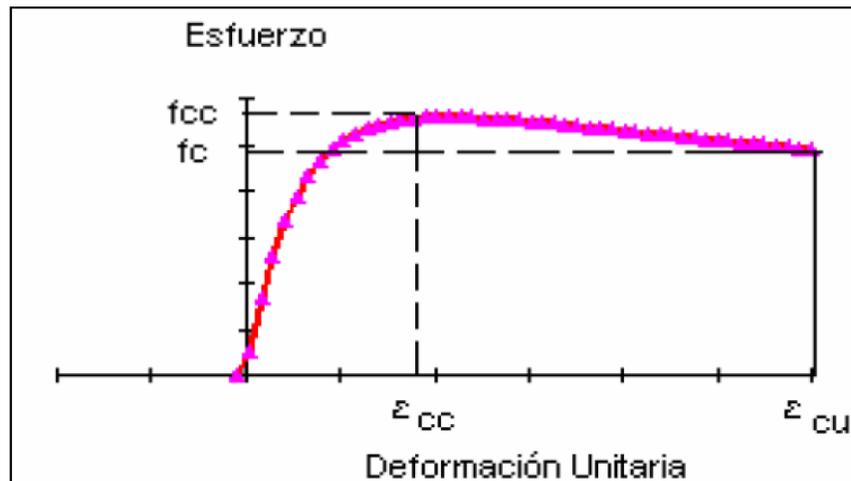


Figura 3. Curva esfuerzo-deformación para el concreto confinado. (Xtract, 2004)

Dónde:

ξ_{cc} = Deformación unitaria del concreto en la máxima resistencia (0.002).

ξ_{cu} = Deformación última del concreto.

f'_c = Resistencia de compresión del concreto a los 28 días.

f_{cc} = Resistencia máxima del concreto confinado (aproximadamente 25% más de la resistencia del concreto).



Revisando autores como (Ruiz, 2000), encontramos que el concreto sin confinamiento, cargado uniaxialmente en compresión tiene una relación de Poisson del orden de 0.15 a 0.20 en los estados iniciales de carga; es decir cuando se introducen niveles de deformación axial altos. Las deformaciones transversales se vuelven muy grandes debido a una micro-fisuración progresiva interna, lo cual lleva a un aumento del volumen del concreto, cuando los esfuerzos se acercan a los valores de la resistencia no confinada del concreto. La falla ocurre por ruptura longitudinal del concreto.

Cuando existe refuerzo transversal, se sabe que a bajos niveles de deformación longitudinal el refuerzo transversal está sometido a esfuerzos muy bajos y por lo tanto está en un estado no confinado. Por esta razón la curva esfuerzo-deformación presentada por Kent y Park es la misma para concreto confinado y no confinado para deformaciones unitarias inferiores a 0.002. (Borrero et al, 2011)

2.3.2. Acero de Refuerzo

Tal y como nos explica (AIS, 2010) el acero de refuerzo o varilla corrugada es un elemento vital de cualquier elemento estructural en una edificación. Éste material absorbe los esfuerzos de tensión ocasionados por las cargas dentro de la estructura (Figura 4.), así como los cambios volumétricos del concreto debido a variaciones de temperatura.

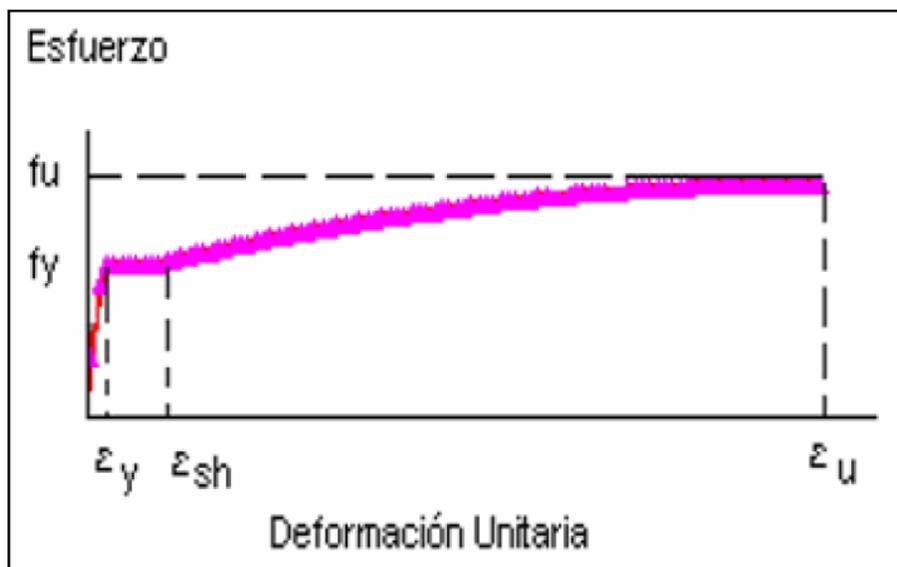


Figura 4. Curva esfuerzo-deformación para el acero. (Xtract, 2004)



Dónde:

f_y = Esfuerzo de fluencia.

ξ_{cc} = Deformación de fluencia.

ξ_{sh} = Deformación de la fase de endurecimiento.

f_y = Esfuerzo último o de rotura.

ξ_u = Deformación última del material.

2.4. *Diagrama de Momento Curvatura*

El diagrama de momento ($M-\phi$) curvatura de un elemento estructural se puede determinar para las diferentes configuraciones del refuerzo del mismo si se conocen las curvas de esfuerzo deformación del concreto y el acero.

Un elemento de concreto reforzado se comporta elásticamente cuando el hormigón presenta bajo nivel de esfuerzos. En este caso, el eje neutro y el centroide de la sección coinciden. Posterior a la aparición del primer agrietamiento el eje neutro de la sección empieza a trasladarse hacia la zona de compresión, provocando un incremento en los esfuerzos de compresión a los que se encuentra sometido el elemento, ya que la fuerza aumenta y el área efectiva que la resiste disminuye. El acero es el encargado de soportar la tensión, de manera tal que se conserve el equilibrio de la sección. (Borrero, 2011)

El diagrama de momento-curvatura se conforma por tres puntos básicos, tal como se muestra en la Figura 5:

- Punto A: Primer agrietamiento del concreto.
- Punto B: Fluencia del acero a tensión.
- Punto C: Punto de resistencia última del concreto.

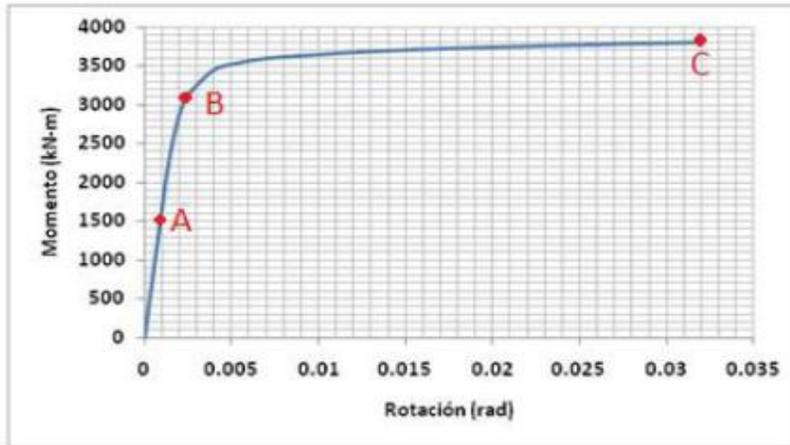


Figura 5. Diagrama Momento de Curvatura. (Borrero, 2011)

2.5. Diagrama De Interacción

El diagrama de interacción de una columna se utiliza para el cálculo y el dimensionamiento de las columnas que soportan cargas excéntricas y representa las combinaciones de carga axial y el momento flector que ocasionan la falla del elemento, dicha falla se genera al alcanzar el valor de la resistencia del concreto, por lo que no toma en cuenta la esbeltez del mismo, los efectos de pandeo, ni fluencia lenta. Para una columna de sección y cuantía establecida, la curva indica los puntos de rotura para todas las interacciones posibles de carga y momento. (Bernal, 2005)

2.6. Rótulas Plásticas

Las rótulas plásticas son zonas donde el acero de refuerzo del elemento fluye como consecuencia de la concentración de solicitaciones sísmicas. Se denominan plásticas puesto que los esfuerzos se desarrollan después de que el elemento supere el rango inelástico. En los lugares donde se formen las rótulas plásticas, los elementos estructurales sufrirán daños permanentes.

Los niveles de daño que puede sufrir una edificación se encuentran clasificados en el documento (ATC-40, 1996) "Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings", estimando el mismo en función de los niveles de desempeño de elementos estructurales y no estructurales. En función de los cuales, se pueden obtener cuatro niveles globales de desempeño comúnmente utilizados para describir el estado de daño de una estructura, y que serán explicados a continuación:



Estimación de la incertidumbre aleatoria de la deriva sísmica de un Pórtico de concreto reforzado considerando la variabilidad De la geometría y las propiedades del suelo

- **1-A Operacional:** Este nivel se relaciona con la funcionalidad del edificio, las reparaciones necesarias no perturban el desempeño sísmico de la estructura y todos los servicios se mantienen en perfecto funcionamiento. Se puede garantizar la seguridad de los ocupantes.
- **1-B Ocupación Inmediata:** Este nivel garantiza el funcionamiento de los espacios, sistemas y equipamientos de la edificación. Se puede garantizar la seguridad de los ocupantes. Algunos servicios pueden presentar interrupción inmediata, y serán restablecidos después de reparaciones.
- **1-C Protección a la Vida:** Estado de daño que presenta una probabilidad baja de atentar contra la vida de los ocupantes de la edificación. Constituye el nivel de desempeño límite que se espera alcanzar con la aplicación de los actuales códigos sísmicos. Pueden presentarse daños en elementos estructurales y falla de elementos no estructurales y en los componentes y servicios primarios y secundarios.
- **5-E Estabilidad Estructural:** Estado de daño en el que no se puede garantizar la vida de ocupantes o transeúntes por lo que se exige el desalojo de la edificación, y el peligro para la vida es elevado. La estructura mantiene su capacidad para resistir cargas verticales, mas no puede garantizar resistencia a cargas laterales.

2.7. Geometría de una Edificación

Comúnmente se dice que una edificación tiene propiedades sismo resistentes cuando se diseña según un código de construcción y se construye utilizando métodos adecuados. Los materiales empleados para construir las edificaciones deben cumplir con todos los códigos y la normatividad vigente en la región.

Además, una adecuada configuración estructural y dimensiones apropiadas aportan al buen desempeño estructural.

Aun cuando se diseñe una edificación cumpliendo con todos los requisitos que indican las normas de diseño y construcción sismo resistente, la posibilidad de que se presenten modificaciones e inconsistencias en el proceso constructivo es elevada.

Tal y como se establece en el apartado 1.1. de este documento, se busca establecer la relación existente entre las edificaciones diseñadas y las



edificaciones construidas. Es así como la geometría de la edificación cobra gran importancia en el desarrollo de esta investigación.

Los cambios geométricos introducidos dentro del diseño sismoresistente están bajo los lineamientos de la mitigación para los posibles desplazamientos generados tanto en la estructura, como también en las condiciones mecánicas de los materiales, que pueden ocasionar respuestas no lineales causando rigidización o ablandamiento en la estructura.

La posibilidad de un terremoto considerable es latente, y los diseños se realizan para ser resistidos por la edificación sin que ocurran daños. Sin embargo, teniendo en cuenta la posible diferencia entre lo diseñado y lo construido, la sismo-resistencia cobra una importancia vital en la construcción de edificaciones en la medida que se procure proteger la vida de las personas quienes la ocupan.

Aunque se presenten diferencias en construcción, en el caso de un sismo muy fuerte, una edificación deberá no colapsar y contribuirá a que no haya pérdidas de vidas y pérdida total de la propiedad.

2.8. Dinámica de Suelos

La naturaleza y la distribución de los problemas que se pueden ocasionar en las estructuras dependen de la respuesta del suelo a las cargas cíclicas, su gran porcentaje de respuesta se halla supeditado a las propiedades del suelo.

El comportamiento presentado ante carga o sollicitación dinámica puede manifestar por:

1. Pérdida de resistencia o pérdida de capacidad portante del suelo (Licuefacción).
2. Cambio de volumetría del suelo (Densificación).
3. Cambio en el estado de esfuerzo de la masa del suelo.
4. Amplificación dinámica y resonancia para los suelos blandos.

El diseño sismoresistente utiliza enfoque pseudo-estático para las cargas inducidas a las fundaciones en un movimiento sísmico, en donde se determinan las reacciones y momentos para llegar al equilibrio estructural.

Los suelos son clasificados de acuerdo con su contenido de humedad (CH) (Figura 6.), representado como consistencia del suelo y conocido como Límite De Atterberg (Rodríguez, 2009):



Estimación de la incertidumbre aleatoria de la deriva sísmica de un Pórtico de concreto reforzado considerando la variabilidad De la geometría y las propiedades del suelo

- Límite de Retracción (ω_R).
- Límite Plástico (ω_P).
- Límite Líquido (ω_L).

Así se realiza la determinación de la Consistencia del suelo que puede ser:

- Dura o Sólida.
- Friable (Desmenuzable fácilmente).
- Semisólida (Consistencia Plástica).
- Viscosa (Consistencia Fluida).

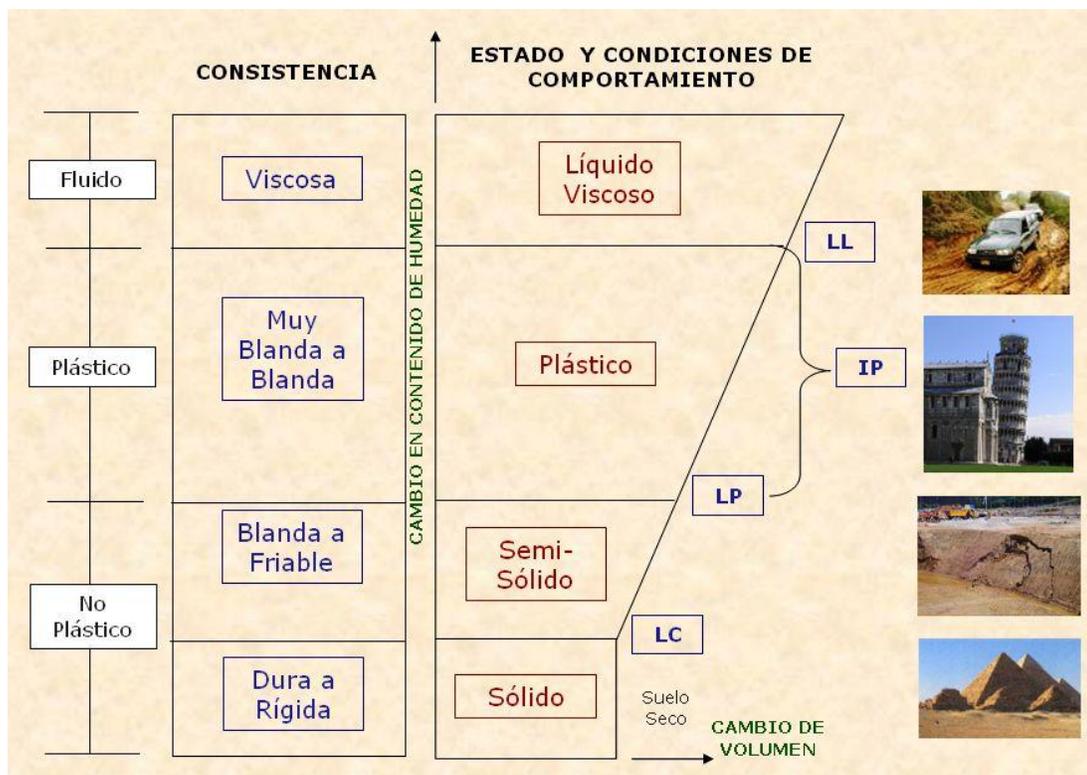


Figura 6. Consistencia y condiciones de comportamiento del suelo (geotecnia-sor, 2013)

Se deben determinar los parámetros que pueden modificar las propiedades dinámicas de los suelos con los índices que se encuentran a continuación:

1. **Índice de Plasticidad (IP):** Diferencia entre Límite Líquido y Límite Plástico (Ecuación 1.), este es de gran influencia en las propiedades dinámicas de los suelos.



$$IP = \omega_L - \omega_P (\%)$$

Ecuación 1. Índice de Plasticidad

Donde ω_L y ω_P se expresan en porcentaje (%)

2. **Porosidad (n):** Relación entre el volumen de huecos y el volumen total del suelo. (Ecuación 2)

$$n = \frac{V_p}{V_t} \text{ (adimensional)}$$

Ecuación 2. Porosidad

Donde $0 < n < 1$

V_p = Volumen de Huecos (Poros) = $V_{H_2O} - V_{aire}$

V_t = Volumen total del suelo

3. **Índice de Poros (e):** Es la relación entre el volumen de huecos y el volumen de sólidos. (Ecuación 3.)

$$e = \frac{V_P}{V_S} \text{ (adimensional)}$$

Ecuación 3. Índice de Poros

Donde $0 < e < \infty$

4. **Peso Específico (ρ):** Relación entre el peso total y el volumen total del suelo. (Ecuación 4.)

$$\rho = \frac{W_T}{V_S} \text{ (Kn/m}^3\text{)}$$

Ecuación 4. Peso Específico

5. **Densidad relativa (Dr):** Esta se deriva y depende directamente del Índice de Poros. (Ecuación 5.)

$$Dr = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}}$$

Ecuación 5. Densidad Relativa.



Donde:

$e_{m\acute{a}x}$: Índice de poros máximo correspondiente al estado mas suelto del suelo.

$e_{m\acute{i}n}$: Índice de poros mínimo correspondiente al estado mas compacto del suelo.

e : Índice de poros del suelo.

2.8.1. Grado de Sobreconsolidación (OCR-Over Consolidation Ratio):

En geotecnia se diferencian dos suelos, unos suelos no consolidados y unos suelos sobreconsolidados (Ecuación 6 6.), donde el primero corresponde a suelos cargados y los segundos corresponden a suelos que han sido cargados y descargados.

$$OCR = \frac{P_{max}}{P_{min}}$$

Ecuación 6. Ecuación de Sobreconsolidación.

Donde:

P_{max} : Tensión máxima que se ha sometido el suelo

P_{min} : Tensión mínima que se ha sometido el suelo

Cuando

$OCR = 1$ es un Suelo normalmente Consolidado

$OCR > 1$ Suelo Sobreconsolidado.

En la actualidad para realizar el diseño de una edificación se deben tener en cuenta múltiples variables aleatorias como lo son: la geometría de los elementos estructurales, la fluencia del acero, la resistencia a la compresión del concreto, la respuesta dinámico-mecánica del suelo, entre otros; sin embargo, habitualmente los diseñadores estructurales no consideran parámetros fundamentales en el análisis dinámico del suelo, como por ejemplo la flexibilidad del sistema suelo-cimentación y su relación con la flexibilidad de la estructura.

La interacción dinámica suelo-estructura (IDSE) consiste en todas las modificaciones del terreno que generan una respuesta dinámica de la estructura debida a las flexibilidad y deformación del suelo y la cimentación en comparación con la flexibilidad y deformación de la estructura. La importancia de este fenómeno en la respuesta estructural es que se puede observar en gran magnitud la



diferencia entre la rigidez de la estructura y la rigidez del suelo-cimentación. (Fernández, 2013)

Según Chorro y Garay, 2006, Los mecanismos de interacción suelo-estructura están compuestos por dos fenómenos físicos:

1. Interacción Inercial: Corresponde a las fuerzas generadas por la masa de la estructura, que incrementa el cortante y momento de la base en función a su propia vibración.
2. Interacción Cinemática: Corresponde a la desviación del movimiento con respecto al de su campo libre debido a la rigidez de la cimentación.

Para analizar el comportamiento del suelo durante movimiento de la base del terreno y el comportamiento sísmico de una edificación es necesario en primer lugar revisar las propiedades dinámicas del suelo que rigen la amplificación de los movimientos del mismo. Estas son la rigidez, el amortiguamiento, la densidad (ρ) y el índice de poisson (ν), sin embargo las de mayor influencia son: La rigidez se obtiene a través del módulo de corte G que es calculado por medio de las velocidades de las ondas sísmicas. El amortiguamiento ξ es la capacidad del suelo para disipar la energía suministrada. (Rodríguez, 2009)

2.9. Módulo de Rigidez o Módulo de Corte en un Suelo

Es de gran importancia en el análisis dinámico del suelo, la estimación experimental de la curva esfuerzos-deformación. Los suelos tienen un comportamiento no lineal que se evidencia comúnmente en los ciclos de histéresis esfuerzo-deformación de un material; el módulo de rigidez o módulo de corte (G_{sec}) se define como la pendiente secante que une los puntos extremos de dicho ciclo, G_1 y G_2 . (Figura 7.)

El modulo de rigidez inicial (G_o o $G_{m\acute{a}x}$) solo se presenta para deformaciones muy pequeñas (menos a $10^{-4}\%$), y esta se encuentra dada por la pendiente tangente ubicada en el origen de la curva o el valor del modulo de Corte (G) estimado en el ensayo de Bender Elements, este es el valor más grande de módulo de corte o rigidez. (Bran et al., 2009). Este puede ser calculado a partir de la velocidad de onda de corte (V_s) de la siguiente manera: (Ecuación 7.)

$$G_{max} = \rho \cdot V_s^2$$

Ecuación 7. Obtención del Modulo de Rigidez $G_{m\acute{a}x}$ (Rivas, 2010.)



Estimación de la incertidumbre aleatoria de la deriva sísmica de un Pórtico de concreto reforzado considerando la variabilidad De la geometría y las propiedades del suelo

Donde

ρ = densidad del material

V_s = Velocidad de onda de corte

Este valor es de gran importancia a la hora de analizar pequeñas deformaciones dinámicas, ya que estos son los que nos ayudan a ver como es el comportamiento del suelo o la interacción de la estructura del mismo en el momento de un desastre natural o industrial (sismos, vibraciones por elementos industriales, etc.)

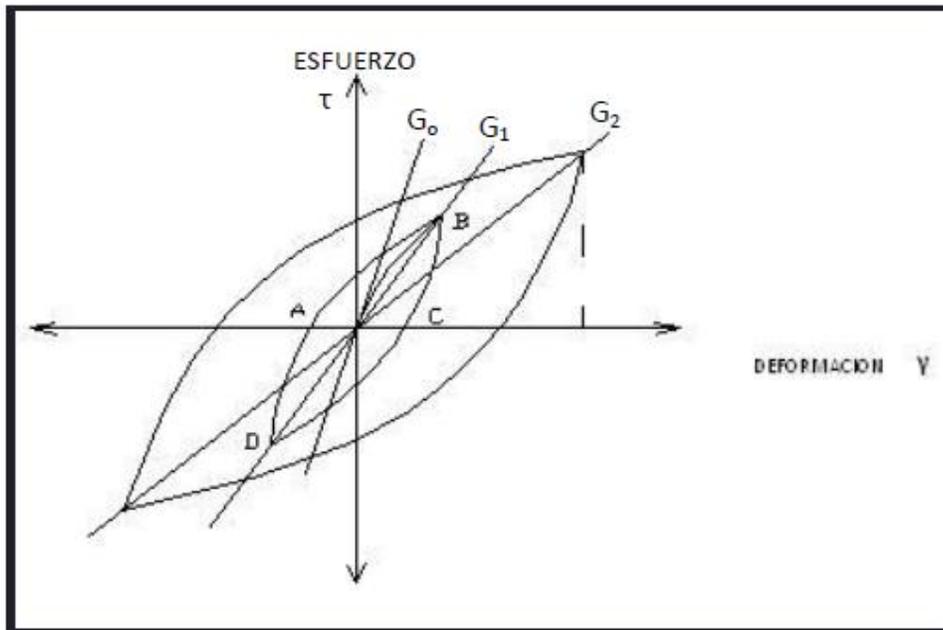


Figura 7. Ciclo de histéresis Esfuerzo-Deformación. (Bran et al., 2009)

Para medir este máximo valor del modulo de rigidez o modulo de corte se utiliza un ensayo denominado “Bender Elements” (Figura 8). Este tiene la capacidad de convertir energía mecánica (producto de movimientos) en energía eléctrica.

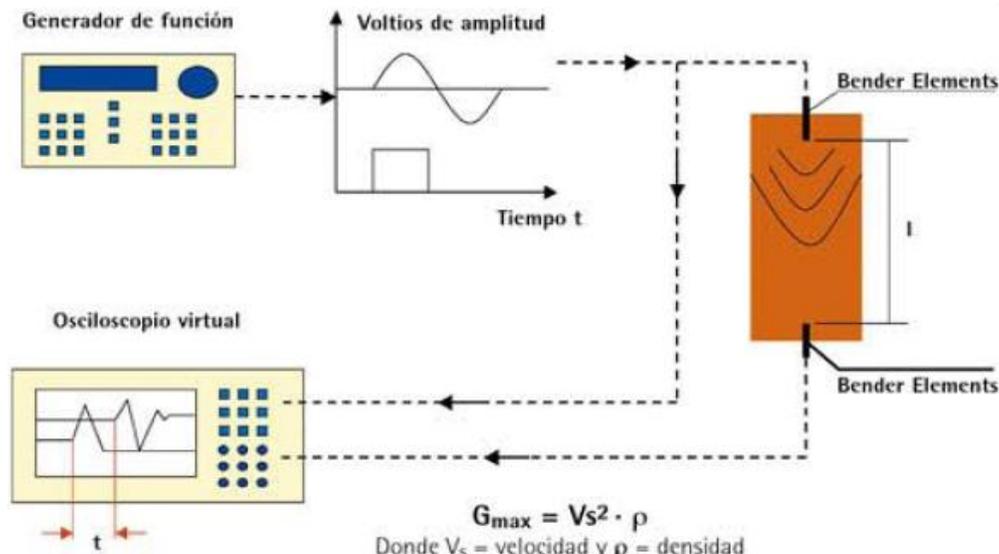


Figura 8. Equipo Bender Elements (adatec, 2013)

El ensayo Bender elements, son simplemente pequeños platos piezocerámicos que oscilan cuando está cargado eléctricamente por una tensión variable, ya sea una onda sinusoidal o cuadrada, o producir un voltaje cuando son estimulados por una vibración. (Schmalz et al., 2007)

Cuando se aplica en suelos, se hace uso del transmisor piezo-cerámico, este genera una onda de corte; dichas ondas o perturbaciones viajan a lo largo de la muestra de suelo. Son recibidas por un elemento similar en el otro extremo que a su vez genera una señal eléctrica o voltaje. Finalmente las características de dichas señales eléctricas son utilizadas para determinar el módulo de corte (G).

El módulo de corte a su vez es utilizado para realizar análisis dinámicos tales como: la interacción de una estructura con el suelo o las vibraciones del tráfico sobre una vía. (Camacho-tauta et al., 2012)

Según un estudio realizado por Bran et al., 2009 los factores que afectan este ensayo y que se encuentran en la mayoría de los suelos son los siguientes:

1. Efecto de la amplitud de deformación.
2. Efecto de la relación de vacíos.
3. Efecto de la presión confinante.
4. Efecto de la historia de consolidación OCR.
5. Efecto de la consolidación secundaria.



6. Efecto del índice de plasticidad.

2.9.1. Curva de Degradación del Módulo de Rigidez

La curva de degradación del modulo de rigidez describe la variación del modulo de corte con respecto a la deformación angular. Esta curva se sistematiza con respecto a la rigidez máxima (G/G_{Max}) y depende de la aplicación de la carga (cíclica o monotónica), la velocidad y los factores que afectan el modulo de corte.

El ajuste de la curva de degradación del suelo se realiza mediante los modelos propuestos por Hardin & Drnevich que fue modificado por Otálvaro en 2005. La ecuación para aplicar al módulo de rigidez se representa mediante la Ecuación 8:

$$\frac{G}{G_{m\acute{a}x}} = \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{\gamma}{\gamma_y}\right)^n\right]^m}$$

Ecuación 8. Ajuste Curva de Degradación del suelo

Donde:

γ_y : Nivel de deformación por cortante donde empieza la pérdida de la estructura y el suelo comienza un comportamiento inelástico.

n : parámetro de ajuste que controla la tasa con la cual ocurre la pérdida de rigidez del suelo con el incremento de la deformación por cortante.

m : parámetro de ajuste que controla la pérdida de rigidez del suelo a grandes deformaciones.

Comúnmente se realizan unos ajustes que definen dos bandas envolventes de los datos medidos en laboratorio, de tal modo que representen la posible variación de las propiedades dinámicas del suelo, acotando los datos mediante unos intervalos de confianza (Limite Superior y Limite Inferior) tal como se muestra en la Figura 9.:

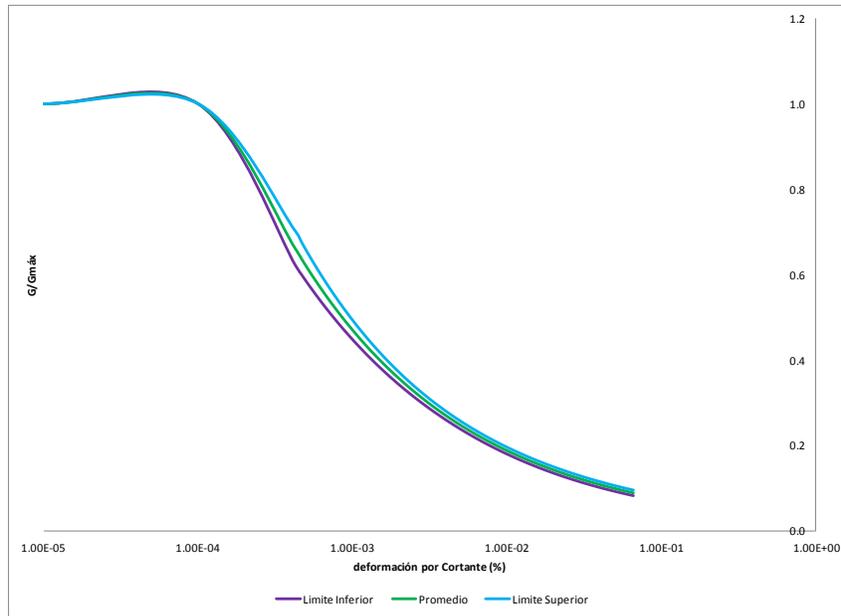


Figura 9. Curva de Degradación del Módulo de Rigidez.

2.10. Amortiguamiento Máximo de un Suelo

Es la propiedad que simboliza la capacidad de la disipación de la energía de un suelo. Este se encuentra presente en todos los sistemas físicos (reales) y permite la disipación de energía de un sistema que se encuentre en vibración hasta obtener su posición de equilibrio inicial. Dependiendo del mecanismo utilizado por el sistema para la disipación de energía se pueden dividir en:

1. Amortiguamiento viscoso.
2. Amortiguamiento por radiación.
3. Amortiguamiento histerético.
4. Amortiguamiento viscoso.

El ensayo que se utiliza para obtención del Amortiguamiento (ξ) y el módulo de elasticidad dinámico (E_d) se denomina “triaxial cíclico”. En la Figura 10. se observa un esquema representativo del procedimiento a usar para este ensayo.



Estimación de la incertidumbre aleatoria de la deriva sísmica de un Pórtico de concreto reforzado considerando la variabilidad De la geometría y las propiedades del suelo

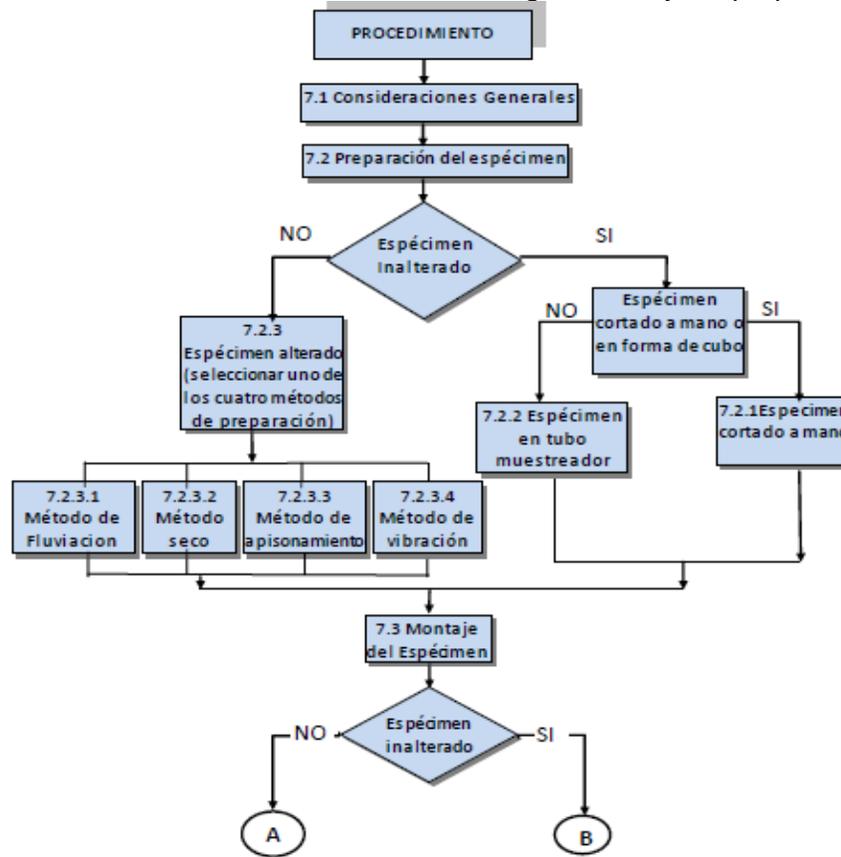


Figura 10. Representación esquemática del procedimiento para el método de prueba Triaxial Cíclico. (Bran et al., 2009)

En este ensayo una muestra cilíndrica se coloca sobre unas platinas de carga (envuelta por una delgada membrana de goma). Esta muestra se somete a dos esfuerzos, uno radial y el otro axial (esfuerzos verticales y horizontales); a estas dos condiciones de frontera se les llama esfuerzo desviador, este esfuerzo es aplicado cíclicamente bajo deformaciones y cargas controladas. El equipo usado se llama “Triaxial cíclico de carga o deformación controlada” (Figura 11.)

Los resultados de la deformación y el esfuerzo axial son medidos y utilizados para calcular la dependencia de la razón de amortiguamiento (ξ), así como del módulo de elasticidad dinámico (E_d) con los esfuerzos o deformaciones. (Chorro y Garay, 2006). Este es usado en estructuras que se encuentran sometidas a cargas cíclicas naturales (terremotos, vientos fuertes, maremotos, etc.).

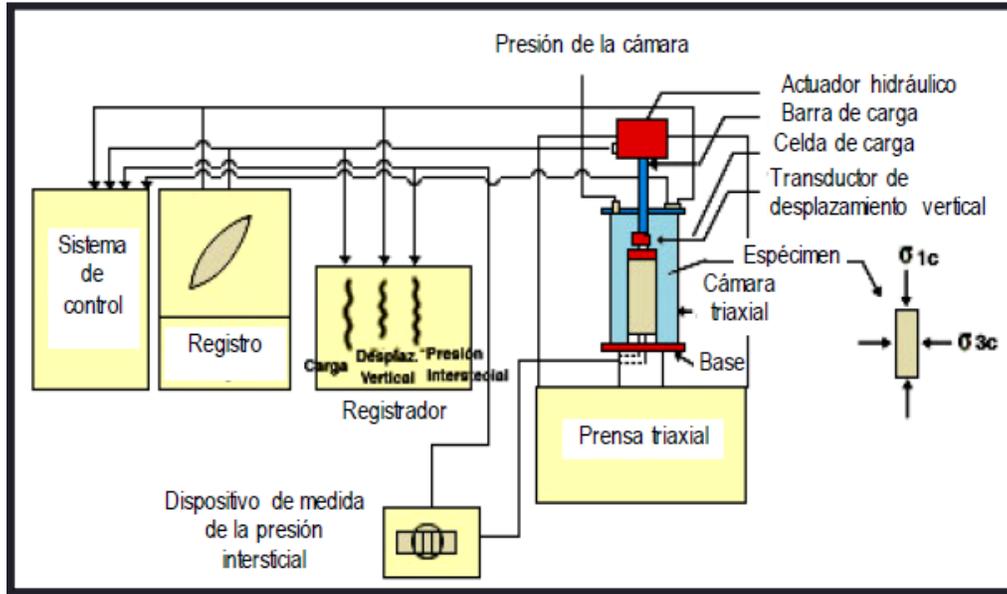


Figura 11. Esquema del Equipo Triaxial cíclico de carga o deformación controlada. (ASTM D3999, 2013)

Los principales factores que afectan el amortiguamiento según una investigación realizada por Bran et al., 2009 en un suelo dado son:

1. Efecto de la amplitud de deformación angular (γ).
2. Efecto de la presión confinada.
3. Efecto de la frecuencia de carga.

2.11. Respuesta Sísmica y Efectos Locales

Los movimientos de cambios de energía ocurridos en las fronteras entre placas tectónicas se llaman movimientos telúricos. Estas fronteras son de tres maneras diferentes (Figura 12.):

1. Fronteras Divergentes: Ocurre debido a la separación de dos placas tectónicas, produciendo una fisura de falla.
2. Fronteras convergentes: Producida por el movimiento de “Fronteras Divergentes”, la cual ocurre cuando dos placas tectónicas chocan entre sí, creando una zona de subducción (oceánica-continental o oceánica-oceánica o colisión continente-continente).
3. Fronteras de transformación: Produce un deslizamiento horizontal entre placas.



Estimación de la incertidumbre aleatoria de la deriva sísmica de un Pórtico de concreto reforzado considerando la variabilidad De la geometría y las propiedades del suelo

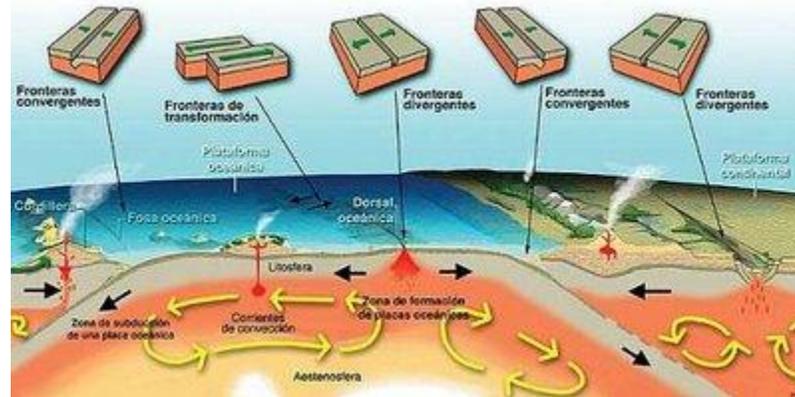


Figura 12. Tipos de fronteras existentes (dinámica del paisaje, 2013)

Estos sucesos de liberación de energía se transmiten por medio de un medio elástico en forma de ondas sísmicas (deformaciones). (Zarate et al., 2005)

Una onda se puede entender entonces como un transporte de energía y cantidad de movimiento de un punto a otro (sin transportar materia), estas se clasifican en:

1. Viajeras: Hay propagación de energía.
2. Estacionarias: La energía relacionada con la onda permanece entre do fronteras.

Los parámetros para describir una onda se pueden ver en las ecuaciones 9, 10 y 11 mostradas a continuación:

$$f = \frac{1}{T}$$

Ecuación 9. Frecuencia

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

Ecuación 10. Frecuencia angular

Donde T= Periodo

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

Ecuación 11. Número de onda

Donde λ = Longitud de onda

Según Rosales, 2001 las ondas elásticas se dividen principalmente en dos subgrupos:

1. Ondas de Volumen (Figura 13.)

- 1.1. **Ondas P (Primarias):** Estas son las que se propagan a mayor velocidad, por lo anterior, son las primeras que registra sin importar la distancia que haya hasta el foco. La propagación de estas producen compresión y dilatación.
- 1.2. **Ondas S (Secundarias):** Tienen menor velocidad de propagación que las ondas P; la vibración de las partículas es perpendicular las de su dispersión.

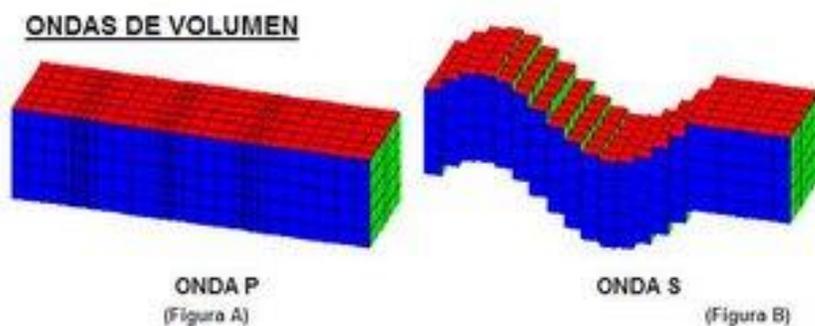


Figura 13. Ondas de Volumen (iesfuentenueva, 2013)

2. Ondas Superficiales (Figura 14.)

- 2.1. **Ondas L (Love):** Su propagación es similar a la de las Ondas S, con la diferencia de que la vibración de las partículas horizontalmente en sentido perpendicular a la propagación (no hay movimiento vertical).
- 2.2. **Ondas R (Rayleig):** La vibración de las partículas sobre un plano que apunta en dirección de la trayectoria de ondas, con movimientos en forma elíptica y vertical al mismo tiempo.

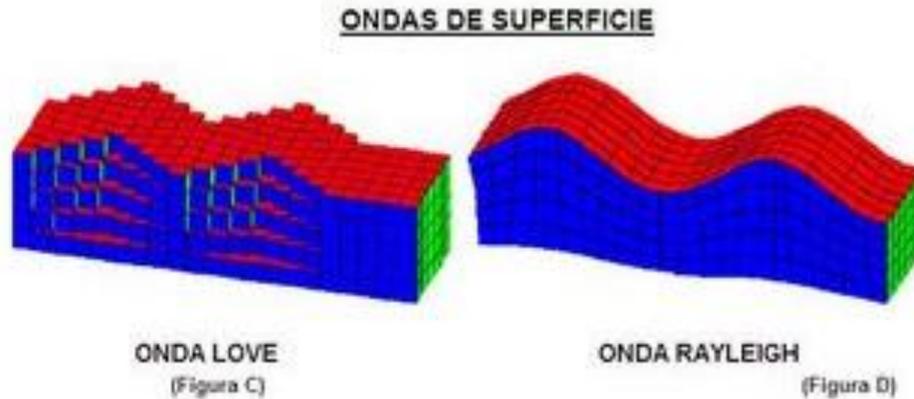


Figura 14. Ondas Superficiales (iesfuentenueva, 2013)

La propagación de estas ondas varia debido a la amplitud, de la distancia epicentral, magnitud del sismo, de las condiciones geológicas del subsuelo, forma del terreno, trayectoria de las ondas, y de las condiciones locales del suelo. (Zarate et al., 2005)

Estas propagaciones de ondas se pueden entender mejor por medio de dos conceptos: por medio del concepto “Rayo”, este es aplicable a la hora de analizar trayectorias en donde la propagación e interacción de las ondas con medios con propiedades variables se simplifican al hacer el seguimiento a los rayos que sufren los efectos de reflexión y refracción en las diferentes interfaces. El otro concepto es el que parte de la naturaleza real de la onda como propagación de una perturbación, este es de gran necesidad a la hora de explicar todos aquellos fenómenos en los cuales son determinantes las propiedades de la onda fenómeno de la difracción, transmisión de energía, interferencia, polarización, la interacción de las ondas con propiedades del medio, etc.). (Rosales, 2001)

En la propagación de las ondas sísmicas hay tres factores fundamentales que contribuyen al movimiento: la fuente, el medio por el cual se transmiten las ondas y el efecto local o del emplazamiento. Este último aspecto, de importante repercusión en el diseño antisísmico de estructuras. (Álvarez, 1999)

De acuerdo a Ramos et al., 2004 los efectos locales se pueden dividir en dos grandes grupos:

1. *Efectos de Amplificación*: Son las modificaciones que sufre el movimiento sísmico (aceleración máxima y frecuencia), debido a la propagación ascendente de las ondas de corte a través del suelo (según las propiedades dinámicas y geométricas del suelo).

2. *Efectos Geométricos*: Se refieren a las amplificaciones o de amplificación generadas como consecuencia a las características topográficas

2.11.1. Modelo Lineal Equivalente

Cuando un suelo es incitado por una fuerza sísmica queda sometido a un proceso cíclico de carga, en donde no se puede considerar como un sistema lineal y elástico a lo largo de su deformación.

Un modelo histéretico (Figura 15.) aplicado al comportamiento dinámico de los suelos (rango lineal y no lineal) supone que la energía sumada en la carga se convierte en energía cinética al invertirse el movimiento, para así comenzar el ciclo de descarga, por lo tanto, esto hace que difieran en su trayectoria y comportamientos estos dos ciclos (carga y descarga).

El comportamiento de este ciclo se compone de dos componentes, su inclinación y anchura; la primera está definida por el Modulo de Rigidez (G) y la segunda por la relación de amortiguamiento (ξ).

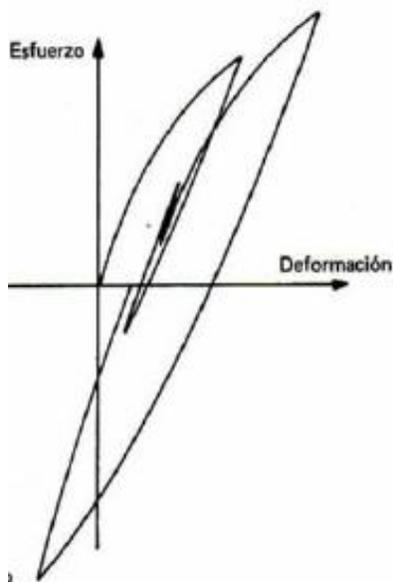


Figura 15. Modelo de Histéresis (Bran et al., 2005)

La inclinación general de la curva de histéresis, la determina el Modulo de Corte Secante (G_{sec}) que a su vez determina la Relación de Amortiguamiento (ξ). El área bajo la curva de carga representa la acumulación de energía de deformación mientras el material es cargado, y el área bajo la curva de descarga representa la transformación en energía cinética cuando el material es descargado.



Estimación de la incertidumbre aleatoria de la deriva sísmica de un Pórtico de concreto reforzado considerando la variabilidad

De la geometría y las propiedades del suelo

En la Figura 16., se presentan resultados de la variación del módulo de rigidez (G) y el amortiguamiento (ξ), con el nivel de deformación cortante (γ). Se observa que a mayor deformación (γ), el módulo de rigidez (G) disminuye y el amortiguamiento (ξ) aumenta.

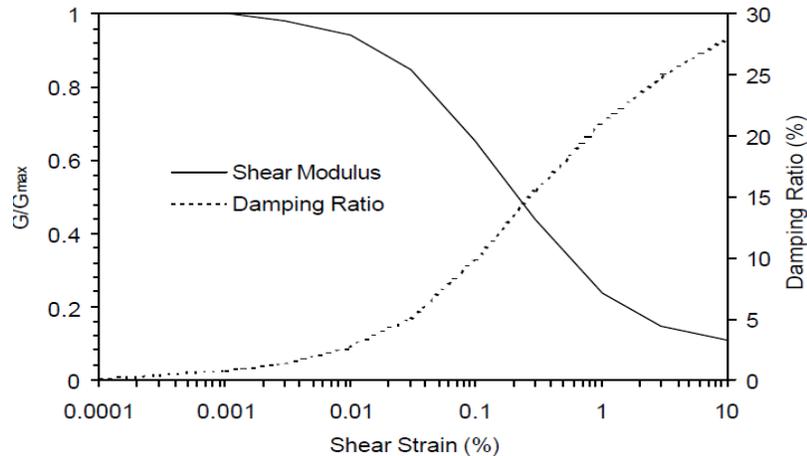


Figura 16. Variación del módulo de rigidez a cortante (G) y la razón de amortiguamiento (ξ) con la deformación de corte (γ). (EERA, 1998)

El modelo lineal equivalente especifica la variación del módulo de corte y la relación de amortiguamiento con amplitud de deformación de corte. Supuestos adicionales son necesarios para especificar los efectos de la frecuencia de las relaciones tensión-deformación.

2.11.2. PROGRAMA EERA (Earthquake site Response Analyses of Layered Soil Deposits)

Significa Análisis de la Respuesta Lineal Equivalente De Un Sismo En Un Depósito De Suelo Estratificado; fue creado en 1998, bajo los mismos conceptos del programa computacional SHAKE (SHAKE calcula la respuesta de un sistema suelo-roca estratificada horizontalmente, sometido a las ondas de corte que viajan transitoriamente de forma vertical)

EERA es un ejecutor de los análisis unidimensionales equivalentes que se usan para la evaluación de la respuesta de un depósito de suelo ante un sismo. Este programa representa la respuesta de un perfil de depósitos de suelo dado usando el lenguaje computacional FORTRAN90; en donde él asume la condición del depósito del suelo como un sistema de estratos horizontales de extensión infinita; las ondas de corte S se transmiten de manera perpendicular a los estratos (verticalmente).



El programa EERA se basa en la teoría de propagación de ondas desarrollada por Kanai (1951), Roesset y Whitman (1969), y Tsai y Housner (1970), asumiendo que el comportamiento histerético de los suelos puede ser simulado por un modelo lineal equivalente. (Zarate et al., 2005).

En SHAKE, los valores de módulo de corte y la relación de amortiguamiento están determinados por iteraciones para que sean coherentes con el nivel de la deformación inducida en cada estrato. Los valores de G_0 y ξ_0 inician con valores pequeños de deformación, y son calculados la deformación cortante máxima γ_{max} y la deformación de corte efectiva γ_{eff} . Entonces, los valores compatibles G_1 y ξ_1 correspondientes a los valores γ_{eff1} se encuentran para la siguiente iteración. El análisis lineal equivalente se repite con nuevos valores de G y ξ hasta que los valores de G y ξ sean compatibles con la deformación inducida en todos los estratos.

El procedimiento de iteración para la aproximación lineal equivalente en cada estrato es de la siguiente manera:

1. Inicializan los valores de G_i y ξ_i a sus valores de deformación pequeñas.
2. Calcule la respuesta del terreno, y obtiene las amplitudes de la deformación cortante máxima γ_{max} de análisis cronológicos de la deformación de corte en cada estrato.
3. Determinar la deformación de corte efectiva γ_{eff} a partir de la deformación de corte máxima $\gamma_{m\acute{a}x}$. por medio de la Ecuación 12. presentada:

$$\gamma_{eff}^i = R_\gamma \gamma_{max}^i$$

Ecuación 12. Deformación de Corte Efectivo (EERA, 1998)

Donde:

R_γ : Es la relación de la deformación por esfuerzo cortante efectiva a la deformación máxima de corte que depende de la magnitud del sismo. Este valor se especifica en la entrada, y representa el número de ciclos durante los sismos; es la misma en todos los estratos.

4. Calcula los nuevos valores equivalentes lineales de G_{i+1} y ξ_{i+1} correspondiente a la deformación de corte efectiva γ_{eff} .
5. Se repita los pasos 2 a 4 hasta que las diferencias entre los valores calculados del módulo de corte y la relación de amortiguamiento en dos iteraciones sucesivas caen por debajo de un valor predeterminado en todas las capas. Generalmente con 8 iteraciones son suficientes para lograr la convergencia. En la Figura 17. se



Estimación de la incertidumbre aleatoria de la deriva sísmica de un Pórtico de concreto reforzado considerando la variabilidad

De la geometría y las propiedades del suelo

observa la iteración del módulo de corte y la relación de amortiguamiento con deformación por esfuerzo cortante.

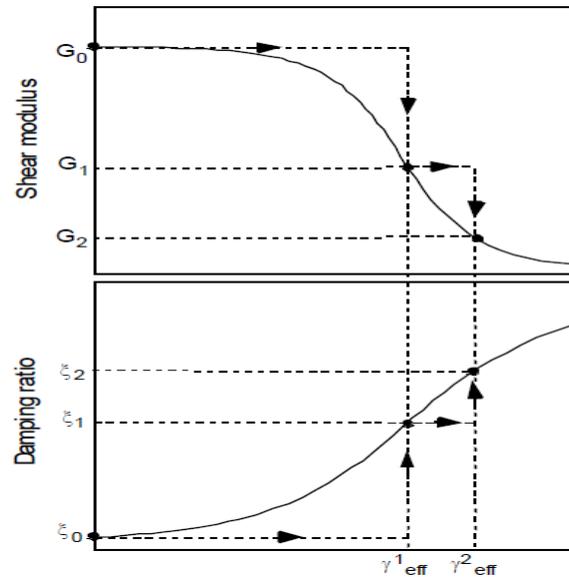


Figura 17. Iteración del módulo de corte y relación de amortiguamiento con deformación por esfuerzo cortante en el análisis lineal equivalente. (EERA, 1998)

Con base a este programa se evaluó la respuesta en superficie ante una señal sísmica de origen cercano como se puede observar en la Figura 18.

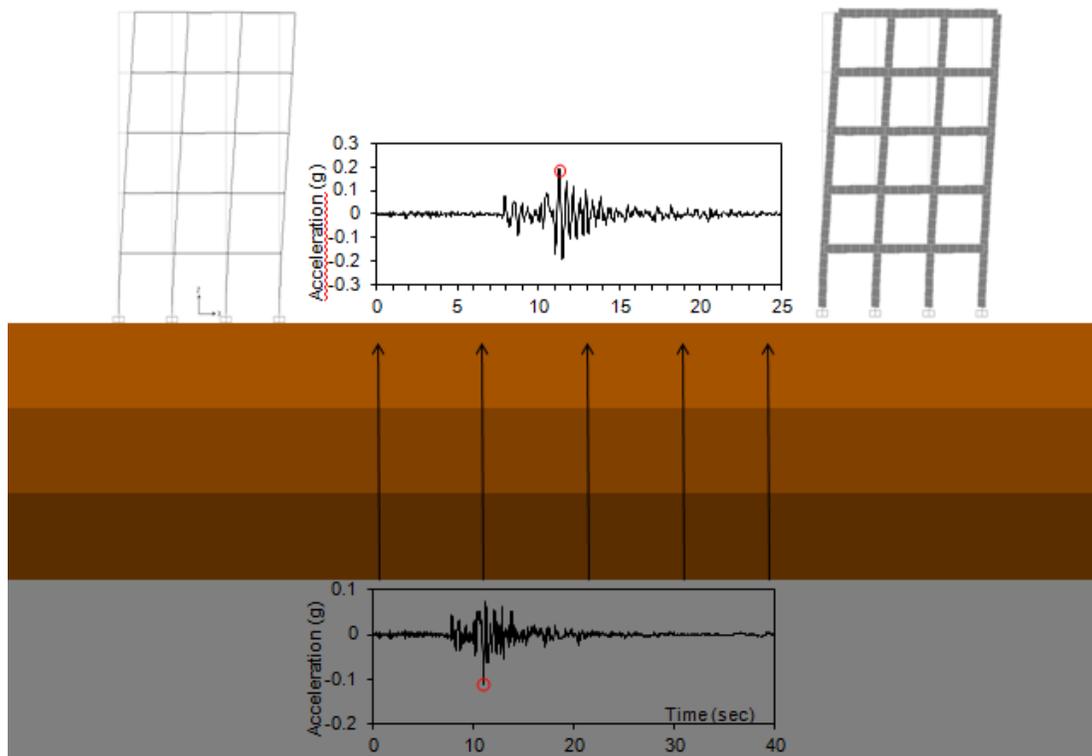


Figura 18. Esquema explicativo de la respuesta sísmica



2.12. Simulaciones De Montecarlo

Nombrado así por el principado de Mónaco, por ser la capital del juego de azar, esto por el hecho de tomar la ruleta como un generador de números aleatorios. Cronológicamente creado en 1944 desde el desarrollo de los computadores. Sin embargo hay eventos anteriores que relacionan dicho método.

El uso de estas simulaciones como herramienta de investigación proviene del trabajo que se realizó en el desarrollo de la bomba atómica durante la segunda Guerra Mundial en el laboratorio nacional de los Álamos. (E.E.U.U); este trabajo involucraba problemas de hidrodinámica a la difusión de neutrones de manera aleatoria. (Rodríguez, 2010)

El método de Monte Carlo es un implemento de planeamiento e investigación, en donde maneja básicamente el muestreo artificial; es empleado en las operaciones numéricas de alta complicación que tengas componentes aleatorios y/o determinísticos, manteniendo en sí, un grado de incertidumbre a la entrada y salida. Entre más pequeño sea el tamaño de las muestra, los resultados tienden a ser más sensibles a las condiciones iniciales.

2.12.1. Variables Aleatorias

Es aquella cuyo valor está determinado por el resultado de un experimento; Las variables aleatorias se clasifican en dos tipos (Ávila, 2005):

1. Variables Aleatorias Discretas: Es una variable que solo puede asumir un conjunto numerable de valores, y estos no pueden ser fraccionados (Lanzamiento de dados, monedas, entre otros.).
2. Variables Aleatorias Continuas: Es una variable que puede asumir un número infinitamente grande de valores correspondientes a los puntos sobre un intervalo en una línea recta (Temperatura de un día determinado, fuerza requerida para romper un elemento, entre otros.)
 - Estos valores deben tener igual probabilidad de salir elegidos.
 - No debe existir correlación serial
 - Se generan por tablas (Rand 1955), o por dispositivos especiales: ruleta. En la práctica se utilizan algoritmos y se generan números pseudo aleatorios.

El algoritmo de simulación de Monte Carlo se encuentra fundamentado en la generación de números aleatorios por el método de transformación Inversa (basado en la distribución acumulada de frecuencias), a continuación se pueden ver los pasos que sigue este método:



Estimación de la incertidumbre aleatoria de la deriva sísmica de un
Pórtico de concreto reforzado considerando la variabilidad
De la geometría y las propiedades del suelo

1. Determinación de las Variables aleatorias y sus distribuciones acumuladas (F).
2. Generar un número aleatorio.
3. Determinar el valor de la variable aleatoria para el número aleatorio generado de acuerdo a las clases que se tengan.
4. Calcular la media, desviación estándar, error y realizar el histograma.
5. Analizar los resultados para distintos tamaños de muestras.

Los pasos 2 y 3 se iteran tantas veces como muestras se necesitan.

Cuando la variable aleatoria no es directamente el resultado de la simulación o se tiene relación entre varias variables se puede emplear el siguiente procedimiento (Investigación Operativa, 2005):

1. Diseñar el modelo lógico de decisión.
2. Especificar distribuciones de probabilidad para las variables aleatorias relevantes.
3. Incluir posibles dependencias entre variables.
4. Muestrear valores de las variables aleatorias.
5. Calcular el resultado del modelo según los valores del muestre (iteración) y registrar el resultado.
6. Repetir el proceso hasta tener una muestra estadísticamente representativa.
7. Obtener la distribución de frecuencias del resultado de las iteraciones.
8. Calcular la media, la desviación.
9. Analizar los resultados.

3. METODOLOGÍA EMPLEADA

El presente trabajo de grado se estructura en VI Fases:

3.1. Fase I: Revisión Bibliográfica

Se realizó la revisión bibliográfica de las experiencias e investigaciones realizadas sobre las variables aleatorias de las estructuras, para así obtener una base conceptual que permitiera plantear el fundamento principal del proyecto.



3.2. Fase II: Evaluación de la aleatoriedad de la Geometría y del módulo elástico del suelo y su amortiguamiento (ensayos de laboratorio).

En el proyecto se evaluó la deriva sísmica de una estructura mediante la variación de la geometría, la variación de las propiedades mecánico-dinámicas del perfil del suelo (obtenidas en el laboratorio) y el sismo de entrada.

3.2.1. Geometría

Se realizarán las medidas dimensionales (doscientas mediciones), correspondientes a varias vigas y columnas de dos edificios (Don Guillermo Castro (115) y Pedro Arrupe (94) ubicados en la Pontificia universidad Javeriana) ya construidos. Se determinaron en el plano las dimensiones que se habían proyectado para este, y se realizó la comparación con las medidas tomadas (Ecuación 13.)

$$factor = \frac{\bar{m}_{real}}{\bar{m}_{plano}};$$

Ecuación 13. Obtención del valor "Factor"

Donde

\bar{m}_{real} = Medida correspondiente después de la construcción.

\bar{m}_{plano} = Medida correspondiente a la proyección en planos para su construcción.

Con base a estos valores de "factor" se estableció el ajuste a la distribución de probabilidad. Posteriormente se obtuvieron de manera aleatoria cincuenta números de "factor" que son finalmente con los que se trabajo en el presente proyecto; estableciendo de nuevo un ajuste para la distribución de probabilidad para estos valores.

3.2.2. Suelo

La microzonificación sísmica de la ciudad de Bogotá definió zonas de respuesta sísmica del suelo. En el proyecto se evaluó un perfil en una única zona que pertenece a la ciudad de Bogotá, contando con información estratigráfica obtenida por medio de ensayos dinámicos de laboratorio tales Como Triaxial Cíclico y Bender Elements (realizados en el Laboratorio De Pruebas Y Ensayos De La Pontificia Universidad Javeriana), y así estimar las



Estimación de la incertidumbre aleatoria de la deriva sísmica de un Pórtico de concreto reforzado considerando la variabilidad De la geometría y las propiedades del suelo propiedades dinámicas del suelo. Para estas estratificaciones se obtuvo la gráfica de G/G_0 vs. γ (Figura 19.) para los intervalos de confianza al 99% que se encuentran en dichos ensayos.

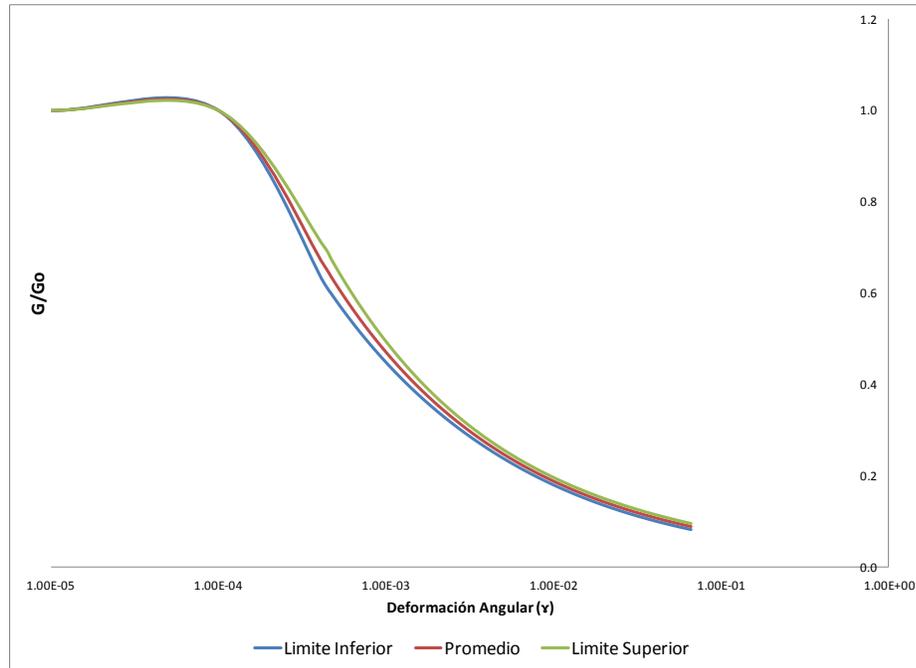


Figura 19. Grafica G/G_0 vs τ

De acuerdo a estas características se generaron cincuenta y uno posibles variaciones de esta curva de tendencia, dentro de estos dos intervalos de confianza (Limite Superior y Limite Inferior).

Cada una de estas curvas se vinculó a un modelo unidimensional del suelo en el programa EERA; a través del cual se obtuvieron cincuenta y un respuestas diferentes en superficie para un sismo dado, variando únicamente las funciones G/G_0 . En total se analizó la respuesta del suelo para 1 sismo de entrada.

3.2.3. Sismo

Los estudios realizados por la Microzonificación Sísmica de la ciudad de Bogotá muestran los siguientes sismos de referencia: Mammoth Lakes-Usa, Coyote Lake-Usa, Lytte Creek-Usa, Western Iran-Iran, Kyshu-Japon, Northridge Yorb-Usa, Northridge Deer-Usa, Honshu-Japon, Costa Peru-Peru, Tarapaca-Chile, Fiordiand-Nueva Zelanda y Michodean-Mexico; de estos se eligió “Coyote Lake-Usa” como sismo de entrada.

3.3. Fase III: Respuesta Sísmica

Se diseñó inicialmente un edificio de 5 pisos (modelo plano con base en la NSR-10 y la MZS 2010). Se Realizó el montaje de los pórticos en SAP 2000 y se creó un macro en Excel (Código visual basic) que generó una interface entre Microsoft Excel y SAP2000, en donde se puede modificar la geometría con la variable “factor”. Así mismo el modelo permitió que para cada valor de “factor” corra el sismo nombrado en la Fase II; con estas dos mil quinientas cincuenta corridas máximas (51 curvas de G/G_0 x 50 geometrías se obtuvo la deriva máxima para varios pisos.

3.4. Fase IV. Análisis de resultados

Se encontró la Función De Distribución De Probabilidad para las derivas elásticas y/o inelásticas.

3.5. Fase V: Conclusiones y recomendaciones

Se emitieron las conclusiones y recomendaciones con el fin de evaluar la variabilidad de la deriva sísmica.

4. DESARROLLO EXPERIMENTAL

4.1. Variación de la Geometría

Como primera instancia se procedió a la obtención de los planos de diseño arquitectónico correspondientes a los edificios Don Guillermo Castro (115) y Pedro Arrupe ubicados en la Pontificia Universidad Javeriana. (Figura 20.)

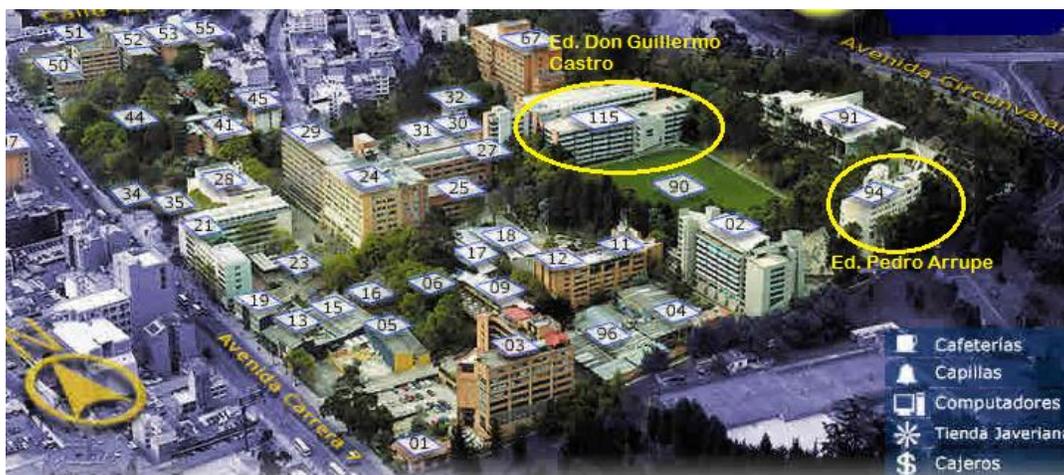


Figura 20. Ubicación de los Edificios Don Guillermo Castro y Pedro Arrupe en el campus de la PUJ. (Javeriana, 2013).



Estimación de la incertidumbre aleatoria de la deriva sísmica de un
Pórtico de concreto reforzado considerando la variabilidad
De la geometría y las propiedades del suelo

Se realizaron cien (100) mediciones dimensionales correspondientes a varias vigas y columnas de los dos edificios anteriormente nombrados, sumando doscientas (200) medidas en su totalidad. Estas medidas se realizaron de la siguiente manera:

- Columnas: Se realizó la medición del elemento estructural (base y espesor) en 3 ubicaciones diferentes a lo largo del elemento (base, medio y parte superior), esto con el fin de reducir la incertidumbre de las medidas y observar la variación de estas a lo largo del mismo elemento. De estas medidas se realizó el promedio para obtener así solo dos datos por columna (base y espesor).
- Viga: Se realizó la medición del elemento estructural (ancho y alto), debido a la longitud del elemento solo se tomó una medida.

Se localizaron en el plano las dimensiones que se habían proyectado para cada medida de cada elemento; con estas, se procede a la respectiva comparación con las mediciones tomadas en forma manual como se muestra a continuación en la Ecuación 13.:

$$Factor = \frac{m_{real}}{m_{plano}}$$

Ecuación 13. Obtención del valor "Factor".

Donde:

m real= Medida correspondiente después de la construcción

m plano= Medida correspondiente a la proyección en planos para su construcción.

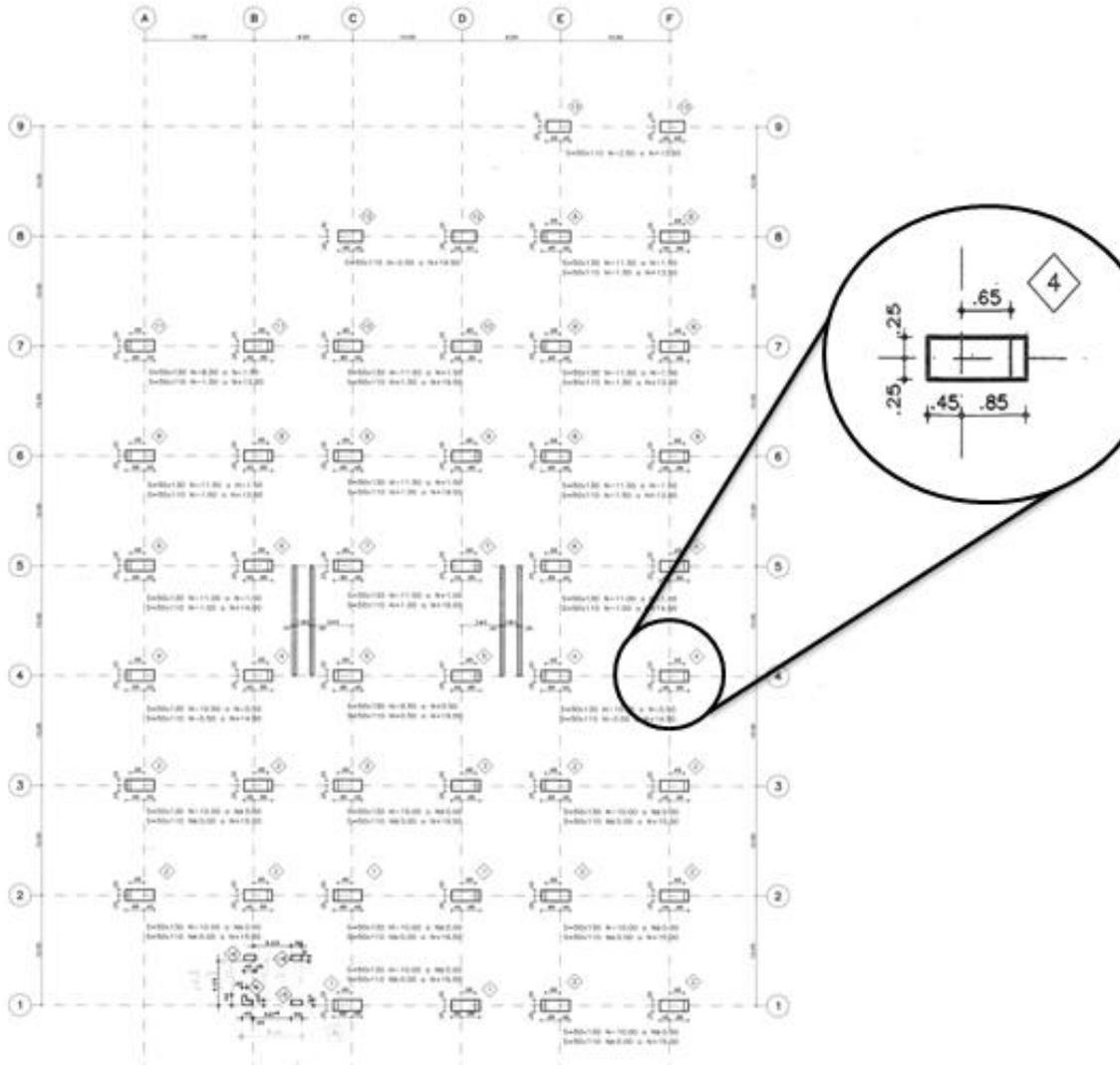


Figura 21. Ubicación y desarrollo de Columnas en el Ed. Don Guillermo Castro (115)

COLUMNAS

Numeración	Base (cm)	Espesor (cm)	Promedio a Base (cm)	Promedio Espesor (cm)	Factor Base	Factor Espesor
Medida 1	130.00	51.00	129.63	48.93	1.0028	1.0218
	129.30	46.00				
	129.60	49.80				
Medida 2	129.90	50.00	129.77	49.97	1.0018	1.0007
	129.80	49.90				
	129.60	50.00				
Medida 3	129.90	50.50	129.57	50.10	1.0033	0.9980
	129.80	49.80				
	129.00	50.00				

Tabla 2. Procedimiento para la obtención del valor "factor" del Ed. Don Guillermo Castro (115)

En la Figura 21 se pueden ver las dimensiones en planos de una columna ubicada en la zona centrorienta del edificio Don Guillermo Castro (115); en la



Estimación de la incertidumbre aleatoria de la deriva sísmica de un Pórtico de concreto reforzado considerando la variabilidad De la geometría y las propiedades del suelo

Tabla 2. se observan los cálculos realizados para la obtención del valor “factor” para cada medida, en donde:

- **Base y Espesor:** Son las tres medidas realizadas en el elemento estructural (Base, Medio y Parte Superior).
- **Promedio Espesor:** Es el promedio de las tres medidas tomadas anteriormente (Base y Espesor).
- **Factor Base y Factor Espesor:** Es el valor final obtenido con base a la Ecuación 13.

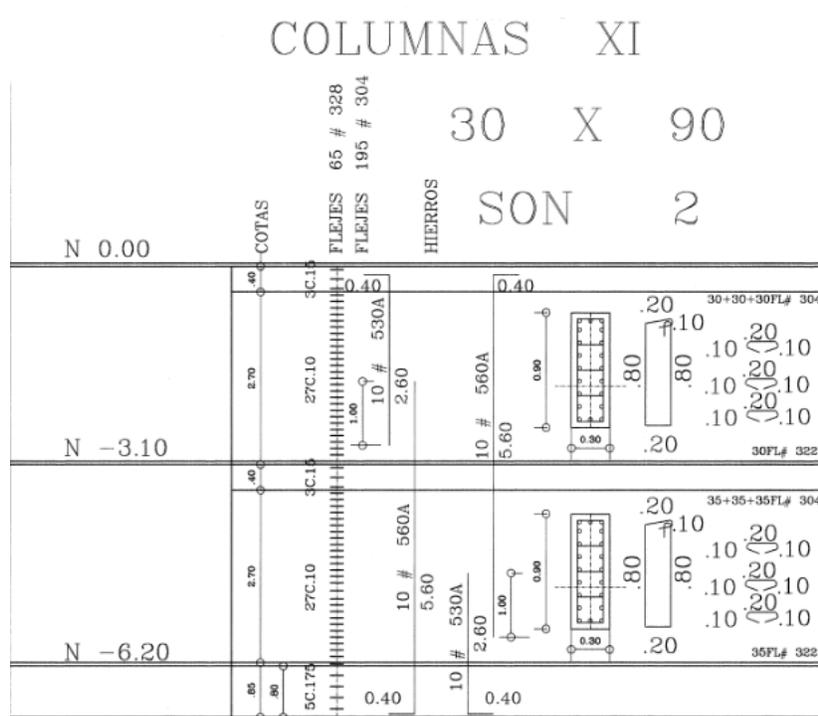


Figura 22. Despiece Columna XI Ed. Pedro Arrupe (94).

COLUMNAS						
Numeracion	Base (cm)	Espesor (cm)	Promedio a Base (cm)	Promedio Espesor (cm)	Factor Base	Factor Espesor
11	91.00	30.50				
	90.50	31.00	90.50	31.00	0.9945	0.9677
	90.00	31.50				

Tabla 3. Procedimiento para la obtención del valor "factor" del Ed. Pedro Arrupe (94)

En la Figura 22. se observan las dimensiones en planos de una columna ubicada en la zona central oriental del edificio Pedro Arrupe (94); en la Tabla 3. se



observan los cálculos realizados para la obtención del valor “factor” para cada medida, en donde:

- **Base y Espesor:** Son las tres medidas realizadas en el elemento estructural (Base, Medio y Parte Superior).
- **Promedio Espesor:** Es el promedio de las tres medidas tomadas anteriormente (Base y Espesor).
- **Factor Base y Factor Espesor:** Es el valor final obtenido con base a la Ecuación 13.

Con base a estas mediciones se realizó el ajuste a la mejor distribución de Probabilidad (Figura 23.) por medio del programa Risk Simulador, esto se realizó con respecto a los valores obtenidos con la Ecuación 13. (200 valores de “factor”). La descripción del software computacional se presenta a continuación:

El **simulador de riesgo (Risk Simulador)** es un software de simulación Monte Carlo (corre simulaciones paramétricas y no paramétricas de 42 distribuciones de probabilidad con diferentes perfiles de simulación), Pronóstico, Optimización bajo incertidumbre (corre las optimizaciones usando números enteros discretos y variables continuas.). Con este programa se pueden todos los posibles resultados ante una situación, indicando así, la probabilidad de que estos eventos ocurran.

Este programa es un complemento de Microsoft Excel, la modelación de un análisis con RISK parte de tres partes:

1. Definir la Incertidumbre
2. Seleccionar los objetivos
3. Simular



Estimación de la incertidumbre aleatoria de la deriva sísmica de un Pórtico de concreto reforzado considerando la variabilidad De la geometría y las propiedades del suelo

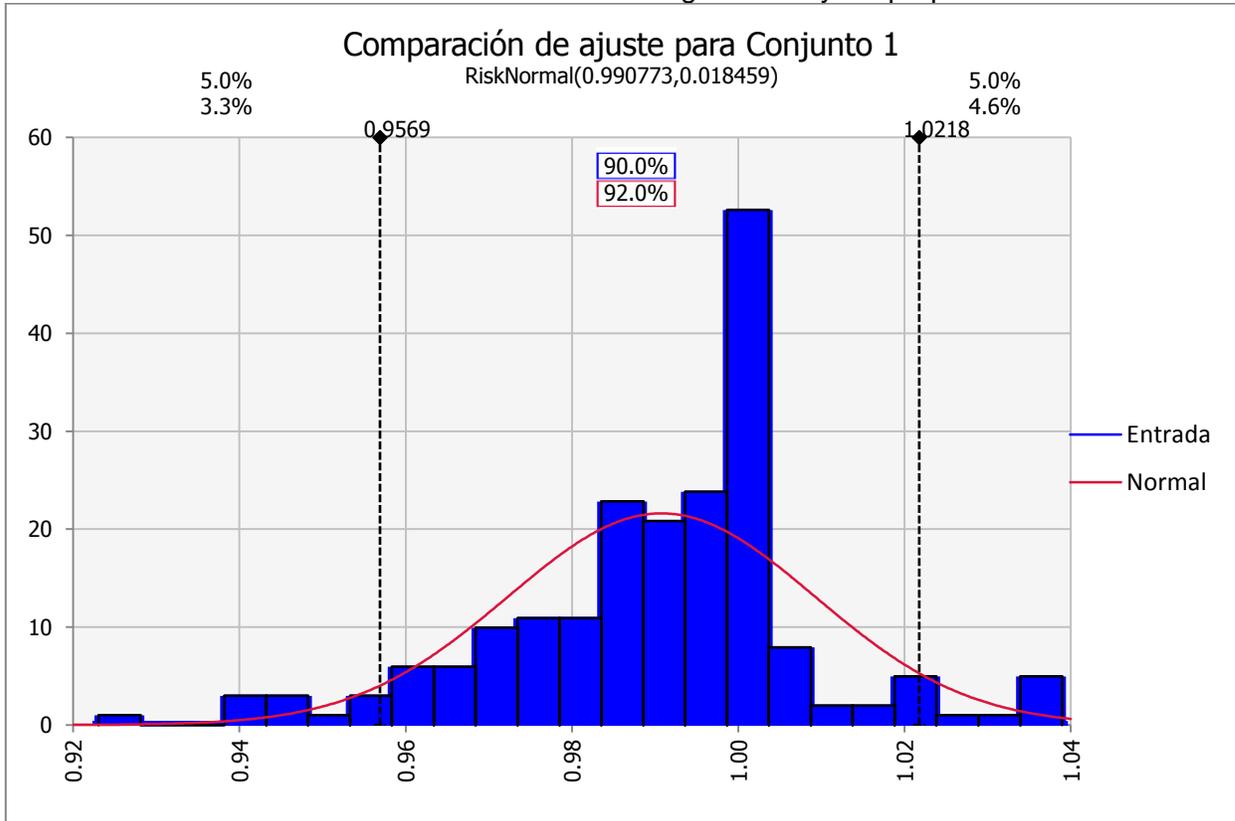


Figura 23. Distribución de Probabilidad para todos los datos obtenidos.

El ajuste por Kolmogorov-Smirnov fue una distribución normal obteniendo así:

- Media Estándar de 0.990773.
- Desviación Estándar de 0.018459.

De acuerdo con Canavos, 1986 el ajuste de bondad de Kolmogorov-Smirnov parte de un estadístico de contraste entre las dos siguientes hipótesis:

H_0 : Son los datos analizados que siguen una distribución X

H_1 : Son los datos analizados que no siguen una distribución X

El estadístico de contraste se presenta en la Ecuación 14.:

$$D = \sup_{1 \leq i \leq n} |\bar{F}_n(x_i) - F_o(x_i)|$$

Ecuación 14. Estadístico de Contraste



En donde:

x_i : Es el i -ésimo valor que se observa en la muestra (ordenado anteriormente de menor a mayor).

$\bar{F}_n(x_i)$: Es un estimador de la probabilidad (valores $\leq x_i$).

$F_0(x_i)$: Es la probabilidad de observar valores $\leq x_i$, cuando H_0 es correcta.

Por lo anterior, D es la mayor diferencia absoluta observada entre la frecuencia acumulada observada $\bar{F}_n(x_i)$ y la frecuencia acumulada teórica $F_0(x_i)$, obtenida a partir de la distribución de probabilidad que se especifica como hipótesis nula.

El valor de D es pequeño, cuando los valores observados $\bar{F}_n(x_i)$ son similares a los esperados $F_0(x_i)$, Cuanto mayor sea la discrepancia entre la distribución empírica $\bar{F}_n(x_i)$ y la distribución teórica, mayor será el valor de D . Por tanto, el criterio para la toma de la decisión entre las dos hipótesis será de la forma:

Si $D \leq D_\alpha$ entonces se acepta H_0

Si $D \geq D_\alpha$ entonces se rechaza H_0

Este método solo es válido para discrepancias continuas.

De acuerdo a estos parámetros estadísticos se obtuvieron cincuenta números de manera aleatoria. Igualmente se realizó el ajuste a la distribución de Probabilidad (Figura 24.) por medio del programa Risk Simulador:

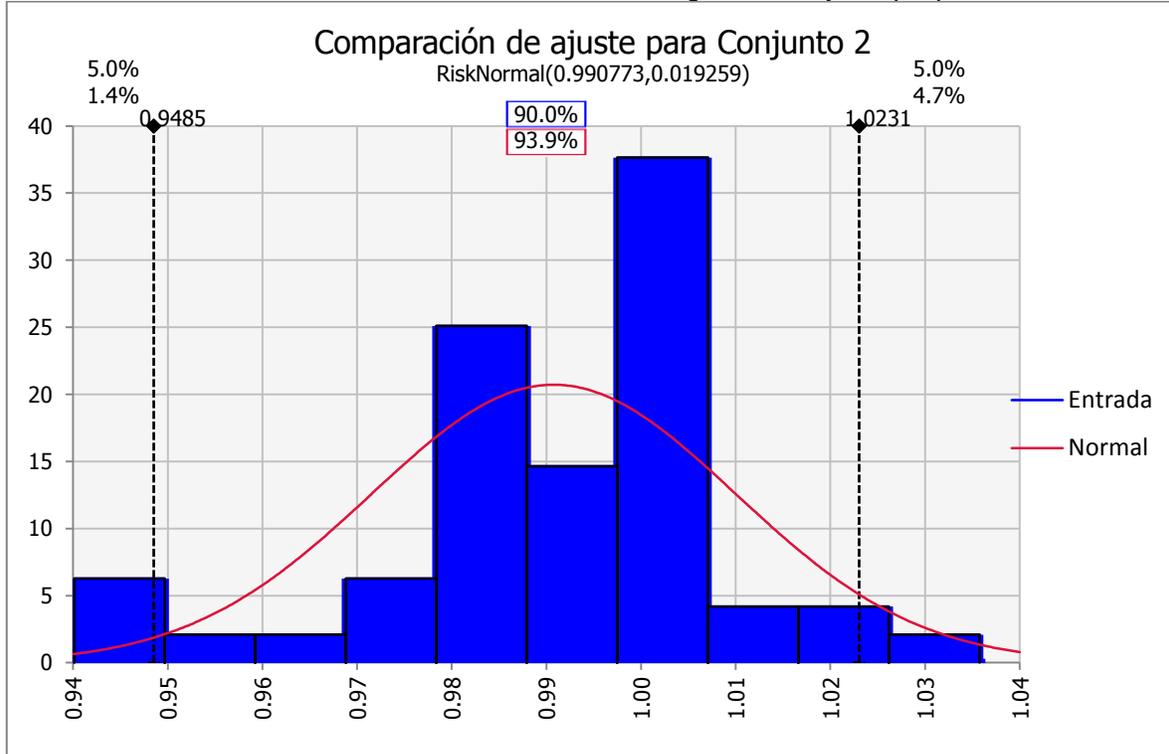


Figura 24. Distribución de Probabilidad de los datos para la modelación.

Obteniendo así:

- Media Estándar de 0.990773.
- Desviación Estándar de 0.019259.

Nota Aclaratoria: El valor “factor” modifica las dimensiones de los elementos estructurales del pórtico de concreto reforzado diseñado; al realizar esta modificación se varía a su vez la masa del pórtico, pero, esta variación no se tuvo en cuenta en el presente trabajo debido a que esta variación de los elementos estructurales es irrelevante con respecto a la masa total de pórtico de concreto evaluado.

4.2. Variación De Características Dinámico-Mecánicas del Suelo

La alcaldía Mayor de Bogotá, junto con otras entidades dividió la ciudad en diferentes zonas de respuesta para un diseño sismo resistente en edificaciones, esto debido a los múltiples suelos que se encuentran alrededor de toda la ciudad.

En este proyecto se evaluó un perfil de suelo (Figura 25.) en una única zona que pertenece a la ciudad de Bogotá (zona de suelos blandos), para esta zona se aplicaron características de un estrato de suelo de la que se conto con



información estratigráfica y se realizó una caracterización dinámico-mecánica por medio de ensayos dinámicos de laboratorio tales como Triaxial cíclico y Bender elements (Datos correspondientes a ensayos del Laboratorio de Pruebas y Ensayos de la Pontificia Universidad Javeriana), para la modelación, dichos estratos se simplifican como se observa en la Tabla 4.

Estrato	Espesor (m)	Características	Peso Unitario Húmedo (kg/m ³)	Módulo Cortante Máximo (G _{máx}) (Kpa)	Velocidad de Onda S (m/s)
1	15		1395.17	16906.68	417.67
2	15	Arcilla de alta compresibilidad café, blanda y humedad media.	1384.1	24451.37	502.72
3	15		1409.86	26390.38	518.11

Tabla 4. Características Estratigráficas del perfil seleccionado

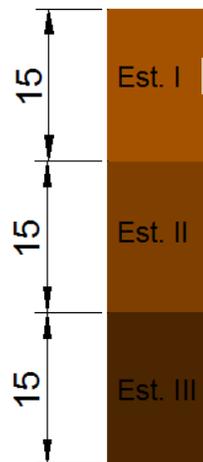


Figura 25. Perfil del suelo seleccionado

Nota: Los estratos del perfil del suelo son de una altura constante (15m) debido a la tipología estipulada en los ensayos de laboratorio.

A continuación se encuentran los resultados del ensayo de Bender elements para cada estrato de suelo seleccionado: (Tabla 5, 6 y 7)



Estimación de la incertidumbre aleatoria de la deriva sísmica de un
Pórtico de concreto reforzado considerando la variabilidad
De la geometría y las propiedades del suelo

Estrato 1

Secuencia de ciclos	Tiempo (10-5) (s)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Módulo de elasticidad (kPa)	Amortiguamiento (%)	Esfuerzo de confinamiento
1er ciclo	144.00	69.03	119.56	16619.42	6%	60.00
2do ciclo	144.00	69.03	119.56	16619.42	3%	60.00
3er ciclo	140.00	71.00	122.98	17582.67	3%	60.00
4to ciclo	139.00	71.51	123.86	17836.57	6%	60.00
5to ciclo	145.00	68.55	118.74	16390.98	2%	60.00
6to ciclo	145.00	68.55	118.74	16390.98	4%	60.00
Sumatoria	857.00	417.67	723.43	101440.05	22%	360.00
Promedio	142.83	69.61	120.57	16906.68	4%	60.00

Tabla 5. Resultados Ensayo Bender Elements para el estrato I

Estrato 2

Secuencia de ciclos	Tiempo (10-5) (s)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Módulo de elasticidad (kPa)	Amortiguamiento (%)	Esfuerzo de confinamiento
1er ciclo	102.00	97.84	169.47	33125.96	3%	83
2do ciclo	123.00	81.14	140.54	22780.26	1%	83
3er ciclo	132.00	75.61	130.95	19779.76	6%	83
4to ciclo	120.00	83.17	144.05	23933.51	2%	83
5to ciclo	120.00	83.17	144.05	23933.51	8%	83
6to ciclo	122.00	81.80	141.69	23155.23	4%	83
Sumatoria	719.00	502.72	870.74	146708.23	24%	498.00
Promedio	119.83	83.79	145.12	24451.37	4%	83.00

Tabla 6. Resultados Ensayo Bender Elements para el estrato II

Estrato 3

Secuencia de ciclos	Tiempo (10-5) (s)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Módulo de elasticidad (kPa)	Amortiguamiento (%)	Esfuerzo de confinamiento
1er ciclo	109.00	90.46	156.68	28841.38	0.07	144.00
2do ciclo	113.00	87.26	151.13	26835.65	0.06	144.00
3er ciclo	112.00	88.04	152.48	27317.00	0.09	144.00
4to ciclo	105.00	93.90	162.65	31080.67	0.04	144.00
5to ciclo	127.00	77.64	134.47	21245.24	0.05	144.00
6to ciclo	122.00	80.82	139.98	23022.33	0.04	144.00
Sumatoria	688.00	518.11	897.40	158342.28	0.36	864.00
Promedio	114.67	86.35	149.57	26390.38	0.06	144.00

Tabla 7. Resultados Ensayo Bender Elements para el estrato III

A continuación se muestran los resultados encontrado en el ensayo de Triaxial Cíclico (Figura 26 y 27) para el Estrato I.



Estrato I

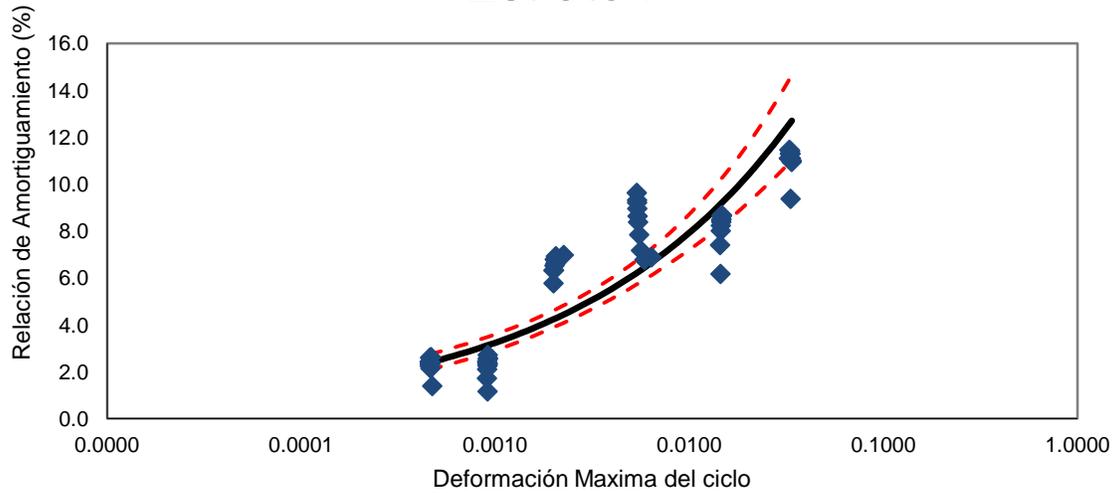


Figura 26. Amortiguamiento para el Estrato I

Estrato I

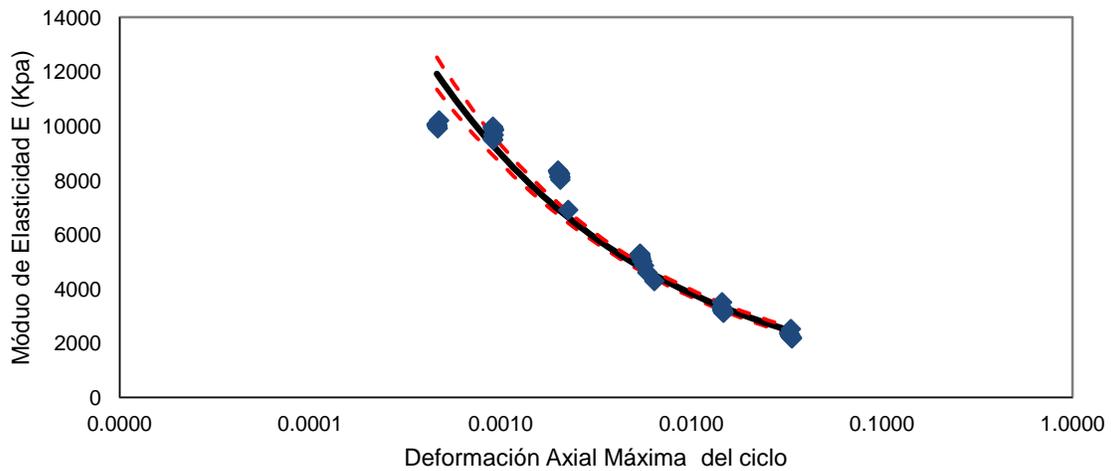


Figura 27. Módulo de Elasticidad para el Estrato I

A continuación se muestran los resultados encontrados en el ensayo de Triaxial Cíclico (Figura 28 y 29) para el Estrato II.



Estimación de la incertidumbre aleatoria de la deriva sísmica de un Pórtico de concreto reforzado considerando la variabilidad De la geometría y las propiedades del suelo

Estrato II

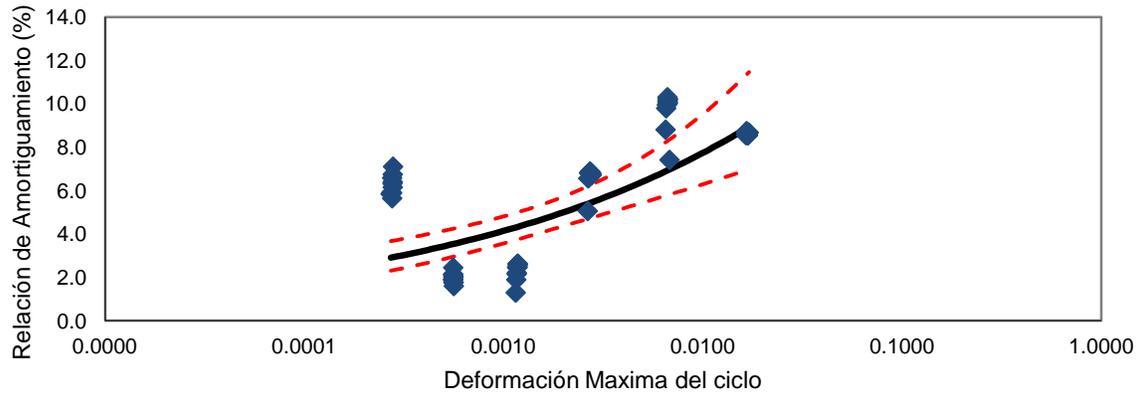


Figura 28. Amortiguamiento para el Estrato II

Estrato II

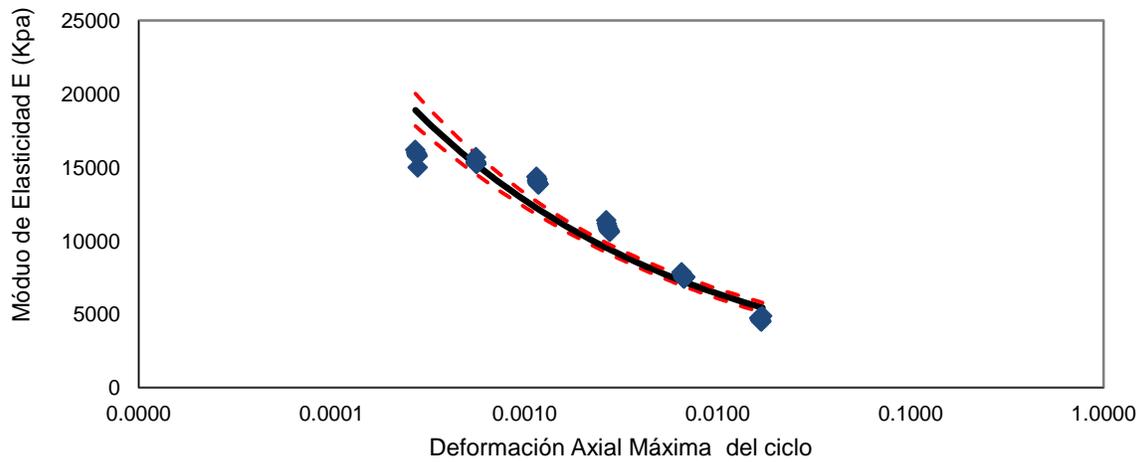


Figura 29. Módulo de Elasticidad para el estrato II

A continuación se muestran los resultados encontrados en el ensayo de Triaxial Cíclico (Figura 30 y 31) para el Estrato III.



Estrato III

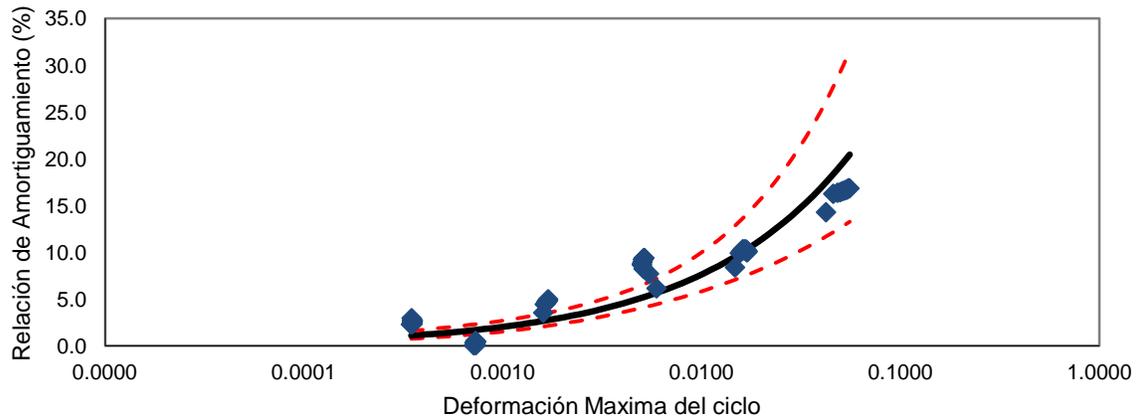


Figura 30. Amortiguamiento para el Estrato III

Estrato III

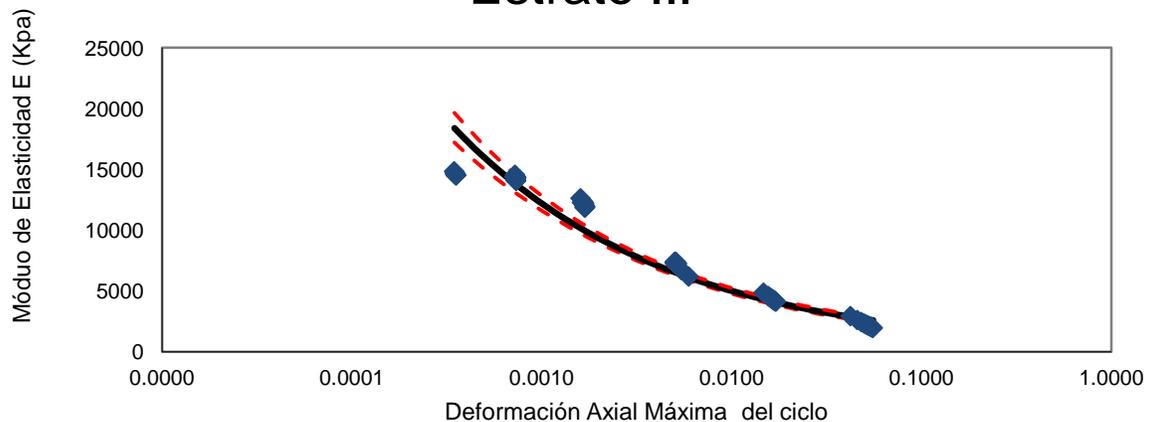


Figura 31. Módulo de Elasticidad para el estrato III

En cada una de las anteriores gráficas se pudo observar las líneas de intervalos de confianza del 99% que se reportan con cada ensayo de Triaxial Cíclico obtenido en el laboratorio.

Para cada uno de estos estratos se obtuvo la gráfica de G/G_0 vs γ .

Con estas características se generaron cincuenta y uno (51) posibles variaciones de esta curva de tendencia (Relación de la rigidez del suelo (G) con la deformación angular) que se encontraran dentro de estos dos intervalos de confianza (dados por el laboratorio) mostrados en la Figura 32, 33 y 34. Esto con el fin de buscar y evaluar la incertidumbre de la aleatoriedad intrínseca de las propiedades mecánicas-dinámicas para cada único perfil con base a los ensayos de laboratorio.



Estimación de la incertidumbre aleatoria de la deriva sísmica de un Pórtico de concreto reforzado considerando la variabilidad De la geometría y las propiedades del suelo

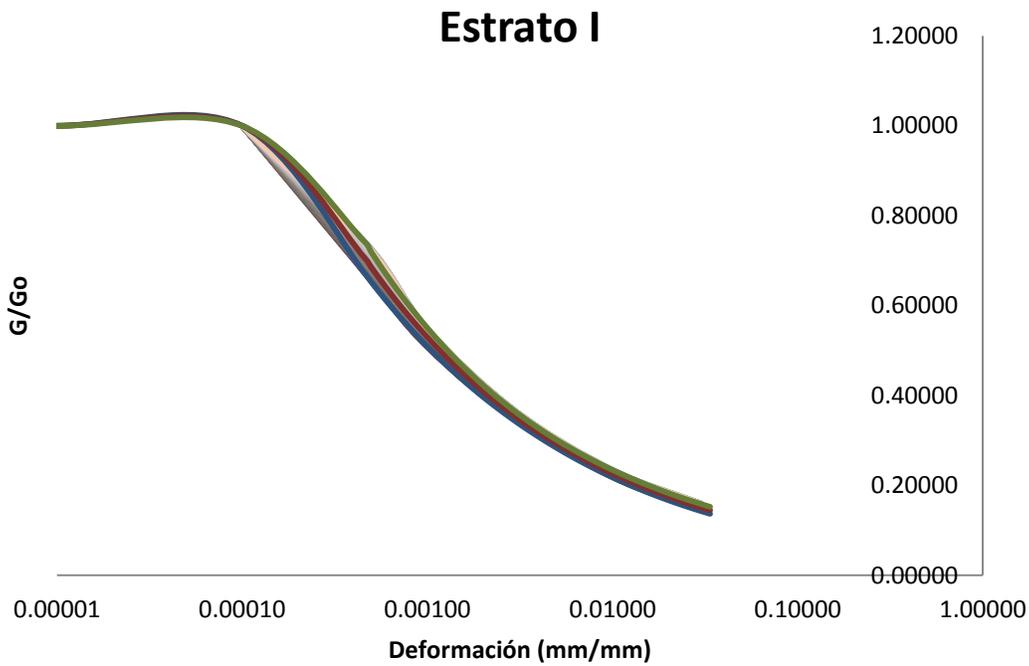


Figura 32. 50 curvas obtenidas para el estrato I

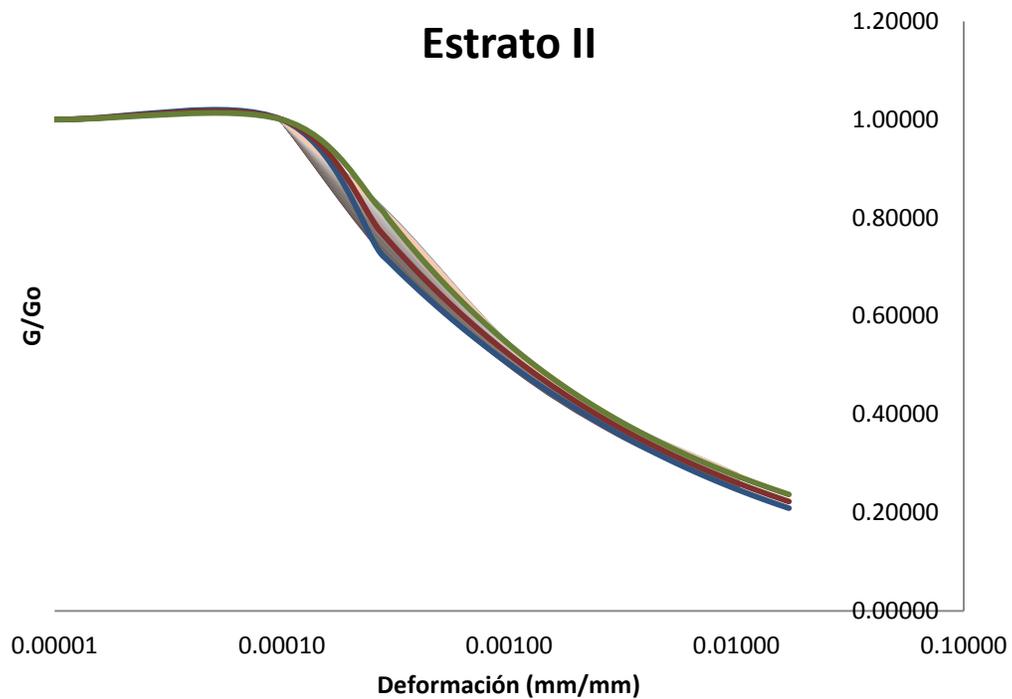


Figura 33. 50 curvas obtenidas para el estrato II

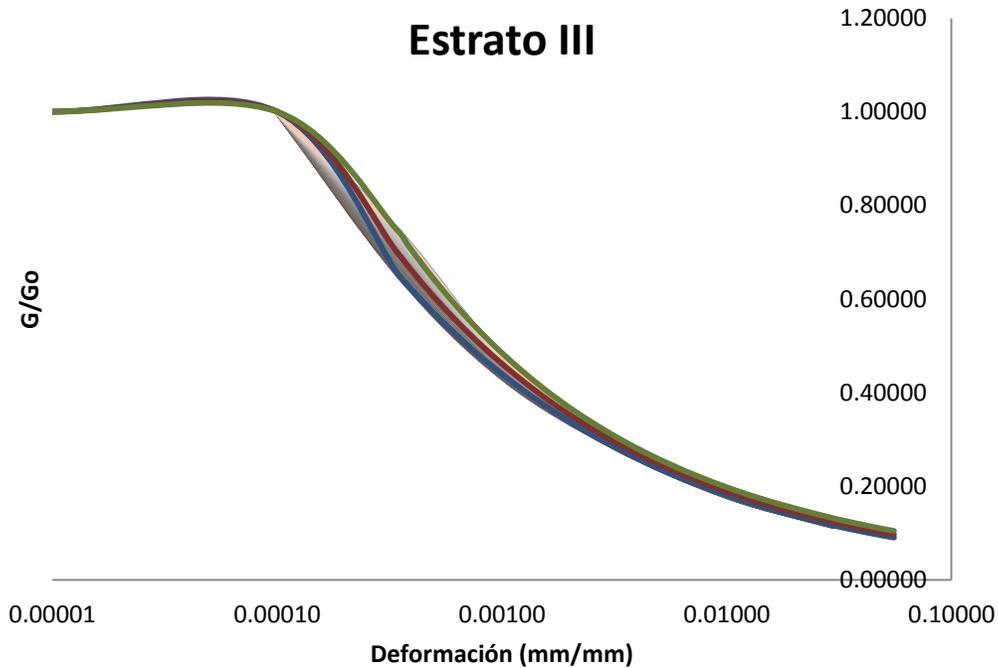


Figura 34. 50 curvas obtenidas para el estrato III

Cada una de estas curvas se vinculo a un modelo unidimensional del suelo en el programa EERA junto con las características de cada material. El objetivo principal de este programa es obtener la respuesta sísmica para un perfil de suelo dado, en este caso nuestro perfil corresponde a los estratos I-II-III como se muestra en la Figura 25. A continuación en la Figura 35. se muestra la forma de entrada para el programa EERA. La Figura 36. muestra el sismo de salida (en superficie) obtenido para cada una de las cincuenta y uno (51) variaciones de las características mecánicas de los estratos.



Estimación de la incertidumbre aleatoria de la deriva sísmica de un
Pórtico de concreto reforzado considerando la variabilidad
De la geometría y las propiedades del suelo

Fundamental period (s) = 0.38
Average shear wave velocity (m/sec) = 486.20
Total number of sublayers = 17

Layer Number	Soil Material Type	Number of sublayers in layer	Thickness of layer (m)	Maximum shear modulus G_{max} (MPa)	Initial critical damping ratio (%)	Total unit weight (kN/m^3)	Shear wave velocity (m/sec)	Location and type of earthquake input motion	Location of water table	Depth at middle of layer (m)	Vertical effective stress (kPa)
Surface	1	1	1.5	248.07		13.95	417.67			0.8	10.63
	2	1	1.5	248.07		13.95	417.67			2.3	31.89
	3	1	3.0	248.07		13.95	417.67			4.6	63.78
	4	1	3.0	248.07		13.95	417.67			7.6	106.30
	5	1	3.0	248.07		13.95	417.67			10.7	148.82
	6	1	3.0	356.55		13.84	502.72			13.7	191.17
	7	2	3.0	356.55		13.84	502.72			16.8	233.35
	8	2	3.0	356.55		13.84	502.72			19.8	275.54
	9	2	3.0	356.55		13.84	502.72			22.9	317.72
	10	2	3.0	356.55		13.84	502.72			25.9	359.91
	11	2	3.0	385.55		14.09	518.11			29.0	402.47
	12	3	3.0	385.55		14.09	518.11			32.0	445.42
	13	3	3.0	385.55		14.09	518.11			35.1	488.37
	14	3	3.0	385.55		14.09	518.11			38.1	531.31
	15	3	3.0	385.55		14.09	518.11			41.1	574.26
	16	3	3.0	385.55		14.09	518.11			44.2	617.20
Bedrock	17	0		385.55	1	14.09	518.11	Outcrop		45.7	638.68

Figura 35. Datos de Entrada de las características del perfil de suelo (EERA, 2000)

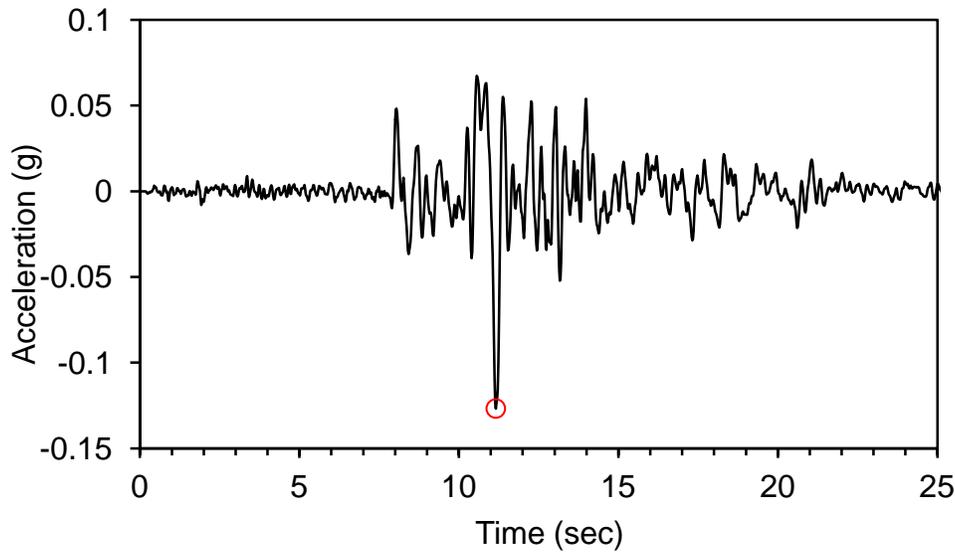


Figura 36. Señal sísmica obtenida con el programa EERA

Este procedimiento se realizó para obtener cincuenta y uno (51) señales en superficies; ingresando un sismo de entrada constante (Coyote Lake-Usa) y cincuenta y uno tipo de curvas G/G_0 . Cada una de estas señales sísmicas generadas con el programa EERA son las que se proceden a ingresar al programa SAP2000 para realizar en análisis no lineal para el pórtico modelado.



4.3. Sismo de Entrada

Los estudios realizados por la Microzonificación Sísmica de la ciudad de Bogotá muestran los siguientes sismos de referencia: Mammoth Lakes-Usa, Coyote Lake-Usa, Lytte Creek-Usa, Western Iran-Iran, Kyshu-Japon, Northridge Yorb-Usa, Northridge Deer-Usa, Honshu-Japon, Costa Peru-Peru, Tarapaca-Chile, Fiordiand-Nueva Zelanda y Michodean-Mexico.

De los anteriores Sismos se acordó elegir un sismo de origen cercano, es por esta razón que se “Coyote Lake-Usa” como sismo de entrada. Para este sismo de entrada se presenta a continuación en la Figura 37, 38 y 39 los espectros respectivos.

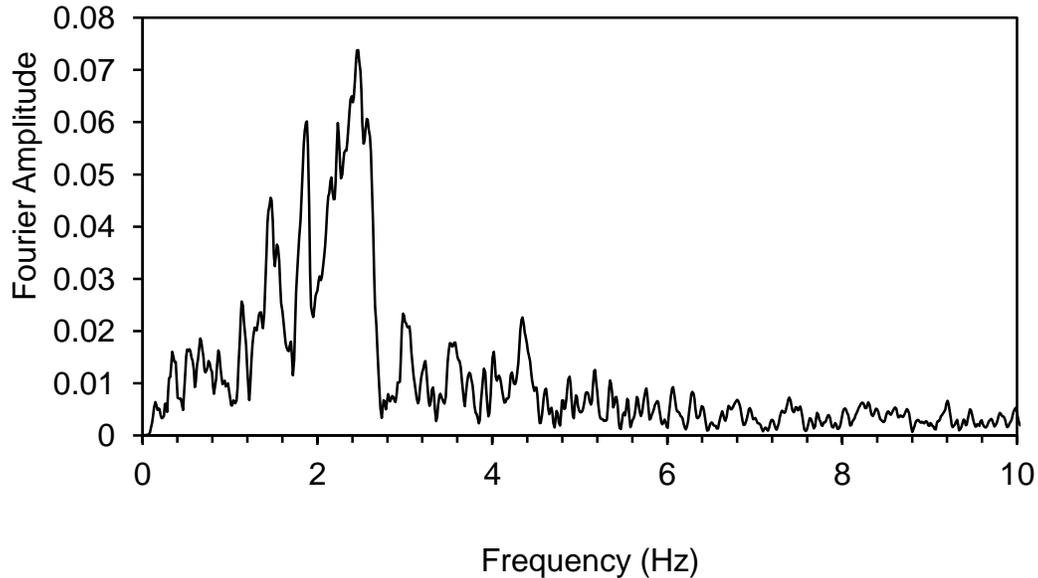


Figura 37. Espectro de Fourier (EERA, 1998)



Estimación de la incertidumbre aleatoria de la deriva sísmica de un Pórtico de concreto reforzado considerando la variabilidad De la geometría y las propiedades del suelo

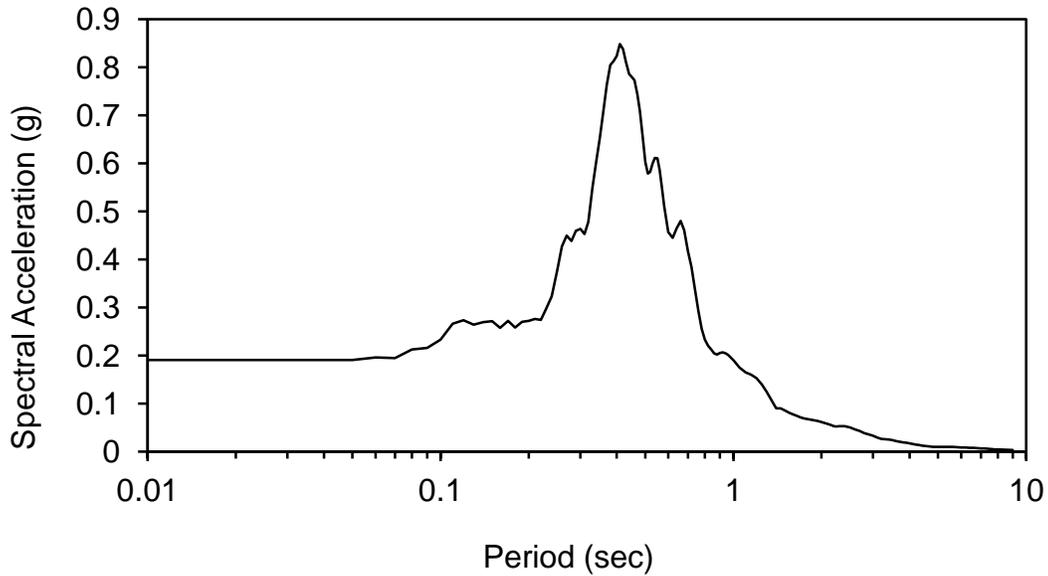


Figura 38. Espectro de Respuesta en Aceleración (EERA, 1998).

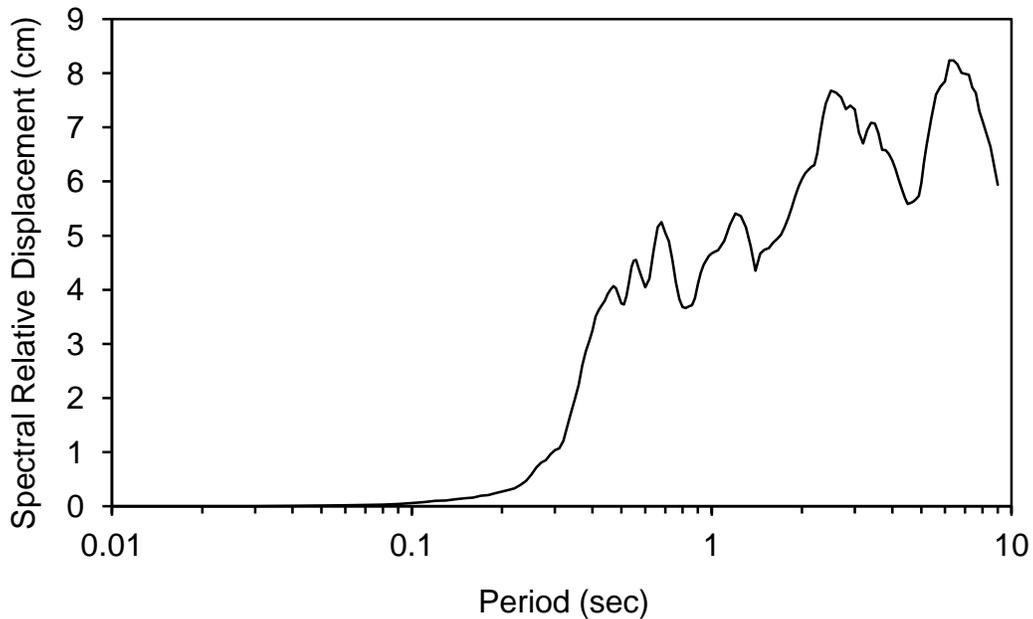


Figura 39. Espectro de Respuesta en Desplazamiento (EERA, 1998).

5. DISEÑO ESTRUCTURAL DE PÓRTICOS DE CONCRETO REFORZADO BAJO ESTUDIO

Se realiza un diseño de un pórtico de concreto reforzado para un edificio tridimensional con las siguientes características:



- Losas armadas en una sola dirección.
- Vigas de carga diseñadas en luces con mayor longitud entre apoyos. (pórtico carguero)

Este diseño está fundamentado en el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10 y la Microzonificación Sísmica de Bogotá. (Decreto 523 de 2010)

Se utiliza la planta típica adaptada de García (1996) como referencia en la Figura 40. La simulación se realizó sobre el pórtico central (pórtico con mayor carga) ubicado en el eje 3 para 5 pisos con luz entre apoyos de 9 m y con altura de entrepiso de 3m.

Se determinan y utilizan las características típicas para los materiales (Tabla 8.) usados en la ciudad de Santafé de Bogotá.

Características de los Materiales

Concreto		Acero	
γ	24 Kn/m ³	γ	79 Kn/m ³
F'_c	28 Mpa	F_y	420 Mpa
E	20637 Mpa	F_u	670 Mpa

Tabla 8. Características de los materiales.

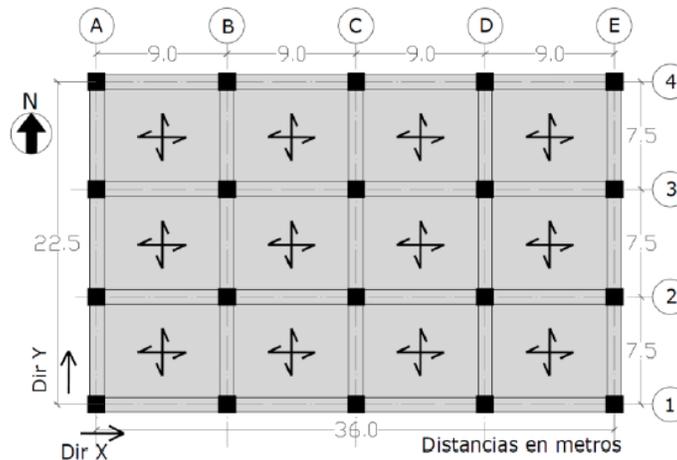


Figura 40. Planta Típica adaptada de García (1996)

Para determinar el módulo de elasticidad del concreto (Ecuación 15.) se aplica la ecuación 4.1 contemplada como una opción en el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10:

$$E = 3900 \sqrt{F'_c} = 3900 \sqrt{28} = 20636.86 \text{ Mpa.}$$

Ecuación 15. Módulo de Elasticidad.



5.1. Espectro de Diseño

La Unidad Para La Prevención De Emergencias Del Distrito (UPES), La Dirección Nacional De Prevención Y Atención De Desastres (DNPAD) e Ingeominas realizaron un estudio de la ciudad de Santafé de Bogotá (1994-1997) en donde se dividía dicha ciudad en diferentes zonas de respuesta sísmica (Figura 41.), esto debido a la gran diversidad de suelos que se pueden encontrar; adicional a lo anterior este estudio se decidió realizarlo debido al crecimiento de asentamiento urbano que trajo consecuencias en algunas construcciones. (DPAE 1997)

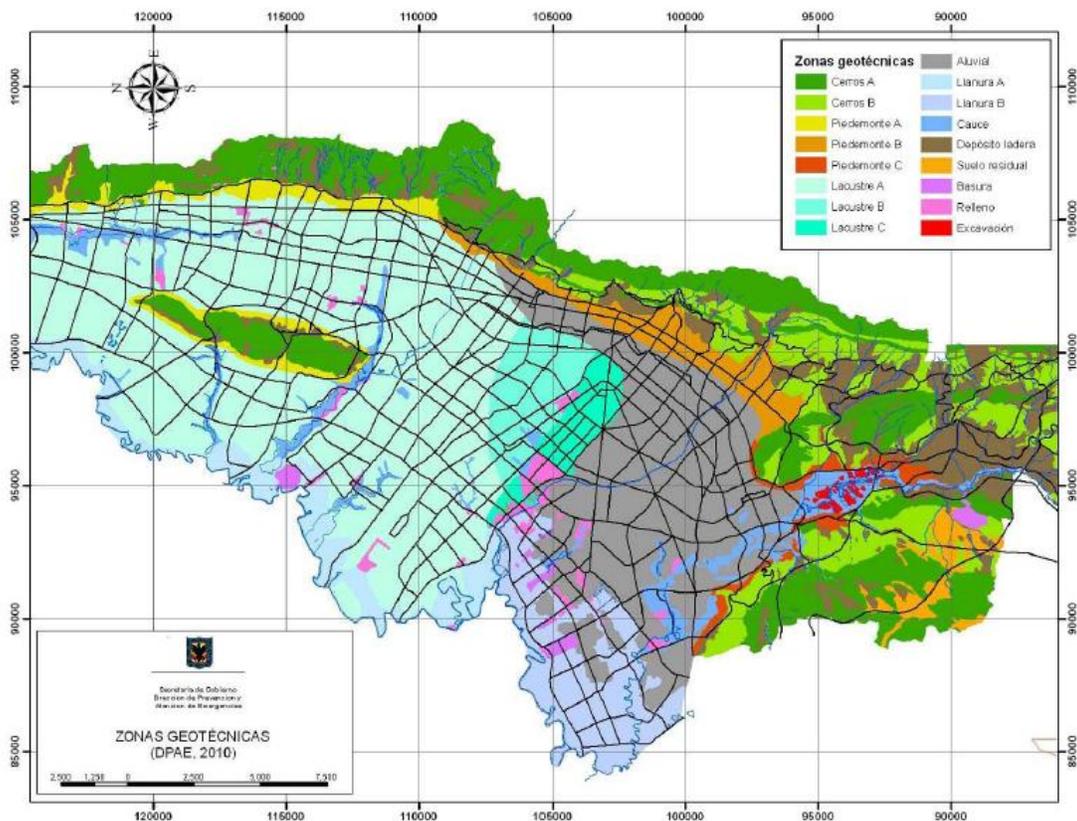


Figura 41. Mapa de zonificación de la ciudad de Bogotá. (DPAE, 2010)

Se decidió finalmente trabajar sobre el espectro de diseño ubicado en la zona “Piedemonte B” (Figura 42) contenido en la Microzonificación Sísmica de la ciudad de Santafé de Bogotá (decreto 523 de 2010). Las razones de escogencia de esta zona son las siguientes:

1. Sus buenas características y capacidades portantes (Tabla 9.) para una edificación en la ciudad de Santafé de Bogotá.



- Es un suelo con un espesor y periodo fundamental pequeño para que pueda afectar una edificación de período corto como la que se estudia en el presente documento. (Tabla 10.)

Se eligió una zona con las condiciones más estables, cabe aclarar que este espectro fue utilizado únicamente para el diseño del pórtico plano en concreto reforzado.

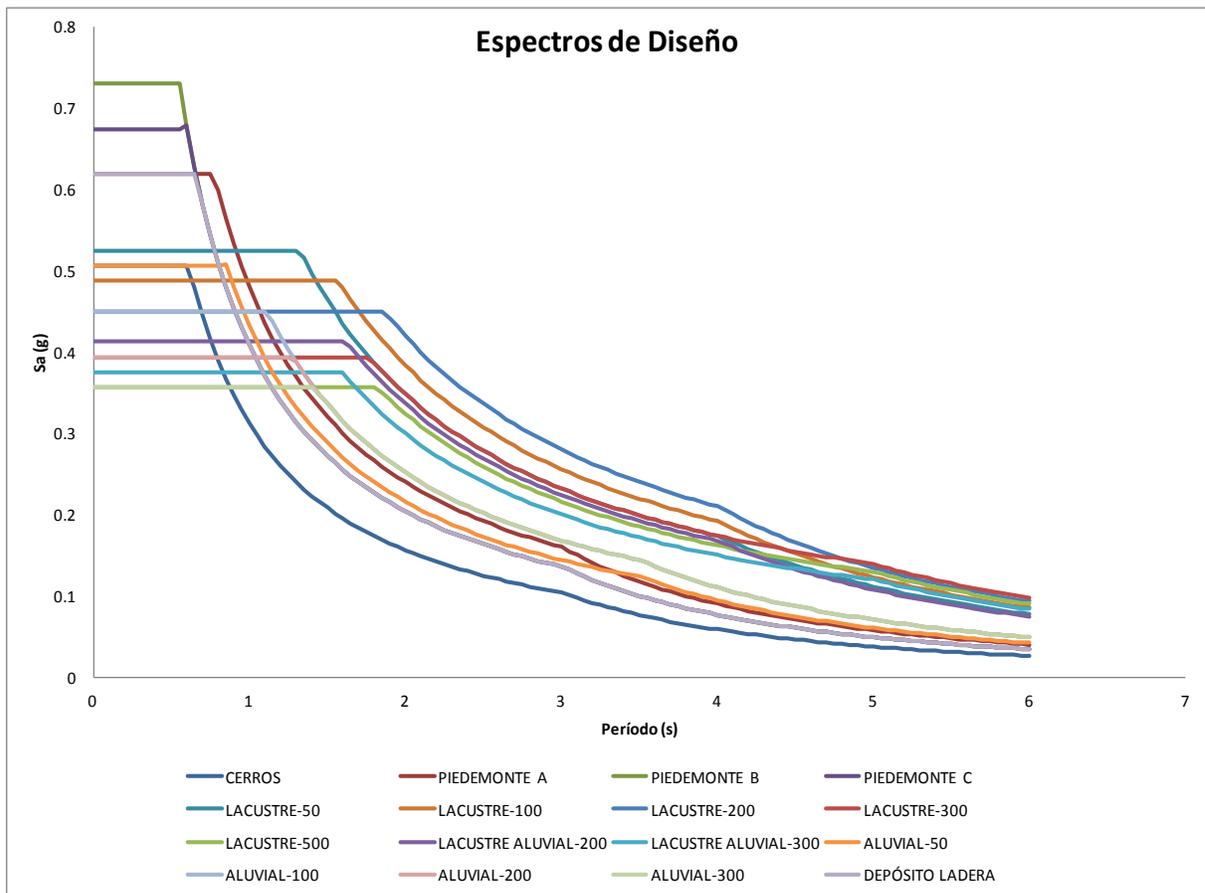


Figura 42. Espectros de Diseño para la ciudad de Santafé de Bogotá. (DPAE, 2010)

Nombre	Geotecnia	Geología	Composición	Comportamiento Geotécnico
Piedemonte B	Suelo coluvial y aluvial centro	Coluviones y Complejo de conos Aluviales	Gravas arena arcillosas compactas	Suelos de alta capacidad portante pero pueden presentar problemas de inestabilidad en excavaciones abiertas

Tabla 9. Características geológicas y geotécnicas del suelo en la zona Piedemonte B. (DPAE, 2010)



Estimación de la incertidumbre aleatoria de la deriva sísmica de un Pórtico de concreto reforzado considerando la variabilidad De la geometría y las propiedades del suelo

Nombre	Espesor	Período fundamental del suelo
<i>Piedemonte B</i>	<50m	0.3-0.4

Tabla 10. Características para una respuesta sísmica. (DPAE, 2010)

5.2. Avalúo de Carga

5.2.1. Carga Muerta

Se determino con fundamento en los parámetros establecidos en el capítulo B.3 del Código Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10, determinando el peso por metro lineal de acuerdo al peso de la estructura en un corte aferente, esto se realizo para cada pórtico.

En la Tabla 11 y la Figura 43. se puede observar las dimensiones del entrepiso, en las Tablas 12 y 13 la carga Muerta por piso y por pórtico con carga. Por otro lado se puede ver en la Figura 44. la aplicación de la carga Muerta para el pórtico en el programa SAP2000.

Dimensiones del Entrepiso

Ancho Vigueta	0.15 m
Altura Vigueta	0.34 m
Altura calculada	0.41 m
Altura	0.42 m
Losa Superior	0.05 m
Losa Inferior	0.03 m
Longitud	7.50 m

Tabla 11. Dimensiones del Entrepiso

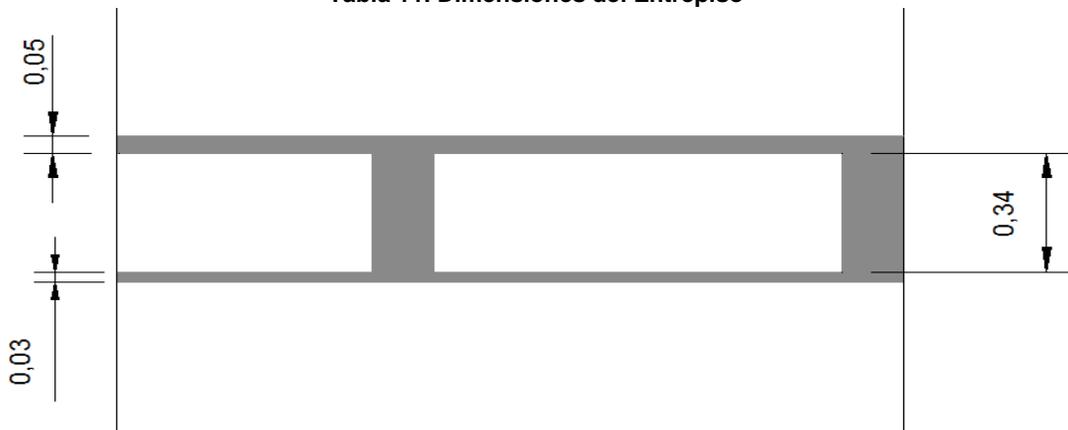


Figura 43. Corte Transversal del Entrepiso



Carga Muerta		
	Pisos 2-3-4	Cubierta
Casetón	0.20 Kn/m ²	0.20 Kn/m ²
Vigueta	1.22 Kn/m ²	1.22 Kn/m ²
Losa Sup.	1.20 Kn/m ²	1.20 Kn/m ²
Losa Inf.	0.72 Kn/m ²	0.50 Kn/m ²
Capa Bituminosa	-	0.22 Kn/m ²
Muros Divisorios	2.93 Kn/m ²	-
Afinado	1.50 Kn/m ²	-
CM TOTAL	7.78 Kn/m²	3.34 Kn/m²

Tabla 12. Carga Muerta

Porticos con Carga		
	Pisos 2-3-4	Cubierta
Vigas	58.32 Kn/m	25.08 Kn/m

Tabla 13. Carga Muerta para pórticos con carga

Nota: El proceso de cálculo de la carga muerta correspondiente a la Cubierta mostrado en la Tabla 12 y 13 se fundamenta sobre los mismos parámetros; usando las características de los materiales, con el peso aferente de cada pórtico de análisis. Se calcula de manera independiente debido a que los elementos no estructurales varían con respecto a los otros pisos de la edificación.

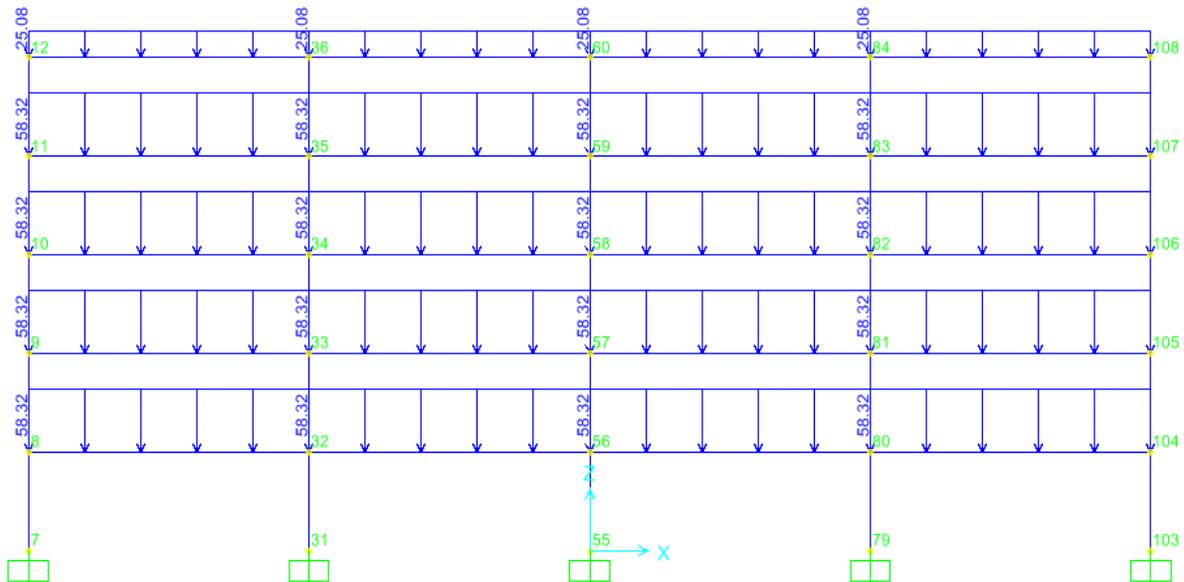


Figura 44. Distribución y aplicación de la carga muerta en el programa SAP2000.



5.2.2. Carga Viva

Se determino con fundamento en los parámetros establecidos en el capítulo B.4 del Código Colombiano De Sismoresistencia NSR-10, analizando la carga para pisos intermedios (Tabla 14) establecida por la norma para un uso residencial (1.8 kn/m^2), esta se aplica sobre cada pórtico analizado; en la Figura 45 se puede observar la aplicación de la Carga Viva en el programa SAP 2000 para el pórtico a analizar.

Carga Viva	
<i>Pisos Intermedios</i>	1.80 Kn/m ²
<i>Porticos con Carga</i>	13.50 Kn/m

Tabla 14. Carga Viva

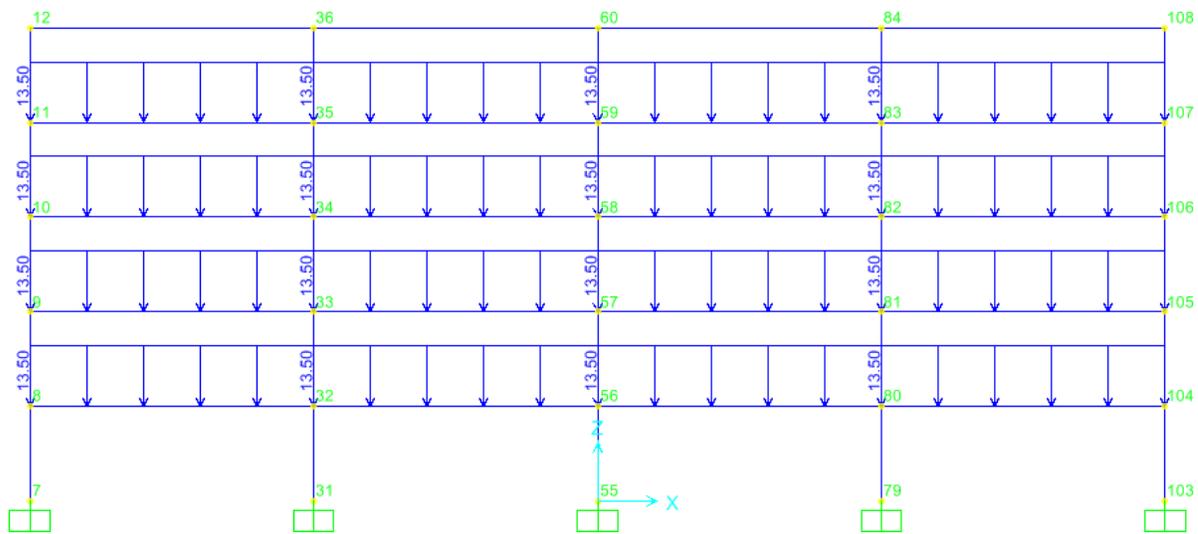


Figura 45. Distribución y aplicación de la carga viva en SAP2000

5.3. Metodología de Análisis

Se seleccionó como método de análisis de diseño para la estructura el “Análisis Dinámico elástico Espectral” establecido en el capítulo A.3.4 del Reglamento Colombiano De Sismo Resistencia NSR-10 con el fin de considerar los parámetros de rigidez y masa de la estructura al momento de evaluar la respuesta sísmica modal.



Se trabajó con el programa SAP2000, determinando con precisión las cargas influyentes en la masa (Carga Muerta, incluyendo el peso propio de la estructura) para su asignación mediante el comando Mass Source.

Para el análisis sísmico de la estructura se asignó el espectro de diseño anteriormente nombrado (Figura 42.) al programa mediante la función “Response Spectrum”, el programa utiliza para este análisis el método SRSS (Square Root Sum Square).

5.4. Dimensiones de Elementos Estructurales

De acuerdo al capítulo B del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10 se debe utilizar el método de resistencia en el cual se deben evaluar 7 combinaciones de carga que incluyen las siguientes cargas:

- Carga Muerta
- Carga Viva
- Carga De Viento
- Carga De Sismo
- Carga de Presión Lateral del Suelo
- Carga de Empozamiento de Agua
- Carga de Empozamiento de Granizo

El pre- dimensionamiento de las vigas y las columnas se modificaron hasta encontrar una deriva del 1% (máxima permisible); esto se realizo para cada una de las 7 combinaciones de carga como se muestra en la Figura 46.

$1.4(D+F)$	(B.2.4-1)
$1.2(D+F+T)+1.6(L+H)+0.5(L_r \text{ ó } G \text{ ó } L_e)$	(B.2.4-2)
$1.2D+1.6(L_r \text{ ó } G \text{ ó } L_e)+(L \text{ ó } 0.8W)$	(B.2.4-3)
$1.2D+1.6W+1.0L+0.5(L_r \text{ ó } G \text{ ó } L_e)$	(B.2.4-4)
$1.2D+1.0E+1.0L$	(B.2.4-5)
$0.9D+1.6W+1.6H$	(B.2.4-6)
$0.9D+1.0E+1.6H$	(B.2.4-7)

Figura 46. Combinaciones de Carga de diseño. (NSR, 2010)



Estimación de la incertidumbre aleatoria de la deriva sísmica de un Pórtico de concreto reforzado considerando la variabilidad De la geometría y las propiedades del suelo

Debido a que Bogotá se encuentra establecida en una zona de amenaza sísmica Intermedia se utilizó un factor de reducción de la capacidad de disipación de energía de 5, y así se garantizó una Disipación moderada de energía (DMO).

Con las dimensiones encontradas se efectúa la revisión de incidencia de la fuerza axial, fuerza cortante y momento para las diferentes combinaciones de carga. Las combinaciones de carga que gobiernan estas fuerzas sobre cada elemento estructural (vigas-columnas) se presentan en la Tabla 15. (Para vigas) y en la Tabla 16. (Para columnas):

**Combinación de Carga
B.2.4-2 para Vigas**

Carga Muerta	20%
Carga Viva	20%

Tabla 15. Combinación de Carga B.2.4-2

**Combinación de Carga
B.2.4-5 para Columnas**

Carga Muerta	20%
--------------	-----

Tabla 16. Combinación de Carga B.2.4-5

Al finalizar todo el pre-dimensionamiento nombrado anteriormente se obtiene las dimensiones finales de los elementos estructurales (Tabla 17.) para el pórtico de concreto reforzado a evaluar, en las Figuras 47 y 48 se puede observar la aplicación de estas dimensiones en el pórtico modelado en el programa SAP2000.

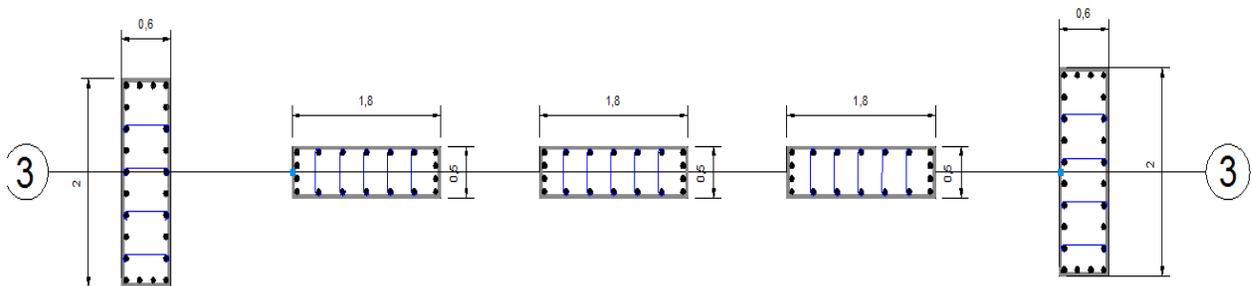


Figura 47. Plano en Planta de la ubicación de las columnas.



Dimension Elemento Estructurales

	<i>Eje x</i>	<i>Eje y</i>	<i>Eje z</i>
<i>Columna Esquinera</i>	0.6 m	0.2 m	-
<i>Columna Central</i>	1.8 m	0.5 m	-
<i>Viga piso 1-2-3-4</i>	-	0.5 m	0.7 m
<i>Viga piso 5</i>	-	0.5 m	0.7 m

Tabla 17. Dimensiones de los elementos Estructurales del pórtico

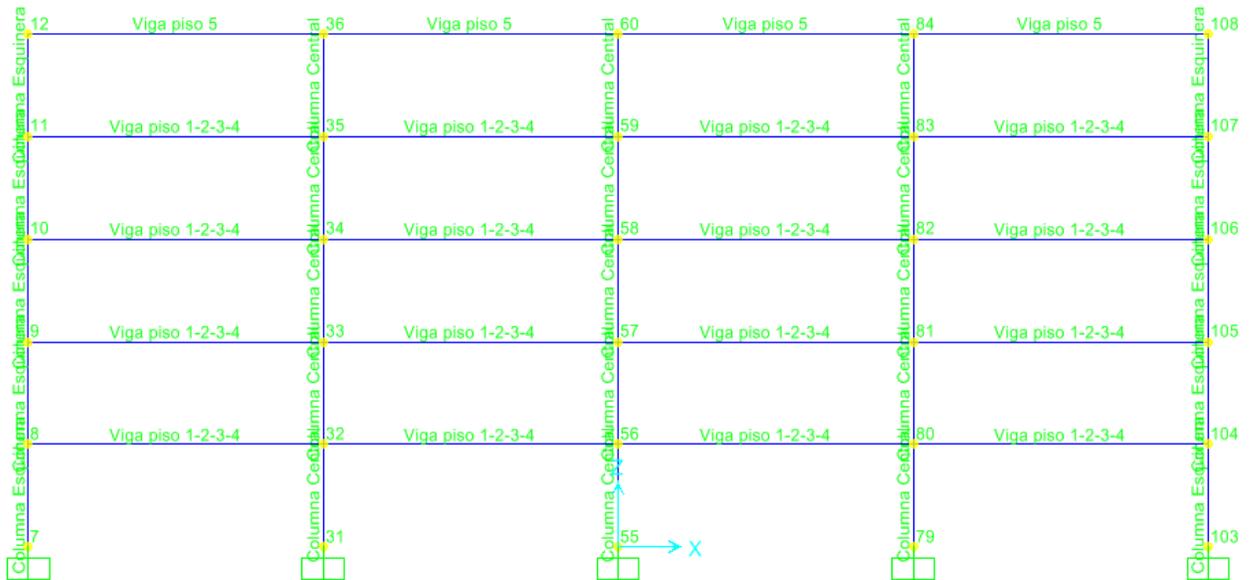


Figura 48. Ubicación de los elementos estructurales en SAP2000

5.5. Diseño de Acero de Refuerzo

Las vigas y columnas presentan su zona crítica en la zona de nudos (Presencia de roturas plásticas y mayores solicitaciones sísmicas) generando elementos necesarios en el análisis inelástico. Los diseños son generados como consecuencia a la distribución de los esfuerzos aferentes a la zona.

A continuación en la Tabla 18. se muestra la cantidad de Refuerzo usado para cada elemento estructural, y en las Figuras 49, 50, 51 y 52 se observa la distribución de este refuerzo; para cada elemento se utilizo un recubrimiento de 0.03 m.



Estimación de la incertidumbre aleatoria de la deriva sísmica de un Pórtico de concreto reforzado considerando la variabilidad De la geometría y las propiedades del suelo

Refuerzo Elementos Estructurales

<i>Columna Esquinera</i>	24 No. 8
<i>Columna Central</i>	18 No. 8
<i>Viga piso 1-2-3-4</i>	9 No. 8
<i>Viga piso 5</i>	6 No. 7

Tabla 18. Acero de Refuerzo en los elementos estructurales

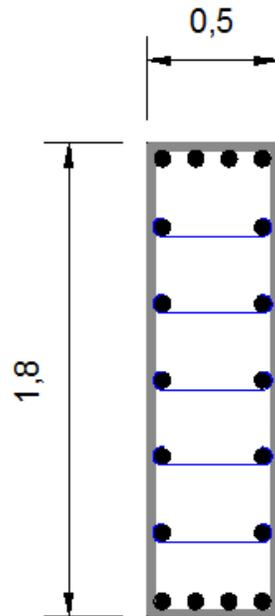


Figura 49. Refuerzo Estructural Columna Central

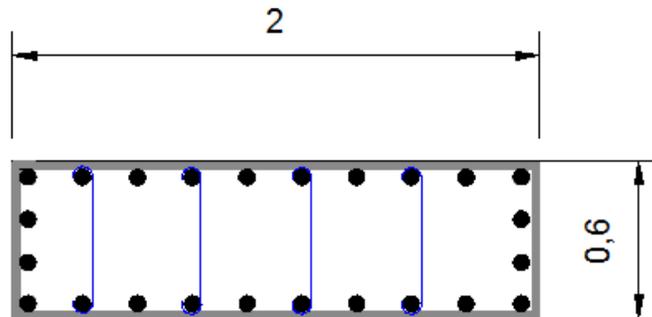


Figura 50. Distribución de Refuerzo Estructural Columna Esquinera

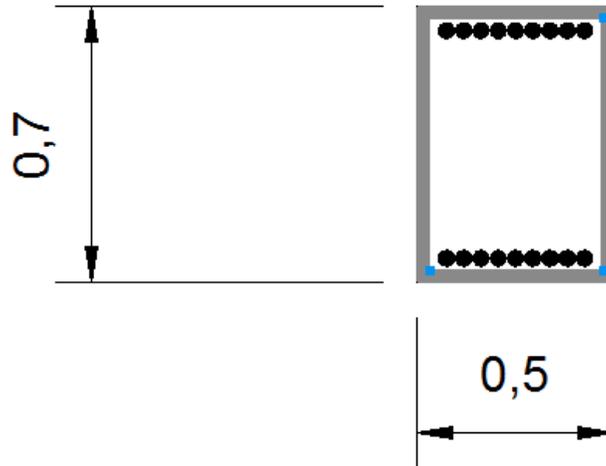


Figura 51. Distribución de Refuerzo Viga pisos 1-2-3-4

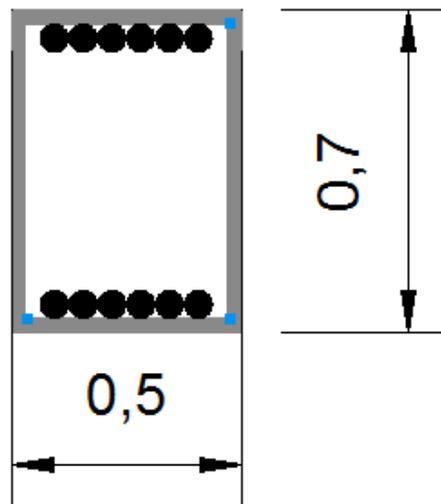


Figura 52. Distribución de Refuerzo Viga piso 5

El diseño bajo el análisis inelástico permite realizarlo en sentido longitudinal y sentido transversal a las zonas críticas en los nudos de la estructura donde se presentan los mayores esfuerzos. En las zonas diferentes a nudos no se hizo relación alguna para el cálculo de ubicación y espaciamiento de los flejes.

El diseño por cortante está claramente controlado por los parámetros de los elementos constructivos (materiales, luces pórtico, dimensión elementos), razón por la cual permite ser absorbido en su efecto por el concreto.



6. CREACIÓN INTERFACE SAP2000-MICROSOFT EXCEL

Con el fin de obtener las derivas elásticas e inelásticas de manera eficiente y rápida se crean tres interfaces de manera independientes entre los programas SAP2000 y Microsoft Excel; esto se logra por medio del lenguaje que viene incorporado en Microsoft Excel nombrado como Visual Basic, que por medio de comandos programados se pueden dirigir, formular, graficas y manejar programas externos a Microsoft Excel.

Se dividió las Interfaces de dos maneras: Análisis Lineal y Análisis no Lineal, pero, dentro de cada una de estas interfaces se creó otro código (igual en los dos) que realiza la obtención de las derivas máximas para cada piso y para cada tipo de Geometría.

En cada Interface se debe ingresar los datos de entrada que se muestran en la Tabla 19.

Datos de Entrada
para cada Interface
Factores
sismo
Ruta
Ruta del Modelo
Ruta de Guardar
de Sismos

Tabla 19. Datos de Entrada para cada Interface

Donde:

Factores: El Número de factores de geometría que se desea analizar para cada sismo, el valor máximo a ingresa es la totalidad de las geometrías (cincuenta (50)).

Sismo: El sismo de inicio del análisis.

Ruta: La ruta en donde se encuentran guardados los sismos en formatos prn.

Ruta del modelo: La ruta en donde se encuentra guardado el modelo.

Ruta a Guardar: La ruta en donde deseamos que se guarde cada archivo analizado, este se guarda automáticamente con el nombre "sismo" seguido por el número del sismo analizado en el proceso realizado.



#sismos: Es el número de sismos que deseamos analizar, el valor máximo a ingresar es la totalidad de sismos (cincuenta y uno (51)).

6.1. Análisis Lineal

La interface creada para el análisis Lineal lo que hace básicamente es lo siguiente:

1. Abrir El programa Sap2000.
2. Multiplicar cada dimensión de los elementos por el factor hallado en la sección 4.1.
3. Incorporar el Sismo por medio de la función “Time History” a partir del sismo en formato .prn que se obtuvo como se explicó anteriormente (Sección 4.2.).
4. Agregar el caso de análisis Lineal y Model (Time history).
5. Configurar el Damping (5%).
6. Configura el caso de Carga del modelo.
7. Configuras las cargas a evaluar.
8. Corre el modelo.
9. Extrae y exporta a Microsoft Excel los desplazamientos máximos en los nodos de la sección (Columna esquinera) para cada piso.

6.2. Análisis No Lineal

La interface creada para el análisis no Lineal lo que hace básicamente es lo siguiente:

1. Abrir El programa Sap2000.
2. Multiplicar cada dimensión de los elementos por el factor hallado en la sección 4.1.
3. Incorporar el Sismo por medio de la función “Time History” a partir del sismo en formato .prn que se obtuvo como se explicó anteriormente (Sección 4.2.).
4. Agregar el caso de análisis NonLinear y Direct Inegration Time History Analysis.
5. Ingresar el Damping (5%).
6. Configura el caso de Carga del modelo.
7. Configuras las cargas a evaluar.
8. Corre el modelo.



Estimación de la incertidumbre aleatoria de la deriva sísmica de un Pórtico de concreto reforzado considerando la variabilidad De la geometría y las propiedades del suelo

9. Extrae y exporta a Microsoft Excel los desplazamientos máximos en los nodos de la sección (Columna esquinera) para cada piso.

6.2.1. Derivas Máximas

El código colombiano de sismo resistencia NSR-10 define la deriva máxima permitida como se muestra en la Ecuación 16:

$$\Delta = \frac{\delta_i - \delta_{i-1}}{h_{piso\ i}}$$

Ecuación 16. Obtención de Deriva Máxima

Donde:

δ_i = Desplazamiento en el piso i.

δ_{i-1} = Desplazamiento en el piso i-1.

$h_{piso\ i}$ = altura del entrepiso entre el piso i y piso i-1.

Nota: Los desplazamientos para la obtención de las derivas tomados en cuenta son los generados por cada paso del tiempo (Δt) y no los máximos.

Con los desplazamientos obtenidos en la sección 4.3.1. y 4.3.2. la interface creada realiza el procedimiento de obtención de derivas por medio de la Ecuación 16. y de todos estos valores obtiene el valor Máximo de deriva para cada piso, para cada pórtico.

7. RECURSOS COMPUTACIONALES

7.1. Análisis Lineal

Para el análisis lineal se realizaron 2550 modelaciones. Resultado de lo siguiente:

50 variaciones de geometría “factor” x 51 Respuestas en superficie (obtenidas por el programa EERA).



Análisis Lineal	
<i>Una modelación</i>	2 min
<i>Analisis por sismo</i>	
<i>(50 valores de "factor" x 1 respuesta en sup.)</i>	100 min
<i>2550 modelaciones</i>	
<i>(50 valores de "factor" * 51 respuestas en sup.)</i>	5100 min
	85 horas
	7.08 días

Tabla 20. Tiempo en Analizar el programa SAP2000 la totalidad de modelaciones para el Análisis Lineal.

En la Tabla 20 se muestra el tiempo que se demoro el programa SAP 2000 para correr y analizar todas las modelaciones del análisis Lineal. Obteniendo así un tiempo en computador de 7.08 días (con días de 12 horas).

7.2. Análisis no Lineal

Para el análisis No lineal se realizaron 2550 modelaciones. Resultado de lo siguiente:

50 variaciones de geometría “factor” x 51 Respuestas en superficie (obtenidas por el programa EERA).

Análisis No Lineal	
<i>Una modelación</i>	12 min
<i>Analisis por sismo</i>	
<i>(50 valores de "factor" x 1 respuesta en sup.)</i>	600 min
<i>2550 modelaciones</i>	
<i>(50 valores de "factor" * 51 respuestas en sup.)</i>	30600 min
	510 horas
	42.50 días

Tabla 21. Tiempo en Analizar el programa SAP2000 la totalidad de modelaciones para el Análisis No Lineal.



Estimación de la incertidumbre aleatoria de la deriva sísmica de un Pórtico de concreto reforzado considerando la variabilidad De la geometría y las propiedades del suelo

En la Tabla 21 se muestra el tiempo que se demoro el programa SAP 2000 para correr y analizar todas las modelaciones del análisis No Lineal. Obteniendo así un tiempo en computador de 42.50 días (con días de 12 horas).

8. RESULTADOS

8.1. Análisis Lineal

En la Figura 53 se presenta la distribución de Probabilidad que mejor se ajusta a los resultados de deriva elástica para 2550 datos; esta distribución es de la forma LogLogistica; adicional a esto en la Tabla 22. se puede ver el análisis estadístico para esta distribución de Probabilidad, esto se realizo para el análisis Lineal de la modelación.

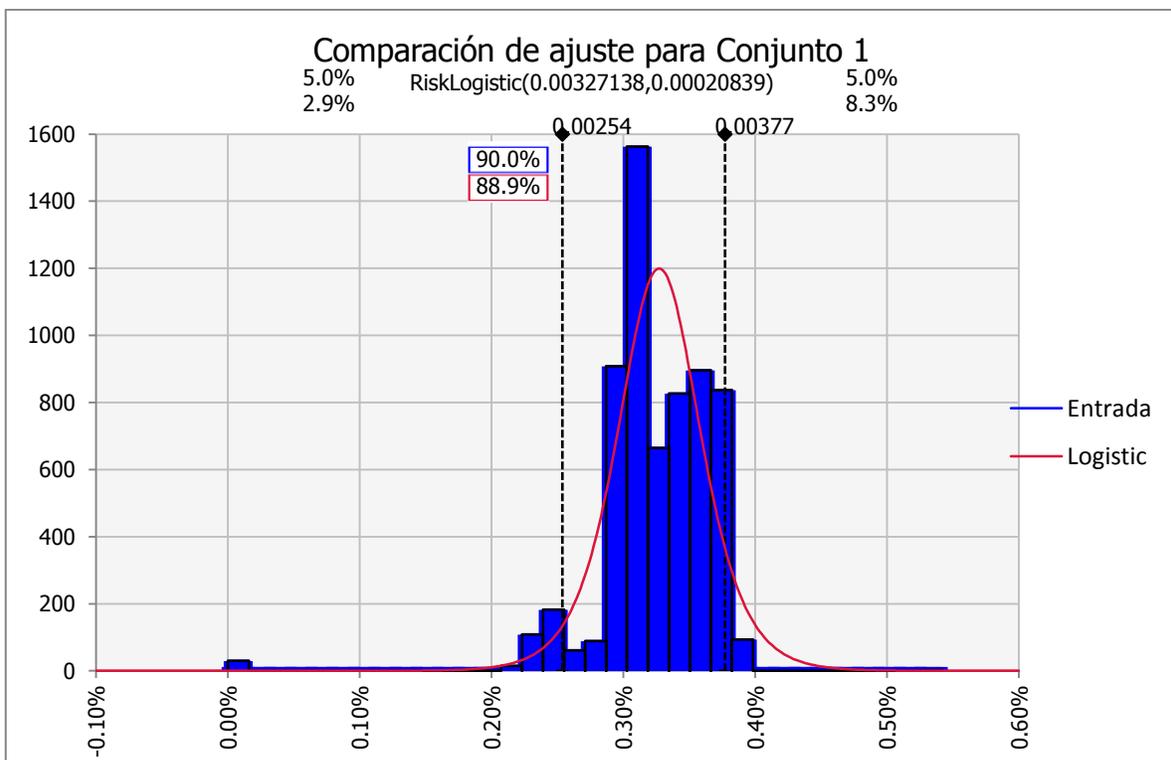


Figura 53. Distribución de Probabilidad Análisis Lineal



Análisis Lineal

<i>Media</i>	0.3271%
<i>Mediana</i>	0.3214%
<i>Moda</i>	0.3052%
<i>Desviación Estandar</i>	0.0208%
<i>Varianza</i>	4.34E-08%
<i>Mínimo</i>	0.2211%
<i>Máximo</i>	0.5418%
Cantidad de Datos	2550

Tabla 22. Resultados Estadísticos Análisis Lineal

8.2. Análisis No Lineal

En la Figura 54. se presenta la distribución de Probabilidad que mejor se ajusta a los resultados de deriva inelástica para 2550 datos, esta distribución es de la forma LogLogística; adicional a esto en la Tabla 23. se puede ver el análisis estadístico para esta distribución de Probabilidad, esto se realizo para el análisis No Lineal de la modelación.

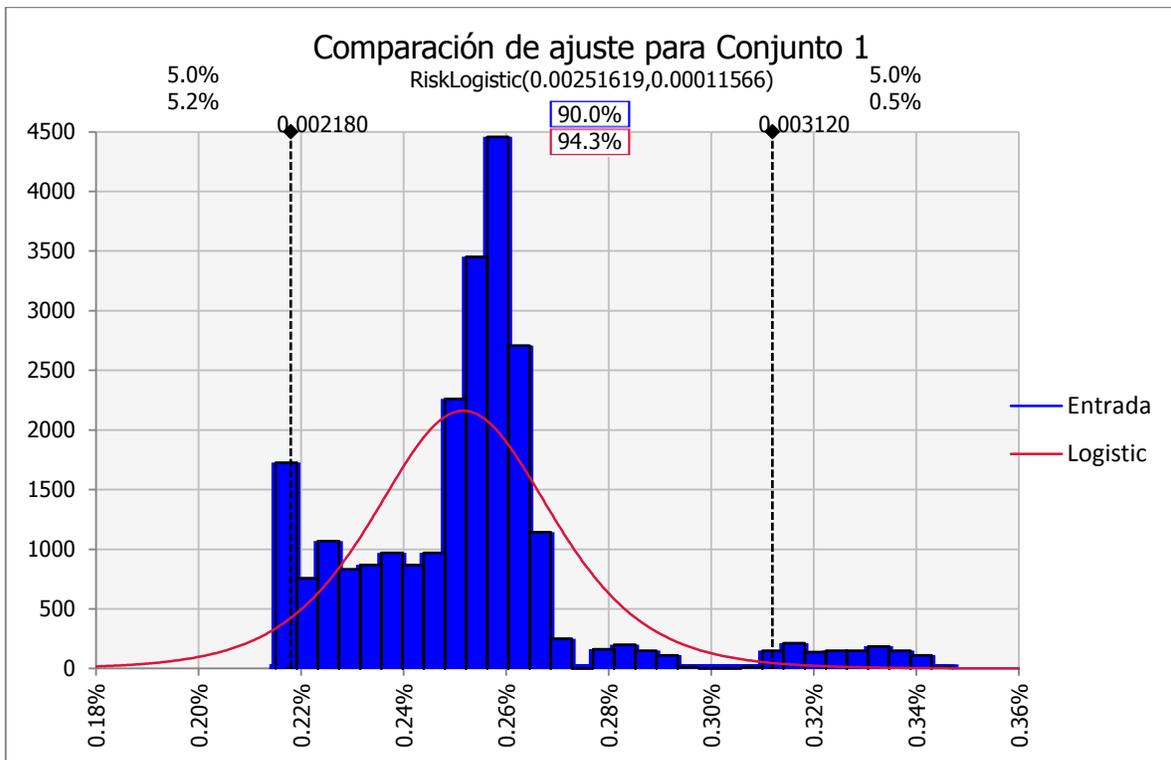


Figura 54. Distribución de Probabilidad Análisis No Lineal



Estimación de la incertidumbre aleatoria de la deriva sísmica de un Pórtico de concreto reforzado considerando la variabilidad De la geometría y las propiedades del suelo

Análisis No Lineal	
<i>Media</i>	0.2516%
<i>Mediana</i>	0.2547%
<i>Moda</i>	0.2594%
<i>Desviación Estandar</i>	0.0117%
<i>Varianza</i>	1.36E-08%
<i>Mínimo</i>	0.2150%
<i>Máximo</i>	0.3471%
Cantidad de Datos	2550

Tabla 23. Resultados Estadísticos Análisis No Lineal

9. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

La variación de la geometría de los elementos estructurales y la respuesta sísmica del suelo son factores de gran importancia e influencia sobre las edificaciones.

Se ajustaron distribuciones de probabilidad con el fin de hallar las derivas elásticas e inelásticas variando la geometría y la respuesta dinámico-mecánica de los ensayos de suelos en un pórtico de concreto reforzado, diseñado con el Reglamento Colombiano de Sismo Resistencia NSR-10 y la microzonificación sísmica (Decreto 523 del año 2010).

Como se dijo en la sección 2.8. la deriva tanto elástica como inelástica se obtuvo de acuerdo a los desplazamientos producidos en la edificación y la altura de cada piso, utilizando la Ecuación 16.

De acuerdo a los resultados se puede analizar qué:

La variación de la geometría (valor “factor”) se encuentra por debajo del valor de variación máximo reportado en Sánchez (2005). El promedio de esta variación para los datos medidos tuvo:

Una media de 0.99077, un valor máximo de 1.03896, un valor mínimo de 0.92308, una desviación estándar de 0.01846, una varianza de 3.41E-04, una mediana de 9.99448 y un nivel de confianza del 90% de que los datos se encuentran dentro de los valores 0.9569 y 1.0218.



La dispersión de datos y la variación de los resultados entre el análisis lineal y el análisis no lineal esta primada debido a la generación de rótulas plásticas en el análisis no lineal. Por lo anterior las rotulas nombradas no aparecerán en el mismo lugar debido a los cambios realizados en el presente trabajo, esto afecta las derivas máximas obtenidas para el presente análisis.

Para las derivas obtenidas (variando las características de suelo y geometría) con el análisis lineal se puede ver que con un nivel de confianza del 90%, estos valores oscilan entre 0.254% y 0.377%.

Para las derivas obtenidas (variando las características de suelo y geometría) con el análisis no lineales se puede ver que con un nivel de confianza del 90%, estos valores oscilan entre 0.218% y 0.312%.

Los Coeficientes de la variación de la geometría 1.86%, junto con la variación de las curvas de degradación del modulo de rigidez del suelo, generan coeficientes de variación en las derivas elásticas del 6.37% y en la deriva inelástica de 4.59%; estos valores son críticos si se tiene en cuenta que una mayor variación de la geometría induciría cambios importantes en las derivas.

Si se compara esta variabilidad obtenida de las derivas debido a los cambios en la geometría y/o los cambios en las propiedades dinámico-mecánicas del suelo (G/G_0 estimado en el laboratorio) son de menor importancia al compararla con la variabilidad de las características de los materiales de una edificación, sobretodo en la variación del módulo de Elasticidad.

10. RECOMENDACIONES

Esta investigación abre las puertas a muchos estudios que se pueden realizar de manera futura, algunas sugerencias son las siguientes:

1. Hacer el mismo estudio, pero, con modelos tridimensionales.
2. Hacer el análisis aumentando la cantidad de sismos de entrada, cantidad de suelos y cantidad de estratos en este.
3. Hacer el estudio en donde se varía la resistencia y deformabilidad de los materiales y la geometría de los elementos.
4. Aumentar el control de la formatelería, debido a la afectación de estas variaciones en el diseño sísmico de una edificación.



11. ANEXOS.

11.1. Código En Visual Basic Análisis Lineal

```
Sub AbrirSap2000()  
Dim FileName As String  
Dim SapObject As Sap2000v15.SapObject  
Dim SapModel As Sap2000v15.cSapModel  
Dim ret As Long  
Dim MyLoadType() As String  
Dim MyLoadName() As String  
Dim MyFunc() As String  
Dim MySF() As Double  
Dim MyTF() As Double  
Dim MyAT() As Double  
Dim MyCSys() As String  
Dim MyAng() As Double  
  
Dim NumberResults As Long  
Dim Obj() As String  
Dim Elm() As String  
Dim LoadCase() As String  
Dim StepType() As String  
Dim StepNum() As Double  
Dim U1() As Double  
Dim U2() As Double  
Dim U3() As Double  
Dim R1() As Double  
Dim R2() As Double  
Dim R3() As Double  
  
Dim nsismo, Filename2 As String  
Dim i, j, k, l, vi, vj, cyi, cyj, cci, ccj, vui, vuj, n, m, o, ns As Double  
  
m = 1  
o = Hoja1.Cells(3, 12).Value  
ns = Hoja1.Cells(3, 14).Value  
  
For m = 1 To ns  
i = 0  
j = 0
```



k = 0

l = 0

vi = 0

vj = 0

cyi = 0

cyj = 0

cci = 0

ccj = 0

vui = 0

vuj = 0

```
Sheets("DerivasMax").Select  
Range("C15:XFD1048576").Select  
Selection.ClearContents
```

```
Range("B2:B1048576").Select  
Selection.ClearContents
```

```
n = Hoja1.Cells(1, 12)  
Hoja1.Cells(3, 12).Value = 0
```

```
Application.DisplayAlerts = False
```

'Crear objeto Sap2000

```
Set SapObject = New Sap2000v15.SapObject
```

'Iniciar Sap2000

```
SapObject.ApplicationStart
```

'Crear Objeto SapModel

```
Set SapModel = SapObject.SapModel
```

'Abrir archivo en ruta

```
FileName = "C:\Users\Laura\Dropbox\TESIS LAURA-MAGO\MODELOS SAP  
FINALES\Modelo Lineal\ANALISIS_LINEAL.SDB"
```

```
ret = SapModel.File.OpenFile(FileName)
```

'Añadir una funcion de Time History a partir de un archivo

```
nsismo = Hoja1.Cells(6, 12)
```

```
ret = SapModel.Func.FuncTH.SetFromFile_1("TH1", nsismo, 1, 0, 1, 1, True, ,  
0.02)
```



'Convertir esta función a Definida por el usuario

```
ret = SapModel.Func.ConvertToUser("TH1")
```

'agregar un caso de análisis de time history, lineal, modal

```
ret = SapModel.LoadCases.ModHistLinear.SetCase("TH1CASE")
```

'set constant damping

```
ret = SapModel.LoadCases.ModHistLinear.SetDampConstant("TH1CASE", 0.05)
```

'set motion type

```
ret = SapModel.LoadCases.ModHistLinear.SetMotionType("TH1CASE", 1)
```

'set modal case

```
ret = SapModel.LoadCases.ModHistLinear.SetModalCase("TH1CASE", "MODAL")
```

'configurar el Step Data del caso

```
ret = SapModel.LoadCases.ModHistLinear.SetTimeStep("TH1CASE", 2670, 0.015)
```

'configurar las cargas evaluadas en el caso

```
ReDim MyLoadType(0)
```

```
ReDim MyLoadName(0)
```

```
ReDim MyFunc(0)
```

```
ReDim MySF(0)
```

```
ReDim MyTF(0)
```

```
ReDim MyAT(0)
```

```
ReDim MyCSys(0)
```

```
ReDim MyAng(0)
```

```
MyLoadType(0) = "Accel"
```

```
MyLoadName(0) = "U1"
```

```
MyFunc(0) = "TH1"
```

```
MySF(0) = 9.81
```

```
MyTF(0) = 1
```

```
MyAT(0) = 0
```

```
MyCSys(0) = "Global"
```

```
MyAng(0) = 0
```

```
ret = SapModel.LoadCases.ModHistLinear.SetLoads("TH1CASE", 1, MyLoadType,  
MyLoadName, MyFunc, MySF, MyTF, MyAT, MyCSys, MyAng)
```



For i = 0 To n - 1 Step 1

```
vi = Hoja1.Cells(2, 4) * Hoja1.Cells(i + 2, 1)
vj = Hoja1.Cells(3, 4) * Hoja1.Cells(i + 2, 1)
cyi = Hoja1.Cells(4, 4) * Hoja1.Cells(i + 2, 1)
cyj = Hoja1.Cells(5, 4) * Hoja1.Cells(i + 2, 1)
cci = Hoja1.Cells(6, 4) * Hoja1.Cells(i + 2, 1)
ccj = Hoja1.Cells(7, 4) * Hoja1.Cells(i + 2, 1)
vui = Hoja1.Cells(8, 4) * Hoja1.Cells(i + 2, 1)
vuj = Hoja1.Cells(9, 4) * Hoja1.Cells(i + 2, 1)
```

'set new frame section property

```
ret = SapModel.PropFrame.SetRectangle("COLY", "Concreto", cyi, cyj)
ret = SapModel.PropFrame.SetRectangle("COLCENTRO", "Concreto", cci, ccj)
ret = SapModel.PropFrame.SetRectangle("VIGA5", "Concreto", vi, vj)
ret = SapModel.PropFrame.SetRectangle("VIGA1-4", "Concreto", vui, vuj)
```

'Correr modelo

```
ret = SapModel.Analyze.RunAnalysis
```

'Limpiar todos los casos y combos en resultados

```
ret = SapModel.Results.Setup.DeselectAllCasesAndCombosForOutput
```

'Escoger el Caso de Carga

```
ret = SapModel.Results.Setup.SetCaseSelectedForOutput("TH1CASE")
```

'set modal history output option to step-by-step

```
ret = SapModel.Results.Setup.SetOptionModalHist(2)
```

'get point displacements

```
ret = SapModel.Results.JointDispl("104", 0, NumberResults, Obj, Elm, LoadCase,
StepType, StepNum, U1, U2, U3, R1, R2, R3)
```

```
Hoja1.Cells(2, 12) = NumberResults
```

For k = 0 To NumberResults - 1

```
Hoja1.Cells(15 + k, 3 + l) = StepNum(k)
```

```
Hoja1.Cells(15 + k, 4 + l) = U1(k)
```

Next k



Estimación de la incertidumbre aleatoria de la deriva sísmica de un
Pórtico de concreto reforzado considerando la variabilidad
De la geometría y las propiedades del suelo

```
ret = SapModel.Results.JointDispl("105", 0, NumberResults, Obj, Elm, LoadCase,  
StepType, StepNum, U1, U2, U3, R1, R2, R3)
```

```
For k = 0 To NumberResults - 1  
Hoja1.Cells(15 + k, 5 + l) = U1(k)  
Next k
```

```
ret = SapModel.Results.JointDispl("106", 0, NumberResults, Obj, Elm, LoadCase,  
StepType, StepNum, U1, U2, U3, R1, R2, R3)
```

```
For k = 0 To NumberResults - 1  
Hoja1.Cells(15 + k, 6 + l) = U1(k)  
Next k
```

```
ret = SapModel.Results.JointDispl("107", 0, NumberResults, Obj, Elm, LoadCase,  
StepType, StepNum, U1, U2, U3, R1, R2, R3)
```

```
For k = 0 To NumberResults - 1  
Hoja1.Cells(15 + k, 7 + l) = U1(k)  
Next k
```

```
ret = SapModel.Results.JointDispl("108", 0, NumberResults, Obj, Elm, LoadCase,  
StepType, StepNum, U1, U2, U3, R1, R2, R3)
```

```
For k = 0 To NumberResults - 1  
Hoja1.Cells(15 + k, 8 + l) = U1(k)  
Next k
```

```
l = l + 7
```

```
'Unlock model'
```

```
ret = SapModel.SetModellsLocked(False)
```

```
Next i
```

```
'Close Sap2000'
```

```
SapObject.ApplicationExit False  
Set SapModel = Nothing  
Set SapObject = Nothing
```



```
Filename2 = Hoja1.Cells(2, 14) & "sismo" & o & ".xlsm"  
ActiveWorkbook.Save  
ActiveWorkbook.SaveCopyAs Filename2
```

```
o = o + 1
```

```
Next m  
End Sub
```

```
Sub HacerTabla()
```

```
Dim i, l, k, n, m, NumberResults As Double  
Dim Rango As Range
```

```
n = Hoja1.Cells(1, 12)  
NumberResults = Hoja1.Cells(2, 12)  
i = 0  
l = 0  
k = 0  
m = 0
```

```
For n = 0 To n - 1  
For k = 0 To NumberResults - 1  
Hoja1.Cells(15 + k, 9 + l) =  
Application.WorksheetFunction.Max(Math.Abs(Hoja1.Cells(15 + k, 4 + l)) / 3,  
Math.Abs(Hoja1.Cells(15 + k, 5 + l) - Hoja1.Cells(15 + k, 4 + l)) / 3,  
Math.Abs(Hoja1.Cells(15 + k, 6 + l) - Hoja1.Cells(15 + k, 5 + l)) / 3,  
Math.Abs(Hoja1.Cells(15 + k, 7 + l) - Hoja1.Cells(15 + k, 6 + l)) / 3,  
Math.Abs(Hoja1.Cells(15 + k, 8 + l) - Hoja1.Cells(15 + k, 7 + l)) / 3)  
Hoja2.Cells(15 + k, 4 + l) = Math.Abs(Hoja1.Cells(15 + k, 4 + l)) / 3  
Hoja2.Cells(15 + k, 5 + l) = Math.Abs(Hoja1.Cells(15 + k, 5 + l) - Hoja1.Cells(15 +  
k, 4 + l)) / 3  
Hoja2.Cells(15 + k, 6 + l) = Math.Abs(Hoja1.Cells(15 + k, 6 + l) - Hoja1.Cells(15 +  
k, 5 + l)) / 3  
Hoja2.Cells(15 + k, 7 + l) = Math.Abs(Hoja1.Cells(15 + k, 7 + l) - Hoja1.Cells(15 +  
k, 6 + l)) / 3  
Hoja2.Cells(15 + k, 8 + l) = Math.Abs(Hoja1.Cells(15 + k, 8 + l) - Hoja1.Cells(15 +  
k, 7 + l)) / 3  
Next k
```

```
Set Rango = Hoja1.Range(Hoja1.Cells(15, 9 + l), Hoja1.Cells(10000, 9 + l))
```



```
Hoja1.Cells(13, 9 + l) = Application.WorksheetFunction.Max(Rango)
```

```
l = l + 7
```

```
Next n
```

```
l = 0
```

```
For i = 0 To n - 1 Step 1
```

```
Hoja1.Cells(2 + i, 2) = Hoja1.Cells(13, 9 + l)
```

```
l = l + 7
```

```
Next i
```

```
End Sub
```

11.2. Código En Visual Basic Análisis No Lineal

```
Sub AbrirSap2000()
```

```
Dim FileName As String
```

```
Dim SapObject As SAP2000v15.SapObject
```

```
Dim SapModel As SAP2000v15.cSapModel
```

```
Dim ret As Long
```

```
Dim MyLoadType() As String
```

```
Dim MyLoadName() As String
```

```
Dim MyFunc() As String
```

```
Dim MySF() As Double
```

```
Dim MyTF() As Double
```

```
Dim MyAT() As Double
```

```
Dim MyCSys() As String
```

```
Dim MyAng() As Double
```

```
Dim NumberResults As Long
```

```
Dim Obj() As String
```

```
Dim Elm() As String
```

```
Dim LoadCase() As String
```

```
Dim StepType() As String
```

```
Dim StepNum() As Double
```

```
Dim U1() As Double
```

```
Dim U2() As Double
```

```
Dim U3() As Double
```

```
Dim R1() As Double
```



Dim R2() As Double

Dim R3() As Double

Dim nsismo, Filename2 As String

Dim i, j, k, l, vi, vj, cyi, cyj, cci, ccj, vui, vuj, n, m, o, ns As Double

m = 1

o = Hoja1.Cells(3, 12).Value

ns = Hoja1.Cells(3, 14).Value

For m = 1 To ns

i = 0

j = 0

k = 0

l = 0

vi = 0

vj = 0

cyi = 0

cyj = 0

cci = 0

ccj = 0

vui = 0

vuj = 0

Sheets("Hoja1").Select

Range("C15:XFD1048576").Select

Selection.ClearContents

Range("B2:B1048576").Select

Selection.ClearContents

n = Hoja1.Cells(1, 12)

Hoja1.Cells(3, 12).Value = o

Application.DisplayAlerts = False

'Crear objeto Sap2000

Set SapObject = New SAP2000v15.SapObject

'Iniciar Sap2000



SapObject.ApplicationStart

'Crear Objeto SapModel'

Set SapModel = SapObject.SapModel

'Abrir archivo en ruta'

FileName = Hoja1.Cells(1, 14)

ret = SapModel.File.OpenFile(FileName)

'Añadir una funcion de Time History a partir de un archivo'

nsismo = Hoja1.Cells(6, 12)

ret = SapModel.Func.FuncTH.SetFromFile_1("TH1", nsismo, 1, 0, 1, 1, True, ,
0.02)

'Convertir esta funcion a Definida por el usuario'

ret = SapModel.Func.ConvertToUser("TH1")

'Análisis NO lineal'

'add nonlinear modal history load case'

ret = SapModel.LoadCases.DirHistNonlinear.SetCase("TH1CASENL")

'set initial condition'

ret = SapModel.LoadCases.DirHistNonlinear.SetInitialCase("TH1CASENL",
"Combo")

'set proportional damping'

ret = SapModel.LoadCases.DirHistNonlinear.SetDampProportional("TH1CASENL",
2, 0, 0, 0.05, 2, 0.05, 0.05)

'set geometric nonlinearity option'

ret =

SapModel.LoadCases.DirHistNonlinear.SetGeometricNonlinearity("TH1CASENL",
0)

'configurar el Step Data del caso'

ret = SapModel.LoadCases.DirHistNonlinear.SetTimeStep("TH1CASENL", 2670,
0.015)

'configurar las cargas evaluadas en el caso'

ReDim MyLoadType(0)



```
ReDim MyLoadName(0)
ReDim MyFunc(0)
ReDim MySF(0)
ReDim MyTF(0)
ReDim MyAT(0)
ReDim MyCSys(0)
ReDim MyAng(0)
```

```
MyLoadType(0) = "Accel"
MyLoadName(0) = "U1"
MyFunc(0) = "TH1"
MySF(0) = 9.81
MyTF(0) = 1
MyAT(0) = 0
MyCSys(0) = "Global"
MyAng(0) = 0
```

```
ret = SapModel.LoadCases.DirHistNonlinear.SetLoads("TH1CASENL", 1,
MyLoadType, MyLoadName, MyFunc, MySF, MyTF, MyAT, MyCSys, MyAng)
```

```
For i = 0 To n - 1 Step 1
```

```
vi = Hoja1.Cells(2, 4) * Hoja1.Cells(i + 2, 1)
vj = Hoja1.Cells(3, 4) * Hoja1.Cells(i + 2, 1)
cyi = Hoja1.Cells(4, 4) * Hoja1.Cells(i + 2, 1)
cyj = Hoja1.Cells(5, 4) * Hoja1.Cells(i + 2, 1)
cci = Hoja1.Cells(6, 4) * Hoja1.Cells(i + 2, 1)
ccj = Hoja1.Cells(7, 4) * Hoja1.Cells(i + 2, 1)
vui = Hoja1.Cells(8, 4) * Hoja1.Cells(i + 2, 1)
vuj = Hoja1.Cells(9, 4) * Hoja1.Cells(i + 2, 1)
```

'set new frame section property

```
ret = SapModel.PropFrame.SetRectangle("COLY", "Concreto", cyi, cyj)
ret = SapModel.PropFrame.SetRectangle("COLCENTRO", "Concreto", cci, ccj)
ret = SapModel.PropFrame.SetRectangle("VIGA5", "Concreto", vi, vj)
ret = SapModel.PropFrame.SetRectangle("VIGA1-4", "Concreto", vui, vuj)
```

'Correr modelo

```
ret = SapModel.Analyze.RunAnalysis
```

'Limpiar todos los casos y combos en resultados



Estimación de la incertidumbre aleatoria de la deriva sísmica de un
Pórtico de concreto reforzado considerando la variabilidad
De la geometría y las propiedades del suelo

```
'ret = SapModel.Results.Setup.DeselectAllCasesAndCombosForOutput
```

'Escoger el Caso de Carga

```
ret = SapModel.Results.Setup.SetCaseSelectedForOutput("TH1CASENL")
```

'set output option to step-by-step

```
ret = SapModel.Results.Setup.SetOptionDirectHist(2)
```

'get point displacements

```
ret = SapModel.Results.JointDispl("104", 0, NumberResults, Obj, Elm, LoadCase,  
StepType, StepNum, U1, U2, U3, R1, R2, R3)
```

```
Hoja1.Cells(2, 12) = NumberResults
```

```
For k = 0 To NumberResults - 1
```

```
Hoja1.Cells(15 + k, 3 + l) = StepNum(k)
```

```
Hoja1.Cells(15 + k, 4 + l) = U1(k)
```

```
Next k
```

```
ret = SapModel.Results.JointDispl("105", 0, NumberResults, Obj, Elm, LoadCase,  
StepType, StepNum, U1, U2, U3, R1, R2, R3)
```

```
For k = 0 To NumberResults - 1
```

```
Hoja1.Cells(15 + k, 5 + l) = U1(k)
```

```
Next k
```

```
ret = SapModel.Results.JointDispl("106", 0, NumberResults, Obj, Elm, LoadCase,  
StepType, StepNum, U1, U2, U3, R1, R2, R3)
```

```
For k = 0 To NumberResults - 1
```

```
Hoja1.Cells(15 + k, 6 + l) = U1(k)
```

```
Next k
```

```
ret = SapModel.Results.JointDispl("107", 0, NumberResults, Obj, Elm, LoadCase,  
StepType, StepNum, U1, U2, U3, R1, R2, R3)
```

```
For k = 0 To NumberResults - 1
```

```
Hoja1.Cells(15 + k, 7 + l) = U1(k)
```

```
Next k
```



```
ret = SapModel.Results.JointDispl("108", 0, NumberResults, Obj, Elm, LoadCase,  
StepType, StepNum, U1, U2, U3, R1, R2, R3)
```

```
For k = 0 To NumberResults - 1  
Hoja1.Cells(15 + k, 8 + l) = U1(k)  
Next k
```

```
l = l + 7
```

```
'Unlock model'
```

```
ret = SapModel.SetModellsLocked(False)
```

```
Next i
```

```
'Close Sap2000'
```

```
SapObject.ApplicationExit False
```

```
Set SapModel = Nothing
```

```
Set SapObject = Nothing
```

```
Filename2 = Hoja1.Cells(2, 14) & "sismo" & o & ".xlsm"
```

```
ActiveWorkbook.Save
```

```
ActiveWorkbook.SaveCopyAs Filename2
```

```
o = o + 1
```

```
Next m
```

```
End Sub
```

```
Sub HacerTabla()
```

```
Dim i, l, k, n, m, NumberResults As Double
```

```
Dim Rango As Range
```

```
n = Hoja1.Cells(1, 12)
```

```
NumberResults = Hoja1.Cells(2, 12)
```

```
i = 0
```

```
l = 0
```

```
k = 0
```

```
m = 0
```

```
For n = 0 To n - 1
```



For k = 0 To NumberResults - 1

Hoja1.Cells(15 + k, 9 + l) =

Application.WorksheetFunction.Max(Math.Abs(Hoja1.Cells(15 + k, 4 + l)) / 3,

Math.Abs(Hoja1.Cells(15 + k, 5 + l) - Hoja1.Cells(15 + k, 4 + l)) / 3,

Math.Abs(Hoja1.Cells(15 + k, 6 + l) - Hoja1.Cells(15 + k, 5 + l)) / 3,

Math.Abs(Hoja1.Cells(15 + k, 7 + l) - Hoja1.Cells(15 + k, 6 + l)) / 3,

Math.Abs(Hoja1.Cells(15 + k, 8 + l) - Hoja1.Cells(15 + k, 7 + l)) / 3)

Hoja2.Cells(15 + k, 4 + l) = Math.Abs(Hoja1.Cells(15 + k, 4 + l)) / 3

Hoja2.Cells(15 + k, 5 + l) = Math.Abs(Hoja1.Cells(15 + k, 5 + l) - Hoja1.Cells(15 + k, 4 + l)) / 3

Hoja2.Cells(15 + k, 6 + l) = Math.Abs(Hoja1.Cells(15 + k, 6 + l) - Hoja1.Cells(15 + k, 5 + l)) / 3

Hoja2.Cells(15 + k, 7 + l) = Math.Abs(Hoja1.Cells(15 + k, 7 + l) - Hoja1.Cells(15 + k, 6 + l)) / 3

Hoja2.Cells(15 + k, 8 + l) = Math.Abs(Hoja1.Cells(15 + k, 8 + l) - Hoja1.Cells(15 + k, 7 + l)) / 3

Next k

Set Rango = Hoja1.Range(Hoja1.Cells(15, 9 + l), Hoja1.Cells(10000, 9 + l))

Hoja1.Cells(13, 9 + l) = Application.WorksheetFunction.Max(Rango)

l = l + 7

Next n

l = 0

For i = 0 To n - 1 Step 1

Hoja1.Cells(2 + i, 2) = Hoja1.Cells(13, 9 + l)

l = l + 7

Next i

End Sub

11.3. Código En Visual Basic Derivas

Sub HacerTabla()

Dim i, l, k, n, m, NumberResults As Double

Dim Rango As Range

n = Hoja1.Cells(1, 12)

NumberResults = Hoja1.Cells(2, 12)



i = 0

l = 0

k = 0

m = 0

For n = 0 To n - 1

For k = 0 To NumberResults - 1

Hoja1.Cells(15 + k, 9 + l) =

Application.WorksheetFunction.Max(Math.Abs(Hoja1.Cells(15 + k, 4 + l)) / 3,

Math.Abs(Hoja1.Cells(15 + k, 5 + l) - Hoja1.Cells(15 + k, 4 + l)) / 3,

Math.Abs(Hoja1.Cells(15 + k, 6 + l) - Hoja1.Cells(15 + k, 5 + l)) / 3,

Math.Abs(Hoja1.Cells(15 + k, 7 + l) - Hoja1.Cells(15 + k, 6 + l)) / 3,

Math.Abs(Hoja1.Cells(15 + k, 8 + l) - Hoja1.Cells(15 + k, 7 + l)) / 3)

Hoja2.Cells(15 + k, 4 + l) = Math.Abs(Hoja1.Cells(15 + k, 4 + l)) / 3

Hoja2.Cells(15 + k, 5 + l) = Math.Abs(Hoja1.Cells(15 + k, 5 + l) - Hoja1.Cells(15 + k, 4 + l)) / 3

Hoja2.Cells(15 + k, 6 + l) = Math.Abs(Hoja1.Cells(15 + k, 6 + l) - Hoja1.Cells(15 + k, 5 + l)) / 3

Hoja2.Cells(15 + k, 7 + l) = Math.Abs(Hoja1.Cells(15 + k, 7 + l) - Hoja1.Cells(15 + k, 6 + l)) / 3

Hoja2.Cells(15 + k, 8 + l) = Math.Abs(Hoja1.Cells(15 + k, 8 + l) - Hoja1.Cells(15 + k, 7 + l)) / 3

Next k

Set Rango = Hoja1.Range(Hoja1.Cells(15, 9 + l), Hoja1.Cells(10000, 9 + l))

Hoja1.Cells(13, 9 + l) = Application.WorksheetFunction.Max(Rango)

l = l + 7

Next n

l = 0

For i = 0 To n - 1 Step 1

Hoja1.Cells(2 + i, 2) = Hoja1.Cells(13, 9 + l)

l = l + 7

Next i

End Sub



12. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AIS (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica) (2010). *Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente (NSR-10)*. Bogotá Colombia

Álvarez (1999) *El Efecto Local sobre el Movimiento Sísmico del Suelo: Fenomenología y Resultados Recientes*. E.U.I.T.Industrial, Univ. Politécnica de Madrid. Madrid, España.

Ang, A.H.-S. (1973). Structural Risk Analysis and Reliability-Based Design. Journal of Structural Engineering Division, 99, 1973, Pag 20-35

ASTM D 3999-91 [2003]. *Método de Prueba Estándar para la Determinación del Módulo y Amortiguamiento del Suelo usando el Aparato Triaxial Cíclico (Standard Test Methods for the Determination of the Modulus and Damping Properties of Soils Using the Cyclic Triaxial Apparatus)*. Philadelphia, U.S.A. ASTM volumen 04.08.

ATC-40 (1996). *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings, Volume I*. California, USA.

Ávila (2005). *Variables Aleatorias Discretas*. Departamento De Ciencias Básicas, Instituto Tecnológico De Querétaro. Querétaro, México

Bernal (2005). *Columnas*. Editorial NOBUKO. Buenos Aires, Argentina.

Borrero (2011). *Estimación De La Variabilidad De La Deriva Y Del Cortante Basal Resistente De Pórticos De Concreto Reforzado En Bogotá*. Facultad De Ingeniería, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia.

Borrero, Ruiz, León y Vacca. (2011). *Estimación De Los Niveles De Desempeño Estructural Y De La Deriva Inelástica De Pórticos De Concreto Considerando La Variabilidad De Los Materiales De Bogotá*. Facultad De Ingeniería, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia.

Bran, González y Ortiz (2009). *Métodos De Ensayo Para La Determinación D Las Principales Propiedad Dinámicas De Los Suelos De El Salvador*. Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de el Salvador, El Salvador, Republica de el Salvador.



Camacho-Tauta, Jiménez y Ortiz (2012). A Procedure To Calibrate And Perform The Bender Element Test. Facultad de Ingeniería, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia.

Canavos (1986). Probabilidad y estadística : aplicaciones y métodos. McGraw-Hill, México D.F.

Chorro y Garay (2006). *Análisis Y Verificación De Interacción Dinámica Suelo-Estructura.* Ingeniería y arquitectura, Universidad Centroamericana, San Salvador, El Salvador C.A.

DPAE. (1997) *(Dirección de Prevención y Atención de Emergencias, Microzonificación sísmica de la ciudad de Santafé de Bogotá.*

DPAE. (2010) *(Dirección de Prevención y Atención de Emergencias, Decreto 523 por el cual se adaptara la Microzonificación sísmica de la ciudad de Santafé de Bogotá.*

EERA MANUAL (2000). *A computer program for equivalent-linear earthquake site response analyses of layered soil deposit.* Department of civil engineering, University of southern California, California, USA.

Fernández (2013). *Influencia De La Interacción Dinámica Suelo-Estructura En La Respuesta Dinámica De Las Estructuras.* Universidad autónoma metropolitana, México D.C.

García, L. E (1996), Economic considerations of displacement-based seismic design of structural concrete buildings. Structural Engineering International Vol 6 n°4, 1669.IABSE. Zurich, Suiza.

Investigación Operativa (2005). *Simulación método de Monte Carlo.* Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional del Centro, Buenos Aires. Argentina.

Mun (2005). *Manual Simulador de Riesgo Risk. Real Option Valuation, Inc. California, USA.*

Ramos y García (2004). *Modelación 1D y 2D de Iso efectos locales en arcillolitas de la formación Bogotá.* Congreso Latinoamericano y segundo Colombiano de Sismología, Bogotá, Colombia.

Rivas, 2010. *Influencia De La Microestructura En El Comportamiento Dinámico De Los Suelos Residuales De Esquistos En Sabaneta.* Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.



Estimación de la incertidumbre aleatoria de la deriva sísmica de un Pórtico de concreto reforzado considerando la variabilidad De la geometría y las propiedades del suelo

Rodríguez (2009). *Caracterización de la respuesta sísmica de los suelos. Aplicación a la ciudad de Barcelona.* Universidad de Cataluña, Ingeniería, Cataluña, España.

Rodríguez, (2010). *Estudios De Amenaza Y Respuesta Sísmica Local.* Seminario Internacional de Gestión Integral De Riesgo Sísmico, Ingeniería y Georriesgos, Bogotá, Colombia.

Rosales (2001) *Sobre El Comportamiento Sísmico De Los Depósitos De Suelos Del Área De Cañaveralejo, Cali, Colombia,* Ingeniería civil y Geomática, Universidad del Valle.

Ruiz, Borrero, León y Vacca. (2011). *Estimación De La Incertidumbre Aleatoria De La Deriva Sísmica De Pórticos De Concreto Reforzado Considerando La Variabilidad Del Módulo Elástico Del Concreto De Bogotá.* Facultad De Ingeniería, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia.

Prieto, J. Muñoz, E. Ruiz, D. Ramos A. (2005). *Estimación De La Incertidumbre Aleatoria Del Punto De Desempeño De Una Edificación Esencial.* Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Antisísmica, IX Jornadas. Artículo N° A04-02. Concepción, Chile.

Sánchez. (2005). *Introducción A La Confiabilidad Y Evaluación De Riesgos.* Facultad de ingeniería, Universidad de los Andes, Bogotá Dc, Colombia.

Schmalz, Laroche y Sheahan (2007). *Development and Proof-Testing of a PC-Based Bender Element System for Shear Wave Measurements in Soft Soil.* Civil and Environmental Engineering, Northeastern University, Boston, Massachusetts.

Zarate y Rodríguez (2005). *Efecto de las Ondas Superficiales ante un evento sísmico en la Zona Plana del Norte de Bogotá.* Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Javeria, Bogotá, Colombia.