



Incidencia de la componente vertical sísmica en la respuesta dinámica de una estructura de pórticos ubicada en la ciudad de Armenia - Revisión bibliográfica y caso estudio

Angie Tatiana Daza A.
María Alejandra Ocampo B.

Trabajo de grado presentado para optar al título de Especialista en Análisis y Diseño de Estructuras

Orientador

Juan Carlos Obando Fuertes, PhD.

Universidad de Antioquia
Especialización en Análisis y Diseño de Estructuras
Medellín, Antioquia

2022

Cita	Daza Acevedo & Ocampo Bedón, 2022)
Referencia Estilo APA 7 (2020)	Daza Acevedo, A.T, & Ocampo Bedón, M. A. (2022).Incidencia de la componente vertical sísmica en la respuesta dinámica de una estructura de dos pórticos ubicada en la ciudad de Armenia - revisión bibliográfica y caso estudio. Trabajo de grado especialización. Universidad de Antioquia, Medellín, Antioquia.



Especialización en Análisis y Diseño de Estructuras, 2023-1
 Centro de Investigación Ambientales y de Ingeniería (CIA)



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes

Decano/Director: Juan Carlos Vélez C.

Jefe departamento: Julio César Saldarriaga Molina

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

CONTENIDO

1. MOTIVACIÓN, JUSTIFICACIÓN, PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	9
2. OBJETIVO GENERAL.....	10
2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	10
3. MARCO TEÓRICO	10
3.1. Evento sísmico.....	10
3.2. Amenaza sísmica.....	11
3.3 Zonas de Amenaza Sísmica	11
3.3.1. Zonificación sísmica de Colombia.....	11
3.3. Dinámica.....	12
3.4 Componentes sísmicas.....	12
4. ESTADO DEL ARTE.....	13
4.1. ESPECTROS VERTICALES.....	15
4.2. NORMATIVAS Y CÓDIGOS DE DISEÑO INTERNACIONALES.....	16
4.3. SISMO DE ARMENIA 1999	18
5. DESARROLLO CASO EJEMPLO	20
5.1. OBJETO DE ESTUDIO	20
5.2. RESPUESTA E INDICADORES PARA CONSIDERAR EN EL ANÁLISIS	20
5.3. HIPÓTESIS PARA EL ANÁLISIS.....	20
5.4. DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA.....	21
5.4.1. PARÁMETROS DE AMENAZA SÍSMICA.....	21
5.4.2. COMBINACIONES DE CARGA.....	24
5.4.3. ASIGNACIÓN DE CARGAS	25
5.5. DESCRIPCIÓN DE LOS REGISTROS	25
5.5.1. Parkfield, 1966, California, EEUU.....	26
5.5.2. Palm Springs, 1986 California, EEUU	27
5.5.3. Christchurch, New Zeland, 2011.....	28
5.5.4. Umbria Marche, 1997 Italia.....	29
5.5.5. Joshua Tree, California, 1992.....	31
5.5.6. Imperial Valley (1979) / Superstition Hills (1987)	31
6. ANÁLISIS TIEMPO HISTORIA SAP2000	32
6.1. Procedimiento de carga de registros.....	32

7. EVALUACIÓN DEL ANÁLISIS TIEMPO HISTORIA	35
7.1. ELEMENTOS A ANALIZAR	35
8. RESULTADOS	37
8.1. Resultados para la relación entre la envolvente horizontal y la envolvente vertical.....	37
8.2. Variación de la incidencia de la componente vertical sísmica en los niveles de la estructura.	38
8.3. Resultados para la relación entre la incidencia de la componente vertical y la distancia epicentral.....	38
8.4. Resultados para la relación entre la incidencia de la componente vertical en la zona de amenaza sísmica.....	39
8.5. Resultados para la relación entre la incidencia de la componente vertical y tipo de falla.....	40
9. ANÁLISIS DE RESULTADOS	42
9.1. Análisis de resultados para la relación entre la envolvente horizontal y la envolvente vertical sísmica.	43
9.2. Análisis de la variación de la incidencia de la componente vertical sísmica en los niveles de la estructura.....	44
9.3. Análisis de resultados para la relación entre la incidencia de la componente vertical y la distancia epicentral.....	47
9.4. Análisis de resultados para la relación entre la incidencia de la componente vertical en la zona de amenaza sísmica.....	48
9.5. Análisis de resultados para la relación entre la incidencia de la componente vertical y tipo de falla.....	49
10. CONCLUSIONES	49
11. REFERENCIAS	51
12. ANEXOS:.....	54
12.1. VIGA 1 “Momentos en los apoyos”	54
12.2. VIGA 2 “Momentos en los apoyos”	57
12.3. VIGA 1 Momentos de cada sismo en los apoyos.....	60
12.4. VIGA 2 Momentos de cada sismo en los apoyos.....	63
12.5. VIGA 1 Envoltentes	69
12.6. VIGA 2 “Momentos de cada sismo ”	70
12.7. Envoltentes	80

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Nivel de amenaza sísmica según valores de Aa y de Av. Fuente: Tomado de NSR10.....	12
Tabla 2. Relaciones de aceleración vertical y horizontal propuestos. Fuente: Tomado de (Perea & Esteva, 2005)	14
Tabla 3. Características de registros de eventos sísmicos. Fuente: Tomado de (Bozorgnia & Campbell, 2004)	15
Tabla 4. Comparación códigos internacionales Fuente: Tomado de Kale, O., & Akkar, S. (2020). A new formulation for a code-based vertical design spectrum. Wiley, 1–18.....	17
Tabla 5. Coeficientes Aa, Av y Ae. Fuente: Tomado de la NSR-10	22
Tabla 6. Clasificación de los perfiles de suelo. Fuente: Tomado de la NSR-10	22
Tabla 7. Valores del Coeficiente Fv Fuente: Tomado de la NSR-10	22
Tabla 8. Valores del coeficiente de importancia I. Fuente: Tomado de la NSR10.	23
Tabla 9. Datos iniciales de la edificación. Fuente: Tomado de la NSR10	23
Tabla 10. Cargas muertas por nivel. Fuente: Propia	25
Tabla 11. Cargas vivas por nivel. Fuente: Propia.....	25
Tabla 12. Descripción de registros del estudio. Fuente: Propia	26
Tabla 13. Factores que afectan cada registro. Fuente: Propia.....	35
Tabla 14. Momento máximo que toma cada envolvente por nivel. Fuente: Propia	37
Tabla 15. Incidencia de la envolvente vertical en la envolvente máxima Viga 1. Fuente: Propia.....	37
Tabla 16. Incidencia de la envolvente vertical en la envolvente máxima Viga 2. Fuente: Propia.....	37
Tabla 17. Variación en la incidencia de la componente vertical sísmica en todos los niveles de la estructura. Fuente: Propia	38
<i>Tabla 18. Resultados para la relación entre la incidencia de la componente vertical y la distancia epicentral. Fuente: Propia.....</i>	<i>38</i>
Tabla 19. Participación de cada uno de los sismos en la cubierta. Fuente: Propia	39
Tabla 20. Zona de amenaza sísmica para cada registro de estudio, Viga 1	39
Tabla 21. Zona de amenaza sísmica para cada registro de estudio, Viga 2	40
Tabla 22. Incidencia de la componente vertical y tipo de falla de cada registro ...	41
Tabla 23. Porcentaje de incidencia de la componente vertical y tipo de falla, Viga 1	41
Tabla 24. Porcentaje de incidencia de la componente vertical y tipo de falla, Viga 2	42
Tabla 25. Relación entre la envolvente horizontal y vertical sísmica, Viga 1.	43

Tabla 26. Relación entre la envolvente horizontal y vertical sísmica, Viga 1	44
Tabla 27. Relación entre la incidencia de la componente vertical y la distancia epicentral de cada registro	47

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Zonas de Amenaza Sísmica aplicable a edificaciones para la NSR-10 en función de Aa y Av. Fuente: Tomado de NSR10.....	11
Figura 2. Espectros de aceleración vertical para los 30 sismos más fuertes de los últimos años en roca. Fuente: Tomado de (Ruiz & Sarría, 2002).....	14
Figura 3. Espectros del cociente V/H en dirección Este-Oeste para los 30 sismos más fuertes de los últimos años. Fuente: Tomado de (Ruiz & Sarría, 2002)	14
Figura 4. Registros del terremoto de N.Palm Springs earthquake, 1996. Tomado de (Nayak, 2021).....	16
Figura 5. Registros de los terremotos (a) Tabas y (b) Northridge, 199. Fuente: Tomado de (Nayak, 2021).....	16
Figura 6. Localización geográfica del epicentro en el departamento del Quindío Fuente: Tomado de (Cardona, 1999)	19
Figura 7. Acelerograma componente vertical. Fuente: Tomado de (Revista Ingeniería Sísmica Universidad del Quindío, 1999)	19
Figura 8. Secciones de vigas y columnas. Fuente: Propia.....	21
Figura 9. Coeficiente de amplificación Fa del suelo para la zona de periodos cortos del espectro. Fuente: Tomado de la NSR10	23
Figura 10. Modelo 3D del pórtico de estudio. Fuente: Propia.....	24
Figura 11. Localización del evento sísmico Parkfield, 1966. Fuente: Tomado de (USGS, 2004).....	27
Figura 12. Acelerograma componente vertical Parkfield, California, EEUU. Fuente: Propia.....	27
Figura 13. Localización del evento sísmico Palm Springs, 1986. Fuente: Tomado de (Earthquakes in Thousand Palms)	28
Figura 14. Acelerograma componente vertical Palm Springs, California, EEUU Fuente: Propia.....	28
Figura 15. Localización del epicentro y secuencia de la réplica. Fuente: Tomado de (Internet Geography, 2022)	29
Figura 16. Acelerograma componente vertical Christchurch, New Zeland. Fuente: Propia.....	29

Figura 17. Falla normal. Fuente: Tomado de: https://rsn.ucr.ac.cr/documentos/educativos/geologia	30
Figura 18. Epicentro sismo Umbria-marche. Fuente: Tomado de: https://rsn.ucr.ac.cr/documentos/educativos/geologia	30
Figura 19. Acelerograma componente vertical Umbria Marche, Italia. Fuente: Propia.....	30
Figura 20. Acelerograma componente vertical Joshua Tree, California, EEUU. Fuente: Propia.....	31
Figura 21. Acelerograma componente vertical. Imperial Valley (1979) / Superstition Hills. Fuente: Propia	32
Figura 22. Definición de la función tiempo-historia. Fuente:Propia	33
Figura 23. Definición de cada registro de estudio. Fuente:Propia	33
Figura 24. Definición de características de los registros. Fuente: Propia	34
Figura 25. Definición de un caso de carga de tipo Linear Direct integration history. Fuente: Propia.....	34
Figura 26. Elementos estructurales a analizar. Fuente: Propia	36
Figura 27. Elementos a analizar y puntos. Fuente: Propia	36
Figura 28. Momentos en los apoyos de la viga 1 respecto a los niveles de la estructura	44
Figura 29. Porcentaje de variación de los momentos por nivel, Viga 1	45
<i>Figura 30. Momentos en los apoyos de la viga 2 respecto a los niveles de la estructura</i>	<i>45</i>
Figura 31. Figura 29. Porcentaje de incidencia de los momentos por nivel, Viga 1	46
Figura 32. Envolverte Vertical Viga 1 Cubierta	54
Figura 33. Envolverte Horizontal Viga 1 Cubierta.....	54
<i>Figura 34. Envolverte Vertical Viga 1 Nivel 2.....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 35. Envolverte Horizontal Viga 1 Nivel 2</i>	<i>55</i>
Figura 36. Envolverte Vertical Viga 1 Nivel 1.....	56
Figura 37. Envolverte Horizontal Viga 1 Nivel 1	56
Figura 38. Envolverte Vertical Viga 2 Cubierta	57
Figura 39. Envolverte Horizontal Viga 2 Cubierta.....	57
Figura 40. Envolverte Vertical Viga 2 Nivel 2.....	58
Figura 41. Envolverte Horizontal Viga 2 Nivel 2	58
Figura 42. Envolverte Vertical Viga 2 Nivel 1.....	59
Figura 43. Envolverte Horizontal Viga 2 Nivel 1	59
Figura 44. Momentos en viga 1 Imperial	60
Figura 45. Momentos en viga 1 Joshua	60
Figura 46. Momentos en la viga 1 Marcas	61
Figura 47. Momentos viga 1 Imperial.....	61
Figura 48. Momentos viga 1 Palms	62
Figura 49. Momentos viga 1 Park.....	62
Figura 50. Momentos viga 2 Imperial	63
Figura 51. Momentos viga 2 Joshua	63

Figura 52. Momenros viga 2 Marcas	64
Figura 53. Momentos viga 2 New Zeland.....	64
Figura 54. Momentos vga 2 Palm.....	65
Figura 55. Momentos viga 2 Park.....	65
Figura 56. Viga 2 valor de momento nivel 1 Imperial	66
Figura 57. Viga 2 valor de momento nivel 1 Joshua.....	66
Figura 58. Viga 2 valor de momento nivel 1 Marcas	67
Figura 59. Viga 2 valor de momento nivel 1 New Zeland	67
Figura 60. Viga 2 valor de momento nivel 1 Palm	68
Figura 61. Viga 2 valor de momento nivel 1 Park.....	68
Figura 62. Envolverte cubierta.....	69
Figura 63. Envolverte nivel 2	69
Figura 64. Envolverte nivel 1	70
Figura 65. Momento en la cubierta Imperial	70
Figura 66.. Momento en la cubierta Joshua	71
Figura 67 . Momento en la cubierta Marcas	71
Figura 68. . Momento en la cubiertaNew Zeland.....	72
Figura 69. Momento en la cubierta Palm.....	72
Figura 70 Momento en la cubierta Park	73
Figura 71. Momento viga 2 nivel 2 Imperial.....	73
Figura 72. Momento viga 2 nivel 2 Joshua.....	74
Figura 73. Momento viga 2 nivel 2 Marcas.....	74
Figura 74. Momento viga 2 nivel 2 New Zeland	75
Figura 75. Momento viga 2 nivel 2 Palm	75
Figura 76. Momento viga 2 nivel 2 Park	76
Figura 77. Momento viga 2 nivel 1 Imperial.....	76
Figura 78.. Momento viga 2 nivel 1 Joshua.....	77
Figura 79. Momento viga 2 nivel 1 Marcas.....	77
Figura 80. Momento viga 2 nivel 1 New Zeland	78
Figura 81. Momento viga 2 nivel 1 Palm	78
Figura 82. Momento viga 2 nivel 1 Park	79
Figura 83. Envolverte Nivel 1.....	80
Figura 84. Envolverte nivel 2	80
Figura 85. Envolverte Nivel 3.....	81

1. MOTIVACIÓN, JUSTIFICACIÓN, PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la actualidad, para el desarrollo de los diseños estructurales de edificaciones no se considera a profundidad la incidencia de la componente vertical de la fuerza sísmica en los diferentes sistemas estructurales.

Partiendo de que la solución del diseño sísmico inicia considerando fuerzas estáticas y proporcionales al peso de la estructura, se deja atrás el estudio de la incidencia de la componente vertical en la respuesta dinámica, es allí donde se concibe la importancia de incorporar esta variable especialmente en edificaciones que se encuentren en zonas de amenaza sísmica alta e intermedia.

Además de esto, a través de los años se han adelantado estudios de eventos sísmicos representativos, donde se ha encontrado que la componente vertical sísmica puede alcanzar valores hasta del 85% de la aceleración de la gravedad, sin embargo, se ha venido apoyando argumentos como los que se listan a continuación:

1. Se toman las cargas gravitatorias con su intensidad máxima y aplicando factores de carga, por lo que se tiene un margen de seguridad importante.
2. Debido a que se tiene una gran rigidez en la dirección vertical, no se presenta una amplificación dinámica en dicha dirección.
3. La componente vertical es menor que la componente horizontal, en la mayoría de los casos. (Perea, 2002)

Por otro lado, se tiene poca información del comportamiento que tiene el coeficiente de disipación de energía para ser empleado en el diseño, esto cuando se propongan espectros verticales.

A partir de lo anterior se realiza una revisión bibliográfica de estudios, investigaciones y normativas que exponen el comportamiento de la componente vertical en relación con la componente horizontal, con el fin de conocer las recomendaciones actuales para el diseño y entender la relevancia que tiene dicha componente en la respuesta dinámica de las estructuras, esto desarrolla mediante el uso de comparativos que muestran las estimaciones que indican diferentes reglamentos, estimaciones de la relación en investigaciones recientes, y demás consideraciones que influyan significativamente en el comportamiento de la estructura ante una componente vertical importante.

De acuerdo con la revisión realizada se desarrollará una modelación de un caso ejemplo de un pórtico ubicado en la ciudad de Armenia, Quindío, para ello se tomarán registros sísmicos existentes que se aplicarán a la estructura y se acerque al comportamiento de la estructura analizando la respuesta que tendrá la componente vertical ante un evento sísmico.

2. OBJETIVO GENERAL

Estudiar la incidencia de la componente vertical sísmica en la respuesta dinámica y su relación con la componente horizontal sísmica a partir de la revisión de estudios, investigaciones, normativas actuales y el análisis de un caso ejemplo que evalúa los efectos del sismo vertical en los momentos que se generan en las vigas de una estructura sencilla de concreto reforzado.

2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

-Realizar un comparativo de las estimaciones que se han dado por diferentes investigadores de la relación entre la componente vertical y horizontal sísmica en la respuesta dinámica de las estructuras.

- Analizar el comportamiento de una estructura típica conformada por dos pórticos de concreto reforzado, asignándole registros con parámetros sísmicos similares al terremoto ocurrido en Armenia, Quindío en el año 1999 con el fin de evaluar la incidencia de la componente vertical sísmica.

-Determinar la incidencia que tienen factores como la zona de amenaza sísmica, distancia del epicentro y tipo de falla, con la relación entre el sismo vertical y la envolvente de combinaciones generada.

3. MARCO TEÓRICO

A continuación, se presentarán una serie de conceptos que ayudarán a comprender la información presentada en este documento, además, de argumentar la importancia de las variables que afectan el comportamiento de la estructura en presencia de un evento sísmico.

3.1. Evento sísmico

El comportamiento de la estructura ante cargas dinámicas que varían con el tiempo es uno de los casos de estudio de la ingeniería estructural, estas cargas dinámicas pueden estar asociadas a los eventos sísmicos de naturaleza tectónica.

Para clasificarlos se relacionan con la profundidad a la que ocurren, entre los 0 y 70 km se clasifican como sismos superficiales, entre 70 y 300 km como sismos de profundidad intermedia, y para más de 300 km como sismos profundos (García, 1998). Otro método tiene en cuenta donde se produce la liberación de energía, en este caso cuando el hipocentro se presenta en las zonas de contacto entre placas el evento sísmico se clasifica como un sismo tectónico o interplaca; a su vez, cuando la liberación de energía se produce al interior de las placas tectónicas como cuando

ocurre en fallas geológicas internas activas se habla de sismos interplaca. (García, 1998).

3.2. Amenaza sísmica

Un modelo de amenaza sísmica determina de forma precisa la posibilidad de ocurrencia de movimientos sísmicos con capacidad de generar daños personales y materiales, a partir de este se pueden estimar valores de intensidad esperada para diferentes periodos de retorno y periodos de vibración estructural que permiten diseñar edificaciones e infraestructura capaces de resistir la acción sísmica.

Un adecuado modelo, permite tomar acciones frente a un ordenamiento territorial y planificación urbana, que brindan un escenario de riesgo sísmico y los efectos asociados. (Arcila et al., 2020).

3.3 Zonas de Amenaza Sísmica

3.3.1. Zonificación sísmica de Colombia

La caracterización de zona de amenaza sísmica de la normatividad Colombiana establecida en la NSR-10, establece 3 zonas: zona de amenaza sísmica alta, media y baja, de acuerdo a los parámetros de A_a (Coeficiente que representa la aceleración horizontal pico efectiva) y A_v (Coeficiente que representa la velocidad horizontal pico efectiva). Como se observa en la figura 1 y tabla 1 de la NSR-10.

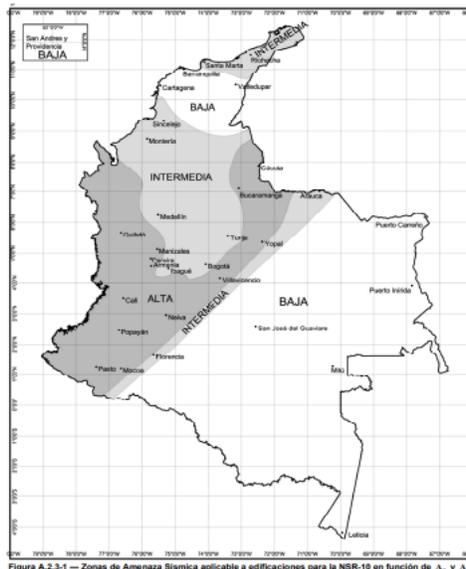


Figura 1. Zonas de Amenaza Sísmica aplicable a edificaciones para la NSR-10 en función de A_a y A_v . Fuente: Tomado de NSR10

Parámetros de A_a (Coeficiente de la aceleración horizontal pico efectiva) y A_v (Coeficiente que representa la velocidad horizontal pico efectiva).

Tabla A.2.3-1
Nivel de amenaza sísmica según valores de A_a y de A_v

Mayor valor entre A_a y A_v	Asociado en mapas de las figuras A.2.3-2 y A.2.3-3 a Región N°	Amenaza Sísmica
0.50	10	Alta
0.45	9	Alta
0.40	8	Alta
0.35	7	Alta
0.30	6	Alta
0.25	5	Alta
0.20	4	Intermedia
0.15	3	Intermedia
0.10	2	Baja
0.05	1	Baja

Tabla 1. Nivel de amenaza sísmica según valores de A_a y de A_v . Fuente: Tomado de NSR10

3.3. Dinámica

La dinámica se entiende como el estudio de los cuerpos o conjunto de partículas que están en movimiento, esta se divide en la cinemática, que se ocupa de la geometría del elemento y la cinética, que estudia la relación de las fuerzas que actúan sobre el cuerpo, su masa y su movimiento (García,1998), por lo tanto, el tema central de la dinámica es estudiar y entender la vibración de la estructura cuando está sujeta a una fuerza lateral u horizontal, o a un movimiento sísmico en su base (Chopra,2014).

La respuesta dinámica, por su parte, se encarga de determinar los desplazamientos, velocidades y las aceleraciones, esta puede calcularse mediante un análisis modal, en el cual para su análisis debe tenerse en cuenta las propiedades estructurales como la masa y la rigidez, por otro lado, sus propiedades de vibración como las frecuencias y modos naturales, la combinación de las respuestas modales proporciona la respuesta dinámica de la estructura.

3.4 Componentes sísmicas

Durante un evento sísmico, el movimiento del terreno se mide mediante un registro de la aceleración de sus tres componentes de traslación mutuamente ortogonales, estas se orientan según dos direcciones horizontales arbitrarias y una vertical.

Estas tres direcciones corresponden a las de máxima, una intermedia y mínima intensidad cuadrática de las aceleraciones, entre todas las direcciones posibles de las tres componentes en el espacio.

Se han efectuado muchos estudios sobre las propiedades de los espectros de las componentes sísmicas registradas, sin embargo, se dispone de muy poca información sobre las propiedades de los espectros de las componentes principales. (López, 2004)

Teniendo en cuenta que, para el desarrollo de un diseño estructural se parte de lo especificado en una norma de diseño sísmo resistente, que indica considerar principalmente la componente horizontal, dejando con poco estudio la componente vertical y su efecto en las estructuras. Sin embargo, sismos como los de Kobe y Northridge, han dejado evidencia de su importancia, para este último se presentaron aceleraciones verticales de hasta el 85% de la aceleración de la gravedad. (Bozorgnia, 1995).

Por otro lado, se establecen tres campos de influencia de los sismos, campo cercano, campo intermedio y campo lejano, que al estudiarse con un análisis espectral tanto para pseudo-aceleración vertical como para pseudo aceleración horizontal en función de la distancia, permite elaborar un estudio de la respuesta de las estructuras, tanto para la componente horizontal como la vertical.

Se muestra en la Figura 1, espectros de aceleración vertical para los 30 sismos más fuertes de los últimos años en roca, y en la Figura 2, se muestra la relación entre la componente vertical y horizontal de estos mismos 30 sismos, (Ruiz & Sarría, 2002).

4. ESTADO DEL ARTE

La componente vertical sísmica de la respuesta dinámica de las estructuras, a lo largo de los años, no se suele considerar para diseño y con base a su relación con la componente horizontal sísmica se podría utilizar para predecir desplazamientos, aceleraciones, velocidad máxima del terreno y/o espectrales, o, tomando en cuenta aspectos como la magnitud, la distancia del epicentro, la frecuencia o los periodos.

La causa por la que hoy no existe suficiente información, se debe a que en el desarrollo de los diseños de las estructuras se tiene en cuenta solamente las demandas generadas por la componente sísmica horizontal (Vilera & Rivero, 2008); algunos códigos y normas toman la relación entre la componente horizontal y vertical como $2/3$ por la ausencia de otra información (Perea & Esteva, 2005), esto se debe básicamente a uno de los primeros estudios realizado por Newmark (1973) en el que se obtuvieron cocientes de las aceleraciones máximas del terreno del componente vertical entre el horizontal de 33 registros de Estados Unidos. En la Tabla 1 se presentan algunas relaciones de aceleración vertical y horizontal propuestos.

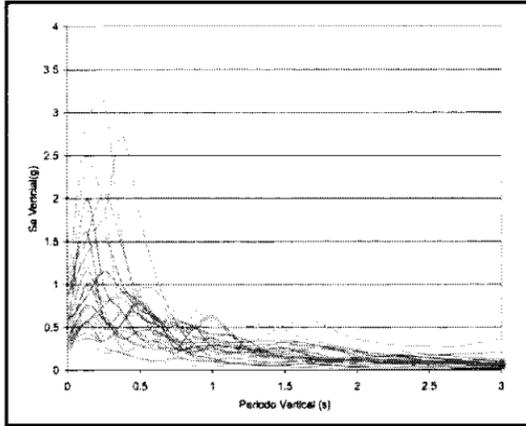


Figura 2. Espectros de aceleración vertical para los 30 sismos más fuertes de los últimos años en roca. Fuente: Tomado de (Ruiz & Sarría, 2002)

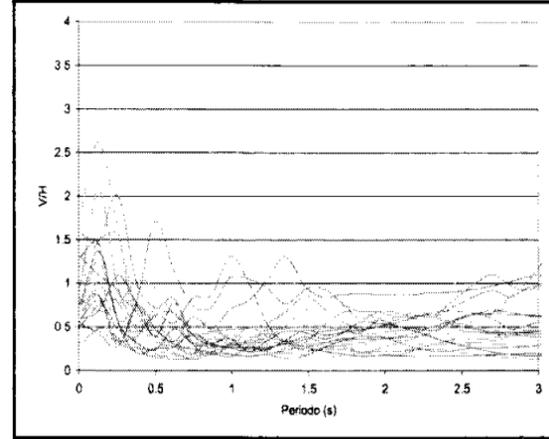


Figura 3. Espectros del cociente V/H en dirección Este-Oeste para los 30 sismos más fuertes de los últimos años. Fuente: Tomado de (Ruiz & Sarría, 2002)

Referencia	Características de los Registros	V/H
Newmark <i>et al.</i> , 1973	33 registros de EE.UU.	2/3
Kawashima <i>et al.</i> , 1985	Registros del Japón	1/5
Ambrasays y Simpson, 1995	104 registros mundiales, $R < 15\text{km}$, $M > 6$, $A_V > 0.1\text{g}$	1.75
Boomer y Martínez, 1996	130 registros, $A_V > 0.2\text{g}$	1.00
Mohammadioun, 1996	Suelos aluviales cercanos a la falla	0.75

Tabla 2. Relaciones de aceleración vertical y horizontal propuestos. Fuente: Tomado de (Perea & Esteva, 2005)

Sin embargo, en la última década Newmark, Kawashima y entre otros autores, como se evidencia en la tabla anterior, han atribuido la mayoría de los daños causados por eventos sísmicos a esta componente vertical, por ejemplo, las aceleraciones de los terremotos mostrados en la Tabla 2 son altas y algunos tienen relaciones PGA_V/PGA_H por encima de 0.5. Esto ha motivado a los investigadores a tener en cuenta los efectos que esta componente induce.

Estos cambios en la relación de PGA_V/PGA_H varían de acuerdo con la distancia epicentral, como se observa entre mayor sea dicha distancia, la incidencia de la PGA_V es menor.

Evento Sísmico	Estación	Magnitud	Tipo de suelo	Distancia Epicentral (km)	Aceleración		
					PGA _v (g) UP	PGA _H (g) NS	PGA _v /PGA _H
Cape Mendocino	Cape Mendocino	7,1	A	8,5	0,754	1,497	0,503
Loma Prieta	Gilroy Array # 1	6,9	A	11,2	0,209	0,411	0,508
Mammoth Lakes	54214 Long Valley Dam	6,1	A	19,7	0,119	0,484	0,246
Palm Sprigs	12206 Silent Valley Poppet	6,0	A	25,8	0,095	0,139	0,679
Notthidge	24399 Mt Wilson	6,7	A	37,8	0,087	0,234	0,372

Tabla 3. Características de registros de eventos sísmicos. Fuente: Tomado de (Bozorgnia & Campbell, 2004)

En el 2004, Bozorgnia y Campbell, realizaron un estudio donde utilizaron 443 acelerogramas de fuente cercana de 36 terremotos en el mundo, encontrando que la relación V/H depende principalmente de las condiciones locales del sitio, la distancia fuente-sitio y el periodo natural, y en menor medida depende de magnitud, mecanismo de falla y profundidad del sedimento (Bozorgnia & Campbell, 2004), estos estudios fueron la base para desarrollar la propuesta de espectro vertical adoptado en la versión de ASCE 7 del año 2016. (Lemus, 2021)

Además, se confirmaron estudios anteriores hechos por Bozorgnia y Niazi (1989 a 1993), y Bozorgnia et al (1995 y 1996), en los que se afirmaba que la relación V/H depende del periodo natural de la estructura, de la distancia entre la fuente y el sitio y de las condiciones de sitio (perfil de suelo), y que guarda menos relación con la magnitud del evento y con la profundidad del sedimento (Lemus, 2021).

Uno de los aportes más recientes corresponde a Kale y Akkar de la Universidad de Ankara en Turquía en el 2020, sus estudios partieron de la comparación de tres códigos de diseño sísmico modernos en los que se tiene en cuenta la componente vertical: (ASCE 7-16 de EEUU, Eurocódigo EC8 y el TBEC18 de Turquía), encontrando que dichos códigos no muestran el comportamiento real de aceleración espectral vertical, por lo que discuten las posibles razones de las diferencias y proponen nuevas expresiones para calcular el espectro de diseño vertical consistente del espectro horizontal a partir de un conjunto de datos simulado completo de ordenadas espectrales verticales y horizontales correlacionadas. (Kale & Akkar, 2020).

4.1. ESPECTROS VERTICALES

En presencia de eventos sísmicos, el terreno está expuesto a movimientos en tres direcciones, sin embargo, en el proceso de diseño solo se tiene en cuenta las componentes asociadas al movimiento horizontal, en la Figura 4 se observa como la aceleración vertical pico (PVA) para el terremoto de N. Palm Springs, 1986, tiene

mayor contenido de frecuencias para la componente vertical en comparación con la horizontal, (Nayak, 2021).

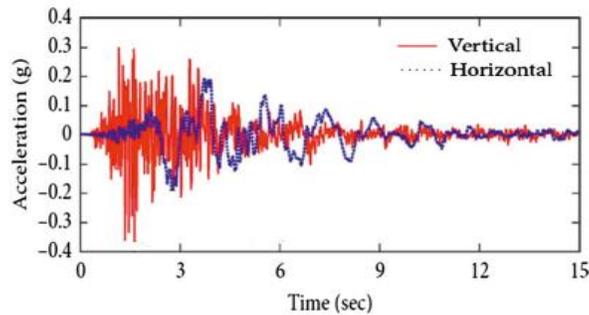


Figura 4. Registros del terremoto de N.Palm Springs earthquake, 1996. Tomado de (Nayak, 2021)

La Figura 5, muestra el comportamiento del movimiento vertical y horizontal del suelo para los terremotos de Tabas y Northridge en 1978, igualmente se puede observar que se presentan mayores contenidos de frecuencia para la componente vertical. Por otro lado, uno de los parámetros principales como lo es el tiempo de llegada de la aceleración pico vertical (PVA) y la aceleración pico horizontal (PHA), se observa que llega primero PVA, cuando esto ocurre debe realizarse un diseño por separado, en cambio, si coinciden debería realizarse un diseño para el efecto combinado (Collier & Elnashai, 2001)

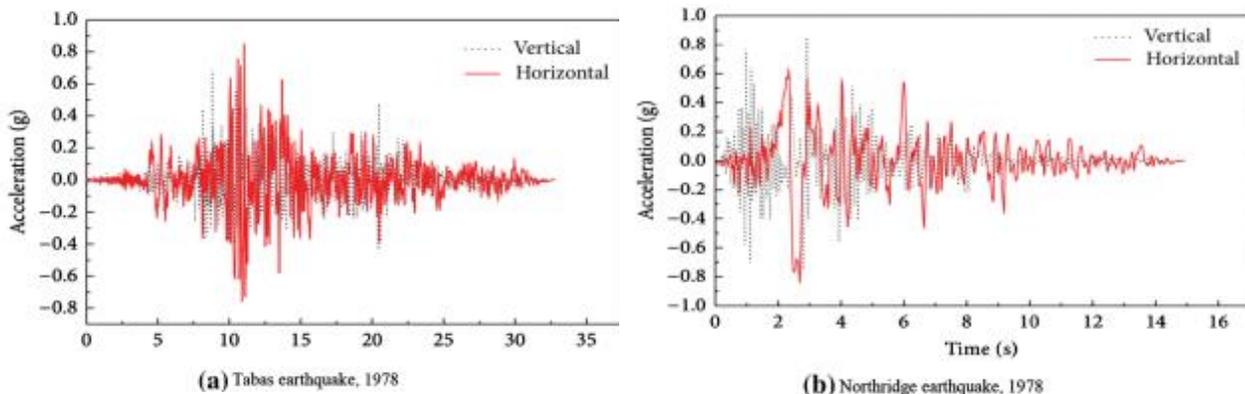


Figura 5. Registros de los terremotos (a) Tabas y (b) Northridge, 199. Fuente: Tomado de (Nayak, 2021)

4.2. NORMATIVAS Y CÓDIGOS DE DISEÑO INTERNACIONALES

A nivel internacional los códigos aportan diversas recomendaciones para evaluar y analizar los efectos causados por la componente sísmica vertical en la respuesta dinámica de las edificaciones, se seleccionan diferentes códigos internacionales y el reglamento nacional NSR-10 con el fin de encontrar las diferencias existentes entre ellos en sus consideraciones de diseño.

COMPARACIÓN ENTRE CÓDIGOS INTERNACIONALES			
CÓDIGO SÍSMICO DE EDIFICIOS DE CANADÁ (NBCC, 1990)	EUROCÓDIGO (CEN, 1994)	NORMA PARA LAS CONSTRUCCIONES ANTISÍSMICAS DE JAPÓN (AIJ, 1990)	REGLAMENTO COLOMBIANO DE CONSTRUCCIÓN SISMO RESISTENTE NSR -10
<p>El código en el apartado correspondiente al movimiento sísmico afirma en cuanto al efecto de la componente vertical que las consideraciones y requerimientos de las cargas gravitacionales tienen la resistencia necesaria para considerar los efectos de la componente vertical en la respuesta dinámica ante los movimientos sísmicos que se presente en el suelo.</p>	<p>El código especifica que la componente vertical se deberá considerar el espectro de respuesta de la componente horizontal tomando en cuenta las siguientes reducciones sobre el periodo de vibración de la estructura (T):</p> <ul style="list-style-type: none"> - Si $T < 0.15$ s, se toma $0.7 \cdot T$ - Si $T > 0.5$ s, se toma $0.5 \cdot T$ - Si $0.15 \text{ s} < T < 0.5$ s, se deberá interpolar linealmente. <p>La componente vertical de fuerza sísmica se considera en 4 casos:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Elementos estructurales horizontales con luces de 20 metros o más. 2. Elementos en voladizo horizontales. 3. Elementos pretensados horizontales. 4. Vigas que soportan columnas. 	<p>Para la evaluación del coeficiente sísmico vertical se define como el 50% de la componente horizontal.</p> $A_v(T_v) = A_H(T_H)/2$	<p>A.2.8.1 – Componente vertical de los movimientos sísmicos La normativa colombiana basa el cálculo de la componente vertical de los movimientos sísmicos como:</p> $E_v = \frac{2}{3} * E_x, \text{ kN}$ <p>A.3.6.13 – Efecto de las aceleraciones verticales. En las zonas amenaza sísmica alta e intermedia se deben evaluar los efectos de los movimientos sísmicos verticales para los elementos en voladizo y elementos preesforzados:</p> <ul style="list-style-type: none"> -Elementos en voladizo se deberá evaluar para una fuerza vertical en la punta del elemento, como el 30% de la carga muerta del voladizo para zonas de amenaza sísmica altas y del 15% para las zonas de amenaza sísmica intermedia -Elementos preesforzados se deberán incluir combinaciones de carga donde se emplee el 50% de la carga muerta

Tabla 4. Comparación códigos internacionales Fuente: Tomado de Kale, O., & Akkar, S. (2020). A new formulation for a code-based vertical design spectrum. Wiley, 1–18.

De acuerdo a las variaciones encontradas en las diferentes consideraciones para la componente vertical, se identifica que en los códigos de diseño no existe un criterio en común que defina los efectos de la componente vertical, se dan diferentes puntos en los cuales para unos códigos es suficiente considerar las cargas gravitatorias mientras que para otras normativas internacionales se relaciona con la componente horizontal en diferentes porcentajes o se considera su alteración sobre el espectro de diseño de la componente horizontal en su periodo de vibración, es importante conocer las diferencias presentadas con el fin de aplicar una evaluación de la componente vertical más real y acertada sobre los diseños realizados, considerando los parámetros que pueden alterar el comportamiento de la componente como, su distancia epicentral, magnitud y condiciones del sitio.

Actualmente, para diseños donde se evalúa la componente vertical con base a la relación horizontal, no se realiza una correcta evaluación del impacto de la componente, ya que no considera las diferencias en parámetros como el periodo, donde se debe tener en cuenta cada dirección, se deberá realizar un análisis en la ordenada espectral vertical y la horizontal, a partir de esto se considera importante realizar una estimación del período vertical y la afectación sobre la estructura.

4.3. SISMO DE ARMENIA 1999

Este evento sísmico ocurrido en el año de 1999 afectó zonas del departamento de Quindío y Risaralda, Colombia, con una magnitud de 6.2 en la Escala de Richter y a 17 km de profundidad. Su causa depende principalmente de la zona geográfica, la cual tiene un alto riesgo sísmico debido a la triple unión que ocurre en la esquina de la Placa Sudamericana donde las placas de Nazca y Placa del Caribe convergen entre ellas.

Por otro lado, se presenta una amplificación sísmica causada por la presencia de suelos blandos y formas topográficas favorables para el efecto. (Cardona, 1999).

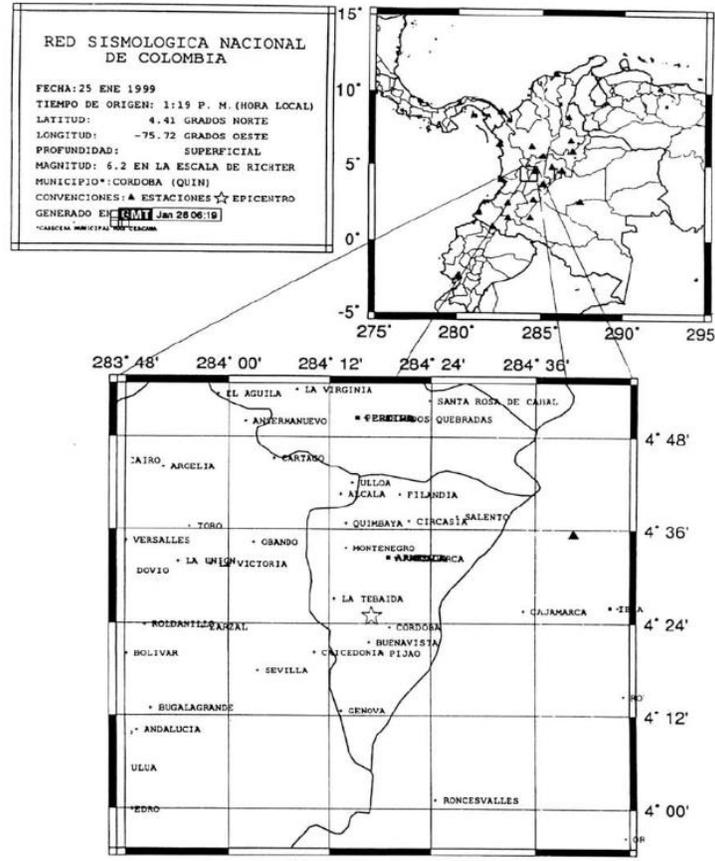


Figura 6. Localización geográfica del epicentro en el departamento del Quindío Fuente: Tomado de (Cardona, 1999)

De acuerdo con las características del suelo donde predominan las cenizas volcánicas de alta plasticidad se evalúa el comportamiento y los registros de aceleración sísmica durante el evento, alcanzando una aceleración de 0.6g, la incidencia de la componente vertical en la zona presentó un resultado alto de 0.45g.

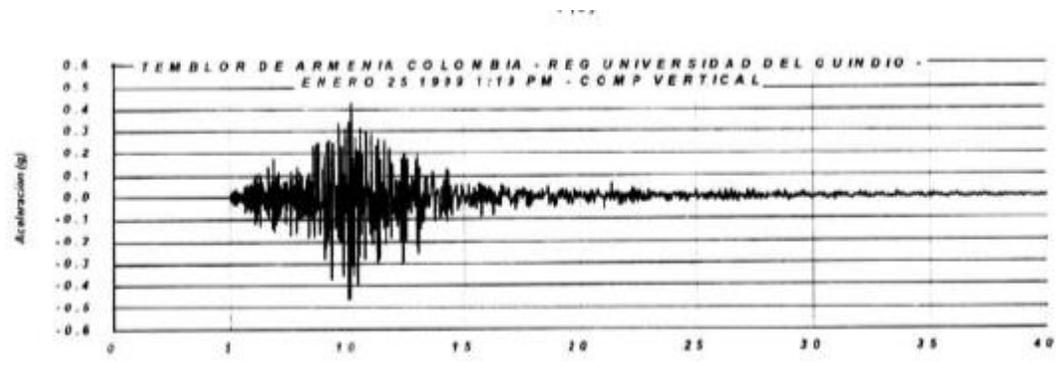


Figura 7. Acelerograma componente vertical. Fuente: Tomado de (Revista Ingeniería Sísmica Universidad del Quindío, 1999)

5. DESARROLLO CASO EJEMPLO

5.1. OBJETO DE ESTUDIO

Con el propósito de determinar la incidencia que tienen factores como: la zona de amenaza sísmica, tipo de suelo y la distancia del epicentro, con la relación entre la envolvente del sismo vertical y la envolvente máxima, se pretende analizar el comportamiento de una estructura típica conformada por dos pórticos de concreto reforzado, asignándole registros con parámetros sísmicos similares al terremoto ocurrido en Armenia, Quindío en el año 1999, con el fin de evaluar la incidencia de la componente vertical sísmica.

Lo anterior, partiendo de un modelo en el software SAP 2000, que contenga 7 registros seleccionados tal que, coincidan o se acerquen a la magnitud presentada en el sismo de Armenia, para con ello, realizar un análisis cronológico que permita desarrollar una validación de la respuesta de elementos estructurales como lo son las vigas, identificando los momentos y cortantes máximos que se presenten.

Una vez obtenidos los resultados, se busca elaborar un análisis sobre la incidencia de la componente vertical y su importancia sobre la estructura, esto permitirá validar que tan correcta es la estimación del comportamiento de la estructura con el sismo real, en caso de encontrar cierta aproximación se podrá basar la metodología de recolección de información como suministro base, en caso de ausencia de información del evento de estudio.

5.2. RESPUESTA E INDICADORES PARA CONSIDERAR EN EL ANÁLISIS

Con el propósito de definir el alcance de este estudio, se establece que el análisis se concentrará en la respuesta de una de las vigas y una losa a través de los siguientes:

Respuesta:

- Momentos máximos de flexión

Indicador:

- Relación entre momentos máximos (Envolvente vertical que considera la componente en X de 6 sismos / Envolvente máxima que considera carga muerta, viva y componente sísmica en X y Y).

5.3. HIPÓTESIS PARA EL ANÁLISIS

Se consideran las siguientes hipótesis para el análisis del edificio:

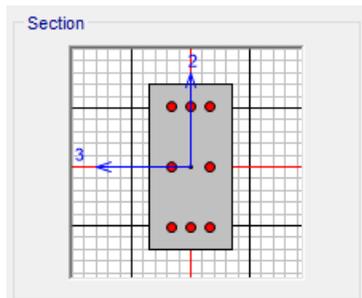
- La losa se comporta axialmente rígida
- Se considera un diafragma rígido, con 3 GDL por piso, (X y Y) horizontales ortogonales y (Z) rotacional con el fin de concentrar las masas en el centro de gravedad del elemento.

- Los elementos se consideran perfectamente adheridos entre sí, sin tener en cuenta algún tipo de articulación en sus conexiones.
- La matriz de masa tendrá su origen de coordenadas en el centroide de modo tal que x y y son cero.
- La tensión es uniforme en todo el elemento, para muros, columnas y vigas.

5.4. DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA

Con el fin de determinar la incidencia de la componente vertical en un evento sísmico, se realiza un modelo para una estructura que consiste en dos pórticos de dos pisos con vigas y columnas en concreto reforzado con las siguientes secciones:

Vigas (0.25m x 0.50m)



Columna (0.50m x 0.50m)

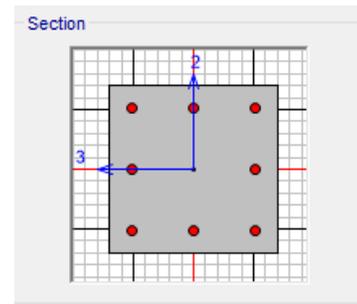


Figura 8. Secciones de vigas y columnas. Fuente: Propia

Los materiales empleados para las secciones realizadas son:

- Concreto $f_c = 28$ MPa
- Acero $f_y = 420$ MPa

5.4.1. PARÁMETROS DE AMENAZA SÍSMICA

El pórtico se encuentra ubicado en la ciudad de Armenia-Quindío, el cual se clasifica como zona de amenaza sísmica alta según apéndice A-4 y los valores correspondientes para A_a , A_v , A_e y A_d de la NSR10.

Departamento del Quindío

Municipio	Código Municipio	A_a	A_v	Zona de Amenaza Sísmica	A_e	A_d
Armenia	63001	0.25	0.25	Alta	0.20	0.10
Buenavista	63111	0.25	0.20	Alta	0.10	0.00
Calarcá	63130	0.25	0.25	Alta	0.20	0.10
Circasia	63190	0.25	0.25	Alta	0.20	0.11
Córdoba	63212	0.25	0.20	Alta	0.20	0.10
Filandia	63272	0.25	0.25	Alta	0.20	0.11
Génova	63302	0.25	0.20	Alta	0.20	0.09
La Tebaida	63401	0.25	0.25	Alta	0.18	0.09
Montenegro	63470	0.25	0.25	Alta	0.19	0.10
Pijáo	63548	0.25	0.20	Alta	0.20	0.10
Quimbaya	63594	0.25	0.25	Alta	0.20	0.10
Salento	63690	0.25	0.25	Alta	0.18	0.09

Tabla 5. Coeficientes A_a , A_v y A_e . Fuente: Tomado de la NSR-10

Para la estructura en estudio se selecciona un tipo de suelo tipo D que de acuerdo a la tabla A.2.4-1 corresponde a un perfil de un suelo denso.

Tabla A.2.4-1
Clasificación de los perfiles de suelo

Tipo de perfil	Descripción	Definición
A	Perfil de roca competente	$\bar{v}_s \geq 1500$ m/s
B	Perfil de roca de rigidez media	1500 m/s > $\bar{v}_s \geq 760$ m/s
C	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	760 m/s > $\bar{v}_s \geq 360$ m/s
	perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con cualquiera de los dos criterios	$\bar{N} \geq 50$, o $\bar{s}_u \geq 100$ kPa (≈ 1 kgf/cm ²)
D	Perfiles de suelos rígidos que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	360 m/s > $\bar{v}_s \geq 180$ m/s
	perfiles de suelos rígidos que cumplan cualquiera de las dos condiciones	$50 > \bar{N} \geq 15$, o 100 kPa (≈ 1 kgf/cm ²) > $\bar{s}_u \geq 50$ kPa (≈ 0.5 kgf/cm ²)

Tabla 6. Clasificación de los perfiles de suelo. Fuente: Tomado de la NSR-10

Se obtiene así un coeficiente F_v asociado al A_v encontrado en la Tabla 4.

Tabla A.2.4-4
Valores del coeficiente F_v , para la zona de periodos intermedios del espectro

Tipo de Perfil	Intensidad de los movimientos sísmicos				
	$A_v \leq 0.1$	$A_v = 0.2$	$A_v = 0.3$	$A_v = 0.4$	$A_v \geq 0.5$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3
D	2.4	2.0	1.8	1.6	1.5
E	3.5	3.2	2.8	2.4	2.4
F	véase nota	véase nota	véase nota	Véase nota	véase nota

Nota: Para el perfil tipo F debe realizarse una investigación geotécnica particular para el lugar específico y debe llevarse a cabo un análisis de amplificación de onda de acuerdo con A.2.10.

Tabla 7. Valores del Coeficiente F_v Fuente: Tomado de la NSR-10

Luego, se obtiene un valor de $F_a=1.3$ mediante la Figura A.2.4-1 como se muestra.

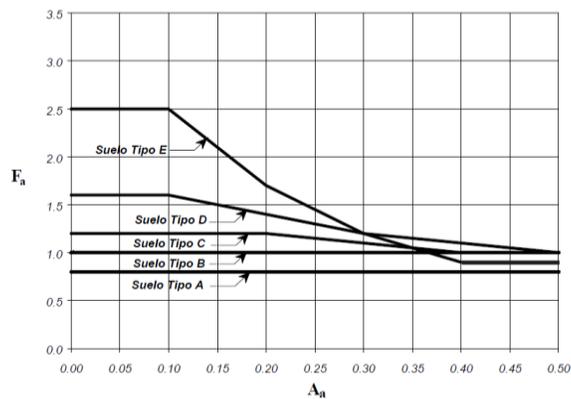


Figura A.2.4-1 - Coeficiente de amplificación F_a del suelo para la zona de períodos cortos del espectro

Figura 9. Coeficiente de amplificación F_a del suelo para la zona de períodos cortos del espectro. Fuente: Tomado de la NSR10

La estructura se define en el grupo de uso de I, que para el caso ejemplo seleccionado corresponde a un edificio residencial de acuerdo a lo establecido en el título A2.5.1.4 Grupo I - Estructuras de ocupación normal con un coeficiente de importancia de 1.0.

Tabla A.2.5-1
Valores del coeficiente de importancia, I

Grupo de Uso	Coeficiente de Importancia, I
IV	1.50
III	1.25
II	1.10
I	1.00

Tabla 8. Valores del coeficiente de importancia I. Fuente: Tomado de la NSR10

Según esto, se tiene la siguiente tabla resumen:

DATOS INICIALES EDIFICACIÓN	
Ubicación	Armenia-Quindío
Zona de amenaza sísmica	Alta
Grupo de uso	I
Tipo de edificación	RESIDENCIAL
Perfil del suelo	TIPO D
Aa	0.25
Av	0.25
Fa	1.3
Fv	1.8
Coeficiente de Importancia I	1.00

Tabla 9. Datos iniciales de la edificación. Fuente: Tomado de la NSR10

Se considera la estructura con una capacidad de disipación de energía especial DES.

A partir de la información anterior, se realiza la modelación en el programa SAP2000 de acuerdo a la asignación de materiales y secciones mencionadas anteriormente para las vigas y columnas.

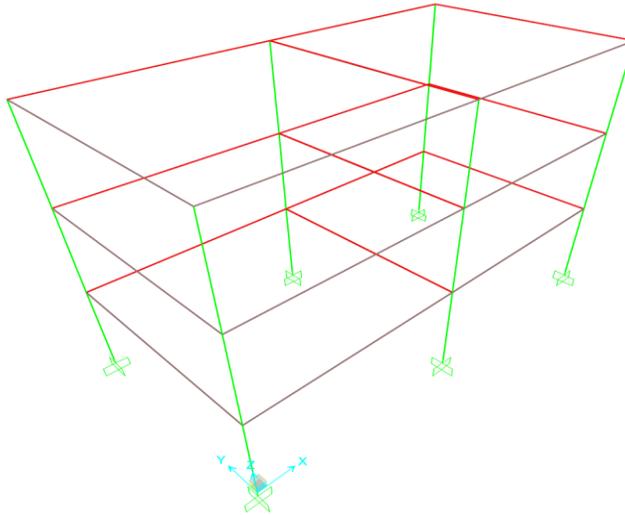


Figura 10. Modelo 3D del pórtico de estudio. Fuente: Propia

5.4.2. COMBINACIONES DE CARGA

En cuanto a las combinaciones de carga empleadas para considerar la componente horizontal, se tomaron las prescritas en el Título B del reglamento NSR-10 y se establecen con el propósito de crear una envolvente comparable con la envolvente sísmica creada para los 7 registros de estudio. Para el alcance de este estudio, no se tiene en cuenta, los efectos de las cargas de granizo ni viento.

Como se muestra, se tienen en cuenta el efecto de solo 2 componentes sísmicas x y y que actuarían en la estructura, la componente vertical se incluye en la envolvente sísmica creada con los 7 registros seleccionados.

- 1.4D
- 1.2D+1.6L
- 1.2D+L+Ex+0.3Ey
- 1.2D+L-Ex-0.3Ey
- 1.2D+L+Ex-0.3Ey
- 1.2D+L-Ex+0.3Ey
- 1.2D+L+0.3Ex+Ey
- 1.2D+L-0.3Ex-Ey
- 1.2D+L+0.3Ex-Ey
- 1.2D+L-0.3Ex+Ey

5.4.3. ASIGNACIÓN DE CARGAS

Dado que todos los niveles cuentan con el mismo uso y distribución, todos los niveles cuentan con las mismas distribuciones de carga.

De los niveles 1 al 2 y cubierta se obtuvo una carga muerta de 10,3 kN/m², esta se obtuvo tal como se muestra en la siguiente tabla:

CARGAS MUERTAS POR NIVEL (m ²)										
NIVEL	Altura Columnas	Área	Columnas	Vigas	Losa	Particiones	Acabados	Inst. y Ductos	Cielo Raso	Total
	[m]	[m ²]	[kg/m ²]	[kg/m ²]	[kg/m ²]	[kg/m ²]	[kg/m ²]	[kg/m ²]	[kg/m ²]	[kN/m ²]
Cubierta	3,0	72	150	150	240	300	180	20	8	10,28
2	3,0	72	150	150	240	300	180	20	8	10,28
1	3,0	72	150	150	240	300	180	20	8	10,28

Tabla 10. Cargas muertas por nivel. Fuente: Propia

En cuanto a la carga viva, se obtuvo los siguientes valores según Tabla B.4.2.1-1 de la NSR 10 _ Cargas vivas mínimas uniformemente distribuidas, en este caso para uso residencial.

CARGAS VIVAS POR NIVEL (m ²)					
Nivel	Área Nivel	Corredores y Escaleras		Cuartos	
Unidad	[m ²]	[kN/m ²]	[m ²]	[kN/m ²]	[m ²]
Cubierta	72,0	3,00			
2	72,0	3,0	72	1,80	72,0
1	72,0	3,0	72	1,80	72,0

Tabla 11. Cargas vivas por nivel. Fuente: Propia

Estas cargas fueron asignadas al modelo de estudio y para cada uno de los registros que se mencionan a continuación.

5.5. DESCRIPCIÓN DE LOS REGISTROS

Con el propósito de evaluar la incidencia de la componente vertical sísmica en la respuesta de la estructura del caso ejemplo, se escogieron 6 registros de diferentes sismos, los cuales tuvieron una magnitud cercana a la presentada en el sismo de Armenia en 1999, a continuación, algunas características de dichos sismos:

Registro	Localización	Magnitud	Tipo de Falla	Profundidad (km)	dt (s)	Máximo valor de G
Parkfield	California, EEUU	6,19	Desplazamiento Lateral	17,64	0,01	0,054
Palm Springs	California, EEUU	6,00	Inversa Oblicua	38,22	0,005	0,095
New Zeland	Christchurch, New Zeland	6,30	Inversa Oblicua	4,9	0,005	0,058
Umbria Marche	Italia	6,00	Normal	17,28	0,005	0,052
Joshua Tree	California, EEUU	6,10	Desplazamiento lateral	17,15	0,005	0,23
Superstition Hills_Imperial Valley	California, EEUU	6,22	Inversa Oblicua	17,59	0,005	0,18

Tabla 12. Descripción de registros del estudio. Fuente: Propia

A continuación, se describirán las características más importantes de cada uno de estos sismos.

5.5.1. Parkfield, 1966, California, EEUU

Este sismo de magnitud 6.9, tiene lugar en la ciudad de Parkfield, la cual está ubicada cerca de la falla de San Andrés, allí se presenta una falla de deslizamiento lateral derecho y un deslizamiento de arrastre “creep”, entre la placa del pacífico y la placa de América del Norte.

Según el Servicio Geológico de EEUU (USGS), al norte de esta zona, en San Juan Bautista, se han presentado grandes terremotos, incluidos San Francisco en 1966 con magnitud 7.9 y Loma Prieta en 1989 con magnitud 6.9, mientras que en la sección sur, no se han producido movimientos sísmicos recientes, por lo que parece estar bloqueada, sin embargo, si se han producido terremotos como el de Fort Tejon en 1857 con una magnitud de 1857.

Como se observa en la imagen se presenta una sección “progresiva” (verde) que separa San Juan Bautista al norte con Cholame al sur, por otro lado la sección roja, correspondiente a Parkfield, que es una zona de transición entre la sección progresiva y la bloqueada en el sur. (USGS, 2004)

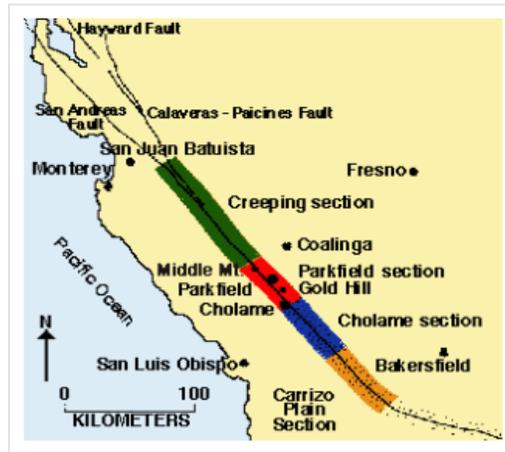


Figura 11. Localización del evento sísmico Parkfield, 1966. Fuente: Tomado de (USGS, 2004)

Como se muestra en el acelerograma de la componente vertical, se tienen valores máximos de 0.4 G y una duración de 44,2 s.

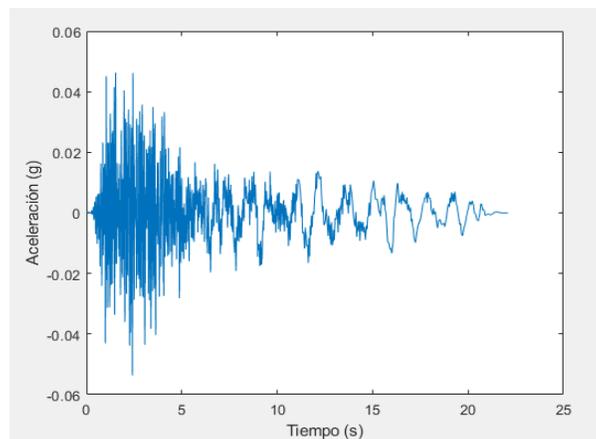


Figura 12. Acelerograma componente vertical Parkfield, California, EEUU. Fuente: Propia

5.5.2. Palm Springs, 1986 California, EEUU

Este sismo de magnitud 6.0, tiene lugar a lo largo de la falla de San Andrés, el epicentro se ubica entre el tramo de Mission Creek y la falla de Banning. Fue el primero de tres terremotos ocurridos al sur de California en 1986, allí se presenta una falla inversa oblicua con una profundidad de 38,22 km, según (Earthquakes in Thousand Palms, California, United States - Most Recent > 6.0M, s. f.)

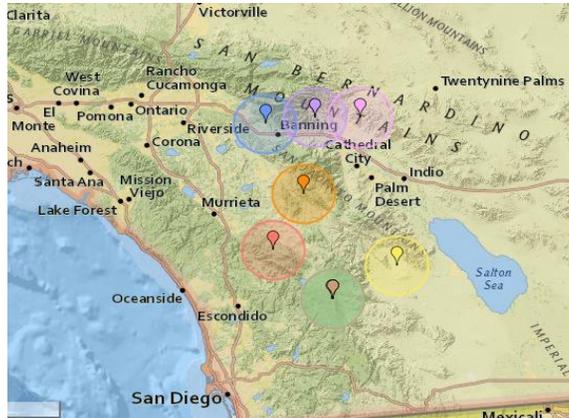


Figura 13. Localización del evento sísmico Palm Springs, 1986. Fuente: Tomado de (Earthquakes in Thousand Palms)

Como se muestra en el acelerograma de la componente vertical, se tienen valores máximos de 0,08 G y una duración de 60 s.

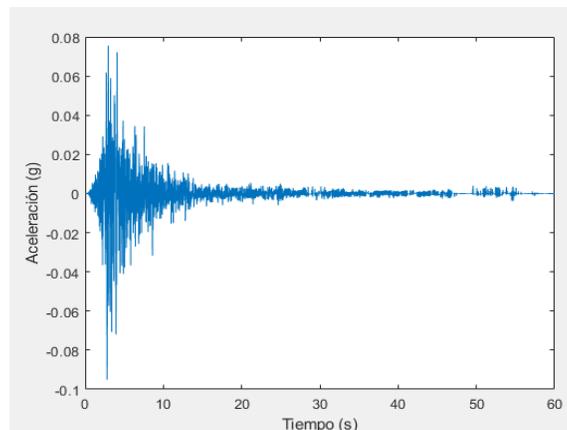


Figura 14. Acelerograma componente vertical Palm Springs, California, EEUU
Fuente: Propia

5.5.3. Christchurch, New Zeland, 2011

Este sismo tuvo una magnitud 6.3 y se presentó a una profundidad de 4,9 km entre la placa del pacífico y la placa de Australasia, según informe del instituto de investigación de ingeniería sísmica EERI, en algunas estaciones se registraron movimientos verticales del suelo inusualmente altos, que a veces excedieron el componente horizontal. Además, los movimientos registrados superaron el espectro de diseño elástico de 2500 años de Nueva Zelanda, por otro lado, este evento ocasionó licuefacción, por lo que se observaron fenómenos de ebullición de arena, asentamiento, levantamiento y extensión lateral, según (Internet Geography, 2022)

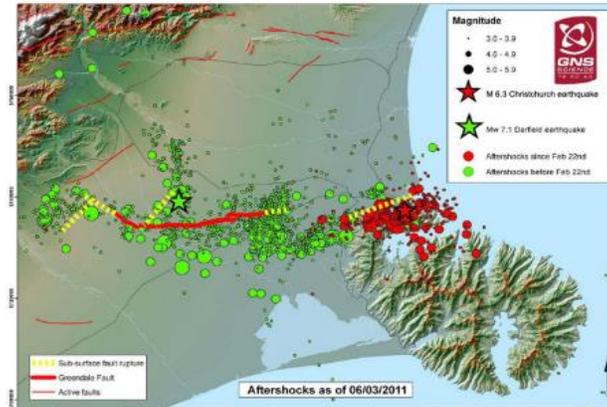


Figure 1. Location of epicenter and aftershock sequence from the M 7.1 September 4, 2010, Darfield (Canterbury) and M 6.3 February 22, 2011, Christchurch earthquakes (source: GNS).

Figura 15. Localización del epicentro y secuencia de la réplica. Fuente: Tomado de (Internet Geography, 2022)

Como se muestra en el acelerograma de la componente vertical, se tienen valores máximos de 0,05 G y una duración de 30 s.

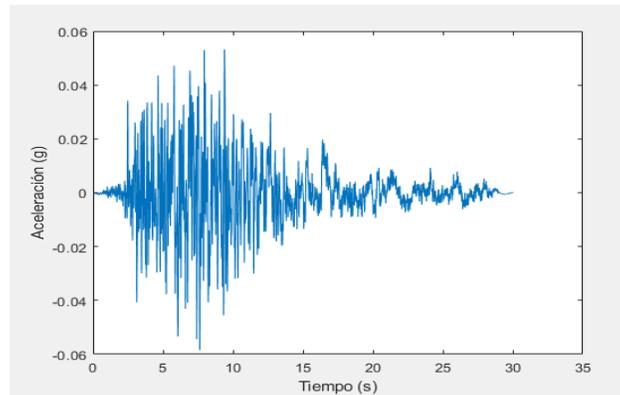


Figura 16. Acelerograma componente vertical Christchurch, New Zeland. Fuente: Propia

5.5.4. Umbria Marche, 1997 Italia

Este sismo de magnitud de 6.0 con epicentro en el área de Colfiorito, Annifo, tuvo una intensidad máxima del IX grado Mercalli, su origen inicial con movimiento telúricos en la provincia de Perugia y en los Apeninos de umbría - Marcas con una profundidad de 9.8 km, el sismo generó una secuencia de eventos telúricos generando una secuencia de 7 sismos con magnitudes que oscilan entre 5.0 y 6.0, dada esta secuencia se genera una activación en el sistema de fallas extendiéndose 5 km por el territorio Apeninos de Umbría. La falla que representa a este sismo corresponde a una falla normal o extensionales que produce un desplazamiento de una corteza respecto a la otra de 8km para este sistema de fallas.

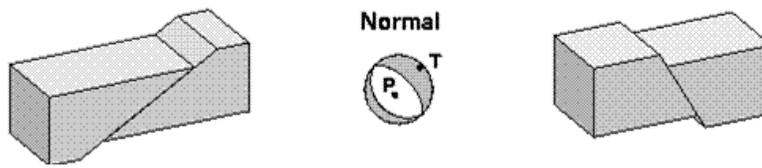


Figura 17. Falla normal. Fuente: Tomado de: <https://rsn.ucr.ac.cr/documentos/educativos/geologia>



Figura 18. Epicentro sismo Umbria-marche. Fuente: Tomado de: <https://rsn.ucr.ac.cr/documentos/educativos/geologia>

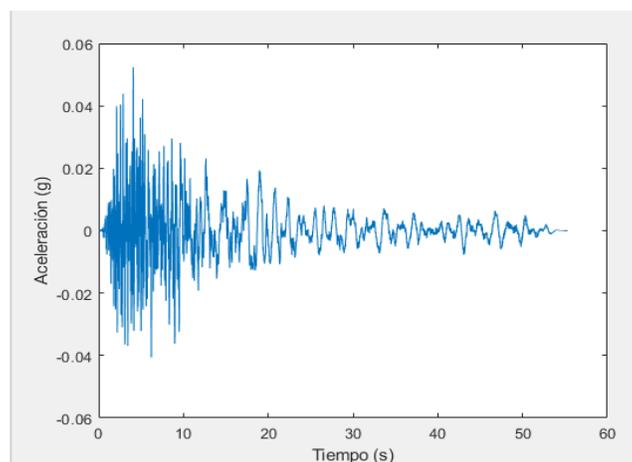
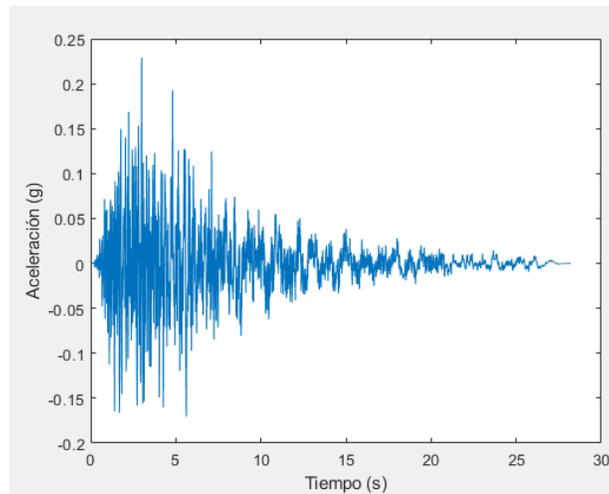


Figura 19. Acelerograma componente vertical Umbria Marche, Italia. Fuente: Propia

5.5.5. Joshua Tree, California, 1992

Este sismo de 6.1 de magnitud tiene lugar al este del desierto Springs, su tipo de falla corresponde a una falla por deslizamiento lateral derecho, dada a su proximidad a la falla san Andrés y su profundidad de 12.4 km, este sismo contemplaba la posibilidad de que se generará una réplica a lo largo de la falla san andrés, a partir de investigaciones realizadas del sitio concluyen que contempla un suelo donde predominan la presencia de rocas ígneas y metamórficas las cuales definen el comportamiento de esta falla que es consistente a la estructura geológica del sitio.



*Figura 20. Acelerograma componente vertical Joshua Tree, California, EEUU.
Fuente: Propia*

5.5.6. Imperial Valley (1979) / Superstition Hills (1987)

El sismo Imperial Valley tiene lugar en California con una magnitud de 6.22, a lo largo de la falla imperial, falla comprendida por un sistema de fallas localizadas en el condado de imperial al sur de california, el periodo del sismo registrado es de 0.316 segundos, con una duración total del evento sísmico de 65 segundos, el cual tuvo una aceleración máxima de 0.21g.

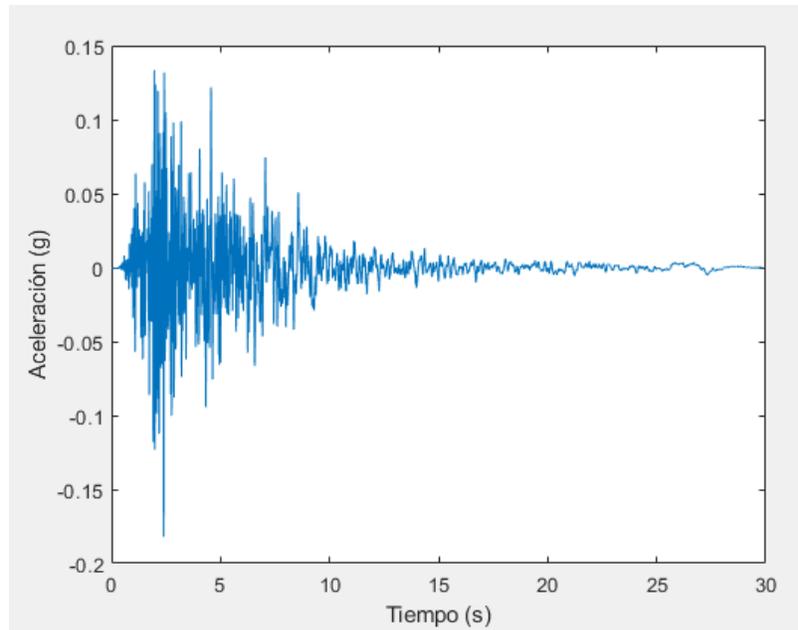


Figura 21. Acelerograma componente vertical. Imperial Valley (1979) / Superstition Hills. Fuente: Propia

Conocidas las características de los registros, se realiza un análisis cronológico que permita desarrollar una validación de la respuesta de elementos estructurales, como vigas y losas, para posteriormente, identificar los momentos y cortantes máximos que se presenten.

A continuación se describe el procedimiento para desarrollar el análisis cronológico:

6. ANÁLISIS TIEMPO HISTORIA SAP2000

6.1. Procedimiento de carga de registros

El análisis dinámico lineal tiempo-historia, se realizó de la siguiente forma:

1. Definir función tiempo historia: Define>Functions>Time History

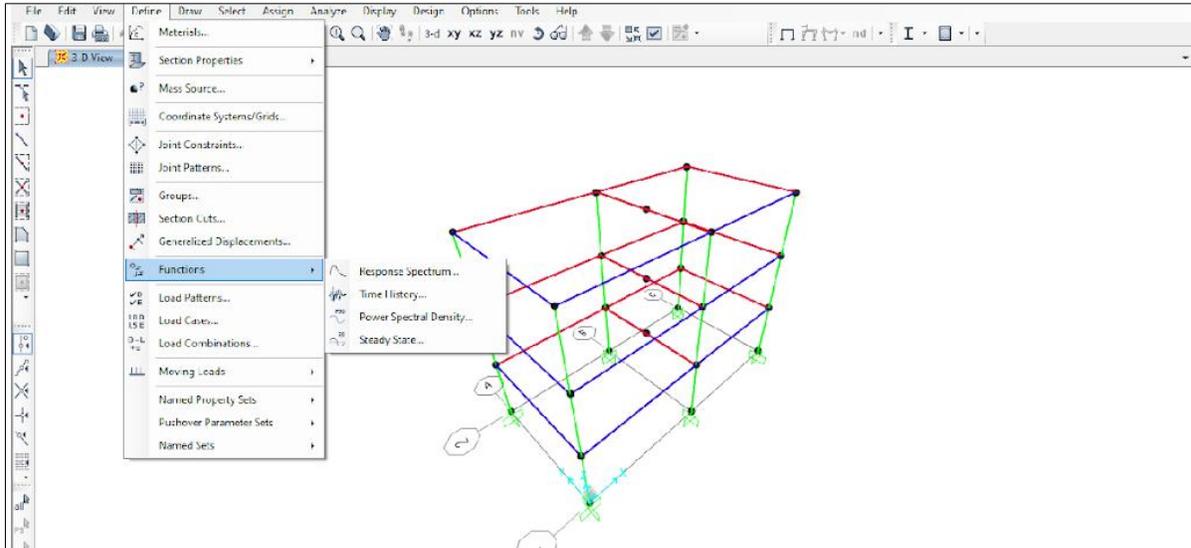


Figura 22. Definición de la función tiempo-historia. Fuente:Propia

2. Definir tipo de función y adicionar: From File>Add New Function

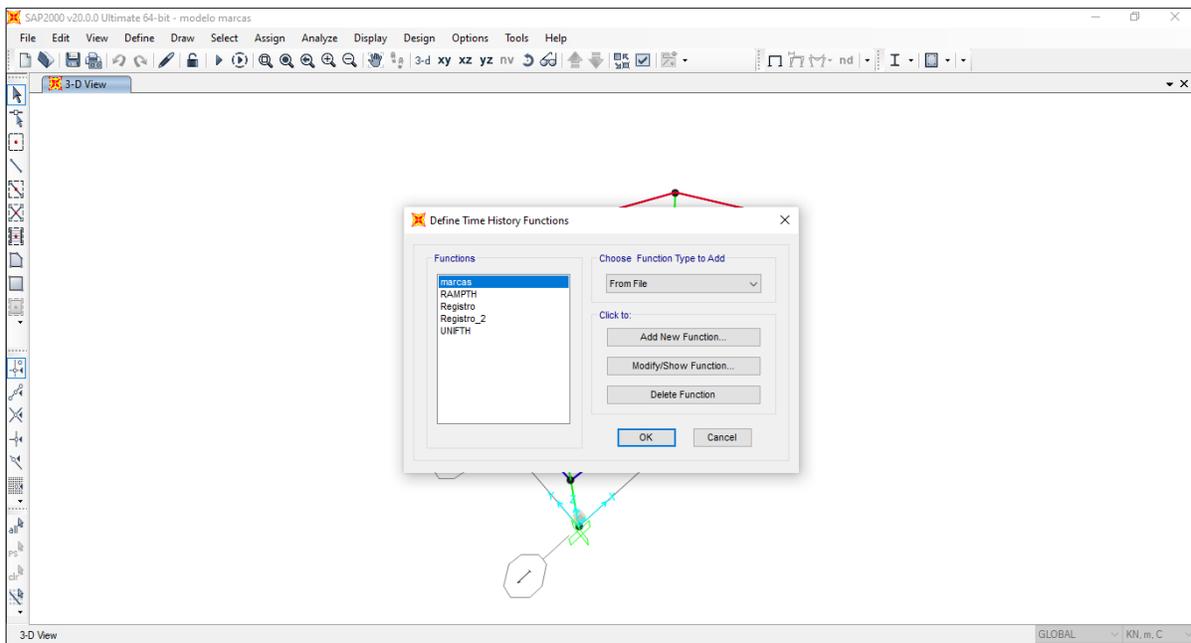


Figura 23. Definición de cada registro de estudio. Fuente:Propia

3. Adicionar un registro a partir de un archivo de texto, digitar el nombre de la función y el dt correspondiente. File Name "Marcas">Browse>Buscar registro>Values at Equal Intervarls of> digitar paso 0.005.

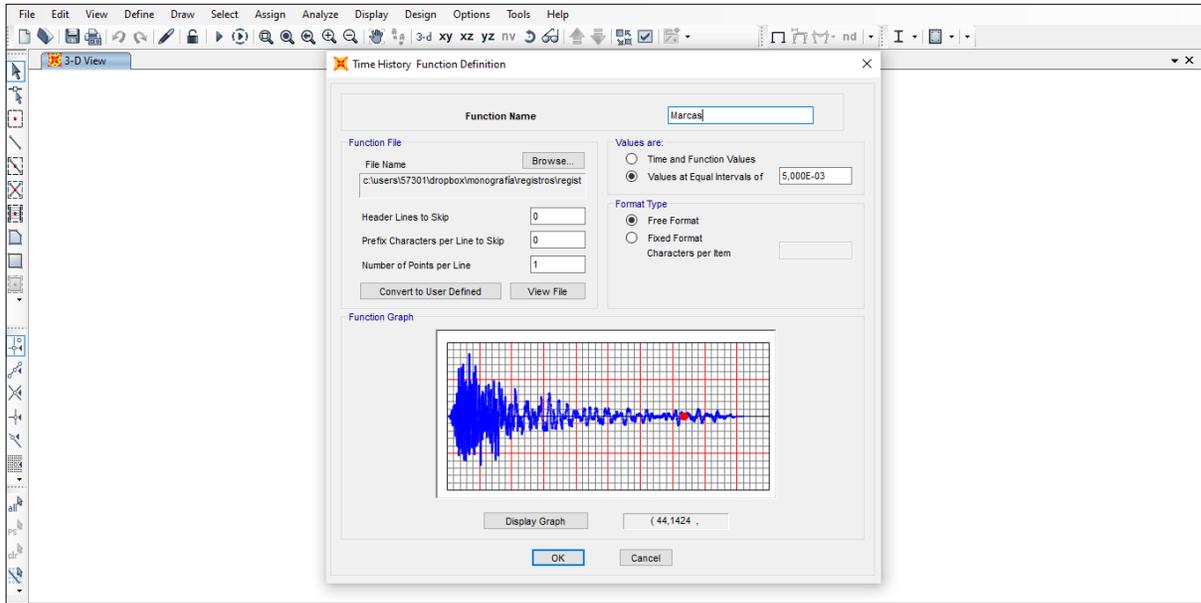


Figura 24. Definición de características de los registros. Fuente: Propia

A continuación, para cada uno de los registros se define un caso de carga de tipo Linear Direct integration history, teniendo en cuenta que es un análisis de tipo lineal, y de integración directa.

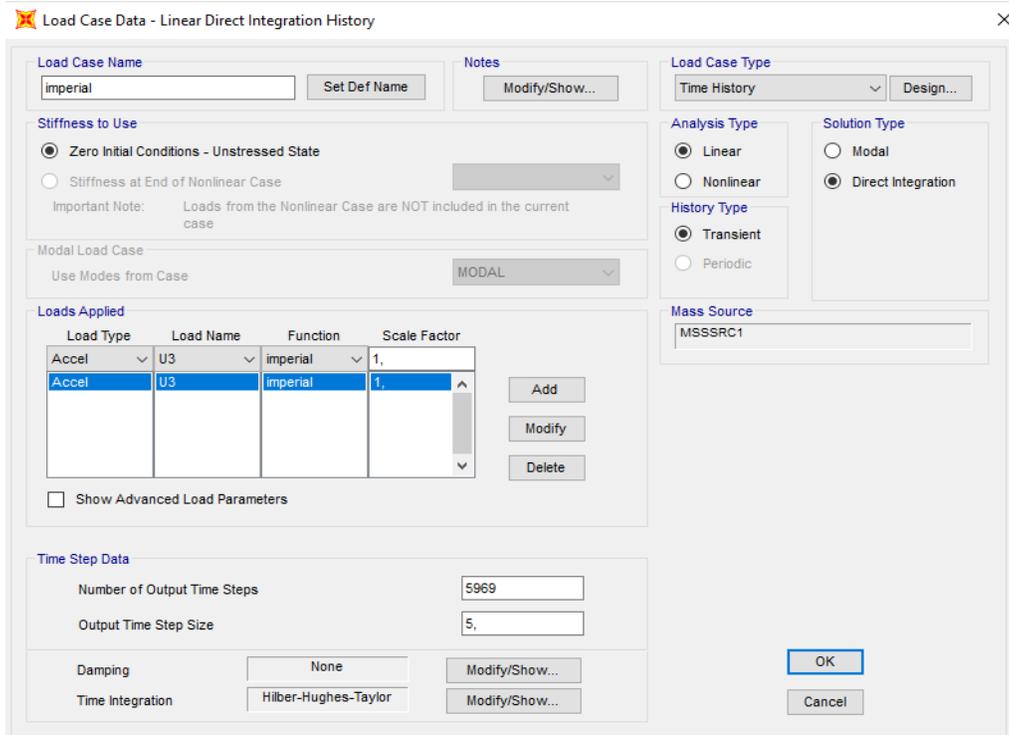


Figura 25. Definición de un caso de carga de tipo Linear Direct integration history. Fuente: Propia

Cada registro debe ser afectado por un factor que tenga en cuenta lo siguiente:

-Los registros contienen valores de aceleración en unidades de g, por lo tanto, se debe considerar un valor de 9.81 en el factor.

-Para escalar los valores de las aceleraciones al máximo valor de aceleración que se presentó en el sismo de Armenia el cual, fue de 0.45g, tal como se muestra en la figura 6. Acelerograma componente vertical, se debe afectar cada registro en un valor de 0.45.

-Los registros fueron tomados de estaciones posicionadas en roca, mientras que el modelo de pórticos, se establece en suelo tipo D, por lo tanto debe amplificarse en un factor de $F_a=1.3$.

-Se debe considerar que la estructura tiene una capacidad de disipación de energía especial DES, por lo tanto se debe tener en cuenta un valor de 7, que permita reducir las fuerzas sísmicas a la respuesta inelástica.

De acuerdo a lo anterior, los factores para cada uno de los registros fueron los siguientes:

Registro	Máximo valor de G	Cálculo del factor	Factor
Parkfield	0,054	Max Abs del registro*9,81*1,3 / 7	8,39
Palm Springs	0,095	Max Abs del registro*9,81*1,3 / 7	8,62
New Zeland	0,058	Max Abs del registro*9,81*1,3 / 7	14,02
Umbria Marche	0,052	Max Abs del registro*9,81*1,3 / 7	15,65
Joshua Tree	0,23	Max Abs del registro*9,81*1,3 / 7	3,58
Superstition Hills_Imperial Valley	0,18	Max Abs del registro*9,81*1,3 / 7	4,50

Tabla 13. Factores que afectan cada registro. Fuente: Propia

7. EVALUACIÓN DEL ANÁLISIS TIEMPO HISTORIA

De acuerdo con los objetivos planteados, a continuación, se mostrará el comportamiento de la estructura típica de pórticos de concreto reforzado, se profundizará en la respuesta de una de las vigas, con el propósito de evaluar la incidencia de la componente vertical sísmica.

7.1. ELEMENTOS A ANALIZAR

Los elementos estructurales a analizar son los siguientes:

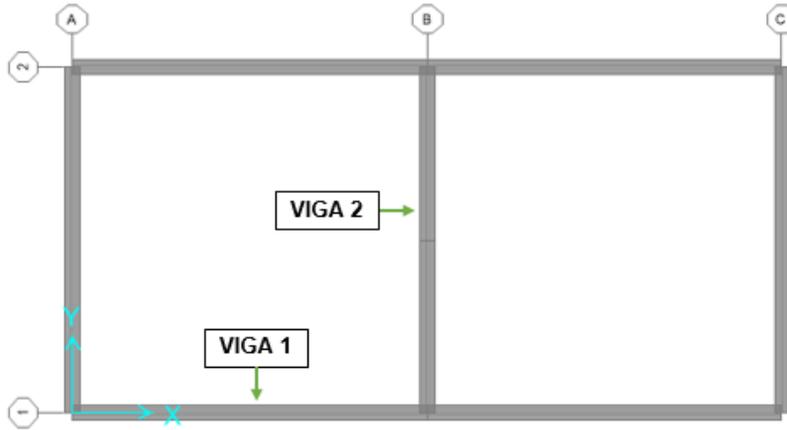


Figura 26. Elementos estructurales a analizar. Fuente: Propia

Viga 1: Viga exterior Eje 1, entre Eje A y Eje B 1

Viga 2: Viga interior entre Eje B, Eje 1 y Eje 2

Para estos elementos, se crea una combinación tipo envolvente, la cual está compuesta por las combinaciones ya establecidas en 5.4, y en donde solo se tiene en cuenta las componentes x y y (Envolvente Máxima), por otro lado, una combinación que incluye la componente vertical, por medio de los 6 registros propuestos (Envolvente Vertical), para las últimas, se tuvo en cuenta un factor que amplifica debido al tipo de suelo en un 30% debido al tipo de suelo y un factor que reduce, debido a la capacidad de disipación de energía R, tal como se menciona en 5.8.1.

Los puntos de verificación para la comparación de los resultados fueron los apoyos de los dos tipos de vigas como se muestra en la figura 27.

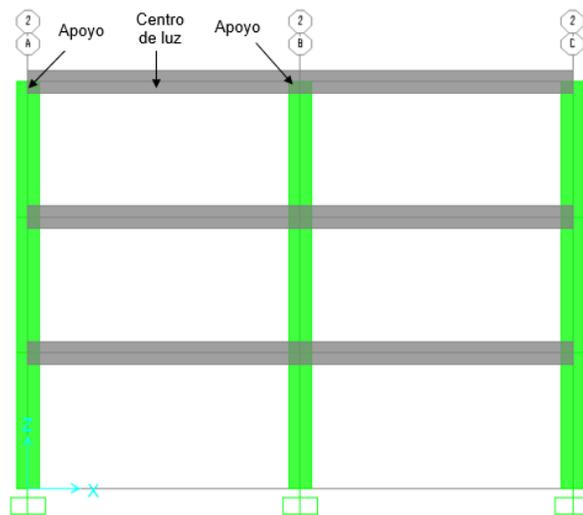


Figura 27. Elementos a analizar y puntos. Fuente: Propia

8. RESULTADOS

Para la revisión de las solicitaciones de mayor importancia, se tomaron las combinaciones definidas en el numeral 5.5 “Combinaciones de carga”. Para este capítulo, se presentan los resultados que se obtuvieron en la metodología explicada en el numeral 5.9. “Evaluación del análisis tiempo historia”.

8.1. Resultados para la relación entre la envolvente máxima y la envolvente vertical.

Se muestran los valores del momento máximo que toma cada envolvente:

Momento (kNm)				Momento (kNm)			
Viga 1_Apoyo				Viga 2_Apoyo			
Envolvente	Cubierta	Nivel 2	Nivel 1	Envolvente	Cubierta	Nivel 2	Nivel 1
Envol. Máxima	-86,23	-113,67	-126,09	Envol. Máxima	-152,29	-212,28	-209,03
Envol.Vertical	-41,22	-40,87	-30,38	Envol.Vertical	-116,59	-98,86	-87,68

Tabla 14. Momento máximo que toma cada envolvente por nivel. Fuente: Propia

Estos resultados fueron obtenidos mediante la evaluación de la envolvente máxima y la envolvente vertical, en cada uno de los niveles y para cada viga de estudio. Los resultados de la viga 1, se muestran en el anexo.

Una vez encontrados los valores más críticos de momento para cada una de las envolventes, se calcula la relación entre estos dos resultados, de tal forma que se obtenga una magnitud de variación de la respuesta.

$$\text{Incidencia en la respuesta} = \frac{\text{Momentos Envolvente Vertical}}{\text{Momento envolvente Máxima}}$$

Momento (kNm)			
Viga 1_Apoyo			
Envolvente	Cubierta	Nivel 2	Nivel 1
Envol. Máxima	-86,23	-113,67	-126,09
Envol.Vertical	-41,22	-40,87	-30,38
% Incidencia	47,8%	36,0%	24,1%

Tabla 15. Incidencia de la envolvente vertical en la envolvente máxima Viga 1. Fuente: Propia

Momento (kNm)			
Viga 2_Apoyo			
Envolvente	Cubierta	Nivel 2	Nivel 1
Envol. Máxima	-152,29	-212,28	-209,03
Envol.Vertical	-116,59	-98,86	-87,68
% Incidencia	76,6%	46,6%	41,9%

Tabla 16. Incidencia de la envolvente vertical en la envolvente máxima Viga 2. Fuente: Propia

8.2. Variación de la incidencia de la componente vertical sísmica en los niveles de la estructura.

Adicionalmente, con el propósito de estudiar la incidencia de la componente vertical sísmica en cada uno de los niveles de la estructura y por cada una de las vigas, se presentan los momentos, el % de variación y su diferencia para cada viga.

Tipo Envol./Nivel	Viga 1 Cubierta	Viga 2 Cubierta	Viga 1 Nivel 2	Viga 2 Nivel 2	Viga 1 Nivel 1	Viga 2 Nivel 1
Envol. Máxima	-86,23	-152,29	-113,67	-212,28	-126,09	-209,03
Envol. Vertical	-41,22	-116,59	-40,87	-98,86	-30,38	-87,68
% Variación	47,8%	76,6%	36,0%	46,6%	24,1%	41,9%
Diferencia		28,8%		10,6%		17,9%

Tabla 17. Variación en la incidencia de la componente vertical sísmica en todos los niveles de la estructura. Fuente: Propia

8.3. Resultados para la relación entre la incidencia de la componente vertical y la distancia epicentral.

Por otro lado, se muestra el momento en el apoyo de la Viga V1, de cada registro seleccionado para la estructura:

MOMENTO (kN.m)				
Viga 1_ Apoyo				
Tipo de envolvente		Nivel 1	Nivel 2	Cubierta
Envol. Horizontal	(+)	6,2851	3,3438	-17,1164
	(-)	-119,2868	-113,6737	-86,2297
Registro		Momento (kN m)		
Imperial	(+)	19,6084	24,8918	15,3272
	(-)	-19,9273	-24,3602	-15,7365
Joshua	(+)	29,8093	25,112	27,5206
	(-)	-30,3816	-25,2226	-28,5957
Marcas	(+)	19,9845	30,5998	25,3018
	(-)	-20,3125	-30,5975	-25,2143
New Zeland	(+)	24,6193	39,7298	42,5213
	(-)	-26,6253	-39,4762	-42,8416
Palm	(+)	22,3387	22,6376	18,6043
	(-)	-22,239	-23,2681	-17,539
Park	(+)	24,5565	34,1394	25,6468
	(-)	-25,0146	-34,2759	-24,9222

Tabla 18. Resultados para la relación entre la incidencia de la componente vertical y la distancia epicentral. Fuente: Propia

Las gráficas para los registros se encuentran en el Anexo **6.1.4. VIGA 1 “Momentos de cada sismo”**

Se refleja la participación de cada uno de los sismos y el comportamiento de la envolvente máxima en la siguiente tabla:

Registro	%Participación Cubierta
Imperial Valley	18%
Joshua Tree	33%
Umbria Marche	29%
New Zeland	50%
Palm Springs	20%
Parkfield	29%

Tabla 19. Participación de cada uno de los sismos en la cubierta. Fuente: Propia

8.4. Resultados para la relación entre la incidencia de la componente vertical en la zona de amenaza sísmica.

Como ya se había mencionado en el marco teórico, se define como amenaza sísmica, a la probabilidad estadística de que un parámetro como la velocidad, aceleración y desplazamiento provocado por un evento sísmico, supere un nivel de referencia, dicho nivel está asociado a una ubicación geográfica.

A continuación, se muestran las caracterizaciones de zona sísmica para cada uno de los registros de estudio.

Viga 1 Interior

Registro	Localización	Zona de Amenaza Sísmica	% de Incidencia			Máximo % de incidencia
			Nivel 1	Nivel 2	Cubierta	
Parkfield	California, EEUU	Alta "Mayor Peligro"	21%	32%	29%	32%
Palm Springs	California, EEUU	Alta "Mayor"	19%	21%	21%	21%
New Zeland	Christchurch, New Zeland	Alta	22%	36%	50%	50%
Umbria Marche	Italia	Alta	17%	28%	30%	30%
Joshua Tree	California, EEUU	Alta "Mayor Peligro"	25%	23%	34%	34%
Superstition Hills_Imperial Valley	California, EEUU	Alta "Mayor Peligro"	17%	22%	19%	22%

Tabla 20. Zona de amenaza sísmica para cada registro de estudio, Viga 1

Viga 2 Exterior

Registro	Localización	Zona de Amenaza Sísmica	% de Incidencia			Máximo % de incidencia
			Nivel 1	Nivel 2	Cubierta	
Parkfield	California, EEUU	Alta "Mayor"	36%	45%	47%	47%
Palm Springs	California, EEUU	Alta "Mayor"	33%	27%	32%	33%
New Zeland	Christchurch, New Zeland	Alta	37%	48%	76%	76%
Umbria Marche	Italia	Alta	29%	38%	49%	49%
Joshua Tree	California, EEUU	Alta "Mayor Peligro"	42%	33%	55%	55%
Superstition Hills_Imperial Valley	California, EEUU	Alta "Mayor Peligro"	25%	28%	28%	28%

Tabla 21. Zona de amenaza sísmica para cada registro de estudio, Viga 2

8.5. Resultados para la relación entre la incidencia de la componente vertical y tipo de falla.

El tipo de falla de cada uno de los sismos se resume en la siguiente tabla con su correspondiente descripción:

REGISTROS	TIPO DE FALLA	DESCRIPCIÓN DE LA FALLA
Parkfield Joshua Tree	Desplazamiento lateral	<p>La falla se describe como el movimiento ocurrido en una dirección paralela a la dirección donde ocurre el evento de falla, este tipo por lo general ocurren en grandes extensiones. Debido al tipo de suelo allí presente por lo que se genera un valle a partir del suelo predominando de tipo roca.</p> <p>En este tipo de falla no se alcanza a generar una pendiente o inclinación diferente respecto a los niveles de los bloques.</p>

Palm Springs New Zealand Superstition Hills Imperial Valley	Inversa Oblicua	En la falla inversa oblicua se lleva el movimiento el bloque de un nivel superior genera un movimiento respecto al bloque del nivel inferior en dos direcciones paralela a la falla y desplazada en un plano de buzamiento
Umbria Marche	Normal	Una falla normal ocurre cuando se genera un desplazamiento de un bloque respecto al otro generalmente presenta un corte de 60°
Armenia	Sinestral normal	La falla se caracteriza por tener un movimiento paralelo a su línea de desplazamiento horizontal y adicional a la línea de buzamiento por lo cual esta falla presenta un desplazamiento lateral y vertical. En este sismo particularmente la falla de buzamiento es de 67°.

Tabla 22. Incidencia de la componente vertical y tipo de falla de cada registro

A continuación, se muestra el máximo % de incidencia para cada uno de los niveles, por registro y por tipo de falla

Viga 1 Exterior

Registro	Tipo de Falla	% de Incidencia			Máximo % de incidencia
		Nivel 1	Nivel 2	Cubierta	
Parkfield	Desplazamiento lateral	21%	32%	29%	32%
Joshua Tree		25%	23%	34%	34%
Palm Springs	Inversa Oblicua	19%	21%	21%	21%
New Zealand		22%	36%	50%	50%
Superstition Hills_Imperial Valley		17%	22%	19%	22%
Umbria Marche	Normal	17%	28%	30%	30%

Tabla 23. Porcentaje de incidencia de la componente vertical y tipo de falla, Viga 1

Viga 2 Interior

Registro	Tipo de Falla	% de Incidencia			Máximo % de incidencia
		Nivel 1	Nivel 2	Cubierta	
Parkfield	Desplazamiento lateral	36%	45%	47%	47%
Joshua Tree		42%	33%	55%	55%
Palm Springs	Inversa Oblicua	33%	27%	32%	33%
New Zealand		37%	48%	76%	76%
Superstition Hills_Imperial Valley		25%	28%	28%	28%
Umbria Marche	Normal	29%	38%	49%	49%

Tabla 24. Porcentaje de incidencia de la componente vertical y tipo de falla, Viga 2

9. ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación, se realizará un análisis de los resultados obtenidos en la sección anterior, con la finalidad de cumplir con los objetivos planteados al inicio de esta monografía, los cuales se enfocan en 3 aspectos de estudio:

Inicialmente, realizar un comparativo de las estimaciones que se han dado por diferentes investigadores de la relación entre la componente vertical y horizontal sísmica en la respuesta dinámica de las estructuras, esto se desarrolló en el capítulo 4, allí se compilaron los diferentes valores de relaciones (V/H) propuestos por autores a lo largo de la historia y se realizó una comparación de las normativas y códigos de diseño internacionales.

Seguido de esto, se establece analizar el comportamiento de una estructura típica conformada por dos pórticos de tres niveles de concreto reforzado, asignándole registros con parámetros sísmicos similares al terremoto ocurrido en Armenia, Quindío en el año 1999, con el fin de evaluar efectos del sismo vertical en los momentos que se generan en las vigas de una estructura sencilla de concreto reforzado, esto se desarrolla en las secciones 7.1 y 7.2.

Y por último, se plantea determinar la incidencia que tienen factores como la zona de amenaza sísmica, tipo de suelo, tipo de falla y distancia del epicentro, en relación con los efectos que genera el sismo vertical en los momentos presentados en las vigas de una estructura sencilla de concreto reforzado, esto se desarrolla en las secciones 7.3 y 7.4.

9.1. Análisis de resultados para la relación entre la envolvente máxima y la envolvente vertical sísmica.

Se seleccionaron dos vigas por considerarse representativas de las restantes que hacen parte de la estructura, una viga es exterior y la otra interior, los resultados obtenidos de la incidencia o efectos del sismo vertical en los momentos que se generan en las vigas corresponden a los extremos de estas, es decir, los apoyos y por cada nivel: cubierta, nivel 2 y nivel 1.

Los resultados de la primera parte se centran en las relaciones entre la envolvente vertical sísmica y la envolvente de combinaciones, que considera carga muerta, viva y sísmica horizontal, por lo tanto se analizan estas relaciones para los 2 tipos de vigas (externa e interna), en uno de sus apoyos.

Para la viga 1 en el apoyo, se presenta un valor de 126,09 kN.m como momento máximo de la envolvente horizontal, un valor de 41,22 kN.m como momento máximo de la envolvente vertical y un % de incidencia de 47,8%. Esto nos indica que no se superan los valores de la envolvente máxima.

Momento (kNm)			
Viga 1 Apoyo			
Tipo envol./Nivel	Cubierta	Nivel 2	Nivel 1
Envol. Horizontal	-86,23	-113,67	-126,09
Envol. Vertical	-41,22	-40,87	-30,38
% Variación	47,8%	36,0%	24,1%

Tabla 25. Relación entre la envolvente horizontal y vertical sísmica, Viga 1.

Por otro lado, para la viga 2, se presenta un valor de 212,28 kNm como momento máximo de la envolvente, un valor de 116,59 kNm como momento máximo de la envolvente vertical, obteniéndose un % de incidencia del 76,6%. Esto nos indica que hay gran participación de los efectos de la envolvente vertical, sin embargo, estos no superan la envolvente máxima.

Momento (kNm)			
Viga 2 _ Apoyo			
Tipo envol./Nivel	Cubierta	Nivel 2	Nivel 1
Envol. Horizontal	-152,29	-212,28	-209,03
Envol. Vertical	-116,59	-98,86	-87,68
% Variación	76,6%	46,6%	41,9%

Tabla 26. Relación entre la envolvente horizontal y vertical sísmica, Viga 1

Como se observa, para la viga 1, ubicada en el sentido del eje "X", todos los niveles presentan valores menores al 50 %, sin embargo, para la viga 2, ubicada en el sentido "Y", en uno de los niveles, en este caso, el de cubierta, presenta un valor del 76%, este es el más representativo, sin embargo, es menor al 100%, es decir que no supera a la envolvente máxima que considera cargas muerta, viva y sismo horizontal, por lo tanto, para este estimativo la ubicación del elemento en los niveles de la estructura, así como la dirección de su eje, no se ve afectado en gran magnitud por los efectos del sismo vertical.

De acuerdo a esto, en el caso del sismo de Armenia, y considerando una estructura sencilla de pórticos hasta de tres niveles, la variación para el diseño de este tipo de edificaciones es poca y puede seguir considerándose la envolvente máxima.

9.2. Análisis de la incidencia de la componente vertical sísmica en los niveles de la estructura.

Con el propósito de estudiar la incidencia de la componente vertical sísmica en cada uno de los niveles de la estructura y por cada una de las vigas, se presentan a continuación los momentos y el % de incidencia:

Viga 1

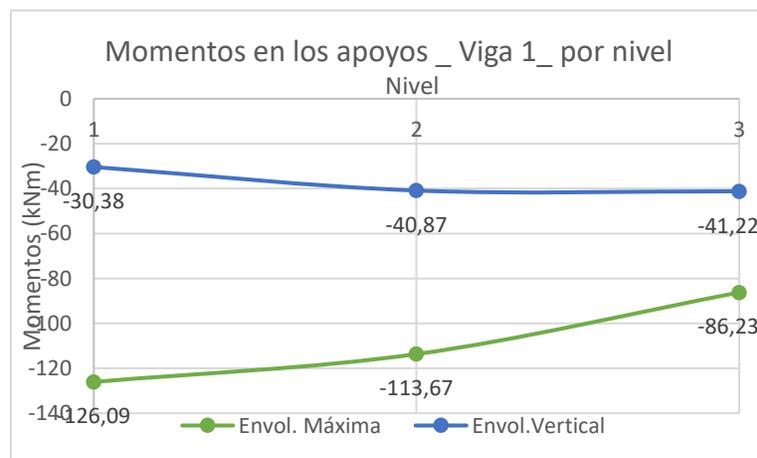


Figura 28. Momentos en los apoyos de la viga 1 respecto a los niveles de la estructura

Como se observa en la gráfica, los momentos de la envolvente máxima aumentan a medida que se aumentan los niveles, y es un resultado que se espera, ya que a medida que aumenta la altura, se aumenta el brazo y la fuerza con el que se produce dicho momento, por otro lado, los momentos de la envolvente vertical aumentan a medida que se aumentan los niveles, esto muestra, que la componente vertical para este modelo de pórticos de tres niveles induce un aumento en el aporte de los momentos.

A continuación, se analizarán los resultados obtenidos del % de incidencia para la viga 1.

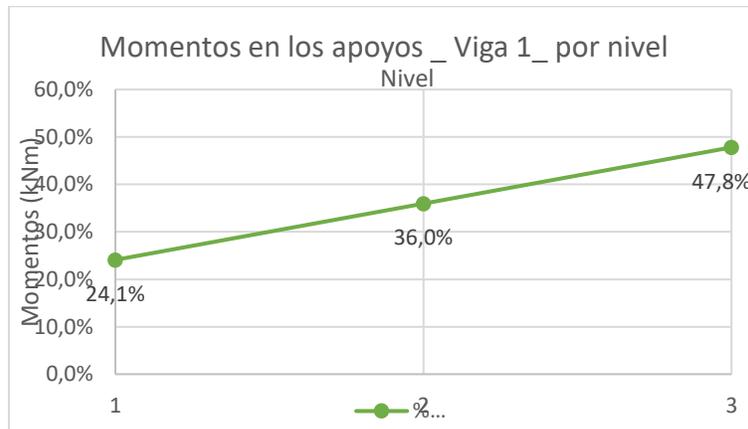


Figura 29. Porcentaje de variación de los momentos por nivel, Viga 1

Se observa que el mayor % de incidencia se encuentra en la cubierta, con un 47,8%, seguido del nivel 2, con un 36 % y finalmente el nivel 1 con un 24,1 %, esto muestra, que a medida que aumentan los niveles, la relación envolvente máxima y envolvente vertical va creciendo, es decir, para niveles superiores se presenta mayor influencia del sismo en la dirección vertical.

Viga 2

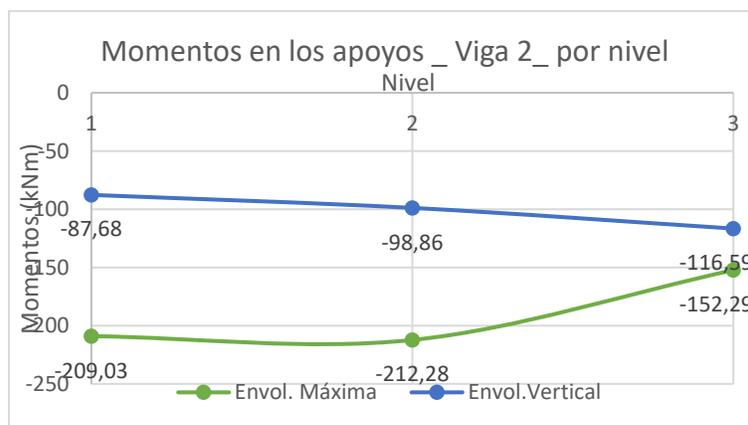


Figura 30. Momentos en los apoyos de la viga 2 respecto a los niveles de la estructura

El análisis para la viga 2 es el mismo que se menciona para la viga 1, como se observa en la gráfica, los momentos de la envolvente máxima aumentan a medida que se aumentan los niveles, por otro lado, los momentos de la envolvente vertical también aumentan a medida que se aumentan los niveles, esto muestra, que la componente vertical para este modelo de pórticos de tres niveles induce un aumento en los momentos, pero no significativo.

A continuación, se analizarán los resultados obtenidos del % de incidencia para la viga 2

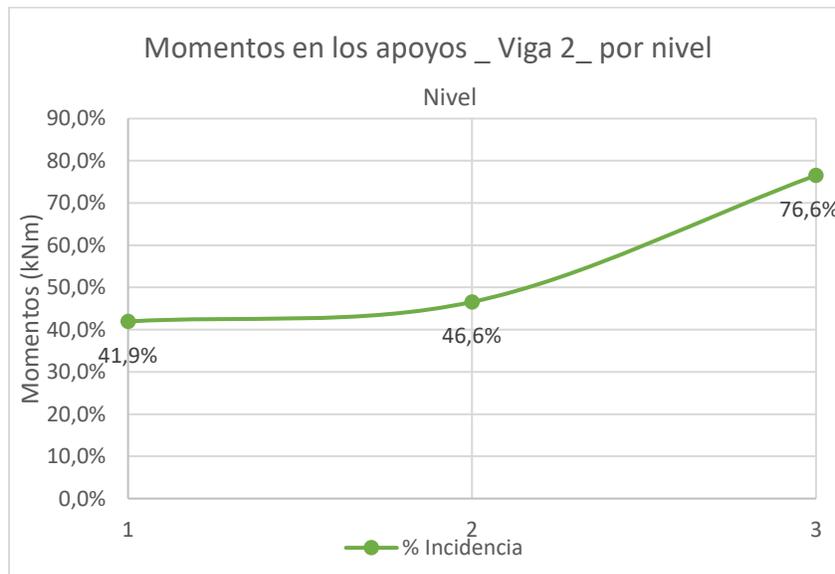


Figura 31. Porcentaje de incidencia de los momentos por nivel, Viga 1

Se observa que en la viga 2 interior, ocurre lo mismo que en la viga 1 externa, en la gráfica se puede ver que el mayor % de incidencia se encuentra en el nivel 3, con un 76,6%, seguido del nivel 2, con un 46,6 % y finalmente el nivel 1 con un 41,9 %, luego, se puede decir que, a medida que aumentan los niveles, el % crece, es decir, para niveles superiores se tiene mayor influencia.

Comparando los resultados de la incidencia de la viga 1 y 2, se encuentra que la viga interior presenta un mayor %, esto puede deberse a que la viga 2 interior, en el sistema de pórticos presenta mayores solicitaciones que la viga 1 externa, que pueden verse afectadas por el sismo vertical.

De acuerdo con esto, en el caso del sismo de Armenia y para este estimativo que considera una estructura conformada por pórticos hasta de tres niveles, el sismo vertical no representa un aumento significativo en la respuesta de la estructura.

9.3. Análisis de resultados para la relación entre la incidencia de la componente vertical y la distancia epicentral.

La incidencia del sismo vertical en la estructura de estudio con relación a la envolvente máxima presenta diferente participación de acuerdo con cada uno de los sismos registrados y las características de cada uno de ellos, como lo es su distancia epicentral, el porcentaje de participación de cada sismo en relación de su magnitud de momento respecto al horizontal tiene los siguientes resultados para la viga de apoyo V1:

Registro	% de Incidencia
	Cubierta
Superstition Hills Imperial Valley	18%
Joshua Tree	33%
Umbria Marche	29%
New Zealand	50%
Palm Springs	20%
Parkfield	29%

Tabla 27. Relación entre la incidencia de la componente vertical y la distancia epicentral de cada registro

la estructura muestra que el registro New Zealand obtiene el valor máximo dentro de esta relación de los sismos y la envolvente, a partir de este se evalúa que características obtuvo este sismo para representar la mayor participación dentro de la estructura con respecto a los momentos de diseño de la estructura, la magnitud registrada es de 6.3 a una profundidad de 4.9 km considerándose como un sismo superficial para este sismo de acuerdo a la revisión bibliográfica realizada se encontraron registros del movimiento vertical altos que exceden el comportamiento y movimiento de la componente vertical por ende es correcto los resultados obtenidos para la estructura.

Realizando una comparación con el sismo ocurrido en la ciudad de Armenia en 1997 se evidencia que el sismo registrado se presenta a una profundidad de 17km, el cual también se considera un sismo superficial por ende encontramos que la aproximación realizada en cuando al impacto de sismo Joshua Tree ingresado al programa es acertada y la respuesta obtenida arroja un comportamiento similar en la estructura al sismo ocurrido en armenia y que la influencia de la componente vertical.

9.4. Análisis de resultados para la relación entre la incidencia de la componente vertical en la zona de amenaza sísmica.

La caracterización de la zona de amenaza sísmica que tiene la normatividad Colombiana en la NSR-10, establece tres zonas: zona de amenaza sísmica alta, media y baja, de acuerdo a los parámetros de Aa (Coeficiente que representa la aceleración horizontal pico efectiva) y Av (Coeficiente que representa la velocidad horizontal pico efectiva).

Por otro lado, la caracterización de la zona de amenaza sísmica de la normatividad estadounidense, establece las aceleraciones máximas del suelo que tienen un 2% de probabilidad de ser excedidas en 50 años, para un sitio de roca firme, como se muestra en la Figura 2.

En cuanto, la caracterización de la zona de amenaza sísmica de la normatividad italiana, que divide las zonas geográficas en términos de aceleración máxima del suelo con probabilidad de exceso del 10% en 50 años, para suelos rígidos.

Por último, la caracterización de la zona de amenaza sísmica de la normatividad de Nueva Zelanda que clasifica en tres áreas de riesgo sísmico: alto, medio y bajo, utilizando el factor 'Z', que es el factor de riesgo sísmico para cada área de Nueva Zelanda. (Ministry of Business, Innovation and Employment, s. f.,2004)

Para hacer comparables las zonas de amenaza sísmica de cada uno de los registros, se presentó en el numeral 6.4, un cuadro con la zona de amenaza para cada registro seleccionado para este estudio, se puede mencionar que todos los registros encontrados corresponden a una zona de amenaza sísmica alta y el % de incidencia que se tomó fue el máximo de todos los niveles, dicho porcentaje no supera la envolvente máxima de diseño convencional, es decir, sin considerar las aceleraciones verticales del sismo.

De acuerdo con esto y para esta investigación que considera sistemas de pórticos hasta de tres niveles, puede recomendarse seguir usando la envolvente máxima para el diseño de sus edificaciones en zonas de amenaza sísmica alta, ya que se obtuvo un valor de 76%, en uno de los registros, el cual no supera la envolvente máxima.

Por otro lado, para el caso del sismo de Armenia, al encontrarse en una zona de amenaza sísmica alta, puede tomarse la envolvente máxima para el diseño. Es importante resaltar que los efectos del sismo vertical se estudiaron de forma individual, sin embargo, pueden estar acompañados del efecto de otras cargas, lo cual puede generar resultados aún mayores, por tanto, si bien los valores obtenidos para el sismo vertical no superan la envolvente, estos valores pueden empezar a ser considerables si se tienen en cuenta los efectos de otras cargas en conjunto.

9.5. Análisis de resultados para la relación entre la incidencia de la componente vertical y tipo de falla.

Para los tipos de falla relacionados en la tabla del numeral 6.5 y de acuerdo con la falla presentada, se observa que el máximo % de incidencia de cada nivel de la viga 1, es función débil del tipo de falla, para los registros de estudio, ya que se obtienen % menores al 100 % por lo que no se sobrepasa lo considerado en la envolvente máxima.

Lo anterior coincide con la investigación realizada por Bozorgnia, Y., & Campbell, K. (2004), quienes encontraron que los espectros V/H son fuertes funciones del periodo natural, distancia de la fuente de sitio y condiciones locales, y por el contrario, son función débil de la magnitud y el mecanismo de falla.

10. CONCLUSIONES

Esta monografía realizó una revisión de literatura sobre los efectos de las aceleraciones verticales de un sismo en las estructuras, además, se realizó la evaluación y el análisis del comportamiento de una estructura idealizada en la ciudad de Armenia, Quindío, compuesta por un sistema de pórticos de 3 niveles, ante registros verticales que tienen características y parámetros sísmicos similares a los del sismo de Armenia de 1999. Se determinó la relación entre la envolvente de los registros verticales y la envolvente máxima de las combinaciones convencionales de diseño, esto partiendo de un modelo de la estructura en el software SAP 2000, en el que se realizó un análisis cronológico y se analizaron los resultados en algunas vigas, las siguientes son las conclusiones principales del trabajo:

1. En la revisión de literatura se evidencia que las estimaciones encontradas por diferentes investigadores en los últimos tiempos muestran una relación que no obedece a las estimaciones hechas inicialmente por Newmark en su estudio de 33 registros y donde estableció que la componente vertical se define como $\frac{2}{3}$ de la componente horizontal, ya que esta relación depende de un conjunto de parámetros característicos de cada sismo, como el tipo de falla, la distancia epicentral, tipo de suelo, zona de amenaza sísmica.
2. Para el caso ejemplo desarrollado para una estructura conformada por dos pórticos de tres niveles, se evaluó la incidencia de la componente vertical sísmica en la respuesta de la estructura, en este caso en dos tipos de vigas, una interior y otra exterior en cada uno de los niveles, donde el parámetro usado para su selección es que tuvieran una magnitud cercana a la presentada en el sismo de Armenia en 1999. Se encontró que el porcentaje de incidencia del sismo vertical en la envolvente máxima, y para este estimativo no depende principalmente de la distancia epicentral, la variación en el comportamiento de la viga de estudio y la altura de esta y en menor medida depende al tipo de falla, por ello es posible seguir usando en el

diseño, la envolvente máxima generada por carga muerta, viva y sismo en direcciones horizontales.

3. Para los análisis de las relaciones de sismo vertical y envolvente máxima, el caso ejemplo permitió realizar una aproximación y verificación de la revisión bibliográfica, específicamente en cuanto a la zona de amenaza sísmica, se encontró que todos los registros se presentaron en zonas de amenaza sísmica alta, de acuerdo a esto y para esta investigación que considera sistemas de pórticos hasta de tres niveles, al encontrarse un % de incidencia máximo del 76%, no mayor al 100 %, es posible usar para el diseño la envolvente máxima, ya que ninguno de los porcentajes sobrepasa dicha envolvente.
4. Con el fin de evaluar la incidencia de la componente vertical en los valores de la envolvente para las combinaciones de diseño tradicionales, y comprobando las afirmaciones realizadas en los estudios consultados, se evidencia que la componente vertical aumenta dependiendo de la distancia epicentral, obteniendo una relación inversamente proporcional, a mayor distancia, menor relación e incidencia tiene el comportamiento de la fuerza vertical mientras que a menor distancia epicentral se encuentra una participación mayor de la componente vertical, se encontró que la relación entre los valores del sismo vertical versus los valores de la envolvente de diseño tradicional para la viga 1, toma un valor mínimo de 18% correspondiente a la mayor distancia epicentral y un valor máximo del 50 % para la menor distancia epicentral, por otro lado, para la viga 2 se encontró que la relación, toma un valor mínimo de 28% correspondiente a la mayor distancia epicentral y un valor máximo del 76 % para menor distancia epicentral.
Esto confirma la afirmación realizada en la revisión bibliográfica que afirma que la componente vertical puede tener mayor incidencia en los momentos de diseño para distancias epicentrales menores a 30 km, ya que para el caso de los sismos ingresados el correspondiente a New Zealand que tienen menor distancia epicentral de 4.9 km obtiene los mayores porcentajes de incidencia de la aceleración vertical evaluando donde para la viga 1 exterior en la cubierta toma el 50% y para la viga 2 interior toma el un valor del 76%.
5. En el estudio del tipo de falla, se encontró el máximo % de incidencia para cada viga, en cada nivel y para cada uno de los registros, se concluye entonces que este factor no es determinante en la incidencia, en el caso de la viga 1 (interior), ya que se presentan valores que oscilan entre 21% y 50% menores al 100 %, en el caso de la viga 2 (exterior), se presentan valores % de incidencia que oscilan entre el 33% y 76%, siendo este último el mayor valor obtenido, sin embargo, no se puede afirmar que, se deba al tipo de falla presentado, lo anterior, debido a la revisión bibliográfica hecha al inicio de la investigación. En el caso de estudio del sismo de Armenia, puede decirse que, el tipo de falla no es factor determinante en la incidencia de la componente vertical.

6. En la participación representada por nivel, se encuentra que a mayor nivel de la estructura aumenta la incidencia del sismo vertical y para los niveles inferiores se presenta en menor magnitud el % de incidencia, el caso ejemplo muestra que para la viga exterior V1 se tiene en la cubierta un 47,8% y para el nivel 1 una disminución al 24.1%, en la viga interior V2 se tiene en la cubierta un porcentaje de 76.6% y para el nivel uno una disminución al 41.9%.
7. De acuerdo con todo lo anterior y para el caso ejemplo de estudio, el considerar las aceleraciones verticales en el diseño de la estructura, no afecta de gran manera la respuesta de elementos estructurales como las vigas, por lo tanto, no se modifica el diseño al considerar estas aceleraciones de forma independiente. Es importante enfatizar que la evaluación del sismo vertical se hizo de forma aislada, es decir, sin considerar el efecto de cargas adicionales que pueden estar presentes junto con las aceleraciones verticales, un estudio interesante sería evaluar los efectos del sismo vertical junto con las otras cargas y observar si en este caso la envolvente del diseño tradicional es superada, este podría ser el objetivo de un estudio posterior.

11. REFERENCIAS

Arcila, M. García, J., Montejo, J., Eraso, J., Valcarcel, J., Mora, M., Viganò, D., Pagani, M. y Díaz, F. (2020). "Modelo nacional de amenaza sísmica para Colombia". Bogotá: Servicio Geológico Colombiano y Fundación Global Earthquake Model.

Bozorgnia, Y., & Campbell, K. (2004). The vertical to horizontal response spectral ratio and tentative procedures for developing simplified V/H and vertical design spectra. *Journal of Earthquake Engineering*, Imperial College Press. [c](#)

Bozorgnia, Y., & Mansour, N, Campbell., K.. Characteristics of Free-Field Vertical Ground Motion during the Northridge Earthquake. *Earthquake Spectra*, Volume 11, N° 4, . Noviembre de 1995. Pag 515-525

Cardona, O (1999) Terremoto de armenia, Colombia, Enero 25 de 1999. *Revista de ingeniería Sísmica* N°60, 21-42 (1999)
https://www.researchgate.net/publication/322720142_TERREMOTO_DE_ARMENIA_COLOMBIA_ENERO_25_DE_1999

Chopra, A. K. (2014). *Dinámica de Estructuras* (Pearson (ed.); Cuarta Ed.).

Collier C, Elnashai A (2001) A procedure and spectra for combining vertical and horizontal seismic action efect. *J Earthquake pag* 5(4):521–539.
https://doi.org/10.1080/1363246010_9350404

García, L. E. (1998). Dinámica estructural aplicada al diseño sísmico (Universidad de Los Andes (ed.); Primera). Universidad de Los Andes.

Earthquakes in Thousand Palms, California, United States - Most Recent > 6.0M. (s. f.). Recuperado 6 de noviembre de 2022, de https://earthquaketrack.com/us-ca-thousand-palms/recent?mag_filter=6

Internet Geography. (2022, 4 febrero). Christchurch Earthquake Case Study. <https://www.internetgeography.net/topics/christchurch-earthquake-case-study/>

Kale, O., & Akkar, S. (2020). A new formulation for a code-based vertical design spectrum. Wiley, 1–18. <https://doi.org/10.1002/eqe.3272>

Long-term National Seismic Hazard Map | U.S. Geological Survey. (s. f.). (2018) USGS.gov | Science for a changing world. <https://www.usgs.gov/media/images/2018-long-term-national-seismic-hazard-map>

Lemus, J.(2021). Relación de la componente sísmica vertical y horizontal y el efecto de la componente sísmica vertical en pórticos y sistemas combinados de concreto reforzado. [Tesis de maestría, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito]. Repositorio Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

López, O. A. (2004, marzo). Propiedades de las tres componentes principales del movimiento sísmico. Scientific Electronic Library Online. Recuperado junio de 2022, de http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0376-723X2004000100001.

Lista Terremoti aggiornata in tempo reale. (2022, 6 noviembre). <http://terremoti.ingv.it/events?starttime=2022-11-06+00:00:00>

Ministry of Business, Innovation and Employment. (s. f.). How the system for managing earthquake-prone buildings works. Building Performance. <https://www.building.govt.nz/managing-buildings/managing-earthquake-prone-buildings/how-the-system-works/>

Nayak, C. B. (2021). A state-of-the-art review of vertical ground motion (VGM) characteristics, effects and provisions. Innovative Infrastructure Solutions, 6(2). <https://doi.org/10.1007/s41062-021-00491-3>

Perea, T. (2002, 1 junio). Repositorio de Tesis DGBSDI: Introducción al estudio de la componente vertical de movimientos sísmicos y su influencia en el comportamiento estructural. *Repositorio Universidad Nacional Autónoma de México*. https://ru.dgb.unam.mx/handle/DGB_UNAM/TES01000306809

Perea, T., & Esteva, L. (2005). Componente vertical de registros sísmicos en México y en su efecto en la respuesta sísmica no lineal de edificios. *Revista de Ingeniería Sísmica*, 72, 45–79. <https://www.redalyc.org/pdf/618/61807204.pdf>

Ruiz, D., & Sarria, A. (2002). EFECTO DE LAS DIFERENTES COMPONENTES SÍSMICAS DE MOVIMIENTO SOBRE LAS NAVES INDUSTRIALES DE GRANDES LUCES. *Revista de Ingeniería Universidad de los Andes*, 15. <https://ojsrevistaing.uniandes.edu.co/ojs/index.php/revista/issue/view/25>

Vilera, L., & Rivero, W. (2008). Efectos sísmicos de la componente vertical en edificios aporticados de acero. *Revista Ciencia e Ingeniería*, 29(1). <https://www.redalyc.org/pdf/5075/507550781011.pdf>

Pacific Earthquake Engineering Center (PEER), "PEER Strong Ground Motion Database," http://peer.berkeley.edu/products/strong_ground_motion_db.html.

USGS Tectonic Setting.(s.f.). Recuperado 2 de noviembre de 2022, de <https://earthquake.usgs.gov/learn/parkfield/geology.php>

Pacheco, J.; Nabelek, J. (1988), "Source mechanisms of three moderate California earthquakes of July 1986", *Bulletin of the Seismological Society of America*, 78 (6): 1907–1909. <https://pubs.geoscienceworld.org/ssa/bssa/article-abstract/78/6/1907/119122/Source-mechanisms-of-three-moderate-California?redirectedFrom=fulltext>

12. ANEXOS:

Resultados para la relación entre la envolvente horizontal y la envolvente vertical.

12.1. VIGA 1 “Momentos en los apoyos”

Viga 1 Cubierta

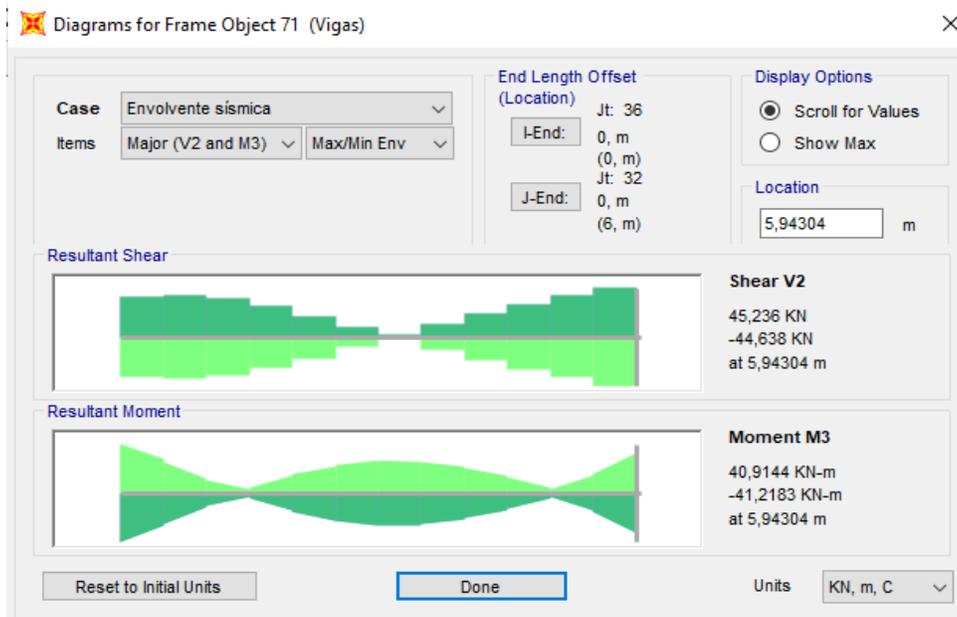


Figura 32. Envolvente Vertical Viga 1 Cubierta

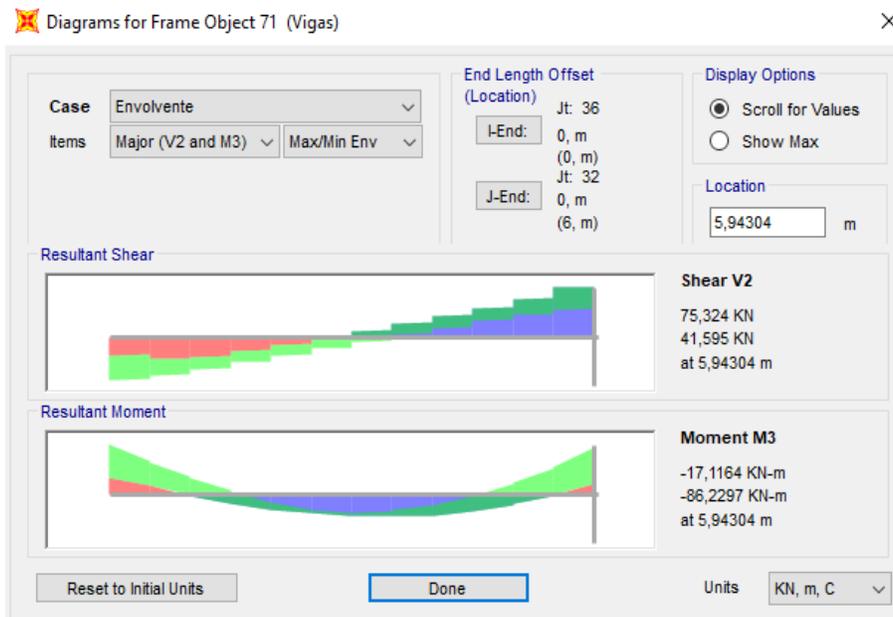


Figura 33. Envolvente Horizontal Viga 1 Cubierta

Viga 1 Nivel 2

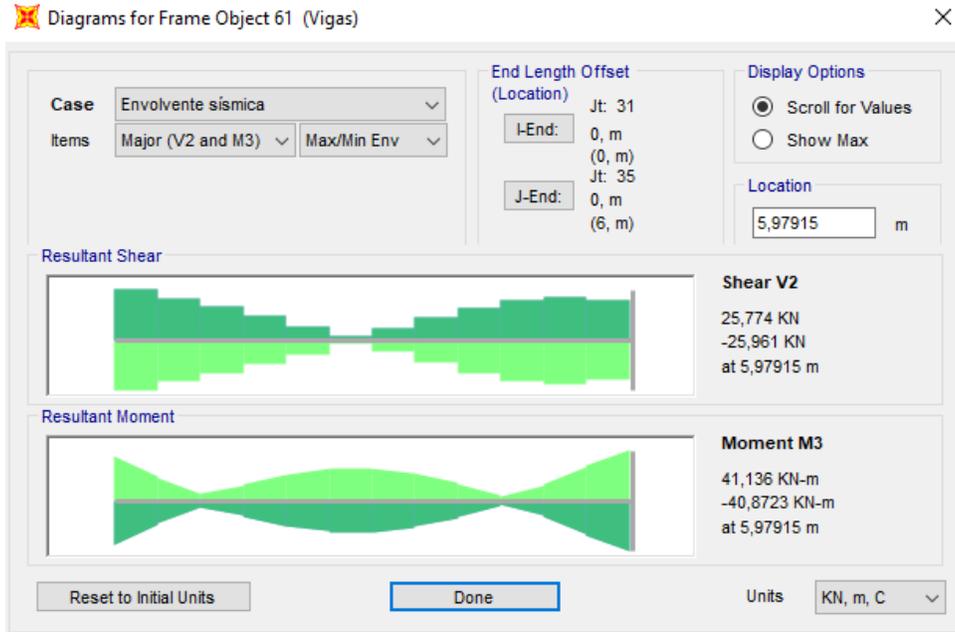


Figura 34. Envolvente Vertical Viga 1 Nivel 2

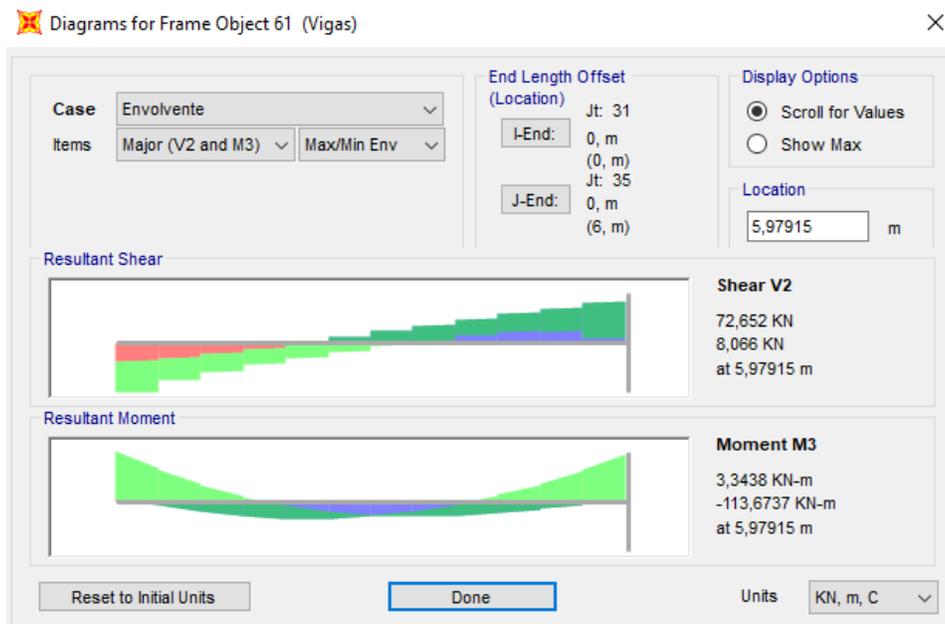


Figura 35. Envolvente Horizontal Viga 1 Nivel 2

Viga 1 Nivel 1

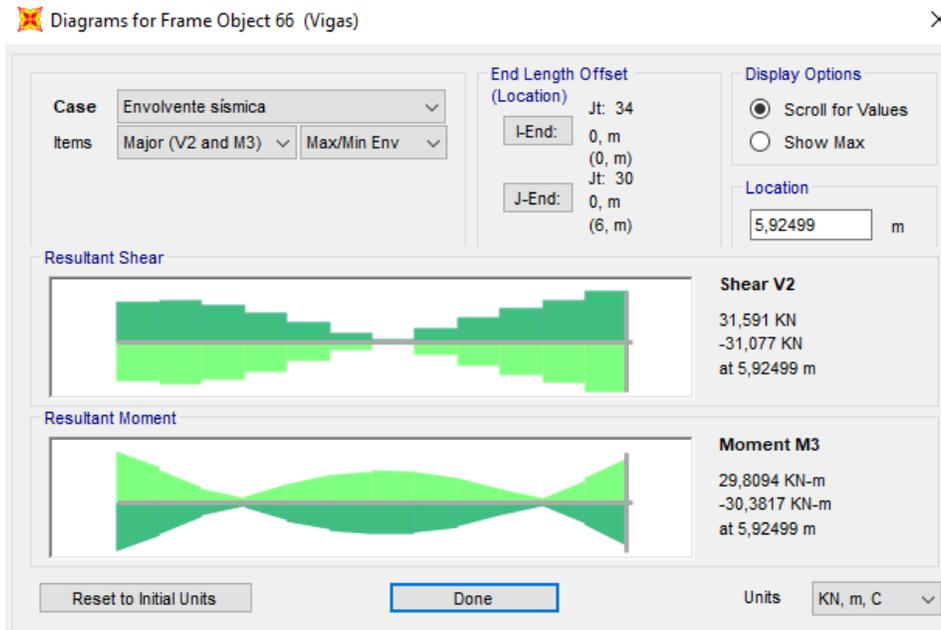


Figura 36. Envolvente Vertical Viga 1 Nivel 1

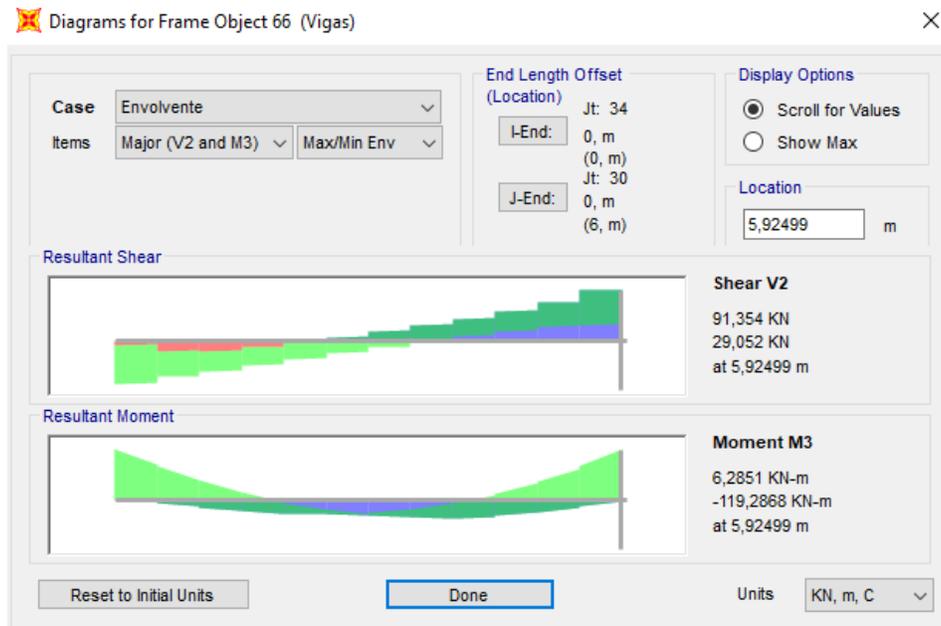


Figura 37. Envolvente Horizontal Viga 1 Nivel 1

12.2. VIGA 2 “Momentos en los apoyos”

Para la viga 2, se obtuvieron los siguientes resultados:

Viga 2 Cubierta

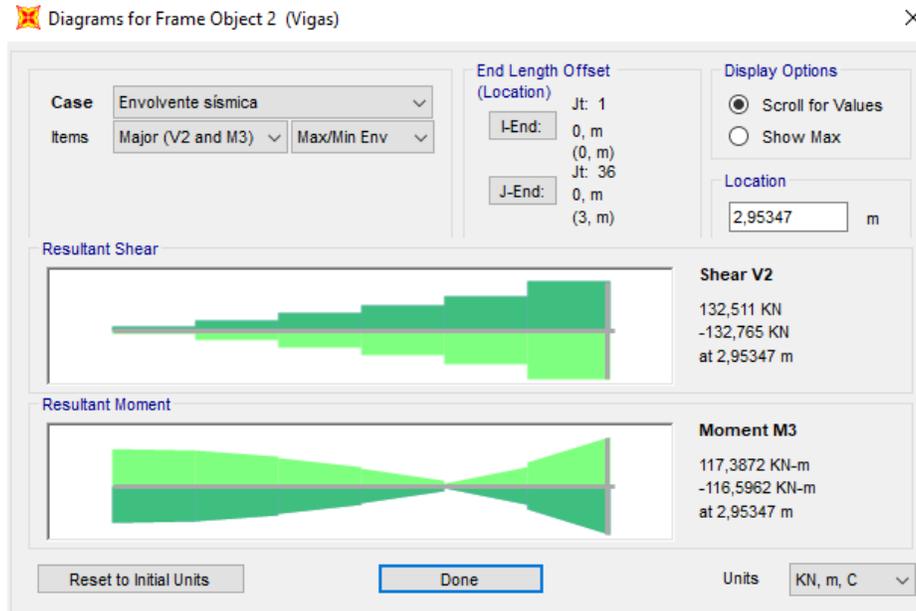


Figura 38. Envolverte Vertical Viga 2 Cubierta

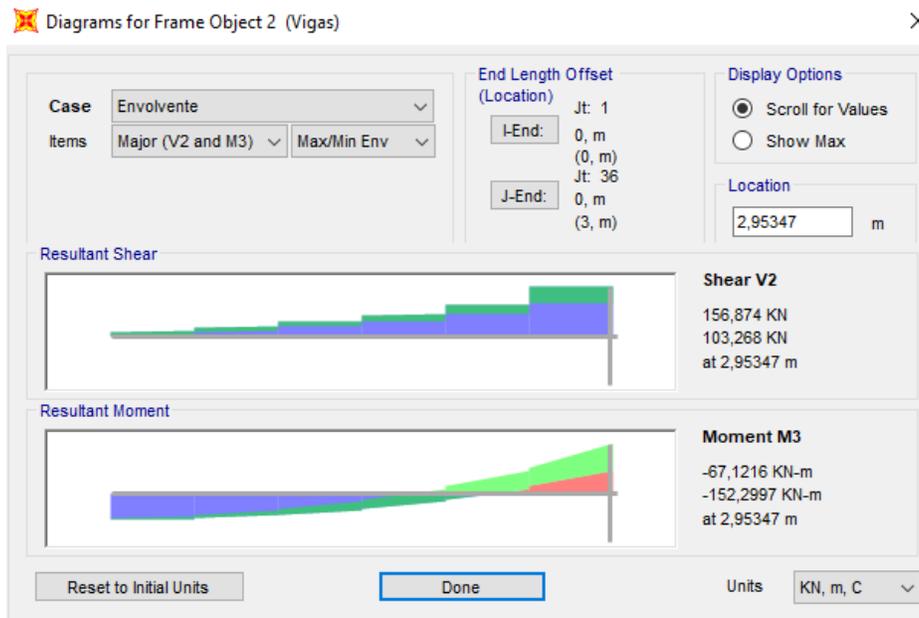


Figura 39. Envolverte Horizontal Viga 2 Cubierta

Viga 2 Nivel 2

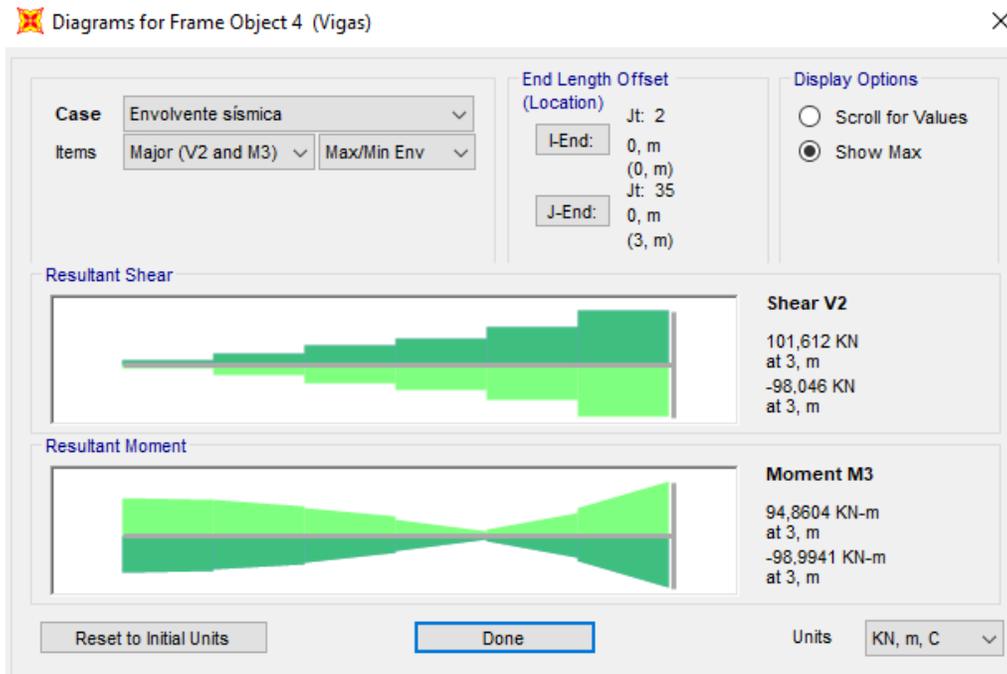


Figura 40. Envolvente Vertical Viga 2 Nivel 2

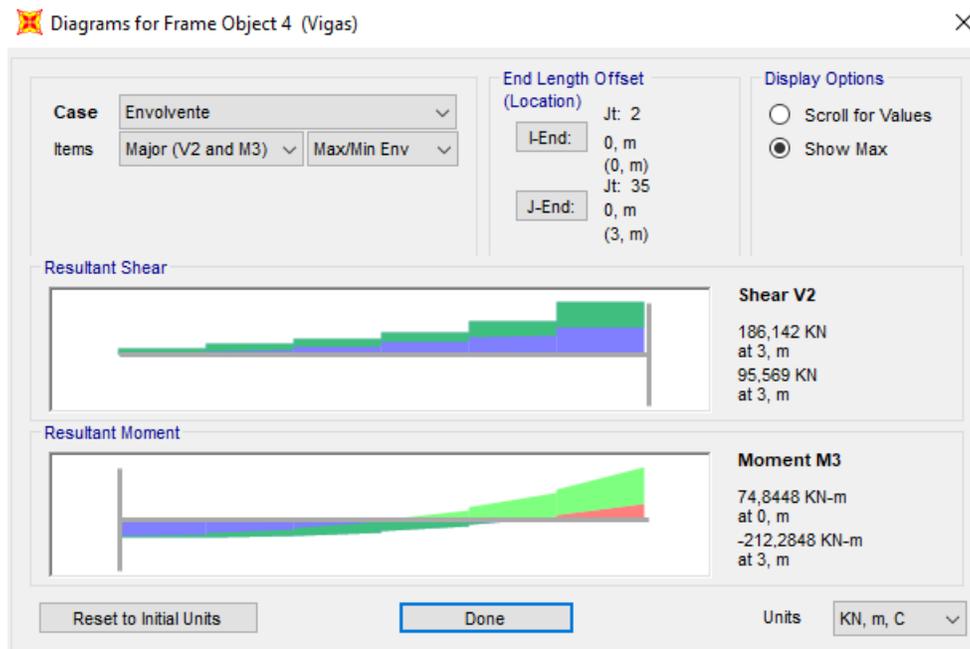


Figura 41. Envolvente Horizontal Viga 2 Nivel 2

Viga 2 Nivel 1

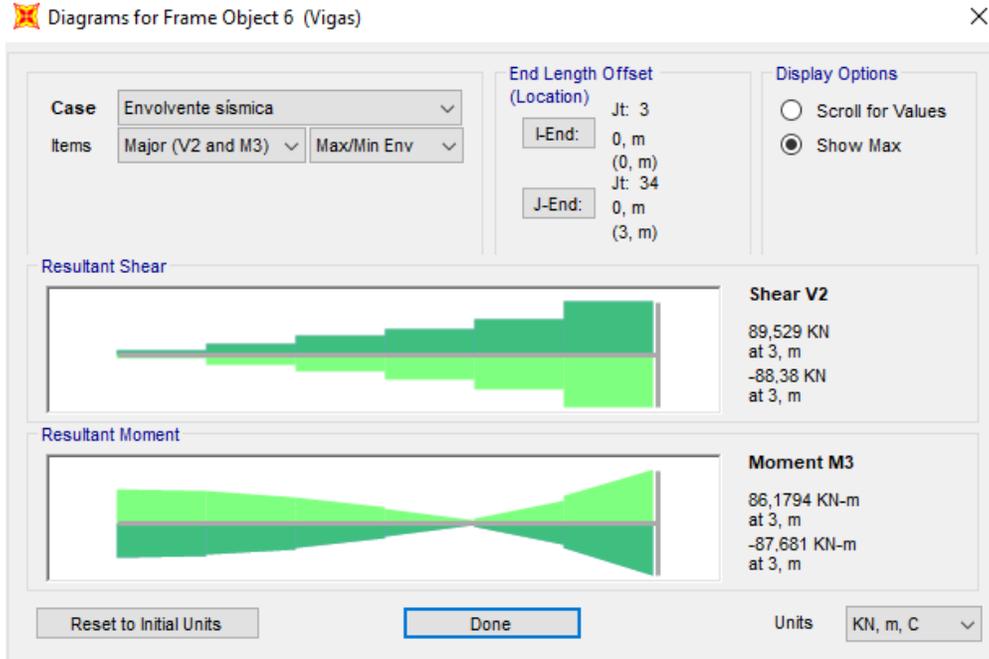


Figura 42. Envolverte Vertical Viga 2 Nivel 1

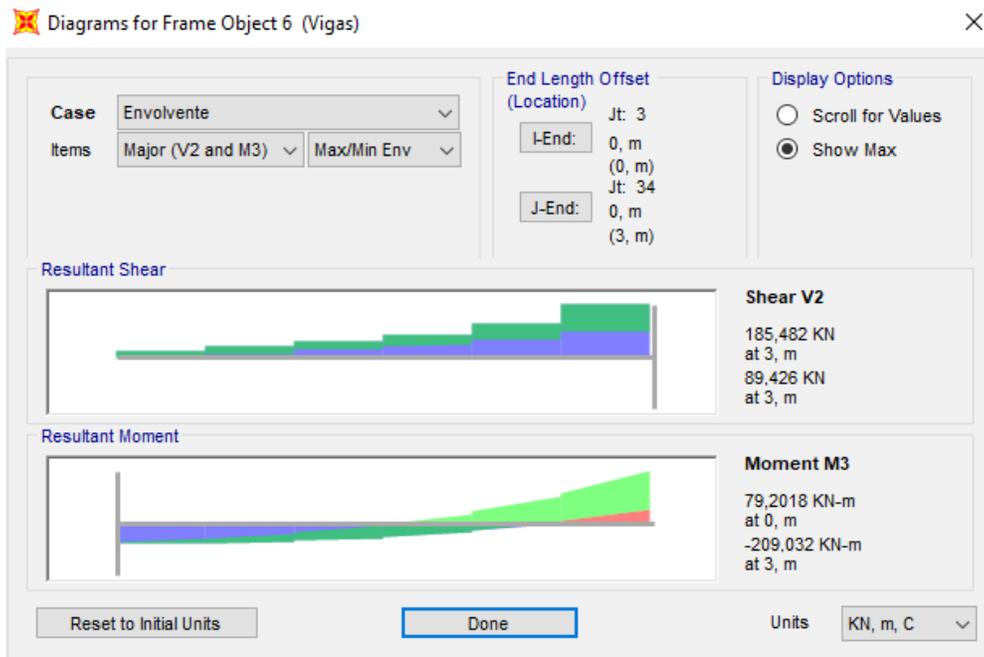


Figura 43. Envolverte Horizontal Viga 2 Nivel 1

12.3. VIGA 1 Momentos de cada sismo en los apoyos

Para la viga V1 el valor del momento para la cubierta es de:

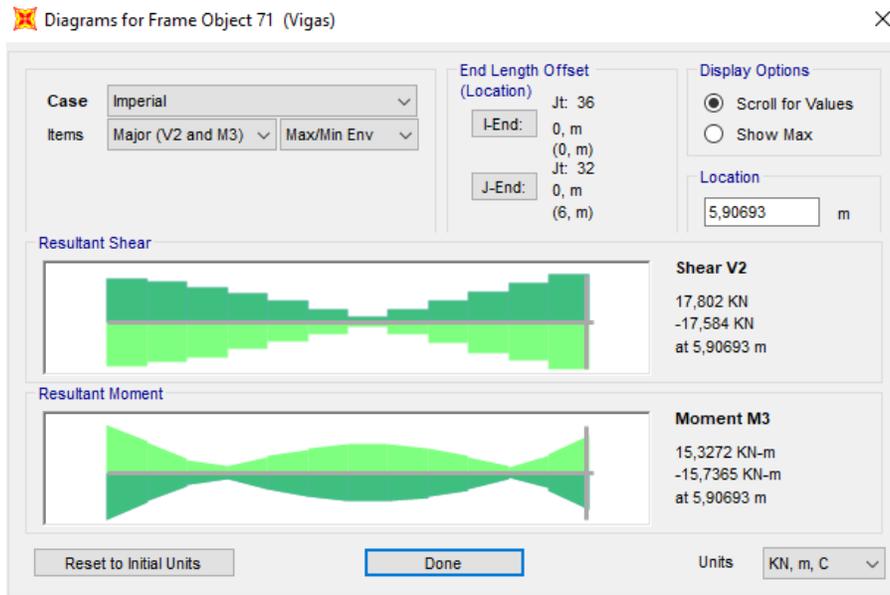


Figura 44. Momentos en viga 1 Imperial

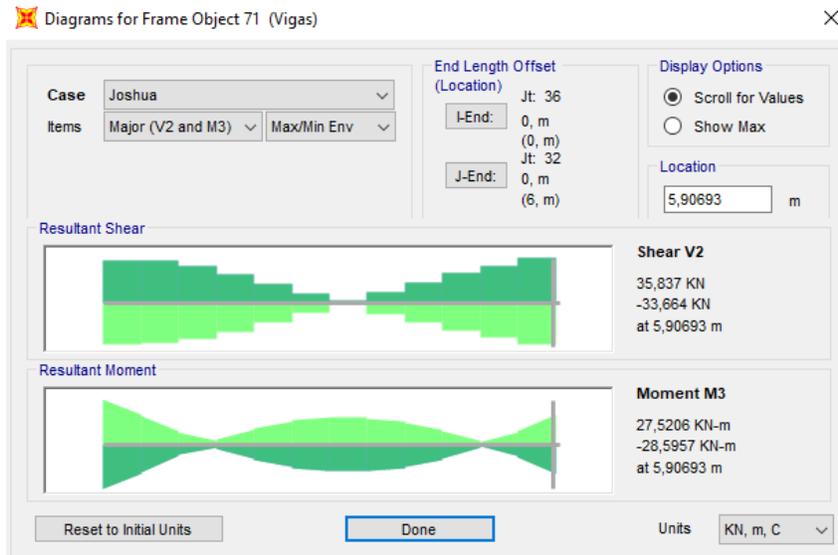


Figura 45. Momentos en viga 1 Joshua

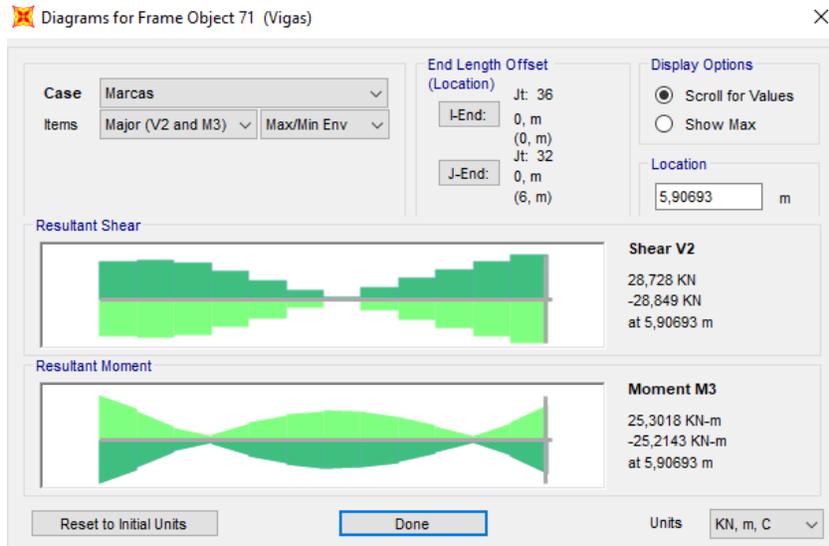


Figura 46. Momentos en la viga 1 Marcas

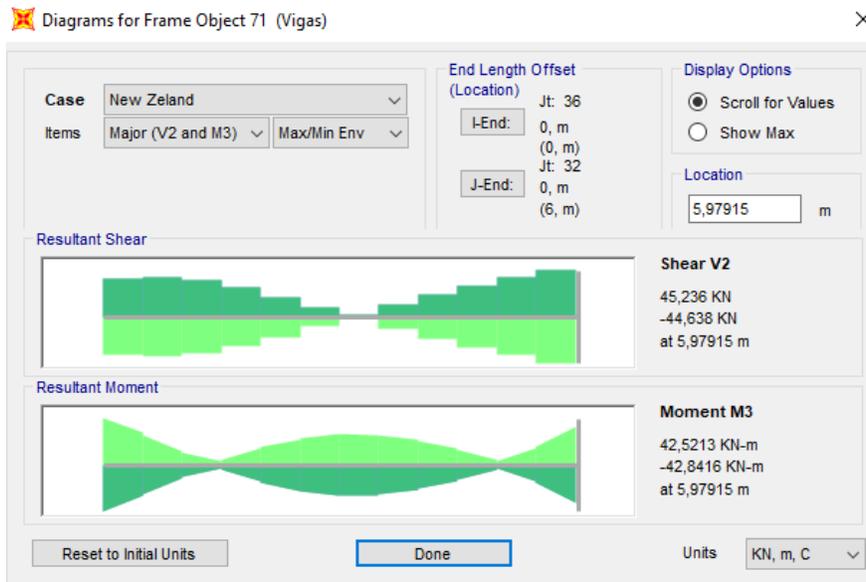


Figura 47. Momenros viga 1 Imperial

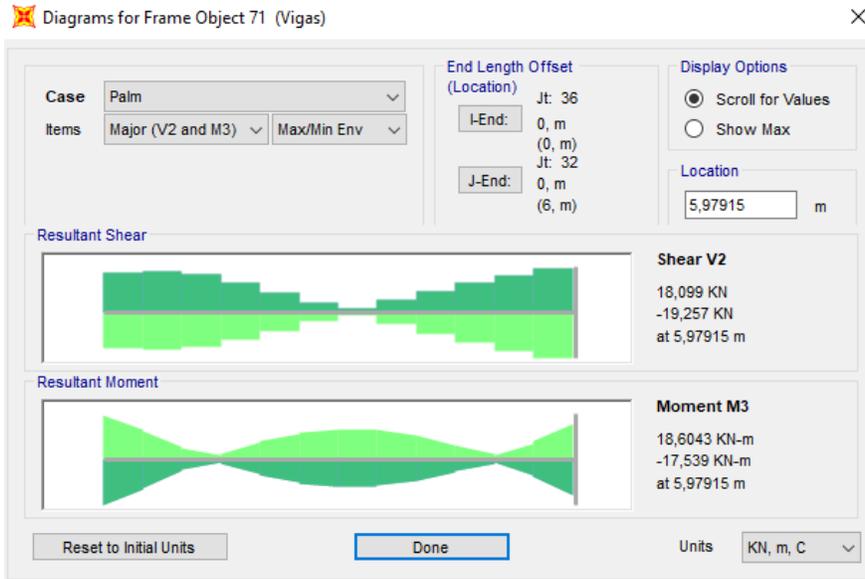


Figura 48. Momentos viga 1 Palms

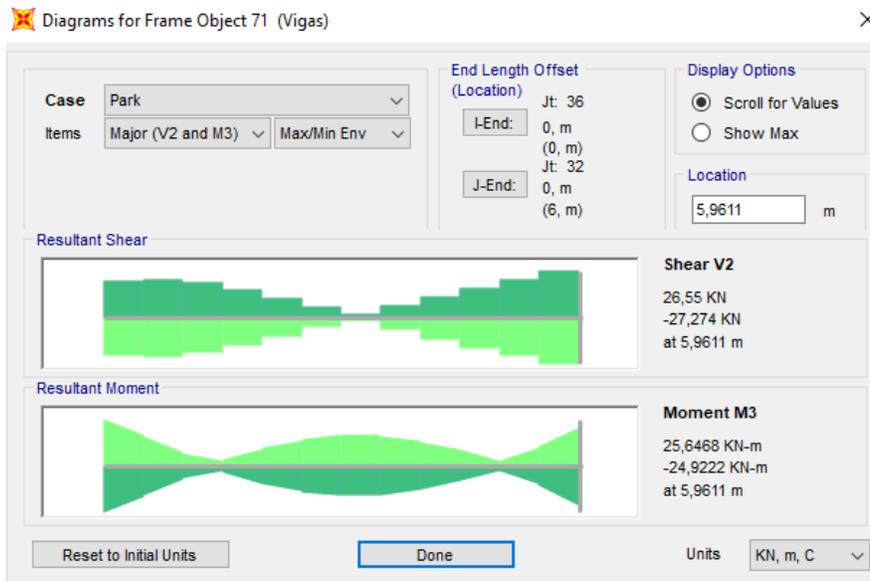


Figura 49. Momentos viga 1 Park

12.4. VIGA 2 Momentos de cada sismo en los apoyos

Para la viga 2 el valor del momento para el nivel 2 es de:

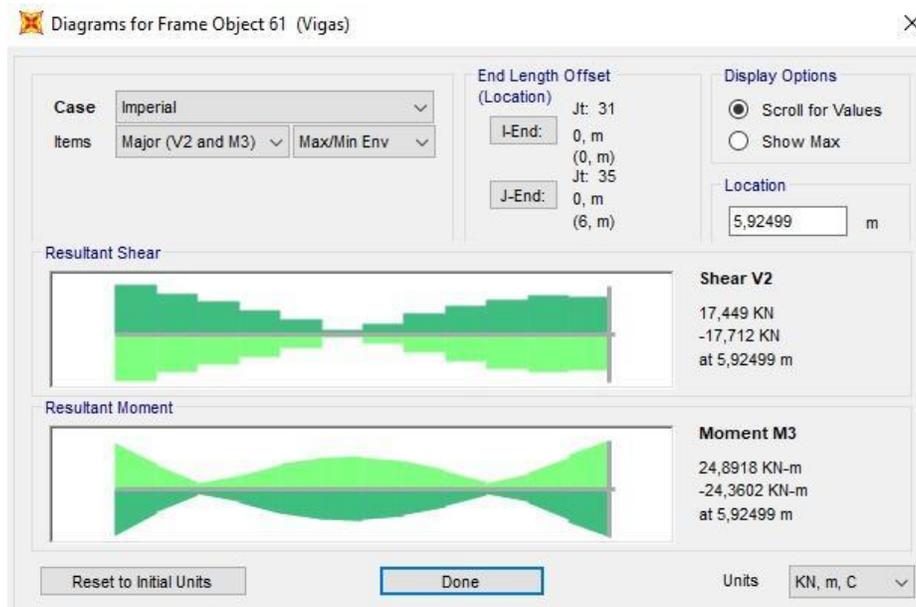


Figura 50. Momentos viga 2 Imperial

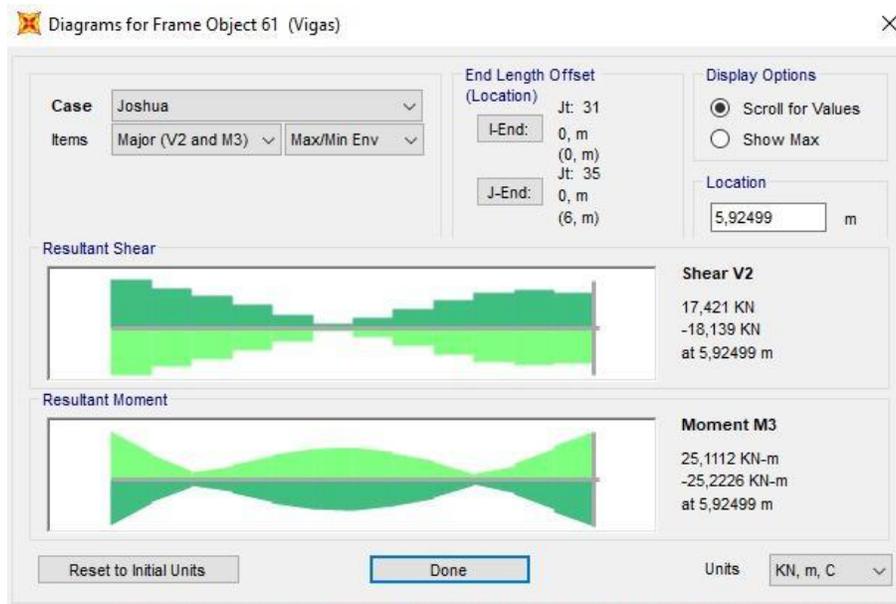


Figura 51. Momentos viga 2 Joshua

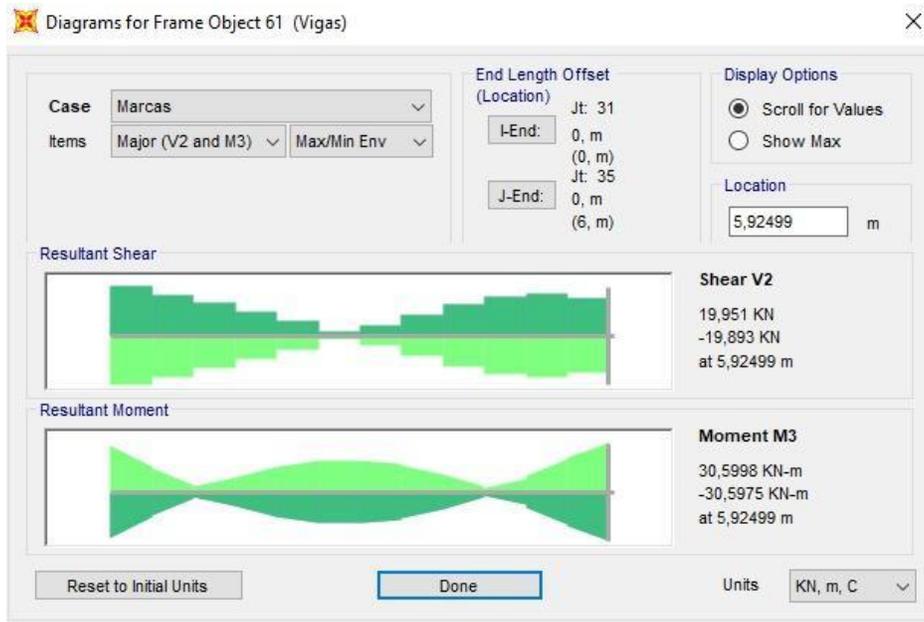


Figura 52. Momenros viga 2 Marcas

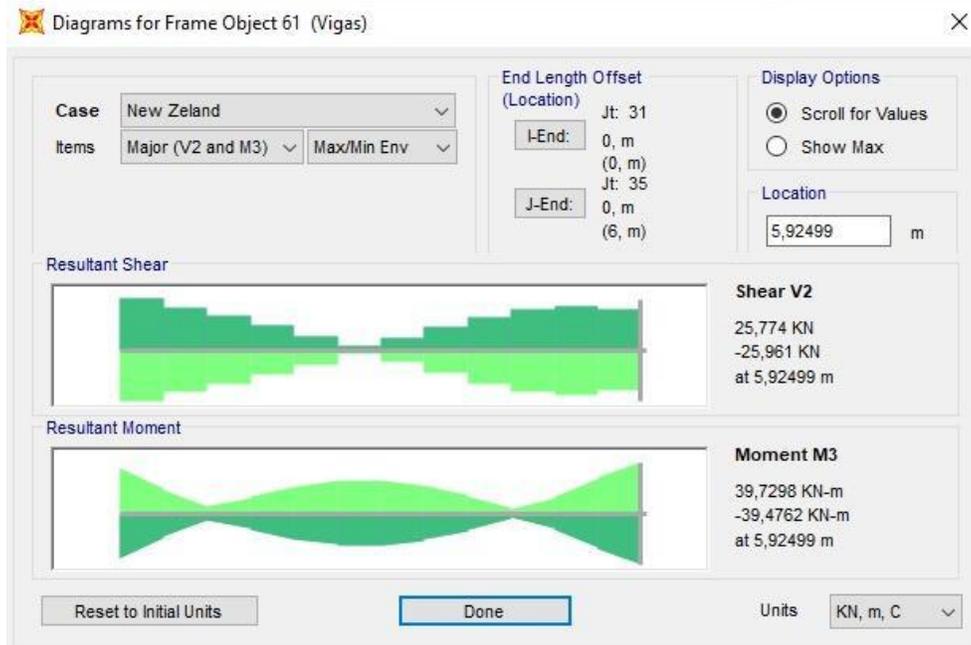


Figura 53. Momentos viga 2 New Zeland

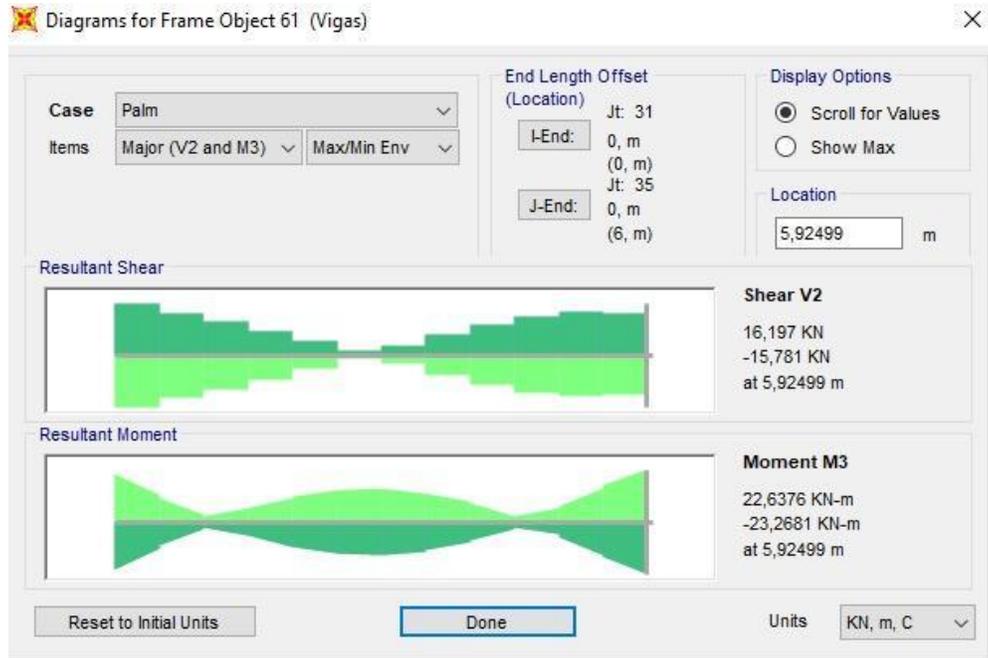


Figura 54. Momentos vga 2 Palm

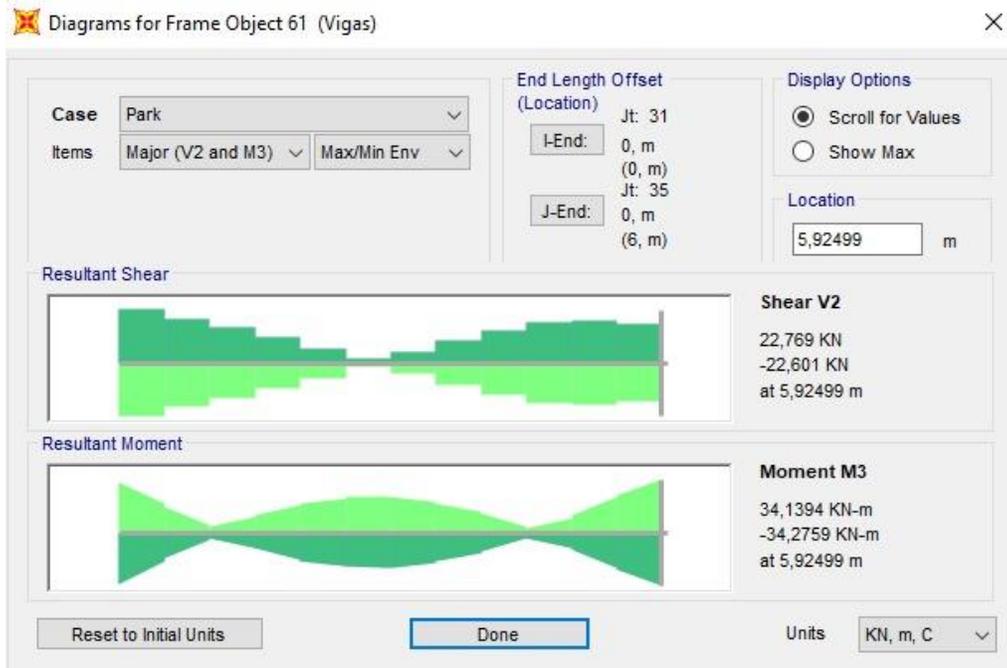


Figura 55. Momentos viga 2 Park

Para la viga 2 el valor del momento para el nivel 1 es de:

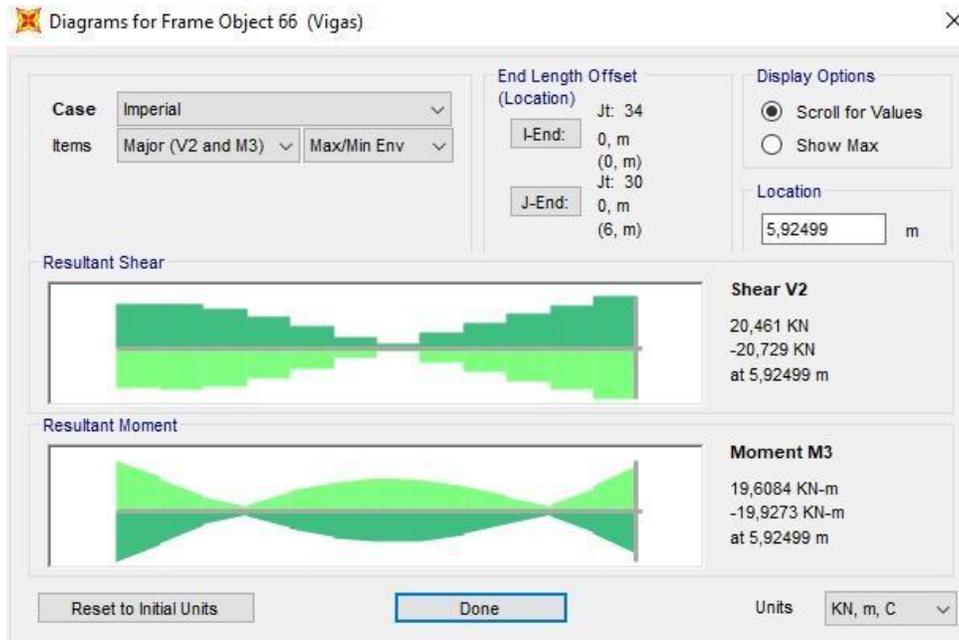


Figura 56. Viga 2 valor de momento nivel 1 Imperial

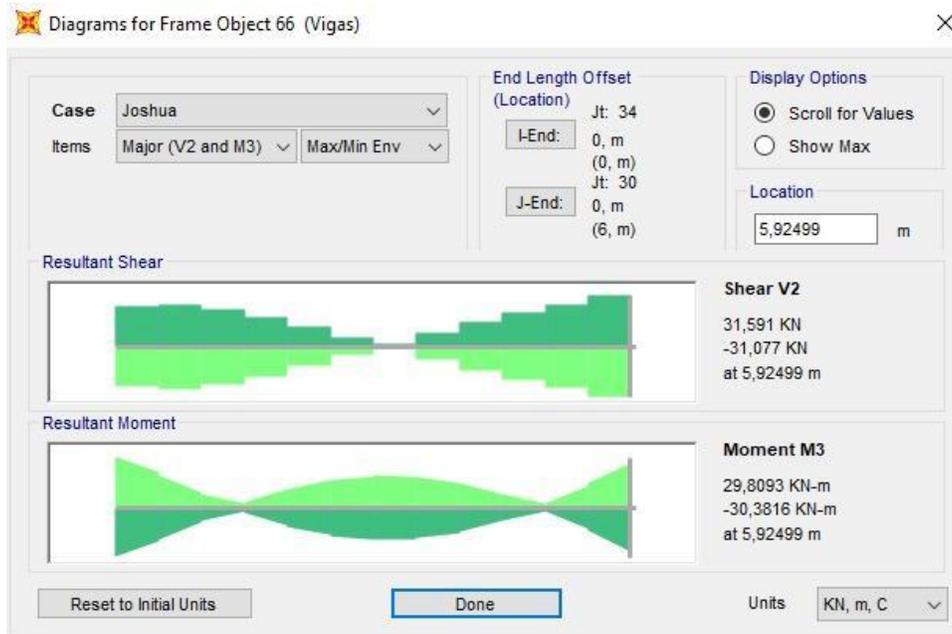


Figura 57. Viga 2 valor de momento nivel 1 Joshua

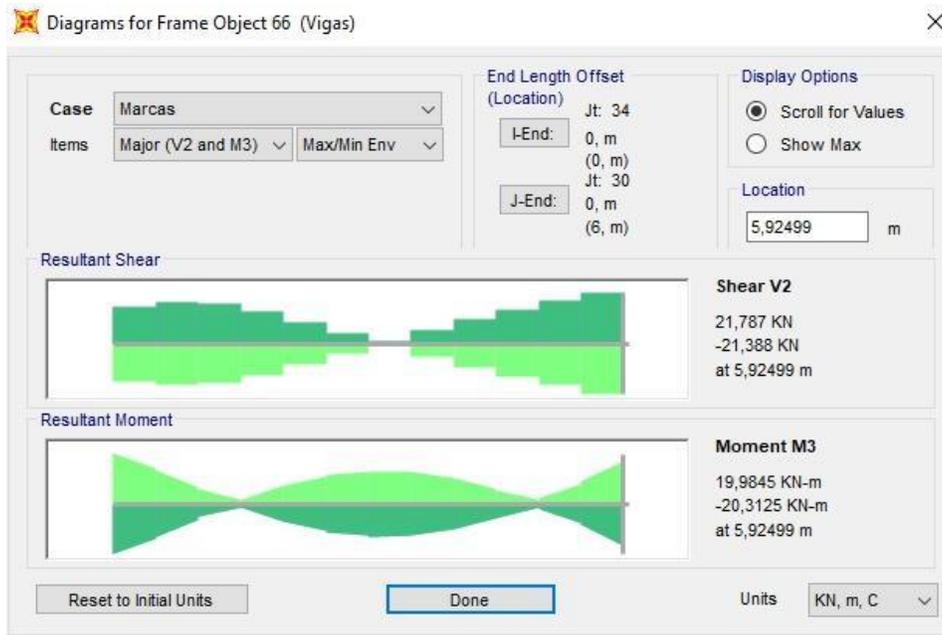


Figura 58. Viga 2 valor de momento nivel 1 Marcas

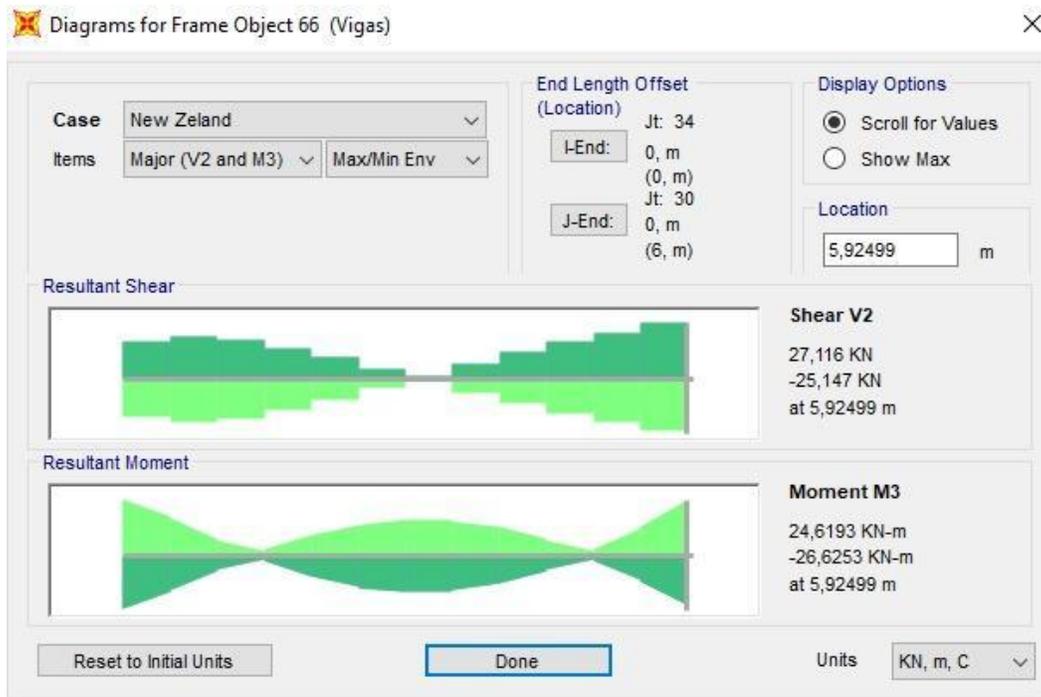


Figura 59. Viga 2 valor de momento nivel 1 New Zealand

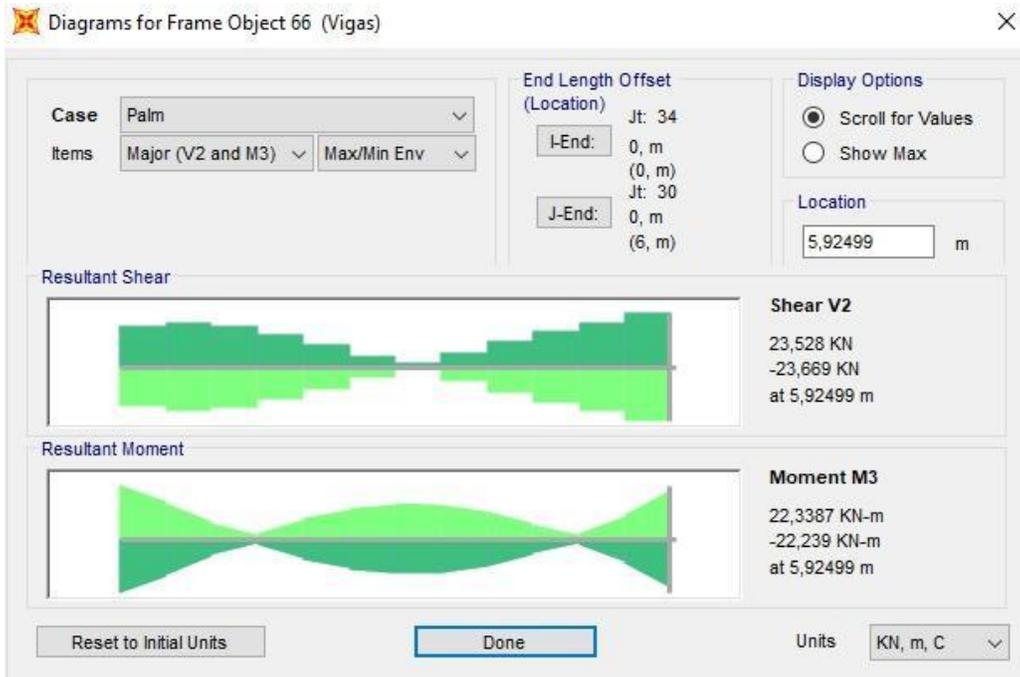


Figura 60. Viga 2 valor de momento nivel 1 Palm

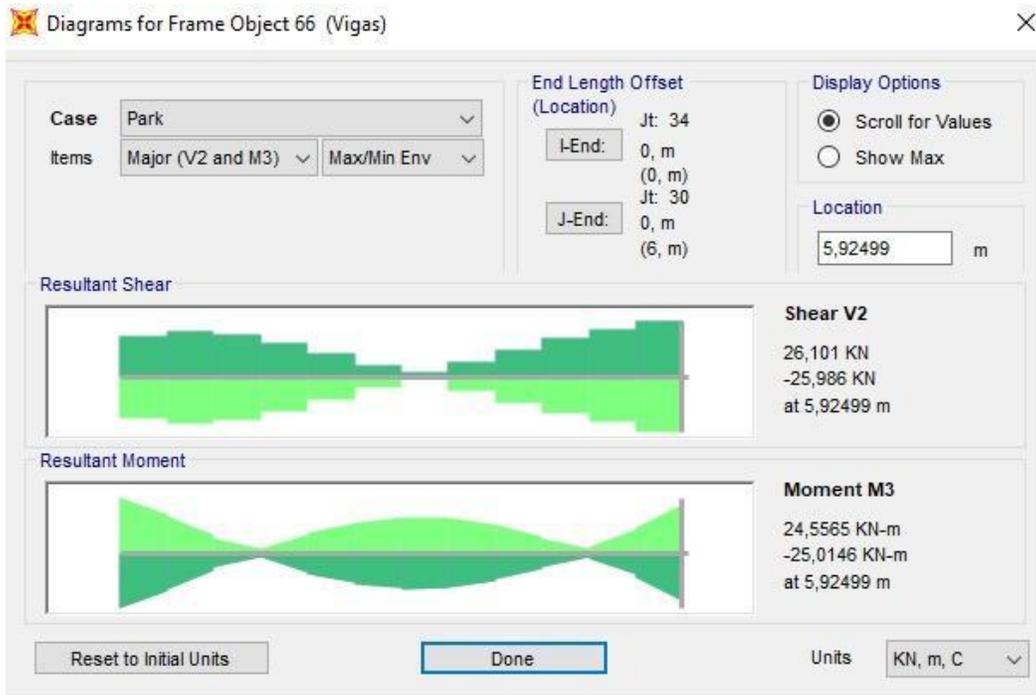


Figura 61. Viga 2 valor de momento nivel 1 Park

12.5. VIGA 1 Envolventes

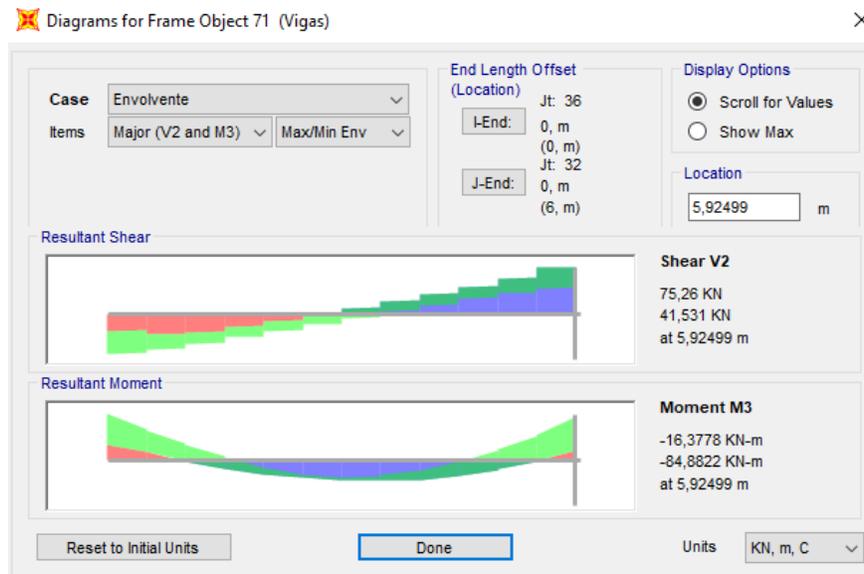


Figura 62. Envolvente cubierta

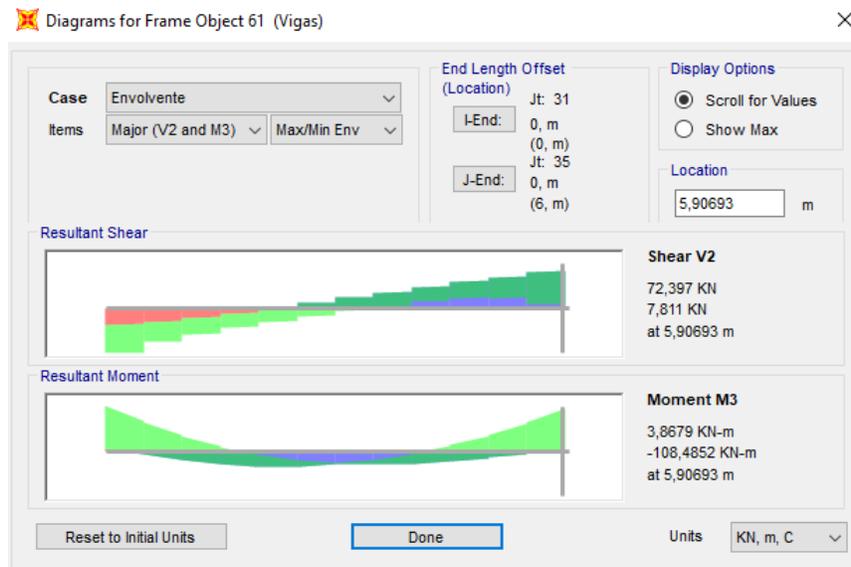


Figura 63. Envolvente nivel 2

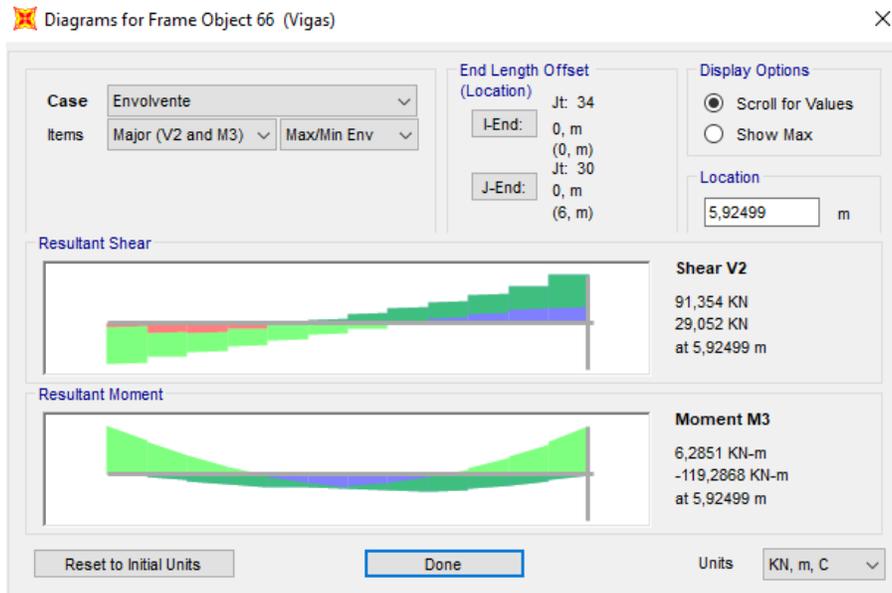


Figura 64. Envolvente nivel 1

12.6. VIGA 2 “Momentos de cada sismo ”

Para la viga V2 el valor del momento para la cubierta es de:

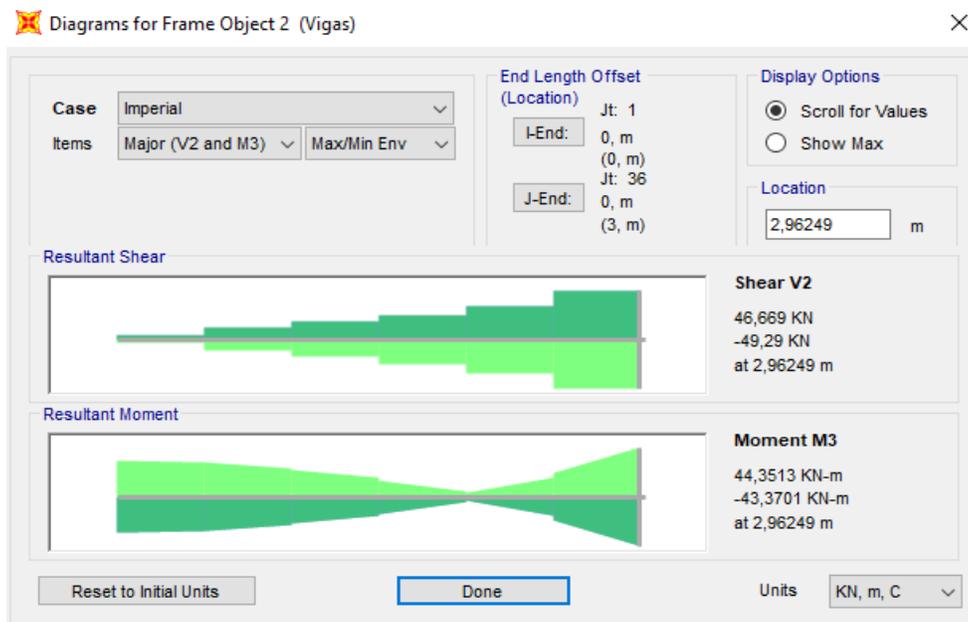


Figura 65. Momento en la cubierta Imperial

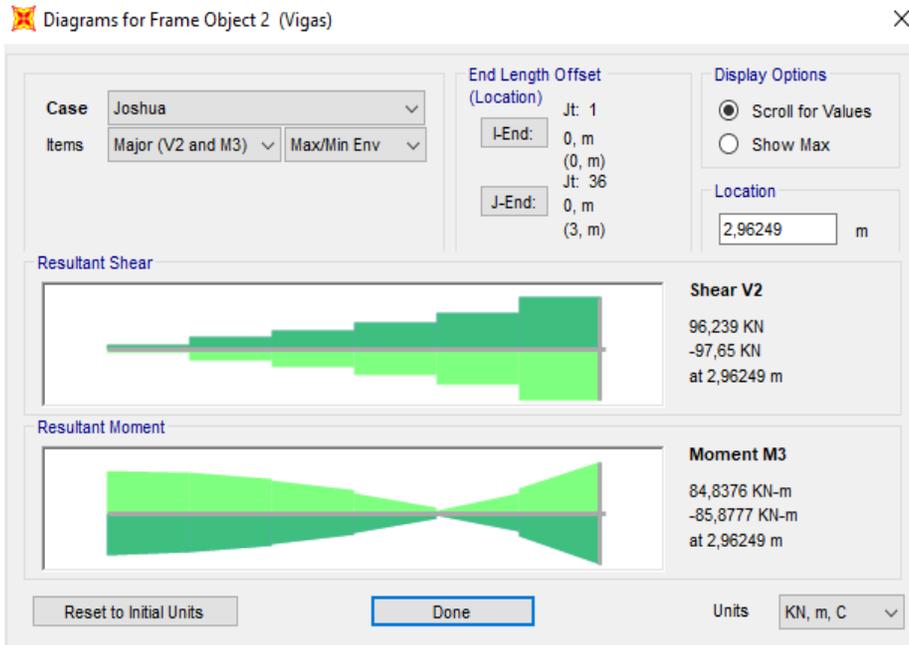


Figura 66.. Momento en la cubierta Joshua

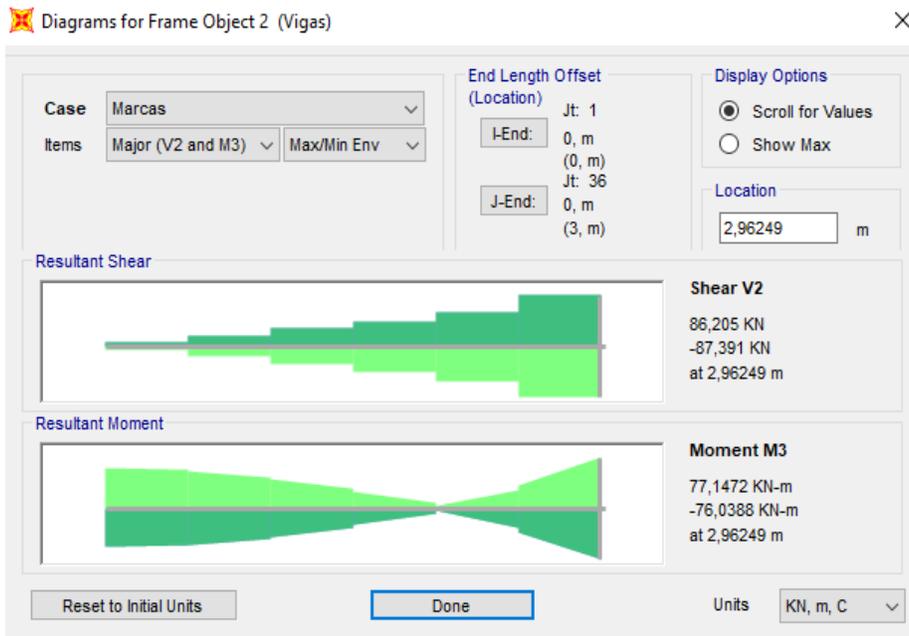


Figura 67 . Momento en la cubierta Marcas

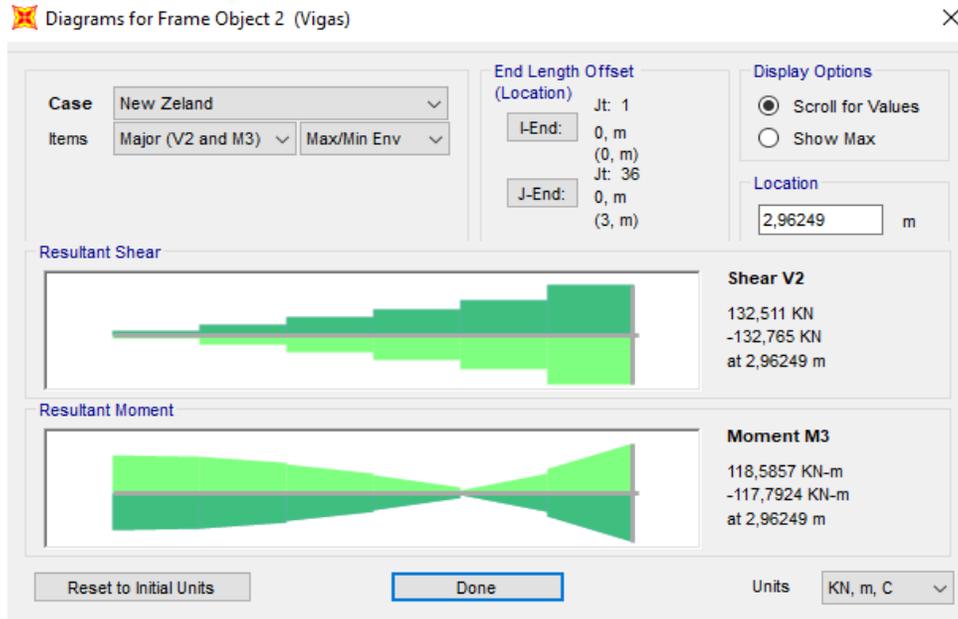


Figura 68. . Momento en la cubierta New Zealand

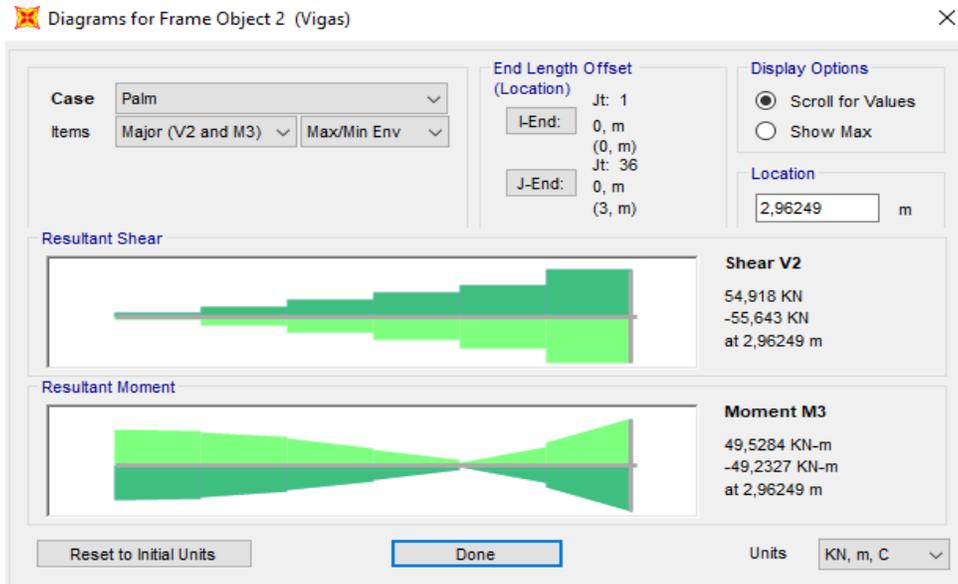


Figura 69. Momento en la cubierta Palm

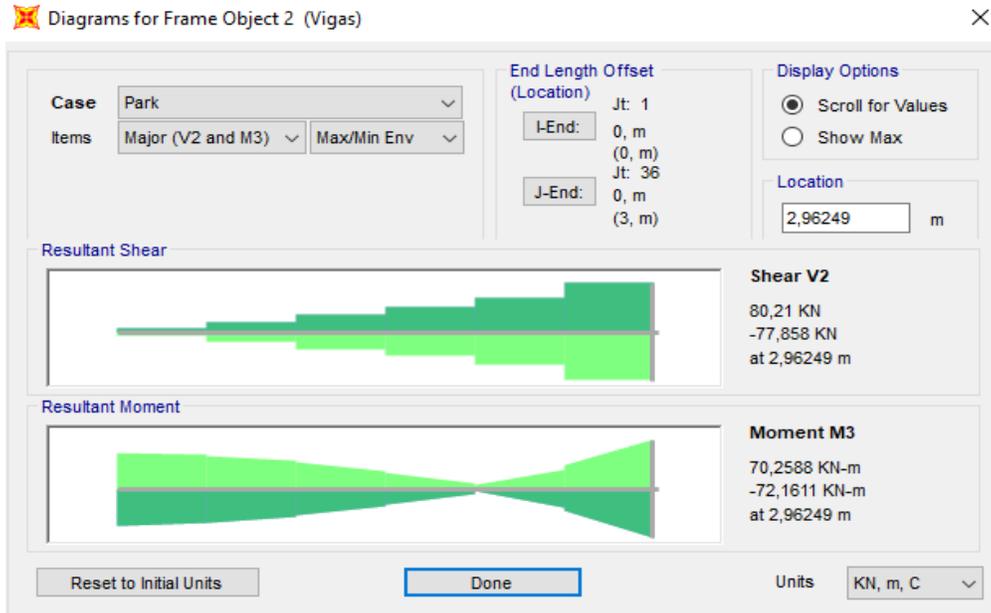


Figura 70 Momento en la cubierta Park

Para la viga V2 el valor del momento para el nivel 2 es de:

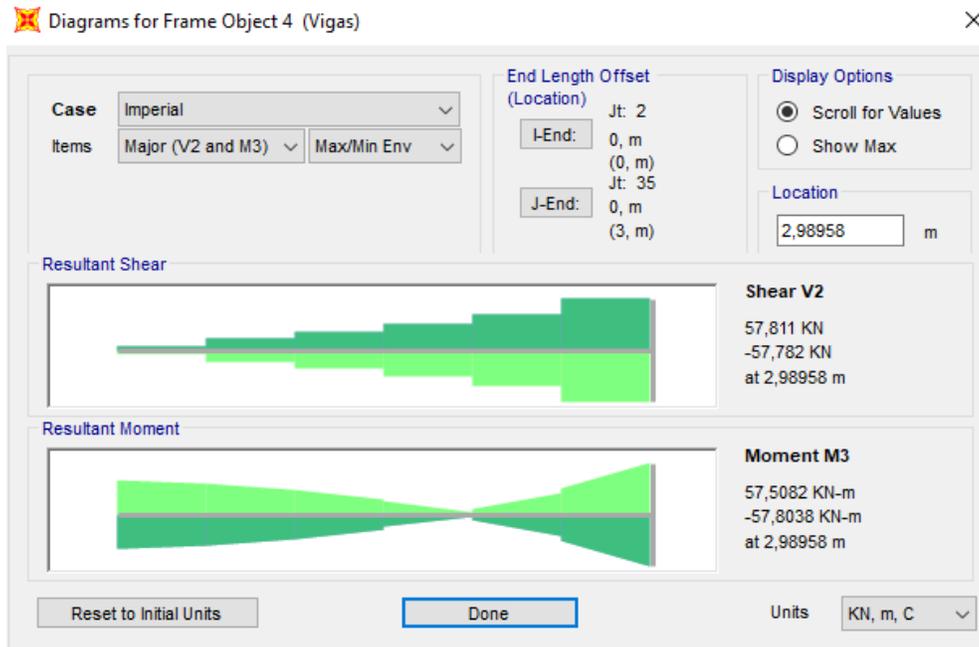


Figura 71. Momento viga 2 nivel 2 Imperial

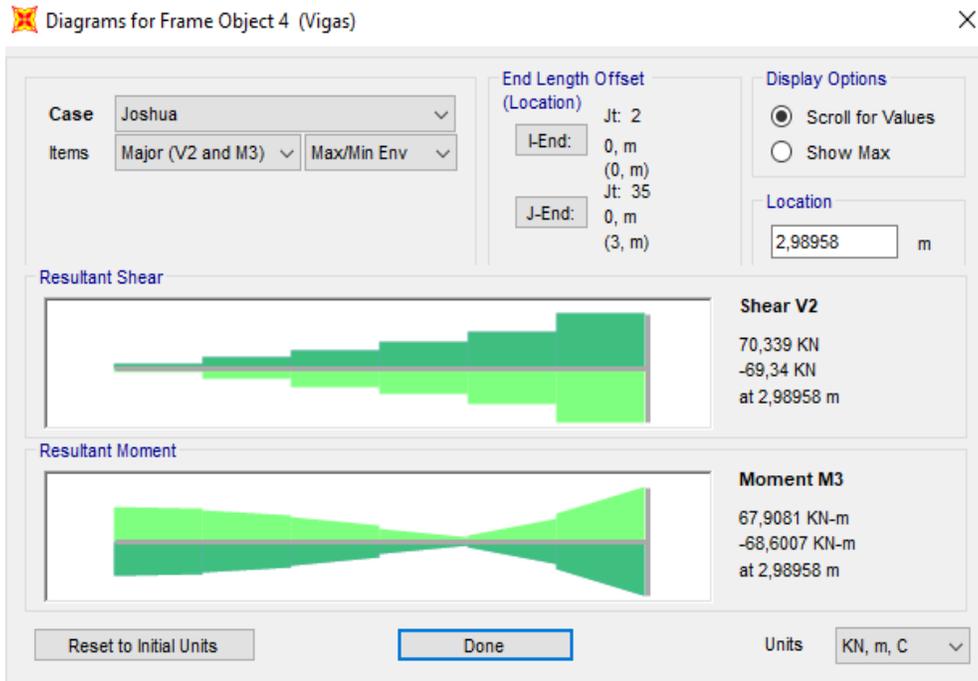


Figura 72. Momento viga 2 nivel 2 Joshua

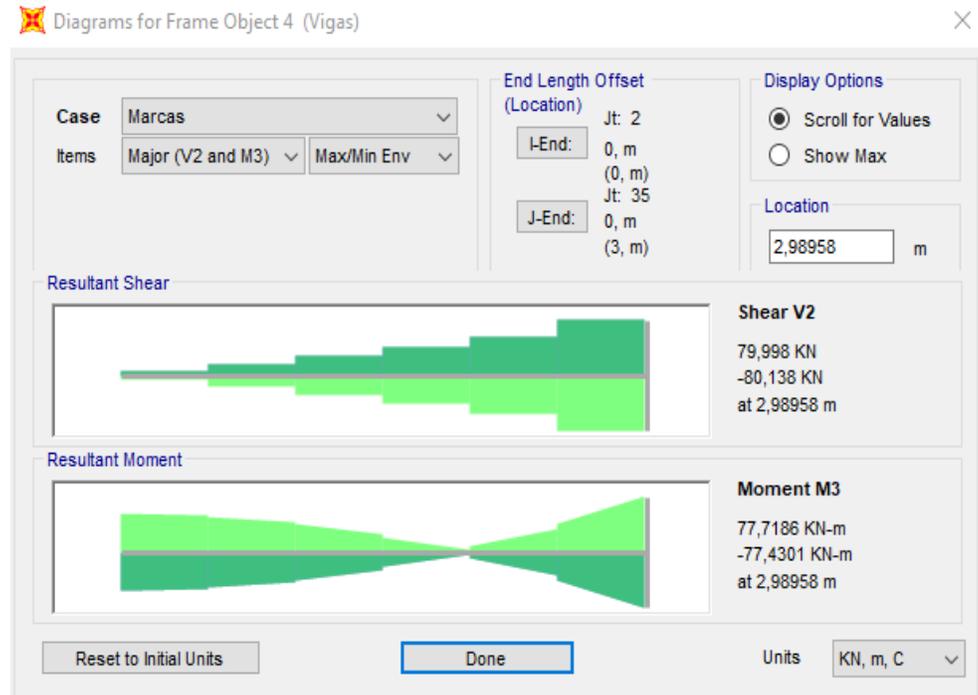


Figura 73. Momento viga 2 nivel 2 Marcas

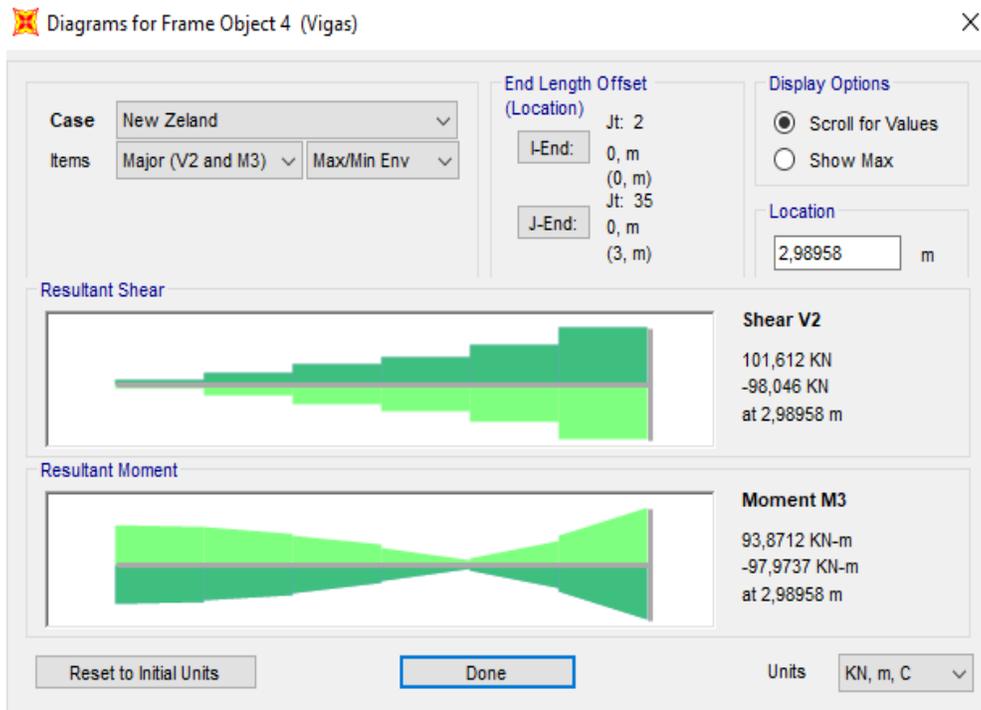


Figura 74. Momento viga 2 nivel 2 New Zealand

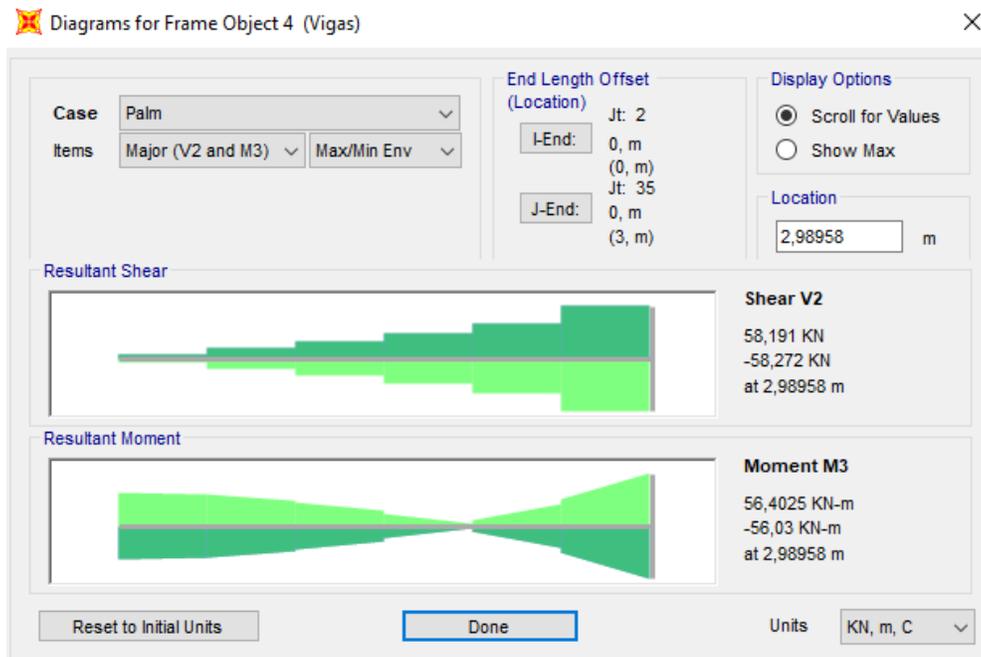


Figura 75. Momento viga 2 nivel 2 Palm

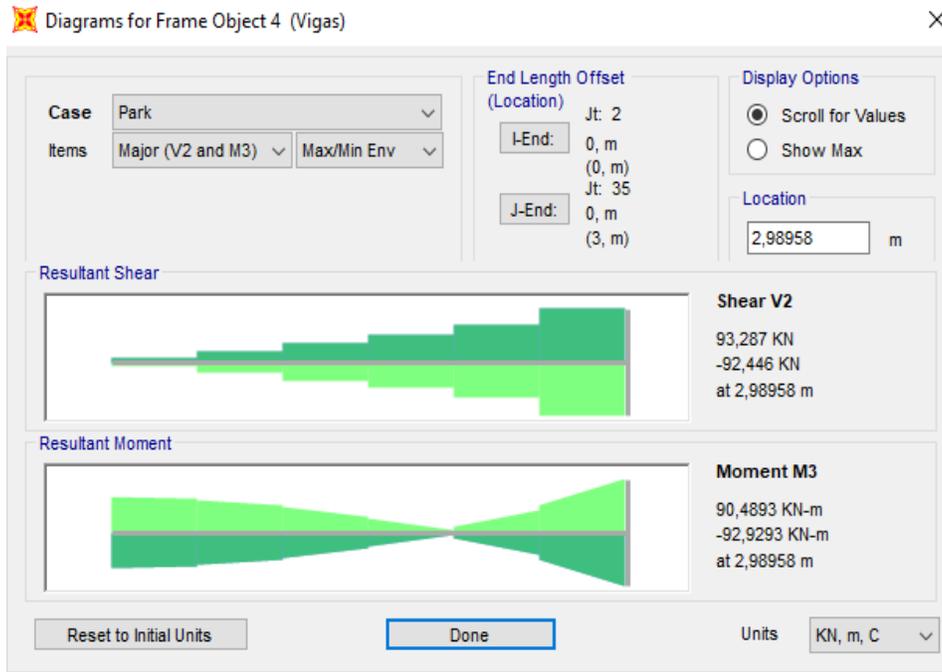


Figura 76. Momento viga 2 nivel 2 Park

Para la viga 2 el valor del momento para el nivel 1 es de:

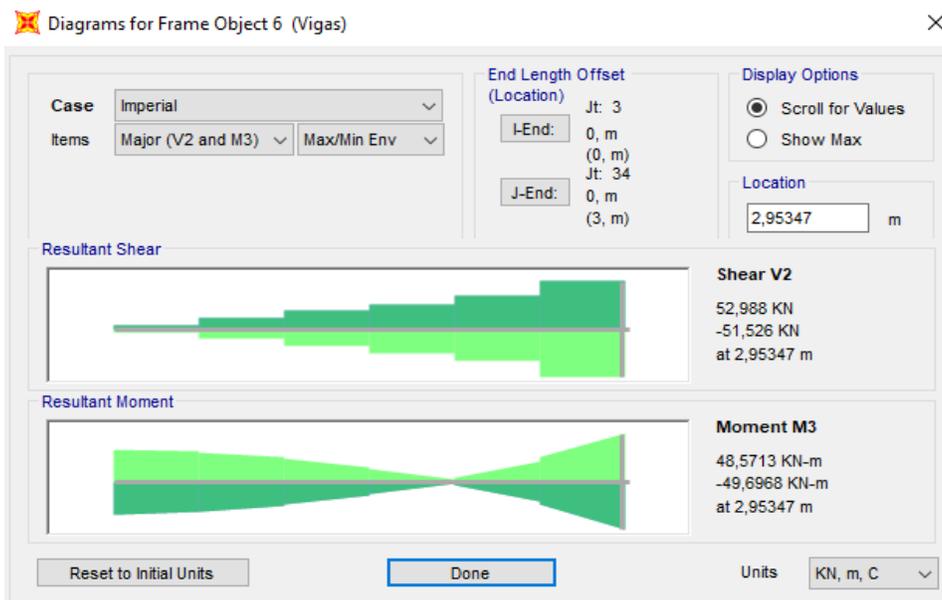


Figura 77. Momento viga 2 nivel 1 Imperial

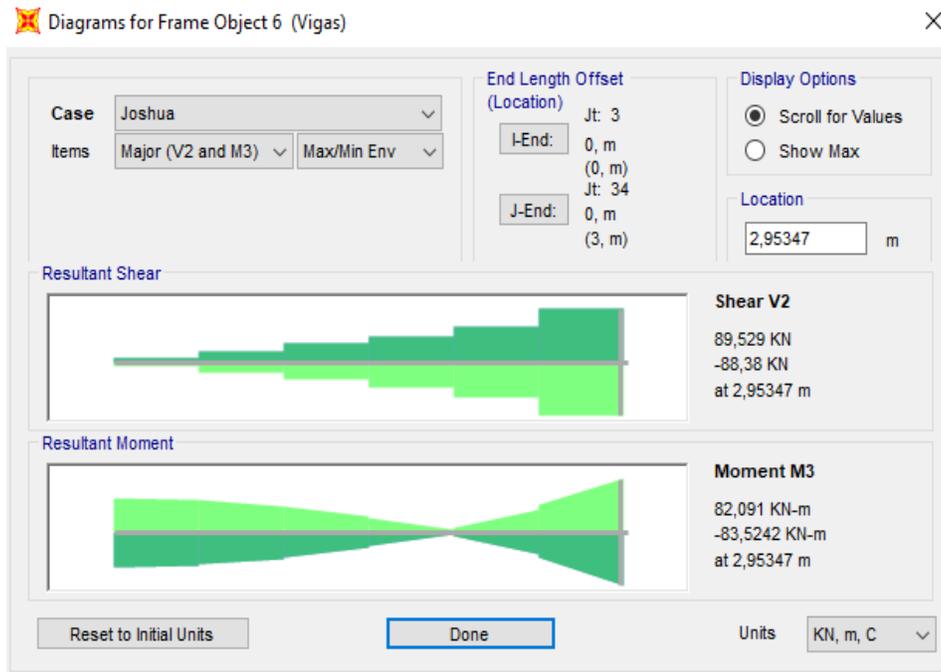


Figura 78.. Momento viga 2 nivel 1 Joshua

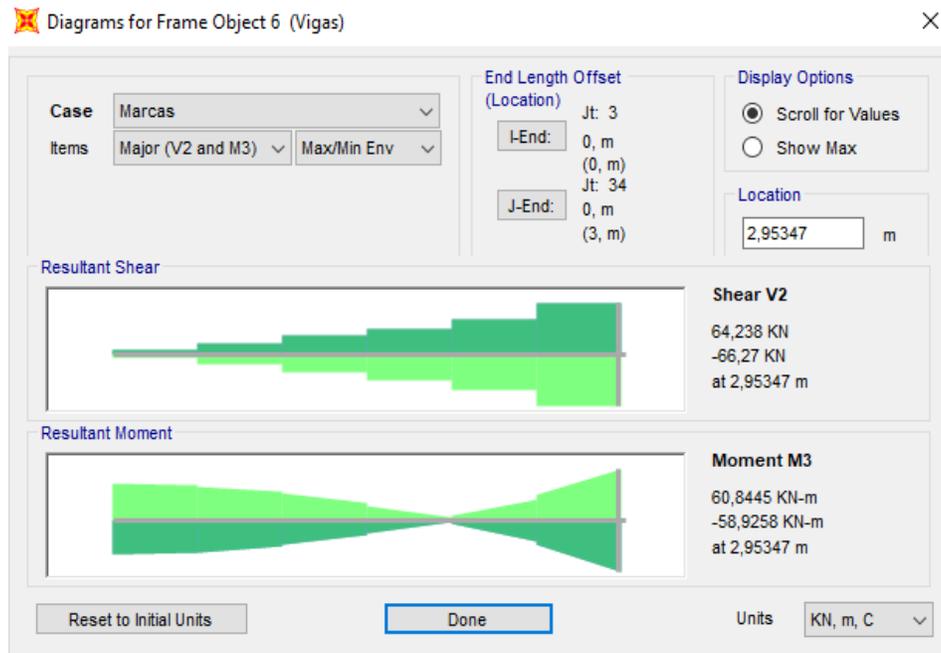


Figura 79. Momento viga 2 nivel 1 Marcas

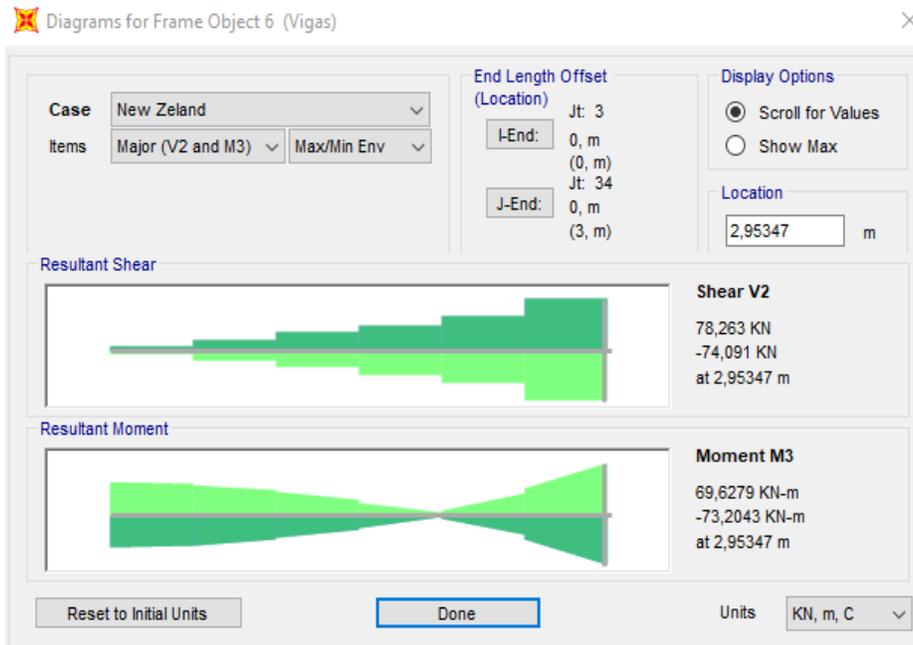


Figura 80. Momento viga 2 nivel 1 New Zealand

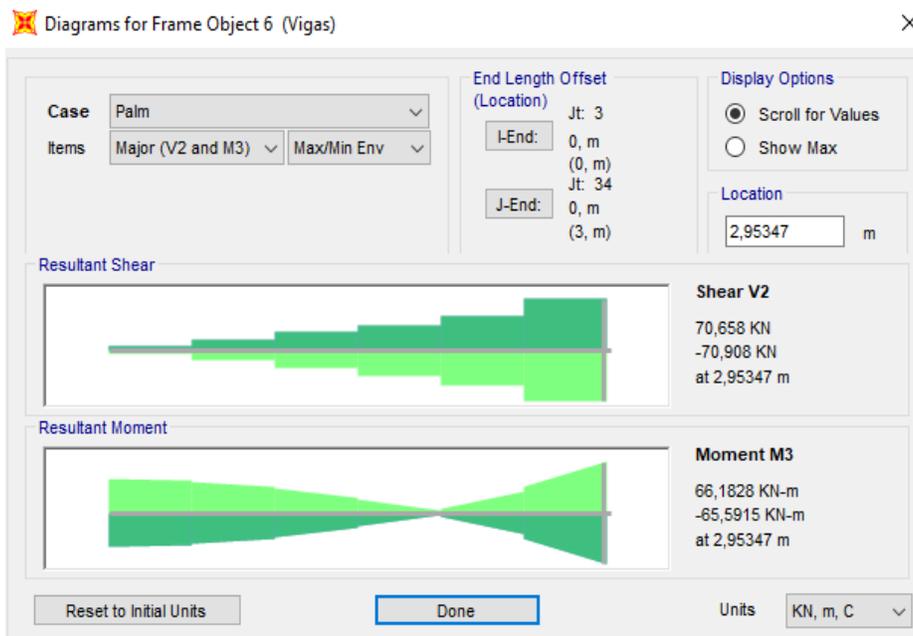


Figura 81. Momento viga 2 nivel 1 Palm

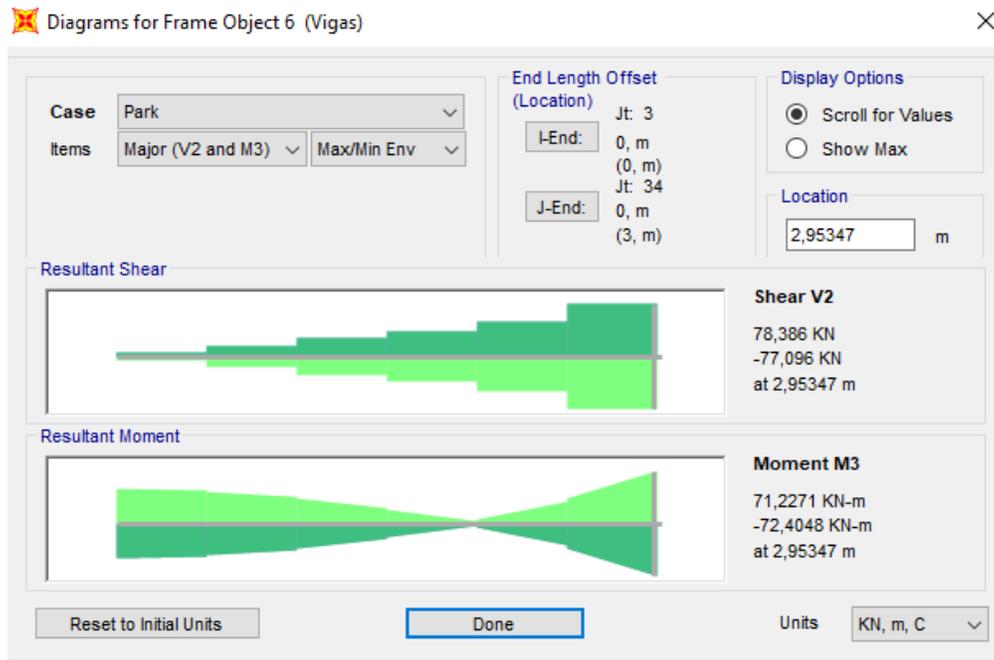


Figura 82. Momento viga 2 nivel 1 Park

12.7. Envolventes

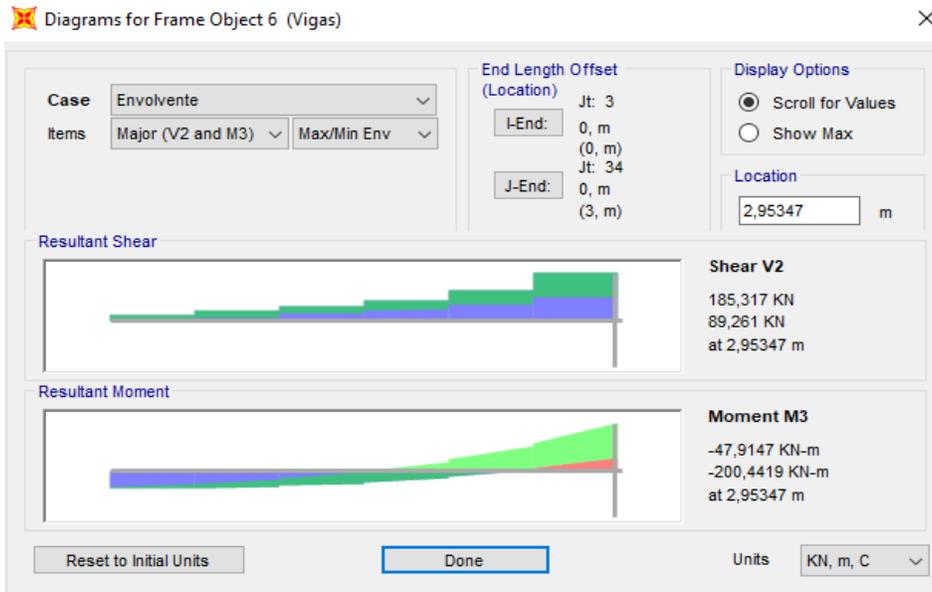


Figura 83. Envolvente Nivel 1

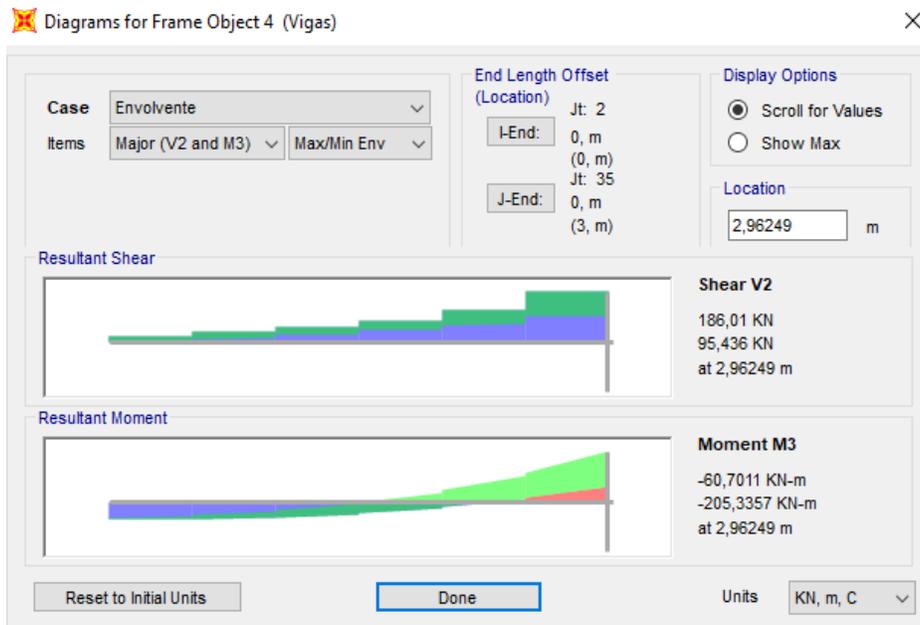


Figura 84. Envolvente nivel 2

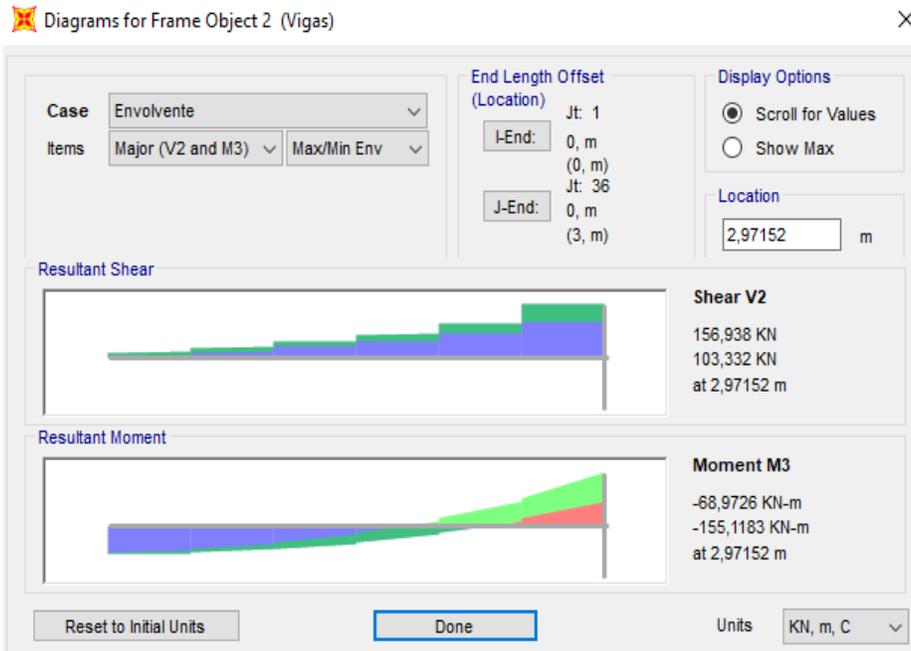


Figura 85. Envolvente Nivel 3