



Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Civil

Análisis por Colapso Progresivo de una estructura real, ante la
ocurrencia de eventos extraordinarios bajo los lineamientos
del General Services Administration del año 2013

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

Presentado ante la

UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO

Como parte de los requisitos para optar el título de

INGENIERO CIVIL

REALIZADO POR:

Rodríguez V. Yuslay A.

Santiago R. Dayana C.

PROFESOR GUÍA:

Ing. Vincenzo Bonadio

FECHA:

Junio de 2017



Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Civil

Este Jurado; una vez realizado el examen del presente trabajo ha evaluado su contenido con el resultado: _____

JURADO EXAMINADOR

Nombre: Vincenzo Bonadio Nombre: Nicolás Labropoulos Nombre: Emilio Solórzano

Firma: _____ Firma: _____ Firma: _____

REALIZADO POR:

Rodríguez V. Yuslay A.

Santiago R. Dayana C.

PROFESOR GUÍA:

Ing. Vincenzo Bonadio

FECHA:

Junio de 2017

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Civil

Este Jurado; una vez realizado el examen del presente trabajo ha evaluado su contenido
con el resultado: Veinte (20)

JURADO EXAMINADOR

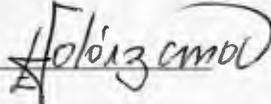
Nombre: Vincenzo Bonadio

Nombre: Nicolás Labropoulos

Nombre: Emilio Solórzano

Firma: 

Firma: 

Firma: 

REALIZADO POR:

Rodríguez V. Yuslay A.

Santiago R. Dayana C.

PROFESOR GUÍA:

Ing. Vincenzo Bonadio

FECHA:

Junio de 2017

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por guiarme cada día y darme su Bendición, por darme la vida y enseñarme a ser mejor persona cada día, porque nunca me abandona y siempre me escucha, Te amo mi Diosito bello, mi mejor amigo.

A mi ángel particular, que me guía desde el cielo y nunca me abandona, porque cada día que estuvo en mi vida nunca me abandono y siempre me protegió, siempre me guio y me enseñó que debía ser una buena mujer y alcanzar mis sueños. Al infinito y más allá, Te Amo papito.

A mi mamita bella, la mujer más trabajadora, luchadora e inspiradora que me enseña cada día a tener fe y ser mejor, quien me ha cuidado desde que nací y lo hará siempre apoyándome, Te Amo mami y éste también es tu logro.

A mi hermanita bella, que siempre me escucha y esta para mí sin importar en que parte del mundo estemos y a mis dos bebés que me regalaste y le han dado luz a mi vida y son otro motivo de ser feliz, los amo mucho.

A toda mi familia que siempre me ha apoyado, y ha estado para mí demostrándome que sin importar lo que pase siempre estaremos unidos, desde cualquier parte del mundo y desde el cielo también.

A mi novio, mi segundo mejor amigo y mi amor, porque me ha inspirado y me ha apoyado, te dedico esta tesis porque es el cierre y el inicio de un nuevo camino, gracias por todo tu amor y ser parte de mi cada día, Te Amo.

A mis dos mejores amigas, Roraima y Dayana porque las dos me apoyaron en mis dos etapas de estudios y a seguir adelante en los momentos más difíciles de mi vida, y ahora estarán siempre en mí.

A mi país Venezuela, porque siempre será parte de lo que soy y me duele ver como se ha destruido, como separo mi familia y en especial estos meses en los que realice mi TEG ha pasado momentos de historia que nunca olvidare y tengo esperanzas de que todo valdrá la pena, ahora seré parte de su cambio y una venezolana más que saldrá al mundo y volverá para levantar este país. Dios bendiga a Venezuela.

A todos los profesores que me formaron en esta etapa, y en especial a tres: nuestro tutor Vincenzo Bonadio, nuestro jurado Nicolás Labropoulos y en memoria a José Nieto por apoyarnos y ayudarnos en este trabajo tan importante.

Alexandra Rodríguez.

Quiero agradecer a todas las personas que me apoyaron durante la realización de este trabajo especial de grado, el camino no fue sencillo, pero con sus aportes, su cariño y su gran apoyo hicieron esto posible.

A mis padres, por estar en todo momento allí y siempre buscar lo mejor para mí dentro de lo que han podido, son todo y más. Espero algún día devolverles todo lo que me han dado.

A mi hermana por ser mi inspiración y mi otra mitad.

A mi amiga Alexandra, por estar allí y ser incondicional, por aceptar asumir este reto juntas, por su paciencia, comprensión y por ser una gran amiga

A mis amigos, Alfonso y Ricardo por darme ánimos y buenos consejos.

A mi profesor guía Vincenzo Bonadio por ser parte de este proceso.

Y por último a mi país, Venezuela, que me inspira a dar lo mejor de mí para ser mejor profesional y formar parte de la construcción de un mejor futuro.

En memoria de José Juan Nieto, quien al inicio nos guió y ayudó todo lo que pudo.

Dayana C. Santiago R.

ÍNDICE GENERAL

Contenido

SINOPSIS	1
ABSTRACT	2
CAPÍTULO I: Introducción	3
1.1 Planteamiento del problema	3
1.2 Antecedentes	4
1.3 Alcance y limitaciones	6
1.4 Objetivos	7
1.4.1 Objetivo general	7
1.4.2 Objetivos específicos.....	7
CAPÍTULO II: Marco Teórico	8
2.1 Glosario	8
2.2 Evento Extraordinario	12
2.3 Relación Demanda Capacidad (DCR)	12
2.4 Acciones controlados por deformación.....	14
2.5 Acciones controlados por fuerza.....	14
2.6 Rótulas plásticas.....	16
2.6.1 Rótulas plásticas por fibra	17
2.6.2 Rótulas por flexión	18
2.6.3 Rótulas de interacción carga axial-momento	19
2.7 Colapso Progresivo	20
2.8 Análisis por Colapso Progresivo	24
2.8.1 Selección de elementos a remover	24
2.8.1.1 Columnas externas	25
2.8.1.2 Columnas internas.....	26
2.8.1.3 Muros de corte externo	27
2.8.1.4 Muros de corte internos	28
2.8.2 Nivel de seguridad de la instalación (FSL)	29

2.8.3	Análisis estático lineal (AEL)	30
2.8.3.1	Modelado de la estructura	31
2.8.3.2	Casos de carga	32
2.8.3.2.1	Acciones controladas por deformación	32
2.8.3.2.2	Acciones controladas por fuerza	33
2.8.3.3	Factor de mayoración de carga (ΩLF , ΩLD)	36
2.8.3.4	Criterio de aceptación	38
2.8.3.4.1	Elementos controlados por deformación	38
2.8.3.4.2	Elementos controlados por fuerza	38
2.8.4	Análisis estático no lineal (AENL)	38
2.8.4.1	Modelado de la estructura	38
2.8.4.2	Efectos P- Δ y largos desplazamientos	41
2.8.4.3	Casos de carga	41
2.8.4.3	Factor de mayoración de carga (ΩN)	42
2.8.4.4	Criterio de Aceptación	42
2.8.4.4.1	Acciones controladas por deformación	43
2.8.4.4.2	Acciones controladas por fuerza	43
2.8.5	Análisis dinámico no lineal (ADNL)	43
2.8.5.1	Modelado de la estructura	44
2.8.5.2	Cargas aplicadas	44
2.8.5.3	Procedimiento de Carga	44
2.8.5.4	Criterio de aceptación	46
2.8.5.4.1	Elementos controlados por deformación	46
2.8.5.4.2	Elementos controlados por fuerza	46
CAPÍTULO III: Marco Metodológico		47
3.1	Obtención de información básica	47
3.2	Modelado de edificación para interpretación de resultados	47
3.3	Interpretación y análisis de resultados	47
3.4	Recomendaciones y elaboración de tomo	47
CAPÍTULO IV: Desarrollo		48
4.1	Estructura de estudio	48
4.2	Modelaje de la estructura en ETABS 2016	49
4.3	Nivel de seguridad de la instalación (FSL)	53
4.4	Selección de elementos a remover	54
4.4.1	Columnas Externas	54

4.4.2 Columnas Internas	55
4.4.3 Muros de corte	55
4.5 Casos de estudio	57
4.5.1 CASO #1 Modelo Control	58
4.5.1.1 Cargas aplicadas	58
4.5.1.2 Relación Demanda Capacidad (DCR) para AEL	58
4.5.1.3 Desplazamientos verticales	60
4.5.2 CASO #2 Remoción Columna C-6	61
4.5.2.1 Análisis Estático Lineal (AEL)	61
4.5.2.1.1 Acciones controladas por deformación	61
4.5.2.1.1.1 DCR para acciones controladas por deformación	63
4.5.2.1.1.2 Áreas afectadas para acciones controladas por deformación	66
4.5.2.1.2 Acciones controladas por fuerza	67
4.5.2.1.2.1 DCR para acciones controladas por fuerza	67
4.5.2.1.2.2 Áreas afectadas para acciones controladas por fuerza	70
4.5.2.2 Análisis Dinámico no Lineal	71
4.5.2.2.1 Procedimiento de Carga	71
4.5.2.2.2 Definición de Rótulas	72
4.5.2.2.3 DCR para acciones controladas por deformación	76
4.5.2.2.3 Acciones controladas por fuerza en el Caso 2	76
4.5.2.2.5 Áreas afectadas para ADNL	78
4.5.3 CASO #3 Remoción Columna C-11	79
4.5.3.1 Definición de Rótulas	79
4.5.3.2 DCR para acciones controladas por deformación	81
4.5.3.1.4 DCR para acciones controladas por fuerza	82
4.5.3.1.5 Áreas afectadas	84
4.5.4 CASO #4 Remoción Columna B-6	85
4.5.4.1 Definición de Rótulas	85
4.5.4.2 DCR para acciones controladas por deformación	87
4.5.4.3 DCR para acciones controladas por fuerza	88
4.5.4.4 Áreas afectadas	91
4.5.5 CASO #5 Remoción Columna B-8	92
4.5.5.1 Definición de Rótulas	92
4.5.5.2 DCR para acciones controladas por deformación	94
4.5.5.3 DCR para acciones controladas por fuerza	95
4.5.5.4 Áreas afectadas	97
4.5.6 CASO #6 Remoción de Muro de Corte B-1-2	98
4.5.6.1 Definición de Rótulas	98
4.5.6.2 DCR para acciones controladas por deformación	100

4.5.6.3 DCR para acciones controladas por fuerza.....	103
4.5.6.4 Áreas afectadas	106
4.6 Comparación de los casos de estudio.....	107
CAPÍTULO V: Análisis de Resultados	113
CAPÍTULO VI: Conclusiones	116

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Column P-M-M Interaction Ratios	13
Ilustración 2. Elementos controlados por deformación	14
Ilustración 3. Elementos controlados por fuerza	15
Ilustración 4. Rótulas plásticas	16
Ilustración 5. Rótulas por fibras de acero y concreto, diagramas de relación fuerza- deformación.	17
Ilustración 6. Conversión de la rotación de la rótula a deformación axial de la fibra	18
Ilustración 7. Componentes de momento y rotación	20
Ilustración 8. Complejo de apartamentos Skyline Plaza luego del colapso.....	21
Ilustración 9. Colapso de Torres Gemelas	22
Ilustración 10. Esquema del colapso progresivo de la torre Ronan Point	23
Ilustración 11. Remoción de columna	24
Ilustración 12. Ubicación de columnas externas a remover	25
Ilustración 13. Ubicación de columnas internas a remover	26
Ilustración 14. Ubicación de muros externos a remover	27
Ilustración 15. Ubicación de muros internos a remover	28
Ilustración 16. Nivel de seguridad de la instalación	30
Ilustración 17. Aplicación de GLD, GLF, GN y G respectivamente según el área afectada por la remoción de una columna – Vista de Planta.....	34
Ilustración 18. Aplicación de GLD, GLF, GN y G respectivamente según el área afectada por la remoción de una columna – Vista de Perfil	34
Ilustración 19. Aplicación de GLD, GLF, GN y G respectivamente según el área afectada por la remoción de un muro – Vista de Planta	35
Ilustración 20. Aplicación de GLD, GLF, GN y G respectivamente según el área afectada por la remoción de un muro – Vista de perfil	35
Ilustración 21. Parámetro de modelaje y criterios de aceptación para rótulas en muros de concreto reforzado para análisis no lineales	41
Ilustración 22. Curva de daños	43
Ilustración 23. Fuerzas de simulación de columna	45
Ilustración 24. Edificio Cincuentenario, UCAB - Sede Montalbán	48
Ilustración 25. Simplificación del techo	50
Ilustración 26. Modelo de las escaleras en forma de rampa	50
Ilustración 27. Cambios de sección es una misma altura.	51
Ilustración 28. Plano de Planta Nivel Mezzanina +4 m.....	51
Ilustración 29. Plano de Planta Nivel +8 m	52
Ilustración 30. Plano de Planta Nivel +12m, +16m, +20m y +24m	52

Ilustración 31. Plano de Planta Nivel +28m	53
Ilustración 32. Plano de Planta de Techo +32m	53
Ilustración 33. Esquema para remoción de columnas externas	54
Ilustración 34. Esquema para remoción de columnas internas	55
Ilustración 35. Esquema para remoción de muros de corte - Vista Planta	56
Ilustración 36. Esquema para la remoción de muro de corte - Vista 3D desde la fachada Sur.	56
Ilustración 37. Valores de DCR para las columnas del Caso 1 - Pórtico A.....	58
Ilustración 38. Valores de DCR para las columnas del Caso 1- Pórtico B.....	59
Ilustración 39. Valores de DCR para las columnas del caso 1- Pórtico C.....	59
Ilustración 40. Desplazamiento vertical para el Caso 1 de AEL	60
Ilustración 41. Desplazamiento vertical para el Caso 1 de ADNL.....	61
Ilustración 42. DCR de columnas para acciones controladas por deformación del caso 2- Pórtico A.....	63
Ilustración 43. DCR de columnas para acciones controladas por deformación del caso 2 – Pórtico B	64
Ilustración 44. DCR de columnas para acciones controladas por deformación del caso 2 – Pórtico C	64
Ilustración 45. Área afectada del caso 2 para acciones controladas por deformación.....	66
Ilustración 46. Valores de DCR de columnas para acciones controladas por fuerza del Caso 2 – Pórtico A	67
Ilustración 47. DCR de columnas para acciones controladas por fuerza del Caso 2 – Pórtico B	68
Ilustración 48 .DCR de columnas para acciones controladas por fuerza del Caso 2 – Pórtico C	68
Ilustración 49. Vigas que no soportan los efectos de corte y torsión del Caso2 de AEL	69
Ilustración 50. Área afectada del caso 2 para acciones controladas por fuerza.....	70
Ilustración 51. Time History cargando y Time History descargando para el caso 2.....	71
Ilustración 52. Definición de rótulas plásticas controladas por interacción P-M para columnas	74
Ilustración 53. Definición de rótulas plásticas controladas por momento para vigas.....	75
Ilustración 54. Rótulas asignadas en el modelo del caso 2 de ADNL.....	75
Ilustración 55. Valores de DCR para vigas y columnas del caso 2 de ADNL	76
Ilustración 56. Valores de Av/S requeridos por el ETABS para el Caso 2	77
Ilustración 57. Vigas que no soportan los efectos de corte y torsión del Caso 2 de ADNL.....	77
Ilustración 58. Área afectada del caso 2 para ADNL	78
Ilustración 59. Rótulas plásticas asignadas en el modelo 3	80
Ilustración 60. Valores de DCR para vigas, columnas y muro del Caso 3.....	81
Ilustración 61. Valores de Av/S requeridos por el ETABS del Caso 3	82

Ilustración 62. Vigas que no soportan los efectos de corte y torsión del Caso 3 de ADNL - Pórtico 10.....	83
Ilustración 63. Áreas afectadas del caso 3 para ADNL	84
Ilustración 64. Rótulas plásticas asignadas en el modelo del Caso 4 para ADNL	87
Ilustración 65. Valores de DCR del Caso 4 para ADNL.....	87
Ilustración 66. Valores de Av/S requeridos para columnas por el ETABS del Caso 4 para ADNL	88
Ilustración 67. Vigas que no soportan los efectos de corte y torsión del Caso 4 de ADNL.....	89
Ilustración 68. Área afectada del Caso 4 para ADNL	91
Ilustración 69. Rótulas plásticas asignadas en el modelo del Caso 5 para ADNL	94
Ilustración 70. Valores de DCR del caso 5 para ADNL.....	94
Ilustración 71. Valores de Av/S requeridos por el ETABS del Caso 5 para ADNL	95
Ilustración 72. Vigas que no soportan los efectos de corte y torsión del Caso 5 de ADNL.....	96
Ilustración 73. Área afectada del caso 5 para ADNL	97
Ilustración 74. Definición de rótulas plásticas por fibra para muros del Caso 6 de ADNL	98
Ilustración 75. Rótulas plásticas asignadas en el modelo del Caso 6 para ADNL	100
Ilustración 76. Valores de DCR en muros del Caso 6 para ADNL	101
Ilustración 77. Valores de DCR del Caso 6 para ADNL - Pórtico 1	101
Ilustración 78. Valores de DCR en vigas del Caso 6 para ADNL – Pórtico B.....	102
Ilustración 79. Valores de Av/S requeridos por el ETABS del Caso 6 para ADNL	103
Ilustración 80. Vigas que no soportan los efectos de corte y torsión del Caso 6 de ADNL...	104
Ilustración 81. Área afectada del Caso 6 para ADNL	106
Ilustración 82. Desplazamientos verticales del Caso 2 vs Caso 1	108
Ilustración 83. Desplazamientos verticales del Caso 3 vs Caso 1	109
Ilustración 84. Desplazamientos verticales del Caso 4 vs Caso 1	110
Ilustración 85. Desplazamientos verticales del Caso 5 vs Caso 1	111
Ilustración 86. Desplazamientos verticales del Caso 6 vs Caso 1	112

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA #1. Acciones controladas por fuerza y por deformación.....	15
TABLA #2. Factores de mayoración de carga.....	36
TABLA #3 Factor m para vigas de concreto reforzado.....	37
TABLA #4. Parámetro de modelaje y criterios de aceptación para rótulas de vigas de concreto reforzado para análisis no lineales.....	39
TABLA #5. Parámetro de modelaje y criterios de aceptación para rótulas en columnas de concreto reforzado para análisis no lineales.....	40
TABLA #6. Factor de mayoración de carga.....	42
TABLA #7. Niveles de Diseño según COVENIN 1756-2001.....	49
TABLA #8. Casos de estudio.....	57
TABLA #9. Cargas gravitacionales actuantes según área.....	57
TABLA #10. Valores de DCR máximos para vigas según nivel de piso.....	60
TABLA #11 Valor del Factor mLIF del caso 2 de AEL.....	62
TABLA #12 Valores de DCR de vigas para acciones controladas por deformación.....	65
TABLA #13. Área afectada del Caso 2 para acciones controladas por deformación.....	66
TABLA 14. At/s requerido vs At/s real para vigas resaltadas en la ilustración 49.....	69
TABLA #15. Área afectada del caso 2 para acciones controladas por fuerza.....	70
TABLA #16. Definición de rótulas plásticas para vigas del Caso 2.....	72
TABLA #17. Definición de rótulas plásticas para columnas del caso 2.....	73
TABLA # 18. At/s requerido vs At/s real para vigas resaltadas en la ilustración 57.....	78
TABLA #19. Área afectada del caso 2 para un ADNL.....	79
TABLA #20. Definición de rótulas plásticas para vigas del Caso 3 de ADNL.....	79
TABLA #21. Definición de rótulas plásticas para columnas del Caso 3 de ADNL.....	80
TABLA #22. At/s requerido vs At/s real para vigas resaltadas en la ilustración 62.....	83
TABLA #23. Áreas afectadas del Caso 3 para ADNL.....	84
TABLA #24. Definición de rótulas plásticas para vigas del Caso 4 de ADNL.....	85
TABLA #25. Definición de rótulas plásticas para columnas del Caso 4 de ADNL.....	86
TABLA #26. At/s requerido vs At/s real para vigas resaltadas en la ilustración 67.....	90
TABLA #27. Área afectada del Caso 4 para ADNL.....	91
TABLA #28. Definición de rótulas plásticas para vigas del Caso 5 de ADNL.....	92
TABLA #29. Definición de rótulas plásticas para columnas del Caso 5 de ADNL.....	93
TABLA #30. At/s requerido vs At/s real para vigas resaltadas en la ilustración 72.....	96
TABLA #31. Área afectada del Caso 5.....	97
TABLA #32. Definición de rótulas plásticas para vigas del Caso 6 de ADNL.....	99
TABLA #33. Definición de rótulas plásticas para columnas del Caso 6 de ADNL.....	99
TABLA 34. At/s requerido vs At/s real para vigas resaltadas en la ilustración 80.....	105
TABLA #35. Área afectada del Caso 6 para ADNL.....	106

TABLA #36. Cuadro comparativo de áreas afectadas y desplazamientos verticales para ADNL
..... 107

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1.Relación Demanda Capacidad	12
Ecuación 2.Capacidad Resistente a Flexión de una Viga de Concreto Reforzado.....	13
Ecuación 3.Capacidad Resistente al Corte de una Viga de Concreto Reforzado	13
Ecuación 4.Momento torsional	19
Ecuación 5.Rotación plástica.....	19
Ecuación 6.Cargas por gravedad para las acciones controladas por deformación	32
Ecuación 7.Cargas por gravedad	33
Ecuación 8.Cargas por gravedad para las acciones controladas por deformación	33
Ecuación 9.Cuantía balanceada.....	37
Ecuación 10.Cargas incrementadas para el análisis estático no lineal.....	42
Ecuación 11.Cargas por gravedad para el análisis dinámico no lineal	44

SINOPSIS

Un colapso progresivo ocurre cuando alguno de los elementos verticales de una estructura falla y los elementos restantes no son capaces de soportar el peso de la misma, generando la falla de los demás componentes, como en un efecto dominó. Este colapso puede ser total o parcial.

Un análisis por colapso progresivo tiene como propósito evaluar el comportamiento de una estructura ante la pérdida de alguno de sus elementos verticales de carga. El evento que genera la falla del elemento vertical no es relevante en este tipo de estudios, ya que suelen ser eventos de muy baja probabilidad de ocurrencia, y se asume que el evento, sea cual sea, ya ha ocurrido y ha dejado como consecuencia una falla local de algún elemento vertical.

La oficina de Servicios Generales de los Estados Unidos (GSA) publicó en el año 2000 una serie de lineamientos con el propósito de crear una metodología para la realización de este tipo de análisis, cuya aplicación depende de los Niveles de Seguridad de la Instalación (Facility Security Level o FSL en inglés).

En este Trabajo Especial de Grado se trabajó con la actualización de la GSA del año 2013 analizando el edificio de Cincuentenario, ubicado en la Universidad Católica Andrés Bello-Sede Montalbán. Para lo cual, se estudiaron cinco (5) casos de remoción de elementos variando su ubicación según las recomendaciones de la GSA y un sexto caso, como modelo control.

En principio, se realizó un análisis estático lineal para el primer caso de remoción de columna, sin embargo, se comprobó a través del software que la estructura tenía un comportamiento inelástico importante por lo cual, fue necesario realizar un análisis dinámico no lineal en cada uno de los casos.

Palabras Clave: Colapso progresivo, GSA, remoción de elementos verticales, análisis dinámico no lineal

ABSTRACT

A Progressive Collapse occurs when a structural vertical element fractures and the rest of the structure is not capable of holding the vertical loads, leading to their failure, as a domino effect. The structure could collapse partially or totally.

A Progressive Collapse Analysis has the purpose of evaluating the structure behavior when it losses a vertical element. The event that leads to the failure of the elements is not important in this study, due to its low probability, but it is assumed that no matter what the cause is, the event has occurred and a vertical element has been significantly affected, simulated as it has been removed.

The General Service Administration (GSA) of the United States of America published in 2000 a document with the purpose of establishing guidelines for performing a Progressive Collapse Analysis, which is associated to the Facility Security Level (FSL).

This investigation was performed using the guidelines established by the GSA in the 2013 edition to analyze the “Cincuentenario” building, located in the Universidad Católica Andrés Bello’s campus in Montalbán, Venezuela. For the analysis were developed 5 different scenarios of removals of vertical elements, compared to the behavior of the structure with all its elements.

Initially, a lineal static analysis was run for the first removal scenario, however, due to the important inelastic behavior developed by the structure, it was necessary to apply a more accurate method, in this case, a nonlinear dynamic analysis to each scenario.

Key words: Progressive Collapse, GSA, vertical element removal, nonlinear dynamic analysis.

CAPÍTULO I: Introducción

1.1 Planteamiento del problema

Las normas de construcción venezolanas se caracterizan generalmente por contemplar en sus diseños los efectos de cargas gravitacionales, cargas sísmicas y cargas de viento dependiendo del tipo de estructura y su ubicación geográfica, así como otros tipos de cargas generadas por algún evento natural de alta incidencia. Sin embargo, debido a su baja probabilidad de ocurrencia, no se contemplan cargas anormales producidas por eventos extraordinarios, que puedan generar una falla local desencadenando un proceso de colapso en la estructura durante la etapa de construcción o a lo largo de su vida útil.

En países como EE.UU y el Reino unido, ya se contempla en el diseño este tipo de cargas poco probables o anormales generadas por la ocurrencia de eventos extraordinarios como incendios, choque de vehículos con la edificación, falta de mantenimiento, problemas constructivos en general, explosiones de gas, explosiones de bombas, entre otros. Este tipo de cargas son causantes del colapso progresivo también conocido como colapso desproporcionado, el cual es uno de los tipos de fallas de construcción de alto riesgo, definido en el documento “Análisis de ruta alternativa y directrices de diseño para resistencia al colapso progresivo” por la GSA (*General Services Administration*), como “la extensión de daño o colapso, de diferentes proporciones a la magnitud del evento inicial”.

Ante la posibilidad de incidencia de esta problemática se plantea realizar un análisis por colapso progresivo a una estructura real, de uso educacional, construida bajo las normas venezolanas COVENIN 1756-1:2001 “*Edificaciones sismorresistentes*”. Mediante el análisis por colapso progresivo es posible predecir el comportamiento de la edificación ante la pérdida de sus elementos estructurales a través de los programas de simulación, y de esta forma, generar recomendaciones.

1.2 Antecedentes

La oficina de Administración de Servicios Generales (General Services Administration, GSA), fue establecida por el presidente Harry Truman el 1 de julio de 1949, para simplificar el trabajo administrativo del gobierno federal. Este ente consolidó el Archivo Nacional de Establecimiento, la Agencia Federal de Obras, la Administración de Edificios Públicos y la Administración de Activos de la guerra en una agencia federal encargada de la administración de los suministros y la disponibilidad para los lugares de trabajo para los empleados federales.

En el año 1995, tras el ataque al edificio federal Alfred P. Murrah, el gobierno federal de los Estados Unidos, pide establecer estándares de construcción para estos edificios. El comité de seguridad interinstitucional (Interagency Security Committee, ISC) desarrolló en respuesta a esta orden ejecutiva, los criterios de diseño de seguridad para nuevos edificios de oficinas federales y grandes proyectos de modernización (Security Design Criteria for New Federal Office Buildings and Major Modernization Projects). La GSA publica “Progressive Collapse Analysis and Design Guidelines for New Federal Office Buildings and Major Modernization Projects” en el año 2000 y es revisado nuevamente en el año 2003.

El propósito de los lineamientos de la GSA es reducir el potencial de colapso progresivo en los edificios federales nuevos y remodelados, cuya aplicación dependerá de los Niveles de Seguridad de la Instalación (Facility Security Level , FSL). Así mismo, en el año 2013, usando como referencia los procedimientos de análisis de UFC 04/02/03 “*Design of Buildings to Resist Progressive Collapse*” y la ASCE-41 “*Seismic Rehabilitation of Existing Buildings*” se actualiza este documento y se publica la nueva versión.

Desde entonces, se han realizado diversos trabajos de investigación basados en los lineamientos proporcionados en este documento tanto para el diseño de nuevas edificaciones como para la evaluación de edificaciones existentes, tal es el caso de (Sezen & Giriunas, 2009) quienes analizaron y estudiaron el colapso progresivo de un edificio histórico localizado en Northbrook, Illinois. El edificio fue programado para la demolición en agosto de 2008,

siguiendo un proceso desarrollado a raíz de las directrices de la Administración de Servicios Generales (General Services Administration ó GSA en inglés) de los Estados Unidos, el cual consistió en retirar 4 columnas de la estructura existente y, con el uso de medidores de tensión, capturar datos que luego fueron comparados con los resultados de un análisis en SAP2000.

Debido al registro de datos inexactos, se obtuvo un porcentaje de error de hasta un 21% en promedio a partir del análisis realizado en SAP2000. Sin embargo recomendaron una simulación numérica más precisa.

Por otro lado, (Dolores S & Minervini G., 2013) , estudiaron la respuesta estructural en edificios de planta regular diseñados según la norma COVENIN 1756-1:2001, ante la pérdida de sus elementos estructurales, con el fin de analizar su comportamiento estructural y evaluar la redistribución de los esfuerzos. Se realizó el análisis a edificaciones de concreto reforzado con distintas alturas.

Partiendo de las recomendaciones realizadas en este trabajo especial de grado, se plantea continuar la línea de investigación aplicando la metodología de este trabajo a una edificación ya construida, con el fin comparar su comportamiento antes y después de la pérdida de al menos uno de sus elementos.

1.3 Alcance y limitaciones

El siguiente trabajo especial de grado se ve limitado principalmente por las directrices del documento “Análisis de ruta alternativa y directrices de diseño para resistencia al colapso progresivo” por la GSA (*General Services Administration*) del año 2013, mediante una simulación de la estructura en programas de análisis estructurales tales como ETABS y SAP 2000, lo que genera otra limitante por la capacidad de los programas.

Así mismo, este trabajo especial de grado se enfocará principalmente en la respuesta estructural que tendrá la edificación ante un colapso progresivo, una vez inducida la falla local de al menos uno de sus elementos, cuyas características propias se vuelven limitantes del análisis:

- Una estructura regular.
- Con sistema de pórticos simples.
- Diseñada y construida según la norma COVENIN 1756-1:2001.
- Losa nervada y en dos direcciones
- Zona sísmica 5.
- Ubicada en un suelo tipo S2.
- Nivel de diseño 3 (ND3).
- Uso educacional.

Al centrarse esta investigación en una edificación real de la ciudad de Caracas - Venezuela, será posible utilizar este estudio como modelo o patrón de comportamiento estructural a edificaciones con características similares susceptibles a este tipo de fallas generadas por eventos extraordinarios.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Estudiar el comportamiento estructural de un edificio real, mediante un análisis por colapso progresivo basado en el documento “Análisis de ruta alternativa y directrices de diseño para resistencia al colapso progresivo” por la *General Services Administration (GSA) 2013*, ante la posibilidad de ocurrencia de un evento extraordinario.

1.4.2 Objetivos específicos

- Plantear el modelo matemático de la estructura a analizar.
- Analizar el modelo según las recomendaciones de la GSA del año 2013.
- Analizar la respuesta estructural previa a la pérdida de alguno de sus elementos estructurales.
- Analizar la respuesta estructural posterior a la pérdida de alguno de sus miembros estructurales.
- Sentar las bases para un documento de recomendaciones a las normas venezolanas de construcción

CAPÍTULO II: Marco Teórico

2.1 Glosario

A continuación, se presentan una serie de términos del campo de estudio aplicado a este Trabajo Especial de Grado, con sus respectivas definiciones.

Acceso público incontrolado: Son aquellas áreas a las que puede tener acceso cualquier público (ya sea estudiantes, personal administrativo, personal de mantenimiento, visitantes, etc.) sin ningún control de seguridad.

Apuntalamiento: Sistema compuesto por una serie de puntales o postes que actúan en conjunto destinados a asegurar y ofrecer sostén a estructuras; por lo general son transitorios y se emplean en casos de inestabilidad estructural hasta la reparación o demolición.

Área afectada: Área que tiene una deformación vertical importante con respecto al resto del área de un mismo nivel de piso.

Ángulo de Rotación Plástica: La rotación plástica θ_p es la rotación inelástica o no recuperable que se produce después de que se alcanza la rotación de rendimiento. La rotación plástica está típicamente asociada con las rotulas plásticas, ya que éstas miden tanto las rotaciones elásticas como plásticas, aunque por simplicidad, la parte elástica es a menudo ignorada debido a su pequeño tamaño.

Carga Anormal: Es una condición de carga no común en la estructura, la cual no es considerada para el diseño y cálculo de las edificaciones, y son capaces de comprometer el funcionamiento correcto de la misma. Este tipo de cargas son las causantes del colapso progresivo.

Cargas gravitacionales: Son las cargas que actúan sobre una estructura como consecuencia de la acción de la gravedad. Por lo tanto siempre tienen dirección vertical (perpendicular a la tierra) ejemplos: peso propio de la estructura, cerramientos revestimientos, instalaciones, solados, revestimientos, etc.

Cargas Permanentes: Son las que duran toda la vida útil de la estructura, es decir, son las que no cambian nunca su estado de reposo o lo hacen lentamente en el tiempo. Comprenden al peso propio de la estructura y el de todas aquellas partes ligadas a ellas (Olano, 2016).

Carga Normal: Condición de carga probabilística que ocurre durante la vida útil de la estructura, tanto en su período de construcción como en su etapa de ocupación, tomada en cuenta para el diseño de la misma según su uso. Dentro de este tipo de carga se consideran algunos eventos naturales como lo son el sismo, viento, etc (GSA, 2013).

Cargas variables: Son las que varían rápidamente en el tiempo. En todos los casos son las que durante el tiempo que actúan están en estado de movimiento (inercial) considerable. (Olano, 2016).

Comportamiento elástico: Se refiere a la propiedad mecánica de ciertos materiales de sufrir deformaciones reversibles cuando se encuentran sujetos a la acción de fuerzas exteriores y de recuperar la forma original si estas fuerzas exteriores se eliminan, esto ocurre dentro del límite elástico, también denominado límite de elasticidad.

Comportamiento inelástico: El comportamiento de los materiales tiene una fase plástica, que se caracteriza porque la relación entre el esfuerzo y la deformación no es lineal y al eliminar la carga el material queda con una deformación permanente.

Compresión: Un cuerpo se encuentra sometido a compresión si las fuerzas aplicadas tienden a aplastarlo o comprimirlo. Los pilares y columnas son ejemplo de elementos diseñados para resistir esfuerzos de compresión.

Continuidad: se refiere a que los miembros principales estén bien conectados entre sí, de esta forma, se podrá transmitir la carga efectivamente, para lograr que la estructura trabaje como un sistema (Herrera & Pollner, Búsqueda de Patrones Geometricos y Mecanicos en Edificios que han Perdido Parte de su Soporte, 2011).

Colapso: Disminución de la resistencia de una estructura o elemento estructural, por condiciones externas o internas, provocando la incapacidad de su función, pérdida de estabilidad y destrucción.

Ductilidad: Es la capacidad que tiene un elemento para soportar grandes deformaciones sin perder su resistencia.

Edificios Aporticados: Un sistema aporticados es aquel cuyos elementos estructurales principales consisten en vigas y columnas conectados a través de nodos formando pórticos resistentes en las dos direcciones principales de análisis (x e y).

Efecto Catenaria: Es cuando el colapso es resistido a través de fuerzas de tracción y las deformaciones se generan en el centro de la viga. Es un fenómeno que ocurre cuando las deformaciones en las vigas o losas son muy altas, generando que los elementos que trabajaban a flexión pasen a trabajar a tracción (GSA, 2013).

Efecto de las placas plegadas: es cuando se transmiten las solicitaciones externas a los apoyos, mediante la repartición de esfuerzos en distintas direcciones, debiendo su capacidad resistente a la forma de la estructura.

Elementos primarios y secundarios: Se clasifica como elementos y componentes primarios, todos aquellos que son capaces de aportar a la estructura capacidad de resistir el colapso ante la pérdida de un elemento vertical. Todos los otros elementos y componentes serán clasificados como secundarios.

Esfuerzo Cedente: El esfuerzo de cedencia (σ_y) es el esfuerzo a partir del cual el material deja de ser elástico y no mantiene una relación lineal entre el esfuerzo y la deformación, es decir, pasa de la fase elástica a la fase plástica (Medina, 2016).

Esfuerzo residual: Un sistema de esfuerzos o tensiones existentes en el interior de un sólido, que no dependen de fuerzas externas.

Falla Local: Pérdida de un único miembro estructural primario, debido a algún evento externo.

Flexión: Un elemento estará sometido a flexión cuando actúen sobre él cargas que tiendan a doblarlo. A este tipo de esfuerzo se ven sometidas las vigas de una estructura.

Función Rampth: Función del análisis no lineal rápido que aplica de manera progresiva las cargas asignadas al análisis.

Monotónica: De una función o cantidad que varía de tal manera que nunca disminuye o nunca aumenta.

Muros de corte: Los muros de corte son elementos estructurales verticales que geométricamente se diferencian de las columnas por que la relación dimensión más pequeña entre dimensión más grande en planta es menor de 0,40.

Redundancia: Es la capacidad que tiene los componentes de una estructura para poder conducir cargas, siendo capaz de transferirlas en distintos caminos desde un punto de aplicación hasta un punto de resistencia. Esta propiedad está asociada a la cantidad razonable de número de columnas o muros que posee una estructura.

Resistencia local: Es un método que intenta prevenir una falla estructural inicial como consecuencia de la ocurrencia de un evento anormal que podría desencadenar un colapso progresivo. (Haberland & Starossek, 2017)

Rótulas: Propiedades que se utilizan para definir el comportamiento no lineal de fuerza-desplazamiento (axial y corte) o momento-rotación (flexión) que se puede asignar a localizaciones determinadas a lo largo de los elementos de una estructura.

Tracción: Decimos que un elemento está sometido a un esfuerzo de tracción cuando sobre él actúan fuerzas que tienden a estirarlo. Los tensores son elementos resistentes que aguantan muy bien este tipo de esfuerzos.

Vulnerabilidad: Se define como la tolerancia de daños imprevistos o no considerados en el diseño de la estructura. (Haberland & Starossek, 2017)

2.2 Evento Extraordinario

Un evento que es imprevisible o se produce con muy baja probabilidad y no se considera en el diseño ordinario de una estructura. Estos eventos pueden de ser de origen natural o antrópico:

Antrópicos (Accidentales o intencionales)	{	Impactos: Carros, trenes, barcos, aviones, misiles, etc
		Explosiones: Gas, explosivos
		Fuego: Incendios
		Carga excesiva
Naturales	{	Sismos, terremotos
		Fuerzas de viento extremas
		Inundaciones: provocan erosión y socavación

2.3 Relación Demanda Capacidad (DCR)

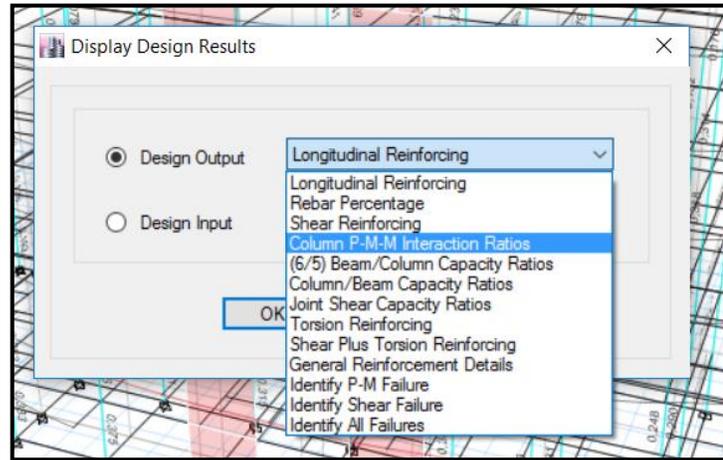
Es la razón entre las solicitaciones actuantes Q_u (momento, fuerza axial, fuerza cortante y combinación de ellas) y las solicitaciones resistentes Q_n de un elemento estructural, es decir,

$$DCR = \frac{Q_u}{Q_n} \quad \text{Ecuación 1}$$

Así mismo, la determinación de su valor en este Trabajo Especial de Grado, dependerá del tipo de elemento estructural:

- **Para las columnas:** Se hará a través del comando “Column P-M-M Interaction Ratio” en ETABS, el cual representa la relación demanda-capacidad de cada elemento en la interacción de fuerza axial y momentos flectores (M_2 y M_3).

Ilustración 1. Column P-M-M Interaction Ratios



Fuente: Realizado por los autores en ETABS 2016

- **Para las vigas:** Se determinará a través de la Ecuación 1, donde Q_u se obtiene según los resultados de sollicitación en cada caso de estudio en ETABS y Q_n se calculará de la siguiente manera:

$$M_n = \phi \times f'_c \times b \times d^2 \times q \times (1 - 0.59 \times q) \quad \left\{ \begin{array}{l} q = \frac{\rho \times f_y}{f'_c} \end{array} \right. \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde,

M_n = Capacidad resistente a flexión

ϕ = Factor de minoración de la resistencia teórica = 0,90

$$V_n = \phi (V_s + V_c) \quad \left\{ \begin{array}{l} V_s = \frac{A_v \times f_y \times d}{s} \\ V_c = 0.53 \times \sqrt{f'_c} \times b \times d \end{array} \right. \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde,

V_n = Capacidad resistente al corte.

V_s = Capacidad resistente al corte del acero.

V_c = Capacidad resistente al corte del concreto.

ϕ = Factor de minoración de la resistencia teórica = 0,75

A_v = Área del estribo o ligaduras.

S = Separación entre estribos o ligaduras.

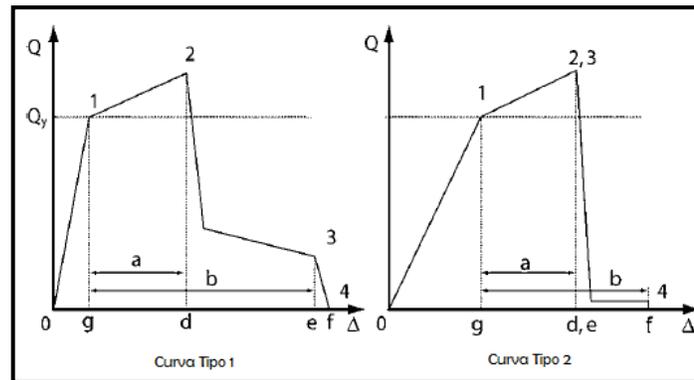
2.4 Acciones controlados por deformación

Los tipos de curva 1 y 2 son representativos de un comportamiento dúctil, donde del punto 0 al 1 se tiene un rango elástico y del punto 1 al 3 un rango plástico. En ambas curvas ocurre una pérdida de capacidad de resistencia en el punto 2 y la falla en el punto 4.

Los componentes primarios que exhiban este comportamientos se clasificarán como controlado por deformación si el rango plástico es tal que $d \geq 2g$ para la curva tipo 1; y si el rango plástico es tal que $e \geq 2g$ para la curva tipo 2.

Los componentes secundarios que exhiban este comportamiento se clasificarán como controlados por deformación para cualquier relación d / g para la curva 1 y si $f \geq 2g$ para la curva tipo 2.

Ilustración 2. Elementos controlados por deformación



Fuente: Documento GSA 2013. Traducción realizada por autores del presente TEG

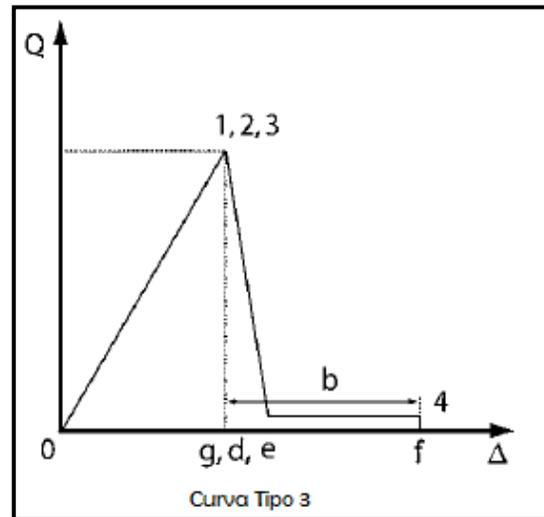
2.5 Acciones controlados por fuerza

La curva Tipo 3 es representativa de un comportamiento frágil, donde del punto 0 a 1 se encuentra en rango elástico seguido de la pérdida de capacidad en el punto 3 y la pérdida de resistencia a la carga por gravedad y la capacidad de deformarse en el punto 4.

Los elementos primarios que exhiban este comportamiento se clasificarán como controlados por fuerza

Los elementos secundarios serán controlados por fuerza si $f < 2g$

Ilustración 3. Elementos controlados por fuerza



Fuente: Documento GSA 2013. Traducción realizada por autores del presente TEG

En los lineamientos de la GSA se presenta la tabla 3.1 en donde se presentan algunos ejemplos de acciones controladas por deformación y acciones controladas por fuerza para los tipos de estructuras más comunes. Para este Trabajo Especial de Grado se tomarán como referencia los siguientes componentes.

TABLA #1. Acciones controladas por fuerza y por deformación.

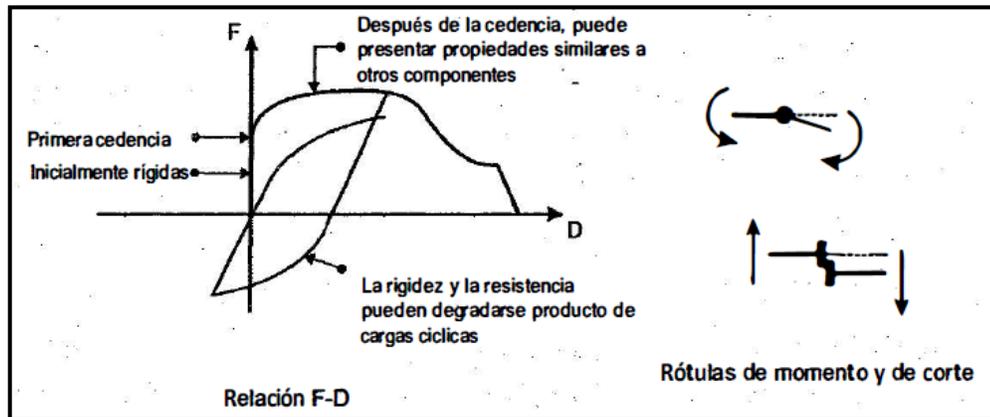
Componente	Acción Controlada por Deformación	Acción Controlada por Fuerza
Porticos de Momento		
Vigas	Momento (M)	Cortante (V)
Columnas	Momento (M)	Fuerza axial (P), (V)
Juntas	-	(V)
Muros de corte	(M), (V)	(P)

2.6 Rótulas plásticas

Una rótula es inicialmente rígida, y no presenta deformaciones importantes ante la acción de fuerzas menores a su punto de cedencia. Luego de que es alcanzada la cedencia, comienza a sufrir deformaciones admitiendo un incremento de las fuerzas actuantes, correspondiente al endurecimiento por deformación del material. Estas rótulas plásticas se utilizan durante un análisis estático no lineal, un análisis no lineal rápido (FNA), un análisis temporal modal, y un análisis tiempo historia de integración directa. Para todos los otros tipos de análisis, las rótulas son rígidas y no tienen ningún efecto sobre el comportamiento del miembro (Moya Q. & Sotillo B, 2016).

En la figura que se presenta a continuación, se ilustra la relación fuerza-deformación de una rótula plástica, y se muestra un esquema referencial para rótulas de momento y de corte.

Ilustración 4. Rótulas plásticas



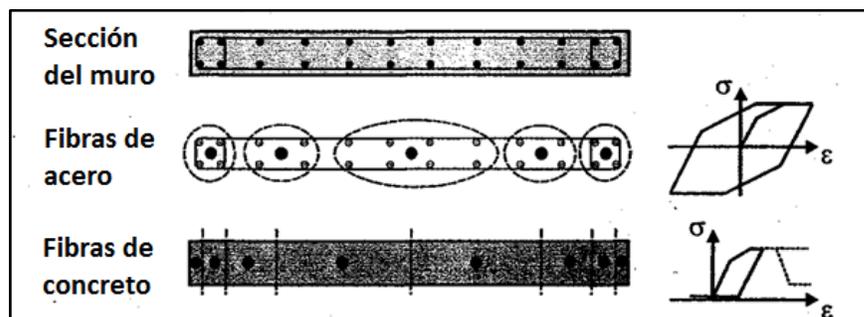
Fuente: (Moya Q. & Sotillo B, 2016)

2.6.1 Rótulas plásticas por fibra

“Para efectos de capturar el comportamiento no lineal producido por la interacción P-M de los muros de corte, existen otro tipo de definición de rotulas, denominada rotulas por fibras. Las rotulas por fibras se basan en dividir la sección del muro de corte en fibras de acero y concreto a lo largo de la longitud del elemento, con la intención de medir bajo la acción de las sollicitaciones de carga axial y momento la deformación axial de cada fibra. Es importante señalar que el comportamiento no lineal se considera únicamente en el plano.

Para el caso de las fibras acero, éstas pueden incluir su cedencia y la degradación cíclica, así como las fibras de concreto pueden modelar el agrietamiento y pulverizado del mismo. Generalmente, no se considera la fuerza a tracción de éstas” (Moya Q. & Sotillo B., 2016, P.11)

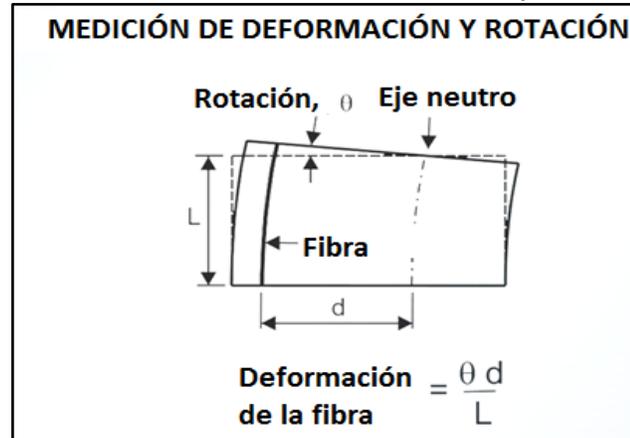
Ilustración 5. Rótulas por fibras de acero y concreto, diagramas de relación fuerza-deformación.



Fuente: (Moya Q. & Sotillo B, 2016)

Debido a que en los códigos como el ASCE 41-13 y GSA 2013, no existen valores de criterios de aceptación, se puede relacionar los criterios de aceptación de dichos códigos con las rótulas por fibras, tal como lo muestra la ilustración que se presenta a continuación:

Ilustración 6. Conversión de la rotación de la rótula a deformación axial de la fibra



Fuente: (Moya Q. & Sotillo B, 2016)

Donde,

L = representa la longitud de la rótula,

d = la distancia de la fibra al eje neutro

θ = la rotación de la rótula

2.6.2 Rótulas por flexión

La formación de una rótula plástica puede ocurrir debido a la acción de un momento flector que supera el momento cedente de un elemento. Inicialmente, se asume que la rótula es rígida, pero al actuar un momento mayor al cedente, ocurren deformaciones inelásticas (permanentes) que se miden como la rotación que desarrolla la rótula plástica.

En análisis como los de colapso progresivo, es permitida la formación de rótulas por flexión y la incursión en el rango no lineal del elemento, sin embargo, al igual que para otras rótulas, la GSA establece criterios de aceptación con los valores máximos de deformaciones que se le puede permitir al elemento de acuerdo a sus características y a las fuerzas a las cuales se encuentra sometido.

2.6.3 Rótulas de interacción carga axial-momento

Se utiliza para describir el comportamiento de un elemento que se somete a condiciones axiales y de flexión combinados.

La curva momento-rotación de una rótula P-M2-M3 es una relación monotónica utilizada para describir el comportamiento post-rendimiento de una columna sometida a condiciones de flexión axial y biaxial combinadas. La superficie de interacción 3D de una rótula P-M2-M3 indica la envolvente de los puntos de fluencia. El rendimiento más allá de este estado límite debe interpolarse a partir de una o más curvas de momento-rotación. Debido a que la respuesta P-M2-M3 se extiende linealmente a través de coordenadas 3D a la superficie de rendimiento, entonces más allá de una manera que no se asemeje exactamente a la curva de momento-rotación de entrada, se crea una curva equivalente de energía manteniendo el área bajo la curva constante.

La capacidad de deformación se reduce o aumenta para mantener la equivalencia, basándose en la distancia del punto de fluencia desde el plano M2-M3. Esta curva equivalente de energía se extiende luego desde la superficie de interacción de una manera no lineal. El momento resultante M se da entonces como,

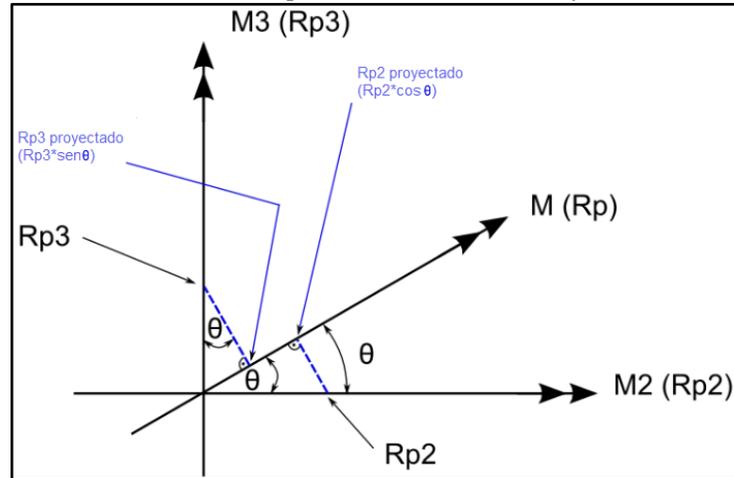
$$M = M_2 \cos \theta + M_3 \sin \theta \quad \text{Ecuación 4}$$

Y la rotación plástica proyectada R_p se da como,

$$R_p = R_{p2} \cos \theta + R_{p3} \sin \theta \quad \text{Ecuación 5}$$

Estas relaciones indican que los valores de momento y rotación de una curva de momento-rotación P-M2-M3 se obtienen a través de relaciones geométricas básicas entre componentes proyectados a lo largo de los ejes M2 y M3, como se muestra en la siguiente ilustración.

Ilustración 7. Componentes de momento y rotación



Fuente: (Mohamad, 2015)

2.7 Colapso Progresivo

El colapso progresivo ha sido definido de distintas maneras por diferentes entes, entre los cuales se pueden destacar:

“Colapso progresivo se define como la propagación de una falla local inicial, de elemento a elemento, resultando eventualmente en el colapso de una estructura completa o una gran parte de esta” (ASCE 7, 2010).

“Extensión de daño o colapso de diferentes proporciones a la magnitud del evento inicial. Debido a que esta definición se centra más en su consecuencia relativa o en la magnitud del colapso que la manera en que ocurre, normalmente se conoce en la industria como desproporcionado en lugar de colapso progresivo” (U.S. General Services Administration (GSA, 2013).

De acuerdo a los anteriores planteamientos realizados, el colapso progresivo es el resultado de la falla de un elemento estructural, producida por algún evento extraordinario, donde la estructura es afectada de manera secuencial en todos sus componentes, provocando una serie de daños que no son proporcionales al evento que inicia la falla local.

Aunque la causa que inicia la falla no tiene relevancia, las circunstancias que pueden dar inicio a un colapso progresivo son diversas. Según la GSA existen cuatro clases generales de eventos, ellos son:

- **Construcción defectuosa:** A través de la historia han existido muchos casos de malas prácticas constructivas que han desencadenado un colapso progresivo. Un caso notable, es el edificio de apartamentos Skyline Plaza en Fairfax, Virginia. Esta falla fue producto de la prematura remoción de los apuntalamientos, que llevó a que la esquina noroeste colapsara.

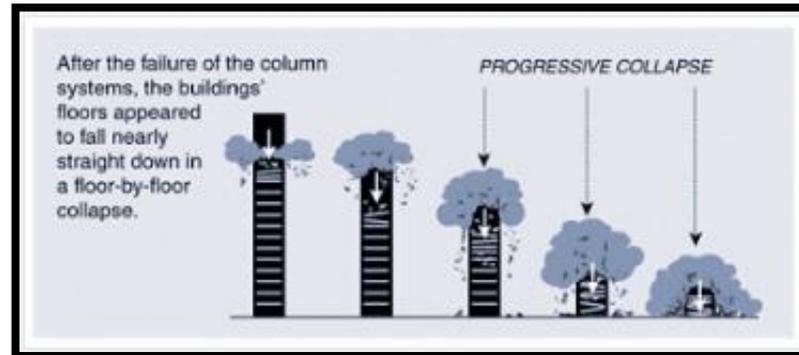
Ilustración 8. Complejo de apartamentos Skyline Plaza luego del colapso



Fuente: <http://www.masterbuilder.co.in/formwork-failure-cases-causes/>

- **Impacto accidental:** Muchos casos de colapso progresivo han sido causa de impactos accidentales. Un ejemplo es el muy conocido caso de las torres gemelas de Nueva York el 11 de Septiembre del 2001, causado por el impacto de un avión. Esta falla fue producto del incendio cuyas altas temperaturas afectaron las columnas de acero, generando que los pisos superiores colapsaran, aumentando las cargas gravitacionales sobre los pisos inferiores, desencadenando finalmente el colapso progresivo en las estructuras.

Ilustración 9. Colapso de Torres Gemelas

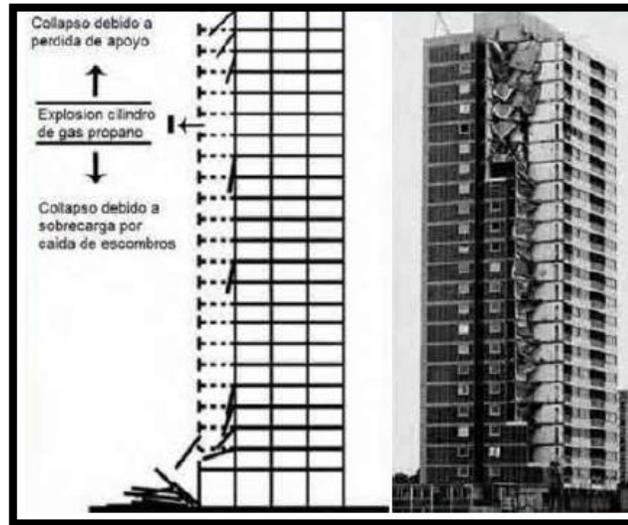


Fuente: <http://911-engineers.blogspot.com/2007/04/collapse-of-world-trade-center-twin.html>

- **Falla de fundación:** La falla de una pequeña porción de la fundación de la estructura puede resultar en la pérdida de soporte primario. Esta falla puede ser el resultado de problemas de erosión, socavación, geología, formación de cráteres por explosión, etc. Si el resto de la estructura no tiene capacidad para redistribuir este cambio de cargas, causado por la pérdida de soporte, el daño extensivo puede ser mayor.
- **Cambio violento de la presión del aire:** Un cambio extremo en la presión del aire puede ser originado por muchas fuentes, tales como detonaciones causadas por gas o fuertes explosivos.

El edificio de 22 pisos Ronan Point en Londres en 1968, es un ejemplo de este caso, al colapsar a causa de una explosión de gas en la cocina de un apartamento en la esquina del piso 18. El estallido acabó con un muro estructural, el cual dejó de soportar los pisos superiores ocasionando su caída, y como resultado de esto, los pisos inferiores también colapsaron. El edificio estaba construido con paneles de concreto prefabricados, los cuales son buenos para eludir el colapso progresivo causado por cargas extremas, el problema en el caso del Ronan Point es que no existía continuidad en el refuerzo de los paneles, y por lo tanto no se podía lograr efectivamente que la carga encontrara una ruta alterna una vez iniciada la propagación.

Ilustración 10. Esquema del colapso progresivo de la torre Ronan Point



Fuente: “Colapso Progresivo de Edificios de Concreto”. Barbosa, R., 2013.

Así mismo, la falta de soporte del elemento trae como consecuencia que el edificio adopte una nueva geometría y por lo tanto tenga que buscar rutas alternas de transmisión de las cargas. Por ejemplo en el caso de que una columna deje de aportar soporte al edificio, la estructura tiene que hacer un desvío de las cargas a través de las vigas para mantenerse en pie. (Herrera & Pollner, *Busqueda de Patrones Geometricos y Mecanicos en Edificios que han Perdido Parte de su Soporte*, 2011)

Los aspectos más importantes que debe poseer una estructura para mitigar el colapso progresivo son: Redundancia, Continuidad y Ductilidad entre otros. (Perez Marrero & Santos Simoza, 1999).

2.8 Análisis por Colapso Progresivo

La GSA recomienda iniciar con un análisis estático lineal, y si éste indica que la estructura tiene comportamiento inelástico significativo, se procede a realizar análisis no lineales.

Para los tres tipos de análisis (Estático lineal, Estático no lineal y Dinámico no lineal), se debe verificar que el área afectada por la remoción de un elemento de carga vertical, no conlleve a una extensión desproporcionada del colapso, tal como se define a continuación:

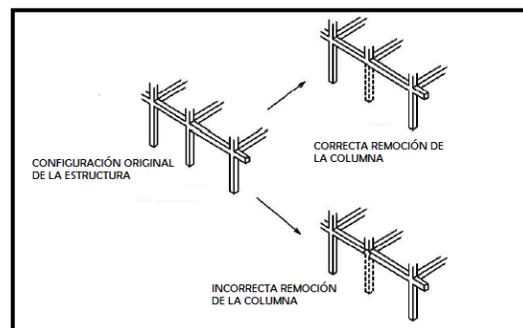
1. **Consideraciones para columnas externas:** el área afectada del piso que esté directamente adyacente al elemento removido no deben exceder el 15% del área total.
2. **Consideraciones para columnas internas:** el área afectada del piso que esté directamente adyacente al elemento removido no deben exceder el 30% del área total.

Además se deben cumplir con los criterios de aceptación definido para cada tipo de análisis.

2.8.1 Selección de elementos a remover

Las columnas que serán removidas en el modelo tridimensional a usar, deben respetar la continuidad estructural, es decir, para los propósitos de la remoción de la columna, se supone que la continuidad viga a viga se mantiene.

Ilustración 11. Remoción de columna



Fuente: Documento GSA 2013. Traducción realizada por autores del presente TEG

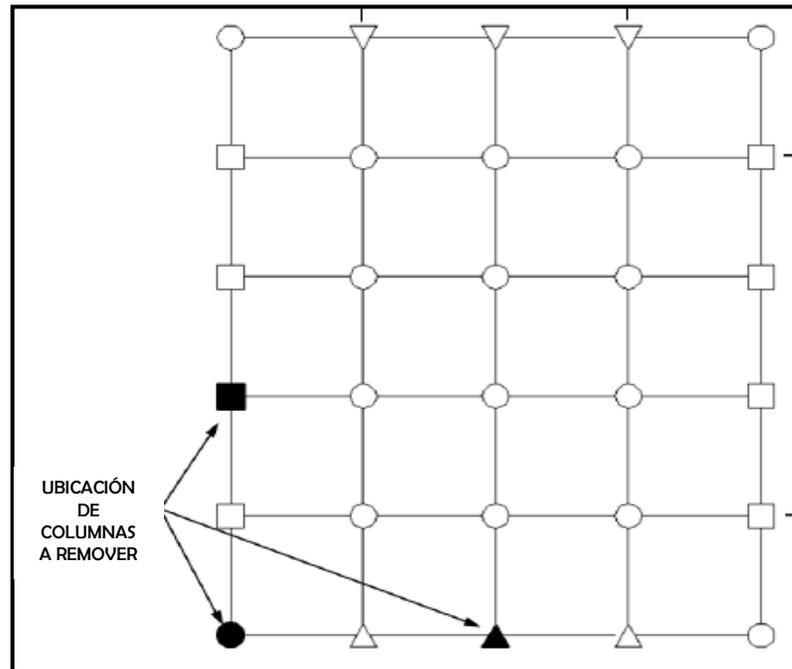
Según las recomendaciones de la GSA, los elementos a remover se clasifican en tres grandes grupos: Columnas externas, Columnas internas y Muros de corte. Así mismo, deberán cumplir los siguientes criterios dependiendo de su ubicación y del uso de la edificación.

2.8.1.1 Columnas externas

Para la selección de columnas externas a remover deben estar ubicadas según los siguientes criterios:

- Cerca de la mitad del lado corto de la planta de la edificación.
- Cerca de la mitad del lado largo de la misma.
- En la esquina del edificio.
- En sitios críticos, según el criterio del ingeniero.

Ilustración 12. Ubicación de columnas externas a remover



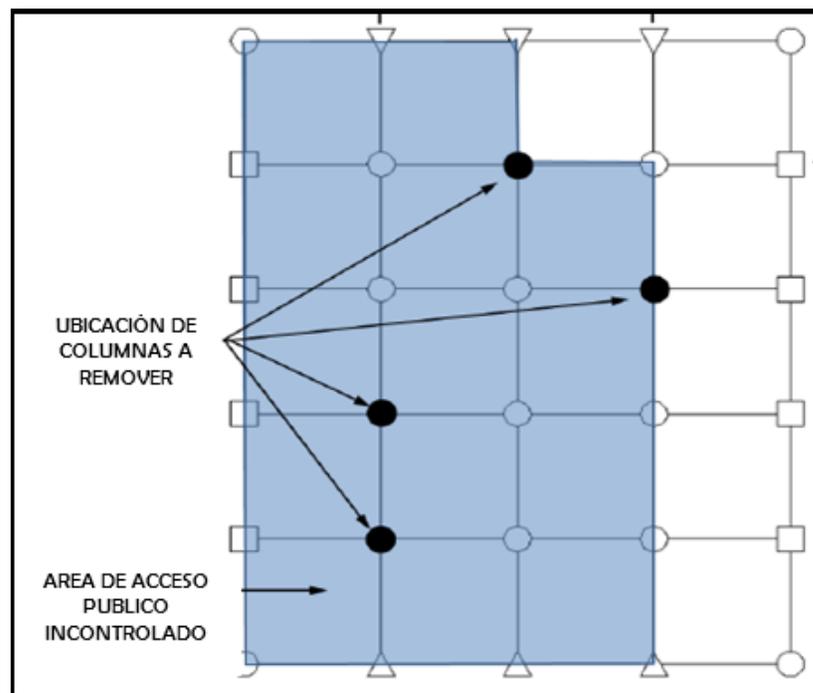
Fuente: Documento GSA 2013. Traducción realizada por autores del presente TEG

2.8.1.2 Columnas internas

Para la selección de las columnas internas a remover, las mismas deben estar ubicadas en áreas de acceso público incontrolado y además cumplir con los siguientes criterios:

- Cerca del medio del lado corto de la planta de la edificación.
- Cerca de la mitad del lado largo de la misma.
- En la esquina del edificio.
- En sitios críticos, según el criterio del ingeniero.

Ilustración 13. Ubicación de columnas internas a remover



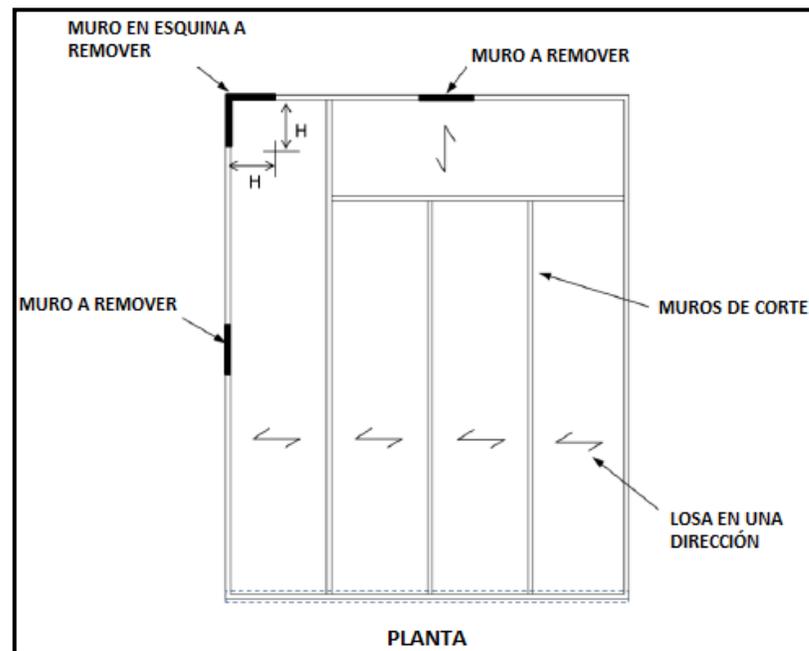
Fuente: Documento GSA 2013. Traducción realizada por autores del presente TEG

2.8.1.3 Muros de corte externo

Para la selección de muros de corte a remover, las mismas deben estar ubicadas en áreas de acceso público incontrolado y además cumplir con los siguientes criterios:

- Cerca del medio del lado corto de la planta de la edificación.
- Cerca de la mitad del lado largo de la misma.
- En esquinas exteriores, donde uno o ambos de los muros se cruzan, quitar una longitud de pared igual a la altura H del piso en cada dirección.
- En sitios críticos, según el criterio del ingeniero.

Ilustración 14. Ubicación de muros externos a remover



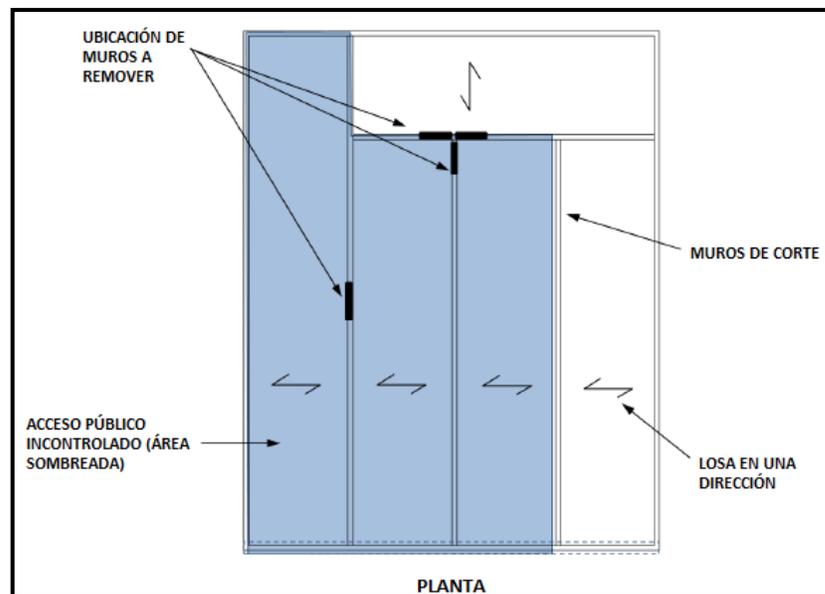
Fuente: Documento GSA 2013. Traducción realizada por autores del presente TEG

2.8.1.4 Muros de corte internos

Para la selección de muros de corte a remover, las mismas deben estar ubicadas en áreas de acceso público incontrolado y además cumplir con los siguientes criterios:

- Cerca del medio del lado corto de la planta de la edificación.
- Cerca de la mitad del lado largo de la misma.
- En las esquinas de áreas de acceso público incontrolado.
- En sitios críticos, según el criterio del ingeniero.

Ilustración 15. Ubicación de muros internos a remover



Fuente: Documento GSA 2013. Traducción realizada por autores del presente TEG

2.8.2 Nivel de seguridad de la instalación (FSL)

Categoriza las instalaciones basándose en el análisis de varios factores relacionados con la seguridad, atractivo y valor. Que sirve de base para la implementación de medidas de seguridad especificadas en las normas ISC (Interagency Security Committee).

El Servicio Marshals de los Estados Unidos (USMS por sus siglas en inglés) clasificó los edificios según las diferencias entre sus necesidades de seguridad en cinco clases, basadas en el tamaño del edificio, la misión y función de la agencia, la población de inquilinos y el grado de acceso público a la instalación:

FSL I: Edificios con no más de 232 m², 10 o menos empleados y acceso público limitado o nulo.

FSL II: Edificios con 232 a 7432 m², y de 11 a 150 empleados y acceso público moderado.

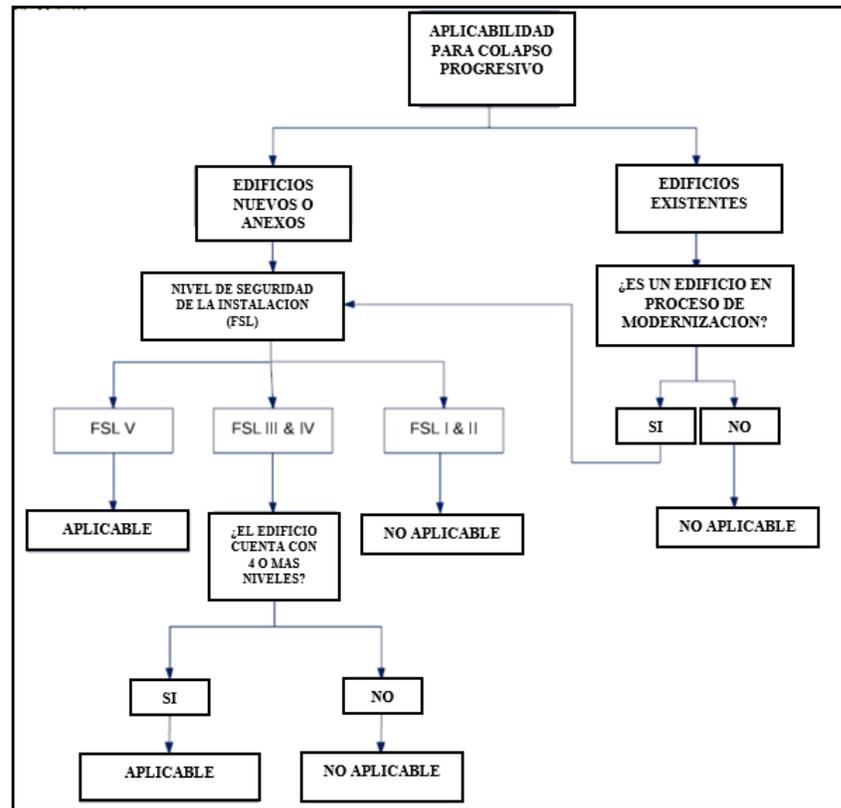
FSL III: Edificios con 7432 a 13935 m², y de 151 a 450 empleados y acceso público de moderado a alto.

FSL IV: Edificios con 13935 m² o más, más de 450 empleados, y un alto nivel de acceso público.

FSL V: Similares al Nivel IV pero son considerados críticos para seguridad nacional (por ejemplo, el Pentágono) (Tong & Reese , 2010).

Una vez clasificado según el nivel de seguridad de la instalación, se verifica su aplicabilidad para un análisis de colapso progresivo según la GSA:

Ilustración 16. Nivel de seguridad de la instalación



Fuente: Documento GSA 2013. Traducción realizada por autores del presente TEG

2.8.3 Análisis estático lineal (AEL)

Para este tipo de análisis todas las cargas permanecen constantes (sin variación en el tiempo). Esta suposición nos permite ignorar las fuerzas inerciales y de amortiguación debido a aceleraciones y velocidades poco significativas.

El análisis estructural incorpora solo materiales elásticos lineales y teoría de deformación baja, los fenómenos de pandeo no están incluidos en el modelo, pero se evalúan a través de la examinación por inspección. Las fuerzas de inercia no se consideran. El análisis consiste en un solo paso, en el que las deformaciones y esfuerzos internos se resuelven basados en las cargas aplicadas, la geometría y materiales. (GSA, 2013)

El uso del procedimiento estático lineal en los lineamientos propuestos por la GSA está limitado a estructuras que tengan diez (10) pisos o menos y que cumpla con los requerimientos para irregularidades y relaciones de demanda capacidad.

Si no se tienen irregularidades estructurales, un AEL puede realizarse y no es necesario calcular las relaciones de demanda capacidad. Si la estructura es irregular, un AEL puede ser realizado si todos los DCRs determinados son menores o iguales a 2.0. Si la estructura es irregular y una o más DCRs excede 2.0, entonces un AEL no puede ser usado. Estas irregularidades se presentan como:

1. Discontinuidades significativas existentes en las cargas gravitacionales y fuerzas laterales soportadas por un edificio.
2. En las columnas exteriores excepto en las esquinas, en cada piso de la estructura aporticada, la relaciones de rigidez y/o esfuerzo de un lado de la columna al otro es menor al 50%.
3. En caso de muros de corte exteriores, excepto en las esquinas, y para cada uno de los pisos, las relaciones de rigidez y / o resistencia de un lado del muro a otro es inferior al 50%.
4. Los elementos resistentes a la carga lateral no son paralelos a los principales ejes ortogonales del sistema de resistencia a la fuerza lateral, tal como el caso de los muros curvos.

2.8.3.1 Modelado de la estructura

Para modelar, analizar y evaluar un edificio se debe usar un modelo tridimensional lineal de la estructura, este modelo contendrá todos sus elementos primarios y secundarios a excepción del elemento de carga vertical removido.

Luego de analizar el modelo, se deben chequear los elementos primarios y secundarios contra los criterios de aceptación para acciones controladas por fuerza y deformación según corresponda.

2.8.3.2 Casos de carga

Para este trabajo especial de grado y siguiendo las recomendaciones de la GSA, se estudiará el efecto que producirán las cargas gravitacionales, sin considerar las cargas sísmicas, debido a que la probabilidad de que la estructura se vea afectada simultáneamente por ambas cargas, luego de producirse la falla local, es bastante baja y se estaría castigando demasiado a la estructura.

Para analizar la estructura, se deben estudiar dos (2) modelos por separado, uno en el que las acciones son controladas por deformaciones y otro en que las acciones son controladas por fuerza.

2.8.3.2.1 Acciones controladas por deformación

Para los elementos primarios, se debe aplicar la siguiente combinación de carga (ver ilustraciones de la 17 a la 20).

$$G_{LD} = \Omega_{LD} [1.2 CP + 0,5CV] \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde,

G_{LD} = Cargas por gravedad para las acciones controladas por deformación para el análisis estático lineal.

CP = Carga permanente incluyendo cargas de fachada

CV = Carga variable, que no exceda el máximo de 50 lb /ft²

Ω_{LD} = Factor de incremento de carga para el cálculo de acciones controladas por deformación para el análisis estático lineal.

Para los elementos secundarios, se debe aplicar la siguiente combinación de carga a los tramos no cargados con G_{LD} como se muestra en las ilustraciones de la 17 a la 20.

$$G = 1,2 CP + 0,5CV \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde,

G = Cargas por gravedad

CP = Carga permanente incluyendo cargas de fachada

CV = Carga variable, que no exceda el máximo de 50 lb /ft²

2.8.3.2.2 Acciones controladas por fuerza.

Para los elementos primarios, se debe aplicar la siguiente combinación de carga como se muestra en las ilustraciones de la 17 a la 20.

$$G_{LF} = \Omega_{LF} [1,2 D + 0,5L] \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde:

G_{LF} = Cargas por gravedad para las acciones controladas por fuerza para el análisis estático lineal.

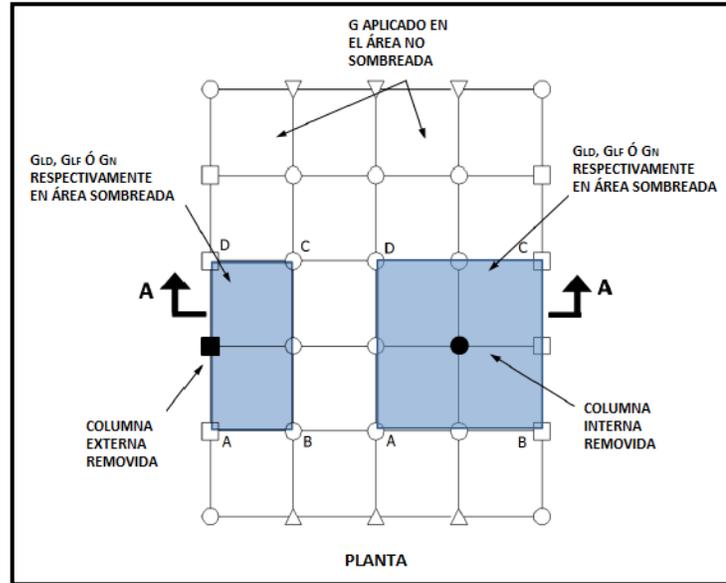
D = Carga permanente incluyendo cargas de fachada.

L = Carga variable, que no exceda el máximo de 50 lb /ft².

Ω_{LF} = Factor de incremento de carga para el cálculo de acciones controladas por fuerza para el análisis estático lineal.

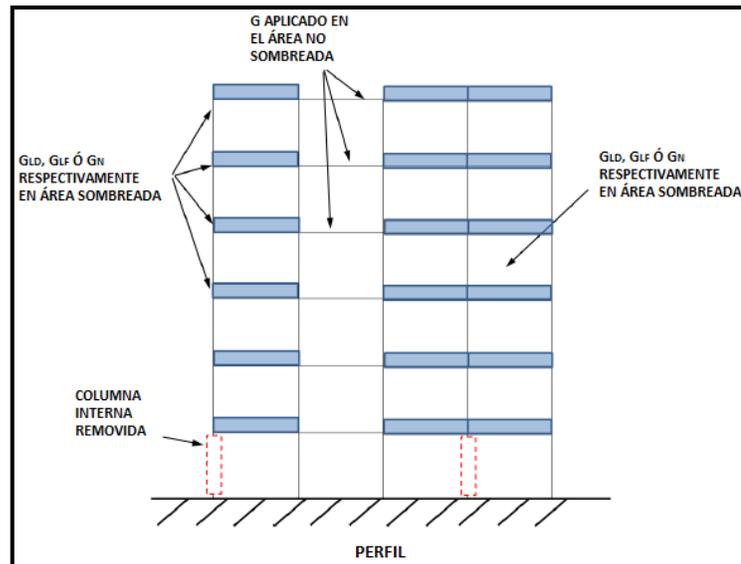
Para los elementos secundarios, se debe aplicar la combinación de carga de la Ecuación 5 a los tramos no cargados con G_{LF} como se muestra en las ilustraciones de la 17 a la 20.

Ilustración 17. Aplicación de GLD, GLF, GN y G respectivamente según el área afectada por la remoción de una columna – Vista de Planta



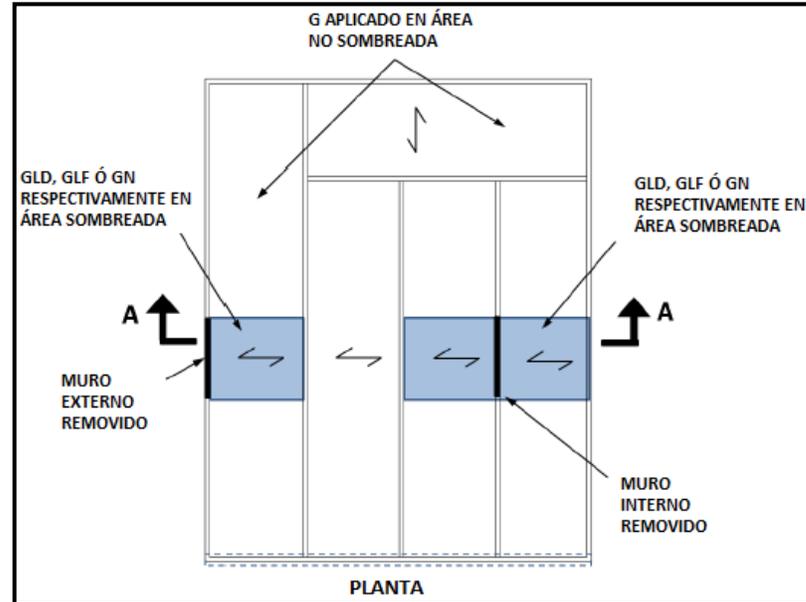
Fuente: Documento GSA 2013. Traducción realizada por autores del presente TEG

Ilustración 18. Aplicación de GLD, GLF, GN y G respectivamente según el área afectada por la remoción de una columna – Vista de Perfil



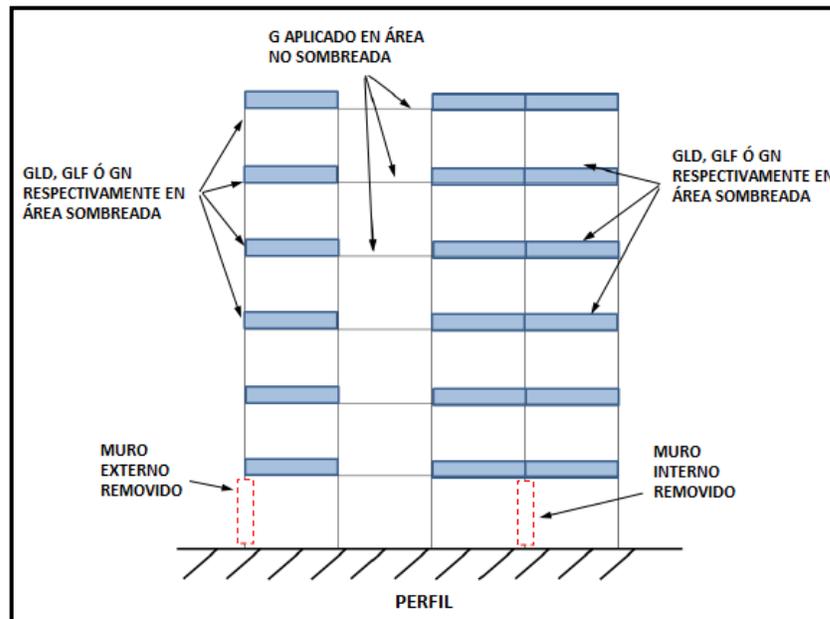
Fuente: Documento GSA 2013. Traducción realizada por autores del presente TEG

Ilustración 19. Aplicación de GLD, GLF, GN y G respectivamente según el área afectada por la remoción de un muro – Vista de Planta



Fuente: Documento GSA 2013. Traducción realizada por autores del presente TEG

Ilustración 20. Aplicación de GLD, GLF, GN y G respectivamente según el área afectada por la remoción de un muro – Vista de perfil



Fuente: Documento GSA 2013. Traducción realizada por autores del presente TEG

2.8.3.3 Factor de mayoración de carga (Ω_{LF} , Ω_{LD})

Los factores de aumento de carga para acciones controladas por deformación y por fuerza para la eliminación de columnas y muros se presentan a continuación:

TABLA #2. Factores de mayoración de carga.

Material	Tipo de estructura	Ω_{LD} Controladas por deformación	Ω_{LF} Controladas por fuerza
Acero	Aporticadas	$0,9 m_{LIF} + 1,1$	2,0
Concreto reforzado	Aporticadas	$1,2 m_{LIF} + 0,8$	2,0
	Apantalladas	$2,0 m_{LIF}$	2,0
Mampostería	Apantalladas	$2,0 m_{LIF}$	2,0
Madera	Apantalladas	$2,0 m_{LIF}$	2,0
Acero conformado en frío	Apantalladas	$2,0 m_{LIF}$	2,0

El factor m_{LIF} es un factor que se aplica a los casos de carga de los procedimientos estáticos lineales, que toma en cuenta los efectos inerciales y no lineales para los estudios de Colapso Progresivo (el cual es un evento dinámico y no lineal). Así mismo, m_{LIF} es el factor m más pequeño de todas las vigas que sean consideradas elementos primarios (según las recomendaciones de la GSA, las columnas son omitidas para la determinación de m).

Para cada una de estas vigas se determinará el factor m de acuerdo a la siguiente tabla, extraída del capítulo IV del documento la GSA.

TABLA #3 Factor m para vigas de concreto reforzado

Condiciones			Factor m ^[1]	
			Tipo de Elemento	
			Elementos Primarios	Elementos Secundarios
i. Vigas Controladas por Flexion ^[2]				
$\frac{\rho - \rho'}{\rho_{bal}}$	Confinamiento [3]	$\frac{V}{b_w d \sqrt{f'_c}}$ ⁴		
≤ 0.0	C	≤ 3	16	19
≤ 0.0	C	≥ 6	9	9
≥ 0.5	C	≤ 3	9	9
≥ 0.5	C	≥ 6	6	7
≤ 0.0	NC	≤ 3	9	9
≤ 0.0	NC	≥ 6	6	7
≥ 0.5	NC	≤ 3	6	7
≥ 0.5	NC	≥ 6	4	5
ii. Vigas Controladas por Corte [2]				
Espaciamiento del Estribo $\leq d/2$			1.75	4
Espaciamiento del Estribo $> d/2$			1.75	3
iii. Vigas Controladas por desarrollo inadecuado o empalme a lo largo del tramo [2]				
Espaciamiento del Estribo $\leq d/2$			1.75	4
Espaciamiento del Estribo $> d/2$			1.75	3
iv. Vigas Controladas por incrustaciones inadecuadas en la union Viga-Columna [2]				
			3	4

[1] Se permitirá la interpolación lineal entre los valores enumerados en el cuadro.

[2] Cuando se produzca más de una de las condiciones I, ii, iii y iv para un componente dado, utilizar el valor numérico mínimo apropiado.

[3] "C" y "NC" son abreviaturas para el refuerzo transversal confinado y no confinado.

[4] V es la fuerza de corte calculada utilizando procedimientos de análisis de estado límite de acuerdo con la ASCE 41.

Para el cálculo del ρ_{bal} se hace uso de la siguiente ecuación:

$$\rho_{bal} = \left(\frac{\gamma \times \beta \times f'_c}{f_y} \right) * \frac{\epsilon_c}{\epsilon_c + \epsilon_y} \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde,

ρ_{bal} = Cuantía balanceada

β = 0,85 (valor experimental, que relaciona el eje neutro con la altura del bloque de compresión)

γ = 0.85 (valor experimental que convierte el diagrama curvo de compresión en uno rectangular equivalente)

ϵ_c = 0.003 (deformación unitaria del concreto)

2.8.3.4 Criterio de aceptación

Para un análisis estático lineal, los elementos clasificados según los apartados [2.4](#) y [2.5](#), deben cumplir con los siguientes requerimientos según sea su caso:

2.8.3.4.1 Elementos controlados por deformación

Se evalúa la relación demanda capacidad de cada componente y se verifica que éste sea inferior al factor “m” gobernante de la estructura.

2.8.3.4.2 Elementos controlados por fuerza

Se evalúa la relación demanda capacidad DCR de cada componente y se verifica que la misma sea inferior a uno (1).

2.8.4 Análisis estático no lineal (AENL)

En este tipo de análisis el modelo estructural incorpora la no linealidad geométrica y no linealidad de los materiales. Así mismo, los efectos de la inercia no están incluidos. Un enfoque incremental o iterativo se utiliza normalmente para resolver la respuesta estructural como una función de la carga aplicada. (U. S. General Services Administration (GSA), 2013).

El análisis no lineal puede proporcionar una mejor información de diseño que el análisis lineal. A medida que se desarrollan mejores herramientas de análisis no lineales, éste se vuelve más práctico y se utiliza cada vez más para el diseño sismo resistente y en los análisis de colapso progresivo.

2.8.4.1 Modelado de la estructura

Para modelar, analizar y evaluar un edificio se debe usar un modelo tridimensional de la estructura, con todos sus elementos primarios y secundarios a excepción del elemento de carga vertical removido. En el modelo es importante tener en cuenta el comportamiento del material

no lineal, incluyendo el rendimiento, el agrietamiento; y considerar una variedad de componentes, incluyendo vigas, columnas, conexiones, paredes, etc.

Luego de analizar el modelo, se deben chequear los elementos primarios y secundarios contra los criterios de aceptación para acciones controladas por fuerza y deformación según corresponda.

Para tener en cuenta el comportamiento no lineal, es necesario la asignación de rótulas en los elementos donde se considere que puedan ocurrir las mismas, es decir, en los elementos primarios. La asignación de rótulas, permite estudiar los mecanismos de falla según las solicitaciones gobernantes.

Para asignar las rótulas a las vigas que sean consideradas como primarias se hace uso de la siguiente tabla siguiente, extraída del capítulo 4 del documento de la GSA.

TABLA #4. *Parámetro de modelaje y criterios de aceptación para rótulas de vigas de concreto reforzado para análisis no lineales*

Condiciones	Parámetros			Criterio de Aceptación			
	Ángulo de rotación plástica, radianes		Resistencia Residual c	Ángulo de rotación plástica, radianes			
	a	b		Elementos Primarios	Elementos Secundarios		
i. Vigas controlados a flexión ³							
$\frac{\rho - \rho'}{\rho_{bal}}$	Trans. Reinf. ⁴	$\frac{v}{b_w d \sqrt{f_c}}^5$					
≤ 0.0	C	≤ 3	0.063	0.1	0.2	0.063	0.1
≤ 0.0	C	≥ 6	0.05	0.08	0.2	0.05	0.08
≥ 0.5	C	≤ 3	0.05	0.06	0.2	0.05	0.06
≥ 0.5	C	≥ 6	0.038	0.04	0.2	0.038	0.04
≤ 0.0	NC	≤ 3	0.05	0.06	0.2	0.05	0.06
≤ 0.0	NC	≥ 6	0.025	0.03	0.2	0.025	0.03
≥ 0.5	NC	≤ 3	0.025	0.03	0.2	0.025	0.03
≥ 0.5	NC	≥ 6	0.013	0.02	0.2	0.013	0.02
ii. Vigas controladas por corte ³							
Separación $\leq d/2$			0.003	0.02	0.2	0.003	0.02
Separación $> d/2$			0.003	0.01	0.2	0.003	0.01
iii. Vigas Controladas por desarrollo inadecuado o empalme a lo largo del tramo ³							
Separación $\leq d/2$			0.003	0.02	0	0.003	0.02
Separación $> d/2$			0.003	0.01	0	0.003	0.01
iv. Vigas Controladas por incrustaciones inadecuadas en la unión Viga-Columna ³							
			0.015	0.03	0.2	0.0015	0.03

Así mismo, para asignar las rótulas a las columnas, la GSA recomienda el uso de la tabla siguiente, extraída del capítulo 10 de la ASCE 41-13.

TABLA #5. Parámetro de modelaje y criterios de aceptación para rótulas en columnas de concreto reforzado para análisis no lineales

Condiciones			Parámetros		
			Ángulo de rotación plástica, radianes	Resistencia Residual	
			a	b	c
Falla a flexión					
$\frac{P}{A_g f'_c}$	$\rho = \frac{A_s}{b_w s}$				
≤ 0.1	≥ 0.006		0.035	0.060	0.2
≥ 0.6	≥ 0.006		0.010	0.010	0.0
≤ 0.1	$= 0.002$		0.027	0.034	0.2
≥ 0.6	$= 0.002$		0.005	0.005	0.0
Falla a flexión-corte					
$\frac{P}{A_g f'_c}$	$\rho = \frac{A_s}{b_w s}$	$\frac{V}{b_w d \sqrt{f'_c}}$			
≤ 0.1	≥ 0.006	$\leq 3 (0.25)$	0.032	0.060	0.2
≤ 0.1	≥ 0.006	$\geq 6 (0.5)$	0.025	0.060	0.2
≥ 0.6	≥ 0.006	$\leq 3 (0.25)$	0.010	0.010	0.0
≥ 0.6	≥ 0.006	$\geq 6 (0.5)$	0.008	0.008	0.0
≤ 0.1	≤ 0.0005	$\leq 3 (0.25)$	0.012	0.012	0.2
≤ 0.1	≤ 0.0005	$\geq 6 (0.5)$	0.006	0.006	0.2
≥ 0.6	≤ 0.0005	$\leq 3 (0.25)$	0.004	0.004	0.0
≥ 0.6	≤ 0.0005	$\geq 6 (0.5)$	0.0	0.0	0.0
Falla a corte					
$\frac{P}{A_g f'_c}$	$\rho = \frac{A_s}{b_w s}$				
≤ 0.1	≥ 0.006		0.0	0.060	0.0
≥ 0.6	≥ 0.006		0.0	0.008	0.0
≤ 0.1	≤ 0.0005		0.0	0.006	0.0
≥ 0.6	≤ 0.0005		0.0	0.0	0.0
Columnas controladas por un inadecuado empalme a lo largo de la altura libre					
$\frac{P}{A_g f'_c}$	$\rho = \frac{A_s}{b_w s}$				
≤ 0.1	≥ 0.006		0.0	0.060	0.4
≥ 0.6	≥ 0.006		0.0	0.008	0.4
≤ 0.1	≤ 0.0005		0.0	0.006	0.2
≥ 0.6	≤ 0.0005		0.0	0.0	0.0

Análogamente, para asignar rótulas a los muros la GSA recomienda el uso de la siguiente tabla, extraída del capítulo 10 de la ASCE 41-13.

Ilustración 21. Parámetro de modelaje y criterios de aceptación para rótulas en muros de concreto reforzado para análisis no lineales

Condiciones			Rótulas plásticas (radianes)		Esfuerzo Residual
			a	b	
Muros de Corte					
$\frac{(A_x - A'_x)f_y + P}{t_w t_w f'_c}$	$\frac{V}{t_w t_w \sqrt{f'_c}}$	Confinamiento	0.015		
≤0.1	≤4	Sí	0.010	0.020	0.75
≤0.1	≥6	Sí	0.009	0.015	0.40
≥0.25	≤4	Sí	0.005	0.012	0.60
≥0.25	≥6	Sí	0.008	0.010	0.30
≤0.1	≤4	No	0.006	0.015	0.60
≤0.1	≥6	No	0.003	0.010	0.30
≥0.25	≤4	No	0.002	0.005	0.25
≥0.25	≥6	No	0.002	0.004	0.20

2.8.4.2 Efectos P-Δ y largos desplazamientos

El análisis P-Δ es más simple que el análisis de gran desplazamiento, y puede ser mucho más eficiente computacionalmente. Para el análisis de colapso progresivo, generalmente es necesario realizar un análisis de desplazamiento grande, donde las vigas y losas desarrollan acciones de "cable" o "membrana".

2.8.4.3 Casos de carga

La GSA recomienda que para el AENL se estudiará el efecto que producirán las cargas gravitacionales, sin considerar las cargas sísmicas, debido a que la probabilidad de que la estructura se vea afectada simultáneamente por ambas cargas, luego de producirse la falla local, es bastante baja y se estaría castigando demasiado a la estructura.

Para analizar la estructura, se deben estudiar un solo caso de carga, en donde los elementos primarios deberán ser cargados con la siguiente combinación de carga, como se indica en las ilustraciones 19 y 20.

$$G_N = \Omega_N [1,2 D + 0,5L] \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde,

G_N = Cargas incrementadas para el análisis estático no lineal.

CP = Carga permanente incluyendo cargas de fachada

CV = Carga variable, que no exceda el máximo de 50 lb /ft²

Ω_N = Factor de incremento dinámico para el cálculo de acciones controladas por deformación y controladas por fuerza para el análisis estático no lineal.

Para los elementos secundarios, se debe aplicar la combinación de carga de la Ecuación 5 a los tramos no cargados con G_N como se muestra en las ilustraciones de la 17 a la 20.

2.8.4.3 Factor de mayoración de carga (Ω_N)

Los factores de aumento de carga para acciones controladas por deformación y por fuerza para la eliminación de columnas y muros se presentan a continuación:

TABLA #6. Factor de mayoración de carga

Material	Tipo de Estructura	Ω_N
Acero	Aporticado	$1.08 + 0.76/(\theta_{pra}/\theta_y + 0.83)$
Concreto Reforzado	Aporticado	$1.04 + 0.45/(\theta_{pra}/\theta_y + 0.48)$
	Muro de Corte	2
Mampostería	Muro de Corte	2
Madera	Muro de Corte	2
Acero conformado en frío	Muro de Corte	2

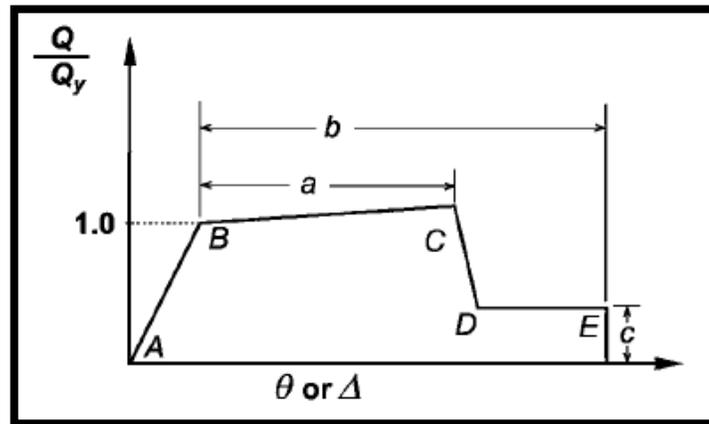
2.8.4.4 Criterio de Aceptación

Para un análisis estático no lineal, los elementos clasificados según los apartados [2.4](#) y [2.5](#), deben cumplir con los siguientes requerimientos según sea su caso:

2.8.4.4.1 Acciones controladas por deformación

Según recomendaciones de la GSA, para los elementos primarios el ángulo de rotación plástica no debe ser mayor al indicado como “a” en las Tablas 4, 5 y 6, así mismo, para los elementos secundarios el ángulo de rotación plástica no debe ser superior a “b”

Ilustración 22. Curva de daños



Fuente: Norma ASCE – SEI 41-13

2.8.4.4.2 Acciones controladas por fuerza

Se evalúa la relación demanda capacidad de cada componente y se verifica que la misma sea inferior a uno (1), es decir, $DCR < 1$

2.8.5 Análisis dinámico no lineal (ADNL)

Un análisis dinámico no lineal consiste en un procedimiento de integración de eventos sucesivos, que se utiliza para determinar la respuesta estructural como una función del tiempo, donde se incluyen los efectos de inercia, la no linealidad de los materiales y no linealidad geométrica. (GSA, 2013)

El empleo del análisis *Time History* se basa en un procedimiento paso a paso de un análisis de respuesta dinámico sobre una estructura que tenga impuesta una carga que pueda variar en el tiempo, donde ésta puede manejarse en los rangos elásticos o plásticos.

En el ámbito del avance de la ingeniería es preferible el estudio y ejecución de este tipo de análisis para un mejor entendimiento del comportamiento de la estructura, ya que los análisis lineales no pueden predecir los mecanismos de falla y no muestra la distribución de fuerzas durante la cedencia de la estructura.

2.8.5.1 Modelado de la estructura

Se debe usar un modelo tridimensional de la estructura, este modelo contendrá todos sus elementos primarios y secundarios a excepción del elemento de carga vertical removido. Para tener en cuenta el comportamiento no lineal, es necesario la asignación de rótulas en los elementos donde se considere que pueda ocurrir la formación de las mismas, es decir, en los elementos primarios.

Para la asignación de las rótulas se utilizan las Tablas [4,5](#) y [6](#) presentadas en este capítulo [apartado 2.8.4.1](#)

2.8.5.2 Cargas aplicadas

Para la totalidad de la estructura, se debe aplicar la siguiente combinación de carga

$$G_{ND} = [1,2 D + 0,5L] \quad \text{Ecuación 11}$$

Donde:

G_{ND} = Cargas por gravedad para el análisis dinámico no lineal.

D = Carga permanente incluyendo cargas de fachada.

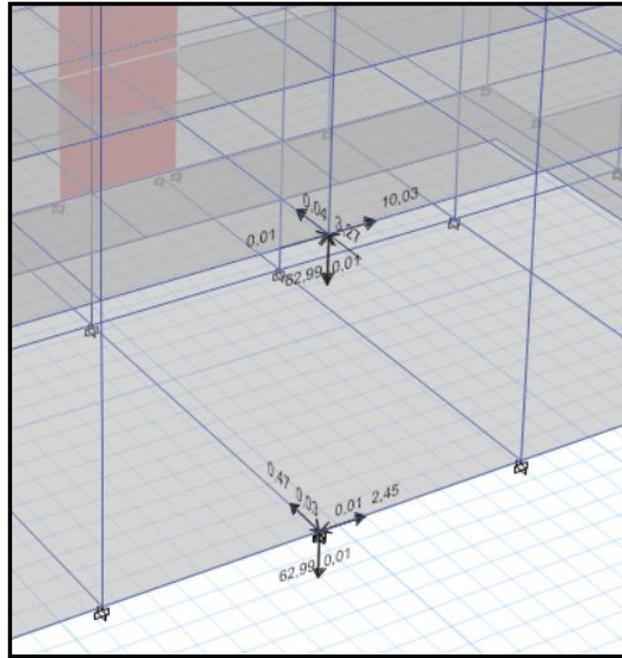
L = Carga variable, que no exceda el máximo de 50 lb/ ft².

2.8.5.3 Procedimiento de Carga

Para un estudio de colapso progresivo, este procedimiento de carga se realiza mediante dos análisis *Time History*, uno de carga en el que se simula la presencia del elemento removido, mediante la aplicación de cargas puntuales obtenidas en un análisis estático lineal previo, y otro

de descarga en el que se simula la remoción de la columna, colocando las mismas cargas puntuales en sentido contrario, tal como se muestra en la siguiente ilustración.

Ilustración 23. Fuerzas de simulación de columna



Fuente: Realizado por los autores en ETABS 2016

Estos dos análisis deben estar configurados de manera continua y dependiente, es decir, primero se da el análisis con las cargas gravitacionales y las cargas puntuales que simulan la existencia del elemento removido y luego el análisis donde se anulan esas fuerzas puntuales.

Adicionalmente, es importante considerar que estos análisis de *Time History* se realizan con funciones progresivas (RampTH), es decir, que las cargas actuantes aumentan con el tiempo hasta alcanzar la carga máxima, lo que permite simular el proceso de pérdida del elemento en la estructura. En cuanto al amortiguamiento, el valor recomendado para el modelado es del 1%. (Powell, 2010).

2.8.5.4 Criterio de aceptación

Para un análisis dinámico no lineal, los elementos clasificados según los [apartados 2.4](#) y [2.5](#), deben cumplir con los siguientes requerimientos según sea su caso:

2.8.5.4.1 Elementos controlados por deformación

Según recomendaciones de la GSA, para los elementos primarios el ángulo de rotación plástica no debe ser mayor al indicado como “a” en las Tablas [4](#), [5](#) y [6](#) así mismo, para los elementos secundarios el ángulo de rotación plástica no debe ser superior a “b”.

2.8.5.4.2 Elementos controlados por fuerza

Se evalúa la relación demanda capacidad de cada componente y se verifica que la misma sea inferior a uno (1), es decir, $DRC < 1$

CAPÍTULO III: Marco Metodológico

La metodología empleada para la realización del presente Trabajo Especial de Grado se puede desglosar en 4 etapas:

3.1 Obtención de información básica

El estudio tiene como fuente de información principal los planos originales del Edificio Cincuentenario, ubicado en la Universidad Católica Andrés Bello, en la ciudad de Caracas-Venezuela. Los mismos, suministrados por el Ingeniero Nicolás Labropoulos, encargado del diseño estructural del edificio.

3.2 Modelado de edificación para interpretación de resultados

Usando el software de análisis estructural ETABS, se modeló en tres dimensiones y con todos sus elementos estructurales de concreto reforzado el edificio, siguiendo los detalles mostrados en los planos obtenidos, para ser sometido a un análisis estático lineal y a un análisis dinámico no lineal y observar su comportamiento al remover sus elementos estructurales.

3.3 Interpretación y análisis de resultados

Una vez realizada la simulación se verificaron las áreas afectadas y los criterios de aceptación para las columnas, vigas y muros en cada uno de los casos de estudios, y se realizó una comparación con el caso control.

3.4 Recomendaciones y elaboración de tomo

Una vez comparados todos los resultados obtenidos, se emitieron recomendaciones para la realización de este estudio. Posteriormente, se realizó el tomo correspondiente al Trabajo Especial de Grado.

CAPÍTULO IV: Desarrollo

4.1 Estructura de estudio

La estructura a estudiar se trata del edificio Cincuentenario, ubicado en la Universidad Católica Andrés Bello Sede Montalbán Caracas-Venezuela. Inaugurado en el año 2004, con un área de construcción de 9.300 m² aproximadamente.

Ilustración 24. Edificio Cincuentenario, UCAB - Sede Montalbán



Fuente: (Drone Pixel Venezuela, 2016)

La estructura es regular y consta de siete (7) pisos además de una planta techo, para una altura total de treinta y dos (32) metros, con una altura de entre pisos de cuatro (4) metros, una longitud en su lado más largo de sesenta (60) metros (con simetría a los 30m) y en su lado más corto dieciocho (18) metros.

En cuanto a la calidad de sus materiales, el concreto tiene una resistencia de $f'c = 250$ Kgf/cm², y el acero utilizado para las cabillas una resistencia de $Fy = 4200$ Kgf/cm² y para las mallas $Fy = 5000$ Kgf/cm².

La estructura está construida sobre un suelo tipo S2 y con fundaciones profundas a través de pilotes de cabezales rectangulares (para un total de 54 pilotes). Presenta losas nervadas en una y en dos direcciones.

Según la Norma Venezolana Covenin 1756-1: 2001 Edificaciones Sismorresistentes, por tratarse de un edificio educacional se clasifica como Tipo A, y de acuerdo a su ubicación geográfica se encuentra en Zona sísmica 5, por lo que la estructura debe corresponder con un nivel de diseño ND3.

TABLA #7. Niveles de Diseño según COVENIN 1756-2001

GRUPO	ZONA SÍSMICA		
	1 y 2	3 y 4	5, 6 y 7
A; B1	ND2 ND3	ND3	ND3
B2	ND1 (*) ND2 ND3	ND2 (*) ND3	ND3 ND2 (**)

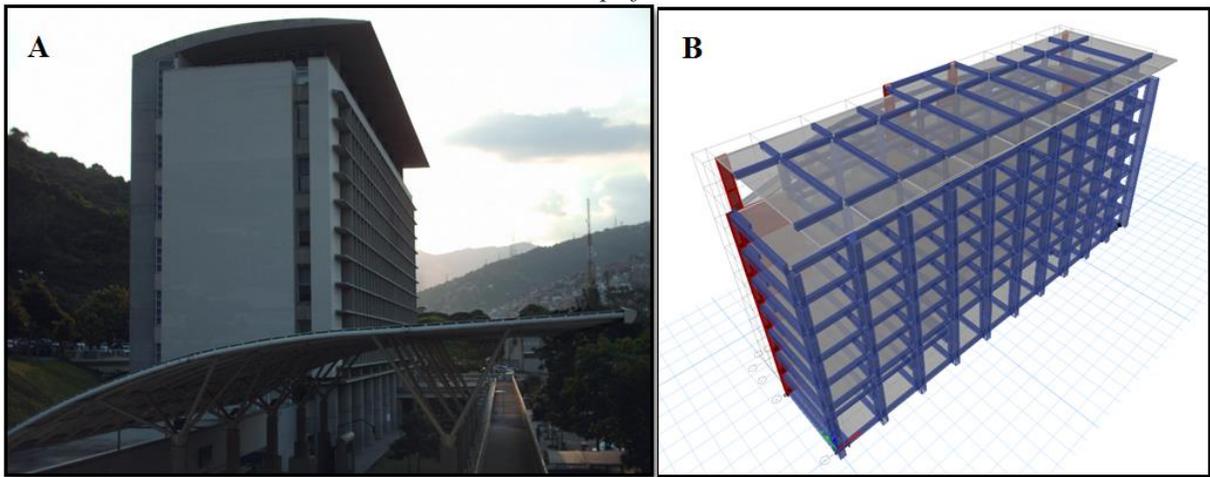
(*) Válido para edificaciones de hasta de 10 pisos ó 30 m de altura.
(**) Válido para edificaciones de hasta de 2 pisos u 8 m de altura.

Este edificio fue calculado por el Ing. Nicolás Labropoulos y construido bajo la inspección del Ing. Vincenzo Bonadio, adicionalmente el Ing. Andres Amelinckx estuvo a cargo de las instalaciones sanitarias, el Ing. Raul Aldrey de las instalaciones eléctricas, el Ing. Eduardo Capiello de las instalaciones mecánicas y el Arq. Miguel Sureda de las instalaciones de control de incendios.

4.2 Modelaje de la estructura en ETABS 2016

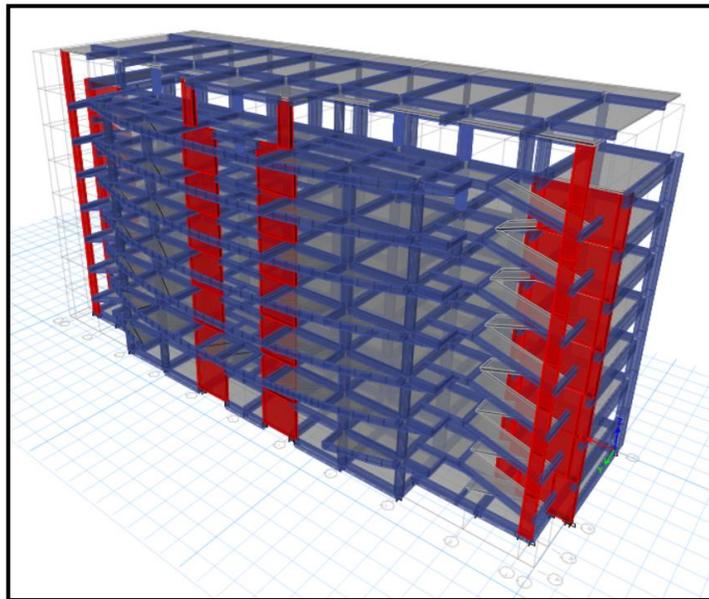
El modelaje del edificio se realizó con la información proporcionada en los planos de la estructura, respetando lo más posible estas instrucciones. Sin embargo, fue necesario aplicar algunas simplificaciones para disminuir el tiempo de corrida en el modelo, las cuales no representan cambios significativos en el comportamiento de la estructura, dichas simplificaciones se presentan a continuación:

- a. El techo de la estructura en realidad es curvo (ilustración 25.A), en el modelo se simplificó a una losa maciza de un espesor de 20 cm (ilustración 25.B).

Ilustración 25. Simplificación del techo

Fuente: (A)

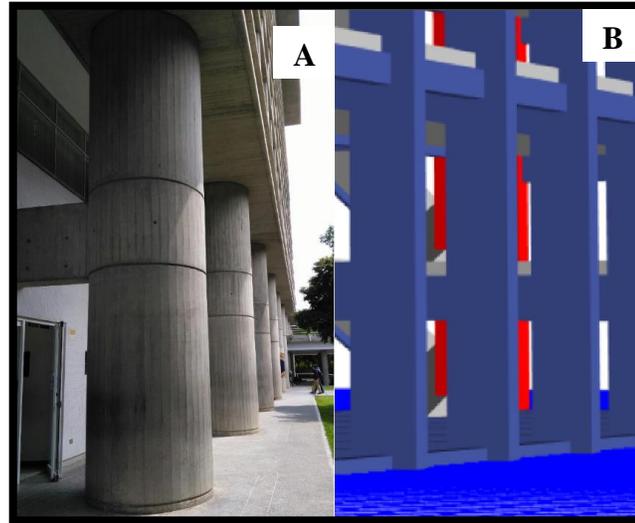
- b. Las losas nervadas en 2 direcciones, se simplifican a losas macizas con un espesor equivalente, para conservar el peso del elemento.
- c. Las escaleras se modelaron como unas rampas de losa maciza de 20cm de espesor.

Ilustración 26. Modelo de las escaleras en forma de rampa

Fuente: Realizado por los autores en ETABS 2016

- d. En la estructura real se tienen cambios de secciones para una misma altura (ilustración 27 A), en el modelo las secciones de las columnas se consideraron uniformes (ilustración 27 B).

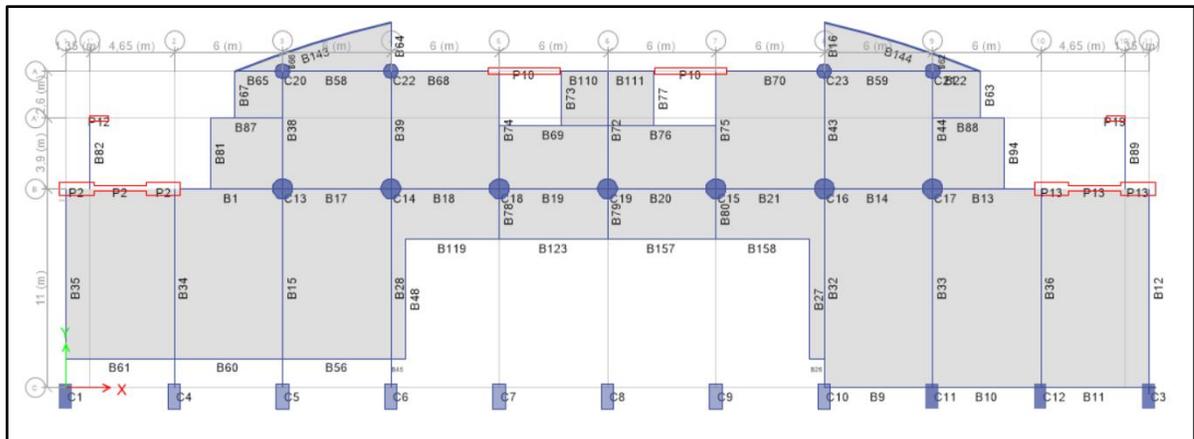
Ilustración 27. Cambios de sección es una misma altura.



Fuente: Lado A fotografía tomada por los autores / Lado B Realizado por los autores en ETABS 2016

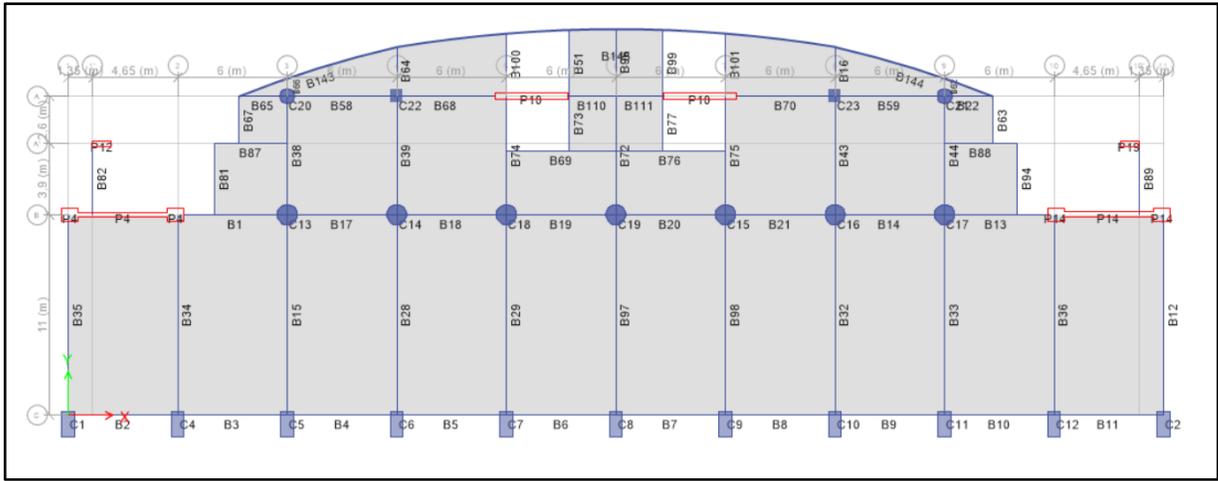
A continuación, se presenta las diferentes vistas en planta del modelo en ETABS.

Ilustración 28. Plano de Planta Nivel Mezzanina +4 m



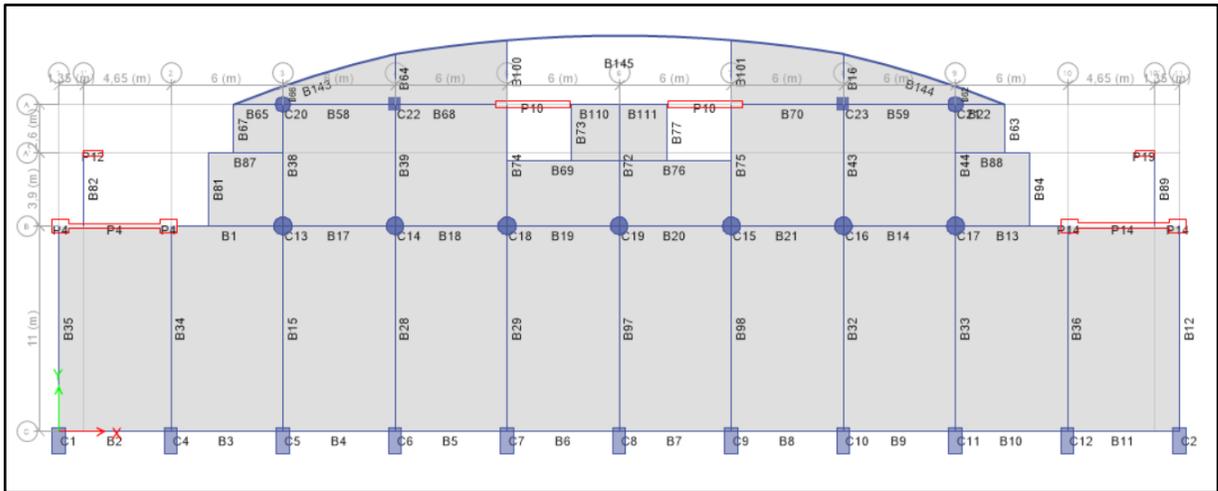
Fuente: Realizado por los autores en ETABS 2016

Ilustración 29. Plano de Planta Nivel +8 m



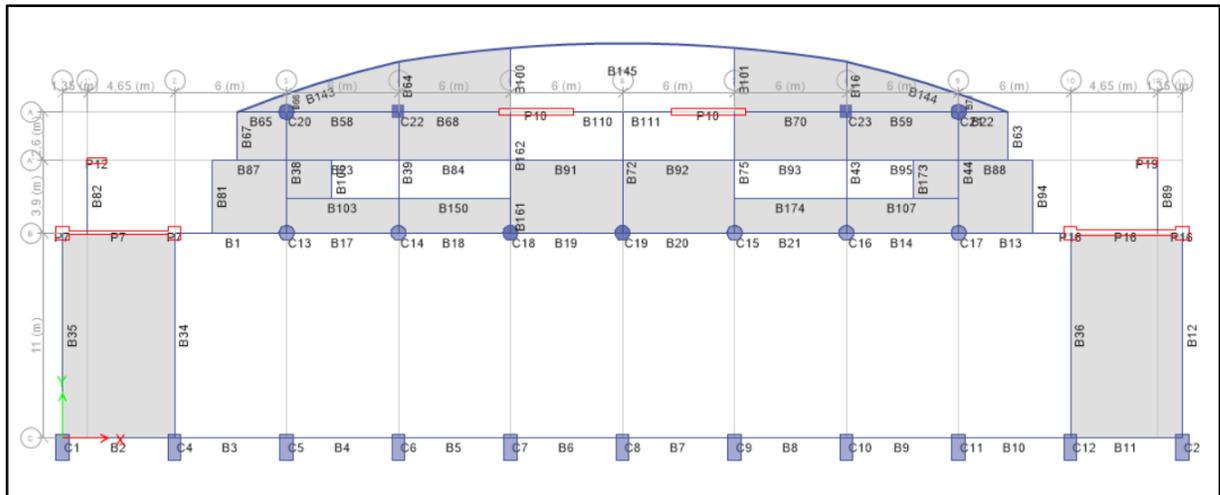
Fuente: Realizado por los autores en ETABS 2016

Ilustración 30. Plano de Planta Nivel +12m, +16m, +20m y +24m



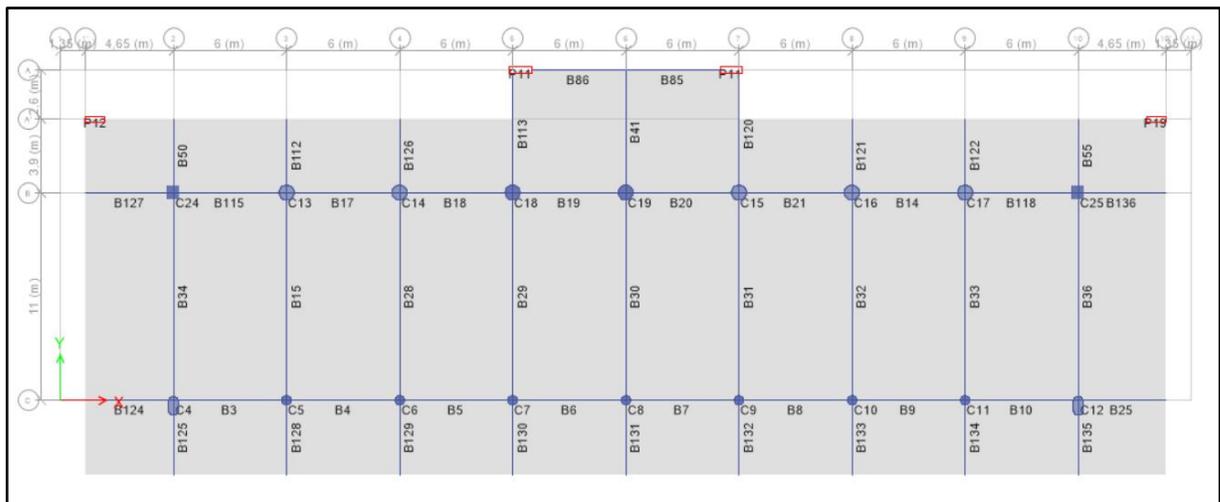
Fuente: Realizado por los autores en ETABS 2016

Ilustración 31. Plano de Planta Nivel +28m



Fuente: Realizado por los autores en ETABS 2016

Ilustración 32. Plano de Planta de Techo +32m



Fuente: Realizado por los autores en ETABS 2016

4.3 Nivel de seguridad de la instalación (FSL)

Según los criterios presentados en el Capítulo II [apartado 2.8.2](#), el edificio de cincuentenario no aplica para un estudio de colapso progresivo. Sin embargo, para efectos de este Trabajo Especial de Grado, se asumirá un nivel de seguridad que requiera un análisis por colapso progresivo.

Descartando los niveles I y II ya que no requieren de este análisis y el FSL V por ser muy riguroso, se selecciona el nivel FSL III, que implica la remoción de los elementos verticales únicamente a nivel de PB.

4.4 Selección de elementos a remover

La GSA establece un criterio de remoción de columnas dependiendo de su ubicación, tal como se explicó en el apartado 2.8.1 del Capítulo II, así mismo, se presentan a continuación las columnas seleccionadas en el modelo.

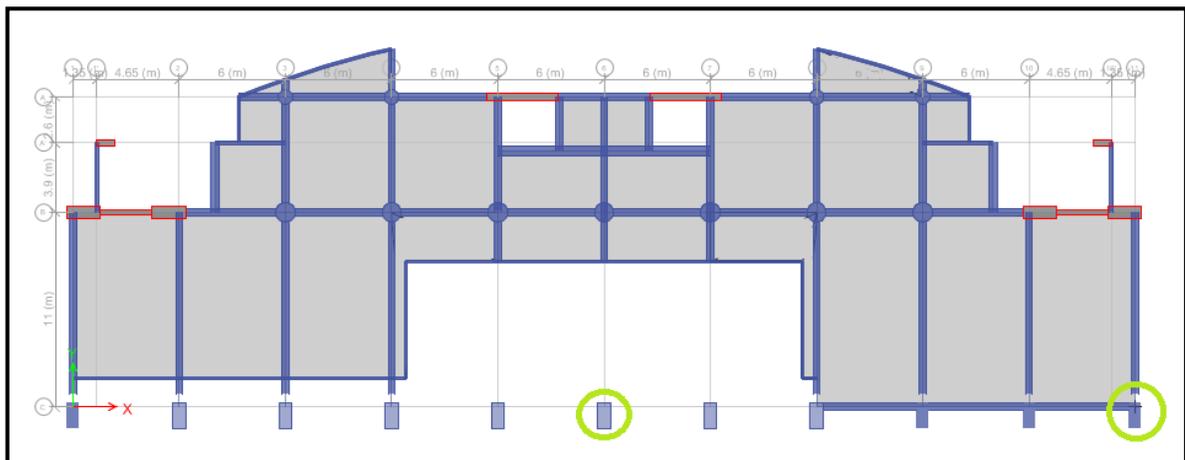
4.4.1 Columnas Externas

Siguiendo las recomendaciones de la GSA indicadas en el Capítulo II [apartado 2.8.1.1](#) se presentan las columnas externas seleccionadas para su remoción:

Columna C-6

Columna C-11

Ilustración 33. Esquema para remoción de columnas externas



Fuente: Realizado por los autores en ETABS 2016

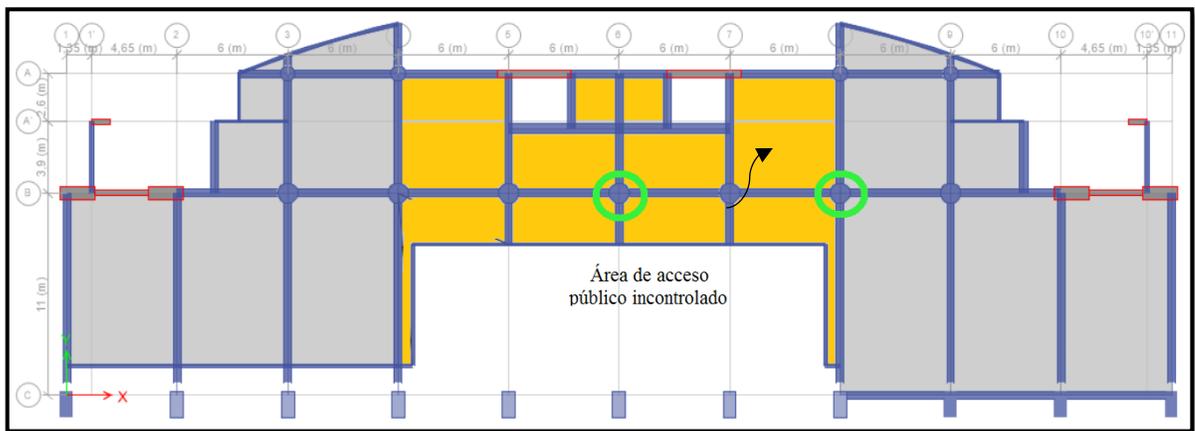
4.4.2 Columnas Internas

Siguiendo las recomendaciones de la GSA indicadas en el Capítulo II [apartado 2.8.1.2](#) se presentan las columnas internas seleccionadas para su remoción:

Columna B-6

Columna C-8

Ilustración 34. Esquema para remoción de columnas internas

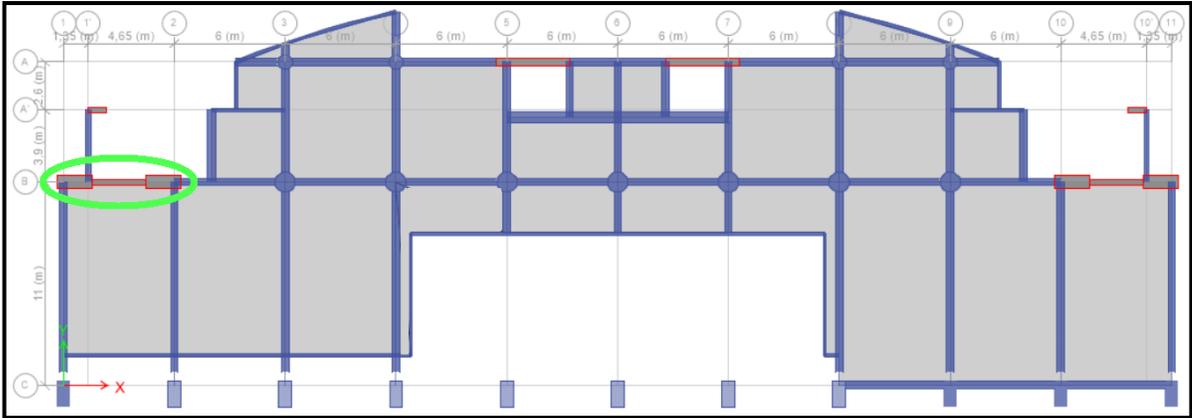


Fuente: Realizado por los autores en ETABS 2016

4.4.3 Muros de corte

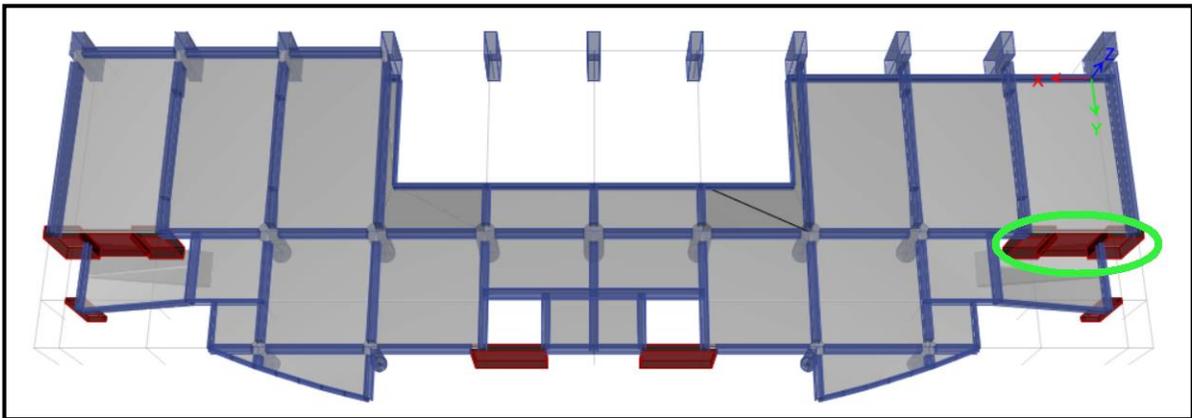
Siguiendo las recomendaciones de la GSA indicadas en el Capítulo II [apartado 2.8.1.3](#) y [2.8.1.4](#) del Capítulo II del presente Trabajo Especial de Grado, se seleccionara el Muro B-1-2, que se encuentra adyacente a las escaleras y se considera crítico ya que afecta una de las vías de escape del edificio.

Ilustración 35. Esquema para remoción de muros de corte - Vista Planta



Fuente: Realizado por los autores en ETABS 2016

Ilustración 36. Esquema para la remoción de muro de corte - Vista 3D desde la fachada Sur.



Fuente: Realizado por los autores en ETABS 2016

4.5 Casos de estudio

Según los elementos seleccionados, se tienen los siguientes casos de estudio:

TABLA #8. Casos de estudio

CASOS	COLUMNA EXTERNA	COLUMNA INTERNA	MURO	PISOS
CASO #1				
CASO #2	C-6			PB y MEZZ
CASO #3	C-11			PB
CASO #4		B-6		PB
CASO #5		B-8		PB
CASO #6			B-1-2	PB

Nota

Los casos de estudios serán analizados de la siguiente forma:

1. Para el caso #1, el modelo control será analizado con los métodos de análisis estático lineal y análisis dinámico no lineal, para fines comparativos con el resto de los casos.
2. Para caso #2, se utilizarán los métodos de análisis estático lineal y análisis dinámico no lineal. El método estático no lineal es descartado por ser menos preciso que el dinámico no lineal.
3. El resto de los casos serán analizados solo con el método de análisis dinámico no lineal, ya que el mismo arroja valores más realistas y los análisis lineales se consideran muy conservadores para este tipo de estudios.

Adicionalmente, para todos los casos, los valores del análisis de cargas permanentes y cargas variables corresponden a los indicados en la siguiente tabla:

TABLA #9. Cargas gravitacionales actuantes según área

ÁREA	CP (Kgf/m ²)	CV (Kgf/m ²)
Techo	640	100
Escaleras	615	500
Entrepisos	615	350

4.5.1 CASO #1 Modelo Control

Para establecer un punto de comparación de la edificación previo a la remoción de alguno de sus elementos, se le aplica un estudio de análisis estático lineal para evaluar los valores de DCR y un análisis dinámico no lineal para evaluar su desplazamiento vertical bajo las acciones de las fuerzas gravitacionales.

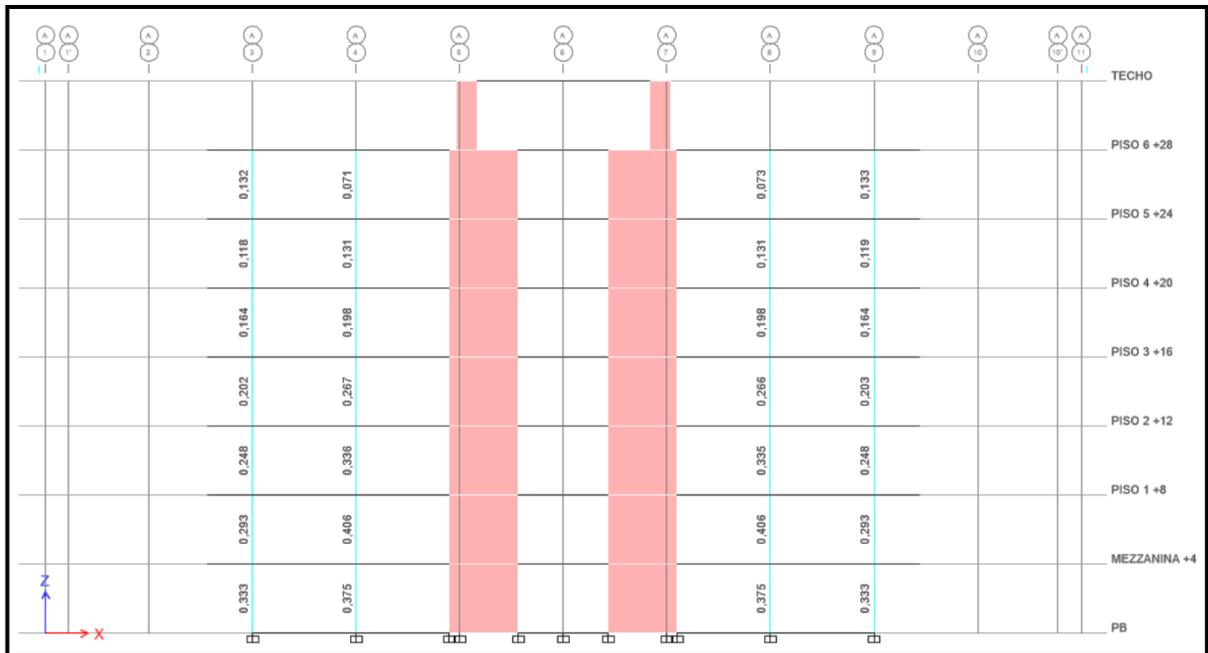
4.5.1.1 Cargas aplicadas

Para el caso control, las cargas últimas vienen dadas por la [Ecuación 7](#).

4.5.1.2 Relación Demanda Capacidad (DCR) para AEL

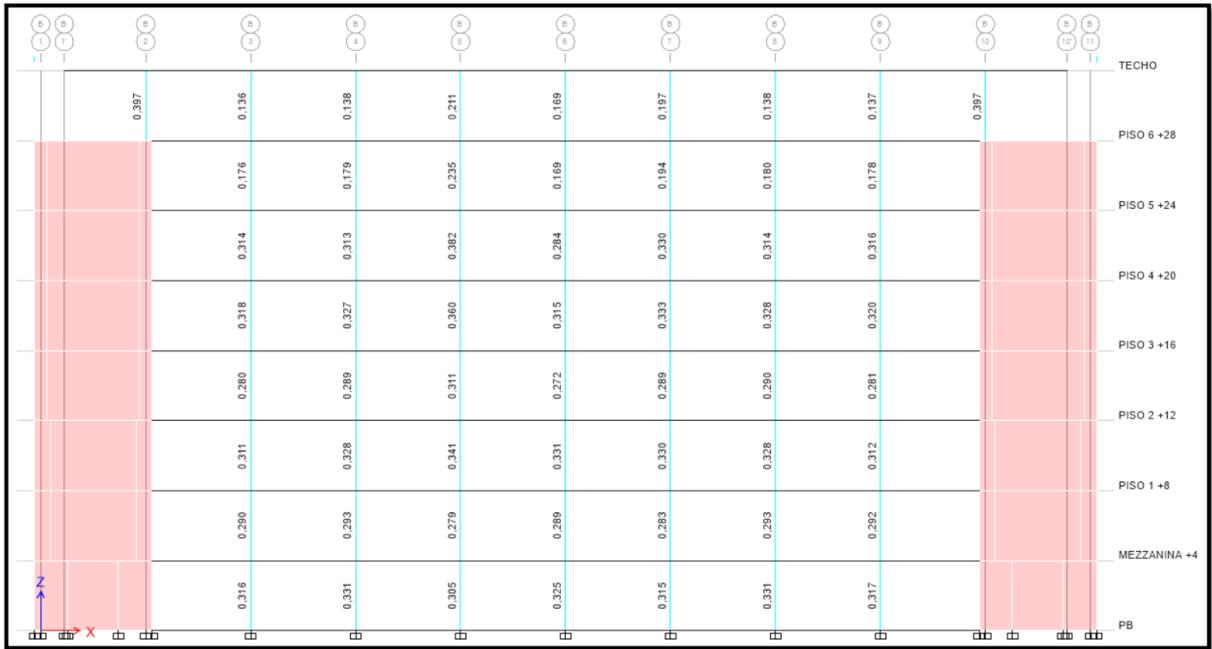
Una vez corrido el análisis estático lineal en el ETABS para el modelo control, se obtuvieron los siguientes valores de DCR para las columnas:

Ilustración 37. Valores de DCR para las columnas del Caso 1 - Pórtico A



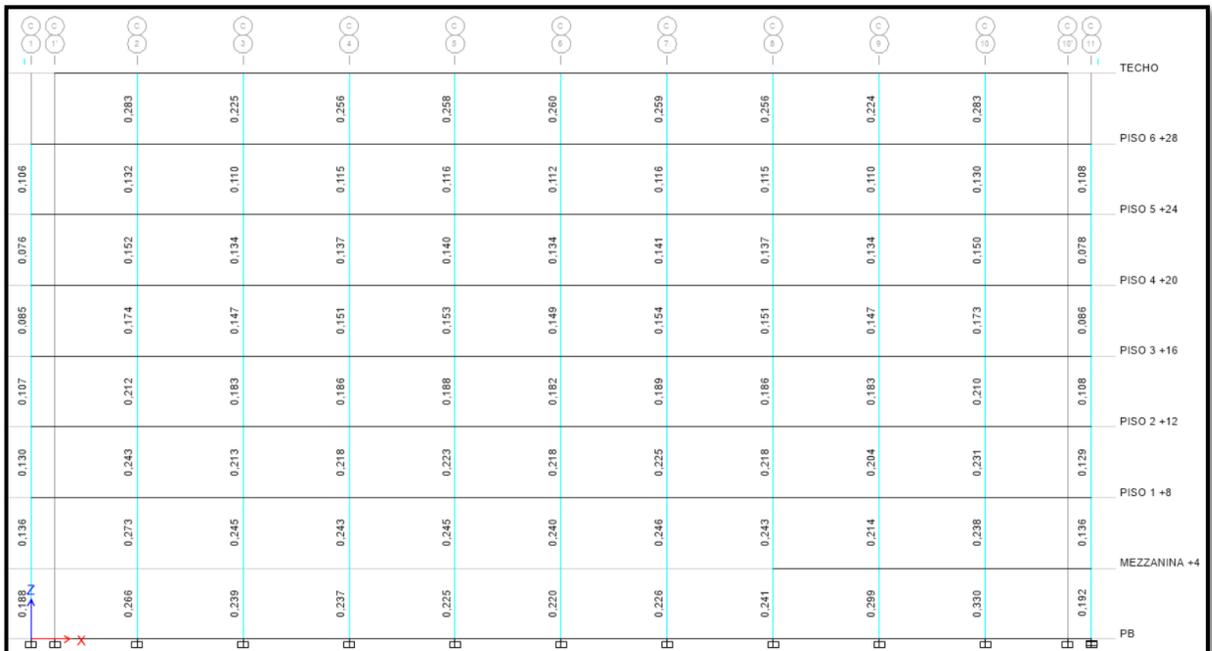
Fuente: Realizado por los autores en ETABS 2016

Ilustración 38. Valores de DCR para las columnas del Caso 1- Pórtico B



Fuente: Realizado por los autores en ETABS 2016

Ilustración 39. Valores de DCR para las columnas del caso 1- Pórtico C



Fuente: Realizado por los autores en ETABS 2016

En el caso de las vigas, a través de la [ecuación 2](#) y la [ecuación 3](#), se obtiene la capacidad resistente para corte y para momento respectivamente (ver detalle en documento de anexos), así mismo se presentan los valores máximos obtenidos para cada nivel.

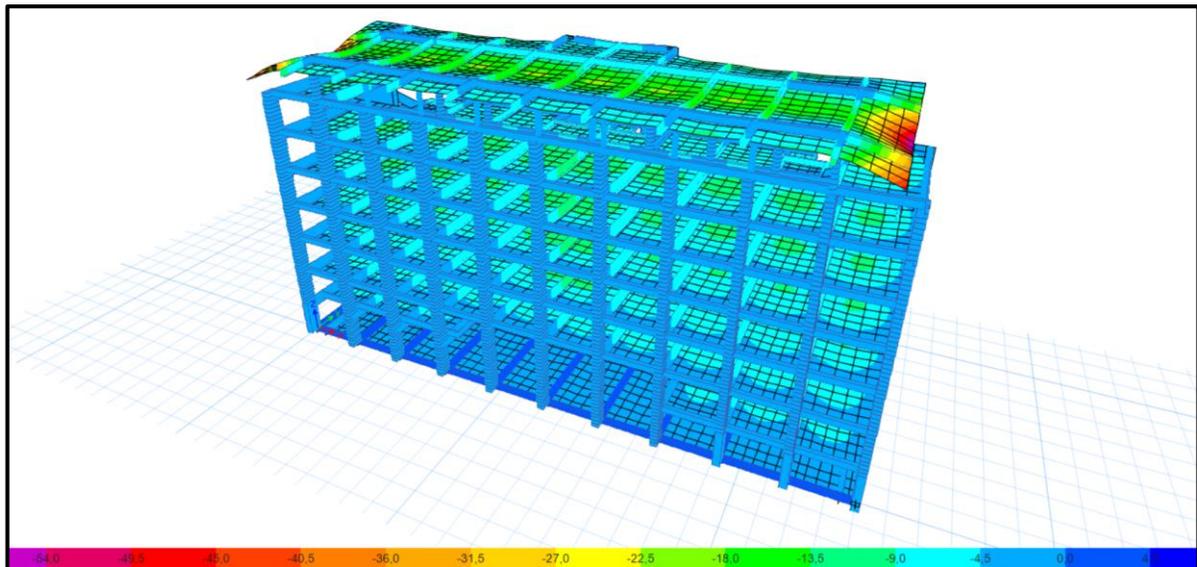
TABLA #10. Valores de DCR máximos para vigas según nivel de piso.

NIVEL	DCR (M)	DCR (V)
TECHO +32	0,89	0,42
PISO 9 +28	0,75	0,38
PISO 5 +24	0,71	0,35
PISO 4 +20	0,72	0,36
PISO 3 +16	0,71	0,36
PISO 2 +12	0,69	0,36
PISO 1 +8	0,76	0,44
MEZZANINA +4	0,64	0,35

4.5.1.3 Desplazamientos verticales

A continuación, se muestra los desplazamientos verticales para el AEL del modelo control bajo las acciones de cargas gravitacionales:

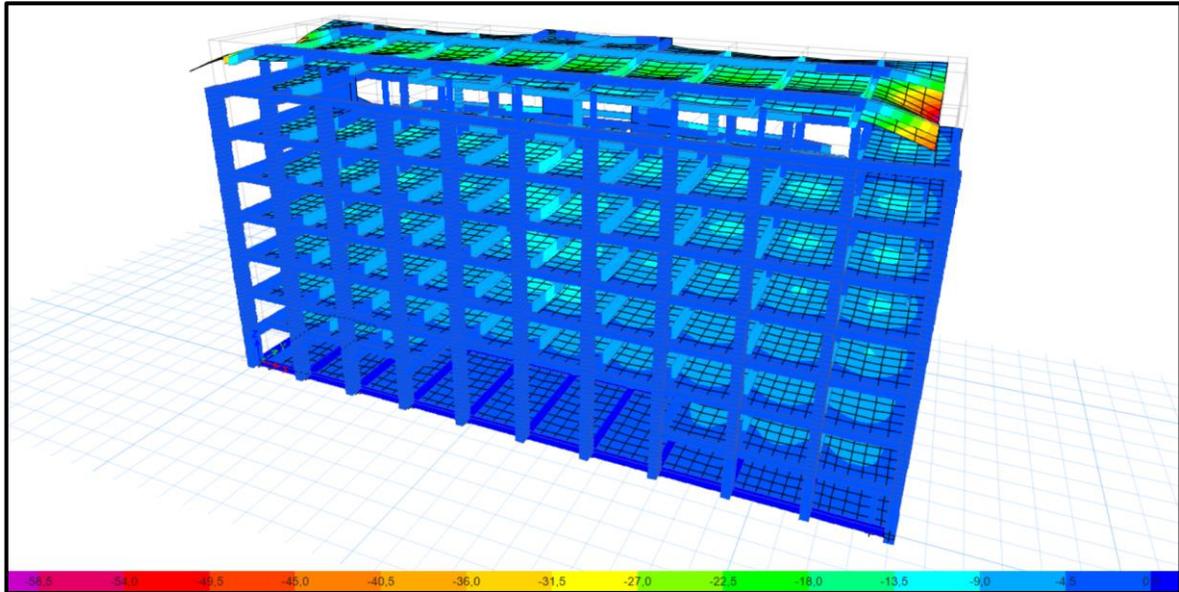
Ilustración 40. Desplazamiento vertical para el Caso 1 de AEL



Fuente: Realizado por los autores en ETABS 2016

A continuación, se muestra los desplazamientos verticales para el ADNL del modelo control bajo las acciones de cargas gravitacionales:

Ilustración 41. Desplazamiento vertical para el Caso 1 de ADNL



Fuente: Realizado por los autores en ETABS 2016

4.5.2 CASO #2 Remoción Columna C-6

Una vez removida la columna C-6 de la estructura, se procede a correr por separado un análisis estático lineal y un análisis dinámico no lineal.

4.5.2.1 Análisis Estático Lineal (AEL)

Para este modelo se tienen dos casos de cargas, las cargas debidas a acciones controladas por deformaciones y las cargas debidas a acciones controladas por fuerza.

4.5.2.1.1 Acciones controladas por deformación

Según lo establecido en el Capítulo II del presente Trabajo Especial de Grado, en su [apartado 2.8.3.2.1](#) las cargas últimas vienen dadas por la [Ecuación 6](#) para las áreas afectadas por la remoción de la columna y por la [Ecuación 7](#) para las áreas no afectadas por la remoción de la

columna. Así mismo, para el cálculo del factor de mayoración Ω_{LD} para estructuras aperticadas de concreto reforzado, se utiliza la ecuación presentada en la [Tabla #2](#).

Para obtener el valor de m_{LIF} se procedió a calcular el factor m de todas las vigas que se consideran elementos primarios y posteriormente se seleccionó el menor de estos valores.

TABLA #11 Valor del Factor m_{LIF} del caso 2 de AEL

NIVEL	Viga	V/B*D*F'C	$\frac{\rho - \rho'}{\rho_{bal}}$	FACTOR "m"
TECHO +32	B6	1,157	0,3	11,8
	B7	1,157	0,1	14,6
	B30	1,992	0,1	14,6
	B131	1,298	0,3	11,8
PISO 6 +28	B6	0,203	0,0	16
	B7	0,203	0,2	13,2
PISO 5 +24	B6	0,464	0,0	16
	B7	0,464	0,2	13,2
	B97	2,039	0,1	14,6
PISO 4 +20	B6	0,465	0,0	16
	B7	0,464	0,2	13,2
	B97	2,017	0,1	14,6
PISO 3 +16	B6	0,465	0,0	16
	B7	0,463	0,2	13,2
	B97	2,002	0,1	14,6
PISO 2 +12	B6	0,465	0,0	16
	B7	0,463	0,2	13,2
	B97	1,995	0,1	14,6
PISO 1 +8	B6	0,451	0,0	16
	B7	0,448	0,2	13,2
	B97	1,747	0,1	14,6
FACTOR m_{LIF}				11,80

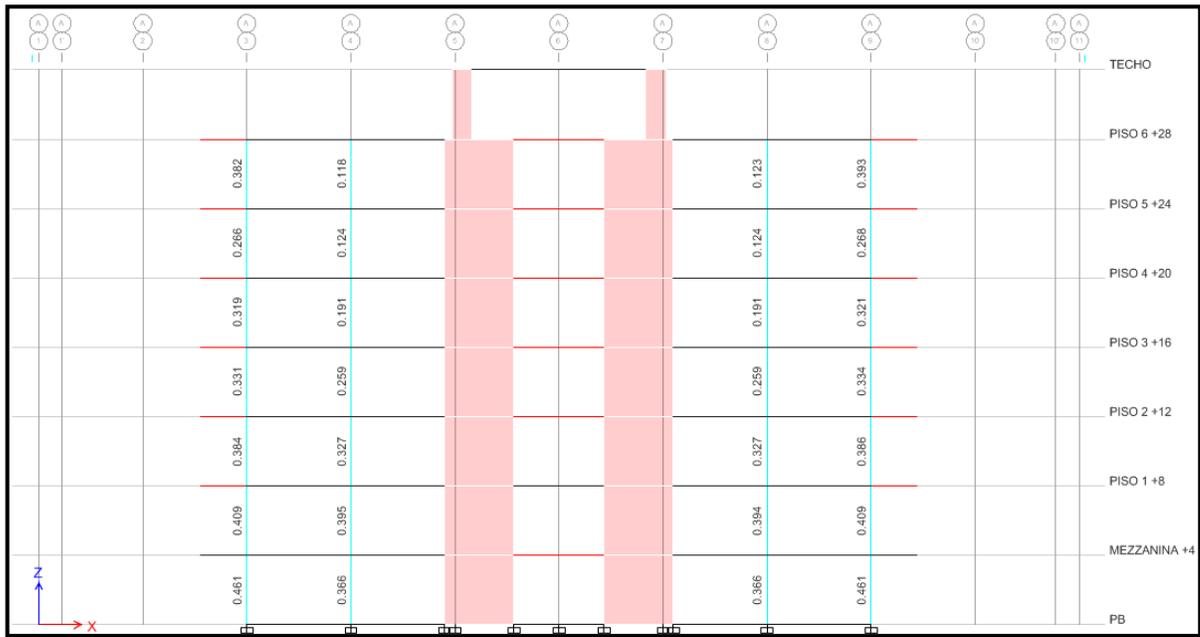
Una vez obtenido el factor m_{LIF} se procede a sustituir en la ecuación y se tiene que,

$$\Omega_{LD} = 1,2 m_{LIF} + 0,8 = 1,2(11,8) + 0,8 = 15$$

4.5.2.1.1.1 DCR para acciones controladas por deformación

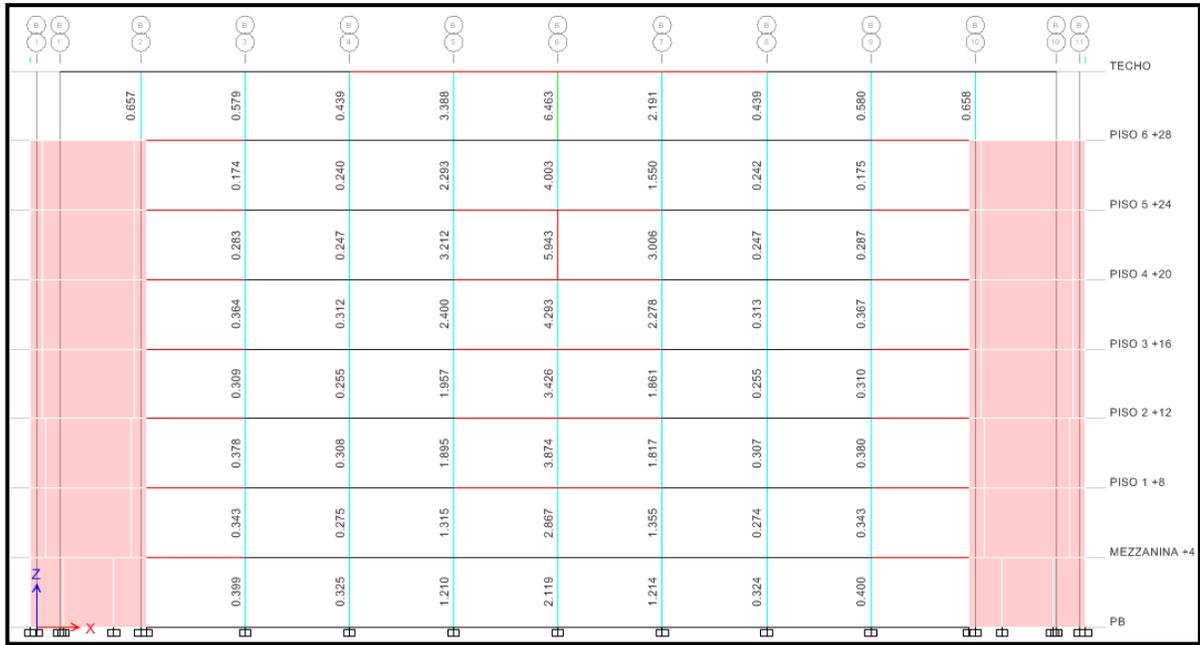
Una vez corrido el análisis estático lineal en el ETABS para el caso 2, se obtuvieron los siguientes valores de DCR para las columnas:

Ilustración 42. DCR de columnas para acciones controladas por deformación del caso 2- Pórtico A.



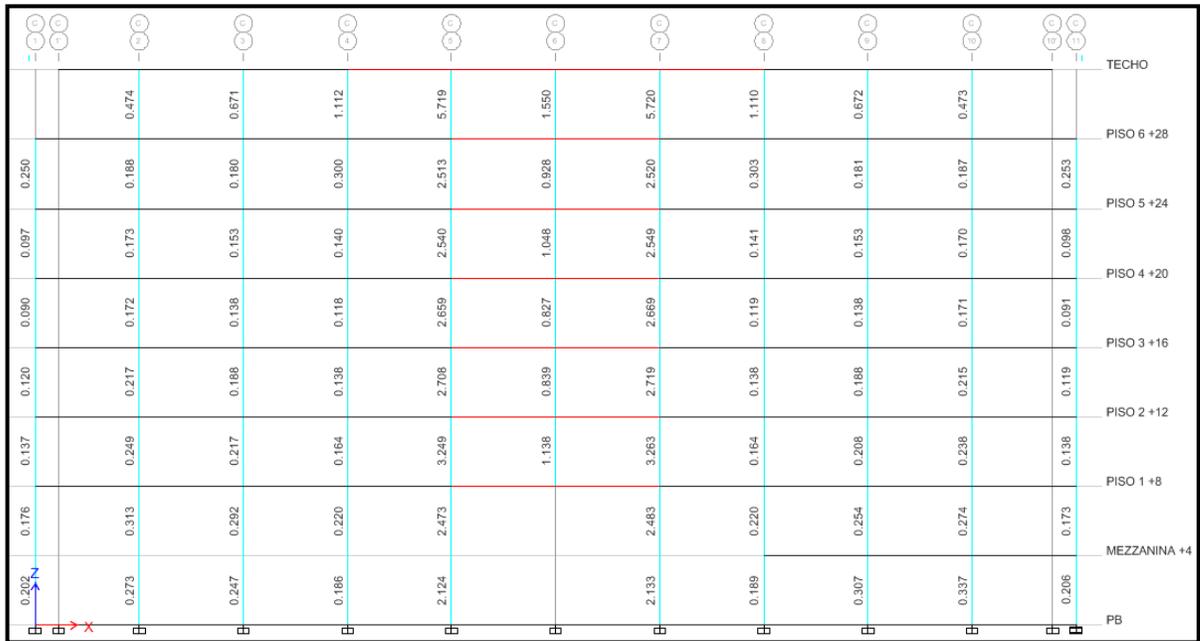
Fuente: Realizado por los autores en ETABS 2016

Ilustración 43. DCR de columnas para acciones controladas por deformación del caso 2 – Pórtico B



Fuente: Realizado por los autores en ETABS 2016

Ilustración 44. DCR de columnas para acciones controladas por deformación del caso 2 – Pórtico C



Fuente: Realizado por los autores en ETABS 2016

En el caso de las vigas, según la [Tabla #1](#) para el caso de acciones controladas por deformación, se deben tomar en cuenta los esfuerzos a flexión, cuya capacidad resistente es obtenida mediante la [Ecuación 2](#). A continuación, se muestran los valores de DCR para esfuerzos a flexión máximos en cada uno de los pisos, cuyos valores resaltados serán aquellos que no cumplan con los criterios de aceptación indicados en el [apartado 2.8.3.4.1](#).

Así mismo, se recomienda revisar el documento de anexos donde se muestra a detalle el cálculo de DCR para todas las vigas.

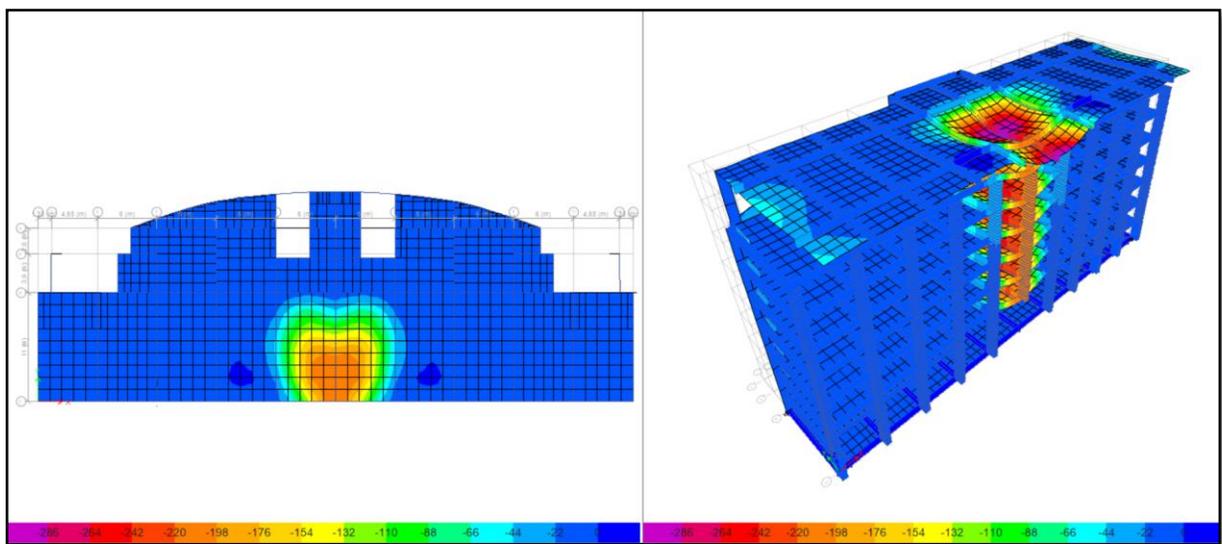
TABLA #12 Valores de DCR de vigas para acciones controladas por deformación

PISO	VIGA	DCR
TECHO +32	B6	8,71
	B7	8,74
	B8	6,06
	B29	7,38
	B30	10,61
	B31	7,38
PISO 6 +28	B6	10,68
	B7	20,98
PISO 5 +24	B6	11,36
	B7	19,89
	B97	8,97
PISO 4 +20	B6	11,46
	B7	20,10
	B97	9,26
PISO 3 +16	B6	11,62
	B7	20,41
	B97	9,49
PISO 2 +12	B6	11,89
	B7	20,86
	B97	9,70
PISO 1 +8	B6	11,91
	B7	22,96
	B97	11,81
MEZZANINA +4	B82	2,75
	B89	2,72

4.5.2.1.1.2 Áreas afectadas para acciones controladas por deformación

En la siguiente ilustración se muestra el desplazamiento vertical obtenido para el caso de remoción de la columna C-6, en donde se puede observar que en el eje de la columna se tiene un desplazamiento de 2,15cm y además un desplazamiento máximo en toda el área adyacente a la columna de 2,21cm.

Ilustración 45. Área afectada del caso 2 para acciones controladas por deformación



Fuente: Realizado por los autores en ETABS 2016

Como la columna removida C-6, es una columna externa de la edificación, se verifica que el área afectada por la remoción no sea superior al 15% del área total del piso ubicado inmediatamente por encima de la columna, es decir, Piso 1, para lo cual se presenta la siguiente tabla:

TABLA #13. Área afectada del Caso 2 para acciones controladas por deformación

Nivel	Área Total (m ²)	Límite de Área afectada (m ²)	Área Afectada (m ²)
Piso 1 +8 m	1000	150	132

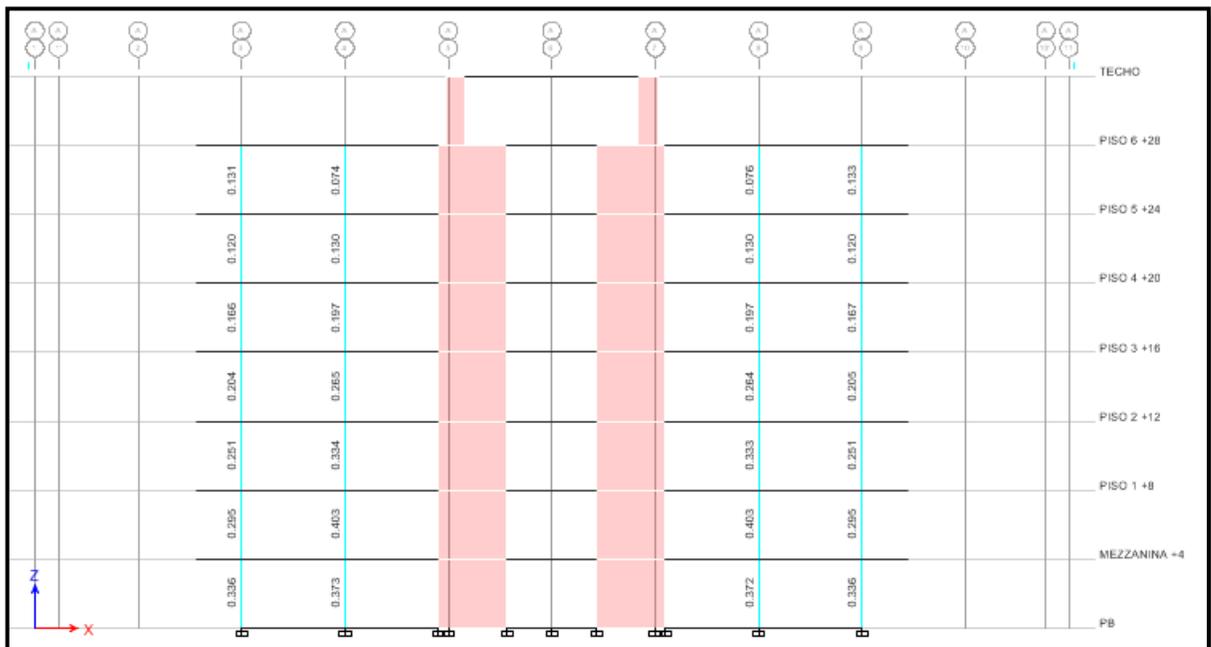
4.5.2.1.2 Acciones controladas por fuerza

Según lo establecido en el **Capítulo II** del presente Trabajo Especial de Grado, en su apartado **2.8.3.2.2** las cargas últimas vienen dada por la [Ecuación 8](#) para los elementos primarios y por la [Ecuación 7](#) para elementos secundarios. Así mismo, para el cálculo del factor de mayoración Ω_{LF} se tomara el valor de dos (2), según lo establecido en la [TABLA #2](#) para estructuras aporricadas de concreto reforzado.

4.5.2.1.2.1 DCR para acciones controladas por fuerza

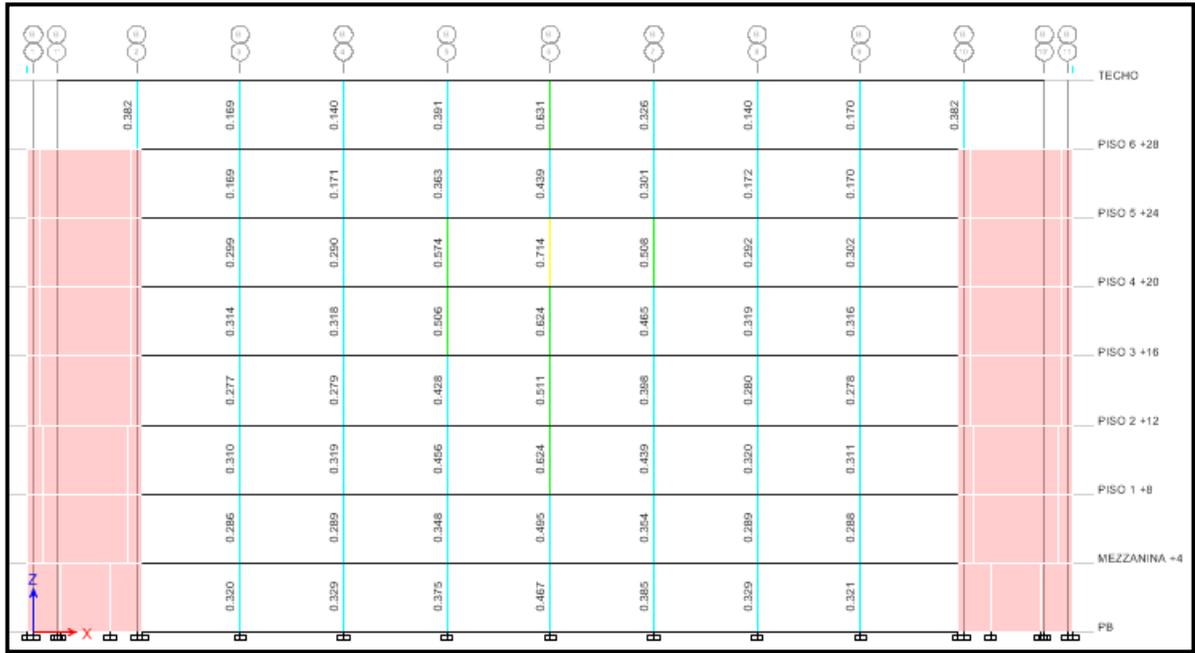
Una vez corrido el análisis estático lineal en el ETABS para el caso 2, se obtuvieron los siguientes valores de DCR para las columnas:

Ilustración 46. Valores de DCR de columnas para acciones controladas por fuerza del Caso 2 – Pórtico A



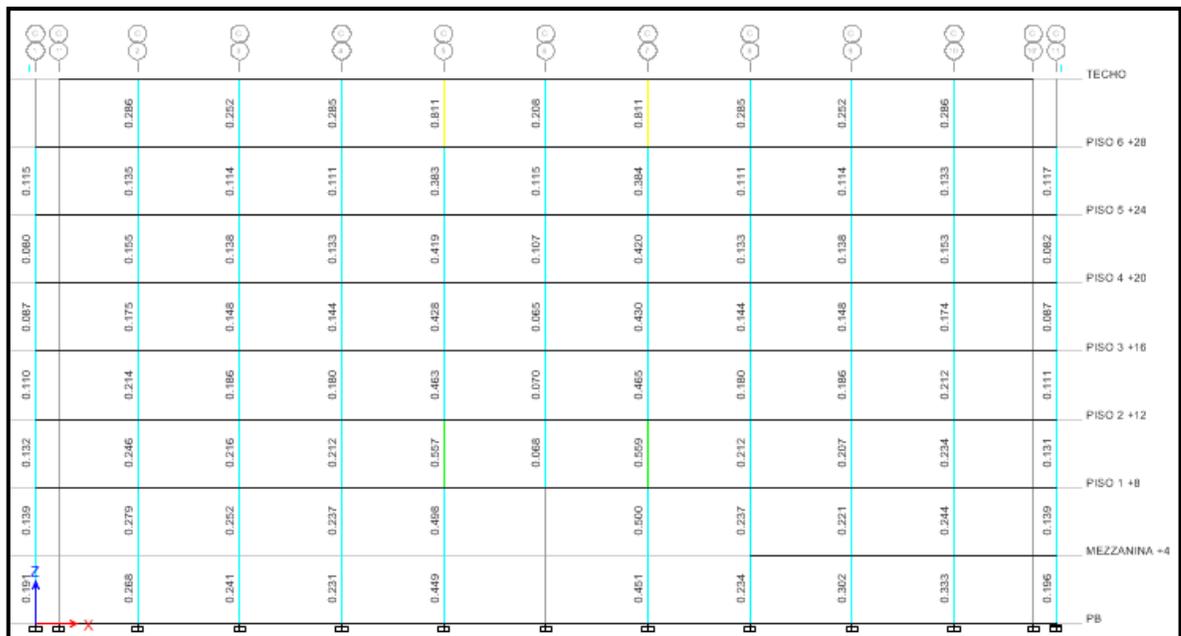
Fuente: Realizado por los autores en ETABS 2016

Ilustración 47. DCR de columnas para acciones controladas por fuerza del Caso 2 – Pórtico B



Fuente: Realizado por los autores en ETABS 2016

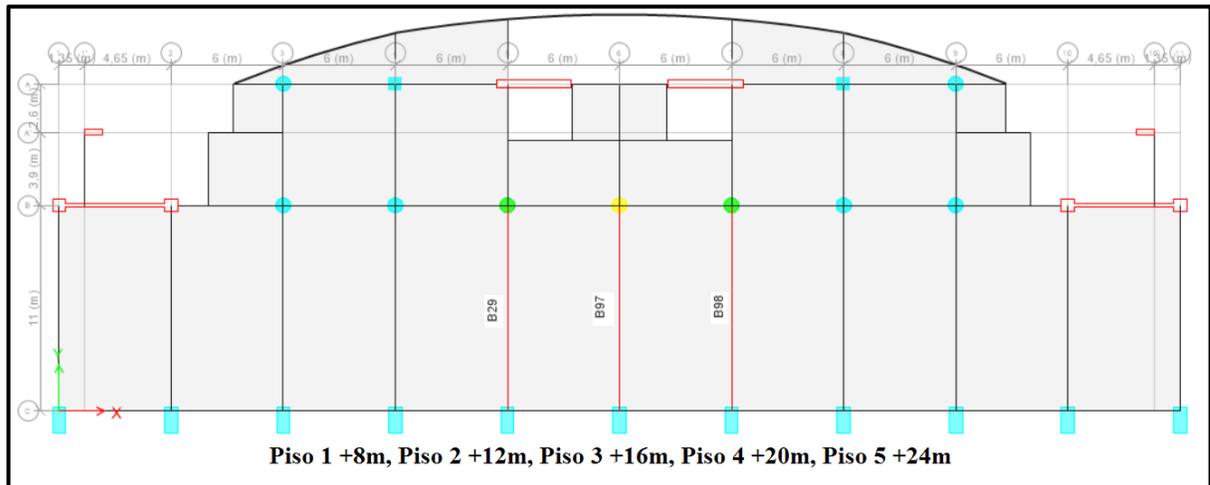
Ilustración 48 .DCR de columnas para acciones controladas por fuerza del Caso 2 – Pórtico C



Fuente: Realizado por los autores en ETABS 2016

En el caso de las vigas se presenta la siguiente ilustración, donde se resalta el nombre de aquellas vigas que no fueron capaces de soportar la acción conjunta del corte y torsión generada por la remoción de la columna C-6.

Ilustración 49. Vigas que no soportan los efectos de corte y torsión del Caso2 de AEL



Fuente: Realizado por los autores en ETABS 2016

Así mismo, en la siguiente tabla se muestra la comparación de valor de At/S requerido con el valor real de la sección.

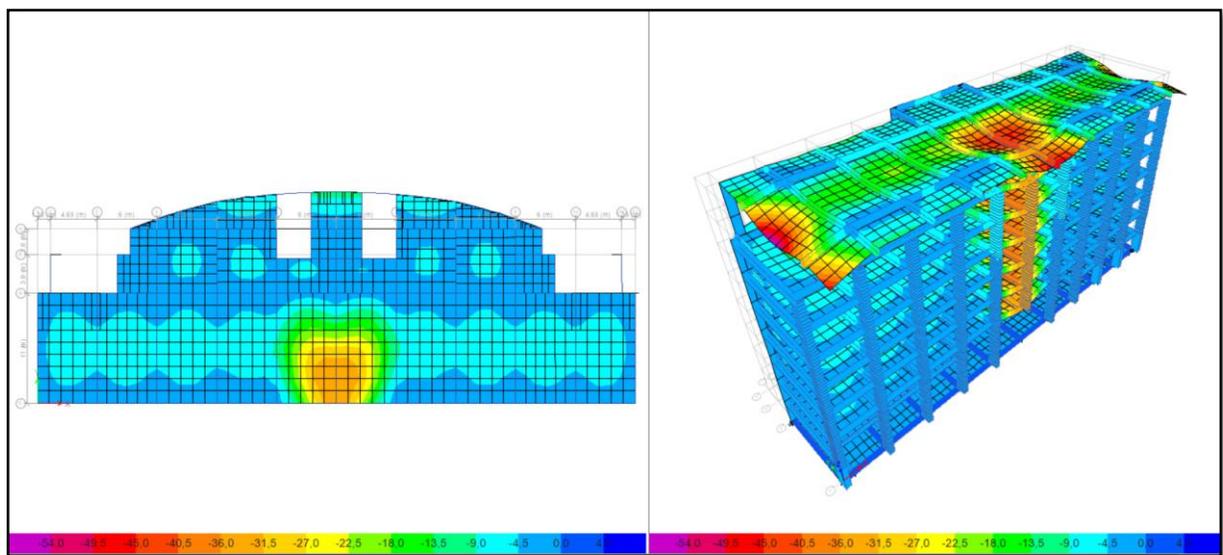
TABLA 14. *At/s requerido vs At/s real para vigas resaltadas en la ilustración 49*

Nivel	Viga	$\frac{A_{total}}{s} = \frac{A_v}{s} + 2 \frac{At}{s}$ Requerido (cm ² /m)	At/s Real (cm ² /m)	¿Resiste?
PISO 1 +8	B29	0,279	0,142	No
PISO 1 +8	B98	0,282	0,142	No
PISO 1 +8	B97	0,181	0,142	No
PISO 2 +12	B29	0,296	0,142	No
PISO 2 +12	B98	0,298	0,142	No
PISO 2 +12	B97	0,146	0,142	No
PISO 3 +16	B29	0,293	0,142	No
PISO 3 +16	B98	0,296	0,142	No
PISO 3 +16	B97	0,144	0,142	No
PISO 4 +20	B29	0,294	0,142	No
PISO 4 +20	B98	0,296	0,142	No
PISO 4 +20	B97	0,155	0,142	No
PISO 5 +24	B29	0,297	0,142	No
PISO 5 +24	B98	0,299	0,142	No
PISO 5 +24	B97	0,152	0,142	No

4.5.2.1.2.2 Áreas afectadas para acciones controladas por fuerza

En la siguiente ilustración se muestra el desplazamiento vertical obtenido para el caso de remoción de la columna C-6 en donde se puede observar que en el eje de la columna se tiene un desplazamiento de 3,53 cm y además un desplazamiento máximo en toda el área adyacente a la columna de 3,57 cm.

Ilustración 50. Área afectada del caso 2 para acciones controladas por fuerza



Fuente: Realizado por los autores en ETABS 2016

Como la columna removida C-6, es una columna externa de la edificación, se verifica que el área afectada por la remoción no sea superior al 15% del área total del piso ubicado inmediatamente por encima de la columna, es decir, Piso 1, para lo cual se presenta la siguiente tabla:

TABLA #15. Área afectada del caso 2 para acciones controladas por fuerza

Nivel	Área Total (m ²)	Límite de Área afectada (m ²)	Área Afectada (m ²)
Piso 1 +8 m	1000	150	100

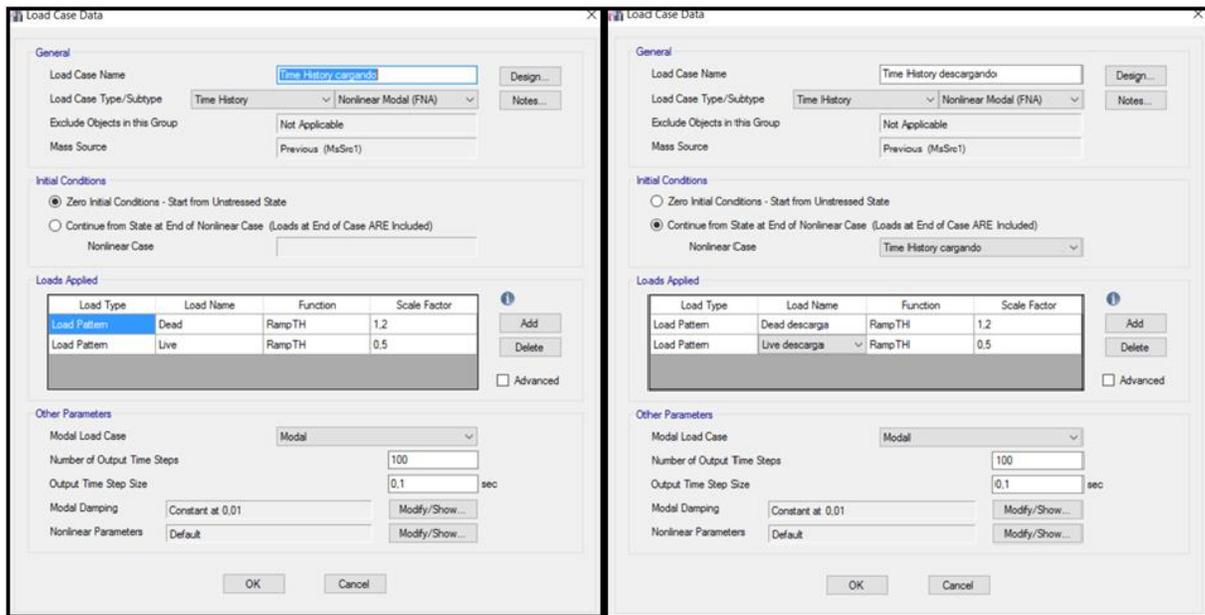
4.5.2.2 Análisis Dinámico no Lineal

Para este modelo las cargas debidas a acciones controladas por deformaciones y las cargas debidas a acciones controladas por fuerza, vienen dadas por la [Ecuación 11](#) según lo establecido en el Capítulo II del presente Trabajo Especial de Grado, en su apartado **2.8.5.2**

4.5.2.2.1 Procedimiento de Carga

Siguiendo las indicaciones del [apartado 2.8.5.3](#) se procedió a crear dos análisis de *Time History*, tal como se muestra a continuación.

Ilustración 51. Time History cargando y Time History descargando para el caso 2



Fuente: Realizado por los autores en ETABS 2016

4.5.2.2.2 Definición de Rótulas

Para estudiar los mecanismos de falla haciendo uso de un software de análisis estructural es necesario definir las rótulas plásticas que serán asignadas a los elementos primarios según lo establecido en el Capítulo II [apartado 2.8.4.1](#) haciendo uso de las Tablas [4](#) y [5](#), para vigas y columnas, respectivamente.

TABLA #16. Definición de rótulas plásticas para vigas del Caso 2

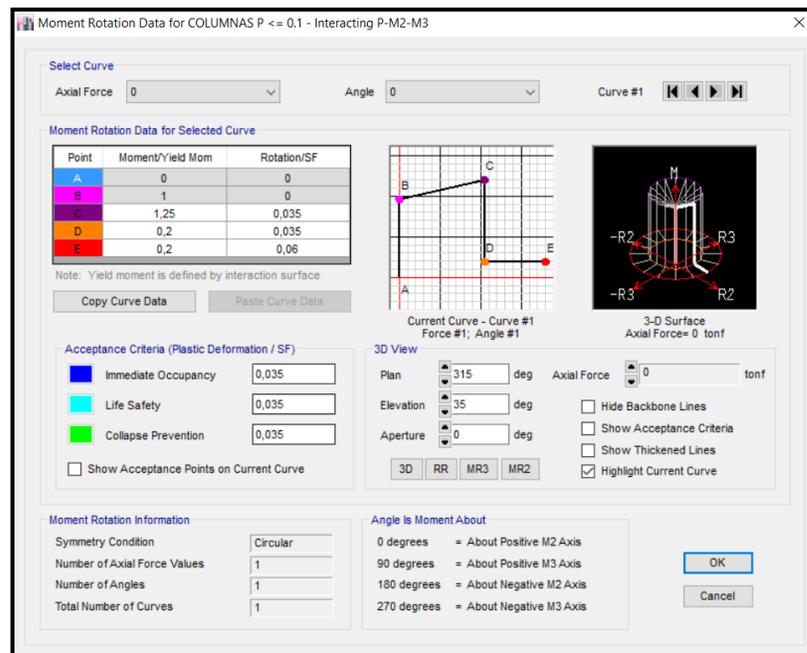
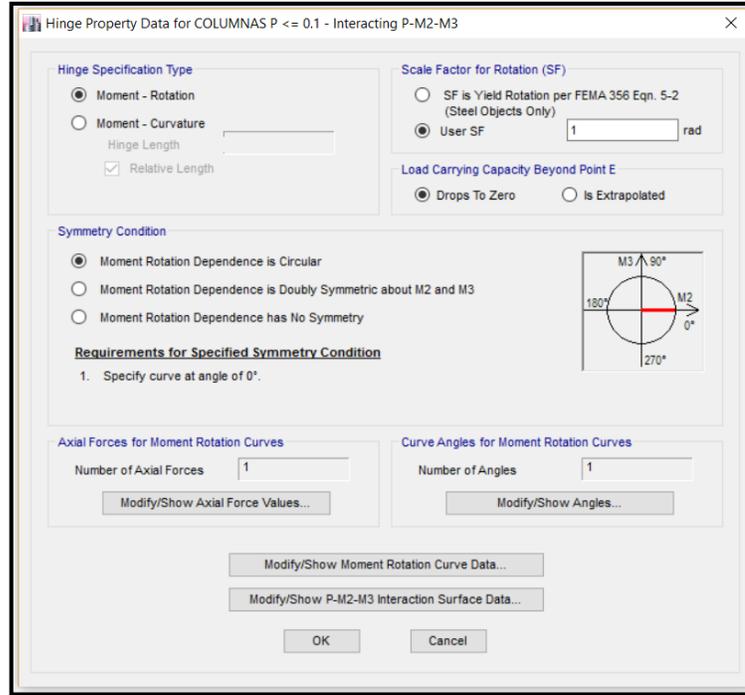
NIVEL	VIGA	V/B*D*F'C inglesas	$\frac{\rho - \rho'}{\rho_{bal}}$	Parámetros			Criterio de aceptación
				a	b	c	Ángulo de Rot. Plástica para elementos primarios (rad)
TECHO	B6	0,111	0,3	0,055	0,076	0,2	0,055
TECHO	B7	0,112	0,1	0,060	0,092		0,060
TECHO	B30	1,464	0,1				0,055
TECHO	B131	0,983	0,3	0,063	0,100		0,063
PISO 6 +28	B6	1,425	0,0	0,058	0,084		0,058
PISO 5 +24	B6	0,779	0,0	0,063	0,100		0,063
PISO 5 +24	B7	1,031	0,2	0,058	0,084		0,058
PISO 5 +24	B97	1,001	0,1	0,060	0,092		0,060
PISO 4 +20	B6	1,049	0,0	0,063	0,100		0,063
PISO 4 +20	B7	1,050	0,2	0,058	0,084		0,058
PISO 4 +20	B97	0,961	0,1	0,060	0,092		0,060
PISO 3 +16	B6	1,083	0,0	0,063	0,100		0,063
PISO 3 +16	B7	1,085	0,2	0,058	0,084		0,058
PISO 3 +16	B97	0,922	0,1	0,060	0,092		0,060
PISO 2 +12	B6	1,132	0,0	0,063	0,100		0,063
PISO 2 +12	B7	1,134	0,2	0,058	0,084		0,058
PISO 2 +12	B97	0,881	0,1	0,060	0,092		0,060
PISO 1 +8	B6	1,148	0,0	0,063	0,100		0,063
PISO 1 +8	B7	1,151	0,2	0,058	0,084		0,058
PISO 1 +8	B97	0,619	0,1	0,060	0,092		0,060

TABLA #17. Definición de rótulas plásticas para columnas del caso 2

Piso	Columna	$\frac{P}{A_g f'_c}$	$\rho = \frac{A_v}{b_w s}$	Parámetros			Criterio de aceptación
				a	b	c	Ángulo de Rot. Plástica para elementos primarios
TECHO	C7	0,2	0,01	0,032	0,054	0,18	0,032
TECHO	C8	0,1	0,01	0,035	0,060	0,20	0,035
TECHO	C9	0,2	0,01	0,032	0,054	0,18	0,032
TECHO	C19	0,1	0,01	0,035	0,060	0,20	0,035
PISO 6 +28	C7	0,0	0,01	0,035	0,060	0,20	0,035
PISO 6 +28	C8	0,0	0,01	0,035	0,060	0,20	0,035
PISO 6 +28	C9	0,0	0,01	0,035	0,060	0,20	0,035
PISO 6 +28	C19	0,1	0,01	0,035	0,060	0,20	0,035
PISO 5 +24	C7	0,1	0,01	0,035	0,060	0,20	0,035
PISO 5 +24	C8	0,0	0,01	0,035	0,060	0,20	0,035
PISO 5 +24	C9	0,1	0,01	0,035	0,060	0,20	0,035
PISO 5 +24	C19	0,1	0,01	0,035	0,060	0,20	0,035
PISO 4 +20	C7	0,1	0,01	0,035	0,060	0,20	0,035
PISO 4 +20	C8	0,0	0,01	0,035	0,060	0,20	0,035
PISO 4 +20	C9	0,1	0,01	0,035	0,060	0,20	0,035
PISO 4 +20	C19	0,2	0,01	0,032	0,054	0,18	0,032
PISO 3 +16	C7	0,1	0,01	0,035	0,060	0,20	0,035
PISO 3 +16	C8	0,0	0,01	0,035	0,060	0,20	0,035
PISO 3 +16	C9	0,1	0,01	0,035	0,060	0,20	0,035
PISO 3 +16	C19	0,2	0,01	0,032	0,054	0,18	0,032
PISO 2 +12	C7	0,2	0,01	0,032	0,054	0,18	0,032
PISO 2 +12	C8	0,0	0,01	0,035	0,060	0,20	0,035
PISO 2 +12	C9	0,2	0,01	0,032	0,054	0,18	0,032
PISO 2 +12	C19	0,2	0,01	0,032	0,054	0,18	0,032
PISO 1 +8	C7	0,2	0,01	0,032	0,054	0,18	0,032
PISO 1 +8	C9	0,2	0,01	0,032	0,054	0,18	0,032
PISO 1 +8	C19	0,2	0,01	0,032	0,054	0,18	0,032
MEZZANINA +4	C7	0,2	0,01	0,032	0,054	0,18	0,032
MEZZANINA +4	C9	0,2	0,01	0,032	0,054	0,18	0,032
MEZZANINA +4	C19	0,2	0,01	0,032	0,054	0,18	0,032

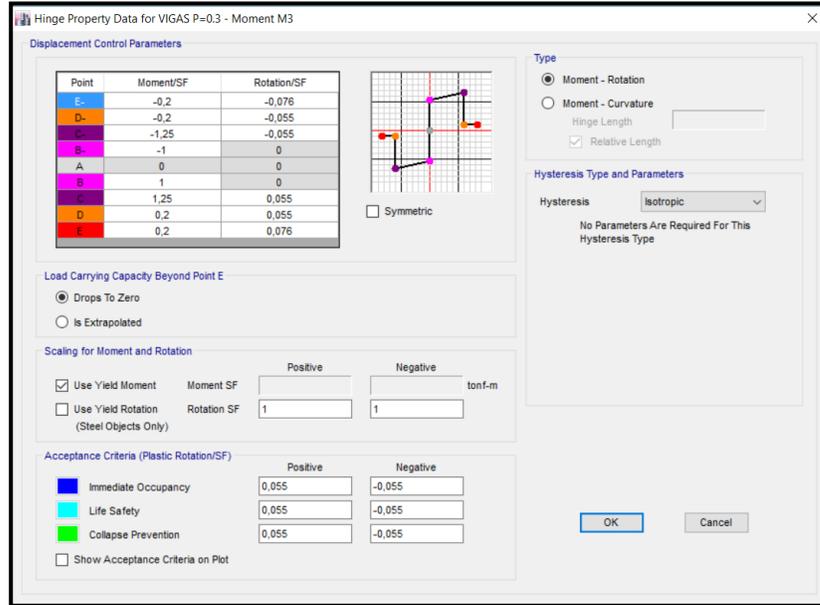
Con los valores presentados en las tablas anteriores, se procedió a asignar las rótulas en el modelo, evaluando la interacción P-M como mecanismo de falla para las columnas y el Momento para las vigas, tal como se muestra en las ilustraciones 52 y 53, respectivamente.

Ilustración 52. Definición de rótulas plásticas controladas por interacción P-M para columnas



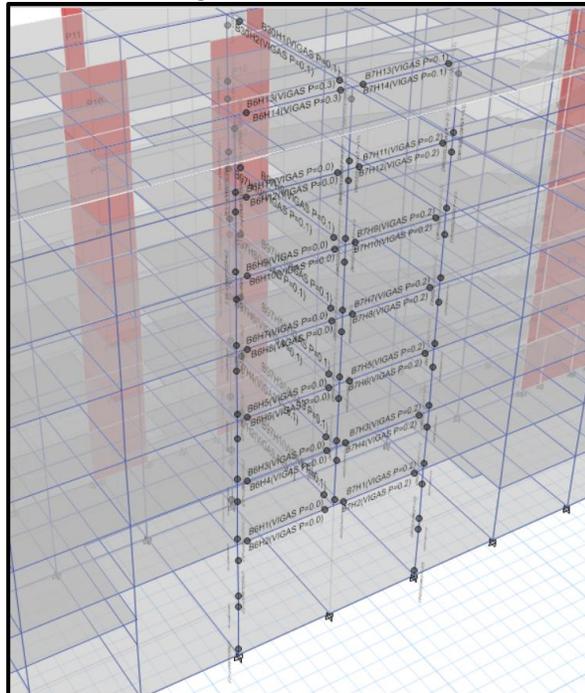
Fuente: Realizado por los autores en ETABS 2016

Ilustración 53. Definición de rótulas plásticas controladas por momento para vigas



Fuente: Realizado por los autores en ETABS 2016

Ilustración 54. Rótulas asignadas en el modelo del caso 2 de ADNL

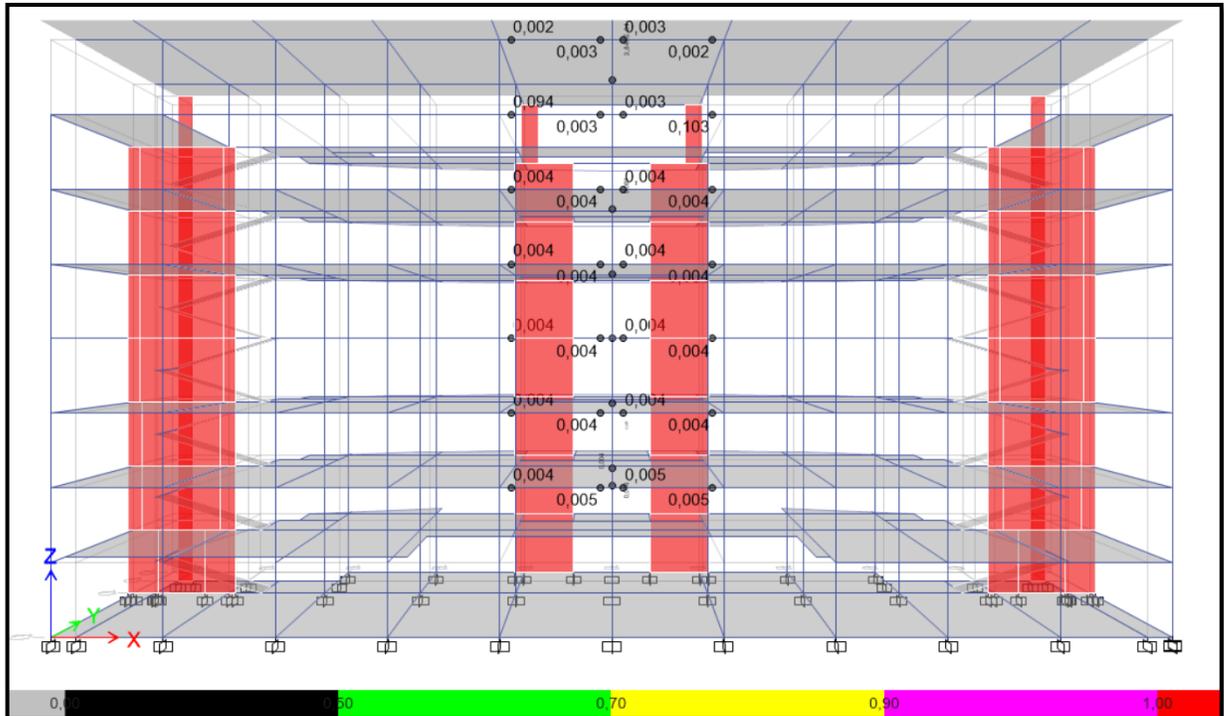


Fuente: Realizado por los autores en ETABS 2016

4.5.2.2.3 DCR para acciones controladas por deformación

Una vez corrido el análisis dinámico no lineal en el ETABS para el caso 2, se obtuvieron los siguientes valores de DCR para las vigas y columnas:

Ilustración 55. Valores de DCR para vigas y columnas del caso 2 de ADNL



Fuente: Realizado por los autores en ETABS 2016

4.5.2.2.3 Acciones controladas por fuerza en el Caso 2

Una vez corrido el análisis dinámico no lineal en el ETABS para el caso 2, se verificara que las vigas y columnas sean capaces de soportar el corte actuante.

Para el caso de las columnas se obtiene el DCR de una manera aproximada, comparando el valor de A_v/S requerido en el ETABS con el valor real de la sección, tal como se presenta a continuación:

Así mismo, en la siguiente tabla se muestra la comparación de valor de At/S requerido con el valor real de la sección.

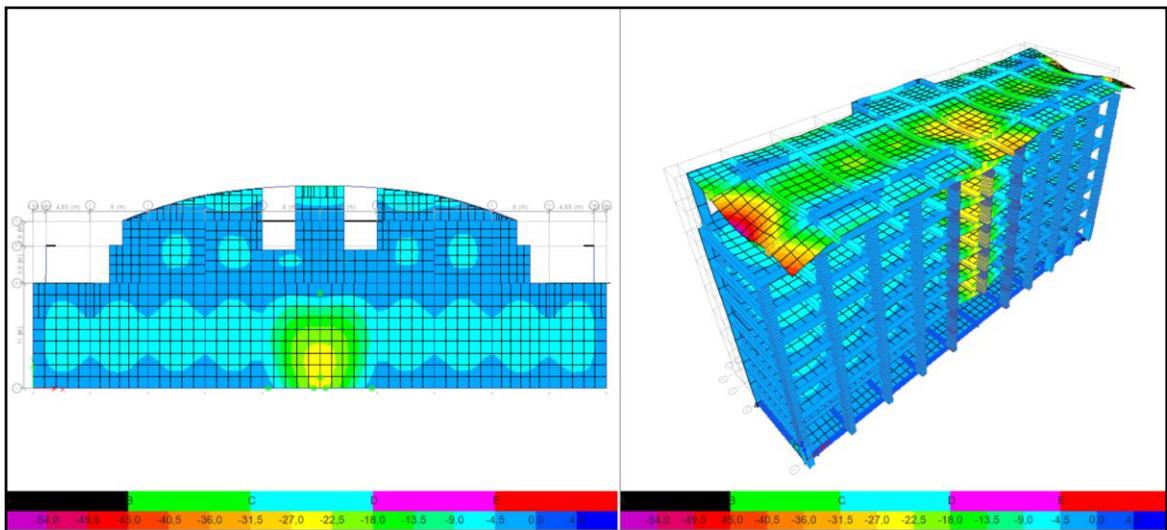
TABLA # 18. At/s requerido vs At/s real para vigas resaltadas en la ilustración 57

Nivel	Viga	$\frac{A_{total}}{Requerido} = \frac{A_v}{Requerido} + 2 \frac{A_t}{S}$ (cm ² /m) ^S	At/s Real (cm ² /m)	¿Resiste?
PISO 1 +8	B29	0,240	0,142	No
PISO 1 +8	B98	0,147	0,142	No
PISO 2 +12	B29	0,257	0,142	No
PISO 2 +12	B98	0,157	0,142	No
PISO 3 +16	B29	0,253	0,142	No
PISO 3 +16	B98	0,153	0,142	No
PISO 4 +20	B29	0,257	0,142	No
PISO 4 +20	B98	0,153	0,142	No
PISO 5 +24	B29	0,250	0,142	No
PISO 5 +24	B98	0,149	0,142	No

4.5.2.2.5 Áreas afectadas para ADNL

Para el análisis dinámico no lineal, se tienen las siguientes áreas afectadas para el caso de carga, donde se puede observar un desplazamiento vertical en el eje de la columna de 2,41cm y además un desplazamiento máximo en toda el área adyacente a la columna de 2,46 cm.

Ilustración 58. Área afectada del caso 2 para ADNL



Fuente: Realizado por los autores en ETABS 2016

Como la columna removida C-6, es una columna externa de la edificación, se verifica que el área afectada por la remoción no sea superior al 15% del área total del piso ubicado inmediatamente por encima de la columna, es decir, Piso 1, para lo cual se presenta la siguiente tabla:

TABLA #19. Área afectada del caso 2 para un ADNL

Nivel	Área Total (m ²)	Límite de Área afectada (m ²)	Área Afectada (m ²)
Piso 1 +8 m	1000	150	80

4.5.3 CASO #3 Remoción Columna C-11

Para este modelo sólo se realizará un análisis dinámico no lineal, donde las cargas debidas a acciones controladas por deformaciones y las cargas debidas a acciones controladas por fuerza, vienen dadas por la [Ecuación 11](#). Seguidamente se procedió a crear dos análisis de *Time History* tal como se hizo en el Caso 2 [apartado 4.5.2.2.1](#)

4.5.3.1 Definición de Rótulas

A continuación, se procede a definir las rótulas plásticas que serán asignadas a los elementos primarios para vigas y columnas, tal como se hizo en el Caso 2 [apartado 4.5.2.2.2](#)

TABLA #20. Definición de rótulas plásticas para vigas del Caso 3 de ADNL

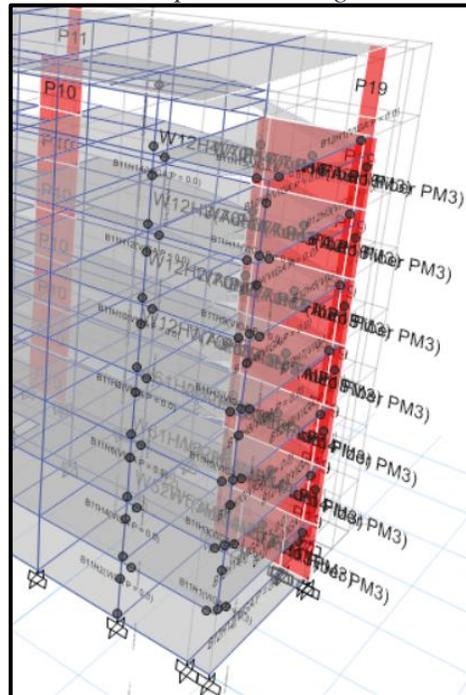
NIVEL	VIGA	V/B*D*F'C inglesas	$\frac{\rho - \rho'}{\rho_{bal}}$	Parámetros			critero de aceptacion			
				a	b	c	Angulo de Rot. Plástica para elementos primarios (rad)			
PISO 6 +28	B11	0,853	0,0	0,063	0,100	0,2	0,063			
PISO 6 +28	B12	0,358	0,0							
PISO 5 +24	B11	0,837	0,0							
PISO 5 +24	B12	0,071	0,0							
PISO 4 +20	B11	0,839	0,0							
PISO 4 +20	B12	0,064	0,0							
PISO 3 +16	B11	0,884	0,0							
PISO 3 +16	B12	0,044	0,0							
PISO 2 +12	B11	0,933	0,0							
PISO 2 +12	B12	0,012	0,0							
PISO 1 +8	B11	1,241	0,0							
PISO 1 +8	B12	0,018	0,0							
MEZZANINA +4	B11	1,265	0,3					0,055	0,076	0,0552
MEZZANINA +4	B12	0,004	0,0					0,063	0,100	0,063

TABLA #21. Definición de rótulas plásticas para columnas del Caso 3 de ADNL

Piso	Columna	$\frac{P}{A_c f'_c}$	$\rho = \frac{A_s}{b_w s}$	Parámetros			Criterio de aceptación
				a	b	c	Ángulo de Rot. Plastica para elementos primarios (rad)
TECHO	C12	0,0	0,03	0,035	0,060	0,20	0,035
PISO 6 +28	C12	0,1	0,01	0,035	0,060	0,20	0,035
PISO 6 +28	C2	0,0	0,01	0,035	0,060	0,20	0,035
PISO 5 +24	C12	0,1	0,01	0,035	0,060	0,20	0,035
PISO 5 +24	C2	0,0	0,01	0,035	0,060	0,20	0,035
PISO 4 +20	C12	0,1	0,01	0,035	0,060	0,20	0,035
PISO 4 +20	C2	0,0	0,01	0,035	0,060	0,20	0,035
PISO 3 +16	C12	0,1	0,01	0,035	0,060	0,20	0,035
PISO 3 +16	C2	0,0	0,01	0,035	0,060	0,20	0,035
PISO 2 +12	C12	0,2	0,01	0,032	0,054	0,18	0,032
PISO 2 +12	C2	0,0	0,01	0,035	0,060	0,20	0,035
PISO 1 +8	C12	0,2	0,01	0,032	0,054	0,18	0,032
PISO 1 +8	C2	0,0	0,01	0,035	0,060	0,20	0,035
MEZZANINA +4	C12	0,2	0,01	0,032	0,054	0,18	0,032

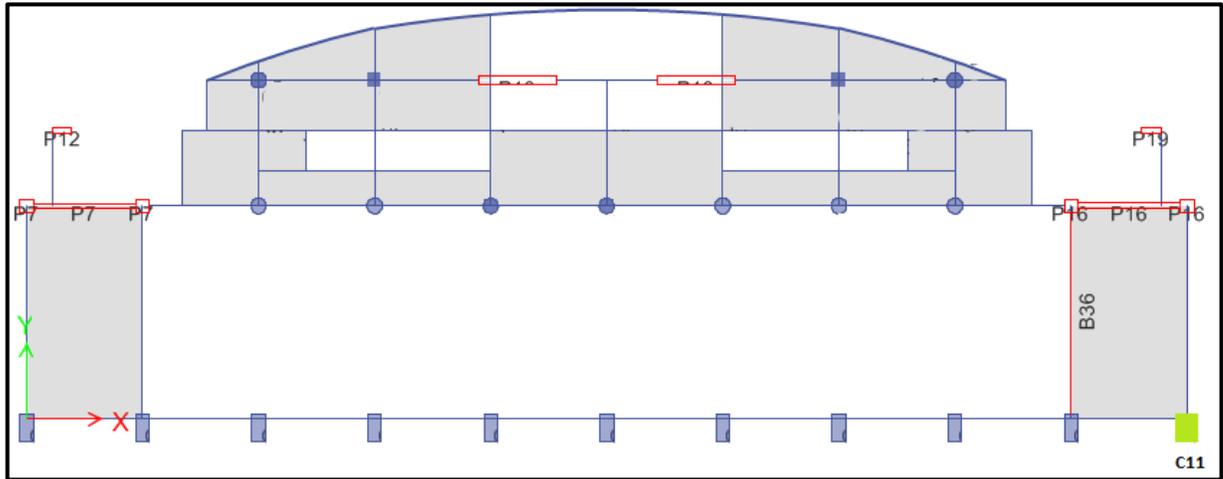
Con los valores presentados en las tablas anteriores, se procedió a asignar las rótulas en el modelo, evaluando la interacción P-M como mecanismo de falla para las columnas y el momento para las vigas.

Ilustración 59. Rótulas plásticas asignadas en el modelo 3



Fuente: Realizado por los autores en ETABS 2016

Ilustración 62. Vigas que no soportan los efectos de corte y torsión del Caso 3 de ADNL - Pórtico 10



Fuente: Realizado por los autores

Así mismo, en la siguiente tabla se muestra la comparación de A_t/s requerido con el A_t/s real que posee la sección. De igual manera, los cálculos realizados para todas las vigas adyacentes al área afectada se muestran en el documento de anexos.

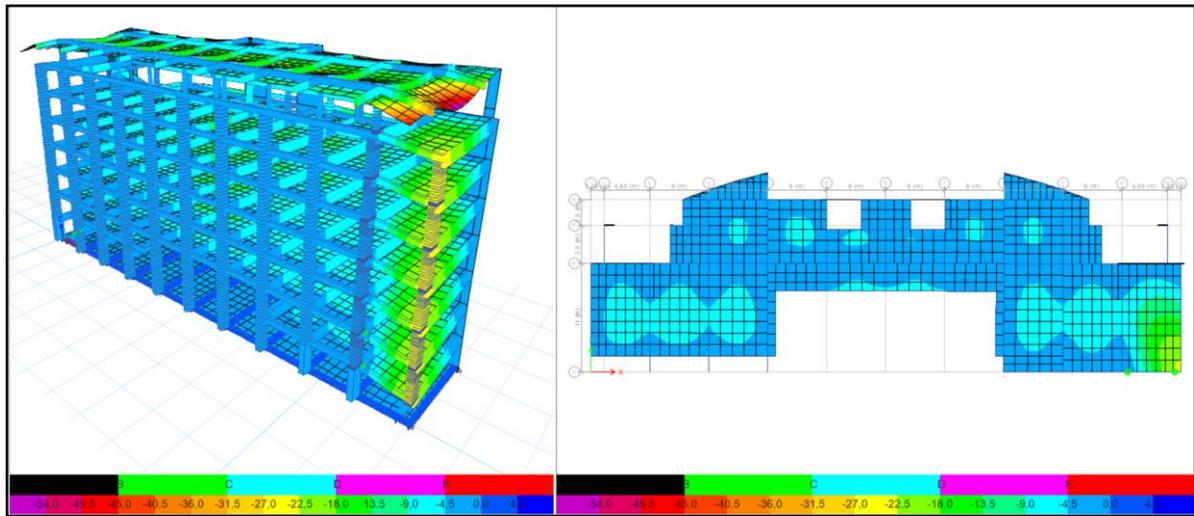
TABLA #22. *A_t/s requerido vs A_t/s real para vigas resaltadas en la ilustración 62*

Nivel	Viga	$\frac{A_{total}}{s} = \frac{A_v}{s} + 2\frac{A_t}{s}$ Requerido (cm ² /m)	A_t/s Real (cm ² /m)	¿Resiste?
PISO 6 +28	B36	0,264	0,142	No

4.5.3.1.5 Áreas afectadas

Para el análisis dinámico no lineal, se tienen las siguientes áreas afectadas para el caso de carga, donde se puede observar un desplazamiento vertical en el eje de la columna de 2,36cm siendo igual al desplazamiento máximo de toda el área adyacente a la columna.

Ilustración 63. Áreas afectadas del caso 3 para ADNL



Fuente: Realizado por los autores en ETABS 2016

Como la columna removida C-11, es una columna externa de la edificación, se verifica que el área afectada por la remoción no sea superior al 15% del área total del piso ubicado inmediatamente por encima de la columna, es decir, Mezzanina, para lo cual se presenta la siguiente tabla:

TABLA #23. Áreas afectadas del Caso 3 para ADNL

Nivel	Área Total (m ²)	Límite de Área afectada (m ²)	Área Afectada (m ²)
MEZZANINA +4m	700	105	73

4.5.4 CASO #4 Remoción Columna B-6

Para este modelo sólo se realizará un análisis dinámico no lineal, donde las cargas debidas a acciones controladas por deformaciones y las cargas debidas a acciones controladas por fuerza, vienen dadas por la [Ecuación 11](#). Seguidamente se procedió a crear dos análisis de *Time History* tal como se hizo en el Caso 2 [apartado 4.5.2.2.1](#)

4.5.4.1 Definición de Rótulas

A continuación se procede a definir las rótulas plásticas que serán asignadas a los elementos primarios para vigas y columnas, tal como se hizo en el Caso 2 [apartado 4.5.2.2.2](#).

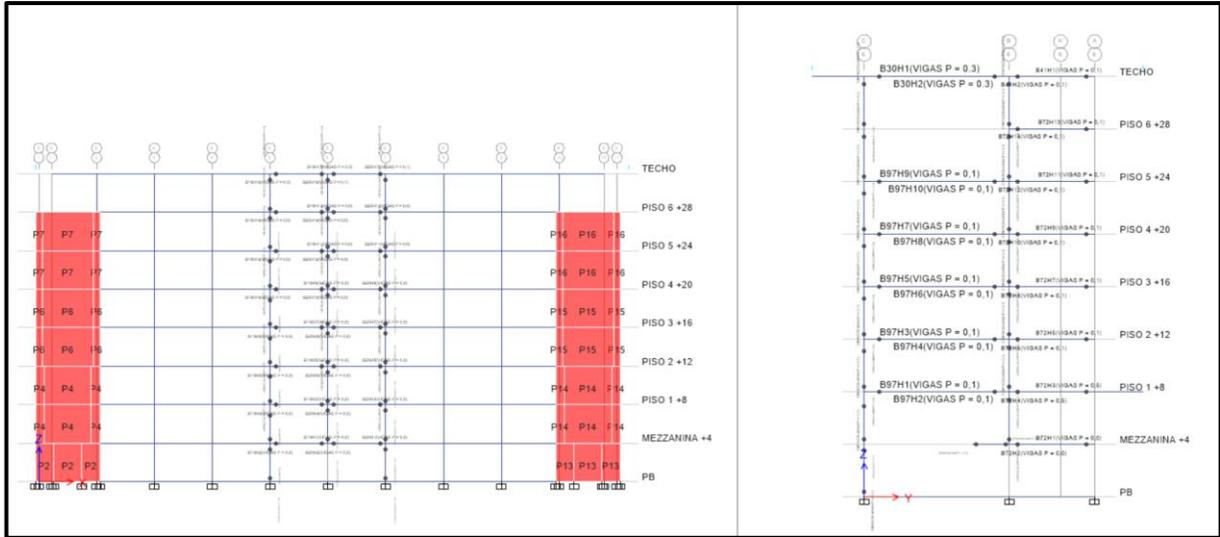
TABLA #24. Definición de rótulas plásticas para vigas del Caso 4 de ADNL

NIVEL	VIGA	V/B*D*F'C inglesas	$\frac{\rho - \rho'}{\rho_{bal}}$	Parámetros			Criterio de aceptación Ángulo de Rot. Plástica para elementos primarios (rad)
				a	b	c	
TECHO	B19	1,077	0,3	0,0552	0,076	0,2	0,0552
TECHO	B20	1,082	0,1	0,06	0,092		0,06
TECHO	B30	1,984	0,3	0,0552	0,076		0,0552
TECHO	B41	1,460	0,1	0,06	0,092		0,06
PISO 6 +28	B19	0,390	0,0	0,063	0,1		0,063
PISO 6 +28	B20	0,400	0,0				
PISO 6 +28	B72	1,403	0,1	0,06	0,092		0,06
PISO 5 +24	B19	0,596	0,0	0,063	0,1		0,063
PISO 5 +24	B20	0,576	0,0				
PISO 5 +24	B72	1,859	0,1	0,06	0,092		0,06
PISO 5 +24	B97	1,039	0,1	0,06	0,092		0,06
PISO 4 +20	B19	0,596	0,0	0,063	0,1		0,063
PISO 4 +20	B20	0,578	0,0				
PISO 4 +20	B72	1,849	0,1	0,06	0,092		0,06
PISO 4 +20	B97	1,034	0,1	0,06	0,092		0,06
PISO 3 +16	B19	0,592	0,0	0,063	0,1		0,063
PISO 3 +16	B20	0,575	0,0				
PISO 3 +16	B72	1,865	0,1	0,06	0,092		0,06
PISO 3 +16	B97	1,042	0,1	0,06	0,092		0,06
PISO 2 +12	B19	0,596	0,0	0,063	0,1		0,063
PISO 2 +12	B20	0,576	0,0				
PISO 2 +12	B72	1,892	0,1	0,06	0,092		0,06
PISO 2 +12	B97	1,058	0,1	0,06	0,092		0,06
PISO 1 +8	B19	0,568	0,0	0,063	0,1		0,063
PISO 1 +8	B20	0,542	0,0				
PISO 1 +8	B72	1,617	0,5	0,05	0,06		0,05
PISO 1 +8	B97	0,760	0,1	0,06	0,092		0,06
MEZZANINA +4	B19	0,562	0,0	0,063	0,1		0,063
MEZZANINA +4	B20	0,533	0,0				
MEZZANINA +4	B72	1,960	0,0				
MEZZANINA +4	B79	1,520	0,3			0,0552	

TABLA #25. Definición de rótulas plásticas para columnas del Caso 4 de ADNL

Piso	Columna	$\frac{P \cdot b}{A_s f_c'}$	$\rho = \frac{A_s}{b_w s}$	Parámetros			Criterio de aceptación
				a	b	c	Ángulo de Rot. Plástica para elementos primarios (rad)
TECHO	C8	0,3	0,01	0,0274	0,0448	0,1393	0,0274
TECHO	C15	0,1	0,01	0,035	0,06	0,2	0,035
TECHO	C18	0,1	0,01				
TECHO	C19	0,0	0,01				
PISO 6 +28	C8	0,0	0,01				
PISO 6 +28	C15	0,2	0,01	0,032	0,054	0,176	0,032
PISO 6 +28	C18	0,2	0,01	0,035	0,060	0,20	0,035
PISO 6 +28	C19	0,0	0,01				
PISO 5 +24	C8	0,1	0,01				
PISO 5 +24	C15	0,3	0,01	0,0274	0,0448	0,1393	0,0274
PISO 5 +24	C18	0,3	0,01	0,035	0,060	0,20	0,035
PISO 5 +24	C19	0,0	0,01				
PISO 4 +20	C8	0,1	0,01				
PISO 4 +20	C15	0,5	0,01	0,015	0,019	0,037	0,015
PISO 4 +20	C18	0,4	0,01	0,018	0,026	0,064	0,018
PISO 4 +20	C19	0,0	0,01	0,035	0,060	0,20	0,035
PISO 3 +16	C8	0,1	0,01				
PISO 3 +16	C15	0,4	0,01				
PISO 3 +16	C18	0,4	0,01	0,018	0,026	0,064	0,018
PISO 3 +16	C19	0,0	0,01	0,035	0,060	0,20	0,035
PISO 2 +12	C8	0,1	0,01				
PISO 2 +12	C15	0,5	0,01				
PISO 2 +12	C18	0,5	0,01	0,015	0,019	0,037	0,015
PISO 2 +12	C19	0,0	0,01	0,035	0,060	0,20	0,035
PISO 1 +8	C8	0,1	0,01				
PISO 1 +8	C15	0,5	0,01				
PISO 1 +8	C18	0,5	0,01	0,015	0,019	0,037	0,015
PISO 1 +8	C19	0,0	0,01	0,035	0,060	0,20	0,035
MEZZANINA +4	C8	0,1	0,01				
MEZZANINA +4	C15	0,5	0,01				
MEZZANINA +4	C18	0,5	0,01	0,015	0,019	0,037	0,015

Ilustración 64. Rótulas plásticas asignadas en el modelo del Caso 4 para ADNL

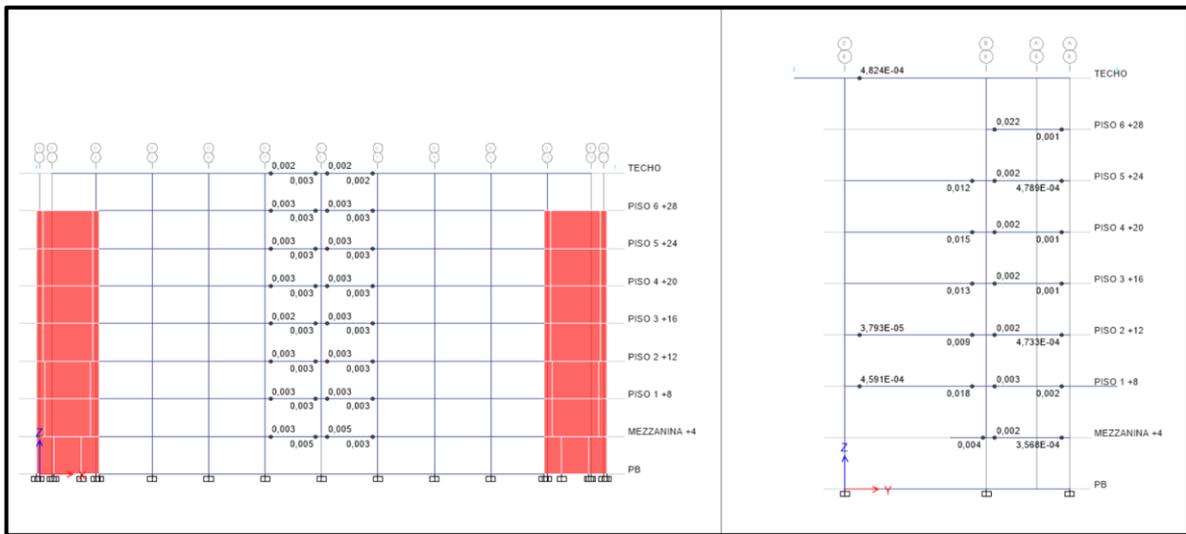


Fuente: Realizado por los autores en ETABS 2016

4.5.4.2 DCR para acciones controladas por deformación

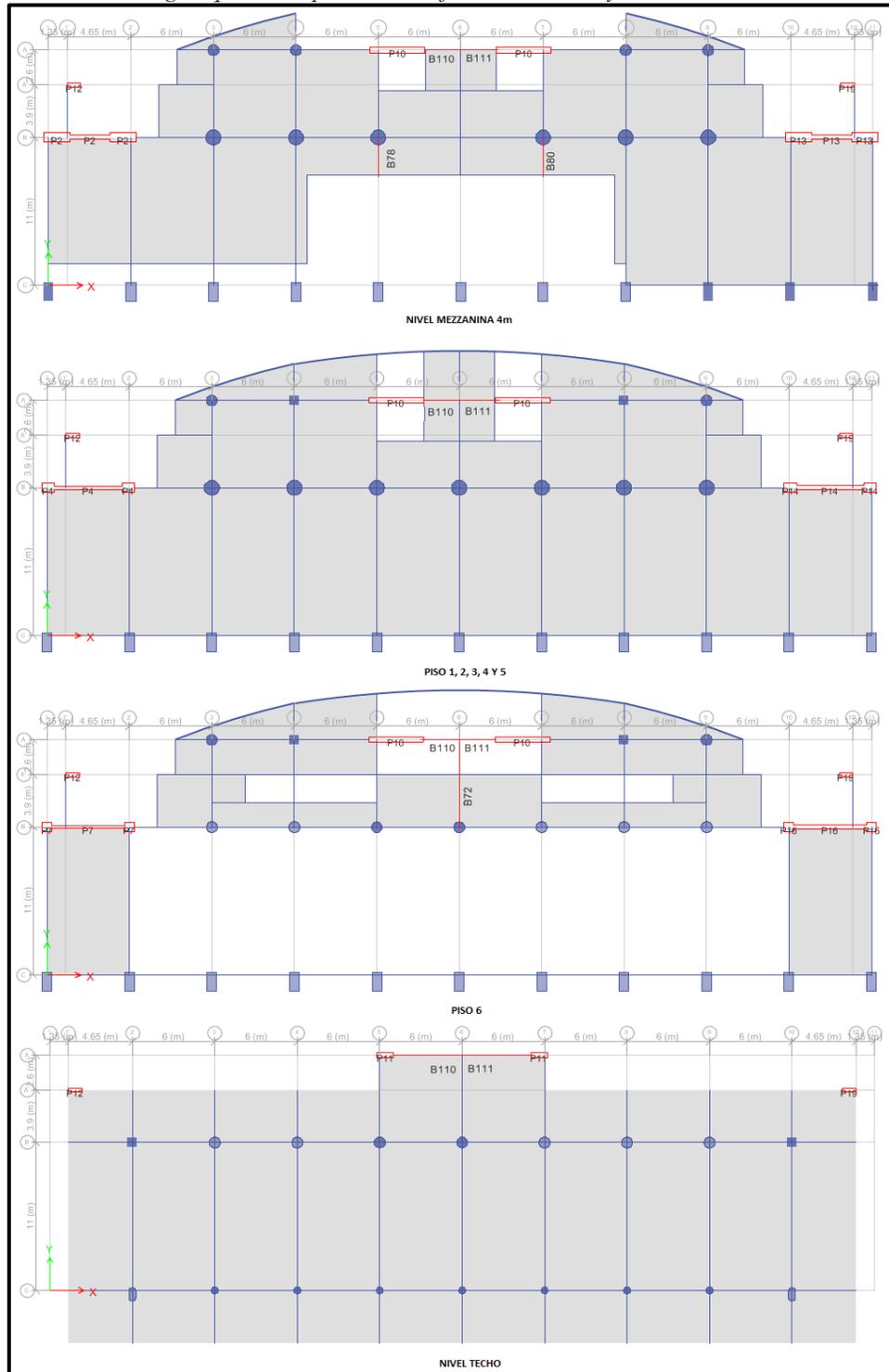
Una vez corrido el análisis dinámico no lineal en el ETABS para el Caso 4, se obtuvieron los siguientes valores de DCR para las vigas y columnas:

Ilustración 65. Valores de DCR del Caso 4 para ADNL



Fuente: Realizado por los autores en ETABS 2016

Ilustración 67. Vigas que no soportan los efectos de corte y torsión del Caso 4 de ADNL



Fuente: Realizado por los autores en ETABS 2016

Así mismo, en la siguiente tabla se muestra la comparación de At/s requerido con el At/s para las vigas que no son capaces de resistir la acción conjunta del corte y la torsión. De igual manera, los cálculos realizados para todas las vigas adyacentes al área afectada se muestran en el documento de anexos,

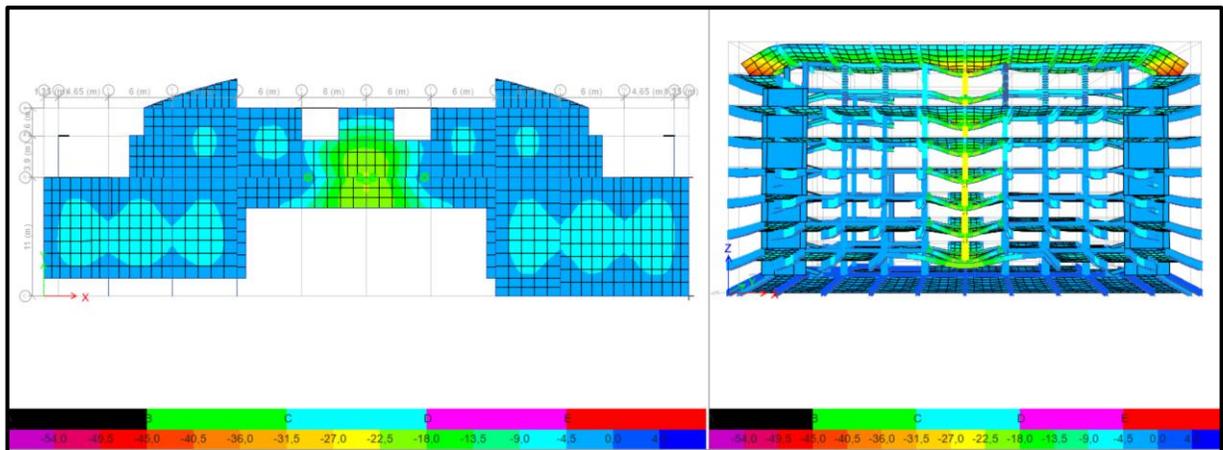
TABLA #26. At/s requerido vs At/s real para vigas resaltadas en la ilustración 67

Nivel	Viga	$\frac{A_{total}}{Requerido} = \frac{A_v}{Requerido} + 2\frac{A_t}{Requerido}$ (cm ² /m) ²	At/s Real (cm ² /m)	¿Resiste?
MEZZANINA +4	B78	0,152	0,142	No
MEZZANINA +4	B80	0,197	0,142	No
MEZZANINA +4	B110	0,381	0,142	No
MEZZANINA +4	B111	0,374	0,142	No
PISO 1 +8	B110	0,238	0,142	No
PISO 1 +8	B111	0,229	0,142	No
PISO 2 +12	B110	0,386	0,142	No
PISO 2 +12	B111	0,380	0,142	No
PISO 3 +16	B110	0,391	0,142	No
PISO 3 +16	B111	0,386	0,142	No
PISO 4 +20	B110	0,390	0,142	No
PISO 4 +20	B111	0,385	0,142	No
PISO 5 +24	B110	0,384	0,142	No
PISO 5 +24	B111	0,379	0,142	No
PISO 6 +28	B72	0,155	0,142	No
PISO 6 +28	B110	0,224	0,142	No
PISO 6 +28	B111	0,222	0,142	No
TECHO	B85	0,155	0,142	No
TECHO	B86	0,160	0,142	No

4.5.4.4 Áreas afectadas

Para el análisis dinámico no lineal, se tienen las siguientes áreas afectadas para el caso de carga, donde se puede observar que el desplazamiento vertical en el eje de la columna removida es el desplazamiento máximo de toda el área con un de 2,30cm.

Ilustración 68. Área afectada del Caso 4 para ADNL



Fuente: Realizado por los autores en ETABS 2016

Como la columna removida B-6 es una columna interna de la edificación, se verifica que el área afectada por la remoción no sea superior al 30% del área total del piso ubicado inmediatamente por encima de la columna, es decir, Mezzanina, para lo cual se presenta la siguiente tabla:

TABLA #27. Área afectada del Caso 4 para ADNL

Nivel	Área Total (m ²)	Límite de Área afectada (m ²)	Área Afectada (m ²)
MEZZANINA +4m	700	210	51

4.5.5 CASO #5 Remoción Columna B-8

Para este modelo sólo se realizará un análisis dinámico no lineal, donde las cargas debidas a acciones controladas por deformaciones y las cargas debidas a acciones controladas por fuerza, vienen dadas por la [Ecuación 11](#). Seguidamente se procedió a crear dos análisis de *Time History* tal como se hizo en el Caso 2 [apartado 4.5.2.2.1](#)

4.5.5.1 Definición de Rótulas

A continuación se procede a definir las rótulas plásticas que serán asignadas a los elementos primarios para vigas y columnas, tal como se hizo en el Caso 2 [apartado 4.5.2.2.2](#)

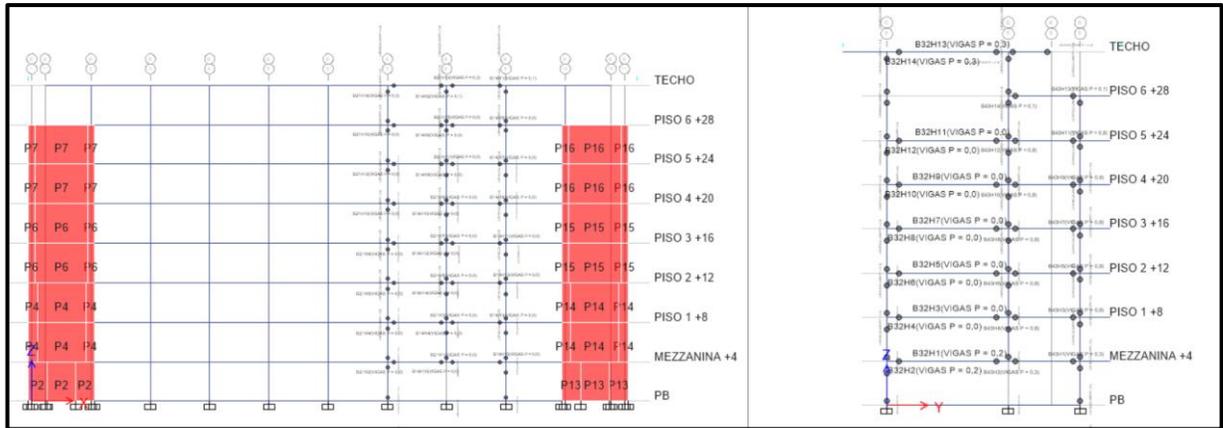
TABLA #28. Definición de rótulas plásticas para vigas del Caso 5 de ADNL

NIVEL	VIGA	V/B*D*F'C	$\rho - \rho'$ ρ_{bal}	Parámetros			Criterio de aceptación
		inglesas		a	b	c	Ángulo de Rot. Plástica para elementos primarios (rad)
TECHO	B21	0,062	0,3	0,055	0,076	0,2	0,055
TECHO	B14	0,106	0,1	0,060	0,092		0,060
TECHO	B32	1,477	0,3	0,055	0,076		0,055
TECHO	B121	0,938	0,1	0,060	0,092		0,060
PISO 6 +28	B21	0,928	0,0	0,063	0,100		0,063
PISO 6 +28	B14	0,864	0,0				0,060
PISO 6 +28	B43	0,491	0,1	0,060	0,092		0,060
PISO 5 +24	B21	0,530	0,0	0,063	0,100		0,063
PISO 5 +24	B14	0,489	0,0				0,050
PISO 5 +24	B32	0,826	-0,1	0,063	0,100		0,063
PISO 5 +24	B43	0,082	0,8	0,050	0,060		0,050
PISO 4 +20	B21	0,577	0,0	0,063	0,100		0,063
PISO 4 +20	B14	0,540	0,0				0,050
PISO 4 +20	B32	0,809	-0,1	0,063	0,100		0,063
PISO 4 +20	B43	0,027	0,8	0,050	0,060		0,050
PISO 3 +16	B21	0,676	0,0	0,063	0,100		0,063
PISO 3 +16	B14	0,641	0,0				0,050
PISO 3 +16	B32	0,769	-0,1	0,063	0,100		0,063
PISO 3 +16	B43	0,066	0,8	0,050	0,060		0,050
PISO 2 +12	B21	0,753	0,0	0,063	0,100		0,063
PISO 2 +12	B14	0,721	0,0				0,050
PISO 2 +12	B32	0,726	-0,1	0,063	0,100		0,063
PISO 2 +12	B43	0,135	0,8	0,050	0,060		0,050
PISO 1 +8	B21	0,847	0,0	0,063	0,100		0,063
PISO 1 +8	B14	0,819	0,0				0,050
PISO 1 +8	B32	0,643	-0,1	0,063	0,100		0,063
PISO 1 +8	B43	0,213	0,8	0,050	0,060		0,050
MEZZANINA +4	B21	0,928	0,0	0,063	0,100		0,063
MEZZANINA +4	B14	0,882	0,0			0,050	0,084
MEZZANINA +4	B32	0,261	0,2	0,050	0,084	0,050	
MEZZANINA +4	B43	0,239	0,3	0,056	0,076	0,056	

TABLA #29. Definición de rótulas plásticas para columnas del Caso 5 de ADNL

Piso	Columna	$\frac{P}{A_s f_c}$	$\rho = \frac{A_s}{b_w s}$	Parámetros			Criterio de aceptación
				a	b	c	Ángulo de Rot. Plástica para elementos primarios (rad)
TECHO	C10	0,3	0,01	0,027	0,045	0,139	0,027
TECHO	C15	0,1	0,01	0,035	0,060	0,20	0,035
TECHO	C16	0,0	0,01				0,000
TECHO	C17	0,1	0,01				0,000
PISO 6 +28	C10	0,0	0,01				0,000
PISO 6 +28	C15	0,2	0,01				0,031
PISO 6 +28	C16	0,0	0,01	0,035	0,060	0,20	0,035
PISO 6 +28	C17	0,2	0,01	0,035	0,20	0,006	0,035
PISO 6 +28	C23	0,0	0,01				0,000
PISO 5 +24	C10	0,1	0,01				0,000
PISO 5 +24	C15	0,3	0,01	0,027	0,045	0,139	0,027
PISO 5 +24	C16	0,0	0,01	0,035	0,20	0,006	0,035
PISO 5 +24	C17	0,3	0,01				0,000
PISO 5 +24	C23	0,1	0,01	0,035	0,060	0,20	0,035
PISO 4 +20	C10	0,1	0,01				0,000
PISO 4 +20	C15	0,4	0,01				0,035
PISO 4 +20	C16	0,0	0,01	0,000			
PISO 4 +20	C17	0,4	0,01	0,018	0,026	0,064	
PISO 4 +20	C23	0,1	0,01	0,035	0,060	0,20	0,035
PISO 3 +16	C10	0,1	0,01				0,000
PISO 3 +16	C15	0,4	0,01	0,018	0,026	0,064	0,018
PISO 3 +16	C16	0,0	0,01	0,035	0,060	0,20	0,035
PISO 3 +16	C17	0,4	0,01	0,018	0,026	0,064	0,018
PISO 3 +16	C23	0,2	0,01	0,035	0,20	0,011	0,035
PISO 2 +12	C10	0,1	0,01				0,000
PISO 2 +12	C15	0,5	0,01	0,015	0,019	0,037	0,015
PISO 2 +12	C16	0,0	0,01	0,035	0,060	0,20	0,035
PISO 2 +12	C17	0,5	0,01	0,035	0,20	0,007	0,035
PISO 2 +12	C23	0,2	0,01				0,000
PISO 1 +8	C10	0,1	0,01	0,035	0,060	0,20	0,035
PISO 1 +8	C15	0,5	0,01	0,015	0,019	0,037	0,015
PISO 1 +8	C16	0,0	0,01	0,035	0,060	0,20	0,035
PISO 1 +8	C17	0,4	0,01	0,018	0,026	0,064	0,018
PISO 1 +8	C23	0,3	0,01	0,027	0,045	0,139	0,027
MEZZANINA +4	C10	0,2	0,01	0,031	0,052	0,167	0,031
MEZZANINA +4	C15	0,5	0,01	0,015	0,019	0,037	0,015
MEZZANINA +4	C17	0,5	0,01	0,015	0,019	0,037	0,015
MEZZANINA +4	C23	0,6	0,01	0,01	0,01	0	0,010

Ilustración 69. Rótulas plásticas asignadas en el modelo del Caso 5 para ADNL

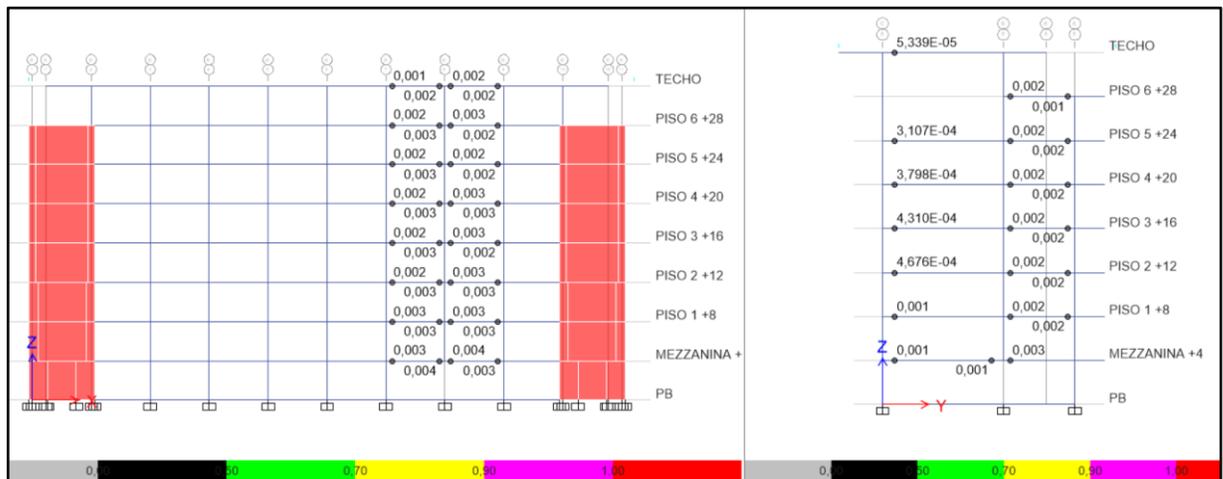


Fuente: Realizado por los autores en ETABS 2016

4.5.5.2 DCR para acciones controladas por deformación

Una vez corrido el análisis dinámico no lineal en el ETABS para el Caso 5, se obtuvieron los siguientes valores de DCR para las vigas y columnas:

Ilustración 70. Valores de DCR del caso 5 para ADNL



Fuente: Realizado por los autores en ETABS 2016

4.5.5.3 DCR para acciones controladas por fuerza

Una vez corrido el análisis dinámico no lineal en el ETABS para el caso 5, se verificara que las vigas y columnas sean capaces de soportar el corte actuante.

Para el caso de las columnas se obtiene el DCR de una manera aproximada, comparando el valor de Av/S requerido en el ETABS con el valor real de la sección, tal como se presenta a continuación

Ilustración 71. Valores de Av/S requeridos por el ETABS del Caso 5 para ADNL

Floor	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z		
TECHO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
PISO 6 +28	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
PISO 5 +24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
PISO 4 +20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
PISO 3 +16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
PISO 2 +12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
PISO 1 +8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MEZZANINA +4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
PB	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Fuente: Realizado por los autores en ETABS 2016

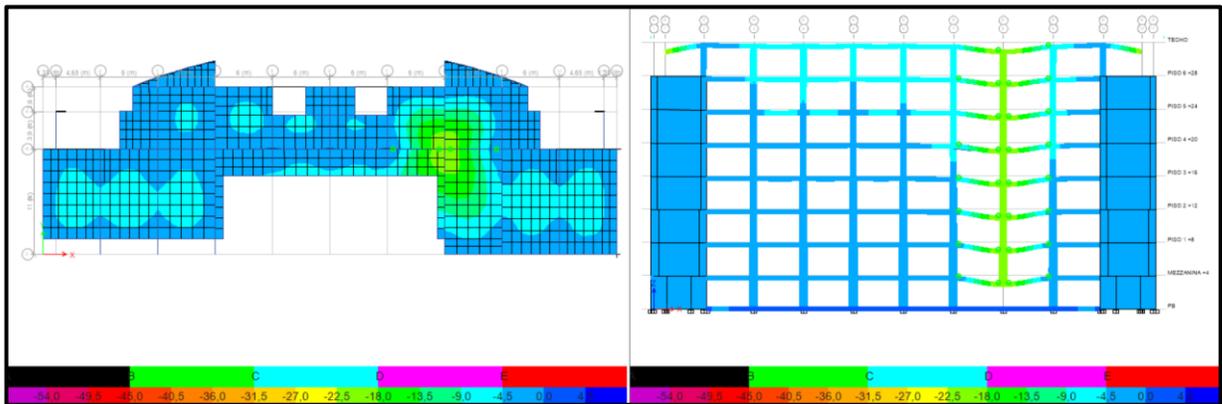
De manera que para la columna resaltada C-16 se tiene un Av/S real de 67,70 cm²/m valor que resulta bastante mayor al requerido de 9,21 cm²/m.

Mientras que en el caso de las vigas se presenta la siguiente ilustración, donde se resalta el nombre de aquellas vigas que no fueron capaces de soportar la acción conjunta del corte y torsión generada por la remoción de la columna B-8

4.5.5.4 Áreas afectadas

Para el análisis dinámico no lineal, se tienen las siguientes áreas afectadas para el caso de carga, donde se puede observar que el desplazamiento vertical en el eje de la columna removida es el desplazamiento máximo de toda el área con un de 2,07cm.

Ilustración 73. Área afectada del caso 5 para ADNL



Fuente: Realizado por los autores en ETABS 2016

Como la columna removida B-8 es una columna interna de la edificación, se verifica que el área afectada por la remoción no sea superior al 30% del área total del piso ubicado inmediatamente por encima de la columna, es decir, Mezzanina, para lo cual se presenta la siguiente tabla:

TABLA #31. Área afectada del Caso 5

Nivel	Área Total (m ²)	Límite de Área afectada (m ²)	Área Afectada (m ²)
MEZZANINA +4m	700	210	73

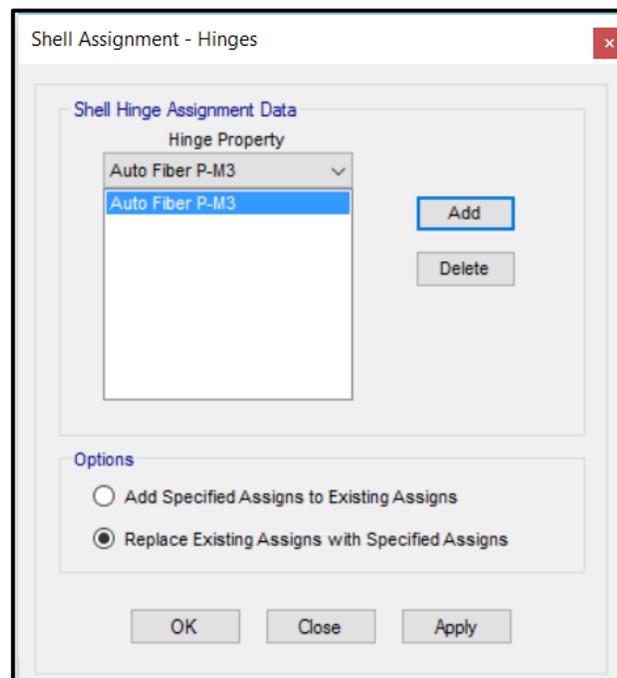
4.5.6 CASO #6 Remoción de Muro de Corte B-1-2

Para este modelo sólo se realizará un análisis dinámico no lineal, donde las cargas debidas a acciones controladas por deformaciones y las cargas debidas a acciones controladas por fuerza, vienen dadas por la [Ecuación 11](#). Seguidamente se procedió a crear dos análisis de *Time History* tal como se hizo en el Caso 2 [apartado 4.5.2.2.1](#)

4.5.6.1 Definición de Rótulas

Tal como se hizo en el Caso 2 [apartado 4.5.2.2.2](#), será necesario definir las rótulas plásticas que serán asignadas a los elementos primarios para vigas y columnas, haciendo uso de las Tablas [4](#) y [5](#) respectivamente, además, para este modelo también es necesario capturar el comportamiento no lineal producido por la interacción P-M de los muros de corte para lo cual se definirán rótulas plásticas por fibra tal como se muestra a continuación:

Ilustración 74. Definición de rótulas plásticas por fibra para muros del Caso 6 de ADNL



Fuente: Realizado por los autores en ETABS 2016

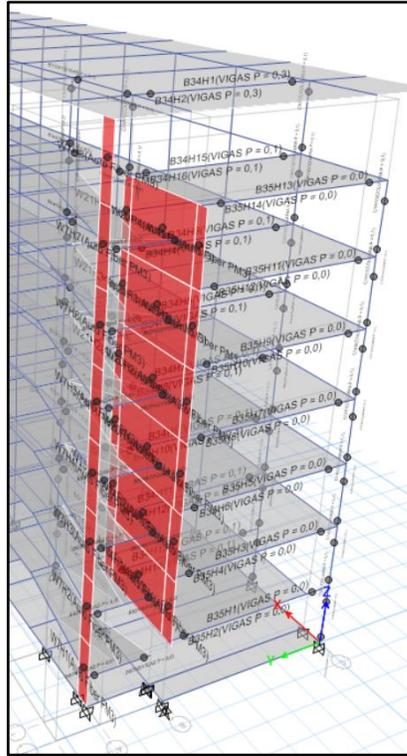
TABLA #32. Definición de rótulas plásticas para vigas del Caso 6 de ADNL

NIVEL	VIGA	V/B*D*F'c inglesas	$\frac{\rho - \rho'}{\rho_{bal}}$	Parámetros			Criterio de aceptación Ángulo de Rot. Plástica para elementos primarios (rad)
				a	b	c	
TECHO	B34	1,972	0,3	0,055	0,076	0,2	0,055
TECHO	B115	0,733	0,1	0,060	0,092		0,060
PISO 6 +28	B1	1,378	0,2	0,050	0,084		0,050
PISO 6 +28	B34	0,765	0,1	0,060	0,092		0,060
PISO 6 +28	B35	0,726	0,0	0,063	0,100		0,063
PISO 6 +28	B82	0,166	0,0				
PISO 5 +24	B1	0,922	0,2	0,050	0,084		0,050
PISO 5 +24	B34	1,280	0,1	0,060	0,092		0,060
PISO 5 +24	B35	0,671	0,0	0,063	0,100		0,063
PISO 5 +24	B82	0,108	0,0				
PISO 4 +20	B1	1,009	0,2	0,050	0,084		0,050
PISO 4 +20	B34	1,256	0,1	0,060	0,092		0,060
PISO 4 +20	B35	0,630	0,0	0,063	0,100		0,063
PISO 4 +20	B82	0,093	0,0				
PISO 3 +16	B1	1,075	0,2	0,050	0,084		0,050
PISO 3 +16	B34	1,199	0,1	0,060	0,092		0,060
PISO 3 +16	B35	0,577	0,0	0,063	0,100		0,063
PISO 3 +16	B82	0,060	0,0				
PISO 2 +12	B1	1,094	0,2	0,050	0,084		0,050
PISO 2 +12	B34	1,143	0,1	0,060	0,092		0,060
PISO 2 +12	B35	0,521	0,0	0,063	0,100		0,063
PISO 2 +12	B82	0,018	0,0				
PISO 1 +8	B1	1,102	0,2	0,050	0,084		0,050
PISO 1 +8	B34	1,091	0,1	0,060	0,092		0,060
PISO 1 +8	B35	0,451	0,0	0,063	0,100		0,063
PISO 1 +8	B82	0,101	0,0				
MEZZANINA +4	B1	1,220	0,2	0,050	0,084		0,050
MEZZANINA +4	B34	1,004	0,1	0,060	0,092		0,060
MEZZANINA +4	B35	0,477	0,0	0,063	0,100		0,063
MEZZANINA +4	B82	0,236	0,0				

TABLA #33. Definición de rótulas plásticas para columnas del Caso 6 de ADNL

Piso	Columna	$\frac{P}{A_c f'_c}$	$\rho = \frac{A_s}{b_w s}$	Parámetros			Criterio de aceptación Ángulo de Rot. Plástica para elementos primarios (rad)
				a	b	c	
TECHO	C4	0,1	0,03	0,035	0,06	0,2	0,035
TECHO	C13	0,1	0,01				
TECHO	C24	0,0	0,01				
PISO 6 +28	C1	0,0	0,01				
PISO 6 +28	C4	0,1	0,01				
PISO 6 +28	C13	0,2	0,01	0,031	0,05	0,17	0,031
PISO 5 +24	C1	0,0	0,01	0,035	0,06	0,2	0,035
PISO 5 +24	C4	0,1	0,01				
PISO 5 +24	C13	0,3	0,01	0,027	0,045	0,14	0,027
PISO 4 +20	C1	0,1	0,01	0,035	0,06	0,2	0,035
PISO 4 +20	C4	0,1	0,01				
PISO 4 +20	C13	0,4	0,01	0,018	0,026	0,064	0,018
PISO 3 +16	C1	0,1	0,01	0,035	0,06	0,2	0,035
PISO 3 +16	C4	0,1	0,01				
PISO 3 +16	C13	0,4	0,01	0,018	0,026	0,064	0,018
PISO 2 +12	C1	0,1	0,01	0,035	0,06	0,2	0,035
PISO 2 +12	C4	0,1	0,01				
PISO 2 +12	C13	0,5	0,01	0,015	0,019	0,037	0,015
PISO 1 +8	C1	0,1	0,01	0,035	0,06	0,2	0,035
PISO 1 +8	C4	0,2	0,01	0,031	0,05	0,17	0,031
PISO 1 +8	C13	0,5	0,01	0,015	0,019	0,037	0,015
MEZZANINA +4	C1	0,1	0,01	0,035	0,06	0,2	0,035
MEZZANINA +4	C4	0,2	0,01	0,031	0,05	0,17	0,031
MEZZANINA +4	C13	0,5	0,01	0,015	0,019	0,037	0,015

Ilustración 75. Rótulas plásticas asignadas en el modelo del Caso 6 para ADNL

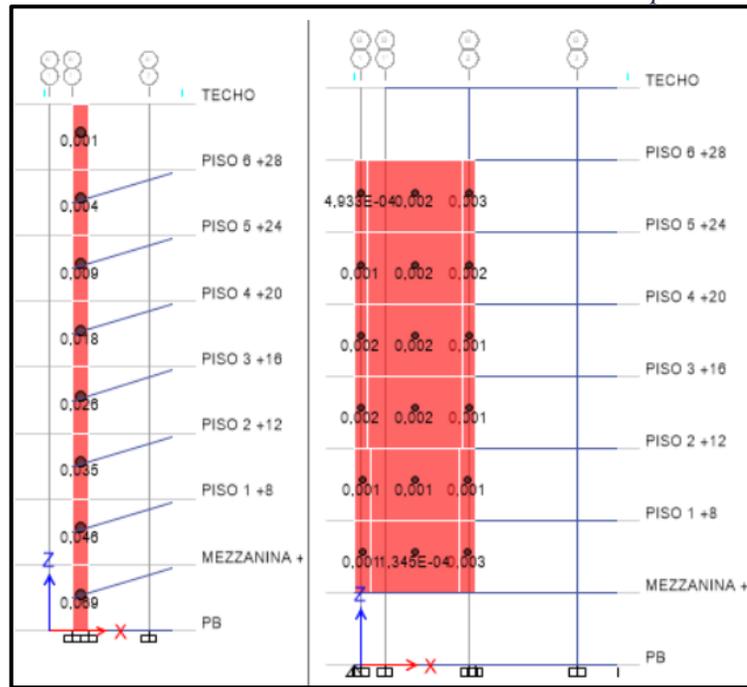


Fuente: Realizado por los autores en ETABS 2016

4.5.6.2 DCR para acciones controladas por deformación

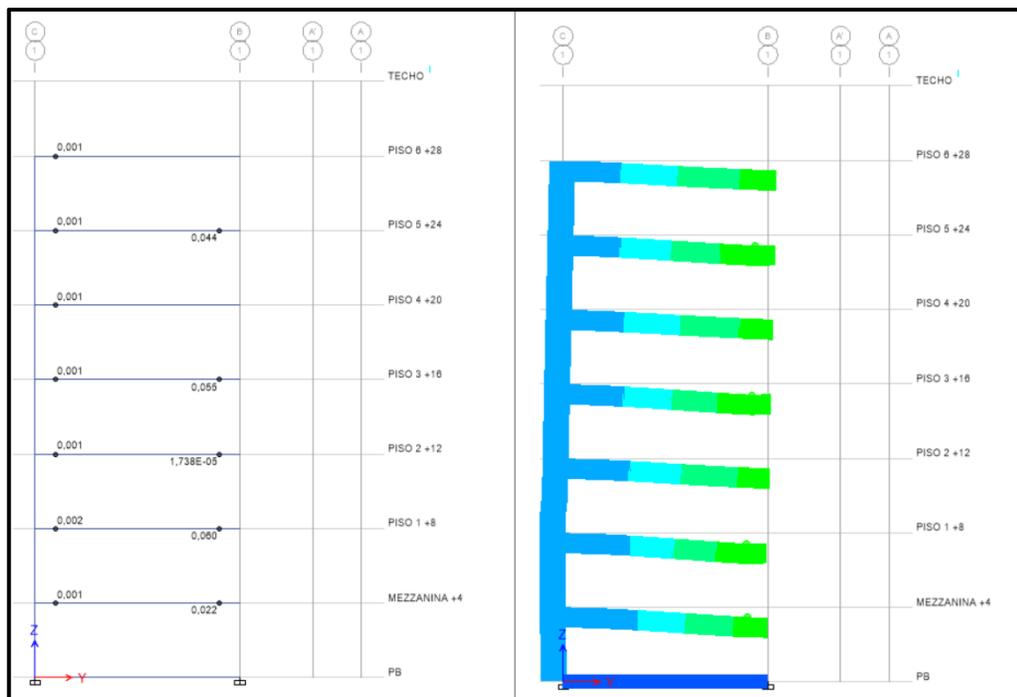
Una vez corrido el análisis dinámico no lineal en el ETABS para el Caso 6, se obtuvieron los siguientes valores de DCR para los elementos en donde ocurre la formación de las rótulas.

Ilustración 76. Valores de DCR en muros del Caso 6 para ADNL



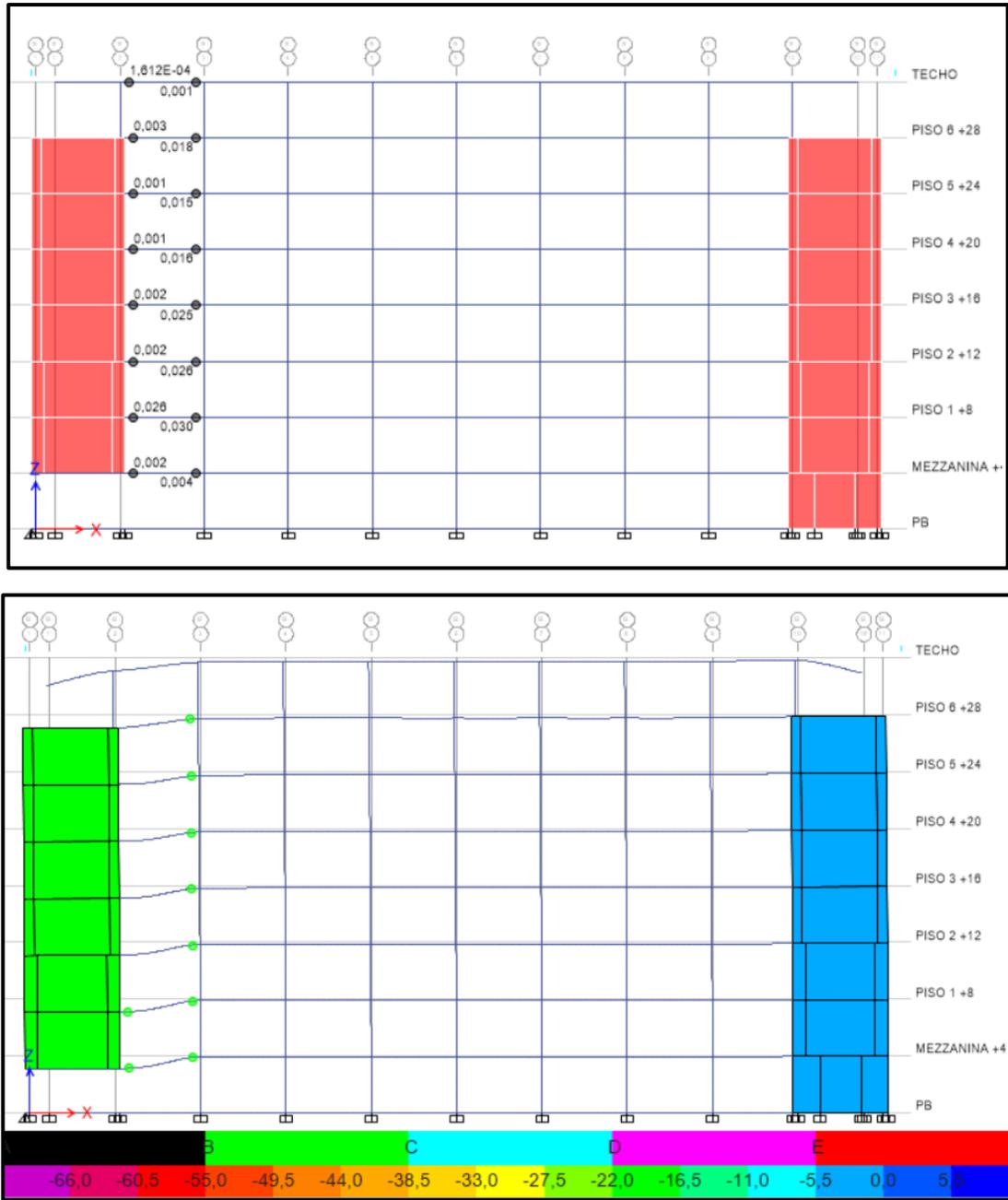
Fuente: Realizado por los autores en ETABS 2016

Ilustración 77. Valores de DCR del Caso 6 para ADNL - Pórtico 1



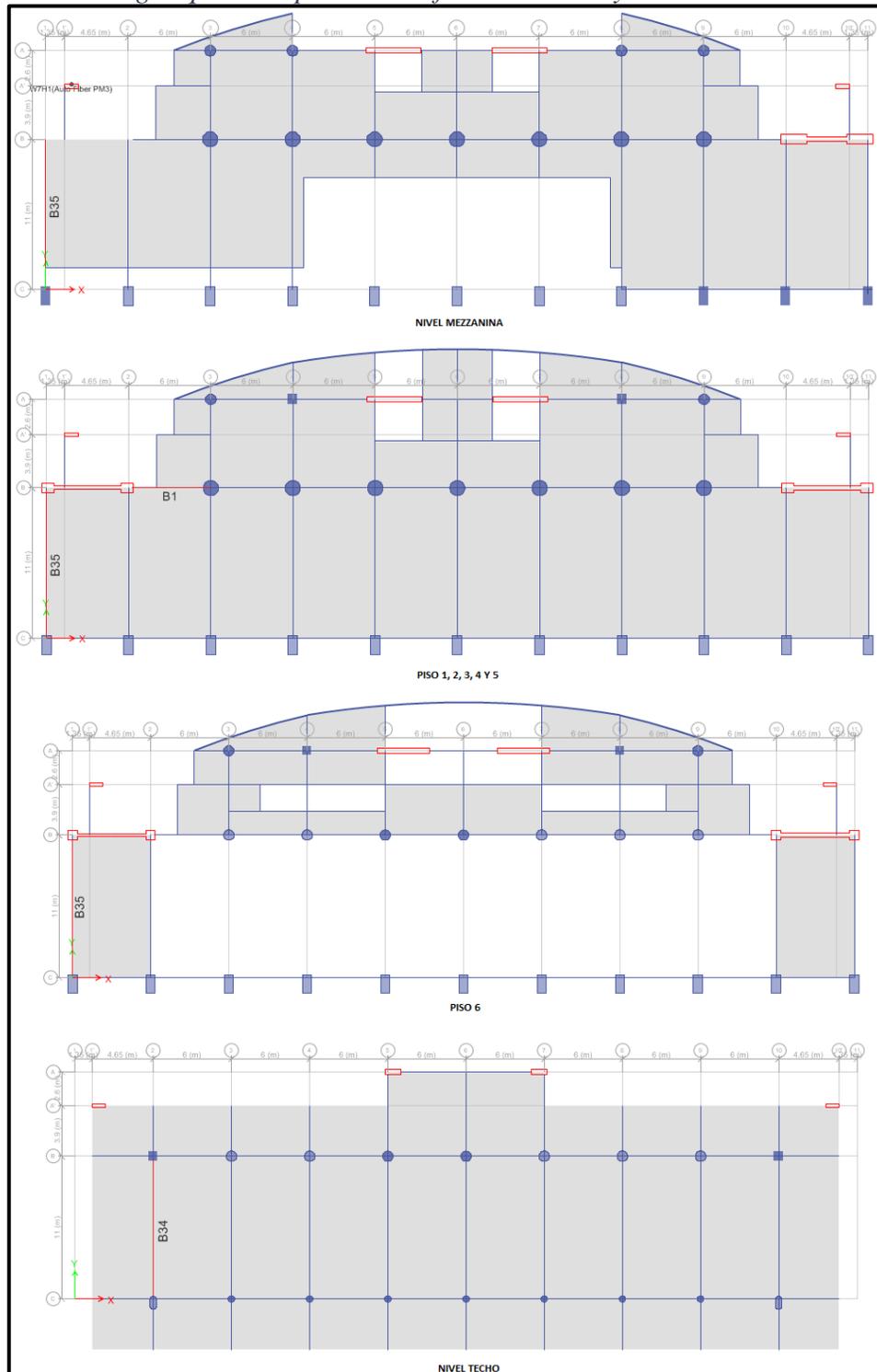
Fuente: Realizado por los autores en ETABS 2016

Ilustración 78. Valores de DCR en vigas del Caso 6 para ADNL – Pórtico B



Fuente: Realizado por los autores en ETABS 2016

Ilustración 80. Vigas que no soportan los efectos de corte y torsión del Caso 6 de ADNL



Fuente: Realizado por los autores en ETABS 2016

Así mismo, en la siguiente tabla se muestra la comparación de A_t/s requerido con el A_t/s para las vigas que no son capaces de resistir la acción conjunta del corte y la torsión. De igual manera, los cálculos realizados para todas las vigas adyacentes al área afectada se muestran en el documento de anexos del presente trabajo especial de grado.

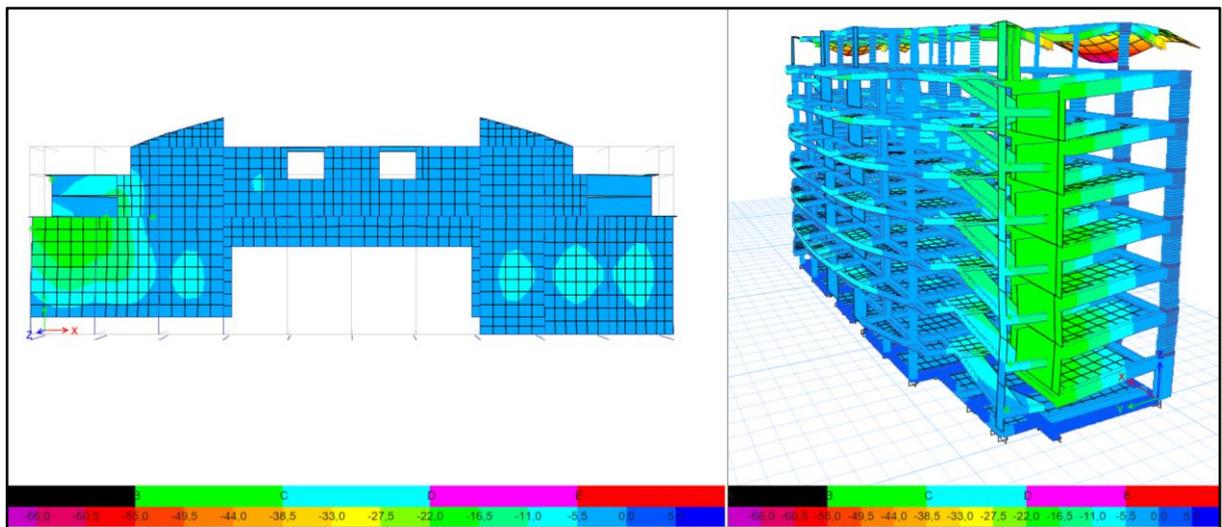
TABLA 34. A_t/s requerido vs A_t/s real para vigas resaltadas en la ilustración 80

Nivel	Viga	$\frac{A_{total}}{s_{requerido}} = \frac{A_v}{s} + 2 \frac{A_t}{s^2}$ (cm ² /m) ²	A_t/s Real (cm ² /m)	¿Resiste?
MEZZANINA +4	B35	0,1931	0,142	No
PISO 1 +8	B1	Aumentar Sección	0,142	No
PISO 1 +8	B35	0,170	0,142	No
PISO 2 +12	B1	Aumentar Sección	0,142	No
PISO 2 +12	B35	0,192	0,142	No
PISO 3 +16	B1	Aumentar Sección	0,142	No
PISO 3 +16	B35	0,176	0,142	No
PISO 4 +20	B1	Aumentar Sección	0,142	No
PISO 4 +20	B35	0,195	0,142	No
PISO 5 +24	B1	Aumentar Sección	0,142	No
PISO 5 +24	B35	0,168	0,142	No
PISO 6 +28	B35	0,165	0,142	No
TECHO	B34	0,151	0,142	No

4.5.6.4 Áreas afectadas

Para el análisis dinámico no lineal, se tienen las siguientes áreas afectadas para el caso de carga, donde se puede observar que el desplazamiento vertical en el lado izquierdo del muro removido es de 1,88cm y en el lado derecho 1,78cm. Así mismo, el desplazamiento máximo de toda el área superior tiene un desplazamiento vertical de con un de 2,11cm.

Ilustración 81. Área afectada del Caso 6 para ADNL



Fuente: Realizado por los autores en ETABS 2016

Para el muro removido B-1-2, se tomara como límite de área afectada el 15% del área total del piso ubicado inmediatamente por encima del mismo, es decir Mezzanina, para lo cual se presenta la siguiente tabla:

TABLA #35. Área afectada del Caso 6 para ADNL

Nivel	Área Total (m ²)	Límite de Área afectada (m ²)	Área Afectada (m ²)
MEZZANINA +4m	700	105	70

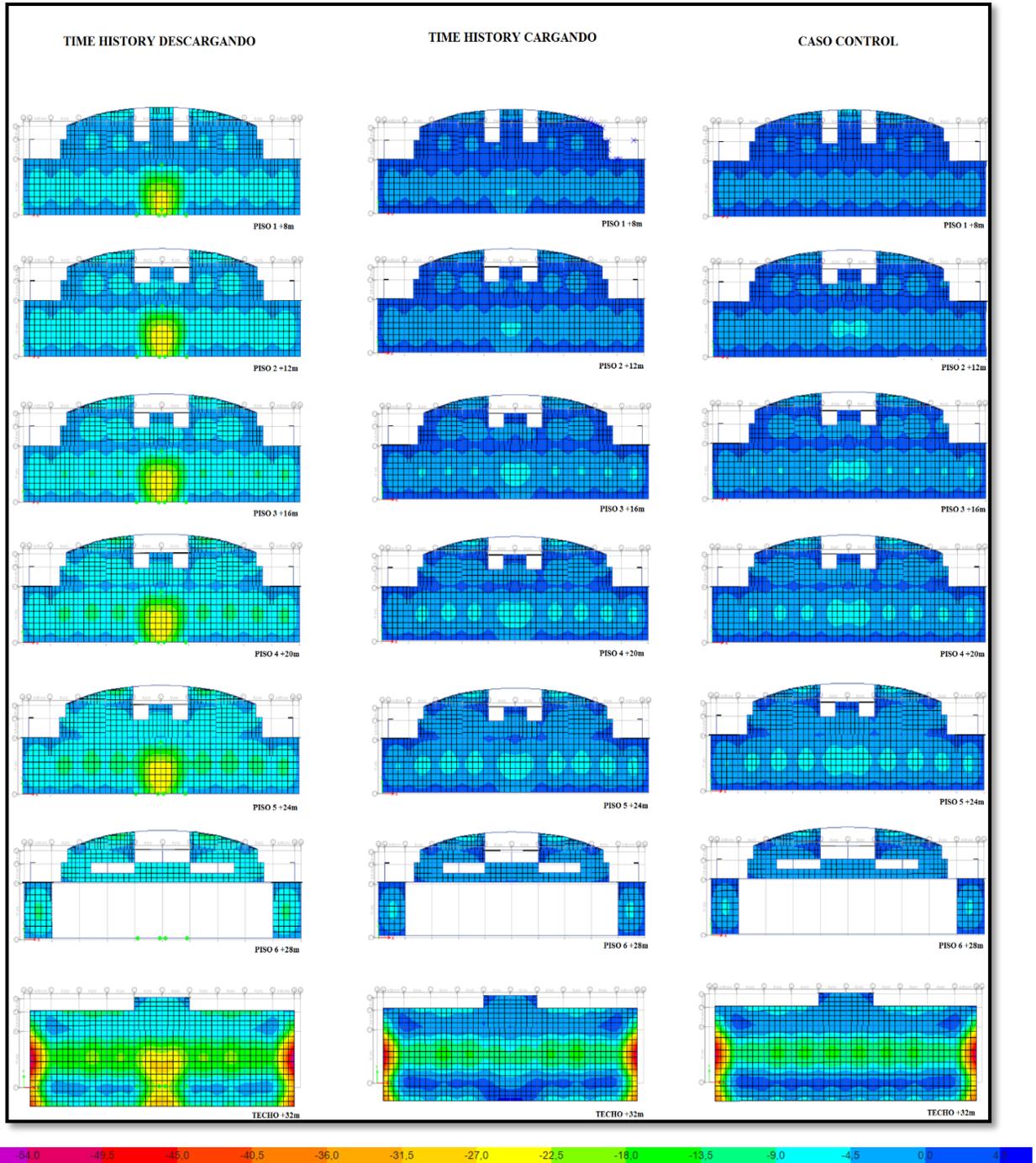
4.6 Comparación de los casos de estudio

Con el fin de comparar los resultados obtenidos en los cinco casos de estudio por ADNL, se presenta el siguiente cuadro comparativo de las áreas afectadas y desplazamientos verticales, así como, un conjunto de ilustraciones donde se comparan las áreas afectadas en los análisis estáticos lineales de cada caso con el caso control.

TABLA #36. Cuadro comparativo de áreas afectadas y desplazamientos verticales para ADNL

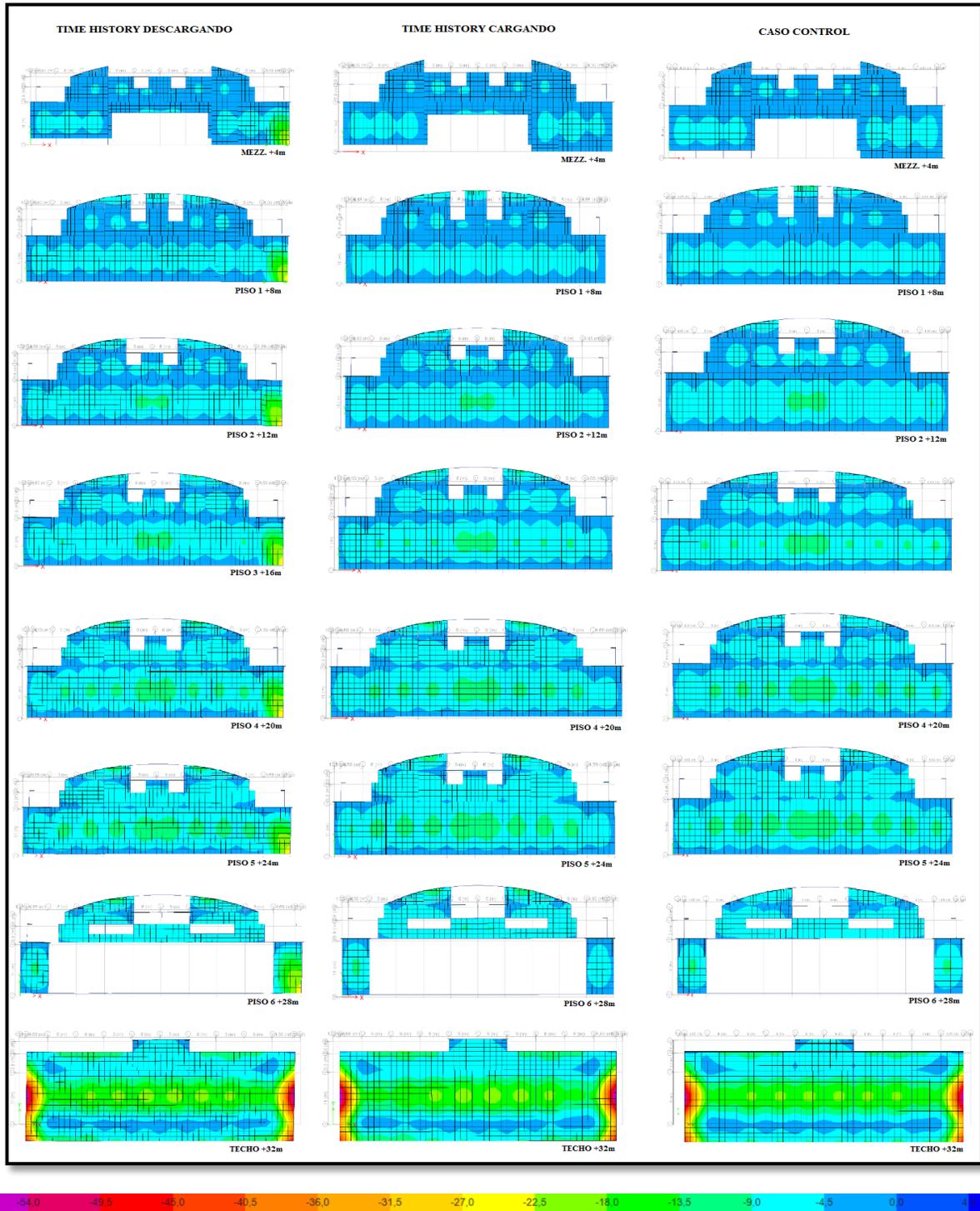
Casos	Columna Externa	Columna Interna	Muro	Nivel Superior		Límite de Área afectada		Área Afectada para ADNL (m ²)	Desplazamiento vertical para ADNL (cm)	
				Piso	Área Total (m ²)	15% Niv. Superior (m ²)	30% Niv. Superior (m ²)		Eje del elemento removido	Máximo
# 2	C-6			Piso +8 m	1000	150		80	2,41	2,46
# 3	C-11			MEZZ. +4m	700	105		73	2,36	
# 4		B-6		MEZZ. +4m	700		210	51	2,30	
# 5		B-8		MEZZ. +4m	700		210	73	2,07	
# 6			B-1-2	MEZZ. +4m	700	105		70	1,78 - 1,88	2,11

Ilustración 82. Desplazamientos verticales del Caso 2 vs Caso 1



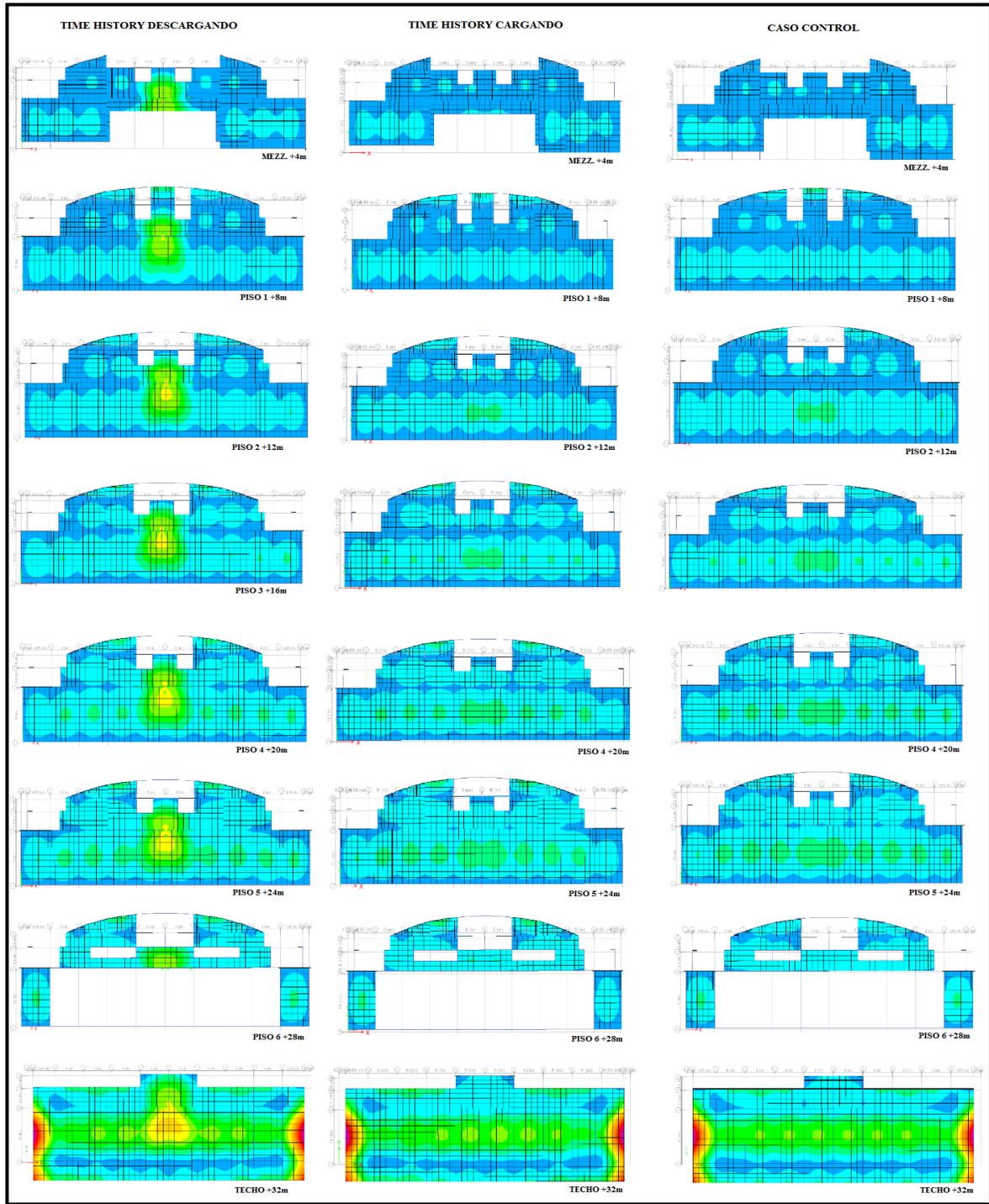
Fuente: Realizado por los autores en ETABS 2016

Ilustración 83. Desplazamientos verticales del Caso 3 vs Caso 1



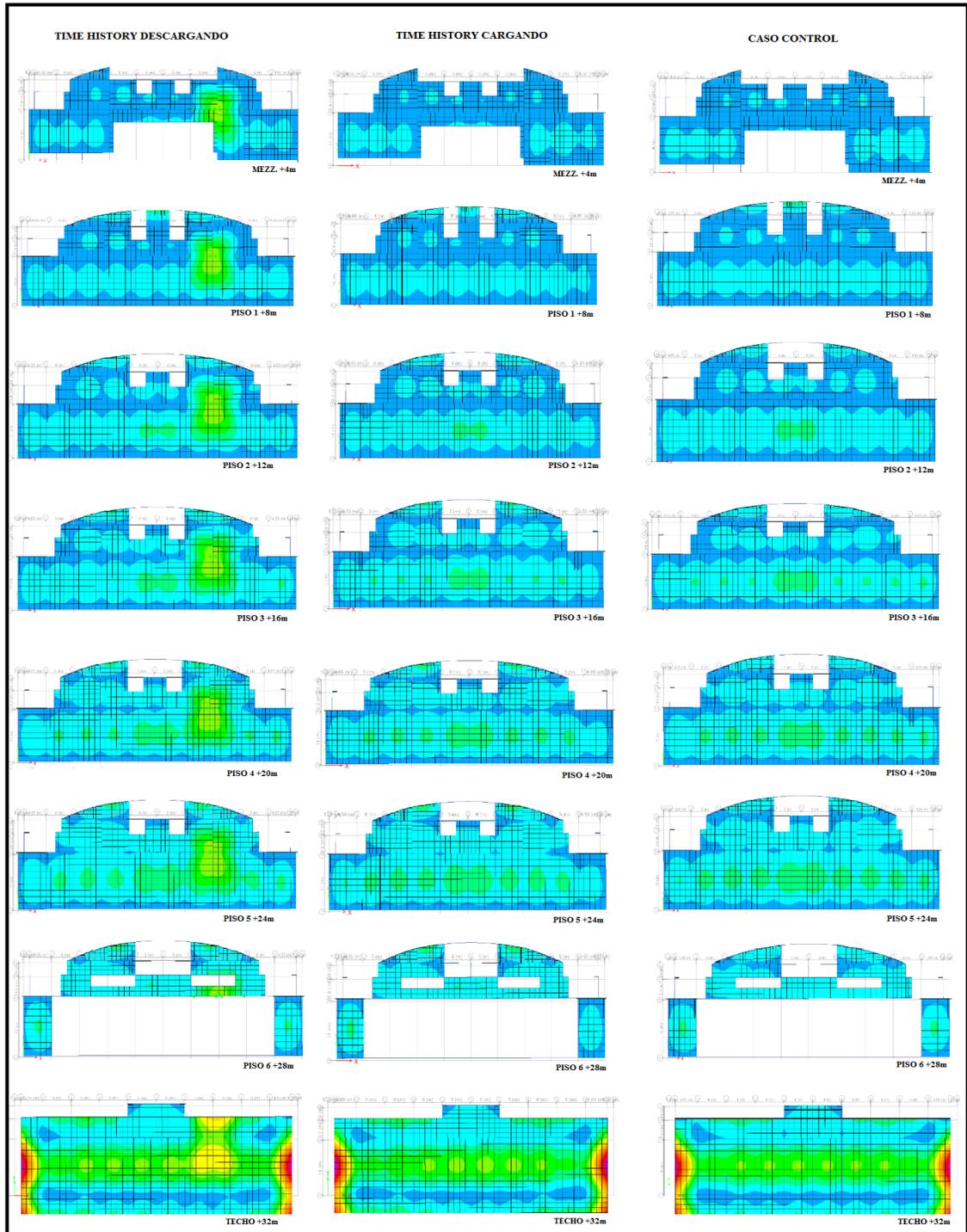
Fuente: Realizado por los autores en ETABS 2016

Ilustración 84. Desplazamientos verticales del Caso 4 vs Caso 1



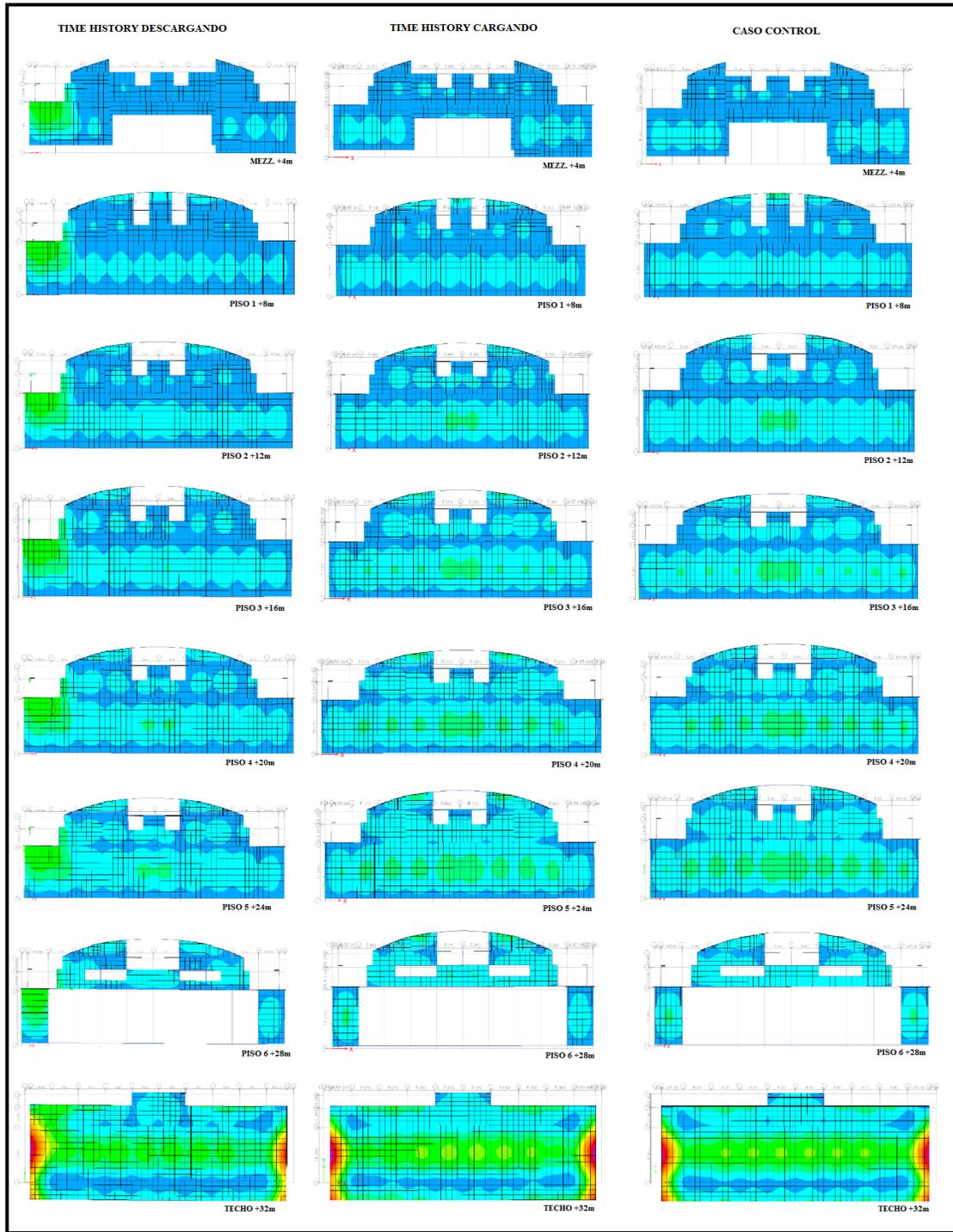
Fuente: Realizado por los autores en ETABS 2016

Ilustración 85. Desplazamientos verticales del Caso 5 vs Caso 1



Fuente: Realizado por los autores en ETABS 2016

Ilustración 86. Desplazamientos verticales del Caso 6 vs Caso 1



Fuente: Realizado por los autores en ETABS 2016

CAPÍTULO V: Análisis de Resultados

Con el fin de estudiar la susceptibilidad del edificio de Cincuentenario ante un colapso progresivo debido a la pérdida de alguno de sus elementos de carga vertical, se consideró un factor de seguridad nivel III indicando la remoción de elementos a nivel de planta baja según las recomendaciones de la GSA, de igual manera, se establecieron cinco (5) casos de estudios (cuatro columnas y un muro) en los que se varió la ubicación del elemento a remover.

Adicional a los casos de remoción, se analizó un modelo tridimensional con todos sus elementos, para establecer un punto de comparación entre el comportamiento de la estructura previo a la remoción y el comportamiento de la misma en cada uno de los cinco casos establecidos anteriormente. Una vez corrido el análisis estático lineal en este modelo control, se observó que los valores de relación demanda capacidad obtenidos eran inferiores a la unidad, verificando que la demanda de los elementos es menor a su capacidad, además, el análisis arrojó deformaciones importantes en el techo del modelo, que se debieron a la simplificación realizada en la losa al ignorar su curvatura real, la cual aporta resistencia al pandeo y evita grandes deformaciones debido al efecto de las placas plegadas, de igual manera, se obtuvo este mismo comportamiento en el análisis dinámico no lineal.

Con respecto al Caso 2, se realizó en primer lugar, un análisis estático lineal donde se tiene que para las acciones controladas por deformación el área afectada fue de 132 m² y el desplazamiento vertical máximo de 2,21 cm, mientras que para las acciones controladas por fuerza el área afectada fue de 100 m² y su desplazamiento vertical máximo 3,57 cm, por lo tanto, ya que estas áreas son inferiores a 150 m², cumplen con el criterio de aceptación de áreas afectadas por la remoción de columnas externas presentado en el [apartado 2.8](#). De igual forma, se verificó que el modelo tenía un comportamiento inelástico importante al arrojar valores de DCR mayores a la unidad para las acciones controladas por fuerza, mientras que para las acciones controladas por deformación algunos de estos valores fueron mayores al “m”

gobernante, cuyo valor fue de 11,8 por lo que se procedió a realizar un análisis dinámico no lineal.

Una vez corrido el análisis dinámico no lineal al caso 2, se observó que para las acciones controladas por deformación se formaron rótulas plásticas con deformaciones inferiores al 10% de la máxima permitida en los elementos primarios, cumpliendo con el criterio de aceptación para análisis no lineal indicado en el [apartado 2.8.4.4.1](#), mientras que para las acciones controladas por fuerza, se determinó que las vigas presentadas en la [ilustración 57](#) no fueron capaces de soportar el efecto de la acción conjunta de los esfuerzos cortantes y de torsión, sin embargo, para las columnas se observó que las mismas fueron capaces de resistir el colapso al tener una capacidad superior a la demanda.

Una vez comprobado que al remover un elemento de carga vertical la estructura tiene un comportamiento inelástico importante, se descartó la realización del análisis estático lineal para el resto de los casos de estudio, y se realizó únicamente análisis dinámicos no lineales.

En este contexto, se obtiene que en el caso 3, para las acciones controladas por deformación las rótulas desarrolladas en los elementos primarios no superaron el 1% de su deformación, cumpliendo con el criterio de aceptación, y para las acciones controladas por fuerza se determinó que las columnas tienen una capacidad mayor a la demanda, mientras que las vigas presentadas en la [ilustración 62](#) no fueron capaces de soportar la combinación de las cargas de torsión y corte generadas por la remoción de la columna C-11.

Para los casos 4 y 5 donde se realizó la remoción de las columnas internas B-6 y B-8, respectivamente, el análisis dinámico no lineal indicó que para las acciones controladas por deformación las rótulas plásticas desarrolladas en los elementos primarios no superaron el 1,8% de la deformación máxima aceptada, así mismo, para las acciones controladas por fuerza se determinó que las columnas en ambos casos de estudio, tienen una capacidad mayor a la demanda mientras que las vigas presentadas en las [ilustraciones 67](#) y [72](#) propias de cada modelo,

no fueron capaces de soportar el efecto de la acción conjunta de los esfuerzos cortantes y de torsión.

En el caso 6, donde fue removido el muro B-1-2 a nivel de planta baja, se obtuvo para las acciones controladas por deformación que tanto para las vigas y muros se formaron rótulas plásticas con deformaciones menores al 10 %, cumpliendo con el criterio de aceptación descrito en [apartado 2.8.4.4.1](#); mientras que en las columnas no se desarrollaron las mismas. Así mismo, para las acciones controladas por fuerza se determinó que las columnas tienen una capacidad mayor a la demanda, mientras que las vigas presentadas en la [ilustración 80](#) no fueron capaces de resistir los esfuerzos cortantes y de torsión generados por la remoción de dicho muro.

Adicionalmente, para todos los casos de remoción de elementos de carga vertical estudiados mediante el análisis dinámico no lineal, se verificó que se cumple el criterio de aceptación para el área afectada indicado en el Capítulo II [apartado 2.8](#) del presente Trabajo Especial de Grado. Además, se observó que el área afectada iba aumentando progresivamente en los niveles superiores de la estructura, esto debido al efecto catenaria que produce que el colapso sea resistido por sus elementos primarios a través de fuerzas de tracción.

Finalmente, se realizó una comparación entre los cinco casos estudiados con el análisis dinámico no lineal, y se observó que los desplazamientos verticales para los casos de remoción de columnas fueron muy similares entre sí, en el orden de los 2,4 cm, mientras que para el caso 6, donde fue removido el muro, este valor fue aproximadamente un 20% menor. La GSA no cuenta con algún criterio de aceptación para los desplazamientos verticales máximos en las áreas afectadas, sin embargo, según la tabla 9.6.2 “Flechas máximas permisibles” del capítulo 9 de la Norma venezolana Covenin 1753-06 el valor máximo permisible corresponde a 2,5 cm.

CAPÍTULO VI: Conclusiones

Al estudiar el edificio de Cincuentenario de la Universidad Católica Andrés Bello, sede Montalbán, mediante un análisis de colapso progresivo bajo los lineamientos del General Services Administration del año 2013, se puede concluir los siguientes puntos:

- ✓ Al plantear el modelo matemático de la estructura a analizar, se evidenció que se generaban desplazamientos verticales importantes en el techo que no estaban relacionados con la remoción de elementos, esto es debido a la simplificación de su geometría.
- ✓ El análisis estático lineal que propone la GSA aplicado a la estructura de estudio, arrojó resultados que dificultan la interpretación del comportamiento de la misma ante la remoción de un elemento, debido a que éste sobrecarga la estructura y altera su respuesta ante el evento extraordinario.
- ✓ Al comparar el comportamiento de la estructura una vez corrido el “*Time History Cargando*” con el modelo control, se evidenció que el método empleado para simular la presencia del elemento removido es apropiado.
- ✓ Al aplicar el procedimiento de carga con un “*Time History Cargando*” seguido de un “*Time History Descargando*” haciendo uso de la función “*RampTH*” en los análisis dinámicos no lineales, se verificó que se simula apropiadamente la remoción progresiva del elemento.
- ✓ Al analizar la respuesta estructural previa a la pérdida de alguno de sus elementos estructurales se verifica que la demanda es mucho menor a la capacidad de los elementos.

- ✓ El área afectada por la remoción del elemento vertical es menor cuando el mismo está conectado a una mayor cantidad de miembros. Así mismo, a medida que se sube de nivel en la edificación, el efecto catenaria ocasiona un incremento del área afectada.
- ✓ Los desplazamientos verticales máximos obtenidos en todos los análisis dinámicos no lineales se consideran aceptables para todos los casos de estudio.
- ✓ Las columnas de la edificación estudiada, las cuales fueron diseñadas para resistir acciones sísmicas, se comportan muy bien ante la pérdida de un elemento vertical, mientras que las vigas que actúan como elementos primarios ubicadas en el lado más corto de la edificación, sufren una falla frágil al estar sometidas a una magnitud importante de acción conjunta entre corte y torsión.
- ✓ Al analizar el edificio de Cincuentenario, diseñado bajo la Norma Venezolana para Edificaciones Sismoresistentes COVENIN 1756-01-2001, según las recomendaciones de la GSA del año 2013, se comprobó que es vulnerable a un colapso parcial.

CAPÍTULO VII: Recomendaciones

- ✓ Para poder garantizar que el modelo inicial no tenga deformaciones importantes, se recomienda considerar las características geométricas de la estructura y su relevancia, para no ignorar o pasar por alto las resistencias que las mismas que aporten al sistema.
- ✓ Incluir en los lineamientos de la GSA un criterio de aceptación para los desplazamientos verticales.
- ✓ Estudiar un caso de remoción de elemento de carga vertical, para una estructura cuyo nivel de seguridad implique la remoción en todos los niveles.
- ✓ Estudiar un caso en el que se remueva más de un elemento de carga vertical simultáneamente.
- ✓ Aplicar este estudio a otras edificaciones existentes para verificar el comportamiento de la estructura tanto para el análisis lineal como no lineal, y compararlo con este Trabajo Especial de Grado.
- ✓ Se recomienda reforzar las vigas de los pisos inferiores y en especial las ubicadas en el lado más corto del edificio Cincuentenario, de modo que éstas sean capaces de soportar la acción conjunta de corte y torsión producida por la pérdida de un elemento de carga vertical debido a un evento extraordinario.
- ✓ Crear un documento de recomendación a la norma venezolana de construcción, en el que se tome en cuenta el colapso progresivo en el diseño de estructuras sismoresistentes, para hacer énfasis en el efecto conjunto de la torsión y el corte en vigas, como consecuencia de la pérdida de un elemento de carga vertical.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Dolores S, C., & Minervini G., M. (2013). *Análisis de Colapso Progresivo en Estructuras de Concreto por Ocurrencia de Eventos Extraordinarios*. Universidad Católica Andrés Bello.
- Drone Pixel Venezuela*. (2016, Mayo 20). Disponible en <http://dronepixel.com.ve/pixel-item/universidad-catolica-andres-bello/>
- General Services Administration. (2013). *Alternate Path Analysis & Design Guidelines for Progressive Collapse Resistance*. U.S.A.
- GSA. (2013). Fecha de consulta Agosto 2016, disponible en <http://www.gsa.gov/portal/category/100000>
- Haberland, M., & Starossek, U. (2017, Mayo 16). *Progressive Collapse Nomenclature*. Disponible en <http://www.tuhh.de/sdb/publikationen/dateien/Progressive-collapse-nomenclature->
- Henry, D. A. (n.d.). *Slide Share*. Fecha de consulta Septiembre 2016, de Diseño y Analisis Estructural de Edificio de Hormigón Armado para Resistir Colapso Progresivo, debido a una Carga Anormal Producida por un Tsunami: <http://es.slideshare.net/DiegoQuezadaHenry/presentacionmemoriadiego-quezada-final>
- Herrera, F., & Pollner, A. (2011). *Búsqueda de patrones geométricos y mecánicos en edificios que han perdido parte de su soporte*. Universidad Católica Andrés Bello, Facultad de Ingeniería Civil, Caracas. Fecha de consulta Mayo 2017
- Herrera, F., & Pollner, A. (2011). *Busqueda de Patrones Geometricos y Mecanicos en Edificios que han Perdido Parte de su Soporte*. Caracas: UCAB.
- Medina, J. (2016, Febrero). *Materiales estructurales*. Fecha de consulta Mayo 2017, Disponible en <http://webdelprofesor.ula.ve/arquitectura/jorgem/principal/guias/seimatest.pdf>
- Mejias, L. G. (n.d.). *Aplicabilidad de las recomendaciones para Colapso Progresivo en Estructuras Prefabricadas en Zonas Sísmicas*. Fecha de consulta Agosto 2016, disponible en <http://www.lgm.com.co/publicaciones/Publicaciones%202/APLICABILIDAD%20DE%20LAS%20RECOMENDACIONES%20PARA%20COLAPSO%20PROGRESIVO.pdf>

- Mohamad, A.-A. (2015, Febrero). *CSI Knowledge Base*. Fecha de consulta Mayo 2017, disponible en <https://wiki.csiamerica.com/display/kb/P-M2-M3+hinges>
- Moya Q., A., & Sotillo B, R. (2016). *Estudio del comportamiento no lineal de muros de corte basados en el diseño por desempeño*. Universidad Católica Andrés Bello, Caracas. Fecha de consulta Mayo 2017
- Olano, C. (2016, Noviembre). *Introducción a las estructuras*. Fecha de consulta Mayo 2017, Disponible en <http://introduccionalasestructuras.blogspot.com/p/clase-09-analisis-de-cargas.html>
- Perez Marrero, J., & Santos Simoza, E. (1999). *Búsqueda de parámetros adimensionales en la determinación de efectos de asentamientos en porticos de acero y concreto*. Caracas: UNEFA.
- Portland Cement Association. (2005, octubre 16). *Structure Point*. Fecha de consulta Febrero 18, 2017, de Concrete Buildings and Progressive Collapse Resistance: <https://www.structurepoint.org/publication/pdf/PCA-Concrete-Buildings-Progressive-Collapse.pdf>
- Powell, G. (2010). *Modelling for Structural Analysis: Behavior and Basics*. Berkeley, California: Computer and Structures, Inc.
- Sezen, H., & Giriunas, K. A. (2009). *Progressive Collapse Analysis of an Existing Building*. The Ohio State University.
- Tong, L. H., & Reese , S. (2010, Marzo 24). *Congressional Research Service*. Fecha de consulta Noviembre 2016, de Federal Building and Facility Security: <https://fas.org/sgp/crs/homesec/R41138.pdf>
- Universidad Católica Andrés Bello . (2017, Febrero). Disponible en <http://www.ucab.edu.ve/>