



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE AGUASCALIENTES



Centro de Ciencias del Diseño y de la Construcción

Departamento de Construcción y Estructuras

Tesis:

“Diseño por desempeño de estructuras, con análisis determinístico
por afectaciones de subsidencia”

Presenta:

Ing. Kevin Adolfo Romero González

Para obtener el grado de Maestro en Ingeniería Civil

En el área de Estructuras

Tutor:

Dr. José Ángel Ortíz Lozano

Cotutor:

M. I. Daniel Enrique Reyna Valdivia

Asesor:

M. I. Roberto Alfonso Amador Martínez

Aguascalientes, Ags.

04/05/2021

Fecha de dictaminación dd/mm/aaaa: 01/06/2021

NOMBRE: KEVIN ADOLFO ROMERO GONZÁLEZ **ID** 123549

PROGRAMA: Maestría en ingeniería civil con salida en estructuras **LGAC (del posgrado):** Construcción y estructuras

TIPO DE TRABAJO: () Tesis () Trabajo Práctico

TÍTULO: "Diseño por desempeño de estructuras, con análisis determinístico por afectaciones de subsidencia"

IMPACTO SOCIAL (señalar el impacto logrado): Investigación con el fin de lograr el desarrollo de ciudades mas resilientes ante los fenomenos naturales y antropicos como lo es la subsidencia.

INDICAR SI NO N.A. (NO APLICA) SEGÚN CORRESPONDA:

<i>Elementos para la revisión académica del trabajo de tesis o trabajo práctico:</i>	
SI	El trabajo es congruente con las LGAC del programa de posgrado
SI	La problemática fue abordada desde un enfoque multidisciplinario
SI	Existe coherencia, continuidad y orden lógico del tema central con cada apartado
SI	Los resultados del trabajo dan respuesta a las preguntas de investigación o a la problemática que aborda
SI	Los resultados presentados en el trabajo son de gran relevancia científica, tecnológica o profesional según el área
SI	El trabajo demuestra más de una aportación original al conocimiento de su área
SI	Las aportaciones responden a los problemas prioritarios del país
SI	Generó transferencia del conocimiento o tecnológica
SI	Cumple con la ética para la investigación (reporte de la herramienta antiplagio)
<i>El egresado cumple con lo siguiente:</i>	
SI	Cumple con lo señalado por el Reglamento General de Docencia
SI	Cumple con los requisitos señalados en el plan de estudios (créditos curriculares, optativos, actividades complementarias, estancia, predoctoral, etc)
SI	Cuenta con los votos aprobatorios del comité tutorial, en caso de los posgrados profesionales si tiene solo tutor podrá liberar solo el tutor
N.A.	Cuenta con la carta de satisfacción del Usuario
SI	Coincide con el título y objetivo registrado
SI	Tiene congruencia con cuerpos académicos
SI	Tiene el CVU del Conacyt actualizado
NO	Tiene el artículo aceptado o publicado y cumple con los requisitos institucionales (en caso que proceda)
<i>En caso de Tesis por artículos científicos publicados</i>	
NO	Aceptación o Publicación de los artículos según el nivel del programa
NO	El estudiante es el primer autor
NO	El autor de correspondencia es el Tutor del Núcleo Académico Básico
NO	En los artículos se ven reflejados los objetivos de la tesis, ya que son producto de este trabajo de investigación.
NO	Los artículos integran los capítulos de la tesis y se presentan en el idioma en que fueron publicados
NO	La aceptación o publicación de los artículos en revistas indexadas de alto impacto

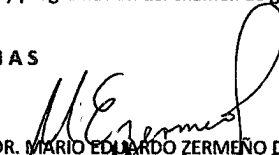
Con base a estos criterios, se autoriza se continúen con los trámites de titulación y programación del examen de grado:

Sí X
No

FIRMAS

Elaboró:

* NOMBRE Y FIRMA DEL CONSEJERO SEGÚN LA LGAC DE ADSCRIPCIÓN:



DR. MARIO EDUARDO ZERMEÑO DE LEÓN

NOMBRE Y FIRMA DEL SECRETARIO TÉCNICO:



DR. MARTÍN FERNÁNDEZ MARÍN

* En caso de conflicto de intereses, firmará un revisor miembro del NAB de la LGAC correspondiente distinto al tutor o miembro del comité tutorial, asignado por el Decano

Revisó:

NOMBRE Y FIRMA DEL SECRETARIO DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO:



DR. ALEJANDRO ACOSTA COLLAZO

Autorizó:

NOMBRE Y FIRMA DEL DECANO:



Dr. EN C. T. G. HÉCTOR ROMERO POSADA ÁVILA

Nota: procede el trámite para el Depto. de Apoyo al Posgrado

En cumplimiento con el Art. 105C del Reglamento General de Docencia que a la letra señala entre las funciones del Consejo Académico: ...luchar la eficiencia terminal del programa de posgrado y el Art. 105F las funciones del Secretario Técnico, llevar el seguimiento de los alumnos.

DR. EN C.T.C. HÉCTOR HOMERO POSADA ÁVILA
DECANO DEL CENTRO DE **CIENCIAS**
DEL DISEÑO Y LA CONSTRUCCIÓN
P R E S E N T E

Por medio del presente como **TUTOR** designado del estudiante **ROMERO GONZÁLEZ KEVIN ADOLFO** con ID **123549** quien realizó **LA TESIS** titulada: **“DISEÑO POR DESEMPEÑO DE ESTRUCTURAS, CON ANÁLISIS DETERMINÍSTICO POR AFECTACIONES DE SUBSIDENCIA”** un trabajo propio, innovador, relevante e inédito y con fundamento en el Artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia doy mi consentimiento de que la versión final del documento ha sido revisada y las correcciones se han incorporado apropiadamente, por lo que me permito emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que él pueda proceder a imprimirla así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

Pongo lo anterior a su digna consideración y sin otro particular por el momento, me permito enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE
“Se Lumen Proferre”

Aguascalientes, Ags., a día 05 de MAYO del 2021.


Dr. José Ángel Ortiz Lozano
Tutor de tesis

c.c.p.- Interesado
c.c.p.- Secretaría Técnica del Programa de Posgrado

CARTA DE VOTO APROBATORIO
INDIVIDUAL

DR. EN C.T.C. HÉCTOR HOMERO POSADA ÁVILA
DECANO DEL CENTRO DE **CIENCIAS**
DEL DISEÑO Y LA CONSTRUCCIÓN
P R E S E N T E

Por medio del presente como **COTUTOR** designado del estudiante **ROMERO GONZÁLEZ KEVIN ADOLFO** con ID **123549** quien realizó **LA TESIS** titulada: **“DISEÑO POR DESEMPEÑO DE ESTRUCTURAS, CON ANÁLISIS DETERMINÍSTICO POR AFECTACIONES DE SUBSIDENCIA”** un trabajo propio, innovador, relevante e inédito y con fundamento en el Artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia doy mi consentimiento de que la versión final del documento ha sido revisada y las correcciones se han incorporado apropiadamente, por lo que me permito emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que él pueda proceder a imprimirla así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

Pongo lo anterior a su digna consideración y sin otro particular por el momento, me permito enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE
“Se Lumen Proferre”

Aguascalientes, Ags., a día 05 de MAYO del 2021.

M. I. Daniel Enrique Reyna Valdivia
Cotutor de tesis

c.c.p.- Interesado
c.c.p.- Secretaría Técnica del Programa de Posgrado

DR. EN C.T.C. HÉCTOR HOMERO POSADA ÁVILA
DECANO DEL CENTRO DE **CIENCIAS**
DEL DISEÑO Y LA CONSTRUCCIÓN
P R E S E N T E

Por medio del presente como **ASESOR** designado del estudiante **ROMERO GONZÁLEZ KEVIN ADOLFO** con ID **123549** quien realizó **LA TESIS** titulada: **“DISEÑO POR DESEMPEÑO DE ESTRUCTURAS, CON ANÁLISIS DETERMINÍSTICO POR AFECTACIONES DE SUBSIDENCIA”** un trabajo propio, innovador, relevante e inédito y con fundamento en el Artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia doy mi consentimiento de que la versión final del documento ha sido revisada y las correcciones se han incorporado apropiadamente, por lo que me permito emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que él pueda proceder a imprimirla así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

Pongo lo anterior a su digna consideración y sin otro particular por el momento, me permito enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE
“Se Lumen Proferre”

Aguascalientes, Ags., a día 05 de MAYO del 2021.



M. I. Roberto Alfonso Amador Martínez
Asesor de tesis

c.c.p.- Interesado
c.c.p.- Secretaría Técnica del Programa de Posgrado

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología CONACYT, por su apoyo a los jóvenes con ganas de seguir sus estudios y facilitar las herramientas que lo permiten.

A la Universidad Autónoma de Aguascalientes por ser una gran casa de estudios, que me permitió cumplir este paso profesional en mi vida.

A mi Tutor y amigo, Dr. José Ángel Ortiz Lozano, por sus conocimientos transmitidos a lo largo de la maestría y el completo acompañamiento en la elaboración de esta investigación que se presenta como tesis. Por ser pieza importante en mi desarrollo profesional.

A mi cotutor y amigo, M. I. Daniel Enrique Reyna Valdivia, que fungió como un gran apoyo en esta investigación. Por su alto conocimiento del tema en el ámbito de diseño estructural y su gran disposición por enseñar a lo largo de toda la maestría.

A mi asesor y amigo, M.I. Roberto Alfonso Amador Martínez, que formo parte del equipo de investigación y por ser un gran mentor que me acerco al mundo del diseño estructural con la enseñanza de su gran experiencia a lo largo de su amplia y exitosa trayectoria.

A mis padres, Ing. Sergio H. Romero y Lic. Bertha A. González. Por su apoyo incondicional en todos mis proyectos. Por eso y por qué los amo con todo mi corazón les brindo este triunfo tan importante en mi vida.

DEDICATORIAS



Por su gran apoyo a lo largo de mi vida:

A mis padres, Sergio Romero y Bertha González,

A mis hermanos Sergio y Donald

Y a mis cuñadas Flor y Paulina

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL.....	1
ÍNDICE DE ILUSRTRACIONES.....	4
ÍNDICE DE TABLAS.....	7
RESUMEN.....	8
ABSTRACT.....	9
INTRODUCCIÓN.....	10
Planteamiento del problema.....	10
Antecedentes.....	11
Objetivo General.....	13
Objetivos particulares.....	13
Plan de trabajo.....	14
Alcances del trabajo desarrollado.....	15
Preguntas de la investigación.....	16
Justificación.....	17
Usuarios principales dela investigación.....	18

ESTADO DEL ARTE Y FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	19
Objeto de estudio.....	19
Normatividad.....	20
Principios fundamentales de mecánica estructural	22
Marco estructural	22
Distorsión angular	23
Articulaciones plásticas.....	24
Mecanismos de falla.....	26
Análisis estructural.....	27
Tipos de Análisis Sísmicos	28
Análisis no lineal.....	30
Análisis estático no lineal.....	31
Métodos usuales de diseño sísmico.....	31
Análisis Push-over	32
Análisis Pull-down	33
Diseño por Desempeño	34
Clasificaciones de Desempeño Estructural	37
Subsidencia	38
Vulnerabilidad.....	40
Modelos determinísticos	41

METODOLOGÍA	42
Contexto de la metodología para un análisis Pull-down.....	42
Variables del análisis Pull-down.....	44
Alcances de la metodología	44
Características de la estructura.....	45
Procedimiento de metodología.....	47
CAMPAÑA EXPERIMENTAL	66
Hipótesis de la campaña experimental.....	66
Diseño de investigación	66
Técnicas de recolección de datos	67
Análisis de resultados.....	68
CONCLUSIONES	76
REFERENCIAS.....	81
ANEXO “A”	83
ANEXO “B”.....	85

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Tipos de asentamiento: a) Asentamiento uniforme, b) Volteo, c) Asentamiento no uniforme.	23
Ilustración 2. Distorsión angular aplicada en un marco estructural (Generación de articulaciones plásticas).	24
Ilustración 3. a) Viga simplemente apoyada. b) Curva de factor de carga- deformación.	25
Ilustración 4. Mecanismo de falla en Columnas y en vigas.	26
Ilustración 5. Construcción de la matriz de rigidez.	28
Ilustración 6. Desempeño sísmico recomendado obtenido por Vision 2000.	36
Ilustración 7. Ejemplo de diagrama de Momento-rotación (Desempeño estructural).	37
Ilustración 8. Configuración de basamento rocoso para fisuras de tierra y fallas superficiales.	39
Ilustración 9. Planta estructural tipo (Para fines del análisis no se consideraron huecos en la losa)	45
Ilustración 10. Definición de la geometría del modelo.	47
Ilustración 11. Esqueleto de modelo en 3D; con empotramiento en los apoyos.	47
Ilustración 12. Propiedades del concreto $f'c=250$ kg/cm ²	48
Ilustración 13. Ilustración 8. Creación de Columna de 60x60 y Viga de 30x60.	48
Ilustración 14. Patrones de carga.	49
Ilustración 15. Casos de carga (CGNL).	49
Ilustración 16. Definición de caso de Carga Gravitacional No lineal.	50
Ilustración 17. Secciones en Vigas y Columnas.	50

Ilustración 18. Modelo tridimensional (Vista extruida)..... 50

Ilustración 19. Asignación de cargas a Estructura (CM+PP) y (CV). 51

Ilustración 20. Determinación de casos de carga a correr..... 51

Ilustración 21. Diagramas de elementos mecánicos del miembro (321) ente un análisis “GCNL”..... 52

Ilustración 22. Momentos en marco en eje B ante el analisis (CGNL)..... 53

Ilustración 23. Asignación de posible formación de rotulas plásticas en vigas. 54

Ilustración 24. Asignación de posible formación de rotulas plásticas en columnas. 55

Ilustración 25. Posibles formaciones de articulaciones plásticas en elementos de los marcos.55

Ilustración 26. Asignar nombre a nodo de control (56. Control de Centro). 56

Ilustración 27. Creación de nuevo patrón de carga “Pull-down”..... 56

Ilustración 28. Casos de carga a considerar. 57

Ilustración 29. Caso de carga del análisis estático no lineal "AENL Pull-down"..... 57

Ilustración 30. Control de desplazamiento en nodo. 58

Ilustración 31. Desratización de deformación en pasos a analizar..... 58

Ilustración 32. Aplicación de desplazamiento forzado en nudo de control, en dirección (-Z). 59

Ilustración 33. Momentos en marco en eje B ante el análisis (AENL Pull-down). 60

Ilustración 34. Diagramas de elementos mecánicos del miembro (321) ente un análisis “AENL Pull-down”..... 61

Ilustración 35. Estructura deformada por hundimiento en punto de apoyo. 62

Ilustración 36. Grafica de momento-rotación para articulación plástica. (Elemento 321) 63

Ilustración 37. Aparición de primeras articulaciones plásticas. 64

Ilustración 38. Aparición de primeras rotulas plásticas en el rango de seguridad de vida (LS).
 65

Ilustración 39. Comportamiento de Marco en eje "B" en Momento M3 (CGNL y AENL_ Paso - 9). 69

Ilustración 40. Comportamiento de Marco en eje "B" en Cortante V2 (CGNL y AENL_ Paso - 9). 70

Ilustración 41. Comportamiento de Marco en eje "B" en Carga Axial (CGNL y AENL_ Paso - 9). 71

Ilustración 42. Marco en eje "B", con vigas y columnas del nivel 1°. 72

Ilustración 43. Marcos estructurales en cruce de ejes B y 2_ elementos (11, 41, 51, 61, 91).. 73

Ilustración 44. Marcos estructurales en los ejes "A" y "B". 83

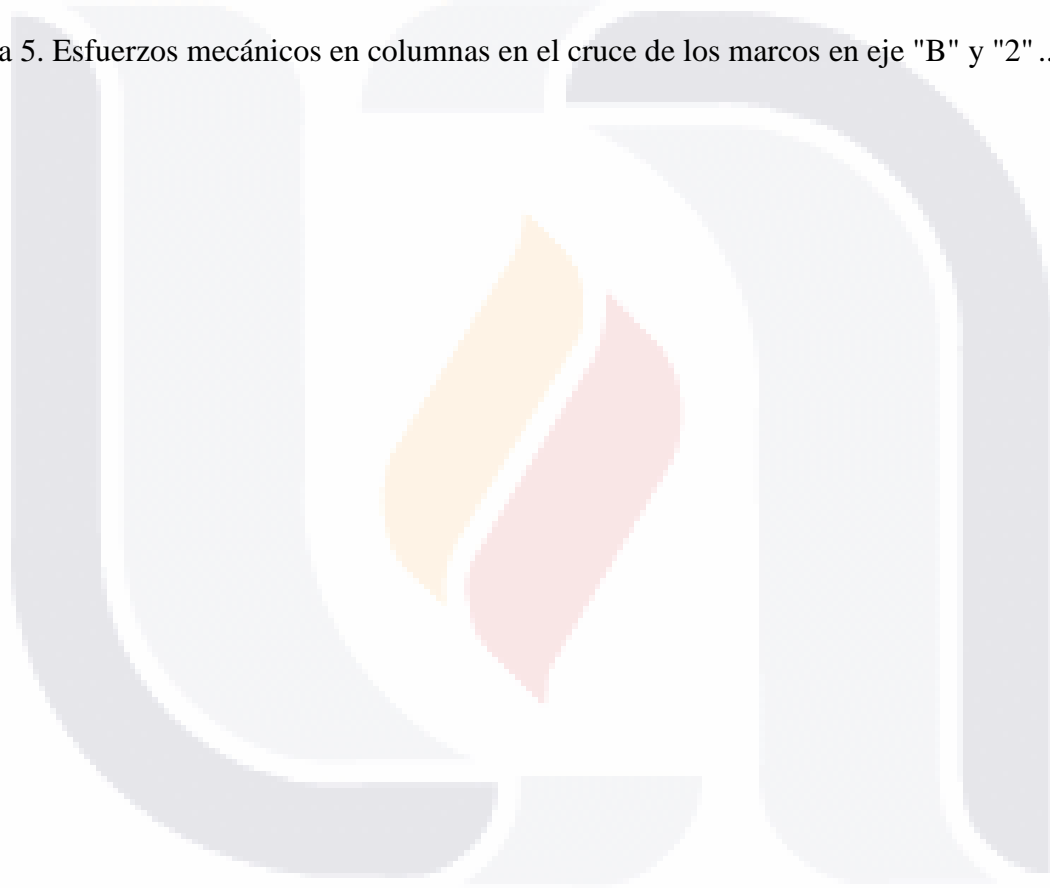
Ilustración 45. Marcos estructurales en los ejes "C" y "D". 83

Ilustración 46. Marcos estructurales en los ejes "1" y "2". 84

Ilustración 47. Marcos estructurales en los ejes "3" y "4". 84

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Redistribución de Esfuerzos de CGNL a AENL en miembros 311 y 321.....	72
Tabla 2. Redistribución de cargas en columnas de análisis CGNL a AENL.....	73
Tabla 3. Tabla de distorsión angular para miembro 321.....	75
Tabla 4. Esfuerzos mecánicos en vigas de marco estructural en eje "B".....	85
Tabla 5. Esfuerzos mecánicos en columnas en el cruce de los marcos en eje "B" y "2".....	86



RESUMEN

La subsidencia es un fenómeno que ha afectado a la humanidad a lo largo de la historia. Ahora, con el desarrollo de diversas investigaciones acerca del tema se sabe que algunas de las grandes causas que lo provocan son el movimiento relativo de las placas tectónicas, la consolidación de suelos blandos y la extracción de agua en acuíferos. Esta última siendo provocada por razones antrópicas; se presenta muy comúnmente en el centro de México, como lo es en la ciudad de Aguascalientes. Debido a esta problemática en la que se ven envueltas distintas ciudades en el mundo; es que, la ingeniería civil en conjunto con las ciencias de la tierra, como lo es la geología, han optado por buscar el desarrollo de investigaciones que permitan construir ciudades más resilientes ante fenómenos que provocan afectaciones significativas en la infraestructura de las ciudades como lo es la subsidencia.

Es por eso que en este trabajo se presenta una metodología para realizar un análisis por desempeño en estructuras verticales de marcos estructurales, que se someterán a las afectaciones provocadas por el fenómeno de la subsidencia; partiendo desde un enfoque determinístico, al aplicar los hundimientos diferenciales en la base de la estructura. Para esta investigación se realiza un análisis no lineal por hundimientos diferenciales, con el que se estudia el comportamiento mecánico de los elementos que componen el esqueleto principal; así también se determinarán los niveles de desempeño de la estructura ante los distintos asentamientos provocados por la subsidencia. El procedimiento que se adopta en esta metodología de análisis por desempeño esta principalmente influenciado por el análisis Push-over que se realiza para el fenómeno de sismo, llevándolo mediante un conjunto de procedimiento al análisis Pull-down para la simulación del fenómeno de la subsidencia.

ABSTRACT

Subsidence is a phenomenon that has affected mankind throughout history. Currently, with the development of research on the subject, it is known that some of the main causes are the relative movement of tectonic plates, the consolidation of soft soils, and the extraction of water in aquifers. The latter, caused by anthropic reasons, commonly occurs in the center of México, as it happens in the city of Aguascalientes. Due to this problem in which different cities around the world are involved, Civil Engineering, in a joined effort with earth sciences, such as the geology, have carried out research to build cities that are more resilient to phenomena that cause significant effects on the infrastructure of cities such as subsidence.

For this reason, this work presents a methodology to carry out a performance analysis on vertical structures of structural frames, which will be subjected to the effects caused by the subsidence phenomenon, starting from a deterministic approach, by applying differential settlements at the base of the structure. During this research, a nonlinear analysis by differential subsidence is carried out to study the mechanical behavior of the elements that compose the main skeleton, and determine the performance levels of the structure under the effects of the different settlements caused by subsidence. The procedure adopted in this performance analysis methodology is mainly influenced by the Push-over analysis performed for the earthquake phenomenon, taking it through a set of procedures to the Pull-down analysis for the simulation of the subsidence phenomenon.

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

INTRODUCCIÓN

Planteamiento del problema

En la actualidad existen construcciones de obra civil como lo son las edificaciones verticales, puentes, viviendas y pavimentos, dentro de otras; que debido a asentamientos diferenciales en su base y a un análisis estructural no adecuado que considere los efectos por subsidencia; se han presentado grandes afectaciones por dicho fenómeno, tales como grietas, deformaciones y ruptura de elementos estructurales (Vigas, columnas, losas, etc.); provocando con estos efectos una alteración en el comportamiento mecánico de las estructuras, cambiando su forma de trabajar a una para la que no fue diseñada la estructura. Afectando así a las edificaciones que en algunos casos se llega a tener la necesidad de sustituir o reparar la construcción afectada, generando un costo no considerado que en algunos casos es bastante elevado.

La problemática del fenómeno de la subsidencia es algo que atañe a una gran parte de las ciudades en distintas partes del mundo, esto debido a los movimientos provocados por extracción de agua en el subterráneo o simplemente por los esfuerzos actuantes en la corteza terrestre. Como se puede comprender es necesario el estudio de la subsidencia en distintos campos; aplicándolo a la rama de la ingeniería civil en el desarrollo urbano de las ciudades, es nuestro deber como ingenieros estructuristas y empresas desarrolladoras, fomentar la construcción de edificaciones menos vulnerables a los fenómenos naturales como es el caso de la subsidencia; por esta razón se opta por realizar análisis más apegados al comportamiento real esperado de las estructuras buscando diseños con un desempeño óptimo.

Actualmente la demanda del desarrollo en las ciudades de edificaciones verticales en todo el mundo crece cada día a pasos agigantados, a lo que acudiendo a este problema se optó por enfocar este trabajo a las estructuras de dichas características, ya que son una muy buena alternativa para la optimización sustentable del espacio en las ciudades.

Antecedentes

“A la ingeniería Civil, (...) le corresponden la planeación, diseño y control del medio, desarrollo de los recursos naturales, construcciones, servicios de transporte y otras estructuras necesarias para la salud, bienestar, seguridad, empleo y recreación de la humanidad” (Merritt, 1984, pág. xxviii).

A lo largo de todo el tiempo en que los seres humanos han habitado el planeta tierra, hemos desarrollado el instinto de supervivencia, gracias a la evolución en todos los aspectos del hombre, vamos creando o modificando tecnologías para la obtención de una mejor calidad de vida. A pesar de los avances que se han logrado desde la época en que el hombre era un ser nómada hasta la humanidad que somos en la actualidad; en el día a día se busca el mejoramiento continuo de las tecnologías y normas que nos rigen para llegar a tener un estado de comodidad más amplio, la búsqueda de un mejor estado de salud, dentro de otros aspectos.

Como se ha podido analizar en los últimos años de investigación, en el valle de Aguascalientes dicho fenómeno causa importantes daños que pueden provocar problemas económicos, sociales y en los peores casos poner en riesgo la vida de las personas que se puedan ver afectadas por esta problemática. En los casos de afectaciones en viviendas en los distintos municipios del estado, se puede atribuir a la falta del conocimiento de los daños que puede ocasionar el fenómeno en cuestión, por parte de los constructores o dueños de las edificaciones, o la falta del conocimiento

de las zonas de peligro por subsidencia al momento de construir; así también a la falta de análisis de afectaciones por subsidencia por parte del diseñador estructural.

Por otra parte, el análisis por desempeño de estructuras que se realizara en esta investigación, pretende determinar distintos niveles de desempeño para estructuras de marcos rígidos para posteriormente, en base al desempeño que deseamos tener, proponer un método de análisis para tener un mejor comportamiento de la estructura si se llegara a presentar el fenómeno de la subsidencia.

En esta investigación se realizará una metodología de análisis por desempeño de estructuras de marcos rígidos; para después de realizar el análisis propuesto, tener las herramientas adecuadas para un correcto diseño para el desempeño esperado. Ya que en la práctica normal del diseño estructural se desea cumplir con las normativas establecidas por códigos, de esta manera realizando los modelos y diseños estructurales basados únicamente en trabajos de cumplimiento y no de un desempeño optimo deseado. Buscar en el método por desempeño una estructura más resiliente, más acorde a las necesidades de los problemas de la actualidad y problemas que se podrían llegar a presentar posteriormente. La subsidencia es un problema del pasado, del presente y que seguirá existiendo en el futuro, ya que es provocada por el movimiento continuo de las masas terrestres, por la composición del suelo en donde se desea ejecutar un proyecto y una de las principales causas de subsidencia en el estado de Aguascalientes está dada por la sobreexplotación de los acuíferos en el subsuelo.

Así también se desea conocer el comportamiento de marcos rígidos para edificaciones ante el fenómeno de la subsidencia mediante un análisis Pull-down, para de esta manera analizar los distintos niveles de desempeño que pueden llegar a presentar antes de un colapso.

Objetivo General

Partiendo del planteamiento del problema anteriormente mencionado, el objetivo principal del desarrollo de esta investigación es el de establecer una metodología que permita realizar un análisis estático no lineal por desempeño de tipo Pull-down para estructuras verticales de marcos estructurales afectadas por el fenómeno de la subsidencia, con apoyo del uso del programa SAP2000. Para facilitar en futuras investigaciones la elaboración del análisis de estructuras ante dicho fenómeno y enfocarse en proponer las herramientas que permitan establecer diseños más resilientes.

Objetivos particulares

- Elaborar un mapa de procesos de los pasos a seguir para obtener un análisis de tipo Pull-down para edificaciones verticales compuestas por marcos rígidos, ante los efectos de hundimiento en el suelo provocados por el fenómeno de la subsidencia.
- Obtener las diferencias de los esfuerzos mecánicos en los elementos estructurales de la edificación, para los distintos desplazamientos aplicados en los puntos de apoyo.
- Determinar las magnitudes máximas de desplazamiento en dichos puntos para cada uno de los niveles de desempeño. Encontrando de esta manera el mecanismo de falla provocado por la subsidencia.

Plan de trabajo

Para la elaboración de este trabajo se establecieron 2 principales etapas de ejecución que se muestra a continuación:

1. Recopilación y uso de herramientas:

- Establecer la metodología de la investigación, recolección de datos e información acerca del tema a desarrollar, para identificar los avances obtenidos hasta el momento de temas afines (Estado del arte).
- Se exploraron varias opciones para identificar cual sería el programa más útil que permitiría representar de manera más adecuada los análisis de la investigación; siendo éste, el programa SAP2000. Se practicó el uso de las herramientas que brinda el programa.

2. Trabajo de gabinete:

- La primera parte del trabajo de gabinete fue la determinación de la metodología a seguir para la creación de modelos representativos del problema analizado.
- La segunda parte del trabajo de gabinete fue la ejecución de modelos matemáticos para la obtención de datos y la organización de los mismos.
- La tercera parte fue el análisis de los datos obtenidos para dar las conclusiones de los resultados.

Alcances del trabajo desarrollado

En los alcances del trabajo se establecerá una metodología para la elaboración de un análisis por desempeño para edificaciones verticales de marcos rígidos afectadas por problemas de subsidencia; mediante un análisis no lineal de tipo Pull-down, aplicando desplazamientos impuestos en los puntos de apoyo de la edificación modelada simulando el hundimiento diferencial del suelo, en un modelo matemático elaborado con el programa SAP2000.

Se generarán un conjunto de análisis para probar la metodología propuesta, estableciendo una edificación de 3 vanos de 8m en cada sentido, formando una planta con 9 tableros de las mismas dimensiones, para poder ver las diferentes afectaciones que sufren los marcos al tener hundimientos en su base.

No se considera la elaboración del diseño de los elementos principales de la estructura, sino únicamente la metodología para llevar a cabo el análisis y la obtención de los resultados para identificar los desplazamientos en los que se logra encontrar los distintos niveles de desempeño. Así también identificar los cambios en los elementos mecánicos para cada nivel de desempeño general de la estructura y la identificación de los mecanismos de falla.

Para investigaciones siguientes se sugiere la elaboración de mecanismos de diseño, así como el diseño propio de los elementos para edificaciones analizadas ante un probable problema de hundimiento diferencial provocado por el fenómeno de la subsidencia o cualquier otro análisis que requiera de este tipo de análisis.

Preguntas de la investigación

1. ¿Por qué sería importante aplicar un análisis por desempeño en estructuras que se pueden ver afectadas por subsidencia?
2. ¿Cómo sería la manera de realizar un análisis de tipo Pull-down que represente las afectaciones que pudieran llegar a sufrir las edificaciones ante el fenómeno de la subsidencia?
3. ¿Qué desempeño se podría esperar para una estructura afectada por problemas de hundimientos diferenciales en su base?

Justificación

“Si he podido ver un poco más lejos que algunos otros, ha sido porque estuve parado sobre los hombros de gigantes”.

Esta frase dicha por el gran físico Isaac Newton nos hace darnos cuentas de la importancia que tiene el reconocer el legado que han dejado los grandes científicos de la historia; sin embargo, a veces subestimamos los avances que pueden lograrse con las pequeñas aportaciones que se generan en el día a día. Es por esa razón, que en esta investigación pretende proporcionar un pequeño grano de arena a la sociedad científica.

La subsidencia del terreno o paulatina deformación que se produce cuando se extraen sólidos, líquidos o gases del subsuelo, es una amenaza global que afecta a 19 por ciento de la población mundial y a mil 200 millones de habitantes del planeta que viven en 21 por ciento de las principales ciudades. (Gaceta UNAM, 2021)

A lo largo de muchos años se ha visto las afectaciones que sufren las edificaciones y en general las obras civiles por los efectos de la subsidencia en distintas partes del mundo; siendo este problema en cuestión un buen punto de partida para muchos campos de investigación para lograr edificaciones más resilientes ante este tipo de fenómenos.

- Impacto económico: En compañía de investigaciones complementarias se pretende crear una metodología que permita generar un análisis adecuado y crear mecanismos que mejoren los diseños de las edificaciones. Para lograr mediante un diseño resiliente reducir o anular costos de reparación de edificaciones que se puedan ver afectadas por el fenómeno de la subsidencia.

- TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS
- Impacto social: Dar mayor seguridad a las estructuras, por consecuente mayor seguridad a las personas que habitan e interactúan con las edificaciones diseñadas por esta metodología. Buscando con esta seguridad, tener una mejor calidad de vida.
 - Impacto científico: Generar un apoyo al avance que se tiene en estos métodos de diseño estructural como lo es el de diseño por desempeño, estableciendo una metodología para generar un análisis Pull-down que permita simular las afectaciones provocadas por el fenómeno de la subsidencia en edificaciones verticales a base de marcos rígidos, partiendo desde un enfoque determinístico.

Usuarios principales de la investigación

- Diseñadores estructurales: Los ingenieros estructurales, tenemos la responsabilidad social de crear ciudades más resilientes ante un mundo con fenómenos en constante actuación y variación.
- Investigadores afines al tema: Son los principales impulsores del cambio y la generación de avances científicos, por lo que este trabajo puede ser de gran utilidad para eficientar tiempos en el desarrollo de la investigación, partiendo de un punto en el que se tiene una metodología para realizar un análisis Pull-down para edificaciones verticales compuestas por marcos rígidos.
- Empresas constructoras y desarrolladoras: Las empresas constructoras son una pieza clave en el desarrollo de las ciudades, por lo que tiene un compromiso moral con la sociedad de construir edificaciones más seguras ante los fenómenos ya conocidos como lo son los sismos, huracanes, explosiones y subsidencia entre otros.

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

ESTADO DEL ARTE Y FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

Objeto de estudio

“Los científicos estudian el mundo tal como es; los ingenieros crean el mundo que nunca ha sido”.

Theodore von Kármán (Wilczynski y Douglas, 1995)

Tener una metodología que permita realizar análisis de interacción suelo estructura debido a hundimientos diferenciales en el suelo, para edificaciones verticales compuestas por marcos, que permitirá tener un gran avance en el conocimiento del comportamiento de dichas estructuras ante el fenómeno de la subsidencia que puede ser provocado por distintas causales. Permitiendo con este análisis optar por construir edificaciones más seguras o infraestructuras con comportamientos más adecuados, previendo las afectaciones que pudieran presentarse para los distintos tipos de construcciones.

Mediante los modelos matemáticos propuestos a utilizar en la metodología, se busca representar el comportamiento esperado que se puede llegar a tener según el nivel de afectación debido a problemas de subsidencia, aplicando hundimiento diferencial en los puntos de apoyo de la estructura. Dando como resultado el nivel de desempeño esperado de la estructura, de acuerdo al comportamiento deseado.

Normatividad

Las normas actuales de diseño estructural se basan en estructuras que resisten la afectación de fenómenos geológicos como lo son el sismo y los tornados (viento). Pero existen casos de edificaciones que son afectadas por otro fenómeno que es muy común en el estado de Aguascalientes, como lo es la subsidencia; dicho fenómeno se ha visto envuelto en ser la causa de afectaciones de vivienda, urbanización y edificaciones dentro de otras obras de ingeniería civil, poniendo a los habitantes de estas zonas afectadas en problemas económicos, sociales y de salud.

Para entender mejor el análisis que se desea realizar de tipo Pull-down, se debe entender primeramente la normativa que surgió a partir del diseño por desempeño sísmico, a partir de metodologías como lo es el Push-over. Para la revisión de normatividad se tomó en cuenta principalmente la americana como se muestra en las siguientes publicaciones.

En el año 1995 mediante la publicación de un documento llamado Vision 2000 (Structural Engineers Association of California (SEAOC), 1995) nació el diseño por desempeño de manera oficial.

Un año después, mediante la publicación “Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings”, realizada por el Consejo de Tecnología Aplicada, (Applied Technology Council (ATC), 1996), se estableció la primer norma para realizar un diseño por desempeño. Y poco tiempo después, se realizó otra normatividad realizada por la Agencia Federal para el Manejo de Emergencias (FEMA) en su documento “Nehrp guidelines for the seismic rehabilitation of buildings” (FEMA 273, 1997).

De acuerdo con el Dr. Ismael Hernández, (Hernández & Mora Pino, 2014); en el documento (FEMA 356, 2000) presenta los modelos para describir el comportamiento de los diferentes materiales utilizados para la construcción de un edificio, los procedimientos necesarios para determinar el comportamiento de una estructura, la rehabilitación de una construcción existente y el impacto de elementos no estructurales ante un sismo.

Con algunas actualizaciones y la mejora sustancial a los procedimientos no-lineales, se mejoró el método de espectro de capacidad y el método de los coeficientes; surgió el documento “Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures” por parte del (FEMA 440, 2005).

En el año 2013 se publica la norma sobre la evaluación sísmica y reforzamiento de edificios existentes; en la publicación “Example Application Guide for ASCE/SEI 41-13 Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings” publicado por (ASCE / SEI 41-13, 2013). La última actualización de normatividad acerca del diseño basado en desempeño es la publicada por (ASCE / SEI 41-17, 2017).

Para el diseño basado en desempeño por afectaciones ante el fenómeno de la subsidencia, no existe como tal una normatividad por la cual regirse, con lo que la intención de este trabajo es analizar la importancia de las afectaciones que se pueden llegar a presentar en nuevas edificaciones y en caso de considerarlo, generar normatividad acerca de esta problemática.

Sin embargo, para la realización de esta investigación se tomó como aspectos similares al diseño por desempeño sísmico, establecer los objetivos de diseño de la estructura y niveles de comportamiento ante problemas de subsidencia.

Principios fundamentales de mecánica estructural

“Creemos que un buen diseño se debe basar necesariamente en el conocimiento profundo de los principios fundamentales de la mecánica estructural, la comprensión cabal del comportamiento de las estructuras reales y la apreciación de sus relaciones con las estructuras idealizadas...” (Bresler, 1980)

Como bien menciona el profesor Bresler, es demasiado importante la comprensión precisa de los principios fundamentales de la mecánica estructural, así como también los de resistencia de materiales.

Ya que de acuerdo a el profesor Ferdinand “Es casi imposible desarrollar correctamente el diseño de estructuras o de máquinas sin un profundo dominio de la mecánica del cuerpo rígido y de la resistencia de materiales.” (Ferdinand, 1982)

Cuerpo Rígido: Un cuerpo rígido se considera como aquel objeto que no tiene deformaciones por efecto de fuerzas externas.

Marco estructural

Son sistemas estructurales que están formados por vigas, columnas y conexiones. Dentro de una de sus nomenclaturas se puede definir como dúctiles o rígidos. Esto dependerá de la capacidad del marco que tiene a oponerse a ser deformado ante una fuerza aplicada.

Otro tipo de característica que se le puede asignar a los marcos estructurales es en base al material del que están constituidos; los principales tipos son los de acero, concreto, madera y sistemas mixtos.

Distorsión angular

La distorsión angular es la deformación lateral o vertical de un cuerpo, definido como la tangente del ángulo de distorsión de la deformación del elemento.

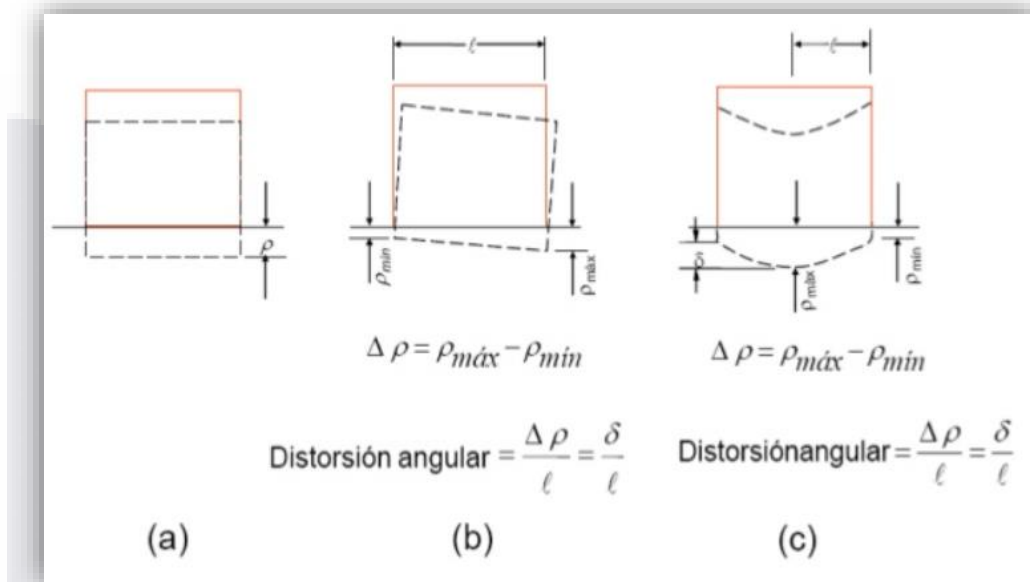


Ilustración 1. Tipos de asentamiento: a) Asentamiento uniforme, b) Volteo, c) Asentamiento no uniforme.

Para obtener el cálculo de la distorsión angular, es necesario obtener el diferencial en los asentamientos entre ambos apoyos ($\Delta\rho$), que se obtiene a partir de la diferencia entre el asentamiento máximo (ρ_{max}) y el mínimo (ρ_{min}). Después se realiza la división de ese diferencial entre la longitud entre los cuerpos desfasados (l).

Las distorsiones se pueden presentar ante desplazamientos verticales por hundimiento, como lo puede ser el fenómeno de la subsidencia; o por desplazamientos laterales debidos a fuerzas en la estructura, como lo provoca un fenómeno sísmico.

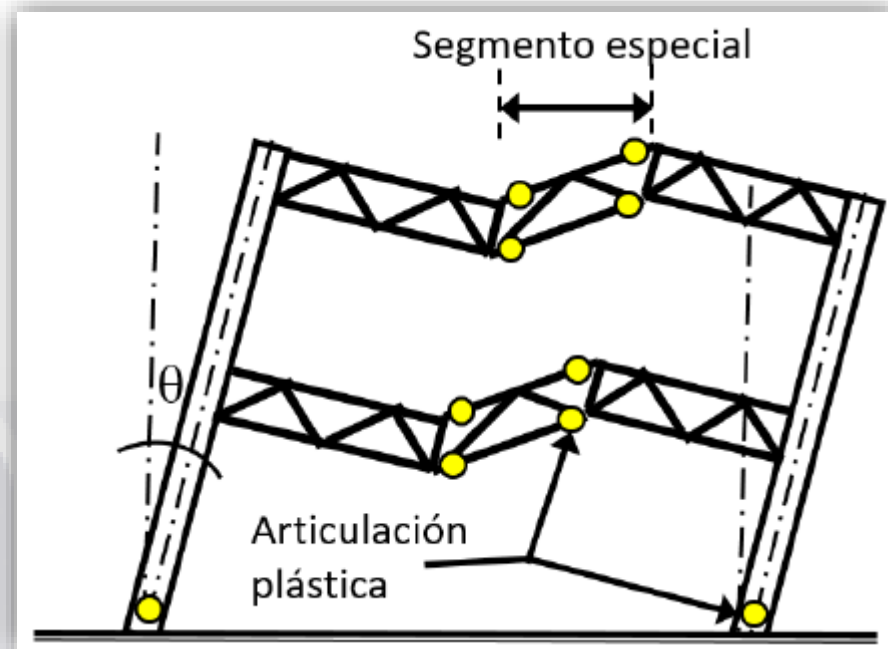


Ilustración 2. Distorsión angular aplicada en un marco estructural (Generación de articulaciones plásticas).

Articulaciones plásticas

Se puede definir como articulación plástica a la zona de cedencia de un elemento estructural como lo pueden ser vigas y columnas dentro de un sistema estructural; esta cedencia debido que se excede el momento plástico de una sección determinada. Por lo tanto, la sección deja de comportarse como un elemento elástico, de comportamiento lineal en sus materiales, ya que, al exceder su momento de agotamiento, se pierde la proporcionalidad de momento curvatura del elemento o a que la sección rota con un comportamiento similar al de un miembro que se encuentra articulado.

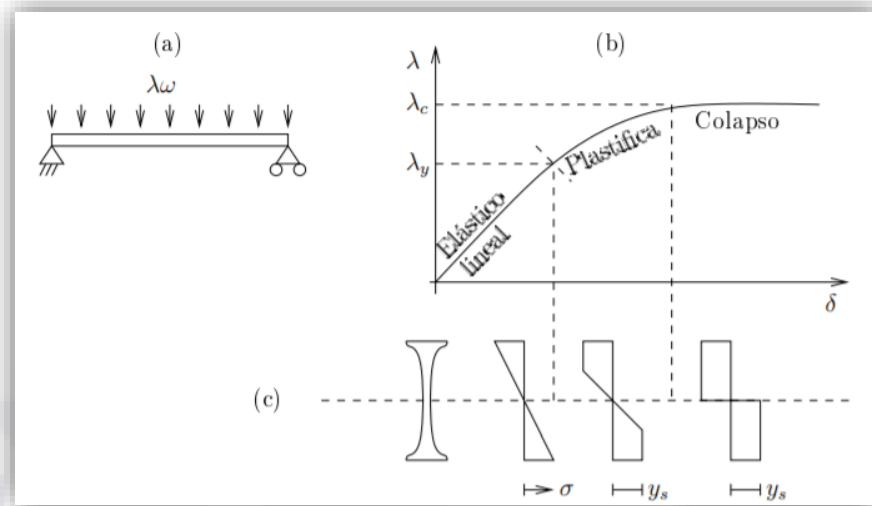


Ilustración 3. a) Viga simplemente apoyada. b) Curva de factor de carga- deformación.
c) Diagrama de esfuerzos en sección plástica.

En la fase elástico lineal de acuerdo a la hipótesis de Bernoulli de sección plana, la tensión es linealmente proporcional a la elongación. En la fase de plastificación, como su nombre lo dice es la etapa en la que se generan las rotulas plásticas debido a que se pierde la linealidad en el comportamiento de los materiales. Y en la etapa de colapso es cuando llegamos al punto máximo en el que el todos de los puntos de la sección llegan a su plastificación, provocando que la sección pierde su capacidad para resistir más carga, llevándola a su falla y el inicio de un posible mecanismo de falla en la estructura general.

Mecanismos de falla

Mecanismo de falla o también llamados mecanismos de colapso se produce cuando se tienen el número suficiente de articulaciones y en la posición adecuada dentro de un elemento, ya sean articulaciones plásticas o reales. Esta aparición de rotulas provoca un sistema inestable, donde bajo ninguna circunstancia es posible conservar el equilibrio de la estructura analizada; y a pesar de que las cargas externas a la estructura permanecen constantes, las deformaciones de los elementos pueden seguir aumentando.

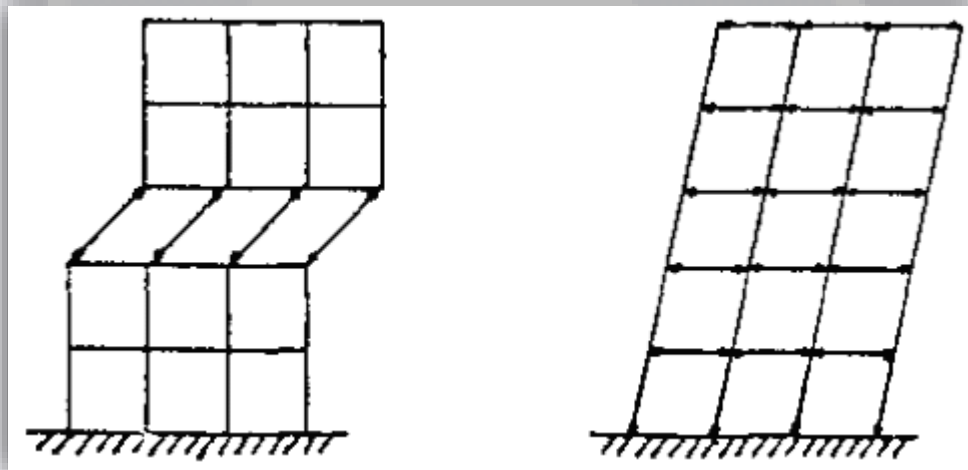


Ilustración 4. Mecanismo de falla en Columnas y en vigas.

Para realizar una estructura segura, siempre es deseable respetar la regla de columna fuerte y viga débil. A lo que siempre se debe buscar que se genere el mecanismo de falla en vigas y al final en columnas, ya que las reparaciones en vigas son más viables y más seguras que en columnas, donde estaríamos buscando un colapso más inminente.

Análisis estructural

El análisis estructural es el proceso de cálculo que permite predecir de una manera bastante precisa, el comportamiento de una estructura que será sometida ante ciertas cargas o fenómenos externos como lo son desplazamientos en los apoyos, cambios de temperatura drásticos, que afectan el comportamiento de los materiales. Este análisis es la herramienta que permite a los ingenieros diseñadores garantizar la seguridad de una estructura ante las solicitaciones de cargas estimadas para las que fue diseñada.

El análisis estructural se enfoca en 3 características principales:

1. En los 2 tipos de esfuerzos a los que puede ser sometido un cuerpo:
 - 1.1. Esfuerzos normales: Es el esfuerzo obtenido al aplicar las fuerzas axiales sobre la sección transversal de un cuerpo.
 - 1.2. Esfuerzos tangenciales: Es el esfuerzo interno provocado por las fuerzas (tensiones) paralelas a la sección transversal de un cuerpo.
2. Deflexiones: Se refiere al cambio de forma que sufren los elementos al someterse a un estado de fuerzas. En la resistencia de materiales se estudia la relación geométrica y las fuerzas aplicadas, obteniendo un análisis de fuerza-deformación. (Ferdinand & Andrew , Resistencia de Materiales, 1982)
3. Reacciones en los apoyos: Se refiere a las fuerzas de apoyo, que al sumarse a las cargas externas ejercidas sobre un cuerpo dando como resultado cero; permiten que el cuerpo se encuentre en equilibrio. (McCormac, 1983)

Tipos de Análisis Sísmicos

De acuerdo con el Ing. Freddy Lanza, Profesor en la Universidad de Carabobo (UC) (Lanza, 2020), en su seminario web “Selección y escalado de movimientos sísmicos para la aplicación del método de análisis dinámico inelástico de respuesta en el tiempo”, se presentan a continuación los diferentes tipos de análisis sísmicos:

1. Análisis estático: Es una idealización cuasi-estática o simplificada del análisis dinámico que es usado para la estimación de fuerzas sísmicas, también conocido como el método estático equivalente (MEE)
2. Análisis Modal: Este tipo de análisis estructural es más aproximado, toma en cuenta los grados de libertad dinámicos de una estructura, los cuales son relacionados como la interacción de múltiples ecuaciones de movimiento.

$$[m]\{\ddot{u}\} + [k]\{u\} = 0$$

$$[k] - [m] = 0$$

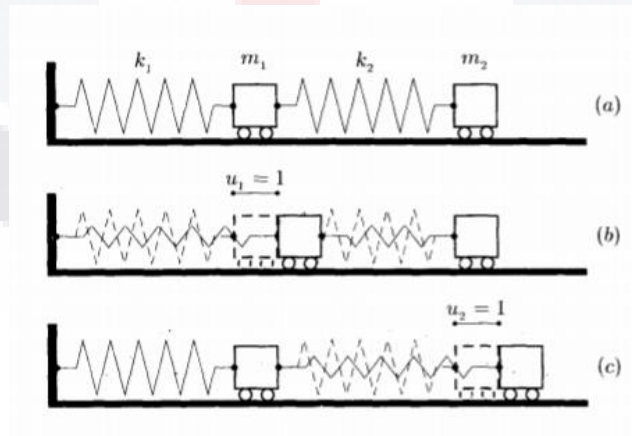


Ilustración 5. Construcción de la matriz de rigidez.

- TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS
3. Análisis Modal Espectral: Este tipo de análisis estructural toma en cuenta los parámetros obtenidos en el análisis modal para obtener las fuerzas sísmicas que son generadas en cada modo de vibración, tomando en cuenta la participación de las masas en cada uno, asumiendo que cada modo se comporta como un sistema de 1 GDLD.
 4. Análisis de respuesta en el tiempo: Este tipo de análisis estructural toma en cuenta como entrada la información obtenida a través de un registro de aceleraciones o desplazamientos. Permite realizar un análisis modal paso a paso de la estructura tomando como base, la historia de desplazamientos o aceleraciones, permite obtener la variación de las solicitaciones a medida que cambia la señal de entrada en la base del modelo estructural.
 5. No linealidad geométrica (Efecto P- Δ): Este tipo de análisis estructural toma en cuenta efectos de segundo orden que se originan en una estructura esbelta, donde se toman en cuenta el incremento de las solicitaciones debido a los grandes desplazamientos que se generan en el tope de la edificación.
 6. Análisis No lineal Estático: Este análisis estructural toma en cuenta el deterioro progresivo de las secciones que conforman una estructura, cuando se le somete a una condición de carga incremental (monotónicamente creciente). Este tipo de análisis es el utilizado para aplicar las metodologías alternativas de diseño sísmico como lo son: Push-over y diseño por desempeño.
 7. Análisis Dinámico inelástico de respuesta en el tiempo: Este análisis toma en cuenta el deterioro progresivo de las secciones que conforman una estructura, cuando se le somete a una condición de carga incremental de naturaleza variable en el dominio del tiempo.

Análisis no lineal

La no linealidad es un sistema en el que la sumatoria de sus componentes fragmentados no es la misma que la de sus componentes unificados, entendiendo que no existe una relación lineal directa entre dichos componentes, estableciendo de tal manera que no aplica en este sistema el principio de la superposición.

El análisis no lineal en el ámbito de la ingeniería estructural sabemos que existen dos tipos, tales como la no linealidad en el comportamiento de los materiales y la geométrica. De acuerdo a el concepto del maestro en Ingeniería Estructural Ronnie Antonio Maldonado Tapia

Un análisis no lineal es aquel que considera el comportamiento tenso-deformacional de los materiales y la no linealidad geométrica, descartando de manera directa el principio de superposición. En las estructuras de hormigón, el comportamiento elástico-lineal difiere en gran medida del observado experimentalmente, especialmente cuando éstas se encuentran bajo niveles elevados de carga. Esto se debe a los fenómenos intrínsecos de los materiales que componen a estas estructuras ..., su interacción y su proceso constructivo (Maldonado Tapia, 2012)

Complementando la idea del ing. Maldonado, el análisis no-lineal es llevar un análisis más allá del comportamiento elástico de los materiales; llevándolo a su análisis plástico para tratar de acercarse más, al comportamiento real de los elementos principales que componen las estructuras al sobrepasar su comportamiento elástico.

Análisis estático no lineal

El análisis estático no lineal calcula los desplazamientos, las deformaciones unitarias, las tensiones y las fuerzas de reacción bajo el efecto de cargas aplicadas. Todas las cargas se aplican lenta y gradualmente hasta que alcanzan sus magnitudes completas.

Métodos usuales de diseño sísmico

Para el análisis sísmico como ya se mencionó anteriormente se tienen distintos tipos de análisis sísmicos, como los estáticos, dinámicos, y en cuanto al comportamiento de los materiales o comportamiento geométrico de la estructura, serán análisis lineales o no lineales.

Pero como se ha mencionado en este trabajo de investigación el enfoque solo es entender el tipo de análisis Push-over para realizar una modificación a la metodología y determinar una nueva para la realización de un análisis de tipo Pull-down.

Actualmente ya es muy común el uso de modelos que permitan recrear la interacción suelo estructura, para ver de manera más aproximada los resultados esperado de un proyecto estructural, pero es poco común la aplicación de desplazamientos obligados en los puntos de apoyo de la cimentación que representen los efectos provocados por el fenómeno de la subsidencia.

Análisis Push-over

El método consiste en aplicar una distribución vertical de carga lateral a la estructura, la cual debe de incrementarse monótonamente hasta que la estructura alcance el máximo desplazamiento, mediante la gráfica del cortante basal y el desplazamiento en la parte superior de la estructura; como se muestra en la siguiente figura:

El Ing. Alejandro Ramírez, ahora doctor egresado de la Universidad Autónoma de Aguascalientes, propone 3 pasos para la realización de un análisis Push-over, que se muestran a continuación:

1. Se modela el edificio incorporando la respuesta inelástica de los materiales en los nudos de los miembros.
2. Se aplica monótonamente (en intervalos y con una misma magnitud de fuerzas o desplazamientos) un incremento de fuerzas laterales o desplazamientos a un modelo matemático no lineal de un edificio, hasta que el desplazamiento del nodo de control (en azotea), exceda un desplazamiento determinado (...) o el colapso del edificio.
3. Se utiliza la gráfica de la curva de fuerza contra deformación para evaluar el desempeño de los miembros individuales una vez que se confirmó que el desplazamiento de la estructura total existe dentro del rango del punto de desempeño. (Ramírez Cortés, 2015).

Análisis Pull-down

Para la realización de un análisis Pull-down, también estamos hablando de un análisis estático no lineal que permitirá ver el comportamiento gradual de la estructura según sus fases de hundimientos en los distintos puntos de apoyo.

El Ing. Ramírez también menciona en su trabajo de tesis doctoral, la manera de realizar un análisis Pull-down basándose primordialmente en el de Push-over con algunas adaptaciones.

La metodología Pull-down que se está proponiendo para evaluar el desempeño de edificaciones dañadas por subsidencia, solo presenta dos variables respecto a la del método Push-over, la primera es la de asignar asentamientos diferenciales en algunos nudos de apoyos donde se esté presentando la deformación en la edificación, y la segunda en vez de motorizar las deformaciones horizontales de azotea que se obtienen con el análisis Push-over, se monitorizaran las deformaciones verticales que se generen en los nudos de control en los apoyos de la estructura, también seleccionados anticipadamente para detectar la evolución de los asentamientos. (Ramírez Cortés, 2015).

Para la realización de un diseño por desempeño se propone realizar la transformación de los pasos a seguir:

- 1) Determinación de la magnitud de hundimiento en los puntos de apoyo en los que se espera que existan efectos de subsidencia.
- 2) Objetivos de diseño de la estructura. Con este paso lo que es muy importante destacar es el nivel de desempeño que estaremos dispuestos a permitir ante las solicitaciones provocadas por el hundimiento determinado. En una comparativa de costo-beneficio
- 3) Niveles de comportamiento esperado. En donde encontraremos la relación más óptima para los puntos anteriores de objetivos de diseño y hundimientos determinados.

Diseño por Desempeño

“Los objetivos del diseño sísmico de obras de ingeniería son bien conocidos: se pueden resumir en el logro de un equilibrio adecuado entre los costos de construcción y de mantenimiento y los riesgos aceptables de daños o fallas durante la vida útil de cada obra”, (Esteva Maraboto, 2001)

El termino de diseño basado en desempeño surgió de manera oficial en el año 1995 con el documento Vision 2000 publicado por la Structural Engineers Association of California (SEAOC); poco tiempo después, en el año siguiente se estableció la primera norma para realizar un diseño basado en desempeño en la publicación “Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings” por el Consejo de Tecnología Aplicada (ATC). Así como una segunda normatividad publicada por la Federal Emergency Management Agency (FEMA), en su documento “Nehrp guidelines for the seismic rehabilitation of buildings” un año más tarde.

Estas publicaciones han sufrido una serie de actualizaciones, buscando mejorar los métodos que permitan representar de manera más realista al comportamiento de las estructuras ante los efectos sísmicos. La última actualización para la metodología del diseño basado en desempeño fue la publicada por la American Society of Civil Engineers (ASCE) y el Structural Engineering Institute (SEI), en el año 2017.

El hecho de que se construyan las edificaciones con la normatividad del país, no asegura que las construcciones después de un evento sísmico o cualquier otro fenómeno, tengan el desempeño óptimo que permita seguir haciendo uso del inmueble, ya que como se ha dicho anteriormente, las normas actuales en el caso de México tienen un enfoque de cumplimiento, mas no de saber cómo quedarán las estructuras después de sucedido el fenómeno; esto, incurriendo en que en el caso de pretender hacer uso de las instalaciones es necesario ejercer una serie de reparaciones para su

posterior reactivación. El diseño por desempeño es la metodología que permite encontrar el punto óptimo entre el costo y beneficio de la construcción, mediante análisis probabilísticos y la determinación de costos de reparación del proyecto analizado. En el método de diseño por desempeño que actualmente se usa para realizar análisis sísmicos, se debe empezar a considerar su aplicación ante el fenómeno de la subsidencia. En el estado de Aguascalientes, y en algunas partes del mundo que sufran de problemas de subsidencia en el suelo, un análisis por desplazamientos provocados por este fenómeno, que en muchos de los casos llega a afectar de manera importante las propiedades mecánicas y los esfuerzos en los elementos de las edificaciones.

El método de diseño por desempeño es utilizado para generar estructuras más confiables, hablando del bienestar de salud, económico y social. Desde el punto de vista de la salud, se hace referencia a que se desea realizar diseños con más seguridad, debido a que con los diseños anteriores aún siguen teniendo grandes afectaciones ante un fenómeno como lo son los sismos, huracanes y el del objeto de estudio de esta investigación, la subsidencia; también desde el punto de vista económico, se pretende buscar un beneficio para las personas que habitan y a los dueños de las edificaciones, una seguridad de que ante un fenómeno de esta magnitud sus construcciones puedan seguir operando de una manera más rápida y más eficiente, en el caso específico del diseño por desempeño sísmico, ante sismos de gran magnitud con un periodo de retorno más alto no solo buscar que soporten el sismo, si no ver más allá de cómo sería su funcionamiento después de ocurrido este fenómeno, esto de acuerdo al desempeño que se desea esperar para la edificación, de acuerdo a la ilustración que se muestra a continuación.

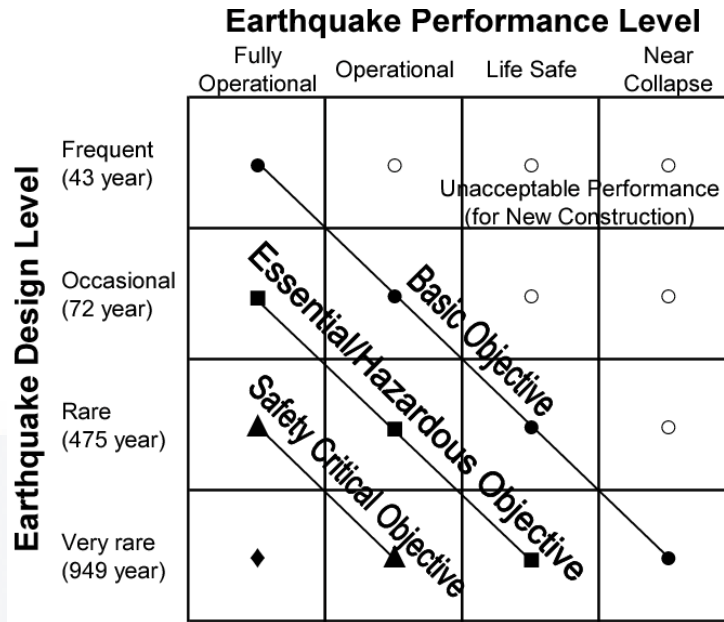


Ilustración 6. Desempeño sísmico recomendado obtenido por Vision 2000

Desde el punto de vista de un bienestar social, se puede ver en muchos estados del país, edificaciones bastante dañadas por las afectaciones ante fenómenos naturales como lo son los sismos y la subsidencia; estas edificaciones son un aspecto de una ciudad dañada, y poco preparada en cuanto a sistemas estructurales, así como también crean una inseguridad para las personas que se encuentran cercanas a ellas poniendo en riesgo la vida de personas, porque esas edificaciones dañadas pueden o no estar en peligro de colapsar ante un comportamiento estático, pero si llegara a existir otro fenómeno con este tipo de características, serían los edificios más propensos a un colapso inmediato.

Clasificaciones de Desempeño Estructural

De acuerdo con el documento Vision 2000, anteriormente mencionado, se sabe que los niveles de desempeño que presenta una estructura son los siguientes.

- Completamente operacional: Los daños estructurales y no estructurales presentados después de un sismo serán despreciables.
- Ocupación inmediata: El edificio podría presentar agrietamiento en elementos estructurales, y daños moderado en elementos arquitectónicos, mientras que sistemas de evacuación y seguridad funcionarán con normalidad.
- Seguridad de vida: Tras un sismo, el edificio presentará daño moderado en algunos elementos, pérdida de resistencia y rigidez del sistema resistente de cargas laterales, pero el sistema permanecerá funcional.
- Prevención de colapso: Podrían presentarse daños severos en elementos estructurales y fallo de elementos secundarios, no estructurales y contenidos.

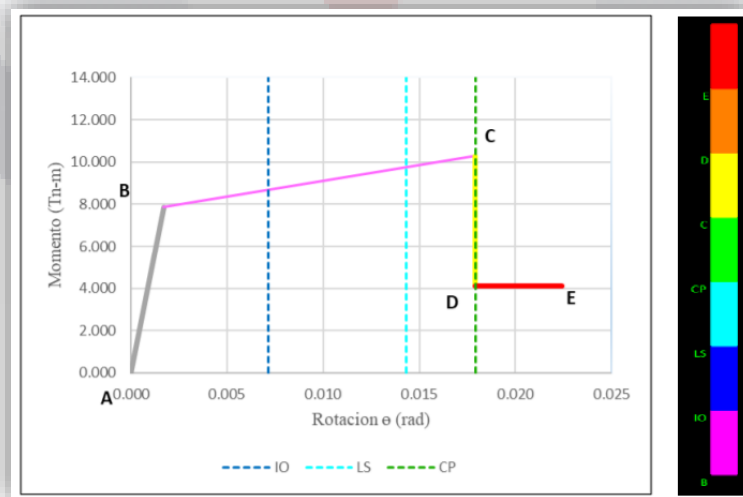


Ilustración 7. Ejemplo de diagrama de Momento-rotación (Desempeño estructural).

Subsidencia

Para entender acerca del fenómeno de la subsidencia, recurrimos en primer instancia a él (Gran Diccionario de la Lengua Española, 2020) en el que dice que el fenómeno de subsidencia se presenta el hundimiento progresivo de la superficie del terreno como consecuencia de trabajos de minería, colapso de cavidades subterráneas, extracción de agua o de petróleo, o desecación. Complementado a la definición del diccionario de la lengua española, de acuerdo a la Doctora Patricia Julio Miranda, investigadora de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

Este fenómeno geológico es subterráneo, producto de la disolución de materiales profundos y tiene diversas causas. Sus efectos son notorios en la superficie por que daña el terreno, las construcciones en el lugar y el sistema de agua y drenaje, en la actualidad se ha generalizado en el mundo y en México debido a la acción humana extractiva. (Julio Miranda, 2015)

Esa acción humana extractiva en gran parte de los casos se debe a la extracción de agua del subsuelo, cuando éste está constituido por material granular poroso, tiene como consecuencia la generación de hundimientos graduales del suelo por consolidación. “Cuando la base del acuífero es irregular se pueden presentar, asociados a los hundimientos, fallamientos del suelo en la forma de grietas o desplazamientos verticales del terreno” (Pacheco Martínez, 2007).

Como es posible notar, la subsidencia no es un fenómeno natural que se pueda hacer a un lado y no considerarlo para los diseños estructurales de construcciones que se encuentren ubicados en zonas de peligro por subsidencia, y es necesario empezar a realizar los diseños por desempeño ante las afectaciones por la subsidencia con análisis de tipo Pull-down, basándose en el desempeño deseado para ese proyecto, según sea el tipo de obra a ejecutar con los niveles de desempeño establecidos.

De acuerdo al artículo publicado acerca de las grietas del suelo relacionadas con el hundimiento de la tierra, (Pacheco Martínez, Zermeño de León, & Ortíz Lozano, 2011) se logra observar los distintos mecanismos de falla que se pueden ocasionar por el fenómeno de la subsidencia:

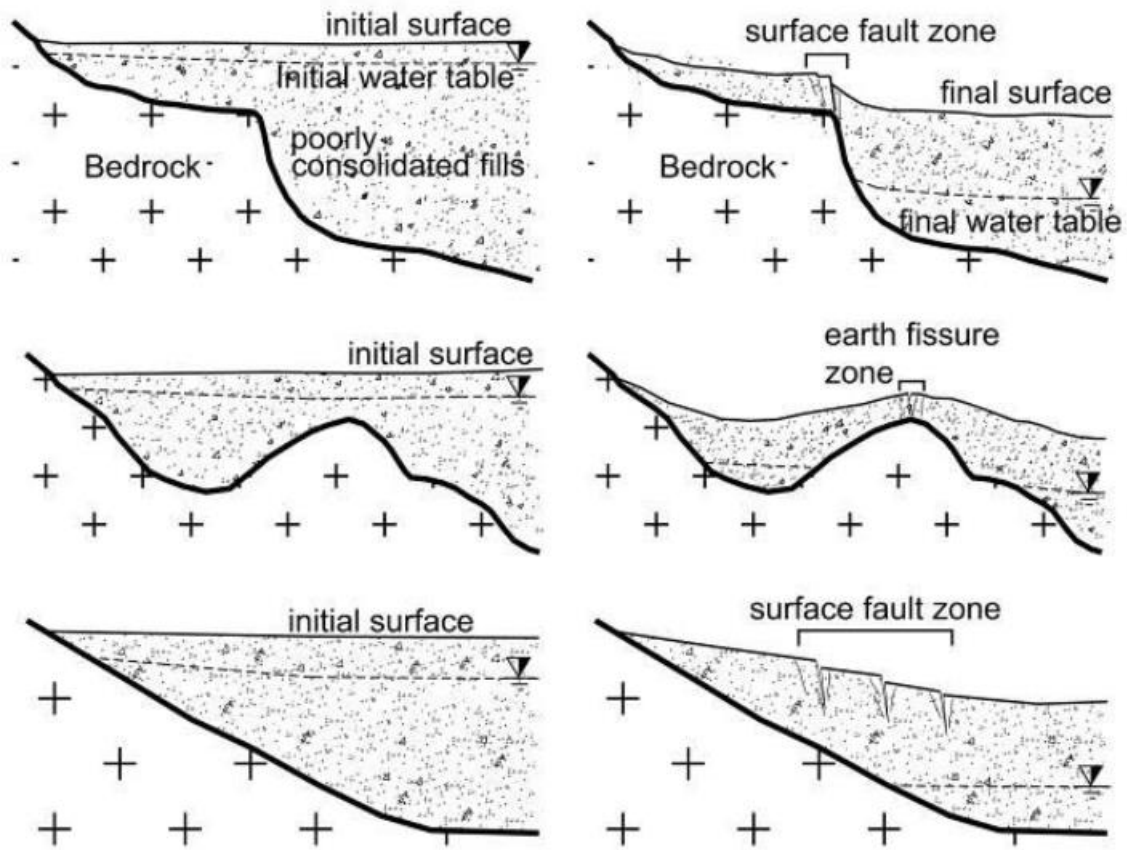


Ilustración 8. Configuración de basamento rocoso para fisuras de tierra y fallas superficiales.

Modificado de Carpenter (1999)

Vulnerabilidad

Partiendo de la definición presentada por la United Nations Disaster Relief Organization (UNDRO, 1979) en colaboración con la United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO, 1979), en su documento “Desastres naturales y análisis de vulnerabilidad”, decimos que:

La Vulnerabilidad es como el grado de pérdida de un elemento o grupo de elementos bajo riesgo, resultado de la probable ocurrencia de un evento desastroso, expresada en una escala que va de 0, o sin daño, a 1, o pérdida total.

Para entender el termino de vulnerabilidad aplicado en la construcción y el desarrollo de las ciudades, la definiremos como la susceptibilidad o propensión de los sistemas expuestos a ser afectados o dañados por el efecto de un fenómeno perturbador. Dicho en otras palabras, es la capacidad que tienen las edificaciones para resistir las afectaciones que pueden ser causadas por los efectos de un fenómeno, ya sea sísmico, de huracanes, explosiones, y en el enfoque de esta investigación, de subsidencia.

La Exposición o Grado de Exposición

Se refiere a la cantidad de personas, bienes y sistemas que se encuentran en el sitio y que son factibles de ser dañados. Por lo general se le asignan unidades monetarias puesto que es común que así se exprese el valor de los daños, aunque no siempre es traducible a dinero. En ocasiones pueden emplearse valores como porcentajes de determinados tipos de construcción o inclusive el número de personas que son susceptibles a verse afectadas.

Modelos determinísticos

"Todos los efectos de la naturaleza son tan solo las consecuencias matemáticas de un pequeño número de leyes inmutables. " P. S. Laplace

Para entender un poco acerca de los modelos determinísticos este trabajo se basó en las ideas y leyes propuestas por Pierre-Simon Laplace y su teoría de la probabilidad.

“Un modelo determinista es un modelo matemático donde las mismas entradas o condiciones iniciales producirán invariablemente las mismas salidas o resultados, no contemplándose la existencia de azar, o incertidumbre en el proceso modelada mediante dicho modelo”.

Los modelos determinísticos permiten predecir el comportamiento esperado de un modelo, en la aplicación de esta investigación se sugiere que para la determinación de una metodología se puede partir de modelos determinísticos que permitan eliminar algunas variables como lo es la probabilidad de la ocurrencia de problemas por subsidencia en un terreno, esto para realizar un procedimiento que se enfoque en la creación de la metodología, partiendo de que se sabe cuál es el hundimiento esperado en los puntos de apoyo, ya que esa sería una variable que no afecta a la elaboración de la metodología.

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

METODOLOGÍA

Contexto de la metodología para un análisis Pull-down

La metodología es una de las etapas específicas de este trabajo de investigación que parte de una posición teórica y conduce una selección de técnicas concretas acerca del procedimiento a la realización de tareas vinculadas a la investigación.

El objetivo de esta metodología es determinar los procesos a seguir para la realización de un análisis estático no lineal del tipo Pull-down, mediante el cual se pretende modelar el comportamiento de una estructura afectada por el fenómeno de la subsidencia; generando el hundimiento del suelo en algunos de sus puntos de apoyo. El procedimiento en el programa SAP2000 que se asocia a los asentamientos diferenciales provocados por la subsidencia, se realizará mediante desplazamientos forzados en los nodos de la base de la estructura.

La intención de crear una metodología para realizar análisis de tipo Pull-down; es que, al estar establecida permitirá en un futuro generar análisis asociados a la subsidencia de manera más sencilla, así como establecer más variables que permitan conocer con mejor proximidad el comportamiento de las estructuras.

La metodología pretende explicar paso a paso los procesos para realizar la revisión mediante el análisis propuesto. Para la elaboración de dicho análisis es conveniente partir de tener un modelo revisado con sus análisis correspondientes, como el de cargas gravitacionales, diseño sísmico y cargas de viento; excluyendo las afectaciones que pudiera tener por el fenómeno de la subsidencia. A partir de ese análisis previo, se sugiere aplicar la metodología Pull-down para analizar las afectaciones que se pudieran presentar ante los efectos de hundimientos diferenciales e identificar

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

los cambios en el desempeño de la estructura que ocurren por la realización del análisis. Ya que, si se realizan todos los análisis necesarios correspondientes a esa estructura al mismo tiempo, se tendrá muchas variables que no dejarán identificar los cambios ocurridos, debido a cada circunstancia que posee la edificación.

En este trabajo se pondrá un ejemplo de un modelo simplificado que permita entender el procedimiento, sin embargo, la parte del análisis ante cargas gravitacionales y los efectos debido a otros fenómenos, pudieran realizarse con un procedimiento diferente, ya que la manera de realizar ese tipo de análisis puede variar de acuerdo al criterio del diseñador estructural. Como ya se mencionó anteriormente para fines prácticos de la investigación se generará un modelo a partir de una estructura esquelética, enfocando la metodología al análisis de la estructura; dejando a un lado criterios de predimensionamiento, de determinación de los materiales con los que se construirá el proyecto, tomando para esta investigación una edificación a base de marcos de concreto armado. Siendo que esas variables mencionadas anteriormente no afectan a la realización de la metodología. Aunque sí podrían arrojar resultados diferentes; pero eso como ya se dijo, se debería a causas externas al análisis Pull-down.

Para investigaciones posteriores se recomienda realizar análisis combinados en los que se puedan ver las afectaciones de edificios con problemas de subsidencia y análisis sísmico; ya que este tipo de efectos combinados podría incrementar la vulnerabilidad de la infraestructura de las ciudades, así como sugiere la Dra. Dora Celia Carreón Freyre en su reporte “Posible influencia de la subsidencia y fracturamiento en la Ciudad de México en las construcciones dañadas por el sismo del 19 de Septiembre de 2017” (Carreón Freyre, 2017). Esto comenzando a desprender un conjunto de investigaciones bastante interesantes a realizar; pero se debe ser conscientes de que los avances tienen que ser firmes en lugar de rápidos, para llegar a conclusiones válidas.

Variables del análisis Pull-down

Variables independientes

- Asentamientos diferenciales en los puntos de apoyo de la estructura.
- Geometría de estructura de marcos rígidos (Niveles, estructuración, extensión, materiales de construcción).
- Nivel de desempeño esperado en el análisis.

Variables dependientes

- Comportamiento mecánico de los elementos estructurales.
- Composición de diseño de los elementos estructurales. (Secciones y armados)
- Graficas de momento-curvatura de los marcos afectados.

Alcances de la metodología

Esta metodología tiene un alcance explicativo porque utilizando información de otras investigaciones que se realizaron afines al tema, se propondrá un conjunto de pasos a seguir para realizar un análisis por desempeño de tipo Pull-down para estructuras verticales a base de marcos rígidos que permita mejorar los diseños estructurales, tomando en cuenta los efectos que causa la subsidencia en las construcciones de obra civil.

Características de la estructura

➤ Geometría de estructura:

- La estructura a modelar será de un proyecto de edificación vertical, compuesta por marcos estructurales de 3 vanos de 8 mts. en cada dirección, teniendo como longitud total 24 mts. en cada dirección creando 9 tableros de 64m^2 ; como se muestra en la ilustración que se encuentra a continuación.
- El edificio será de 10 niveles con una altura de entrepiso de 3 mts.; obteniendo una estructura con una altura total de 30 mts.

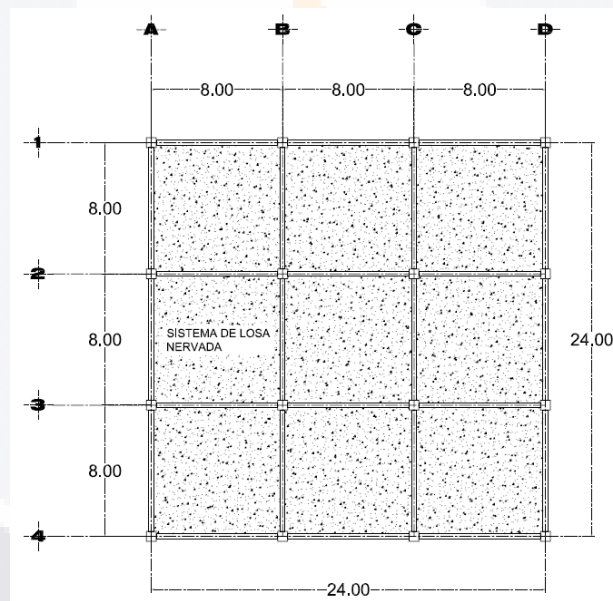


Ilustración 9. Planta estructural tipo (Para fines del análisis no se consideraron huecos en la losa)

➤ Materiales:

- Concreto $f'c=250\text{ kg/cm}^2$
- Acero de refuerzo $f_y=4200\text{ kg/cm}^2$

➤ Secciones:

- Columnas: 60x60 cm
- Vigas: 30x60 cm

➤ Cargas de servicio y factorizadas:

○ Entrepiso

- Carga Muerta (CM): $530 \text{ kg/m}^2 * 1.2 = 636 \text{ kg/m}^2$
- Carga Viva (CV): $200 \text{ kg/m}^2 * 1.6 = 320 \text{ kg/m}^2$

○ Azotea

- Carga Muerta (CM): $615 \text{ kg/m}^2 * 1.2 = 738 \text{ kg/m}^2$
- Carga Viva (CV): $100 \text{ kg/m}^2 * 1.6 = 160 \text{ kg/m}^2$

➤ Sistema de losa: Sistema de losa a base de nervaduras con 30cm de peralte en dos direcciones y trabes peraltadas para lograr un sistema de losa perimetralmente apoyada.

➤ Restricción en apoyos: todos los apoyos serán de tipo empotramiento para la 1° parte del análisis, ya que en la segunda parte se tendrá que liberar la restricción en sentido vertical (U3) en el nodo de control, para asignar el desplazamiento obligado, para la simulación del hundimiento provocado por subsidencia.

Procedimiento de metodología

1. 1º Etapa del análisis: Creación de modelo a analizar ante cargas gravitacionales con análisis no lineal

1.1. Primero se establece la geometría de la estructura a modelar.

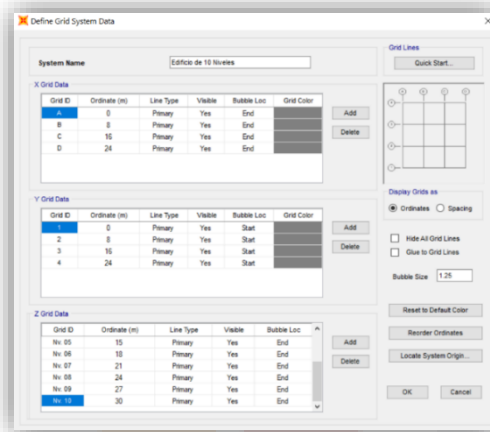


Ilustración 10. Definición de la geometría del modelo

1.2. Creación del modelo esquelético tridimensional.

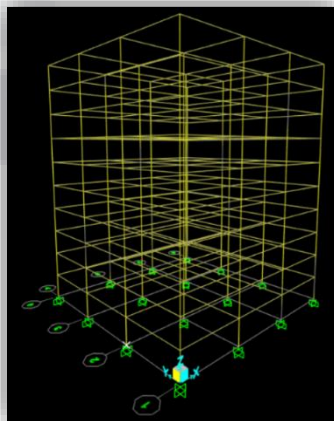


Ilustración 11. Esqueleto de modelo en 3D; con empotramiento en los apoyos.

1.3. Definición de materiales y las secciones a utilizar.

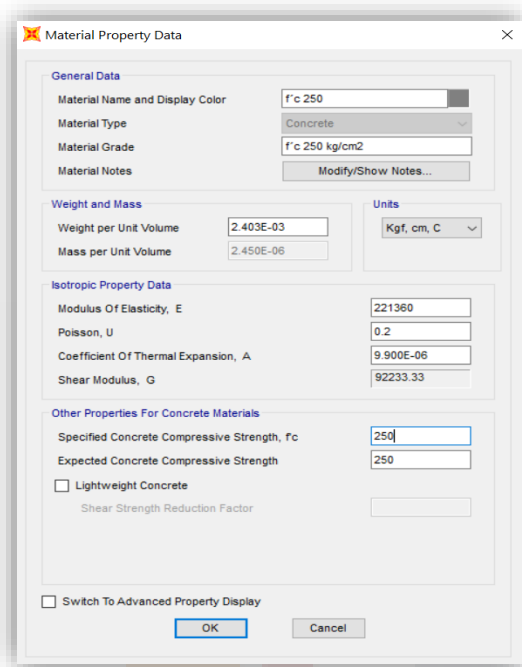


Ilustración 12. Propiedades del concreto f'c=250 kg/cm2

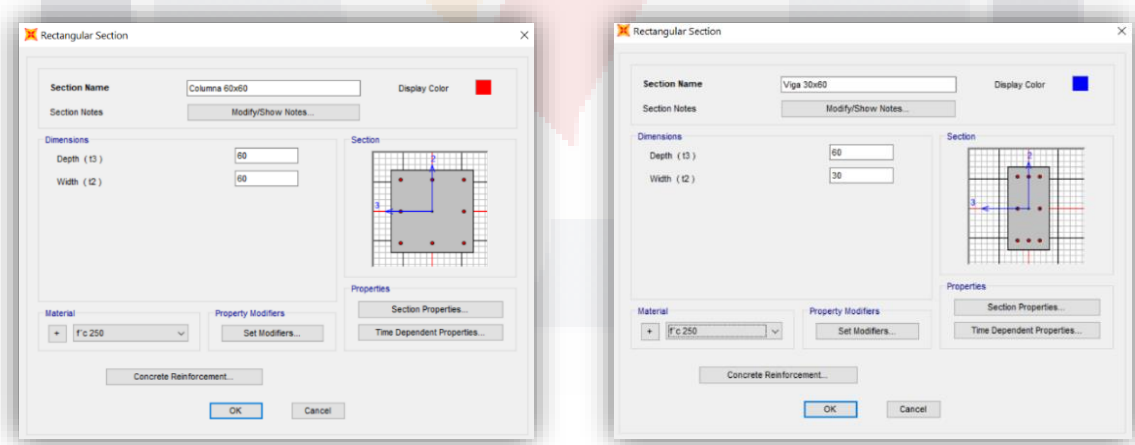


Ilustración 13. Ilustración 8. Creación de Columna de 60x60 y Viga de 30x60
(Ambas de concreto reforzado con f'c=250kg/cm2)

1.4. Definición de patrones de carga: Como patrones de carga en la primera etapa del análisis solo se considerarán, la carga muerta que se combinó con el peso propio de la estructura (CM+PP) y la carga viva (CV).

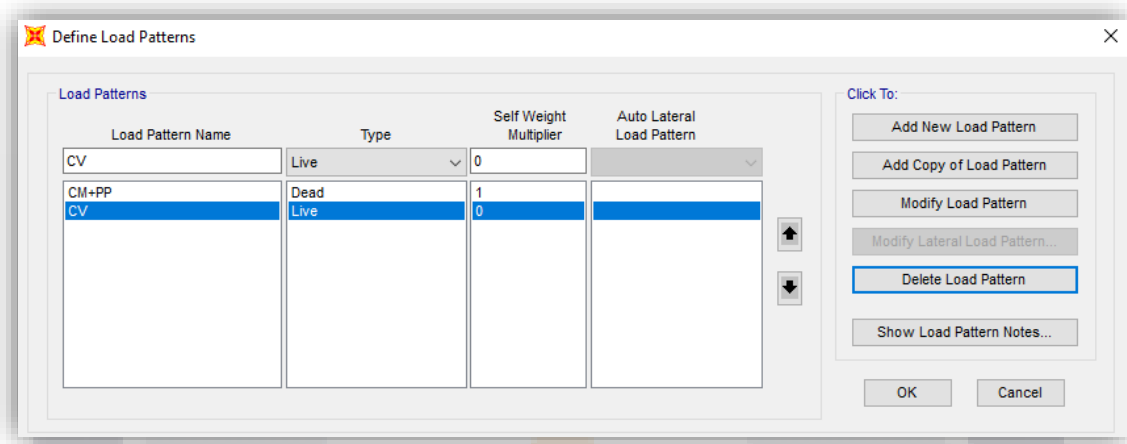


Ilustración 14. Patrones de carga.

1.5. Definimos los casos de carga: Tendremos únicamente el caso de carga “Modal” y el caso de carga gravitacional No Lineal (CGNL), para esta primera etapa de análisis

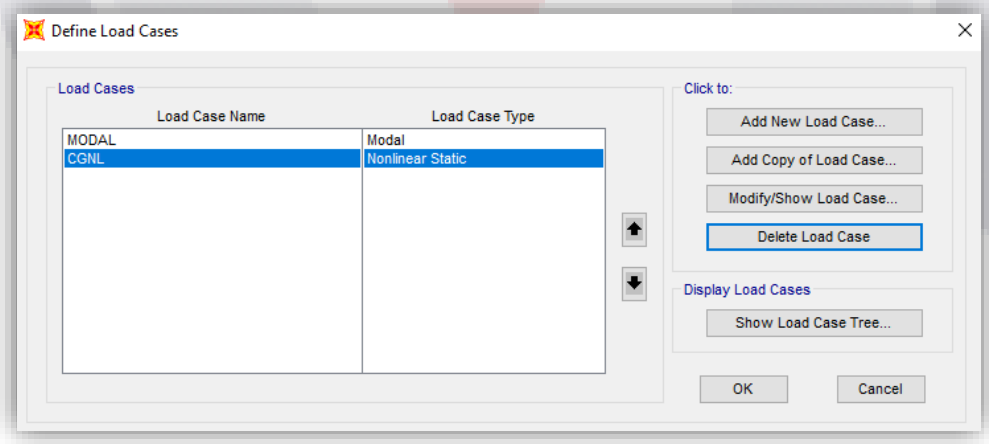


Ilustración 15. Casos de carga (CGNL).

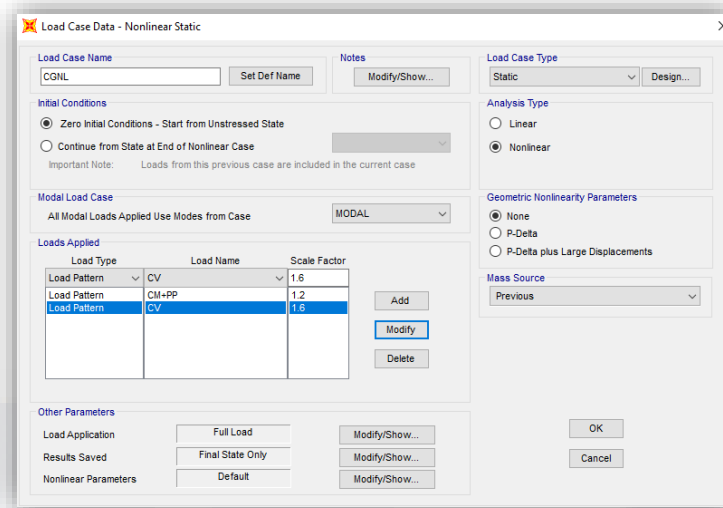


Ilustración 16. Definición de caso de Carga Gravitacional No lineal

1.6. Asignaremos las secciones a los elementos del modelo: las vigas con una sección de 30x60cm y a las columnas una sección de 60x60cm con un $f'c=250\text{kg/cm}^2$.

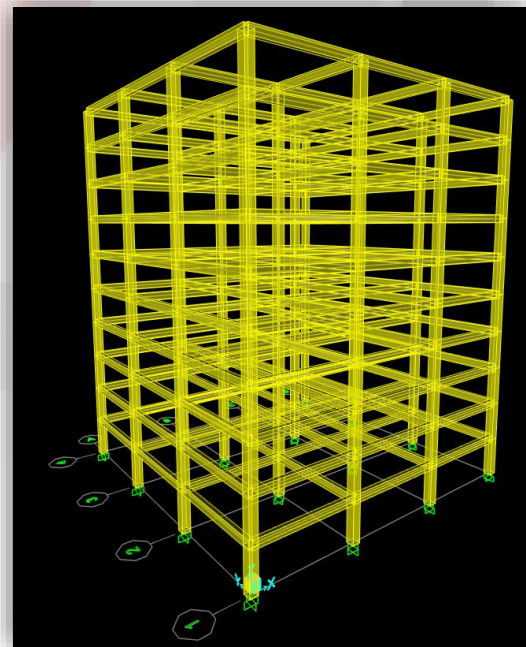
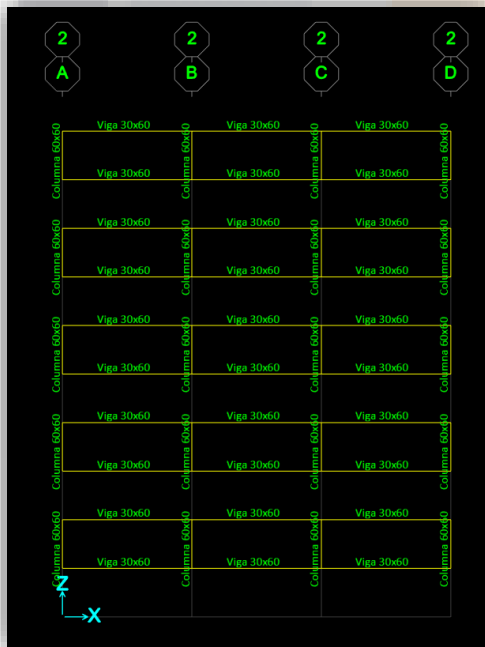


Ilustración 17. Secciones en Vigas y Columnas.

Ilustración 18. Modelo tridimensional (Vista extruida).

1.7. Después deberemos de colocar las cargas a los elementos viga, que llevaran correspondiente a sus áreas tributarias. Como se muestra en las siguientes ilustraciones:

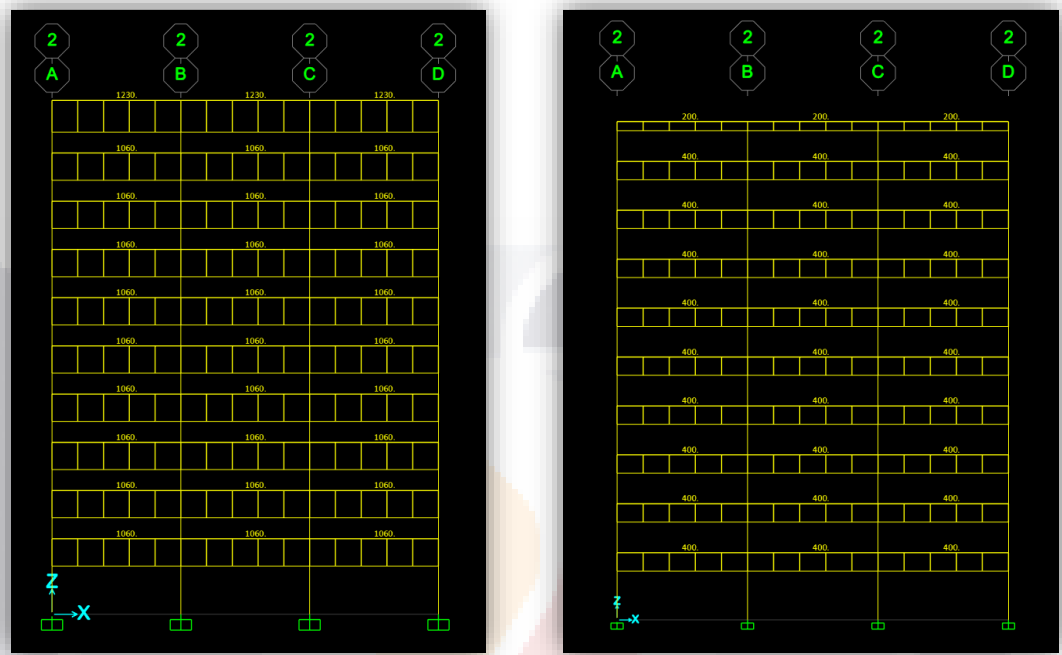


Ilustración 19. Asignación de cargas a Estructura (CM+PP) y (CV).

1.8. Se debe guardar el modelo y correrlo para ver los resultados obtenidos.

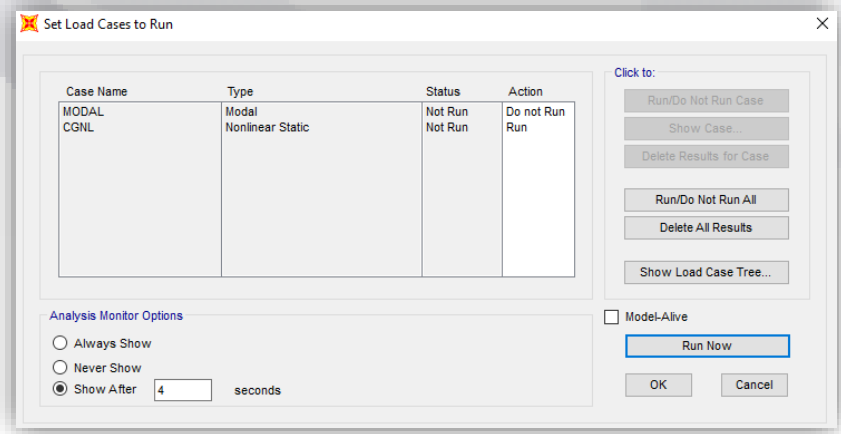


Ilustración 20. Determinación de casos de carga a correr.

1.9. Observar los resultados que se generan del 1º análisis del modelo. Obteniendo todos los elementos mecánicos de los componentes principales como los son las vigas y columnas de los marcos estructurales; se sugiere enfocarse principalmente en los elementos aledaños a los puntos que posteriormente se verán afectados por la aplicación de desplazamientos forzados para la realización del análisis Pull-down.

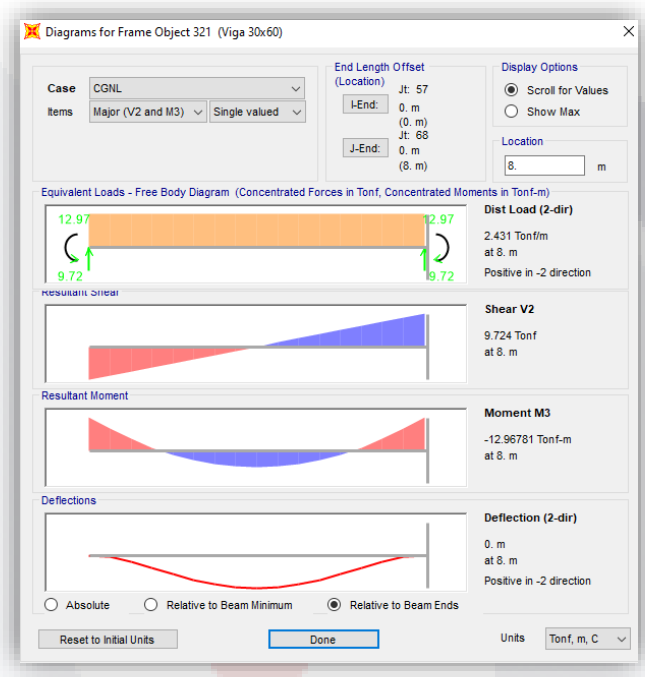


Ilustración 21. Diagramas de elementos mecánicos del miembro (321) ente un análisis “GCNL”.

- El elemento que se está analizando es una viga aledaña al punto al que se le aplicara un desplazamiento forzado. A pesar de que todos los elementos se podrían ver afectados por esas deformaciones en los marcos, debido a que se generara una redistribución de esfuerzos en los elementos; es importante hacer énfasis principalmente en los elementos cercanos a la afectación, ya que se espera que sean los más afectados.

- Para poder ver más claramente los efectos de la subsidencia en el comportamiento de los momentos en los marcos, es bueno realizar una captura de pantalla, para posteriormente compararla con los marcos después de verse afectados por el fenómeno de la subsidencia de manera visual. Claramente siendo el análisis de las diferencias numéricas la más importante que será la que regira.

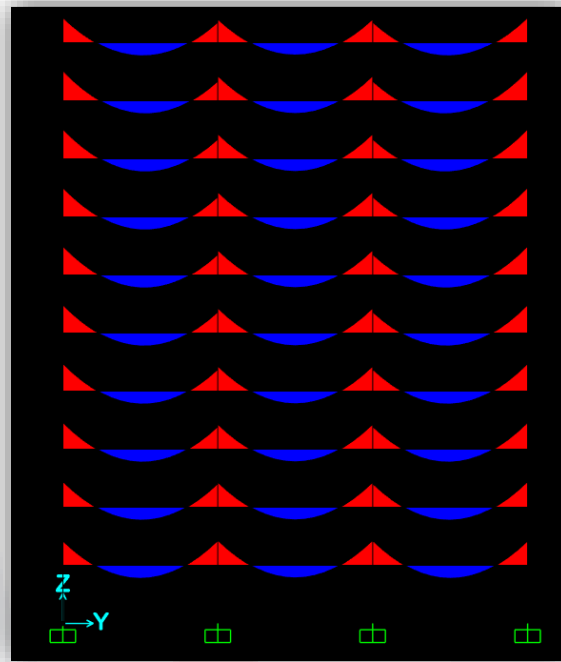


Ilustración 22. Momentos en marco en eje B ante el analisis (CGNL).

- ❖ Hasta este momento, solo estamos realizando un análisis no lineal ante cargas gravitacionales convencional. Por lo que, si se desea utilizar otra metodología, queda sujeto al criterio del diseñador estructural. Únicamente no debe omitirse el análisis no lineal como se muestra en el punto 1.5.

2. 2º Etapa del Análisis: Incorporar la parte de análisis Pull-down al 1º modelo realizado ante cargas gravitacionales, sin la consideración de las afectaciones provocadas por el fenómeno de la subsidencia.

2.1. Para la realización de la segunda etapa del análisis Pull-down se debe asignar a los elementos viga y columnas las posibles formaciones de articulación plástica como se muestra en las ilustraciones siguientes.

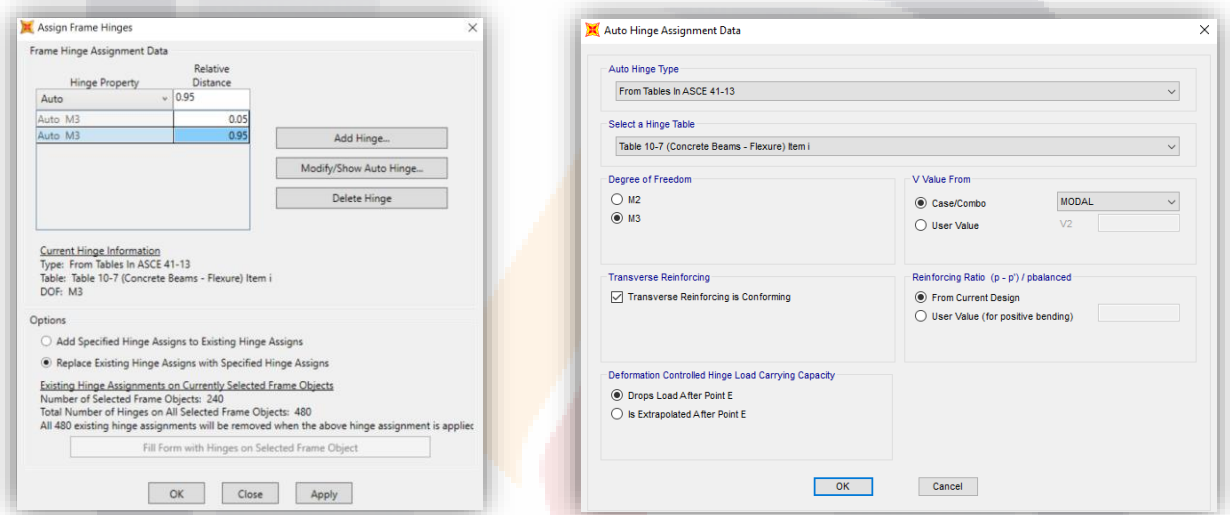


Ilustración 23. Asignación de posible formación de rotulas plásticas en vigas.

- Para asignar la distancia relativa de las articulaciones plásticas en Vigas y Columnas es necesario seguir la reglamentación del código por el cual se está rigiendo; para fines de esta investigación la distancia del nodo a la que se produciría la falla plástica será a un 5% y 95% de la longitud de la sección. Este criterio aplicara para vigas y columnas. Como se puede observar en la ilustración 17 del lado derecho, se asigna articulaciones en el momento “M3” regido por la norma ASCE 41-13.

- Las articulaciones en columnas deberán de ser ante solicitaciones de carga de tipo “P-M2-M3”, para considerar el comportamiento de las columnas biaxialmente.

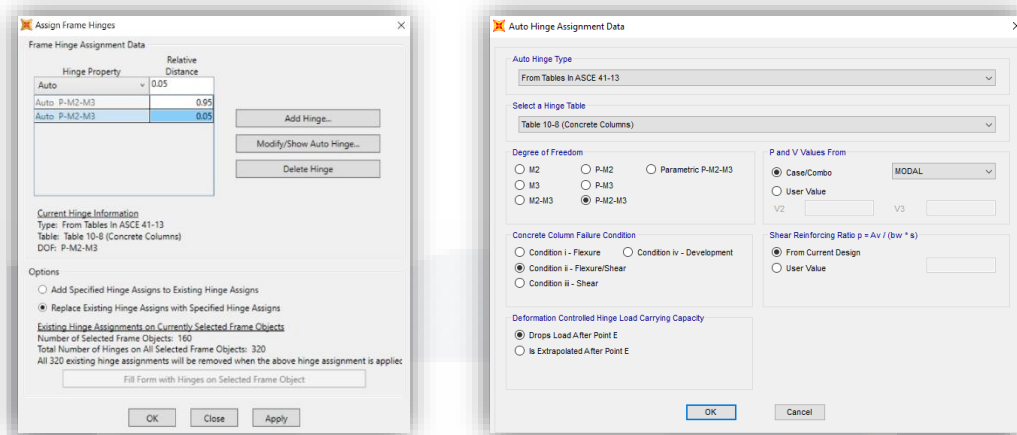


Ilustración 24. Asignación de posible formación de rotulas plásticas en columnas.

- Marco con la representación de las articulaciones plásticas (Hinges).

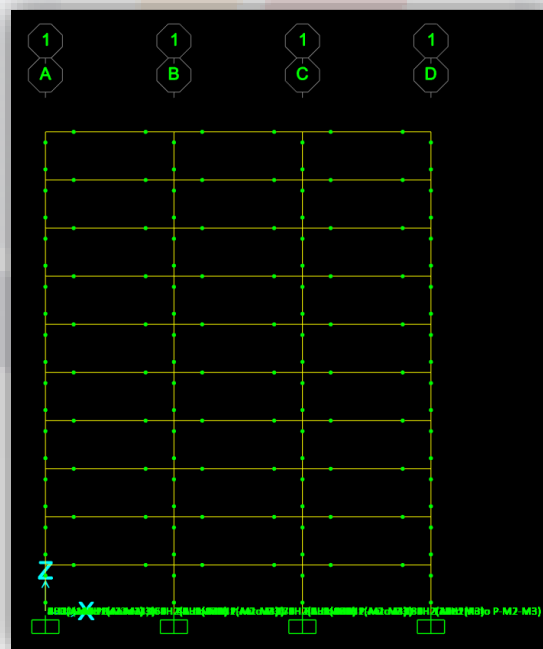


Ilustración 25. Posibles formaciones de articulaciones plásticas en elementos de los marcos.

2.2. Identificación de nodo de control. Se puede asignar algún nombre al nodo de control, o únicamente tenerlo identificado; el nodo al que se le aplicara el desplazamiento máximo permitido. Para un análisis más preciso se recomienda elegir como nodo de control el punto de apoyo que se verá afectado por el hundimiento.

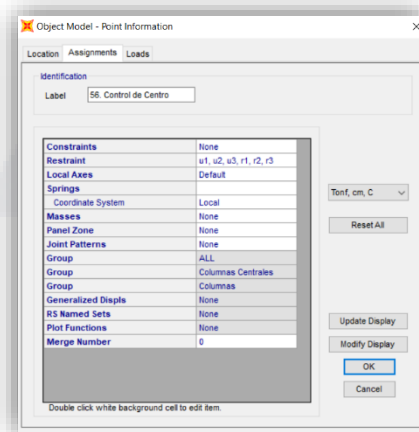


Ilustración 26. Asignar nombre a nodo de control (56. Control de Centro).

2.3. Creación de nuevos patrones de carga. En este momento deberemos de crear un nuevo patrón de carga llamado “Pull-down”, que será al cual le asignaremos el desplazamiento forzado.

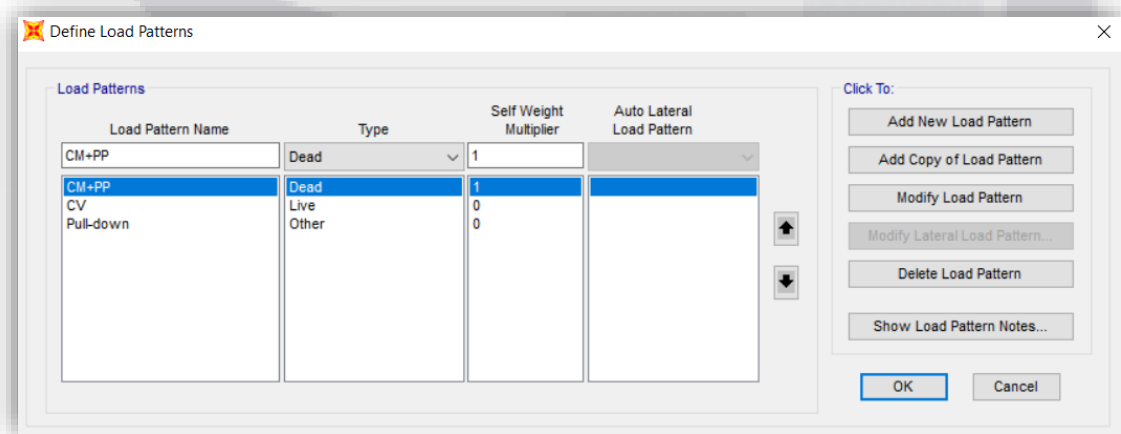


Ilustración 27. Creación de nuevo patrón de carga “Pull-down”.

2.4. Creación de nuevos casos de carga. Se debe de crear el caso de carga para la consideración del análisis Pull-down, a partir de la estructura deformada a causa de cargas gravitacionales.

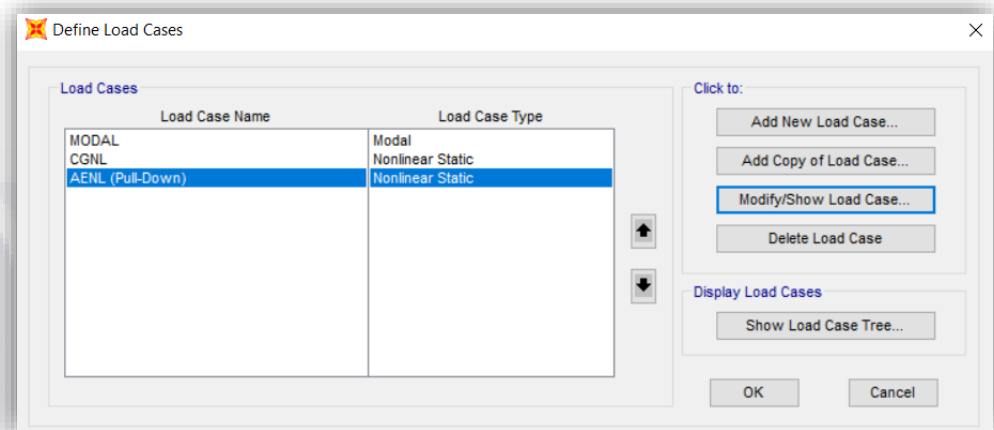


Ilustración 28. Casos de carga a considerar.

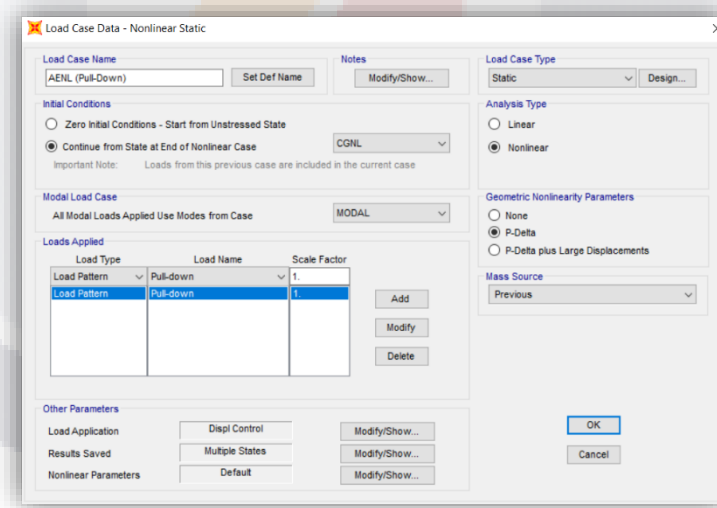


Ilustración 29. Caso de carga del análisis estático no lineal "AENL Pull-down".

- El caso de carga para el “AENL Pull-down” deberá de empezar a partir del estado de carga “CGNL”, también será un análisis de tipo no lineal y tendrá la carga tendrá el patrón de carga “Pull-down” que creamos anteriormente.

- Mediante el apartado de control de desplazamiento del caso de carga “AENL Pull-down”, es necesario especificar que se monitorizara el nodo de control que se eligió anteriormente, que el grado de libertad que se va a revisar no exceda los desplazamientos impuestos, y el máximo nivel de desplazamiento al que se llegara. Guardado de resultados en los que se desea discretizar el desplazamiento aplicado en el nodo de control.

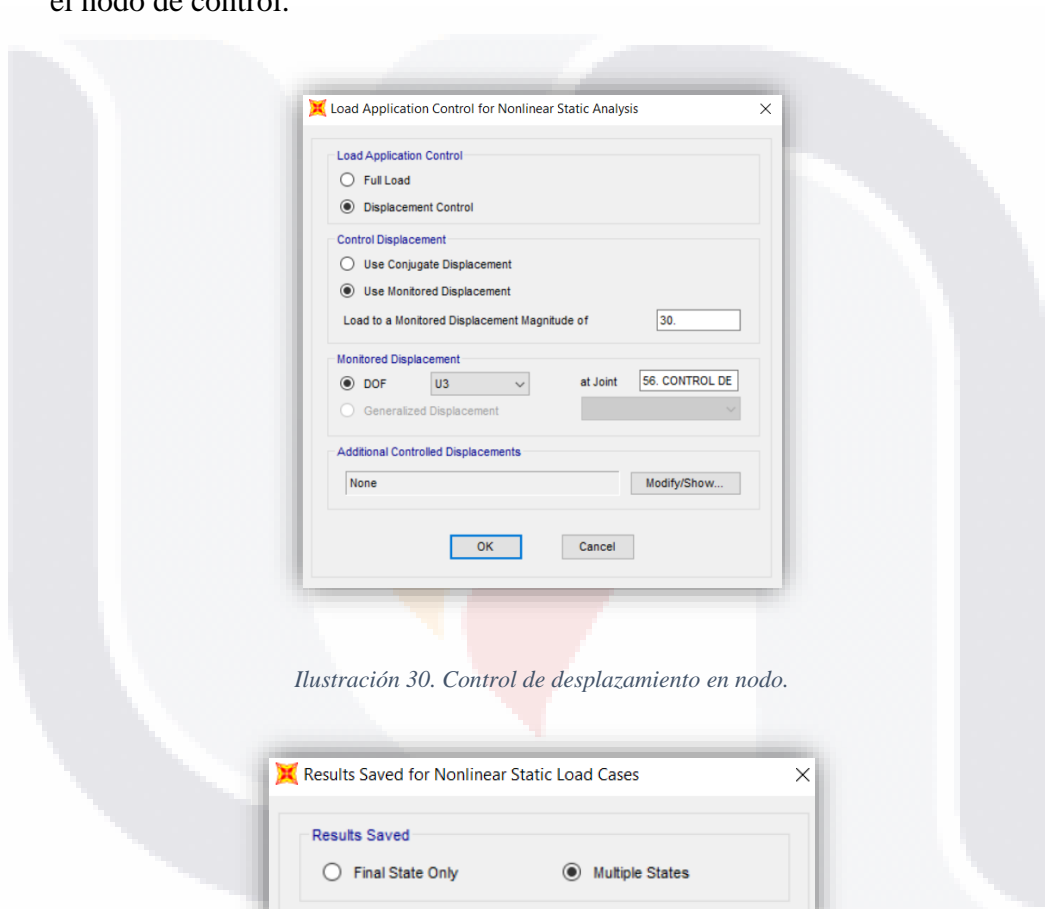


Ilustración 30. Control de desplazamiento en nodo.

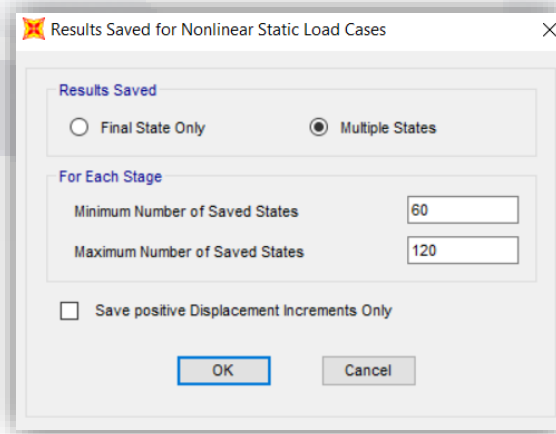


Ilustración 31. Desratización de deformación en pasos a analizar.

2.5. Simular el hundimiento esperado por problemas de subsidencia, mediante la aplicación de un desplazamiento forzado en el punto de apoyo afectado. Para el caso de este modelo se asignó un desplazamiento de 30cm con fin de ver a mayor escala las afectaciones de la estructura y aplicar de manera más completa la utilización de la metodología.

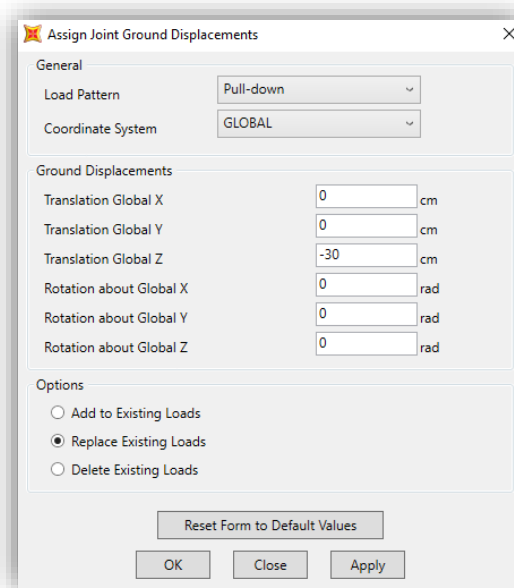


Ilustración 32. Aplicación de desplazamiento forzado en nudo de control, en dirección (-Z).

- ❖ En un análisis de tipo Push-over se aplican fuerzas en los pisos para la simulación de las fuerzas sísmicas. Siendo esta una de las diferencias al utilizar un análisis Pull-down; ya que para esta situación se deberá de aplicar directamente los desplazamientos que se podrían esperar de asentamiento en una estructura, o en caso de revisión, aplicar el hundimiento ya existente.

2.6. Guardar y correr el programa para realizar el segundo análisis de la estructura en el que ahora si se consideran los efectos por subsidencia.

3. 3° Etapa del Análisis: Para completar el análisis por desempeño para afectaciones por subsidencia se debe de revisar el comportamiento de la estructura ante los efectos que se generan al tener hundimientos diferenciales por subsidencia en el suelo.

3.1.1. Análisis y comparación de los resultados en los elementos mecánicos de la estructura como lo son (Momentos, cortantes, cargas axiales).

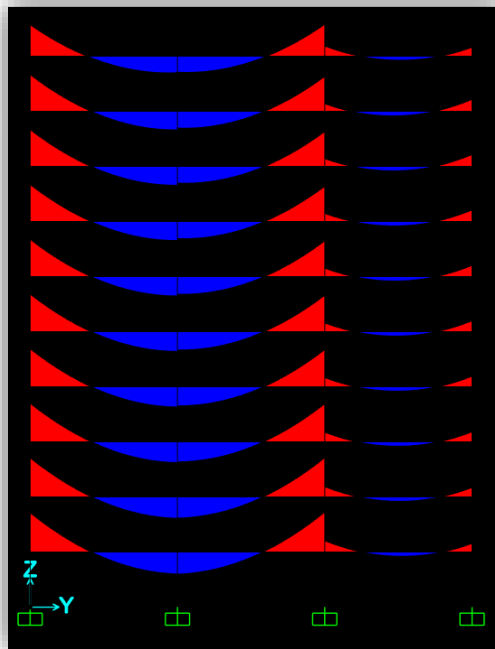


Ilustración 33. Momentos en marco en eje B ante el análisis (AENL Pull-down).

- Como se logra observar, la distribución de momentos en los elementos cambio bastante al aplicar el análisis Pull-down, con lo que se logran ver las afectaciones que se pudieran presentar en el caso de verse afectada una estructura.

- Ahora se debe de realizar ese análisis a nivel numérico; ya que, aunque de manera visual se puede percibir las afectaciones en la redistribución de momentos, es necesario conocer su magnitud.

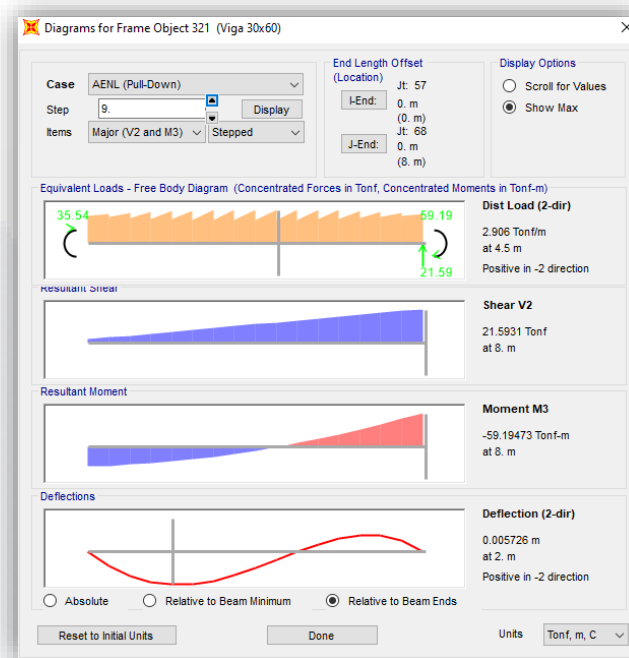


Ilustración 34. Diagramas de elementos mecánicos del miembro (321) ente un análisis “AENL Pull-down”.

- En este elemento se logra apreciar las grandes afectaciones que puede sufrir un miembro al estar sujeto a deformaciones en los marcos ante desplazamientos verticales provocados por subsidencia. Este cambio de momento se logra alcanzar en el paso “9” del análisis Pull-down, que significa el hundimiento en ese nodo de control asociado a la subsidencia para una magnitud de desplazamiento de 4.76cm.; incrementando el momento (-) de 12.96 t*m a 59.19 t*m. siendo esta, una relación de casi 5 veces. Y con un incremento en la fuerza cortante de 9.72 t a 21.59 t, duplicando su impacto.

3.1.2. En este último proceso se debe de obtener todos los niveles por desempeño en la estructura, en los que se puede ir viendo cómo se forman las articulaciones plásticas en los elementos de vigas y columnas. Así como los mecanismos de falla que se irán presentando.

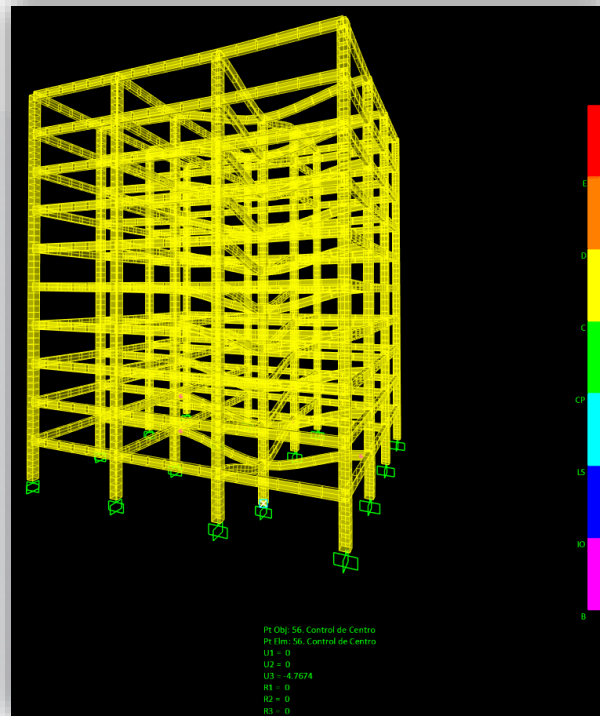


Ilustración 35. Estructura deformada por hundimiento en punto de apoyo.

- La estructura se sometió ante desplazamientos forzados de 30 cm, a lo que en un principio; si se considera la subsidencia en ese punto solamente, el máximo hundimiento al que podría llegar sería de 4.65 cm (Presentándose este desplazamiento en el paso 9), considerando que no tuviera ninguna clase de apoyo. Pero si el sistema de cimentación está compuesto a base de pilotes y la subsidencia fuera tal, que los jalaría hacia abajo, podría presentarse el caso de tener más desplazamiento.

3.1.3. Analizar los resultados de las articulaciones plásticas para ver su comportamiento en su grafica de momento-rotación. Aplicar este análisis para las rotulas plásticas más críticas.

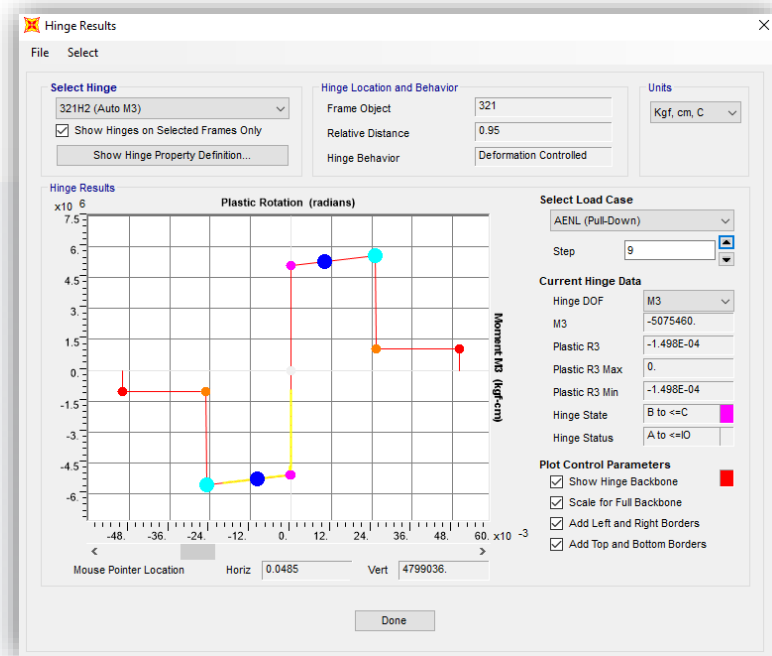


Ilustración 36. Grafica de momento-rotación para articulación plástica. (Elemento 321)

- Como se puede ver en la ilustración anterior, la aparición de una rotula plástica en el elemento (321) es en el paso “9” en el rango de “Ocupación Inmediata” (IO) y de “Seguridad de vida” (LS) en el paso “24”.

3.1.4. Identificar los posibles mecanismos de falla que se pudieran presentar, buscando siempre que se cumpla la teoría en la que hacemos fallar primero las vigas y al final las columnas.

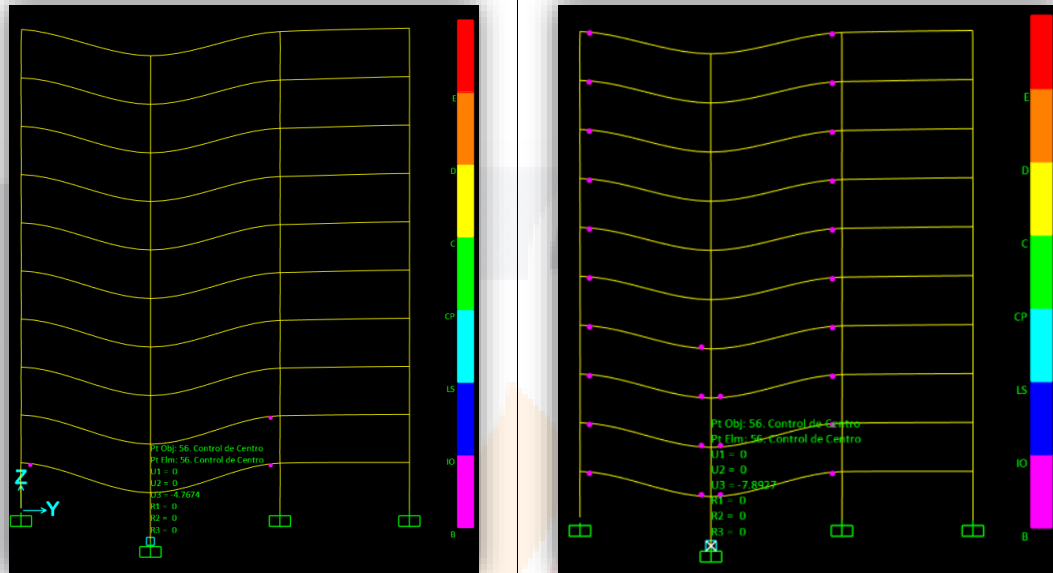


Ilustración 37. Aparición de primeras articulaciones plásticas.

- Como se muestra en las ilustraciones anteriores se empiezan a presentar las primeras articulaciones plásticas en el rango de ocupación inmediata (IO) en las vigas aledañas a el punto de apoyo afectado; y en consecutivo, pasos más adelante se genera el 1° mecanismo de falla ante un desplazamiento de 7.89 cm, en esos mismos ejes como era de suponerse.

- Creación de primeras rotulas plásticas en el rango de seguridad de vida (LS) en el paso 24 en el elemento 321.

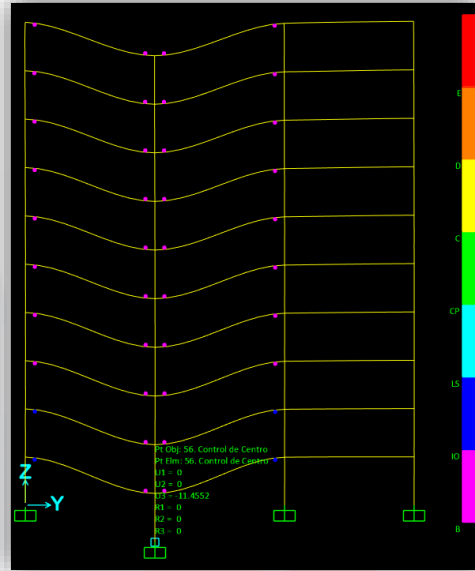


Ilustración 38. Aparición de primeras rotulas plásticas en el rango de seguridad de vida (LS).

- Se presenta nivel de desempeño de seguridad de vida (LS) en algunos elementos al presentar un desplazamiento con una magnitud de 11.45 cm. Siendo estas deformaciones excesivas para presentarse en un único punto, sin embargo, es importante entender las afectaciones que se pudieran presentar al no considerar este análisis.
- ❖ El paso que seguiría después de estos análisis sería la creación de un diseño por desempeño óptimo para la estructura, pero como se mencionó en los alcances de esta investigación es algo en lo que no se va a incursionar; sin embargo, es muy buena línea de investigación futura.

CAMPAÑA EXPERIMENTAL

Hipótesis de la campaña experimental

Al aplicar la metodología establecida en esta investigación podremos generar análisis Pull-down para estructuras verticales de marcos estructurales, logrando simular las afectaciones que pudieran presentarse ante problemas de subsidencia en distintos puntos de apoyo. Obteniendo como resultado el incremento significativo en los elementos mecánicos de los marcos al presentar problemas de subsidencia. Generando los principales déficits de desempeño en las vigas inmediatas al área de afectación, presentando un nivel de desempeño que se encuentre en el rango de prevención de colapso; esto debido a las grandes rotaciones provocadas por el hundimiento de los apoyos desplazados.

Debido a que estamos realizando una investigación con enfoque determinístico, es de esperarse que los resultados serán predecibles, ya que el principal objetivo de la investigación es llegar a establecer una metodología para hacer análisis de tipo Pull-down.

Diseño de investigación

El diseño de la investigación será de tipo experimental debido a que se realizarán distintas pruebas en los modelos generados en el programa SAP2000 para poder analizar los distintos comportamientos en las propiedades mecánicas de los elementos principales de la estructura determinando sus niveles de desempeño. De esta manera se permite establecer la metodología para realizar un análisis por desempeño de tipo Pull-down.

Técnicas de recolección de datos

Mediante modelos de edificaciones de marcos rígidos con el programa SAP 2000 se realizará análisis de la afectación que sufren las estructuras por efectos de subsidencia, simulando mediante los modelos, asentamientos diferenciales en puntos estratégicos en los apoyos; para posteriormente hacer una comparativa de los datos entre los distintos niveles de desempeño de los modelos aplicando los hundimientos diferenciales determinados.

Una vez ejecutado el análisis correspondiente al modelo que se desea determinar el comportamiento de la estructura, obteniendo las propiedades mecánicas de los elementos principales, el comportamiento de los materiales en su rango no lineal, así como también los desplazamientos máximos permitidos en los apoyos afectados por la subsidencia para cada uno de los niveles de desempeño establecidos.

Para la realización del análisis por desempeño ante efectos de la subsidencia, en una estructura de tipo edificación vertical compuesta por marcos se utilizó la metodología propuesta, que consta de 3 pasos principales que ayudaran a tener una mejor idea acerca del comportamiento real estimado de una estructura como lo son las edificaciones de marcos; los cuales son:

- 1) Creación de modelo a analizar ante cargas gravitacionales.
- 2) Obtención de datos y correcciones sobre los resultados del 1° análisis.
- 3) Determinar los niveles de desempeño de la estructura para los distintos desplazamientos en la cimentación por efectos de la subsidencia.

Análisis de resultados

“Es preferible obtener una respuesta razonablemente aproximada pero rápida que le indique si el diseño funciona o no, que invertir más tiempo y obtener el mismo resultado solo que con más decimales” (Norton, 1991)

- Para la comprensión de cualquier problema, es necesario entenderlo primeramente de manera general y así mismo manejar una solución simplista. Para la comprensión de los resultados a analizar a continuación es importante entender los planteamientos principales, ya que en base a ellos se prosiguió con el análisis.
- Para el análisis de la estructura se debe partir, del entendimiento de cuál es el desplazamiento máximo esperado en el nodo de control llamado “56. Control de Centro”. Sabiendo que, si se presentara subsidencia en un punto de la estructura, el máximo desplazamiento vertical sería el mismo que si se comparara con una estructura sin apoyo en ese punto; a lo que si aplicamos un desplazamiento mayor al anteriormente mencionado, el programa estaría entendiendo que ya no solo existen problemas en donde la cimentación va perdiendo apoyo en su base, sino que incluso el suelo está jalando hacia abajo la cimentación, y ese caso se podría presentar si la cimentación fuera a base de pilotes, los cuales al sufrir subsidencia, hundirían la columna en ese punto, debido a problemas de fricción. Para el análisis que se realizó en este trabajo ese desplazamiento máximo esperado es de 4.65 cm, que se llega a presentar en el paso 9 de nuestro análisis estático Pull-down. Generando de esta manera las primeras rotulas plásticas en el sistema.

- Para la 1° y 2° etapa de la metodología en la que se enfoca en la creación del modelo y el primer análisis no lineal ante cargas gravitacionales (CGNL) y el análisis estático no lineal (AENL) respectivamente; los primeros resultados que se deben de analizar, son los esfuerzos mecánicos en los componentes de los marcos de la estructura, tales como momentos, cortantes y carga axial. Para comprender los efectos que se provocan en los miembros estructurales, es importante analizar de manera visual el comportamiento de la estructura de una manera más general como se logra observar en las ilustraciones siguientes.

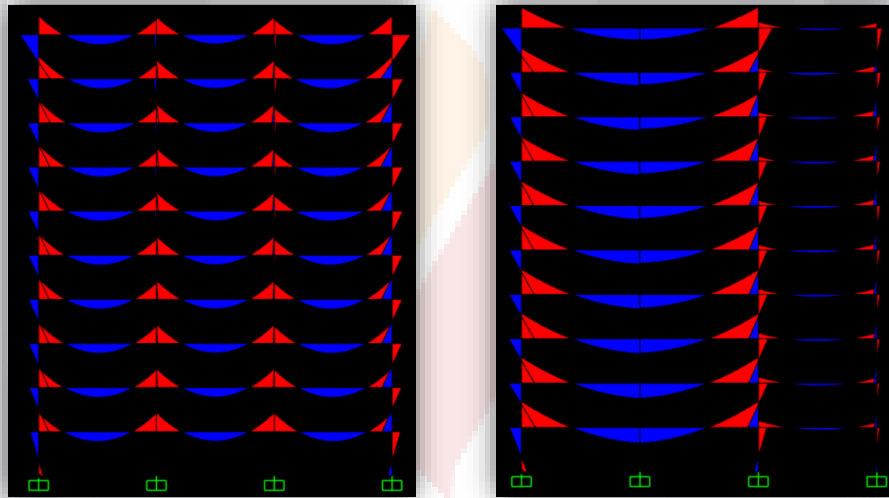


Ilustración 39. Comportamiento de Marco en eje "B" en Momento M3 (CGNL y AENL_ Paso - 9).

- Como se puede observar en los diagramas de momento en los miembros del marco, ante el caso de carga (CGNL) los momentos se mantienen de manera uniforme, correspondientes al comportamiento típico de una estructura cargada gravitacionalmente. Al momento de llevar el marco estructural al caso de carga (AENL_ Paso 9), se puede ver claramente la redistribución de esfuerzos en los miembros.

- Los resultados presentados son obtenidos de un eje de marcos de la estructura, ya que, al manejar un modelo simétrico en sus 2 direcciones, los resultados son iguales en los ejes simétricos en la otra dirección. El marco que se optó por tomar en cuenta para el análisis fue el del eje “B”, ya que al igual que el eje “2” presentan las situaciones más desfavorables, debido a que son los ejes que cruzan en el punto de apoyo afectado por el hundimiento en la base. En el anexo A se puede ver la nomenclatura de los miembros que componen los 8 marcos de la estructura y sus ejes correspondientes.

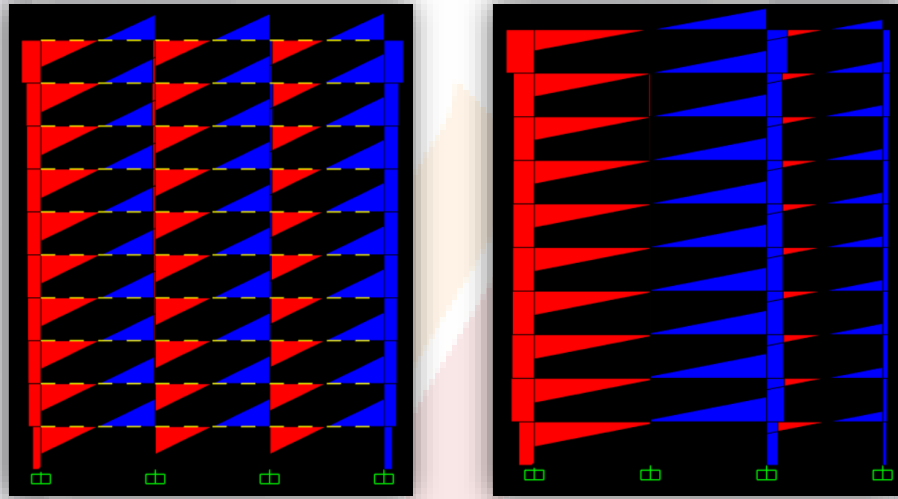


Ilustración 40. Comportamiento de Marco en eje "B" en Cortante V2 (CGNL y AENL_ Paso - 9).

- Al igual que el comportamiento del marco presentando sus momentos, en la redistribución de esfuerzos cortantes se logra apreciar como la columna que se ve afectada por el fenómeno de la subsidencia ya no presenta ninguna clase a apoyo y únicamente se convierte en un peso al centro de la nueva viga que se generó desde el eje “1” al “3”. Mandando los cortantes presentados en el eje “2” a las orillas, ya que únicamente se distribuyó el mismo peso, pero en un tramo más largo.

- Como ya se mencionó anteriormente, aunque el comportamiento de la estructura era bastante predictivo, esto debido a que esta investigación tiene un enfoque de tipo determinístico y la mayor aportación de esta investigación se centró en crear la metodología para un análisis Pull-down y probarla con un modelo matemático representativo.

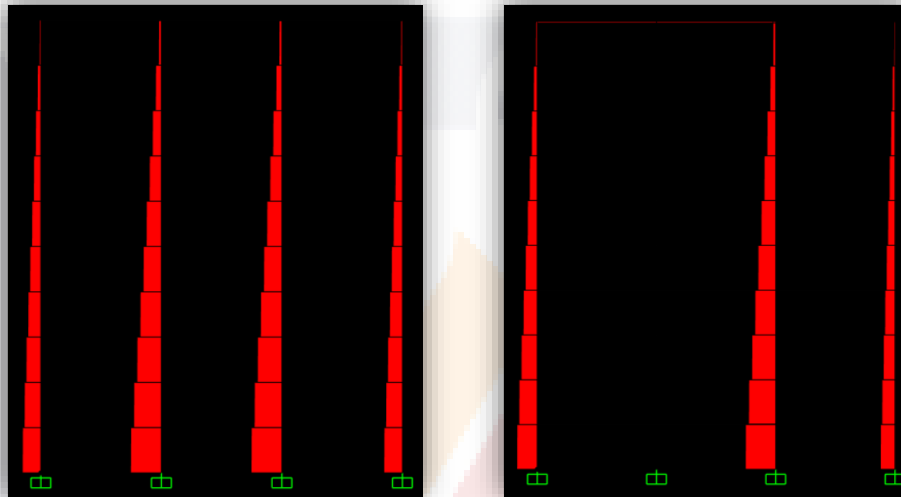


Ilustración 41. Comportamiento de Marco en eje "B" en Carga Axial (CGNL y AENL_ Paso - 9).

- En las ilustraciones anteriores se permite identificar como la carga axial de las columnas que se encuentran en los ejes "2" y "3" son mayores que las de los ejes "1" y "4", debido a que son columnas centrales y presentan mayor carga. En segunda instancia en la ilustración de la derecha que representa la del análisis (AENL) se va perdiendo la carga axial en las columnas del eje "2" y se redistribuye esa carga a las columnas del eje "1" y "3". Creando de esta manera, un nuevo sistema de marcos.
- Hasta este punto del análisis la distribución de cargas se mantiene, ya que no existe ninguna fuerza externa al sistema que afecte los miembros, todo esto pasa, como ya se mencionó en el paso 9 donde el desplazamiento en el nodo de control es de 4.65 cm.

- A partir de ahí, si se sigue desplazando ese nodo de control, si existirá un incremento en los esfuerzos mecánicos de los elementos que componen la estructura, ya que para mover ese punto se estará rebasando el nivel máximo de desplazamiento por falta de apoyo y empezaremos a incursionar en un apoyo jalado hacia abajo por alguna situación de succión en el sistema de cimentación.
- En el anexo B se establecieron los esfuerzos mecánicos en todas las vigas del marco estructural ubicado en el eje “B” del cual se tomó para analizar más a detalle los elementos viga número 311 y 321, correspondientes al 1º nivel del marco, en los cuales arrojó los siguientes resultados.

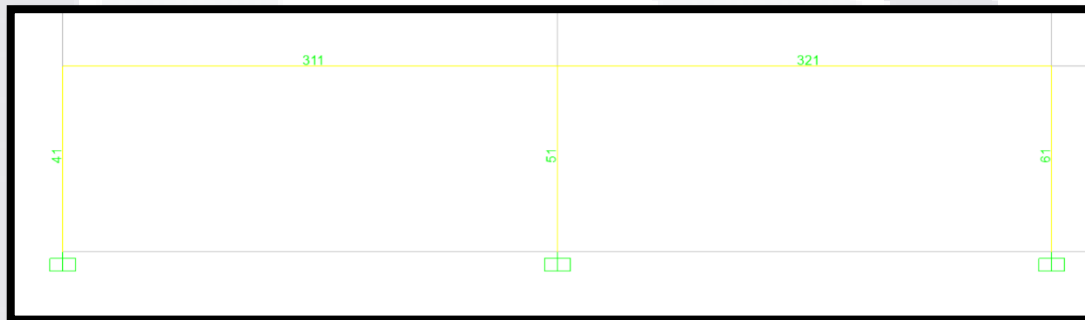


Ilustración 42. Marco en eje "B", con vigas y columnas del nivel 1º.

# Elemento	Tipo de Elemento	Longitud de análisis cm	Caso de carga (CGNL)		Caso de carga (AENL) - Paso 9	
			V2 (Tonf)	M3 (Tonf-m)	V2 (Tonf)	M3 (Tonf-m)
311	Viga	0.5	-8.48	-8.06	-20.33	-48.41
		4	0.02	6.75	-11.82	7.74
		7.5	8.53	-8.23	-3.31	34.12
321	Viga	0.5	-8.51	-8.41	3.36	34.17
		4	0.00	6.48	11.87	7.62
		7.5	8.51	-8.41	20.38	-48.71

Tabla 1. Redistribución de Esfuerzos de CGNL a AENL en miembros 311 y 321.

- Al analizar el comportamiento del cortante en ambas vigas, se logra apreciar que ambas llegan a 0 a la mitad de la sección (4m), y al entra en el análisis AENL se percibe que el cortante en cero converge en la orilla de cada uno de los miembros, y redistribuyendo a un marco más largo.
- Como se puede identificar en la tabla anterior, los momentos si crecen de manera significativa, esto debido a que, a pesar de ser la misma carga aplicada sobre las vigas, al no tener apoyo intermedio, se genera un mayor brazo de palanca en las fuerzas.

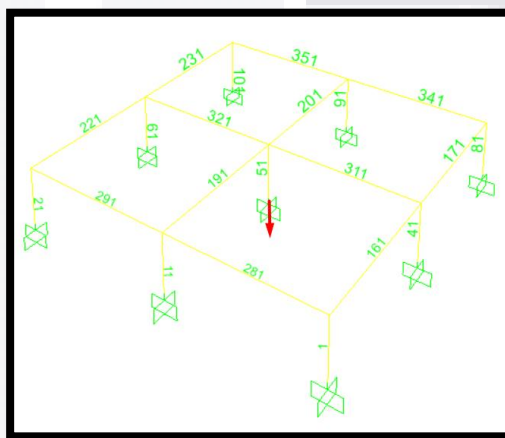


Ilustración 43. Marcos estructurales en cruce de ejes B y 2_ elementos (11, 41, 51, 61, 91)

# Elemento	Tipo de Elemento	Caso de carga (CGNL)			Caso de carga (AENL) - Paso 9		
		P (Tonf)	M2 (Tonf-m)	M3 (Tonf-m)	P (Tonf)	M2 (Tonf-m)	M3 (Tonf-m)
11	Columna	-247	-0.11	-3.00	-346	0.04	-13.24
41	Columna	-247	-3.00	-0.11	-346	-13.24	0.04
51	Columna	-410	-0.19	-0.19	10	0.01	0.01
61	Columna	-410	0.19	-0.19	-511	10.00	-0.05
91	Columna	-410	-0.19	0.19	-511	-0.05	10.00
		-1,725			-1,703		

Tabla 2. Redistribución de cargas en columnas de análisis CGNL a AENL.

- Como se muestra en resultados presentados, en el caso de los cortantes en las vigas y de las cargas axiales en las columnas al no existir ese apoyo en el nodo de control se genera una redistribución de esfuerzos en los miembros. En los momentos en las vigas no se genera esa redistribución de esfuerzos de manera directa, ya que las cargas se ven afectadas por un brazo de palanca mayor, con lo que se provocan momentos más grandes aplicados a una misma sección; causando que de acuerdo a un análisis de momento curvatura se presentan momentos más grandes, por lo cual se provocan rotaciones mayores. Cuando aún se conserva la linealidad de los materiales, como su nombre lo dice, la rotación incrementa proporcionalmente al momento aplicado al elemento. Sin embargo; cuando excedemos el momento de fisuración en la sección, se pierde la proporción lineal entre el momento aplicado y la rotación obtenida; generando de esta manera las rotulas plásticas en las secciones.
- En la tabla que se encuentra a continuación se presenta el comportamiento de la torsión angular en uno de los elementos más afectados por el hundimiento del nodo de control. En ella se permite ver el incremento de la torsión angular de dicho elemento paso a paso, con su relación al asentamiento diferencial presentado en el paso 9. Así como su relación con los momentos a ambos extremos del elemento, en el que se puede apreciar como a una distancia de 0.50m del eje “2”, pasa de ser momento negativo a convertirse en momento positivo; y en el otro extremo ubicado a una longitud de 7.5m acercándose al eje “3” el momento negativo se incrementa de manera significativa.

Distorsión angular en miembro 321 para AENL_ Paso 9						
Miembro analizado	# de Paso	U3 (cm)	Longitud de análisis		Distorsión angular	
			0.5 m	7.5 m	θ (rad)	Grados ($^{\circ}$)
321	0	0.000	-8.41	-8.41	0.0000	0.0000
321	1	-0.236	-6.29	-10.44	0.0003	0.0172
321	2	-0.895	-0.38	-16.09	0.0011	0.0652
321	3	-1.478	4.86	-21.10	0.0018	0.1077
321	4	-1.999	9.53	-25.57	0.0025	0.1457
321	5	-2.612	15.03	-30.84	0.0033	0.1903
321	6	-3.160	19.96	-35.55	0.0040	0.2303
321	7	-3.672	24.56	-39.95	0.0046	0.2676
321	8	-4.216	29.43	-44.62	0.0053	0.3072
321	9	-4.767	34.17	-48.71	0.0060	0.3474
321	10	-4.267	29.70	-44.43	0.0053	0.3110
321	11	-4.768	34.17	-48.70	0.0060	0.3474
321	12	-5.268	37.05	-48.84	0.0066	0.3839
321	13	-5.768	39.98	-48.98	0.0072	0.4203
321	14	-6.268	42.89	-49.13	0.0078	0.4567
321	15	-6.768	45.80	-49.27	0.0085	0.4932
321	16	-7.393	49.44	-49.45	0.0092	0.5387
321	17	-7.893	50.25	-49.58	0.0099	0.5751
321	18	-8.455	50.40	-49.73	0.0106	0.6161
321	19	-8.955	50.53	-49.87	0.0112	0.6526
321	20	-9.455	50.67	-50.00	0.0118	0.6890
321	21	-9.955	50.80	-50.13	0.0124	0.7254
321	22	-10.455	50.93	-50.26	0.0131	0.7619
321	23	-10.955	51.06	-50.40	0.0137	0.7983
321	24	-11.455	51.20	-50.53	0.0143	0.8347
321	25	-11.955	51.33	-50.66	0.0149	0.8712
321	26	-12.455	51.46	-50.79	0.0156	0.9076
321	27	-12.955	51.60	-50.92	0.0162	0.9440
321	28	-13.455	51.73	-51.06	0.0168	0.9805
321	29	-13.955	51.86	-51.19	0.0174	1.0169
321	30	-14.455	51.99	-51.32	0.0181	1.0533
321	31	-14.955	52.13	-51.45	0.0187	1.0898
321	32	-15.455	52.26	-51.59	0.0193	1.1262
321	33	-15.955	52.39	-51.72	0.0199	1.1627
321	34	-16.455	52.52	-51.85	0.0206	1.1991
321	35	-16.955	52.66	-51.98	0.0212	1.2355
321	36	-17.455	52.79	-52.12	0.0218	1.2720
321	37	-17.955	52.92	-52.25	0.0224	1.3084
321	38	-18.455	53.06	-52.38	0.0231	1.3448
321	39	-18.830	53.16	-52.48	0.0235	1.3722

Tabla 3. Tabla de distorsión angular para miembro 321

CONCLUSIONES

En el análisis de los resultados obtenido se logra observar las afectaciones en los componentes mecánicos de los miembros y como se fue deteriorando el nivel de desempeño de la estructura con el incremento del hundimiento diferencial aplicado en el nodo de control, como se puede observar en el análisis de los datos, el hundimiento máximo esperado por efectos de subsidencia es de 4.65cm que se presenta en el paso 9 del análisis Pull-down, en el mismo que empiezan a aparecer las primeras rotulas plásticas en las vigas que intersectan en el nodo de control, formándose de abajo hacia arriba en los niveles de la estructura, llevándolo al rango “Ocupación inmediata” (IO).

En la tabla 1, presentada en el análisis de los datos, se logra observar de manera muy clara como se genera una redistribución en los esfuerzos mecanismos de los miembros 311 y 321, los cuales son el par de vigas que se ubican a cada extremo del nodo de control en uno de los sentidos de los marcos; al ver el comportamiento de los miembros 311 y 321 ante un caso de carga gravitacional (CGNL) se puede ver que los elementos están compuestos de momentos negativos en sus extremos con una magnitud promedio de (-) M 8.30 ton*m y al centro de (+) M 6.60 ton*m, representado en el diagrama de momentos el comportamiento de una viga continua, como se muestra en la ilustración 39. Y analizando el comportamiento de dichos elementos ante el caso de carga (AENL, Paso 9), la redistribución de los esfuerzos mecánicos cambia completamente a una viga sin apoyo intermedio, creando un momento positivo en la unión de los dos miembros de (+) M 34.15 ton*m y de (-) M 48.60 ton*m en los extremos, afectando considerablemente los esfuerzos a los que deberían de estar sujetos ambos miembros.

Así mismo los cortantes se redistribuyen al tener sus cortantes negativos de (-) V 8.50 ton, igual que su cortante en el extremo opuesto de (+) V 8.50 ton en cada uno de los miembros analizados

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

(311 y 321) ante el caso de carga (CGNL). Y al observar el comportamiento de dichos elementos en el caso de carga (AENL, Paso 9); se convierten los cortantes de todo el miembro 311 en negativos y en el 321 todos positivos, con una magnitud máxima (-) y (+) M de 20.38 ton, respectivamente.

Como es de esperarse, las columnas de la estructura que se encuentran cercanas al nodo de control afectado presentan los cambios más significativos en sus propiedades mecánicas. En la tabla 2 que se ubica en el análisis de los datos de la campaña experimental, se observa que la carga axial que estaba tomada por la columna en el nodo de control (Miembro 51), va decreciendo de ese miembro e incrementando en el conjunto de columnas aledañas, teniendo una magnitud de 410 ton al igual que los miembros 61 y 91 que también son columnas centrales y de 247 ton en las columnas de lindero para los miembros 11 y 41, estas cargas ante el caso de carga (CGNL). Para el caso de carga (AENL, Paso 9) la columna afectada por el hundimiento disminuye al punto de no aportar nada de apoyo a la estructura y mandado principalmente esa carga a las columnas que se encuentran conectadas a ella por vigas, dando como resultado un incremento en las columnas 11 y 41 hasta 346 ton, y en los miembros 61 y 91 hasta 511 ton. Esto viendo la redistribución de la carga axial en columnas, pero para darse cuenta con mayor precisión de las afectaciones en el comportamiento de la columna, se debe de realizar un análisis biaxial de las columnas para contemplar el momento en ambos sentidos.

Debido a estas afectaciones presentadas, es que se puede entender la importancia que tiene realizar un análisis por desempeño de una estructura que pueda presentar problemas de subsidencia. Existen muchos factores que se deben tomar en cuenta para un análisis completo y más apegado a la realidad, en este trabajo se optó por enfocarse más en la geometría global de la estructura y el impacto que tendría la aplicación de desplazamientos en los apoyos.

La metodología presentada en esta investigación es una opción viable para la realización de un análisis estático no lineal de tipo Pull-down, que permita representar de manera muy clara, el comportamiento de una estructura vertical a base de marcos ante los efectos de la subsidencia, ya sea que se utilice como metodología de análisis o de revisión en el caso de que se desee ver una edificación con problemas presentados por este fenómeno. Para la implementación de esta metodología se tomó como herramienta de apoyo el programa SAP2000 de la compañía de softwares CSI (Computers and Structures, Inc.). el cual nos permitió realizar un análisis no lineal de tipo Pull-down en la estructura modelada.

La metodología se estructuró en 3 principales etapas de análisis que se muestran a continuación:

- 1° Etapa de análisis: un procedimiento común para la realización de un análisis ante cargas gravitacionales, teniendo como única diferencia de un análisis convencional la consideración de la no linealidad en el comportamiento de los materiales, para posteriormente elaborar análisis con desplazamientos progresivos partiendo de una estructura deformada por los efectos de la no linealidad. En esta etapa inicial, el proceso más elaborado en su ejecución es el modelado tridimensional de la estructura y la asignación de sus propiedades, tales como materiales, secciones, geometría, apoyos; así como la definición de los patrones de carga y casos de carga gravitacionales.
- 2° Etapa de análisis: después de crear el modelo matemático y realizar los análisis correspondientes para cargas gravitacionales, se procede con las variantes en el modelo para establecer el análisis Pull-down, que nos provocara desplazamientos progresivos en un nudo de la base de la estructura, de esta manera simulando un hundimiento diferencial en los apoyos gracias a los efectos de la subsidencia. Siendo como variantes

principales del 1° análisis gravitacional las siguientes: establecer las posibles rotulas plásticas en los miembros de la estructura, asignar los desplazamientos obligados al nodo de control (nodo afectado por los efectos de la subsidencia), creación de nuevos patrones de carga en los que se establecen las afectaciones de la estructura con los desplazamientos en el nodo partiendo de una posición deformada de la estructura ante un análisis gravitacional, asignando un análisis por pasos para poder ver los efectos sobre la estructura.

- 3° Etapa de análisis: la etapa definitiva de la metodología se basa en el análisis de los datos y la comparativa de los elementos mecánicos de los miembros, tales como los momentos, cortantes, fuerzas axiales. Después de realizar estas comparativas, se debe de detectar la aparición de rotulas plásticas en la estructura, buscando que ocurran primero en las vigas y consecutivamente en las columnas; de la misma manera se debe identificar los mecanismos de falla y asociar al nivel de hundimiento en el nodo de control, para poder establecer una relación de desempeño en la estructura ante el desplazamiento ejercido. Finalmente se debe proponer la mejor solución al sistema estructural analizado, según los datos obtenidos y el criterio del diseñador estructural.

Como se planteó en un principio, se esperaba que una estructura que presenta problemas de subsidencia claramente arrojaría resultados del desempeño de la estructura en el rango de prevención de colapso (CP); sin embargo, el hecho de que existan tantas variables, como lo son, las secciones de la estructura y su resistencia a los esfuerzos, esta investigación permite darse cuenta que no siempre se presentaría un desempeño inaceptable ante el fenómeno de la subsidencia. No se descarta que, ante una estructuración diferente, de dimensionamientos de

secciones, sistemas estructurales y otras variables; podría verse más afectado el desempeño de la estructura.

Para el análisis de la distorsión angular de la viga más afectadas (membro 321) se deberá de analizar la tabla 3, que permite ver la relación de momento-rotación del miembro en el que se puede ver que para el caso de carga (AENL, Paso 9) se tiene en el extremo continuo un momento de (-) M 48.71 ton*m dando como distorsión angular 0.0060 rad.

Para un análisis con el que se pretende proseguir con el diseño se deben de revisar estas distorsiones angulares para cumplir con el desempeño deseado, basándonos en las tablas de distorsión angular máximas permitidas por la normatividad como lo pueden ser las normas FEMA o ASCE/SEI 41-17, siendo esta ultima la más actualizada.

Al ver todos los efectos que se pueden provocar en una edificación como lo es la de esta investigación, es recomendable empezar a considerar la investigación detallada de los efectos provocados por el fenómeno de la subsidencia, al igual que los efectos combinados de dicho fenómeno con los de sismo y viento, ya que son acciones que pudiesen presentarse al mismo tiempo; debido a que un fenómeno es gradual, continuo y los otros son accidentales que pueden ocurrir en cualquier instante. Se propone que los análisis a realizar se apoyen de la metodología propuesta, para la realización de análisis estáticos no lineales de tipo Pull-down.

REFERENCIAS

Applied Technology Council (ATC), A. 4. (1996). *“The Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings”*, Volume 1. Redwood City, California: CALIFORNIA SEISMIC SAFETY COMMISSION.

ASCE / SEI 41-13. (2013). *Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings*. Virginia, Estados Unidos: ASCE.

ASCE / SEI 41-17. (2017). *Seismic evaluation and retrofit of existing buildings*. Virginia, Estados Unidos: ASCE.

Bresler, B. (1980). *Diseño de Estructuras de Acero*. México, D.F.: LIMUSA.

Esteva Maraboto, L. (2001). DISEÑO SÍSMICO BASADO EN DESEMPEÑO: TENDENCIAS Y RETOS. *Revista de Ingeniería Sísmica No. 63*.

FEMA. (2000). *“Pre-Standard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings”*. Washington D.C.: FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY, ASCE.

FEMA 273. (1997). *NEHRP GUIDELINES FOR THE BSSC Seismic Rehabilitation Project*. Washington, D.C.: Building Seismic Safety Council.

FEMA 356. (2000). *PRESTANDARD AND COMMENTARY FOR THE SEISMIC REHABILITATION OF BUILDINGS*. Washington, D.C.: AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS.

FEMA 440. (2005). *Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures*. Washington, D.C.: Nohp.

Ferdinand, L. S., & Andrew, P. (1982). *Resistencia de Materiales*. Mexico, D.F.: HARLA.

Hernández, E. I., & Mora Pino, D. I. (2014). *EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD SÍSMICA DE CONSTRUCCIONES ESCOLARES*. *Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural*.

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

Lanza, S. (2020). Seminario web selección y escalado de movimientos sísmicos para la aplicación del método de análisis dinámico inelástico de respuesta en el tiempo. Carabobo: Venezuela.

McCormac, J. C. (1983). *Analisis Esturctural*. Mexico, D.F.: HARLA.

Merritt, F. S. (1984). *Manual del Ingeniero Civil*. México, D.F.: Calypso.

Pacheco Martínez, J., Zermeño de León, M. E., & Ortíz Lozano, J. Á. (2011). Soil Cracks related to land subsidence. The main geotechnical hazard affecting to constructions in Aguascalientes City, México. Aguascalientes, México: ISSMGE Events.

Ramírez, A. (2015). *Evaluacion de patologias y desempeño estructural en viviendas afectadas por el fenomeno de la subsidencia en la localidad de Jocotepec, Jalisco, México*. Universidad Autónoma De Aguascalientes, Ags., México.

SEAOC, Structural Engineers Association of California. (1995). Vision 2000 A Framework for Performance Based Structural Engineering. *Vision 2000*. California: SEAOC.

Fitzgerald, R.W. (2007). *Mecánica de materiales*. México, D.F.: Alfaomega.

Martínez, H. C. (1976). *Análisis y diseño estructural*. México, D.F.: ISBN 968-6062-39-4

Centro Nacional de Prevención de Desastres. (2006). *Guía básica para la elaboración de atlas estatales y municipales de peligros y riesgos*. Recuperado de

<http://www.cenapred.gob.mx/es/Publicaciones/archivos/44.pdf>

ANEXO "A"

- Numeración de elementos en marcos ubicados en los ejes letra.



Ilustración 44. Marcos estructurales en los ejes "A" y "B".



Ilustración 45. Marcos estructurales en los ejes "C" y "D".

- Numeración de elementos en marcos ubicados en los ejes número.



Ilustración 46. Marcos estructurales en los ejes "1" y "2".

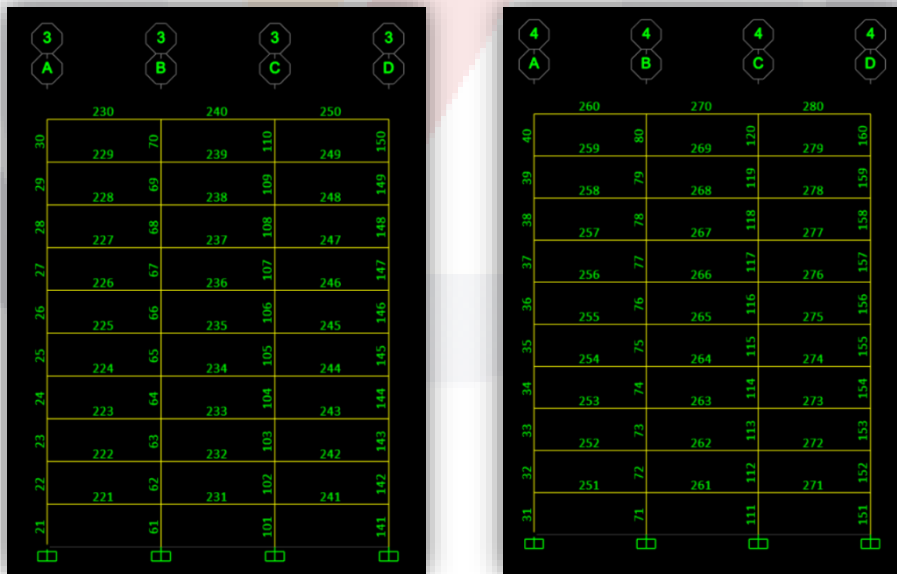


Ilustración 47. Marcos estructurales en los ejes "3" y "4".

ANEXO "B"

Tabla: Fuerzas en Vigas del marco en eje "B"						
# Elemento	Tipo de Elemento	Longitud de analisis cm	Caso de carga (CGNL)		Caso de carga (AENL) - Paso 9	
			V2 (Tonf)	M3 (Tonf-m)	V2 (Tonf)	M3 (Tonf-m)
311	Viga	0.5	-8.48	-8.06	-20.33	-48.41
311	Viga	4	0.02	6.75	-11.82	7.74
311	Viga	7.5	8.53	-8.23	-3.31	34.12
312	Viga	0.5	-8.64	-8.66	-20.12	-48.06
312	Viga	4	-0.13	6.70	-11.61	7.49
312	Viga	7.5	8.38	-7.72	-3.10	33.26
313	Viga	0.5	-8.77	-9.11	-19.89	-47.28
313	Viga	4	-0.26	6.70	-11.38	7.46
313	Viga	7.5	8.25	-7.27	-2.87	32.41
314	Viga	0.5	-8.88	-9.47	-19.67	-46.51
314	Viga	4	-0.37	6.70	-11.16	7.44
314	Viga	7.5	8.14	-6.90	-2.65	31.61
315	Viga	0.5	-8.97	-9.79	-19.48	-45.87
315	Viga	4	-0.46	6.70	-10.97	7.42
315	Viga	7.5	8.05	-6.59	-2.46	30.93
316	Viga	0.5	-9.04	-10.05	-19.32	-45.34
316	Viga	4	-0.53	6.70	-10.81	7.40
316	Viga	7.5	7.98	-6.33	-2.31	30.36
317	Viga	0.5	-9.10	-10.25	-19.20	-44.92
317	Viga	4	-0.59	6.70	-10.69	7.39
317	Viga	7.5	7.92	-6.12	-2.18	29.92
318	Viga	0.5	-9.16	-10.46	-19.14	-44.72
318	Viga	4	-0.65	6.70	-10.63	7.36
318	Viga	7.5	7.86	-5.92	-2.12	29.67
319	Viga	0.5	-9.18	-10.57	-19.09	-44.59
319	Viga	4	-0.67	6.67	-10.58	7.22
319	Viga	7.5	7.84	-5.88	-2.07	29.26
320	Viga	0.5	-8.40	-8.42	-17.20	-37.81
320	Viga	4	-0.29	6.79	-9.10	8.59
320	Viga	7.5	7.81	-6.37	-1.00	26.58
321	Viga	0.5	-8.51	-8.41	3.36	34.17
321	Viga	4	0.00	6.48	11.87	7.62
321	Viga	7.5	8.51	-8.41	20.38	-48.71
322	Viga	0.5	-8.51	-8.37	3.12	33.08
322	Viga	4	0.00	6.52	11.63	7.27
322	Viga	7.5	8.51	-8.37	20.13	-48.32
323	Viga	0.5	-8.51	-8.37	2.69	31.55
323	Viga	4	0.00	6.52	11.19	7.25
323	Viga	7.5	8.51	-8.37	19.70	-46.83
324	Viga	0.5	-8.51	-8.35	2.32	30.28
324	Viga	4	0.00	6.54	10.83	7.25
324	Viga	7.5	8.51	-8.35	19.34	-45.56
325	Viga	0.5	-8.51	-8.34	2.02	29.20
325	Viga	4	0.00	6.55	10.53	7.25
325	Viga	7.5	8.51	-8.34	19.03	-44.49
326	Viga	0.5	-8.51	-8.33	1.77	28.32
326	Viga	4	0.00	6.56	10.28	7.25
326	Viga	7.5	8.51	-8.33	18.78	-43.61
327	Viga	0.5	-8.51	-8.32	1.57	27.63
327	Viga	4	0.00	6.57	10.08	7.24
327	Viga	7.5	8.51	-8.32	18.59	-42.93
328	Viga	0.5	-8.51	-8.33	1.43	27.10
328	Viga	4	0.00	6.56	9.93	7.22
328	Viga	7.5	8.51	-8.33	18.44	-42.44
329	Viga	0.5	-8.51	-8.28	1.47	27.19
329	Viga	4	0.00	6.61	9.98	7.21
329	Viga	7.5	8.51	-8.28	18.49	-42.56
330	Viga	0.5	-8.10	-7.78	1.04	26.06
330	Viga	4	0.00	6.40	9.15	7.94
330	Viga	7.5	8.10	-7.78	17.25	-38.57

Tabla 4. Esfuerzos mecánicos en vigas de marco estructural en eje "B".

Tabla: Fuerzas en Columnas en el cruce de los marcos en eje "B" y "2"							
# Elemento	Tipo de Elemento	Caso de carga (CGNL)			Caso de carga (AENL) - Paso 9		
		P (Tonf)	M2 (Tonf-m)	M3 (Tonf-m)	P (Tonf)	M2 (Tonf-m)	M3 (Tonf-m)
11	Columna	-247	-0.11	-3.00	-346	0.04	-13.24
12	Columna	-223	0.02	-6.77	-309	0.13	-31.22
13	Columna	-198	-0.30	-6.78	-273	-0.22	-29.19
14	Columna	-173	-0.38	-6.95	-238	-0.33	-28.43
15	Columna	-148	-0.50	-7.15	-203	-0.46	-28.04
16	Columna	-123	-0.60	-7.32	-168	-0.58	-27.69
17	Columna	-99	-0.68	-7.46	-134	-0.67	-27.39
18	Columna	-74	-0.74	-7.58	-100	-0.74	-27.17
19	Columna	-49	-0.87	-7.83	-66	-0.89	-27.42
20	Columna	-24	-0.55	-7.69	-32	-0.47	-27.30
41	Columna	-247	-3.00	-0.11	-346	-13.24	0.04
42	Columna	-223	-6.77	0.02	-309	-31.22	0.13
43	Columna	-198	-6.78	-0.30	-273	-29.19	-0.22
44	Columna	-173	-6.95	-0.38	-238	-28.43	-0.33
45	Columna	-148	-7.15	-0.50	-203	-28.04	-0.46
46	Columna	-123	-7.32	-0.60	-168	-27.69	-0.58
47	Columna	-99	-7.46	-0.68	-134	-27.39	-0.67
48	Columna	-74	-7.58	-0.74	-100	-27.17	-0.74
49	Columna	-49	-7.83	-0.87	-66	-27.42	-0.89
50	Columna	-24	-7.69	-0.55	-32	-27.30	-0.47
51	Columna	-410	-0.19	-0.19	10	0.01	0.01
52	Columna	-368	0.01	0.01	5	0.55	0.55
53	Columna	-327	-0.52	-0.52	0	-0.50	-0.50
54	Columna	-285	-0.67	-0.67	-3	-0.64	-0.64
55	Columna	-244	-0.87	-0.87	-5	-0.88	-0.88
56	Columna	-203	-1.04	-1.04	-6	-1.08	-1.08
57	Columna	-162	-1.17	-1.17	-6	-1.23	-1.23
58	Columna	-121	-1.27	-1.27	-5	-1.36	-1.36
59	Columna	-80	-1.50	-1.50	-5	-1.68	-1.68
60	Columna	-40	-0.98	-0.98	-4	0.19	0.19
61	Columna	-410	0.19	-0.19	-511	10.00	-0.05
62	Columna	-368	-0.01	0.01	-457	23.80	0.11
63	Columna	-327	0.52	-0.52	-403	21.86	-0.45
64	Columna	-285	0.67	-0.67	-351	21.42	-0.62
65	Columna	-244	0.87	-0.87	-299	21.09	-0.84
66	Columna	-203	1.04	-1.04	-248	20.82	-1.02
67	Columna	-162	1.17	-1.17	-198	20.59	-1.16
68	Columna	-121	1.27	-1.27	-148	20.45	-1.28
69	Columna	-80	1.50	-1.50	-98	20.57	-1.51
70	Columna	-40	0.98	-0.98	-48	21.93	-0.91
91	Columna	-410	-0.19	0.19	-511	-0.05	10.00
92	Columna	-368	0.01	-0.01	-457	0.11	23.80
93	Columna	-327	-0.52	0.52	-403	-0.45	21.86
94	Columna	-285	-0.67	0.67	-351	-0.62	21.42
95	Columna	-244	-0.87	0.87	-299	-0.84	21.09
96	Columna	-203	-1.04	1.04	-248	-1.02	20.82
97	Columna	-162	-1.17	1.17	-198	-1.16	20.59
98	Columna	-121	-1.27	1.27	-148	-1.28	20.45
99	Columna	-80	-1.50	1.50	-98	-1.51	20.57
100	Columna	-40	-0.98	0.98	-48	-0.91	21.93

Tabla 5. Esfuerzos mecánicos en columnas en el cruce de los marcos en eje "B" y "2"