



UNIVERSIDAD

ANÁLISIS DEL COEFICIENTE DE CAPACIDAD DE DISIPACIÓN DE
ENERGÍA POR MEDIO DE LA METODOLOGÍA DE DISEÑO
INELÁSTICO

DANIELA MARIN CAÑÓN
LUIS ENRIQUE GELVES KERGUELEN
SANTIAGO ALBERTO HUERTAS ROJAS

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
UNIVERSIDAD
INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ, COLOMBIA
2022-1

ANÁLISIS DEL COEFICIENTE DE CAPACIDAD DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA POR MEDIO DE LA METODOLOGÍA DE DISEÑO INELÁSTICO

DANIELA MARIN CAÑÓN
LUIS ENRIQUE GELVES KERGUELEN
SANTIAGO ALBERTO HUERTAS ROJAS

Trabajo dirigido presentado para optar el énfasis en Estructuras

DIRECTOR(A):
Ph.D. SANDRA ROCÍO JEREZ BARBOSA

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:
Análisis del coeficiente de capacidad de disipación de energía por medio de la
metodología de diseño inelástico.
GRUPO DE INVESTIGACIÓN:
Centro de Estudios en Estructuras, Materiales y Construcción.

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
UNIVERSIDAD
INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ, COLOMBIA
2022-1

CONTENIDO

RESUMEN	5
ABSTRACT	6
1. INTRODUCCIÓN	7
2. OBJETIVOS	7
2.1. Objetivo general	7
2.2. Objetivos específicos	7
3. MARCO TEÓRICO	8
3.1. Diseño estructural según NSR-10	8
3.1.1. <i>Solicitaciones en estructuras</i>	8
3.1.2. <i>Cargas</i>	8
3.1.3. <i>Coficiente de disipación de energía R_o</i>	9
3.2. Diseño elástico	9
3.2.1. <i>Diseño estructural estático</i>	9
3.2.2. <i>Diseño estructural sísmico</i>	10
3.3. Análisis inelástico de secciones de concreto reforzado.	12
3.3.1. <i>Modelos del acero de refuerzo</i>	12
3.3.2. <i>Modelos del concreto confinado e inconfinado</i>	13
3.3.3. <i>Diagrama momento-curvatura</i>	13
3.4. Curva de capacidad.	13
3.4.1. <i>Pushover</i>	14
3.5. Coeficiente de capacidad de disipación de energía R.	14
3.5.1. <i>Newmark y Hall</i>	14
3.5.2. <i>ATC 17</i>	15
3.6. Comportamiento histérico.	15
4. ESTADO DEL ARTE	16
5. METODOLOGÍA Y DESARROLLO	17
5.1. Generalidades	17
5.1.1. <i>Propiedades de los materiales</i>	18
5.2. Modelación y diseño elástico	18
5.2.1. <i>Cargas</i>	18
5.2.2. <i>Derivas</i>	20
5.2.3. <i>Coficiente de disipación de energía</i>	22
5.3. Pórtico representativo	23
5.3.1. <i>Cargas</i>	23

5.3.2.	<i>Diseño según la NSR-10</i>	24
5.3.3.	<i>Ubicación de rotulas</i>	25
5.3.4.	<i>Construcción</i>	28
5.3.5.	<i>Ensayo experimental</i>	28
5.4.	<i>Análisis inelástico</i>	29
5.4.1.	<i>Curva de la demanda del pórtico y de la edificación dada por el espectro de diseño.</i>	29
5.4.2.	<i>Curva de capacidad</i>	29
5.4.3.	<i>Coefficiente de disipación de energía “R”</i>	41
5.4.4.	<i>Resumen de resultados</i>	49
6.	ANÁLISIS	50
7.	CONCLUSIONES.....	53
8.	RECOMENDACIONES	54
	BIBLIOGRAFÍA	55
	ANEXOS:.....	56

RESUMEN

La capacidad de disipación de energía está definida como “la capacidad que tiene un sistema estructural, un elemento estructural, o una sección de un elemento estructural, de trabajar dentro del rango inelástico de respuesta sin perder su resistencia.” (Theran Cabello, 2011). Esta capacidad se cuantifica por medio de un coeficiente R_0 . En el contexto colombiano la normativa sismo resistente (NSR-10) es la que se encarga de asignar unos valores a dicho coeficiente basados en los materiales y el sistema estructural con el objetivo de proteger la vida de las personas y al mismo tiempo asegurar que las estructuras soporten los movimientos sísmicos de diseño, disipando parte de la energía en forma de deformaciones inelásticas, sin generar daños significativos, salvaguardando el patrimonio.

La determinación del coeficiente R_0 es aún objeto de análisis e investigación pues no hay consenso en cuanto a los valores y la forma de calcularlos. Diferentes países han optado por asignar en sus códigos o normas valores que se consideran adecuados a las condiciones sísmicas de cada nación. En Colombia, los valores que se establecieron del coeficiente de disipación de energía R_0 oscilan entre 1 y 8, valores que dependen del sistema estructural, sistema de resistencia sísmica (fuerzas horizontales) y el sistema de resistencia para cargas verticales.

El Reglamento actual (NSR-10) da los valores para que los diseñadores estructurales realicen los cálculos, sabiendo que esos valores no son característicos de las estructuras a construir, es decir, son aproximaciones de valores que den rangos de seguridad, pero no son los valores reales de la capacidad con la que las edificaciones realizan la disipación de energía; son valores asumidos para poder cumplir con las deformaciones y se pueda salvaguardar tanto la vida como el patrimonio, pero “sin embargo, al final del diseño no es común, como debiera hacerse, comprobar cuál es la capacidad de disipación que la estructura diseñada está en capacidad de asumir.” (Murillo Rivas, 2017).

Este trabajo tiene por objeto evaluar el coeficiente de disipación de energía asumido en el diseño con el obtenido a partir de un análisis estático no lineal y con el obtenido experimentalmente construyendo y ensayando una parte de la estructura, consistente en un pórtico plano de una edificación tridimensional. Estos ensayos se llevan a cabo en el laboratorio de materiales y estructuras del bloque H de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

PALABRAS CLAVES:

R₀, inelástico, energía, pórtico, NSR-10, capacidad, resistencia, ensayo, cargas, disipación de energía

ABSTRACT

Energy dissipation capacity is defined as "the capacity of a structural system, structural element, or a section of a structural element, to work within the inelastic range of response without losing its strength" (Theran Cabello, 2011). This capacity is quantified by means of a R_o coefficient. In the Colombian context, the seismic resistant standard (NSR-10) oversees assigning values to this coefficient based on the materials and the structural system with the objective of protecting people's lives and at the same time ensuring that the structures withstand the seismic design movements, dissipating part of the energy in the form of inelastic deformations, without generating significant damage, safeguarding the heritage.

The determination of the R_o coefficient is still the subject of analysis and research as there is no consensus as to the values and the way to calculate them. Different countries have chosen to assign in their codes or standards values that are considered adequate to the seismic conditions of each nation. In Colombia, the values established for the R_o energy dissipation coefficient range between 1 and 8, values that depend on the structural system, the seismic resistance system (horizontal forces) and the resistance system for vertical loads.

The current Regulation (NSR-10) gives the values for structural designers to perform the calculations, knowing that these values are not characteristic of the structures to be built, i.e. they are approximations of values that give safety ranges, but they are not the real values of the capacity with which the buildings perform energy dissipation; they are values assumed to be able to comply with the deformations and to be able to safeguard both life and heritage, but "however, at the end of the design it is not common, as it should be done, to check what is the dissipation capacity that the designed structure is able to assume." (Murillo Rivas, 2017).

This work aims to evaluate the energy dissipation coefficient assumed in the design with the one obtained from a nonlinear static analysis and with the one obtained experimentally by building and testing a part of the structure, consisting of a flat portal frame of a three-dimensional building. These tests are carried out in the materials and structures laboratory of block H of the Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

KEYWORDS:

R_o , inelastic, energy, portico, NSR-10, capacity, resistance, test, loads, energy dissipation.

1. INTRODUCCIÓN

El Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10, nos introduce el coeficiente de disipación de energía, R_o , como un factor de reducción para que la estructura diseñada sea forzada a comportarse de manera inelástica. La NSR-10 en su objeto en la sección A.1.2.2.2. especifica que *“Una edificación diseñada siguiendo los requisitos de este Reglamento, debe ser capaz de resistir, además de las fuerzas que le impone su uso, temblores de poca intensidad sin daño, temblores moderados sin daño estructural, pero posiblemente con algún daño a los elementos no estructurales y un temblor fuerte con daños a elementos estructurales y no estructurales, pero sin colapso”*. Esto quiere decir, que la norma nos dice que tenemos que diseñar la estructura para que soporte las cargas estáticas y dinámicas, sufriendo daños que no sean perjudiciales para el sistema estructural porque si se llega a plantear un diseño completamente elástico, se vuelve muy costoso porque las secciones de los elementos estructurales van a ser muy grandes con grandes cantidades de acero, por lo que lo vuelve un diseño inviable económicamente.

Mediante la introducción del coeficiente de capacidad de disipación de energía, R , en la NSR-10 como un valor, ha sido muy cuestionado por varios ingenieros diseñadores, por lo que ese coeficiente es más complicado que un valor exacto, sino que depende y es muy variable. Por ende, el motivo de esta investigación es hacer la comparación del coeficiente tanto teórica como experimentalmente construyendo un pórtico de una edificación y ensayándola.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

Analizar el coeficiente de disipación de energía, R_o , dado por la normativa sismo resistente colombiana, NSR-10, de un sistema aporticado de concreto reforzado para una zona de amenaza sísmica intermedia de manera analítica y experimental.

2.2. Objetivos específicos

- Estudiar y recolectar información sobre el análisis inelástico de secciones y la determinación del coeficiente de disipación de energía R de estructuras de concreto reforzado.
- Realizar el análisis y diseño de una edificación de acuerdo con las especificaciones de diseño de la NSR-10, evaluando que cumpla con los requerimientos exigidos por la norma.
- Determinar el comportamiento inelástico de los elementos estructurales pertenecientes al sistema de resistencia sísmica del pórtico.
- Hallar la curva de capacidad de los elementos principales, mediante el procedimiento de análisis no lineal estático (Pushover).
- Estimar el coeficiente de disipación de energía del pórtico analizado mediante (método a usar)
- Ensayar el pórtico construido para poder hallar la curva de cortante basal vs deformación y el valor del coeficiente R experimentalmente.

- Comparar los resultados experimentales con los teóricos para analizar la efectividad del diseño y la validez del coeficiente de disipación de energía R de la normativa.

3. MARCO TEÓRICO

3.1. Diseño estructural según NSR-10

La NSR-10 es el reglamento colombiano de construcción sismo resistente, en su última actualización permite el diseño por medio de los métodos de resistencia, esfuerzos de trabajo y estados límites, siendo este último el más usado por la comunidad para la optimización y aprovechamiento total de las características de los materiales.

3.1.1. *Solicitaciones en estructuras*

La estructura estará sometida a lo largo de su vida útil a diferentes fuerzas, esfuerzos y cargas las cuales serán propias de sí misma como también externas, estas pueden ser desde peso propio por elementos estructurales, no estructurales, uso por ocupación, fenómenos ambientales como viento y sismo, y deformaciones por cambio de temperatura.

3.1.2. *Cargas*

Son solicitudes que son permanentes, como lo es el peso propio de la estructura y no estructural, las cuales la magnitud varía muy poco en el tiempo, así mismo hay variables como lo pueden ser cargas vivas, de impacto, sísmicas, de viento entre otras.

Dichas solicitudes son las más relevantes en el diseño de estructuras para viviendas, siendo esta la principal solicitud en la construcción.

3.1.2.1. *Tipos de carga*

En la normativa NSR-10 título B encontramos la descripción y valores mínimos de las diferentes solicitudes que puede llegar a soportar la estructura, como puede ser: carga muerta, viva, empuje de tierra, presión hidrostática y fuerzas de viento.

Para estas diferentes solicitudes, como lo puede ser la carga muerta y viva, nos presentan diferentes tablas de valores que dependen del tipo de uso, por otra parte, condicionales y fórmulas para el cálculo de estas solicitudes, como lo puede llegar a ser la fuerza de viento.

3.1.2.2. *Fuerza sísmica*

Para el diseño de los elementos estructurales se reduce la fuerza sísmica (F_s), calculada por el método de fuerzas horizontales equivalentes o por el espectro de diseño, esta reducción se hace por medio del coeficiente de disipación de energía R ($E = F_s/R$) por el contrario, para la rigidez de la estructura controlada por medio de las derivas no se presenta la reducción de la fuerza sísmica.

3.1.2.3. *Combinaciones*

La normativa NSR-10 nos presenta dos tipos de combinaciones de cargas principales, con el método de esfuerzos de trabajo y método de la resistencia, este último presenta las cargas mayoradas como se muestra a continuación:

$$1.4D$$

$$1.2D + 1.6L + 0.5(L_r \text{ o } G \text{ o } L_e)$$

$$1.2D + 1.6(L_r \text{ o } G \text{ o } L_e) + (1.0L \text{ o } 0.5W)$$

$$1.2D + 1.0W + 1.0L + 0.5(L_r \text{ o } G \text{ o } L_e)$$

$$1.2D + 1.0E + 1.0L$$

$$0.9D + 1.0W$$

$$0.9D + 1.0E$$

3.1.3. Coeficiente de disipación de energía R_0 .

La capacidad de disipación de energía está definida como “la capacidad que tiene un sistema estructural, un elemento estructural, o una sección de un elemento estructural, de trabajar dentro del rango inelástico de respuesta sin perder su resistencia.” En el cual el reglamento actual (NSR-10) da los valores para que los diseñadores estructurales realicen los cálculos, sabiendo que esos valores no son característicos de las estructuras a construir, es decir, son aproximaciones de valores que den rangos de seguridad, pero no son los valores reales de la capacidad con la que las edificaciones realizan la disipación de energía; son valores asumidos para poder cumplir con las deformaciones y se pueda salvaguardar tanto la vida como el patrimonio.

3.2. Diseño elástico

3.2.1. Diseño estructural estático

El diseño de estructuras en concreto reforzado en Colombia está regido por el reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10, en donde se tienen requisitos mínimos de deformaciones, de resistencia y de funcionamiento.

Las estructuras y elementos estructurales se diseñan en base a factores de cargas mayoradas sometiendo al diseño a combinaciones de dichas cargas (NSR 10 título b) y factores de reducción de resistencia, de forma que el elemento y/o estructura tenga una resistencia mayor a las cargas últimas calculadas.

para un sistema aporticado resistente a momentos, se diseña principalmente a solicitaciones de momento y cortante para vigas, mientras que para columnas a compresión y cortante.

3.2.1.1. Flexión.

El diseño a flexión se presenta principalmente en las vigas dentro del sistema aporticado como también en las losas de una dirección, se basa en la compatibilidad de deformaciones y el equilibrio de las cargas a las que está sometido el elemento, para lo cual los materiales de la sección transformada, en este caso de estudio el concreto y acero, deben trabajar en su zona elástica y sus límites los puntos de fluencia correspondientes. Para contemplar estas suposiciones de diseño la norma presenta diferentes límites en el refuerzo.

3.2.1.1.1. Refuerzo mínimo sometido a flexión.

Se presenta esta consideración de refuerzo mínimo para secciones con mayor área transversal a la solicitada por resistencia, pero al presentar fisuración, el elemento pierde considerablemente la capacidad de resistencia, por lo cual es necesario un mínimo de refuerzo, el cual la normativa NSR-10 nos da.

$$A_{s,min} = \frac{0.25 \sqrt{f'_c}}{f_y} b_w d$$

O

$$A_{s,min} = \frac{1.4 b_w d}{f_y}$$

3.2.1.1.2. Refuerzo máximo sometido a flexión.

Para garantizar una falla dúctil en el elemento, se diseña de manera que el acero presente una deformación unitaria de 0.004 en el momento de fisuración del concreto, de manera que se presente un claro aviso de falla, debido que el elemento sometido a flexión es controlado por tracción, de manera que el concreto presente en ese instante una deformación unitaria de 0.003, manteniendo así las suposiciones consideradas anteriormente.

3.2.1.2. Cortante.

El diseño del cortante en los elementos aporticados es de gran importancia, debido al tipo de falla que produce, siendo esta una falla frágil y por ende sin previo aviso, generando discontinuidad entre los elementos y total pérdida de estos. El título C.11 de la NSR-10 se explica el reglamento en el diseño de estribos como refuerzo para mitigación del cortante, tanto por parte del concreto como del estribo.

3.2.1.2.1. Resistencia del concreto no preesforzado.

El concreto por sus propiedades mecánicas, aunque presente resistencia frente a una sollicitación de cortante, su tipo de falla es frágil, por lo cual se debe reforzar con estribos a lo largo del elemento. Esta propiedad mecánica, la normativa en el Título C.11.2 la calcula por medio de diferentes ecuaciones, las cuales dependen de las sollicitaciones primarias a las cuales se encuentra sometido el elemento, como lo puede ser la flexión, compresión o tracción.

3.2.1.2.2. Resistencia por refuerzo transversal

Para mitigar toda posibilidad de fallo por cortante la normativa en el título C.11.4 ya especifica una separación máxima de refuerzos cada $d/2$ para elementos no preesforzados, debido al tipo de fisuración que presenta esta falla, por otra parte, da el diseño de refuerzo según el tipo que se use, como puede ser perpendicular al eje como inclinado.

3.2.1.3. Compresión.

Para el diseño a compresión, presente en columnas, la norma en el título C.10, especifica solo límites de diseño del refuerzo longitudinal, el cual se basa en estar en un rango entre el 1% y el 4% del área efectiva reducida del elemento, dependiendo de la capacidad de disipación de energía de la estructura, el área efectiva puede variar.

3.2.1.4. Requerimientos.

Para una estandarización de requerimientos, en el título C.7, la normativa presenta requisitos mínimos de cumplimiento generales para los diferentes elementos. Ejemplo de estos requisitos, llega a ser los detalles del refuerzo como lo son los ganchos y sus diámetros de barra, el espaciamiento mínimo entre refuerzos, recubrimiento en los diferentes tipos de elemento dependiendo de su fabricación y condiciones a las cuales está expuesto como intemperie y contacto con el suelo, por último, condicionamientos para el refuerzo transversal tanto en elementos a compresión como a flexión buscando mantener una buena zona de confinamiento.

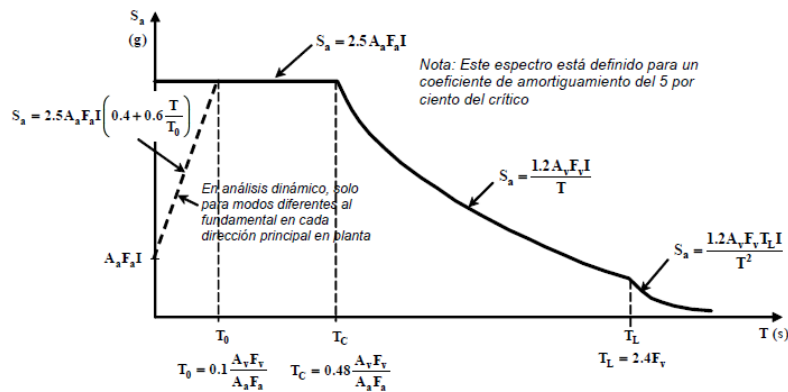
3.2.2. Diseño estructural sísmico.

En el diseño de estructura aporticada el principal factor dinámico con el cual se diseña es por fuerzas sísmicas, con las cuales se usan principalmente tres tipos de métodos de cálculos, siendo estos: fuerzas horizontales equivalentes, espectro de diseño y cronológico.

3.2.2.1. Espectro de diseño.

Se basa en realizar un gráfico el cual calcula la reacción de la estructura a la vibración del suelo, sismo, para lo cual depende de factores externos a la propia estructura como lo es el tipo de suelo, coeficientes de aceleración y velocidad horizontal, como también sus debidas amplificaciones por la zonas donde se encuentre la estructura, dichos datos a nivel Colombia, la misma normativa presenta los valores a tomar, como también hay estudios de microzonificación realizado por entidades, por otra parte depende también de factores intrínsecos de la propia estructura como lo es su periodo, la cual depende de su masa y rigidez, como también un valor o coeficiente de importancia dado por el uso e importancia de la misma.

Para el desarrollo del método la norma NSR-10 en el título A.2.6. el cual nos presenta el siguiente diagrama para su cálculo:



3.2.2.2. Capacidad de disipación de energía.

Como su nombre lo indica, se refiere a la capacidad que tiene la estructura y/o elemento por medio de deformaciones trabajar en el rango inelástico sin perder su capacidad de resistencia, para lo cual la normativa estipula tres capacidades: mínimo (DMI), moderada (DMO) y especial (DES), esto principalmente para soportar las solicitudes de fuerzas sísmicas en dicho rango, de modo que la estructura no presentara sobredimensionamiento para las cargas gravitacionales.

Por lo cual, al diseñar con cargas sísmicas, estas solicitaciones se dividen por un coeficiente de disipación de energía R_0 , el cual puede reducirse por irregularidades que la misma estructura presenta y están consagradas en las tablas del título A.3 como también el valor del coeficiente R_0 , el cual depende de la capacidad, tipo de estructura y material de esta.

3.2.2.3. Derivas.

Dentro del diseño las derivas son la principal limitante para los análisis dinámicos y en este caso sísmicos, debido a que presenta un límite de desplazamiento horizontal del 1% de la altura del piso, controlando así la estructura mediante la rigidez del propio sistema, mas no por la resistencia misma de los elementos y estructura en sí. Esto debido a que se encuentra asociada las derivas a la deformación de los propios elementos llegando al punto de que sea una deformación inelástica, la propia estabilidad global de la estructura y la propia seguridad y tranquilidad de quien ocupe la estructura.

3.2.2.4. Diseño sismo resistente.

Debido al tipo de diseño elástico y la reducción de la fuerza sísmica por medio del coeficiente R_0 , la norma solicita unos requerimientos adicionales dependiendo de la capacidad de disipación de energía de la estructura que se encuentran en el título C.21, estos para los diferentes elementos estructurales y difieren entre sí, buscando mantener la zona confinada de los elementos estructurales las cuáles serán las encargadas de soportar las cargas y sollicitudes de la estructura si dicho elemento pasa a estar en zona inelástica.

3.2.2.4.1. Requisitos.

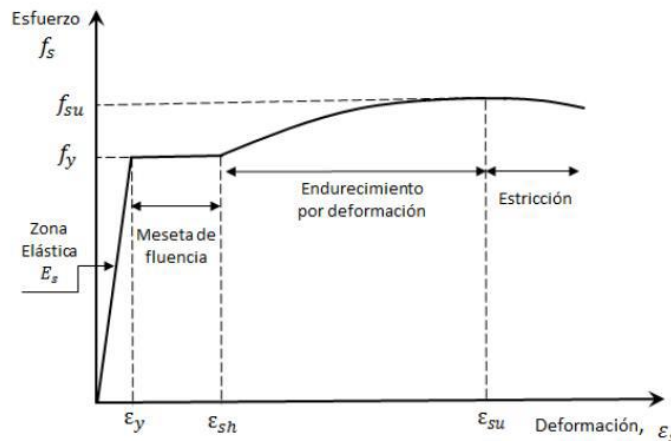
A lo largo de la normativa en el título C.21.3. se presenta como prioridad mitigar cualquier falla por cortante y aún más en las columnas, por lo cual exige que las sollicitaciones y cargas no sobrepasen valores intrínsecos de la misma estructura o sean menores a nuevas combinaciones de cargas las cuales amplifican el valor del cortante con un coeficiente Ω_0 , estas condicionales son diferentes frente a viga y columna, pero se solicita que priorice el principio de columna fuerte y vigas débil. Por otra parte, en búsqueda de una mejor zona confinada en los diferentes elementos, se solicita mayor cantidad de refuerzo transversal disminuyendo la separación entre estos, estas medidas y separaciones dependen del tipo de elemento.

3.3. Análisis inelástico de secciones de concreto reforzado.

Debido a que las secciones son compuestas por dos tipos de materiales, concreto y acero, su comportamiento tiene que ser analizado por cada material en sus diferentes zonas de inelasticidad para poder realizar un análisis posterior conjunto de la sección.

3.3.1. Modelos del acero de refuerzo.

Para el acero se realiza un análisis a tensión, el cual será la sollicitud principal y en el que sobrepasa su punto de fluencia llegando a la zona inelástica donde tendrá aumento de deformación manteniendo el mismo esfuerzo al que es sometido llegando a un punto de endurecimiento por deformación.



3.3.1.1. Modelo Mander

Consiste en el cálculo y formulación de la curva en la zona inelástica por medio de las siguientes ecuaciones:

$$f_s = f_{su} + (f_y - f_{su}) \left(\frac{\epsilon_{su} - \epsilon_s}{\epsilon_{su} - \epsilon_{sh}} \right)^2$$

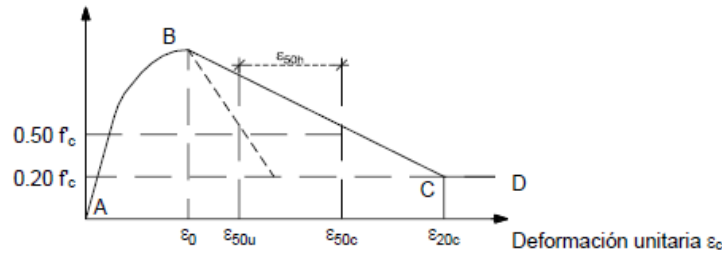
3.3.2. Modelos del concreto confinado e inconfinado.

El concreto presenta dos comportamientos los cuales son inconfinado y confinado, dependiendo del punto de análisis, esto debido al refuerzo de acero, en este caso, genera un cambio considerable en la relación esfuerzo deformación al pasar la zona inelástica, con lo cual se plantea el estudio por medio de los siguientes modelos.

3.3.2.1. Modelo de Kent y Park.

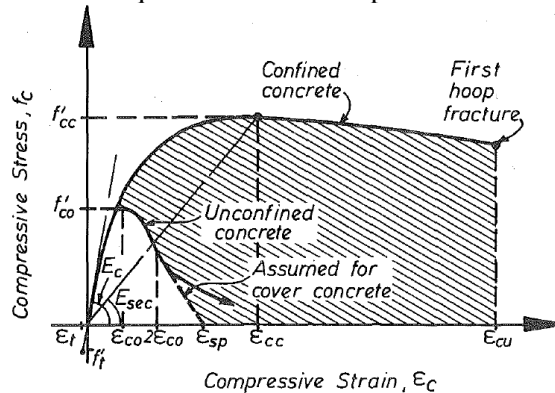
Este modelo se caracteriza por revelar el centro de aplicación y magnitud de las fuerzas a compresión a las cuales se encuentra sometido la sección no solo para las deformaciones últimas.

Esfuerzo a compresión f_c



3.3.2.2. Modelo de Mander.

Este modelo presenta una curva continua para describir el comportamiento, aumentando la resistencia y por ende las deformaciones, proponiendo una deformación unitaria última que se alcanza en la primera fractura del refuerzo.



3.3.3. Diagrama momento-curvatura.

Este diagrama muestra el comportamiento de las secciones de concreto reforzado a medida que se le va aumentando la sollicitud. Al comienzo presentara un comportamiento lineal debido a que los diferentes materiales se encuentran en la zona elástica, a medida que dicha sollicitud aumente, en la zona de tracción, el concreto comienza a fallar encontrando el momento de fisuración y por ende reduciendo su sección, ocasionando una leve disminución en la relación por el aumento de la curvatura. Al seguir aumentando la sollicitud o momento, el acero que se encuentra a tracción llegara a plastificarse encontrando el momento de plastificación determinado así la ductilidad de la sección y por tanto generando la rótula plástica hasta encontrar el momento último en el cual se considera que la sección no soportara más y falla en su totalidad.

3.4. Curva de capacidad.

La estructura a medida que aumenta el cortante basal debido a una fuerza sísmica, va generando deformaciones horizontales en los diferentes pisos por las nuevas solicitaciones generadas las cuales afectan a los diferentes elementos llegando a comportarse inelásticamente, provocando posibles rotulas y por ende disipaciones de energía al transmitir estas solicitaciones a los diferentes elementos, hasta el punto de que la estructura falla.

3.4.1. Pushover.

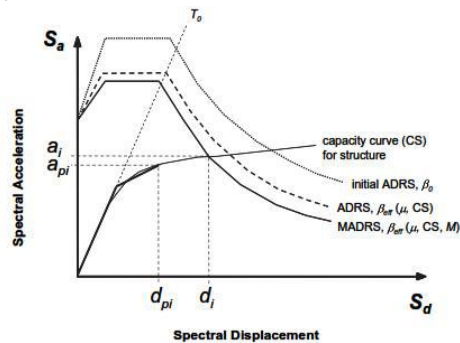
Este método de análisis para el cálculo de la curva de capacidad se basa en un proceso iterativo en el cual va variando las cargas horizontales en el sistema calculando el cortante basal y la deformación respecto al último nivel, generalmente esta respuesta se da en el primer modo de vibración.

3.5. Coeficiente de capacidad de disipación de energía R.

Se realiza con el cruce del espectro de diseño y la curva de capacidad de la estructura, las cuales se pasan a un mismo formato de S_a contra deformación, con lo cual se pueden obtener tres comportamientos:

- No se presenta corte entre las dos curvas, debido a que la estructura se encuentra subdiseñada, y la demanda de carga sísmica es superior a lo que puede llegar a soportar la estructura.
- La curva de capacidad corta después de haber generado rotulas en el sistema dando a entender que varios elementos presentan inelasticidad y por ende disipación de energía.
- El corte se presenta en la zona elástica de la estructura, mostrando que no va a presentar fallas por la demanda sísmica.

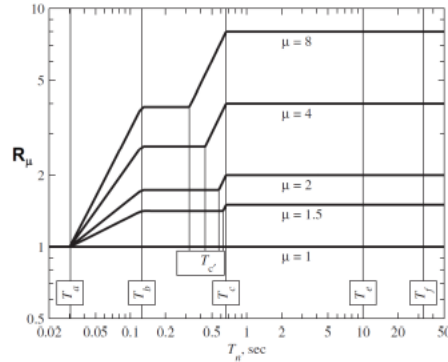
Obteniendo el segundo caso, se busca determinar la ductilidad de la estructura por el método de bilinealización estipulado en la FEMA 440, el cual se basa en el principio de desplazamientos iguales.



Mediante un periodo y amortiguamiento efectivo se calcula un desplazamiento último en este caso d_{pi} y el punto intermedio de la bilineal que se encuentra intrínseca en la línea dada por la pendiente, con lo cual la relación de estos dos desplazamientos da la ductilidad, valor primordial para las diferentes metodologías de cálculo del coeficiente R_0 .

3.5.1. Newmark y Hall.

Este método consiste en que el coeficiente de disipación de energía dependía directamente de la ductilidad, presentando las siguientes ecuaciones.



$$R_{\mu} = \begin{cases} 1 & T_n < T_a \\ \sqrt{2\mu - 1} & T_b < T_n < T_c \\ \mu & T_n > T_c \end{cases}$$

Para suelo firme:

- $T_a = 0.03 \text{ s}$
- $T_b = 0.125 \text{ s}$
- $T_c = \text{depende de } \xi$
- $T_d = 10 \text{ s}$
- $T_j = 33 \text{ s}$

El cual se escoge dependiendo del periodo de la estructura y otros periodos.

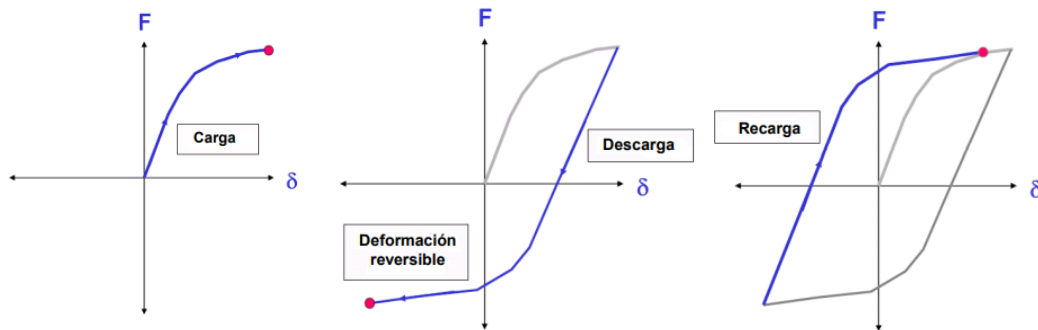
3.5.2. ATC 17.

Este método supone que el R_0 calculado por el método de Newmark y Hall, es uno de los dos factores de multiplicación, el otro factor es la relación del cortante ultimo de la curva de capacidad con el cortante elástico antes de producirse la primera rotula.

3.6. Comportamiento histerético.

Los modelos o comportamientos histeréticos, es una representación de la relación que hay entre el desplazamiento generado por una fuerza aplicada en un proceso de carga y descarga, la cual puede ser aleatoria, por ejemplo, en un evento sísmico o puede ser un patrón de carga controlada en laboratorio.

Un ciclo del comportamiento histerético, se compone de los siguientes momentos de la aplicación de la fuerza:



Pueden existir varios comportamientos y una manera de clasificarlos es como lo presenta el ingeniero y profesor Julián Carrillo:



El comportamiento histerético es una acumulación de varios ciclos de carga y descarga, donde el área que es contenida dentro de cada ciclo es la energía disipada. Entonces se dice que a mayor energía disipada (sin deformaciones excesivas) es mejor el comportamiento de la estructura.

4. ESTADO DEL ARTE

A través de la historia de la ingeniería se van observando, analizando y estudiando nuevas fuerzas o profundizando en las ya existentes, en búsqueda de mejorar las cargas de diseño de las diferentes estructuras para los usos correspondientes, tanto así que a nivel colombiano debido a nuestra posición geográfica, donde nos encontramos en una zona sísmica de gran afectación y consideración, las normativas generadas a lo largo de los años van teniendo en cuenta la importancia de estas cargas sísmicas y sus afectaciones a la estructuras, siendo estas solicitudes de gran relevancia para los diseños, convirtiéndose en parámetros fundamentales e imposible de ignorar al diseñar cualquier estructura. Pero esta búsqueda de generar estructuras que soporten las cargas sísmicas a las que puede llegar a ser sometidas presentan un fallo, y es la viabilidad en la construcción de las obras civiles, donde el aumento de las secciones y refuerzos en los elementos estructurales son económicamente inviables, generando un mayor costo en la construcción, afectando la calidad de vida y el entorno social de la población.

Esto debido a que hasta el día de hoy se diseñan las estructuras para un comportamiento elástico, de manera que para toda carga a la cual sea sometida la estructura, esta puede responder correctamente y no generar afectaciones en los diferentes elementos estructurales. Pero las cargas sísmicas a nivel nacional no presentan una frecuencia alta de sucesos como en Chile o Japón, por lo cual un diseño elástico para cargas sísmicas es inviable.

Llegando así a un consenso dentro del análisis de las cargas sísmicas y es dividir las por un factor de disipación de energía R_0 , con lo cual se estima que la estructura al estar sometida a una carga sísmica llegue a comportarse inelásticamente, lo que provoca afectaciones en los elementos estructurales, consiguiendo así no generar sobredimensionamiento a las estructuras que en su mayoría de vida útil será solo sometidas a cargas gravitacionales. Pero como antes se mencionó, ese comportamiento inelástico en la estructura provocaría graves afectaciones llevándola a ser un riesgo para la preservación de la vida humana, para lo cual la normativa por medio de coeficientes de importancia, reducción y reglamentación frente a los refuerzos y su disposición busca mitigar toda posibilidad de amenaza para la vida misma, buscando así un equilibrio entre viabilidad y seguridad.

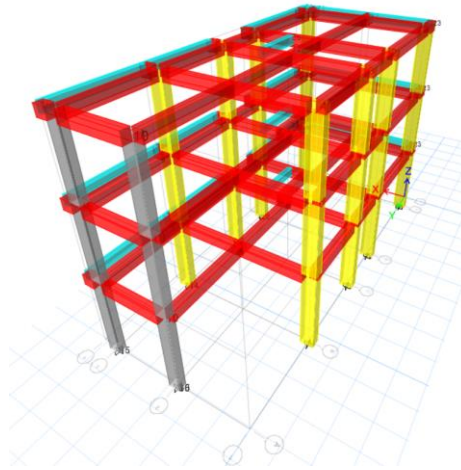
Esto lleva a pensar si dicho coeficiente de disipación de energía R_0 , es un valor óptimo para el diseño o presenta inconsistencias debido a que depende y varía mucho según el sistema estructural y la zona de amenaza que se encuentra, adicionalmente que ya entre países se encuentra muchas discrepancias al comparar los valores del coeficiente, sin llegar a un consenso de un valor fijo o rango de este mismo. Aun siendo un factor que afecta directamente una solicitud de gran importancia como lo es las cargas sísmicas.

5. METODOLOGÍA Y DESARROLLO

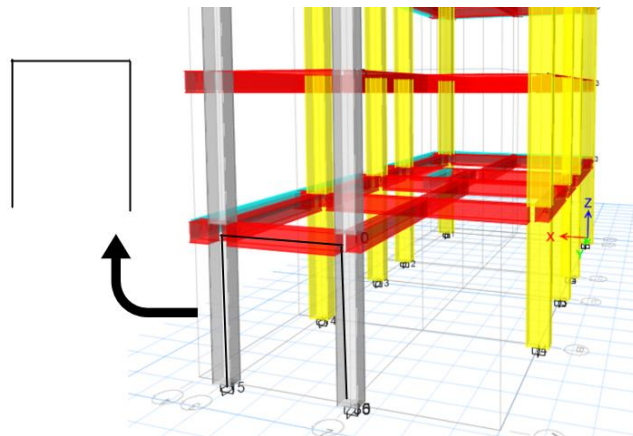
5.1. Generalidades

La metodología consistió en el diseño elástico de un pórtico representativo sacado de una edificación la cual fue planeada para estar ubicada en una zona de amenaza sísmica intermedia (Bogotá) con todos los requisitos sismo resistentes que exige la NSR-10. Después de realizar el diseño se evaluará de manera analítica, tanto el pórtico como la edificación el coeficiente de disipación de energía, usando métodos no lineales como lo son el método de Newmark y Hall y el método de la ATC-19. Además, se construyó el pórtico antes analizado a escala real, con el objetivo de ver su comportamiento frente a fuerzas sísmicas simuladas en el laboratorio, para estimar de forma experimental el coeficiente de disipación de energía.

Se obtendrán resultados no solo del coeficiente de disipación de energía, sino también el cortante basal y las derivas del pórtico, estas se comparan con los parámetros del diseño inelástico realizado siguiendo los requerimientos de la norma. Se muestra un esquema del modelo completo de la edificación.



A continuación, se muestra el pórtico representativo elegido para la construcción y el análisis.



Cabe aclarar que por facilidad de análisis se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- No se tiene en cuenta la afectación que pueda tener el suelo con la estructura.
- Se consideran todos los apoyos como empotrados.
- Se utiliza las características de un suelo Lacustre-200.
- Se usan los espectros de la norma sismo resistente.
- Se mantiene el criterio “Columna fuerte - Viga débil”.
- Se utiliza SAP-2000 y ETABS como programas de ayuda.
- Las cargas se aumentan un 3% para considerar los elementos que no se tuvieron en cuenta en el avalúo de cargas.
- La carga de viento no se tendrá en cuenta ya que es una edificación de poca altura y está ubicada en Bogotá, donde el viento no juega un papel importante para el diseño de estructuras.

5.1.1. Propiedades de los materiales

Para la construcción, diseño y análisis se utilizó un concreto de 28 MPa de resistencia a compresión; con un módulo de elasticidad de 24855 MPa y una densidad de 24 KN/m³. Se trabajó también con un acero de 420 MPa como esfuerzo de fluencia y un módulo de elasticidad de (200000MPa). El recubrimiento usado fue de 40mm tanto en vigas como en columnas.

5.2. Modelación y diseño elástico

5.2.1. Cargas

5.2.1.1. Cargas gravitacionales

Para el avalúo de las cargas muertas y vivas de la edificación, se tiene que analizar tanto para la losa como para la fachada y la cubierta, todos los datos son tomados de la NSR-10 y el diseño de la fachada y del tipo de suelo fueron elegidos a criterio propio. En la tabla adjunta a continuación se muestra un resumen de los valores en (KN/m²) elegidos.

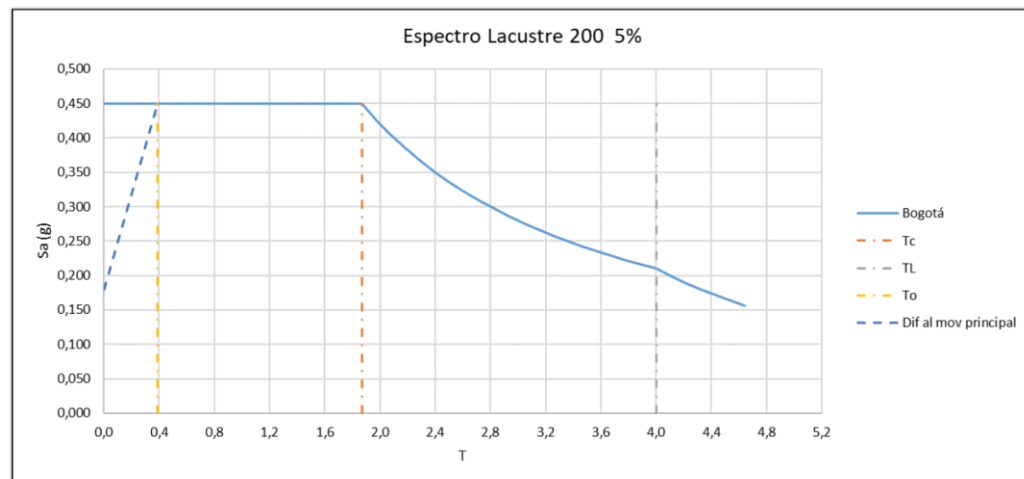
Tipo de carga	CARGA (KN/m2)	DESCRIPCIÓN	NSR-10	
Carga muerta	Losa típica			
	Cielo Raso	0,5	Entramado metálico suspendido afinado en yeso	B.3.4.1-1
	Piso	1,1	Baldosa cerámica (20 mm) sobre 25 mm de mortero.	B.3.4.1-3
	Muros	2,5	Mampostería de bloque de arcilla pañetado en ambas caras (150)	B.3.4.2-4
	Otros	0,5		
		4,6		
	Fachada			
	Muros	2,5	Mampostería de bloque de arcilla pañetado en ambas caras (150)	B.3.4.2-4
	Ventanas, vidrios	0,5	Muros cortina de vidrio, entramado y marco	B.3.4.2-5
	Cubierta			
Membrana	0,03	Membranas impermeables, tela asfáltica de una capa.	B3.4.1-4	
Piso	1,5	Afinado (25 mm) sobre concreto de agregado pétreo.	B3.4.1-3	
	1,53			
	1,6	Carga muerta mínima en cubierta	B.3.4.3-1	
Carga viva	Balcones	5	Balcones residenciales.	
	Cuartos y corredores	1,8	Cuartos residenciales.	B.4.2.1-2
	Escalera	3	Escaleras residenciales.	
	Cubierta	1,8	Carga mínima en cubierta usada para jardines de cubierta.	

5.2.1.2. Parámetros sísmicos

Los parámetros sísmicos de la zona en donde estará ubicada la edificación (Lacustre 200), se muestran a continuación. Cabe aclarar que como el edificio entra en el grupo de uso I, lo que quiere decir que el coeficiente de importancia es de 1.

Parametro	Valor
Aa	0,15
Av	0,2
Fa	1,2
Fv	3,5
Tc	1,87
TL	4,00
Grupo de uso	I
Coeficiente de importancia	1,00

El espectro que obtenemos con los parámetros característicos mostrados anteriormente se muestra a continuación.



5.2.1.3. Combinaciones de carga según la normativa vigente (NSR-10)

Las combinaciones usadas se muestran a continuación y tienen en cuenta las combinaciones de diseño, en donde el sismo se toma como el 100% en una dirección y el 30 % en la otra, en donde el sismo se aumenta por un factor de 2 y 3 para el diseño de las vigas y las columnas respectivamente.

Combinaciones de carga

(DER) $0.9D+S_x$
(DER) $0.9D+S_y$
(DER) $1.2D+S_y+L$
(DER) $1.2D+S_x+L$
(DIS) $0.9D+S_x+0.3S_y$
(DIS) $0.9D+S_y+0.3S_x$
(DIS) $1.2D+1.6G+0.5W$
(DIS) $1.2D+1.6G+L$

(DIS) 0.9D+W
(DIS) 1.2D+1.6L+0.5Lr
(DIS) 1.2D+1.6L+0.5Le
(DIS) 1.2D+1.6L+0.5G
(DIS) 1.2D+1.6Le+0.5W
(DIS) 1.2D+1.6Le+L
(DIS) 1.2D+1.6Lr+0.5W
(DIS) 1.2D+1.6Lr+L
(DIS) 1.2D+Sx+0.3Sy+L
(DIS) 1.2D+Sy+0.3Sx+L
(DIS) 1.2D+W+L+0.5G
(DIS) 1.4D
(DIS) 1.2D+W+L+0.5Lr
(DIS) 1.2D+W+L+0.5Le
(DIS_COL) 0.9D+3(Sx+0.3Sy)
(DIS_COL) 0.9D+3(Sy+0.3Sx)
(DIS_COL) 1.2D+3(Sx+0.3Sy)+L
(DIS_COL) 1.2D+3(Sy+0.3Sx)+L
(DIS_VGA) 0.9D+2(Sx+0.3Sy)
(DIS_VGA) 0.9D+2(Sy+0.3Sx)
(DIS_VGA) 1.2D+2(Sx+0.3Sy)+L
(DIS_VGA) 1.2D+2(Sy+0.3Sx)+L

En donde:

D: Carga muerta

L: Carga viva

Sy: Carga dirección y.

Sx: Carga dirección x.

W: Carga generada por el viento.

5.2.2. Derivas

Para el cálculo de derivas se usan las combinaciones de derivas y se verifica que cumplan con la deriva límite por piso, las columnas elegidas son las resaltadas en el plano mostrado.



Después de realizar el análisis, se evidencia que las derivas máximas ocurren con la combinación de 1.2D+Sx+L y ocurren en la columna 1 y 11.

Label	Story	(DER) 1.2D+Sx+L					Verificación
		Ux	Uy	Deriva	H	d limite	
1	Cubierta	53,72	8,835	15,553	2,88	28,8	Cumple
	Piso 3	38,33	6,609	21,924	2,88	28,8	Cumple
	Piso 2	16,69	3,064	16,968	3,15	31,5	Cumple
	Piso1						
	Cubierta	-51,6	-10,36	14,784	2,88	28,8	Cumple
	Piso 3	-37,09	-7,535	21,215	2,88	28,8	Cumple
	Piso 2	-16,28	-3,376	16,63	3,15	31,5	Cumple
	Piso1						

Label	Story	(DER) 1.2D+Sx+L					Verificación
		Ux	Uy	Deriva	H	d limite	
11	Cubierta	53,72	6,55	15,471	2,88	28,8	Cumple
	Piso 3	38,33	5,003	21,791	2,88	28,8	Cumple
	Piso 2	16,69	2,407	16,862	3,15	31,5	Cumple
	Piso1						
	Cubierta	-51,6	-8,098	14,668	2,88	28,8	Cumple
	Piso 3	-37,09	-5,956	21,051	2,88	28,8	Cumple
	Piso 2	-16,28	-2,731	16,511	3,15	31,5	Cumple
	Piso1						

Como se observa, las derivas máximas que se generan cumplen con el requisito de la norma de ser menor al 1 % de la altura entre pisos.

5.2.3. Coeficiente de disipación de energía

Se establece un coeficiente de disipación (R_o) de 5 para una estructura de pórticos en concreto resistente a momentos con capacidad de disipación de energía DMO, teniendo en cuenta que la edificación presenta irregularidades, este valor se ve afectado por unos coeficientes, como se muestra en la siguiente tabla.

Irregularidad				
Tipo		Si	No	Ø irregularidad
De Planta	1P	a	x	0,9
		b	x	0,8
	2P	x		0,9
	3P		x	0,9
	4P		x	0,8
	5P		x	0,9
De Altura	1A	a		0,9
		b	x	0,8
	2A		x	0,9
	3A		x	0,9
	4A		x	0,8
	5A	a		0,9
		b	x	0,8
	De ausencia de redundancia	1R		x

Con la anterior tabla de resumen de irregularidades, escogemos el menor coeficiente (\emptyset) de cada tipo, dándonos así los siguientes resultados.

$\emptyset_p =$	0,8
$\emptyset_a =$	1
$\emptyset_r =$	1

Con lo cual se realiza la reducción al valor R para estructuras irregulares con la siguiente formula:

$$R = R_0 * \emptyset_p * \emptyset_a * \emptyset_r = 4$$

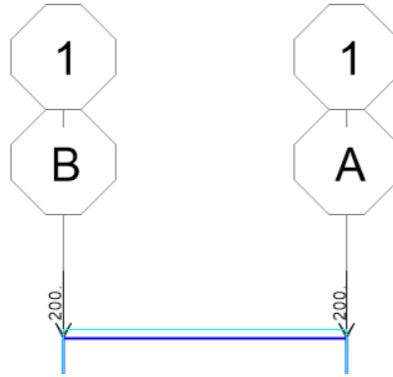
5.3. Pórtico representativo

5.3.1. Cargas

El pórtico representativo que se busca construir se modela en SAP2000 con cargas que sean lo más parecidas posibles a las cargas que soportaría el pórtico como parte de la edificación.

Las cargas que soportara el pórtico serán:

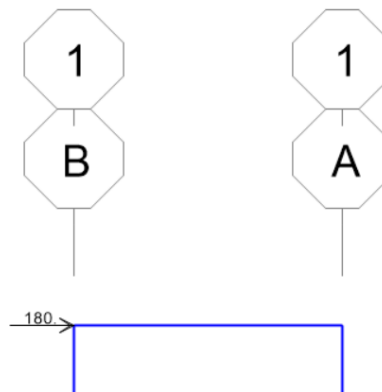
- Carga por sus propios elementos
- Carga axial generada por el edificio: La cual es de 400 KN, estas se distribuyen en las dos columnas con un valor de 200 KN.



- Carga sísmica:

La carga sísmica es aplicada como una fuerza horizontal en el extremo superior derecho del pórtico, es modelada como una fuerza no lineal con esta fuerza y los diagramas de cortante y momento generado se podrá ver el comportamiento de las rotulas. Este valor se halla como el cortante ultimo soportado por las dos columnas y depende directamente del diseño de esta.

El cortante soportado por cada columna es de 90 KN, es decir que el pórtico soportará 180 KN de cortante.



5.3.2. Diseño según la NSR-10

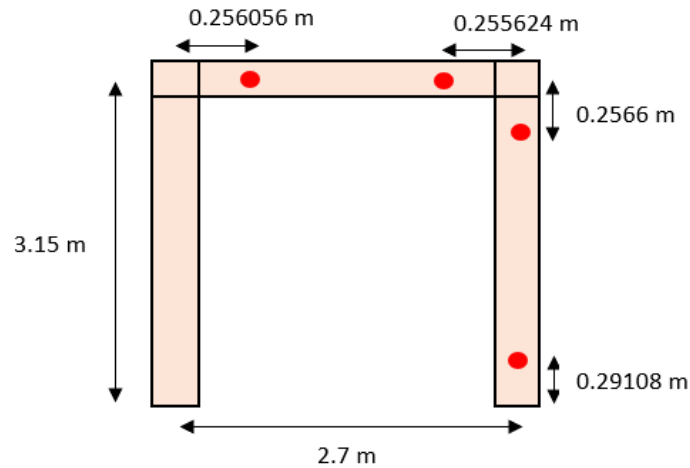
El diseño de los elementos del pórtico se realiza con los resultados dados por el modelo en ETABS, se diseña con los requisitos dados por la norma sismo resistente (NSR-10), el diseño del pórtico se muestra en los planos que se encuentran en los anexos, con las especificaciones necesarias.

5.3.3. Ubicación de rotulas

Para poder analizar el comportamiento de las rotulas, es necesario ubicar primero la ubicación de estas y modelarlas en el programa. Se uso la siguiente ecuación.

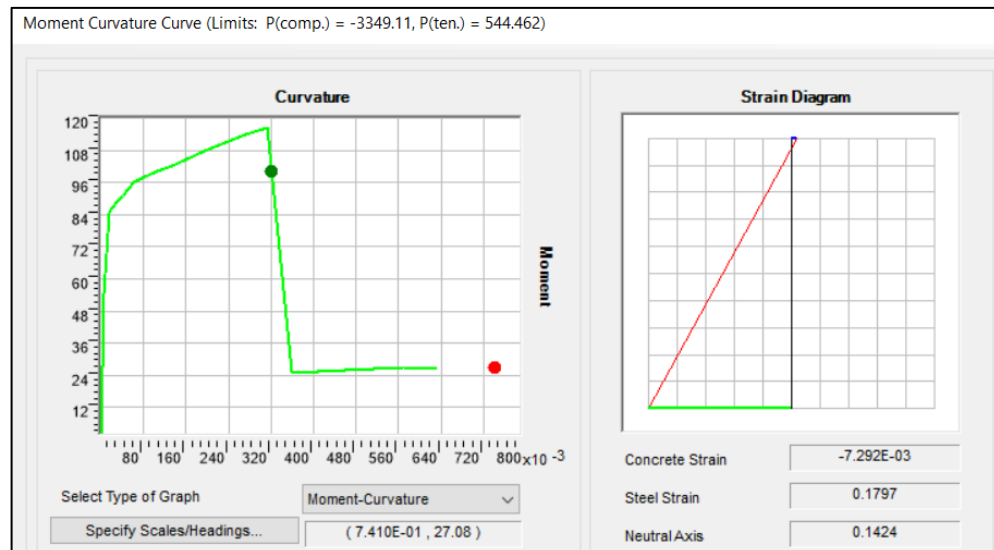
$$L_{sp} = 0.08 * L_c + 0.022 * f_y * d_b$$

En donde L_c es la distancia que hay entre el punto inicial o final de la columna o viga hasta donde haya cambio de signo de momento en el diagrama de momentos, con la combinación de carga 1,2D + 1,0 L + F_s. Los resultados se muestran a continuación.

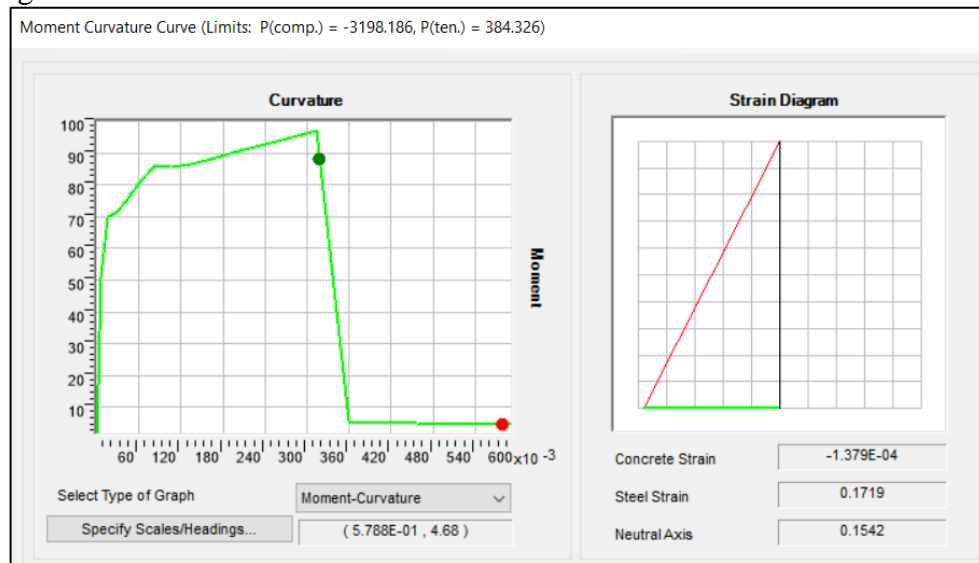


De igual manera se modela el comportamiento que tendrán las rotulas, para poder hacerlo es necesario tener la gráfica de momento-curvatura para cada sección, la cual es dada por el programa. El diagrama de la viga y de la columna se muestra a continuación.

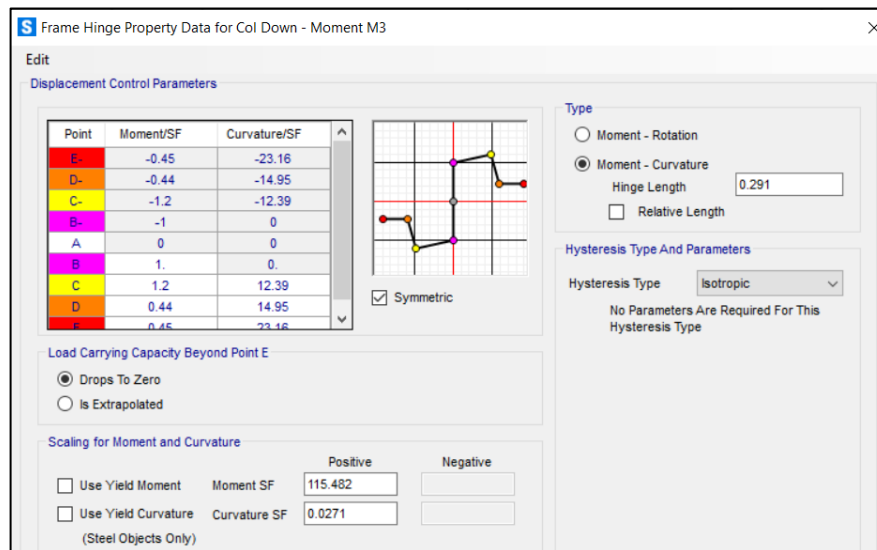
Columna



Viga



Se realiza la relación de Momento / Momento de fluencia “ M/M_y ” y Curvatura δ /Curvatura “ δ / δ_y ” y para cuatro puntos de la gráfica momento curvatura (M fisuración, M fluencia “ M_y ”, Momento último, Momento máximo); estos valores se ingresan en la modelación de las rotulas, también se tiene en cuenta la longitud L_{sp} hallado anteriormente, es por esto por lo que se realiza la definición de las propiedades para las rotula tanto para la superior como la inferior de la viga y de la columna.



S Frame Hinge Property Data for Col Up - Moment M3

Edit

Displacement Control Parameters

Point	Moment/SF	Curvature/SF
E-	-0.45	-23.16
D-	-0.44	-14.95
C-	-1.24	-12.39
B-	-1	0
A	0	0
B	1	0
C	1.24	12.39
D	0.44	14.95
E	0.45	23.16

Symmetric

Load Carrying Capacity Beyond Point E

Drops To Zero
 Is Extrapolated

Scaling for Moment and Curvature

Use Yield Moment Moment SF Positive: 115.482 Negative:

Use Yield Curvature Curvature SF Positive: 0.027 Negative:

(Steel Objects Only)

Type

Moment - Rotation
 Moment - Curvature
Hinge Length: 0.257
 Relative Length

Hysteresis Type And Parameters

Hysteresis Type: Isotropic
No Parameters Are Required For This Hysteresis Type

S Frame Hinge Property Data for V Left - Moment M3

Edit

Displacement Control Parameters

Point	Moment/SF	Curvature/SF
E-	-0.07	-22.06
D-	-0.07	-13.22
C-	-1.36	-11.56
B-	-1	0
A	0	0
B	1	0
C	1.36	11.56
D	0.07	13.22
E	0.07	22.06

Symmetric

Load Carrying Capacity Beyond Point E

Drops To Zero
 Is Extrapolated

Scaling for Moment and Curvature

Use Yield Moment Moment SF Positive: 71.33 Negative:

Use Yield Curvature Curvature SF Positive: 0.027 Negative:

(Steel Objects Only)

Type

Moment - Rotation
 Moment - Curvature
Hinge Length: 0.2605
 Relative Length

Hysteresis Type And Parameters

Hysteresis Type: Isotropic
No Parameters Are Required For This Hysteresis Type

S Frame Hinge Property Data for V Right - Moment M3

Edit

Displacement Control Parameters

Point	Moment/SF	Curvature/SF
E-	-0.07	-22.06
D-	-0.07	-13.22
C-	-1.36	-11.56
B-	-1	0
A	0	0
B	1	0
C	1.36	11.56
D	0.07	13.22
E	0.07	22.06

Symmetric

Load Carrying Capacity Beyond Point E

Drops To Zero
 Is Extrapolated

Scaling for Moment and Curvature

Use Yield Moment Moment SF Positive: 71.33 Negative:

Use Yield Curvature Curvature SF Positive: 0.027 Negative:

(Steel Objects Only)

Type

Moment - Rotation
 Moment - Curvature
Hinge Length: 0.2556
 Relative Length

Hysteresis Type And Parameters

Hysteresis Type: Isotropic
No Parameters Are Required For This Hysteresis Type

5.3.4. Construcción

Se muestran de manera resumida las fotos del proceso constructivo que se llevó a cabo, las demás fotos se encuentran en los anexos del trabajo.



5.3.5. Ensayo experimental

Se muestran de manera resumida las fotos del ensayo realizado en el laboratorio de estructuras de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito que se llevó a cabo, las demás fotos se encuentran en los anexos del trabajo.

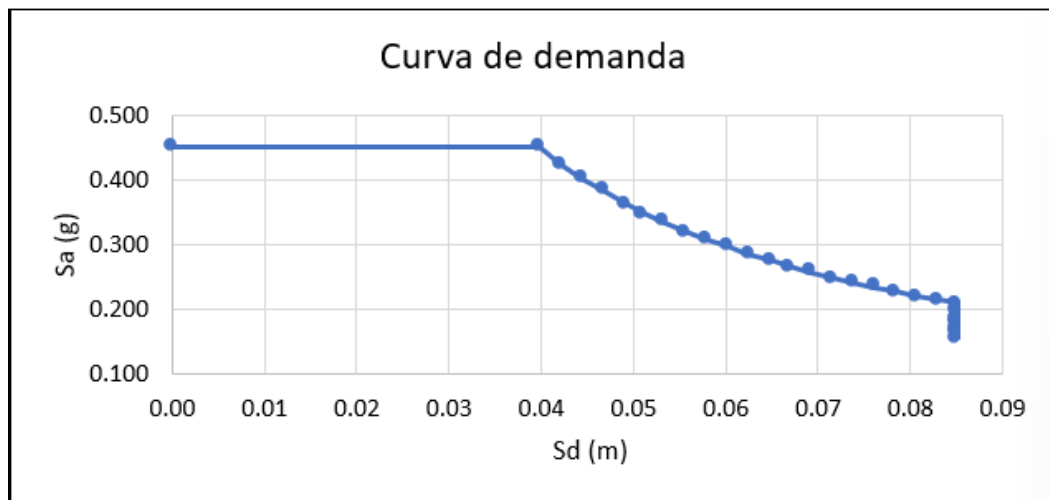


5.4. Análisis inelástico

5.4.1. Curva de la demanda del pórtico y de la edificación dada por el espectro de diseño.

El espectro de diseño se convierte en una curva de demanda, la cual se muestra a continuación, el periodo de la estructura se convierte en desplazamiento S_d , con la siguiente ecuación.

$$S_a = \frac{4 \pi^2}{T^2}$$



5.4.2. Curva de capacidad

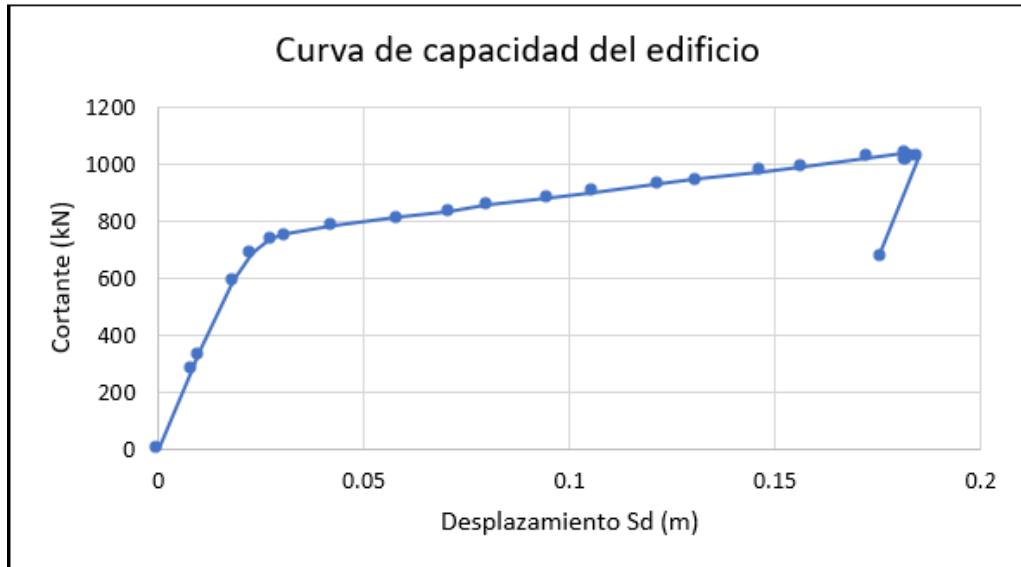
5.4.2.1. Edificación

La curva de capacidad indica el comportamiento de la estructura al momento de ser sometida a carga hasta la falla.

Para sacar esta curva es necesario aplicarle fuerzas sísmicas en el centro de masa de la estructura, estas cargas son obtenidas teniendo en cuenta la masa de cada piso y su participación modal, los resultados se muestran a continuación.

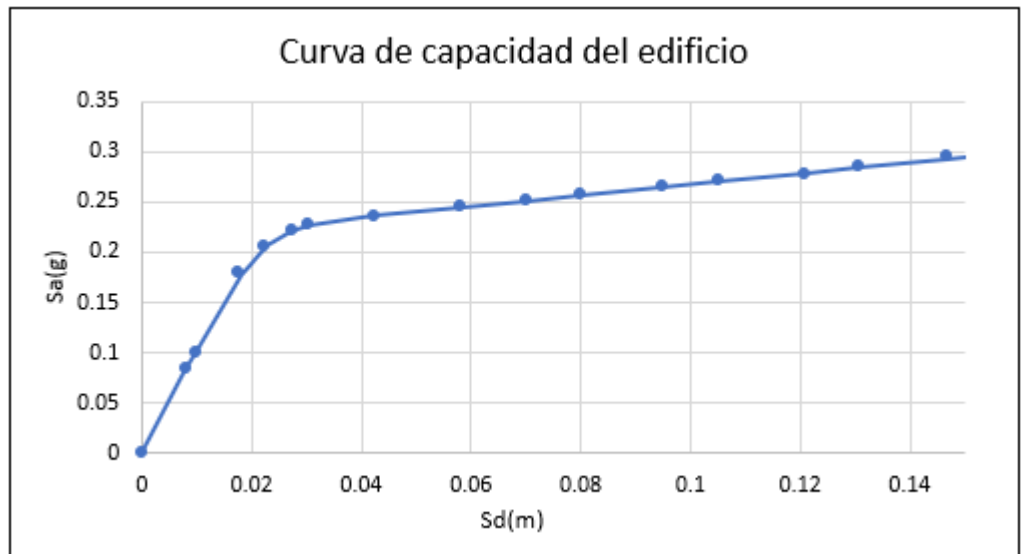
Fuerzas sísmicas	
Cubierta	61,65 KN
2° Piso	64,32 KN
1° Piso	27,91 KN

La edificación se analizará solo de forma analítica, la curva de capacidad es obtenida con ayuda del programa, la cual nos da el siguiente resultado.

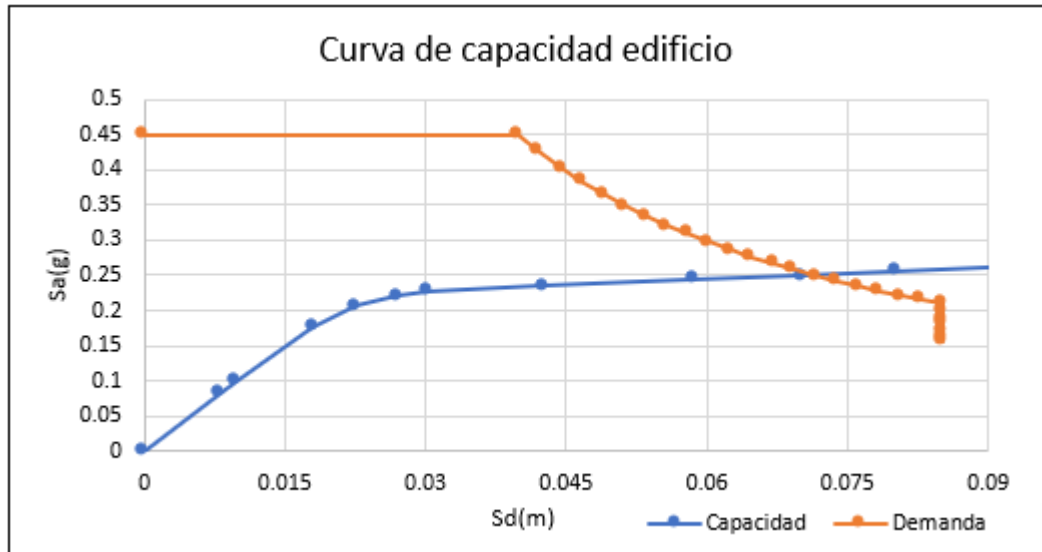


Esta grafica también se convierte en una curva de S_a vs S_d , pero en este caso ya no es una curva de demanda si no curva de capacidad del edificio.

El valor del desplazamiento no varía, pero el cortante se convierte en S_a dividiéndolo en la masa efectiva de la estructura, en este caso la masa del edificio que es de 3326.3KN.



Estas dos graficas se superponen, dándonos así la curva de demanda y capacidad del edificio.

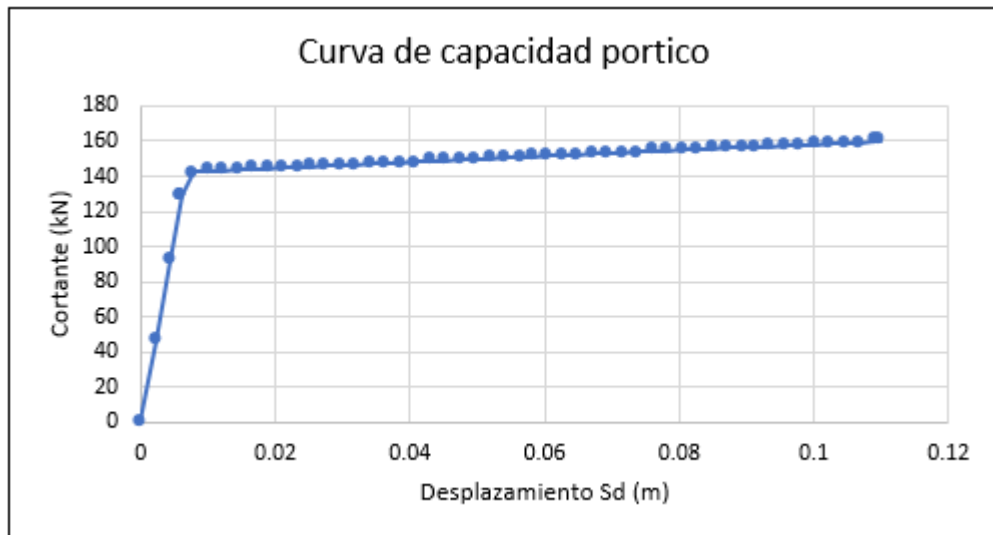


5.4.2.2. Pórtico

El pórtico se analizará tanto analítica como experimentalmente, la curva de capacidad analítico lo da SAP y la curva de capacidad experimental se obtiene mediante el ensayo del pórtico.

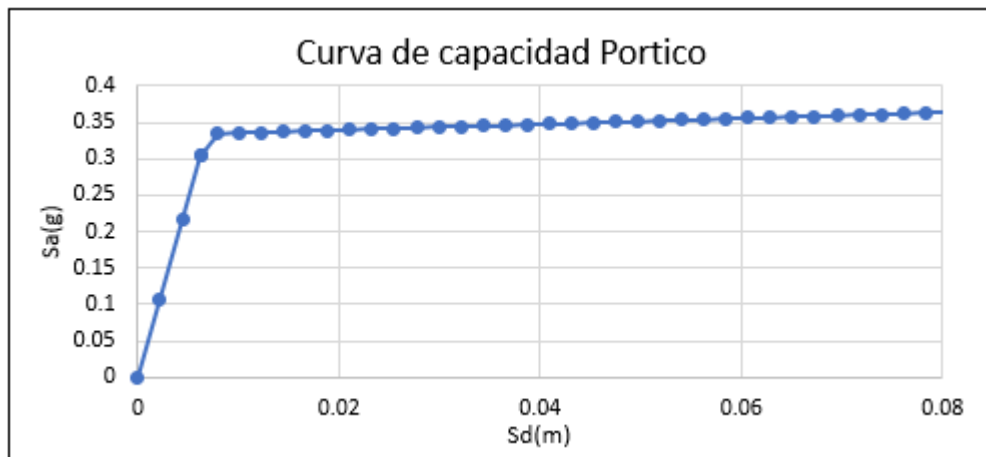
5.4.2.2.1. Analítico

Los resultados del desplazamiento vs el cortante en la base dados por SAP nos dan la siguiente curva de capacidad.

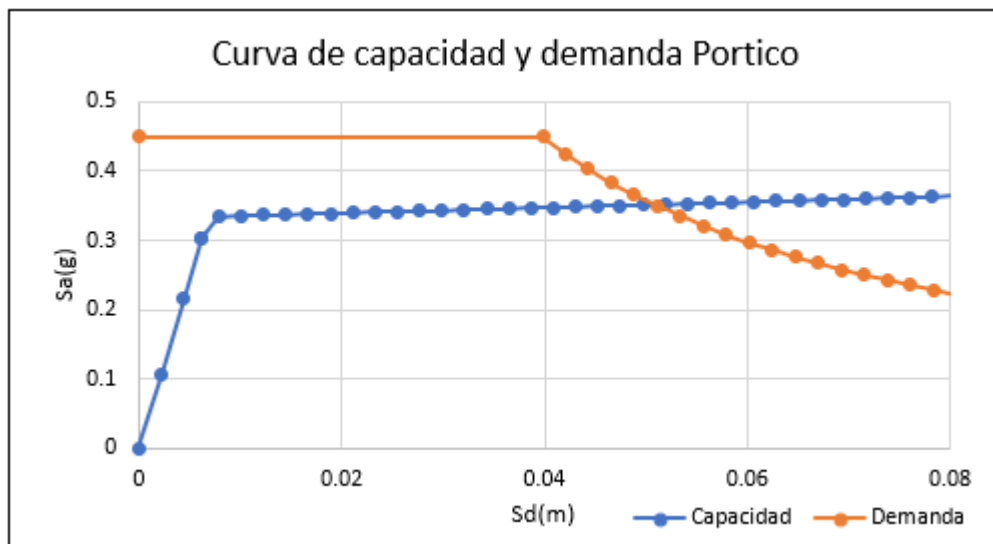


Esta grafica también se convierte en una curva de S_a vs S_d , pero en este caso ya no es una curva de demanda si no curva de capacidad.

El valor del desplazamiento no varía, pero el cortante se convierte en S_a dividiéndolo en la masa efectiva de la estructura, en este caso del pórtico, que es de 426KN.



Estas dos graficas se superponen como se realizó en el análisis del edificio.



Como podemos observar en la superposición de las curvas tanto para el edificio como para el pórtico, estamos en una zona inelástica ya que la curva de capacidad no está ni muy abajo, ni muy arriba de la curva de demanda. En el caso de que la curva de capacidad estuviera muy por debajo significaría que la estructura se encuentra subdiseñada, es decir, que se generará grandes deformaciones al momento de que actúe el sismo, más sin embargo si esa misma curva estuviera muy por encima de la curva de demanda, significa que el comportamiento es elástico y la estructura no tendría deformaciones, ni daños al momento de soportar el sismo, lo que indicaría que el diseño con el que se realizó la estructura estaría sobrediseñado lo que ocasiona que el refuerzo sea mucho mayor al necesario, incurriendo en un mayor coste de construcción a lo que se consideraría que no sea viable económicamente.

5.4.2.2.2. Experimental

Teniendo el pórtico construido y cumpliendo los requisitos de diseño de la NSR-10, se procede a realizar el montaje del ensayo en el laboratorio de materiales de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

El montaje con el que se realizó el ensayo fue con un actuador el cual nos aplicaba una carga cíclica, con el que se simulaba la carga sísmica. Adicionalmente, como el pórtico construido era una parte de una edificación completa, se tenía que simular las cargas verticales que le llegaban, estas cargas fueron extraídas y calculadas con la ayuda del programa de diseño, ETABS.

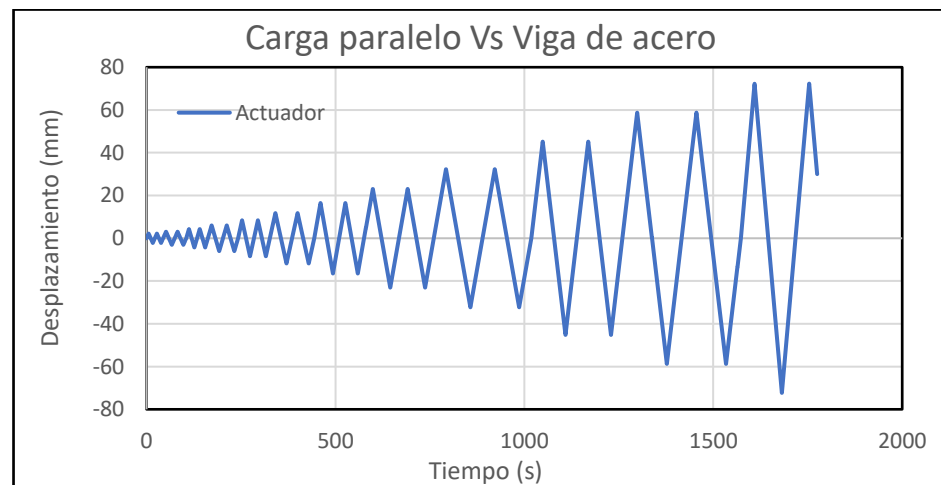
A continuación, se muestra el montaje del laboratorio y se indican en que puntos se aplicaría las cargas en el pórtico:



Se aclara, la carga axial como se supone que es la carga que le llega al pórtico del edificio, se considera que es una carga estática que soporta en su vida útil, es decir, en el ensayo no se aumentaba ni disminuía de magnitud, se aplicaba por medio de unas prensas en los nudos, encima de una platina que se podía desplazar mientras se aplicaba la carga cíclica.



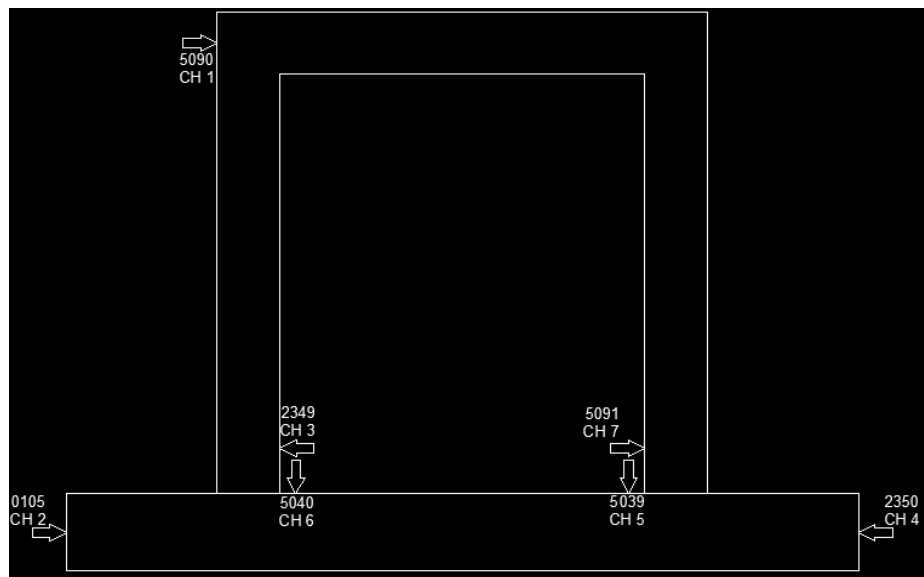
Mientras que la carga cíclica se aplicaba como se comentó anteriormente, por medio de un actuador. Este necesitaba de un patrón de carga inicial, para empezar el ensayo. Se definió que el ensayo iba a ser controlado por desplazamientos, con el siguiente patrón de carga.



Además, en el pórtico antes de iniciar el ensayo se colocaron unos sensores para medir los desplazamientos en unos puntos claves. Uno de estos dispositivos se muestra a continuación, este en especial se ubicó cerca del punto de aplicación de la fuerza del actuador.



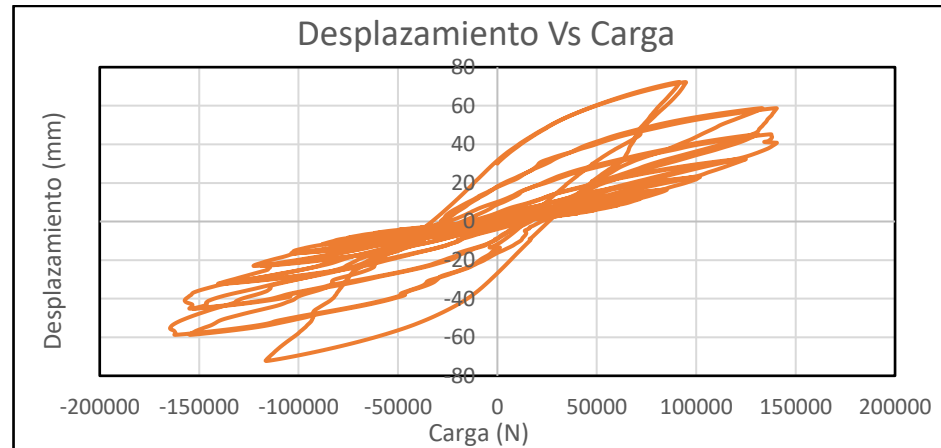
En el siguiente esquema se muestran los sensores de desplazamientos puestos en el pórtico, con un número que indica el *label* de identificación de cada uno.



Se aclara que en el día del ensayo se presentó un inconveniente a mitad del ensayo, porque las platinas donde estaban siendo aplicadas las cargas axiales se movieron fuera de lo normal, por lo que se tuvo que parar y acomodar nuevamente para reanudar el procedimiento. Esto generó que hicieramos dos ensayos en el día, por lo que al final se tenían que hacer ajustes para calibrar los resultados que nos dieran.

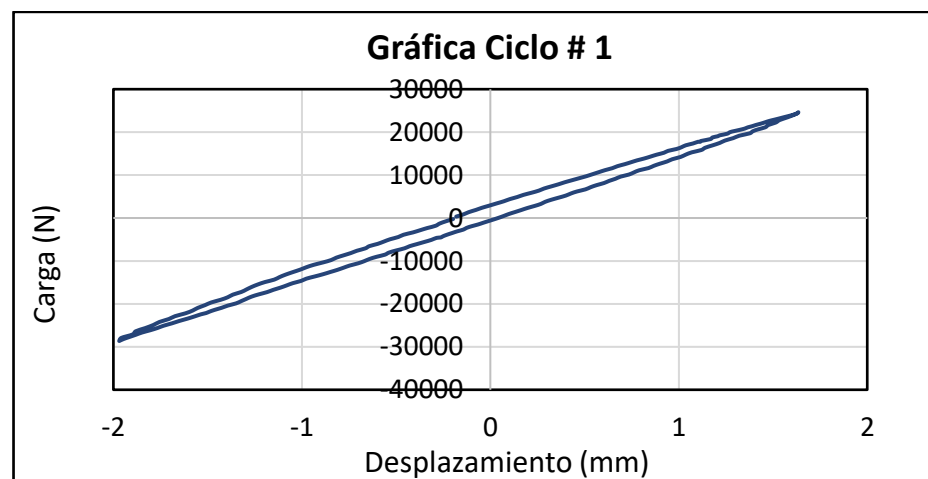
Con los equipos calibrados se procedió a aplicar la carga sísmica al pórtico, dando unos resultados de valores de carga y tiempo de aplicación, con los que, posprueba, se procedió a realizar unos ajustes, debido que tanto los sensores, como el actuador medían tiempos y otros datos, pero en tiempos diferentes. Entonces fue necesario calibra los ceros¹ de cada equipo para que los resultados y el manejo de estos sean consistentes.

Se usaron los datos obtenidos para construir la curva de desplazamiento vs carga y poder observar el comportamiento histerético.

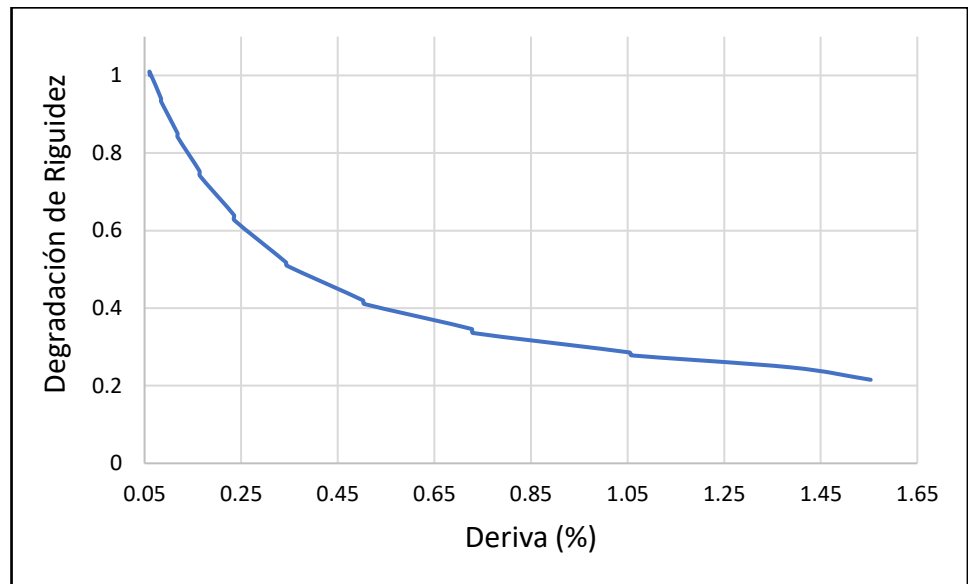
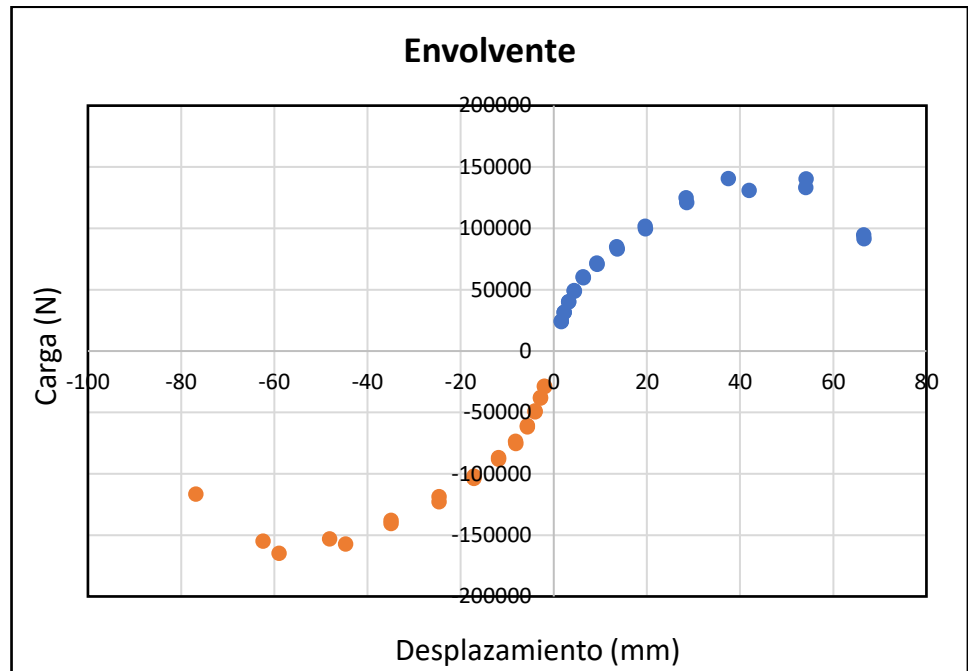


Teniendo las curvas histereticas del pórtico ensayado se procede a definir cada ciclo, para poder extraer de cada uno la rigidez, la energía disipada (E_D), la energía de deformación (E_{SO}) y el punto máximo para sacar la envolvente. Con los resultados obtenidos de los sensores de desplazamiento, en especial el 5090, nos da el valor de la deriva.

A continuación, se muestran los resultados del ciclo 1 de carga y descarga del 1er ensayo.



¹ Ceros del equipo, hace referencia al tiempo cero en el que un equipo empieza a hacer mediciones.



En la siguiente tabla se resumen los datos de todos los ciclos del primer ensayo (antes de pausar el ensayo).

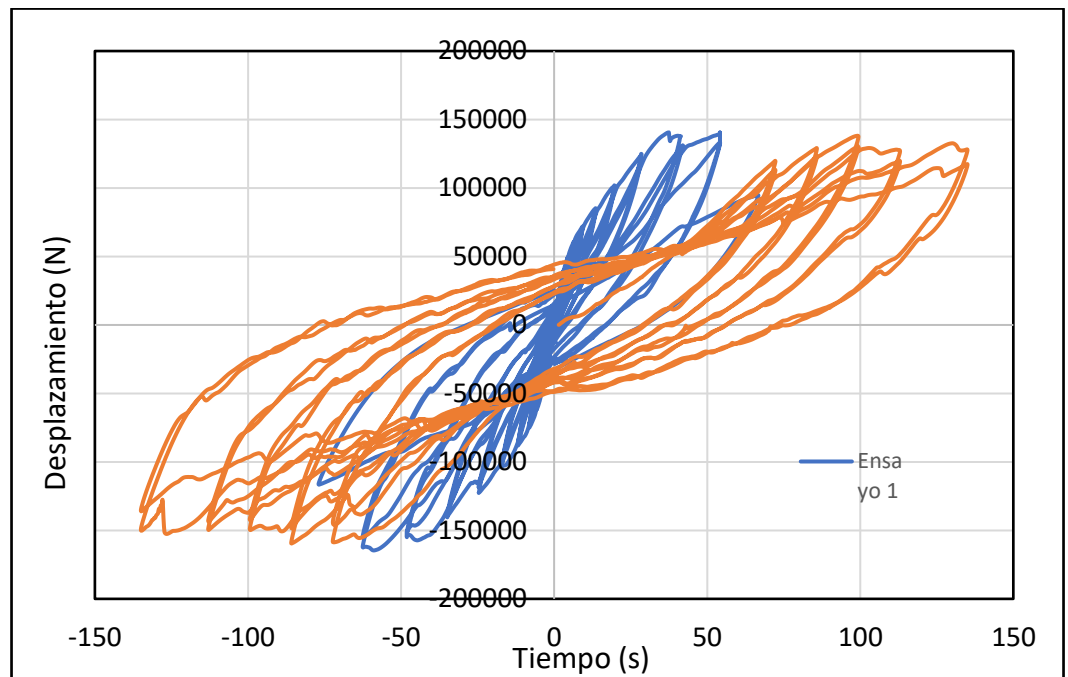
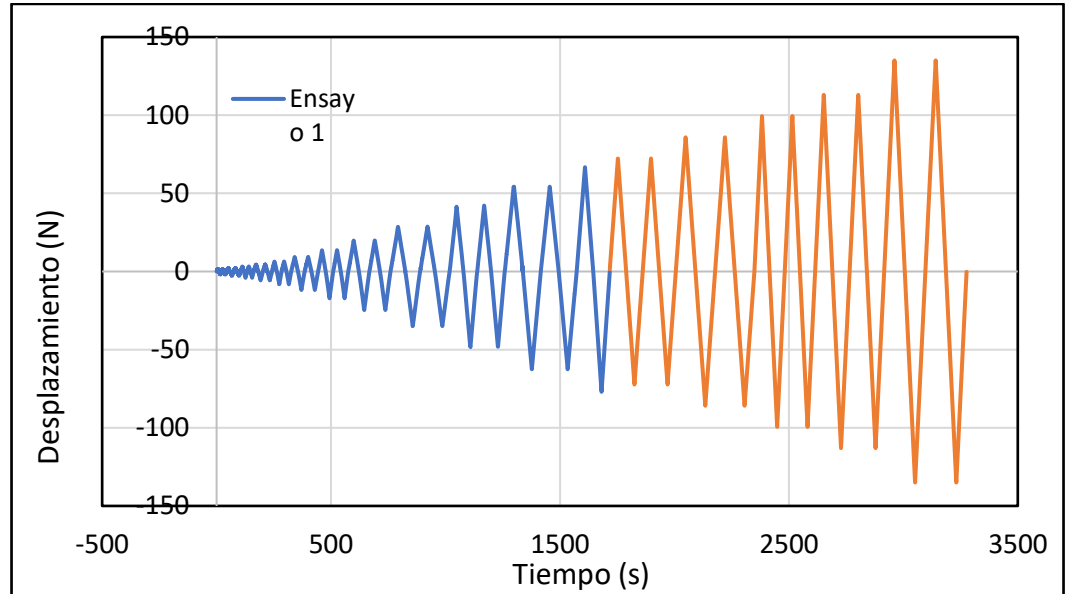
No. Ciclo	Puntos máximos		Puntos mínimos		Área			Δ (%)	Rigidez		ξ
	F (N)	D (mm)	F (N)	D (mm)	Eso (N*mm)	Ed (N*mm)	Ed acum (KN*mm)		Ki (KN/mm)	Δ Ki	
0	24052,95	1,66	-28914,39	-1,96	19920,66	13124,57	0,00	13,12	0,055	14,65	1,00
1	24644,43	1,63	-28639,73	-1,97	20140,66	8412,84	1,00	21,54	0,054	14,79	1,01

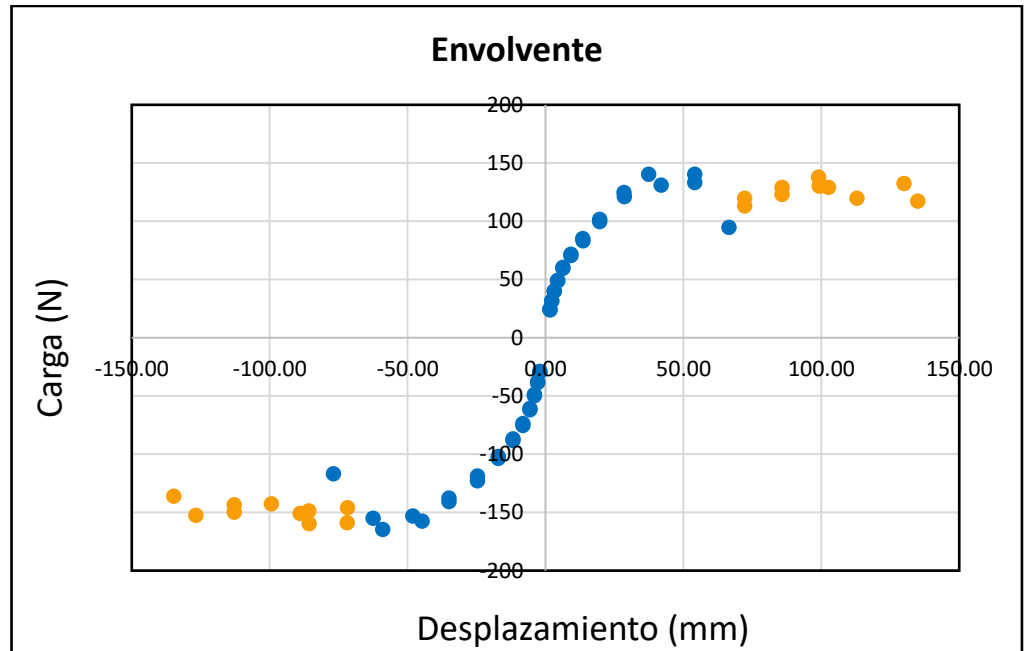
No. Ciclo	Puntos máximos		Puntos mínimos		Área			Δ (%)	Rigidez		ξ
	F (N)	D (mm)	F (N)	D (mm)	Eso (N*mm)	Ed (N*mm)	Ed acum (KN*mm)	%	Ki (KN/mm)	Δ Ki	%
2	31736,60	2,27	-38350,00	-2,81	36032,14	20828,14	2,00	42,37	0,076	13,78	0,94
3	31734,57	2,28	-37734,29	-2,81	36117,12	16841,99	3,00	59,21	0,076	13,66	0,93
4	40320,99	3,19	-49532,48	-4,01	64245,45	43724,36	4,00	102,93	0,106	12,48	0,85
5	40144,66	3,20	-48584,66	-4,00	64293,68	31574,31	5,00	134,51	0,107	12,32	0,84
6	49395,94	4,42	-61800,77	-5,65	109048,94	92884,72	6,00	227,39	0,147	11,05	0,75
7	48994,10	4,45	-60594,71	-5,64	109102,52	64313,30	7,00	291,70	0,148	10,85	0,74
8	60536,45	6,34	-75136,75	-8,12	191915,69	171444,40	8,00	463,15	0,211	9,38	0,64
9	59844,59	6,37	-73548,50	-8,16	190706,75	116186,16	9,00	579,33	0,212	9,18	0,63
10	71864,23	9,25	-88027,21	-11,80	332476,27	331287,51	10,00	910,62	0,308	7,60	0,52
11	70750,57	9,30	-86831,83	-11,80	329071,52	219017,24	11,00	1129,64	0,310	7,47	0,51
12	85250,95	13,55	-103634,13	-17,12	577707,30	595183,85	12,00	1724,82	0,452	6,16	0,42
13	83264,16	13,63	-101859,00	-17,12	567441,12	397872,72	13,00	2122,70	0,454	6,02	0,41
14	101871,28	19,64	-122684,44	-24,61	1000162,00	1022793,58	14,00	3145,49	0,655	5,08	0,35
15	99702,23	19,71	-118622,36	-24,63	982695,06	644772,55	15,00	3790,26	0,657	4,92	0,34
16	124942,58	28,46	-140507,73	-34,92	1777989,14	1757914,63	16,00	5548,18	0,949	4,19	0,29
17	121157,39	28,57	-137724,77	-34,91	1730769,70	1185661,99	17,00	6733,84	0,952	4,08	0,28
18	140592,56	37,48	-157270,24	-44,69	2634564,07	3710267,99	18,00	10444,11	1,249	3,63	0,25
19	131128,07	41,94	-153043,06	-48,09	2749932,72	2693421,40	19,00	13137,53	1,398	3,16	0,22
20	140530,56	54,18	-164631,53	-58,93	3806930,77	6167955,90	20,00	19305,48	1,806	2,70	0,18
21	133269,81	54,13	-154923,22	-62,42	3606874,51	5015939,56	21,00	24321,42	1,804	2,47	0,17
22	94888,75	66,54	-116594,32	-76,78	3157064,22	7011436,86	22,00	31332,86	2,218	1,48	0,10

La siguiente tabla se resumen los datos del segundo ensayo (después de reanudar el primero)

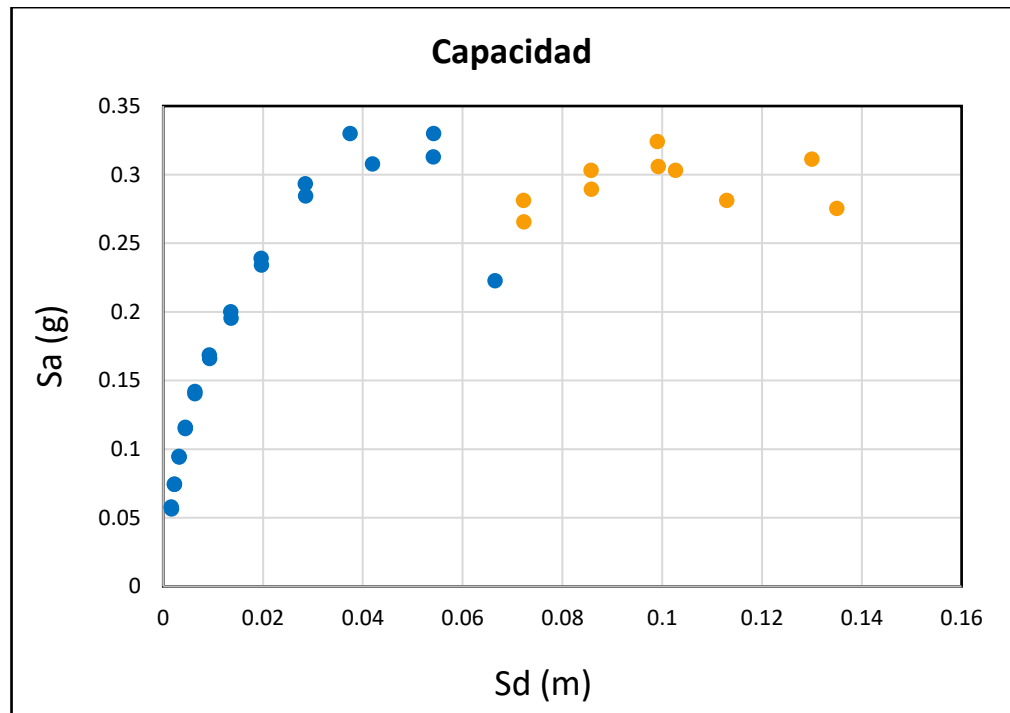
No. Ciclo	Puntos máximos		Puntos mínimos		Área			Δ (%)	Rigidez		ξ
	F (N)	D (mm)	F (N)	D (mm)	Eso (N*mm)	Ed (N*mm)	Ed acum (KN*mm)	%	Ki (KN/mm)	Δ Ki	%
0	119841,16	72,23	-158694,31	-71,88	4327827,60	6988641,34	23,00	38321,50	2,408	1,93	0,13
1	113188,03	72,28	-145933,37	-71,76	4090763,50	6726964,35	24,00	45048,47	2,409	1,80	0,12
2	129190,35	85,77	-159512,90	-85,70	5540558,98	9526485,37	25,00	54574,95	2,859	1,68	0,11
3	123261,82	85,80	-148504,39	-85,74	5287767,64	9232025,17	26,00	63806,98	2,860	1,58	0,11
4	138097,98	99,06	-150733,91	-88,96	6840062,93	12410140,93	27,00	76217,12	3,302	1,54	0,10
5	130294,84	99,26	-142549,36	-99,30	6466321,09	11844283,36	28,00	88061,40	3,309	1,37	0,09
6	129174,31	102,67	-149596,38	-112,77	6631325,03	14936580,66	29,00	102997,98	3,422	1,29	0,09
7	119796,07	112,95	-143400,49	-112,76	6765264,34	14426594,61	30,00	117424,58	3,765	1,17	0,08
8	132637,96	129,99	-152560,42	-126,69	8620756,45	20690647,78	31,00	138115,22	4,333	1,11	0,08
9	117336,44	135,04	-136069,42	-134,79	7922444,00	20057502,22	32,00	158172,73	4,501	0,94	0,06
10	119841,16	72,23	-158694,31	-71,88	4327827,60	6988641,34	23,00	38321,50	2,408	1,93	0,13

Luego de haber sacado los datos de los ensayos se procedió a unir los dos resultados en uno solo





Y con la envolvente del ensayo unificado podemos sacar la capacidad del pórtico ensayado.



5.4.3. Coeficiente de disipación de energía “R”

El coeficiente R se halla por dos diferentes métodos: Newmark and Hall y ATC-19; en el primero se hace una relación entre el coeficiente y la ductilidad de la estructura, mientras que en el segundo no solo se tiene en cuenta la ductilidad, sino también la relación entre cortantes basales, la sobrerresistencia y el amortiguamiento.

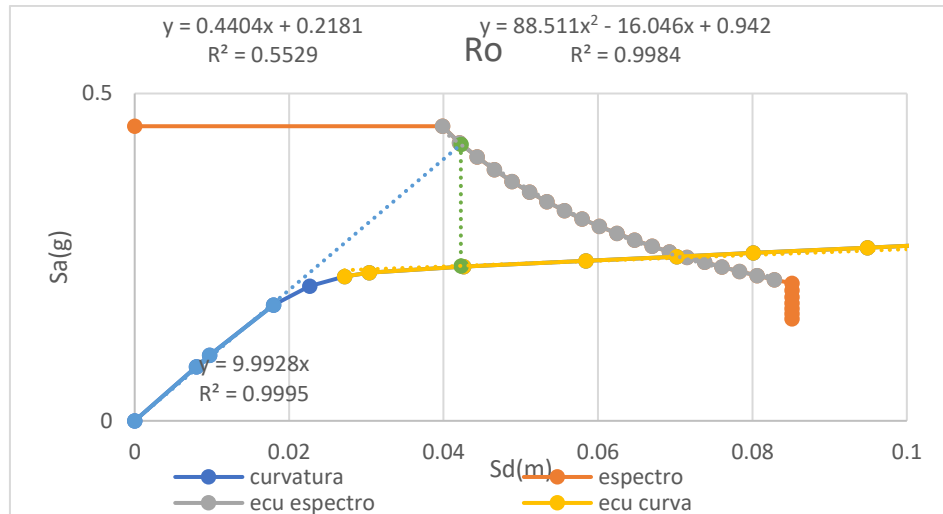
Para poder calcular el coeficiente de disipación de energía tanto del edificio como del pórtico con los métodos anteriormente mencionados se tiene que realizar una linealización de las curvas de capacidad y demanda encontradas anteriormente. Para poder realizar este procedimiento seguimos los pasos a continuación, que son extraídos y resumidos por la ingeniera Sandra Jerez (*comunicación personal, mayo 2022*) del procedimiento de FEMA 440.

1. *Obtener la representación de la capacidad (Curva de capacidad V vs. D) y de la demanda (espectro de respuesta o diseño) para el 5% de amortiguamiento*
2. *Convertir las curvas anteriores al formato **ADRS** (Acceleration-Displacement Response Spectrum).*
3. *Establecer una primera estimación del punto de comportamiento con base en el principio de los desplazamientos iguales.*
4. *Bilinealizar el espectro de capacidad hasta el punto estimado.*
5. *Calcular para el espectro encontrado en el punto (4) la rigidez post-elástica (α) y la ductilidad (μ).*
6. *Calcular el período y el amortiguamiento efectivos (T_{eff} y β_{eff}).*
7. *Calcular el factor de modificación **B** de acuerdo con el amortiguamiento efectivo encontrado.*
8. *Ajustar (reducir) el espectro de demanda de acuerdo con el factor del paso anterior.*
9. *Determinar el máximo desplazamiento estimado, d_i , usando la intersección entre el periodo efectivo radial (T_{eff}) y el espectro de demanda modificado. La aceleración espectral (a_i) es la que corresponde a d_i en el espectro de capacidad.*
10. *Comparar d_i con la estimación previa, si la hay. Si la diferencia supera una cierta tolerancia (usualmente el 5%), repetir el proceso hasta lograr una convergencia.*

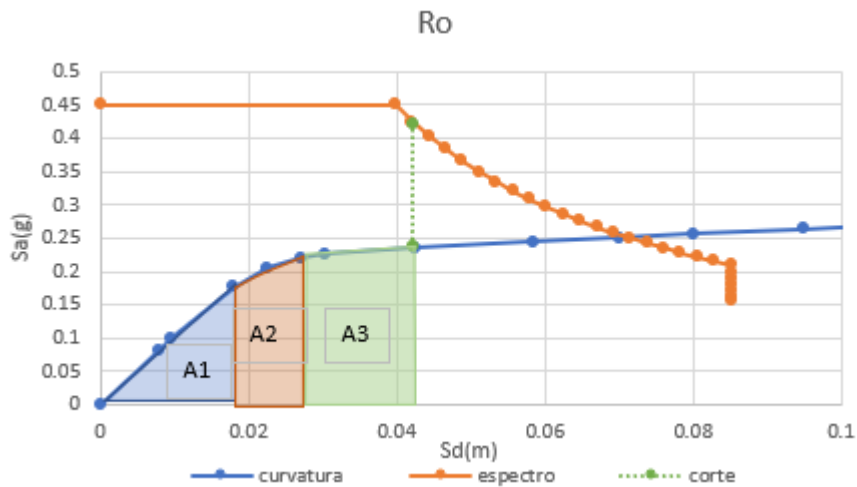
5.4.3.1. Edificio

Como ya realizamos los dos primeros pasos anteriormente procedemos con el 3er paso, es decir, realizar una primera estimación, proyectando la capacidad si trabajara en su totalidad en el rango elástico, hasta que corte la curva de la demanda.²

² El procedimiento de linealización es el mismo para la estructura completa como para el pórtico analítico como del construido y ensayado en el laboratorio. De manera académica solo se va a realizar el procedimiento con la edificación completa y se presentara los resultados de los dos pórticos.



Luego se procede a sacar el área bajo la curva de la capacidad, hasta el punto de intersección, con la regla de los desplazamientos iguales.



Área de bajo la curva

A1	0.001589956
A2	0.001823691
A3	0.003445828
At	0.006859474

	Sa	Sd
api	0.23670	0.0422424
ay	0.20049	0.02006315

Y con el punto de quiebre se procede a usar las siguientes ecuaciones, para realizar la bilinealización de la capacidad.

$$\alpha = \frac{\left(\frac{a_{pi} - a_y}{d_{pi} - d_y}\right)}{\left(\frac{a_y}{d_y}\right)}$$

$$\mu = \frac{d_{pi}}{d_y}$$

$$\beta_{eff} = 4.90(\mu - 1)^2 - 1.10(\mu - 1)^3 + \beta_o \quad \text{Para } 1.0 < \mu < 4.0$$

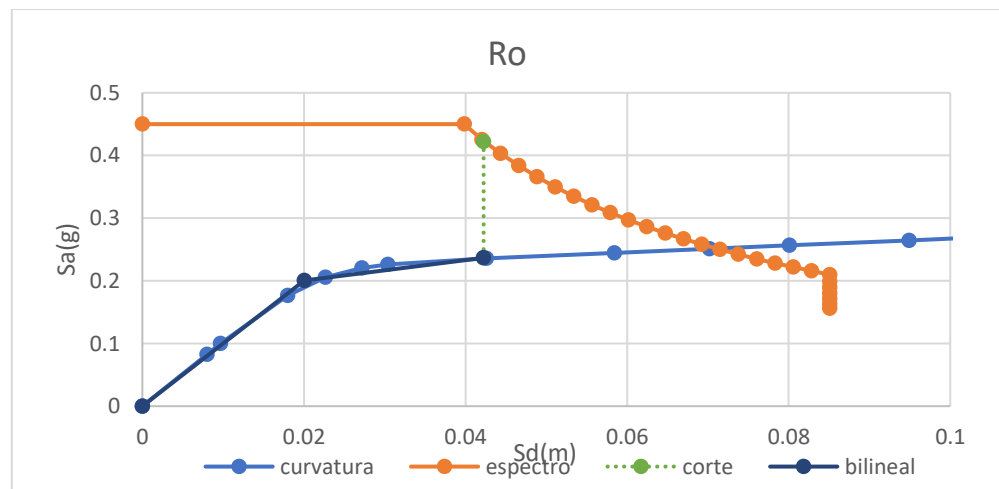
$$\beta_{eff} = 14.0 + 0.32(\mu - 1)^2 + \beta_o \quad \text{Para } 4.0 \leq \mu \leq 6.5$$

$$\beta_{eff} = 4.90 \left[\frac{0.64(\mu - 1) - 1}{[0.64(\mu - 1)]^2} \right] \left(\frac{T_{eff}}{T_o} \right)^2 + \beta_o \quad \text{Para } \mu > 6.5$$

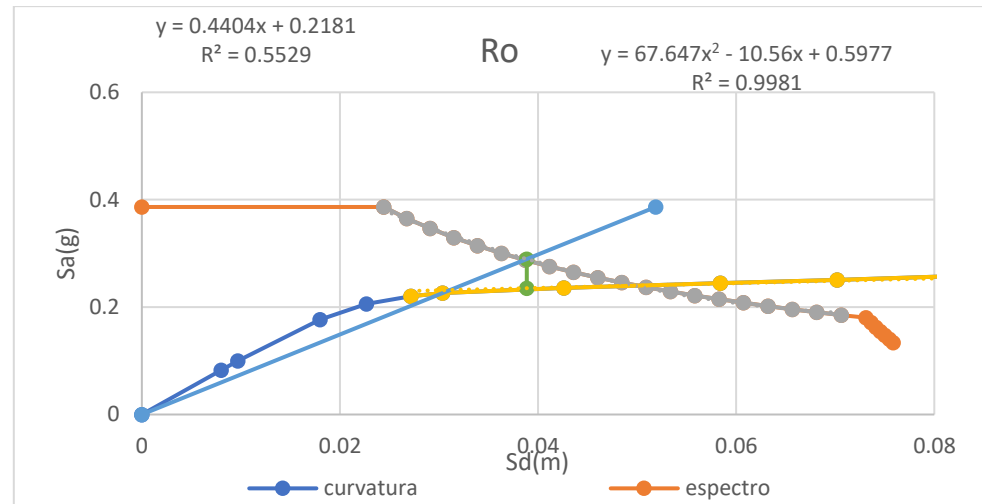
$$B = \frac{4}{5.6 - \ln \beta_{eff}(in\%)} \rightarrow (S_a)_\beta = \frac{(S_a)_o}{B(\beta_{eff})}$$

α	0.163
μ	2.11
Pendiente	9.99
T0	1.99
Bo (%)	5%
Teff	2.37
Pendienteeff	7.02
Beff	9.50
B	1.195

Con estos valores se procede a bilinealizar la capacidad, como se muestra a continuación y con el valor de B se reduce el espectro:



De esta manera se realiza nuevamente, hasta que la diferencia de la gráfica bilineal sea menor al 5%, de esta manera se obtiene la siguiente grafica final:



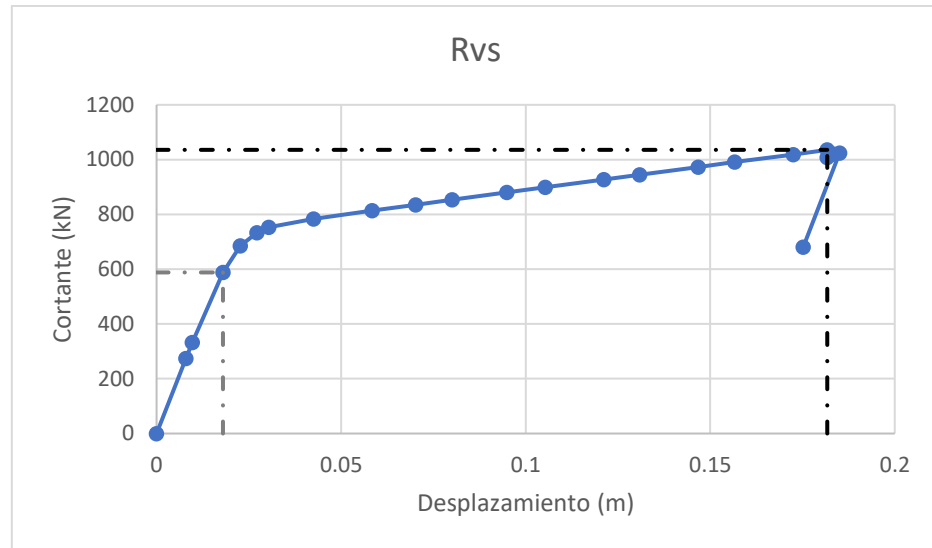
Con los siguientes datos:

α	0.196
μ	1.99
Pendiente	9.99
T0	1.99
Bo (%)	5%
Teff	2.30
Pendienteeff	7.45
Beff	8.71
B	1.164

Con estos datos obtenidos después de realizar el procedimiento del FEMA 440, procedemos a calcular los coeficientes con la metodología de Newmark and Hall y según la ATC-19

Newmark and Hall 1973		
Ro	1.99	$R = \mu$
	1.72	$R = \sqrt{2\mu - 1}$

Para usar el método según la ATC-19 toca recordar que supone, el R0 calculado por el método de Newmark y Hall, como uno de los dos factores de multiplicación, el otro factor es la relación del cortante último de la curva de capacidad con el cortante elástico antes de producirse la primera rotula.



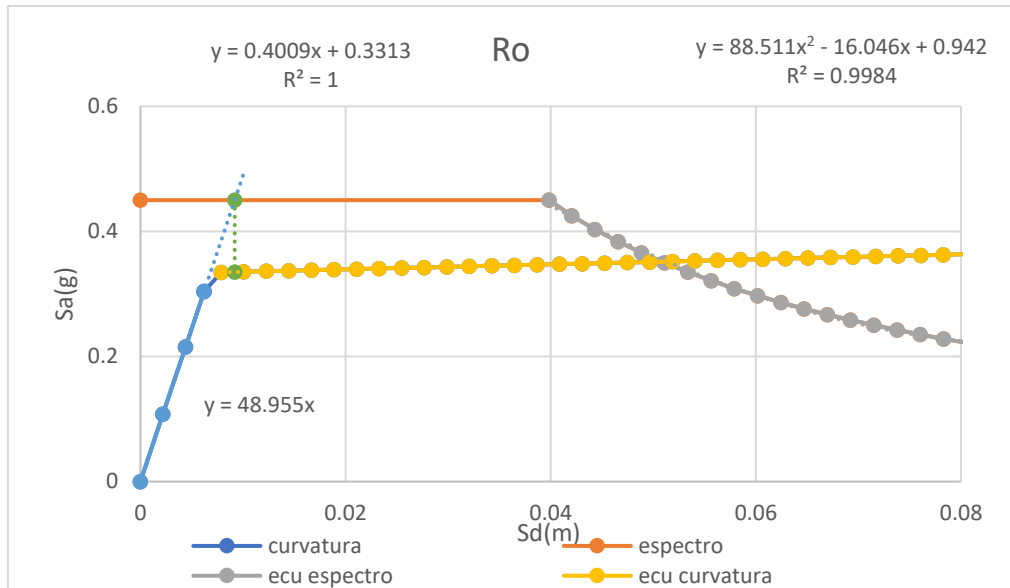
R_{μ}	1.99	$R_{\mu} = R_{Newmark}$
Rvs	1.76	
Ro	3.50	$R_o = R_{\mu} * R_{VS}$

5.4.3.2. Pórtico

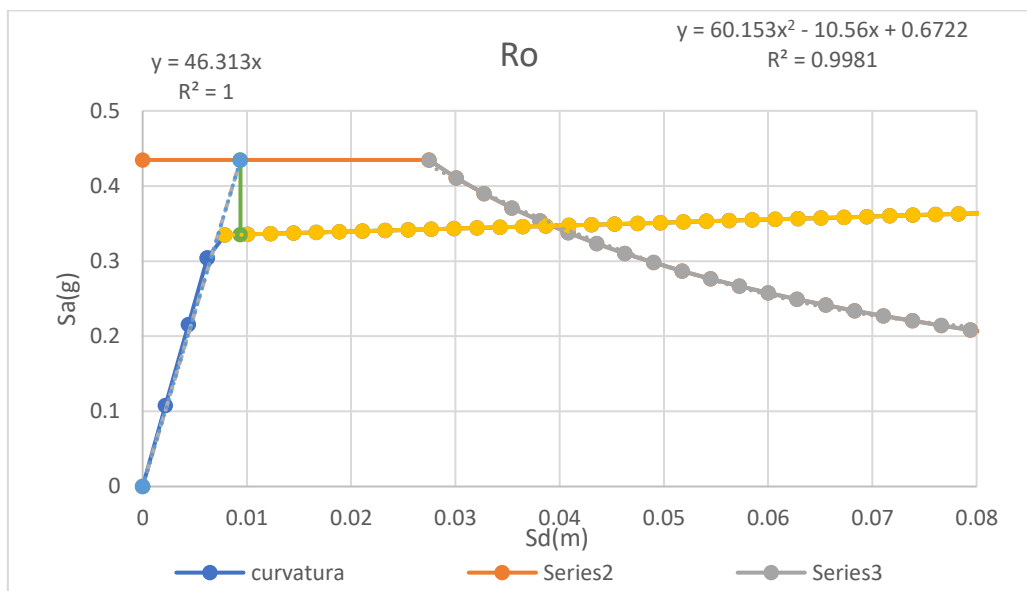
Esta sección se divide en dos, el cálculo del coeficiente de disipación de energía, R_o , del pórtico experimental, es decir, el que se diseñó y construyó para ensayarlo en el laboratorio y el otro cálculo del pórtico ideal, es decir, el pórtico teórico o analítico.

5.4.3.2.1. Analítico

El procedimiento para calcular el R_o , es el mismo con el que se calculó el del edificio por lo que acá solo se va a presentar gráfica donde se muestra la primera proyección:



Y la bilinealización definitiva con los valores correspondientes a esa gráfica:

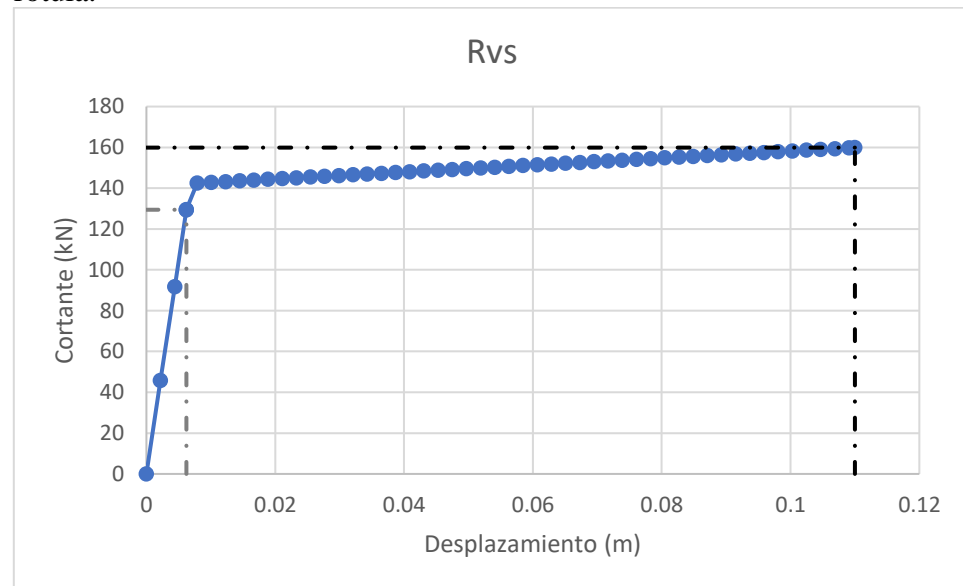


α	0.089
μ	1.39
Pendiente	48.96
T0	0.90
Bo (%)	5%
Teff	0.92
Pendienteff	46.31
Beff	5.68
B	1.035

Con estos datos obtenidos después de realizar el procedimiento del FEMA 440, procedemos a calcular los coeficientes con la metodología de Newmark and Hall y según la ATC-19

Newmark and Hall 1973		
Ro	1.39	$R = \mu$
	1.33	$R = \sqrt{2\mu - 1}$

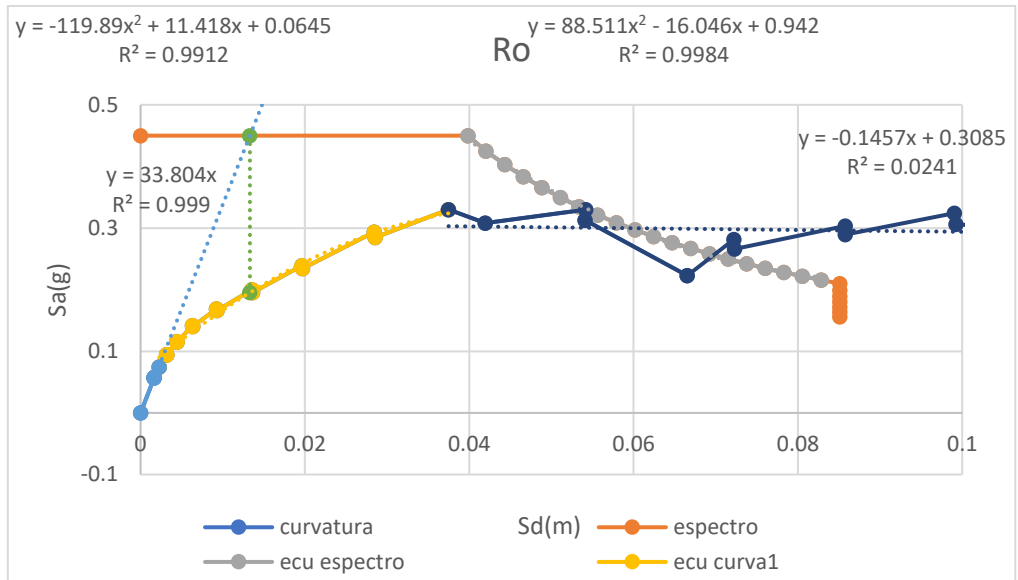
Para usar el método según la ATC-19 toca recordar que supone, el Ro calculado por el método de Newmark y Hall, como uno de los dos factores de multiplicación, el otro factor es la relación del cortante último de la curva de capacidad con el cortante elástico antes de producirse la primera rotula.



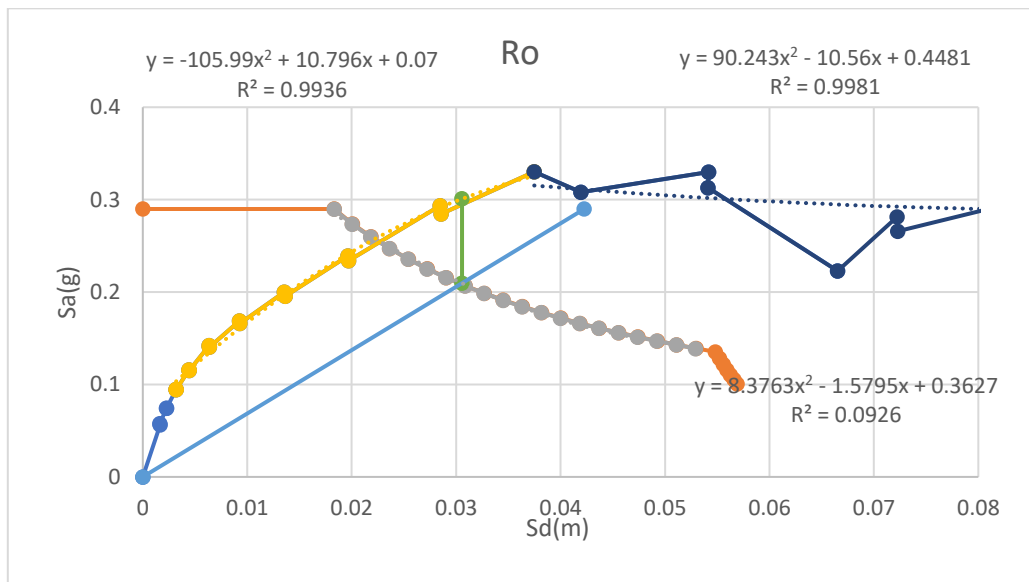
R_{μ}	1.39	$R_{\mu} = R_{Newmark}$
Rvs	1.24	
Ro	1.72	$R_o = R_{\mu} * R_{VS}$

5.4.3.2.2. Experimental

El procedimiento para calcular el Ro, es el mismo con el que se calculó el del edificio por lo que acá solo se va presentar gráfica donde se muestra la primera proyección:



Y la bilinealización definitiva con los valores correspondientes a esa gráfica:

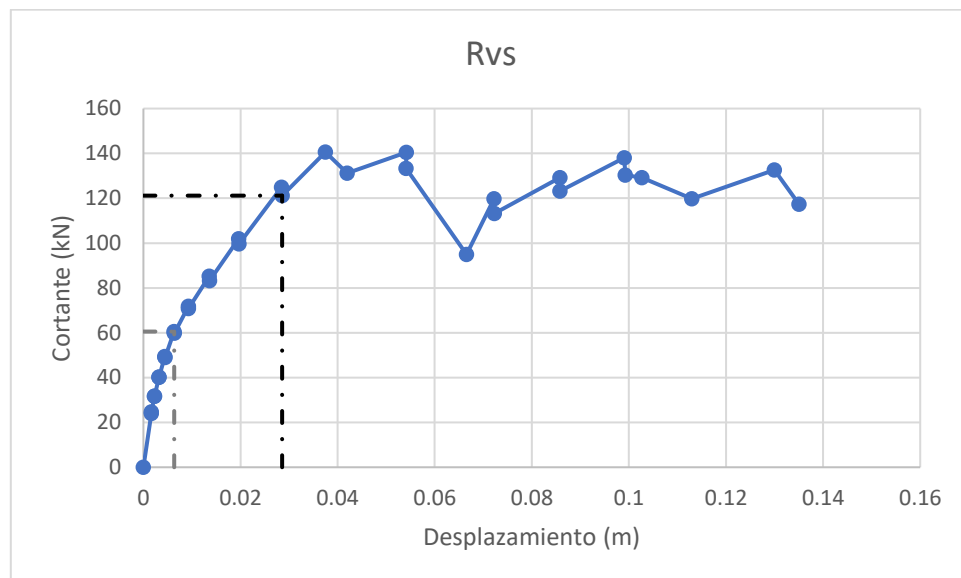


α	0.202
μ	8.43
Pendiente	33.80
T0	1.08
Bo (%)	5%
Teff	2.40
Pendienteff	6.86
Beff	20.56
B	1.552

Con estos datos obtenidos después de realizar el procedimiento del FEMA 440, procedemos a calcular los coeficientes con la metodología de Newmark and Hall y según la ATC-19

Newmark and Hall 1973		
Ro	8.43	$R = \mu$
	3.98	$R = \sqrt{2\mu - 1}$

Para usar el método según la ATC-19 toca recordar que supone, el R0 calculado por el método de Newmark y Hall, como uno de los dos factores de multiplicación, el otro factor es la relación del cortante último de la curva de capacidad con el cortante elástico antes de producirse la primera rotula.



R_{μ}	3.98	$R_{\mu} = R_{Newmark}$
Rvs	2.00	
Ro	7.97	$R_o = R_{\mu} * R_{VS}$

5.4.4. Resumen de resultados

En la siguiente tabla se resumen los resultados obtenidos de los valores de coeficientes de disipación de energía con las diferentes metodologías utilizadas en el estudio.

COEFICIENTE DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA			
MÉTODO	EDIFICIO	PÓRTICO (Analítico)	PÓRTICO (Experimental)
<i>Newmark and Hall</i>	1,72	1,33	3.98
<i>ATC-19</i>	3,04	1,65	7.97
<i>NSR-10</i>	5	5	5

6. ANALISIS

Teórico:

Se calculó el coeficiente, R_o , de disipación de energía por los dos métodos ya mencionados (Newmark and Hall y ATC-19), como se observa en la siguiente tabla los valores obtenidos en el método de ATC-19 dan mayores a los obtenidos mediante la metodología de Newmark and Hall, esto se debe a que el primer método utilizado tiene en cuenta no solo en la ductilidad, sino también la sobre resistencia y el amortiguamiento. Teniendo la siguiente tabla de resultados finales:

COEFICIENTE DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA ANALÍTICO		
MÉTODO	EDIFICIO	PÓRTICO
<i>Newmark and Hall</i>	1,72	1,33
<i>ATC-19</i>	3,04	1,65
<i>NSR-10</i>	5	5

Como se observa en la tabla anterior, el coeficiente aumenta en el edificio en comparación con el coeficiente obtenido de manera teórica en el pórtico, esto se debe al nivel de redundancia que se tiene en el edificio, el cual es capaz de disipar mucha más energía al momento de ser sometido a fuerzas sísmicas en comparación con el pórtico, que carece de elementos que le ayuden en su eficiente comportamiento.

Finalmente comparando el valor analítico del edificio y del pórtico con el valor dado por la norma (Titulo A), el cual es de 5, da una diferencia de 60,8 % y de 33.0% respectivamente. Los valores hallados por los métodos analíticos dan menores que el dado por la norma ya que la normativa exige ciertos requisitos adiciones al diseño elástico, tal como separación mínima entre estribos o cuantía mínima de refuerzo, que hacen de la estructura una estructura más rígida, haciendo que su capacidad para disipar energía por medio de deformaciones disminuya con relación al coeficiente esperado de 5. Sin embargo, con esto se logran que la estructura tenga la resistencia suficiente al momento de soportar fuerzas sísmicas aun cuando estas son disminuidas en una quinta parte.

Experimental:

El pórtico fue capaz de sufrir grandes deformaciones antes de fallar, llegando a un desplazamiento aproximado de 13,5 cm, es decir una deriva de 4,5% y fuerza sísmica cíclica máxima soportada de 140 KN, con una degradación de la rigidez de un 94%, respecto a la rigidez inicial la cual es de 14,65 KN/mm. Sin embargo, la fuerza para la cual fue diseñado el pórtico fue de 160 KN lo cual nos muestra que no soporto lo esperado, sin embargo, esto se debe a la interrupción del ensayo ocasionado por la inestabilidad de la aplicación de carga axial en los nodos superiores.

El pórtico pasa a comportarse de forma inelástica a partir del ciclo No.6 con una fuerza aproximada de 19,4 KN, desplazamiento de 4 mm, amortiguamiento del 0,07%,

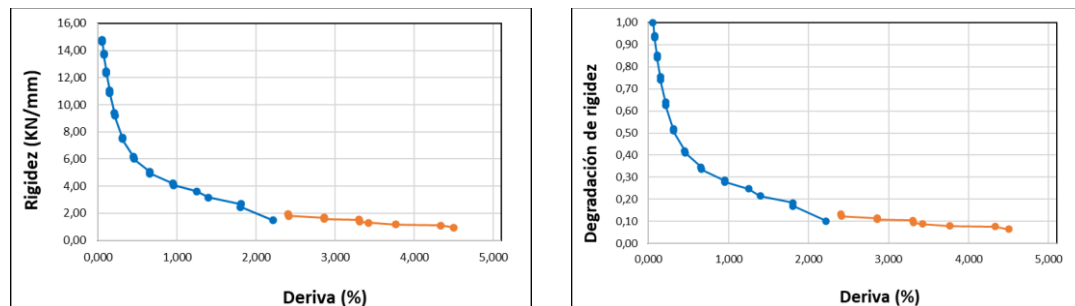
rigidez de 11,0 KN/mm, lo que indica que la capacidad del pórtico de soportar deformaciones disminuye en un 25 % cuando se llega a la zona inelástica. Además de esto, se observa que experimentalmente el pórtico pasa de manera muy rápida (Deriva del 0,15%) a la zona inelástica, es decir que a partir de este ciclo 6 se genera la primera rótula y los elementos no volverán a su estado inicial, teniendo deformaciones permanentes.

La primera fisura del concreto se observó en el ciclo No.12, con una fuerza de 82 KN, deriva de 0,45% y desplazamiento superior del pórtico de 1,35 cm. Lo que nos indica que el concreto se fisura mucho después de empezar a comportarse inelásticamente.

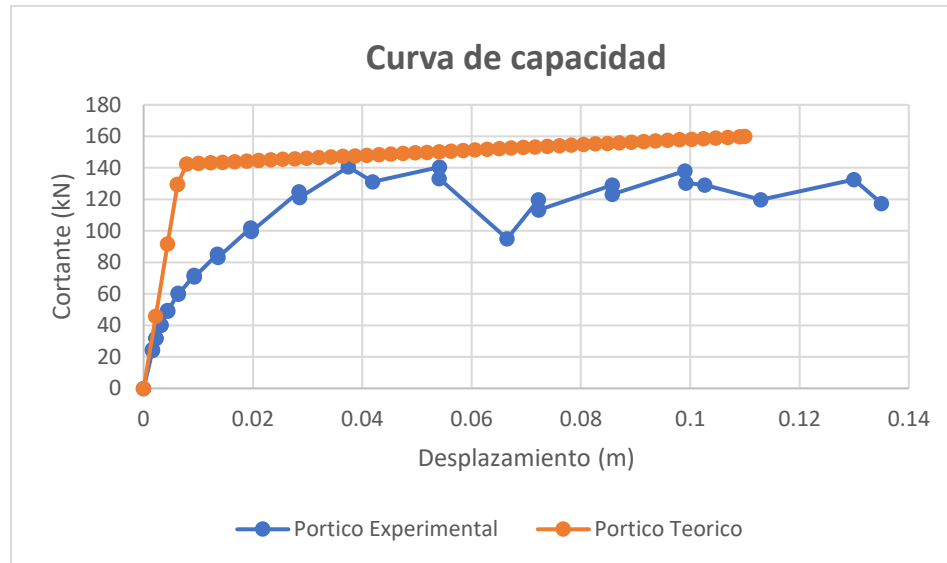


La norma nos exige una deriva máxima de 1% para sistemas aporticados, cuando nuestro pórtico llega a esta deriva, se encuentran en el ciclo No. 17 con una fuerza sísmica de 12,5 KN, desplazamiento de 3 cm y una degradación de la rigidez del 70%, el amortiguamiento en este punto es de 0,063% y la ductilidad en este de 4,5.

A continuación, se anexan las gráficas finales del análisis experimental, donde se observa la rigidez y su degradación en relación con la deriva.



Por otra parte, se analiza la curva de capacidad del pórtico experimental y teórico, la cual se muestra a continuación.



El comportamiento experimental varía respecto al teórico, la rapidez con la que llega el pórtico a la zona inelástica es mucho mayor experimentalmente, esto debido a que el programa realiza modelos de comportamiento ignorando factores que pueden afectarlo significativamente, es decir, que SAP2000 supone un comportamiento perfecto. Sin embargo, se tiene la misma tendencia en general, lo que varía entre las dos curvas es específicamente el cambio de zona elástica a inelástica.

El coeficiente obtenido del pórtico de forma experimental es casi 3 y 5 veces mayor que el obtenido de forma analítica por el método del Newmark and Hall y ATC-19, respectivamente, como se muestra a continuación:

COEFICIENTE DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA PÓRTICO		
MÉTODO	ANALÍTICO	EXPERIMENTAL
<i>Newmark and Hall</i>	1,33	3.98
<i>ATC-19</i>	1,65	7.97
<i>NSR-10</i>	5	5

Este valor aumenta debido a la relación que hay entre los cortantes y desplazamientos, como se explicó anteriormente la velocidad con la que se llega a la zona inelástica es mucho mayor en el ensayo que en el modelo teórico (como se observa en la gráfica anterior); lo que genera que la relación entre el cortante último y el cortante elástico sea mucho mayor en el análisis experimental que en el analítico, pasando de ser 1,2 a casi 2, es por esto que el valor obtenido por el método del ATC-19 es duplicado cuando se analiza experimentalmente que cuando se analiza teóricamente.

7. CONCLUSIONES

- Realizar un modelo a través de un programa computacional de diseño estructural como lo es SAP2000 o ETABS no logrará obtener un comportamiento 100% real de la estructura si no una aproximación, esto debido a que no es posible que el programa tenga en cuenta todos los factores que pueden afectar el comportamiento de la misma, como lo es la incertidumbre de parámetros iniciales ingresados al programa, incertidumbre generada en obra y demás agentes que pueden generar diferencias entre el comportamiento modelado y lo experimental.
- Comparando el valor analítico del edificio y del pórtico con el valor dado por la norma (Titulo A), el cual es de 5, da una diferencia de 60,8 % y de 33.0% respectivamente. Los valores hallados por los métodos analíticos dan menores que el dado por la norma ya que la normativa exige ciertos requisitos adicionales al diseño elástico, tal como separación mínima entre estribos o cuantía mínima de refuerzo, que hacen de la estructura una estructura más rígida, haciendo que su capacidad para disipar energía por medio de deformaciones disminuya con relación al coeficiente esperado de 5. Sin embargo, con esto se logran que la estructura tenga la resistencia suficiente al momento de soportar fuerzas sísmicas aun cuando estas son disminuidas en una quinta parte.
- Utilizando los métodos Newmark and Hall y ACI-19 podemos encontrar falencias debido a que consideran solamente una característica de la estructura siendo esta la relación entre desplazamientos y cortantes mínimos y máximo, dejando a un lado otros factores relevantes en los comportamientos de las estructuras.

8. RECOMENDACIONES

Una vez concluido el trabajo dirigido, se considera interesante investigar sobre otros aspectos relacionados con el coeficiente de disipación de energía y se propone:

- Se recomienda realizar un programa enfocado en la evaluación de comportamiento de estructuras, debido a que la mayoría de los programas están enfocados en el diseño mas no en el comportamiento más exacto de las mismas. Esto debido no solo a la vida útil de las estructuras si no de la actualización de la normativa, por lo cual a las mismas estructuras hay que hacerles una evaluación exhaustiva y exacta para su rehabilitación y mantenimiento.
- Trabajar en mejorar la aplicación estática de la carga axial, en un pórtico, para que no se presente la inestabilidad que pueda perjudicar en los resultados de los ensayos.
- Reducir la inexactitud en la mezcla de concreto, para que se pueda pedir de fabrica ya que, la mezcla diseñada en obra tiene un nivel de incertidumbre debido a diferentes factores de mano de obra o de la misma calidad de los elementos del concreto.
- Este trabajo es académico, se debe realizar más de un ensayo para poder decidir si es necesario o no disminuir el coeficiente de disipación de energía dado por la norma NSR-10.

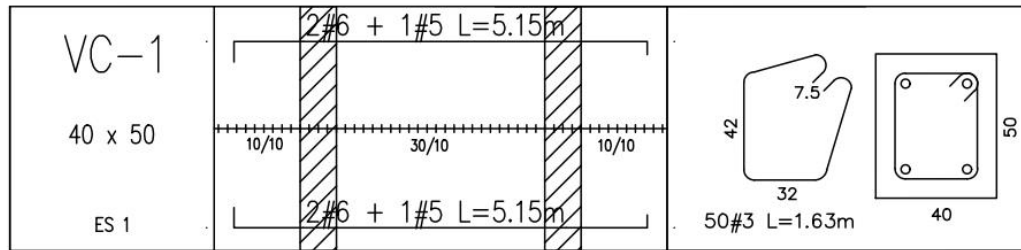
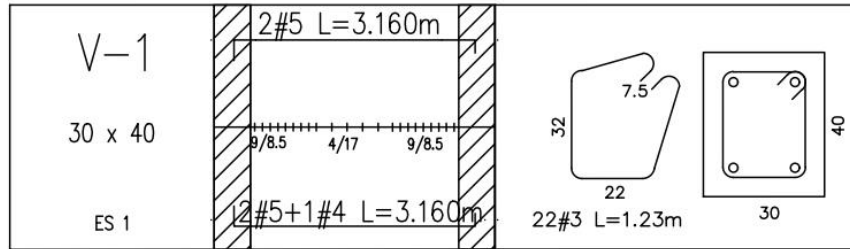
BIBLIOGRAFÍA

- ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SÍSMICA. (2010). *Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo-Resistente, NSR -10*. Bogotá: AIS.
- Carrillo, J. (s.f.). *CONCEPTOS BÁSICOS DE RESISTENCIA Y DUCTILIDAD*. Bogotá, Colombia: Universidad Militar Nueva Granada.
- Jerez, S. (s.f.). *MÉTODOS INELÁSTICOS*. Bogotá, Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- Morales Ortiz, F. A. (2021). *DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL PARA LA EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO NO LINEAL DE MUROS DE CONCRETO REFORZADO*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito .
- Murillo Rivas, C. D. (2017). *EVALUACIÓN TEÓRICA DEL COEFICIENTE DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA EN PÓRTICOS DE CONCRETO REFORZADO CON CAPACIDAD DE DISIPACIÓN MODERADA Y ESPECIAL SEGÚN EL REGLAMENTO NSR-10*. Bogotá: Escuela Colombiana Julio Garavito.
- Theran Cabello, P. J. (2011). *REVISIÓN DEL COEFICIENTE DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA, R, EN UNA ESTRUCTURA DE HORMIGÓN REFORZADO CO CAPACIDAD DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA MÍNIMA POR MEDIO DE METODOLOGÍAS DE ANÁLISIS NO LINEAL ESTÁTICO*. Barranquilla: Fundación Universidad del Norte.
- Valencia Restrepo, D., & Valencia Clement, G. (2008). *EVALUACIÓN DEL COEFICIENTE DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA, R, PARA ALGUNOS TIPOS DE ESTRUCTURAS DE ACERO*. *Revista Ingeniería e Investigación*, 41-49.

ANEXOS:
Planos del pórtico:

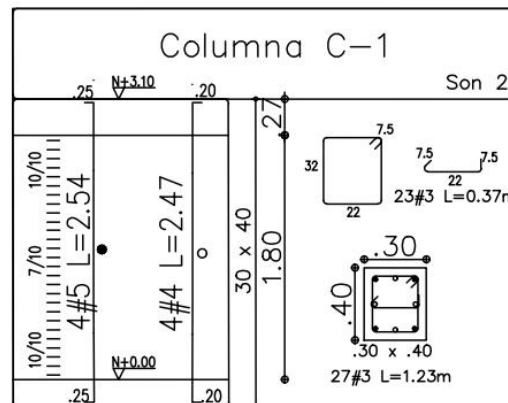
REFUERZO DE VIGA

ESC: _____ 1:75



REFUERZO DE COLUMNA

ESC: _____ 1:75



OBRA :

TRABAJO
DIRIGIDO

ANÁLISIS DEL
COEFICIENTE DE
CAPACIDAD DE
DISIPACIÓN DE
ENERGÍA POR
MEDIO DE LA
METODOLOGÍA DE
DISEÑO INELÁSTICO

CALCULO :

DANIELA MARIN CARÓN
LUIS ENRIQUE GELVES MERQUELEN
SANTIAGO ALBERTO HUERTAS ROJAS

CONTENIDO :

-REFUERZO DE VIGA
-REFUERZO DE COLUMNA

MODIFICACIONES :

MATERIALES :

Concreto: Ver especificaciones
Acero: De refuerzo
-Barras corrugadas #3/#4 #5-60 Mpa
-Barras lisas #3/#4 #5-60 Mpa
Estructuras metálicas: #3-#4 MPA
DIBUJO: ACAD -L.E.G.K

ESCALA:

INDICADAS

VERSION:

1

FECHA:

06 DE JULIO DE 2016

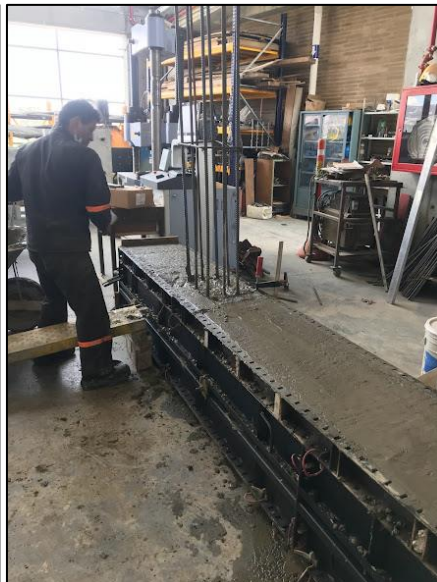
PLANO No

E-1

UNICO PLANO

Se anexan fotos de la construcción y del ensayo del pórtico analizado.
- Construcción:





- Ensayo:





