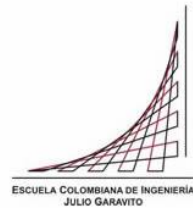


# **Maestría en Ingeniería Civil**

## **Evaluación analítica de los coeficientes de capacidad de disipación de energía individuales para elementos de pórticos de concreto reforzado.**

**Nicolás Guillén Hernández**

**Bogotá, D.C., 16 de Abril de 2023**



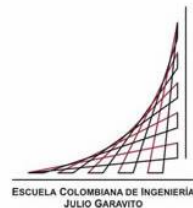
**Evaluación analítica de los coeficientes de capacidad de  
disipación de energía individuales para elementos de pórticos de  
concreto reforzado.**

**Tesis para optar al título de magíster en Ingeniería Civil, con  
énfasis en Estructuras**

**MSc, Ph.D., Sandra Rocío Jerez Barbosa**

**Director**

**Bogotá, D.C., 16 de abril de 2023**



La tesis de maestría titulada “Evaluación analítica de los coeficientes de capacidad de disipación de energía individuales para elementos de pórticos de concreto reforzado”, presentada por Nicolás Guillén Hernández, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Estructuras.

Director de la tesis

Sandra Rocío Jerez Barbosa I.C., M.Sc., Ph.D

Jurado

Nancy Torres Castellanos I.C., M.Sc., Ph.D.

Jurado

Pedro Nel Quiroga I.C., M.Sc., Ph.D.

Bogotá, D.C., 24 de mayo de 2023

## **DEDICATORIA**

A mi esposa por su apoyo en los momentos más difíciles, por creer en mí y por darme todas las fuerzas para llegar a este momento, a mi madre por estar siempre para mí y al igual que mi esposa nunca me dejó desfallecer, a mi papá que desde el cielo espero haber enorgullecido, a mi hermana por estar pendiente de mi proceso y a mi mejor amigo por aconsejarme y darme fuerzas para seguir adelante.

## **AGRADECIMIENTOS** (opcional)

A la ingeniera Sandra Jerez por guiarme con tanto empeño durante este proceso, a mi jefe por brindarme las facilidades para alcanzar esta meta, a mi compañera de trabajo Paola Rivera por ayudarme en este proceso y a Bibiana Romero por darme todo el apoyo que le fue posible para llegar a este momento.

## RESUMEN

La NSR-10 en el título A-10 permite el uso de la normativa ASCE 41-17 para la evaluación y rehabilitación de edificaciones existentes; sin embargo, para poder hacer uso de estas normativas se considera necesario hacer una adaptación a las prácticas de nuestro país. El presente trabajo busca evaluar los factores de modificación del componente, conocidos factores  $m$ , y compararlos contra los valores mínimos esperados contenidos en la ASCE 41-17 para contribuir a una propuesta de factores  $m$  que se adapten a las prácticas de nuestro país. Específicamente en este trabajo se evaluó el factor  $m$  para pórticos de concreto reforzado por medio de la modelación de dos estructuras; la primera de ellas diseñada según el Reglamento NSR-10 y la segunda diseñada antes de la entrada en vigor del CCCSR-84, con el fin de poder obtener información para una estructura que cumpliera con todas las especificaciones de la última normativa vigente y otra que no contara con provisiones sísmicas. Para este fin se realizaron modelaciones matemáticas haciendo uso de un método de análisis no lineal, el método del espectro de capacidad. Con base en la respuesta de cada una de las zonas de plastificación en los elementos estructurales se ha calculado el factor  $m$  en términos de las rotaciones para cada nivel de desempeño definido en la ASCE 41-17 y se han comparado contra los factores  $m$  mínimos esperados en función del tipo de elemento, nivel de desempeño y características del despiece. En términos generales se encontró que los factores  $m$  calculados en este trabajo superan los mínimos establecidos en el ASCE 41-17.

**Palabras clave:** Análisis no lineal, Análisis de Pushover, factor  $m$ , NSR-10, ASCE 41-17

## TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	14
2	OBJETIVOS	18
2.1	OBJETIVO GENERAL	18
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
3	MARCO TEÓRICO	19
3.1	Análisis inelástico de secciones de concreto reforzado	19
3.1.1	Modelo teórico del acero de refuerzo	19
3.1.2	Modelo constitutivo del concreto	22
3.1.3	Relación momento – curvatura	29
3.1.4	Ductilidad	32
3.1.5	Rotación inelástica	32
3.1.6	Longitud de plastificación	33
3.2	Curva de capacidad y punto de desempeño de una estructura	34
3.2.1	Análisis de plastificación progresiva o Pushover y curva de capacidad	34
3.2.2	Punto de comportamiento	35
3.2.3	Niveles de desempeño y criterios de aceptación	40
4	METODOLOGÍA	42
5	EVALUACIÓN DE LAS ESTRUCTURAS	47
6	ANÁLISIS DE RESULTADOS	53
6.1	Obtención del factor m para la estructura diseñada según la NSR-10 (AIS, 2010b) 53	
6.1.1	Análisis de rótulas en vigas	53
6.1.2	Análisis de columnas	64
6.1.3	Comparación de rótulas de columnas y vigas para IO y LS	69
6.2	Obtención del factor m para la estructura diseñada sin código de diseño sísmo resistente	73
6.2.1	Análisis de rotulas en vigas	73
6.2.2	Análisis de rotulas en columnas	78
6.2.3	Comparación de rótulas de columnas y vigas para IO y LS	82
6.3	Comparación de resultados para cada nivel de desempeño y propuesta de factores m	85
6.3.1	Para la edificación diseñada según los requisitos de la NSR-10 (AIS, 2010b) 85	

6.3.2	Para la edificación diseñada sin código de diseño sismo resistente	91
7	CONCLUSIONES	95
8	RECOMENDACIONES	98
	Bibliografía	99
	Anexos	102



## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 PRINCIPIO DE IGUALES DESPLAZAMIENTOS PARA ESTRUCTURAS DE PERIODOS LARGOS (PARK & PAULAY, 1983A) .....	15
FIGURA 2 PRINCIPIO DE IGUALES ENERGÍAS PARA ESTRUCTURAS DE PERIODOS CORTOS (PARK & PAULAY, 1983A).....	15
FIGURA 3 CURVA ESFUERZO – DEFORMACIÓN PARA ACERO DE REFUERZO SOMETIDO A TENSIÓN, ADAPTADO DE (HIBBELER R., 2011) .....	20
FIGURA 4 CURVA ESFUERZO-DEFORMACIÓN PARA CONCRETO CONFINADO E INCONFINADO PROPUESTA POR KENT Y PARK.....	23
FIGURA 5 CURVA ESFUERZO-DEFORMACIÓN PARA CONCRETO CONFINADO E INCONFINADO, PARK MODIFICADO (R.PARK ET AL., 1982A) .....	26
FIGURA 6 CURVA ESFUERZO-DEFORMACIÓN PARA CONCRETO CONFINADO E INCONFINADO, (MANDER ET AL., 1988B) .....	27
FIGURA 7 CONFINAMIENTO EFECTIVO EN SECCIONES RECTANGULARES (MANDER ET AL., 1988B), IMAGEN TOMADA DE (HERNANDEZ, 2014B) .....	28
FIGURA 8 DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA CONFINADA DE SECCIONES RECTANGULARES A PARTIR DEL ESFUERZO LATERAL DE CONFINAMIENTO (MANDER ET AL., 1988A).....	29
FIGURA 9 DEFORMACIÓN DE UNA VIGA A FLEXIÓN SEGÚN LA MECÁNICA CLÁSICA DE MATERIALES .....	30
FIGURA 10 RELACIÓN MOMENTO CURVATURA REAL VS BILINEALIZADA.....	31
FIGURA 11 IDEALIZACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DE CURVATURA (PRIESTLEY ET AL., 2007) .....	34
FIGURA 12 ESPECTRO DE RESPUESTA EN SU FORMA TRADICIONAL Y SU TRANSFORMACIÓN A ADSR TOMADO DE (APPLIED TECHNOLOGY COUNCIL, 1996A) .....	37
FIGURA 13 ESPECTROS DE DEMANDA VS CAPACIDAD Y PUNTO DE DESEMPEÑO.....	37
FIGURA 14 DETERMINACIÓN DEL MÁXIMO DESPLAZAMIENTO ESTIMADO USANDO ITERACIÓN DIRECTA (FEMA, 2005A) .....	40
FIGURA 15 RELACIÓN GENERALIZADA FUERZA -DEFORMACIÓN PARA ELEMENTOS DE CONCRETO TOMADA DE LA ASCE-41-17 (ASCE, 2017A).....	44
FIGURA 16 PLANTA DE PISO 2 DE LA EDIFICACIÓN 1 .....	47
FIGURA 17 CORTE VERTICAL EDIFICACIÓN 1 .....	48
FIGURA 18 PLANTA DE PISO 2 DE LA EDIFICACIÓN 2 .....	49
FIGURA 19 DETALLE EN CORTE DE CUBIERTA EDIFICACIÓN 2.....	49
FIGURA 20 CURVA DE DEMANDA VS CAPACIDAD EN EL SENTIDO X DE LA EDIFICACIÓN 1 .....	50
FIGURA 21 CURVA DE DEMANDA VS CAPACIDAD EN EL SENTIDO Y DE LA EDIFICACIÓN 1 .....	50
FIGURA 22 CURVA DE DEMANDA VS CAPACIDAD EN EL SENTIDO X DE LA EDIFICACIÓN 2 .....	51
FIGURA 23 CURVA DE DEMANDA VS CAPACIDAD EN EL SENTIDO Y DE LA EDIFICACIÓN 2 .....	52
FIGURA 24 M/My Vs m/M DE TABLA 10.3 PARA OI EN EL PUNTO DE COMPORTAMIENTO .....	54
FIGURA 25 M/My Vs m/M DE TABLA 10.3 PARA LS EN EL PUNTO DE COMPORTAMIENTO .....	54
FIGURA 26 M/My Vs m PARA OI EN EL PUNTO DE COMPORTAMIENTO.....	55
FIGURA 27 M/My Vs m PARA LS EN EL PUNTO DE COMPORTAMIENTO .....	55
FIGURA 28 $\theta$ Vs M PARA IO EN EL PUNTO DE COMPORTAMIENTO .....	56
FIGURA 29 $\theta$ Vs M PARA LS EN EL PUNTO DE COMPORTAMIENTO.....	57
FIGURA 30 M Vs M/My PARA IO – COMPARATIVA ENTRE VIGAS Y COLUMNAS.....	70
FIGURA 31 M Vs M/My PARA LS – COMPARATIVA ENTRE VIGAS Y COLUMNAS .....	72

FIGURA 32 M Vs M/MY PARA IO – COMPARATIVA ENTRE VIGAS Y COLUMNAS.....	83
FIGURA 33 M Vs M/MY PARA LS – COMPARATIVA ENTRE VIGAS Y COLUMNAS.....	85

## LISTA DE TABLAS

TABLA 1 RESULTADOS ESTADÍSTICOS PARA BARRAS DE REFUERZO GRADO 60 (CARLOS ET AL., 2005) .....	21
TABLA 2 PROPIEDADES DEL ACERO DE REFUERZO ASTM A706 GRADOS 60 Y 80 (CALTRANS, 2019) .....	22
TABLA 3 PARÁMETROS DE MODELACIÓN Y CRITERIOS NUMÉRICOS DE ACEPTACIÓN PARA PROCEDIMIENTOS NO LINEALES - VIGAS DE CONCRETO REFORZADO. TABLA 10-7 DE LA ASCE 41-17 (ASCE, 2017A) .....	45
TABLA 4 PARÁMETROS DE MODELACIÓN Y CRITERIOS NUMÉRICOS DE ACEPTACIÓN PARA PROCEDIMIENTOS NO LINEALES – COLUMNAS DIFERENTES A CIRCULARES CON REFUERZO EN ESPIRAL O ESTRIBOS SÍSMICOS COMO SE DEFINEN EN LA ACI 318. TABLA 10-8 DE LA ASCE 41-17 (ASCE, 2017A) .....	46
TABLA 5 VALORES DE RIGIDEZ EFECTIVA, TABLA 10-5 DE LA ASCE 41-17 (ASCE, 2017A) ....	46
TABLA 6 RESUMEN DE RESULTADOS DE RÓTULAS EN VIGAS PARA EL PUNTO DE COMPORTAMIENTO .....	57
TABLA 7 RESUMEN DE RESULTADOS DE RÓTULAS EN VIGAS PARA EL PUNTO DE INESTABILIDAD ESTRUCTURAL.....	59
TABLA 8 RESUMEN DE RESULTADOS DE RÓTULAS EN VIGAS PARA NIVEL DE DESEMPEÑO DE IO .....	61
TABLA 9 RESUMEN DE RESULTADOS DE RÓTULAS EN VIGAS PARA NIVEL DE DESEMPEÑO DE LS .....	63
TABLA 10 RESUMEN DE RESULTADO EN RÓTULAS EN COLUMNAS PARA EL PUNTO DE COMPORTAMIENTO .....	65
TABLA 11 RESUMEN DE RESULTADO EN RÓTULAS EN COLUMNAS PARA EL PUNTO DE INESTABILIDAD ESTRUCTURAL .....	66
TABLA 12 RESUMEN DE RESULTADO EN RÓTULAS EN COLUMNAS PARA EL NIVEL DE DESEMPEÑO DE IO.....	68
TABLA 13 RESUMEN DE RESULTADO EN RÓTULAS Y COLUMNAS PARA EL NIVEL DE DESEMPEÑO DE IO.....	70
TABLA 14 RESUMEN DE RESULTADO EN RÓTULAS DE VIGAS Y COLUMNAS PARA EL NIVEL DE DESEMPEÑO DE LS.....	72
TABLA 15 RESUMEN DE RESULTADO EN RÓTULAS DE VIGAS PARA EL PUNTO DE INESTABILIDAD ESTRUCTURAL.....	75
TABLA 16 RESUMEN DE RESULTADO EN RÓTULAS DE VIGAS PARA EL NIVEL DE DESEMPEÑO DE IO .....	76
TABLA 17 RESUMEN DE RESULTADO EN RÓTULAS DE VIGAS PARA EL NIVEL DE DESEMPEÑO DE LS.....	78
TABLA 18 RESUMEN DE RESULTADO EN RÓTULAS DE COLUMNAS PARA EL PUNTO DE INESTABILIDAD ESTRUCTURAL .....	80
TABLA 19 RESUMEN DE RESULTADO EN RÓTULAS DE COLUMNAS PARA EL NIVEL DE DESEMPEÑO DE IO.....	81
TABLA 20 RESUMEN DE RESULTADO EN RÓTULAS Y COLUMNAS PARA EL NIVEL DE DESEMPEÑO DE IO.....	83

TABLA 21 RESUMEN DE RESULTADO EN RÓTULAS DE VIGAS Y COLUMNAS PARA EL NIVEL DE DESEMPEÑO DE LS.....	84
TABLA 22 COMPARACIÓN DE RESULTADO EN RÓTULAS DE VIGAS PARA EL NIVEL DE DESEMPEÑO DE IO.....	86
TABLA 23 COMPARACIÓN DE RESULTADO EN RÓTULAS DE VIGAS PARA EL NIVEL DE DESEMPEÑO DE LS.....	87
TABLA 24 COMPARACIÓN DE RESULTADO EN RÓTULAS DE VIGAS PARA EL NIVEL DE DESEMPEÑO DE CP.....	89
TABLA 25 COMPARACIÓN DE RESULTADO EN RÓTULAS DE COLUMNAS PARA EL NIVEL DE DESEMPEÑO DE IO.....	90
TABLA 26 COMPARACIÓN DE RESULTADO EN RÓTULAS DE COLUMNAS PARA EL NIVEL DE DESEMPEÑO DE LS.....	91
TABLA 27 COMPARACIÓN DE RESULTADO EN RÓTULAS DE VIGAS PARA EL NIVEL DE DESEMPEÑO DE LS.....	93

## **LISTA DE ANEXOS**

Anexo A - planos estructurales de la edificación diseñada según NSR-10

Anexo B - Planos estructurales de la edificación diseñada antes del CCCSR-84

Anexo C - Cálculo de rótulas plásticas para la edificación diseñada según NSR-10

Anexo D - Cálculo de las rótulas plásticas para la edificación diseñada antes del CCCSR-84

Anexo E - Cálculo del punto de comportamiento para la edificación diseñada según NSR-10

Anexo F - Cálculo del punto de comportamiento para la edificación diseñada antes del CCCSR-84

Anexo G - análisis de rótulas para la edificación diseñada según NSR-10

Anexo H - análisis de rótulas para la edificación diseñada antes del CCCSR-84

## 1. INTRODUCCIÓN

En la actual versión del capítulo A-10 del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10 (AIS, 2010b), se establecen las metodologías de evaluación y rehabilitación de edificaciones existentes. Esencialmente se trata de aplicar los métodos propios de edificaciones nuevas y exigir que la estructura existente, una vez rehabilitada, se comporte como una estructura nueva.

En esta norma la reglamentación presentada para la evaluación y rehabilitación de estructuras existentes es limitada, en la medida en que no se presenta al diseñador una metodología detallada para la evaluación de las condiciones actuales de la edificación. Adicionalmente, esta norma considera que toda la estructura debe ser afectada por el mismo coeficiente de disipación de energía (coeficiente R), estimando que la edificación tendrá un comportamiento dúctil uniforme y desconociendo el hecho de que cada elemento tiene una capacidad de disipación de energía distinta, además de que al entrar en el rango de comportamiento inelástico existirá una redistribución de esfuerzos en la estructura.

Como consecuencia, en el trabajo de grado realizado previamente por (López, 2014) se propuso la traducción de las normas ASCE/SEI 31 y 41, correspondientes a la evaluación y rehabilitación sísmica de edificaciones existentes, debido a que el uso de estas normas está permitido de acuerdo con el numeral A.10.4.4 de la NSR-10 (AIS, 2010b) y a que éstas contienen metodologías y procedimientos más claros y adecuados para estos fines.

Teniendo en cuenta que el uso de la ASCE 41-17 (ASCE, 2017a) está permitido por el Reglamento NSR-10 (AIS, 2010b) se considera necesario adaptar sus contenidos al medio colombiano, iniciando con la evaluación de los factores de disipación de energía “m” para pórticos en concreto reforzado, debido a que este sistema estructural es uno de las más comunes dentro de las estructuras existentes en nuestro país.

El coeficiente R, también conocido como factor de modificación de respuesta, se define como la relación adimensional entre la fuerza asociada a una respuesta elástica y la fuerza asociada con una demanda máxima de ductilidad para la estructura completa.

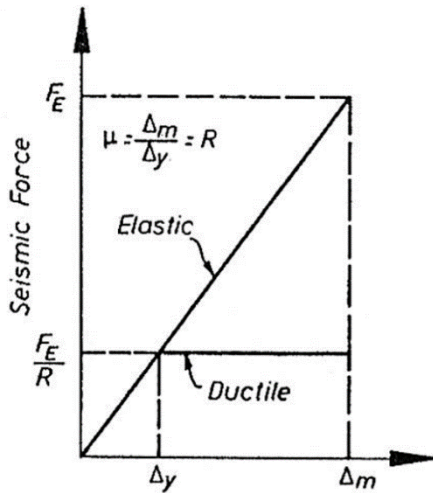
Por otra parte, el factor de modificación de capacidad del componente (factor m), busca tener en cuenta la ductilidad esperada asociada a una acción específica (fuerza axial, cortante, flexión) y un nivel de desempeño definido para la estructura.

Los factores “m” cumplen una función similar a los coeficientes “R”, ambos se basan en el concepto de que un sistema estructural bien diseñado es capaz de soportar grandes deformaciones sin falla o colapso; al hacer uso de estos coeficientes se considera que a partir de análisis lineales modificados por ellos, se puede esperar un comportamiento inelástico adecuado de la estructura, con daños, pero con suficiente margen de seguridad y sin colapso.

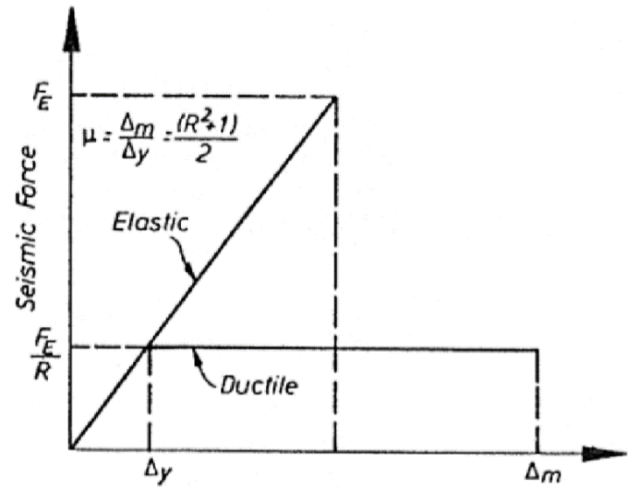
Tanto los factores “m” como los coeficientes “R” representan la manera en que un elemento o un sistema estructural, respectivamente, disipan la energía asociada a los eventos sísmicos por medio de deformaciones inelásticas.

Arroyave (Arroyave, 2013) menciona varias metodologías de evaluación del coeficiente R propuestas por algunos investigadores tales como Newmark y Hall (Newmark & Hall, 1973), Krawinkler y Nassar (H. Krawinkler & A. A. Nassar, 1992), Miranda y Bertero (Miranda E. & Bertero V., 1994) y NERPH 2003 y 2009, siendo la primera la más comúnmente utilizada.

Según Newmark y Hall (1973) en el caso del coeficiente R, los desplazamientos están relacionados con el periodo de la edificación, alcanzando un desplazamiento determinado,  $\Delta_x$ , resultante de una fuerza de sismo en una estructura que presente periodos largos ( $T > 1s$ ) y un comportamiento elástico. Así mismo, se obtendría el mismo desplazamiento para la misma fuerza dividida en R, para estructuras con un comportamiento no lineal idealizado (principio de iguales desplazamientos). De otro lado, para periodos cortos ( $.12s < T < .50s$ ), este cálculo se basa en la igualdad de energías, siendo iguales la energía del sistema elástico y la del sistema inelástico (área bajo la curva fuerza – desplazamiento, principio de iguales energías), como se presenta en las Figuras 1 y 2.



**Figura 1** Principio de iguales desplazamientos para estructuras de periodos largos (Park & Paulay, 1983a)



**Figura 2** Principio de iguales energías para estructuras de periodos cortos (Park & Paulay, 1983a)

La metodología de evaluación del coeficiente de disipación de energía  $R$  (Newmark & Hall, 1973) consiste en relacionar el desplazamiento para el momento en el que la edificación inicie su comportamiento plástico y compararlo con el máximo desplazamiento asociado a un estado límite. Finalmente, la relación entre estos dos valores de desplazamientos (ductilidad) es la base para el cálculo del coeficiente  $R$ .

En otras palabras y según lo explica (Hernandez, 2014a), es necesario conocer la curva de respuesta global de la estructura (desplazamiento vs cortante en la base) con el fin de obtener los valores de cortante basal último ( $V_u$ ) y el cortante donde la estructura entra en el rango inelástico ( $V_y$ ), además de sus respectivos desplazamientos, siendo el desplazamiento máximo ( $D_{max}$ ) el correspondiente al cortante basal que ocasionó el colapso ( $V_u$ ), y el desplazamiento de fluencia ( $D_y$ ) que correspondería al cortante  $V_y$ , obteniendo el valor  $R$  como la relación entre el desplazamiento máximo ( $D_{max}$ ) y el desplazamiento de fluencia ( $D_y$ ).

La obtención del valor de  $R$  por medio de desplazamientos es válida siempre que los periodos de la estructura sean largos, en caso contrario se debe realizar esta por medio de energía, no obstante, también es posible obtener el coeficiente  $R$  en términos de resistencia por medio de la relación de cortante basal, tal como se propone en la ATC-19 (Applied Technology Council, 1995)

Estos factores relacionados con la ductilidad son considerados de manera distinta en la NSR-10 (AIS, 2010b) y en la ASCE 41-17 (ASCE, 2017a). La NSR-10 establece el uso de este coeficiente en el diseño de todos los elementos de la estructura. Su valor varía dependiendo del sistema estructural, material y la zona de amenaza sísmica en la que se vaya a construir la edificación y, adicionalmente, es afectado por valores que varían entre 0.75 y 1.00 dependiendo de las irregularidades que presente la estructura en planta, en altura o por ausencia de redundancia.

Por otro lado, en la norma ASCE 41-17 (ASCE, 2017a) no se afecta toda la estructura por un mismo coeficiente de disipación de energía, al contrario de la NSR-10 (AIS, 2010b) esta norma tiene en cuenta que cada tipo de elemento de una estructura puede tener un comportamiento dúctil o frágil y en función de su detallado le es asignado un factor "m".

Cabe precisar que el factor de modificación "m" es utilizado en componentes cuyas acciones (fuerzas internas) sean controladas por deformación. Se entiende por una acción controlada por deformación aquella para la cual, están permitidas deformaciones inelásticas. Por tanto, se considera entonces que cualquier elemento sometido a acciones controladas por deformación disipa energía por medio de deformaciones inelásticas.

Por todo lo anterior, este análisis se vuelve relevante para la complementación de la NSR-10 (AIS, 2010b), toda vez que puede dar lineamientos para adaptar los valores de los factores "m" de cada componente de una estructura de pórticos de concreto a nuestro detallado de elementos y características de los materiales, para que así puedan ser



incluidos en la normatividad Colombiana, logrando probablemente mejores resultados al considerar el comportamiento individual de cada elemento, en lugar del comportamiento global de la estructura en relación con la disipación de energía del mismo.

De otro lado, el presente estudio tiene por objetivo darles continuidad a los trabajos adelantados por Olejua (Olejua F. et al., 2013) y Lopez (López, 2014) y que buscan facilitar la adaptación y posible inserción de las metodologías mencionadas al reglamento colombiano.

Dentro de los análisis realizados durante la elaboración de este estudio y Con base en la respuesta de cada una de las zonas de plastificación en los elementos estructurales se ha calculado el factor  $m$  en términos de las rotaciones para cada nivel de desempeño definido en la ASCE 41-17 (López, 2014) y se han comparado contra los factores  $m$  mínimos esperados en función del tipo de elemento, nivel de desempeño y características del despiece. En términos generales se encontró que los factores  $m$  calculados en este trabajo superan los mínimos establecidos en el ASCE 41-17.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GENERAL**

Realizar una evaluación analítica de los factores de modificación de respuesta individuales “m” para pórticos de concreto reforzado diseñados en Colombia bajo diferentes parámetros, para ser utilizados en la adaptación de las metodologías de evaluación y reforzamiento contenidas en el documento ASCE 41-17 (ASCE, 2017a).

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Seleccionar y analizar dos estructuras, una de ellas sin previsiones sísmicas y la otra diseñada según la Norma Sismo Resistente de 2010 (NSR-10) (AIS, 2010b) para una capacidad moderada de disipación de energía (DMO).
- Realizar una evaluación analítica de los factores “m” en las edificaciones escogidas, en elementos críticos.
- Realizar un análisis comparativo entre los valores encontrados en las edificaciones evaluadas, y los valores contenidos en la norma ASCE 41-17 (ASCE, 2017a).
- Proponer unos valores “m” para elementos típicos de una edificación de pórticos en concreto reforzado.

### 3 MARCO TEÓRICO

#### 3.1 ANÁLISIS INELÁSTICO DE SECCIONES DE CONCRETO REFORZADO

##### 3.1.1 *Modelo teórico del acero de refuerzo*

Los elementos en concreto reforzado están constituidos principalmente por dos materiales, el primero de ellos es el concreto, este material tiene un buen comportamiento para soportar esfuerzos de compresión, pero un bajo desempeño ante sollicitaciones de tensión. El segundo material es el acero de refuerzo, que tiene un muy buen desempeño a tensión, complementado satisfactoriamente las falencias de resistencia del concreto en masa.

El acero de refuerzo tiene una curva de esfuerzo deformación que puede ser descrita mediante 4 zonas, la primera de ellas presenta un comportamiento elástico con deformaciones directamente proporcionales a los esfuerzos sobre el elemento, esta es llamada la zona elástica y la pendiente de esta curva representa el módulo de elasticidad del acero, cuyo valor típico es de 200.000 MPa.

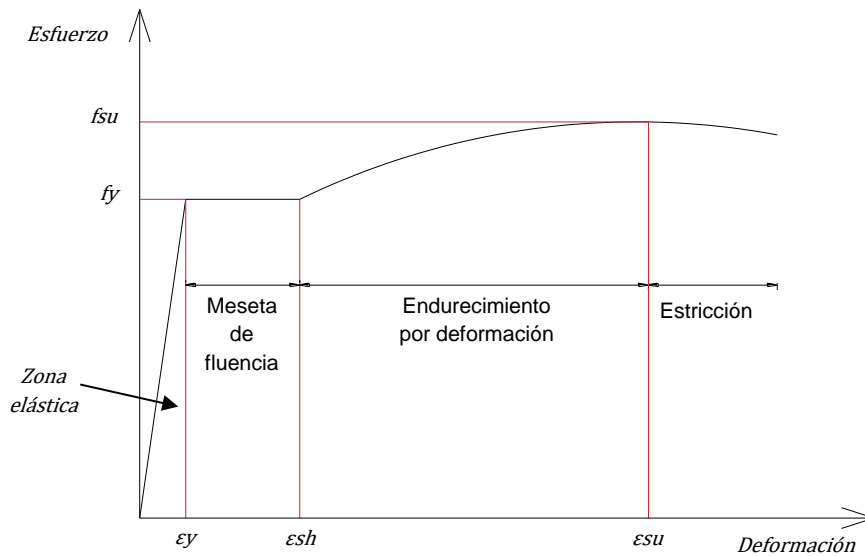
Al alcanzar el esfuerzo de fluencia (420 MPa para el acero utilizado en las estructuras estudiadas) se entra en la meseta de fluencia, tramo de la curva en la que el esfuerzo se mantiene constante, pero con un aumento considerable en las deformaciones.

Posteriormente el acero de refuerzo gana resistencia nuevamente a la vez que las deformaciones continúan aumentando, este tercer tramo es llamado la zona de endurecimiento por deformación. Finalmente se llega al tramo de estricción en el que las deformaciones continúan aumentando, pero la resistencia del material decrece hasta la falla. Véase la Figura 3.

Como parte del estudio del comportamiento del acero de refuerzo algunos investigadores han formulado algunos modelos para representarlo, siendo uno de los modelos mayormente aceptados el de Park y Paulay en 1975 (Park & Paulay, 1983b) y el de Mander en 1988 (Mander et al., 1988a).

##### 3.1.1.1 *Modelo de Park y Paulay*

Este modelo considera que la curva esfuerzo – deformación del acero de refuerzo se divide en tres zonas, la zona elástica, la meseta de fluencia y la zona de endurecimiento por deformación. Cada una de estas zonas se encuentra delimitada por una deformación unitaria característica, siendo la primera la deformación de fluencia ( $\epsilon_y$ ), seguida por la deformación de endurecimiento ( $\epsilon_{sh}$ ) y finalmente la deformación última ( $\epsilon_u$ ), tal como se ve en la Figura 3.



**Figura 3** Curva esfuerzo – deformación para acero de refuerzo sometido a tensión, adaptado de (Hibbeler R., 2011)

La principal característica de este modelo recae en la formulación de la curva en la zona de endurecimiento por deformación, la cual es descrita por medio de la siguiente ecuación:

$$f_s = \left[ \frac{mu + 2}{60u + 2} + \frac{(60 - m)u}{2(30r + 1)^2} \right] f_y \quad (Ec. 1)$$

os valores  $m$ ,  $r$  y  $u$  se obtienen por medio de las siguientes ecuaciones, las cuales se basan en los resultados de deformación unitaria y esfuerzos medidos en laboratorio:

$$m = \frac{\frac{f_{su}}{f_y} (30r + 1)^2 - 60r - 1}{15r^2} \quad (Ec. 2)$$

$$r = \varepsilon_{su} - \varepsilon_{sh} \quad (Ec. 3)$$

$$u = \varepsilon_s - \varepsilon_{sh} \quad (Ec. 4)$$

### 3.1.1.2 Modelo de Mander

El modelo de Mander mantiene buena parte de las consideraciones del modelo de Park y Paulay, pero la diferencia radica en la definición de la curva en la zona de endurecimiento por deformación en donde el esfuerzo se define así:

$$f_s = f_{su} + (f_y - f_{su}) \left( \frac{\epsilon_{su} - \epsilon_s}{\epsilon_{su} - \epsilon_{sh}} \right)^p \quad (Ec. 5)$$

Tal como se observa en la ecuación anterior, a excepción del parámetro "p" todos los parámetros pueden ser obtenidos por medio de ensayos de laboratorio, mientras que "p" se obtiene como:

$$p = \frac{\ln \left( \frac{f_{su} - f_{s1}}{f_{su} - f_y} \right)}{\ln \left( \frac{\epsilon_{su} - \epsilon_{s1}}{\epsilon_{su} - \epsilon_{sh}} \right)} \quad (Ec. 6)$$

Donde  $f_{s1}$  y  $\epsilon_{s1}$  son valores obtenidos por medios experimentales.

### 3.1.1.3 Acero de refuerzo en Colombia

Las dos estructuras en estudio fueron diseñadas y construidas con acero de refuerzo grado 60, cuyas propiedades mecánicas están estandarizadas en la norma estadounidense A706/A706M y en su contraparte colombiana NTC 2289 (icontec, 2015).

A pesar de que estas dos normativas buscan normalizar las resistencias del acero, el proceso de fabricación entre un fabricante y otro conlleva una cierta variación en su resistencia, condición que fue evidenciada en la investigación experimental realizada por Victoria Gonzales (Carlos et al., 2005). A continuación, se presenta la tabla de resultados obtenida en esa investigación:

Variable	No. Datos	$\hat{\mu}$	$\hat{\sigma}$	Mínimo	Máximo	V	Percentil 5	Percentil 95
$f_y (Mpa)$	467	470,30	25,25	419,93	538,804	0,054	431,2	522,93
$\epsilon_y (mm/mm)$	467	0,0024	0,0001	0,0021	0,0028	0,054	0,0022	0,0027
$f_{sh} (Mpa)$	477	472,16	25,67	419,64	543,80	0,054	432,77	525,38
$\epsilon_{sh} (mm/mm)$	473	0,0138	0,0048	0,0022	0,0259	0,348	0,0045	0,0207
$f_{su} (Mpa)$	477	659,74	30,46	581,24	752,93	0,046	618,67	737,16
$\epsilon_{su} (mm/mm)$	476	0,1141	0,0120	0,0613	0,1435	0,106	0,0948	0,1353
$f_{suu} (Mpa)$	476	536,35	62,89	319,77	701,29	0,117	441,10	637,00
$\epsilon_{suu} (mm/mm)$	475	0,1407	0,0175	0,0828	0,1797	0,125	0,1144	0,1705
P	461	3,087	0,4487	1,762	5,026	0,145	2,403	3,945

**Tabla 1 Resultados estadísticos para barras de refuerzo grado 60** (Carlos et al., 2005)

$\hat{\mu}$  Media Aritmética  $\hat{\sigma}$  Desviación estándar. Mínimo= Mínimo encontrado. Máximo= Máximo encontrado. V= Coeficiente de variación. P= Variable del modelo de Mander

Los resultados obtenidos por Gonzales, y primordialmente los valores promedio ( $f_y= 470$  MPa, 68.17 ksi,  $F_u= 659$  MPa, 95.58 ksi) coinciden con los valores dados por Caltrans en el Seismic Desing Criteria de 2019 (Caltrans, 2019) que se presentan a continuación:

**Table 3.3.3-1 Properties of ASTM A706 Grades 60 and 80 Reinforcing Steel**

Property	Grade 60	Grade 80
Modulus of elasticity, $E_s$	29,000 ksi	29,000 ksi
Specified minimum yield strength, $f_y$	60 ksi	80 ksi
Expected yield strength, $f_{ye}$	68 ksi	85 ksi
Specified minimum tensile strength, $f_u$	80 ksi	98 ksi
Expected tensile strength, $f_{ue}$	95 ksi	112 ksi
Nominal yield strain, $\epsilon_y$	0.0021	0.0028
Expected yield strain, $\epsilon_{ye}$	0.0023	0.0033
Ultimate tensile strain, $\epsilon_{su}$	0.120 - #10 bars and smaller 0.090 - #11 bars and larger	0.095
Reduced ultimate tensile strain, $\epsilon_{su}^R$	0.090 - #10 bars and smaller 0.060 - #11 bars and larger	0.060
Strain at onset of strain hardening, $\epsilon_{sh}$	0.0150 - #8 bars 0.0125 - #9 bars 0.0115 - #10 & #11 bars 0.0075 - #14 bars 0.0050 - #18 bars	0.0074

**Tabla 2 Propiedades del acero de refuerzo ASTM A706 grados 60 y 80** (Caltrans, 2019)

De estos datos se destaca el hecho de que el valor de resistencia a la fluencia definido por las normativas es de 420 MPa, mientras que los datos experimentales revelan que este valor es de 470 MPa y la resistencia última es de 660 MPa. Estas diferencias se deben a los requerimientos exigidos en la NTC2289 (icontec, 2015).

### 3.1.2 Modelo constitutivo del concreto

El comportamiento para este material puede ser analizado tanto para concreto simple o sin confinamiento como para concreto confinado por estribos de refuerzo, siendo su curva esfuerzo – deformación distinta entre sí. Dentro de los modelos más aceptados en la actualidad se encuentran el de Kent y Park (Kent & Park, 1971a), Park (R.Park et al., 1982a) y el de Mander (Mander et al., 1988b).

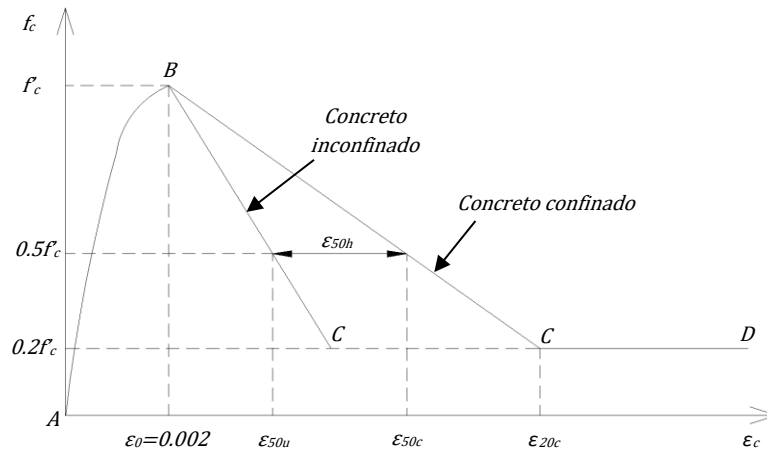
A Continuación, se hace una breve explicación de cada uno de estos modelos.

### 3.1.2.1 Modelo de Kent y Park – Miembros en flexión con concreto confinado

Siempre que vigas y columnas tengan refuerzo transversal con poca separación en las zonas de compresión, la ductilidad del elemento y su curvatura última mejoran considerablemente.

Según Kent y Park (Kent & Park, 1971a), se ha observado que el refuerzo transversal estaría mínimamente esforzado cuando el concreto es sometido a bajos niveles de esfuerzo axial, por lo cual el refuerzo transversal no ejerce fuerzas de confinamiento, pero cuando el esfuerzo axial sobre el concreto se acerca al esfuerzo de rotura el volumen del concreto aumenta debido a las fisuras internas, provocando que se apoye contra el refuerzo transversal y que ahora éste ofrezca una reacción de confinamiento al concreto.

En su investigación mencionan también que los estribos rectangulares no son tan eficientes como las espirales, debido a que la reacción de confinamiento solo puede ser aplicada en las esquinas de los estribos, mientras que la resistencia al doblamiento entre las esquinas del refuerzo transversal es insuficiente para restringir la expansión del concreto a lo largo de toda la longitud de la barra, sin embargo, a pesar de este fenómeno los estribos rectangulares incrementan significativamente la resistencia del núcleo de concreto.



**Figura 4 Curva esfuerzo-deformación para concreto confinado e inconfinado propuesta por Kent y Park**

Según la curva de esfuerzo-deformación propuesta por Kent y Park (Kent & Park, 1971b), La región ascendente de la curva entre A y B considera que los estribos no ejercen un efecto de confinamiento, tal como ya se mencionó y la formulación de este primer tramo corresponde a la siguiente ecuación.

$$f_c = f'_c \left[ \frac{2\varepsilon_c}{\varepsilon_0} - \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right)^2 \right], \varepsilon_0 = 0.002 \text{ (Ec. 7)}$$

Por otra parte, el esfuerzo máximo alcanzado tanto para el concreto confinado como para el incofinado es el mismo, y corresponde al valor obtenido en el ensayo de compresión de un cilindro de concreto ( $f'_c$ ).

La segunda región de la curva entre B y C se considera lineal y se define con la deformación unitaria obtenida para el 50% del esfuerzo máximo de rotura ( $\varepsilon_{50u}$ ).

$$\varepsilon_{50u} = \frac{3 + 0.002f'_c}{f'_c - 1.000}, f'_c \left( \frac{lb}{ft^2} \right) \quad (Ec. 8)$$

Para concreto confinado por estribos rectangulares la pendiente entre B y C se reduce y se deben tener en cuenta las siguientes variables:

- Sección transversal del acero de refuerzo transversal ( $A_s''$ )
- Espaciamiento centro a centro de los estribos ( $s$ )
- Relación entre el espaciamento entre estribos y la mínima dimensión del núcleo confinado ( $s/b''$ ), en donde  $b'' \leq d''$
- Relación entre el diámetro del acero de refuerzo de los estribos y las dimensiones del núcleo confinado,  $D/b''$  y  $D/d''$ .
- El esfuerzo de fluencia del acero de refuerzo de los estribos ( $f_y$ )
- Cantidad de refuerzo longitudinal
- Resistencia a la rotura del concreto ( $f'_c$ )
- Gradiente de deformación
- Velocidad de carga

Las primeras dos variables hacen parte de la formulación de cuantía volumétrica de refuerzo transversal.

$$\rho'' = \frac{2(b'' + d'')A_s''}{b''d''s} \quad (Ec. 9)$$

En esta modelación del concreto confinado se menciona la importancia que tiene el diámetro del refuerzo transversal en el efecto de confinamiento, sin embargo, no se tiene en cuenta debido a la poca información experimental existente hasta ese momento, como tampoco se tiene en cuenta el efecto que produce el refuerzo longitudinal en el comportamiento de la sección.

Con el fin de obtener la deformación adicional debida al confinamiento ( $\varepsilon_{50h}$ ) kent y park (Kent & Park, 1971b) propusieron la siguiente ecuación basados en la evidencia experimental obtenida:

$$\varepsilon_{50h} = \frac{3}{4} \rho'' \sqrt{\frac{b''}{s}} \quad (Ec. 10)$$



Y finalmente proponen la siguiente ecuación para representar la pendiente de la recta entre los puntos B y C para el concreto confinado:

$$f_c = f'_c (1 - Z(\varepsilon_c - \varepsilon_0)) \quad (Ec. 11)$$

$$z = \frac{0.5}{\varepsilon_{50h} + \varepsilon_{50u} - \varepsilon_0} \quad (Ec. 12)$$

$$\varepsilon_0 = 0.002 \quad (Ec. 13)$$

Para terminar con la definición de la curva entre los puntos C y D, se consideró que la resistencia del concreto para este punto sería de un 20% de la resistencia a la compresión del concreto inconfinado ( $f'_{20c}$ ), valor que al intersecarse con la extensión de la pendiente entre el tramo B y C da como resultado el valor de la deformación  $\varepsilon_{20c}$ , tal como se observa en la Figura 4.

### 3.1.2.2 Modelo de Park modificado - Ductilidad de columnas de concreto confinado

En el año de 1982 el trabajo realizado por Kent y Park (Kent & Park, 1971b) fue retomado y modificado por Park (R.Park et al., 1982b)

con el fin de incluir en la modelación dos asuntos que no habían sido tenidos en cuenta del modelo anterior.

El primero de ellos es el incremento en el esfuerzo de rotura y deformaciones sobre el concreto confinado, para esto se incluyó un factor  $K$  dentro de la formulación desarrollada por Kent y Park y que es función de la cuantía volumétrica de refuerzo transversal ( $\rho_s$ ), la resistencia a la compresión del concreto inconfinado ( $f'_c$ ) y el esfuerzo de fluencia del refuerzo transversal ( $f_{yh}$ ). Este último valor es el segundo tema adicionado a la teoría inicial.

Al reescribir la formulación original se obtiene lo siguiente:

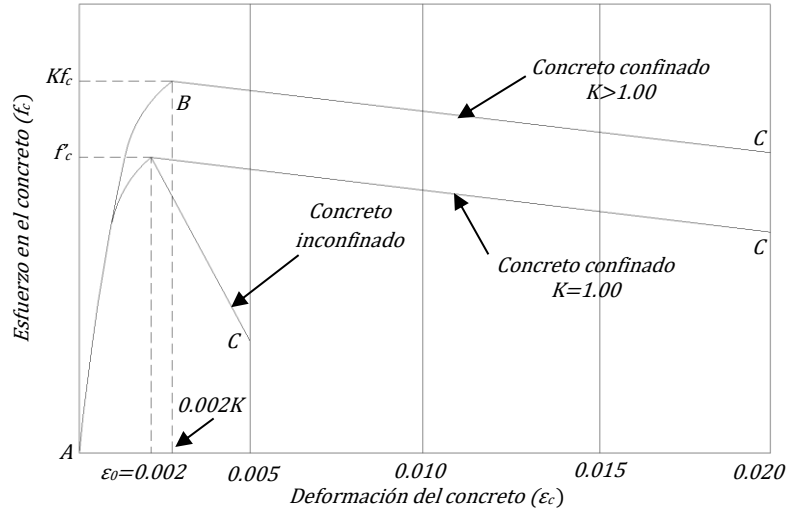
$$K = 1 + \frac{\rho_s f_{yh}}{f'_c} \quad (Ec. 14)$$

Región de la curva entre A y B

$$f_c = K f'_c \left[ \frac{2\varepsilon_c}{\varepsilon_0} - \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right)^2 \right], \varepsilon_0 = 0.002K \quad (Ec. 15)$$

Región de la curva entre B y C

$$f_c = Kf'_c(1 - Z(\varepsilon_c - \varepsilon_0)); z = \frac{0.5}{\varepsilon_{50h} + \varepsilon_{50u} - \varepsilon_0}; \varepsilon_0 = 0.002K \text{ (Ec. 16)}$$

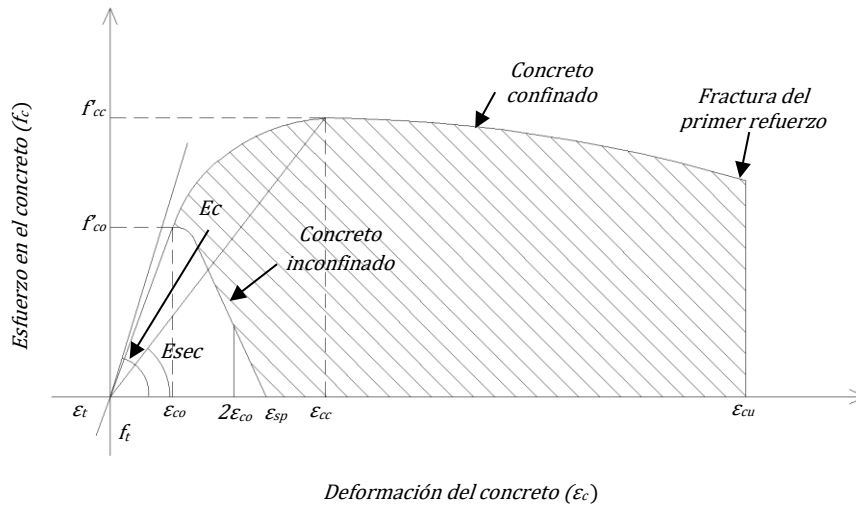


**Figura 5** Curva esfuerzo-deformación para concreto confinado e inconfinado, Park modificado (R.Park et al., 1982a)

### 3.1.2.3 Modelo de Mander - Modelo teórico de esfuerzo-deformación para concreto confinado

El último de los tres modelos mencionados es el desarrollado por Mander (Mander et al., 1988a). Este modelo es el más versátil de los tres y por esta razón es el más utilizado, puesto que tiene en cuenta las siguientes condiciones:

- Secciones transversales rectangulares o circulares
- Refuerzo transversal en espiral o estribos cerrados con o sin ramas adicionales
- Desarrollado para cargas estáticas o dinámicas, aplicadas tanto monotónica como cíclicamente.
- Esfuerzos de confinamiento iguales o desiguales a lo largo de cada eje transversal.



**Figura 6 Curva esfuerzo-deformación para concreto confinado e inconfinado,** (Mander et al., 1988b)

El esfuerzo de compresión en el concreto ( $f_c$ ) se obtiene por medio de:

$$f_c = \frac{f'_{cc} \cdot x^r}{r - 1 + x^r} \quad (Ec. 17)$$

$$f'_{cc} = f'_{co} \left( -1.254 + 2.254 \sqrt{1 + \frac{7.94 f'_l}{f'_{co}}} - 2 \frac{f'_l}{f'_{co}} \right) \quad (Ec. 18)$$

$$x = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}} \quad (Ec. 19)$$

Donde  $f'_{cc}$  es la resistencia a la compresión del concreto confinado. Y  $\varepsilon_c$  es la deformación longitudinal del concreto a compresión.

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} \left[ 1 + 5 \left( \frac{f'_{cc}}{f'_{co}} - 1 \right) \right] \quad (Ec. 20)$$

En la ecuación anterior  $f'_{co}$  y  $\varepsilon_{co}$  corresponden a la resistencia a la compresión y la deformación del concreto simple (o no confinado), siendo  $\varepsilon_{co} = 0.002$  por recomendación del autor (Mander, 1988).

Finalmente, los tres últimos términos necesarios para definir la curva de la Figura 6 serían,  $r$ ,  $E_{sec}$ , y  $f'_l$ .

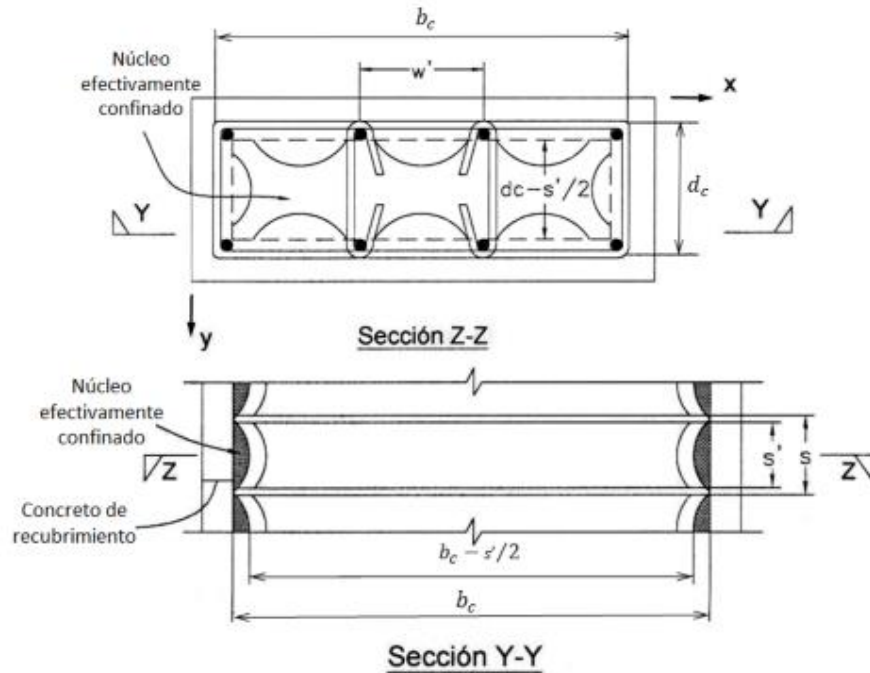
$$r = \frac{E_c}{E_c - E_{sec}} \quad (Ec. 21)$$

$$E_{sec} = \frac{f'_{cc}}{\varepsilon_{cc}} \quad (Ec. 22)$$

$f'_l$  representa el esfuerzo lateral de confinamiento proporcionado por los estribos de acero, cuya presión transversal máxima solo puede ser ejercida efectivamente sobre el núcleo de concreto cuando los esfuerzos de confinamiento se hayan desarrollado debido a la acción del arco, tal como se ve en la sección A-A de la Figura 7

$$f'_l = f'_l K_e \quad (\text{Ec. 23})$$

$f'_l$  se asume como uniformemente distribuida a lo largo de la superficie del núcleo de concreto y  $K_e$  es el coeficiente de efectividad del confinamiento.



**Figura 7 confinamiento efectivo en secciones rectangulares** (Mander et al., 1988b), *imagen tomada de* (Hernandez, 2014b)

Para secciones rectangulares:

$$K_e = \frac{\left(1 - \sum_{i=1}^n \frac{(w'i)^2}{6b_c d_c}\right) \left(1 - \frac{s'}{2b_c}\right) \left(1 - \frac{s'}{2d_c}\right)}{1 - \rho_{cc}} \quad (\text{Ec. 24})$$

Siendo  $w'$  la distancia libre entre barras longitudinales adyacentes, y  $b_c$  y  $d_c$  las dimensiones del núcleo de concreto medido hasta el centro de la barra de refuerzo tanto en el sentido x como en y.

Teniendo en cuenta que la cuantía de refuerzo transversal puede ser diferente en el sentido de cada eje principal del elemento se definen entonces las siguientes expresiones:

$$\rho_x = \frac{A_{sx}}{sd_c} \quad (Ec. 25)$$

$$\rho_y = \frac{A_{sy}}{sb_c} \quad (Ec. 26)$$

Los valores de  $A_{sx}$  y  $A_{sy}$  son el área total de refuerzo transversal paralelas a la dirección x y y respectivamente.

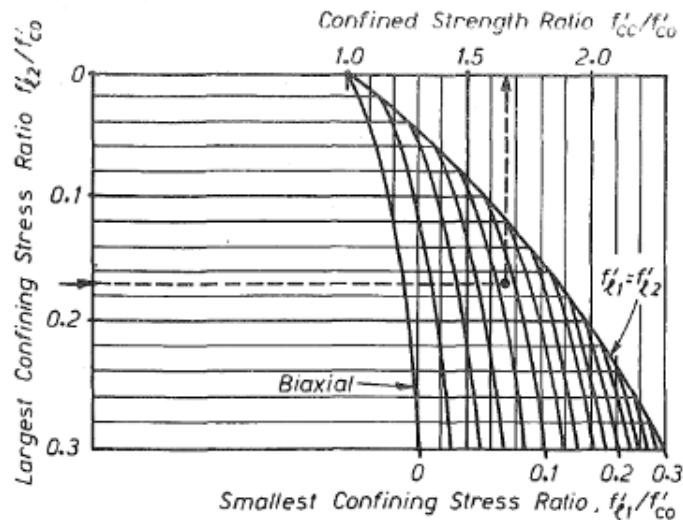
Habiendo definido los términos anteriores se puede ahora definir el esfuerzo lateral de confinamiento  $f'_l$  como:

$$f'_{lx} = \rho_x f_{yh} \quad (Ec. 27)$$

$$f'_{ly} = \rho_y f_{yh} \quad (Ec. 28)$$

Donde  $f_{yh}$  es la resistencia a la fluencia del acero transversal de confinamiento.

Por último, habiendo obtenido los esfuerzos efectivos de confinamiento en el cada sentido se procede a hacer uso del nomograma que se muestra en la Figura 8 para obtener el esfuerzo a compresión del concreto confinado  $f_{cc}$ .



**Figura 8 determinación de la resistencia confinada de secciones rectangulares a partir del esfuerzo lateral de confinamiento** (Mander et al., 1988a)

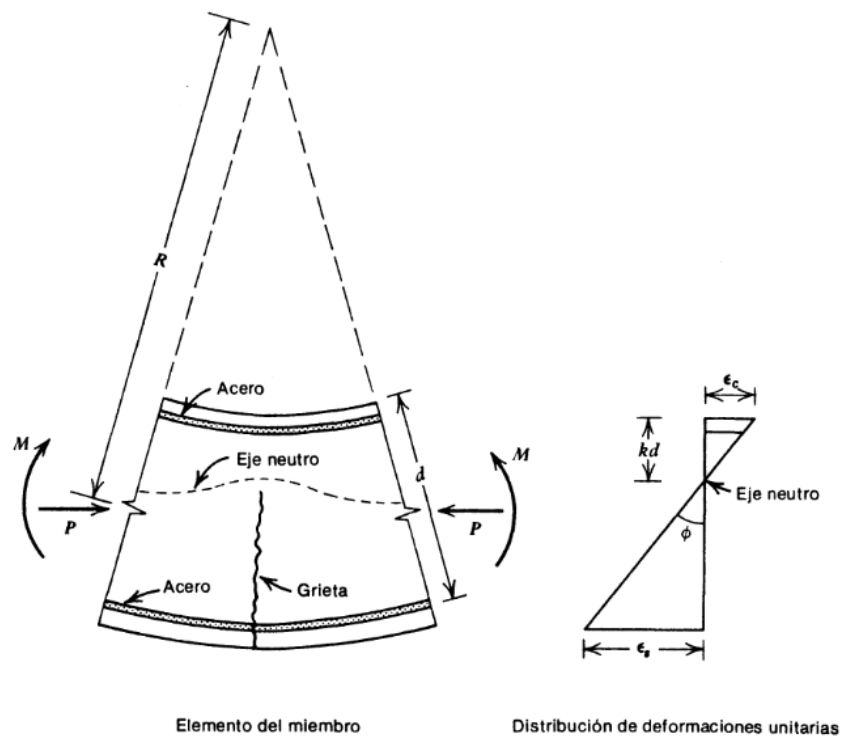
### 3.1.3 Relación momento – curvatura

La relación momento-curvatura permite calcular la ductilidad y resistencia de un elemento sometido a momento y carga axial, información primordial a la hora de evaluar las

características de comportamiento de una rótula plástica en un modelo de deformación progresiva.

El cálculo de esta grafica se basa en la teoría básica de la mecánica de materiales, en donde la curvatura ( $\phi$ ) de una viga, bajo solicitaciones de momento y carga axial, es la inversa del radio de curvatura ( $R$ ).

Esta curvatura ( $\phi$ ) es debida a la acción de una carga axial constante y un momento actuante, que es contrarrestado por un momento interno. El cálculo de este momento interno parte del principio de compatibilidad de deformaciones y de suposición de que las secciones planas permanecen planas.



**Figura 9 Deformación de una viga a flexión según la mecánica clásica de materiales**

Si este momento actuante es incrementado progresivamente hasta la falla del elemento es posible diferenciar tres fases distintas:

- 1- La primera corresponde al comportamiento elástico de la sección, en donde las deformaciones en los dos materiales son proporcionales a los esfuerzos.
- 2- En la segunda etapa el acero de refuerzo alcanza su esfuerzo de fluencia por tensión y comienza a recorrer el rango de endurecimiento por deformación, pero el concreto ya ha superado su resistencia a tensión, por lo cual se encuentra fisurado, sin embargo, su máxima resistencia a compresión inconfiada aún no ha sido superada.

- 3- En la tercera y última etapa las deformaciones llevan a la falla de la sección, iniciando con la falla del acero longitudinal y posteriormente fallando el acero de refuerzo transversal o el concreto debido a los altos esfuerzos en el concreto confinado.

Realizando un análisis de esfuerzo-deformación, considerando el bloque de esfuerzos (distribución de deformaciones y esfuerzos para los dos materiales a lo largo de la sección transversal), es posible graficar el comportamiento momento-curvatura de la sección, la cual es generalmente simplificada mediante la bilinealización de la curva obtenida basado en la energía bajo la curva, garantizando que la energía representada por la curva bilineal sea la misma que se obtiene de la curva original.

De la gráfica de momento-curvatura bilinealizada se obtiene 4 valores fundamentales para la definición de la rótula plástica de una sección, los cuales son:

- $M_y$ = momento de fluencia
- $M_u$ = momento último
- $\Phi_y$ = curvatura de fluencia
- $\Phi_u$ = curvatura última

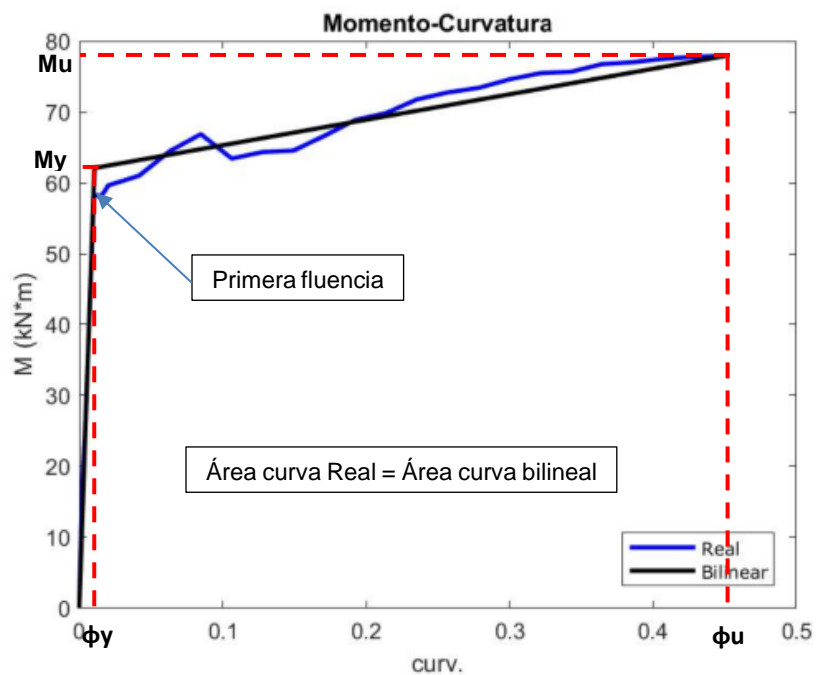


Figura 10 Relación momento curvatura real vs bilinealizada

### 3.1.4 Ductilidad

La ductilidad de un material es la capacidad de deformarse elásticamente sin romperse, y puede medirse para varios parámetros de deformación, dentro de los cuales se encuentra los siguientes:

- Ductilidad de curvatura:  $\mu_{\varphi} = \frac{\varphi}{\varphi_y}$
- Ductilidad de rotación:  $\mu_{\theta} = \frac{\theta}{\theta_y}$
- Ductilidad de desplazamiento:  $\mu_{\Delta} = \frac{\Delta}{\Delta_y}$
- Ductilidad de deformación:  $\mu_{\varepsilon} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_y}$

### 3.1.5 Rotación inelástica

La capacidad dúctil de un elemento depende de la geometría de la sección, la resistencia de sus materiales y de la cantidad y distribución del refuerzo transversal dentro de lo que se considere como la región de posibles deformaciones plásticas.

Adicionalmente, como ya se observó en los modelos de concreto confinado, el refuerzo transversal confina el núcleo de concreto, incrementando considerablemente la resistencia a compresión y por consiguiente incrementando también la capacidad de la sección para sostener grandes deformaciones a compresión, además de restringir el pandeo del refuerzo longitudinal.

Por otra parte, la curvatura de fluencia  $\Phi_y$ , y la curvatura última  $\Phi_u$ , se obtiene por medio de la bilinealización de la curva real de la sección, tal como se explicó en el numeral 3.1.3, y la capacidad de rotación plástica es la diferencia entre estas dos anteriores.

$$\varphi_p = \varphi_u - \varphi_y$$

Según (Priestley et al., 2007), se asume que el esfuerzo y la curvatura son constantes a lo largo de la longitud de plastificación  $L_p$ , longitud que incluye la longitud de penetración de esfuerzo  $L_{sp}$  (*strain penetration* por sus siglas en inglés). Más allá de la longitud  $L_p$  se considera que la distribución de curvatura y esfuerzos es lineal, de acuerdo con la aproximación bilineal de la curva momento-curvatura.  $L_p$  se describe en el numeral 3.1.6.

La rotación de fluencia se calcula a partir del área bajo la curva del diagrama de curvatura, siendo:



$$\theta_y = \frac{1}{2} \varphi_y L \text{ (Ec. 29)}$$

Siendo L la distancia medida desde la sección crítica de la articulación hasta donde el momento sea cero (punto de inflexión del momento).

La rotación plástica es:

$$\theta_p = \varphi_p L_p = L_p (\varphi_p - \varphi_y) \text{ (Ec. 30)}$$

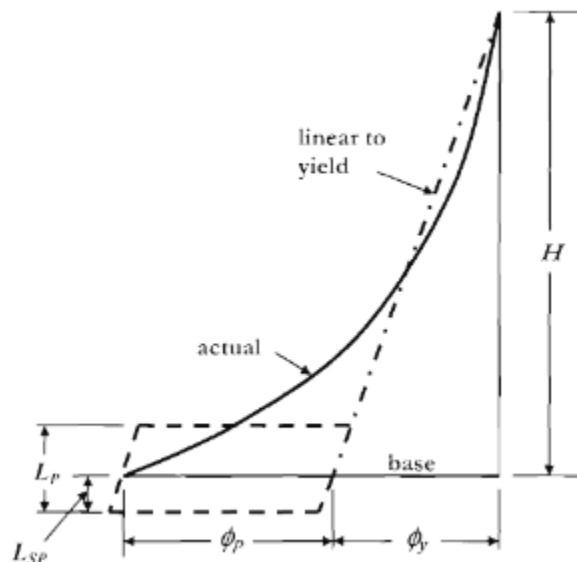
Luego, la rotación última sería:

$$\theta_u = \theta_y + \theta_p = \frac{1}{2} \varphi_y L + L_p (\varphi_u - \varphi_y) \text{ (Ec. 31)}$$

### 3.1.6 Longitud de plastificación

El concepto de longitud de plastificación es la longitud que abarca la rótula plástica de una sección dada, y que como se mencionó antes, asume que los esfuerzos y deformaciones a lo largo de esta distancia son constantes e iguales a los máximos dentro de esta longitud.

La longitud de plastificación incorpora la longitud de penetración de esfuerzos, la cual considera que los esfuerzos no llegan solamente hasta la cara del apoyo, sino que se extienden una distancia más allá dentro de este tal como se ve en la Figura 11



**Figura 11 Idealización de la distribución de curvatura** (Priestley et al., 2007)

Las longitudes  $L_p$  y  $L_{sp}$  se obtienen a partir de las siguientes ecuaciones:

$$L_p = kL_c + L_{sp} \geq 2L_{sp} \text{ (Ec. 32)}$$

$$k = 0.2 \left( \frac{f_u}{f_y} - 1 \right) \leq 0.08 \text{ (Ec. 33)}$$

$$L_{sp} = 0.022f_{ye}d_{bl} \text{ (Ec. 34)}$$

Donde  $f_y$  es el esfuerzo de fluencia del acero,  $f_u$  es el esfuerzo último,  $f_{ye}$  es el esfuerzo esperado de fluencia,  $d_{bl}$  es el diámetro del refuerzo longitudinal y  $L_c$  es la longitud desde la sección crítica hasta el punto de inflexión del momento.

## **3.2 CURVA DE CAPACIDAD Y PUNTO DE DESEMPEÑO DE UNA ESTRUCTURA**

### **3.2.1 Análisis de plastificación progresiva o Pushover y curva de capacidad**

El procedimiento para la obtención de la curva de capacidad es el siguiente:

- Modelar la estructura incluyendo la no linealidad de sus elementos (rótulas concentradas en los extremos de los elementos principales) y la no linealidad geométrica (efectos P-Delta).
- Calcular los modos de vibración de la estructura, obteniendo el vector de forma del vector predominante en cada sentido principal de la estructura.
- Calcular el patrón de cargas en cada sentido principal de la estructura, el cual se obtiene por medio de la multiplicación de la matriz de masas y el vector de forma del modo.
- Aplicar al modelo las cargas vivas y muertas.
- Definir el desplazamiento máximo de la cubierta, el cual en principio se estima como un 4% de la altura total de la edificación.
- Definir un punto de aplicación de las cargas y monitoreo de los desplazamientos y aplicar las cargas incrementales hasta alcanzar el desplazamiento predeterminado o la inestabilidad global de la estructura.
- Graficar la curva de capacidad registrando para cada paso en el aumento de carga su respectivo desplazamiento en la cubierta.

Para este análisis se debe partir de los resultados obtenidos de deformaciones y sollicitaciones para el caso de carga muerta.

### 3.2.2 Punto de comportamiento

El punto de desempeño o punto de comportamiento representa la condición de la estructura durante el sismo de diseño, que en otras palabras sería el desplazamiento y fuerza horizontal máximos que experimentara la estructura durante su vida útil al ser sometida al sismo de diseño.

Esta condición considera la degradación de rigidez de la estructura como consecuencia del comportamiento inelástico de sus elementos.

Actualmente existen dos metodologías para la determinación del punto de comportamiento, la primera es la del espectro de capacidad descrito en el ATC-40 (Applied Technology Council, 1996a) y modificado en el documento FEMA 440, y la segunda es llamada el método del coeficiente del desplazamiento, dado en el FEMA 440 (FEMA P440A, 2009)

#### 3.2.2.1 Método del espectro de capacidad

El método del espectro de capacidad descrito en el ATC-40 (Applied Technology Council, 1996a), es un método gráfico que compara la curva de capacidad de la estructura contra la curva de demanda sísmica a la que se ve sometida.

Dicha comparación se hace en términos de respuesta espectral aceleración-desplazamiento (ADRS, por sus siglas en inglés), por lo cual es necesario convertir la información de la curva de capacidad, que está en términos de fuerza y desplazamiento, a valores de  $S_a$  y  $S_d$ , a lo cual se le conoce como la curva espectral de capacidad, su conversión se basa en los principios básicos de la dinámica estructural y se realiza por medio de la formulación propuesta en el numeral 8.2.2.1.1 del ATC-40 (Applied Technology Council, 1996a).

$$PF_1 = \frac{\left[ \sum_{i=1}^N \frac{(w_i \varphi_{1i})}{g} \right]}{\left[ \sum_{i=1}^N \frac{(w_i \varphi_{1i}^2)}{g} \right]} \quad (Ec. 35)$$

$$\alpha_1 = \frac{\left[ \sum_{i=1}^N \frac{(w_i \varphi_{1i})}{g} \right]^2}{\left[ \sum_{i=1}^N \frac{w_i}{g} \right] \left[ \sum_{i=1}^N \frac{(w_i \varphi_{1i}^2)}{g} \right]} \quad (Ec. 36)$$

$$S_a = \frac{V/W}{\alpha_1} \quad (Ec. 37)$$

$$S_d = \frac{\Delta_{cub}}{PF_1 \Delta_{cub1}} \quad (Ec. 38)$$

Donde:

$PF_1$  = Factor de participación modal para el primer modo de vibración natural.

$\alpha_1$  = Coeficiente de masa modal para el primero modo de vibración natural.

$\frac{w_i}{g}$  = Masa correspondiente al nivel i.

$\varphi_{1i}$  = Amplitud del modo 1 en el nivel i.

$N$  = Nivel N, nivel mas alto en la porción principal de la estructura.

$V$  = Cortante basal.

$W$  = Carga muerta de la edificación mas la carga viva probable.

$\Delta_{cub}$  = desplazamiento en la cubierta asociado al un cortante sobre la curva de capacidad.

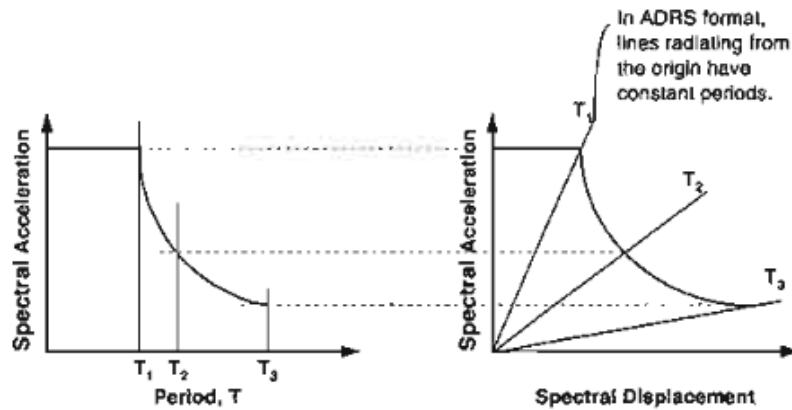
$S_a$  = Aceleración espectral.

$S_d$  = Desplazamiento espectral asociado a una aceleración espectral del espectro de capacidad.

El espectro de demanda sísmica también debe ser transformado al formato ADSR, debido a que comúnmente este espectro se define en las normas en términos de  $S_a$  vs  $T$ , por lo cual el periodo debe transformarse a valores de  $S_d$  por medio de la siguiente ecuación:

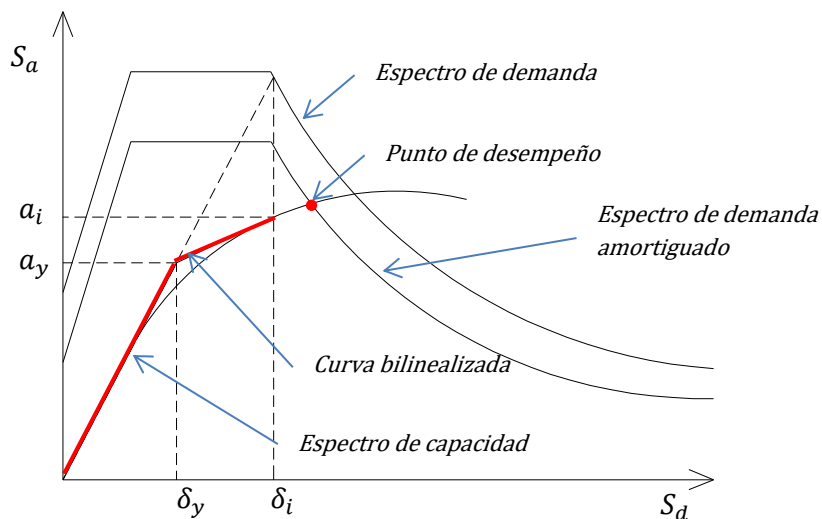
$$S_d = \frac{S_a T^2}{4\pi^2} \quad (Ec. 39)$$

En la Figura 12 se observa la representación del espectro de diseño en términos de  $S_a$  vs  $T$  y su transformación espectral, y en la Figura 13 se puede ver la sobreposición de la curva de capacidad en formato  $S_a$  Vs  $T$  y su respectiva transformación espectral  $S_a$  Vs  $S_d$ .



**Figura 12** Espectro de respuesta en su forma tradicional y su transformación a ADRS tomado de (Applied Technology Council, 1996a)

En la medida que la estructura entra en el rango de comportamiento inelástico el espectro de demanda debe reducirse, debido a que la estructura ha disipado energía por medio del daño producido durante el movimiento histerético, fenómeno que produce un amortiguamiento llamado amortiguamiento histetético.



**Figura 13** Espectros de demanda Vs capacidad y punto de desempeño

### 3.2.2.2 Procedimiento mejorado para Linealización Equivalente (Fema, 2005a)

El capítulo 6 del FEMA 440 (Applied Technology Council, 2005a) se presenta el procedimiento de linealización equivalente mejorado como modificación al método del espectro de capacidad del ATC-40 (Applied Technology Council, 1996b).

El objetivo es estimar la máxima respuesta de desplazamiento de un sistema no lineal con un sistema lineal equivalente usando un periodo y amortiguamiento efectivos ( $T_{eff}, \beta_{eff}$ ).

Los parámetros efectivos para la linealización equivalente son función de la ductilidad y teniendo en cuenta que la ductilidad es el objetivo de este análisis, la solución debe ser encontrada por medio de métodos gráficos o iterativos. En la sección 6.4 del FEMA-440 (Applied Technology Council, 2005b) se presentan 3 de estas técnicas, describiéndose más adelante el procedimiento A, que ha sido usado en este caso.

Finalmente debe tenerse en cuenta que estos procedimientos no son aplicables a estructuras con ductilidades grandes (mayores que 10 a 12).

A continuación, se presentan las expresiones para el cálculo del amortiguamiento y periodo efectivos aplicables para cualquier curva de capacidad:

Para  $1.0 < \mu < 4.0$

$$\beta_{eff} = 4.9(\mu - 1)^2 - 1.1(\mu - 1)^3 + \beta_0; T_{eff} = \{0.20(\mu - 1)^2 - 0.038(\mu - 1)^3 + 1\}T_0 \text{ (Ec. 40)}$$

Para  $4.0 \leq \mu \leq 6.5$

$$\beta_{eff} = 14.0 + 0.32(\mu - 1) + \beta_0; T_{eff} = [0.28 + 0.13(\mu - 1) + 1]T_0 \text{ (Ec. 41)}$$

Para  $\mu > 6.5$

$$\begin{aligned} \beta_{eff} &= 19 \left[ \frac{0.64(\mu - 1) - 1}{[0.64(\mu - 1)]^2} \right] \left( \frac{T_{eff}}{T_0} \right)^2 + \beta_0; T_{eff} \\ &= \left\{ 0.89 \left[ \sqrt{\frac{(\mu - 1)}{1 + 0.05(\mu - 2)}} - 1 \right] + 1 \right\} T_0 \text{ (Ec. 42)} \end{aligned}$$

Este procedimiento de linealización equivalente requiere del uso de un factor de reducción espectral ( $B(\beta_{eff})$ ) para ajustar la respuesta inicial del espectro de demanda a un nivel apropiado de amortiguamiento efectivo,  $\beta_{eff}$ .

$$(S_a)_\beta = \frac{(S_a)_0}{B(\beta_{eff})}; b = \frac{4}{5.6 - \ln \beta_{eff}(\text{en } \%)} \text{ (Ec. 43)}$$

El procedimiento de solución consta de 11 pasos, los cuales se describen a continuación:

- 1- Seleccionar el espectro de diseño con un amortiguamiento inicial  $\beta_i$ , normalmente este amortiguamiento es del 5%.
- 2- Modificar el espectro de diseño para una apropiada interacción suelo estructura, este puede incluir una reducción del espectro si se considera el amortiguamiento del suelo de fundación.

- 3- Convertir el espectro al formato de aceleración-desplazamiento, siendo este espectro el espectro de demanda inicial.
- 4- Generar la curva de capacidad de la estructura a analizar, para esto se pueden usar las guías del FEMA 440 (Fema, 2005b).
- 5- Seleccionar un punto de comportamiento inicial (aceleración y desplazamientos máximos,  $a_{pi}$  y  $d_{pi}$ , esto puede basarse en una aproximación de iguales desplazamientos como se ve en la Figura 14 o en cualquier otro basado en el juicio ingenieril.
- 6- Desarrollar una representación bilineal del espectro de capacidad hasta el punto de comportamiento seleccionado en el paso 5, esto con el fin de definir una aceleración y un desplazamiento de fluencia  $a_y$  y  $d_y$  (ver la Figura 14).
- 7- Para la representación bilineal del paso anterior calcular los valores de rigidez post-elástica ( $\alpha$ ) y ductilidad ( $\mu$ ) según las siguientes expresiones:

$$\alpha = \frac{\left(\frac{a_{pi} - a_y}{d_{pi} - d_y}\right)}{\left(\frac{a_y}{d_y}\right)} \text{ (Ec. 44); } \mu = \frac{d_{pi}}{d_y} \text{ (Ec. 45)}$$

- 8- Habiendo obtenido los valores de  $\alpha$  y  $\mu$  se calculan ahora el periodo y amortiguamiento efectivos ( $T_{eff}$ ,  $\beta_{eff}$ ).

Los pasos 9, 10 y 11 hacen parte del procedimiento A de iteración directa.

- 9- Usar el amortiguamiento efectivo para ajustar el espectro de demanda inicial.
- 10- Determinar el desplazamiento máximo estimado ( $d_i$ ) usando la intersección del periodo efectivo radial con el espectro de demanda para el amortiguamiento efectivo. La máxima aceleración estimada ( $a_i$ ) es la correspondiente a  $d_i$  en la curva de capacidad, ver la Figura 14.
- 11- Comparar el máximo desplazamiento  $d_i$  con el máximo desplazamiento inicial o con el de la iteración anterior, si la diferencia entre ambos valores se encuentra entre valores de tolerancia aceptables entonces el punto de comportamiento correspondería al último valor de  $d_i$  y  $a_i$  obtenidos. En caso de que esta diferencia supere la tolerancia considerada aceptable entonces se deberá repetir el proceso desde el paso 5 tomando como punto de partida los últimos valores obtenidos de  $d_i$  y  $a_i$ .

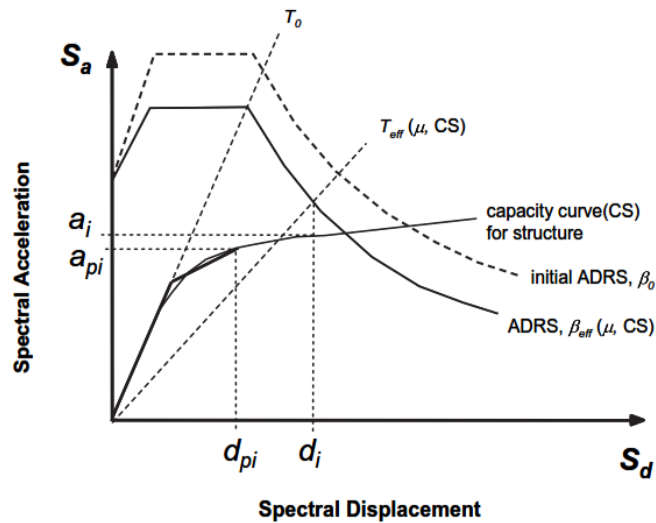


Figura 14 Determinación del máximo desplazamiento estimado usando iteración directa (Fema, 2005a)

### 3.2.3 Niveles de desempeño y criterios de aceptación

El ASCE 41-17 (ASCE, 2017a) define a los niveles de desempeño como estados límites de daño para una edificación, teniendo en cuenta los componentes estructurales y no estructurales. Dependiendo del nivel de desempeño se limitan los valores de algunas propiedades de la estructura, tales como la deriva, la demanda de esfuerzos y la deformación inelástica, a los cuales se les conoce como criterios de aceptación.

Los niveles de desempeño considerados en la ASCE 41-17 (ASCE, 2017a) son 6 diferentes; ocupación inmediata, control de daños, seguridad de la vida, seguridad limitada, prevención del colapso y no considerada. De estos 6 niveles los más representativos son los de ocupación inmediata, seguridad de la vida y prevención del colapso, cuyas siglas en inglés son IO, LS y CP respectivamente.

Estos tres niveles de desempeño se describen de la siguiente manera:

Ocupación Inmediata (Immediate Occupancy - IO): Es definido como el estado de daño posterior a un sismo en el que la estructura es segura para su ocupación puesto que retiene su resistencia y rigidez.

Seguridad de la Vida (Life Safety - LS): Se define como el estado de daño posterior a un sismo en el que la estructura ha sufrido daños en sus componentes, pero tiene un margen de seguridad ante el colapso parcial o total de la edificación.



Prevención del Colapso (*Collapse Prevention* - CP): Es el estado de daño posterior a un sismo en el que la estructura ha sufrido daños en sus componentes, es capaz de soportar cargas gravitacionales, pero no retiene un margen ante el colapso.

En las tablas 10-7 y 10-8 de la ASCE 41-17 (ASCE, 2017a) se definen los valores del ángulo de rotación plástica para los criterios de aceptación en las rótulas de vigas y columnas de pórticos en concreto reforzado.

## 4 METODOLOGÍA

Este estudio inició con la búsqueda de dos estructuras de pórticos en concreto reforzado, una de ellas diseñada para una capacidad moderada de disipación de energía (DMO) según la NSR-10 (AIS, 2010b) y la otra antes de la entrada en vigor del CCCSR-84 (sin provisiones sísmicas). A continuación, se hizo una revisión de la información, haciendo hincapié en la definición geométrica de la estructura, sus cargas, materiales y sus despieces de elementos, haciendo esto por medio de los planos estructurales y memorias de cálculo (en caso de que existiesen).

A continuación, se realizó la modelación matemática de la estructura, con el fin de obtener información preliminar sobre los periodos estructurales y masas de cada piso para calcular el patrón de cargas a aplicar en el análisis estático no lineal (Pushover).

Adicionalmente se obtuvo de esta primera modelación las solicitaciones sobre cada uno de los elementos del sistema de resistencia sísmica, para esto fueron usadas dos combinaciones de carga, la primera fue  $CM+0.25CV$ , con la cual se obtuvieron los cortantes en vigas y la carga axial, momentos y cortantes para las columnas. Con la segunda combinación de cargas ( $CM+0.25CV+S$ ) se obtuvo la longitud  $L_c$  de cada elemento, la cual es la distancia medida desde el nudo hasta el punto en el que el diagrama de momentos cambia de signo y que es usada para calcular la longitud de plastificación  $L_p$ .

Con esta información se procedió a la tipificación de secciones de refuerzo con el fin de unificar parámetros para elementos similares, luego de lo cual se procedió a la parametrización de las rótulas, haciendo uso de la curva momento-curvatura de cada rótula y de los lineamientos de la ASCE 41-17 (ASCE, 2017a) para estos efectos.

Habiéndose obtenido los parámetros para cada rótula se introdujeron y asignaron todas estas rótulas a sus elementos correspondientes dentro de la modelación matemática, continuando con el análisis no lineal estático.

Del análisis no lineal inicialmente se busca encontrar el punto de comportamiento de la estructura y así obtener la información de momentos y rotaciones de los elementos en este estado, pero posteriormente también es usado para encontrar los momentos y rotaciones antes de sobrepasar cada nivel de desempeño y en el estado de inestabilidad de la estructura.

Con esta información se busca saber a qué grado de solicitaciones de momentos y rotaciones ha llegado cada elemento y así poder definir las relaciones entre los momentos y rotaciones encontradas respecto a las rotaciones y momentos de fluencia de cada rótula.

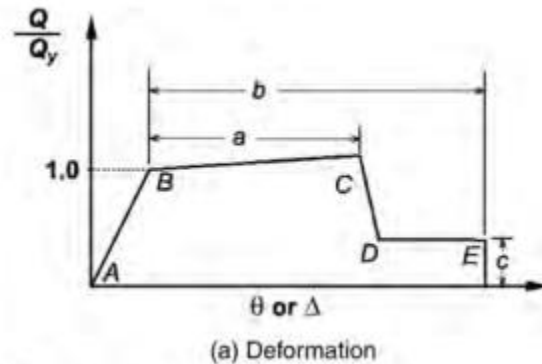
La relación de momentos permite saber si la rótula ha llegado o no a la fluencia de la sección, criterio con el cual posteriormente se define si las rotaciones obtenidas son coherentes con el estado de fluencia de la rótula.

Por otra parte la relación de la rotación obtenida contra la rotación de fluencia da como resultado el factor  $m$  teórico, el cual es comparado con el factor  $m$  mínimo esperado de las tablas 10-10a y 10-13 de la ASCE 41-17 (ASCE, 2017a) con el fin de comprender el comportamiento de los resultados teóricos y saber si estos factores son similares o no a los consignados en las tablas, para finalmente proponer o no que estos factores  $m$  sean ajustados basados en la evidencia obtenida por medio de las modelaciones.

A continuación, se presenta un listado de actividades para la ejecución del presente estudio.

1. Recopilación de información:
  - 1.1. Planos estructurales
  - 1.2. Despiece de elementos
  - 1.3. Cargas
  - 1.4. Espectro sísmico de diseño
  - 1.5. Materiales
2. Modelación estructural:
  - 2.1. Representación 3D de los planos estructurales
  - 2.2. Asignación de cargas y materiales
  - 2.3. Definición y asignación del espectro sísmico de diseño
3. Análisis preliminar de la estructura, obtención de solicitaciones:
  - 3.1. Vigas: cortante para la combinación de cargas  $CM+0.25CV$  y Longitud  $L_c$ , la cual es la distancia medida desde el nudo hasta donde el momento sea cero, evaluado para la combinación de carga  $CM+0.25CV+S$
  - 3.2. Columnas: Carga axial, momentos y cortantes para  $CM+0.25CV$  y longitud  $L_c$  para la combinación de carga  $CM+0.25CV+S$
4. Parametrización de rótulas para modelación estructural:
  - 4.1. Tipificación de rótulas en función de la sección transversal, refuerzo longitudinal y transversal, y para las columnas, su carga axial para la combinación de carga de  $CM+0.25CV$
  - 4.2. Obtención de la curva momento-curvatura para los ejes principales de cada sección tipo.
  - 4.3. Bilinealización de la curva momento-curvatura
  - 4.4. Obtención de los parámetros de modelación de las rótulas para vigas y columnas según el capítulo 10 de la ASEC-41-17 (ASCE, 2017a)
5. Modelación no lineal de la estructura:
  - 5.1. Definición y asignación de rótulas en vigas y columnas
  - 5.2. Definición de patrón de cargas horizontales y análisis de *pushover*
6. Obtención del punto de comportamiento según FEMA440 (Applied Technology Council, 2005b)
7. Análisis de ductilidad de rotulas para el punto de comportamiento de la estructura y para los criterios de aceptación definidos en el ASCE 41-17 (ASCE, 2017a)

La parametrización de las rótulas plásticas descrito en el numeral 4 siguió las especificaciones del capítulo 10 de la ASCE 41-17 (ASCE, 2017a), la cual consiste en obtener los valores de  $a$ ,  $b$  y  $c$  que definen la curva fuerza-deformación de la Figura 15 además de incluir a esta gráfica los criterios de aceptación para cada nivel de desempeño.



**Figura 15 relación generalizada fuerza -deformación para elementos de concreto tomada de la ASCE-41-17 (ASCE, 2017a)**

Dicha parametrización tiene una formulación independiente para cada tipo de elemento; particularmente para pórticos de concreto la ASCE 41-17 (ASCE, 2017a) diferencia los parámetros y formulaciones entre vigas, columnas rectangulares o circulares y nudos viga-columna.

En el caso de las rótulas para vigas los parámetros son los que se observan en la Tabla 3, los cuales dependen de las siguientes variables:

- Las cuantías de refuerzo superior, inferior y de la cuantía balanceada de la sección.
- La disposición del refuerzo transversal y el cumplimiento o no de la normativa vigente respecto a este tema.
- El cortante de diseño en relación con el cortante nominal de la sección para la resistencia esperada del concreto.
- El desarrollo del refuerzo longitudinal

Conditions	Modeling Parameters <sup>a</sup>			Acceptance Criteria <sup>a</sup>				
	Plastic Rotation Angle (radians)		Residual Strength Ratio	Plastic Rotation Angle (radians)				
	a	b		Performance Level				
			IO	LS	CP			
Condition i. Beams controlled by flexure <sup>b</sup>								
$\frac{\mu - \mu'}{\mu_{max}}$	Transverse reinforcement <sup>c</sup>	$\frac{V'}{b_w d \sqrt{f_{cE}}}$						
≤0.0	C	≤3 (0.25)	0.025	0.05	0.2	0.010	0.025	0.05
≤0.0	C	≥6 (0.5)	0.02	0.04	0.2	0.005	0.02	0.04
≥0.5	C	≤3 (0.25)	0.02	0.03	0.2	0.005	0.02	0.03
≥0.5	C	≥6 (0.5)	0.015	0.02	0.2	0.005	0.015	0.02
≤0.0	NC	≤3 (0.25)	0.02	0.03	0.2	0.005	0.02	0.03
≤0.0	NC	≥6 (0.5)	0.01	0.015	0.2	0.0015	0.01	0.015
≥0.5	NC	≤3 (0.25)	0.01	0.015	0.2	0.005	0.01	0.015
≥0.5	NC	≥6 (0.5)	0.005	0.01	0.2	0.0015	0.005	0.01
Condition ii. Beams controlled by shear <sup>b</sup>								
Stirrup spacing ≤ d/2			0.0030	0.02	0.2	0.0015	0.01	0.02
Stirrup spacing > d/2			0.0030	0.01	0.2	0.0015	0.005	0.01
Condition iii. Beams controlled by inadequate development or splicing along the span <sup>b</sup>								
Stirrup spacing ≤ d/2			0.0030	0.02	0.0	0.0015	0.01	0.02
Stirrup spacing > d/2			0.0030	0.01	0.0	0.0015	0.005	0.01
Condition iv. Beams controlled by inadequate embedment into beam-column joint <sup>b</sup>			0.015	0.03	0.2	0.01	0.02	0.03

**Tabla 3 Parámetros de modelación y criterios numéricos de aceptación para procedimientos no lineales - Vigas de concreto reforzado. Tabla 10-7 de la ASCE 41-17 (ASCE, 2017a)**

Para el caso de las rótulas para columnas su parametrización se encuentra en la tabla 10-8 de la ASCE 41-17 (ASCE, 2017a) y que se muestra en la Tabla 4. Según esta tabla las variables necesarias para su uso son:

- Nud esta ha sido calculada como la máxima carga axial para la combinación de carga 1.0CM+0.25CV
- Vye se ha calculado como el máximo cortante actuante para la combinación de carga 1.0CM+0.25CV+S
- $V_{ColOE}$  se calculó como el cortante máximo resistente para la resistencia esperada del acero y del concreto.
- $f'_{cE}$  es la resistencia esperada del concreto la cual es la resistencia a compresión multiplicada por un factor de mayoración de 1.50 según la tabla 10.-1 de la ASCE 41-17 (ASCE, 2017a)
- $f'_{yIE}$  es la resistencia esperada del acer la cual es la resistencia a tensión multiplicada por un factor de mayoración de 1.25 según la tabla 10.-1 de la ASCE 41-17 (ASCE, 2017a)
- $A_g$  es el área total de la sección transversal de la columna.
- $\rho_t$  es la cuantía de acero longitudinal

Modeling Parameters	Acceptance Criteria		
	Plastic Rotation Angle (radians)		
	Performance Level		
Plastic Rotation Angles, <i>a</i> and <i>b</i> (radians) Residual Strength Ratio, <i>c</i>	IO	LS	CP
Columns not controlled by inadequate development or splicing along the clear height <sup>a</sup>			
$a = \left( 0.042 - 0.043 \frac{N_{UD}}{A_g f'_{cE}} + 0.63 \rho_t - 0.023 \frac{V_{yE}}{V_{CoIOE}} \right) \geq 0.0$	0.15 <i>a</i> ≤ 0.005	0.5 <i>b</i> <sup>b</sup>	0.7 <i>b</i> <sup>b</sup>
For $\frac{N_{UD}}{A_g f'_{cE}} \leq 0.5$ $\left\{ \begin{array}{l} b = \frac{0.5}{5 + \frac{N_{UD}}{0.8 A_g f'_{cE}} \frac{1}{\rho_t} \frac{f'_{cE}}{f_{yIE}}} - 0.01 \geq a^a \\ c = 0.24 - 0.4 \frac{N_{UD}}{A_g f'_{cE}} \geq 0.0 \end{array} \right.$			
Columns controlled by inadequate development or splicing along the clear height <sup>c</sup>			
$a = \left( \frac{1}{8} \frac{\rho_t f_{yIE}}{\rho_t f_{yIE}} \right) \geq 0.0$ $\left( \frac{1}{8} \frac{\rho_t f_{yIE}}{\rho_t f_{yIE}} \right) \leq 0.025^d$	0.0	0.5 <i>b</i>	0.7 <i>b</i>
$b = \left( 0.012 - 0.085 \frac{N_{UD}}{A_g f'_{cE}} + 12 \rho_t^e \right) \geq 0.0$ $\geq a$ $c = 0.15 + 36 \rho_t \leq 0.4$			

**Tabla 4** Parámetros de modelación y criterios numéricos de aceptación para procedimientos no lineales – Columnas diferentes a circulares con refuerzo en espiral o estribos sísmicos como se definen en la ACI 318. **Tabla 10-8 de la ASCE 41-17** (ASCE, 2017a)

Finalmente, siguiendo la metodología del capítulo 10 de la ASCE 41-17 (ASCE, 2017a), a los pórticos del modelo estructural se les debe reducir su rigidez tal como se ven la Tabla 5.

Component	Flexural Rigidity	Shear Rigidity	Axial Rigidity
Beams—nonprestressed <sup>a</sup>	$0.3 E_{cE} I_g$	$0.4 E_{cE} A_w$	—
Beams—prestressed <sup>a</sup>	$E_{cE} I_g$	$0.4 E_{cE} A_w$	—
Columns with compression caused by design gravity loads $\geq 0.5 A_g f'_{cE}$ <sup>b</sup>	$0.7 E_{cE} I_g$	$0.4 E_{cE} A_w$	$E_{cE} A_g$
Columns with compression caused by design gravity loads $\leq 0.1 A_g f'_{cE}$ or with tension <sup>b</sup>	$0.3 E_{cE} I_g$	$0.4 E_{cE} A_w$	$E_{cE} A_g$ (compression) $E_{sE} A_s$ (tension)
Beam–column joints	Refer to Section 10.4.2.2.1		$E_{cE} A_g$
Flat slabs—nonprestressed	Refer to Section 10.4.4.2	$0.4 E_{cE} A_g$	—
Flat slabs—prestressed	Refer to Section 10.4.4.2	$0.4 E_{cE} A_g$	—
Walls—cracked <sup>c</sup>	$0.35 E_{cE} A_g$	$0.4 E_{cE} A_w$	$E_{cE} A_g$ (compression) $E_{sE} A_s$ (tension)

**Tabla 5** Valores de rigidez efectiva, **tabla 10-5 de la ASCE 41-17** (ASCE, 2017a)

## 5 EVALUACIÓN DE LAS ESTRUCTURAS

Las estructuras objeto de este estudio son dos, la primera de ellas es un diseño realizado por el autor de este documento y que sigue los lineamientos de la Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente de 2010 - NSR-10 (AIS, 2010b). La segunda estructura no sigue ninguna normativa puesto que fue calculada antes de la entrada en vigor del Código Colombiano de Construcción Sismo Resistente de 1984 (CCCSR-84). Estas estructuras se denominarán Edificación 1 y Edificación 2 de ahora en adelante.

La edificación 1 es una estructura residencial perteneciente al grupo de uso I, de dos pisos de altura y cubierta plana transitable. El sistema estructural de resistencia sísmica es el de pórticos de concreto con capacidad moderada de disipación de energía (DMO). Las losas de entrepiso y cubierta son aligeradas en una dirección de 35cm de altura.

Esta edificación se encuentra ubicada al sur de la ciudad de Bogotá y según la microzonificación sísmica se localiza dentro de la zona Aluvial 200. Los materiales utilizados para el diseño fueron concreto de 21 MPa de resistencia a la compresión y acero de refuerzo de 420MPa de resistencia a la fluencia.

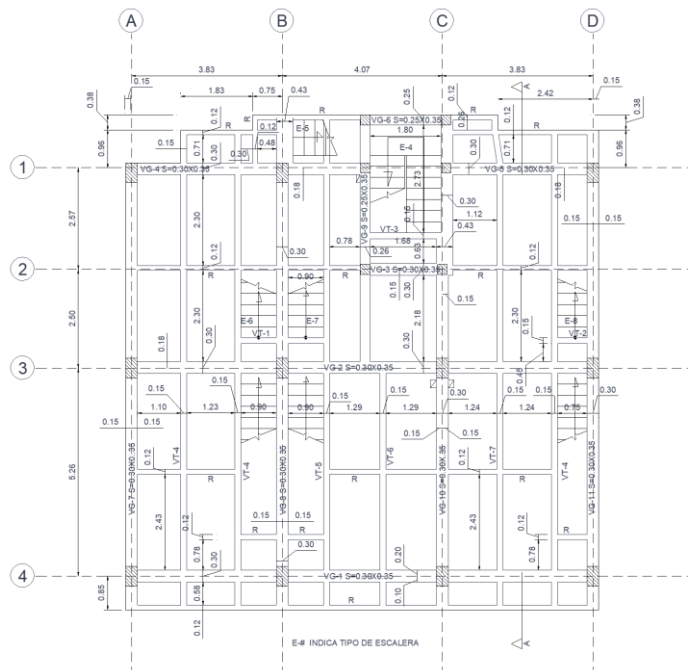
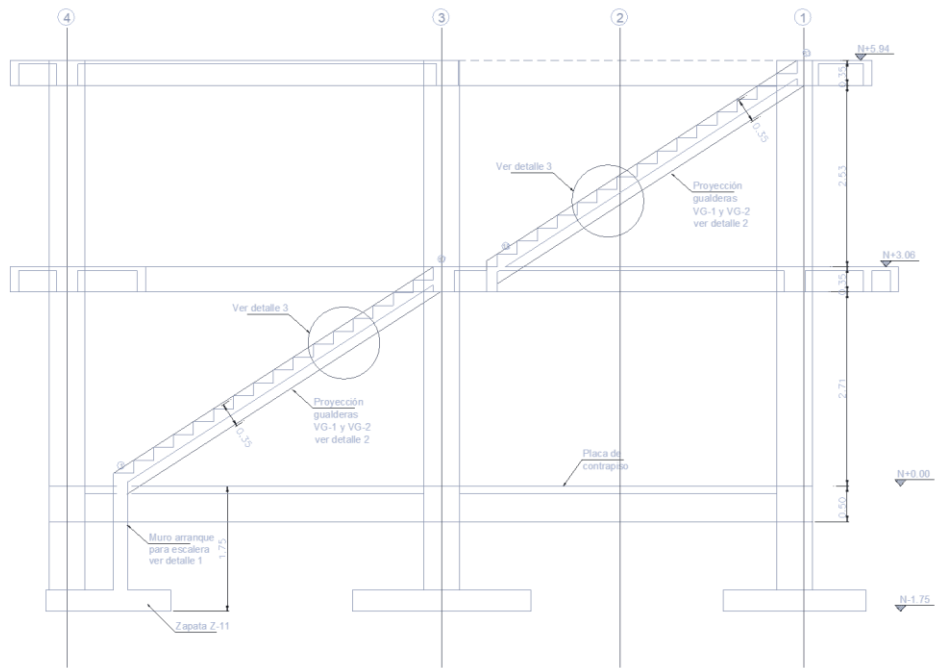


Figura 16 Planta de piso 2 de la edificación 1

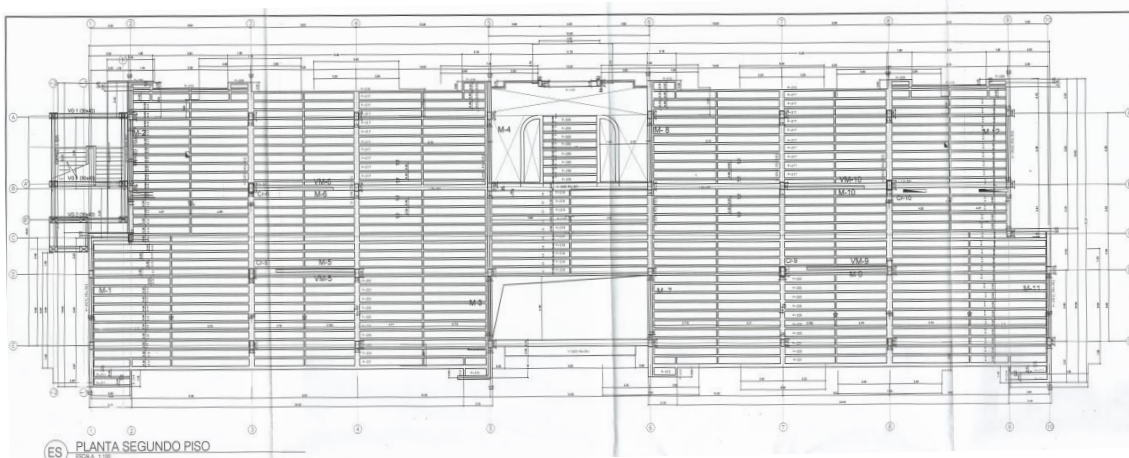


**Figura 17 Corte vertical edificación 1**

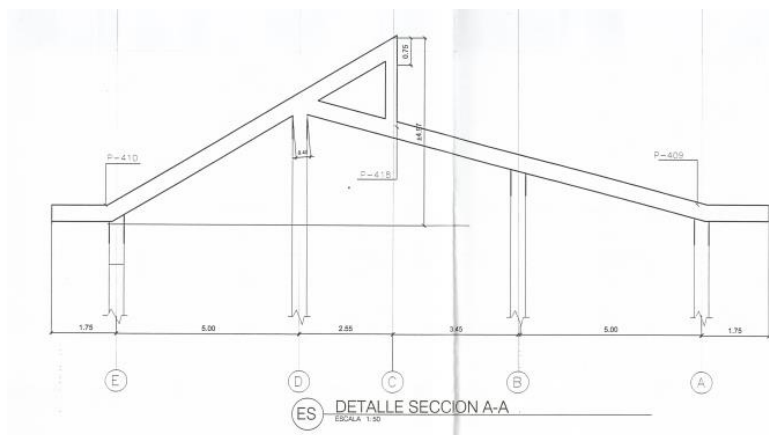
La Edificación 2 consta de dos placas aéreas y cubierta a dos aguas. el sistema estructural es el de pórticos de concreto, pero se conforman principalmente en el sentido transversal del edificio, mientras que en el sentido longitudinal las fuerzas horizontales se transmiten a las columnas mediante algunas vigas, pero mayormente por medio del diafragma que conforman las viguetas de losa de entrepiso que llevan las cargas a las vigas principales transversales. Las losas de entrepiso son aligeradas en una dirección de 50cm de altura y la cubierta es a dos aguas en tejas de asbesto-cemento.

Este edificio se encuentra ubicado en la ciudad de Bogotá y según la microzonificación sísmica se localiza dentro de la zona Lacustre 200. Los materiales utilizados fueron concreto de 21 MPa de resistencia a la compresión y acero de refuerzo de 240MPa de resistencia a la fluencia para diámetros de barras menores o iguales a #3 y 420 MPa para todos los demás.





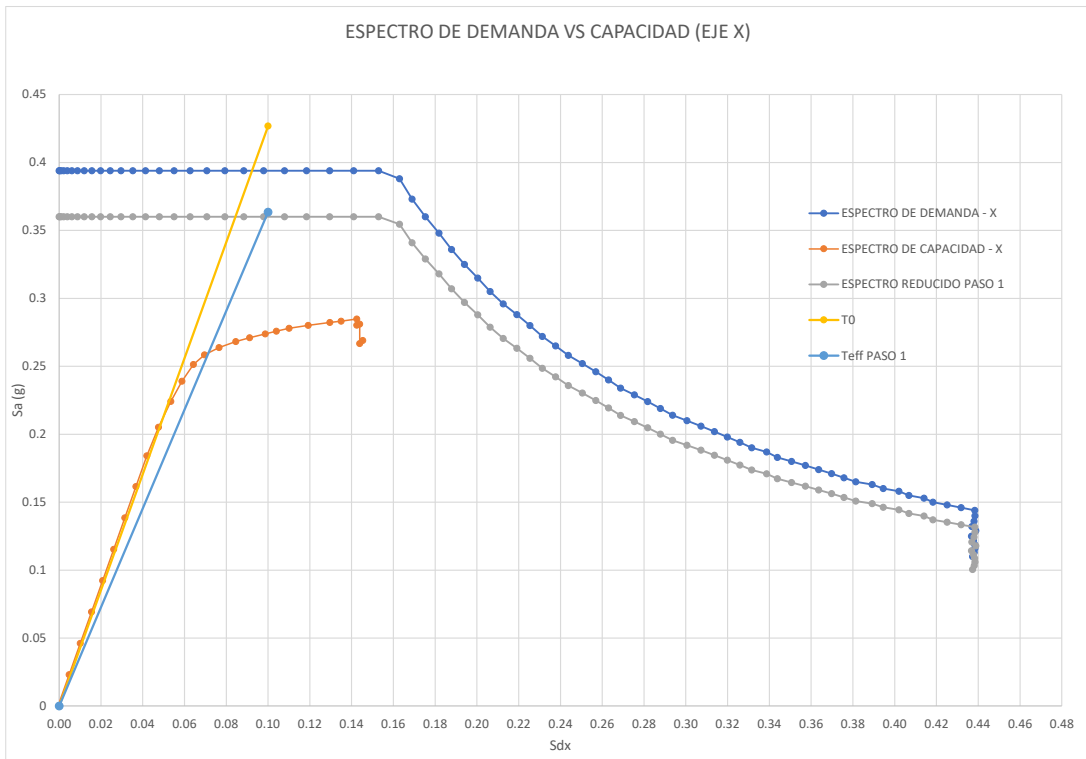
**Figura 18 Planta de piso 2 de la edificación 2**



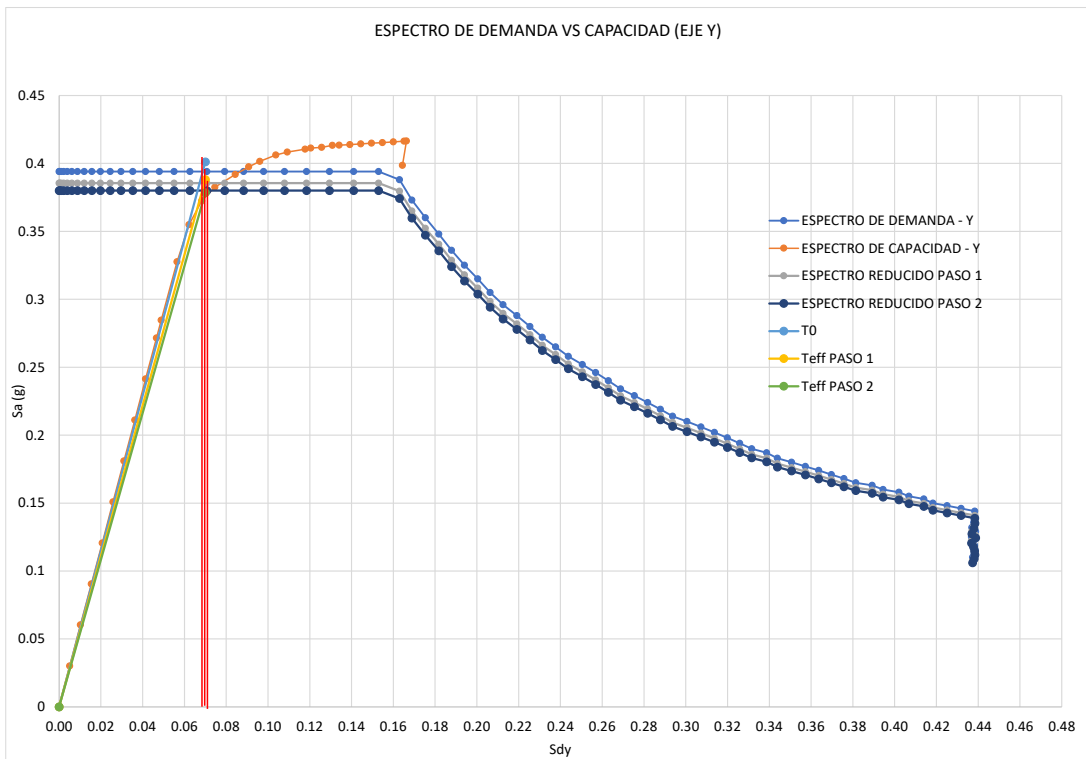
**Figura 19 detalle en corte de cubierta edificación 2**

Los resultados gráficos de los análisis estáticos no lineales sobre las dos estructuras se presentan a continuación.

Para la Estructura 1, el comportamiento de la curva de capacidad contra la de demanda para el eje X se puede ver en la Figura 20, mientras que el comportamiento en el sentido Y se puede ver en la Figura 21. Allí podemos observar que la curva de capacidad en el sentido Y de la estructura representaría el comportamiento del sentido fuerte de la estructura, y que en esta dirección la estructura se comportaría elásticamente bajo el sismo de diseño, mientras que en el sentido X la curva alcanza capacidades menores, entrando en el rango inelástico; sin embargo, en ambos casos fue posible encontrar un punto de comportamiento.



**Figura 20** Curva de demanda Vs capacidad en el sentido X de la edificación 1

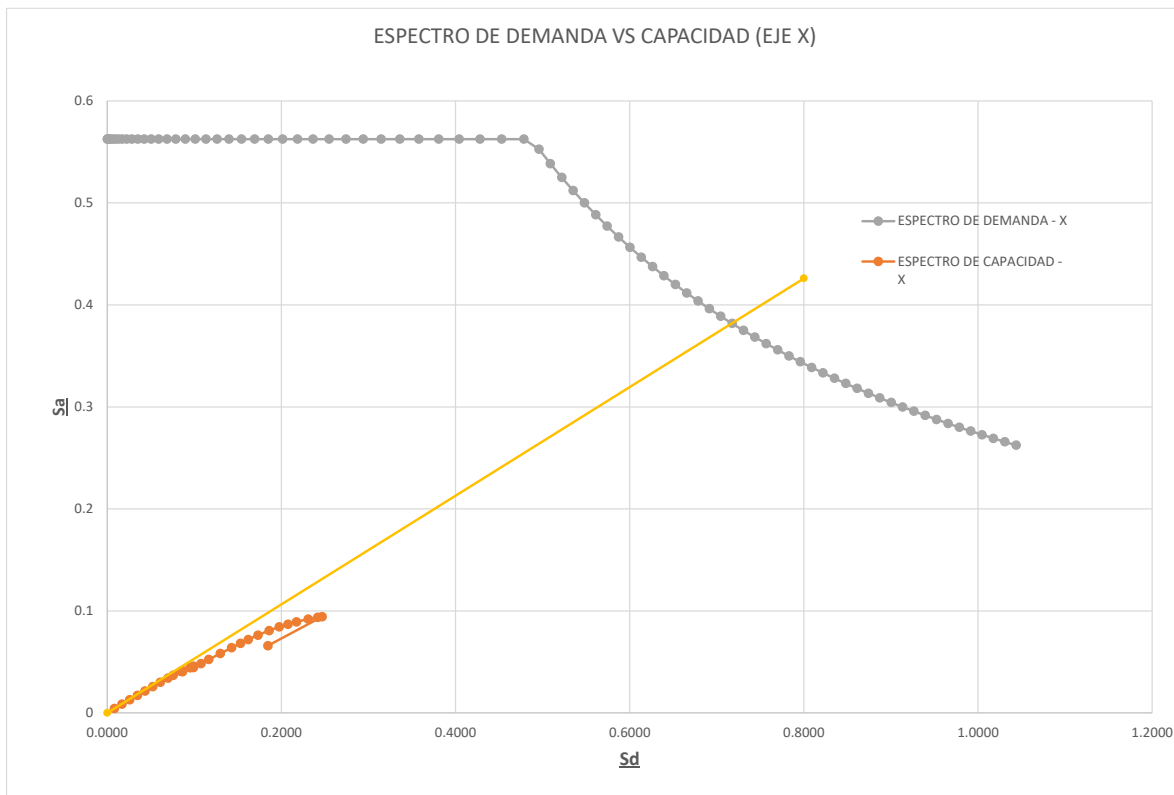


**Figura 21** Curva de demanda Vs capacidad en el sentido Y de la edificación 1

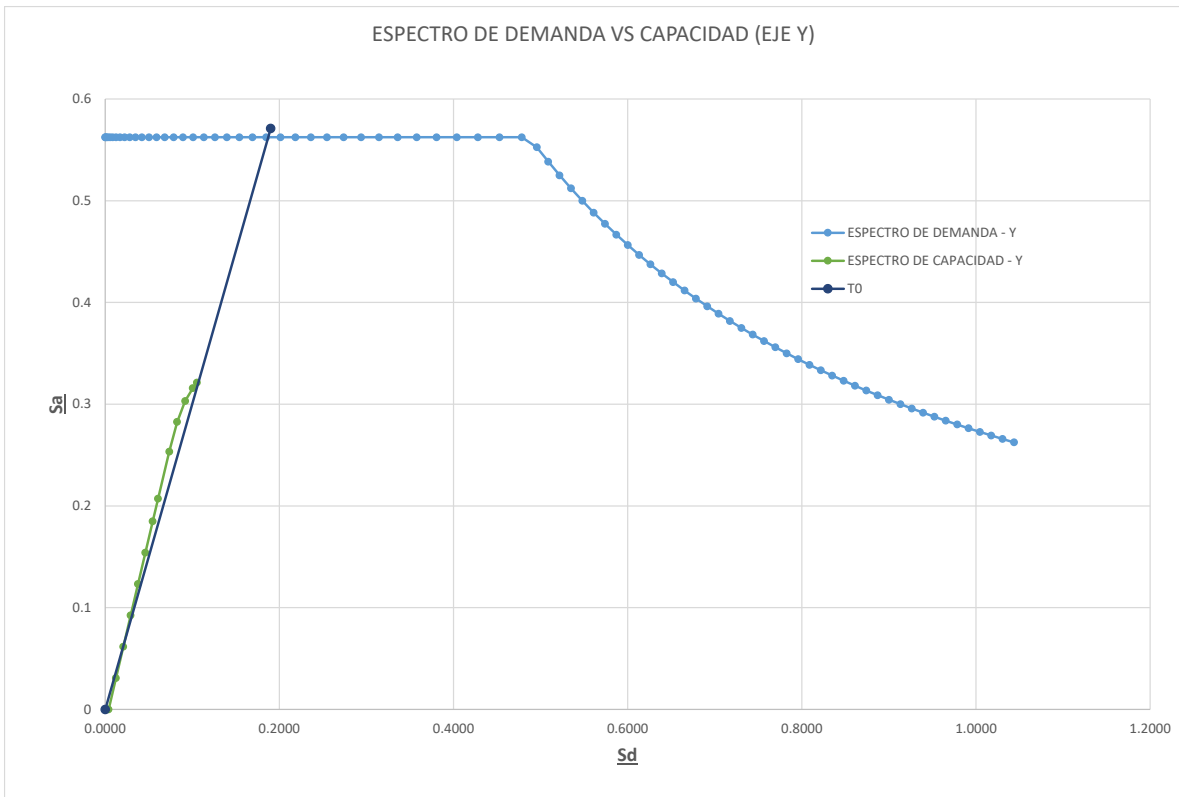
En el caso de la Edificación 2 su comportamiento fue bastante diferente, para éste análisis se observó nuevamente que la curva de capacidad en el eje Y presentó una mayor resistencia a la del eje X, esto primordialmente debido a que en el sentido corto de la edificación (eje Y) es en el que se conforman los pórticos de este edificio y todas las columnas están orientadas con el eje fuerte sobre este eje, mientras que sobre el eje X apenas se conforman 3 pórticos y las columnas trabajan todas sobre su eje débil.

En la Figura 22 se puede observar la curva de demanda contra capacidad de la edificación 2 en sobre el eje X; aquí es notable la baja resistencia de la estructura respecto a la demanda bajo el sismo de diseño. La línea amarilla representa el periodo inicial de la estructura y el punto sobre el que esta línea corta al espectro de demanda es el correspondiente a la primera iteración para hallar el punto de comportamiento, si en ese punto de intersección se traza una línea vertical se puede ver que no toca al espectro de capacidad.

Esta misma condición ocurre en el caso de la Figura 23, lo cual indica que la estructura no tiene la capacidad para hacer frente a las fuerzas que le impondría el sismo de diseño y por consiguiente la estructura pasaría directamente a la falla estructural.



**Figura 22** Curva de demanda Vs capacidad en el sentido X de la edificación 2



**Figura 23** Curva de demanda Vs capacidad en el sentido Y de la edificación 2

## 6 ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 6.1 Obtención del factor $m$ para la estructura diseñada según la NSR-10 (AIS, 2010b)

Para los siguientes análisis se tiene en cuenta los siguientes valores y criterios:

En cuanto a los valores que se deben analizar en cada rótula, se tomarán en cuenta las rotaciones ( $\theta$ ), la relación entre los momentos obtenidos ( $M$ ) y los momentos de fluencia ( $M_y$ ), el factor  $m$  obtenido (relación entre la rotación de fluencia y la rotación obtenida), y el factor  $m$  para vigas y columnas que se encuentran en las tablas 10.10a y 10.13 de la ASCE 41-17(ASCE, 2017a).

Es importante señalar que solo se considerarán aquellas rótulas cuya relación de momentos  $M/M_y$  sea mayor a 0.95, ya que se asume que para que se puedan producir rotaciones en la sección, primero se debe superar el momento de fluencia del elemento, para lo cual se ha considerado un margen de error del 5%.

#### 6.1.1 Análisis de rótulas en vigas

##### 6.1.1.1 Para el punto de comportamiento

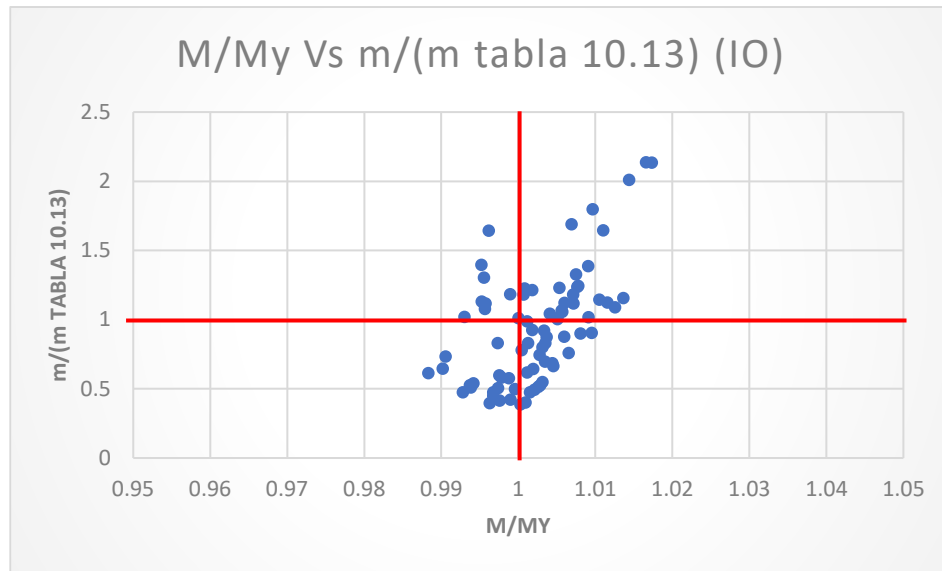
En el punto de comportamiento de la estructura se producen 94 rótulas, las cuales se reparten en 78 dentro del rango de IO y 16 en LS.

De las 78 rótulas en IO 27 se encuentran en las vigas en el sentido  $x$  de la estructura (sentido más rígido) y 51 en el sentido  $Y$  (sentido menos rígido), mientras que las 16 rótulas en LS 15 están en el sentido fuerte de la estructura y 1 en el sentido débil. Cabe resaltar que esas 16 rótulas en LS se encuentran todas en las vigas de piso 2.

A continuación, se describe una serie de gráficas con el fin de dilucidar el comportamiento obtenido para todas las rótulas obtenidas.

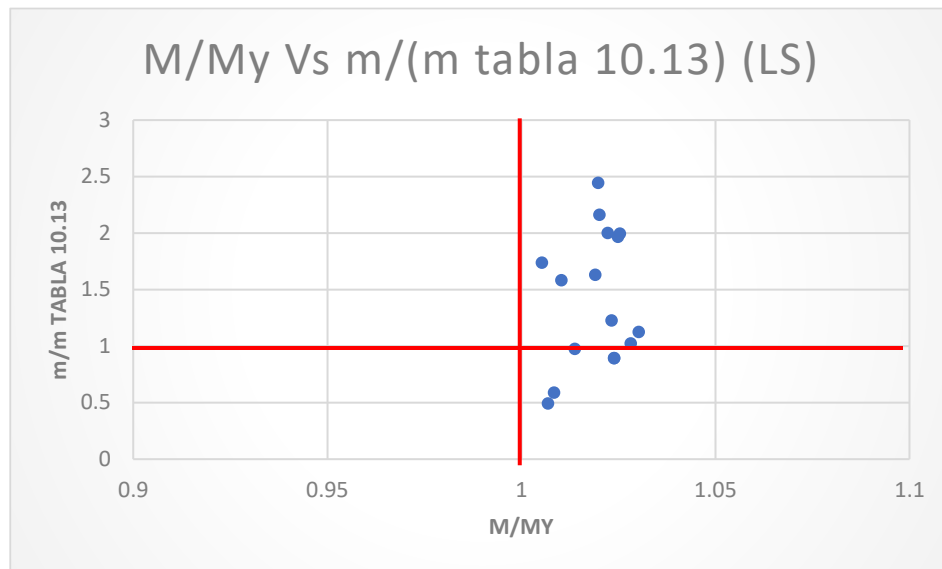
En la Figura 24 se observa que para las 78 rótulas obtenidas para IO su relación  $M/M_y$  se encuentra entre 0.99 y 1.014, mientras que la relación del factor  $m/m$  tabla 10-13 (ASCE, 2017a) está entre 0.348 y 2.13 con un promedio de la relación de factores  $m$  de 0.93.

Teniendo en cuenta la relación de momentos se puede decir que todas las rótulas han alcanzado la fluencia, llegando a factores  $m$  un 213% mayor al mínimo esperado, sin embargo, el promedio del total de rótulas indicaría que se alcanza solo un 93% del  $m$  mínimo esperado.



**Figura 24 M/My Vs m/m de tabla 10.3 para OI en el punto de comportamiento**

Haciendo el mismo análisis para las rótulas en LS se puede ver en la Figura 25 que las 16 rótulas obtenidas tienen una relación M/My entre 1.00 y 1.03, mientras que la relación del factor m/m tabla 10-13 (ASCE, 2017a) está entre 0.49 y 2.44 con un valor promedio de 1.39. Lo anterior indicaría que se llegan a sobrepasar los factores m mínimos esperados hasta en un 244%, pero que en promedio solo sobrepasarían a los factores m mínimos de la tabla 10-10a (ASCE, 2017a) en un 39%.

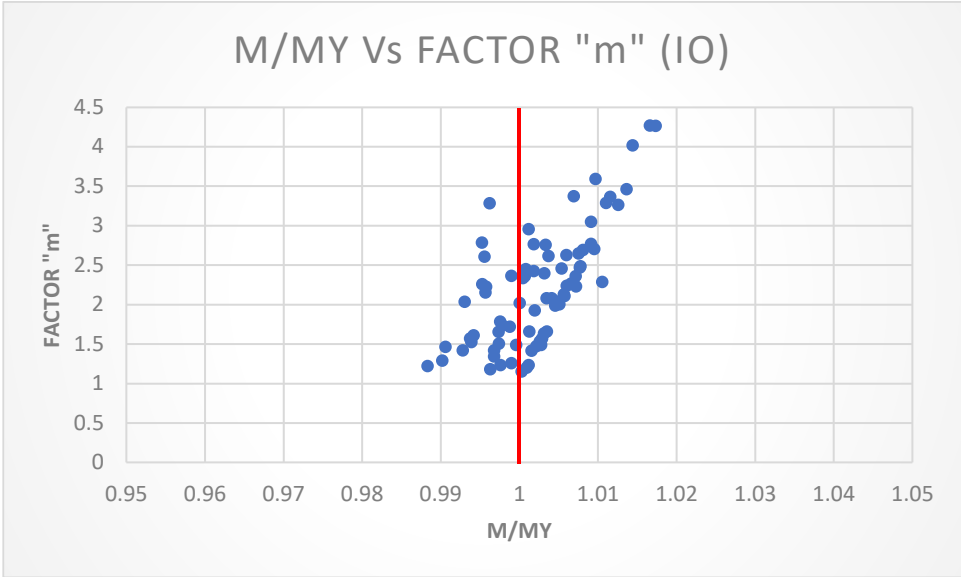


**Figura 25 M/My Vs m/m de tabla 10.3 para LS en el punto de comportamiento**

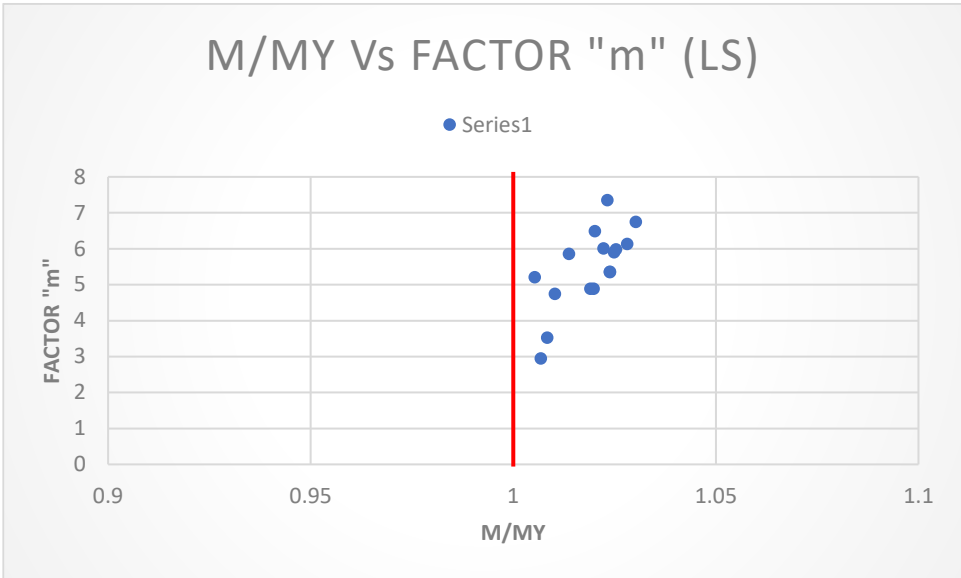
En cuanto a los resultados obtenidos para IO, se observó que 36 de los 78 valores de "m" obtenidos (46.2%) se encuentran dentro del rango de 2 a 3 establecido en la Tabla 10.13

de la ASCE 41-17.(ASCE, 2017a). Además, 11 valores (14.1%) superan este rango y 31 (39.8%) se encuentran por debajo del mismo (ver Figura 26). Por otro lado, en el caso de LS, 11 de las 16 rótulas analizadas (68.8%) están dentro del rango de 2 a 6 especificado en la tabla, mientras que 5 rótulas (31.2%) superan este rango (ver Figura 27).

En relación al resto de las rótulas en IO que no alcanzaron los valores de "m" esperados, puede deberse a que para el punto de comportamiento de la estructura, estas rótulas no reciben solicitaciones muy altas, lo que resulta en deformaciones y factores "m" más bajos.



**Figura 26 M/My Vs m para OI en el punto de comportamiento**

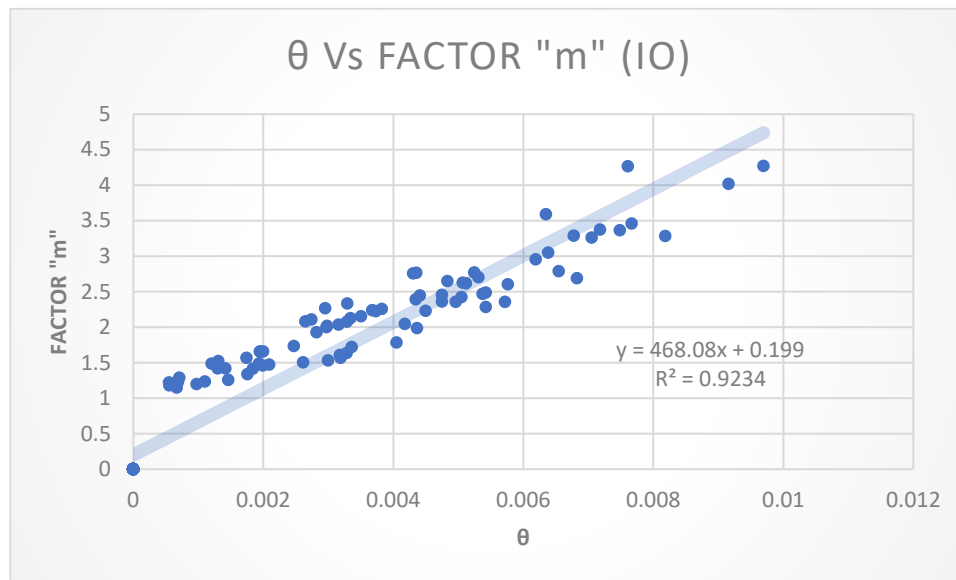


**Figura 27 M/My Vs m para LS en el punto de comportamiento**

Por otra parte, en la Figura 28 se observa que las rotaciones de las rótulas en el rango de IO varían entre 0.00067 y 0.00969 rad. De ellas, 24 (30.7%) están dentro del rango de 0.005 a 0.010 establecido por la tabla 10-7 de la ASCE 41-17 (ASCE, 2017a) para vigas en IO, y sus valores del factor "m" oscilan entre 2.28 y 4.26 con un promedio de 3.04. Las otras 54 rótulas (69.3%) tienen rotaciones menores y un factor "m" promedio de 1.89. De estas 54 rótulas, 23 (29.5%) tienen factores "m" mayores en el rango de 2 a 3, mientras que las otras 31 (39.8%) tienen factores "m" entre 1.15 y 1.92.

Este análisis muestra que el comportamiento de las rótulas para IO es similar al esperado, ya que las rótulas dentro del rango de rotaciones entre 0.005 y 0.010 tienen factores "m" dentro del rango de 2 a 3, y las rotaciones por debajo del rango mencionado tienen factores "m" menores a 2, tal como se esperaría según la tabla 10-7 de la ASCE 41-17 (ASCE, 2017a).

También puede observarse en la misma figura que existe una relación lineal entre el factor "m" y el giro, encontrándose que el factor "m" es en promedio 468 veces el valor de giro en la viga, tal como se ve en la regresión lineal de la Figura 28, cuyo coeficiente de determinación (R<sup>2</sup>) es cercano al 92%.

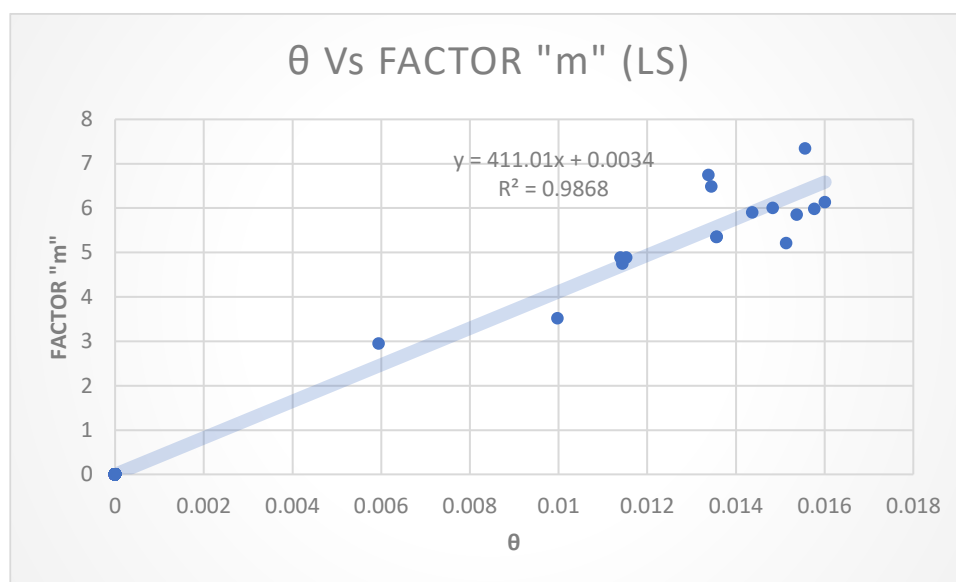


**Figura 28 θ Vs m para IO en el punto de comportamiento**

En la Figura 29 se observa que las rotaciones de las rótulas en el rango de LS oscilan entre 0.0059 y 0.016 rad. Sin embargo, según la tabla 10-7 (ASCE, 2017a), se esperaría que las rotaciones estuvieran en el rango de 0.015 a 0.025 rad. De las 16 rótulas evaluadas, 5 (31.3%) están dentro del rango esperado de rotaciones, con valores del factor m entre 5.2 y 7.34 y un promedio de 6.10. Las otras 11 rótulas tienen rotaciones que oscilan entre 0.0059 y 0.0148, valores del factor m entre 2.95 y 6, con un valor promedio de 5.16.



Además, también puede observarse una relación lineal entre el factor "m" y el giro, encontrándose que el factor "m" es en promedio 340 veces mayor al valor de giro en la viga, tal como se ve en la regresión lineal de la gráfica, cuyo coeficiente de determinación (R<sup>2</sup>) es cercano al 98%.



**Figura 29 θ Vs m para LS en el punto de comportamiento**

En resumen, los resultados de las rótulas para el punto de comportamiento sería el siguiente:

EDIFICIO DISEÑADO CON NSR-10 - PUNTO DE COMPORTAMIENTO			
Nivel de Desempeño	IO	LS	CP
Cantidad de rótulas	78	16	
Rango factor m min. Esperado	2 a 3	2 a 6	3 a 7
Rango θ min. Esperado	0.005-0.010	0.015-0.025	0.02-0.05
Rango de M/My calculado	0.99 a 1.014	1.007 a 1.03	
Cant. Rótulas con M/My < 0.95	-	-	
Cant. Rótulas con M/My > 0.95	100%	100%	
Rango de Factor m/m tabla 10-7	0.348 a 2.13	0.49 a 2.44	
Promedio de Factor m/m tabla 10-7	0.93	1.39	
Rango factor m para rótulas con M/My > 0.95	1.15 a 4.26	2.95 a 7.34	
Promedio factor m para rótulas con M/My > 0.95	2.20	5.62	
Rango factor m para rótulas con M/My < 0.95	-	-	
Promedio factor m para rótulas con M/My < 0.95	-	-	
Rótulas < factor m min esperado	39.7%	-	
Rótulas en el rango del factor m min esperado	46.2%	68.8%	
Rótulas > factor m min esperado	14.1%	31.3%	
Rango de θ	0.00067 a 0.00969	0.005941 a 0.016	
Rótulas dentro del rango min esperado de θ	30.8%	31.3%	
rango de factor m para rótulas dentro del rango de θ	2.28 a 4.26	5.20 a 7.34	
Prom. de factor m para rótulas dentro del rango de θ	3.04	6.10	
Rótulas menores al rango min esperado de θ	69.2%	68.8%	
rango de factor m para rótulas menores al rango de θ	1.15 a 2.76	2.95 a 6	
Prom. de factor m para rótulas menores al rango de θ	1.89	5.16	
Rótulas con θ bajas y factores m dentro de m min esp.	29.5%	50.0%	
Prom. Factor m Rótulas con θ bajas y factores m dentro de m min esp.	2.27	4.70	

**Tabla 6 Resumen de resultados de rótulas en vigas para el punto de comportamiento**

Analizando los datos de la Tabla 6 para IO se puede observar que cerca de un 85% de los datos obtuvo factores  $m$  dentro del rango mínimo esperado o por debajo, con valores promedio del factor  $m$  cercanos a su mínimo esperado, lo cual indicaría que las ductilidades obtenidas con el detallado de la NSR-10 (AIS, 2010b) se acercan a las mínimas esperadas en la tabla 10-13 (ASCE, 2017a).

Sin embargo, se encontró que alrededor de un tercio de las rótulas tienen rotaciones que están por debajo de las mínimas según la tabla 10-7 (ASCE, 2017a) y aun así logran llegar a factores  $m$  dentro del rango mínimo esperado según la tabla 10-13 (ASCE, 2017a), lo cual indicaría que el factor  $m$  para éstas rótulas podría llegar a ser mayor a lo mínimo esperado puesto que podrían llegar a valores de deformación aún mayores antes de sobrepasar el límite de rotación plástica del criterio de aceptación para IO.

En cuanto a LS se encontró que cerca de un tercio de los datos superan el rango mínimo de factores  $m$  esperados, mientras el resto de rótulas tiene factores  $m$  dentro de este rango. Adicionalmente se evidenció que en todas las rótulas cuyo factor  $m$  se encuentra dentro del rango mínimo esperado, tienen rotaciones asociadas por debajo del rango de rotaciones mínimas y que los factores  $m$  que superan el rango mínimo esperado apenas superan el límite inferior de rotaciones esperadas.

Este comportamiento mostraría que al igual que para las rótulas en IO, en LS las rótulas con deformaciones bajas podrían seguir deformándose más antes de sobrepasar el límite de rotaciones indicado para este nivel de desempeño, obteniéndose así factores  $m$  mayores a los propuestos en la tabla 10-13 (ASCE, 2017a), lo cual coincidiría con el comportamiento descrito anteriormente en el que las rótulas que están dentro del rango de rotaciones esperadas superan el factor  $m$  mínimo esperado en la tabla 10-13 para este nivel de desempeño.

Teniendo en cuenta lo anteriormente descrito podría considerarse que para LS la tabla 10.13 (ASCE, 2017a) también subestimaría las ductilidades que podrían llegar a presentar las vigas detalladas según la NSR-10 (AIS, 2010b).

Por otra parte, y como un análisis adicional, si se tiene en cuenta que según la tabla A3.3 de la NSR-10 (AIS, 2010b) el coeficiente de capacidad de disipación de energía ( $R$ ) para el sistema estructural de pórticos de concreto DMO es 5, y que además unos de los objetivos de esta normativa según el artículo A1.2.2.4 es que para el sismo de diseño se produzcan daños estructurales y no estructurales reparables (descripción que se acerca al descrito para el nivel de desempeño de *Life Safety*), podemos observar que ninguna de las rótulas producidas para el punto de comportamiento sobrepasa el nivel de desempeño de LS, pero además el valor promedio de todas las rótulas sobre vigas es de 2.76, valor que representaría cerca de un 55.2% del  $R$  de 5 mencionado anteriormente.

### 6.1.1.2 Para el punto de inestabilidad estructural

En el punto de inestabilidad de la estructura se producen 87 rótulas, las cuales se reparten en 76 dentro del rango de LS y 11 en CP. Adicionalmente a estas 87 rótulas se producen 16 más dentro del rango de IO, sin embargo, estas no serán analizadas en este punto puesto que no se consideran relevantes debido a que en este numeral se estudia el comportamiento de inestabilidad estructural y estas no contribuyen mayormente a este estado.

De las 76 rótulas en LS 72 sobrepasan la relación  $M/My$  de 0.95, de las cuales 30 se encuentran en las vigas del piso 2, 33 en las vigas de piso 3 y 9 en cubierta. mientras que de las 11 rótulas en CP 10 se encuentran en piso 2 y 1 en cubierta.

A continuación, se presenta una tabla resumen de los resultados extraídos del análisis de las gráficas realizadas para el punto de inestabilidad estructural.

EDIFICIO DISEÑADO CON NSR-10 - PUNTO DE INESTABILIDAD ESTRUCTURAL			
Nivel de Desempeño	IO	LS	CP
Cantidad de rótulas	-	76	11
Rango factor m min. Esperado	-	2 a 6	3 a 7
Rango $\theta$ min. Esperado	-	0.015-0.025	0.02-0.05
Rango de $M/My$ calculado	-	0.92 a 1.04	0.98 a 1.058
Cant. Rótulas con $M/My < 0.95$	-	5.3%	-
Cant. Rótulas con $M/My > 0.95$	-	94.7%	100%
Rango de Factor m/m tabla 10-7	-	0.54 a 4.34	1.29 a 2.91
Promedio de Factor m/m tabla 10-7	-	1.57	1.86
Rango factor m para rótulas con $M/My > 0.95$	-	3.24 a 9.77	5.90 a 12.60
Promedio factor m para rótulas con $M/My > 0.95$	-	5.96	9.88
Rango factor m para rótulas con $M/My < 0.95$	-	5.36 a 9.32	-
Promedio factor m para rótulas con $M/My < 0.95$	-	7.67	-
Rótulas < factor m min esperado	-	-	-
Rótulas en el rango del factor m min esperado	-	55.3%	9.1%
Rótulas > factor m min esperado	-	44.7%	90.9%
Rango de $\theta$	-	0.00806 a 0.02355	0.01146 a 0.02736
Rótulas dentro del rango min esperado de $\theta$	-	61.8%	90.9%
Rango de factor m para rótulas dentro del rango de $\theta$	-	4.23 a 8.94	8.60 a 12.60
Prom. de factor m para rótulas dentro del rango de $\theta$	-	6.76	10.28
Rótulas menores al rango min esperado de $\theta$	-	38.2%	9.1%
Rango de factor m para rótulas menores al rango de $\theta$	-	3.24 a 6.98	5.90
Prom. de factor m para rótulas menores al rango de $\theta$	-	4.89	5.90
Rótulas con $\theta$ bajas y factores m dentro de m min esp.	-	35.5%	-
Prom. Factor m Rótulas con $\theta$ bajas y factores m dentro de m min esp.	-	4.74	-

**Tabla 7 Resumen de resultados de rótulas en vigas para el punto de inestabilidad estructural**

Analizando la información de la Tabla 7 se observa que el 87% del total de rótulas se encuentran en el rango de LS, de las cuales cerca de la mitad tienen factores m dentro del rango mínimo esperado según la tabla 10-13 (ASCE, 2017a), mientras que las rótulas restantes superan este rango de valores, llegando a valores de hasta en un 28% mayor.

Teniendo en cuenta ahora el rango de rotaciones mínimas esperadas según la tabla 10-7 (ASCE, 2017a) se puede ver que cerca de dos tercios de los datos están dentro de este rango y sus factores  $m$  superan hasta en un 49% el rango mínimo esperado de la tabla 10-13 (ASCE, 2017b), mientras que alrededor de un tercio de los datos se encuentran dentro del rango de rotaciones mínimas esperadas y sus factores  $m$  asociados están dentro del rango del factor  $m$  mínimo esperado según la tabla 10-7 (ASCE, 2017a).

El comportamiento descrito anteriormente corrobora el presentado en el análisis de rótulas para el punto de comportamiento, en donde se encontró que las rótulas para LS llegan a valores del factor  $m$  alrededor de los factores  $m$  mínimos esperados aún sin haber alcanzado rotaciones dentro del rango mínimo esperado, lo que quiere decir que si las rotaciones lograran llegar hasta el límite de rotaciones para este nivel de desempeño mencionado por la tabla 10-7 (ASCE, 2017a), muy probablemente se obtendrían factores  $m$  mayores al rango especificado en la tabla 10.13 (ASCE, 2017a), lo cual es confirmado con las rótulas analizadas cuyas rotaciones se encuentran dentro del rango esperado úes sus rotaciones superan a las de la tabla 10-7 (ASCE, 2017a).

En el caso de CP las rótulas a analizar apenas representan un 13% del total de rótulas obtenidas para este punto de inestabilidad estructural, de las cuales el 90% llegan a valores del factor  $m$  mayores a los mínimos esperados según la tabla 10.13 (ASCE, 2017a), y todas estas tienen rotaciones apenas mayores al mínimo valor del rango mínimo esperado, pero con factores  $m$  que llegan a superar hasta en un 80% el valor mínimo esperado según la tabla 10-13, lo que indicaría que si las rotaciones lograran llegar al límite para este nivel de desempeño los factores  $m$  podrían llegar a ser todavía mayores.

En ambos casos, tanto para LS como para CP se podría decir que los factores  $m$  de la tabla 10.13 (ASCE, 2017a) subestimarían la ductilidad de las vigas detalladas según la NSR-10 (AIS, 2010b).

Por otra parte, como ya se mencionó antes, de acuerdo con los estándares de diseño de la NSR-10, una estructura diseñada para un grupo de uso I debería encontrarse dentro del rango comportamiento de *Life Safety* (LS), sin embargo, esto es aplicable al punto de comportamiento de la estructura y no para el estado último pues en este punto se alcanza la inestabilidad de la estructura debido a deformaciones importantes en sus elementos, llegando en este caso a que 11 de las 87 rótulas (12.6%) alcanzan el estado límite de CP.

Ahora bien, considerando que la capacidad dúctil de diseño según la NSR-10 (AIS, 2010b) es de 5 para el sistema estructural de pórticos de concreto, podemos observar que los valores individuales obtenidos sobre las rótulas de las vigas se alejan del valor de 5, sin embargo, el promedio de todas las 87 rotulas es de 6.53, lo cual sobrepasa en un 30% al R de 5 especificado en la tabla A3.3 de la NSR-10 (AIS, 2010b).

### 6.1.1.3 Para el nivel de desempeño de Ocupación Inmediata (IO)

Para este análisis se han tenido en cuenta 48 rótulas sobre vigas que han alcanzado el nivel de desempeño de IO, independientemente del punto sobre la curva de capacidad obtenida en el análisis de *pushover*. Sin embargo, solamente se analizarán las que se presenten en el piso 2 puesto que allí es donde se alcanzan las mayores solicitaciones, con lo cual se busca garantizar que cada una de las rótulas analizadas estén en el límite del rango de deformaciones esperadas para IO.

A continuación se presenta una tabla resumen de los resultados extraídos del análisis de las gráficas realizadas para el nivel de desempeño de IO:

EDIFICIO DISEÑADO CON NSR-10 - ANÁLISIS PARA EL NIVEL DE DESEMPEÑO DE IO			
Nivel de Desempeño	IO	LS	CP
Cantidad de rótulas	48	-	-
Rango factor m min. Esperado	2 a 3	-	-
Rango $\theta$ min. Esperado	0.005-0.010	-	-
Rango de M/My calculado	0.996 a 1.022	-	-
Cant. Rótulas con M/My < 0.95	-	-	-
Cant. Rótulas con M/My > 0.95	100%	-	-
Rango de Factor m/m tabla 10-7	0.63 a 2.62	-	-
Promedio de Factor m/m tabla 10-7	1.51	-	-
Rango factor m para rótulas con M/My > 0.95	1.89 a 5.24	-	-
Promedio factor m para rótulas con M/My > 0.95	3.46	-	-
Rango factor m para rótulas con M/My < 0.95	-	-	-
Promedio factor m para rótulas con M/My < 0.95	-	-	-
Rótulas < factor m min esperado	2.1%	-	-
Rótulas en el rango del factor m min esperado	27.1%	-	-
Rótulas > factor m min esperado	66.7%	-	-
Rango de $\theta$	0.00272 a 0.00973	-	-
Rótulas dentro del rango min esperado de $\theta$	85.4%	-	-
Rango de factor m para rótulas dentro del rango de $\theta$	2.40 a 5.19	-	-
Prom. de factor m para rótulas dentro del rango de $\theta$	3.65	-	-
Rótulas menores al rango min esperado de $\theta$	14.6%	-	-
rango de factor m para rótulas menores al rango de $\theta$	1.89 a 3.02	-	-
Prom. de factor m para rótulas menores al rango de $\theta$	2.47	-	-
Rótulas con $\theta$ bajas y factores m dentro de m min esp.	14.6%	-	-
Prom. Factor m Rótulas con $\theta$ bajas y factores m dentro de m min esp.	2.47	-	-

**Tabla 8 Resumen de resultados de rótulas en vigas para nivel de desempeño de IO**

Para este análisis se ha identificado que cerca de dos tercios de los datos analizados alcanzan factores m que superan a los del rango mínimo de la tabla 10-13 (ASCE, 2017a), llegando a superar este rango hasta en un 74.6%, con un promedio que también lo supera, pero por un 21.6%, mientras que el tercio restante se encuentra dentro del rango de factores m mínimos esperados.

En términos de rotaciones casi todas las rótulas se encuentran dentro del rango mínimo esperado de la tabla 10-7 (ASCE, 2017a), pero sus factores  $m$  asociados llegan a superar el rango de valores esperados hasta en un 74.6%.

Adicionalmente se observa que el 14.6% de las rótulas llegan a rotaciones que se encuentran por debajo del rango mínimo esperado según la tabla 10-7 (ASCE, 2017a) pero cuyos factores  $m$  se encuentran dentro del rango mínimo esperado según la tabla 10-13 (ASCE, 2017a).

Este patrón sugiere que las rótulas diseñadas para IO tienen capacidades dúctiles mayores a las sugeridas en la tabla 10-7 (ASCE, 2017a), ya que para rotaciones menores al rango establecido se obtienen valores de factor  $m$  dentro del rango esperado, mientras que para el rango esperado de rotaciones se obtienen valores de factor  $m$  mayores a los mencionados en la tabla.

#### ***6.1.1.4 Para el nivel de desempeño de Preservación de la vida (LS)***

Para este análisis se han tenido en cuenta 48 rótulas sobre vigas que han alcanzado el nivel de desempeño de LS, independientemente del punto sobre la curva de capacidad obtenida en el análisis de *pushover*. Sin embargo, solamente se analizarán las que se presenten en el piso 2 puesto que allí es donde se alcanzan las mayores solicitaciones, con lo cual se busca garantizar que cada una de las rótulas analizadas estén en el límite del rango de deformaciones esperadas para LS.

A continuación, se presenta una tabla resumen de los resultados extraídos del análisis de las gráficas realizadas para el punto de inestabilidad estructural.

EDIFICIO DISEÑADO CON NSR-10 - ANÁLISIS PARA EL NIVEL DE DESEMPEÑO DE LS			
Nivel de Desempeño	IO	LS	CP
Cantidad de rótulas	-	46	-
Rango factor m min. Esperado	-	2 a 6	-
Rango $\theta$ min. Esperado	-	0.015-0.025	-
Rango de M/My calculado	-	0.96 a 1.056	-
Cant. Rótulas con M/My < 0.95	-	2.2%	-
Cant. Rótulas con M/My > 0.95	-	97.8%	-
Rango de Factor m/m tabla 10-7	-	0.54 a 4.51	-
Promedio de Factor m/m tabla 10-7	-	1.96	-
Rango factor m para rótulas con M/My > 0.95	-	3.24 a 11.72	-
Promedio factor m para rótulas con M/My > 0.95	-	7.25	-
Rango factor m para rótulas con M/My < 0.95	-	8.47	-
Promedio factor m para rótulas con M/My < 0.95	-	8.47	-
Rótulas < factor m min esperado	-	-	-
Rótulas en el rango del factor m min esperado	-	26.1%	-
Rótulas > factor m min esperado	-	73.9%	-
Rango de $\theta$	-	0.01047 a 0.02499	-
Rótulas dentro del rango min esperado de $\theta$	-	89.1%	-
Rango de factor m para rótulas dentro del rango de $\theta$	-	4.17 a 11.72	-
Prom. de factor m para rótulas dentro del rango de $\theta$	-	7.58	-
Rótulas menores al rango min esperado de $\theta$	-	10.9%	-
Rango de factor m para rótulas menores al rango de $\theta$	-	3.24 a 6.28	-
Prom. de factor m para rótulas menores al rango de $\theta$	-	4.77	-
Rótulas con $\theta$ bajas y factores m dentro de m min esp.	-	3.24 a 6.28	-
Prom. Factor m Rótulas con $\theta$ bajas y factores m dentro de m min esp.	-	4.77	-

**Tabla 9 Resumen de resultados de rótulas en vigas para nivel de desempeño de LS**

Para este análisis se ha encontrado que cerca de tres cuartos de los datos analizados alcanzan factores m que superan a los del rango mínimo de la tabla 10-13 (ASCE, 2017a), llegando a superar este rango hasta en un 95.3%, con un promedio que también lo supera, pero en un 26.3%, mientras que el tercio restante se encuentra dentro del rango de factores m mínimos esperados.

En términos de rotaciones casi todas las rótulas se encuentran dentro del rango mínimo esperado de la tabla 10-7 (ASCE, 2017a), pero sus factores m asociados llegan a superar el rango de valores esperados hasta en un 95.3%.

Adicionalmente se encuentra un grupo de rótulas cuyas rotaciones se encuentran por debajo del rango mínimo esperado según la tabla 10-7 (ASCE, 2017a) pero cuyas rotaciones se encuentran dentro del rango mínimo esperado según la tabla 10-13 (ASCE, 2017a).

Este patrón sugiere que las rótulas diseñadas para LS tienen capacidades dúctiles mayores a las sugeridas en la tabla 10-7, ya que para rotaciones menores al rango establecido se obtienen valores de factor m dentro del rango esperado, mientras que para el rango esperado de rotaciones se obtienen valores de factor m mayores a los mencionados en la tabla 10.13 (ASCE, 2017a), siendo superados hasta en un 95.3%.

### **6.1.2 Análisis de columnas**

Durante el análisis de rótulas en columnas se ha encontrado que los momentos de fluencia calculados por ETABS difieren a los calculados por XTRACT. Dichas diferencias varían en un rango de un 10% y hasta un 50%, lo cual ocasiona una distorsión importante en los datos al analizarlos entre ellos pues no se encontraban dentro de los mismos rangos. Por esta razón se decidió que los momentos con los cuales se iban a obtener las relaciones de momentos  $M/M_y$  se harían respecto a los obtenidos en ETABS,

Como segundo criterio para seleccionar las rótulas a analizar, se ha considerado aquellas que se encuentran debajo de la losa de piso 2. Para este criterio se tuvo en cuenta que estas rótulas son sometidas a mayores niveles de solicitaciones y deformaciones en comparación con las rótulas del resto de la estructura, por lo que son más representativas para el análisis del comportamiento, pues es probable que estas rótulas alcancen rotaciones más altas en comparación con las rótulas de pisos superiores, donde las solicitaciones son menores.

#### **6.1.2.1 Para el punto de comportamiento**

Para el punto de comportamiento se han obtenido 25 rótulas en columnas, de las cuales 14 se clasifican dentro del rango de IO y las 9 restantes alcanzan el grado de desempeño de LS.

A continuación, se presenta una tabla resumen de los resultados extraídos del análisis de las gráficas realizadas para el punto de inestabilidad estructural.



EDIFICIO DISEÑADO CON NSR-10 - PUNTO DE COMPORTAMIENTO			
Nivel de Desempeño	IO	LS	CP
Cantidad de rótulas	14	9	
Rango factor m min. Esperado	1.70	3.40	
Rango $\theta$ min. Esperado	0.0066	0.0066 a 0.0445	
Rango de M/My calculado	0.836 a 1.19	0.85 a 1.18	
Cant. Rótulas con M/My < 0.95	64.3%	55.6%	
Cant. Rótulas con M/My > 0.95	35.7%	55.6%	
Rango de Factor m/m tabla 10-7	0.90 a 2.058	1.01 a 1.10	
Promedio de Factor m/m tabla 10-7	2.38	0.97	
Rango factor m para rótulas con M/My > 0.95	2.55 a 3.50	2.90 a 3.57	
Promedio factor m para rótulas con M/My > 0.95	2.91	3.25	
Rango factor m para rótulas con M/My < 0.95	1.53 a 3.47	3.14 a 3.77	
Promedio factor m para rótulas con M/My < 0.95	2.49	3.40	
Rótulas < factor m min esperado	7.1%	55.6%	
Rótulas en el rango del factor m min esperado	-		
Rótulas > factor m min esperado	92.9%	44.4%	
Rango de $\theta$	0.00351 a 0.00602	0.00639 a 0.0095	
Rótulas dentro del rango min esperado de $\theta$	100%	100.0%	
rango de factor m para rótulas dentro del rango de $\theta$	1.53 a 3.50	2.90 a 3.77	
Prom. de factor m para rótulas dentro del rango de $\theta$	2.73	3.25	
Rótulas menores al rango min esperado de $\theta$	-	-	
rango de factor m para rótulas menores al rango de $\theta$	-	-	
Prom. de factor m para rótulas menores al rango de $\theta$	-	-	
Rótulas con $\theta$ bajas y factores m dentro de m min esp.	-	-	
Prom. Factor m Rótulas con $\theta$ bajas y factores m dentro de m min esp.	-	-	

**Tabla 10 Resumen de resultado en rótulas en columnas para el punto de comportamiento**

Para este análisis se encontró que un 65% de las rótulas en IO no alcanzan a sobrepasar el momento de fluencia de la sección, sin embargo, el rango de factores m asociados a éstas rótulas es muy similar al de las rótulas que si lo superaron.

En comparación con los mismos datos para LS se observa que el comportamiento es similar, las rótulas que no sobrepasan el momento de fluencia tienen un rango de factores m muy similar al de las que lo sobrepasan, e incluso el rango de relaciones entre el momento de fluencia y el momento calculado (M/My) también es similar entre IO y LS, pero el rango de rotaciones calculados para IO es menor que el de LS.

Ahora, revisando las rótulas en términos de rotaciones se encontró que para IO las rótulas con rotaciones por dentro del rango mínimo esperado según la tabla 10-8 (ASCE, 2017a) se obtienen factores m hasta un 205% mayores a los mínimos esperados según la tabla 10-10a(ASCE, 2017a), lo que indicaría que la tabla 10-10a de la ASCE 41-17 subestima los factores "m" de las columnas en IO, ya que los factores "m" obtenidos son iguales o mayores a 1.70, llegando a duplicar este valor en el caso de algunas rótulas.

En el caso de LS el rango de rotaciones calculadas se encuentra dentro del rango mínimo esperado, pero sus valores máximos se alejan bastante el límite máximo del rango mínimo esperado, sin embargo, a pesar de que sus rotaciones son relativamente bajas respecto al rango esperado, los factores m calculados alcanzan a superar el valor mínimo esperado, lo

cual como se ha mencionado antes sería un indicador de que los factores  $m$  podrían estar siendo subestimados por la tabla 10-10a (ASCE, 2017a), pues si se considera el caso de una rótula que alcance el límite rotaciones del rango esperado posiblemente se podrían obtener factores  $m$  mucho mayores a los del rango mínimo esperado.

### 6.1.2.2 Para el punto de inestabilidad estructural

Para el estado último de la estructura se presentan 34 rótulas, todas ellas en el rango de LS.

A continuación, se presenta una tabla resumen de los resultados extraídos del análisis de las gráficas realizadas para el punto de inestabilidad estructural.

EDIFICIO DISEÑADO CON NSR-10 - PUNTO DE INESTABILIDAD ESTRUCTURAL			
Nivel de Desempeño	IO	LS	CP
Cantidad de rótulas	-	34	-
Rango factor $m$ min. Esperado	-	3.40	-
Rango $\theta$ min. Esperado	-	0.0066 a 0.0445	-
Rango de $M/My$ calculado	-	0.54 a 1.17	-
Cant. Rótulas con $M/My < 0.95$	-	50.0%	-
Cant. Rótulas con $M/My > 0.95$	-	50.0%	-
Rango de Factor $m/m$ tabla 10-7	-	1.06 a 3.70	-
Promedio de Factor $m/m$ tabla 10-7	-	1.83	-
Rango factor $m$ para rótulas con $M/My > 0.95$	-	2.08 a 12.57	-
Promedio factor $m$ para rótulas con $M/My > 0.95$	-	6.73	-
Rango factor $m$ para rótulas con $M/My < 0.95$	-	2.35 a 8.78	-
Promedio factor $m$ para rótulas con $M/My < 0.95$	-	5.73	-
Rótulas < factor $m$ min esperado	-	20.6%	-
Rótulas en el rango del factor $m$ min esperado	-	-	-
Rótulas > factor $m$ min esperado	-	79.4%	-
Rango de $\theta$	-	0.0070 a 0.0207	-
Rótulas dentro del rango min esperado de $\theta$	-	100.0%	-
Rango de factor $m$ para rótulas dentro del rango de $\theta$	-	2.08 a 12.57	-
Prom. de factor $m$ para rótulas dentro del rango de $\theta$	-	6.23	-
Rótulas menores al rango min esperado de $\theta$	-	-	-
rango de factor $m$ para rótulas menores al rango de $\theta$	-	-	-
Prom. de factor $m$ para rótulas menores al rango de $\theta$	-	-	-
Rótulas con $\theta$ bajas y factores $m$ dentro de $m$ min esp.	-	-	-
Prom. Factor $m$ Rótulas con $\theta$ bajas y factores $m$ dentro de $m$ min esp.	-	-	-

**Tabla 11 Resumen de resultado en rótulas en columnas para el punto de inestabilidad estructural**

En este caso se encontró que el 50% de las rótulas no alcanzan a sobrepasar el 0.95 de la relación de momentos  $M/My$ , lo cual indicaría que este grupo de rótulas no alcanzaría a sobrepasar el momento de fluencia y por lo tanto la rótula no debería plastificar. A pesar de esto se observó que los factores  $m$  se acercaron al factor  $m$  mínimo esperado y en algunos casos llegaron a sobrepasarlo hasta en un 238%.

Por otra parte, las rótulas cuya relación de momentos  $M/M_y$  superaron al 0.95 llegaron a factores  $m$  todavía más altos, alcanzando valores del factor  $m$  de 12.57, lo cual es 3.69 veces mayor al valor mínimo esperado según la tabla 10-10a (ASCE, 2017a).

Por otra parte, realizando un análisis basado en las rotaciones se observa que el 100% de las rótulas se encuentran dentro del rango de rotaciones mínimas esperadas según la formulación de la tabla 10-10a (ASCE, 2017a), no obstante, la rótula con mayor rotación apenas llega a la mitad del rango de rotaciones mínimo esperado pero su factor  $m$  correspondiente llegó a un valor de 12.57, cuyo factor  $m$  como se mencionó anteriormente es 3.69 veces mayor al mínimo esperado.

Estos resultados indican que se alcanzan valores de deformación elevados, aunque no se llegue al momento de fluencia de la sección, lo cual podría explicarse con la posibilidad de que los momentos de fluencia calculados por ETABS hayan sido subestimados y por ende la sección fluya para momentos menores, llegando a deformaciones altas para momentos mas bajos que los esperados.

Además, 27 rótulas superan el valor esperado de 3.4 para el factor  $m$ , lo que representa alrededor del 80% de las rótulas consideradas. Esto demuestra que la ductilidad de las columnas es mucho mayor de lo esperado para el nivel de desempeño de LS.

Este comportamiento sugiere que las rotaciones de la ASCE 41-17 (ASCE, 2017a) podrían subestimar las rotaciones que se obtienen con el detallado de refuerzo de la NSR-10 (AIS, 2010b), ya que los valores de ductilidad obtenidos son bastante altos en comparación con los valores esperados.

### ***6.1.2.3 Para el nivel de desempeño de ocupación inmediata (IO)***

El escenario anterior consideró a la estructura en el estado de inestabilidad estructural y se encontró que todas las rótulas analizadas alcanzan el nivel de desempeño de LS, razón por la cual ahora se analizarán las mismas 34 rótulas para el nivel de desempeño de IO.

A continuación, se presenta una tabla resumen de los resultados extraídos del análisis de las gráficas realizadas para el nivel de desempeño de IO.

EDIFICIO DISEÑADO CON NSR-10 - ANÁLISIS PARA EL NIVEL DE DESEMPEÑO DE IO			
Nivel de Desempeño	IO	LS	CP
Cantidad de rótulas	34	-	-
Rango factor m min. Esperado	1,70	-	-
Rango $\theta$ min. Esperado	0,0066	-	-
Rango de M/My calculado	0826 a 1.169	-	-
Cant. Rótulas con M/My < 0.95	41%	-	-
Cant. Rótulas con M/My > 0.95	59%	-	-
Rango de Factor m/m tabla 10-7	1.02 a 2.26	-	-
Promedio de Factor m/m tabla 10-7	1,56	-	-
Rango factor m para rótulas con M/My > 0.95	1.94 a 3.84	-	-
Promedio factor m para rótulas con M/My > 0.95	2,76	-	-
Rango factor m para rótulas con M/My < 0.95	1.73 a 3.47	-	-
Promedio factor m para rótulas con M/My < 0.95	2,58	-	-
Rótulas < factor m min esperado	-	-	-
Rótulas en el rango del factor m min esperado	-	-	-
Rótulas > factor m min esperado	100,0%	-	-
Rango de $\theta$	0.0041 a 0.0065	-	-
Rótulas dentro del rango min esperado de $\theta$	100,0%	-	-
Rango de factor m para rótulas dentro del rango de $\theta$	1.73 a 3.84	-	-
Prom. de factor m para rótulas dentro del rango de $\theta$	2,68	-	-
Rótulas menores al rango min esperado de $\theta$	-	-	-
rango de factor m para rótulas menores al rango de $\theta$	-	-	-
Prom. de factor m para rótulas menores al rango de $\theta$	-	-	-
Rótulas con $\theta$ bajas y factores m dentro de m min esp.	-	-	-
Prom. Factor m Rótulas con $\theta$ bajas y factores m dentro de m min esp.	-	-	-

**Tabla 12 Resumen de resultado en rótulas en columnas para el nivel de desempeño de IO**

En este caso se encontró que el 41% de las rótulas no alcanzan a sobrepasar el 0.95 de la relación de momentos M/My, lo cual indicaría que este grupo de rótulas no alcanzaría a sobrepasar el momento de fluencia y por lo tanto la rótula no debería plastificar. A pesar de esto se observó que los factores m se acercaron al factor m mínimo esperado y en algunos casos llegaron a sobrepasarlo hasta en un 204%.

Por otra parte, las rótulas cuya relación de momentos M/My superaron al 0.95 llegaron a factores m muy similares a los de las rótulas que no superan la relación de M/My, alcanzando valores del factor m de 3.84, lo cual es 2.26 veces mayor al valor mínimo esperado según la tabla 10-10a (ASCE, 2017a)

Por otra parte, realizando un análisis basado en rotaciones se observa que el 100% de las rótulas se encuentran dentro del rango de rotaciones mínimas esperadas según la formulación de la tabla 10-10a (ASCE, 2017a) no obstante, el máximo factor m calculado llegó a un valor de 3.84, que como se mencionó anteriormente es 2.26 veces mayor al mínimo esperado.

Estos resultados indican que se alcanzan valores de deformación elevados, aunque no se llegue al momento de fluencia de la sección, lo cual podría explicarse con la posibilidad de que los momentos de fluencia calculados por ETABS hayan sido subestimados y por ende

la sección fluya para momentos menores, llegando a deformaciones altas para momentos más bajos que los esperados.

Además, el 100% de las rótulas superan el valor esperado de 1.70 para el factor  $m$ , lo que demuestra que la ductilidad de las columnas es mucho mayor de lo esperado para el nivel de desempeño de IO.

Este comportamiento sugiere que las rotaciones de la ASCE 41-17 podrían subestimar las rotaciones que se obtienen con el detallado de refuerzo de la NSR-10 (AIS, 2010b), ya que los valores de ductilidad obtenidos son bastante altos en comparación con los valores esperados.

### **6.1.3 Comparación de rótulas de columnas y vigas para IO y LS**

En este caso se realizará un análisis comparativo de las rótulas para vigas y columnas para los niveles de desempeño de IO y LS.

En la Figura 30 y la Tabla 13 se presenta la comparación entre las rótulas de vigas y columnas para el nivel de desempeño de IO. Se puede observar que la dispersión de las relaciones de momentos ( $M/My$ ) es más amplia en las columnas que en las vigas, ya que las primeras presentan un rango de 0,82 a 1,17, mientras que las segundas oscilan entre 0,99 y 1,02. Esto puede explicarse por la influencia de la carga axial en la curva momento-curvatura de las columnas, que produce rótulas con capacidades distintas según la magnitud de la carga axial, la cual al ser tan diversa hace que para una misma sección se obtengan momentos resistentes distintos.

Así mismo, se ha constatado que el 100% de las rótulas de vigas superan la relación de momentos de 0,95, mientras que en el caso de las columnas un 41% (14 de 34 rótulas) se sitúan por debajo de dicho valor, pero en ambos casos los valores de factor  $m$  calculados superan el rango mínimo esperado según las tablas 10-10a y 10-13 (ASCE, 2017a).

Otro dato relevante es el rango de valores del factor " $m$ " para las columnas (1,73 a 3,84), el cual es inferior al rango de valores para las vigas (1,89 a 5,24). Esto concuerda con lo esperado, ya que según las tablas 10-10a (factor  $m$  para columnas) y 10-13 (factor  $m$  para vigas), los factores  $m$  para las vigas suelen estar en un rango de valores de 2 a 3, lo que casi duplica al factor  $m$  esperado para las columnas de 1,70.

Sin embargo, en ambos casos el valor promedio de los factores  $m$  obtenidos supera el rango de valores esperado. En el caso de las vigas el valor máximo calculado supera en un 74.6% el límite superior del rango esperado, mientras que para las columnas el valor máximo supera el valor esperado en un 125.8%.

En términos de rotaciones se encontró que en vigas hay un porcentaje pequeño de rótulas que no logran llegar a la rotación mínima esperada, pero aun así sus factores m se encuentran dentro del rango mínimo esperado, mientras que en columnas todas las rótulas se encuentran dentro del rango de rotaciones esperadas.

EDIFICIO DISEÑADO CON NSR-10 - COMPARACIÓN ENTRE VIGAS Y COLUMNAS EN IO		
Nivel de Desempeño	VIGAS	COLUMNAS
Cantidad de rótulas	48	34
Rango factor m min. Esperado	2 a 3	1.70
Rango $\theta$ min. Esperado	0.005-0.010	0.0066
Rango de M/My calculado	0.996 a 1.022	0.826 a 1.169
Cant. Rótulas con M/My < 0.95	-	41%
Cant. Rótulas con M/My > 0.95	100%	59%
Rango de Factor m/m tabla 10-7	0.63 a 2.62	1.02 a 2.26
Promedio de Factor m/m tabla 10-7	1.51	1.56
Rango factor m para rótulas con M/My > 0.95	1.89 a 5.24	1.94 a 3.84
Promedio factor m para rótulas con M/My > 0.95	3.46	2.76
Rango factor m para rótulas con M/My < 0.95	-	1.73 a 3.47
Promedio factor m para rótulas con M/My < 0.95	-	2.58
Rótulas < factor m min esperado	2.1%	-
Rótulas en el rango del factor m min esperado	27.1%	-
Rótulas > factor m min esperado	66.7%	100.0%
Rango de $\theta$	0.00272 a 0.00973	0.0041 a 0.0065
Rótulas dentro del rango min esperado de $\theta$	85.4%	100.0%
rango de factor m para rótulas dentro del rango de $\theta$	2.40 a 5.19	1.73 a 3.84
Prom. de factor m para rótulas dentro del rango de $\theta$	3.65	2.68
Rótulas menores al rango min esperado de $\theta$	14.6%	-
rango de factor m para rótulas menores al rango de $\theta$	1.89 a 3.02	-
Prom. de factor m para rótulas menores al rango de $\theta$	2.47	-
Rótulas con $\theta$ bajas y factores m dentro de m min esp.	14.6%	-
Prom. Factor m Rótulas con $\theta$ bajas y factores m dentro de m min esp.	2.47	-

Tabla 13 Resumen de resultado en rótulas y columnas para el nivel de desempeño de IO

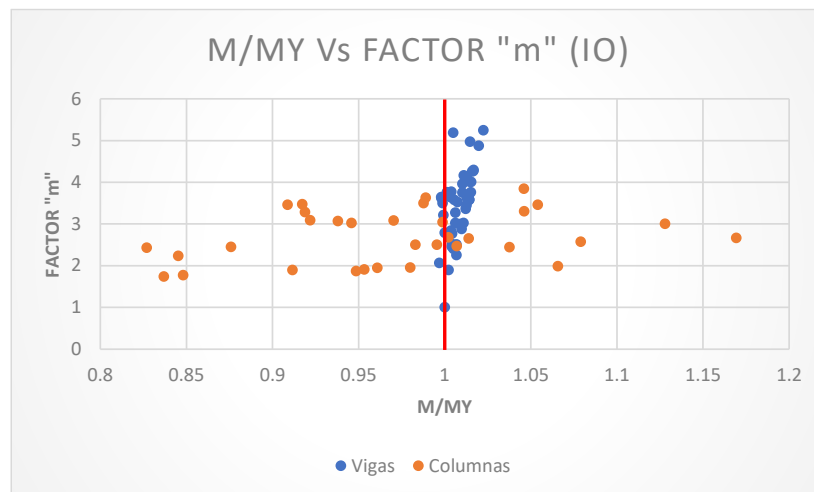


Figura 30 m Vs M/My para IO – comparativa entre vigas y columnas

Realizando un análisis similar para el nivel de desempeño de LS se observa en la Figura 31 y en la Tabla 14 que la dispersión de las relaciones de momentos vuelve a ser es más amplia en las columnas que en las vigas, ya que las columnas presentan un rango de 0,79 a 1,17 (muy similar al de IO), mientras que las vigas oscilan entre 0,97 y 1,06 (si se tiene en cuenta que los dos datos por debajo de este rango se consideran resultados anómalos). Esto como se mencionó anteriormente podría deberse por la influencia de la carga axial en la curva momento-curvatura de las columnas, que produce rótulas con capacidades distintas según la magnitud de la carga axial.

En este caso el 97.8% de rótulas en vigas superan la relación de momentos de 0,95, mientras que, en el caso de las columnas, un 50% sobrepasan dicho valor.

Por otro lado, es importante destacar que el rango de valores obtenidos para el factor "m" de columnas (2,08 a 12,57) resulta similar al de las vigas (3,24 a 11,72), pero diferentes en sus valores promedio, que son 8,06 para las vigas y 6,23 para las columnas. En ambos casos, estos valores superan sustancialmente los valores esperados según las tablas 10-10a (factor "m" para columnas) y 10-13 (factor "m" para vigas), que suponen valores de 2 a 6 para vigas y de 3,4 para columnas. Por lo tanto, se podría afirmar que, en el caso de LS, tanto en vigas como en columnas, el factor "m" de la norma ASCE 41-17 (ASCE, 2017a) subestimaría la ductilidad teórica de los elementos.

En el caso de LS a grandes rasgos el comportamiento entre vigas y columnas para LS es similar en cuanto al rango de los factores m obtenidos, si embargo su diferencia radica en el rango de valores para la relación de momentos ( $M/M_y$ ) y el rango de rotaciones.

De manera general se encontró que tanto en vigas como en columnas el rango de factores m calculados para el nivel de desempeño de IO y LS es mayor al esperado, obteniendo factores m de mayor magnitud para rotaciones bajas dentro del rango de las rotaciones mínimas esperadas.

EDIFICIO DISEÑADO CON NSR-10 - COMPARACIÓN ENTRE VIGAS Y COLUMNAS EN LS		
Nivel de Desempeño	VIGAS	COLUMNAS
Cantidad de rótulas	46	34
Rango factor m min. Esperado	2 a 6	3.40
Rango $\theta$ min. Esperado	0.015-0.025	0.0066 a 0.0445
Rango de M/My calculado	0.96 a 1.056	0.54 a 1.17
Cant. Rótulas con M/My < 0.95	2.2%	50.0%
Cant. Rótulas con M/My > 0.95	97.8%	50.0%
Rango de Factor m/m tabla 10-7	0.54 a 4.51	1.06 a 3.70
Promedio de Factor m/m tabla 10-7	1.96	1.83
Rango factor m para rótulas con M/My > 0.95	3.24 a 11.72	2.08 a 12.57
Promedio factor m para rótulas con M/My > 0.95	7.25	6.73
Rango factor m para rótulas con M/My < 0.95	8.47	2.35 a 8.78
Promedio factor m para rótulas con M/My < 0.95	8.47	5.73
Rótulas < factor m min esperado	-	20.6%
Rótulas en el rango del factor m min esperado	26.1%	-
Rótulas > factor m min esperado	73.9%	79.4%
Rango de $\theta$	0.01047 a 0.02499	0.0070 a 0.0207
Rótulas dentro del rango min esperado de $\theta$	89.1%	100.0%
rango de factor m para rótulas dentro del rango de $\theta$	4.17 a 11.72	2.08 a 12.57
Prom. de factor m para rótulas dentro del rango de $\theta$	7.58	6.23
Rótulas menores al rango min esperado de $\theta$	10.9%	-
rango de factor m para rótulas menores al rango de $\theta$	3.24 a 6.28	-
Prom. de factor m para rótulas menores al rango de $\theta$	4.77	-
Rótulas con $\theta$ bajas y factores m dentro de m min esp.	3.24 a 6.28	-
Prom. Factor m Rótulas con $\theta$ bajas y factores m dentro de m min esp.	4.77	-

Tabla 14 Resumen de resultado en rótulas de vigas y columnas para el nivel de desempeño de LS

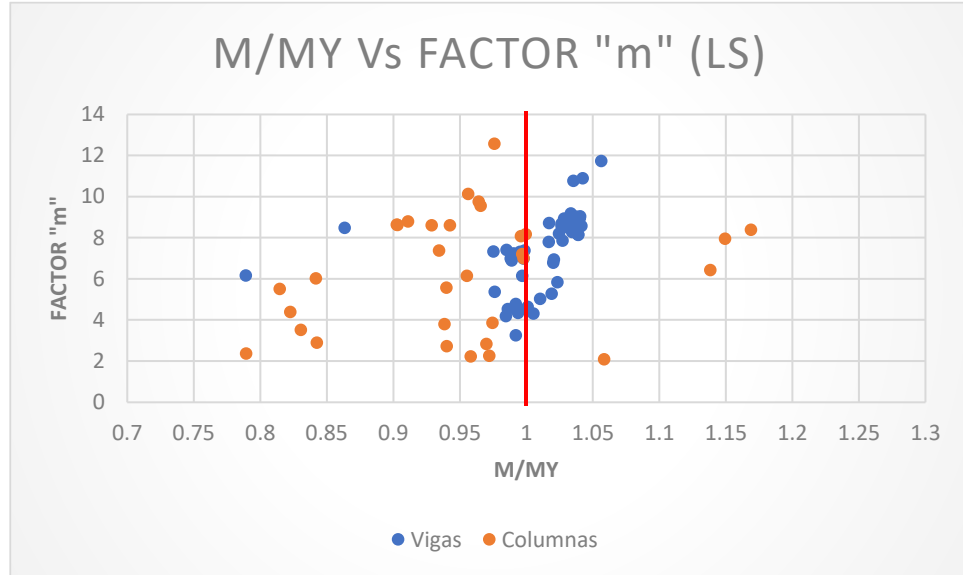


Figura 31 m Vs M/My para LS – comparativa entre vigas y columnas



## **6.2 OBTENCIÓN DEL FACTOR M PARA LA ESTRUCTURA DISEÑADA SIN CÓDIGO DE DISEÑO SÍSMO RESISTENTE**

En este caso particular, la estructura no ha alcanzado un punto de comportamiento debido a las deficiencias en el detallado del refuerzo de los elementos del sistema de resistencia sísmica. Por esta razón, no es posible determinar el estado de los elementos en el punto donde la demanda y la capacidad sísmica de la estructura se encuentran, por ende se analizará directamente el punto de inestabilidad estructural.

En cuanto a los valores que se deben analizar en cada rótula, se tomarán en cuenta las rotaciones ( $\theta$ ), los momentos obtenidos ( $M$ ) en comparación con los momentos de fluencia ( $M_y$ ), el factor  $m$  obtenido (relación entre la rotación de fluencia y la rotación obtenida), y el factor  $m$  para vigas y columnas que se encuentran en las tablas 10.10a y 10.13 de la ASCE 41-17 (ASCE, 2017a), tal como se hizo en el modelo anterior.

Para este caso se hizo una revisión de los despieces de vigas y columnas y se consideró que todos los despieces de vigas tienen un inadecuado desarrollo del refuerzo en el pues se desconoce el diagrama de momentos con el que fue calculado y por esta razón no se puede saber desde que punto se iniciaría a contar la longitud de desarrollo.

En el caso de las columnas se consideró que si el traslapo se hace dentro del nudo o tiene una longitud de traslapo menor a la necesaria entonces también tiene un inadecuado desarrollo del refuerzo.

### **6.2.1 *Análisis de rotulas en vigas***

#### **6.2.1.1 *Para el punto de inestabilidad estructural***

En el punto de inestabilidad estructural se producen un total de 19 rótulas, distribuidas en 13 en LS y 6 en CP, donde la mayoría de ellas se producen a nivel de piso 2 y unas pocas en piso 3.

EDIFICIO DISEÑADO SIN CÓDIGO DE DISEÑO SISMO RESISTENTE - ANÁLISIS PARA EL PUNTO DE INESTABILIDAD ESTRUCTURAL			
Nivel de Desempeño	IO	LS	CP
Cantidad de rótulas		13	6
Rango factor m min. Esperado		1.50	1.75
Rango $\theta$ min. Esperado		0.005 a 0.010	0.010 a 0.020
Rango de M/My calculado		0.77 a 1.02	0.00 a 0.75
Cant. Rótulas con M/My < 0.95		15%	100%
Cant. Rótulas con M/My > 0.95		85%	-
Rango de Factor m/m tabla 10-7		1.28 a 2.74	2.45 a 7.10
Promedio de Factor m/m tabla 10-7		1.84	4.39
Rango factor m para rótulas con M/My > 0.95		1.92 a 4.10	-
Promedio factor m para rótulas con M/My > 0.95		2.57	-
Rango factor m para rótulas con M/My < 0.95		3.54 a 4.06	4.29 a 12.43
Promedio factor m para rótulas con M/My < 0.95		3.80	7.70
Rótulas < factor m min esperado		-	-
Rótulas en el rango del factor m min esperado		-	-
Rótulas > factor m min esperado		100.0%	100.0%
Rango de $\theta$		0.0022 a 0.0114	0.0105 a 0.0238
Rótulas dentro del rango min esperado de $\theta$		53.8%	100.0%
rango de factor m para rótulas dentro del rango de $\theta$		2.65 a 4.10	4.29 a 12.43
Prom. de factor m para rótulas dentro del rango de $\theta$		3.25	7.70
Rótulas menores al rango min esperado de $\theta$		46.2%	-
rango de factor m para rótulas menores al rango de $\theta$		1.92 a 2.52	-
Prom. de factor m para rótulas menores al rango de $\theta$		2.18	-
Rótulas con $\theta$ bajas y factores m dentro de m min esp.		0.5%	-
Prom. Factor m Rótulas con $\theta$ bajas y factores m dentro de m min esp.		3.25	-

Tabla 15, se observa que el 85% de las rótulas en LS tienen relaciones de momentos (M/My) mayores a 0.95, lo que indicaría que este grupo de rótulas entró al rango inelástico, sin embargo, también se evidencia que tanto las rótulas que no fluyeron como las que sí lo hicieron tienen factores m mayores al mínimo esperado según la tabla 10-13 (ASCE, 2017a), llegando en ambos casos a superarlo en un 270%.

En cuanto a las rotaciones de las rótulas en LS cerca de la mitad se encuentran dentro del rango de rotaciones esperadas según la tabla 10-7 (ASCE, 2017a) y su rango de factores m asociados sobrepasan al esperado hasta 2.73 veces, sin embargo, existe un grupo pequeño de rótulas que también sobrepasan el factor m mínimo esperado a pesar de que sus rotaciones se encuentran por debajo del rango mínimo esperado.

Por otra parte, en el caso de las rótulas obtenidas dentro del rango de rotaciones para CP se debe tener en cuenta que su cantidad es muy poca y por esta razón los resultados pueden no ser muy representativos.

Sin embargo, se observa que todas las rótulas tienen relaciones de momento por debajo de 0.95 e incluso algunas de ellas son cero, pero todas tienen factores m mayores al mínimo esperado según la tabla 10-13 (ASCE, 2017a), lo que en este caso se debe a que las rótulas han sobrepasado el punto C de la Figura 15, luego de lo cual en rótulas con inadecuado desarrollo del refuerzo la deformación sigue aumentando pero la resistencia baja hasta cero, tal como el comportamiento observado, en el que su factor m es mayor a la unidad pero su relación de momentos es nula.

En cuanto a las rotaciones asociadas a estos factores  $m$  calculados se observa que una de las rótulas alcanza a sobrepasar el valor máximo del rango mínimo esperado según la tabla 10-7 (ASCE, 2017a), superando este valor de rotación en un 19%, pero su factor  $m$  correspondiente es 4.13 veces mayor al mínimo esperado según la tabla 10-13 (ASCE, 2017a).

Teniendo en cuenta el comportamiento descrito anteriormente se puede considerar que los valores de los factores  $m$  de la tabla 10-7 (ASCE, 2017a) subestimarían a los factores  $m$  calculados, principalmente por que se ha encontrado que los factores calculados llegan casi a triplicar a los de referencia, pero además porque para rótulas con un mal desarrollo del refuerzo no se considera un rango de valores sino un único valor, criterio que no tiene en cuenta que la diversidad de valores que pueden obtenerse de una misma sección de refuerzo.

EDIFICIO DISEÑADO SIN CÓDIGO DE DISEÑO SISMO RESISTENTE - ANÁLISIS PARA EL PUNTO DE INESTABILIDAD ESTRUCTURAL			
Nivel de Desempeño	IO	LS	CP
Cantidad de rótulas		13	6
Rango factor $m$ min. Esperado		1.50	1.75
Rango $\theta$ min. Esperado		0.005 a 0.010	0.010 a 0.020
Rango de $M/My$ calculado		0.77 a 1.02	0.00 a 0.75
Cant. Rótulas con $M/My < 0.95$		15%	100%
Cant. Rótulas con $M/My > 0.95$		85%	-
Rango de Factor $m/m$ tabla 10-7		1.28 a 2.74	2.45 a 7.10
Promedio de Factor $m/m$ tabla 10-7		1.84	4.39
Rango factor $m$ para rótulas con $M/My > 0.95$		1.92 a 4.10	-
Promedio factor $m$ para rótulas con $M/My > 0.95$		2.57	-
Rango factor $m$ para rótulas con $M/My < 0.95$		3.54 a 4.06	4.29 a 12.43
Promedio factor $m$ para rótulas con $M/My < 0.95$		3.80	7.70
Rótulas < factor $m$ min esperado		-	-
Rótulas en el rango del factor $m$ min esperado		-	-
Rótulas > factor $m$ min esperado		100.0%	100.0%
Rango de $\theta$		0.0022 a 0.0114	0.0105 a 0.0238
Rótulas dentro del rango min esperado de $\theta$		53.8%	100.0%
rango de factor $m$ para rótulas dentro del rango de $\theta$		2.65 a 4.10	4.29 a 12.43
Prom. de factor $m$ para rótulas dentro del rango de $\theta$		3.25	7.70
Rótulas menores al rango min esperado de $\theta$		46.2%	-
rango de factor $m$ para rótulas menores al rango de $\theta$		1.92 a 2.52	-
Prom. de factor $m$ para rótulas menores al rango de $\theta$		2.18	-
Rótulas con $\theta$ bajas y factores $m$ dentro de $m$ min esp.		0.5%	-
Prom. Factor $m$ Rótulas con $\theta$ bajas y factores $m$ dentro de $m$ min esp.		3.25	-

**Tabla 15 Resumen de resultado en rótulas de vigas para el punto de inestabilidad estructural**

### 6.2.1.2 Para el nivel de desempeño de Ocupación Inmediata (IO)

En este análisis se tuvieron en cuenta 22 rótulas, ubicadas mayormente en las vigas de piso 2 y unas pocas sobre las de piso 3.

Según los resultados resumidos en la Tabla 16 se puede ver que solo una rótula tuvo una relación de momentos menor a 0.95, mientras que el 95.5% restante alcanzó o sobrepasó este valor y el promedio de sus factores  $m$  se encuentra muy cerca del factor  $m$  mínimo esperado según la tabla 10-13 (ASCE, 2017a), aunque su valor máximo calculado supera el factor mínimo esperado por un 137%.

Ahora, teniendo en cuenta las rotaciones obtenidas para estas rótulas se puede observar que los resultados se encuentran dentro del rango mínimo esperado según la tabla 10-7 (ASCE, 2017a), y tal como se mencionó anteriormente, el valor promedio de los factores  $m$  asociados a estas rotaciones es casi el mismo que el valor mínimo esperado. Adicionalmente el valor del factor  $m$  máximo calculado apenas supera al mínimo esperado en un 37%.

Tomando en consideración el comportamiento anteriormente descrito se considera que para IO los factores  $m$  calculados y los mínimos esperados son virtualmente iguales, toda vez que el promedio de los factores  $m$  calculados es casi el mismo y el valor máximo y mínimo del rango no se aleja exageradamente del valor mínimo esperado, su diferencia es cercana a un 30%.

EDIFICIO DISEÑADO SIN CÓDIGO DE DISEÑO SISMO RESISTENTE - ANÁLISIS PARA EL NIVEL DE DESEMPEÑO DE IO			
Nivel de Desempeño	IO	LS	CP
Cantidad de rótulas	22		
Rango factor $m$ min. Esperado	1,25		
Rango $\theta$ min. Esperado	0,0015		
Rango de $M/My$ calculado	0.93 a 1.00		
Cant. Rótulas con $M/My < 0.95$	4,5%		
Cant. Rótulas con $M/My > 0.95$	95,5%		
Rango de Factor $m/m$ tabla 10-7	0.75 a 1.37		
Promedio de Factor $m/m$ tabla 10-7	1,00		
Rango factor $m$ para rótulas con $M/My > 0.95$	0.95 a 1.72		
Promedio factor $m$ para rótulas con $M/My > 0.95$	1,28		
Rango factor $m$ para rótulas con $M/My < 0.95$	0,94		
Promedio factor $m$ para rótulas con $M/My < 0.95$	0,94		
Rótulas < factor $m$ min esperado	23%		
Rótulas en el rango del factor $m$ min esperado	-		
Rótulas > factor $m$ min esperado	77,3%		
Rango de $\theta$	0 a 0.0015		
Rótulas dentro del rango min esperado de $\theta$	100,0%		
rango de factor $m$ para rótulas dentro del rango de $\theta$	0.79 a 1.72		
Prom. de factor $m$ para rótulas dentro del rango de $\theta$	1,23		
Rótulas menores al rango min esperado de $\theta$	-		
rango de factor $m$ para rótulas menores al rango de $\theta$	-		
Prom. de factor $m$ para rótulas menores al rango de $\theta$	-		
Rótulas con $\theta$ bajas y factores $m$ dentro de $m$ min esp.	-		
Prom. Factor $m$ Rótulas con $\theta$ bajas y factores $m$ dentro de $m$ min esp.	-		

**Tabla 16 Resumen de resultado en rótulas de vigas para el nivel de desempeño de IO**

### **6.2.1.3 Para el nivel de desempeño de Preservación de la vida (LS)**

En este caso se tuvieron en cuenta 19 rótulas de las cuales 16 se presentaron en el segundo piso y las otras 3 en el tercero.

Analizando el rango de valores para la relación de momentos de la Tabla 17 se podría considerar que el 100% de las rotulas han sobrepasado el valor de 0.95 y por ende también a la fluencia de la sección.

Teniendo esto en cuenta se puede decir entonces que el 100% de los factores  $m$  calculados son coherentes con el comportamiento plástico de la sección, en el sentido de que en principio para que se pueda calcular un factor  $m$  debe existir fluencia en la rótula.

Así las cosas se ha encontrado que el factor  $m$  obtenido en la modelación ha sido siempre mayor al mínimo esperado según la tabla 10-13 (ASCE, 2017a), siendo el valor promedio un 1.85 veces mayor al mínimo esperado con un rango cuyo valor máximo que es un 2.73 veces mayor.

En cuanto a las rotaciones se encontró que casi la mitad de las rótulas tiene rotaciones dentro del rango mínimo esperado según la tabla 10-7 (ASCE, 2017a) y sus factores  $m$  calculados son mayores al factor mínimo esperado según la tabla 10-13 (ASCE, 2017a), sin embargo, se encontró también que hay otra mitad de rótulas cuyo factor  $m$  también supera al mínimo esperado, pero con rotaciones que se encuentran por debajo del rango mínimo esperado.

Lo anterior permite inferir que para las secciones de refuerzo detalladas sin provisiones sísmicas, la ductilidad de las rótulas medida por medio del factor  $m$ , es mayor a la mínima esperada según la ASCE 41-17 (ASCE, 2017a) teniendo en cuenta que para todas las rótulas se ha llegado a superar el factor  $m$  desde un 28% y hasta un 273%.

EDIFICIO DISEÑADO SIN CÓDIGO DE DISEÑO SISMO RESISTENTE - ANÁLISIS PARA EL NIVEL DE DESEMPEÑO DE LS			
Nivel de Desempeño	IO	LS	CP
Cantidad de rótulas		19	
Rango factor m min. Esperado		1.50	
Rango $\theta$ min. Esperado		0.005 a 0.010	
Rango de M/My calculado		0.94 a 1.02	
Cant. Rótulas con M/My < 0.95		5.3%	
Cant. Rótulas con M/My > 0.95		94.7%	
Rango de Factor m/m tabla 10-7		1.28 a 2.73	
Promedio de Factor m/m tabla 10-7		1.88	
Rango factor m para rótulas con M/My > 0.95		1.92 a 4.10	
Promedio factor m para rótulas con M/My > 0.95		2.78	
Rango factor m para rótulas con M/My < 0.95		4.05	
Promedio factor m para rótulas con M/My < 0.95		4.05	
Rótulas < factor m min esperado		-	
Rótulas en el rango del factor m min esperado		-	
Rótulas > factor m min esperado		100.0%	
Rango de $\theta$		0.002 a 0.0114	
Rótulas dentro del rango min esperado de $\theta$		57.9%	
rango de factor m para rótulas dentro del rango de $\theta$		2.66 a 4.10	
Prom. de factor m para rótulas dentro del rango de $\theta$		3.15	
Rótulas menores al rango min esperado de $\theta$		42.1%	
rango de factor m para rótulas menores al rango de $\theta$		1.92 a 3.56	
Prom. de factor m para rótulas menores al rango de $\theta$		2.36	
Rótulas con $\theta$ bajas y factores m dentro de m min esp.		45.1%	
Prom. Factor m Rótulas con $\theta$ bajas y factores m dentro de m min esp.		2.36	

**Tabla 17 Resumen de resultado en rótulas de vigas para el nivel de desempeño de LS**

### 6.2.2 Análisis de rotulas en columnas

En este análisis se encontró que el 100% de las rótulas que se producen en las columnas se encuentran ubicadas al nivel de la cimentación de la edificación.

Adicionalmente se ha considerado que todas las rótulas a nivel de cimentación cumplen con un adecuado desarrollo del refuerzo, esto debido a que todas ellas tienen una longitud de refuerzo embebida dentro del cimientado y además cuentan con gancho a 90°. Cabe aclarar que se desconoce la longitud del gancho y la longitud embebida en el cimientado, pero a falta de información se considera que su longitud de desarrollo es adecuada.

Teniendo en cuenta lo anterior se realizará el análisis del factor m comparando los valores obtenidos contra los valores de columnas no controladas por un inadecuado desarrollo o empalme del refuerzo, no obstante, este análisis no asignará directamente un valor esperado para cada rótula, debido a que por la diversidad de las cargas axiales y cortantes se tiene que la asignación de cada factor m podría cubrir casi por completo el rango de valores que señala la tabla 10-8 (ASCE, 2017a).

Por otra parte, como resultado de la modelación se ha encontrado que solamente una rótula alcanza a sobrepasar el límite mínimo esperado de rotaciones para LS de la tabla 10-8,

encontrándose entonces dentro del rango de CP. Por esta razón solamente se realizará el análisis para el punto de inestabilidad estructural, en donde casi todas las rótulas llegan a LS y otro análisis para todas las rótulas en el límite de rotaciones para IO.

### ***6.2.2.1 Para el punto de inestabilidad estructural***

Para el punto de inestabilidad estructural se producen 55 rótulas, todas ellas en la base de las columnas, tal como se mencionó anteriormente. Estas 55 rótulas se encuentran repartidas 5 en IO y 50 en LS. Adicionalmente a estas 55 rótulas se generó otra más que llegó a CP, pero al ser una sola rótula no será tomada en cuenta en estos análisis pues no es posible ahondar sobre un único resultado, caso similar al de IO en el que solo hay 5 elementos para analizar y de donde también es difícil profundizar en los análisis.

En las rótulas dentro del rango de rotaciones para el nivel de desempeño de LS se encontró que el rango de la relación de momentos ( $M/M_y$ ) oscila desde un 33% menos hasta un 79% más del momento de fluencia calculado, donde cerca de un tercio de estas rótulas tiene una relación de momentos por debajo de 0.95, lo que indicaría que éstas rótulas no debería haber entrado en el rango plástico, sin embargo el rango del factor  $m$  calculado para éste mismo grupo de rótulas se encuentra entre 1.44 y 5.71, lo cual supera al valor mínimo esperado según la tabla 10-10a hasta en un 67%, mientras que las rótulas con relaciones de momento mayores a 0.95 tienen un rango de factores  $m$  entre 1.57 y 10.42, valores que también superan a los mínimos esperados, pero en este caso lo hasta 3.06 veces.

En cuanto a las rotaciones para este nivel de desempeño esta depende del valor calculado para “a” según la tabla 10-8 (ASCE, 2017a). Dentro de este rango de rotaciones se encuentran tres cuartas partes de las rótulas obtenidas y su factor  $m$  oscila entre 1.73 y 10.42, con un promedio general de 4.25, valor que supera al factor  $m$  máximo del rango mínimo esperado en un 25%.

El otro tercio restante cuyas rotaciones son menores al rango mínimo esperado tienen un promedio de 2.42, valor que se encontraría dentro del rango del factor  $m$  mínimo esperado de 1.70 a 3.40 si se tiene en cuenta que se considera que estas rótulas tienen un adecuado desarrollo del refuerzo.

Lo anterior permite deducir que las rótulas de estas columnas tienen capacidades dúctiles mayores a las mínimas esperadas en la tabla 10-10a (ASCE, 2017a), toda vez que las rótulas con rotaciones menores al rango mínimo esperado llevan a factores  $m$  cercanas o dentro del rango mínimo esperado, pero las rótulas que tiene rotaciones dentro del rango mínimo esperado obtienen factores  $m$  mayores al máximo valor esperado, llegando a ser hasta 3.06 veces mayor.

EDIFICIO DISEÑADO SIN CÓDIGO DE DISEÑO SISMO RESISTENTE - ANÁLISIS PARA EL PUNTO DE INESTABILIDAD ESTRUCTURAL			
Nivel de Desempeño	IO	LS	CP
Cantidad de rótulas	-	50	-
Rango factor m min. Esperado	-	1.70 a 3.40	-
Rango $\theta$ min. Esperado	-	0.005 a 0.0440	-
Rango de M/My calculado	-	0.67 a 1.79	-
Cant. Rótulas con M/My < 0.95	-	36.0%	-
Cant. Rótulas con M/My > 0.95	-	64.0%	-
Rango de Factor m/m tabla 10-7	-	-	-
Promedio de Factor m/m tabla 10-7	-	-	-
Rango factor m para rótulas con M/My > 0.95	-	1.57 a 10.42	-
Promedio factor m para rótulas con M/My > 0.95	-	4.05	-
Rango factor m para rótulas con M/My < 0.95	-	1.44 a 5.71	-
Promedio factor m para rótulas con M/My < 0.95	-	3.02	-
Rótulas < factor m min esperado	-	22.0%	-
Rótulas en el rango del factor m min esperado	-	40.0%	-
Rótulas > factor m min esperado	-	38.0%	-
Rango de $\theta$	-	0.00015 - 0.026	-
Rótulas dentro del rango min esperado de $\theta$	-	74.0%	-
rango de factor m para rótulas dentro del rango de $\theta$	-	1.73 a 10.42	-
Prom. de factor m para rótulas dentro del rango de $\theta$	-	4.25	-
Rótulas menores al rango min esperado de $\theta$	-	26.0%	-
rango de factor m para rótulas menores al rango de $\theta$	-	1.06 a 2.76	-
Prom. de factor m para rótulas menores al rango de $\theta$	-	2.00	-
Rótulas con $\theta$ bajas y factores m dentro de m min esp.	-	16.0%	-
Prom. Factor m Rótulas con $\theta$ bajas y factores m dentro de m min esp.	-	2.42	-

**Tabla 18 Resumen de resultado en rótulas de columnas para el punto de inestabilidad estructural**

### 6.2.2.2 Para Ocupación Inmediata (IO)

En este caso se extrajo la información de las 56 rótulas que se produjeron en este modelo, la información de todas ellas se analizó para las rotaciones justo antes de sobrepasar el límite para IO según la formulación de la tabla 10-8 (ASCE, 2017a).

Dentro de la información analizada se encontró que cerca de la mitad de las rótulas tienen una relación de momentos (M/My) menor a 0.95, lo que indicaría que éstas rótulas no alcanzarían a sobrepasar el límite de fluencia de la sección, sin embargo, una cuarta parte de éstas rótulas llegaron a factores m dentro del rango mínimo esperado, mientras que las otras tres cuartas partes se encontraron dentro del rango elástico de la sección y su factor m no alcanza a entrar dentro de este rango esperado. Este grupo dentro del rango elástico representaría el 41% del total de rótulas analizadas.

En cuanto a la otra mitad de las rótulas su relación de momentos es mayor a 0.95 y el rango de factores m obtenidos se encuentra dentro del rango de factores m mínimos esperados y alcanza a sobrepasar este rango hasta en un 47%.

En términos de rotaciones todas las rótulas se encuentran dentro del rango mínimo esperado según la formulación de la tabla 10-8 (ASCE, 2017a), y sus factores m asociados



se dividen en tres grupos, una primera mitad tiene factores  $m$  por debajo del rango mínimo esperado, mientras que una cuarta parte se encuentra dentro de este rango y la otra cuarta parte restante lo supera.

Por otra parte, algo que vale la pena anotar es que la formulación del criterio de aceptación para las rotaciones en IO impone un límite de deformaciones muy bajo, en algunos casos muy cercano al punto de fluencia de la sección y en otros casos sobre el punto de fluencia. Al ser tan estrecha la diferencia de rotaciones entre el límite de fluencia y el límite para IO suele verse que un pequeño cambio en la fuerza aplicada a la estructura produce rotaciones suficientes para sobrepasar el nivel de desempeño de IO, pero en el punto anterior esa fuerza no provoca la rotación necesaria para sobrepasar la fluencia, lo cual explica el por qué en este caso cerca de la mitad de las rótulas tiene relaciones de momento y factores  $m$  por debajo de 1.00, debido a que el paso en el pushover antes de sobrepasar el límite para IO no produce rotaciones ni momentos que sobrepasen a los de la fluencia de las sección.

En resumen, en este caso se puede decir que, a pesar de que los despieces de esta edificación tienen deficiencias sismorresistentes, al haberse asumido que la rótula no se encuentra controlada por un inadecuado desarrollo del refuerzo, las rótulas que se obtuvieron tienen una capacidad de deformación mayor al rango de valores mínimos esperados según la tabla 10-10a (ASCE, 2017a), encontrando que llegan a superar estos valores hasta en un 47%

EDIFICIO DISEÑADO SIN CÓDIGO DE DISEÑO SISMO RESISTENTE - ANÁLISIS PARA EL NIVEL DE DESEMPEÑO DE IO			
Nivel de Desempeño	IO	LS	CP
Cantidad de rótulas	56		
Rango factor $m$ min. Esperado	1.00 a 1.70		
Rango $\theta$ min. Esperado	0.00 a 0.005		
Rango de $M/My$ calculado	0,64 a 1,71		
Cant. Rótulas con $M/My < 0.95$	55.4%		
Cant. Rótulas con $M/My > 0.95$	44.6%		
Rango de Factor $m/m$ tabla 10-7	-		
Promedio de Factor $m/m$ tabla 10-7	-		
Rango factor $m$ para rótulas con $M/My > 0.95$	0.97 a 2.51		
Promedio factor $m$ para rótulas con $M/My > 0.95$	1.37		
Rango factor $m$ para rótulas con $M/My < 0.95$	0,64 a 1.75		
Promedio factor $m$ para rótulas con $M/My < 0.95$	0.94		
Rótulas < factor $m$ min esperado	48.2%		
Rótulas en el rango del factor $m$ min esperado	23.2%		
Rótulas > factor $m$ min esperado	28.6%		
Rango de $\theta$	0.00 a 0.0041		
Rótulas dentro del rango min esperado de $\theta$	100.0%		
rango de factor $m$ para rótulas dentro del rango de $\theta$	0.64 a 2.51		
Prom. de factor $m$ para rótulas dentro del rango de $\theta$	1.13		
Rótulas menores al rango min esperado de $\theta$	-		
rango de factor $m$ para rótulas menores al rango de $\theta$	-		
Prom. de factor $m$ para rótulas menores al rango de $\theta$	-		
Rótulas con $\theta$ bajas y factores $m$ dentro de $m$ min esp.	-		
Prom. Factor $m$ Rótulas con $\theta$ bajas y factores $m$ dentro de $m$ min esp.	-		

**Tabla 19 Resumen de resultado en rótulas de columnas para el nivel de desempeño de IO**

### **6.2.3 Comparación de rótulas de columnas y vigas para IO y LS**

En este caso se realizará un análisis comparativo de las rótulas para vigas y columnas para los niveles de desempeño de IO y LS.

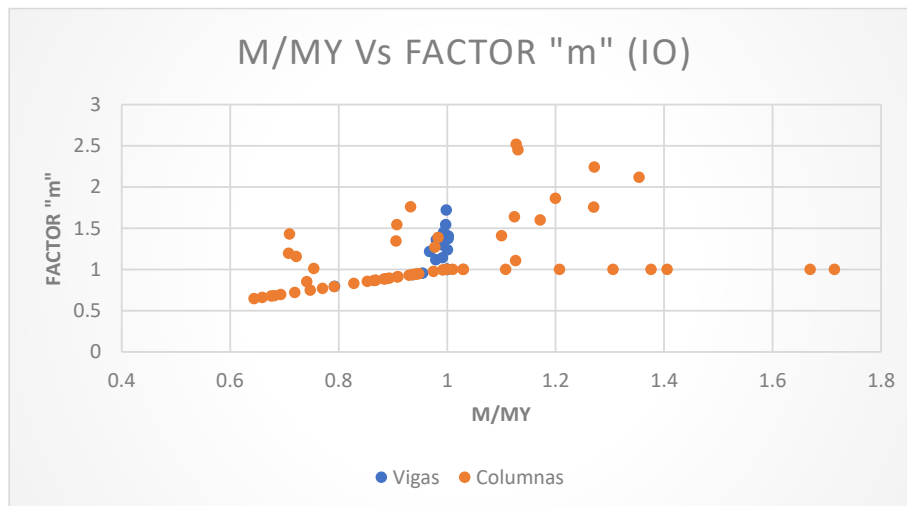
En la Figura 32 y la Tabla 20 se presenta la comparación entre las rótulas de vigas y columnas para el nivel de desempeño de IO. Se puede observar que la dispersión de las relaciones de momentos ( $M/My$ ) es más amplia en las columnas que en las vigas, ya que las primeras presentan un rango de 0,64 a 1,71, mientras que las segundas oscilan entre 0,93 y 1,00. Esto puede explicarse por la influencia de la carga axial en la curva momento-curvatura de las columnas, que produce rótulas con capacidades distintas según la magnitud de la carga axial, la cual al ser tan diversa hace que para una misma sección se obtengan momentos resistentes distintos.

Así mismo, se ha constatado que casi el 100% de las rótulas de vigas superan la relación de momentos de 0,95, mientras que en el caso de las columnas un 36% se sitúan por debajo de dicho valor, y en cuanto al factor  $m$  el 100% de las vigas superan el valor esperado mientras que en las columnas solamente el 38% superan el rango mínimo esperado, según las tablas 10-10a y 10-13 (ASCE, 2017a).

Otro dato relevante es el rango de valores del factor " $m$ " para las columnas (0.64 a 2.51), el cual es superior al rango de valores para las vigas (0.75 a 1.72). Esto concuerda con lo esperado, ya que según las tablas 10-10a (factor  $m$  para columnas) y 10-13 (factor  $m$  para vigas), los factores  $m$  para las vigas se espera que estén en 1.25, mientras que para las columnas el factor  $m$  esperado estaría en un rango de 1.00 a 1.70, siendo en general más dúctiles las columnas que las vigas.

EDIFICIO DISEÑADO SIN CÓDIGO DE DISEÑO SISMO RESISTENTE - COMPARACIÓN ENTRE VIGAS Y COLUMNAS EN IO		
Nivel de Desempeño	VIGAS	COLUMNAS
Cantidad de rótulas	22	56
Rango factor m min. Esperado	1.25	1.00 a 1.70
Rango $\theta$ min. Esperado	0.0015	0.00 a 0.005
Rango de M/My calculado	0.93 a 1.00	0,64 a 1,71
Cant. Rótulas con M/My < 0.95	4.5%	55.4%
Cant. Rótulas con M/My > 0.95	95.5%	44.6%
Rango de Factor m/m tabla 10-7	0.75 a 1.37	-
Promedio de Factor m/m tabla 10-7	1.00	-
Rango factor m para rótulas con M/My > 0.95	0.95 a 1.72	0.97 a 2.51
Promedio factor m para rótulas con M/My > 0.95	1.28	1.37
Rango factor m para rótulas con M/My < 0.95	0.94	0,64 a 1,75
Promedio factor m para rótulas con M/My < 0.95	0.94	0.94
Rótulas < factor m min esperado	23%	48.2%
Rótulas en el rango del factor m min esperado	-	23.2%
Rótulas > factor m min esperado	77.3%	28.6%
Rango de $\theta$	0.00 a 0.0015	0.00 a 0.0041
Rótulas dentro del rango min esperado de $\theta$	100.0%	100.0%
rango de factor m para rótulas dentro del rango de $\theta$	0.79 a 1.72	0.64 a 2.51
Prom. de factor m para rótulas dentro del rango de $\theta$	1.23	1.13
Rótulas menores al rango min esperado de $\theta$	-	-
rango de factor m para rótulas menores al rango de $\theta$	-	-
Prom. de factor m para rótulas menores al rango de $\theta$	-	-
Rótulas con $\theta$ bajas y factores m dentro de m min esp.	-	-
Prom. Factor m Rótulas con $\theta$ bajas y factores m dentro de m min esp.	-	-

**Tabla 20 Resumen de resultado en rótulas y columnas para el nivel de desempeño de IO**



**Figura 32 m Vs M/My para IO – comparativa entre vigas y columnas**

Realizando un análisis similar para el nivel de desempeño de LS se observa en la Figura 33 y en la Figura 28 que la dispersión de las relaciones de momentos vuelve a ser es más amplia en las columnas que en las vigas, ya que las columnas presentan un rango de 0,67 a 1,79 (muy similar al de IO), mientras que las vigas oscilan entre 0,94 y 1,02. Esto como se mencionó anteriormente podría deberse por la influencia de la carga axial en la curva

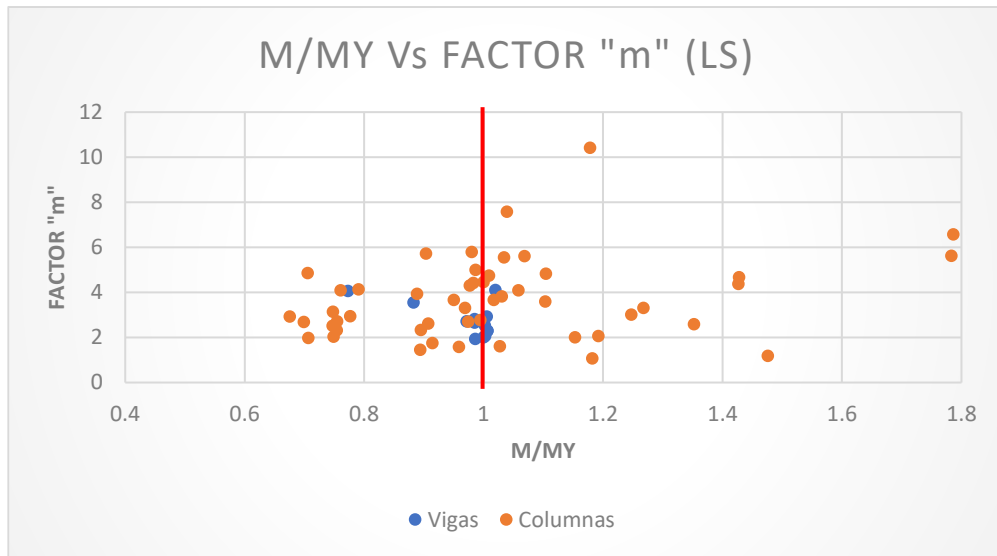
momento-curvatura de las columnas, que produce rótulas con capacidades distintas según la magnitud de la carga axial.

Por otro lado, es importante destacar que el rango de valores obtenidos para el factor "m" de columnas (1.44 a 10.42) resulta superior al de las vigas (1.28 a 4.10). En ambos casos, estos valores superan sustancialmente los valores esperados según las tablas 10-10a (factor "m" para columnas) y 10-13 (factor "m" para vigas), que suponen un valor de 1.50 para vigas y de 1.70 a 3.40 para columnas. Por lo tanto, se podría afirmar que, en el caso de LS, tanto en vigas como en columnas, el factor "m" de la norma ASCE 41-17 (ASCE, 2017a) subestimaría la ductilidad teórica de los elementos.

De manera general se encontró que tanto en vigas como en columnas el rango de factores m calculados para el nivel de desempeño de IO y LS es mayor al esperado, obteniendo factores m de mayor magnitud para rotaciones bajas dentro del rango de las rotaciones mínimas esperadas.

EDIFICIO DISEÑADO SIN CÓDIGO DE DISEÑO SISMO RESISTENTE - COMPARACIÓN ENTRE VIGAS Y COLUMNAS EN LS		
Nivel de Desempeño	VIGAS	COLUMNAS
Cantidad de rótulas	19	50
Rango factor m min. Esperado	1.50	1.70 a 3.40
Rango $\theta$ min. Esperado	0.005 a 0.010	0.005 a 0.0440
Rango de M/My calculado	0.94 a 1.02	0.67 a 1.79
Cant. Rótulas con M/My < 0.95	5.3%	36.0%
Cant. Rótulas con M/My > 0.95	94.7%	64.0%
Rango de Factor m/m tabla 10-7	1.28 a 2.73	-
Promedio de Factor m/m tabla 10-7	1.88	-
Rango factor m para rótulas con M/My > 0.95	1.92 a 4.10	1.57 a 10.42
Promedio factor m para rótulas con M/My > 0.95	2.78	4.05
Rango factor m para rótulas con M/My < 0.95	4.05	1.44 a 5.71
Promedio factor m para rótulas con M/My < 0.95	4.05	3.02
Rótulas < factor m min esperado	-	22.0%
Rótulas en el rango del factor m min esperado	-	40.0%
Rótulas > factor m min esperado	100.0%	38.0%
Rango de $\theta$	0.002 a 0.0114	0.00015 - 0.026
Rótulas dentro del rango min esperado de $\theta$	42.1%	74.0%
rango de factor m para rótulas dentro del rango de $\theta$	2.66 a 4.06	1.73 a 10.42
Prom. de factor m para rótulas dentro del rango de $\theta$	3.06	4.25
Rótulas menores al rango min esperado de $\theta$	42.1%	26.0%
rango de factor m para rótulas menores al rango de $\theta$	1.92 a 3.56	1.06 a 2.76
Prom. de factor m para rótulas menores al rango de $\theta$	2.36	2.00
Rótulas con $\theta$ bajas y factores m dentro de m min esp.	57.9%	16.0%
Prom. Factor m Rótulas con $\theta$ bajas y factores m dentro de m min esp.	2.36	2.42

**Tabla 21 Resumen de resultado en rótulas de vigas y columnas para el nivel de desempeño de LS**



**Figura 33 m Vs M/My para LS – comparativa entre vigas y columnas**

### **6.3 Comparación de resultados para cada nivel de desempeño y propuesta de factores m**

Realizando una comparación de los resultados obtenidos en cada edificación para cada nivel de desempeño se puede decir lo siguiente:

#### **6.3.1 Para la edificación diseñada según los requisitos de la NSR-10 (AIS, 2010b)**

##### Vigas en el nivel de desempeño de ocupación inmediata (IO).

En la Tabla 22 se recopila la información obtenida para el punto de comportamiento y para el análisis de todas las rótulas llevadas al límite antes de sobrepasar el nivel de desempeño de IO.

EDIFICIO DISEÑADO CON NSR-10 - COMPARACIÓN DE RESULTADOS PARA IO		
Nivel de Desempeño	P.C.	IO
Cantidad de rótulas	78	48
Rango factor m min. Esperado	2 a 3	2 a 3
Rango $\theta$ min. Esperado	0.005-0.010	0.005-0.010
Rango de M/My calculado	0.99 a 1.014	0.996 a 1.022
Cant. Rótulas con M/My < 0.95	-	-
Cant. Rótulas con M/My > 0.95	100%	100%
Rango de Factor m/m tabla 10-7	0.348 a 2.13	0.63 a 2.62
Promedio de Factor m/m tabla 10-7	0.93	1.51
Rango factor m para rótulas con M/My > 0.95	1.15 a 4.26	1.89 a 5.24
Promedio factor m para rótulas con M/My > 0.95	2.20	3.46
Rango factor m para rótulas con M/My < 0.95	-	-
Promedio factor m para rótulas con M/My < 0.95	-	-
Rótulas < factor m min esperado	39.7%	2.1%
Rótulas en el rango del factor m min esperado	46.2%	27.1%
Rótulas > factor m min esperado	14.1%	66.7%
Rango de $\theta$	0.00067 a 0.00969	0.00272 a 0.00973
Rótulas dentro del rango min esperado de $\theta$	30.8%	85.4%
rango de factor m para rótulas dentro del rango de $\theta$	2.28 a 4.26	2.40 a 5.19
Prom. de factor m para rótulas dentro del rango de $\theta$	3.04	3.65
Rótulas menores al rango min esperado de $\theta$	69.2%	14.6%
rango de factor m para rótulas menores al rango de $\theta$	1.15 a 2.76	1.89 a 3.02
Prom. de factor m para rótulas menores al rango de $\theta$	1.89	2.47
Rótulas con $\theta$ bajas y factores m dentro de m min esp.	29.5%	14.6%
Prom. Factor m Rótulas con $\theta$ bajas y factores m dentro de m min esp.	2.27	2.47

**Tabla 22 Comparación de resultado en rótulas de vigas para el nivel de desempeño de IO**

Para las vigas en el nivel de desempeño de IO se puede concluir que hay una tendencia marcada a obtener factores m mayores al rango mínimo esperado según la tabla 10-13 (ASCE, 2017a) cuando las rotaciones en la sección se encuentran dentro del mínimo esperado según la tabla 10-7 (ASCE, 2017a), llegando a sobrepasar los factores m esperados hasta en un 173%, si se considera que el máximo valor del factor m esperado es 3.00 y el máximo factor m calculado llegó hasta 5.24. Cabe aclarar que ninguna de las rótulas sobrepasó el valor máximo esperado de rotaciones.

Lo afirmado anteriormente se puede corroborar con un grupo de rótulas en el que las rotaciones obtenidas están por debajo del rango mínimo esperado pero que a pesar de esto han llegado a factores m dentro del rango de factores m mínimos esperados, lo que indicaría que para estas rótulas el factor m podría llegar a ser mayor si las rotaciones sobre este elemento aumentaran, muy posiblemente sobrepasando el rango mínimo esperado para el factor m según la tabla 10.13.

Sin embargo, lo descrito anteriormente es válido cuando se fuerza a la rótula a llegar a su estado máximo de deformación, pero esto no es lo que ocurre cuando la rótula trabaja para el punto de comportamiento de la estructura; allí la rótula está trabajando bajo niveles de rotación menores y por ende los factores m obtenidos para este estado son más bajos.

Teniendo esto en cuenta, se observa que la cantidad de rótulas en el punto de comportamiento cuyas rotaciones están dentro del rango mínimo esperado de la tabla 10-

7 (ASCE, 2017a), son cerca del 30% del total de rótulas, y sus factores  $m$  tienden a superar al rango mínimo esperado entre un 20 y un 40%. Lo cual se considera que es una variación baja respecto a los valores de la tabla 10.13 (ASCE, 2017a)

Por esta razón se considera que el rango del factor  $m$  para el nivel de desempeño de IO y rótulas que cumplen con el espaciamiento entre flejes  $< d/3$  en el tramo de la rótula plástica, es congruente con la información analizada y por ende no es pertinente realizar ninguna modificación.

### Vigas en el nivel de desempeño de preservación de la vida (LS).

En la Tabla 23 se recopila la información obtenida para el punto de comportamiento, el punto de inestabilidad estructural y para el análisis de todas las rótulas llevadas al límite antes de sobrepasar el nivel de desempeño de LS.

EDIFICIO DISEÑADO CON NSR-10 - COMPARACIÓN DE RESULTADOS PARA LS			
Nivel de Desempeño	P.C.	I.E.	LS
Cantidad de rótulas	16	76	46
Rango factor $m$ min. Esperado	2 a 6	2 a 6	2 a 6
Rango $\theta$ min. Esperado	0.015-0.025	0.015-0.025	0.015-0.025
Rango de $M/My$ calculado	1.007 a 1.03	0.92 a 1.04	0.96 a 1.056
Cant. Rótulas con $M/My < 0.95$	-	5.3%	2.2%
Cant. Rótulas con $M/My > 0.95$	100%	94.7%	97.8%
Rango de Factor $m/m$ tabla 10-7	0.49 a 2.44	0.54 a 4.34	0.54 a 4.51
Promedio de Factor $m/m$ tabla 10-7	1.39	1.57	1.96
Rango factor $m$ para rótulas con $M/My > 0.95$	2.95 a 7.34	3.24 a 9.77	3.24 a 11.72
Promedio factor $m$ para rótulas con $M/My > 0.95$	5.62	5.96	7.25
Rango factor $m$ para rótulas con $M/My < 0.95$	-	5.36 a 9.32	8.47
Promedio factor $m$ para rótulas con $M/My < 0.95$	-	7.67	8.47
Rótulas $<$ factor $m$ min esperado	-	44.7%	-
Rótulas en el rango del factor $m$ min esperado	68.8%	55.3%	26.1%
Rótulas $>$ factor $m$ min esperado	31.3%	44.7%	73.9%
Rango de $\theta$	0.005941 a 0.016	0.00806 a 0.02355	0.01047 a 0.02499
Rótulas dentro del rango min esperado de $\theta$	31.3%	61.8%	89.1%
rango de factor $m$ para rótulas dentro del rango de $\theta$	5.20 a 7.34	4.23 a 8.94	4.17 a 11.72
Prom. de factor $m$ para rótulas dentro del rango de $\theta$	6.10	6.76	7.58
Rótulas menores al rango min esperado de $\theta$	68.8%	38.2%	10.9%
rango de factor $m$ para rótulas menores al rango de $\theta$	2.95 a 6	3.24 a 6.98	3.24 a 6.28
Prom. de factor $m$ para rótulas menores al rango de $\theta$	5.16	4.89	4.77
Rótulas con $\theta$ bajas y factores $m$ dentro de $m$ min esp.	50.0%	35.5%	3.24 a 6.28
Prom. Factor $m$ Rótulas con $\theta$ bajas y factores $m$ dentro de $m$ min esp.	4.70	4.74	4.77

**Tabla 23 Comparación de resultado en rótulas de vigas para el nivel de desempeño de LS**

Para este nivel de desempeño se observa que el rango del factor  $m$  calculado tiende a obtener valores máximos mayores en la medida que se fuerza a la sección a aumentar sus rotaciones hasta el límite superior del rango mínimo esperado de la tabla 10-7 (ASCE, 2017a), y es por esta misma razón que la cantidad de rótulas que no alcanzan el rango mínimo esperado disminuyen en la medida que se evalúa una condición más exigente para cada rótula.

En los tres casos se observa que el valor mínimo calculado del factor  $m$  está alrededor de 3.00, factor  $m$  que es mayor al mínimo esperado y que se relaciona con un valor de rotación por debajo del rango mínimo esperado, indicando nuevamente que aún para rotaciones por debajo de este rango mínimo de rotaciones esperado se alcanzan factores  $m$  que están dentro del rango mínimo esperado según la tabla 10.13 (ASCE, 2017a).

Finalmente, como se mencionó en el caso de rótulas en vigas para IO, los valores máximos obtenidos para el factor  $m$  corresponden a la condición en la que se fuerza a la rótula a su máxima deformación posible, pero en el punto de comportamiento estas rótulas llegan a rotaciones y factores  $m$  menores, en este caso las rótulas en LS varían dentro del rango de 2.95 y 7.34, pero si consideramos solo las rótulas que estén dentro del rango de rotaciones mínimas esperadas de la tabla 10.8, se observa que el factor  $m$  calculado sería mínimo de 5.20 y máximo de 7.34, lo que quiere decir que se supera al valor mínimo del rango mínimo esperado 2.6 veces mientras que al valor máximo es superado en un 20%.

Teniendo en cuenta lo anterior se considera pertinente que en aumentar el valor del factor  $m$  mínimo esperado en un 50%, de manera conservador, mientras que el factor  $m$  máximo obtenido para el punto de comportamiento no fue muy diferente al máximo esperado, porque se propone mantenerlo igual.

Lo anterior quiere decir que para rótulas en vigas con flejes dispuestos a una distancia  $<d/3$  y dentro del rango de rotaciones para LS el rango de factores  $m$  pasaría de 2.00 a 6.00 a 3.00 a 6.00.

#### Vigas en el nivel de desempeño de prevención del colapso (CP)

En la Tabla 24 se recopila la información obtenida para el punto de inestabilidad estructural de todas las rótulas en el nivel de desempeño de CP, debido a que es en el único horizonte en el que se obtuvieron valores dentro de este rango de rotaciones.

En este caso la muestra de datos es mucho menor a los de los otros dos niveles de desempeño, razón por la cual se podría considerar que esta muestra es poco significativa para sacar conclusiones respecto a su comportamiento.

Sin embargo, con esta información es notable que las rótulas que alcanzaron a entrar al rango de rotaciones mínimas esperadas según la tabla 10-7 (ASCE, 2017a) han obtenido factores  $m$  que duplican el factor  $m$  mínimo esperado de la tabla 10-13 (ASCE, 2017a), mientras que al evaluar rótulas con rotaciones mayores se encontró que el factor  $m$  mínimo es duplicado, llegando a valores de 12.60 para una rotación de 0.027, valor de rotación que se encuentra lejos de llegar al máximo del rango mínimo esperado de rotaciones, pero a pesar de esto obtuvo un factor  $m$  que es 1.8 veces mayor al esperado.



Basado en esta evidencia se concluye entonces que el factor m para rótulas dentro del rango de rotaciones para CP y con separación entre estribos  $<d/3$  en la zona de la rótula plástica, podría llegar a factores m teóricos mayores a los mínimos esperados en la tabla 10-13 (ASCE, 2017a). Sin embargo, no se considera apropiado proponer modificaciones con base en los pocos resultados obtenidos.

EDIFICIO DISEÑADO CON NSR-10 - COMPARACIÓN DE RESULTADOS PARA CP	
Nivel de Desempeño	I.E.
Cantidad de rótulas	11
Rango factor m min. Esperado	3 a 7
Rango $\theta$ min. Esperado	0.02-0.05
Rango de M/My calculado	0.98 a 1.058
Cant. Rótulas con M/My $< 0.95$	-
Cant. Rótulas con M/My $> 0.95$	100%
Rango de Factor m/m tabla 10-7	1.29 a 2.91
Promedio de Factor m/m tabla 10-7	1.86
Rango factor m para rótulas con M/My $> 0.95$	5.90 a 12.60
Promedio factor m para rótulas con M/My $> 0.95$	9.88
Rango factor m para rótulas con M/My $< 0.95$	-
Promedio factor m para rótulas con M/My $< 0.95$	-
Rótulas $<$ factor m min esperado	-
Rótulas en el rango del factor m min esperado	9.1%
Rótulas $>$ factor m min esperado	90.9%
Rango de $\theta$	0.01146 a 0.02736
Rótulas dentro del rango min esperado de $\theta$	90.9%
rango de factor m para rótulas dentro del rango de $\theta$	8.60 a 12.60
Prom. de factor m para rótulas dentro del rango de $\theta$	10.28
Rótulas menores al rango min esperado de $\theta$	9.1%
rango de factor m para rótulas menores al rango de $\theta$	5.90
Prom. de factor m para rótulas menores al rango de $\theta$	5.90
Rótulas con $\theta$ bajas y factores m dentro de m min esp.	-
Prom. Factor m Rótulas con $\theta$ bajas y factores m dentro de m min esp.	-

**Tabla 24 Comparación de resultado en rótulas de vigas para el nivel de desempeño de CP**

#### Columnas en el nivel de desempeño de ocupación inmediata (IO).

En la Tabla 22 se recopila la información obtenida para el punto de comportamiento y para el análisis de todas las rótulas llevadas al límite antes de sobrepasar el nivel de desempeño de IO.

EDIFICIO DISEÑADO CON NSR-10 - COMPARACIÓN DE RESULTADOS PARA IO		
Nivel de Desempeño	P.C.	IO
Cantidad de rótulas	14	34
Rango factor m min. Esperado	1.70	1.70
Rango $\theta$ min. Esperado	0.0066	0.0066
Rango de M/My calculado	0.836 a 1.19	0.826 a 1.169
Cant. Rótulas con M/My < 0.95	64.3%	41%
Cant. Rótulas con M/My > 0.95	35.7%	59%
Rango de Factor m/m tabla 10-7	0.90 a 2.058	1.02 a 2.26
Promedio de Factor m/m tabla 10-7	2.38	1.56
Rango factor m para rótulas con M/My > 0.95	2.55 a 3.50	1.94 a 3.84
Promedio factor m para rótulas con M/My > 0.95	2.91	2.76
Rango factor m para rótulas con M/My < 0.95	1.53 a 3.47	1.73 a 3.47
Promedio factor m para rótulas con M/My < 0.95	2.49	2.58
Rótulas < factor m min esperado	7.1%	-
Rótulas en el rango del factor m min esperado	-	-
Rótulas > factor m min esperado	92.9%	100.0%
Rango de $\theta$	0.00351 a 0.00602	0.0041 a 0.0065
Rótulas dentro del rango min esperado de $\theta$	100%	100.0%
rango de factor m para rótulas dentro del rango de $\theta$	1.53 a 3.50	1.73 a 3.84
Prom. de factor m para rótulas dentro del rango de $\theta$	2.73	2.68
Rótulas menores al rango min esperado de $\theta$	-	-
rango de factor m para rótulas menores al rango de $\theta$	-	-
Prom. de factor m para rótulas menores al rango de $\theta$	-	-
Rótulas con $\theta$ bajas y factores m dentro de m min esp.	-	-
Prom. Factor m Rótulas con $\theta$ bajas y factores m dentro de m min esp.	-	-

**Tabla 25 Comparación de resultado en rótulas de columnas para el nivel de desempeño de IO**

En este caso se espera que el factor m sea de 1.70 para columnas que no estén controladas por un inadecuado desarrollo o traslapeo del refuerzo y que se encuentran dentro del rango de rotaciones para IO.

La información analizada demostró que los factores m calculados llegan a duplicar el factor m mínimo esperado según la tabla 10-10a, llegando a valores alrededor de 3.50 para rotaciones muy cercanas al límite mínimo esperado de la tabla 10-8, pero además el promedio de los datos obtenidos es un 50% mayor.

Por consiguiente, basados en el valor promedio obtenido se concluye que es factible aumentar el factor mínimo esperado en un 30% conservadoramente para rótulas no controladas por un inadecuado desarrollo o traslapeo del refuerzo que se encuentren dentro del rango de rotaciones mínimas esperadas para IO, pasando de un valor de 1.70 a 2.20.

### Columnas en el nivel de desempeño de preservación de la vida (LS)

En la Tabla 26 se recopila la información obtenida para el punto de comportamiento y para el punto de inestabilidad estructural, que coincide con el análisis de todas las rótulas llevadas al límite antes de sobrepasar el nivel de desempeño de LS.

EDIFICIO DISEÑADO CON NSR-10 - COMPARACIÓN DE RESULTADOS PARA LS		
Nivel de Desempeño	P.C.	I.E. - LS
Cantidad de rótulas	9	34
Rango factor m min. Esperado	3.40	3.40
Rango $\theta$ min. Esperado	0.0066 a 0.0445	0.0066 a 0.0445
Rango de M/My calculado	0.85 a 1.18	0.54 a 1.17
Cant. Rótulas con M/My < 0.95	55.6%	50.0%
Cant. Rótulas con M/My > 0.95	55.6%	50.0%
Rango de Factor m/m tabla 10-7	1.01 a 1.10	1.06 a 3.70
Promedio de Factor m/m tabla 10-7	0.97	1.83
Rango factor m para rótulas con M/My > 0.95	2.90 a 3.57	2.08 a 12.57
Promedio factor m para rótulas con M/My > 0.95	3.25	6.73
Rango factor m para rótulas con M/My < 0.95	3.14 a 3.77	2.35 a 8.78
Promedio factor m para rótulas con M/My < 0.95	3.40	5.73
Rótulas < factor m min esperado	55.6%	20.6%
Rótulas en el rango del factor m min esperado		-
Rótulas > factor m min esperado	44.4%	79.4%
Rango de $\theta$	0.00639 a 0.0095	0.0070 a 0.0207
Rótulas dentro del rango min esperado de $\theta$	100.0%	100.0%
rango de factor m para rótulas dentro del rango de $\theta$	2.90 a 3.77	2.08 a 12.57
Prom. de factor m para rótulas dentro del rango de $\theta$	3.25	6.23
Rótulas menores al rango min esperado de $\theta$	-	-
rango de factor m para rótulas menores al rango de $\theta$	-	-
Prom. de factor m para rótulas menores al rango de $\theta$	-	-
Rótulas con $\theta$ bajas y factores m dentro de m min esp.	-	-
Prom. Factor m Rótulas con $\theta$ bajas y factores m dentro de m min esp.	-	-

**Tabla 26 Comparación de resultado en rótulas de columnas para el nivel de desempeño de LS**

En este caso se encontró que las rotaciones sobre las rótulas no llegan a alcanzar la máxima del rango mínimo esperado según la tabla 10-8 (ASCE, 2017a), no obstante, las rotaciones máximas obtenidas en las rótulas llegaron a valores del factor m muy cercanos a los esperados según la tabla 10-10<sup>a</sup> (ASCE, 2017a), lo que indicaría que la ductilidad teórica de las rótulas analizadas similar a la mínima esperada.

Adicionalmente también se encontró que cerca del 80% de las rótulas sobrepasa el factor m mínimo esperado y su rango de valores social entre 3.50 y 12.50, con un valor promedio de 7.20, no obstante, estos valores corresponden a los obtenidos al punto de inestabilidad estructural, en donde las rotaciones en las columnas han sido llevadas tan lejos como es posible y por ende no son un buen referente de la ductilidad de diseño de la sección.

Por esta razón se propone que el factor m mínimo esperado para secciones de columnas detalladas según la NSR-10 (AIS, 2010b), que no se encuentran controladas por un mal desarrollo o traslape del refuerzo y cuyas rotaciones la clasifiquen dentro del rango de LS no sea modificado, toda vez que los factores m calculados para el punto de comportamiento fueron muy cercanos al factor m mínimo esperado de la tabla 10-10a (ASCE, 2017a).

### **6.3.2 Para la edificación diseñada sin código de diseño sismo resistente**

### Vigas en el nivel de desempeño de ocupación inmediata (IO)

En el caso de esta estructura no se presentaron rótulas en el punto de inestabilidad estructural, por lo que para el análisis de las rótulas en IO se tomaron todas las que se presentaron para los estados de LS y CP y se evaluaron en el punto justo antes de sobrepasar la rotación para el nivel de desempeño de IO.

Es por esta razón que en este caso no es posible realizar una comparativa entre resultados para varios horizontes de análisis.

Dicho esto, se puede observar en la Tabla 16 que el rango de valores del factor  $m$  obtenidos oscila entre 0.75 y 1.72 y más del 75% de las rótulas analizadas superan el valor de 1.25 esperado según la tabla 10-13 (ASCE, 2017a), lo cual demostraría que se puede llegar a superar el factor  $m$  mínimo esperado pero apenas en un 37%, razón por la cual se concluye que dicho factor  $m$  de 1.25 estaría bien para describir la ductilidad de vigas que no cumplen con un adecuado desarrollo o traslapeo del refuerzo, que es el caso de la mayoría de las rótulas analizadas para la edificación que se estudió en este análisis.

### Vigas en el nivel de desempeño de Preservación de la vida (LS)

En la Tabla 27 se recopila la información obtenida para el punto de inestabilidad estructural y para el análisis de todas las rótulas llevadas al límite antes de sobrepasar el nivel de desempeño de LS.

Para este caso se encontró que el 100% de las rótulas analizadas llegaron a factores  $m$  mayores al mínimo esperado según la tabla 10-13 (ASCE, 2017a), pero además se observó que casi la mitad de las rótulas tuvieron rotaciones por debajo del rango mínimo esperado según la tabla 10-7 (ASCE, 2017a) y aun así los factores  $m$  asociados a estas rótulas sobrepasaron el factor  $m$  mínimo esperado.

Si se tiene en cuenta que para la primera rótula con rotaciones dentro del rango mínimo esperado se obtuvo un factor  $m$  un 77% mayor al factor  $m$  mínimo esperado (2.66) y que el máximo factor  $m$  calculado es 2.73 veces mayor, se podría considerar pertinente aumentar el factor  $m$  mínimo esperado en al menos un 50% con el fin de no subestimar la resistencia teórica que se ha evidenciado que tiene las rótulas analizadas.

Por lo anterior se propone que para rótulas con rotaciones dentro del rango de LS, con espaciamiento entre flejes de  $>d/3$  y con inadecuado desarrollo o traslapeo del refuerzo el factor  $m$  pase de 1.50 a 2.25.

EDIFICIO DISEÑADO SIN CÓDIGO DE DISEÑO SISMO RESISTENTE - COMPARACIÓN DE RESULTADOS PARA EL NIVEL DE DESEMPEÑO DE LS		
Nivel de Desempeño	I.E. - LS	LS
Cantidad de rótulas	13	19
Rango factor m min. Esperado	1.50	1.50
	0.005 a 0.010	0.005 a 0.010
Rango de M/My calculado	0.77 a 1.02	0.94 a 1.02
Cant. Rótulas con M/My < 0.95	15%	5.3%
Cant. Rótulas con M/My > 0.95	85%	94.7%
Rango de Factor m/m tabla 10-7	1.28 a 2.74	1.28 a 2.73
Promedio de Factor m/m tabla 10-7	1.84	1.88
Rango factor m para rótulas con M/My > 0.95	1.92 a 4.10	1.92 a 4.10
Promedio factor m para rótulas con M/My > 0.95	2.57	2.78
Rango factor m para rótulas con M/My < 0.95	3.54 a 4.06	4.05
Promedio factor m para rótulas con M/My < 0.95	3.80	4.05
Rótulas < factor m min esperado	-	-
Rótulas en el rango del factor m min esperado	-	-
Rótulas > factor m min esperado	100.0%	100.0%
	0.0022 a 0.0114	0.002 a 0.0114
Rótulas dentro del rango min esperado de $\theta$	53.8%	57.9%
rango de factor m para rótulas dentro del rango de $\theta$	2.65 a 4.10	2.66 a 4.10
Prom. de factor m para rótulas dentro del rango de $\theta$	3.25	3.15
Rótulas menores al rango min esperado de $\theta$	46.2%	42.1%
rango de factor m para rótulas menores al rango de $\theta$	1.92 a 2.52	1.92 a 3.56
Prom. de factor m para rótulas menores al rango de $\theta$	2.18	2.36
Rótulas con $\theta$ bajas y factores m dentro de m min esp.	0.5%	45.1%
Prom. Factor m Rótulas con $\theta$ bajas y factores m dentro de m min esp.	3.25	2.36

**Tabla 27 Comparación de resultado en rótulas de vigas para el nivel de desempeño de LS**

### Columnas en el nivel de desempeño de ocupación inmediata (IO)

De manera similar a lo comentado para las vigas en IO, en el caso de las columnas se presentaron muy pocas rótulas en IO en el punto de inestabilidad estructural, por lo que el análisis de las rótulas para este nivel de desempeño se realizó sobre las rótulas que alcanzaron el nivel de desempeño de LS, razón por la cual solamente se evaluó un único horizonte de análisis para las rótulas en IO y no es posible hacer una comparación de datos.

Ahora, analizando la información obtenida para éste único horizonte se concluye lo siguiente.

En la Tabla 19 se puede observar que 100% de las rótulas analizadas se encuentra dentro del rango de rotaciones mínimo esperado según la tabla 10.8 (ASCE, 2017a), llegando a factores m de 2.51.

Si se tiene en cuenta que el rango del factor m para columnas en IO no controladas por un inadecuado desarrollo o traslapo del refuerzo está entre 1.00 y 1.70 según la tabla 10-10a (ASCE, 2017a), y que los valores del factor m calculados se encuentra entre 0.64 y 2.51, se podría decir que el rango de factores m considerado en la tabla 10-10a sería coherente con los resultados encontrados, pues la diferencia de valores teóricos del factor m contra

los mínimos esperados no es muy grande y no se estaría subestimando en gran medida a los factores  $m$  teóricos.

Por lo anteriormente descrito se concluye que para rótulas en columnas con rotaciones dentro del rango para IO y que no son controladas por un inadecuado desarrollo o traslapo del refuerzo, el factor  $m$  mínimo esperado es adecuado y consecuente con los factores  $m$  teóricos obtenidos en esta modelación.

#### Columnas en el nivel de desempeño de preservación de la vida (LS)

Debido a que en esta modelación las rótulas en todas las columnas llegaron directamente al nivel de desempeño de LS en el punto de inestabilidad estructural y ninguna llegó al nivel de CP entonces solamente se estudió este horizonte de análisis y no existe más información de otros horizontes para hacer una comparación de resultados.

Dicho esto, en la Tabla 18 se puede observar que las rótulas con rotaciones por debajo del rango mínimo esperado según la tabla 10-8 (ASCE, 2017a) llegan a valores del factor  $m$  cercanos o dentro del rango mínimo esperado según la tabla 10-10a (ASCE, 2017a), lo cual indica que si éstas rótulas tuvieran rotaciones mayores probablemente sobrepasarían los factores  $m$  mínimos esperados, tal y como se observa en el grupo de rótulas cuyas rotaciones se encuentran dentro del rango mínimo esperado y para las cuales sus rotaciones superaron el factor  $m$ , en algunos casos hasta 3.06 veces mayores al máximo esperado.

Sin embargo, en este caso la dispersión de los datos es alta, cerca de un 40% de las rótulas presentan rotaciones dentro del rango mínimo esperado y sus factores  $m$  calculados también se encuentran dentro del rango mínimo esperado, pero otro 38% tiene rotaciones dentro del rango esperado pero sus factores  $m$  superan el rango mínimo esperado.

Debido a esta gran dispersión de los datos se considera inconveniente proponer el aumento del rango del factor  $m$  mínimo esperado para las rótulas con un adecuado desarrollo o traslapo del refuerzo.

## 7 CONCLUSIONES

Habiendo analizado los resultados obtenidos para las rótulas de pórticos en concreto reforzado detalladas con y sin provisiones sísmicas se concluye lo siguiente:

- Los valores obtenidos para el factor  $m$  en rótulas de vigas controladas por flexión y con estribos separados a menos de  $d/3$  en la región donde se espera que se produzca la rótula, obtuvieron rotaciones dentro del rango mínimo esperado según la tabla 10-7 de la ASCE 41-17 (ASCE, 2017a), sin embargo los factores  $m$  asociados a esta rotaciones superaron a los mínimos esperados según la tabla 10-13 (ASCE, 2017a), llegando en algunos casos a triplicar el valor máximo de este rango, lo cual corrobora lo mencionado en el punto anterior.
- En vista de que los resultados obtenidos en vigas controladas por flexión y con estribos separados a menos de  $d/3$  en la región donde se espera que se produzca la rótula, se ha propuesto mantener el rango del factor  $m$  para las rótulas en el nivel de desempeño de IO, mientras que de la información obtenida para las rótulas en el nivel de desempeño de LS, se propone aumentar el valor mínimo del rango en un 50%, llevando el rango mínimo esperado de 2.00 a 6.00 a 3.00 a 6.00.
- Para el caso de vigas controladas por flexión, con estribos separados a menos de  $d/3$  en la región donde se espera que se produzca la rótula y cuyas rotaciones las clasifiquen en el nivel de desempeño de CP, a pesar de que los resultados que muestran mayores valores de  $m$ , no se considera pertinente proponer un aumento en los mismos, ya que en este nivel de desempeño se tiene poco margen frente al colapso y cualquier aumento de este valor podría conllevar en una sobreestimación de la ductilidad del elemento, condición que iría en contravía de la seguridad estructural.
- En cuanto a los factores  $m$  de columnas no controladas por un inadecuado desarrollo o traslapo del refuerzo se lograron obtener datos para los niveles de desempeño de IO y LS en la edificación diseñada según la NSR-10 (AIS, 2010b), encontrando que las columnas para el rango de IO obtuvieron factores  $m$  mayores al mínimo esperado según la tabla 10-10a (AIS, 2010a), llegando a duplicar este valor con una rotación asociada que se encontraba en el límite de este rango según las disposiciones de la tabla 10-8 (ASCE, 2017a), por lo cual se ha considerado apropiado aumentar el factor  $m$  mínimo esperado en un 30%, pasando el factor  $m$  de 1.70 a 2.20.
- Respecto a las columnas en el rango de rotaciones para LS no se obtuvieron rótulas con valores de rotación en el límite del rango mínimo esperado, sin embargo, los factores  $m$  obtenidos fueron muy cercanos a los esperados según la tabla 10-10a (ASCE, 2017a), lo que indica que la ductilidad teórica de las rótulas es similar a la esperada, razón por la cual en este caso no se considera necesario proponer un aumento en el factor  $m$  para columnas no controladas por un inadecuado desarrollo

o traslapo del refuerzo con rotaciones dentro del rango para el nivel de desempeño de LS.

- Respecto a los factores  $m$  calculados para estas rótulas en vigas con rotaciones en el rango de IO que no cumplen con un adecuado desarrollo o traslapo del refuerzo, se encontró que el factor  $m$  calculado apenas sobrepasa al factor  $m$  mínimo esperado según la tabla 10-13 (ASCE, 2017a), mientras que las rótulas con rotaciones dentro del rango de LS llegaron a factores  $m$  teóricos que superaron en casi un 80% al mínimo esperado aún con rotaciones que apenas sobrepasan el mínimo valor del rango mínimo esperado. Debido a esto se propone que, en rótulas de vigas controladas por un inadecuado desarrollo o traslapo del refuerzo y con estribos con una separación menor a  $d/2$ , el factor  $m$  para IO no sea modificado pues se considera adecuado, pero para LS se propone un aumento del 50%, pasando el valor del factor  $m$  de 1.50 a 2.25.
- En el caso de las columnas del edificio diseñado antes de la entrada en vigor del CCCSR-84 se obtuvo información de las rótulas cuyo refuerzo tiene un adecuado desarrollo o traslapo del refuerzo, sobre lo cual cabe aclarar que son elementos que no cuentan con una cuantía de refuerzo transversal que cumpla con lo mínimo especificado según la NSR-10 (ASCE, 2017a). En éstas rótulas se observó que la variación de la relación entre el momento último y el momento de fluencia es mucho más amplio, llegando a momentos últimos hasta un 70% mayores al de fluencia, sin embargo, en este caso no se puede decir que este aumento sea aprovechable en el diseño puesto que para llegar a esto de manera segura se debería contar con un adecuado confinamiento que permita desarrollar de manera segura la ductilidad del elemento, lo cual se observó que no existe en los despieces con las características modeladas.
- En cuanto a los factores  $m$  para éstas columnas con refuerzo transversal menor al mínimo, se encontró que para el rango de rotaciones de IO los valores teóricos no se alejan mucho del factor  $m$  mínimo esperado según la tabla 10-10a (ASCE, 2017a), por lo que se considera que no es necesario aumentar el factor  $m$  en este caso, pero en el caso de las rótulas dentro del rango de rotaciones para LS se obtuvieron factores  $m$  teóricos muy dispersos que no permitieron encontrar una tendencia y por esta razón se concluyó que es inconveniente proponer un factor  $m$  diferente a los de la tabla 10-10a.
- Es importante aclarar que todas las sugerencias realizadas respecto a los ajustes sobre los factores  $m$  se basan en el estudio de únicamente dos edificaciones, información que no es suficiente para ser concluyente y por lo cual no es posible generalizar mientras que no se realicen más estudios y se obtengan más datos.
- Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en esta investigación se considera necesario seguir haciendo investigaciones al respecto, estudiando edificaciones con diferentes capacidades de disipación de energía, normas de diseño sismo resistente (incluyendo el CCCSR-84 y la NSR-98) y sistemas estructurales, con el fin de ahondar en el comportamiento de las estructuras construidas en nuestro país



atreves del tiempo, que permitan adaptar las metodologías de evaluación y rehabilitación de edificaciones existentes contenidas en la ASCE 41-17 y usarlas mejorando el grado de confiabilidad de los resultados obtenidos.

## 8 RECOMENDACIONES

En vista de los resultados obtenidos y con el fin de avanzar en los estudios acá presentados se realizan las siguientes recomendaciones:

- Se debe procurar conseguir planos con el detallado de despieces lo suficientemente completos para poder definir las condiciones de ganchos, longitudes de desarrollo y traslajos, con el fin de poder definir cada una de las rótulas correctamente y sin suposiciones.
- Se debería hacer una evaluación un poco mas a fondo de la modelación de rótulas de columnas con ETABS, con el fin de definir las diferencias y procedimientos para poder compatibilizar la información entre ETABS y XTRACT y no incurrir en distorsiones en la información debidas a las diferencias entre ambos programas.
- Se considera adecuado realizar la evaluación de otra edificación diseñada sin provisiones sísmicas, además de una diseñada con el CCCSR-84, la primera para corroborar la información obtenida en este trabajo y la segunda para complementarlo, pues entre el CCCSR-84 y la NSR-10 (AIS, 2010b) existen diferencias relevantes en el detallado de los elementos que se considera importante que sean evaluadas.
- En este caso las edificaciones modeladas no permitieron verificar el comportamiento de rótulas en vigas con rotaciones dentro del rango de CP y controladas por un inadecuado desarrollo o traslajo del refuerzo, por lo que sería importante buscar una edificación que si permita conocer la ductilidad de estos elementos para el detallado de vigas realizado en nuestro país.
- De manera similar ocurre con las columnas, en cuyo caso no se obtuvieron resultados para rótulas controladas por un inadecuado desarrollo o traslajo del refuerzo para ningún nivel de desempeño, principalmente por las suposiciones que se hicieron sobre el detallado del refuerzo de la edificación diseñada sin provisiones sísmicas, puesto que aunque si se modelaron rótulas con estas características, todos los resultados obtenidos fueron sobre rótulas que fueron clasificadas como elementos sin esta deficiencia, esto debido al desconocimiento de la información necesaria. Por lo cual también sería importante obtener información de una edificación que permita modelar rótulas con este tipo de deficiencia en su detallado.
- El comportamiento descrito en este trabajo debería ser corroborado en laboratorio por medio de la falla de elementos que cumplan con las características de materiales y detallados de refuerzo usados en las dos edificaciones acá analizadas, pero además de elementos detallados como se recomienda en el CCCSR-84.
- Se debería continuar con este estudio evaluando otros sistemas estructurales y capacidades de disipación de energía sísmica que permitan adaptar a nuestro país todos los factores contenidos en la ASCE 41-17 y así poder hacer un uso más adecuado de las metodologías allí descritas para la evaluación y rehabilitación de edificaciones existentes.

## BIBLIOGRAFIA

- AIS. (2010a). *NSR-10*.
- AIS. (2010b). *REGLAMENTO COLOMBIANO DE CONSTRUCCIÓN SISMO RESISTENTE (NSR-10)*.
- AIS. (2010c). *REGLAMENTO COLOMBIANO DE CONSTRUCCIÓN SISMO RESISTENTE (NSR-10)*.
- Applied Technology Council. (1995). *Atc 19 Structural response modification*.
- Applied Technology Council. (1996a). ATC-40. 1996. Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings. Redwood City, CA: Applied Technology Council. En *Seismic safety commisionsion* (Vol. 1, Número November 1996, p. 334).
- Applied Technology Council. (1996b). ATC-40. 1996. Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings. Redwood City, CA: Applied Technology Council. En *Seismic safety commisionsion* (Vol. 1, Número November 1996, p. 334).
- Applied Technology Council. (2005a). *Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures*. 392.  
<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Improvement+of+Nonlinear+Static+Seismic+Analysis+Procedures#2%5Cnhttp://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:440,+Improvement+of+nonlinear+static+seismic+analysis+procedures#2>
- Applied Technology Council. (2005b). *Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures*. 392.
- Arroyave, H. (2013). *EVALUACIÓN DEL COEFICIENTE DE CAPACIDAD DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA DADO POR EL CÓDIGO COLOMBIANO DE DISEÑO SÍSMICO DE PUENTES DE 1995, PARA COLUMNAS Y PÓRTICOS EN PUENTES TÍPICOS*. 236.  
<http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/130118/Memoria.pdf>
- ASCE. (2017a). *ASCE 41-17*. <http://ascelibrary.org/doi/book/10.1061/9780784414859>
- ASCE. (2017b). *Asce/Sei 41-17*.
- Caltrans. (2019). *Seismic Design Criteria*.  
<http://ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/9780784411179.ch02>
- Carlos, J., Gonz, V., Botero, J. C., & Rochel, R. (2005). Propiedades mecánicas del acero de refuerzo utilizado en Colombia. *Ingeniería y Ciencia*, 1(1), 67–76.  
<https://www.redalyc.org/pdf/835/83510105.pdf>

- Fema. (2005a). *Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures FEMA 440 FEMA nehrp.*
- Fema. (2005b). *Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures FEMA 440 FEMA nehrp.*
- FEMA P440A. (2009). Effects of Strength and Stiffness Degradation on Seismic Response. *Fema P440a, June*, 312.
- H. Krawinkler, & A. A. Nassar. (1992). *Seismic design based on ductility and cumulative damage demands and capacities.*
- Hernandez, G. (2014a). METODOLOGÍA PROPUESTA PARA LA DETERMINACIÓN DE FACTORES REDUCTORES POR SOBRESRESISTENCIA Y DUCTILIDAD DE ESTRUCTURAS INDUSTRIALES. *Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural*. <https://doi.org/10.13140/2.1.2798.8805>
- Hernandez, G. (2014b). METODOLOGÍA PROPUESTA PARA LA DETERMINACIÓN DE FACTORES REDUCTORES POR SOBRESRESISTENCIA Y DUCTILIDAD DE ESTRUCTURAS INDUSTRIALES. *Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural*. <https://doi.org/10.13140/2.1.2798.8805>
- Hibbeler R. (2011). *Hibbeler - Mecánica de materiales 8a edición.*
- icontec. (2015). *NTC 2289.*
- Kent, D., & Park, R. (1971a). *Flexural Members With Confined Concrete* (pp. 1970–1989).
- Kent, D., & Park, R. (1971b). *Flexural Members With Confined Concrete* (pp. 1970–1989).
- López, P. (2014). ANEXO 1 . *Propuesta de Adaptación del Documento ASCE/SEI31-03 "Evaluación Sísmica de Edificaciones Existentes"*. 1–518.
- Mander, J. B., Priestley, M. J. N., & Park, R. (1988a). Theoretical Strss-Strain Model for Confined Concrete. *J. Struct. Eng*, 114(8), 1804–1826.
- Mander, J. B., Priestley, M. J. N., & Park, R. (1988b). Theoretical Strss-Strain Model for Confined Concrete. *J. Struct. Eng*, 114(8), 1804–1826.
- Miranda E., & Bertero V. (1994). *Evaluation of strength reduction factors for earthquake resistant design.*
- Newmark, N., & Hall, W. (1973). *Seismic desing criteria for nuclear reactors.*
- Olejua F., Torres N., & Quiroga P.N. (2013). *Propuesta de traducción y adaptación a Colombia de la Norma ASCE /SEI 41-06 Seismic Rehabilitation of Existing Buildings.*

- Park, R., & Paulay, T. (1983a). *Estructuras de Concreto Reforzado*. 769.
- Park, R., & Paulay, T. (1983b). *Estructuras de Concreto Reforzado*. 769.  
[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0102-44502003000200003&lng=pt&tlng=pt%0Ahttp://doi.wiley.com/10.1002/9780470172834%0Ahttps://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=QPDvchXv5zUC&pgis=1](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-44502003000200003&lng=pt&tlng=pt%0Ahttp://doi.wiley.com/10.1002/9780470172834%0Ahttps://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=QPDvchXv5zUC&pgis=1)
- Priestley, M. J. N., Calvi, G. M., & Kowalsky, M. J. (2007). *Displacements-based Seismic Desing of Structures* (pp. 133–151).
- R.Park, Priestley, M. J. N., & Gill, W. D. (1982a). Ductility of Square Confined Concrete Columns. En *Journal of the Structural Division* (Vol. 108, pp. 929–950).
- R.Park, Priestley, M. J. N., & Gill, W. D. (1982b). Ductility of Square Confined Concrete Columns. En *Journal of the Structural Division* (Vol. 108, pp. 929–950).

## **ANEXOS**

**ANEXO A - PLANOS ESTRUCTURALES DE LA EDIFICACIÓN DISEÑADA SEGÚN NSR-10**

**ANEXO B - PLANOS ESTRUCTURALES DE LA EDIFICACIÓN DISEÑADA ANTES DEL  
CCCSR-84**



**ANEXO C - CÁLCULO DE RÓTULAS PLÁSTICAS PARA LA EDIFICACIÓN DISEÑADA  
SEGÚN NSR-10**

**ANEXO D - CÁLCULO DE LAS RÓTULAS PLÁSTICAS PARA LA EDIFICACIÓN  
DISEÑADA ANTES DEL CCCSR-84**

**ANEXO E - CÁLCULO DEL PUNTO DE COMPORTAMIENTO PARA LA EDIFICACIÓN  
DISEÑADA SEGÚN NSR-10**

**ANEXO F - CÁLCULO DEL PUNTO DE COMPORTAMIENTO PARA LA EDIFICACIÓN  
DISEÑADA ANTES DEL CCCSR-84**

**ANEXO G - ANÁLISIS DE RÓTULAS PARA LA EDIFICACIÓN DISEÑADA SEGÚN NSR-10**

**ANEXO H - ANÁLISIS DE RÓTULAS PARA LA EDIFICACIÓN DISEÑADA ANTES DEL  
CCCSR-84**