



**MÉTODO N2 PARA LA EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO SÍSMICO DE SISTEMAS
DE MUROS DE CONCRETO REFORZADO: CASO DE ESTUDIO.**

David Andrés González Tabares

Duván Steven Cardona Amariles

Especialización en estructuras

Facultad de Ingeniería

Asesor: Dr. Juan Carlos Vélez Cadavid

Medellín, 2025.

Cita	(Cardona Amariles & González Tabares, 2025)
Referencia	Cardona Amariles, D., & González Tabares, D. A. (2025). <i>Método N2 para la evaluación del desempeño sísmico de sistemas de muros de concreto reforzado: caso estudio.2025</i> [Trabajo de grado especialización]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
Estilo APA 7 (2020)	



Especialización en Análisis y Diseño de Estructuras , Cohorte XII.

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

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

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

DEDICATORIA

Dedicamos este trabajo a nuestras familias, por su amor, comprensión y apoyo incondicional durante todo este proceso académico. Su confianza y acompañamiento fueron el impulso que nos permitió avanzar con determinación y culminar esta etapa con éxito.

A nuestros profesores, por su dedicación, orientación y por compartir con nosotros su conocimiento y experiencia, contribuyendo de manera invaluable a nuestra formación profesional y personal.

Y a nuestra universidad, por brindarnos los espacios, recursos y oportunidades necesarias para desarrollar nuestras capacidades y alcanzar este importante logro académico.

AGRADECIMIENTOS

Expresamos nuestro más sincero agradecimiento a todos quienes hicieron posible la realización de este trabajo.

A nuestros profesores, por su dedicación, compromiso y por compartir con nosotros sus conocimientos, experiencias y consejos, los cuales fueron fundamentales para nuestro crecimiento académico y profesional. Su orientación constante nos motivó a superar cada desafío con esfuerzo y responsabilidad.

A nuestra universidad, por proporcionarnos un entorno de aprendizaje integral y enriquecedor, así como los recursos, el acompañamiento y las oportunidades que contribuyeron de manera decisiva al fortalecimiento de nuestra formación profesional y a la consecución de este importante logro académico.

Y a nuestros compañeros de clase, por su colaboración, apoyo y amistad durante todo el proceso de estudios. El intercambio de ideas, el trabajo en equipo y las experiencias compartidas hicieron de esta etapa una vivencia significativa y valiosa tanto en lo académico como en lo personal.

TABLA DE CONTENIDO

1	MOTIVACIÓN	7
2	OBJETIVOS	8
	2.1 Objetivo general	8
	2.2 Objetivos específicos.....	8
3	INTRODUCCIÓN	9
4	CUERPO.....	11
5	CASO ESTUDIO.....	16
	5.1 Parámetros de la estructura para el muro en análisis	16
	5.2 Propiedades mecánicas de los materiales empleados.....	18
	5.3 Casos de carga empleados.....	20
	Datos generales del análisis sísmico	22
	Datos del método de la fuerza horizontal equivalente.....	22
	5.4 Programa de análisis para desplazamientos y Momentos – Curvatura.	27
	5.5 Aplicación del programa CUMBIA WALLS v0.1 para el análisis del comportamiento estructural de muros de concreto reforzado.	31
	5.6 Resultados.....	34
	5.7 Resultados método N2 aplicado al muro de concreto reforzado.....	39
6	ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES.....	44
7	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	45
8	ANEXOS	46

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Definición de los estados límites de la estructura.	11
Figura 2. Curva de capacidad de una estructura de muros de concreto.....	13
Figura 3. OpenAI. (2025). Curva de capacidad y distorsión de entrepiso por nivel mediante análisis.....	14
Figura 4. Planta estructural muro de concreto reforzado piso 1.	15
Figura 5. Planta elevación resistencias por piso.	19
Figura 6. Diagrama de flujo NSR-10 – Método FBD.....	24
Imagen 7. Diseño estructural muro en análisis.	26
Figura 8. Código Matlab Cumbia Walls.	30
Figura 9. Planta estructural muro de concreto reforzado piso 1.	32
Figura 10. Resultados del programa cumbia WALLS v01.	36
Figura 11. Diagrama momento curvatura Cumbia Walls.....	37
Figura 12. Estados de servicio Cumbia walls.	37
Figura 13. Diagrama fuerza desplazamiento a partir de resultados de Cumbia Walls.....	42
Figura 14. Diagrama Momento-Curvatura a partir de resultados de Cumbia Walls.....	42
Figura 15. Relación de ductilidad.	43
Figura 16. Espectro Demanda VS Capacidad de ductilidad.	44

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Resistencias y módulos de elasticidad del concreto de la estructura.	18
Tabla 2. Carga muerta y viva en la cimentación.	21
Tabla 3. Densidades de los materiales.....	21
Tabla 4. Cargas muertas por acabados.	21
Tabla 5. Datos para el análisis de la fuerza horizontal equivalente.	22
Tabla 6. Modos de vibración de la estructura.	23
Tabla 7. Análisis de cortante basal sísmico.....	23
Tabla 8. Resultados método N2	39
Tabla 9. Aproximación bilineal.	40

1 MOTIVACIÓN

En Colombia y gran parte de Latinoamérica, la actividad sísmica representa una amenaza constante debido a la interacción entre las placas tectónicas de Nazca, Suramérica y Caribe. Esta condición exige que los ingenieros estructurales adopten métodos de análisis que trasciendan el enfoque elástico tradicional, el cual, si bien resulta útil para el dimensionamiento de elementos, no refleja de manera precisa el comportamiento real de las estructuras frente a sismos severos.

La Norma Colombiana de Construcción Sismo Resistente (NSR-10) reconoce la importancia de emplear enfoques de evaluación que incorporen el comportamiento inelástico de las estructuras. En este marco, el diseño sísmico basado en desplazamientos (DDBD) surge como una metodología que permite estimar directamente la respuesta estructural en términos de deformaciones y desplazamientos, priorizando el desempeño real de los sistemas estructurales ante demandas sísmicas intensas. Este enfoque supera las limitaciones de los métodos puramente elásticos, al incorporar explícitamente la ductilidad, la disipación de energía y la secuencia de formación de mecanismos de falla.

La presente monografía se centra en la aplicación del método N2 basado en desplazamientos a muros estructurales de concreto reforzado, con el propósito de comprender de manera más profunda su comportamiento sísmico. Este interés se justifica en su uso extendido en edificaciones de mediana y gran altura, donde desempeñan un papel esencial como elementos de resistencia lateral. Adicionalmente, la normativa vigente presenta vacíos en cuanto a lineamientos específicos para el abordaje detallado del comportamiento no lineal de estos elementos, lo que refuerza la necesidad de explorar este enfoque.

Según Birely (2019) y Pujol & Magenes (2018), los métodos basados en desplazamientos constituyen una herramienta más cercana a la evaluación del desempeño que a un procedimiento estrictamente de diseño, ya que ofrecen una visión más realista del comportamiento inelástico de las estructuras. Esta perspectiva es esencial para anticipar fallas, detectar debilidades —como entrepisos flexibles o irregularidades de rigidez— y respaldar la toma de decisiones en procesos de reforzamiento o verificación de la seguridad estructural.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Evaluar el desempeño sísmico de un muro perteneciente a un sistema estructural de muros de concreto reforzado previamente diseñado, mediante la implementación del método N2, con el fin de determinar su ductilidad y punto de desempeño, complementando el análisis con una revisión bibliográfica que permita contrastar y validar los resultados obtenidos frente al análisis lineal convencional basado en fuerzas (FBD).

2.2 Objetivos específicos

- Realizar una revisión bibliográfica sobre el diseño sísmico basado en desplazamientos y el método N2, considerando sus fundamentos teóricos, el marco normativo vigente y las experiencias relevantes en la evaluación de sistemas estructurales de muros de concreto reforzado.

- Identificar los parámetros mecánicos y geométricos más influyentes en la respuesta sísmica de sistemas de muros de concreto reforzado, con especial énfasis en los desplazamientos, la ductilidad y los mecanismos de formación de rótulas plásticas.
- Implementar el método N2 en el modelo del caso de estudio, a fin de determinar el punto de desempeño y la capacidad de disipación de energía del muro analizado dentro del sistema estructural de muros de concreto reforzado.

3 INTRODUCCIÓN

Los muros de concreto reforzado cumplen un papel fundamental en la estabilidad de edificaciones sismo-resistentes debido a su elevada rigidez, resistencia y capacidad de disipación de energía. Son ampliamente utilizados en construcciones de mediana y gran altura por su eficacia en el control de desplazamientos laterales y su buen desempeño frente a cargas sísmicas. No obstante, los métodos de análisis lineal, tradicionalmente empleados en el diseño estructural, presentan limitaciones al momento de evaluar el comportamiento post-elástico de una estructura sometida a demandas sísmicas severas (Moehle, 2020). Dichos métodos idealizan el comportamiento de los materiales, dificultando la representación de fenómenos como la degradación de rigidez, la formación de rótulas plásticas o la redistribución de esfuerzos, aspectos determinantes en escenarios de sismo intenso.

En este contexto, el diseño sísmico basado en desplazamientos (DDBD) se plantea como una alternativa para superar las limitaciones del análisis lineal, al estimar directamente la respuesta inelástica de la estructura en función de desplazamientos y deformaciones. Este método permite evaluar con mayor precisión la capacidad de disipación de energía, la ductilidad disponible y la

evolución de los mecanismos de daño, aspectos fundamentales para garantizar la seguridad y el desempeño adecuado de los sistemas estructurales de muros de concreto reforzado.

En el presente estudio, se aplicará el método basado en desplazamientos a un caso de estudio de muros de concreto reforzado previamente diseñados conforme a la NSR-10 mediante un análisis modal espectral. A partir de este diseño inicial, se desarrollará la evaluación no lineal orientada a la construcción de curvas de capacidad que describan la relación entre desplazamientos y demandas sísmicas. Dichas curvas permitirán contrastar objetivamente el desempeño estimado por ambos enfoques: lineal y basado en desplazamientos, verificando la validez del diseño original y determinando el nivel de desempeño alcanzado frente a diferentes escenarios de demanda sísmica.

La Figura 1 ilustra la relación fuerza–desplazamiento de una estructura y define tres estados límite de desempeño sísmico:

- Servicio (Δ_s): respuesta casi elástica, con daños mínimos y sin afectación de elementos no estructurales.
- Control de daños (Δ_d): se permiten daños reparables y derivas controladas para evitar afectaciones mayores.
- Supervivencia o colapso (Δ_u): la estructura debe mantenerse en pie frente a un sismo severo, aunque pueda quedar inutilizable.

En conjunto, el diagrama muestra la transición desde el comportamiento elástico hasta el colapso, base del diseño sísmico por desempeño.

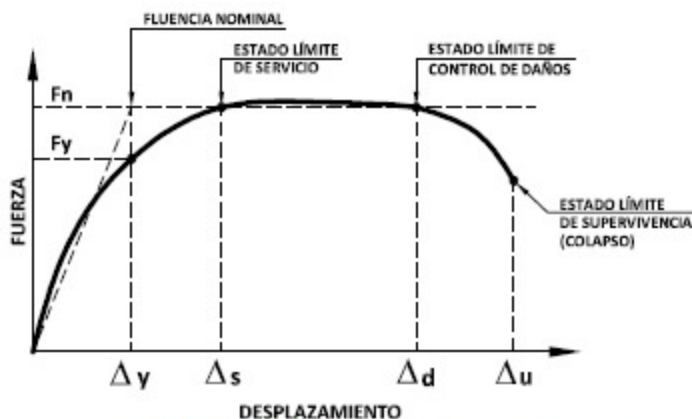


Figura 1. Definición de los estados límites de la estructura.
Fuente: Pérez Vargas Francisco Javier. (201). Diseño sísmico basado en desplazamientos (DDBD)

4 CUERPO

El método basado en desplazamientos (DDBD) ha adquirido un papel central en la ingeniería estructural contemporánea, particularmente en el diseño y evaluación sísmica de edificaciones con muros de concreto reforzado. En países con alta amenaza sísmica, como Colombia, se ha hecho evidente la necesidad de superar los enfoques puramente elásticos, ya que los métodos basados en fuerzas (FBD) resultan insuficientes para representar con precisión los mecanismos de falla y la capacidad de disipación de energía de las estructuras.

Diversos estudios han contribuido al entendimiento de este tema. Marín (2018) demuestra que el DDBD permite identificar con mayor precisión las zonas críticas susceptibles de daño, aspecto clave en edificaciones donde se busca garantizar un comportamiento dúctil. De forma complementaria, Tapia (2013) subraya que este enfoque facilita la estimación de las deformaciones

inelásticas y, por tanto, aporta una visión más completa del proceso progresivo de colapso. Más aún, el modelo propuesto por Tapia Mejía incorpora la consideración de múltiples modos de vibración, lo cual resulta particularmente relevante en estructuras con irregularidades en planta o elevación. Aunque este enfoque añade complejidad a la modelación, se ha comprobado que mejora la correlación entre el daño estructural previsto y el observado experimentalmente o en simulaciones numéricas.

Un aspecto recurrente en la literatura es la influencia de parámetros geométricos y mecánicos sobre la respuesta sísmica de los muros. Marín (2018) identifica variables como la densidad de muros, la esbeltez, la relación de aspecto y el nivel de carga axial como determinantes del comportamiento global, ya que condicionan la capacidad de desarrollar mecanismos de deformación controlada. De forma similar, Toapanta y Vélez (2024) destacan la importancia del detallado del refuerzo y de la adecuada conformación de elementos de borde, factores directamente vinculados con la ductilidad y resistencia del sistema estructural. Estos hallazgos reafirman la necesidad de un enfoque basado en desplazamientos para captar los efectos de la interacción entre diseño, geometría y demanda sísmica.

La comparación entre los métodos basados en fuerzas y el DDBD refuerza este planteamiento. Según Toapanta y Vélez (2024), el análisis tradicional basado en fuerzas tiende a subestimar las deformaciones y no logra representar la redistribución de esfuerzos posterior a la fluencia. Por el contrario, el método de los desplazamientos permite construir curvas de capacidad que evidencian la rigidez inicial, el punto de fluencia y la resistencia última, tal como se aprecia en la Imagen 2. Estas curvas constituyen una herramienta fundamental para identificar el punto de desempeño de la estructura y compararlo con diferentes configuraciones y demandas sísmicas.

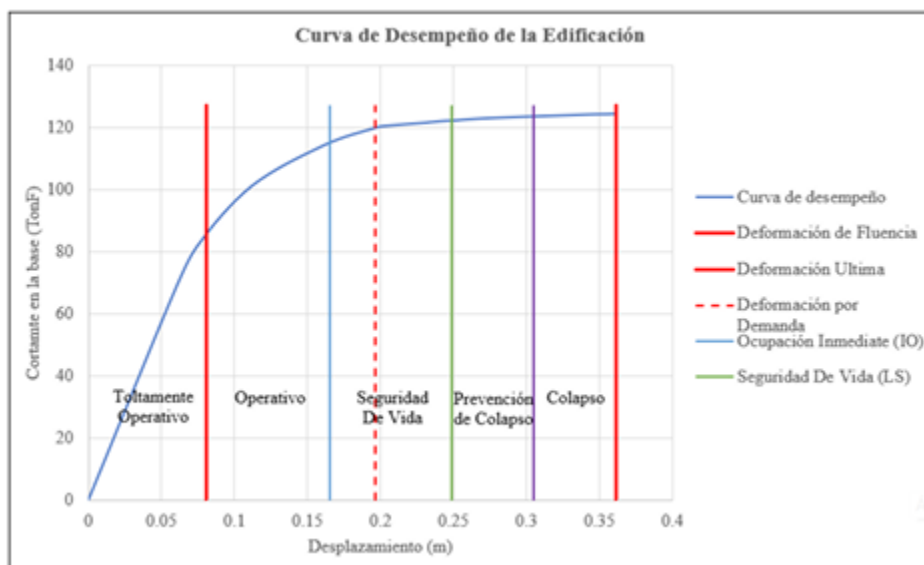


Figura 2. Curva de capacidad de una estructura de muros de concreto.
Fuente: Toapanta y Vélez (2024). Diseño estructural con análisis estático no lineal (Pushover) en una edificación de seis pisos de hormigón armado

Un componente esencial de este enfoque es la estimación del punto de desempeño estructural en relación con los niveles definidos por normas como la NSR-10. Vargas Pérez (2019), mediante el método N2, establece la intersección entre la curva de capacidad y la demanda sísmica, verificando así el cumplimiento de los estados de ocupación inmediata, seguridad de vida o prevención del colapso. Resultados similares fueron obtenidos por Toapanta y Vélez (2024), quienes validaron sus hallazgos mediante simulaciones avanzadas en software especializado, lo que demuestra la aplicabilidad del método en la práctica profesional.

Si bien el DDBD no sustituye a los métodos dinámicos no lineales, constituye una alternativa eficiente tanto para estudios preliminares como para verificaciones en fases avanzadas de diseño. Tal como argumenta Tapia (2013), este método ofrece una representación simplificada

pero útil del comportamiento inelástico de las estructuras, siempre que se complemente con un criterio ingenieril sólido y, de ser posible, con respaldo experimental.

Entre las limitaciones más citadas destacan la sensibilidad a los patrones de carga lateral y la suposición de que la forma de desplazamiento permanece constante durante toda la incursión no lineal. Esta hipótesis resulta válida en edificaciones regulares dominadas por el primer modo de vibración, pero pierde precisión en estructuras con irregularidades en planta o altura, muros esbeltos o sistemas donde los modos superiores adquieren relevancia. En tales casos, el método de los desplazamientos tiende a subestimar las demandas en niveles superiores o a sobreestimarlas en inferiores, como lo muestra la Figura 3, en la que se evidencia una concentración de distorsión en el primer nivel.

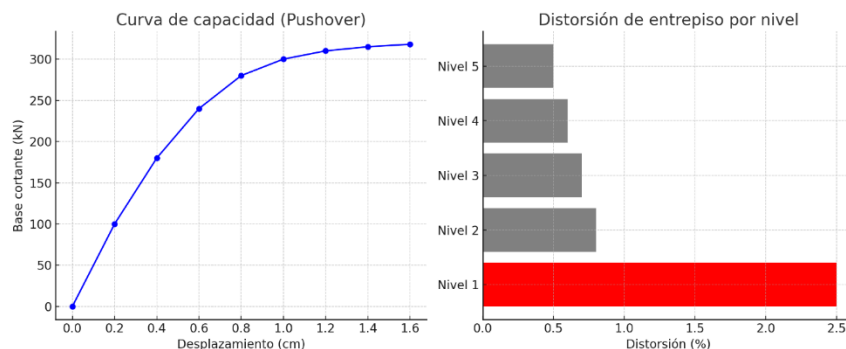


Figura 3. OpenAI. (2025). Curva de capacidad y distorsión de entrepiso por nivel mediante análisis

Fuente: OpenAI.

En conclusión, la revisión bibliográfica confirma que el método basado en desplazamientos aplicado a muros de concreto reforzado constituye un avance metodológico relevante dentro del diseño sísmico basado en desempeño. Su implementación permite identificar vulnerabilidades, cuantificar la ductilidad disponible y establecer niveles de desempeño realistas, tal como se

observa en la Imagen 3. Si bien presenta limitaciones, sus aportes en la comprensión del comportamiento post-elástico justifican su inclusión en la práctica de diseño y evaluación estructural, en particular en contextos de alta amenaza sísmica como el colombiano.

En esta monografía se busca profundizar en este enfoque a través del análisis de un muro en voladizo de concreto reforzado (véanse Imagen 4), con el propósito de evidenciar en la práctica los aspectos discutidos en la literatura, contrastar sus alcances y limitaciones, y aportar criterios para una aplicación más consciente del método de los desplazamientos en la ingeniería estructural.

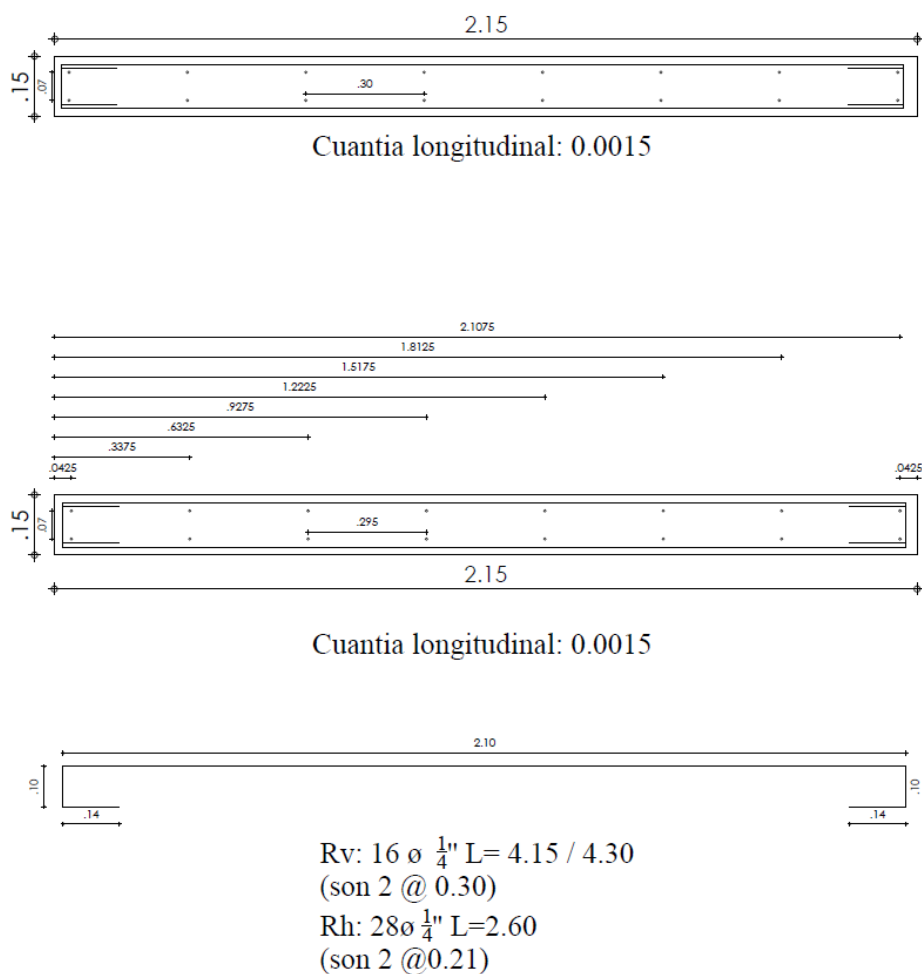


Figura 4. Planta estructural muro de concreto reforzado piso 1.
Fuente: Risk and Design Consulting - R&DC (2024).

5 CASO ESTUDIO

5.1 Parámetros de la estructura para el muro en análisis

Definición de parámetros para el análisis modal espectral:

Información del proyecto:

- Localización: Bello, Antioquia.
- Sistema estructural: Muros de carga.
- Uso de la edificación: Vivienda
- Número de losas: 30 (Piso 1 a cubierta)
- Altura medida desde el nivel inferior a la cubierta principal: 73.95 m.
- Sistema de entrepiso: Losa maciza de 10 cm de espesor.
- Sistema de cimentación: Pilas pre-excavadas manualmente.
- Material estructural: Concreto reforzado.
- Grupo de uso: I (Estructura de ocupación normal).
- Coeficiente de importancia: 1.0.
- Capacidad de disipación de energía: Especial (DES), de acuerdo a la tabla A.3-1 Sistema estructural de muros de carga no permite trabajar DMO para alturas superiores a 50 metros en zonas de amenaza sísmica intermedia.
- Irregularidades:
 - Irregularidad en planta, ϕ_p : 1.0
 - Irregularidad en altura, ϕ_a : 1.0
 - Ausencia de redundancia, ϕ_r : 1.0
- Coeficiente de capacidad de disipación de energía básico, R_o : 5.00
- Coeficiente de capacidad de disipación de energía empleado, R : 5.00, mediante las curvas de capacidad de los elementos más críticos de la edificación se determinará si el refuerzo dispuesto alcanza la ductilidad estimada por la norma NSR-10.

Parámetros sísmicos:

- Tipo de perfil de suelo: C.
- Coeficientes de sitio
 - Amplificación en zona de periodos cortos, F_a : 1.20
 - Amplificación en zona de periodos intermedios, F_v : 1.60
- Coeficiente de aceleración:

- Aceleración pico efectiva, A_a : 0.15
- Velocidad pico efectiva, A_v : 0.20
- Zona de amenaza sísmica: Intermedia
- Método de análisis empleado: Análisis dinámico elástico (modal espectral)

Para el diseño a partir del análisis dinámico elástico se tuvieron en consideración las siguientes hipótesis:

- La estructura se idealiza empotrada en la base
- Combinación direccional empleada: SRSS
- Combinación modal: CQC
- Método de diseño de los elementos de concreto: Resistencia última.
- Se asume la hipótesis de diafragma rígido para la edificación y, por tanto, en el modelo matemático se aplica constricción de diafragma rígido en todos los niveles.
- La estructura no tiene ningún tipo de irregularidad.
- Las losas y dinteles no aportan rigidez lateral al sistema (los muros toman la totalidad del sismo). Con el fin de garantizar esta condición, los dinteles se articulan a momento y torsión en sus extremos y las losas se modelan como elementos tipo “membrana” sin capacidad por fuera del plano.
- Las derivas se evalúan según NSR-10 A.6.3.1.2.
- Los cortantes basales utilizados en el diseño fueron los calculados con el método de análisis modal espectral y fueron ajustados al 80% del obtenido con el análisis pseudo-estático.
- Se utiliza reducción de carga viva por número de pisos soportados según NSR-10 B.4.5.2. para el diseño de los muros y la cimentación.
- El diseño a flexión y carga axial de los muros se hace empleando secciones compuestas según lo indicado en NSR-10 C.21.9.5.2.
- La necesidad de emplear elementos de borde se evaluó según lo indicado en C.21.9.6.2.
- En el análisis y diseño de la edificación se tuvieron en cuenta los efectos de segundo orden por medio de un análisis $P-\Delta$ que considera la influencia de las cargas axiales en los desplazamientos horizontales y fuerzas internas de la estructura. Para la revisión de $P-\Delta$ se tuvo en cuenta la siguiente combinación de cargas: 1.0 Dead + 1.0 SW + 1.0 Live.

5.2 Propiedades mecánicas de los materiales empleados

Acero de refuerzo

- Refuerzo longitudinal y transversal: Resistencia, $f_y = 4200 \text{ kgf/cm}^2$
- Mallas electrosoldadas: Resistencia, $f_y = 4900 \text{ kgf/cm}^2$

Concreto estructural

- El módulo de elasticidad correspondiente a cada una de las resistencias de concreto especificadas en la tabla 1, fue calculado según lo dispuesto en la NSR-10 secciones C.8.5 y CR.8.5 ($E_c = 4700\sqrt{f'_c} \text{ [MPa]}$ - $E_c = 15100\sqrt{f'_c} \text{ [kgf/cm}^2\text{]}$).

Resistencia, f'_c	Módulo de elasticidad
490 kgf/cm^2	334253 kgf/cm^2
420 kgf/cm^2	309458 kgf/cm^2
350 kgf/cm^2	282495 kgf/cm^2
280 kgf/cm^2	252671 kgf/cm^2
210 kgf/cm^2	218820 kgf/cm^2

Tabla 1. Resistencias y módulos de elasticidad del concreto de la estructura.
Fuente: Risk and Design Consulting - R&DC (2024).

El sistema de entrepiso tiene una resistencia de 210 kgf/cm^2 . En la figura 5, se presenta la resistencia de los muros estructurales:

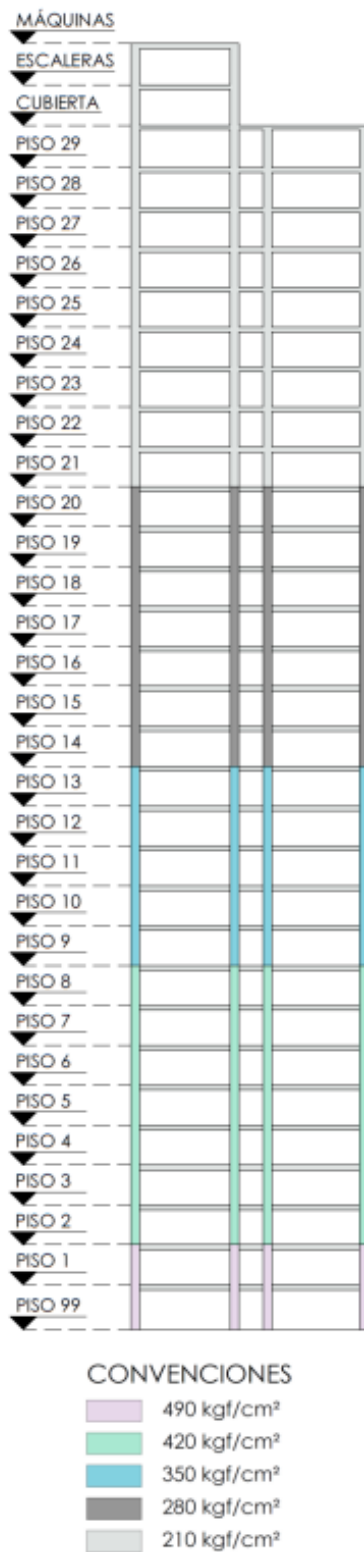


Figura 5. Planta elevación resistencias por piso.
Fuente: Risk and Design Consulting - R&DC (2024).

5.3 Casos de carga empleados

Casos de carga vertical

- Dead: Carga muerta.
- SW: Peso propio.
- Live: Carga viva.

Casos de carga lateral

- SDERIVA: Respuesta dinámica total empleando el espectro elástico.
- SISMO: Respuesta dinámica total empleando el espectro inelástico.
- TORX y TORY: Respuesta dinámica total empleando el espectro elástico considerando el 5% de excentricidad accidental para la revisión de irregularidades.

Combinaciones de carga empleadas

De acuerdo con lo requerido por el reglamento NSR-10 en la Tabla A.1.3-1, las diferentes sollicitaciones que resultan de los casos de carga analizados fueron combinadas según lo dispuesto en NSR-10 secciones B.2.3 y B.2.4 y que se muestran a continuación:

Combinaciones de carga según NSR-10 B.2.3

- Dead + 1.0 SW
- Dead + 1.0 SW + 1.0 Live
- Dead + 1.0 SW + 0.7 Sismo
- Dead + 1.0 SW \pm 0.75(0.70 Sismo) + 0.75 Live
- 0.6 Dead + 0.6 SW \pm 0.7 Sismo

Combinaciones de carga según NSR-10 B.2.4

- 1.4 Dead + 1.4 SW
- 1.2 Dead + 1.2 SW + 1.6 Live
- 1.2 Dead + 1.2 SW \pm 1.0 Sismo + 1.0 Live
- 0.9 Dead + 0.9 SW \pm 1.0 Sismo.

Resumen de cargas

En la tabla 2, se presentan los totales de carga muerta y carga viva sobre la cimentación.

TORRE	
Carga	Total
Peso propio	10666 Tonf
Acabados y particiones	3132 Tonf
Carga muerta total que participa en la respuesta sísmica	13798 Tonf
Carga viva	2951 Tonf

Tabla 2. Carga muerta y viva en la cimentación.
Fuente: Risk and Design Consulting - R&DC (2024).

Datos generales de las cargas empleadas:

- Densidades empleadas de los materiales:

Densidades empleadas para el cálculo de las cargas	
Concreto reforzado	2400 kgf/m ³
Mampostería	1260 kgf/m ³
Mortero de nivelación	200 kgf/m ³
Mampostería reforzada	1500 kgf/m ³
Antepedechos	1600 kgf/m ³
Ventanería y puertas vidrieras	45 kgf/m ²

Tabla 3. Densidades de los materiales.
Fuente: Risk and Design Consulting - R&DC (2024).

- Carga muerta:

TIPO DE CARGA	CARGA	OBSERVACIÓN
Acabados apartamentos	135 kgf/m ²	5 cm de mortero de nivelación + 1 cm de baldosa.
Acabados cubiertas	155 kgf/m ²	7 cm de mortero de nivelación)
Peso tanques	20000 kgf	Ubicación de los tanques especificada en planos de cubierta

Tabla 4. Cargas muertas por acabados.
Fuente: Risk and Design Consulting - R&DC (2024).

- Carga viva (apartamentos y cubierta): 180 kgf/m².

Datos generales del análisis sísmico

Datos del método de la fuerza horizontal equivalente

Únicamente empleado para realizar el ajuste de los resultados del análisis dinámico.

PARÁMETROS		OBSERVACIÓN
α	0.75	Exponente para el cálculo del periodo estructural.
Ct	0.049	Coefficiente utilizado para el cálculo del periodo estructural.
Cu	1.366	Coefficiente utilizado para el cálculo del periodo máximo permisible.
H	73.95 m	Altura del edificio hasta la cubierta principal.
Ta	1.236 seg	Periodo fundamental aproximado de la estructura.
Tmax	1.688 seg	$T_{max} = C_u * T_a$
m	13798 Tonf	Masa participante para el cálculo de la respuesta pseudo estática.
Sa (Espectro elástico)	0.227 %g	Aceleración espectral para ajuste con el espectro elástico.
Sa (Espectro inelástico)	0.045 %g	Aceleración espectral para ajuste con el espectro inelástico.
Vs (FHE)	3132 Tonf	Cortante basal obtenido por el método de la fuerza horizontal equivalente.
0.80 Vs (FHE)	2506 Tonf	80% del cortante basal obtenido por el método de la fuerza horizontal equivalente.
0.80 Vs/R (FHE)	501 Tonf	Cortante basal de diseño obtenido por el método de la fuerza horizontal equivalente.

Tabla 5. Datos para el análisis de la fuerza horizontal equivalente.
Fuente: Risk and Design Consulting - R&DC (2024).

Datos generales del análisis dinámico

- Periodos y participaciones de masa:

Se emplean modos hasta alcanzar el 100% de participación de masa. A continuación, se presentan los 6 primeros:

Modo	Periodo	UX	UY	RZ
1	2.140	0.00%	57.89%	0.00%
2	1.708	58.15%	0.00%	0.56%
3	1.662	0.56%	0.01%	57.83%
4	0.423	0.00%	20.35%	0.03%
5	0.363	21.09%	0.00%	0.01%
6	0.333	0.01%	0.04%	20.54%

Tabla 6. Modos de vibración de la estructura.
Fuente: Risk and Design Consulting - R&DC (2024).

- Cortantes en la base y ajuste de resultados:

Análisis de cortante basal sísmico				
	Fuerza horizontal equivalente "Dirección X"	Fuerza horizontal equivalente "Dirección Y"	Análisis modal espectral "Dirección X"	Análisis modal espectral "Dirección Y"
<i>Cortante elástico</i>	2506 Tonf	2506 Tonf	2283 Tonf	1967 Tonf
<i>Cortante de diseño</i>	501 Tonf	501 Tonf	543 Tonf	477 Tonf
<i>Factor de ajuste elástico</i>	-	-	1.10	1.27
<i>Factor de ajuste inelástico</i>	-	-	No requiere	1.05

Tabla 7. Análisis de cortante basal sísmico.
Fuente: Risk and Design Consulting - R&DC (2024).

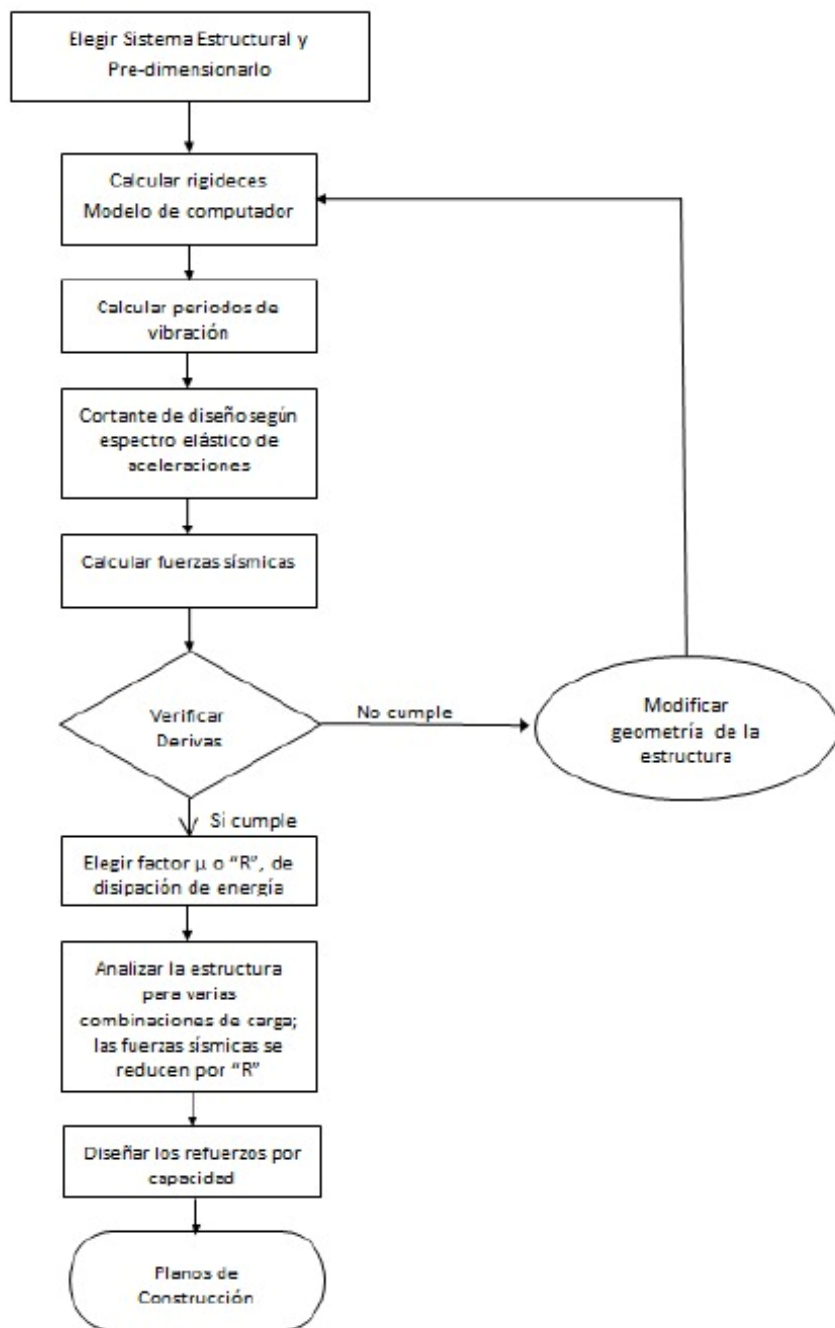
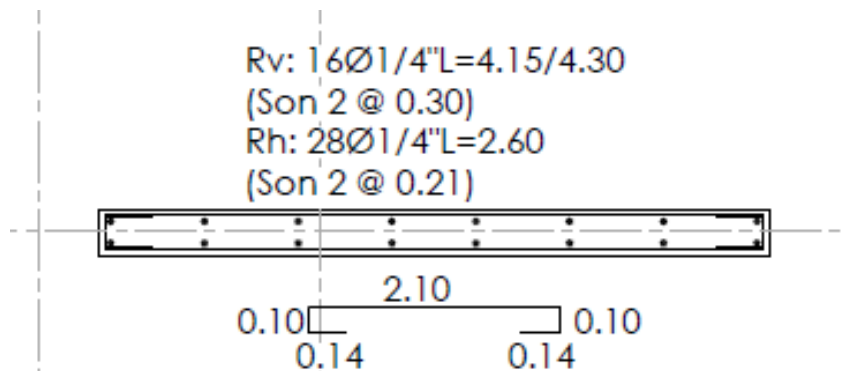
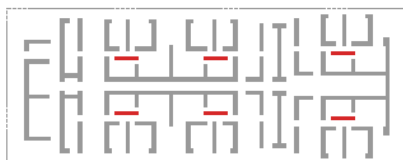


Figura 6. Diagrama de flujo NSR-10 – Método FBD.
Fuente: Vargas Pérez Javier Francisco (2019).



MURO PH1 - PISO 01: DISEÑO A FLEJO-COMPRESIÓN



Parámetros:

f_c : 490 kgf/cm² f_y : 4200 kgf/cm²
 ϵ_c : 0.0030 E_s : 2000000 kgf/cm²
 β : 0.85 ϵ_{yt} : 0.0021

Resultados combinación crítica:

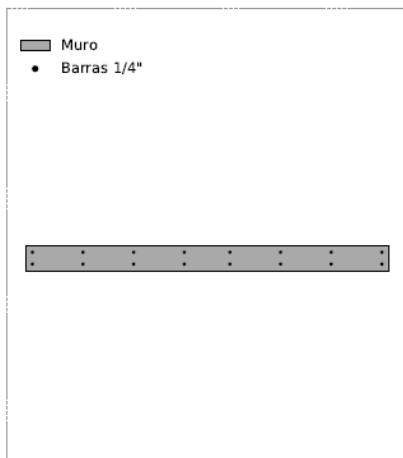
Combo: U2-1_PH6_B... ϕP_n : 664.3 tonf
 Ángulo θ : 270.0° ϕM_{nx} : -0.0 tonf-m
 Máximo CR: 0.255 ϕM_{ny} : -0.5 tonf-m

Reforzo vertical

Área refuerzo [cm ²]	5.12
Área muro [cm ²]	3225.00
Cuantía [%]	0.16

Relaciones demanda - capacidad

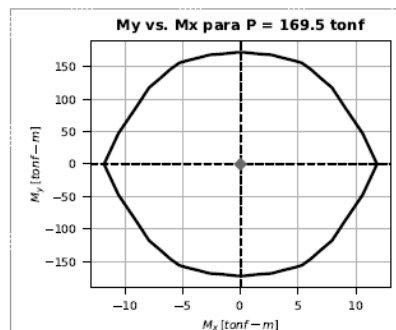
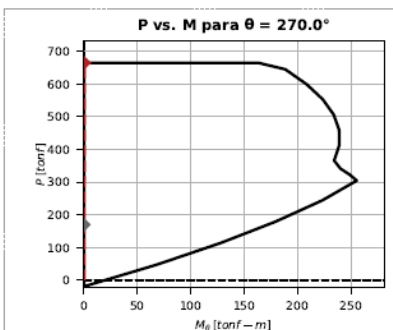
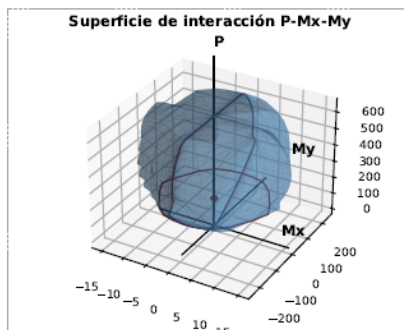
Combo	Pu [tonf]	Mux [tonf-m]	Muy [tonf-m]	CR
U2-1_PH6_Bot	169.5	0.0	-0.1	0.255
U2-1_PH3_Bot	169.2	0.0	-0.0	0.255
U2-1_PH2_Bot	168.6	0.0	0.1	0.254
U2-1_PH5_Bot	168.5	0.0	0.0	0.254
U2-1_PH6_Top	167.0	0.0	0.1	0.251
U2-1_PH1_Bot	166.8	0.0	-0.0	0.251
U2-1_PH4_Bot	166.8	0.0	-0.1	0.251
U2-1_PH3_Top	166.8	0.0	0.2	0.251
U2-1_PH2_Top	166.1	0.0	-0.2	0.250
U2-1_PH5_Top	166.0	0.0	-0.3	0.250
U2-1_PH1_Top	164.4	0.0	0.1	0.247
U2-1_PH4_Top	164.3	0.0	0.1	0.247
U3-5_PH2_Bot	164.3	0.0	23.0	0.247
U3-6_PH2_Bot	164.3	0.0	23.0	0.247
U3-7_PH2_Bot	164.3	0.0	-22.7	0.247
U3-8_PH2_Bot	164.3	0.0	-22.7	0.247



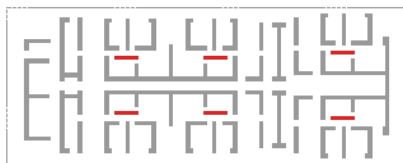
Distribución refuerzo vertical

Calibre	No. Barras
1/4"	16

Diagramas para combinación crítica



MURO PH1 - PISO 01: DISEÑO A CORTANTE



Parámetros:

$f_c: 490 \text{ kgf/cm}^2$
 $f_y: 4200 \text{ kgf/cm}^2$
 $\phi: 0.60$

Resultados combinación crítica:

Combo: U4-1_PH5_Bot $\phi V_c: 17.9 \text{ tonf}$
 $V_u: 5.1 \text{ tonf}$ $\phi V_s: 13.2 \text{ tonf}$
 Máximo CR: 0.164 $\phi V_n: 51.8 \text{ tonf}$

Relaciones demanda capacidad por combinación

Id	Combo	Vu [tonf]	Pu [tonf]	Mu [tonf-m]	$\phi Vc1$ [tonf]	$\phi Vc2$ [tonf]	$\phi Vc3$ [tonf]	ϕVc [tonf]	ϕVs [tonf]	ϕVn [tonf]	CR
PH1	U4-1_PH5_Bot	5.1	87.6	23.0	40.7	17.9	22.7	17.9	13.2	31.1	0.16
PH1	U4-1_PH2_Bot	5.1	87.7	23.0	40.7	17.8	22.7	17.8	13.2	31.0	0.16
PH1	U4-1_PH6_Bot	5.0	89.9	22.9	40.9	17.8	22.7	17.8	13.2	31.0	0.16
PH1	U4-1_PH3_Bot	5.0	89.8	22.9	40.9	17.7	22.7	17.7	13.2	30.9	0.16
PH1	U4-5_PH5_Bot	5.1	107.8	23.0	43.1	19.1	22.7	19.1	13.2	32.3	0.16
PH1	U4-5_PH2_Bot	5.1	107.9	23.0	43.1	19.0	22.7	19.0	13.2	32.2	0.16
PH1	U4-5_PH6_Bot	5.0	106.6	22.9	42.9	18.8	22.7	18.8	13.2	32.0	0.16
PH1	U4-5_PH3_Bot	5.0	106.3	22.9	42.9	18.7	22.7	18.7	13.2	31.9	0.16
PH1	U4-1_PH4_Bot	4.8	86.6	21.6	40.5	18.0	22.7	18.0	13.2	31.2	0.16
PH1	U4-1_PH1_Bot	4.8	86.6	21.6	40.6	17.9	22.7	17.9	13.2	31.1	0.16
PH1	U4-5_PH4_Bot	4.8	106.2	21.6	42.9	19.2	22.7	19.2	13.2	32.4	0.15
PH1	U4-5_PH1_Bot	4.8	106.3	21.6	42.9	19.1	22.7	19.1	13.2	32.3	0.15
PH1	U3-1_PH5_Bot	5.2	144.0	23.0	47.4	21.4	22.7	21.4	13.2	34.6	0.15
PH1	U3-1_PH2_Bot	5.1	144.2	23.0	47.5	21.4	22.7	21.4	13.2	34.6	0.15
PH1	U3-1_PH6_Bot	5.0	146.7	22.9	47.8	21.1	22.7	21.1	13.2	34.3	0.15
PH1	U3-1_PH3_Bot	5.0	146.5	22.9	47.7	21.0	22.7	21.0	13.2	34.2	0.15
PH1	U3-5_PH5_Bot	5.2	164.2	23.0	49.9	22.7	22.7	22.7	13.2	35.9	0.14
PH1	U3-5_PH2_Bot	5.1	164.3	23.0	49.9	22.6	22.7	22.6	13.2	35.8	0.14
PH1	U3-5_PH6_Bot	5.0	163.4	22.9	49.8	22.1	22.7	22.1	13.2	35.3	0.14
PH1	U3-5_PH3_Bot	5.0	163.1	22.9	49.7	22.0	22.7	22.0	13.2	35.2	0.14
PH1	U3-1_PH4_Bot	4.8	142.6	21.5	47.3	21.3	22.7	21.3	13.2	34.5	0.14
PH1	U3-1_PH1_Bot	4.8	142.7	21.5	47.3	21.2	22.7	21.2	13.2	34.5	0.14
PH1	U3-5_PH4_Bot	4.8	162.2	21.5	49.6	22.5	22.7	22.5	13.2	35.7	0.13
PH1	U3-5_PH1_Bot	4.8	162.3	21.5	49.6	22.4	22.7	22.4	13.2	35.6	0.13
PH1	U3-1_PH5_Top	5.2	141.5	9.8	47.1	69.7	22.7	22.7	16.5	39.2	0.13
PH1	U3-3_PH5_Top	5.2	141.5	-10.2	47.1	0.0	22.7	22.7	16.5	39.2	0.13
PH1	U3-5_PH5_Top	5.2	161.7	9.8	49.6	74.8	22.7	22.7	16.5	39.2	0.13
PH1	U3-7_PH5_Top	5.2	161.7	-10.2	49.6	0.0	22.7	22.7	16.5	39.2	0.13
PH1	U3-3_PH5_Bot	5.2	144.0	-22.9	47.4	0.0	22.7	22.7	16.5	39.2	0.13
PH1	U3-7_PH5_Bot	5.2	164.2	-22.9	49.9	0.0	22.7	22.7	16.5	39.2	0.13

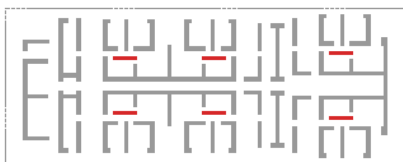
PH1



Parámetros generales de las aletas

Id	Lw [m]	tw [m]	Vu [tonf]	V lcap [tonf]	V red [tonf]	Refuerzo
PH1	2.15	0.15	5.2	37.8	19.3	2 ϕ 1/4"@21.0

MURO PH1 - PISO 01: ELEMENTOS DE BORDE



Parámetros:

Método: Desplazamientos $P_u: 164.3 \text{ tonf}$
 $\delta_{ux}: 29.0 \text{ cm}$ $h_w: 74.0 \text{ m}$
 $\delta_{uy}: 42.0 \text{ cm}$ $\delta_{d/h_{wmin}}: 0.007$

Resultados:

No requiere elemento de borde
 Altura elementos de borde: 0.00 m

Revisión de elemento de borde

θ^*	δ_u [cm]	δ_u/h_w	C^+ [cm]	L_u [cm]	C_{MAX} [cm]	Obs.	L_{EB} [cm]
0.0	29.0	0.0070	44.6	215.0	91.4	No requiere	23.1
180.0	29.0	0.0070	44.6	215.0	91.4	No requiere	23.1

*Imagen 7. Diseño estructural muro en análisis.
 Fuente: Risk and Design Consulting - R&DC (2024).*

5.4 Programa de análisis para desplazamientos y Momentos – Curvatura.

El código CUMBIA WALLS v0.1 está diseñado para analizar el comportamiento estructural de muros de concreto reforzado bajo cargas axiales y de flexión. El proceso inicia con la definición de los datos de entrada, que incluyen propiedades geométricas de la sección, características del refuerzo longitudinal y transversal, condiciones de borde y parámetros de los materiales (concreto y acero). Posteriormente, se establecen las cargas aplicadas y los modelos constitutivos de los materiales, necesarios para evaluar la respuesta no lineal.

El programa calcula la respuesta de la sección crítica del muro mediante la distribución de deformaciones y esfuerzos, generando resultados como la resistencia a flexión, la capacidad axial y la interacción entre carga axial y momento. Además, incorpora la definición de estados límite de deformación en el concreto y el acero, lo que permite determinar la transición entre desempeño en servicio, control de daños y colapso.

En síntesis, el código automatiza la evaluación seccional y del elemento de un muro estructural de concreto reforzado, proporcionando información clave para entender su comportamiento frente a cargas sísmicas y facilitar la toma de decisiones en diseño o reforzamiento.

Dado que el presente trabajo corresponde a un caso de estudio, y considerando que el muro analizado no es el elemento de mayor longitud ni aquel que predomina en el comportamiento global del sistema estructural de muros de concreto reforzado, se ha optado por reducir su altura y la carga axial aplicada. Esta simplificación permite enfocar el análisis en la evaluación del desempeño sísmico del muro mediante el método N2, sin que se vean comprometidos los objetivos del estudio ni la representatividad del comportamiento estructural.

```

%=====
%
%                               CUMBIA WALLS v0.1
%
%                               SECTION AND MEMBER RESPONSE OF RC WALLS
%
%                               luis.montejo@upr.edu, arsalan_niroomandi@yahoo.co.nz
%=====

clc; clear; close all; format long

% input data:

name = 'Muro0015cargareducida'; %identifies actual work, the output file will be name.xls
interaction = 'n'; % if you want to also perform an axial load - moment interaction
% analysis type 'y', otherwise type 'n'

% section properties:

H = 2150; % wall length (mm)- perp to x
B = 150; % wall thickness (mm)- perp to y
clb = 37; % cover to longitudinal bars (mm)

% member properties

L = 10290; % Wall height (mm)
% effective height for single bending wall (usually 0.7 times the full height)
%full height for double bending walls
hn = 2450; % clear height to the next floor above the critical section

bending = 'single'; % single or double
reinforcement = 'doubly'; % singly or doubly

% longitudinal reinforcement details, MLR is a matrix composed by
% [distance from the top to bar center (mm) - # of bars - bar diameter (mm)] each row
% corresponds to a layer of reinforcement:

MLR=[42.5 2.0 6.35
337.5 2.0 6.35
632.5 2.0 6.35
927.5 2.0 6.35
1222.5 2.0 6.35
1517.5 2.0 6.35
1812.5 2.0 6.35
2107.5 2.0 6.35];

```

```

% Boundary element details (reinforcement must be symmetric, as the code is)
% --- Boundary element details (opcional) ---
useBoundary = 'n'; % 'y' = sí usar, 'n' = no usar
if useBoundary == 'y'
    firstRowBoundary = 1;
    HBZ = MLR(firstRowBoundary, 1);
    nBZ = sum(MLR(1:firstRowBoundary, 2));
    db = mean(MLR(1:firstRowBoundary, 3));
else
    HBZ = 0; % boundary Elements length (mm) (from extreme compression
            % to the centre of the last confined longitudinal bar)
    nBZ = 0; % # bars in the boundary elements
    db = 0; % longitudinal bar diameter (mm)
end
% transverse reinforcement
ncx = 0; % # legs transv. steel x_dir
ncy = 0; % # legs transv. steel y_dir
Dh = 6.35; % transverse reinforcement diameter (mm)
sh = 300; % spacing of transverse reinforcement (mm)

% Shear reinforcement details

Ds = 6.35; % diameter of shear reinf. (mm)
s = 210; % spacing of shear steel (mm)*
ns = 2; % # legs shear reinforcement

% applied loads:

P = 339; % axial load kN (-) tension (+)compression

% material models (input the 'name' of the file with the stress-strain relationship
% to use the default models: Mander model for confined or unconfined concrete type 'mc' or 'mu'.
% King model for the steel 'ks', Raynor model for steel 'ra':

confined = 'mc'; %mc=mu if no transverse reinforcement
unconfined = 'mu';
rebar = 'ks';

wi = [295 295 295 295 295 295 295]; % vector with clear distances between
% periferical longitudinal bars properly
% restrained

```


5.5 Aplicación del programa CUMBIA WALLS v0.1 para el análisis del comportamiento estructural de muros de concreto reforzado.

El programa CUMBIA WALLS v0.1 permite analizar el comportamiento estructural de muros de concreto reforzado sometidos a cargas axiales y de flexión, a través de la obtención del diagrama momento–curvatura ($M-\phi$) y, cuando es requerido, del diagrama Fuerza–Desplazamiento ($F-\Delta$). En este estudio se modelan dos muros de concreto reforzado, con el objetivo de comparar su desempeño bajo diferentes cuantías de refuerzo longitudinal y verificar la coherencia con los requerimientos establecidos por la NSR-10 y el ACI 318.

El usuario ingresa las propiedades del muro, los materiales y la disposición del refuerzo, y el programa calcula automáticamente el comportamiento del elemento ante la flexión y la carga axial.

- **Inicio del programa:**

Al abrir el archivo en MATLAB, se debe editar la primera parte del código, donde se define el nombre del modelo: `name = 'Muro0015'`. Este nombre identificará los resultados generados.

También se puede decidir si se desea obtener el diagrama P–M, escribiendo: `interaction = 'y'`; (o 'n' si no se requiere).

- **Definición de la geometría**

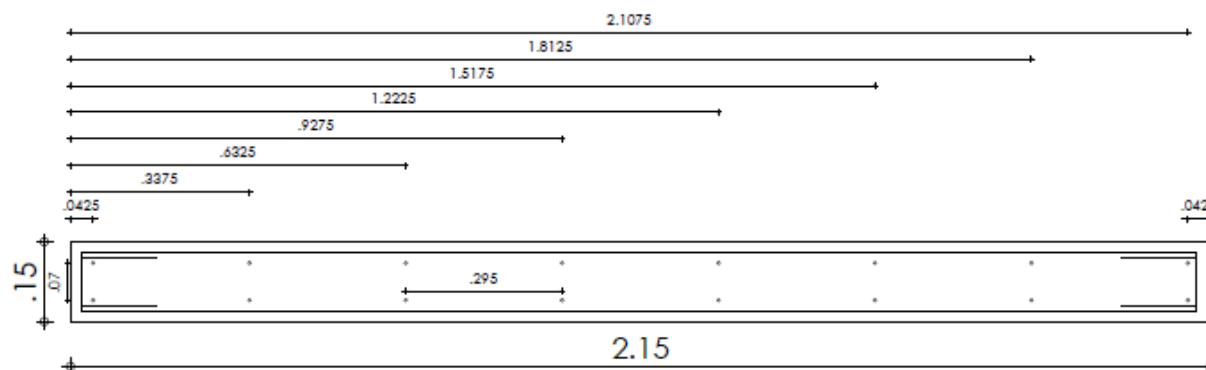
El usuario introduce las dimensiones del muro: H = Longitud del muro (mm); B = Espesor (mm); clb = Recubrimiento del refuerzo (mm).

Además, debe indicarse si el muro trabaja a flexión simple o doble: `bending = 'single'`; o `'double'` y si tiene refuerzo en una o en ambas caras: `reinforcement = 'doubly'`; o `'singly'`.

- **Definición del refuerzo longitudinal**

El refuerzo se especifica mediante una matriz de tres columnas (MLR), donde cada fila representa una capa de acero: MLR = [distancia número_de_barras diámetro];

Por ejemplo:



Cuantía longitudinal: 0.0015

Figura 9. Planta estructural muro de concreto reforzado piso 1.

Fuente: Risk and Design Consulting - R&DC (2024).

MLR = [

42.5 2 6.35

337.5 2 6.35

632.5 2 6.35...];

El programa usa esta información para calcular automáticamente la cuantía de refuerzo total (ρ) y su distribución en la sección.

- **Zonas confinadas (elementos de borde)**

Si el muro posee elementos de borde confinados, se debe activar esta opción:

Use Boundary = 'y'; De lo contrario, se deja 'n'.

Cuando está activada, el programa identifica las barras confinadas y calcula las propiedades específicas de esa zona.

En el caso de estudio, se determinó que el sistema de muros de concreto reforzado no requiere elementos de borde en su diseño inicial mediante el método espectral dinámico. Asimismo, al tratarse de muros delgados, no se realizó el análisis considerando estribos de confinamiento, ya que diversos estudios demuestran que el aporte de estos a la resistencia de los muros es mínimo.

- **Refuerzo transversal y a cortante**

El usuario ingresa el diámetro y la separación de los estribos: D_h = Diámetro del refuerzo transversal (mm); s_h = Separación (mm). Define el refuerzo a cortante: D_s = Diámetro (mm); s = Espaciamiento (mm); n_s = Número de ramas.

En este caso de estudio como no se requiere zonas de confinamiento el refuerzo a cortante tiene un valor de cero.

- **Carga axial aplicada**

Se indica la carga axial en kilo newtons: P = Carga axial del muro (Positiva si es compresión).

Esta carga se extrae como una fracción del total de la carga axial calculada en el diseño modal espectral.

- **Modelos de material**

El programa trabaja con diferentes modelos constitutivos para concreto y acero. Se seleccionan así: Confined = 'mc' Concreto confinado (Mander); Unconfined = 'mu' Concreto sin confinar; Rebar = 'ks' Acero (King). Si no se definen, el programa utiliza sus modelos por defecto.

- **Propiedades de los materiales**

Se introducen las propiedades mecánicas del concreto y del acero:

Concreto:

F'_c = resistencia a la compresión del concreto (MPa)

ϵ_{co} = Deformación unitaria del concreto

ϵ_{spall} = Deformación máxima del concreto

Acero:

f_y = Modulo de fluencia (MPa)

E_s = Módulo de elasticidad (MPa)

ϵ_{sh} = Deformación de endurecimiento

ϵ_{su} = Deformación última

- **Ejecución del análisis**

Una vez configurados los datos, se ejecuta el programa en MATLAB.

El software realiza automáticamente:

- La generación de la sección del muro con su refuerzo.
- El análisis incremental de curvatura, manteniendo equilibrio entre fuerzas internas y externas.
- La construcción de la curva momento–curvatura ($M-\phi$).
- (Opcionalmente) el diagrama de interacción $P-M$.
- La verificación del cortante con factor ϕS .

5.6 Resultados.

El programa genera:

- El diagrama $M-\phi$, que permite observar el momento máximo y la ductilidad del muro.
- El diagrama $P-\Delta$, cuando la opción está activada.
- Valores de momento último, curvatura última, y tipo de falla.
- Archivo de salida en Excel (.xls) con todos los resultados numéricos.

Rectangular Section	
normal weight concrete	
Width [mm]:	150.0
Height [mm]:	2150
cover to longitudinal bars [mm]:	37

Dist.Top [mm]	# Long Bars	Diameter [mm]
42.5	2	6.35
337.5	2	6.35
632.5	2	6.35
927.5	2	6.35
1222.5	2	6.35
1517.5	2	6.35
1812.5	2	6.35
2107.5	2	6.35

diameter of transverse steel [mm]:	6.3
spacing of transverse steel [mm]:	210.0
# legs transv. steel x_dir (confinement):	0.0
# legs transv. steel y_dir (shear):	0.0
axial load [kN]:	339.0
concrete compressive strength [MPa]:	49.0
long steel yielding stress [MPa]:	420
long steel max. Stress [MPa]:	520
transverse steel yielding stress [MPa]:	420
Member Length [mm]:	10290
Single Bending	
Longitudinal Steel Ratio:	0.002
Average Transverse Steel Ratio:	0.000
Axial Load Ratio:	0.021

Cover Strain	Core Strain	N.A [mm]	Steel Strain	Moment [kN-m]	Curvature [1/m]	Force [kN]	Sh displ. [m]	Fl displ. [m]	Total displ. [m]	Shear strength [kN]
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	630.4
0.0001	0.0001	1306.67	-0.00006	192.71	0.00008	18.73	0.00053	0.0027	0.00323	630.4
0.0002	0.00019	706.07	-0.0004	302.88	0.00028	29.43	0.00083	0.01002	0.01085	630.4
0.0003	0.00028	519.03	-0.00092	384.14	0.00058	37.33	0.00105	0.0205	0.02155	630.4
0.0004	0.00037	422.75	-0.00159	447.75	0.00095	43.51	0.00123	0.03368	0.03491	630.4
0.0005	0.00045	362.46	-0.00241	495.73	0.00138	48.18	0.00167	0.04594	0.04761	630.4
0.0006	0.00053	310.76	-0.00347	506.55	0.00193	49.23	0.00185	0.05091	0.05276	630.4
0.0007	0.00062	280.46	-0.00456	544.07	0.0025	52.87	0.00211	0.0579	0.06	630.4
0.0008	0.00069	253.12	-0.00586	561.36	0.00316	54.55	0.00233	0.06419	0.06653	630.4
0.0009	0.00077	228.44	-0.0074	569.83	0.00394	55.38	0.00257	0.07073	0.0733	630.4
0.001	0.00084	206.17	-0.00922	562.79	0.00485	54.69	0.00281	0.07716	0.07996	630.4
0.0011	0.0009	186.06	-0.01136	533.85	0.00591	51.88	0.00303	0.08317	0.08619	630.4
0.0012	0.00097	176.76	-0.01311	574.97	0.00679	55.88	0.00337	0.09278	0.09616	630.4
0.0013	0.00102	159.53	-0.01587	547.73	0.00815	53.23	0.00368	0.10119	0.10487	621.63
0.0014	0.00109	151.55	-0.01807	556.47	0.00924	54.08	0.004	0.1101	0.1141	612.24
0.0015	0.00115	143.97	-0.02046	550.71	0.01042	53.52	0.00432	0.11867	0.12299	603.2
0.0016	0.00122	143.97	-0.02182	610.34	0.01111	59.31	0.00466	0.12822	0.13289	593.13
0.0018	0.00133	129.94	-0.0274	585.33	0.01385	56.88	0.00536	0.14729	0.15265	573.03
0.002	0.00145	123.44	-0.03215	629.34	0.0162	61.16	0.00612	0.16832	0.17444	550.86
0.0025	0.0017	105.83	-0.04728	611.67	0.02362	59.44	0.00813	0.22353	0.23166	492.66
0.003	0.00199	100.54	-0.05988	596.2	0.02984	57.94	0.00981	0.26974	0.27955	443.95
0.0035	0.00232	100.54	-0.06987	591.96	0.03481	57.53	0.01118	0.30729	0.31847	434.61

Bilinear Approximation:

Curvature [1/m]	Moment [kN-m]	Displ. [m]	Force [kN]
0	0	0	0
0.00142	556.34	0.04987	54.07
0.03481	591.96	0.31847	57.53

*** concrete strain exceeds maximum ***

Moment for First Yielding [kN-m]:	477.6
Curvature for First Yielding [1/m]:	0.00122
Potential Section Nominal Moment [kN-m]:	556.34
Equivalent Curvature [1/m]:	0.00142
Potential Section Curvature Ductility:	24.58
Potential Displacement Ductility:	6.39

*** flexural failure ***

Moyer - Kowalsky buckling model:

Curvature Ductility for Buckling	0.11
Curvature at Buckling [m]	0.00016
Displacement Ductility at Buckling	0.13
Displacement at Buckling [m]	0.00628
Force for Buckling [KN]	23.01
Moment for Buckling [KN]	236.77

Alvarado et al. buckling model:

Curvature Ductility for Buckling	3.13
Curvature at Buckling [m]	0.00443
Displacement Ductility at Buckling	1.54
Displacement at Buckling [m]	0.07687
Force for Buckling [KN]	55.01
Moment for Buckling [KN]	566.06

== Potential Deformation Limit States (serviceability/damage control/ultimate) ==

Cover Strain	Steel Strain	Moment [kN-m]	Force [kN]	Curvature [1/m]	Curvature Ductility	Displacement [m]	Displacement Ductility
0.00127	-0.015	556.34	54.07	0.00772	5.45	0.10212	2.05
0.00301	-0.06	596.15	57.94	0.0299	21.11	0.28	5.61
0.0035	-0.06987	591.96	57.53	0.03481	24.58	0.31847	6.39

Deformation Limit States Criteria :

serviceability concrete strain	0.004
serviceability steel strain	-0.015
damage control concrete strain	0.0043
damage control steel strain	-0.06

Original Mander Model Ultimate Concrete Strain:	0.0043
---	--------

for non-linear THA:

E [Pa]	32900000000
G [Pa]	14147000000
A [m ²]	0.3225
I [m ⁴]	0.01194
Bi-Factor	0.003
Hinge Length [m]	0.764
Tension Yield [N]	229688.04
Compression Yield [N]	7071917.01
Moment Yield[N-m]	556336.15

Figura 10. Resultados del programa cumbia WALLS v01.

Fuente: Resultados cumbia walls archive tipo xlsx.

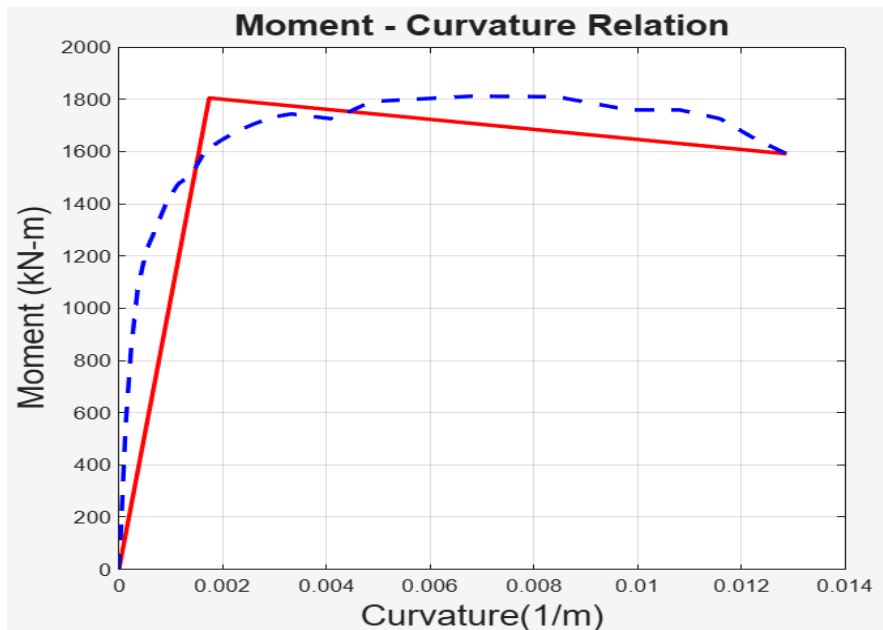


Figura 11. Diagrama momento curvatura Cumbia Walls.
Fuente: Cumbia walls.

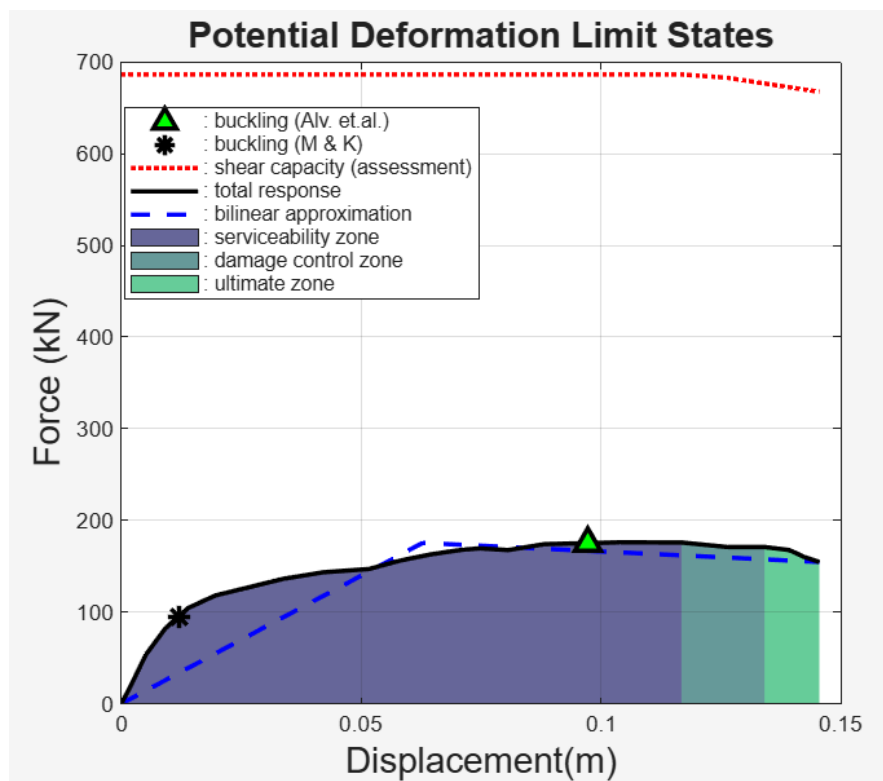


Figura 12. Estados de servicio Cumbia walls.
Fuente: Cumbia walls.

Las gráficas obtenidas en el programa CUMBIA WALLS v0.1 permiten evaluar el comportamiento estructural del muro de concreto reforzado frente a flexión y desplazamientos laterales.

En la Imagen 9 se observa la curva de momento–curvatura, la cual describe la evolución del momento flector en función de la curvatura unitaria a lo largo de la sección crítica del muro.

La curva azul discontinua representa la respuesta completa obtenida del análisis no lineal del elemento, mientras que la línea roja bilineal corresponde a la idealización equivalente que permite definir los parámetros de rigidez y ductilidad.

Inicialmente, la relación es lineal hasta alcanzar el momento de fisuración, donde se evidencia el inicio del comportamiento no lineal debido a la aparición de grietas en el concreto, Posteriormente, el sistema entra en una zona de endurecimiento hasta llegar al momento último (aprox. 1800 kN-m), donde el acero longitudinal alcanza su fluencia, Después del punto máximo, se identifica una pérdida progresiva de rigidez asociada a la degradación del concreto comprimido y a la redistribución de esfuerzos. Este comportamiento indica un muro con adecuada ductilidad y capacidad de rotación plástica, lo que confirma su idoneidad para sistemas de muros estructurales en zonas sísmicas, cumpliendo con los requerimientos de cuantía mínima ($\rho \geq 0.00125$) para muros en donde el cortante no excede el siguiente valor:

$$V_u < 0.083 A_{cv} \lambda \sqrt{f'c}$$

Lo anterior según la NSR-10 en el título C.21.9.2.

Estados Límite de Deformación Potencial, la Imagen 10 muestra la relación Fuerza–Desplazamiento o Curva de Capacidad, donde se identifican los estados límite de desempeño: La curva negra representa la respuesta total del muro, mientras que la línea azul segmentada

corresponde a la aproximación bilineal equivalente, empleada para la evaluación de ductilidad global.

Las zonas sombreadas representan los distintos niveles de desempeño estructural:

- Zona de servicio (azul oscuro): respuesta elástica con desplazamientos dentro del rango admisible.
- Zona de control de daño (verde azulado): aparición de fisuras y plastificación parcial del refuerzo.
- Zona última (verde claro): corresponde al punto de falla por aplastamiento del concreto o pandeo del acero.

Los símbolos marcan los límites de pandeo (M&K) y colapso, verificando que ambos ocurren después del punto de fluencia, lo que confirma una reserva de ductilidad adecuada y una disipación de energía estable.

5.7 Resultados método N2 aplicado al muro de concreto reforzado.

Metodo N2

"Masa sismica [KN*s ² /m] ""M""	33.90
"Masa equivalente [KN*s ² /m] "M*"	23.73
Fuerza de fluencia Fy* [KN]	54.07
Desplazamiento de fluencia DY [m]	0.04987
Say= FY*/M* [g]	0.228
Fuerza de fluencia Fu*	57.53
Desplazamiento de fluencia Du [m]	0.31847
Sau= Fu*/M*	0.242
Capacidad de ductilidad =Du/Dy	6.386
T* [seg]	0.930
Sae [g]	0.298
Sde [m]	0.124
Rμ	1.31
Demanda de ductilidad μ	2.483
Factor de sobrerresistencia	2.572

OK

Tabla 8. Resultados método N2
Fuente: Elaboración propia.

Bilinear Approximation:

Curvature [1/m]	Moment [kN-m]	Displ. [m]	Force [kN]
0	0	0	0
0.00142	556.34	0.04987	54.07
0.03481	591.96	0.31847	57.53

Tabla 9. Aproximación bilineal.

Fuente: Cumbia walls.

Del diagrama bilineal aproximado obtenido de la tabla 9 se obtuvieron los desplazamientos y fuerzas de fluencia.

- **Masa sísmica:** Es la carga axial que baja por el muro teniendo en cuenta las áreas de aferencia.
- **Masa equivalente:** Esta se obtiene como el 70% de la masa sísmica el cual permite el método N2.
- **Fuerza de fluencia f_y :** Se obtiene del diagrama bilineal aproximado que arroja el programa cumbia walls.
- **Desplazamiento de fluencia D_y :** Este asociado a la fuerza de fluencia anterior del diagrama bilineal aproximado.
- **Say:** Es la pseudo aceleración de fluencia expresada en fracción de la gravedad que se obtiene a través de la relación entre la masa equivalente y la fuerza de fluencia.
- **Fuerza de fluencia F_u :** Se obtiene del diagrama bilineal aproximado que arroja el programa cumbia walls, es la fuerza de fluencia ultima.

- **Sau:** Es la pseudo aceleración de fluencia expresada en fracción de la gravedad que se obtiene a través de la relación entre la masa equivalente y la fuerza de fluencia ultima.
- **Capacidad de ductilidad:** Es la capacidad de ductilidad del muro.
- **Periodo elástico T:** se obtiene de la siguiente expresión:
- **Pseudo aceleración Sae:** Con el periodo obtenido con la expresión anterior se obtiene la pseudo aceleración del espectro elástico de diseño de la NSr-10.
- **Pseudo desplazamiento Sde:** Con el periodo obtenido con la expresión anterior se obtiene el pseudo desplazamiento del espectro elástico de diseño de la NSr-10.
- **Relación de ductilidad Ru:** se obtiene de la relación entre la pseudo aceleración de fluencia Say y la pseudo aceleración de diseño Sae.
- **Demanda de ductilidad U:** es la demanda de ductilidad del muro y se obtiene como la relación entre el desplazamiento de fluencia Dy y el pseudo desplazamiento de diseño Sde.

$$T^* = 2 \pi \sqrt{\frac{m^* D_y^*}{F_y^*}}$$

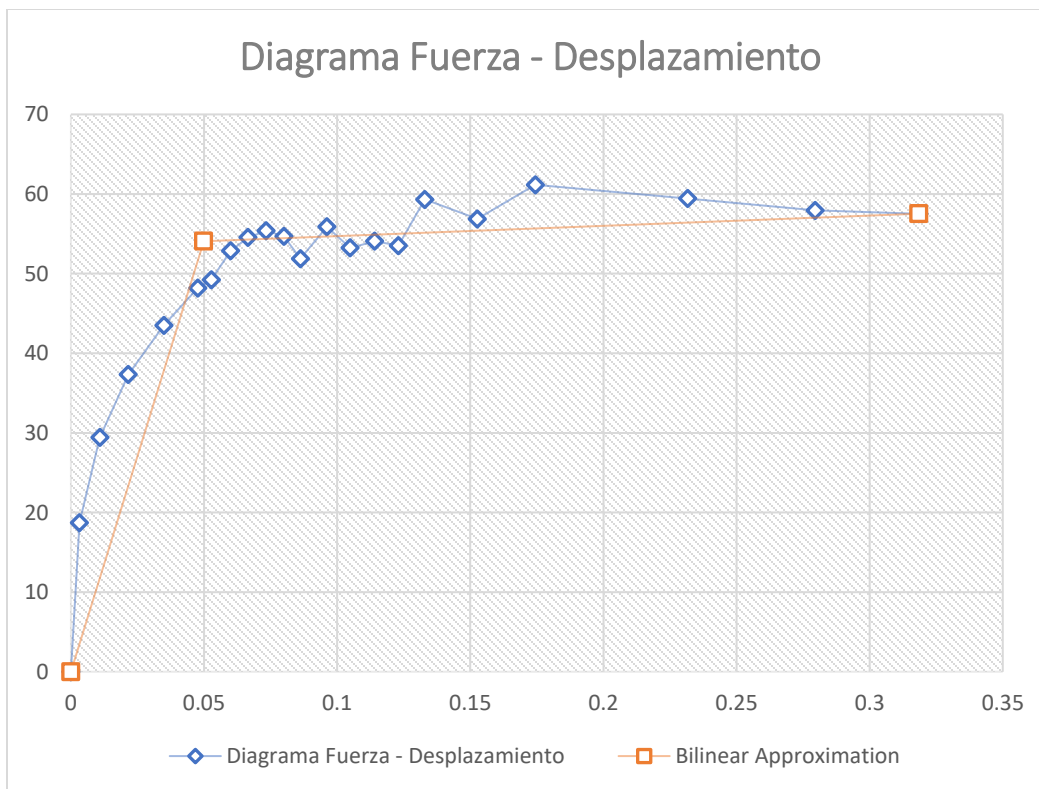


Figura 13. Diagrama fuerza desplazamiento a partir de resultados de Cumbia Walls.
Fuente: Elaboración propia.

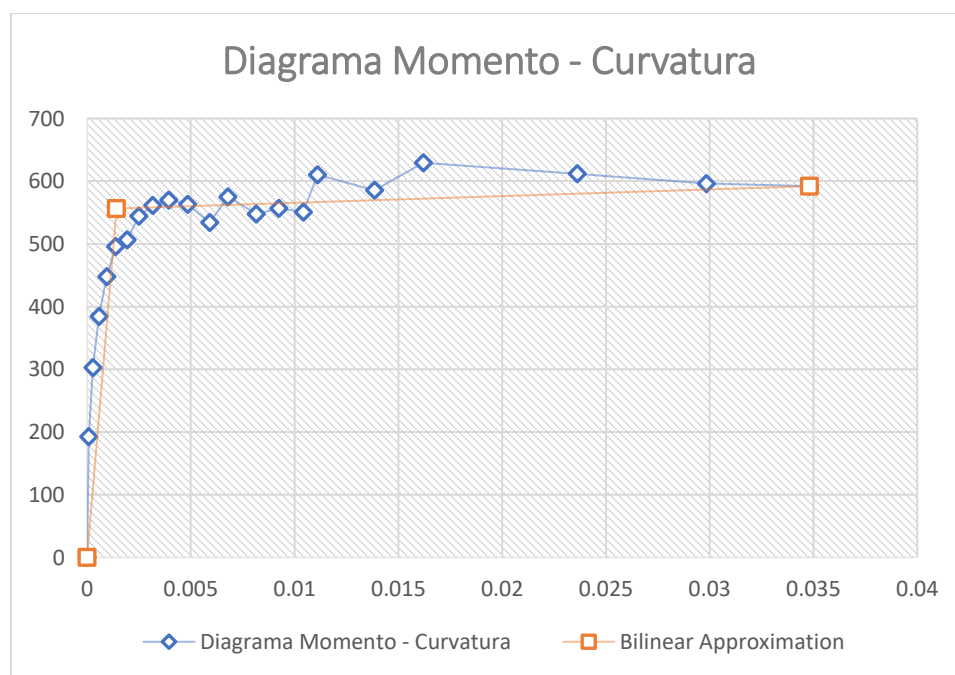


Figura 14. Diagrama Momento-Curvatura a partir de resultados de Cumbia Walls.
Fuente: Elaboración propia.

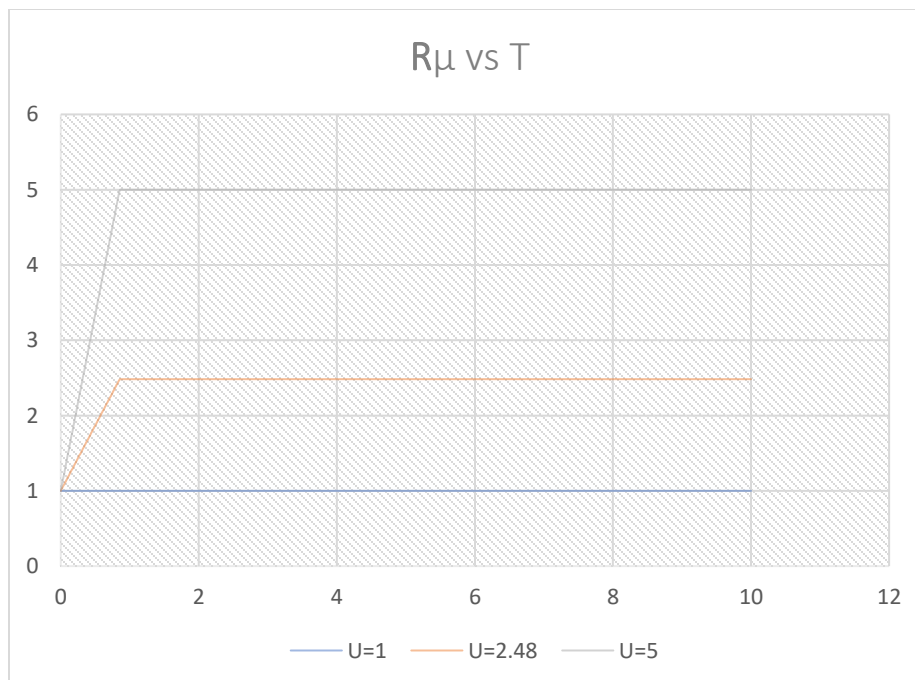


Figura 15. Relación de ductilidad.
Fuente: Elaboración propia.

Luego de obtener los datos del programa Cumbia Walls y de elaborar los **diagramas** Fuerza–Desplazamiento y Momento–Curvatura, se procede a generar el espectro de diseño en función del desplazamiento, el cual se determina aplicando la siguiente ecuación:

$$S_{de} = \frac{T^2}{4\pi^2} S_{ae}$$

Posteriormente, a partir de la relación entre la ductilidad y la demanda de ductilidad, se construyen los espectros correspondientes mediante las siguientes expresiones:

$$S_a = \frac{S_{ae}}{R_\mu}, \quad S_d = \frac{\mu}{R_\mu} S_{de}$$

Con las gráficas obtenidas en función del desplazamiento, se realiza la comparación entre la capacidad de ductilidad y la demanda de ductilidad del muro analizado. En este caso de estudio, se observa que la curva de capacidad intercepta a la curva de demanda, lo que indica que la

geometría y el refuerzo del muro satisfacen adecuadamente las solicitaciones sísmicas aplicadas, cumpliendo con los criterios de desempeño estructural establecidos.

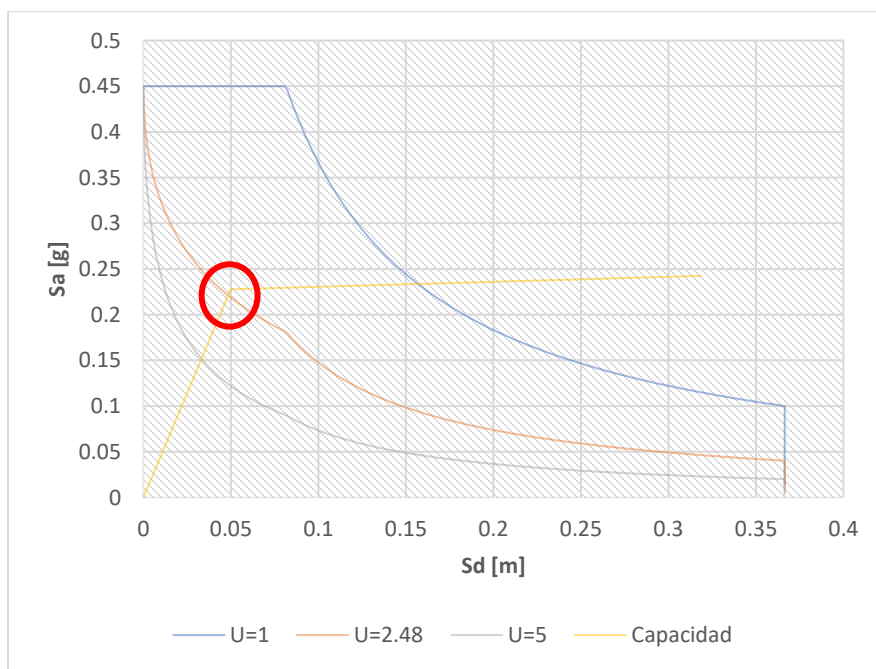


Figura 16. Espectro Demanda VS Capacidad de ductilidad.
Fuente: Elaboración propia.

6 ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Mediante la aplicación del método N2 para el análisis de capacidad del muro en estudio, se observa según la Figura 16, que la intersección entre el diagrama de capacidad y el diagrama de demanda de ductilidad indica que el muro es capaz de resistir las cargas impuestas. En este caso, la demanda de ductilidad obtenida es de 2.483, mientras que la capacidad de ductilidad del muro alcanza aproximadamente 6.386. Por tanto, se obtiene un factor de sobrerresistencia de 2.572, lo que evidencia un adecuado margen de seguridad frente a las solicitaciones consideradas.

7 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Birely, A. C. (2019). Nonlinear modeling and analysis of reinforced concrete structural walls. *Structures*, 19, 93–105. https://www.researchgate.net/publication/359892238_Nonlinear_modeling_and_analysis_of_reinforced_concrete_structural_walls
- Cumbia Walls. (s. f.). Montejo, Luis. <https://github.com/LuisMontejo/CUMBIA-Walls>
- Marín Ospina, A. F. (2018). *Evaluación del desempeño estructural de una edificación en muros de concreto mediante métodos simplificados* (Trabajo de grado para optar al título de Magíster en Ingeniería, Universidad EAFIT, Medellín, Colombia). Universidad EAFIT.
- MATLAB Online (basic). (s. f.). <https://matlab.mathworks.com/>
- Moehle, J., Bozorgnia, Y., & Deierlein, G. (2020). Seismic design and performance assessment of concrete wall buildings. *Earthquake Spectra*, 36(1), 5–22.
- Pujol, S., & Magenes, G. (2018). Behavior of structural walls: Recent insights from nonlinear modeling and tests. *Engineering Structures*, 172, 763–776. <https://escholarship.org/content/qt7dn6d93f/qt7dn6d93f.pdf>
- Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente – NSR-10. (2010). *Título A–G*. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica – AIS. <https://www.ais.org.co/nsr-10/>
- Risk and Design Consulting. (s. f.). <https://www.risk-and-design.com/>
- Tapia Mejía, F. (2013). *Método de análisis modal pushover para estructuras de concreto armado* (Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Aragón). UNAM.
- Toapanta Chamba, D. A., & Vélez Llanos, D. R. (2024). *Diseño estructural con análisis estático no lineal (Pushover) en una edificación de seis pisos de hormigón armado* (Trabajo de titulación, Universidad Politécnica Salesiana, Sede Cuenca). Universidad Politécnica Salesiana.
- Vargas Pérez, J. F. (2019). *Diseño sísmico basado en desplazamientos (DBD)*.

8 ANEXOS

Se adjunta hoja de Excel en el cual se tiene los datos obtenidos a partir del programa Cumbia walls, se generan los espectros y se aplica el método N2 para así definir la capacidad de ductilidad del muro analizado.

[Análisis\Metodo N2 - Muro 0015cargareducida.xlsx](#)