



UNIVERSIDAD LAICA ELOY ALFARO DE MANABÍ
FACULTAD DE INGENIERÍA, INDUSTRIA Y ARQUITECTURA

CARRERA: INGENIERÍA CIVIL
INFORME FINAL DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Previo a la obtención del título de:
INGENIERO CIVIL

MODALIDAD: PROYECTO DE INVESTIGACIÓN


TEMA:
RIGIDEZ EFECTIVA EN COLUMNAS DE HORMIGÓN ARMADO
ENCAMISADAS: MODELADO LINEAL EN ETABS Y VALIDACIÓN CON
OPENSEES

ELABORADO POR:
Meyer Stewart Santana Palma

TUTOR (A):
Ing. Ángel Abel Zambrano Mejía, MSc.

MANTA – MANABÍ – ECUADOR

Febrero 2026

 Uleam ELOY ALFARO DE MANABÍ	NOMBRE DEL DOCUMENTO: CERTIFICADO DE TUTOR(A).	CÓDIGO: PAT-04-F-004
	PROCEDIMIENTO: TITULACIÓN DE ESTUDIANTES DE GRADO BAJO LA UNIDAD DE INTEGRACIÓN CURRICULAR	REVISIÓN: 1 Página 1 de 1

CERTIFICACIÓN

En calidad de docente tutor(a) de la Facultad de Ingeniería, Industria y Arquitectura de la Universidad Laica "Eloy Alfaro" de Manabí, CERTIFICO:

Haber dirigido, revisado y aprobado preliminarmente el Trabajo de Integración Curricular bajo la autoría del estudiante Santana Palma Meyer Stuwart, legalmente matriculado/a en la carrera de Ingeniería Civil, período académico 2025-2026, cumpliendo el total de 384 horas, cuyo tema del proyecto es "Rigidez efectiva en columnas de hormigón armado encamisadas: modelado lineal en ETABS y validación con OpenSees".

La presente investigación ha sido desarrollada en apego al cumplimiento de los requisitos académicos exigidos por el Reglamento de Régimen Académico y en concordancia con los lineamientos internos de la opción de titulación en mención, reuniendo y cumpliendo con los méritos académicos, científicos y formales, y la originalidad del mismo, requisitos suficientes para ser sometida a la evaluación del tribunal de titulación que designe la autoridad competente.

Particular que certifico para los fines consiguientes, salvo disposición de Ley en contrario.

Lugar, Manta 30 de enero de 2026.

Lo certifico,



Ing. A. Abel Zambrano Mejía, MSc.
Docente Tutor(a)
Área: Estructuras

Nota 1: Este documento debe ser realizado únicamente por el/la docente tutor/a y será receptado sin enmendaduras y con firma física original.

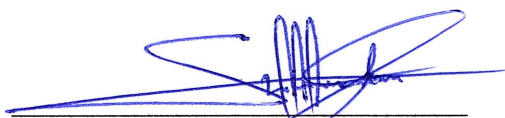
Nota 2: Este es un formato que se llenará por cada estudiante (de forma individual) y será otorgado cuando el informe de similitud sea favorable y además las fases de la Unidad de Integración Curricular estén aprobadas.

DECLARACIÓN DE AUTORIA

Yo, Meyer Stuwart Santana Palma con CC: 131529465-0, doy constancia de ser el autor del Trabajo de Titulación con modalidad Proyecto de investigación con el tema **“RIGIDEZ EFECTIVA EN COLUMNAS DE HORMIGÓN ARMADO ENCAMISADAS: MODELADO LINEAL EN ETABS Y VALIDACIÓN CON OPENSEES”**, el cual fue dirigido por el tutor, Ing. Ángel Abel Zambrano Mejía, MSc.

Quiero resaltar la originalidad de este trabajo, que se fundamenta en la contribución de varios autores que enriquecieron la investigación, así como en la recopilación de datos e información provenientes de fuentes bibliográficas, visitas de campo, entre otros recursos.

En la ciudad de Manta, a los 24 días del mes de enero de dos mil veinte y seis.



Meyer Stuwart Santana Palma

C.C. 131529465-0

Autor

CERTIFICACIÓN DE APROBACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

En calidad de tribunales de la Facultad de Ingeniería, Industria y Arquitectura de la Universidad Laica “Eloy Alfaro” de Manabí, certifico:

Haber revisado el trabajo de titulación, bajo la modalidad de **Proyecto de Investigación**, cuyo tema es “RIGIDEZ EFECTIVA EN COLUMNAS DE HORMIGÓN ARMADO ENCAMISADAS: MODELADO LINEAL EN ETABS Y VALIDACIÓN CON OPENSEES” de la modalidad en mención y en apego al cumplimiento de los requisitos exigidos por el Reglamento de Régimen Académico, por tal motivo APRUEBO, que el mencionado proyecto reúne los méritos académicos, científicos y formales, suficientes para proceder a la defensa correspondiente.

Certifico lo anterior para los fines pertinentes, a salvo disposición de Ley en contrario.


En la ciudad de *Manta*, a los 19 días del mes de febrero de dos mil veinte y seis.



Ing. Alexi Morán Guzmán, Mg.

C.C. 1204318248

Tribunal 1



Ing. Dolly Delgado Toala, PhD

C.C. 1305190330

Tribunal 2

DEDICATORIA

Aquellos que buscan dotar al mundo de herramientas, obras, palabras, voz, ideas y pensamientos con un fin mayor y un bien común. En especial aquellos que construyeron lo que soy hoy, desde mi formación inicial hasta los que leen actualmente esta investigación.

También a la vida, a Dios y al destino “predestinado”, porque los resultados logrados no eran esperados inicialmente, sin embargo, demuestran ser un regalo inesperado revelado por el amado a través de mí, para dotar al mundo de herramientas, obras, palabras, voz, ideas y pensamientos con un fin mayor y un bien común.

“Por el Poder, el Honor y la Gloria...Por la Luz y la Eternidad...”

Meyer Stuwart Santana Palma

C.I 1315294650

Autor

AGRADECIMIENTO

Le agradezco a la vida y aquellos que me dieron la oportunidad de vivirla, mis Padres que siempre me ha apoyado y esperan lo mejor para mí.

Agradezco cada aporte, idea y ayuda que recibido a lo largo de lo que he vivido y al día de hoy, han formado un ingeniero civil que busca devolver multiplicado ese agradecer, en especial a los que formaron parte mi carrera de ingeniería civil, en primer lugar, a mi querida “Presi” Marlisse que cruzamos nuevamente caminos en la universidad, y hemos compartido momentos juntos a Noe y Misael, apoyándonos los unos a los otros. Agradezco a mi tutor el Ing. Abel Zambrano, por la paciente y confianza otorgados en el proyecto de investigación realizado, la educación y formación como ingenieros civiles que me ha impartido en sus cursos durante mi carrera. Agradezco, a todos aquellos que han dedicado su tiempo a leerme y apreciar este aporte a la ingeniería civil.

Meyer Stuwart Santana Palma
C.I 1315294650
Autor

SÍNTESIS Y PALABRAS CLAVE

Aunque el encamisado de hormigón armado es una técnica habitual en rehabilitación sísmica, su modelado lineal en software comercial enfrenta un vacío técnico: no existe consenso sobre la rigidez real que debe asignarse a la sección compuesta. Esta investigación solventa dicha incertidumbre determinando factores de rigidez efectiva (α) validados numéricamente para su aplicación directa en ETABS.

Se desarrolló una arquitectura avanzada en OpenSeesPy mediante discretización por fibras, capturando fenómenos físicos como la inestabilidad P-Delta y el ablandamiento del material. El estudio paramétrico reveló una paradoja física: aunque la resistencia absoluta aumenta con el espesor del refuerzo, la eficiencia relativa de la sección (α) no es constante — contrario a los factores fijos del ACI 318—, sino que sufre una degradación asintótica conforme la sección se vuelve más masiva.

El hallazgo central es la formulación de la "Norma de Dilución Geométrica", una ecuación racional que permite calcular el espesor del refuerzo basándose en una rigidez objetivo, reconociendo que la eficiencia se "diluye" al aumentar el volumen. La validación cruzada confirmó que los factores propuestos reducen el error en la estimación de derivas al 0.55% respecto al modelo no lineal. Esto mejora drásticamente las discrepancias cercanas al 25% de los métodos convencionales, proporcionando una herramienta de diseño coherente con la realidad física del daño esperado.

PALABRAS CLAVE: Encamisado de Hormigón, Rigidez Efectiva, OpenSees, , Rehabilitación Sísmica.

ABSTRACT AND KEYWORDS

While Reinforced Concrete (RC) Jacketing is a standard seismic rehabilitation technique, its linear modeling in commercial software faces a technical gap regarding the actual stiffness assigned to the composite section. This research resolves this uncertainty by determining effective stiffness factors (α) numerically validated for direct use in ETABS.

An advanced numerical architecture was developed in OpenSeesPy using fiber discretization to capture physical phenomena such as P-Delta instability and material softening. A parametric study revealed a physical paradox: while absolute strength increases with jacket thickness, the section's relative efficiency (α) is not constant—contrary to ACI 318 fixed factors—but undergoes asymptotic degradation as the section becomes massive.

The core finding is the formulation of the "Geometric Dilution Rule", a rational equation allowing engineers to calculate reinforcement thickness based on a target stiffness, acknowledging that efficiency is geometrically "diluted" as volume increases. Cross-validation confirmed that using the proposed factors reduces lateral drift estimation error to 0.55% compared to the non-linear model. This drastically improves upon the 25% discrepancies yielded by conventional methods, providing a design tool consistent with the physical reality of expected damage.

KEYWORDS: RC Jacketing, Effective Stiffness, OpenSees, Seismic Rehabilitation.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Planteamiento del Problema	1
1.1.1 Inconsistencias en el modelado lineal de estructuras reforzadas: La incertidumbre de la inercia agrietada en secciones compuestas.	1
1.1.2 Limitaciones de los códigos actuales (NEC-SE-HM, ACI 318) para definir la rigidez en elementos tipo "Jacketing".	2
1.2 Justificación de la Investigación	3
1.2.1 Necesidad práctica: Facilitar el diseño en software comercial (ETABS) mediante factores calibrados (α)	3
1.2.2 Ventaja del Método de Fibras (OpenSees) como herramienta de validación numérica de alta precisión.	4
1.3 Objetivos	4
1.3.1 Objetivo General.....	4
1.3.2 Objetivos Específicos:	4
1.4 Alcance y Metodología	5
1.4.1 Alcance	5
1.4.2 Metodología	5
CAPÍTULO I: FUNDAMENTOS DEL COMPORTAMIENTO NO LINEAL Y REFORZAMIENTO.....	7
1.1 Comportamiento Mecánico del Hormigón Confinado	7
1.1.1 Efecto del confinamiento en la ductilidad y resistencia a compresión	7
1.1.2 Modelo Constitutivo de Mander et al. (1988) para secciones rectangulares. 7	
1.1.3 Coeficiente de Efectividad para Secciones Rectangulares	9
1.2 Técnica de Encamisado (Concrete Jacketing)	10
1.2.1 Mecanismo de acción compuesta: Hipótesis de sección monolítica.	10

1.2.2	Consideraciones sobre materiales de reparación: Micro-hormigón y recubrimientos reducidos.	11
1.3	Modelado Numérico Avanzado.....	12
1.3.1	Método de la Fibra (Fiber Element Method): Ventajas frente a la plasticidad concentrada.....	12
1.3.2	Rigidez Efectiva (<i>Eleff</i>): Concepto de bilinealización y punto de cedencia. 14	
1.4	Software OpenSees y OpenSeesPy.....	15
1.4.1	Arquitectura del framework para simulación sísmica.	15
1.4.2	Elementos finitos basados en fuerzas (<i>ForceBeamColumn</i>): Formulación y ventajas en plasticidad distribuida.....	16
1.5	Análisis, comentarios y conclusiones parciales del Capítulo I.	16
	CAPÍTULO II: METODOLOGÍA Y CARACTERIZACIÓN DE LOS MODELOS....	18
2.1	Definición de la Campaña Paramétrica.....	18
2.1.1	Descripción de la Columna Base: Sección 300x300 mm, Hormigón $f'c = 210kgcm^2$	19
2.1.2	Matriz de Casos de Estudio para Encamisado (Micro-hormigón $f'c = 28 MPa$). 20	
2.2	Caracterización de Materiales (Modelos Constitutivos).....	21
2.2.1	Hormigón: Implementación del Material <i>Concrete02</i> (Linear Tension Softening). 22	
2.2.2	Acero de Refuerzo: Implementación del Material <i>ReinforcingSteel</i> 23	
2.3	Estrategia de Modelado en OpenSees.....	24
2.3.1	Formulación del Elemento: <i>ForceBeamColumn</i> con integración de Legendre (5 puntos).	25
2.3.2	Discretización de Secciones Transversales (Fiber Section).....	26
2.3.3	Definición de Condiciones de Frontera y Justificación del Modelo en Voladizo 28	

2.4	Protocolo de Carga y Análisis	29
2.4.1	Aplicación de Cargas Gravitacionales y Efectos $P - \Delta$	29
2.4.2	Análisis Estático No Lineal (Pushover): Control de desplazamiento monótono	33
2.4.3	Algoritmos de solución y estrategia de paso adaptativo	33
2.5	Análisis, comentarios y conclusiones parciales del Capítulo II.....	33
CAPÍTULO III: DESARROLLO Y VALIDACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO.....		36
3.1	Modelo de Referencia (Columna Sin Refuerzo).....	36
3.1.1	Construcción geométrica y validación de propiedades dinámicas.	36
3.1.2	Validación Seccional (Momento-Curvatura).	38
3.1.3	Respuesta a Carga Lateral (Pushover Base).	40
3.2	Modelo de la Columna Reforzada (Técnica de Elementos en Paralelo)	43
3.2.1	Implementación Computacional y Estrategia de Solución Adaptativa....	43
3.2.2	Verificación de Secciones Compuestas para los casos J-075 a J-175.....	45
3.3	Análisis de Propiedades Dinámicas (Modal).....	46
3.3.1	Variación del Periodo Fundamental (T1) según incremento de masa y rigidez.	46
3.4	Análisis, comentarios y conclusiones parciales del Capítulo III.	47
CAPÍTULO IV: DETERMINACIÓN DE FACTORES DE RIGIDEZ Y ANÁLISIS DE RESULTADOS		50
4.1	Análisis de Capacidad y Desempeño Sísmico	50
4.1.1	Curvas de Capacidad (Pushover) Comparativas: J-075 vs J-100 vs J-125 vs J-175.	51
4.1.2	Evaluación por Desempeño (Niveles NEC-SE-HM).....	52
4.2	Mecanismo de Distribución de Cargas (Desglose de Aportes).....	53
4.2.1	Cuantificación del aporte resistente: Núcleo Original vs. Jacket Nuevo.	53
4.2.2	Análisis de la eficiencia del reforzamiento y punto de rendimientos decrecientes.	55

4.3	Determinación de Factores de Rigidez Efectiva (α).....	56
4.3.1	Metodología de Cálculo: Rigidez Secante al Punto de Cedencia (75% Vmax).	56
4.3.2	Cálculo de la Rigidez Bruta Teórica (<i>Kgross</i>) usando propiedades del Jacket (<i>f_c' = 28 MPa</i>).....	56
4.3.3	Resultados de los Factores Modificadores (α).	57
4.4	Discusión de Resultados	58
4.4.1	Análisis de Tendencias y Selección del Modelo Matemático.....	58
4.4.2	Interpretación Física: La Paradoja de la Rigidez y la Dilución Geométrica 60	
4.4.3	Formulación General del Encamisado	61
4.4.4	Micro Estudio del comportamiento de la rigidez efectiva por agrietamiento <i>abase</i>	62
4.4.5	Ecuación Específica del Sistema Estudiado	64
4.4.6	Evidencia de uso del factor α en software comerciales (ETABS).....	65
4.4.7	Recomendaciones de valores de diseño para la práctica profesional.	66
4.5	Análisis, comentarios y conclusiones parciales del Capítulo IV.....	66
	CONCLUSIONES.....	68
	RECOMENDACIONES	70
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72
	ANEXOS.....	76

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1.1-1 Contraste esquemático de la respuesta constitutiva esfuerzo-deformación del hormigón en estados confinado y no confinado. Fuente: (Mander y otros, 1988).....</i>	<i>8</i>
<i>Figura 1.3-1. Discretización de una sección transversal en fibras de hormigón y acero.....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 1.3-2. Integración numérica mediante Gauss-Lobatto (4 puntos) para la evaluación de compatibilidad en elementos basados en fuerzas. (Scott & Fenves, 2006)</i>	<i>14</i>
<i>Figura 2.1-1. Esquema de (a) columna existente en geometría y parámetros de diseño, y (b) columna encamisada con micro-hormigón $f'c = 28\text{Mpa}$.</i>	<i>20</i>
<i>Figura 2.2-1. Curva Esfuerzo-Deformación analítica para el hormigón confinado. Recopilado de: (OpenSees, 2025).....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 2.2-2. Ciclos de carga y descarga del modelo constitutivo del acero de refuerzo ($f_y = 4200\text{ kg/cm}^2$). Recopilado de: (OpenSees, 2025).</i>	<i>24</i>
<i>Figura 2.3-1. Mapeo de fibras para la Sección Compuesta J-100: Núcleo, Jacket y Recubrimiento.</i>	<i>26</i>
<i>Figura 3.1-1. Diagrama Momento-Curvatura (M-phi) de la columna original en OpenSees.</i>	<i>38</i>
<i>Figura 3.1-2. Grafica comparativa del Momento-Curvatura realizado en OpenSees y ETABS.</i>	<i>39</i>
<i>Figura 3.1-3. Curvas de momento-curvatura de una columna C250 × 500. Recopilada de: (Bilgin & Plaku, 2024).....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 3.1-4. Curvas de Fuerza-Desplazamiento Idealizada. Recopilada de: (ASCE, 2017)</i>	<i>40</i>
<i>Figura 3.1-5. Curva de capacidad basal de la columna original</i>	<i>41</i>
<i>Figura 3.1-6. Tipos de comportamiento de la curva de fuerza-deformación establecidas por las ASCE 41-17 (2017).</i>	<i>42</i>
<i>Figura 3.1-7. Criterios de Aceptabilidad ilustrados por la ASCE 41-17 (2017).</i>	<i>43</i>
<i>Figura 3.2-1 Comparativa de diagramas Momento-Curvatura: Influencia del espesor tjack)</i>	<i>45</i>
<i>Figura 3.3-1. Comportamiento del Periodo Fundamental y Rigidez Lateral con el incremento del espesor del encamisado.....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 4.1-1. Superposición de Curvas Pushover: Influencia del espesor del encamisado)</i>	<i>50</i>
<i>Figura 4.1-2. Curva de capacidad del Caso J-175 con identificación de niveles IO, LS, CP</i>	<i>52</i>

<i>Figura 4.1-3. Evolución de la curva de capacidad y expansión de los niveles de desempeño (IO, LS, CP) según ASCE 41-17 para los casos: (a) J-075, (b) J-100, (c) J-125 y (d) J-175.</i>	53
<i>Figura 4.2-1. Desglose de fuerzas cortantes por equilibrio global para el Caso J-175).....</i>	54
<i>Figura 4.2-2. Comparativa Progresiva de los cambios del espesor del encamisado y su efecto en el aporte desglosado de fuerzas del encamisado y columna existente.</i>	55
<i>Figura 4.3-1. Determinación gráfica de la rigidez efectiva y factor α para el Caso J-175 ..</i>	57
<i>Figura 4.4-1. Regresión Logarítmica de t_{jack} en función de α previa a refinamiento.....</i>	58
<i>Figura 4.4-2. Funciones de mejor ajuste a los datos recopilados de t_{jack} y α.</i>	59
<i>Figura 4.4-3 Comportamiento de la rigidez lateral real, efectiva y bruta de la columna encamisada.</i>	60
<i>Figura 4.4-4. Comportamiento de la rigidez efectiva α base a distintos recubrimientos límites para diferentes secciones, de diseño al $\rho = 1\%$ y $f_c' = 21\text{MPa}$.</i>	63
<i>Figura 4.4-5. Parametrización de coeficientes A y B de la función de α base.....</i>	64

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 2.1-1. Matriz de configuraciones geométricas para el encamisado (Casos J-075 a J-175).</i>	20
<i>Tabla 2.1-2. Output de verificación del modelo constitutivo del acero de refuerzo y cuantía global.</i>	21
<i>Tabla 2.2-1. Parámetros ingresados en OpenSees para Hormigón Original y Jacket.</i>	23
<i>Tabla 2.2-2. Parámetros constitutivos para el Acero de Refuerzo (ReinforcingSteel).</i>	24
<i>Tabla 2.3-1. Comparativa entre los métodos de integración Legendre y Lobatto.</i>	25
<i>Tabla 2.3-2. Bloque de Sub-rutina de selección / cálculo del tamaño de cada fibra para geometría cuadrada.</i>	26
<i>Tabla 3.1-1. Contenido interno de Resultados_Modal_Original.txt</i>	37
<i>Tabla 3.1-2. Segmento del BLOQUE 7 donde se aplica la transformación geométrica aplicada.</i>	37
<i>Tabla 3.2-1. Algoritmo condicional del cambio de algoritmo, “analyze_smart_step”</i>	44
<i>Tabla 3.3-1. Reporte de propiedades modales: Periodo y Frecuencia para cada caso de estudio</i>	46
<i>Tabla 4.3-1. Resultados del factor α en respuesta a la variación del encamisado</i>	57
<i>Tabla 4.4-1. Configuraciones de columnas del micro estudio, del comportamiento del abase en relación con el tamaño de recubrimiento</i>	62

INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento del Problema

La rehabilitación sísmica de estructuras de hormigón armado mediante técnica/s de encamisado (*concrete jacketing*) plantea una dicotomía fundamental entre el comportamiento físico real del elemento compuesto (columna existente + encamisado) y las simplificaciones inherentes a los procedimientos de análisis aceptados por la práctica profesional, puesto que, si bien la intervención del encamisado incrementa notablemente la capacidad a flexión y cortante, la caracterización de su rigidez operativa introduce sesgos por falta de datos que superan la capacidad de respuesta de los análisis lineales y la normativa prescriptiva vigente, ocasionando que el diseñador carezca de herramientas precisas para estimar la demanda de derivas.

1.1.1 Inconsistencias en el modelado lineal de estructuras reforzadas: La incertidumbre de la inercia agrietada en secciones compuestas.

Al proceder con el modelado analítico de una sección encamisada, la práctica predominante asume que el elemento reforzado se comporta como una sección monolítica perfecta desde el inicio de la carga, incurriendo en una simplificación que falla al ignorar la historia de esfuerzos previa del núcleo; esto resulta crítico debido a que el elemento preexistente ya posee una deformación inicial precedente de las cargas gravitacionales de servicio antes de la aplicación del refuerzo, lo cual impide que la interfaz actúe de manera totalmente compuesta (Suarjana, 2020). Al omitir esta condición de pre-carga y el inevitable deslizamiento interfacial entre el concreto antiguo y el nuevo, los modelos de "sección transformada" convencional tienden a sobreestimar la rigidez a la flexión del conjunto, dado que no capturan la degradación de la adherencia cuando los coeficientes de fricción en la interfaz son superados.

Adicionalmente, la inercia agrietada real de la sección compuesta se ve afectada por fenómenos reológicos que los modelos lineales estándar (basados en un módulo de elasticidad constante) son incapaces de integrar nativamente. Se ha determinado mediante ensayos que el concreto del encamisado experimenta una retracción por secado que, al encontrarse restringida por la rigidez del núcleo existente, induce un estado de esfuerzos biaxiales (tensión en la camisa y compresión en el núcleo), fenómeno que puede reducir la resistencia efectiva a la compresión del material entre un 8% al 11% y precipitar una fisuración prematura (Lampropoulos y otros,

2013). La incapacidad de los softwares comerciales para simular estos módulos de elasticidad diferenciados y evolutivos sin recurrir a homogeneizaciones manuales propensas al error resulta en una discrepancia crítica entre la rigidez modelada y la respuesta dinámica real de la estructura.

1.1.2 Limitaciones de los códigos actuales (NEC-SE-HM, ACI 318) para definir la rigidez en elementos tipo "Jacketing".

No se encontró explícitamente en los códigos de diseño, tales como el ACI 318 y la NEC-SE-HM, detalles respecto a la asignación de factores de modificación de rigidez agrietada específicos para elementos rehabilitados por encamisado, obligando a los calculistas a recurrir en prescripciones establecidas para diseño de obra nueva. El reglamento ACI 318-19 prescribe el uso de factores de rigidez efectiva para análisis elástico lineal —típicamente $0.70I_g$ para columnas – asumiendo secciones monolíticas (2019); sin embargo, esta prescripción ignora que, al encamisar una columna, el área bruta (A_g) aumenta drásticamente mientras la carga axial (P) se mantiene constante, lo que reduce significativamente la relación de carga axial ($P/A_g f'_c$). Como menciona Elwood & Eberhard (2006), la rigidez efectiva es altamente dependiente de esta relación axial, la aplicación ciega de factores estandarizados conlleva una sobreestimación de la rigidez lateral, atrayendo fuerzas sísmicas irreales al elemento reforzado en el modelo matemático.

De manera análoga, la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC-SE-HM) establece lineamientos generales que remiten a la normativa americana para el detallado, pero carece de una metodología para ponderar la rigidez de secciones compuestas con historias de carga (MIDUVI, 2014). Aunque documentos de evaluación avanzada como el ASCE 41 permiten el cálculo de rigideces efectivas basadas en la relación de carga axial, área y resistencia del material, la práctica de diseño común a menudo omite estos procedimientos iterativos en favor de los valores tabulados, los cuales no garantizan ser calibrados para capturar la degradación de rigidez por deslizamiento de barras o falla de adherencia en interfaces de concreto viejo-nuevo (ASCE, 2017). El ASCE 41 en su sección 10.3.1.2 indica determinar la rigidez efectiva de los elementos mediante el valor secante del punto de fluencia del componente, y como alternativa permite usar rigideces efectivas de la Tabla 10-5 de la misma norma para elementos nuevos que respeten la ACI318 como rehabilitaciones, pero la asunción errónea de que una columna encamisada posee la misma integridad y rigidez inicial que una columna nueva de dimensiones idénticas, compromete la validez del análisis de distribución de cortante basal.

1.2 Justificación de la Investigación

La intervención de estructuras existentes mediante encamisado de hormigón armado (*concrete jacketing*) no solo altera la geometría seccional, sino que modifica fundamentalmente la topología y la respuesta mecánica del elemento al generar una sección compuesta heterogénea, cuya rigidez operativa no puede ser deducida linealmente a partir de la simple superposición de sus materiales constituyentes. En consecuencia, la presente investigación se fundamenta en la necesidad crítica de articular una metodología que cierre la brecha existente entre el complejo comportamiento no lineal de estas secciones rehabilitadas y las herramientas de diseño lineal simplificado que predominan en la práctica profesional.

1.2.1 Necesidad práctica: Facilitar el diseño en software comercial (ETABS) mediante factores calibrados (α)

Si bien el uso de plataformas comerciales como ETABS constituye el estándar industrial para el análisis global de edificaciones, este software presenta limitaciones sustanciales al abordar elementos rehabilitados, puesto que su módulo nativo *Section Designer* se restringe al cálculo de propiedades geométricas brutas, careciendo de la capacidad intrínseca para integrar fenómenos complejos como la degradación de rigidez por deslizamiento en la interfaz o la influencia de la historia de carga previa del núcleo. Esta deficiencia tecnológica se agrava ante la ausencia de normativas explícitas – tales como la NEC-SE-HM o el ACI 318 – que proporcionen factores de agrietamiento específicos para elementos encamisados, forzando a los ingenieros a asumir erróneamente factores de columnas monolíticas nuevas ($0.70I_g$); esta práctica conlleva una sobreestimación sistemática de la rigidez lateral y, por ende, una subestimación peligrosa de las derivas reales de piso.

Por tanto, esta investigación resulta imperativa para proporcionar factores de modificación de rigidez (α) debidamente calibrados, limitadas al alcance propuesto de análisis, los cuales faculten al ingeniero proyectista para entender y simular el comportamiento degradado real de la columna encamisada dentro de un análisis lineal elástico, simplificando drásticamente el flujo de trabajo al permitir evaluaciones de desempeño seguras sin la necesidad de recurrir a laboriosos análisis no lineales para cada proyecto de rehabilitación rutinario.

1.2.2 Ventaja del Método de Fibras (OpenSees) como herramienta de validación numérica de alta precisión.

Ante la incertidumbre cognitiva inherente a los modelos lineales y la inviabilidad logística y económica de ejecutar campañas experimentales a escala real para múltiples configuraciones, se justifica la implementación de la plataforma OpenSees como herramienta de validación numérica de alta fidelidad. A diferencia de los modelos de plasticidad concentrada, se recurre al enfoque de discretización por fibras (*Fiber Section*) debido a que esta técnica nos permite monitorear la evolución del estado tensional en cada subdivisión de la sección transversal, capturando explícitamente la no linealidad constitutiva de los materiales (distinguiendo entre concreto confinado y no confinado) así como la interacción dinámica axial-flexión ($P - M$) en tiempo real.

La adopción de este enfoque computacional avanzado es esencial, pues permite simular el comportamiento histeréticos si se requiriera y la degradación de rigidez con una precisión que emula los resultados experimentales físicos. Al establecer la respuesta no lineal de OpenSees como la línea base de desempeño (capacidad y ductilidad real), se procede a calibrar los modelos lineales simplificados de ETABS, garantizando así que el diseño prescriptivo cuente con un respaldo numérico robusto.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Determinar factores de rigidez efectiva (α) para el modelado lineal en ETABS de columnas cuadradas de hormigón armado reforzadas con encamisado, calibrados a partir de la respuesta no lineal obtenida mediante modelos de fibra en OpenSeesPy.

1.3.2 Objetivos Específicos:

- Desarrollar modelos analíticos no lineales en OpenSeesPy utilizando formulación basada en fibras (*Fiber Section*) y simulación constructiva por etapas, para representar la interacción reológica y el confinamiento variable en la sección compuesta.
- Evaluar la capacidad de resistencia lateral y ductilidad mediante análisis estático no lineal (Pushover) sobre una matriz de casos de estudio en columnas de 300x300 mm con relaciones de espesor de encamisado variables (J-075 a J-175), considerando cargas gravitacionales preexistentes.

- Formular una propuesta matemática de estimación del factor de inercia agrietada (α) en función del espesor del encamisado, mediante la correlación estadística entre la rigidez secante al punto de fluencia (OpenSeesPy) y la rigidez elástica bruta (ETABS)

1.4 Alcance y Metodología

1.4.1 Alcance

El estudio delimita su campo de acción al análisis del comportamiento estructural de columnas de hormigón armado de sección cuadrada ($300 \times 300 \text{ mm}$) y resistencia original ($f'_c = 21 \text{ MPa}$), las cuales son intervenidas mediante la técnica de encamisado empleando micro-hormigón de alta prestación ($f'_c = 28 \text{ MPa}$); bajo esta premisa, la investigación se articula en torno a una matriz paramétrica de cuatro configuraciones (J-075 a J-175) gobernada por la variación del espesor del recrecido – en un rango de 75 mm a 175 mm –, estableciéndose como criterio de control la invariabilidad de la cuantía de refuerzo longitudinal ($\rho_l \approx 1\%$) y el recubrimiento entre el estado original y el reforzado, condición *sine qua non* para desacoplar la influencia de la inercia geométrica de otras variables de diseño.

Desde la perspectiva del modelado constitutivo, además se asume una interfaz monolítica (adherencia perfecta) entre el núcleo existente y el nuevo material de encamisado, hipótesis justificada por el uso prescrito de micro-hormigón con propiedades de alta adherencia y la preparación superficial adecuada. Asimismo, la evaluación del desempeño se limita a la respuesta ante cargas estáticas laterales monótonas para el análisis *Pushover*, integrando explícitamente la no linealidad geométrica (Efectos P-Delta) para capturar la inestabilidad global ante grandes deformaciones bajo las cargas gravitatorias aplicadas a la columna “existente”, pero excluyendo efectos de carga cíclica degradante o interacción dinámica suelo-estructura, con la finalidad de centrar el análisis en la determinación precisa de la rigidez secante y la capacidad última de la sección compuesta.

1.4.2 Metodología

Para el logro de los objetivos planteados, se adopta un enfoque de investigación cuantitativo-deductivo, estructurado en una secuencia lógica de modelado numérico, simulación no lineal y calibración analítica.

En primera instancia, se procede al Modelado Numérico Avanzado utilizando la librería OpenSeesPy dentro del entorno de programación de Visual Studio Code + Gemini Code Assist,

donde se implementa el método de la fibra (Fiber Section) para discretizar la sección transversal compuesta; esta técnica resulta esencial puesto que permite asignar leyes constitutivas uniaxiales diferenciadas para el hormigón confinado del núcleo (Modelo de Mander – `confinedconcrete01`), el micro-hormigón del encamisado (`concrete02`) y el acero de refuerzo (`ReinforcingSteel`), capturando la no linealidad del material bajo grandes deformaciones.

Posteriormente, se ejecuta la fase de Simulación y Obtención de Respuesta, sometiendo los modelos numéricos a un análisis estático no lineal (Pushover) controlado por desplazamiento que incorpora transformaciones geométricas de segundo orden (P-Delta), lo cual permite generar las curvas de capacidad (Cortante Basal vs. Desplazamiento) y determinar con exactitud el punto de fluencia efectivo y la ductilidad del sistema considerando la pérdida de rigidez por inestabilidad geométrica.

Finalmente, se ejecuta la fase de Determinación y Análisis de Factores, la cual inicia con la validación rigurosa del modelo de referencia (columna sin refuerzo) contrastando sus propiedades dinámicas y capacidad seccional teórica para asegurar la fidelidad numérica; posteriormente, se procesa la matriz paramétrica de espesores variables, donde, mediante la igualación de la rigidez secante al punto de fluencia ($0.75V_{max}$), se obtienen los factores de modificación de inercia (α) específicos para cada configuración, con el propósito último de establecer la ley de comportamiento que correlaciona el incremento del espesor del encamisado con la evolución de su eficiencia estructural efectiva.

CAPÍTULO I: FUNDAMENTOS DEL COMPORTAMIENTO NO LINEAL Y REFORZAMIENTO

1.1 Comportamiento Mecánico del Hormigón Confinado

La respuesta inelástica de elementos de hormigón armado sometidos a demandas sísmicas severas depende intrínsecamente de la capacidad del material para sostener deformaciones plásticas sin una degradación abrupta de resistencia, propiedad que no es inherente al concreto simple —de naturaleza frágil— sino que debe ser inducida mediante mecanismos de confinamiento lateral, teniendo acero de refuerzo longitudinal, transversal y recubrimiento/s.

1.1.1 Efecto del confinamiento en la ductilidad y resistencia a compresión

El mecanismo de mejora mecánica por confinamiento se fundamenta en la restricción pasiva de la dilatación transversal del núcleo de hormigón; al someterse a compresión axial, el material experimenta una expansión lateral por efecto Poisson que, al ser coartada por la rigidez del acero de refuerzo transversal (estribos cerrados y ganchos sísmicos), genera una presión de contacto en la interfaz acero-hormigón. Esta interacción induce un estado triaxial de compresión en el núcleo que retrasa la propagación de microfisuras internas, resultando en un incremento sustancial de la deformación última a compresión (ϵ_{cu}) y, en menor medida, de la resistencia máxima (f'_{cc}) (Chen y otros, 2022).

No obstante, la eficiencia de este mecanismo no es uniforme para todas las clases de material. Investigaciones recientes (Chen y otros, 2022) señalan que el nivel de confinamiento efectivo tiende a disminuir conforme se incrementa la resistencia del concreto no confinado; este comportamiento es esperable debido a que el hormigón de alta resistencia (HSC) exhibe una menor dilatación lateral en el rango inelástico comparado con el hormigón convencional (NSC). Esta reducida expansión transversal limita la activación de los esfuerzos de tracción en los estribos, impidiendo que el acero transversal alcance su punto de fluencia antes de la falla del núcleo y reduciendo, por ende, la presión de confinamiento pasivo generada (Mander y otros, 1988).

1.1.2 Modelo Constitutivo de Mander et al. (1988) para secciones rectangulares.

Para la caracterización analítica de la sección compuesta, se adopta el modelo constitutivo unificado propuesto por Mander, Priestley y Park (1988), puesto que esta formulación permite predecir la curva esfuerzo-deformación ($\sigma - \epsilon$) tanto para el hormigón

del núcleo confinado como para el recubrimiento no confinado mediante una única ecuación algebraica continua basada en la función de Popovics.

La resistencia máxima a la compresión del concreto confinado (f'_{cc}) se determina en función de la presión lateral efectiva (f'_l) ejercida por el refuerzo transversal, según la relación empírica calibrada experimentalmente:

$$f'_{cc} = f'_c \left(-1.254 + 2.254 \sqrt{1 + \frac{7.94f'_l}{f'_c}} - 2 \frac{f'_l}{f'_c} \right) \quad \text{Eq. 1.1.1}$$

Donde:

f'_{cc} : Resistencia máxima a compresión del concreto confinado [MPa].

f'_c : Resistencia a compresión del concreto no confinado (cilíndrica) [MPa].

f'_l : Presión lateral efectiva de confinamiento [MPa].

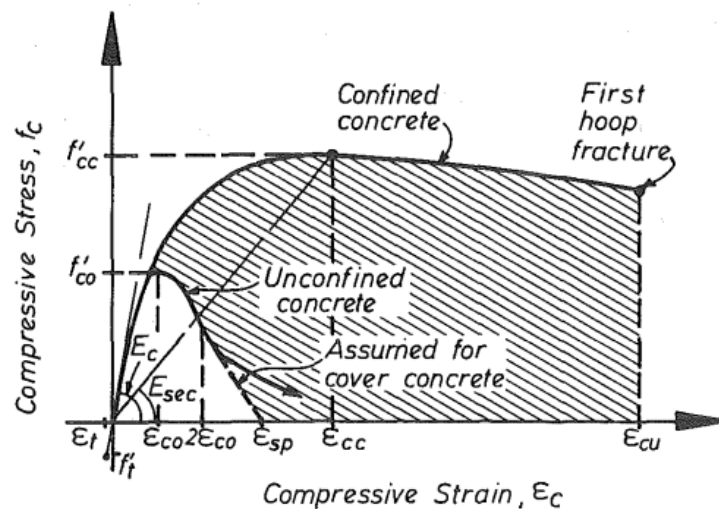


Figura 1.1-1 Contraste esquemático de la respuesta constitutiva esfuerzo-deformación del hormigón en estados confinado y no confinado. Fuente: (Mander y otros, 1988)

Una vez determinado el pico de resistencia, la deformación unitaria correspondiente a este esfuerzo máximo (ϵ_{cc}) aumenta significativamente respecto a la deformación del concreto simple, calculándose como:

$$\epsilon_{cc} = \epsilon_{co} \left[1 + 5 \left(\frac{f'_{cc}}{f'_c} - 1 \right) \right] \quad \text{Eq. 1.1.2}$$

Donde:

ϵ_{cc} : Deformación unitaria del concreto confinado en el pico de esfuerzo [mm/mm].

ϵ_{co} : Deformación unitaria del concreto no confinado (usualmente 0.002) [mm/mm].

La curva completa de comportamiento esfuerzo-deformación para cualquier nivel de deformación ϵ_c se describe mediante la siguiente función racional, la cual captura tanto la rama ascendente como el ablandamiento post-pico (softening):

$$f_c = \frac{f'_{cc} \cdot x \cdot r}{r - 1 + x^r} \quad \text{Eq. 1.1.3}$$

Siendo:

$$x = \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{cc}} ; r = \frac{E_c}{E_c - E_{sec}}$$

Donde:

f_c : Esfuerzo longitudinal del concreto para una deformación dada [MPa].

ϵ_c : Deformación unitaria longitudinal actual [mm/mm].

E_c : Módulo de elasticidad tangente del concreto ($4700\sqrt{f'_c}$) [MPa].

E_{sec} : Módulo secante al pico de resistencia (f'_{cc}/ϵ_{cc}) [MPa].

1.1.3 Coeficiente de Efectividad para Secciones Rectangulares

En el caso específico de secciones rectangulares, la presión de confinamiento no es uniforme debido a la formación de arcos de descarga entre los estribos y las barras longitudinales. Mander, Priestley y Park (1988) introducen el coeficiente de efectividad del confinamiento (k_e) para penalizar la cuantía volumétrica de acero, reconociendo que solo una fracción del núcleo (A_e) está efectivamente restringida:

$$k_e = \frac{\left(1 - \sum_{i=1}^n \frac{(w'_i)^2}{6b_c d_c}\right) \left(1 - \frac{s'}{2b_c}\right) \left(1 - \frac{s'}{2d_c}\right)}{1 - \rho_{cc}} \quad \text{Eq. 1.1.4}$$

Donde:

k_e : Coeficiente de efectividad del confinamiento (adimensional).

w'_i : Separación libre horizontal entre barras longitudinales adyacentes soportadas [mm].

b_c : Dimensión del núcleo confinado (al eje de estribos) en dirección x [mm].

d_c : Dimensión del núcleo confinado (al eje de estribos) en dirección y [mm].

s' : Separación libre vertical entre estribos (luz libre) [mm].

ρ_{cc} : Cuantía de refuerzo longitudinal respecto al área del núcleo (adimensional).

Finalmente, este coeficiente reduce la presión lateral teórica a un valor efectivo (f'_l), el cual se promedia considerando las cuantías de refuerzo transversal en ambas direcciones (ρ_x y ρ_y):

$$f'_l = \frac{1}{2} k_e (\rho_x + \rho_y) f_{yh} \quad \text{Eq. 1.1.5}$$

Donde:

ρ_x, ρ_y : Cuantía volumétrica de refuerzo transversal en las direcciones principales (adimensional).

f_{yh} : Esfuerzo de fluencia del acero transversal [MPa].

1.2 Técnica de Encamisado (Concrete Jacketing)

La rehabilitación estructural mediante encamisado de hormigón armado se concibe no como una mera adición volumétrica de material perimetral, sino como una estrategia de intervención integral orientada a transmutar la respuesta sismorresistente del elemento, puesto que se persigue el incremento simultáneo de la rigidez lateral, la capacidad de carga axial y la ductilidad seccional; para lograr este desempeño, se recurre a la configuración de una nueva envolvente de hormigón armado alrededor del elemento existente, generando así una sección compuesta cuya finalidad última es garantizar una redistribución eficiente de las demandas sísmicas entre el núcleo original y el recrecido externo.

1.2.1 Mecanismo de acción compuesta: Hipótesis de sección monolítica.

La eficiencia estructural de esta técnica se encuentra gobernada por el "Mecanismo de Acción Compuesta", principio fundamental que establece que, al someter el elemento rehabilitado a deformaciones laterales, resulta imperativo que tanto el núcleo preexistente

como la nueva camisa trabajen de forma solidaria, exhibiendo una compatibilidad de deformaciones unitaria que descarte cualquier discontinuidad o deslizamiento en el campo de desplazamientos. Para fines de modelado analítico en esta investigación, se adopta la hipótesis de sección monolítica perfecta, premisa que se sustenta en la evidencia experimental seminal de Júlio, Branco, & Silva (2005), quienes demostraron que, mediante una preparación superficial adecuada (como el escarificado o chorro de arena), es factible lograr que el encamisado trabaje solidariamente con el núcleo, permitiendo asumir una acción compuesta total en el análisis estructural.

Esta validación es reforzada por investigaciones sobre técnicas de interfaz (Bousias y otros, 2007), las cuales confirmaron que el incremento de la rugosidad superficial permite que las columnas rehabilitadas alcancen valores de rigidez y resistencia comparables —e incluso superiores— a los de elementos monolíticos de referencia. Estudios comparativos posteriores (Vandoros & Dritsos, 2006) han cuantificado esta eficiencia, hallando que una sección encamisada con tratamiento de interfaz adecuado recupera hasta el 91% de la capacidad teórica de una sección monolítica idéntica; consecuentemente, y respaldado por la síntesis experimental de (Cruz Eligio, 2022), se justifica el uso de modelos de cálculo que integran las contribuciones de ambos materiales como un sólido único equivalente para la simulación numérica.

1.2.2 Consideraciones sobre materiales de reparación: Micro-hormigón y recubrimientos reducidos.

La viabilidad constructiva del encamisado en espesores reducidos impone restricciones reológicas severas que, en la práctica, inhabilitan el uso de hormigones convencionales. Dado que los casos de estudio plantean espesores de encamisado que inician en los 75 mm – espacio crítico en el cual debe alojarse la nueva jaula de armadura longitudinal y transversal –, el uso de agregados pétreos estándar implicaría un alto riesgo de segregación y la formación de oquedades (*cangrejas*) que comprometerían la transferencia de carga en la interfaz discutida anteriormente.

En respuesta a esta limitante constructiva, se propone el uso de micro-hormigón fluido de alta resistencia ($f'_c = 28 \text{ MPa}$) como material de reparación. Esta elección se sustenta en las propiedades tixotrópicas y autocompactantes del material, el cual, al estar compuesto por áridos finos de granulometría controlada, garantiza la penetrabilidad de la mezcla a través de la congestión del acero sin necesidad de vibrado mecánico excesivo. De acuerdo con

especificaciones técnicas de proveedores especializados como Cymper (2016), estos morteros técnicos logran desarrollos de resistencia temprana significativos —alcanzando prestaciones estructurales a las 24 horas— y proveen una durabilidad superior frente a agentes agresivos (cloruros y sulfatos) gracias a su baja permeabilidad.

Si bien la literatura sugiere que el micro-hormigón es una solución ideal para espesores ultra-delgados de entre 2 a 50 mm (Brick & Bolt), su aplicación en capas de 75 mm resulta igualmente ventajosa para asegurar la integridad monolítica del recubrimiento. Consecuentemente, el modelado numérico en OpenSees incorpora estas propiedades materiales mediante el modelo constitutivo Concrete02 para el recubrimiento y ConfinedConcrete01 para el núcleo confinado, calibrando los parámetros de deformación límite para no sobreestimar la ductilidad, pero aprovechando la fiabilidad de la adherencia que este material garantiza.

1.3 Modelado Numérico Avanzado

La simulación de la respuesta sísmica en estructuras de hormigón armado ha evolucionado desde simplificaciones fenomenológicas hacia formulaciones micromecánicas robustas. Frente a las limitaciones de los modelos de plasticidad concentrada (*lumped plasticity*), que restringen la no linealidad a resortes de longitud cero en los extremos del elemento, esta investigación adopta el enfoque de plasticidad distribuida implementado en la plataforma OpenSees, el cual permite capturar la evolución del daño a lo largo del elemento y a través de la sección transversal.

1.3.1 Método de la Fibra (Fiber Element Method): Ventajas frente a la plasticidad concentrada.

El Método de la Fibra se fundamenta en la discretización de la sección transversal del elemento en un conjunto discreto de filamentos longitudinales (*fibras*), donde cada subdivisión representa un área tributaria de hormigón (confinado o no confinado) o acero de refuerzo. De acuerdo con la formulación clásica de Taucer, Spacone, & Filippou (1991), la respuesta fuerza-deformación de la sección no se predefine, sino que se deriva implícitamente de la integración numérica de la respuesta tensión-deformación uniaxial ($\sigma - \epsilon$) de las fibras individuales, asumiendo la hipótesis de Navier-Bernoulli donde las secciones planas permanecen planas y normales al eje deformado.

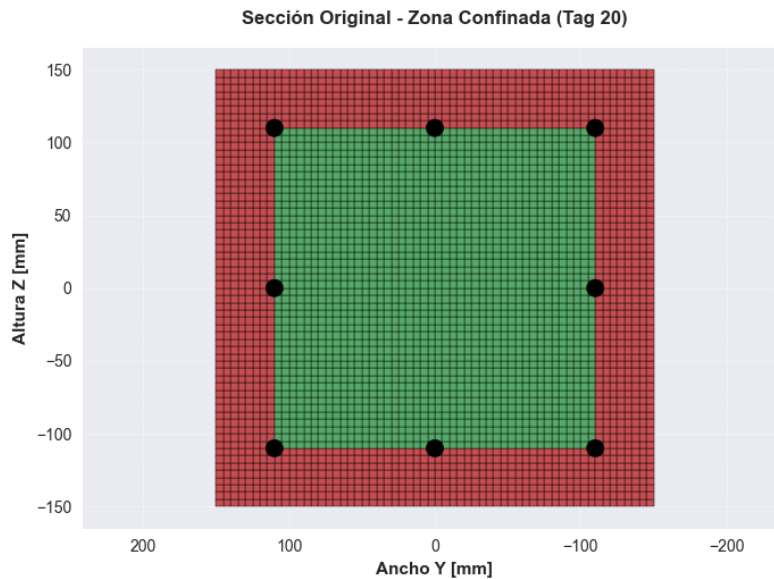


Figura 1.3-1. Discretización de una sección transversal en fibras de hormigón y acero

La adopción de esta metodología, específicamente bajo la formulación basada en fuerzas (*Force-Based Formulation*) propuesta por Spacone, Filippou, & Taucer (1996) ofrece ventajas determinantes frente a los modelos de plasticidad concentrada tradicionales:

Interacción P-M-M en Tiempo Real: Mientras que las rótulas plásticas requieren la definición *a priori* de superficies de fluencia estáticas que a menudo desacoplan la carga axial del momento, el modelo de fibra captura de manera natural el acoplamiento entre la fuerza axial fluctuante y la capacidad a flexión biaxial. Esto resulta crítico en columnas encamisadas, donde la variación de la carga axial durante el sismo altera instantáneamente la rigidez y resistencia del elemento (Spacone y otros, 1996).

Monitoreo Constitutivo Local: El método faculta el monitoreo explícito del estado tensional en cada material, permitiendo asignar leyes constitutivas avanzadas —como el modelo de Menegotto-Pinto para el acero con efecto Bauschinger— y capturar mecanismos de falla locales como el aplastamiento del concreto de recubrimiento o la fractura del refuerzo, fenómenos que los modelos de resortes globales no pueden detallar (Taucer y otros, 1991).

Plasticidad Extendida: A diferencia de los enfoques concentrados que fijan una longitud de rótula plástica (L_p) constante, la formulación de fibras permite que la fluencia se propague a cualquier punto a lo largo del elemento (puntos de integración de Gauss-Lobatto o Gauss-Legendre), proporcionando una estimación más precisa de

la curvatura y las derivas de entrepiso bajo distribuciones de carga complejas (Scott & Fenves, 2006).

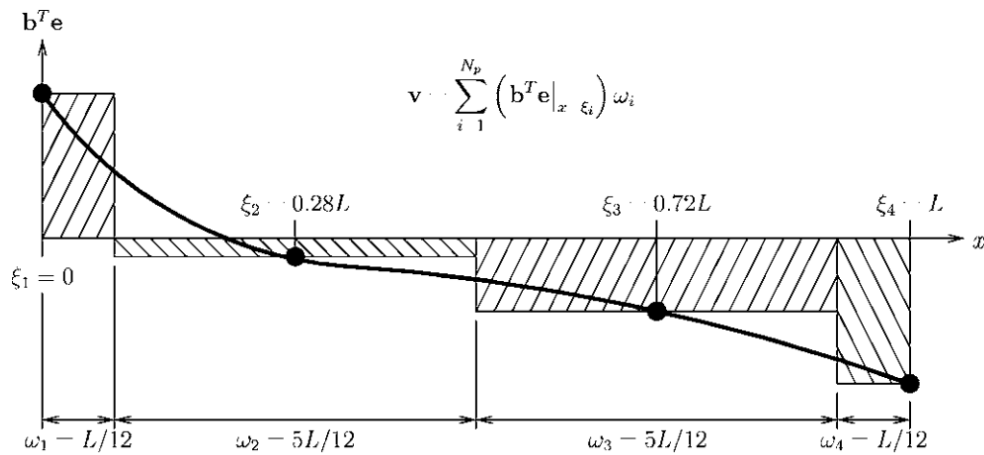


Figura 1.3-2. Integración numérica mediante Gauss-Lobatto (4 puntos) para la evaluación de compatibilidad en elementos basados en fuerzas. (Scott & Fenves, 2006)

1.3.2 Rigidez Efectiva (EI_{eff}): Concepto de bilinealización y punto de cedencia.

Desde el análisis no lineal hacia el diseño lineal simplificado, es necesario definir una rigidez efectiva (EI_{eff}) que represente el comportamiento agrietado del elemento hasta su punto de fluencia. Dado que la rigidez no es una propiedad constante sino dependiente de la resistencia, Priestley y Kowalsky (2000) establecen que la rigidez efectiva debe calcularse como la rigidez secante al punto de fluencia real, definida teóricamente como:

$$EI_{eff} = M_n / \phi_y \quad \text{Eq. 1.3.1}$$

En el contexto de esta investigación, la determinación de los factores de rigidez α se basa en la bilinealización de la curva de capacidad obtenida del análisis *Pushover*. Siguiendo el criterio de áreas iguales (balance de energía) y las recomendaciones clásicas de Paulay y Priestley (1992), la rigidez elástica efectiva (K_{eff}) se define mediante la secante que pasa por el origen y por el punto de la curva de capacidad correspondiente al 75% de la carga máxima ($0.75 V_{max}$); este punto se selecciona estratégicamente por representar el inicio de la fluencia significativa en el refuerzo longitudinal, minimizando la influencia del agrietamiento inicial errático.

Consecuentemente, el factor α se obtiene de la relación entre esta rigidez secante operativa y la inercia bruta geométrica de la sección compuesta ($I_{g,tot}$), tal que

$$\alpha = (K_{eff} \cdot L^3 / 3E_c) / I_{g,tot},$$

permitiendo transferir la precisión del modelo no lineal a los parámetros de entrada de un software lineal como ETABS.

1.4 Software OpenSees y OpenSeesPy

Para abordar la complejidad del análisis no lineal en secciones compuestas, no es suficiente con emplear software comercial convencional, que muchas veces funciona como una "caja negra" limitando el control sobre los algoritmos de solución. Por esta razón, la investigación se apoya en el Open System for Earthquake Engineering Simulation (OpenSees). La elección de este framework de código abierto no es arbitraria; se justifica por su capacidad para permitirnos manipular directamente la programación de los elementos finitos y los integradores temporales.

Específicamente, utilizamos la interfaz de un Jupyter Notebook en Visual Studio Code, e instalando la librería de OpenSeesPy para conectar la potencia de cálculo del núcleo en C++ con la versatilidad de Python, cuya versión compatible es 3.12.10. Lejos de buscar una automatización cerrada a un conjunto de variables, se programó con el fin de mayor manipulación, control y definición paramétrica, facilitando la modificación manual de las variables críticas para cada escenario de la matriz de casos, garantizando así que el análisis de cada configuración mantenga el rigor numérico necesario sin las restricciones de una interfaz gráfica cerrada (Zhu y otros, 2018)

1.4.1 *Arquitectura del framework para simulación sísmica.*

Lo que distingue a OpenSees de otros programas es su arquitectura orientada a objetos. Aquí, el modelo físico (nodos, elementos, materiales) está completamente desacoplado de los algoritmos matemáticos que resuelven las ecuaciones. Esta separación es crucial para nuestro estudio: nos permite cambiar la estrategia de solución "al vuelo" si el análisis *Pushover* encuentra problemas de convergencia – algo muy común cuando el micro-hormigón entra en la rama de ablandamiento –, sin necesidad de alterar la estructura del modelo. Básicamente, los componentes actúan como objetos independientes que se comunican entre sí, dándonos una flexibilidad que los softwares cerrados no ofrecen (McKenna, 2011).

1.4.2 Elementos finitos basados en fuerzas (*ForceBeamColumn*): Formulación y ventajas en plasticidad distribuida.

En cuanto a la discretización de las columnas, hemos optado decididamente por el elemento `forceBeamColumn`. La razón se basa en que los elementos basados en desplazamientos requieren dividir la columna en muchos segmentos para no perder precisión, la formulación basada en fuerzas utiliza funciones de interpolación que satisfacen el equilibrio de forma exacta a lo largo del elemento. Esto significa que podemos modelar la columna completa con un único elemento finito y aun así capturar con mayor exactitud la plasticidad distribuida.

Al utilizar este enfoque, integramos la respuesta de la sección (calculada con el método de fibras) empleando la regla de cuadratura de Gauss-Legendre debido a que su método de integración más usado Gauss-Lobatto no integra exactamente para proporcionar la solución exacta para distribuciones de curvatura lineal. Por ello, “Legendre” al ubicar los puntos de monitoreo en el interior del elemento, permite registrar la evolución del daño y la degradación de rigidez evitando los problemas de localización de deformaciones excesivas en los nodos extremos, garantizando una respuesta global más estable bajo grandes derivadas (Scott & Fenves, 2006).

1.5 Análisis, comentarios y conclusiones parciales del Capítulo I.

Al cerrar la revisión crítica de los fundamentos teóricos relacionados y el estado del arte de interés, es necesario decantar qué herramientas conceptuales son realmente operativas para resolver la problemática planteada. Posterior a la lectura de este capítulo, subyace una premisa ineludible: los procedimientos lineales convencionales y las normativas prescriptivas carecen de la resolución necesaria para predecir la respuesta de una sección compuesta llevada al límite de su capacidad inelástica, tocando un área más profunda (análisis no lineal) para resolver variaciones en áreas de uso fundamental (análisis lineal) .

En primer lugar, la adopción del modelo constitutivo de Mander se valida como la ruta metodológica correcta porque no suponemos un factor de aumento experimental fijo para f'_c para simular el hormigón confinado, por lo contrario, se basa en su confinamiento existe y en conjunto a sus mitigadores de rigidez simula el comportamiento de los elementos confinados con certeza. Porque no se trata simplemente de elegir el modelo más citado, sino de utilizar su

capacidad específica para penalizar la eficiencia del confinamiento en secciones rectangulares a través del coeficiente k_e . Esta consideración es vital en nuestra investigación, dado que la distribución de esfuerzos en el núcleo de la columna existente no es uniforme y depende críticamente de la geometría de los estribos del encamisado.

En segundo lugar, respecto a la interacción entre el hormigón antiguo y el nuevo, la evidencia experimental analizada respalda una decisión de modelado audaz pero justificada: la hipótesis de "sección monolítica". Aunque físicamente existe una interfaz, hemos establecido que, garantizando una preparación superficial adecuada y empleando materiales de reparación de alta adherencia, como el micro-hormigón fluido descrito en la sección 1.2, el deslizamiento es despreciable. Esto legitima, desde un punto de vista ingenieril, la asunción de compatibilidad total de deformaciones en la simulación numérica.

Finalmente, la elección de la plataforma OpenSeesPy y la implementación de elementos basados en fuerzas (ForceBeamColumn) con integración de Gauss-Legendre responden a una necesidad de precisión matemática y experiencia adquirida al probar otros métodos. Al evitar la integración de Lobatto (que concentra deformaciones en los extremos) y optar por Legendre (que monitorea el daño en el interior del elemento), aseguramos una respuesta global estable y libre de los problemas de convergencia numérica que suelen plagar los modelos de plasticidad concentrada o de mallas rígidas, tomando la libertad de expresión, que ETABS cuenta por default a Gauss-Lobatto con puntos de integración distintos a la posición de los extremos, contrario a su descripción del método, con fin de evitar fallos en la convergencia numérica.

En síntesis, se concluye que la integración de la teoría de confinamiento de Mander, la hipótesis de adherencia perfecta y una formulación numérica avanzada basada en fibras, constituye un marco teórico robusto. Con esta estructura conceptual lista, la investigación dispone de las bases necesarias para proceder al Capítulo II, cuyo objetivo será la ejecución de la matriz de casos y la cuantificación precisa de la degradación de la rigidez efectiva (α) en función del espesor del encamisado.

CAPÍTULO II: METODOLOGÍA Y CARACTERIZACIÓN DE LOS MODELOS

Establecido el marco teórico, este capítulo detalla la instrumentación numérica de la investigación llevada a cabo en el entorno de Visual Studio Code. La metodología se aleja de la aplicación genérica de software para centrarse en una arquitectura por módulos para programar, modelar y analizar con las herramientas de la librería de OpenSees para Python (OpenSeesPy), donde cada decisión – desde la selección del integrador numérico hasta la discretización de las fibras – responde a la necesidad de capturar la respuesta inelástica del hormigón compuesto evitando en su mayoría los problemas de convergencia, alineándonos a las respuestas de los programas comerciales, pero con mayor control sobre la calidad de resultados.

2.1 Definición de la Campaña Paramétrica

Para aislar el efecto de la inercia geométrica sobre la rigidez efectiva, se ha diseñado un experimento numérico controlado que parte de una estructura deficiente típica para luego evaluar su evolución bajo diferentes grados de intervención.

El comportamiento no lineal de una columna encamisada programada con OpenSeesPy con variables abierta a cambios de diseño, deja una rama amplia de estudio de casos posibles. Cada resultado específico está ligado a las condiciones fijas y variables controlables generales establecidas en el alcance de estudio, dando a entender que se comprende que los resultados de los factores de rigidez α pueden tener resultados varios si se alteran variables tales como:

- Relación de Resistencia en hormigón existente y hormigón del encamisado.
- Cuantía de acero de la columna existente y/o relación con la cuantía de acero del encamisado.
- Variaciones de las propiedades de los modelos constitutivos de los materiales (acero, hormigón y hormigón confinado) tanto de la columna existente como del encamisado.
- Variaciones de las propiedades geométricas de la columna
 - Variación del espesor del encamisado
 - Cambios en la esbeltez final versus esbeltez inicial de la columna.
 - Relación de Áreas de la sección original y encamisada.

- Disposición y ubicación del acero de refuerzo con respecto al eje central y eje neutro.

Existiendo tantos casos de estudios, se determinó a fijar variables para poder estudiar el comportamiento del modificador de rigidez (α), como es una cuantía fija de acero de refuerzo longitudinal mayor y cercana al 1%, separación fija de 7cm de estribos vinculadas a los cambios de condiciones de confinamiento y relaciones de resistencia del hormigón en $f'_c = 21 \text{ MPa}$ en consideración de estructuras existentes que bajo códigos anteriores fueron diseñadas bajo esta resistencia mínima los elementos estructurales, y bajo el concepto de reforzamiento el hormigón del encamisado debe ser superior, por ello $f'_{c\ jack} = 28 \text{ MPa}$ y se plantea el uso de micro-hormigón como método constructivo más favorable, no obstante, las propiedades principales del hormigón son generales, asumiendo que el desempeño estructural del micro-hormigón es igual al hormigón normal.

Las variables no controladas debido a su mayor dependencia entre variables geométricas, son la relación de áreas y variación de la esbeltez, se entiende por un cambio en el espesor del encamisado (t_{jack}), a que si este aumenta:

- Aumentan, relaciones de $Area_{jack}/Area_{final}$, $Area_{jack}/Area_{original}$, donde el $Area_{original}$ es fija.
- Disminuye la esbeltes de la columna, $\lambda = \frac{L_e}{r} \rightarrow r \propto t_{jack} \rightarrow \lambda \propto \frac{1}{t_{jack}}$

2.1.1 Descripción de la Columna Base: Sección 300x300 mm, Hormigón ($f'_c = 210 \frac{kg}{cm^2}$).

Para aislar el efecto de la inercia geométrica sobre la rigidez efectiva, el experimento numérico controlado parte de una estructura deficiente típica para luego evaluar su evolución bajo diferentes grados de intervención.

La columna existente (base u original) tiene una sección de 300x300mm, configuración de acero de refuerzo longitudinal de $4 \phi 12 \text{ mm} (Esq) + 1 \phi 12 \text{ mm por Cara} \rightarrow 904.78 \text{ mm}^2 \rightarrow \rho = 1.01 \%$, refuerzo transversal calculado regida por la NEC-SE-HM resultan en $EST 1 \phi 10 \text{ mm @ } 7 \text{ cm}$ y una altura total de 3600 mm con una luz libre de 6000 mm supuesta con único fin de verificaciones normativas de espaciados y zona de confinamiento.

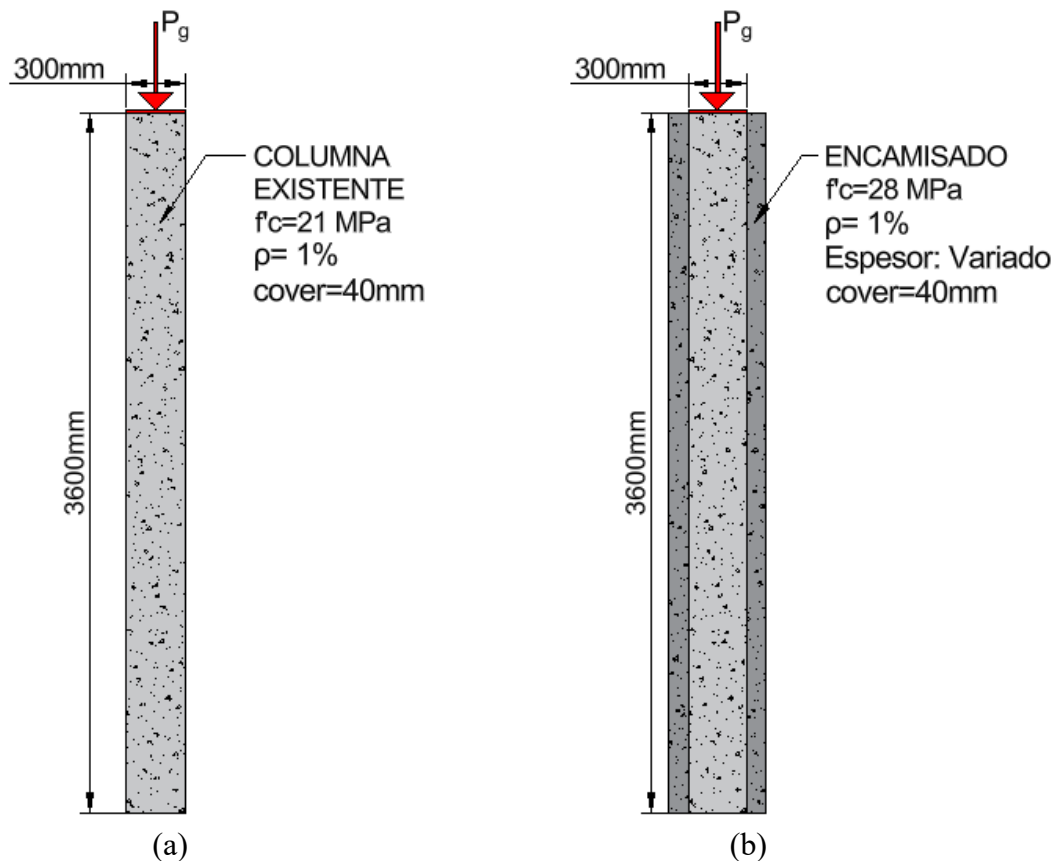


Figura 2.1-1. Esquema de (a) columna existente en geometría y parámetros de diseño, y (b) columna encamisada con micro-hormigón $f'_c = 28 \text{ MPa}$.

2.1.2 Matriz de Casos de Estudio para Encamisado (Micro-hormigón $f'_c = 28 \text{ MPa}$).

Se plantean estratégicamente cuatro configuraciones de encamisado de hormigón armado, donde la variable independiente es el espesor del cuerpo del encamisado (t_{jack}) y la variable dependiente a estudiar será el factor modificador de la rigidez a flexión (α).

Para garantizar la comparabilidad de los resultados y evitar "ruido" en los datos, se mantiene una variable de control estricta como se comentó: la cuantía de acero se ajusta cercanamente al 1% del área bruta compuesta en todos los casos. Esto implica que, a medida que crece la sección de hormigón, también aumentamos el acero proporcionalmente.

Cada configuración se detalla en la Tabla 2.1-1, donde se dispone el diámetro de varillas de acero corrugado, asignando refuerzos tanto en las esquinas ("Esq") como en las caras ("Cara") para mantener la simetría. Asimismo, se establece un único valor de recubrimiento de 4.0 cm para el encamisado, eliminando otra posible fuente de variabilidad.

Tabla 2.1-1. Matriz de configuraciones geométricas para el encamisado (Casos J-075 a J-175).

ID Caso	Espesor (t_{jack})	Sección Final ($B_{tot} \times H_{tot}$) mm	Aumento Área Acumulado	RecuB. (cover)	Configuración de Acero o Sugerida (Simétrica)	$A_{s,adicional}$ (mm^2) Acero existente 904.78 mm^2	Cuantía Global ρ (%)
J-075	7.5 cm	450 x 450	+125%	4.0 cm	4 ϕ 14mm (Esq) + 1 ϕ 14mm por Cara	1231.50	1.05 %
J-100	10.0 cm	500 x 500	+178%	4.0 cm	4 ϕ 16mm (Esq) + 2 ϕ 12mm por Cara	1709.03	1.05 %
J-125	12.5 cm	550 x 550	+236%	4.0 cm	4 ϕ 16mm (Esq) + 3 ϕ 12mm por Cara	2161.42	1.01 %
J-175	17.5 cm	650 x 650	+369%	4.0 cm	4 ϕ 18mm (Esq) + 3 ϕ 16mm por Cara	3430.62	1.03 %


Los parámetros geométricos y características de cada caso son expuestas a detalle en cada Output del script, permitiendo conocer la cuantía actual de la columna original y encamisada.

Tabla 2.1-2. Output de verificación del modelo constitutivo del acero de refuerzo y cuantía global.

DEFINICIÓN DE ACERO LONGITUDINAL

- ✓ Material Steel02 (Tag 1): $f_y = 420.0$ MPa
- ✓ Material ReinforcingSteel (Tag 18): Activado (Pandeo incluido).

=====

 REPORTE TÉCNICO: CUANTÍAS Y ARMADO

=====

COLUMNA ORIGINAL (300x300 mm):

- As Total: 904.78 mm^2
- Cuantía Real: 1.01 %

✓ VERIFICADO: Cuantía dentro del rango normativo (1% - 3%).

COLUMNA ENCAMISADA (450x450 mm):

- As Adicional (Jacket): 1231.50 mm^2
- Cuantía Global Final: 1.05 %

✓ VERIFICADO: Cuantía global normativa.

=====

2.2 Caracterización de Materiales (Modelos Constitutivos)

La fidelidad de la simulación reside en no usar modelos "elásticos perfectos", sino leyes constitutivas capaces de representar el daño, la fisuración y la fluencia.

2.2.1 *Hormigón: Implementación del Material Concrete02 (Linear Tension Softening).*

La caracterización del hormigón se ha desglosado en dos definiciones materiales distintas para capturar la física del encamisado: el recubrimiento (susceptible a desprendimiento) y el núcleo (confinado).

Recubrimiento: Concrete02 (Linear Tension Softening)

Para el modelado del hormigón no confinado —tanto del recubrimiento original como de la capa exterior del encamisado— se ha seleccionado el comando `uniaxialMaterial Concrete02`. A diferencia del modelo básico, este material incorpora una rama de ablandamiento por tensión lineal, permitiendo que el recubrimiento aporte rigidez a tracción en los estadios iniciales.

Adicionalmente, tal como se identifica en la Tabla 2.2-1, se ha asignado una resistencia residual del 5% ($0.05 f'_c$) para su respuesta no lineal post-pico. Esta decisión busca simular la naturaleza abrupta del desprendimiento del recubrimiento durante la formación de rótulas plásticas, pero manteniendo un remanente de tensión nominal mínimo indispensable para evitar singularidades matemáticas en la matriz de rigidez y asegurar la convergencia del modelo sin sobreestimar la capacidad real.

Núcleo Confinado: ConfinedConcrete01 (Automatización de Mander)

Para el núcleo estructural (original y encamisado), se implementa el material `ConfinedConcrete01`. Este comando actúa como un "contenedor computacional" de la formulación teórica de Mander, Priestley y Park (1988) expuesta en el CAPÍTULO I: FUNDAMENTOS DEL COMPORTAMIENTO NO LINEAL Y REFORZAMIENTO.

La ventaja técnica de usar esta implementación en OpenSees radica en su capacidad de cálculo interno: en lugar de ingresar manualmente valores pre-calculados de resistencia aumentada (f'_{cc}) y deformación última (ϵ_{cc}), el script recibe como inputs las propiedades del hormigón simple (f'_c) y la geometría exacta de los estribos (diámetro, separación y configuración). A partir de estos datos, el algoritmo genera internamente la curva esfuerzo-deformación modificada, ajustando automáticamente el nivel de confinamiento efectivo en función de la densidad de estribos definida para cada caso de la matriz paramétrica (J-075 a J-175).

Tabla 2.2-1. Parámetros ingresados en OpenSees para Hormigón Original y Jacket.

Material / Modelo	Parámetro	Símbolo	Valor (H. Original)	Valor (H. Jacket)	Justificación / Fuente
PROPIEDADES BASE	Resistencia a compresión	f'_c	21.0 MPa	28.0 MPa	Resistencia nominal de diseño (cilíndrica).
	Módulo de Elasticidad	E_c	21,538 MPa	24,870 MPa	Calculado según NEC-SE-HM: $4700\sqrt{f'_c}$.
RECUBRIMIENTO	Deformación pico	ϵ_0	-0.00195	-0.00225	Deformación asociada a f'_c . Calc: $\frac{2f'_c}{E_c}$.
(Concrete02)	Resistencia residual	f_{cu}	1.05 MPa	1.40 MPa	5% de f'_c . Capacidad remanente mínima.
Hormigón No Confinado	Deformación última	ϵ_u	-0.005	-0.005	Límite de desprendimiento del recubrimiento (Spalling).
	Resistencia a Tracción	f_t	2.84 MPa	3.28 MPa	Módulo de rotura: $0.62\sqrt{f'_c}$ (ACI 318).
	Rigidez Ablandamiento	E_{ts}	1,420 MPa	1,640 MPa	Slope de la rama de tensión: $f_t / 0.002$.
	Tipo de Sección	—	'R'	'R'	Sección Rectangular para Modelo de Mander.
NÚCLEO CONFINADO (ConfinedConcrete01)	Deformación Última	$\epsilon_{cu,lim}$	-0.03	-0.03	Límite conservador para evitar fallo numérico abrupto.
	Coeficiente Poisson	ν	0.20	0.20	Valor estándar para hormigón.
Inputs Geométricos	Diámetro Estribo	ϕ_v	10 mm	10 mm	Varilla utilizada en el confinamiento.
	Fluencia Estribo	f_{yh}	420 MPa	420 MPa	Acero de refuerzo transversal estándar.
	Espaciamiento (Lo/Cnt)	s	70 mm	70 mm	Variable según zona (Confinada / Central).
	Factor Endurecimiento	α_h	0.01	0.01	<i>haRatio</i> : Endurecimiento post-fluencia del estribo.

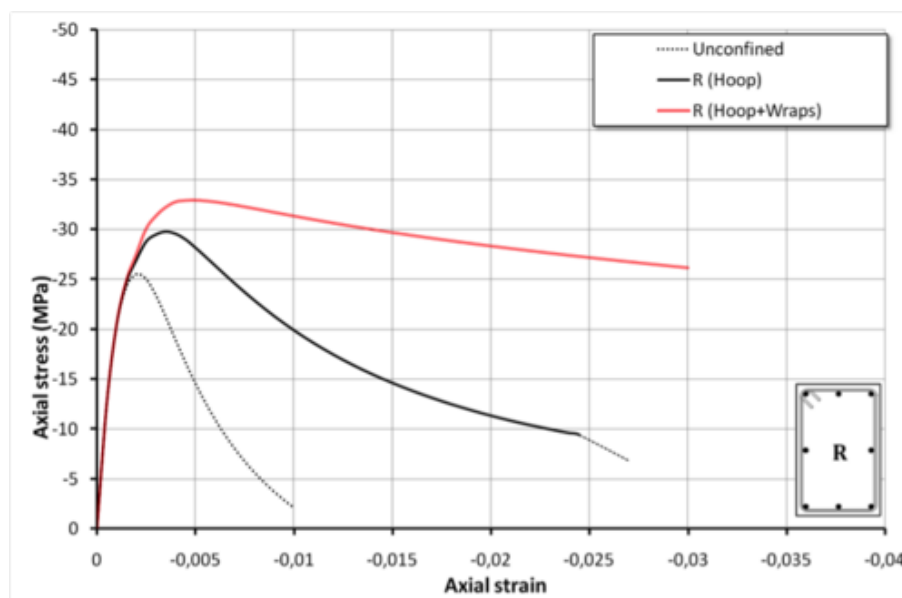


Figura 2.2-1. Curva Esfuerzo-Deformación analítica para el hormigón confinado. Recopilado de: (OpenSees, 2025).

2.2.2 Acero de Refuerzo: Implementación del Material ReinforcingSteel

Para el acero longitudinal, se descartó el modelo simplificado Steel02 en favor de una formulación más robusta: el material ReinforcingSteel con el modelo de pandeo de

Gomes-Appleton (-GABuck). Esta elección es determinante para la fidelidad del análisis en rangos de grandes deformaciones, ya que, a diferencia de los modelos bilineales tradicionales, este material permite simular la degradación de resistencia por el pandeo de las barras comprimidas una vez que el recubrimiento se ha desprendido y los estribos pierden eficacia, así como el comportamiento asimétrico en ciclos de histéresis.

Tabla 2.2-2. Parámetros constitutivos para el Acero de Refuerzo (ReinforcingSteel).

Parámetro	Símbolo OpenSees	Valor	Descripción Técnica
Mecánicos Básicos			
Esfuerzo de Fluencia	f_y	420 MPa	Límite elástico nominal del acero (Grado 60).
Esfuerzo Último	f_u	630 MPa	Resistencia máxima a tracción ($1.5 f_y$).
Módulo de Elasticidad	E_s	200,000 MPa	Rigidez elástica inicial.
Módulo de Endurecimiento	E_{sh}	2,000 MPa	Rigidez tangente al inicio del endurecimiento.
Deformaciones			
Inicio Endurecimiento	ϵ_{sh}	0.015	Deformación donde termina la meseta de fluencia.
Deformación Última	ϵ_{ult}	0.12	Capacidad máxima de elongación antes de ruptura.
Modelo de Pandeo			
	-GABuck	Activado	Modelo de Gomes-Appleton para pandeo de barras.
Relación de Esbeltez	l_{sr}	8.0	Relación longitud libre/diámetro entre estribos.
Factor de Amplitud	β	0.5	Factor de imperfección inicial para pandeo.
Factor de Curvatura	r	0.85	Controla la transición de la curva de pandeo.
Factor de Post-Pandeo	γ	0.25	Controla la degradación de resistencia post-pandeo.

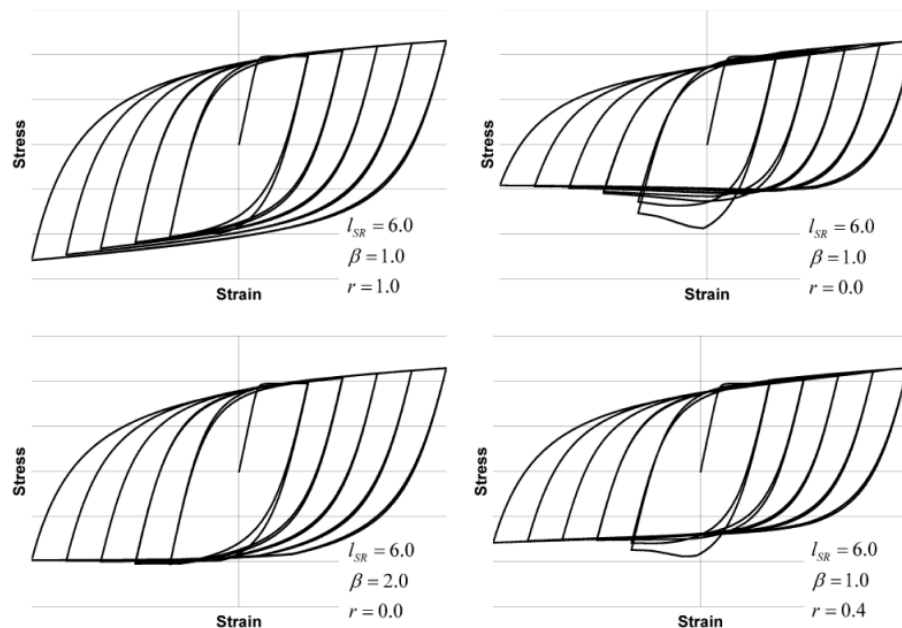


Figura 2.2-2. Ciclos de carga y descarga del modelo constitutivo del acero de refuerzo ($f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$). Recopilado de: (OpenSees, 2025).

2.3 Estrategia de Modelado en OpenSees

Aquí definimos el motor de integración de las fibras en el modelo. Con la particularidad, que contrario a la práctica común de usar configuraciones por defecto, hemos tomado decisiones específicas sobre la formulación matemática de los elementos.

2.3.1 Formulación del Elemento : *ForceBeamColumn* con integración de Legendre (5 puntos).

Se seleccionó la integración de Gauss-Legendre por una razón técnica de peso: al utilizar elementos basados en fuerzas (*ForceBeamColumn*), la interpolación de fuerzas es exacta a lo largo del elemento, pero la forma en que se integra el daño es crítica.

Mientras que muchos softwares comerciales utilizan por defecto Gauss-Lobatto (que coloca puntos de integración en los extremos, nodos 0 y L), nuestra experiencia demuestra que esto es problemático para materiales con ablandamiento como el hormigón confinado, que cuando el este empieza a romperse en la base (extremos), Lobatto concentra todo el daño en ese único punto extremo, causando problemas de "localización" y fallos abruptos de convergencia. Legendre, por el contrario, ubica los puntos de integración en el interior del elemento, por lo tanto, este "suaviza" numéricamente la respuesta y presenta una estabilidad superior, permitiendo capturar la curva de capacidad completa sin los errores numéricos prematuros del método de Lobatto, en el mayor de los casos, porque la convergencia depende también del número de fibras, la compatibilidad numérica del paso, ya sea fijo o adaptativo. En la tabla siguiente se puede comprender de forma clara dicha diferencia y la razón de optar por Legendre.

Tabla 2.3-1. Comparativa entre los métodos de integración Legendre y Lobatto

CARACTERÍSTICA	GAUSS-LEGENDRE (RECOMENDADO)	GAUSS-LOBATTO
UBICACIÓN	Puntos internos.	Incluye extremos (0 y L).
PRECISIÓN MATEMÁTICA	Exacto para polinomios de grado $2N - 1$. (Más preciso).	Exacto para polinomios de grado $2N - 3$. (Menos preciso).
DETECCIÓN DE FLUENCIA	La detecta suavemente cuando la plasticidad entra al primer punto interior.	La detecta inmediatamente al inicio porque hay un punto en la base.
COMPORTAMIENTO EN ABLANDAMIENTO (SOFTENING)	Es más estable numéricamente cuando el hormigón se rompe (<i>epsU</i>). Evita la "localización" abrupta del daño.	Sufre problemas de "Localización". Si el punto base falla, el elemento pierde fuerza de golpe y cuesta converger.
DEPENDENCIA DE MALLA	La respuesta es más objetiva (cambia menos al aumentar puntos).	La respuesta es muy sensible al número de puntos (puedes sobreestimar la ductilidad).

Fuente: tabla generada a partir de (Plastic Hinge Integration Methods for Force-Based Beam-Column Elements, 2006)

2.3.2 Discretización de Secciones Transversales (Fiber Section).

La sección se discretiza mediante el comando Section Fiber. Esto implica "mapear" la geometría en pequeñas fibras de hormigón y capas de acero, asegurando la continuidad de deformaciones entre el núcleo viejo y el encamisado nuevo, un proceso manual y tedioso. La Figura 2.3-1 ilustra el resultado final de la sección, así como esta se puede encontrar en anexos todas las secciones creadas y el nivel de discretización, el cual afecta en gran medida cuando las capas más delgadas poseen menos segmentación, perdiendo finesa en el comportamiento inelástico de toda la columna. No obstante, la creación de una infinidad de fibras, conlleva a un cálculo computacional que satura de acuerdo al dispositivo la terminal (kernel).

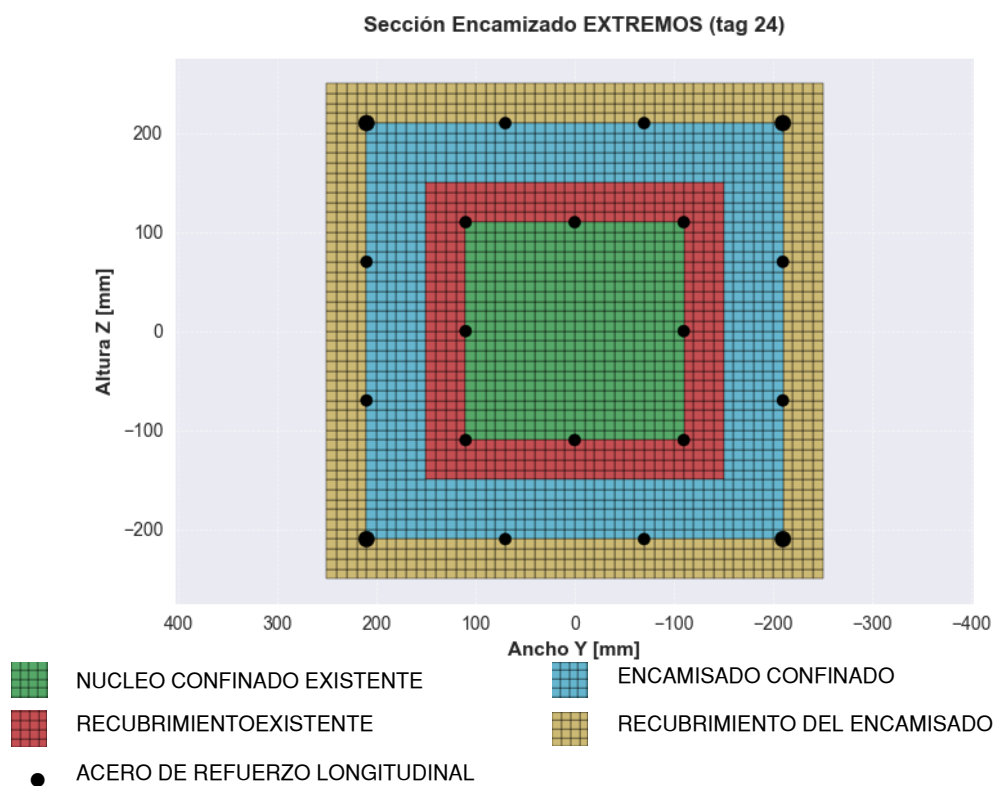


Figura 2.3-1. Mapeo de fibras para la Sección Compuesta J-100: Núcleo, Jacket y Recubrimiento.

La discretización tiene una subrutina que se encarga de hallar el máximo común divisor para poder fragmentar las dimensiones geométricas en cuadrados perfectos.

Tabla 2.3-2. Bloque de Sub-rutina de selección / cálculo del tamaño de cada fibra para geometría cuadrada

```
##### BLOQUE 5: DISCRETIZACIÓN AUTOMÁTICA DE SECCIONES
print("\n" + "-"*70)
print("5. GENERACIÓN Y REFINAMIENTO DE MALLA DE FIBRAS")
print("-"*70)
```

```

# 1. Parámetro de Control de Malla
# -----
# Factor entero para subdividir la celda base calculada por el
MCD.
# 1 = Malla base (MCD puro).
# 2 = Refinamiento medio (Mitad del tamaño base).
# 4 = Alta precisión (Cuarto del tamaño base).
FACTOR_REFINAMIENTO = 1 # <-- ;MODIFICAR VALOR SEGÚN NECESIDAD!

# 2. Función Auxiliar: MCD
def mcd( numeros ):
    """Calcula el Máximo Común Divisor de una lista de enteros."""
    return reduce( math.gcd, numeros )

# 3. Definición de Dimensiones Críticas [mm]
# Se incluyen todas las geometrías que definen cambios de material
list_B = [ int( B_orig ), int( B_tot ), int( cover_new ),
int( cover_orig ), int( t_B ), int( L1_jackB ) ]
list_H = [ int( H_orig ), int( H_tot ), int( cover_new ),
int( cover_orig ), int( t_H ), int( L2_jackH ) ]

# 4. Cálculo de la Celda Base (Matemática Pura)
base_mcd_B = mcd( list_B )
base_mcd_H = mcd( list_H )

# 5. Aplicación del Refinamiento (Ingeniería)
# Tamaño final de la fibra = Tamaño Base / Factor
size_fib_B = base_mcd_B / FACTOR_REFINAMIENTO
size_fib_H = base_mcd_H / FACTOR_REFINAMIENTO

# 6. Cálculo de Densidad de Mallado Global
# Número total de fibras en la sección transversal completa
nfibB = int( B_tot / size_fib_B )
nfibH = int( H_tot / size_fib_H )

# Factor de escala (Fibras por milímetro)
# Vital para calcular cuántas fibras entran en cada parche
específico
fac_nfibB = nfibB / B_tot
fac_nfibH = nfibH / H_tot

# 7. Reporte Técnico de Discretización
print( f"Parámetros de Mallado:" )
print( f" - MCD Base (Matemático):    {base_mcd_B} x {base_mcd_H}
mm" )
print( f" - Factor de Refinamiento:    {FACTOR_REFINAMIENTO}" )
print( f" - Tamaño Final de Fibra:    {size_fib_B:.2f} x
{size_fib_H:.2f} mm" )

print( f"\nDensidad de Fibras Resultante:" )
print( f" - Dirección B: {nfibB} fibras totales ({fac_nfibB:.4f}
fib/mm )" )
print( f" - Dirección H: {nfibH} fibras totales ({fac_nfibH:.4f}
fib/mm )" )

```

```

print(f" - Resolución: ~{nfibB * nfibH} fibras por sección
transversal")

if (nfibB * nfibH) < 100:
    print(" ⚠ ALERTA: Malla muy gruesa. Considere aumentar
FACTOR_REFINAMIENTO.")
elif (nfibB * nfibH) > 10000:
    print(" ⚠ AVISO: Malla muy densa. El análisis podría ser
lento.")
else:
    print(" ✅ VERIFICADO: Densidad de malla adecuada para
análisis de fibra.")

print("="*70 + "\n")

```

2.3.3 Definición de Condiciones de Frontera y Justificación del Modelo en Voladizo

Para la determinación de los factores de rigidez efectiva, se adoptó el modelo de columna en voladizo (Cantilever), teniendo empotrada la base y libre en el tope; esta decisión metodológica se fundamenta en la estandarización experimental ya estudiadas como la base de datos del PEER (Pacific Earthquake Engineering Research Center) (2004) y las formulaciones analíticas de Sezen (Sezen, 2002).

Si bien se reconoce que las columnas en pórticos reales experimentan doble curvatura, y que la distribución de fisuras difiere al extenderse hacia la zona central del elemento – lo que podría generar desplazamientos mayores a los estimados por modelos de voladizo equivalentes (Sezen, 2002) –, la simplificación adoptada se justifica bajo los siguientes criterios de aislamiento de variables especificados a continuación.

Dentro de la caracterización de la rótula plástica y efecto, el objetivo de esta investigación es calibrar la degradación de la sección compuesta, no del sistema estructural global. Por ende, el modelo en voladizo permite fijar la demanda máxima y la formación de la rótula plástica en la base. En un modelo de doble curvatura, el punto de inflexión (o momento cero) se desplaza durante la excursión inelástica, introduciendo una variable de incertidumbre que contaminaría la calibración del factor α .

En el enfoque principal, que es el cálculo de α , tenemos el paso previo de obtener la rigidez Efectiva; debido a que el factor α se define como la relación adimensional entre la rigidez operativa y la rigidez bruta (K_{eff}/K_g). Dado que las condiciones de frontera afectan tanto al numerador como al denominador en la misma proporción geométrica (coeficiente de rigidez $3EI/L^3$ vs $12EI/L^3$), el valor de α resultante es una propiedad intrínseca de la sección

transversal y su estado de daño., por tanto, los factores obtenidos mediante el modelo en voladizo son extrapolables, toda vez que el análisis confirmó que la demanda inelástica se concentró consistentemente en la sección basal (zona de momento máximo). Aunque se observó una interacción compleja entre el núcleo y el encamisado (donde el núcleo experimenta una degradación prematura mientras el encamisado mantiene la integridad global), el mecanismo de colapso sigue gobernado por la formación de una rótula plástica compuesta en el empotramiento, validando la hipótesis de diseño.

Adicionalmente, no es la primera vez que se considera un estudio de una columna en vez de doblemente curvatura, como columna en cantiléver, se considera la existencia de la Base de Datos Experimental, siguiendo el protocolo del (2004), que normaliza todos los ensayos experimentales (independientemente de su configuración real) a un sistema de "voladizo equivalente" para permitir comparaciones directas, este estudio adopta el mismo esquema. Esto garantiza que los factores de rigidez obtenidos sean comparables con la literatura internacional existente sobre desempeño sísmico de componentes.

2.4 Protocolo de Carga y Análisis

El análisis sísmico de secciones compuestas no se aplicó un análisis simple, sino que además de la carga lateral se respetó la física del problema y los estándares de evaluación, el modelo numérico debe someterse a una secuencia estricta de estados de carga que simulen fielmente la condición de servicio previa al evento sísmico y la posterior incursión inelástica basándose en las normas de diseño e investigaciones relacionadas a la ductilidad de la sección.

2.4.1 Aplicación de Cargas Gravitacionales y Efectos $P - \Delta$

Antes de cualquier análisis en el rango inelástico lateral, es requerido establecer el estado de equilibrio inicial de la estructura, simular las cargas gravitacionales, entonces, siguiendo los lineamientos de la ASCE 41-17 (2017), la carga gravitacional operativa (Q_G) se determina mediante la combinación de carga descrita en la Ecuación (7-3) de la norma:

$$Q_G = Q_D + Q_L + Q_S$$

Aunque la expresión matemática incluye la carga de nieve (Q_S), esta se desprecia por su nula incidencia en el contexto local de Ecuador, centrando el análisis en la interacción de la carga muerta (Q_D) y la carga viva efectiva (Q_L).

Ahora bien, para esta investigación he fijado un nivel de carga axial gravitatoria de

$$P_g = 0.25A_g f'_c \quad \text{Eq. 2.4.1}$$

Esta decisión de diseño no es casualidad, sino que busca explorar y explotar una "zona estratégica" dentro de la normativa y la evidencia experimental:

1. **Zona de Interpolación de Rigidez (ASCE 41-17):** Al revisar la Tabla 10-5 de la norma, los factores de rigidez efectiva son prescriptivos para cargas gravitacionales bajas ($\leq 0.1 A_g f'_c$) o altas ($\geq 0.5 A_g f'_c$) con factores de 0.30 y 0.70 correspondientemente. Nuestro caso (0.25) se sitúa deliberadamente en el rango de interpolación, un escenario donde los métodos simplificados pierden precisión y el modelado de fibra demuestra su destacar para calcular la rigidez tangente real paso a paso. Véase la Tabla 10-5 en Anexo 117.
2. **Validación del Diseño de Confinamiento (ACI 318-19):** Al mantener la carga axial por debajo del límite de $0.3A_g f'_c$ (según Tabla 18.7.5.4, Anexo 118), nos alineamos con las ecuaciones de refuerzo transversal estándar para pórticos especiales, evitando las exigencias de confinamiento ultra-severas requeridas para cargas axiales extremas, asegurando que el diseño del encamisado sea constructivamente viable.
3. **Expectativa de Ductilidad (Sharma y otros, 2007):** La evidencia experimental sugiere que este nivel de carga es el límite operativo ideal para evaluar desempeño. Mientras que cargas superiores a 0.3 degradan severamente la ductilidad, el rango de 0.15 a 0.25 permite que la sección desarrolle deformaciones plásticas robustas (factor de ductilidad de curvatura > 16) antes de la falla, permitiéndonos medir la verdadera eficiencia del encamisado.

Simultáneamente a la carga gravitacional, se activan los efectos de segundo orden $P - \Delta$. Cumpliendo con la sección 7.2.6 de la ASCE 41-17, la no linealidad geométrica se incorpora directamente en la formulación de la matriz de rigidez del elemento, capturando los momentos secundarios generados por la desviación del eje de la columna que son críticos para la estabilidad global.

El paso más relevante en esta sección de aplicación de carga gravitatoria para nuestro estudio, es la particularidad crítica de la metodología en el tratamiento de la secuencia de carga, diseñado para respetar el principio de Construcción por Etapas.

La realidad física que buscamos simular de una rehabilitación, es que el encamisado se vierte alrededor de una columna que ya se encuentra deformada bajo la carga de servicio del

edificio. El nuevo material del encamisado fragua en un estado libre de esfuerzos axiales iniciales, activándose únicamente ante las sobrecargas sísmicas posteriores. Ignorar este fenómeno y aplicar la carga gravitacional sobre la sección compuesta monolítica implicaría asumir erróneamente que el encamisado "alivia" el peso existente, subestimando la pre-compresión del núcleo original.

Se conoce que se puede profundizar aún más en la realidad constructiva en base a las distintas formas de aplicar el encamisado de acuerdo al nivel de intervención, donde se aligera y estabiliza la columna a intervenir con puntales para poder encamisar, o realizar encamisado continuo de filas de columnas, donde se requiere realizar traslape de la sección completa del encamisado a pisos superiores. Sin embargo, no es nuestro caso de estudio.

Para replicar esta Historia de Carga Secuencial en el entorno de nuestro script de OpenSees, se implementó el siguiente protocolo en el bloque de ensamblaje (Bloque 7 del script):

1. **Definición de la Carga Axial (P_g):** La magnitud de la carga ($P_g = 0.25 A_g f'_c$) se calculó estrictamente sobre el área de la columna original (300×300 mm), sin considerar el aporte del encamisado, esto asegurando que el nivel de esfuerzo inicial en el núcleo ($f_c \approx 5.25$ MPa) sea representativo de la realidad operativa antes de la intervención.

```
# 5. Cálculo de Masas y Cargas
# -----

# A. Carga del Edificio (Estimación Gravedad)
P_edificio = 0.25 * fc * B_orig * H_orig # [N]

# B. Peso Propio de la Columna
Vol_col = (B_orig * H_orig) * L_col # [mm³]
densidad_hormigon = 2.4e-9 * 9810 # [N/mm³]
W_columna = Vol_col * densidad_hormigon

# C. Carga Total (Pg)
P_g = P_edificio + (0.5 * W_columna)

# D. Masa Sísmica Total
g_grav = 9810.0 # [mm/s²]
m_lump = P_g / g_grav
print(f"Carga del Edificio: {P_edificio:.0f} N")
print(f"Carga Axial Total (P_g): {P_g:.0f} N")
print(f"Masa Sísmica Asignada: {m_lump:.4f} Ton")

# Asignación de masa al nodo tope (DOF: X, Y, Rz)
ops.mass(ID_nodo_tope, m_lump, m_lump, 0.0)
```

2. **Inicialización Gravitacional:** Se aplica la carga vertical mediante un análisis estático lineal de 10 pasos (`LoadControl 0.1`) sobre el modelo.

```
# 6. Aplicación de Gravedad (Pre-carga)
# -----
ops.timeSeries('Constant', 1)
ops.pattern('Plain', 1, 1)
ops.load(ID_nodo_tope, 0.0, -P_g, 0.0) # Carga vertical
descendente

# Configuración del Análisis
ops.constraints('Plain')
ops.numberer('RCM')
ops.system('BandGeneral')
ops.test('NormDispIncr', 1.0e-6, 100)
ops.algorithm('Newton')
ops.integrator('LoadControl', 0.1) # 10 pasos de carga
ops.analysis('Static')

print(f" Aplicando gravedad...")
ok_grav = ops.analyze(10)
```

3. **Congelamiento del Estado (`loadConst`):** Una vez estabilizada la gravedad, se ejecuta el comando `ops.loadConst('-time', 0.0)`, que es vital para la simulación por etapas, porque fija las deformaciones axiales y los esfuerzos internos actuales como el "estado cero" (pseudo-tiempo $t = 0$) para el análisis sísmico subsiguiente, y de esta forma, cualquier fuerza lateral aplicada en la fase *Pushover* actuará sobre una estructura pre-cargada, capturando correctamente la interacción P-Delta desde el primer incremento de desplazamiento lateral, sin que el encamisado "nazca" pre-cargado artificialmente.

```
if ok_grav == 0:
    d_serv = ops.nodeDisp(ID_nodo_tope)
    print(f"✅ Gravedad aplicada exitosamente.")
    print(f"    Desplazamiento Axial: {d_serv[1]:.4f} mm")

    # CONGELAR ESTADO (Vital para análisis posteriores)
    ops.loadConst('-time', 0.0)
    print("🔒 Estado de gravedad congelado. P-Delta
inicializado.")
else:
    print("❌ ERROR: El análisis de gravedad no convergió.")
```

Esta estrategia garantiza que la rigidez tangente inicial de la simulación sísmica incorpore la degradación geométrica inducida por la carga de servicio, alineándose con los

requisitos de análisis no lineal de la ASCE 41-17 para elementos con historia de carga preexistente.

2.4.2 *Análisis Estático No Lineal (Pushover): Control de desplazamiento monótono*

La evaluación de la capacidad se ejecuta siguiendo el Procedimiento Estático No Lineal (NSP) fundamentado en la sección 7.4.3.1 de la ASCE 41-17. La norma establece que el modelo matemático debe someterse a "*cargas laterales monótonamente crecientes [...] hasta que se exceda un desplazamiento objetivo*" (ASCE, 2017).

Operativamente, esto se traduce en un algoritmo de Control de Desplazamiento (*Displacement Control*). En lugar de empujar con fuerza (lo cual haría colapsar el análisis numérico al llegar a la resistencia máxima), comprendiendo esto imponemos incrementos de deformación constantes en el grado de libertad lateral. Esta estrategia es indispensable para registrar la rama post-pico, permitiéndonos capturar no solo la resistencia máxima, sino la ductilidad disponible y el modo de falla.

2.4.3 *Algoritmos de solución y estrategia de paso adaptativo*

Dada la complejidad inducida por el ablandamiento del hormigón de recubrimiento y la interacción P-Delta, los algoritmos estándar como Newton-Raphson suelen fallar en la convergencia, ya sea por el paso fijo (y si es numéricamente múltiplo o no) o la densidad de fibras que interactúen. Para mitigar esto, se implementa el algoritmo Krylov-Newton, que utiliza un subespacio de vectores para acelerar la búsqueda del equilibrio en cada paso.

Adicionalmente, se ha programado una rutina de paso adaptativo: si el integrador no converge en un paso de carga difícil (común cuando se desprende el recubrimiento y la rigidez cae abruptamente), el algoritmo reduce automáticamente el tamaño del paso de tiempo (dt) y reintenta la solución. Esto garantiza la trazabilidad matemática de la curva completa sin interrupciones numéricas artificiales, aunque en su mayoría debido al algoritmo de Krylov-Newton no se requiere un cambio de paso.

2.5 *Análisis, comentarios y conclusiones parciales del Capítulo II.*

La metodología desarrollada en este capítulo constituye una respuesta técnica frente a las incertidumbres o dudas de diseño al modelar de secciones compuestas. Al finalizar la etapa

de caracterización numérica, es posible establecer tres pilares fundamentales que validan la fiabilidad de los datos que se obtendrán en la siguiente fase experimental:

En primer lugar, la estabilidad numérica en contra la convención común de usar Lobatto. La decisión de implementar la integración de Gauss-Legendre en lugar del estándar comercial Gauss-Lobatto no es un detalle menor que adopto; representa una seguridad matemática contra los errores de "localización de daño" con los cuales me he atorado durante la programación y validación de la programación. Demostrado que, para materiales que exhiben ablandamiento como el hormigón confinado, ubicar los puntos de integración en el interior del elemento es la única vía para garantizar que la pérdida de rigidez sea progresiva y no un artefacto numérico puntual que interrumpa el análisis prematuramente, así mismo como los programas comerciales como ETABS corrigen internamente el método de Gauss-Lobatto. En el próximo capítulo, al validar se usa Legendre tanto en OpenSees, así como en ETABS para garantizar el correcto modelado.

En segundo lugar, la justificación estratégica del estado de carga. La definición de una carga axial de $0.25A_g f'_c$ trasciende una simple decisión de un valor promedio, hemos logrado fundamentarlo con el fin de que sea de interés estudiarlo, en otras palabras haciendo de este nivel de carga sitúe a la columna en un "punto dulce" experimental: es lo suficientemente alto para caer en la zona de incertidumbre de rigidez de la ASCE 41-17 (donde el análisis de fibra demuestra su mejor comportamiento frente a los factores fijos) y lo suficientemente moderado para alinearse con los hallazgos de Sharma u otros (2007) y las disposiciones del ACI 318, permitiendo evaluar la ductilidad del encamisado en un escenario exigente pero físicamente gobernable, lejos de la fragilidad extrema.

Finalmente, la fidelidad constitutiva. Al abandonar los modelos bilineales simples en favor de formulaciones avanzadas como ReinforcingSteel (con pandeo) y Concrete02 (con tensión residual), el modelo numérico deja de ser una idealización elástica para convertirse en una herramienta capaz de simular mecanismos de falla complejos como el *ablandamiento-agrietamiento* del recubrimiento y la degradación del acero.

En síntesis, la arquitectura de modelado en OpenSeesPy configurada (con su control de paso adaptativo y su rigor en la discretización de fibras) ofrece un entorno controlado y transparente. Con este esquema metodológico calibrado, la investigación está lista para ejecutar la matriz paramétrica y cuantificar, con alta precisión, la evolución del factor de rigidez efectiva (α) en función del espesor del encamisado, objetivo central del Capítulo III. Se menciona que

toda la programación se dejara adjuntada al final de los anexos como contribución para futuras investigaciones.

CAPÍTULO III: DESARROLLO Y VALIDACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO

Una vez establecida la arquitectura de modelado en OpenSeesPy, este capítulo documenta la construcción progresiva de la simulación. A partir de ahora, la estrategia metodológica se divide en dos fases: primero, la validación exhaustiva del Modelo de Referencia (columna existente) con el fin de validar los resultados de una columna sin encamisar con los resultados del análisis en ETABS, incluyendo un micro-estudio paramétrico emergente para caracterizar su rigidez real en función del recubrimiento de la columna existente; y segundo, la generación principal del Modelo de Sección Compuesta, validando que la integración monolítica de las fibras responda a las leyes constitutivas sin recurrir a simplificaciones de elementos en paralelo.

3.1 Modelo de Referencia (Columna Sin Refuerzo)

Antes de evaluar la eficiencia del encamisado, es imperativo validar el comportamiento de la columna de $300 \times 300 \text{ mm}$ ($f'_c = 21 \text{ MPa}$) que servirá como justificativo de una buena programación.

3.1.1 Construcción geométrica y validación de propiedades dinámicas.

La primera verificación del modelo numérico consistió en validar que la matriz de masa y la rigidez elástica inicial de la columna de original, mediante un análisis modal de valores propios (*Eigen Analysis*) realizada en la programación en el BLOQUE 9 .

Para aislar las variables y evitar "ruido" numérico en esta etapa temprana a medida que se construida y calibrara para simular la columna existente, se procedió a realizar el análisis despreciando los efectos P-Delta tanto en el modelo de OpenSees como en el modelo espejo de validación en ETABS. El objetivo fue confirmar que la distribución de masa y la inercia bruta (I_g) fueran consistentes.

Los resultados de este procedimiento se documentan en los anexos del proyecto:

En el Modelo de Referencia (Anexo 18), el análisis modal determina un periodo fundamental teórico de $T_1 = 1.414 \text{ s}$ para los dos primeros modos de vibración (traslacionales).

Dentro del Modelo de OpenSees (Anexo 19), el reporte de salida del script (Resultados_Modal_Original.txt) registra un periodo fundamental de $T_1 = 1.4236 \text{ s}$.

Tabla 3.1-1. Contenido interno de Resultados_Modal_Original.txt

```

REPORTE DE ANÁLISIS MODAL - COLUMNA ORIGINAL
=====
Periodo_Fundamental_T1_(s) 1.423649
Frecuencia_f1_(Hz) 0.702421
Frecuencia_Angular_w_(rad/s) 4.413438
Rigidez_Dinamica_K_(N/mm) 945.7549
Masa_Sismica_(Ton) 48.5539
    
```

Al contrastar ambos valores, se obtiene una correlación casi perfecta (diferencia menor al 0.7%), lo cual valida matemáticamente que la columna base ha sido modelada/programada con la geometría y masa correctas. Una vez superada esta validación elástica lineal, se procedió a “activar” la transformación geométrica *Corotational* para las siguientes fases de análisis no lineal (Pushover), asegurando así la captura rigurosa de los efectos de segundo orden bajo grandes desplazamientos.

Para la validación del periodo fundamental considerando efectos de segundo orden (P-Delta), se seleccionó en ETABS la opción 'Non-Iterative - Based on Mass'. Esta metodología aplica una reducción de rigidez geométrica lineal ($K_{geom} = P/L$) consistente con la formulación de la 'Geometric Transformation Corotational' utilizada en el código de OpenSees. Los resultados obtenidos (1.52s en ETABS vs 1.517s en OpenSees) muestran una correlación casi perfecta, validando la rigidez elástica y geométrica del modelo numérico.

Tabla 3.1-2. Segmento del BLOQUE 7 donde se aplica la transformación geométrica aplicada.

```

# 3. Transformación Geométrica
# -----
-----
transfTag = 31
if USAR_PDELTA:
    # Corotational para capturar efectos P-Delta rigurosos
    ops.geomTransf('Corotational', transfTag)
    print(" ♦ TRANSFORMACIÓN: Corotational (P-Delta Riguroso)")
else:
    ops.geomTransf('Linear', transfTag)
    print(" ♦ TRANSFORMACIÓN: Linear (Sin P-Delta)")
    
```

La Tabla 3.1-2 reafirma la intención de que la programación sea multifuncional, y tener la versatilidad de análisis, ya sea activando o desactivando la inclusión de los efectos de segundo orden P-Delta.

3.1.2 Validación Seccional (Momento-Curvatura).

Previo al análisis global, se aisló el comportamiento de la sección transversal mediante un análisis de Momento-Curvatura. Este ayuda a verificar que el hormigón de recubrimiento (modelado con Concrete02) y el núcleo (modelado con ConfinedConcrete01 de Mander) interactúen lógicamente, apreciando su comportamiento en la Figura 3.1-1 ante una carga axial $P_g = 0.25A_gf'_c$.

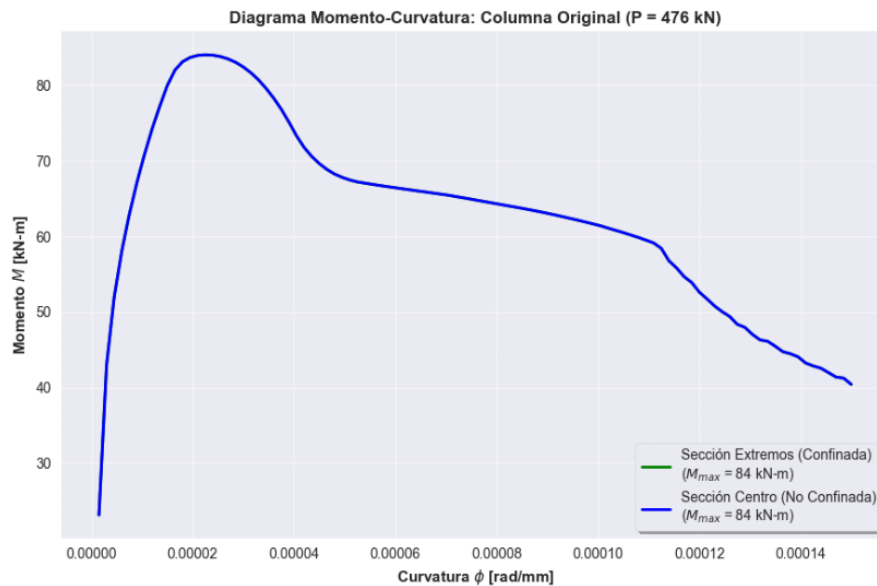


Figura 3.1-1. Diagrama Momento-Curvatura (M - ϕ) de la columna original en OpenSees.

Para validar la fidelidad de la respuesta inelástica programada, se contrastó el diagrama Momento-Curvatura obtenido en OpenSeesPy (*Fibra*) con el generado por el módulo "Section Designer" de ETABS. La Figura 3.1-2 revela una coincidencia satisfactoria en la rigidez elástica inicial, pero expone diferencias notables en la respuesta post-pico que confirman la mayor resolución del modelo propuesto, sobre todo bajo la carga axial propuesta.

Se observan tres fenómenos evidentes que validan la programación en OpenSees:

En primera instancia, el aporte a tracción (*Rigidez Inicial*) de la curva de OpenSees se desarrolla ligeramente por encima de la referencia comercial en el rango elástico. Esto responde a la implementación del material Concrete02, el cual incorpora la rigidez por tensión antes del agrietamiento, un fenómeno físico que los modelos simplificados de diseño suelen despreciar por conservadurismo, demostrando mayor control sobre el comportamiento de los materiales en un script de OpenSees.

Analizando la transición plástica suave de ambos resultados, encontramos que ETABS predice un pico tardío seguido de una degradación abrupta, OpenSees registra un descenso controlado post-fluencia, indicando que el modelo de fibras está capturando progresivamente el desprendimiento escalonado del recubrimiento, en lugar de simular una falla frágil instantánea, entiendo que estamos analizando la respuesta bajo carga axial, debido a que el gráfico de momento-curvatura de ETABS sin la carga axial a compresión considerada de 476314N demuestra un comportamiento idóneo.

La programación se limitó a cierto rango de rad/mm , por lo que no obtuvimos más desarrollo del comportamiento de la sección diseñada más allá de los $150 \times 10^{-6} rad/mm$, no obstante, interpretando la resistencia residual, la diferencia más crítica se halla en la "cola" de la gráfica. ETABS proyecta una caída de capacidad cercana a cero ($\approx 2.5 kN \cdot m$), asumiendo un fallo total de la sección tras perder el recubrimiento. Por el contrario, el modelo en OpenSees mantiene un momento residual estable ($\approx 45 kN \cdot m$). Este comportamiento es físicamente más realista, pues representa la capacidad remanente del núcleo confinado que, aunque dañado, continúa resistiendo carga axial y momento gracias a la acción de los estribos y el endurecimiento del acero, una reserva de energía vital para evitar el colapso progresivo que el software comercial omite.

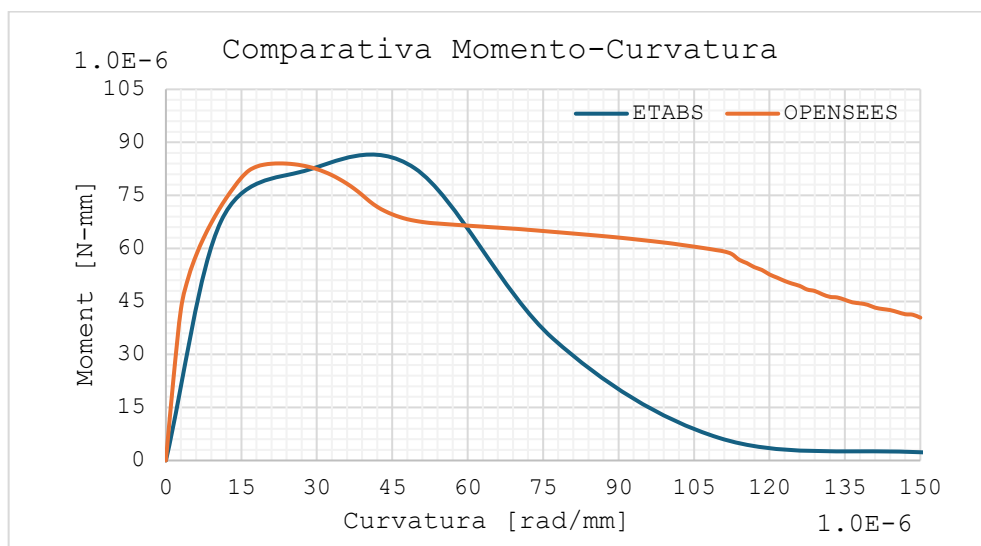


Figura 3.1-2. Gráfica comparativa del Momento-Curvatura realizado en OpenSees y ETABS.

Por lo tanto, la discrepancia post-pico no constituye un error, sino una evidencia de que el modelo numérico desarrollado en OpenSees es apto para análisis de desempeño sísmico al

no truncar arbitrariamente la ductilidad disponible de la sección, observando el comportamiento de una columna ante la pérdida repentina de confinamiento en el rango no lineal en la Figura 3.1-3, y reconsiderando que la producción final de esta investigación se orienta no determinar post-pico el factor α .

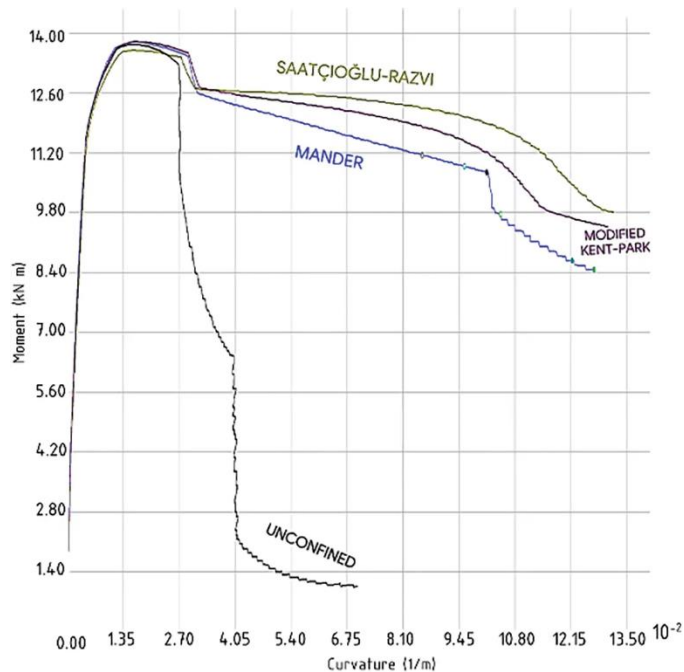


Figura 3.1-3. Curvas de momento-curvatura de una columna $C250 \times 500$. Recopilada de: (Bilgin & Plaku, 2024)

3.1.3 Respuesta a Carga Lateral (Pushover Base).

Para determinar la curva de capacidad global, se aplicó el protocolo de carga monótona descrito en el Capítulo II. La interpretación de esta curva requiere definir un criterio de fluencia y clasificar el modo de falla según la normativa ASCE 41-17.

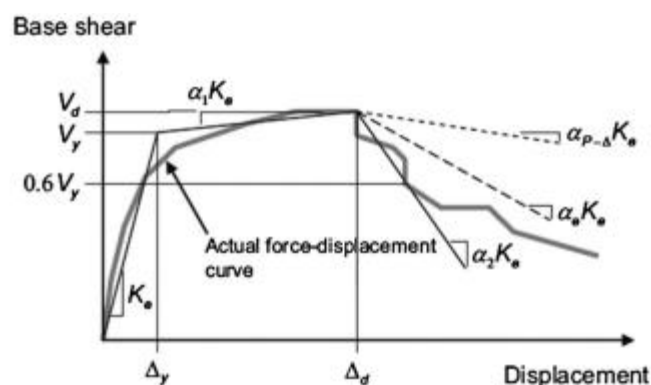


Figura 3.1-4. Curvas de Fuerza-Desplazamiento Idealizada. Recopilada de: (ASCE, 2017)

La Sección 7.4.3.2.4 de la ASCE 41-17 (2017) sugiere calcular la rigidez secante (K_e) al 60% de la fuerza de fluencia efectiva. Sin embargo, para componentes individuales de

hormigón armado, esta aproximación puede resultar conservadora al subestimar la rigidez inicial real, Por ello, esta investigación adoptamos el criterio experimental de Priestley & Park (1987) el cual define la rigidez efectiva (K_{eff}) como la rigidez secante al 75% de la carga máxima ($0.75 V_{max}$). Este punto representa con mayor fidelidad el inicio de la fluencia significativa en el refuerzo longitudinal y permite una correlación directa con los modelos de ductilidad de Mander y otros (1988).

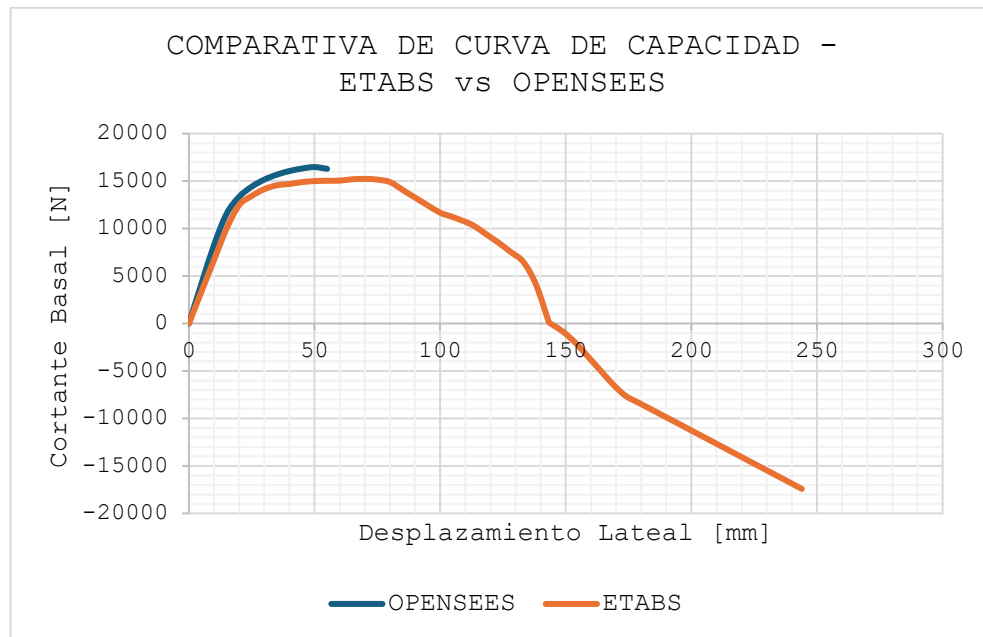


Figura 3.1-5. Curva de capacidad basal de la columna original

Al contrastar la curva *Pushover* obtenida en OpenSees con la referencia de ETABS, surge una aparente discrepancia visual respecto a lo analizado en la validación seccional de momento-curvatura, en donde, mientras que en el análisis Momento-Curvatura (Figura 3.1-2) OpenSees mostraba una mayor resistencia residual post-pico gracias al núcleo confinado, en el análisis global la curva de capacidad basal se interrumpe súbitamente antes que la curva de ETABS.

Esta conducta no contradice la validación anterior, sino que la complementa al introducir la inestabilidad P-Delta, que no es parte de las curvas de momento-curvatura, pero si en nuestro análisis no lineal Pushover.

Y debemos comprender la realidad física que nos representa OpenSees, que, aunque la sección transversal mantiene una capacidad remanente de $\approx 45 \text{ kN} \cdot \text{m}$ tras el desprendimiento del recubrimiento (como se demostró en el apartado 3.1.2), en el análisis global, el momento de segundo orden generado por la carga axial actuando sobre el

desplazamiento lateral ($P \cdot \Delta$) crece exponencialmente. El algoritmo de OpenSees detecta el instante preciso en que este momento de volcamiento supera la capacidad residual del núcleo. Es decir, la columna no falla porque el material se agote (aún tiene resistencia), sino porque se vuelve inestable geoméricamente; la gravedad "gana" la batalla contra la rigidez remanente.

Y la razón por la que ETABS continua el análisis, es debido a que suele operar sobre curvas de comportamiento predefinidas (*Backbone curves*) que asignan ductilidades normativas teóricas. Esto lleva al programa a extender la curva de capacidad "forzando" el equilibrio matemático más allá del punto de volcamiento físico, mostrando una ductilidad que, en la realidad de una columna no confinada bajo alta carga axial, no sería posible desarrollar sin colapso previo.

En conclusión, el corte prematuro en la curva de OpenSees es el indicador más fiable del Límite de Prevención de Colapso (CP) real, validando que la herramienta es capaz de predecir no solo el daño material, sino el riesgo de inestabilidad global que los métodos simplificados pueden enmascarar.

3.1.3.1 Clasificación del Comportamiento (ASCE 41-17)

Basándonos en la Figura 7-4 de la ASCE 41-17, la respuesta de la columna original se clasifica como una Curva Tipo 2.

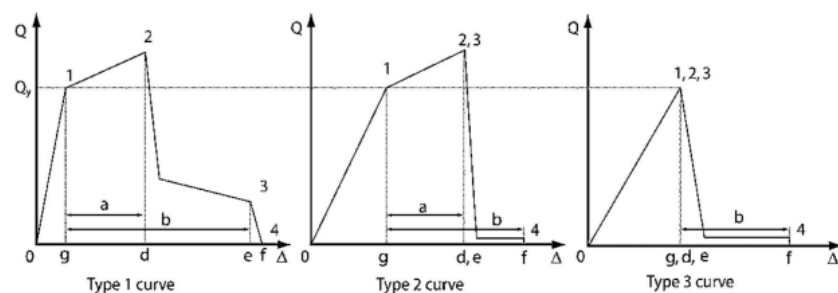


Figure 7-4. Component Force Versus Deformation Curves

Notes:

1. Only secondary component actions permitted between points 2 and 4.
2. The force, Q , after point 3 diminishes to approximately zero.

Figura 3.1-6. Tipos de comportamiento de la curva de fuerza-deformación establecidas por las ASCE 41-17 (2017).

De acuerdo a la norma, esta tipología representa un "comportamiento dúctil en el que existe un rango elástico... y un rango plástico... seguida por una pérdida sustancial de la capacidad de resistencia a fuerzas sísmicas" (ASCE, 2017, Sec. 7.5.1.2). Esto es consistente con la falta de confinamiento en la columna base: posee cierta ductilidad inicial, pero falla

abruptamente al perder el recubrimiento (punto 3) debido a la inestabilidad geométrica por efectos de segundo orden, incapaz de sostener la carga sísmica.

Niveles de Desempeño: Se mapearon los criterios de aceptación de la Sección 7.5.1.2 sobre la curva:

- Ocupación Inmediata (IO), deformación donde inicia el daño visible pero reparable.
- Seguridad de Vida (LS), 0.75 veces la deformación del punto de colapso teórico.
- Prevención de Colapso (CP), límite de estabilidad vertical (1.0 veces la deformación en el punto E).

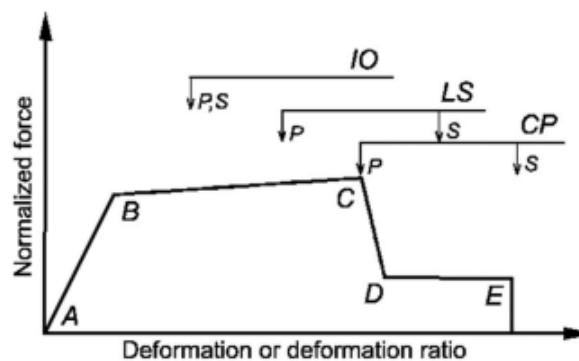


Figure 7-7. Acceptance Criteria Illustration

Figura 3.1-7. Criterios de Aceptabilidad ilustrados por la ASCE 41-17 (2017).

3.2 Modelo de la Columna Reforzada (Técnica de Elementos en Paralelo)

Para simular el encamisado, se adoptó una estrategia de Sección Monolítica Compuesta mediante la discretización por fibras (Fiber Section), descartando deliberadamente las técnicas simplificadas de elementos en paralelo (donde se modelan dos columnas conectadas por links). Esta decisión se fundamenta en la necesidad de garantizar la compatibilidad cinemática perfecta entre el núcleo existente y el nuevo encamisado, asumiendo una adherencia total en la interfaz de contacto.

3.2.1 Implementación Computacional y Estrategia de Solución Adaptativa

Dado que la simulación de secciones compuestas conlleva fuertes no linealidades, si consideramos especialmente el ablandamiento del micro-hormigón del encamisado post-pico, los algoritmos de solución estándar suelen fallar. Para mitigar esto, se implementó en el código una rutina de control adaptativo denominada “analyze_smart_step” propuesto por Gemini

Code Assist, en respuesta a la solicitud de replicar los ajustes internos del Pushover generado en ETABS.

Esta estrategia opera con una "Lógica de Cerrojo" pensada por mi autoría, en respuesta al crear otros modelos se basan en la falla por convergencia del algoritmo en ejecución, para realizar el cambio de algoritmo de análisis. Sin embargo, se detectó que el cambio sucedía posterior a pasar pico máximo, por lo que la lógica presentada fuerza al cambio de algoritmo por detección de pico máximo para poder incorporar al algoritmo que tiene mayor eficiencia en los rangos no lineales.

Durante la Fase Elástica, se utiliza el algoritmo `NewtonLineSearch`, eficiente para la búsqueda de equilibrio en la rama ascendente.

Pero para la Fase Inelástica, se conmuta automáticamente al algoritmo `KrylovNewton` al detectar, mediante el monitoreo del cortante basal, el inicio del ablandamiento.

Tabla 3.2-1. Algoritmo condicional del cambio de algoritmo, “analyze_smart_step”

```
# 3. Función de Resolución (Estrategia Blindada)
# -----
def analyze_smart_step(forzar_inelastico, step_size):
    ops.integrator('DisplacementControl', ID_nodo_control,
DOF_control, step_size)

    # Fase Elástica
    if not forzar_inelastico:
        ops.algorithm('NewtonLineSearch', 0.80)
        ops.analysis('Static')
        if ops.analyze(1) == 0: return True, 'NewtonLineSearch',
False

    # Fase Inelástica
    ops.algorithm('KrylovNewton')
    ops.analysis('Static')
    if ops.analyze(1) == 0: return True, 'KrylovNewton', True
    return False, None, forzar_inelastico
...

...
# A. Detección de Pico (Ablandamiento)
if not modo_inelastico_activo and len(cortantes) > 1:
    if abs(cortantes[-1]) < abs(cortantes[-2]) * 0.999:
        modo_inelastico_activo = True
        print(f"      ⚠ Pico detectado en Jacket
(D={disp_actual:.1f}mm). Bloqueando en Krylov.")
...

```

Esta heurística propuesta permite al modelo "navegar" la rama descendente de la curva de capacidad sin divergencias numéricas artificiales, garantizando la obtención de datos continuos hasta derivas del 6% ($0.06 L_{col}$), igualando la convergencia de software comercial convencional sin ser una "caja negra" las calibraciones internas y suavizados de curvas.

3.2.2 Verificación de Secciones Compuestas para los casos J-075 a J-175

Una vez ensamblada la matriz de fibras (que integra el núcleo confinado, la interfaz de micro-hormigón y el recubrimiento), se procedió a verificar la respuesta seccional mediante diagramas Momento-Curvatura para los distintos espesores de encamisado propuestos en la matriz paramétrica.

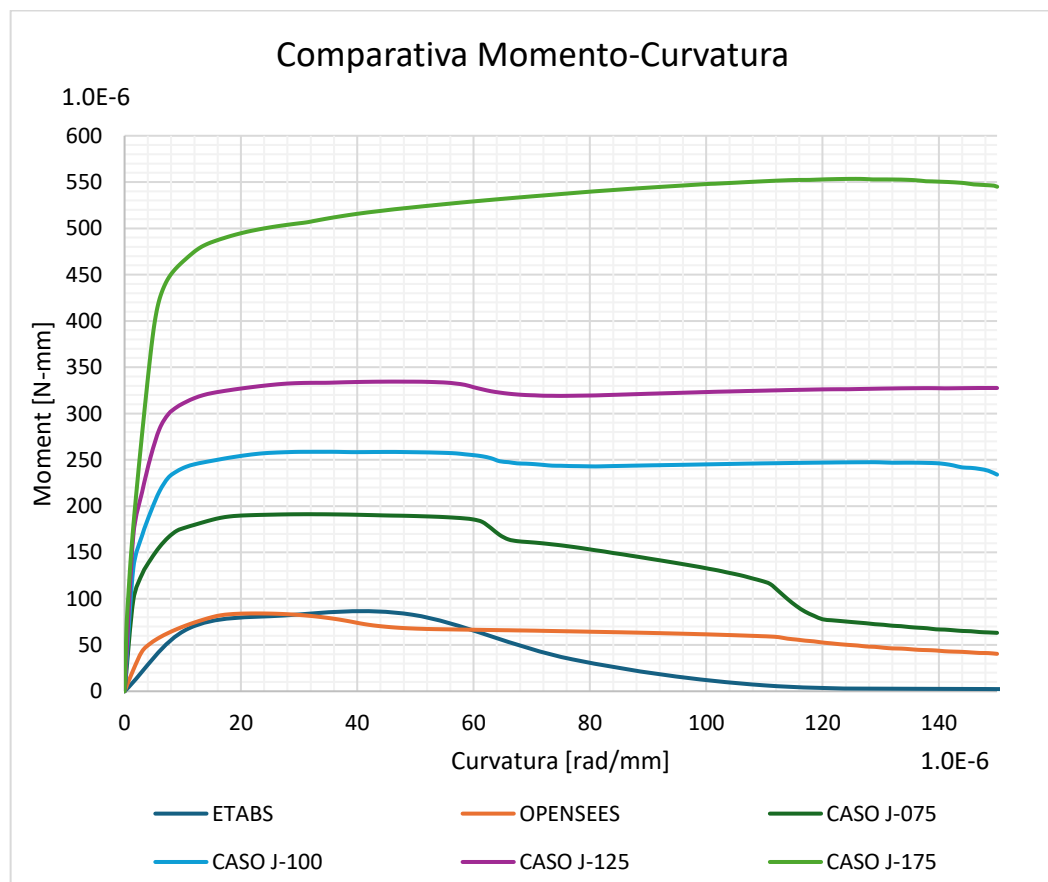


Figura 3.2-1 Comparativa de diagramas Momento-Curvatura: Influencia del espesor t_{jack})

Como se ilustra en la Figura 3.2-1, la evolución de las curvas revela dos efectos simultáneos producto del confinamiento del modelo de Mander aplicado al anillo exterior:

Encontramos que el incremento de rigidez tangente, la pendiente inicial se verticaliza progresivamente desde el caso J-075 hasta el J-175, validando el aumento del momento de inercia efectivo de la sección transformada.

También, se interpreta una extensión de la ductilidad de la sección, a diferencia de la columna original (que fallaba abruptamente), las secciones compuestas exhiben una meseta de fluencia prolongada. Esto confirma que el nuevo estriado del encamisado está confinando efectivamente al micro-hormigón, permitiendo desarrollar grandes curvaturas sin degradación severa de resistencia. Como nota, se replica que las gráficas de momento-curvatura están limitadas hasta llegar a los $150 \times 10^{-6} \text{ rad/mm}$, esto quiere decir que aún se podría llegar a estudiar el avance en la capacidad deformable de las secciones encamisadas post-pico completamente.

3.3 Análisis de Propiedades Dinámicas (Modal)

Para evaluar el impacto de la intervención en la respuesta global de la estructura, se realizó un análisis de valores propios (Eigen Analysis) sobre los modelos reforzados, siguiendo el Método 1 – Analítico de la sección 7.4.1.2.1 de la ASCE 41-17.

3.3.1 Variación del Periodo Fundamental (T_1) según incremento de masa y rigidez.

El encamisado introduce una competencia física en la ecuación del periodo natural $T = 2\pi\sqrt{M/K}$, por un lado, añade masa ($\uparrow M$) que tiende a flexibilizar el sistema; por otro, aumenta drásticamente la inercia ($\uparrow K$) que tiende a rigidizarlo, sin embargo, en la simulación no se actualiza la masa con el incremento del encamisado, despreciando este efecto al considerando que en caso J-175 representa el 5.8% de la masa considerada.

Los resultados numéricos, sintetizados en la Tabla 3.3-1 y mostrados en la Figura 3.3-1, demuestran que el aumento de rigidez (proporcional a h^4) predomina sobre el aumento lineal de la masa. Se observa una reducción sistemática del periodo fundamental T_1 a medida que se incrementa el espesor del encamisado (t_{jack}).

Tabla 3.3-1. Reporte de propiedades modales: Periodo y Frecuencia para cada caso de estudio

	INICIAL	CASO J-075	CASO J-100	CASO J-125	CASO J-175
<i>Espesor Jacket [mm]</i>	0	75	100	125	175
<i>T1 [s]</i>	1.5067	0.5763	0.4592	0.3752	0.3338
<i>Masa [Ton]</i>	48.554	48.554	48.554	48.554	48.554
<i>Rigidez [kN/m]</i>	844.40	5771.62	9088.46	13619.38	17205.41
<i>Peso Jacket [kN]</i>	0	9.54	13.56	18.01	28.18

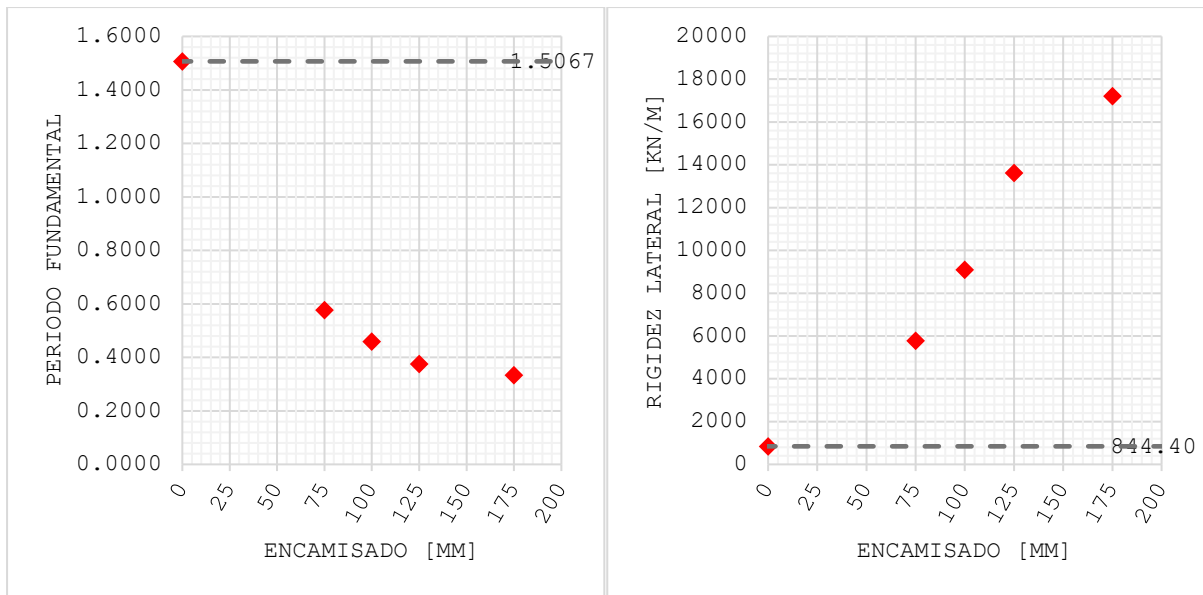


Figura 3.3-1. Comportamiento del Periodo Fundamental y Rigidez Lateral con el incremento del espesor del encamisado.

Esta tendencia confirma que la estructura intervenida se desplaza hacia la zona de periodos cortos del espectro de diseño, atrayendo mayores aceleraciones sísmicas, pero reduciendo los desplazamientos esperados. En los anexos mencionados a continuación ilustran la forma modal fundamental, la cual se mantiene estable en su configuración deformada, indicando que la intervención no introduce irregularidades torsionales ni modos locales indeseados.

- Anexo 27
Caso – J-075 – Perfil Modal – Columna Encamisada
- Anexo 50
Caso – J-100 – Perfil Modal – Columna Encamisada
- Anexo 73
Caso – J-125 – Perfil Modal – Columna Encamisada
- Anexo 96
Caso – J-175 – Perfil Modal – Columna Encamisada

3.4 Análisis, comentarios y conclusiones parciales del Capítulo III.

La construcción y validación del modelo numérico ha permitido establecer los confianza y certeza del análisis de nuestra simulación, cuya fiabilidad parte de la simple coincidencia de datos para adentrarse en la captura de fenómenos más complejos en el

comportamiento de los elementos estructurales y materiales implementados. En primera instancia, la consistencia de la línea base ha quedado demostrada mediante la validación cruzada con ETABS en el rango elástico; la correlación casi perfecta en los periodos fundamentales, con una discrepancia menor al 0.7%, confirma que la distribución de masa y la rigidez geométrica inicial del modelo en OpenSeesPy representan fielmente la realidad física de la columna existente, descartando cualquier error de modelado en la etapa de ensamblaje matricial.

Sin embargo, el hallazgo más significativo emerge del comportamiento del modelo matemático proviene del análisis no lineal Pushover más allá de los inicios de deformaciones no lineales, cuya discrepancia en la respuesta entre curvas de OpenSees con respecto a ETABS, no son una limitación y más bien evidencia la interacción del modelo basado en fibras y el uso de modelos constitutivos de materiales con mayor practicidad. Observando que mientras el software comercial tiende a extender artificialmente la ductilidad basándose en curvas suavizadas, el modelo propuesto demostró una sensibilidad superior al detectar la inestabilidad P-Delta real; porque el corte "premature" de la curva en OpenSees revela el verdadero mecanismo de colapso, donde el momento de volcamiento geométrico supera la capacidad residual del núcleo dañado; siendo este un límite físico crítico que los modelos simplificados enmascaran y que resulta vital para una evaluación de seguridad realista, pero que no descarta una confirmación sólida con futuros ensayos con columnas reales sometidas a fallas controladas.

Desde la perspectiva computacional, la estrategia de modelado ha validado la eficacia de la integración monolítica frente a las técnicas de elementos en paralelo, lograda con la implementación exitosa del algoritmo adaptativo de autoría propia en el criterio de cambio de algoritmo no basados en fallos por convergencia únicamente (`analyze_smart_step`), es así, que con su lógica de conmutación basada en la detección del pico de resistencia, ha logrado resolver el problema de convergencia en elementos de hormigón con ablandamiento. Esto asegura que las curvas de capacidad generadas para los casos compuestos sean matemáticamente continuas y trazables hasta grandes derivas, legitimando el uso de OpenSeesPy no solo como una herramienta de comprobación, sino como un instrumento de investigación capaz de generar datos de rigidez efectiva con transparencia algorítmica.

Finalmente, el análisis dinámico confirmó que la intervención estructural modifica drásticamente la respuesta espectral del elemento. La reducción sistemática del periodo

fundamental (T_1) demuestra que el incremento exponencial de la inercia ($I \propto h^4$) gobierna sobre el aumento lineal de la masa a pesar de no ser estudiada directamente, desplazando la estructura hacia zonas de mayor demanda de aceleración. Con este entorno numérico validado dentro de los rangos de interés del comportamiento lineal, como aquellos secundarios que aportan mayor comprensión de los materiales en el rango inelástico llevados al colapso, la investigación dispone de la solidez necesaria para procesar la matriz de casos completa en el siguiente capítulo y proceder a la determinación de los factores α con la certeza de que provienen de una simulación físicamente rigurosa.

CAPÍTULO IV: DETERMINACIÓN DE FACTORES DE RIGIDEZ Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Validada la arquitectura numérica en el capítulo precedente, este apartado se concentra en el procesamiento masivo de la matriz paramétrica que contiene las variaciones de espesores del encamisado. Logrando alcanzar los objetivos propuestos y obtener a través de las curvas de capacidad de cada caso, el comportamiento complejo de la sección compuesta en un parámetro de diseño simplificado: el factor de inercia efectiva (α). Para ello, partimos del análisis de los casos J-075 a J-175, se cuantifica la evolución de la resistencia, la ductilidad y, fundamentalmente, llegamos a proponer una norma matemática que correlaciona el espesor del encamisado con la rigidez agrietada operativa.

4.1 Análisis de Capacidad y Desempeño Sísmico

Al superponer las curvas fuerza-desplazamiento resultantes de las cuatro configuraciones de encamisado, se evidencia una transformación radical en la respuesta mecánica del elemento, por lo que no se trata únicamente de un incremento escalar de resistencia, sino de una modificación cualitativa del modo de falla.

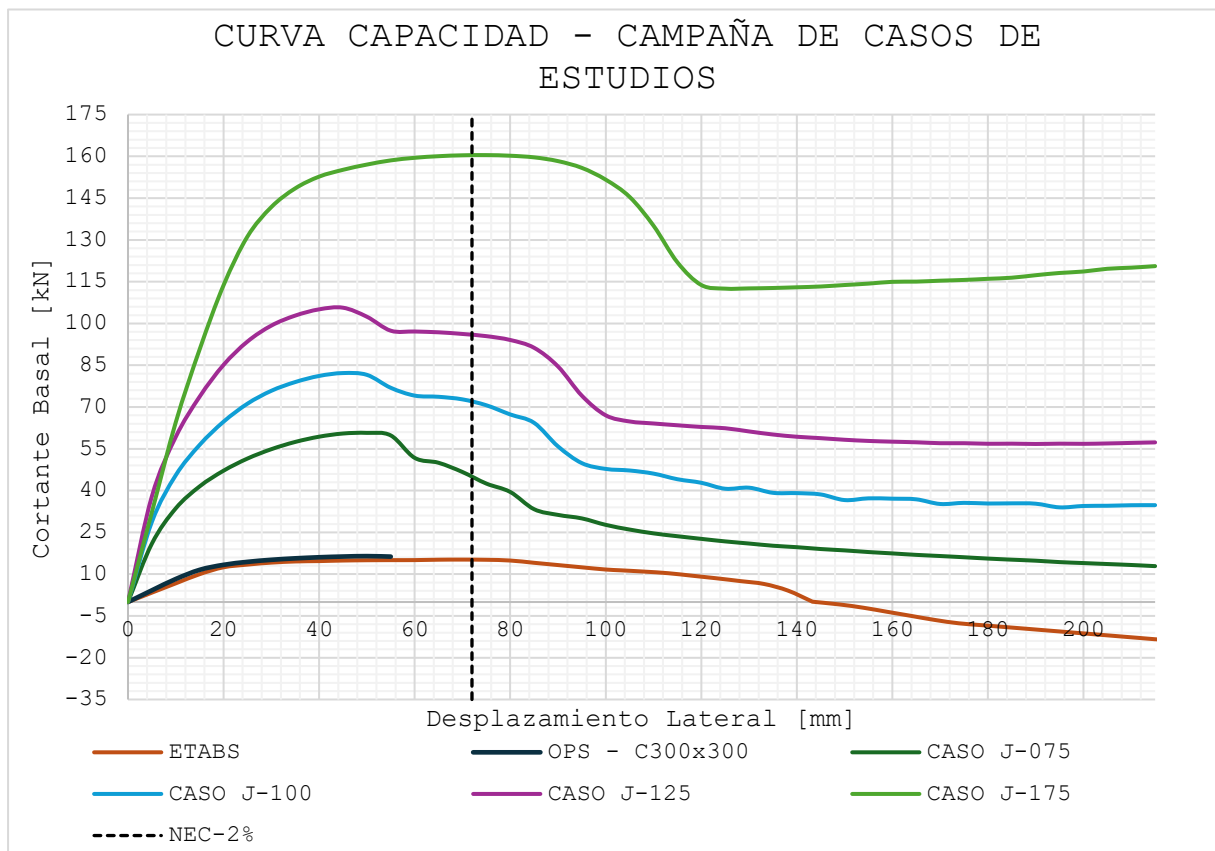


Figura 4.1-1. Superposición de Curvas Pushover: Influencia del espesor del encamisado)

4.1.1 *Curvas de Capacidad (Pushover) Comparativas: J-075 vs J-100 vs J-125 vs J-175.*

En primera instancia, en la Figura 4.1-1 se observa una notable verticalización de la rigidez tangente en el rango elástico, comentando el Caso J-175 que exhibe la pendiente más pronunciada, lo que confirma que el incremento del momento de inercia ($I \propto h^4$) es efectivo desde los primeros respuesta de carga. Esto implica que la columna reforzada no solo resiste más, sino que restringe la deformabilidad lateral mucho antes de alcanzar el límite de fluencia, protegiendo a los elementos no estructurales adheridos.

Por otro lado, el incremento de resistencia (V_{max}) denota un comportamiento de aparentemente con "rendimientos decrecientes". Si bien la capacidad de carga aumenta sustancialmente con cada adición de material, el salto de capacidad entre los primeros casos (J-075 a J-100) es porcentualmente ligeramente mayor, un incremento $\approx 35\%$, que en siguiente aumento del espesor (J-100 a J-125) se reduce a $\approx 28\%$ este rendimiento, y el caso más robusto que hace un incremento doble de 50mm para llegar a los 175mm, el incremento sustancial fue de $\approx 66\%$, que distribuido equitativamente sería que sigue un paso incremental del $\approx 33\%$ y ya no menor a los 28%. Esto sugiere que la eficiencia geométrica del refuerzo tiende a estabilizarse, indicando que aumentar indefinidamente el espesor aporta inercia, pero deja de aportar resistencia marginal significativa, sin embargo, luego muestra nuevamente un crecimiento aparente y debe a que contrarresta mejor los efectos P-Delta debido a los cambios de esbeltez no estudiados, es más fácil voltear empujando lateralmente un lápiz con poca fuerza en su parte superior debido a su geometría esbelta, que una caja de cartón ligero pero con una esbeltes menor. Porque en nuestro caso del modelo, que, a pesar de flexionarse lo mismo, se distribuye mejor y aportan mayor resistencia a la flexión de los efectos de segundo orden los aceros del encamisado, por tener un mayor brazo de palanca.

Y continuando con el desempeño ante los efectos P-Delta, la estabilidad post-pico es lo que más inquieta, porque a diferencia de la columna original analizada en el Capítulo III, que presentaba una caída abrupta de resistencia tras el agotamiento del recubrimiento, todos los modelos encamisados desarrollan una meseta plástica extendida. Incluso el caso de menor espesor logra mantener su capacidad de carga hasta desplazamientos significativos, validando que el confinamiento proporcionado por los nuevos estribos es suficiente para activar la ductilidad del micro-hormigón, transformando un modo de falla frágil en uno dúctil y disipativo. Porque si enlazamos el límite de capacidad de los estribos para columnas resistentes a momentos dictada por la norma ACI 318-19, donde $P \leq 0.30A_g f'_c$ cobra sentido que con una

carga $P_g = 0.25A_gf'_c$ sumándole los efectos $P - \Delta$ la columna original colapsara. Consolidando que la propuesta de 0.25 fue una estrategia de análisis óptima para evidenciar dicho comportamiento, comportamiento que fue corregido al aumentar sección con el encamisado.

4.1.2 Evaluación por Desempeño (Niveles NEC-SE-HM).

Para traducir estas curvas al lenguaje de la evaluación basada en desempeño, se han mapeado los estados límite de daño sobre la respuesta del caso más robusto (J-175). Como se ilustra en la Figura 4.1-2, la zonificación de los niveles de desempeño demuestra que el encamisado expande significativamente el rango de seguridad de la estructura.

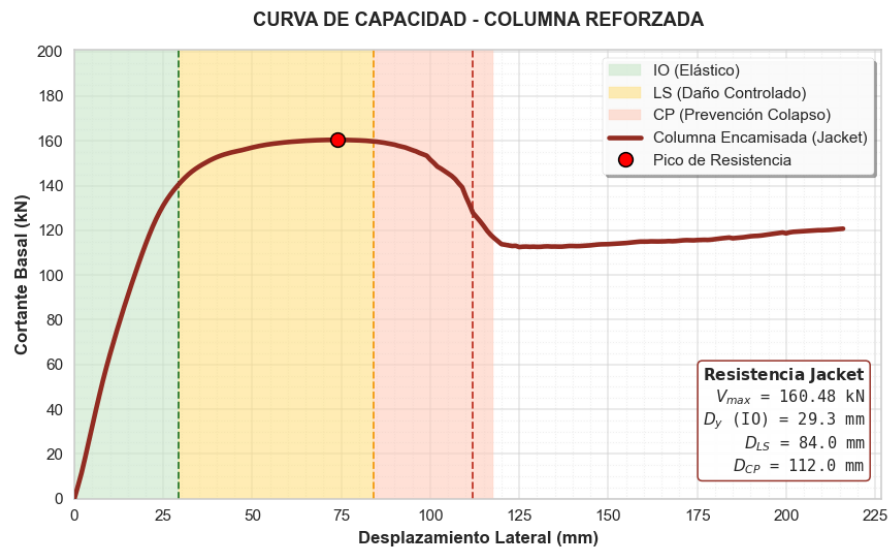


Figura 4.1-2. Curva de capacidad del Caso J-175 con identificación de niveles IO, LS, CP

El punto de fluencia efectiva, determinado por el criterio de Priestley, actúa como el umbral donde la estructura pasa de un comportamiento controlado por rigidez a uno controlado por ductilidad. Es notable que, para los espesores mayores, el límite de "Prevención de Colapso" (CP) se desplaza hacia la izquierda. Esto válida la idoneidad técnica del encamisado para dotar de capacidad de deformación a estructuras que originalmente eran rígidas y frágiles, permitiéndoles incursionar en el rango inelástico sin riesgo de inestabilidad vertical.

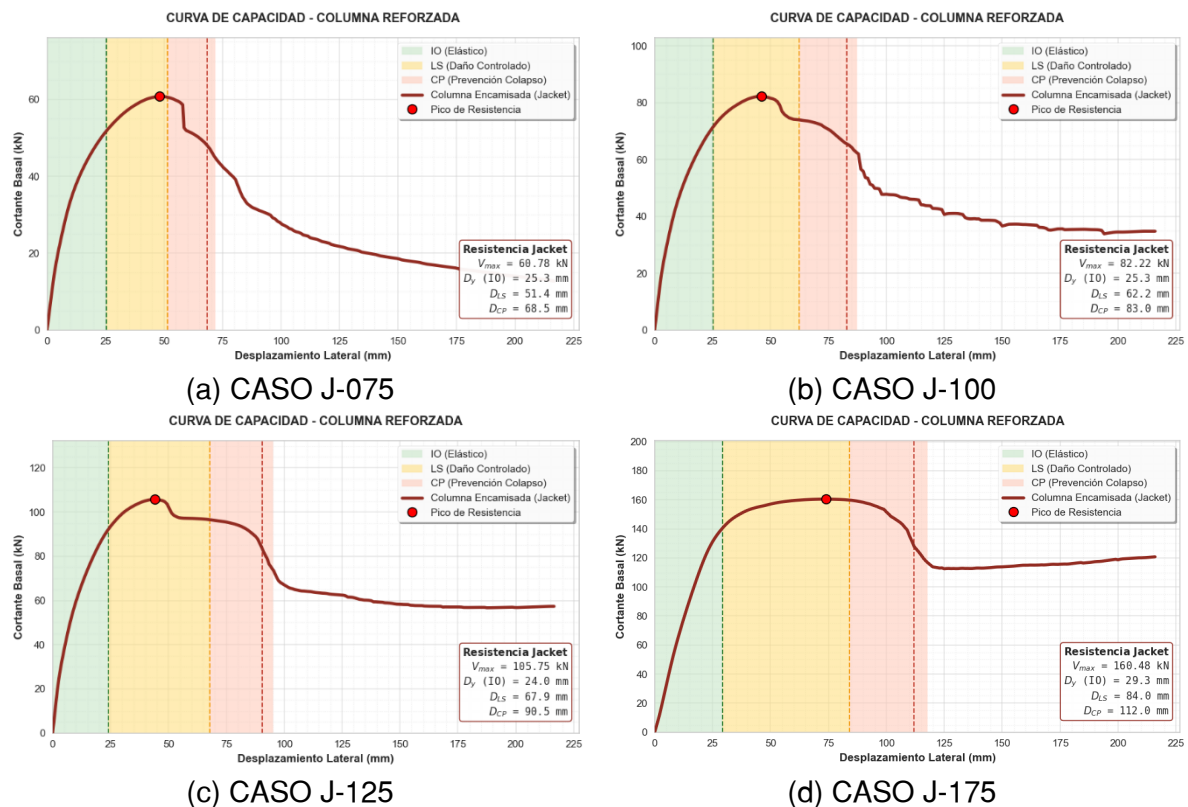


Figura 4.1-3. Evolución de la curva de capacidad y expansión de los niveles de desempeño (IO, LS, CP) según ASCE 41-17 para los casos: (a) J-075, (b) J-100, (c) J-125 y (d) J-175.

Como se aprecia en la Figura 4.1-3, existe una notable transformación de la respuesta inelástica post-pico de las curvas de capacidad al aumentar el espesor del encamisado. A diferencia de la columna original que falla abruptamente, los modelos encamisados desarrollan una pendiente de ablandamiento suave, esto permite una expansión progresiva de la zona de seguridad de vida (LS) conforme aumenta el espesor, desplazando el límite de inestabilidad vertical hacia derivas mayores y dotando al sistema de una ductilidad estable.

4.2 Mecanismo de Distribución de Cargas (Desglose de Aportes)

Una interrogante común en el diseño de refuerzos es determinar cómo se reparten los esfuerzos entre el material existente y el nuevo. Mediante la extracción de fuerzas en las fibras del modelo OpenSees, ha sido posible desagregar el cortante basal total para entender la mecánica interna del refuerzo.

4.2.1 Cuantificación del aporte resistente: Núcleo Original vs. Jacket Nuevo.

Con el fin conocer cuál es el desempeño propio del núcleo original y el encamisado, se segregan sus aportes, los cuales nos permiten construir la Figura 4.2-1.

Cuando nos dirigimos a las primeras etapas de carga, correspondientes al rango elástico, ambos hormigones trabajan solidariamente debido a la compatibilidad de deformaciones

impuesta por la adherencia perfecta y una rigidez relativamente idéntica entre el encamisado y la columna existente, sin embargo, a medida que se incrementa el espesor del encamisado, este comienza a tomar protagonismo, en consecuencia, la dinámica cambia drásticamente al superarse el umbral de agrietamiento.

Conforme avanza la demanda de desplazamiento, la rigidez del núcleo original —que ya se encuentra degradado o fisurado, cede protagonismo al anillo exterior. El encamisado, dotado de acero nuevo y un hormigón de mayor resistencia ($f'_c = 28 \text{ MPa}$), termina absorbiendo la mayor parte de la demanda inelástica y el cortante sísmico. Este mecanismo actúa como un escudo protector, el encamisado disipa la energía del sismo, permitiendo que el núcleo central se concentre en preservar la estabilidad ante las cargas gravitacionales, evitando excursiones excesivas que podrían comprometer su integridad vertical.

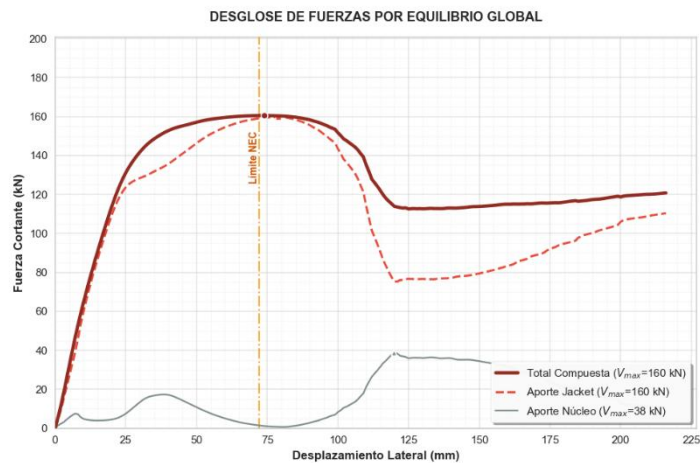


Figura 4.2-1. Desglose de fuerzas cortantes por equilibrio global para el Caso J-175)

Al observar detenidamente el comportamiento mostrado entre el núcleo y el Jacket de la Figura 4.2-1, cuando el encamisado sufre la plastificación y un colapso debido al agrietamiento excesivo del hormigón del mismo, el núcleo vuelve a portar rigidez lateral aproximadamente a los 120 mm de desplazamiento lateral, demostrando que a pesar de perder capacidad durante dos etapas anteriores, el confinamiento aportado por el encamisado logra “revivir” al núcleo, y el posterior crecimiento en la cola final de la gráfica se debe al proceso de endurecimiento del acero del encamisado simulado por el material constituyente “ReinforcingSteel”, que al sufrir grandes deformaciones supera su etapa plástica y en conjunto a su mayor brazo de palanca logran aportar un incremento paulatinamente lento de resistencia.

4.2.2 Análisis de la eficiencia del reforzamiento y punto de rendimientos decrecientes.

No obstante, se identifica un comportamiento inflexión en la eficiencia del reforzamiento. Al comparar los incrementos de capacidad entre los modelos ya analizados en Figura 4.1-1, que al complementarse con la Figura 4.2-2, muestra que no es que la ganancia marginal en resistencia empieza a decrecer proporcionalmente al volumen de hormigón invertido solamente, sino que el desempeño de un encamisado exagerado sesga parcialmente la existencia de un núcleo preexistente. Esto sugiere la existencia de un "punto óptimo" técnico-económico; más allá de cierto espesor, el encamisado sigue aportando rigidez (útil para control de derivas) como el Caso J-175, pero penaliza excesivamente la masa sísmica del edificio sin ofrecer beneficios proporcionales en términos de ductilidad o resistencia última como son los casos desglosados J-100 y J-125, donde se busca una falla continua de los elementos y no abrupta. Este fenómeno físico es consistente con la saturación del confinamiento en elementos masivos, un hallazgo que se formalizará matemáticamente en la discusión de resultados.

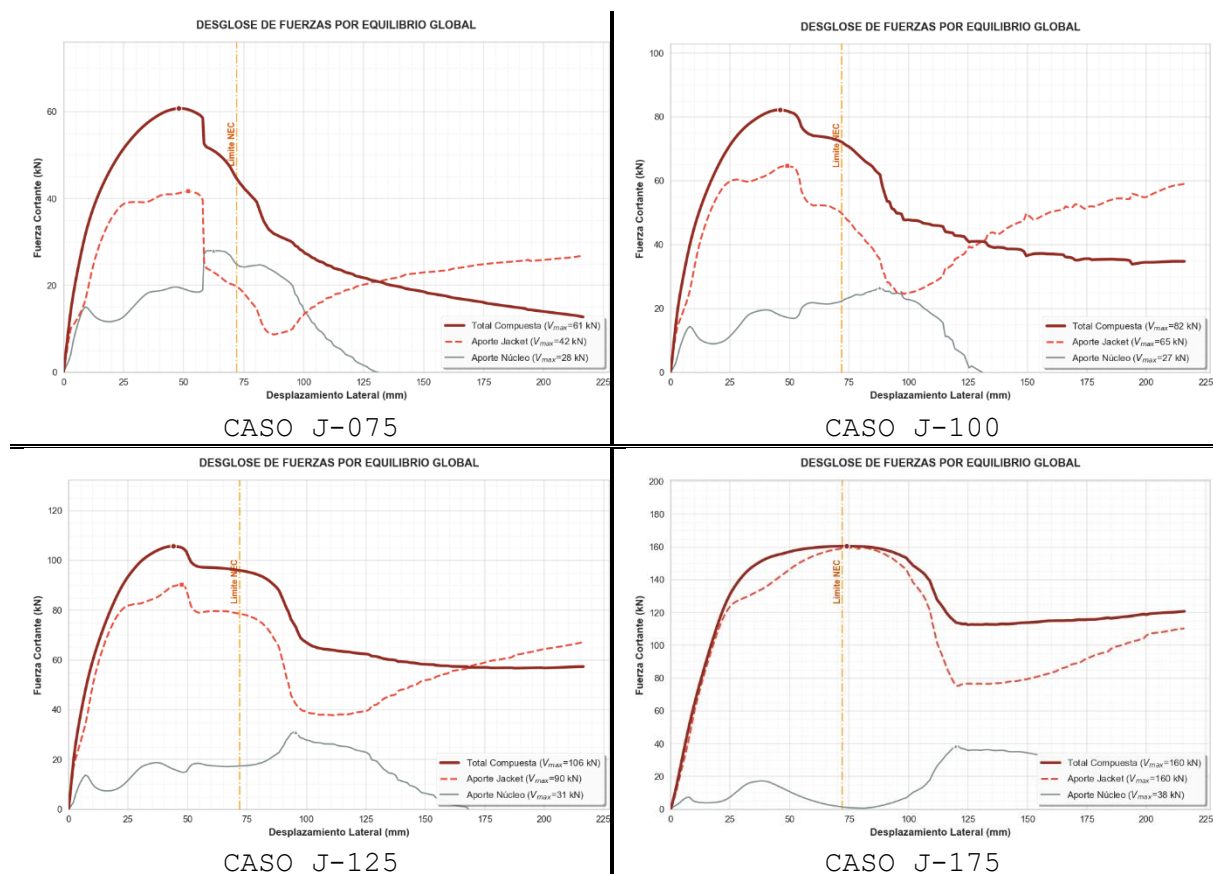


Figura 4.2-2. Comparativa Progresiva de los cambios del espesor del encamisado y su efecto en el aporte desglosado de fuerzas del encamisado y columna existente.

4.3 Determinación de Factores de Rigidez Efectiva (α)

Este apartado constituye el núcleo principal de la investigación, donde se aborda la transformación de la compleja respuesta no lineal obtenida mediante el análisis de fibras en un factor escalar simple α , apto para ser introducido en los modificadores de rigidez (*modifiers*) de software comercial como ETABS en un análisis lineal.

4.3.1 Metodología de Cálculo: Rigidez Secante al Punto de Cedencia (75% V_{max}).

Para determinar la rigidez efectiva (K_{eff}), se aplicó rigurosamente sobre las curvas simuladas el criterio de Priestley & Park (1987), validado previamente en el Capítulo III. Este método consiste en trazar una secante desde el origen hasta la intersección con la fuerza correspondiente al 75% de la capacidad máxima del sistema ($0.75 V_{max}$). Este enfoque asegura que la rigidez capturada corresponda al estado de servicio agrietado, justo antes de que la fluencia generalizada del acero reduzca drásticamente la rigidez tangente.

4.3.2 Cálculo de la Rigidez Bruta Teórica (K_{gross}) usando propiedades del Jacket ($f'_c = 28 \text{ MPa}$).

El factor modificador adimensional α – acotando el punto 2.3.3 – surge de la comparación entre la rigidez efectiva simulada (K_{eff}) y la rigidez bruta teórica (K_{gross}) que utilizaría un ingeniero en la práctica convencional. La rigidez bruta se calculó considerando la inercia de la sección monolítica total ($B_{tot} \times H_{tot}$) y el módulo de elasticidad del material predominante del encamisado. Finalmente, el factor se obtiene como la razón directa entre la rigidez real operativa y la rigidez ideal no fisurada.

$$\alpha_{crack} = \frac{K_{eff}}{K_{gross}} \quad \text{Eq. 4.3.1}$$

$$K_{eff} = \frac{V_{75\%}}{\Delta_{75\%}}, \quad K_{gross} = \frac{3E_{jack}I_g}{L^3}$$

$$\alpha_{crack} = \frac{\frac{V_{75\%}}{\Delta_{75\%}}}{\frac{3E_{jack}I_g}{L^3}}$$

$$\alpha_{crack} = \frac{V_{75\%}L^3}{3\Delta_{75\%}E_{jack}I_g} \quad \text{Eq. 4.3.2}$$

4.3.3 Resultados de los Factores Modificadores (α).

El procesamiento de los cuatro casos de estudio arroja los valores de diseño específicos presentados en la **Tabla 4.1**.

Tabla 4.3-1. Resultados del factor α en respuesta a la variación del encamisado

CASO	Espesor [mm]	Alpha
Columna Original	0	0.7792
Caso J-075	75	0.4440
Caso J-100	100	0.3910
Caso J-125	125	0.3690
*	150	0.3588
Caso J-175	175	0.2320
*	200	0.3310
*	260	0.3194
*	300	0.2912
*	400	0.2984
*	420	0.2772
*	480	0.2683
*	540	0.2615

*Los valores de espesores encamisados extras suplen a una demanda emergente de las comprobaciones límites del comportamiento de α bajo espesores de encamisados superiores.

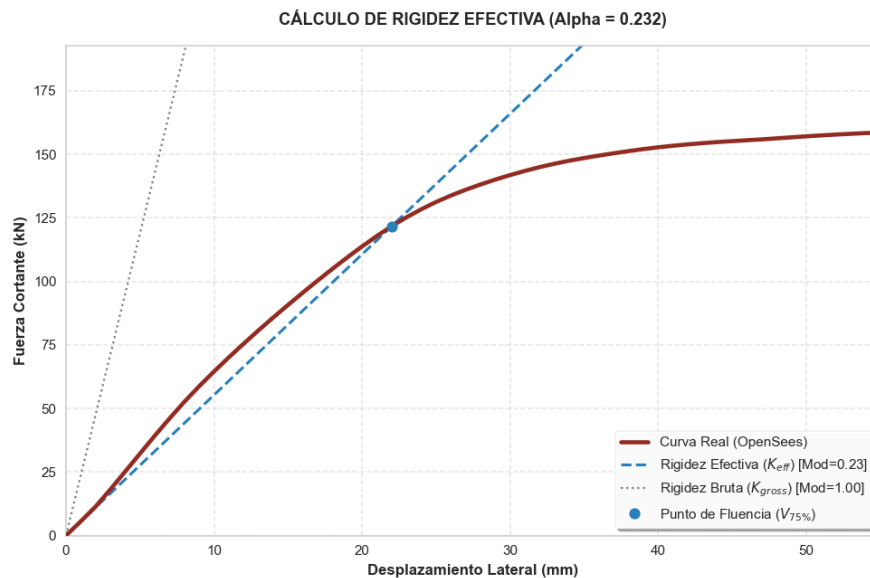


Figura 4.3-1. Determinación gráfica de la rigidez efectiva y factor α para el Caso J-175

Los resultados tabulados en la Tabla 4.3-1, indica que el factor α no es una constante universal (como sugiere el valor 0.70 de la norma ACI para columnas), sino que varía en función de la geometría del reforzamiento estructural. A mayor espesor del encamisado, aunque la rigidez absoluta de la columna aumenta, la "eficiencia" relativa de la sección (α) tiende a disminuir asintóticamente hacia un valor residual de $\alpha_{min} \approx 0.27$. Esto se debe a que, en secciones más grandes, una mayor porción de hormigón trabaja a tracción y se agrieta, alejando el comportamiento real de la idealización de sección bruta.

4.4 Discusión de Resultados

Más allá de los valores discretos obtenidos, el análisis de regresión sobre la matriz extendida de datos revela una tendencia matemática de interés que permite generalizar el comportamiento de la sección compuesta. Al graficar el espesor del encamisado (t_{jack}) frente al factor α , se observa una correlación fuerte ($R^2 \approx 0.95$) que sugiere un fenómeno de rendimientos decrecientes.

4.4.1 Análisis de Tendencias y Selección del Modelo Matemático

Inicialmente con los casos de estudios y la columna original se logró comprender a breves rasgos el comportamiento de los datos, y una posible tendencia logarítmica presentada en la Eq. 4.4.1, donde los coeficientes tienen una relación con la geometría del modelo.

$$t_{jack} = -147.5 \ln(\alpha) - 36.523 \quad \text{Eq. 4.4.1}$$

$$t_{jack} = -k \cdot \ln(\alpha) - B \quad \text{Eq. 4.4.2}$$

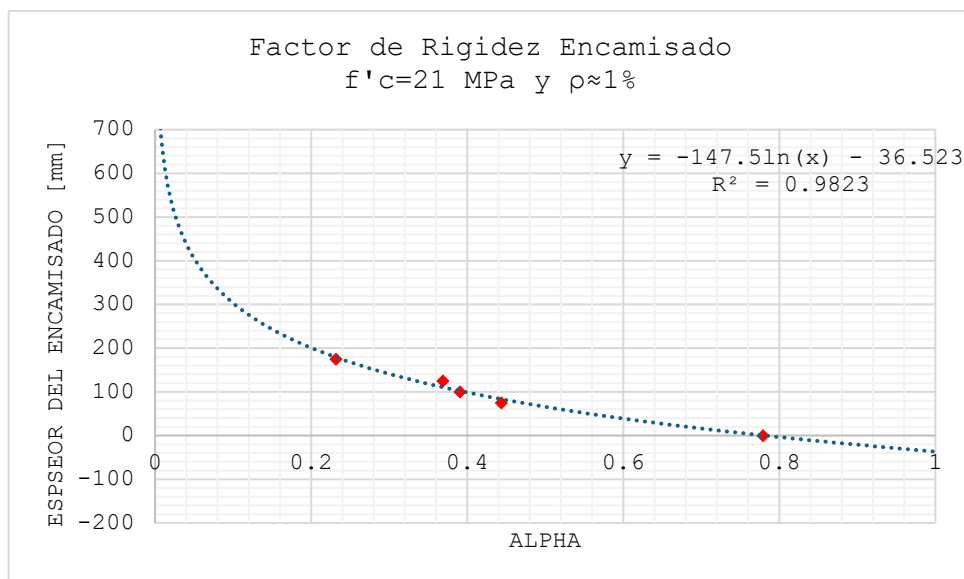


Figura 4.4-1. Regresión Logarítmica de t_{jack} en función de α previa a refinamiento.

Los coeficientes a priori respondían a que para un encamisado nulo ($t_{jack} = 0$) el valor de α debe corresponder al factor de rigidez agrietada (α_{base}) de la columna existente, por lo tanto, $B = -k \cdot \ln(\alpha_{base})$, que sustituyendo en la formulación inicial.

$$t_{jack} = -k \cdot \ln(\alpha) - (-k \cdot \ln(\alpha_{base}))$$

$$t_{jack} = -k \cdot (\ln(\alpha_{base}) - \ln(\alpha))$$

$$t_{jack} = -k \cdot \ln\left(\frac{\alpha_{base}}{\alpha}\right) \quad \text{Eq. 4.4.3}$$

Aunque parecía que Eq. 4.4.3 responde al comportamiento de los datos, no respondía al comportamiento asintótico del valor residual $\alpha_{min} \approx 0.26$ cuando se comenzaron a generar más resultados, con el fin de convalidar la tendencia logarítmica descrita.

4.4.1.1 Comparativa: Modelo Exponencial vs. Modelo Racional

Para corregir esto, se evaluaron dos modelos matemáticos candidatos capaces de representar el comportamiento asintótico (Ver Figura 4.4-2).

El primero y asociado al comportamiento logarítmico, tenemos la Ley de Decaimiento Exponencial, que asume que la pérdida de eficiencia se debe a la atenuación del confinamiento.

Y una función con la misma curvatura de ajuste, pero con una conceptualización distinta a nivel físico, es la Ley Racional (Hipérbola Desplazada), que asume que la pérdida de eficiencia se debe a la posible "dilución geométrica" de la inercia.

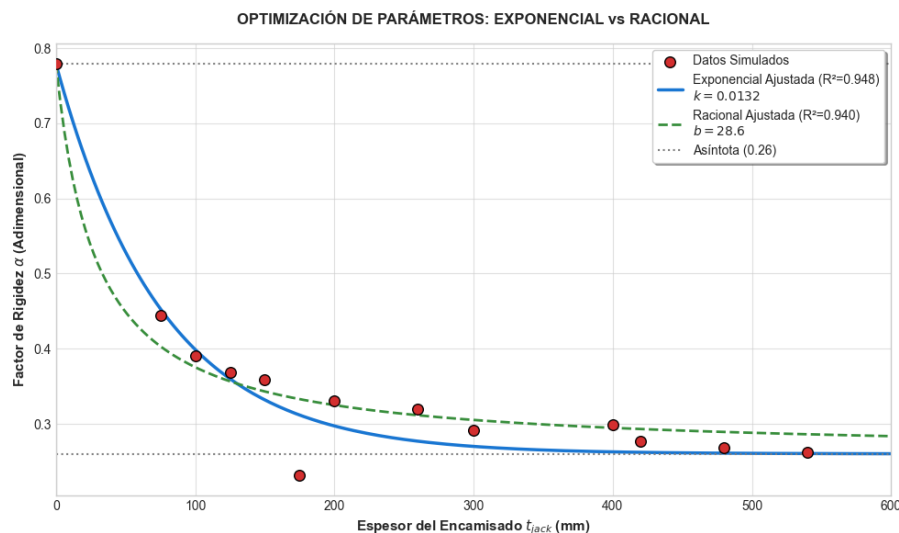


Figura 4.4-2. Funciones de mejor ajuste a los datos recopilados de t_{jack} y α .

Si bien ambos modelos presentaron ajustes estadísticos excelentes ($R^2 > 0.94$), se seleccionó el Modelo Racional como la ecuación gobernante del comportamiento de los datos.

La justificación es mera mente física, donde las propiedades de la sección (como la Inercia I y Área A) son funciones polinómicas de la geometría (H^4, H^2). Además, como la relación entre rigidez efectiva y rigidez bruta ($\alpha = K_{eff}/K_g$) representa un cociente de polinomios, es un indicio de que corresponde matemáticamente a una función racional, y no a una exponencial.

4.4.2 Interpretación Física: La Paradoja de la Rigidez y la Dilución Geométrica

Al analizar la caída del factor α con el aumento del espesor (t_{jack}), se observa un fenómeno aparentemente contradictorio que requiere una interpretación física detallada.

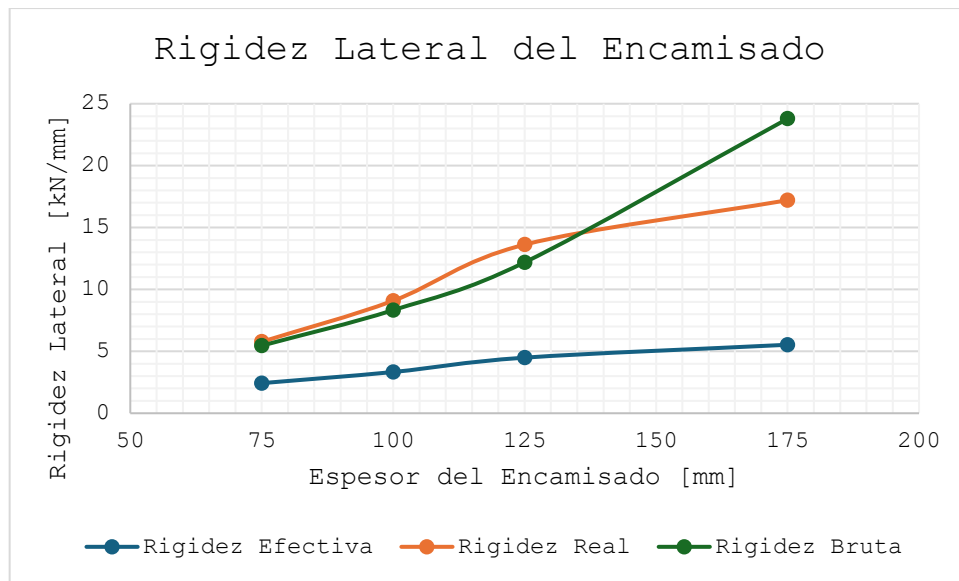


Figura 4.4-3 Comportamiento de la rigidez lateral real, efectiva y bruta de la columna encamisada.

Analizando la rigidez efectiva (K_{ff}) como se observa en la Figura 4.4-3, Figura 3.3-1 es evidente que al aumentar el espesor del encamisado (de 75 mm a 175 mm), la columna se vuelve más robusta y su rigidez lateral absoluta (kN/mm) aumenta. Es decir, la columna reforzada es objetivamente más difícil de deformar que la original.

La rigidez bruta teórica (k_{gross}), de la geometría final de la columna encamisada, en cambio, tiene un crecimiento exponencialmente con la dimensión (H^4 , sección cuadrada). Al calcular la rigidez esperada de una columna monolítica gigante (ej. 650 × 650 mm), la teoría matemática predice un valor extremadamente alto.

Asociamos al termino de “Fenómeno de Dilución” al siguiente comportamiento: como el factor α representa la relación entre la realidad (K_{ff}) y la expectativa teórica (k_{gross}), a medida que el encamisado aumenta de espesor, el volumen de hormigón añadido se aleja del centroide de la sección. Este anillo exterior, aunque aporta resistencia, está sometido a mayores

deformaciones por tracción y se agrieta prematuramente. En consecuencia, aunque la rigidez efectiva (real) crece, la rigidez teórica (monolítica) crece mucho más rápido. Esto provoca que la eficiencia relativa (α) decaiga asintóticamente.

Este fenómeno denominado en esta investigación "Norma de Dilución Geométrica", ya que la eficiencia del núcleo confinado original se "diluye" al ser rodeada por un volumen masivo de hormigón que satura su capacidad de aporte a la rigidez elástica.

4.4.3 Formulación General del Encamisado

Se define la ecuación constitutiva de rigidez efectiva válida para las condiciones de diseño del proyecto investigativo, expresada como una función racional:

$$\alpha(t_{jack}) = \frac{0.5192 \cdot \beta}{t_{jack} + \beta} + 0.26, \text{ donde } \beta = 28.6$$

Donde, 0.5192 responde a $0.7792 - 0.26 \rightarrow (\alpha_{base} - \alpha_{min})$ y $\beta \approx H_{orig}/10 = 30mm$, siendo β la variable que representa el factor de escala geométrica, interpretándose que la eficiencia del encamisado al ser muy sensible al inicio, basta con añadir un espesor igual al 10% de la columna para degradar la eficiencia significativamente. Esto justifica por qué los encamisados delgados son más eficientes en términos de α que los encamisados gruesos.

La Expresión de la Formula General es:

$$\alpha(t_{jack}) = \frac{(\alpha_{base} - \alpha_{min}) \cdot \beta}{t_{jack} + \beta} + \alpha_{min} \quad \text{Eq. 4.4.4}$$

Donde

α_{base} : Estado Inicial, se define como la rigidez agrietada de la columna original antes de la intervención, y depende de su geometría (H) y recubrimiento (c).

α_{min} : Eficiencia Residual, representa la asíntota de la eficiencia geométrica, siendo el límite inferior al que tiende la rigidez cuando el elemento se vuelve masivo y el efecto del confinamiento se satura en relación al volumen. Actualmente *calibrado en*: 0.26. (Este valor coincide cercano a los factores del ACI 318 - Anexo 117, para elementos no confinados o muros, validando la saturación del sistema.

- Si comprobamos, a todos los casos se les aplico una carga $P = 0.25A_g f'_c = 472.5 \text{ kN}$, el cálculo para la inecuación $P \leq 0.1A_g f'_c$ que

nos indica el ACI 318, el resultado es de 1119.625kN para una columna redimensionada del Caso J-175, si trabajamos con la metodología de elementos paralelos obtenemos un f'_c ponderado a 26.5MPa para el área monolítica de 650x650mm.

Lo que implica la norma es, como $472.5kN < 1119.625kN \rightarrow \alpha_{base} = 0.30$

β : nombrado como Factor de Escala Geométrica, es la variable crítica que gobierna la curvatura de la degradación, recordando que el ajuste numérico arrojó un valor de $\beta \approx 28.6 \text{ mm}$ para la columna base de $H = 300 \text{ mm}$, teniendo así una relación de escala fundamental:

$$\beta \approx \frac{H_{orig}}{10} = 30 \text{ mm}$$

t_{jack} : Espesor del encamisado en mm.

4.4.4 Micro Estudio del comportamiento de la rigidez efectiva por agrietamiento α_{base}

La fórmula general requiere factores de rigidez que definen los materiales y elementos existentes, con el fin de practicidad de diseño y validación de la profundidad de la investigación principal, se incorpora una exploración del comportamiento del factor α_{base} al tener relación normativa mas fuerte con la ACI 318-19, como factores de rigidez efectiva o inercia agrietada de los elementos.

Tabla 4.4-1. Configuraciones de columnas del micro estudio, del comportamiento del α_{base} en relación con el tamaño de recubrimiento

C30x30		C40x40		C50x50	
Cover [mm]	α_{base}	Cover [mm]	α_{base}	Cover [mm]	α_{base}
5	0.6817	5	0.6757	5	0.6825
40	0.7792	30	0.7184	75	0.7401
145	0.7046	110	0.7846	220	0.7811
148	0.7044	190	0.7595	240	0.7783

Estas columnas no son encamisadas, se considerarían “columnas existentes” o un análisis de columnas simple, compuestas por su núcleo confinado + armadura de refuerzo + recubrimiento.

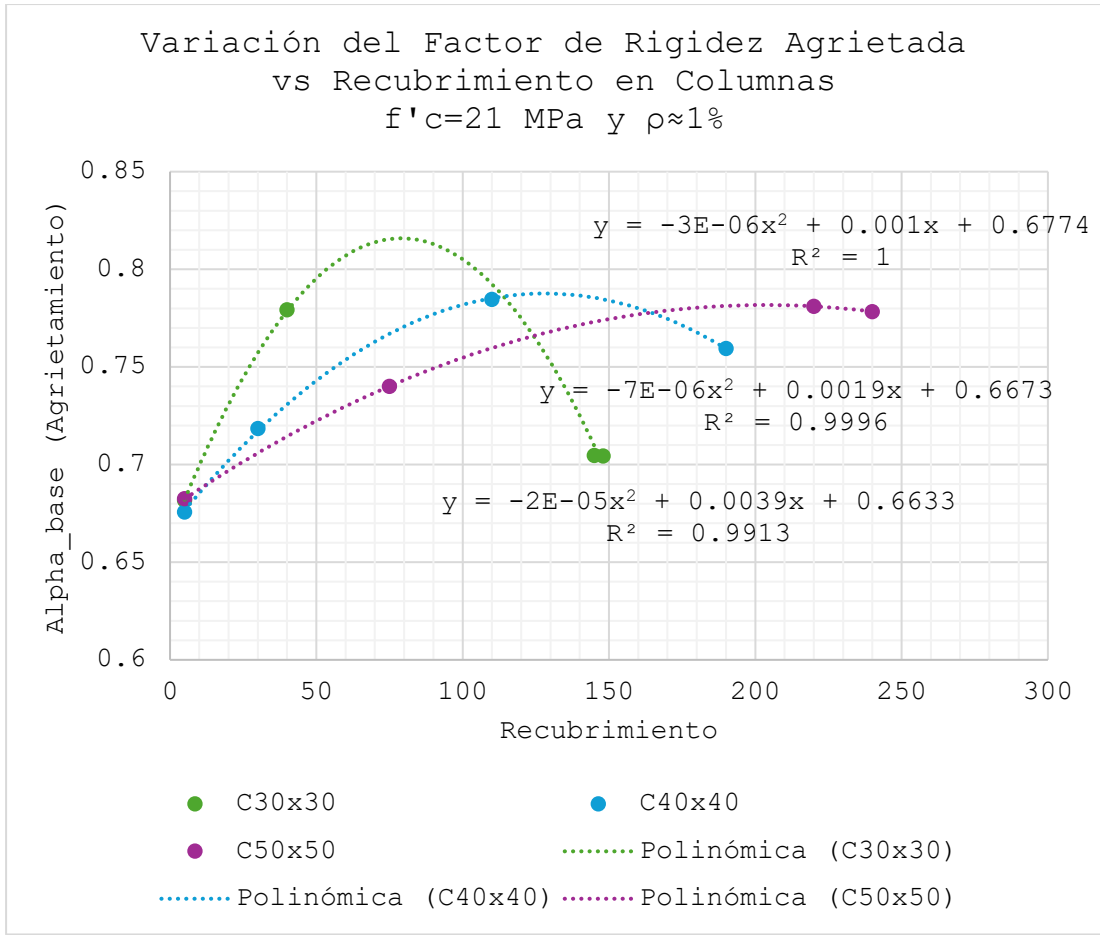


Figura 4.4-4. Comportamiento de la rigidez efectiva α_{base} a distintos recubrimientos límites para diferentes secciones, de diseño al $\rho = 1\%$ y $f'_c = 21MPa$.

$$\alpha_{base} = (-31292 H^{-3.711})c^2 + \left(\frac{638.67 e^{-0.007H}}{4700\sqrt{f'_c}}\right)c + 0.6693 \quad \text{Eq. 4.4.5}$$

La parametrización de la formula anterior, surge de lada la naturaleza parábola del comportamiento de los datos.

$$\alpha(c) = A \cdot c^2 + B \cdot c + C$$

Solo se da garantía de la función para las condiciones de diseño de hormigón y acero de la columna existente, no se ha realizado una validación rigurosa de esta ecuación. La metodología de hallazgo de los coeficientes fue relacionando variables con un comportamiento similar, en relación a cómo cambia los coeficientes A y B al cambiar la sección (H).

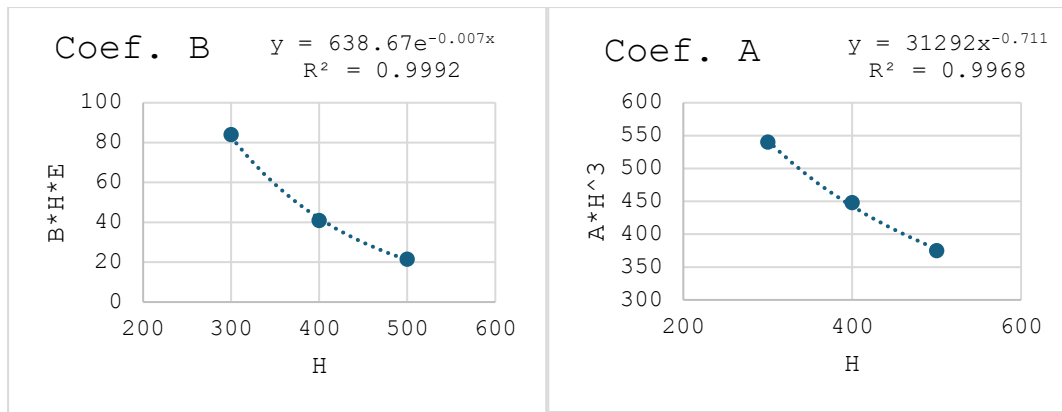


Figura 4.4-5. Parametrización de coeficientes A y B de la función de α_{base}

Coefficiente Cuadrático (A)

$$A(H) = -31292 H^{-3.711}$$

Coefficiente Lineal (B)

$$B(H) = \frac{638.67 e^{-0.007H}}{H \cdot E}, E = 4700\sqrt{f'_c}$$

Intercepto (C)

$$\text{Valor: } C \approx 0.6693$$

4.4.5 Ecuación Específica del Sistema Estudiado

Para el caso específico de esta investigación ($H = 300\text{mm}$, $\alpha_{base} \approx 0.779$, $\alpha_{min} = 0.26$, $\beta \approx 28.6$), la ecuación racional se puede reorganizar para despejar el espesor necesario (t_{jack}), convirtiéndose en una herramienta directa de diseño:

$$t_{jack} = \beta \cdot \left(\frac{\alpha_{base} - \alpha_{min}}{\alpha_{objetivo} - \alpha_{min}} - 1 \right) \quad \text{Eq. 4.4.6}$$

Sustituyendo los valores calibrados:

$$t_{jack} = 28.6 \cdot \left(\frac{0.519}{\alpha_{objetivo} - 0.26} - 1 \right)$$

Esta expresión final demuestra la robustez del modelo, es decir que el espesor requerido está en función directa de la "ambición" de rigidez del ingeniero ($\alpha_{objetivo}$), escalado por un factor geométrico de $\approx 30\text{ mm}$.

4.4.6 Evidencia de uso del factor α en software comerciales (ETABS).

Para corroborar la aplicabilidad práctica de los factores obtenidos, se trasladaron los resultados al entorno de diseño comercial ETABS. En los anexos del proyecto se documenta detalladamente el desplazamiento bajo carga lateral antes y después de la asignación de los modificadores de inercia (α), contrastando la respuesta elástica con la no lineal.

CASO J-075 Anexo 34, Anexo 35, Anexo 36

CASO J-100 Anexo 57, Anexo 58, Anexo 59

CASO J-125 Anexo 80, Anexo 81, Anexo 82

CASO J-175 Anexo 103, Anexo 104, Anexo 105

El análisis de precisión más exigente se llevó a cabo sobre el modelo crítico J-175, donde la geometría completa de $650 \times 650 \text{ mm}$ se modeló asignando las propiedades resistivas del encamisado. En una primera instancia, al trabajar con la inercia bruta (I_g) sin modificadores, la columna exhibió bajo la carga lateral de fluencia un desplazamiento de apenas 5.23 mm ; este valor irrealmente bajo denota una rigidez teórica excesiva que falla en capturar el daño acumulado en la sección compuesta. Por el contrario, al asignar al modelo el factor calibrado de $\alpha = 0.232$, la respuesta se ajustó a un desplazamiento de 22.12 mm . Al contrastar este resultado con el desplazamiento objetivo de 22.00 mm proyectado por OpenSees, se logró una convergencia con un error marginal de apenas 0.55% , lo cual avala contundentemente que los resultados derivados de la programación numérica avanzada pueden replicarse con alta fidelidad en las herramientas de diseño cotidiano.

Finalmente, se evaluó el impacto de utilizar los factores derivados de esta investigación frente a los estandarizados por el ACI 318, que sugiere valores de α_{ACI} entre 0.30 y 0.70 dependiendo de la carga axial. Tomando como referencia el Caso J-100, la normativa sugeriría un comportamiento más rígido que el real; al modelar esta columna bajo el criterio estándar, ETABS arroja un desplazamiento lateral de 25.41 mm . Sin embargo, al aplicar el factor α específico calibrado en este estudio, el desplazamiento por encamisado se ajusta a 19.11 mm . Esta diferencia demuestra que el criterio genérico introduce una diferencia del 24.9% , resultando conservador la norma ACI 318 en ciertos rangos o potencialmente inseguro en casos de mayor espesor como en J-175. Tal evidencia justifica la necesidad técnica de "ajustar la demanda" utilizando la ecuación racional propuesta, permitiendo así diseños más certeros y menos dependientes de factores de seguridad, optimizando diseño y economía.

4.4.7 Recomendaciones de valores de diseño para la práctica profesional.

Basado en esta evidencia, se puede aconsejar el uso de la ecuación Eq. 4.4.6 dentro del rango que la ACI-318 (2019) deja a libre disposición de los ingenieros realizar una interpolación lineal entre los factores de rigidez efectiva (como $0.7 EI_g$ y $0.30 EI_g$), y para columnas encamisadas para hallar un valor más real y conservador, ya que los factores fijos pueden sobreestimar la rigidez real. Nuestra Formula general permite entrar con la rigidez objetivo necesaria para el control de derivas, para obtener el espesor óptimo, garantizando compatibilidad entre el modelo elástico y el daño esperado.

4.5 Análisis, comentarios y conclusiones parciales del Capítulo IV.

El procesamiento masivo de los modelos paramétricos y la posterior generación matemática de los resultados permiten establecer tres conclusiones determinantes que cierran esta fase de la investigación. Debido a que estos hallazgos no solo validan la técnica constructiva, sino que proponen una nueva metodología de diseño basada en la física del comportamiento compuesto para reforzamiento y rehabilitación estructural, que es contrario al comportamiento de columnas nuevas y monolíticas.

En primer lugar, la validación del refuerzo es contundente, las curvas de capacidad (Pushover) confirman que el encamisado no solo se limita a restaurar la capacidad original de la columna; la intervención con encamisados de hormigón armado realiza una transformación cualitativa de su respuesta sísmica; logrando convertir un modo de falla frágil e inestable (característico de la columna original dañada y que con efecto $P - \Delta$ entra en un rango de sobrecarga axial que genera una pérdida de ductilidad (Sharma y otros, 2007)) en un comportamiento dúctil y estable. Incluso los encamisados de menor espesor demostraron ser capaces de cumplir con niveles de desempeño de Seguridad de Vida ante grandes demandas de desplazamiento, validando que el confinamiento activo que proporciona el encamisado ya es suficiente para activar la ductilidad del sistema compuesto.

En segundo lugar, se ha demostrado la variabilidad intrínseca del factor α , en base a los resultados que refutan la práctica común de asumir un modificador de inercia fijo (como $0.70 I_g$) para columnas reforzadas. Además, se evidenció que la eficiencia relativa de la sección no es constante ni sigue una tendencia lineal como para interpolaciones con resultados certeros, sino que depende críticamente de la relación geométrica entre el núcleo existente y el nuevo espesor añadido, de este modo, ignorar esta variabilidad y asumir un valor constante introduce

errores significativos en la estimación de la demanda sísmica, pudiendo llevar a diseños que subestiman las derivas reales del edificio rehabilitado.

Finalmente, el aporte más trascendental de este capítulo es la formulación del Modelo Predictivo Racional, que siguiendo la deducción de la tendencia de dilución geométrica (Eq. 4.4.4) proporciona una herramienta de diseño calibrada mecánicamente que supera las aproximaciones empíricas. Al vincular el espesor necesario del encamisado (t_{jack}) con el estado inicial de la columna (α_{base}) y un factor de escala geométrico ($\beta \approx H/10$), se cierra el ciclo de diseño. Comunicando de forma personal, “me es grato” otorgar a los ingenieros la capacidad de dimensionar refuerzos partiendo de objetivos de rigidez precisos ($\alpha_{objetivo}$), optimizando así el proceso de rehabilitación estructural con una base matemática robusta y físicamente coherente.

CONCLUSIONES

La presente investigación ha cumplido con el objetivo general de determinar factores de rigidez efectiva para el modelado lineal en ETABS de columnas reforzadas, validando la propuesta mediante modelos de fibra avanzados en OpenSeesPy.

En primera instancia, se concluye que la técnica de encamisado con micro-hormigón ($f'_c = 28 \text{ MPa}$) induce una transformación cualitativa del modo de falla, convirtiendo un comportamiento frágil e inestable en uno dúctil y disipativo. Conduciendo a que se identificara que la columna original, sometida a una alta carga axial de servicio ($0.25 A_g f'_c$), se comportó de manera vulnerable al colapso prematuro, debido a inestabilidad geométrica tras el desprendimiento del recubrimiento, sobre todo, debido a los efectos de segundo orden $P - \Delta$.

Se logra establecer que la implementación del encamisado, incluso en su espesor mínimo ($t_{jack} = 75 \text{ mm}$), estabilizó la respuesta post-pico, permitiendo el desarrollo de mesetas plásticas y desplazando el límite de desempeño de "Prevención de Colapso" hacia derivas superiores al 3% en su caso más robusto ($t_{jack} = 175 \text{ mm}$), garantizando la seguridad ante el colapso progresivo.

El desglose de fuerzas internas reveló que el encamisado actúa como un escudo protector en el rango inelástico, absorbiendo la mayor parte de la disipación de energía sísmica, permitiendo al núcleo original preserve su integridad para soportar las cargas gravitacionales, validando la hipótesis de acción compuesta monolítica, y a su vez logrando una reactivación de su respuesta por el confinamiento activo brindado por el encamisado; no obstante, exagerar el espesor del encamisado no es una solución eficiente, debido a que a con grandes espesores se identificó un rendimiento decreciente, incluyendo el incremento de masa sísmica innecesaria sin ofrecer beneficios proporcionales en ductilidad.

El estudio refuta la práctica de aplicar factores constantes (como el $0.70 I_g$ del ACI 318) a elementos rehabilitados, debido a que se demostró que la eficiencia relativa de la sección (α) es una variable dinámica con una degradación asintótica gobernada por la "dilución geométrica". Dicho comportamiento idealizado bajo un modelo matemático racional, concibe el aporte principal de esta tesis, con la formulación de una norma de dilución geométrica que correlaciona el espesor del encamisado (t_{jack}) con el factor de rigidez efectiva (α) mediante una función racional calibrada mecánicamente:

$$\alpha(t_{jack}) = \frac{(\alpha_{base} - \alpha_{min}) \cdot \beta}{t_{jack} + \beta} + \alpha_{min}$$

Donde se identificaron los parámetros físico-mecánicos del sistema, teniendo una eficiencia residual asintótica $\alpha_{min} \approx 0.26$ (consistente con elementos masivos) y un factor de escala geométrico $\beta \approx H/10$ (28.6 mm).

A partir de la norma general, se derivó la ecuación de diseño que permite al ingeniero obtener el espesor necesario en función de una rigidez objetivo (α_{obj}), sin necesidad de iteraciones no lineales avanzadas:

$$t_{jack} = \beta \cdot \left(\frac{\alpha_{base} - \alpha_{min}}{\alpha_{obj} - \alpha_{min}} - 1 \right)$$

Para su modelado en ETABS, se crea la sección completa de forma monolítica con las propiedades del encamisado, asignando al elemento el factor α propuesto sobre sus inercias a flexión. Esta metodología redujo el error en la estimación de desplazamientos laterales a un 0.55% respecto al modelo no lineal de referencia (OpenSees), logrando una precisión superior frente a las discrepancias cercanas al 25% obtenidas con los métodos normativos convencionales. Se concluye que dichos coeficientes normativos, al estar calibrados para el diseño de elementos nuevos homogéneos, resultan insuficientes para capturar la rigidez real de una sección compuesta rehabilitada

Finalmente, la arquitectura numérica basada en la discretización por fibras (*Fiber Section*) y elementos *ForceBeamColumn* se validó como una herramienta superior a los modelos comerciales para capturar la respuesta inelástica real. Recordando que, en las Consistencia Dinámica, el análisis modal confirmó una correlación casi perfecta con ETABS en el rango elástico (diferencia $< 0.7\%$ en T_1), asegurando la correcta captura de la rigidez inicial y la masa. También, la captura de la inestabilidad física, en la diferencia del software comercial que suele extender artificialmente la ductilidad, mientras que el modelo de fibras con integración de Gauss-Legendre y el algoritmo adaptativo "Smart Step" logró detectar con precisión el punto de inestabilidad global provocado por los efectos $P - \Delta$ y el ablandamiento del material, proporcionando límites de seguridad física reales para el diseño de rehabilitación.

RECOMENDACIONES

Es fundamental que futuras líneas de investigación utilicen los scripts en OpenSeesPy para expandir el rango paramétrico hacia variables que este estudio mantuvo controladas. Sería de gran valor científico evaluar la sensibilidad del factor α ante el uso de hormigones de alta resistencia o variaciones en la cuantía de acero longitudinal del jacket, verificando si la "Longitud Característica" de decaimiento responde también al confinamiento activo del acero y no solo a la geometría de la sección, como a otras variables vinculadas al diseño del reforzamiento estructural.

Asimismo, se recomienda escalar la validación de la norma racional propuesta hacia sistemas estructurales tridimensionales. La aplicación de los factores α en el modelado de pórticos planos o edificios completos nos permitiría analizar la redistribución real de fuerzas internas, confirmando si la rigidez modificada ayuda a corregir irregularidades de piso blando o si, por el contrario, altera las demandas de ductilidad en las vigas de conexión, evaluando así el desempeño global de la estructura rehabilitada.

Desde el punto de vista físico, aunque la calibración numérica ha sido rigurosa, se sugiere desarrollar una campaña experimental que corrobore la eficiencia geométrica teórica asumida. Ensayos de laboratorio permitirían validar los modelos constitutivos de interfaz y refinar el factor de eficiencia ante diferentes técnicas de preparación de superficie, cerrando la brecha entre la simulación de alta fidelidad y la variabilidad constructiva real.

También, se recomienda un análisis multinivel, debido a que el actual solo es un elemento aislado, por lo que no contempla los posibles efectos y variaciones del modelo para reforzamiento de encamisado continuo en altura, en donde en el sistema toma mayor relevancia el incremento de masa sísmica proporcionada por el mismo encamisado.

Otro punto para posibles estudios, es sobre columnas con una enorme carga axial $P \geq 0.5A_g f'_c$ y volver a estudiar el comportamiento de $\alpha(t_{jack})$ y juzgar si es aplicable el encamisado bajo la premisa de no aportar resistencia axial iniciales, porque si algo queda claro en la investigación presente, es en su aplicación como refuerzo sísmico.

Finalmente, extender el análisis numérico a elementos de dimensiones masivas, como pilas de puentes, serviría para ratificar empíricamente el valor de la eficiencia residual asintótica. Confirmar que la tendencia de la rigidez efectiva se estabiliza en el valor límite

identificado consolidaría la tendencia actual de dilución geométrica propuesta como una teoría que rija el hormigón armado compuesto.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACI Committee 318. (2019). *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19) and Commentary*. American Concrete Institute.
<https://doi.org/ISBN: 978-1-64195-056-5>
- ASCE. (2017). *ASCE 41-17 Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings*.
- Bilgin, H., & Plaku, B. (2024). Influence of Confined Concrete Models on the Seismic Response of RC Frames. *Structural Durability & Health Monitoring*, 18(3), 197-222. <https://doi.org/https://doi.org/10.32604/sdhm.2024.048645>
- Bousias, S. N., Biskinis, D., Fardis, M. N., & Spathis, A. L. (2007). Strength, stiffness, and cyclic deformation capacity of concrete jacketed members. *ACI Structural Journal*, 104(5). <https://es.scribd.com/document/253160990/104-s49-Strength-Stiffness-And-Cyclic-Deformation-Capacity>
- Brick & Bolt. (n.d.). *Micro concrete in construction: Meaning, applications, benefits..*
<https://www.bricknbolt.com/blogs-and-articles/construction-guide/micro-concrete-construction-applications-benefits>
- Chen, P., Cui, X., Zheng, H., & Si, S. (2022). A Mesoscale Study on the Dilation of Actively Confined Concrete under Axial Compression. *MDPI*, 15(18).
<https://doi.org/10.3390/ma15186490>
- Cruz Eligio, V. D. (2022). *Modelos de cálculo de resistencia a momento flexionante y fuerza cortante de columnas rehabilitadas con encamisado de concreto reforzado (Tesis de Licenciatura)*. Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.
<https://ru.dgb.unam.mx/server/api/core/bitstreams/85e68dc1-176e-476f-85fc-f8f86fa7a5dc/content>
- Cymper. (2016, mayo 5). *Reparación y protección del hormigón – V Microhormigón*.
<https://www.cymper.com/blog/reparacion-y-proteccion-del-hormigon-parte-v-microhormigon/>
- Elwood, K., & Eberhard, M. (2006). Effective Stiffness of Reinforced Concrete Columns. *Pacific Earthquake Engineering Research Center*.

https://apps.peer.berkeley.edu/publications/research_digests/digests_2006/rd2006-1.pdf

Gemini. (2026). *Gemini*.

Júlio, E. N., Branco, F. A., & Silva, V. D. (2005). Reinforced Concrete Jacketing - Interface Influence on Monotonic Loading Response. *ACI Structural Journal*, 102(4), 525-531.

https://www.sefindia.org/forum/files/jacketing_of_column_122.pdf

Lampropoulos, A., Tsioulou, O., & Dritsos, S. (2013). Restrained Concrete Shrinkage In Case Of Strengthened Bridge Piers By Concrete Jacketing. *COMPdyn 2013*, 109. <https://cris.brighton.ac.uk/ws/portalfiles/portal/300068/1603.pdf>

Mander, J. B., Priestley, M. J., & Park, R. (1988). Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete. *Journal of Structural Engineering*, 114(8).

[https://doi.org/https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1988\)114:8\(1804\)](https://doi.org/https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1988)114:8(1804))

McKenna, F. (2011). *OpenSees: A Framework for Earthquake Engineering Simulation. Computing in Civil and Building Engineering*.

<https://doi.org/10.1109/MCSE.2011.66>

MIDUVI. (2014). *Norma Ecuatoriana de la Construcción - Estructuras de Hormigón Armado (NEC-SE-HM)*. Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda del Ecuador.

OpenSees. (2025). *opensees.berkeley.edu*. <https://opensees.berkeley.edu/>

Paulay, T., & Priestley, M. J. (1992). *Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings*. John Wiley & Sons, Inc.

<https://doi.org/10.1002/9780470172841>

PEER. (2004). *PEER Structural Performance Database User's Manual*. Pacific Earthquake Engineering Research Center .

https://nisee.berkeley.edu/spd/performance_database_manual_1-0.pdf

Priestley, M. J., & Kowalsky, M. J. (2000). Direct Displacement-Based Seismic Design of Concrete Buildings. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 33(4), 421-444.

<https://doi.org/https://doi.org/10.5459/bnzsee.33.4.421-444>

- Priestley, M. J., & Park, R. (1987). Strength and Ductility of Concrete Bridge Columns Under Seismic Loading. *Structural Journal*, 84(1), 61-76.
<https://doi.org/10.14359/2800>
- Scott, M. H., & Fenves, G. L. (2006). Plastic Hinge Integration Methods for Force-Based Beam-Column Elements. *Journal of Structural Engineering*, 132(2), 244-252. [https://doi.org/https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2006\)132:2\(244\)](https://doi.org/https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2006)132:2(244))
- Sezen, H. (2002). *Seismic Behavior and Modeling of Reinforced Concrete Building Columns*.
- Sharma, U. K., Bhargava, P., Singh, S. P., & Kaushik, S. K. (2007). Confinement Reinforcement Design for Plain and Fibre Reinforced High. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 5(1), 113-127.
<https://doi.org/DOI:10.3151/jact.5.113>
- Spacone, E., Filippou, F. C., & Taucer, F. F. (1996). Fibre Beam-Column Model for Non-Linear Analysis of R/C Frames: Part I. Formulation. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 25(7), 711–725.
[https://doi.org/DOI:10.1002/\(SICI\)1096-9845\(199607\)25:7<711::AID-EQE576>3.0.CO;2-9](https://doi.org/DOI:10.1002/(SICI)1096-9845(199607)25:7<711::AID-EQE576>3.0.CO;2-9)
- Suarjana, M. O. (2020). Seismic Performance of RC Hollow Rectangular Bridge Piers Retrofitted by Concrete Jacketing Considering the Initial Load and Interface Slip. *Journal of Engineering and Technological Sciences*, 344–368.
<https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2020.52.3.4>
- Taucer, F. F., Spacone, E., & Filippou, F. C. (1991). *A Fiber Beam-Column Element for Seismic Response Analysis of Reinforced Concrete Structures (Report No. UCB/EERC-91/17)*. Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.
<https://nehrpsearch.nist.gov/static/files/NSF/PB95192126.pdf>
- Vandoros, K. G., & Dritsos, S. E. (2006). Concrete jacket construction detail effectiveness when strengthening RC columns. *Construction and Building Materials*, 20(9), 677-685. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.04.004>

Zhu, M., McKenna, F., & Scott, M. H. (2018). OpenSeesPy: Python library for the OpenSees finite element framework. *SoftwareX*, 7. <https://doi.org/DOI:10.1016/j.softx.2017.10.009>

ANEXOS

Anexo 1

Caso – J-075 – Parámetros Geométricos Globales

PARÁMETROS GEOMÉTRICOS GLOBALES

Sección Original: 300 x 300 mm
Núcleo Original: 220 x 220 mm
Sección Total (Jacket): 450 x 450 mm
Altura del modelo: 3600 mm
Luz libre: 6000 mm

Anexo 2

Caso – J-075 – Definición De Acero Longitudinal

DEFINICIÓN DE ACERO LONGITUDINAL

- ✓ Material Steel02 (Tag 1): $f_y = 420.0$ MPa
- ✓ Material ReinforcingSteel (Tag 18): Activado (Pandeo incluido).

REPORTE TÉCNICO: CUANTÍAS Y ARMADO

COLUMNA ORIGINAL (300x300 mm):

- As Total: 904.78 mm²
- Cuantía Real: 1.01 %
- ✓ VERIFICADO: Cuantía dentro del rango normativo (1% - 3%).

COLUMNA ENCAMISADA (450x450 mm):

- As Adicional (Jacket): 1231.50 mm²
- Cuantía Global Final: 1.05 %
- ✓ VERIFICADO: Cuantía global normativa.

Anexo 3

Caso – J-075 – Definición De Acero Transversal (Estribos)

1. DEFINICIÓN DE ACERO TRANSVERSAL (ESTRIBOS)

DISEÑO AUTOMÁTICO DE ESTRIBOS (NEC 4.3.4)

- Refuerzo Long. Menor: 12.0 mm
- Criterio $Dim/4$: 75.0 mm
- Criterio $6*db$: 72.0 mm
- ☞ SELECCIONADO (Lo): $s = 70$ mm (Zona Confinada)
- ☞ SELECCIONADO (Cnt): $s = 70$ mm (Zona Central)

CONFIGURACIÓN FINAL DE ESTRIBOS:

Columna Original: Ø10mm @ 70/70 mm

Columna Jacket: Ø10mm @ 70/70 mm

Anexo 4

Caso – J-075 – Definición de Materiales De Hormigón

3. DEFINICIÓN DE MATERIALES DE HORMIGÓN

Hormigón Original: f'c = 21.0 MPa | Ec = 21538 MPa

Hormigón Jacket: f'c = 28.0 MPa | Ec = 24870 MPa

Deformación a maxima resistencia eps0_orig: -0.001950, eps0_jack: -0.002252

Resistencia a la Tensión ft_orig: 2.84 MPa, ft_new: 3.28 MPa

Resistencia remanente compresión del encamisado original: -1.05 MPa, del jacket: -1.40 MPa

✓ Material Recubrimiento (Concrete02) creado.

✓ Material Dummy creado.

=====

✓ Material Dummy creado.

=====

Anexo 5

Caso – J-075 – Definición De Materiales Confinados

4. DEFINICIÓN DE MATERIALES CONFINADOS

✓ Material Confinado Original EXTREMOS (Tag 2)

Núcleo: 220 x 220 mm | Estribo: Ø10 @ 70 mm

✓ Material Confinado Original CENTRO (Tag 4)

Núcleo: 220 x 220 mm | Estribo: Ø10 @ 70 mm

✓ Material Confinado Jacket EXTREMOS (Tag 6)

Núcleo: 370 x 370 mm | Estribo: Ø10 @ 70 mm

✓ Material Confinado Jacket CENTRO (Tag 7)

Núcleo: 370 x 370 mm | Estribo: Ø10 @ 70 mm

=====

Anexo 6

Caso – J-075 – Generación y Refinamiento De Malla De Fibras

5. GENERACIÓN Y REFINAMIENTO DE MALLA DE FIBRAS

Parámetros de Mallado:

- MCD Base (Matemático): 5 x 5 mm

- Factor de Refinamiento: 1
- Tamaño Final de Fibra: 5.00 x 5.00 mm

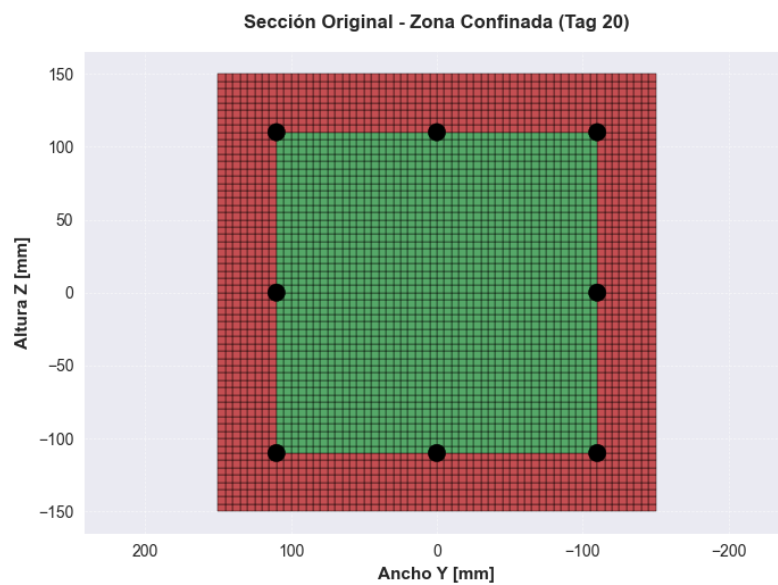
Densidad de Fibras Resultante:

- Dirección B: 90 fibras totales (0.2000 fib/mm)
- Dirección H: 90 fibras totales (0.2000 fib/mm)
- Resolución: ~8100 fibras por sección transversal

✓ VERIFICADO: Densidad de malla adecuada para análisis de fibra.

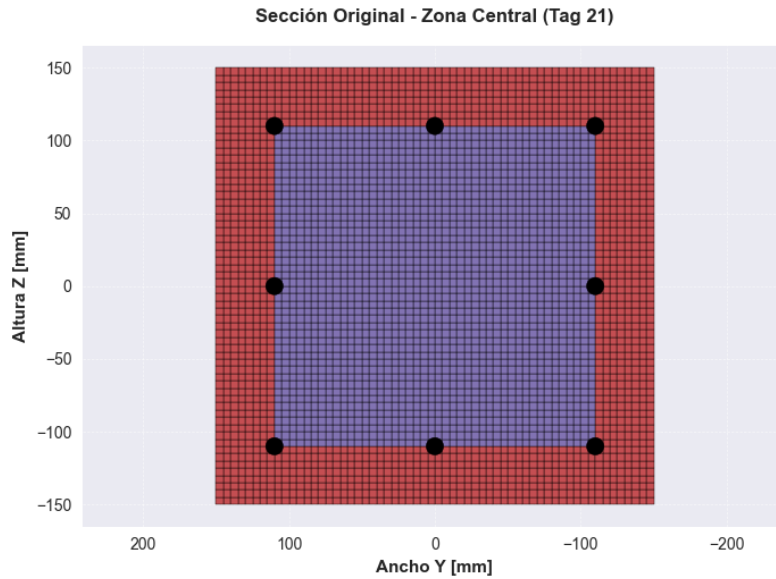
Anexo 7

Caso – J-075 – 6-a. Generación de Sección 20: Columna Original (Extremos)



Anexo 8

Caso – J-075 – 6-b. Generación de Sección 21: Columna Original (Centro)



Anexo 9

Caso – J-075 – 6-c. Definición de Propiedades de Corte (Timoshneko)

6-c. DEFINICIÓN DE PROPIEDADES DE CORTE (Timoshneko)

Propiedades Calculadas:

- Módulo de Corte (G): 8974.21 MPa
- Área Efectiva (Ash): 75000 mm² (5/6 Ag)
- Rigidez a Corte (GA): 6.73E+08 N

✓ Material Elástico para Corte creado (Tag 900)

Secciones Agregadas Generadas:

- ✓ Tag 22: Extremos (Fibra 20 + Rigidez GA)
 - ✓ Tag 23: Centro (Fibra 21 + Rigidez GA)
-

Anexo 10

Caso – J-075 – Bloque 7: Ensamblaje del Modelo, Discretización y Análisis de Gravedad

◆ SECCIONES: Incluyendo deformación por CORTE (Tags 22 y 23)

DISCRETIZACIÓN LONGITUDINAL (NEC-SE-HM):

Dimensión Máx Sección : 300.0 mm
 Luz Libre / 6 : 1000.0 mm
 Mínimo Normativo : 450.0 mm
 --> Longitud Lo Calculada : 1000.0 mm
 --> Longitud Zona Central : 1600.0 mm

◆ TRANSFORMACIÓN: Linear (Sin P-Delta)

✓ Elementos creados exitosamente (3 tramos).

Carga del Edificio: 472500 N

Carga Axial Total (P_g): 476314 N

Masa Sísmica Asignada: 48.5539 Ton
 Aplicando gravedad...
 ✓ Gravedad aplicada exitosamente.
 Desplazamiento Axial: -0.8457 mm
 ⚠ Estado de gravedad congelado. P-Delta inicializado.

Anexo 11

Caso – J-075 – Validación M-Phi: Secciones Originales (20 Y 21)

8-a. VALIDACIÓN M-PHI: SECCIONES ORIGINALES (20 y 21)

Carga Axial (P): 476.31 kN

◆ SECCIONES: Incluyendo deformación por CORTE (Tags 22 y 23)

👉 Analizando Sección Extremos (Confinada) (Tag 22)...

✓ Sección Extremos (Confinada): $M_{max} = 84.05$ kN-m

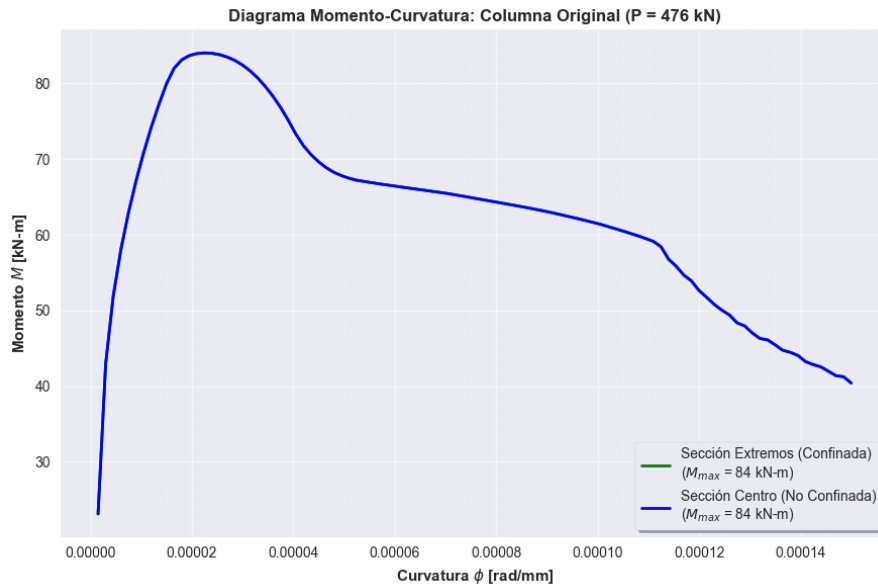
👉 Analizando Sección Centro (No Confinada) (Tag 23)...

✓ Sección Centro (No Confinada): $M_{max} = 84.05$ kN-m

📊 Generando gráfico comparativo...

Anexo 12

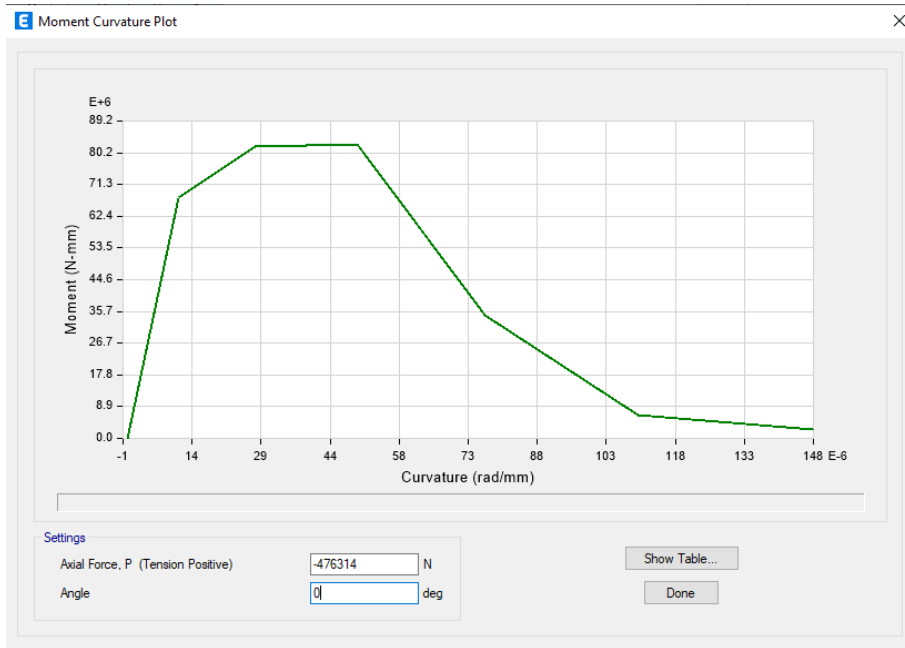
Caso – J-075 – Diagrama de Momento-Curvatura: Columna Original ($P_g = 476$ kN)



Anexo 13

Caso – J-075 – Diagrama de Momento-Curvatura: Columna Original ($P_g = 476$ kN)

ETABS



Anexo 14
Caso – J-075 – Análisis Modal (Valores y Vectores Propios)

9. ANÁLISIS MODAL (VALORES Y VECTORES PROPIOS)

Resultados del Modo Fundamental (Modo 1):

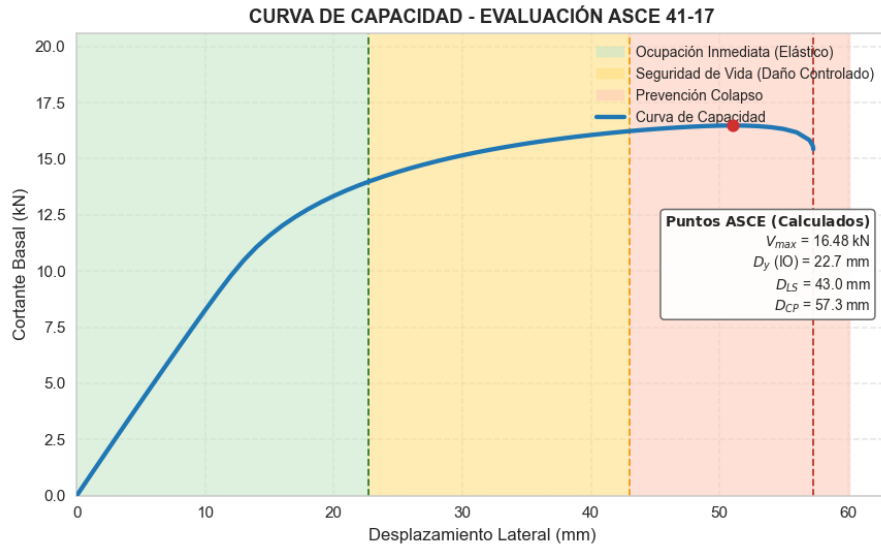
- 👉 Periodo (T1): 1.5067 s
- 👉 Frecuencia (f): 0.6637 Hz
- 👉 Frecuencia Angular (w): 4.1703 rad/s
- 👉 Valor Propio (λ): 17.3910

Rigidez Lateral Efectiva:

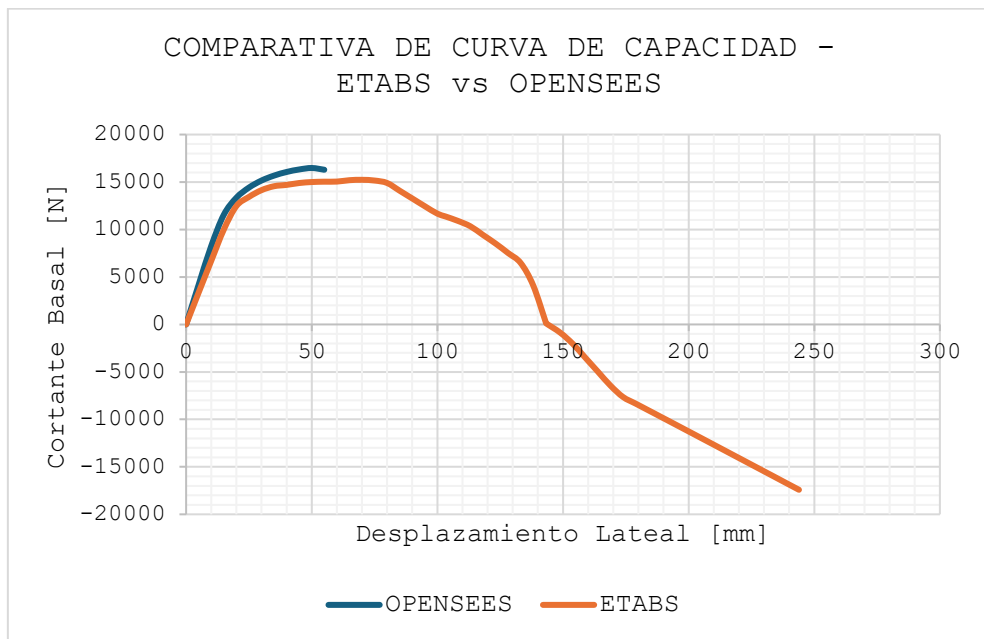
- ◆ K_dinámica: 844.40 N/mm
- ◆ K_dinámica: 844.40 kN/m

✅ Archivo de resultados generado: 'Resultados_Modal_Original.txt'

Anexo 15
Caso – J-075 – Curva de Capacidad – Columna Original

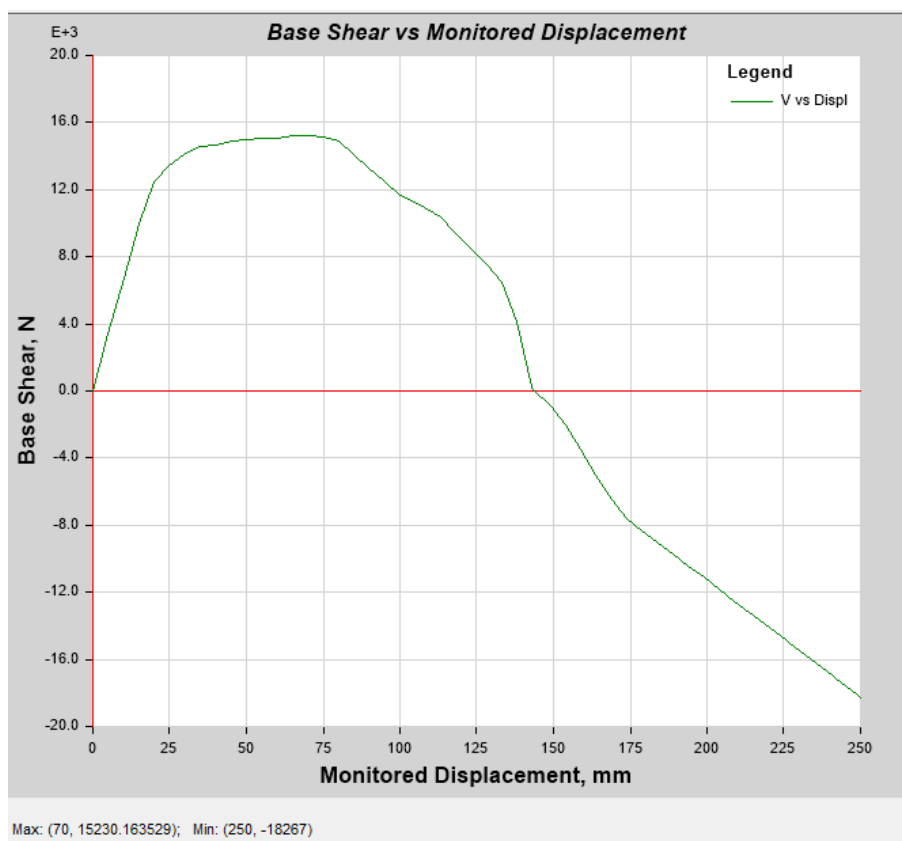


Anexo 16
Caso – J-075 – Comparativa de curva de Capacidad de la Columna original 300x300mm en ETABS vs OPENSEES.



Anexo 17

Caso – J-075 – Curva de Capacidad – Columna Original - ETABS



Anexo 18

Caso – J-075 – Periodos modales columna modal sin efectos P-Delta

CASE	MODE	PERIOD SEC
MODAL	1	1.414
MODAL	2	1.414
MODAL	3	0.063

Anexo 19

Caso – J-075 – Análisis Modal (Valores Y Vectores Propios) Sin Efectos P-Delta

9. ANÁLISIS MODAL (VALORES Y VECTORES PROPIOS) SIN EFECTOS P-DELTA

Resultados del Modo Fundamental (Modo 1):

- 👉 Periodo (T1): 1.4236 s
- 👉 Frecuencia (f): 0.7024 Hz
- 👉 Frecuencia Angular (w): 4.4134 rad/s
- 👉 Valor Propio (λ): 19.4784

Rigidez Lateral Efectiva:

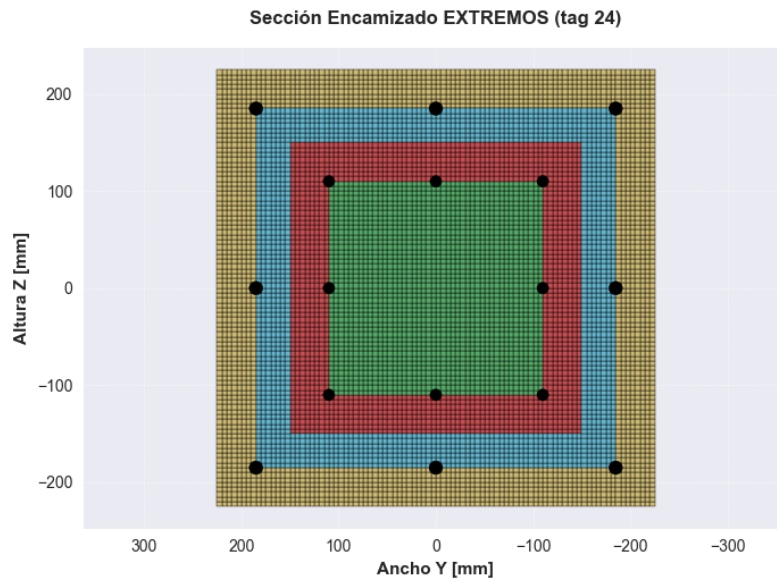
- ◆ K_dinámica: 945.75 N/mm

◆ K_dinámica: 945.75 kN/m

✓ Archivo de resultados generado: 'Resultados_Modal_Original.txt'

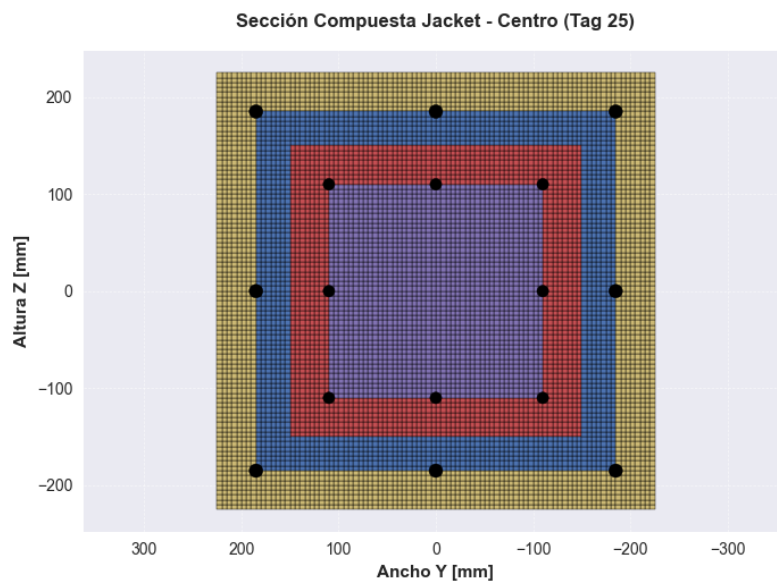
Anexo 20

Caso – J-075 – 8-a. Generación de Sección 24: Jacket (Extremos)



Anexo 21

Caso – J-075 – 8-b. Generación De Sección 25: Jacket (Centro)



Anexo 22
Caso – J-075 – 8-c. Definición de Propiedades de Corte (Jacket)

8-c. DEFINICIÓN DE PROPIEDADES DE CORTE (JACKET)

Propiedades Calculadas (Anillo de Refuerzo):

- Área Bruta Total: 2025.00 cm²
- Área Neta Anillo: 1125.00 cm²
- Módulo de Corte (G): 10362.53 MPa
- Rigidez a Corte (GA): 9.71E+08 N

✓ Material de Corte creado (Tag 901)

Secciones Finales Generadas (Flexión + Corte):

- ✓ Tag 26: Extremos Jacket (Confinada)
- ✓ Tag 27: Centro Jacket (Menos Confinada)

⚠ Nota: Estas secciones se usarán en la re-construcción del modelo (Bloque 10).

=====

Anexo 23
Caso – J-075 – Instalación del Refuerzo (Encamisado)

10. INSTALACIÓN DEL REFUERZO (ENCAMISADO)

Estado del Modelo:

- Tiempo Actual: 0.00 s
- Carga de Gravedad: Mantenida (Constant)

Instalando elementos de refuerzo...

- + Elemento 2001 (Jacket) -> Nodos 1-2 | Sección 26 (Extremos)
- + Elemento 2002 (Jacket) -> Nodos 2-3 | Sección 27 (Centro)
- + Elemento 2003 (Jacket) -> Nodos 3-4 | Sección 26 (Extremos)

✓ Instalación Completada: 3 elementos agregados.
Estado: Columna Compuesta (Hormigón Original + Encamisado)

Anexo 24
Caso – J-075 – Análisis Momento-Curvatura (Secciones Jacket)

10-a. ANÁLISIS MOMENTO-CURVATURA (SECCIONES JACKET)

Condición de Carga Axial (P): 476.31 kN

--> Analizando: Sección Jacket Extremos (Tag 26)...

✓ Momento Máximo: 191.24 kN-m

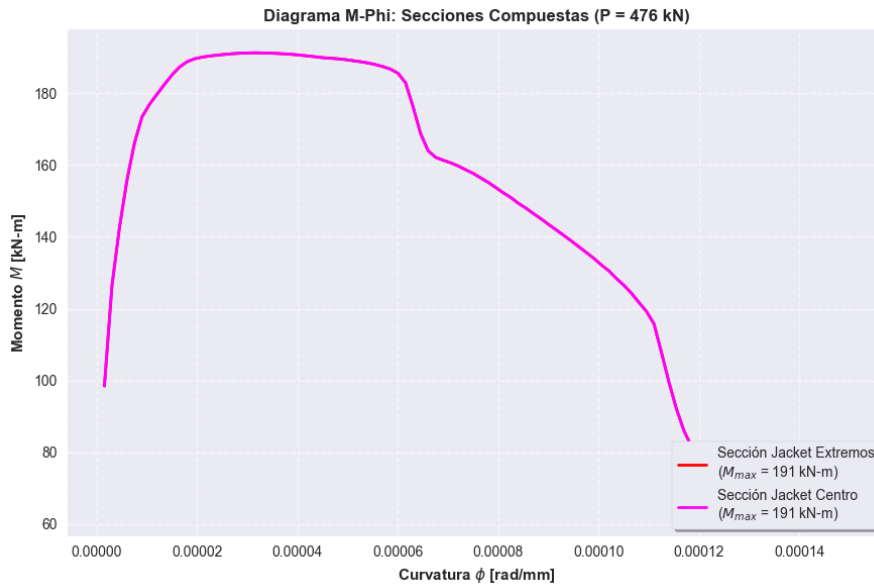
--> Analizando: Sección Jacket Centro (Tag 27)...

✓ Momento Máximo: 191.24 kN-m

✂ Generando gráfico comparativo...

Anexo 25

Caso – J-075 – Diagrama Momento-Curvatura



Anexo 26

Caso – J-075 – Análisis Modal - Columna Reforzada (Jacket)

10. ANÁLISIS MODAL - COLUMNA REFORZADA (JACKET)

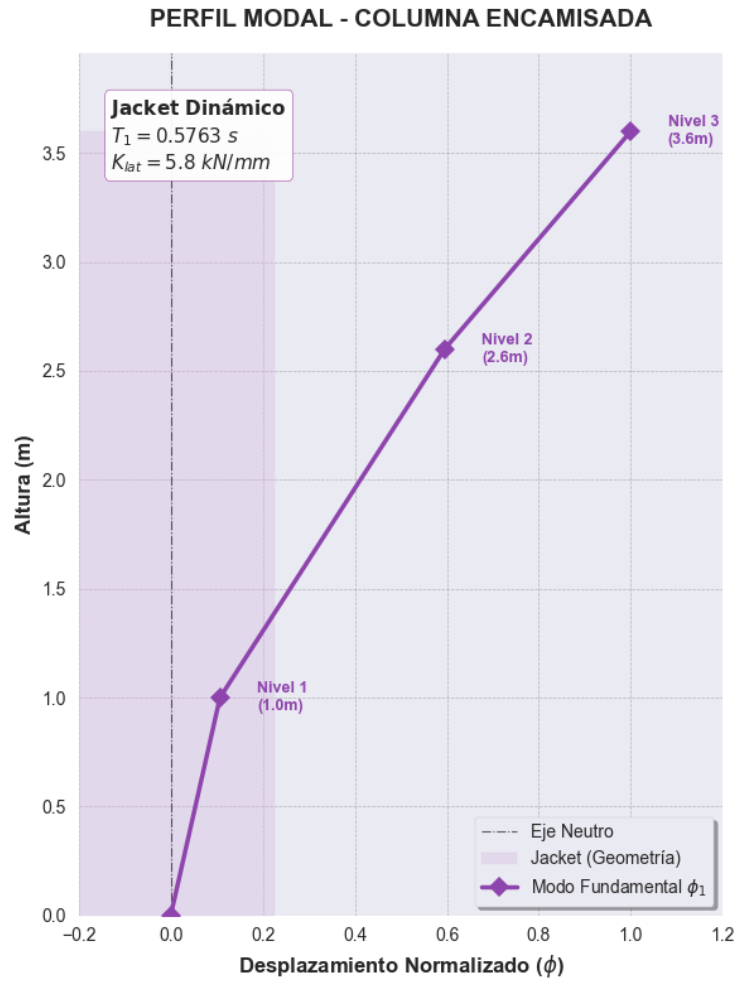
🏰 Masa Sísmica Asignada: 48.5539 Ton (Consistente con Original)
(Nota: Peso del Jacket 9.54 kN no incluido en masa dinámica)
(Objetivo: Aislar el incremento de rigidez lateral K)

PARÁMETRO	VALOR JACKET	UNIDAD
Periodo (T1)	0.5763	s
Frecuencia (f)	1.7352	Hz
Rigidez Lat. (K_din)	5771.62	N/mm

📁 Archivo generado: 'Resultados_Modal_Jacket.txt' |

✂ Generando perfil modal del refuerzo...

Anexo 27
Caso – J-075 – Perfil Modal – Columna Encamisada



Anexo 28
Caso – J-075 – Pushover: Resultados Jacket

11. ANÁLISIS PUSHOVER – COLUMNA REFORZADA

Parámetros Pushover (Jacket):

- Nodo Control: 4
- Meta Drift: 6.0% (216.0 mm)



Iniciando Pushover Jacket...

⚠ Pico detectado en Jacket (D=48.0mm). Bloqueando en Krylov.

RESULTADOS JACKET:

- > Cortante Máximo (Vmax): 82.22 kN
- > Despl. en Vmax: 46.0 mm
- > Drift en Vmax: 1.28%
- 👉 Tiempo CPU: 4.76 s



Datos exportados en 'JACKET_datos_pushover.txt'

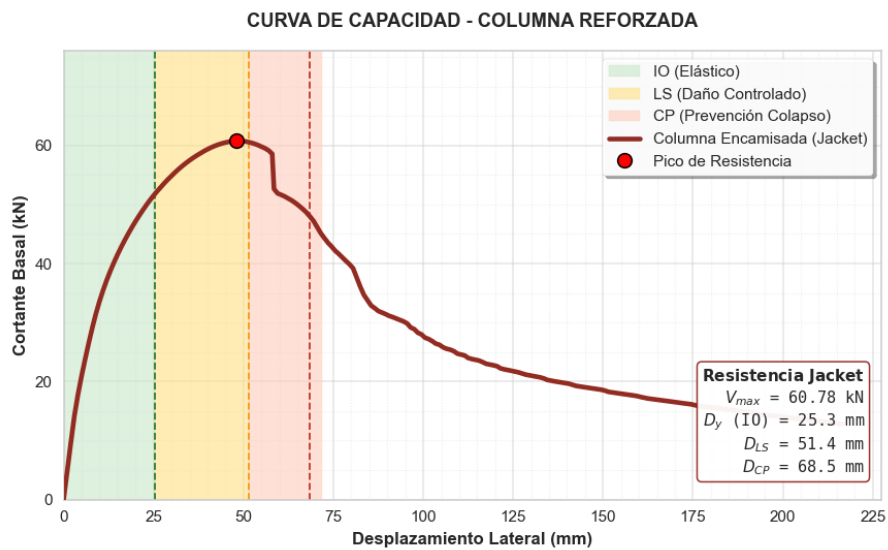
✂ Generando gráfico de capacidad...

RESULTADOS JACKET:

--> Cortante Máximo (Vmax): 60.78 kN
--> Despl. en Vmax: 48.0 mm
--> Drift en Vmax: 1.33%
👉 Tiempo CPU: 13.68 s

Anexo 29

Caso – J-075 – Curva de Capacidad – Columna Encamisada



Anexo 30

Caso – J-075 – Pushover: Desglose De Aportes (Método De Equilibrio)

11-Extra. PUSHOVER: DESGLOSE DE APORTES (MÉTODO DE EQUILIBRIO)

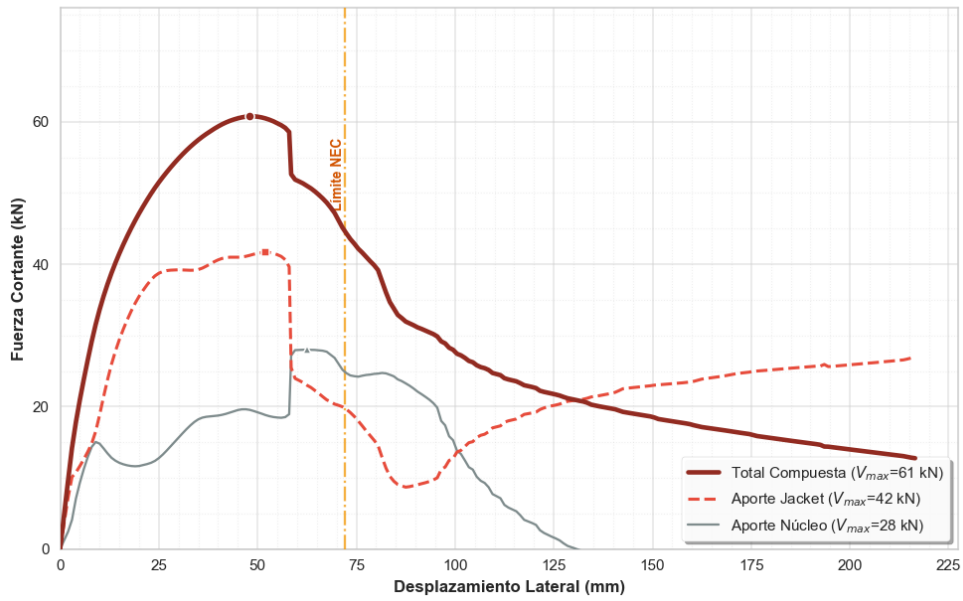
✅ Análisis finalizado (34.28 s).
Vmax Total: 60.78 kN
Vmax Jacket: 41.67 kN
Vmax Núcleo: 28.00 kN

✂ Generando gráfico de contribución estructural...

Anexo 31

Caso – J-075 – Desglose de Fuerzas por Equilibrio Global

DESGLOSE DE FUERZAS POR EQUILIBRIO GLOBAL



Anexo 32

Caso – J-075 – Cálculo De Inercia Efectiva (Modifiers)

12. CÁLCULO DE INERCIA EFECTIVA (MODIFIERS)

Análisis de la Curva de Capacidad (OpenSees):

- 👉 V_{max} Sistema: 60.78 kN
- 👉 V_{75%} (Servicio): 46.14 kN
- 👉 Despl. @ 75%: 19.00 mm
- 👉 Rigidez Efectiva: 2.43 kN/mm

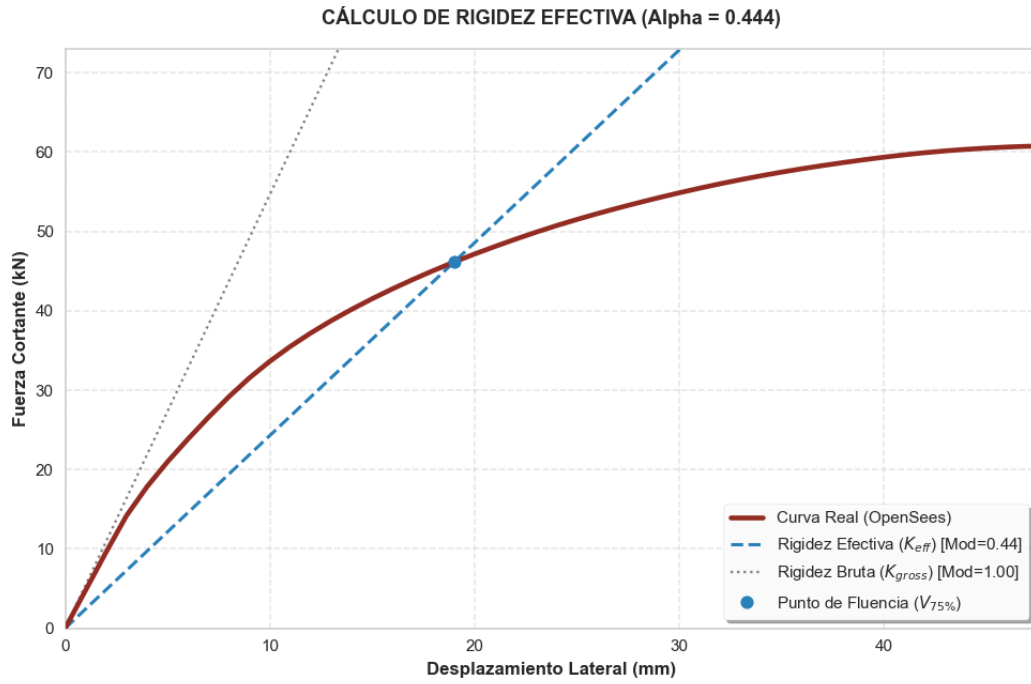
Referencia Teórica (Sección Bruta Monolítica):

- ◆ Sección Total: 450 x 450 mm
- ◆ Inercia Bruta (I_g): 3.42E+09 mm⁴
- ◆ Módulo E (Jacket): 24.87 kN/mm²
- ◆ Rigidez Bruta (K_g): 5.46 kN/mm

```
=====
🎯 RESULTADO FINAL (INPUT PARA ETABS)
=====
Modifier de Inercia (f11/f22): 0.4444
=====
```

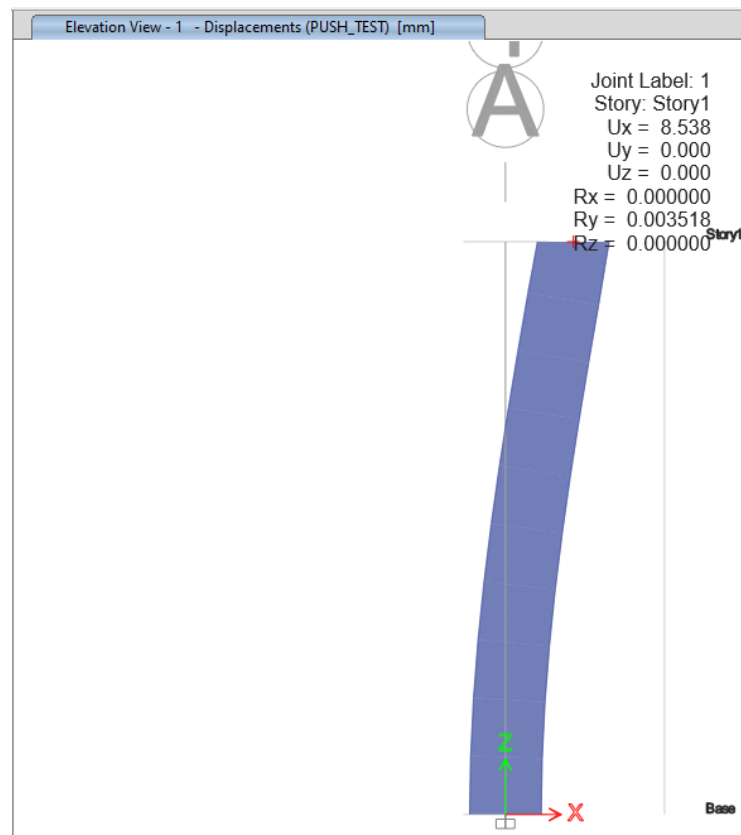
Anexo 33

Caso – J-075 – Calculo de Rigidez Efectiva



Anexo 34

Caso – J-075 – Análisis Lineal - Desplazamiento Lateral de Columna 450x450 sin Modifiers.



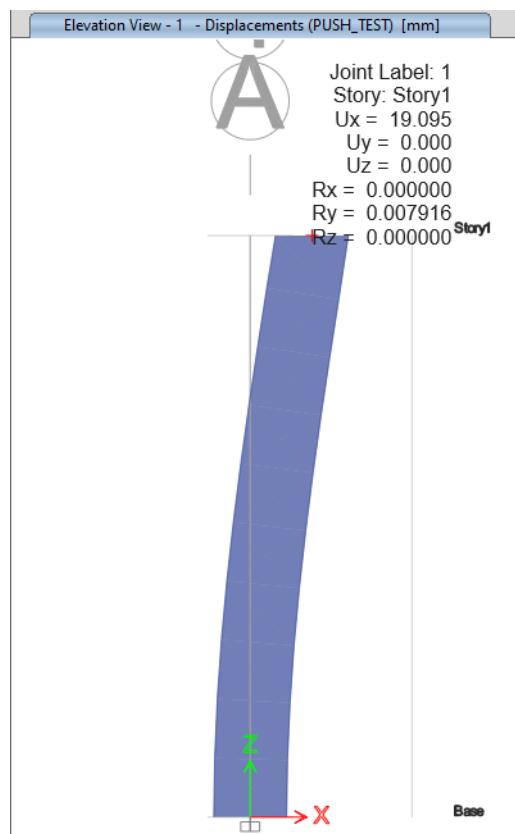
Anexo 35

Caso – J-075 – Aplicación de Modifiers en Inercia a Flexión

Assignments	
Section Property	C45x45
Property Modifiers	I22; I33
Area	1
As2	1
As3	1
Torsion	1
I22	0.4444
I33	0.4444
Mass	1
Weight	1

Anexo 36

Caso – J-075 – Análisis Lineal - Desplazamiento Lateral de Columna 450x450 con Modifiers.



Anexo 37
Caso – J-100 – Parámetros Geométricos Globales

=====

PARÁMETROS GEOMÉTRICOS GLOBALES

=====


=====
Sección Original: 300 x 300 mm
Núcleo Original: 220 x 220 mm
Sección Total (Jacket): 500 x 500 mm
Altura del modelo: 3600 mm
Luz libre: 6000 mm
=====

Anexo 38
Caso – J-100 – Definición De Acero Longitudinal

DEFINICIÓN DE ACERO LONGITUDINAL

- ✓ Material Steel02 (Tag 1): $f_y = 420.0$ MPa
- ✓ Material ReinforcingSteel (Tag 18): Activado (Pandeo incluido).

=====

 REPORTE TÉCNICO: CUANTÍAS Y ARMADO

=====

COLUMNA ORIGINAL (300x300 mm):

- As Total: 904.78 mm²
- Cuantía Real: 1.01 %

VERIFICADO: Cuantía dentro del rango normativo (1% - 3%).

COLUMNA ENCAMISADA (500x500 mm):

- As Adicional (Jacket): 1709.03 mm²
- Cuantía Global Final: 1.05 %

VERIFICADO: Cuantía global normativa.


=====

Anexo 39
Caso – J-100 – Definición De Acero Transversal (Estribos)

1. DEFINICIÓN DE ACERO TRANSVERSAL (ESTRIBOS)

DISEÑO AUTOMÁTICO DE ESTRIBOS (NEC 4.3.4)

- Refuerzo Long. Menor: 12.0 mm
- Criterio Dim/4: 75.0 mm
- Criterio 6*db: 72.0 mm

 SELECCIONADO (Lo): s = 70 mm (Zona Confinada)

👉 SELECCIONADO (Cnt): s = 70 mm (Zona Central)

CONFIGURACIÓN FINAL DE ESTRIBOS:

Columna Original: Ø10mm @ 70/70 mm

Columna Jacket: Ø10mm @ 70/70 mm

Anexo 40

Caso – J-100 – Definición de Materiales De Hormigón

3. DEFINICIÓN DE MATERIALES DE HORMIGÓN

Hormigón Original: f'c = 21.0 MPa | Ec = 21538 MPa

Hormigón Jacket: f'c = 28.0 MPa | Ec = 24870 MPa

Deformación a maxima resistencia eps0_orig: -0.001950, eps0_jack: -0.002252

Resistencia a la Tensión ft_orig: 2.84 MPa, ft_new: 3.28 MPa

Resistencia remanente compresión del encamisado original: -1.05 MPa, del jacket: -1.40 MPa

✓ Material Recubrimiento (Concrete02) creado.

✓ Material Dummy creado.

Anexo 41

Caso – J-100 – Definición De Materiales Confinados

4. DEFINICIÓN DE MATERIALES CONFINADOS

✓ Material Confinado Original EXTREMOS (Tag 2)

Núcleo: 220 x 220 mm | Estribo: Ø10 @ 70 mm

✓ Material Confinado Original CENTRO (Tag 4)

Núcleo: 220 x 220 mm | Estribo: Ø10 @ 70 mm

✓ Material Confinado Jacket EXTREMOS (Tag 6)

Núcleo: 420 x 420 mm | Estribo: Ø10 @ 70 mm

✓ Material Confinado Jacket CENTRO (Tag 7)

Núcleo: 420 x 420 mm | Estribo: Ø10 @ 70 mm

Anexo 42

Caso – J-100 – Generación y Refinamiento De Malla De Fibras

5. GENERACIÓN Y REFINAMIENTO DE MALLA DE FIBRAS

Parámetros de Mallado:

- MCD Base (Matemático): 20 x 20 mm
- Factor de Refinamiento: 2
- Tamaño Final de Fibra: 10.00 x 10.00 mm

Densidad de Fibras Resultante:

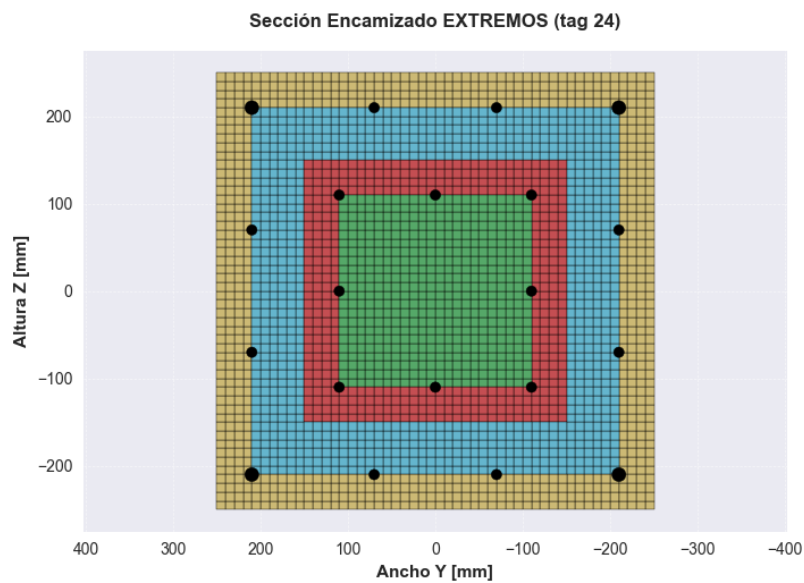
- Dirección B: 50 fibras totales (0.1000 fib/mm)
- Dirección H: 50 fibras totales (0.1000 fib/mm)
- Resolución: ~2500 fibras por sección transversal

✓ VERIFICADO: Densidad de malla adecuada para análisis de fibra.

=====

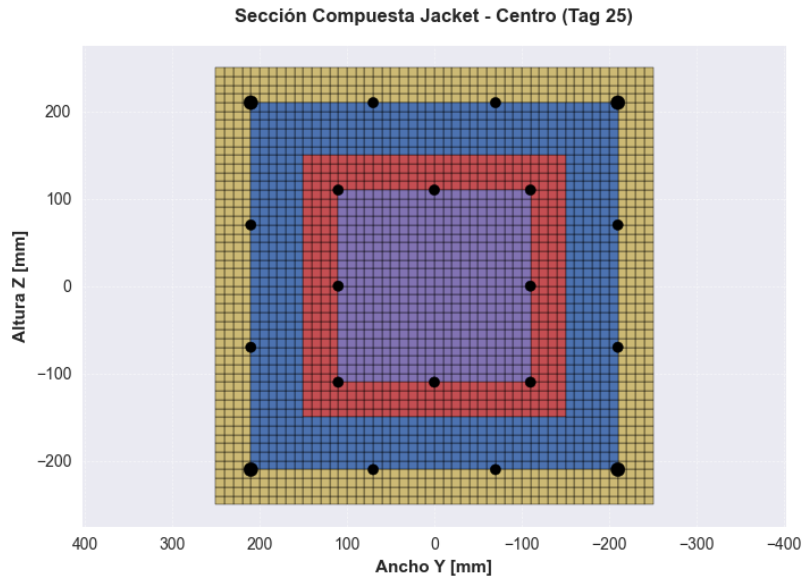
Anexo 43

Caso – J-100 – 8-a. Generación de Sección 24: Jacket (Extremos)



Anexo 44

Caso – J-100 – 8-b. Generación De Sección 25: Jacket (Centro)



Anexo 45
Caso – J-100 – Definición De Propiedades De Corte (Jacket)

8-c. DEFINICIÓN DE PROPIEDADES DE CORTE (JACKET)

Propiedades Calculadas (Anillo de Refuerzo):

- Área Bruta Total: 2500.00 cm²
- Área Neta Anillo: 1600.00 cm²
- Módulo de Corte (G): 10362.53 MPa
- Rigidez a Corte (GA): 1.38E+09 N

✓ Material de Corte creado (Tag 901)

Secciones Finales Generadas (Flexión + Corte):

- ✓ Tag 26: Extremos Jacket (Confinada)
- ✓ Tag 27: Centro Jacket (Menos Confinada)

⚠ Nota: Estas secciones se usarán en la re-construcción del modelo (Bloque 10).

=====

Anexo 46
Caso – J-100 – Análisis Momento-Curvatura (Secciones Jacket)

10-a. ANÁLISIS MOMENTO-CURVATURA (SECCIONES JACKET)

Condición de Carga Axial (P): 476.31 kN

--> Analizando: Sección Jacket Extremos (Tag 26)...

✓ Momento Máximo: 258.65 kN-m

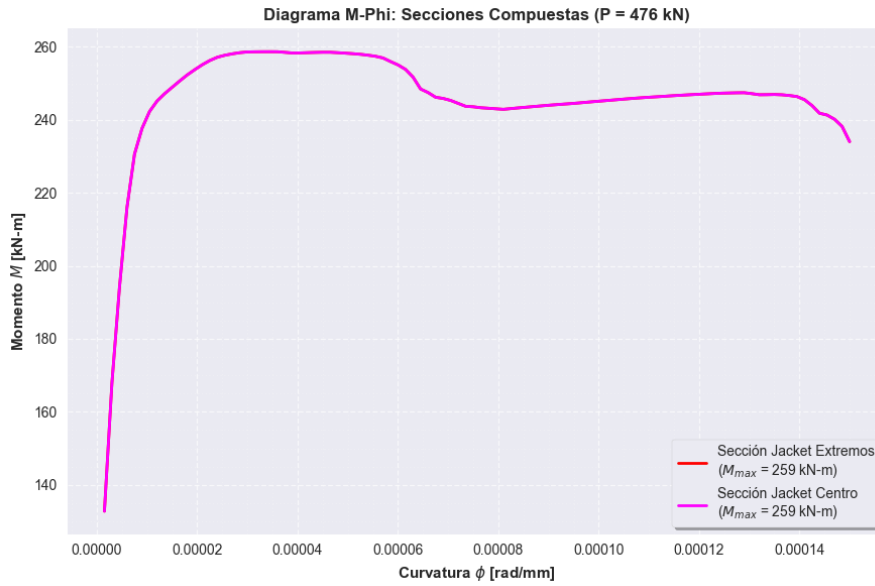
--> Analizando: Sección Jacket Centro (Tag 27)...

✓ Momento Máximo: 258.65 kN-m

✂ Generando gráfico comparativo...

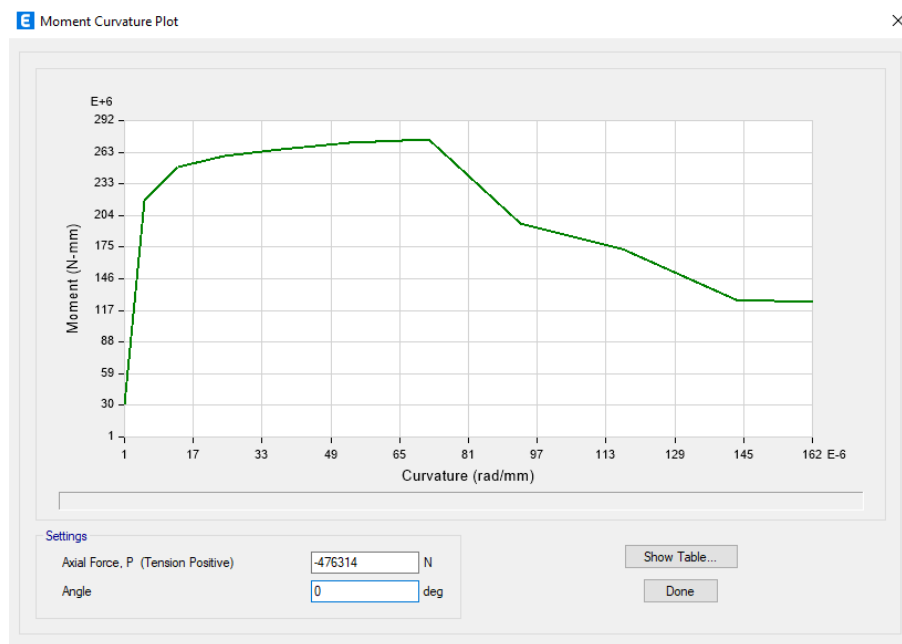
Anexo 47

Caso – J-100 – Diagrama Momento-Curvatura



Anexo 48

Caso – J-100 – Diagrama Momento-Curvatura - ETABS



Anexo 49

Caso – J-100 – Análisis Modal - Columna Reforzada (Jacket)

10. ANÁLISIS MODAL - COLUMNA REFORZADA (JACKET)

🏠 Masa Sísmica Asignada: 48.5539 Ton (Consistente con Original)
(Nota: Peso del Jacket 13.56 kN no incluido en masa dinámica)
(Objetivo: Aislar el incremento de rigidez lateral K)

PARÁMETRO	VALOR JACKET	UNIDAD
Periodo (T1)	0.4592	s
Frecuencia (f)	2.1775	Hz
Rigidez Lat. (K_din)	9088.46	N/mm

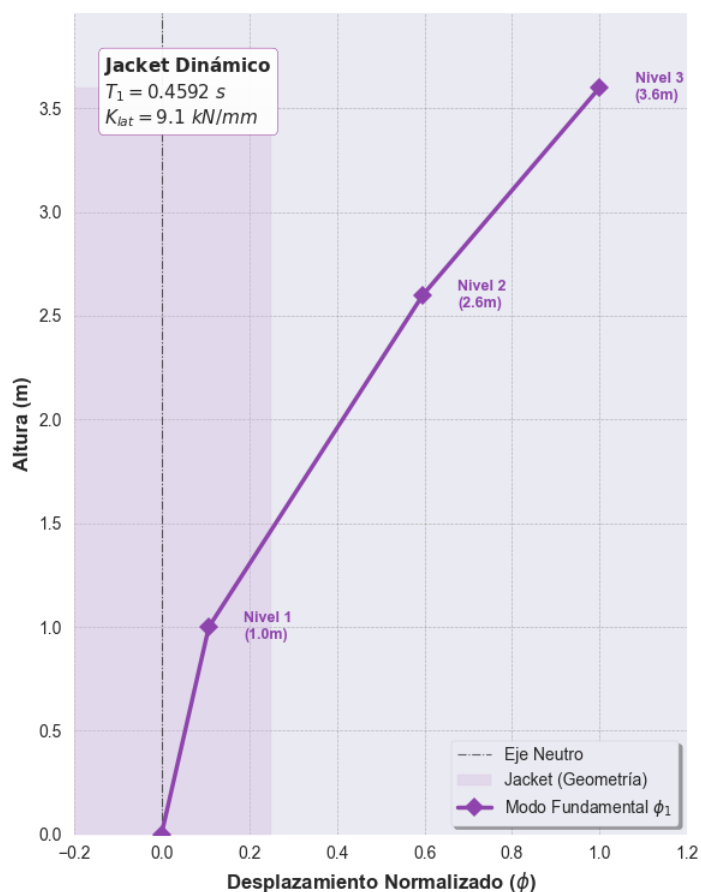
📄 Archivo generado: 'Resultados_Modal_Jacket.txt'

🔄 Generando perfil modal del refuerzo...

Anexo 50

Caso – J-100 – Perfil Modal – Columna Encamisada

PERFIL MODAL - COLUMNA ENCAMISADA



Anexo 51
Caso – J-100 – Análisis Pushover - Columna Reforzada

11. ANÁLISIS PUSHOVER - COLUMNA REFORZADA

Parámetros Pushover (Jacket):

- Nodo Control: 4
- Meta Drift: 6.0% (216.0 mm)

🚀 Iniciando Pushover Jacket...

⚠️ Pico detectado en Jacket (D=48.0mm). Bloqueando en Krylov.

RESULTADOS JACKET (CRITERIO DINÁMICO):

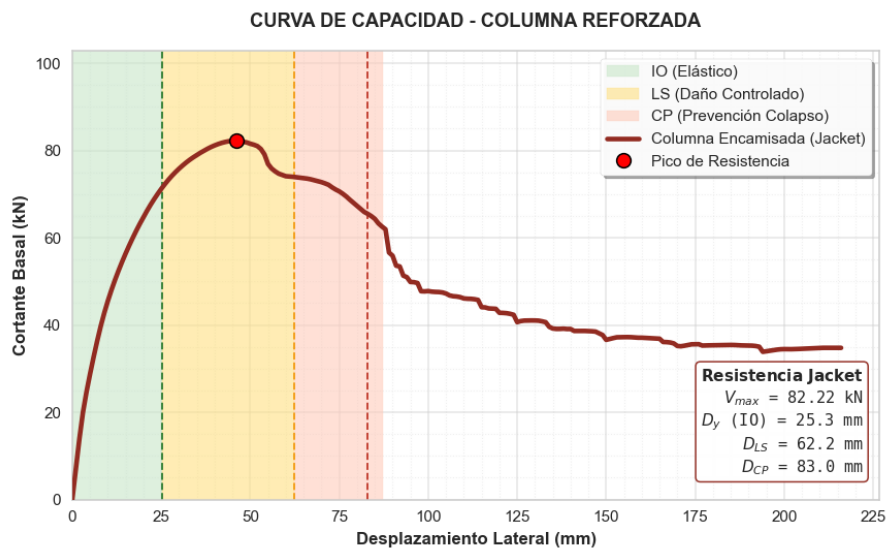
- 👉 Vmax: 82.22 kN
- 👉 Despl. @ Vmax: 46.0 mm

-
- ◆ IO (Fluencia): 25.3 mm (Drift 0.70%)
 - ◆ LS (0.75 x CP): 62.2 mm (Drift 1.73%)
 - ◆ CP (Límite): 83.0 mm (Drift 2.31%)
-

📁 Datos exportados en 'JACKET_datos_pushover.txt'

📊 Generando gráfico de capacidad...




Anexo 52
Caso – J-100 – Curva de Capacidad – Columna Encamisada



Anexo 53

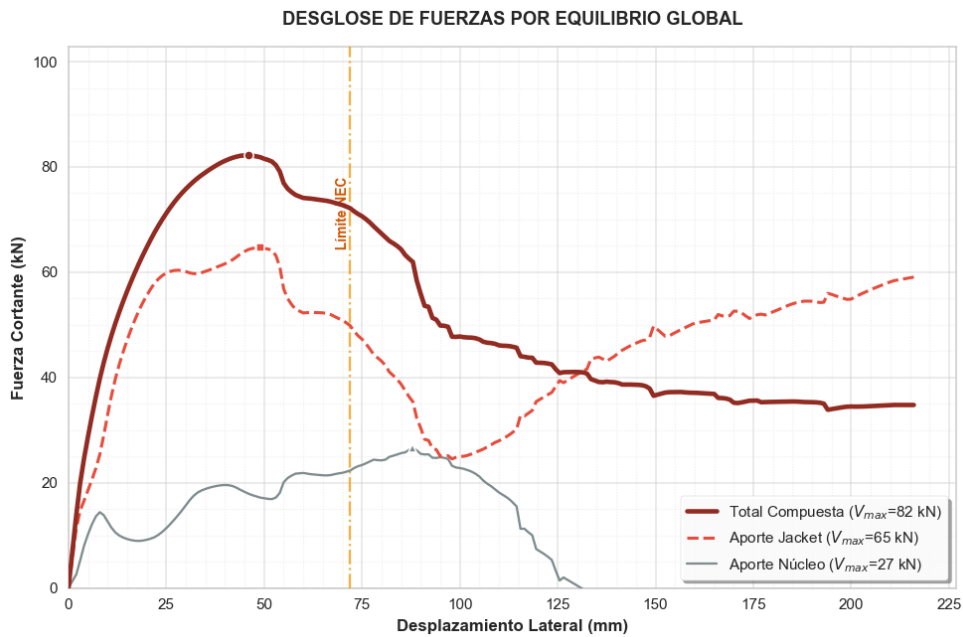
Caso – J-100 – Pushover: Desglose De Aportes (Método De Equilibrio)

11-Extra. PUSHOVER: DESGLOSE DE APORTES (MÉTODO DE EQUILIBRIO)

-  Ejecutando Pushover con desglose por equilibrio...
-  **Análisis finalizado (5.41 s).**
 - Vmax Total: 82.22 kN
 - Vmax Jacket: 64.68 kN
 - Vmax Núcleo: 26.55 kN
-  Generando gráfico de contribución estructural...

Anexo 54

Caso – J-100 – Desglose de Fuerzas por Equilibrio Global







Anexo 55

Caso – J-100 – Cálculo De Inercia Efectiva (Modifiers)

12. CÁLCULO DE INERCIA EFECTIVA (MODIFIERS)

Análisis de la Curva de Capacidad (OpenSees):

-  V_max Sistema: 82.22 kN
-  V_75% (Servicio): 63.23 kN
-  Despl. @ 75%: 19.00 mm
-  Rigidez Efectiva: 3.33 kN/mm

Referencia Teórica (Sección Bruta Monolítica):

- ◆ Sección Total: 500 x 500 mm
- ◆ Inercia Bruta (I_g): $5.21E+09 \text{ mm}^4$
- ◆ Módulo E (Jacket): 24.87 kN/mm^2
- ◆ Rigidez Bruta (K_g): 8.33 kN/mm

=====

🎯 RESULTADO FINAL (INPUT PARA ETABS)

=====

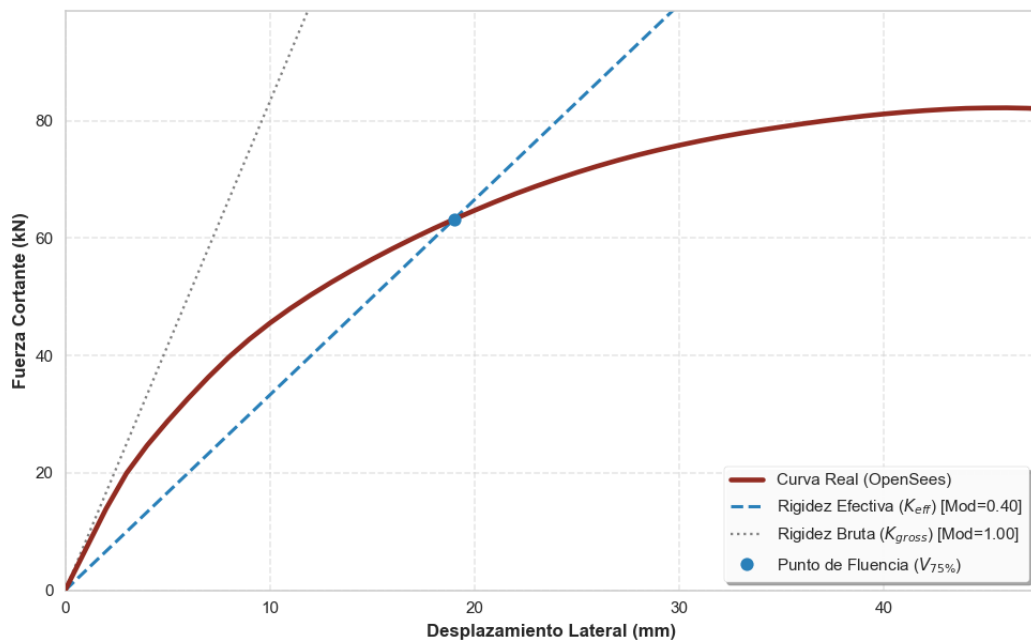
Modifier de Inercia (f_{11}/f_{22}): 0.3995

=====

Anexo 56

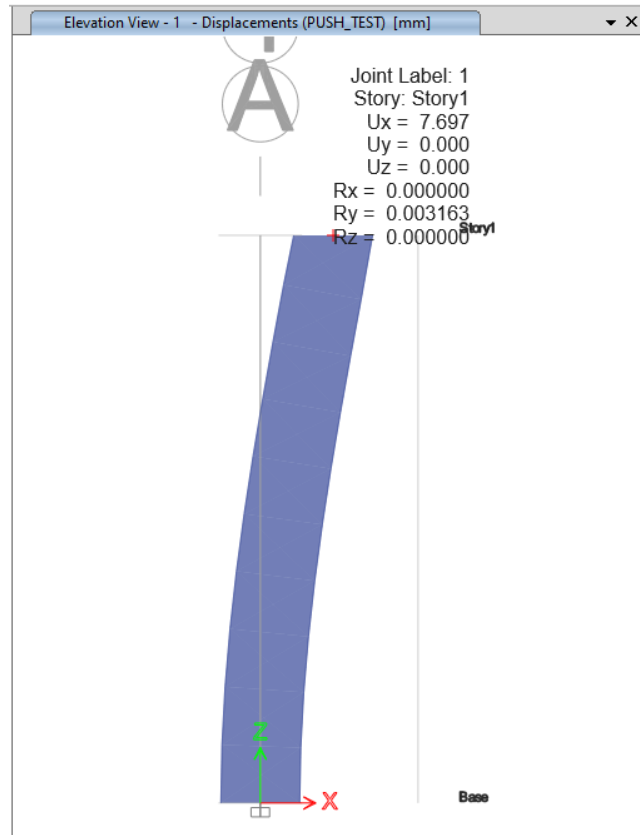
Caso – J-100 – Calculo de Rigidez Efectiva

CÁLCULO DE RIGIDEZ EFECTIVA (Alpha = 0.400)



Anexo 57

Caso – J-100 – Desplazamiento Lateral de Columna 500x500 sin Modifiers.



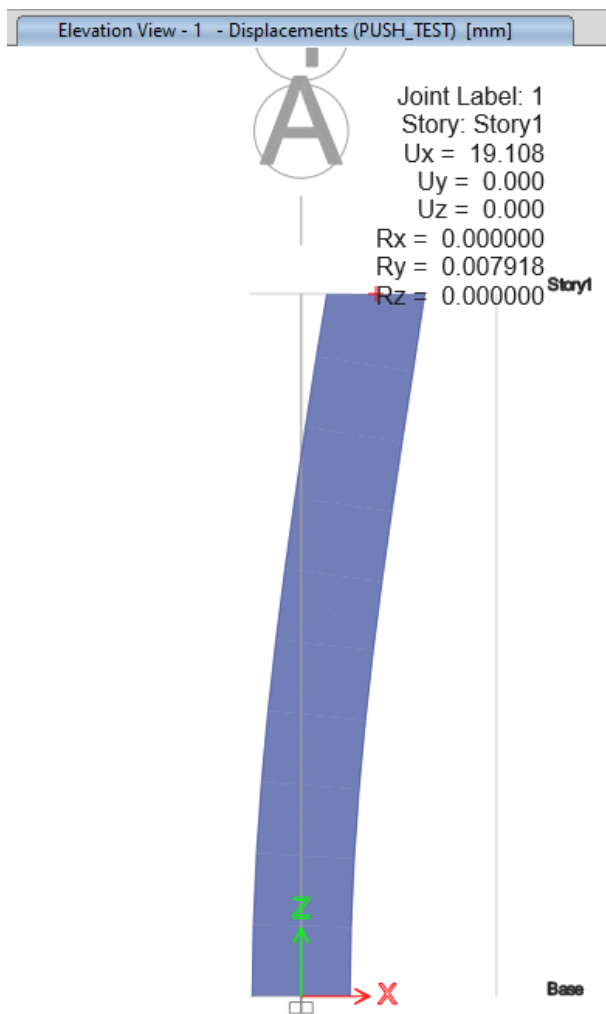
Anexo 58

Caso – J-100 – Aplicación de Modifiers en Inercia a Flexión

Assignments	
Section Property	C50x50
Property Modifiers	I22; I33
Area	1
As2	1
As3	1
Torsion	1
I22	0.3995
I33	0.3995
Mass	1
Weight	1

Anexo 59

Caso – J-100 – Análisis Lineal - Desplazamiento Lateral de Columna 500x500 con Modifiers.



Anexo 60

Caso – J-125 – Parámetros Geométricos Globales

=====

PARÁMETROS GEOMÉTRICOS GLOBALES

=====

Sección Original:	300 x 300 mm
Núcleo Original:	220 x 220 mm
Sección Total (Jacket):	550 x 550 mm
Altura del modelo:	3600 mm
Luz libre:	6000 mm


=====

Anexo 61
Caso – J-125 – Definición De Acero Longitudinal

DEFINICIÓN DE ACERO LONGITUDINAL

- ✓ Material Steel02 (Tag 1): $f_y = 420.0$ MPa
- ✓ Material ReinforcingSteel (Tag 18): Activado (Pandeo incluido).

=====

 REPORTE TÉCNICO: CUANTÍAS Y ARMADO

=====

COLUMNA ORIGINAL (300x300 mm):

- As Total: 904.78 mm²
- Cuantía Real: 1.01 %

✓ VERIFICADO: Cuantía dentro del rango normativo (1% - 3%).

COLUMNA ENCAMISADA (550x550 mm):

- As Adicional (Jacket): 2161.42 mm²
- Cuantía Global Final: 1.01 %

✓ VERIFICADO: Cuantía global normativa.

=====

Anexo 62
Caso – J-125 – Definición De Acero Transversal (Estribos)

1. DEFINICIÓN DE ACERO TRANSVERSAL (ESTRIBOS)

DISEÑO AUTOMÁTICO DE ESTRIBOS (NEC 4.3.4)

- Refuerzo Long. Menor: 12.0 mm
 - Criterio Dim/4: 75.0 mm
 - Criterio 6*db: 72.0 mm
 - 👉 SELECCIONADO (Lo): $s = 70$ mm (Zona Confinada)
 - 👉 SELECCIONADO (Cnt): $s = 70$ mm (Zona Central)
-

CONFIGURACIÓN FINAL DE ESTRIBOS:

- Columna Original: Ø10mm @ 70/70 mm
- Columna Jacket: Ø10mm @ 70/70 mm

Anexo 63
Caso – J-125 – Definición de Materiales De Hormigón

3. DEFINICIÓN DE MATERIALES DE HORMIGÓN

- Hormigón Original: $f'_c = 21.0$ MPa | $E_c = 21538$ MPa
- Hormigón Jacket: $f'_c = 28.0$ MPa | $E_c = 24870$ MPa

Deformación a maxima resistencia eps0_orig: -0.001950, eps0_jack: -0.002252
Resistencia a la Tensión ft_orig: 2.84 MPa, ft_new: 3.28 MPa
Resistencia remanente compresión del encamisado original: -1.05 MPa, del jacket: -1.40 MPa
✓ Material Recubrimiento (Concrete02) creado.
✓ Material Dummy creado.
=====

Anexo 64
Caso – J-125 – Definición De Materiales Confinados

4. DEFINICIÓN DE MATERIALES CONFINADOS

- ✓ Material Confinado Original EXTREMOS (Tag 2)
Núcleo: 220 x 220 mm | Estribo: Ø10 @ 70 mm
 - ✓ Material Confinado Original CENTRO (Tag 4)
Núcleo: 220 x 220 mm | Estribo: Ø10 @ 70 mm

 - ✓ Material Confinado Jacket EXTREMOS (Tag 6)
Núcleo: 470 x 470 mm | Estribo: Ø10 @ 70 mm
 - ✓ Material Confinado Jacket CENTRO (Tag 7)
Núcleo: 470 x 470 mm | Estribo: Ø10 @ 70 mm
- =====

Anexo 65
Caso – J-125 – Generación y Refinamiento De Malla De Fibras

5. GENERACIÓN Y REFINAMIENTO DE MALLA DE FIBRAS

Parámetros de Mallado:

- MCD Base (Matemático): 5 x 5 mm
- Factor de Refinamiento: 1
- Tamaño Final de Fibra: 5.00 x 5.00 mm

Densidad de Fibras Resultante:

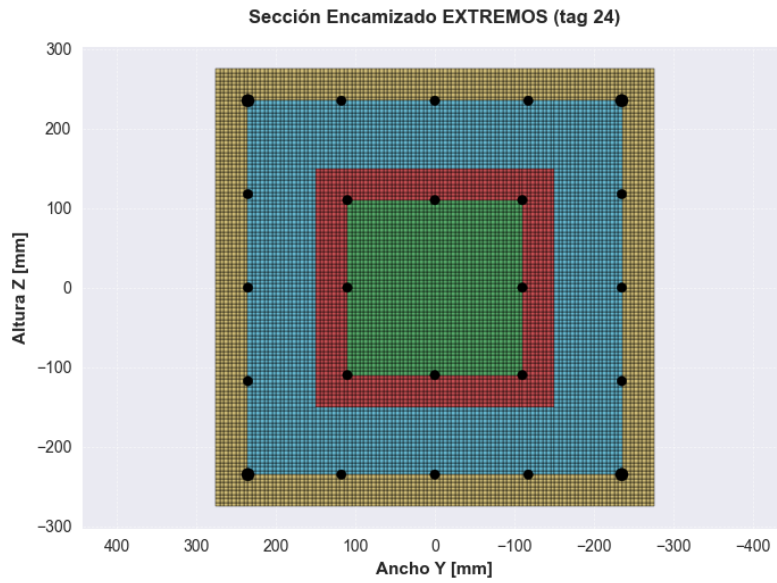
- Dirección B: 110 fibras totales (0.2000 fib/mm)
- Dirección H: 110 fibras totales (0.2000 fib/mm)
- Resolución: ~12100 fibras por sección transversal

⚠ AVISO: Malla muy densa. El análisis podría ser lento.

=====

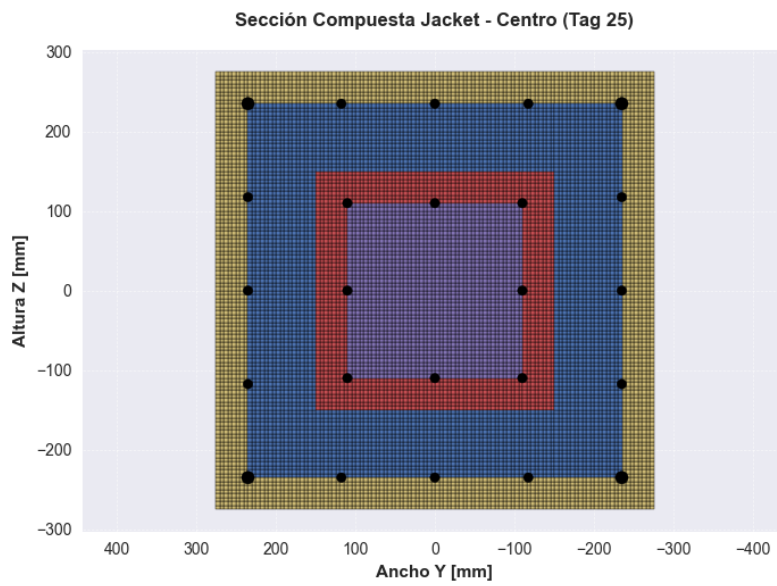
Anexo 66

Caso – J-125 – 8-a. Generación de Sección 24: Jacket (Extremos)



Anexo 67

Caso – J-125 – 8-b. Generación de Sección 25: Jacket (Centro)



Anexo 68

Caso – J-125 – Definición De Propiedades De Corte (Jacket)

8-c. DEFINICIÓN DE PROPIEDADES DE CORTE (JACKET)

Propiedades Calculadas (Anillo de Refuerzo):

- Área Bruta Total: 3025.00 cm²
- Área Neta Anillo: 2125.00 cm²
- Módulo de Corte (G): 10362.53 MPa
- Rigidez a Corte (GA): 1.84E+09 N

✓ Material de Corte creado (Tag 901)

Secciones Finales Generadas (Flexión + Corte):

- ✓ Tag 26: Extremos Jacket (Confinada)
- ✓ Tag 27: Centro Jacket (Menos Confinada)

⚠ Nota: Estas secciones se usarán en la re-construcción del modelo (Bloque 10).

=====

Anexo 69

Caso – J-125 – Análisis Momento-Curvatura (Secciones Jacket)

10-a. ANÁLISIS MOMENTO-CURVATURA (SECCIONES JACKET)

Condición de Carga Axial (P): 476.31 kN

--> Analizando: Sección Jacket Extremos (Tag 26)...

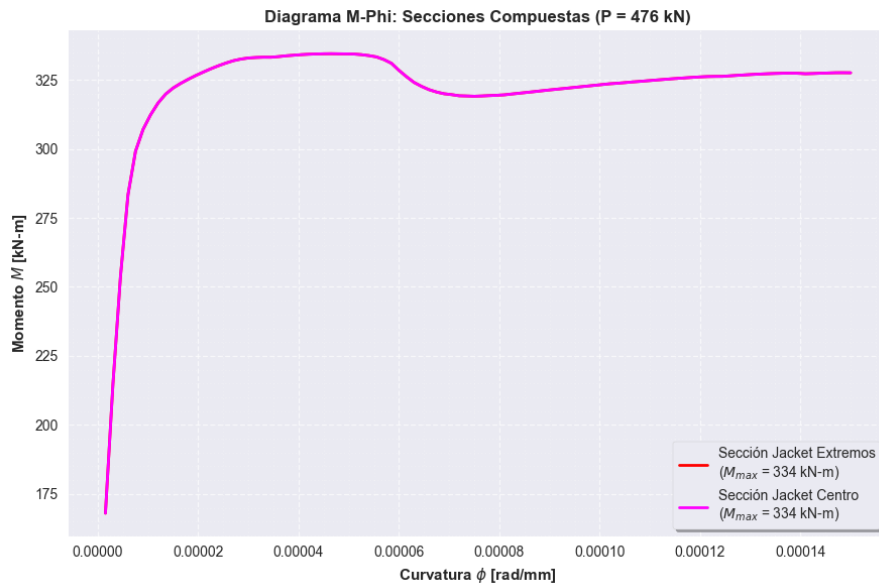
✓ Momento Máximo: 334.46 kN-m

--> Analizando: Sección Jacket Centro (Tag 27)...

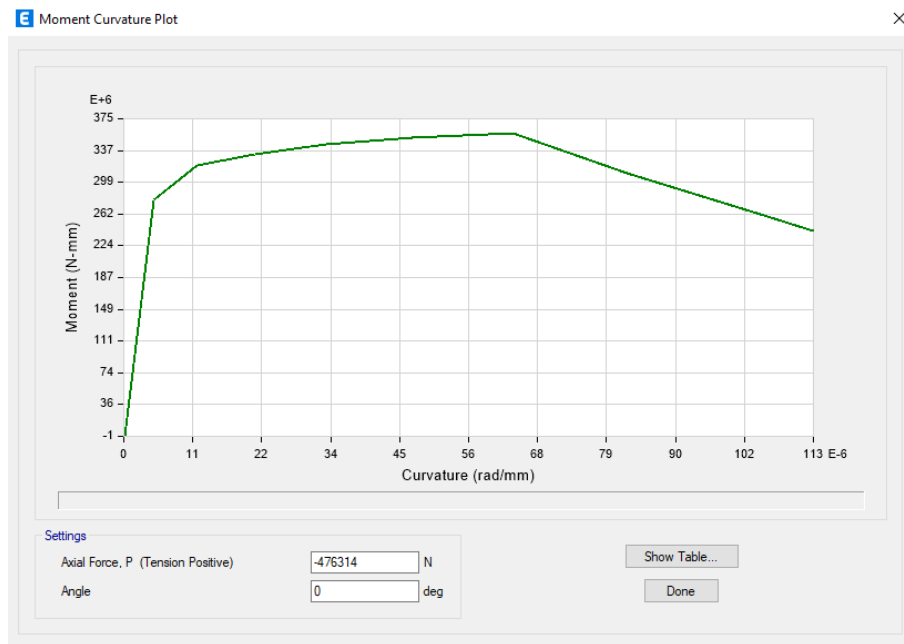
✓ Momento Máximo: 334.46 kN-m

🔄 Generando gráfico comparativo...

Anexo 70
Caso – J-125 – Diagrama Momento-Curvatura



Anexo 71
Caso – J-125 – Diagrama Momento-Curvatura - ETABS



Anexo 72
Caso – J-125 – Análisis Modal - Columna Reforzada (Jacket)

10. ANÁLISIS MODAL - COLUMNA REFORZADA (JACKET)

🏗️ Masa Sísmica Asignada: 48.5539 Ton (Consistente con Original)
 (Nota: Peso del Jacket 18.01 kN no incluido en masa dinámica)
 (Objetivo: Aislar el incremento de rigidez lateral K)

PARÁMETRO	VALOR JACKET	UNIDAD
Periodo (T1)	0.3752	s
Frecuencia (f)	2.6655	Hz
Rigidez Lat. (K_din)	13619.38	N/mm

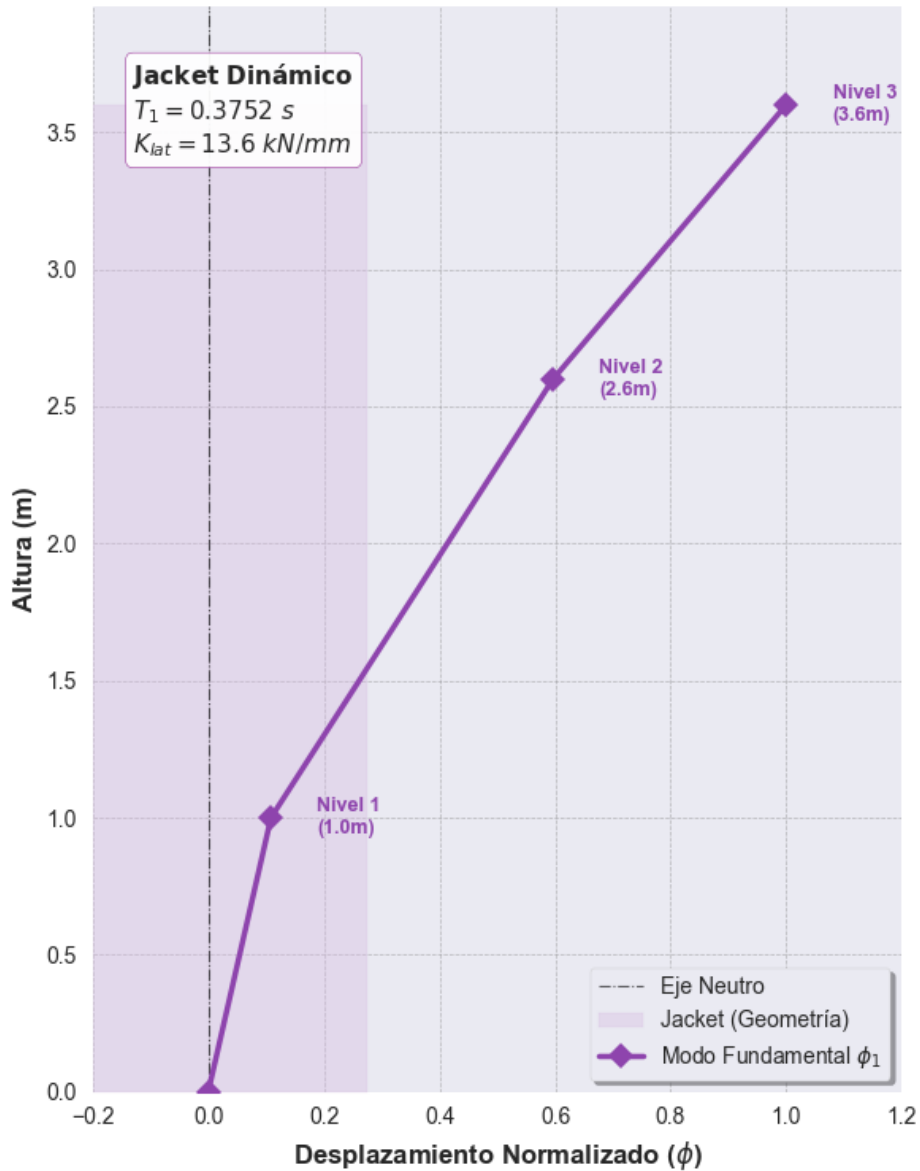
📄 Archivo generado: 'Resultados_Modal_Jacket.txt'

🔄 Generando perfil modal del refuerzo...

Anexo 73

Caso – J-125 – Perfil Modal – Columna Encamisada

PERFIL MODAL - COLUMNA ENCAMISADA



Anexo 74
Caso – J-125 – Análisis Pushover - Columna Reforzada

11. ANÁLISIS PUSHOVER - COLUMNA REFORZADA

Parámetros Pushover (Jacket):

- Nodo Control: 4
- Meta Drift: 6.0% (216.0 mm)

🚀 Iniciando Pushover Jacket...

⚠️ Pico detectado en Jacket (D=46.5mm). Bloqueando en Krylov.

RESULTADOS JACKET (CRITERIO DINÁMICO):

- 👉 Vmax: 105.75 kN
- 👉 Despl. @ Vmax: 44.0 mm

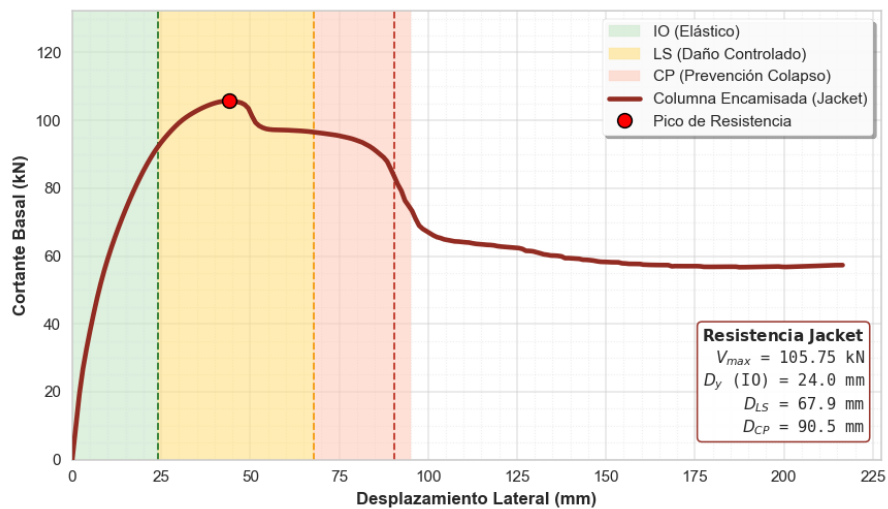
- ◆ IO (Fluencia): 24.0 mm (Drift 0.67%)
- ◆ LS (0.75 x CP): 67.9 mm (Drift 1.89%)
- ◆ CP (Límite): 90.5 mm (Drift 2.51%)

📁 Datos exportados en 'JACKET_datos_pushover.txt'

📊 Generando gráfico de capacidad...

Anexo 75
Caso – J-125 – Curva de Capacidad – Columna Encamisada




CURVA DE CAPACIDAD - COLUMNA REFORZADA



Anexo 76

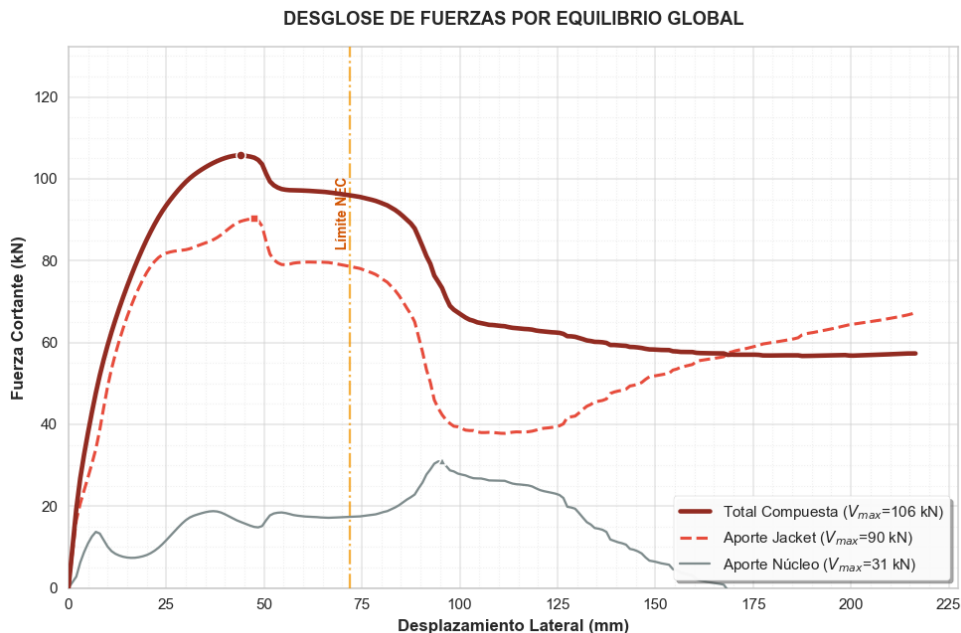
Caso – J-125 – Pushover: Desglose De Aportes (Método De Equilibrio)

11-Extra. PUSHOVER: DESGLOSE DE APORTES (MÉTODO DE EQUILIBRIO)

-  Ejecutando Pushover con desglose por equilibrio...
-  Análisis finalizado (63.77 s).
 - Vmax Total: 105.75 kN
 - Vmax Jacket: 90.25 kN
 - Vmax Núcleo: 30.97 kN
-  Generando gráfico de contribución estructural...

Anexo 77

Caso – J-125 – Desglose de Fuerzas por Equilibrio Global







Anexo 78

Caso – J-125 – Cálculo De Inercia Efectiva (Modifiers)

12. CÁLCULO DE INERCIA EFECTIVA (MODIFIERS)

Análisis de la Curva de Capacidad (OpenSees):

-  V_max Sistema: 105.75 kN
-  V_75% (Servicio): 80.89 kN
-  Despl. @ 75%: 18.00 mm
-  Rigidez Efectiva: 4.49 kN/mm

Referencia Teórica (Sección Bruta Monolítica):

-  Sección Total: 550 x 550 mm

- ◆ Inercia Bruta (I_g): $7.63E+09 \text{ mm}^4$
- ◆ Módulo E (Jacket): 24.87 kN/mm^2
- ◆ Rigidez Bruta (K_g): 12.19 kN/mm

=====

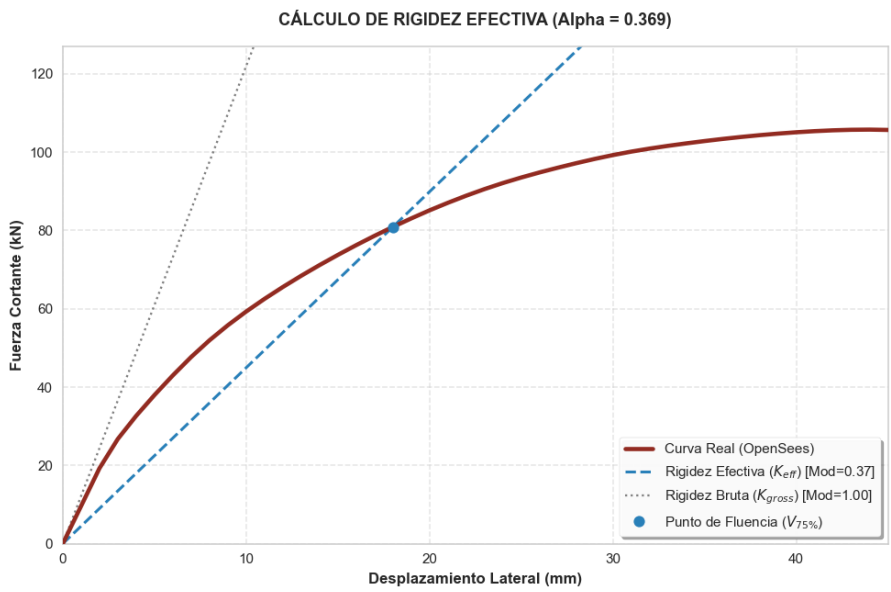
🎯 RESULTADO FINAL (INPUT PARA ETABS)

=====

Modifier de Inercia (f_{11}/f_{22}): 0.3685

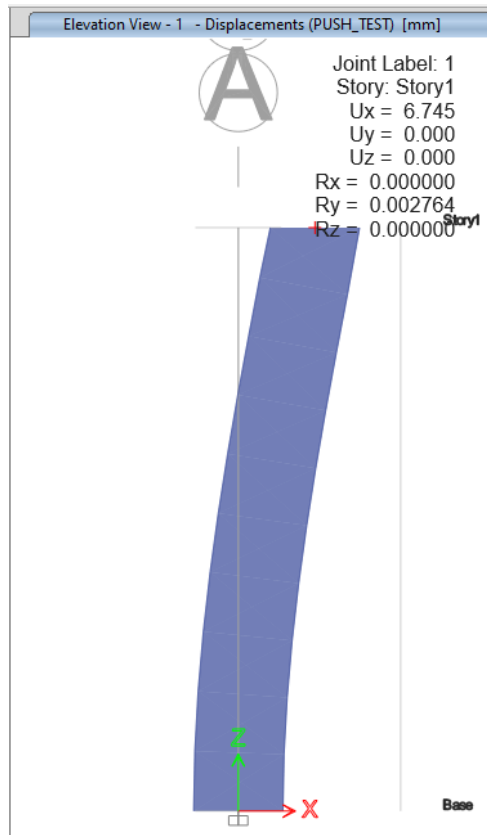
=====

Anexo 79
Caso – J-125 – Calculo de Rigidez Efectiva



Anexo 80

Caso – J-125 – Desplazamiento Lateral de Columna 550x550 sin Modifiers



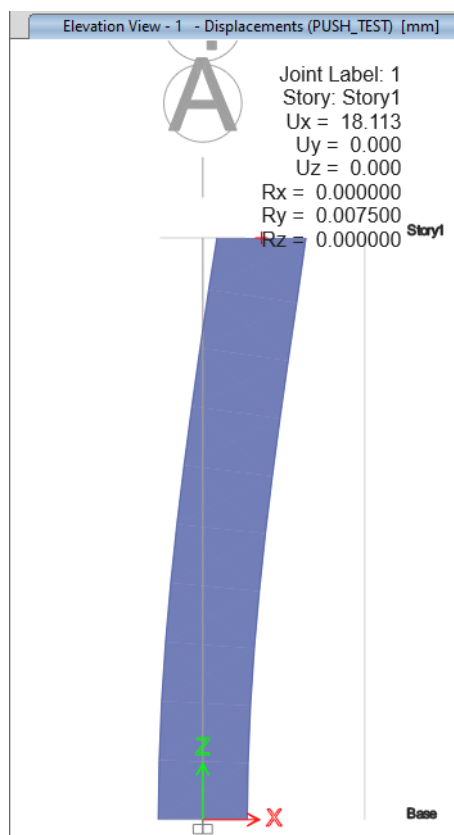
Anexo 81

Caso – J-125 – Aplicación de Modifiers en Inercia a Flexión

Assignments	
Section Property	C55x55
Property Modifiers	
I22	0.3685
I33	0.3685
Area	1
As2	1
As3	1
Torsion	1
Mass	1
Weight	1

Anexo 82

Caso – J-125 – Análisis Lineal - Desplazamiento Lateral de Columna 550x550 con Modifiers.



Anexo 83

Caso – J-175 – Parámetros Geométricos Globales

PARÁMETROS GEOMÉTRICOS GLOBALES

Sección Original: 300 x 300 mm
Núcleo Original: 220 x 220 mm
Sección Total (Jacket): 650 x 650 mm
Altura del modelo: 3600 mm
Luz libre: 6000 mm

Anexo 84

Caso – J-175 – Definición De Acero Longitudinal

DEFINICIÓN DE ACERO LONGITUDINAL

- ✓ Material Steel02 (Tag 1): $f_y = 420.0$ MPa
- ✓ Material ReinforcingSteel (Tag 18): Activado (Pandeo incluido).

=====

 REPORTE TÉCNICO: CUANTÍAS Y ARMADO

=====

COLUMNA ORIGINAL (300x300 mm):

- As Total: 904.78 mm²
- Cuantía Real: 1.01 %

VERIFICADO: Cuantía dentro del rango normativo (1% - 3%).

COLUMNA ENCAMISADA (650x650 mm):

- As Adicional (Jacket): 3430.62 mm²
- Cuantía Global Final: 1.03 %

VERIFICADO: Cuantía global normativa.



=====

Anexo 85

Caso – J-175 – Definición De Acero Transversal (Estribos)

1. DEFINICIÓN DE ACERO TRANSVERSAL (ESTRIBOS)

DISEÑO AUTOMÁTICO DE ESTRIBOS (NEC 4.3.4)

- Refuerzo Long. Menor: 12.0 mm
 - Criterio Dim/4: 75.0 mm
 - Criterio 6*db: 72.0 mm
 -  SELECCIONADO (Lo): s = 70 mm (Zona Confinada)
 -  SELECCIONADO (Cnt): s = 70 mm (Zona Central)
-

CONFIGURACIÓN FINAL DE ESTRIBOS:

- Columna Original: Ø10mm @ 70/70 mm
- Columna Jacket: Ø10mm @ 70/70 mm

Anexo 86

Caso – J-175 – Definición de Materiales De Hormigón

3. DEFINICIÓN DE MATERIALES DE HORMIGÓN

Hormigón Original: f'c = 21.0 MPa | Ec = 21538 MPa

Hormigón Jacket: f'c = 28.0 MPa | Ec = 24870 MPa

Deformación a máxima resistencia eps0_orig: -0.001950, eps0_jack: -0.002252

Resistencia a la Tensión ft_orig: 2.84 MPa, ft_new: 3.28 MPa

Resistencia remanente compresión del encamisado original: -1.05 MPa, del jacket: -1.40 MPa

✓ Material Recubrimiento (Concrete02) creado.

✓ Material Dummy creado.

=====

Anexo 87
Caso – J-175 – Definición De Materiales Confinados

4. DEFINICIÓN DE MATERIALES CONFINADOS

- ✓ Material Confinado Original EXTREMOS (Tag 2)
Núcleo: 220 x 220 mm | Estribo: Ø10 @ 70 mm
 - ✓ Material Confinado Original CENTRO (Tag 4)
Núcleo: 220 x 220 mm | Estribo: Ø10 @ 70 mm

 - ✓ Material Confinado Jacket EXTREMOS (Tag 6)
Núcleo: 570 x 570 mm | Estribo: Ø10 @ 70 mm
 - ✓ Material Confinado Jacket CENTRO (Tag 7)
Núcleo: 570 x 570 mm | Estribo: Ø10 @ 70 mm
- =====

Anexo 88
Caso – J-175 – Generación y Refinamiento De Malla De Fibras

5. GENERACIÓN Y REFINAMIENTO DE MALLA DE FIBRAS

Parámetros de Mallado:

- MCD Base (Matemático): 5 x 5 mm
- Factor de Refinamiento: 1
- Tamaño Final de Fibra: 5.00 x 5.00 mm

Densidad de Fibras Resultante:

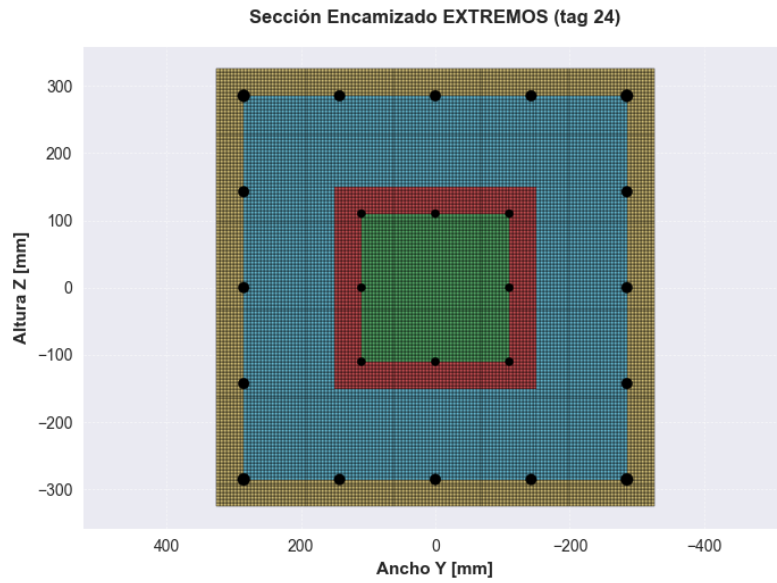
- Dirección B: 130 fibras totales (0.2000 fib/mm)
- Dirección H: 130 fibras totales (0.2000 fib/mm)
- Resolución: ~16900 fibras por sección transversal

⚠ AVISO: Malla muy densa. El análisis podría ser lento.

=====

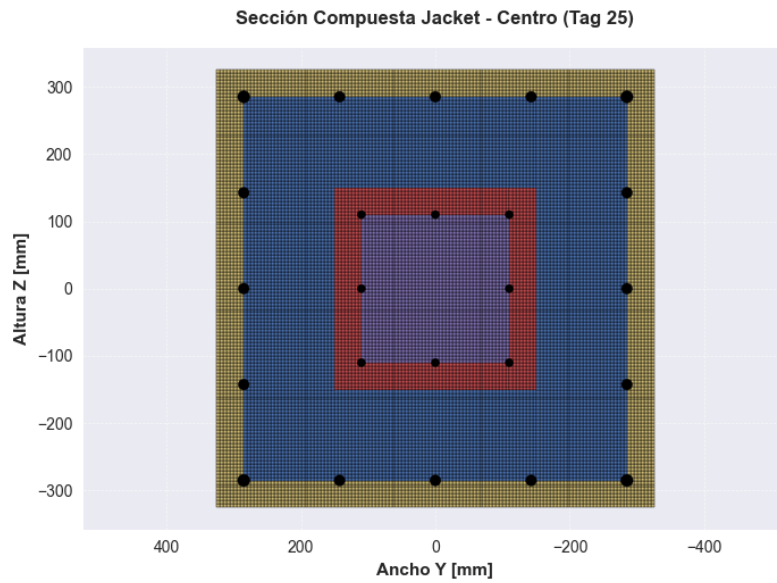
Anexo 89

Caso – J-175 – 8-a. Generación de Sección 24: Jacket (Extremos)



Anexo 90

Caso – J-175 – 8-b. Generación de Sección 25: Jacket (Centro)



Anexo 91
Caso – J-175 – Definición De Propiedades De Corte (Jacket)

8-c. DEFINICIÓN DE PROPIEDADES DE CORTE (JACKET)

Propiedades Calculadas (Anillo de Refuerzo):

- Área Bruta Total: 4225.00 cm²
- Área Neta Anillo: 3325.00 cm²
- Módulo de Corte (G): 10362.53 MPa
- Rigidez a Corte (GA): 2.87E+09 N

✓ Material de Corte creado (Tag 901)

Secciones Finales Generadas (Flexión + Corte):

- ✓ Tag 26: Extremos Jacket (Confinada)
- ✓ Tag 27: Centro Jacket (Menos Confinada)

⚠ Nota: Estas secciones se usarán en la re-construcción del modelo (Bloque 10).

=====

Anexo 92
Caso – J-175 – Análisis Momento-Curvatura (Secciones Jacket)

10-a. ANÁLISIS MOMENTO-CURVATURA (SECCIONES JACKET)

Condición de Carga Axial (P): 476.31 kN

--> Analizando: Sección Jacket Extremos (Tag 26)...

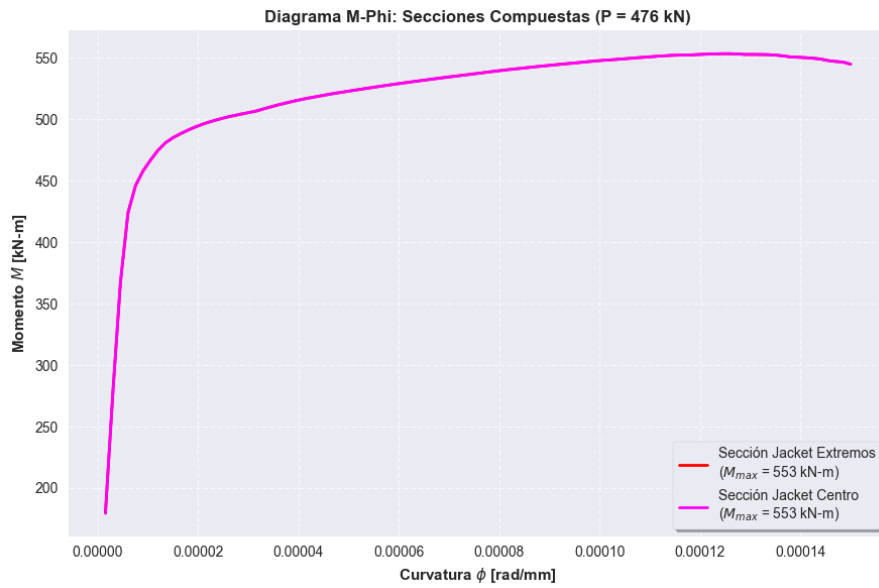
✓ Momento Máximo: 553.44 kN-m

--> Analizando: Sección Jacket Centro (Tag 27)...

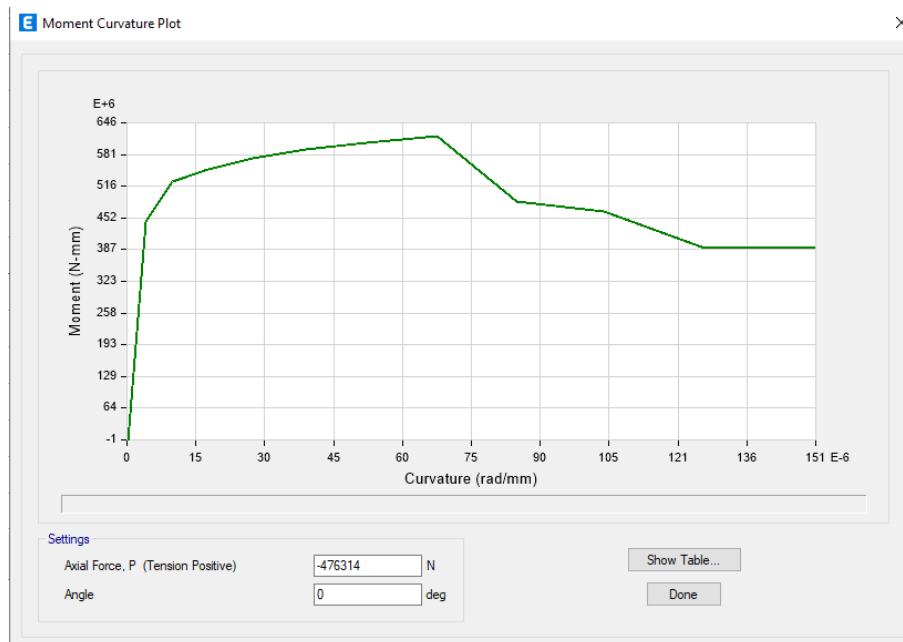
✓ Momento Máximo: 553.44 kN-m

🔄 Generando gráfico comparativo...

Anexo 93
Caso – J-175 – Diagrama Momento-Curvatura



Anexo 94
Caso – J-175 – Diagrama Momento-Curvatura - ETABS



Anexo 95

Caso – J-175 – Análisis Modal - Columna Reforzada (Jacket)

10. ANÁLISIS MODAL - COLUMNA REFORZADA (JACKET)

🏗️ Masa Sísmica Asignada: 48.5539 Ton (Consistente con Original)
(Nota: Peso del Jacket 28.18 kN no incluido en masa dinámica)
(Objetivo: Aislar el incremento de rigidez lateral K)

PARÁMETRO	VALOR JACKET	UNIDAD
Periodo (T1)	0.3338	s
Frecuencia (f)	2.9960	Hz
Rigidez Lat. (K_din)	17205.41	N/mm

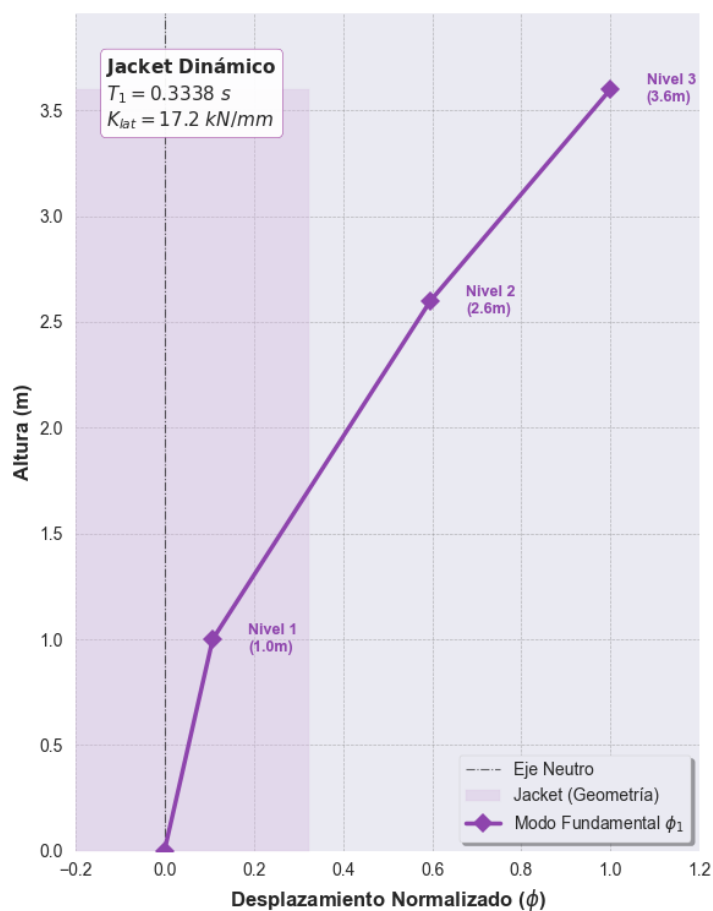
📄 Archivo generado: 'Resultados_Modal_Jacket.txt'

📈 Generando perfil modal del refuerzo...

Anexo 96

Caso – J-175 – Perfil Modal – Columna Encamisada

PERFIL MODAL - COLUMNA ENCAMISADA



Anexo 97
Caso – J-175 – Análisis Pushover - Columna Reforzada

11. ANÁLISIS PUSHOVER - COLUMNA REFORZADA

Parámetros Pushover (Jacket):

- Nodo Control: 4
- Meta Drift: 6.0% (216.0 mm)

🚀 Iniciando Pushover Jacket...

⚠️ Pico detectado en Jacket (D=86.0mm). Bloqueando en Krylov.

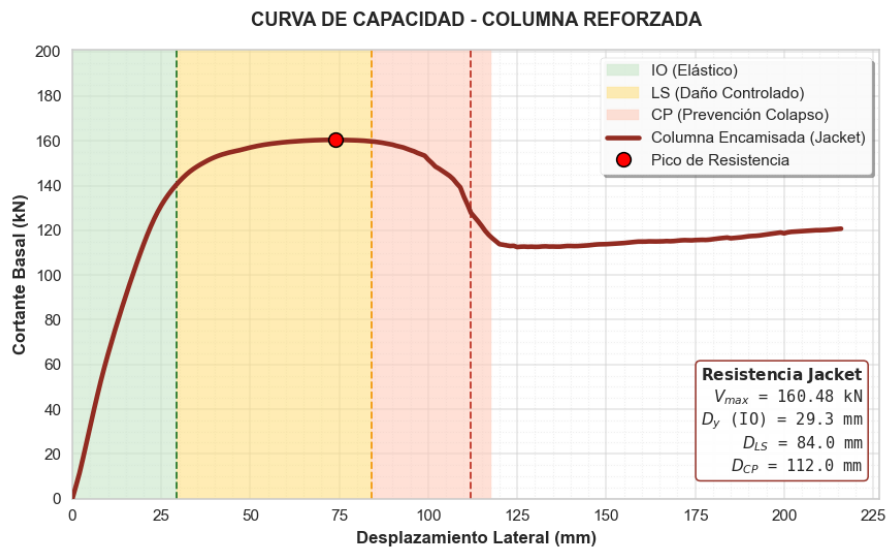
RESULTADOS JACKET (CRITERIO DINÁMICO):

- 👉 Vmax: 160.48 kN
 - 👉 Despl. @ Vmax: 74.0 mm
-
- ◆ IO (Fluencia): 29.3 mm (Drift 0.81%)
 - ◆ LS (0.75 x CP): 84.0 mm (Drift 2.33%)
 - ◆ CP (Límite): 112.0 mm (Drift 3.11%)
-

📄 Datos exportados en 'JACKET_datos_pushover.txt'

📊 Generando gráfico de capacidad...

Anexo 98
Caso – J-175 – Curva de Capacidad – Columna Encamisada



Anexo 99

Caso – J-175 – Pushover: Desglose De Aportes (Método De Equilibrio)

11-Extra. PUSHOVER: DESGLOSE DE APORTES (MÉTODO DE EQUILIBRIO)

✓ Análisis finalizado (35.95 s).

Vmax Total: 160.48 kN

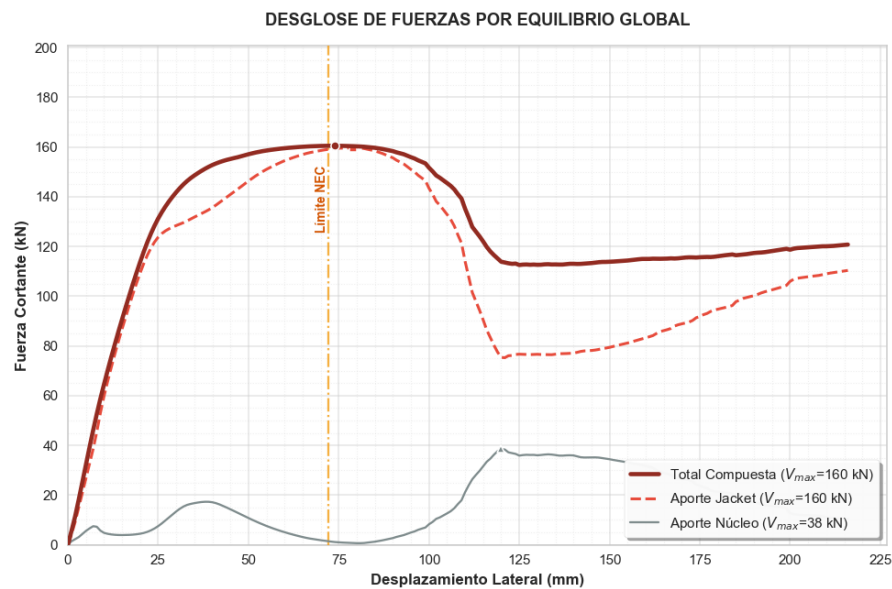
Vmax Jacket: 159.60 kN

Vmax Núcleo: 38.46 kN

📊 Generando gráfico de contribución estructural...

Anexo 100

Caso – J-175 – Desglose de Fuerzas por Equilibrio Global



Anexo 101

Caso – J-175 – Cálculo De Inercia Efectiva (Modifiers)

12. CÁLCULO DE INERCIA EFECTIVA (MODIFIERS)

Análisis de la Curva de Capacidad (OpenSees):

- 👉 V_max Sistema: 160.48 kN
- 👉 V_75% (Servicio): 121.68 kN
- 👉 Despl. @ 75%: 22.00 mm
- 👉 Rigidez Efectiva: 5.53 kN/mm

Referencia Teórica (Sección Bruta Monolítica):

- ◆ Sección Total: 650 x 650 mm
- ◆ Inercia Bruta (I_g): 1.49E+10 mm⁴
- ◆ Módulo E (Jacket): 24.87 kN/mm²

◆ Rigidez Bruta (K_g): 23.79 kN/mm

=====

🎯 RESULTADO FINAL (INPUT PARA ETABS)

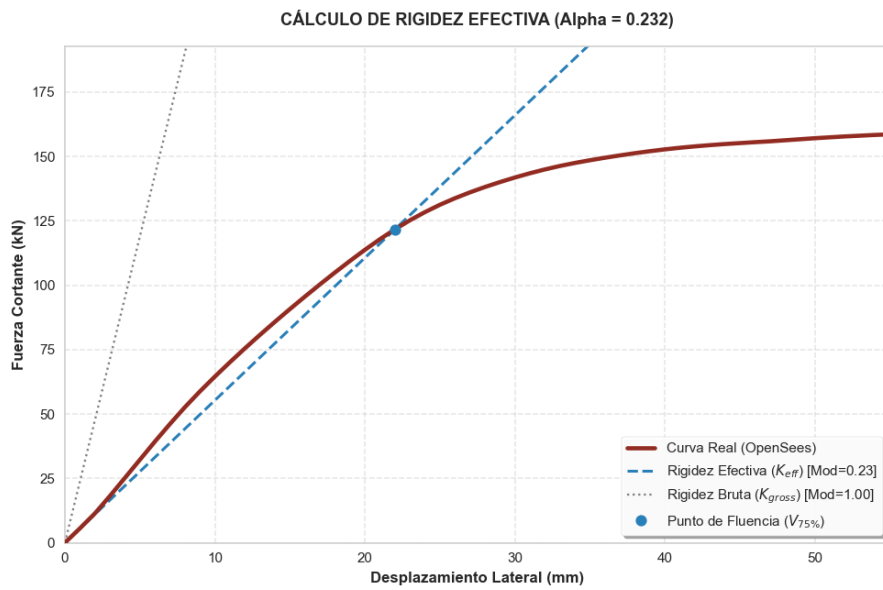
=====

Modifier de Inercia (f_{11}/f_{22}): 0.2325

=====

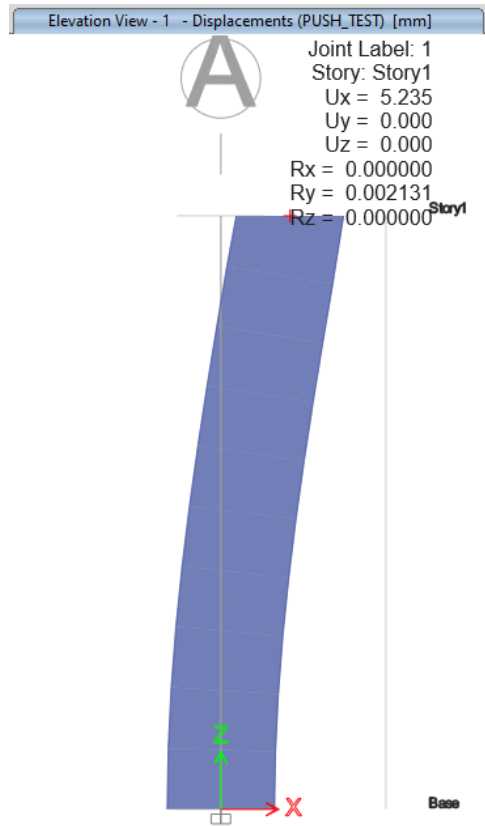
Anexo 102

Caso – J-175 – Calculo de Rigidez Efectiva



Anexo 103

Caso – J-175 – Desplazamiento Lateral de Columna 650x650 sin Modifiers



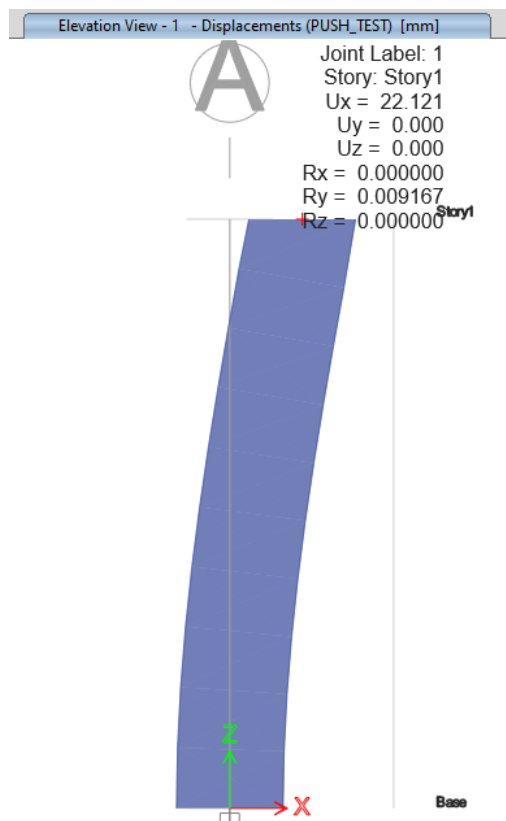
Anexo 104

Caso – J-175 – Aplicación de Modifiers en Inercia a Flexión

Assignments	
Section Property	C65x65
Property Modifiers	I22; I33
Area	1
As2	1
As3	1
Torsion	1
I22	0.2325
I33	0.2325
Mass	1
Weight	1

Anexo 105

Caso – J-175 – Análisis Lineal - Desplazamiento Lateral de Columna 550x550 con Modifiers.



Anexo 106

Caso – C – Análisis de factor de agrietamiento columna 300x300, cover_orig=40mm

12. CÁLCULO DE INERCIA EFECTIVA (MODIFIERS)

Análisis de la Curva de Capacidad (OpenSees):

- ☞ V_max Sistema: 16.45 kN
- ☞ V_75% (Servicio): 12.38 kN
- ☞ Despl. @ 75%: 17.00 mm
- ☞ Rigidez Efectiva: 0.73 kN/mm

Referencia Teórica (Sección Bruta Monolítica):

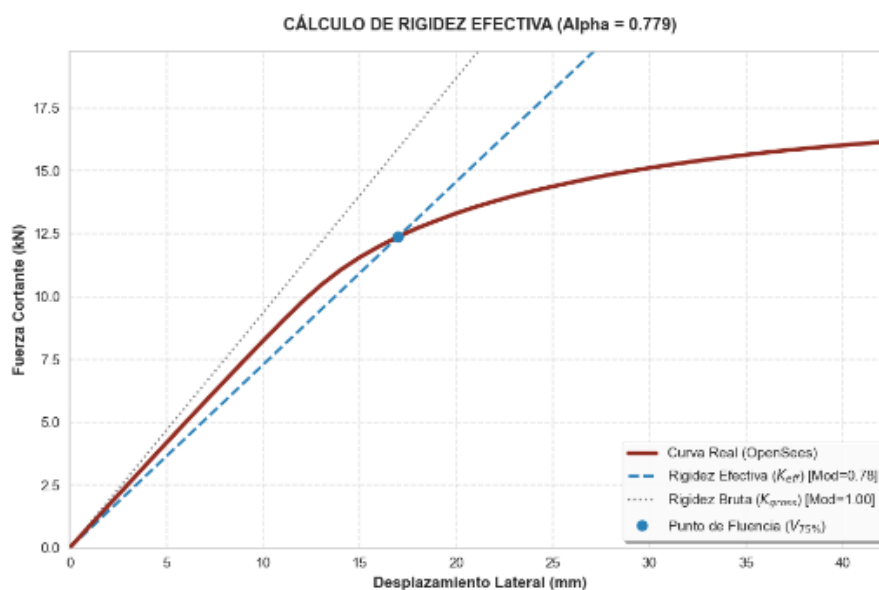
- ◆ Sección Total: 300 x 300 mm
- ◆ Inercia Bruta (I_g): 6.75E+08 mm⁴
- ◆ Módulo E (Jacket): 21.54 kN/mm²
- ◆ Rigidez Bruta (K_g): 0.93 kN/mm

🎯 RESULTADO FINAL (INPUT PARA ETABS)

Modifier de Inercia (f11/f22): 0.7792

Anexo 107

Caso – C – Calculo de Rigidez Efectiva de agrietamiento columna 300x300, cover_orig=40mm



Anexo 108

Caso – C – Análisis de factor de agrietamiento columna 300x300, cover_orig=145mm

12. CÁLCULO DE INERCIA EFECTIVA (MODIFIERS)

Análisis de la Curva de Capacidad (OpenSees):

- V_max Sistema: 12.66 kN
- V_75% (Servicio): 9.88 kN
- Despl. @ 75%: 15.00 mm
- Rigidez Efectiva: 0.66 kN/mm

Referencia Teórica (Sección Bruta Monolítica):

- Sección Total: 300 x 300 mm
- Inercia Bruta (I_g): 6.75E+08 mm⁴
- Módulo E (Jacket): 21.54 kN/mm²
- Rigidez Bruta (K_g): 0.93 kN/mm

=====

🎯 RESULTADO FINAL (INPUT PARA ETABS)

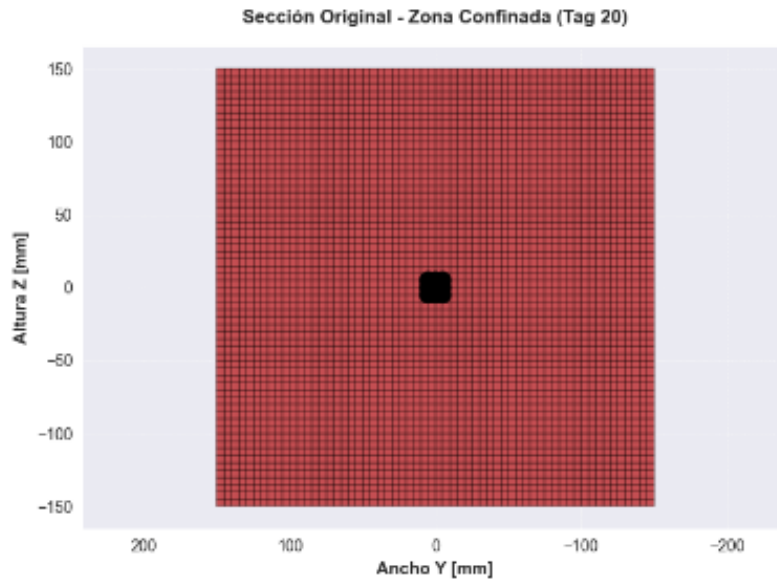
=====

Modifier de Inercia (f11/f22): 0.7046

=====

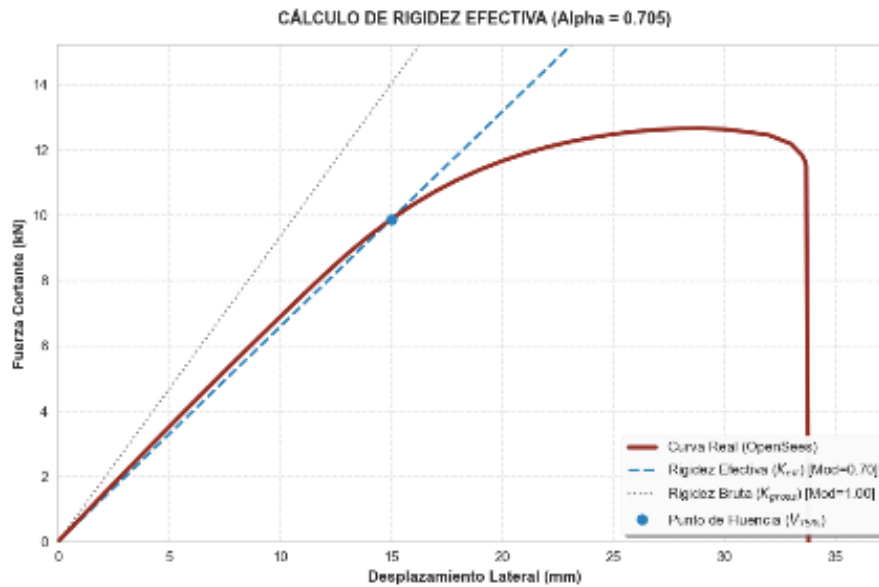
Anexo 109

Caso – C – Sección de columna 300x300, cover_orig=145mm



Anexo 110

Caso – C – Calculo de Rigidez Efectiva de agrietamiento columna 300x300, cover_orig=145mm



Anexo 111

Caso – C – Análisis de factor de agrietamiento columna 300x300, cover_orig=5mm

12. CÁLCULO DE INERCIA EFECTIVA (MODIFIERS)

Análisis de la Curva de Capacidad (OpenSees) :

- ☞ V_max Sistema: 19.48 kN
- ☞ V_75% (Servicio): 14.66 kN
- ☞ Despl. @ 75%: 23.00 mm
- ☞ Rigidez Efectiva: 0.64 kN/mm

Referencia Teórica (Sección Bruta Monolítica) :

- ◆ Sección Total: 300 x 300 mm
- ◆ Inercia Bruta (I_g): $6.75E+08 \text{ mm}^4$
- ◆ Módulo E (Jacket): 21.54 kN/mm^2
- ◆ Rigidez Bruta (K_g): 0.93 kN/mm

=====

🎯 RESULTADO FINAL (INPUT PARA ETABS)

=====

Modifier de Inercia (f11/f22): 0.6817

=====

[Formulación Matemática Utilizada]:

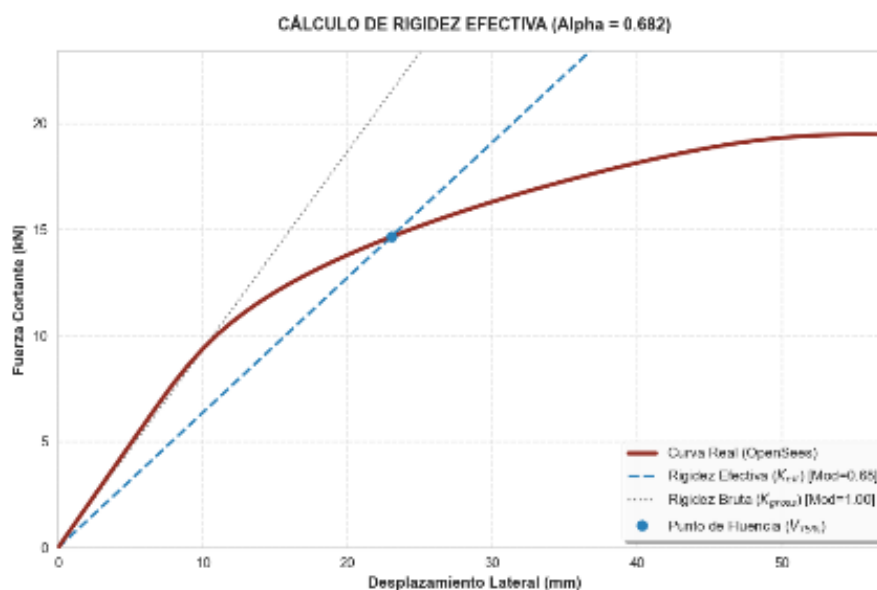
Anexo 112

Caso – C – Sección de columna 300x300, cover_orig=5mm



Anexo 113

Caso – C – Calculo de Rigidez Efectiva de agrietamiento columna 300x300, cover_orig=5mm



Anexo 114

Caso – C – Análisis de factor de agrietamiento columna 300x300, cover_orig=148mm

12. CÁLCULO DE INERCIA EFECTIVA (MODIFIERS)

Análisis de la Curva de Capacidad (OpenSees):

- V_max Sistema: 12.66 kN
- V_75% (Servicio): 9.88 kN
- Despl. @ 75%: 15.00 mm
- Rigidez Efectiva: 0.66 kN/mm

Referencia Teórica (Sección Bruta Monolítica):

- Sección Total: 300 x 300 mm
- Inercia Bruta (I_g): 6.75E+08 mm⁴
- Módulo E (Jacket): 21.54 kN/mm²
- Rigidez Bruta (K_g): 0.93 kN/mm

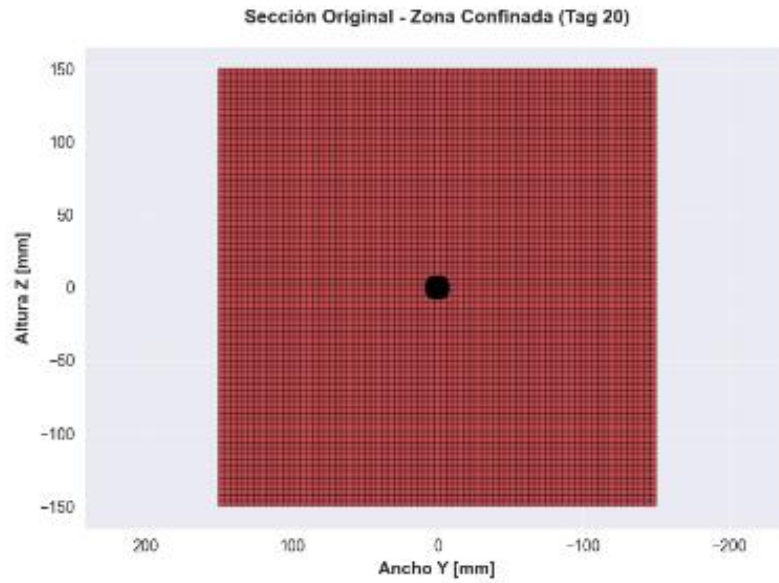
RESULTADO FINAL (INPUT PARA ETABS)

Modifier de Inercia (f11/f22): 0.7044

[Formulación Matemática Utilizada]:

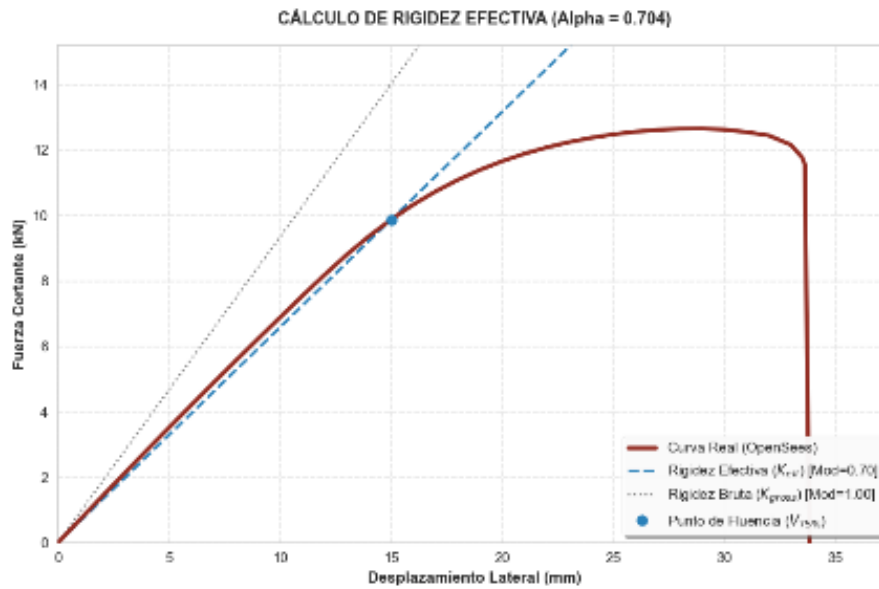
Anexo 115

Caso – C – Sección de columna 300x300, cover_orig=148mm



Anexo 116

Caso – C – Cálculo de Rigidez Efectiva de agrietamiento columna 300x300, cover_orig=148mm



Anexo 117

Tabla de Rigideces Efectivas estandarizadas por la ASCE 41-17, página 147

Table 10-5. Effective Stiffness Values

Component	Flexural Rigidity	Shear Rigidity	Axial Rigidity
Beams—nonprestressed ^a	$0.3E_cEI_g$	$0.4E_cEA_w$	—
Beams—prestressed ^a	E_cEI_g	$0.4E_cEA_w$	—
Columns with compression caused by design gravity loads $\geq 0.5A_gf'_c$ ^b	$0.7E_cEI_g$	$0.4E_cEA_w$	E_cEA_g
Columns with compression caused by design gravity loads $\leq 0.1A_gf'_c$ or with tension ^b	$0.3E_cEI_g$	$0.4E_cEA_w$	E_cEA_g (compression) E_cEA_g (tension)
Beam-column joints	Refer to Section 10.4.2.2.1	—	E_cEA_g
Flat slabs—nonprestressed	Refer to Section 10.4.4.2	$0.4E_cEA_g$	—
Flat slabs—prestressed	Refer to Section 10.4.4.2	$0.4E_cEA_g$	—
Walls—cracked ^c	$0.35E_cEA_g$	$0.4E_cEA_w$	E_cEA_g (compression) E_cEA_g (tension)

^a For T-beams, I_g can be taken as twice the value of I_g of the web alone. Otherwise, I_g should be based on the effective width as defined in Section 10.3.1.3.

^b For columns with axial compression falling between the limits provided, flexural rigidity shall be determined by linear interpolation. If interpolation is not performed, the more conservative effective stiffnesses shall be used. An imposed axial load N_{UG} is permitted to be used for stiffness evaluations.

^c See Section 10.7.2.2.

Anexo 118

Tabla de la norma ACI 318 sobre refuerzo transversal para columnas sismorresistentes.

Tabla 18.7.5.4 — Refuerzo transversal para columnas en pórticos especiales resistentes a momento

Refuerzo transversal	Condición	Expresiones aplicables
A_{sh}/sb_c para estribos cerrados de confinamiento rectilíneos	$P_u \leq 0.3A_gf'_c$ y $f'_c \leq 70$ MPa	Mayor de (a) y (b) $0.3 \left(\frac{A_g}{A_{ch}} - 1 \right) \frac{f'_c}{f_{yt}}$ (a) $0.09 \frac{f'_c}{f_{yt}}$ (b)
	$P_u > 0.3A_gf'_c$ ó $f'_c > 70$ MPa	Mayor de (a), (b) y (c) $0.2k_fk_n \frac{P_u}{f_{yt}A_{ch}}$ (c)
ρ_s para espirales o estribos cerrados de confinamiento circulares	$P_u \leq 0.3A_gf'_c$ y $f'_c \leq 70$ MPa	Mayor de (d) y (e) $0.45 \left(\frac{A_g}{A_{ch}} - 1 \right) \frac{f'_c}{f_{yt}}$ (d) $0.12 \frac{f'_c}{f_{yt}}$ (e)
	$P_u > 0.3A_gf'_c$ ó $f'_c > 70$ MPa	Mayor de (d), (e) y (f) $0.35k_f \frac{P_u}{f_{yt}A_{ch}}$ (f)

Anexo 119

Script con Openseespy – Preparación de Entorno. - BLOQUE 0: INSTALACIÓN DE DEPENDENCIAS EN KERNEL PYTHON 3.12

```
## BLOQUE 0: INSTALACIÓN DE DEPENDENCIAS EN KERNEL PYTHON 3.12

# =====
# OpenSeesPy: Motor de cálculo para análisis sísmico no lineal
%pip install openseespy

# Visualización 2-D/3-D y utilidades push-over
# motor de gráficos activo
%pip install opsvis

# backend 3-D interactivo (opcional)
%pip install pyvista
%pip install ipynb
# Cálculo y manejo de datos
%pip install numpy pandas matplotlib

import openseespy.opensees as ops
import platform

print("=" * 60)
print("INFORMACIÓN DEL SISTEMA")
print("=" * 60)
print(f"Versión OpenSees: {ops.version()}")
print(f"Versión Python: {platform.python_version()}")
print("=" * 60)
import openseespy.opensees as ops
import platform
print(ops.version())
print(platform.python_version())
```

Anexo 120

Script con Openseespy – Columna Existente. – MODELACIÓN DE COLUMNA FEM

```
# MODELACIÓN DE COLUMNA FEM
##### CONFIGURACIÓN DE LIBRERÍAS Y MODELO BASE
# Importar dependencias principales
import openseespy.opensees as ops
import opsvis as opsv
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
import pandas as pd
import math
from functools import reduce
import matplotlib.patches as patches
from matplotlib.patches import Patch

# Configurar backend gráfico interactivo
%matplotlib widget

# Aplicar estilo visual profesional
plt.style.use("seaborn-v0_8")

# =====
# INICIALIZACIÓN DEL MODELO ESTRUCTURAL
# =====
# Sistema de Coordenadas: 2D (NDM=2) con 3 grados de libertad (NDF=3)
# DOF: [u_x, u_y,  $\theta_z$ ] (desplazamiento horizontal, vertical, rotación)

ops.wipe() # Limpiar cualquier modelo anterior
ops.model('basic', '-ndm', 2, '-ndf', 3)
```

```

##### BLOQUE 2: DEFINICIÓN DE SISTEMA DE UNIDADES CONSISTENTE [mm - N - MPa]
# Sistema Consistente: [mm, N, MPa]
# Derivadas: [mm2, mm3, kN, s]

cm = 1                # Centímetro [1 cm]
kgf = 1               # Kilofuerza [base]
s = 1                 # Segundo [base]
N = kgf * cm / s**2  # Newton [N]
kN = 1000 * N        # Kilonewton [kN]
mm = 0.1 * cm        # Milímetro [mm]
m = 100 * cm         # Metro [m]

# =====
# BLOQUE 1: DEFINICIÓN DE IDENTIFICADORES Y GEOMETRÍA
# =====

# -----
# 1. IDENTIFICADORES DE MATERIALES (Tags)
# -----
tag_steelMat      = 1      # Acero longitudinal (Steel02)
tag_rebarsteel    = 18     # Acero longitudinal (ReinforcingSteel)
tag_coreMat_ext   = 2      # Núcleo original extremos
tag_coverMat_orig = 3      # Recubrimiento original
tag_coreMat_cnt   = 4      # Núcleo original centro
tag_coverMat_new  = 5      # Recubrimiento jacket
tag_coreMat_jext  = 6      # Núcleo jacket extremos
tag_coreMat_jcnt  = 7      # Núcleo jacket centro
tag_dummy         = 30     # Material nulo (picado)

# -----
# 2. DIMENSIONES GLOBALES [mm]
# -----
# Sección transversal de la columna original
B_orig, H_orig = 300, 300 # Ancho x Alto [mm]
t_B, t_H       = 75, 75  # Espesor del encamisado (Jacket) [mm]

# Dimensiones totales
B_tot = B_orig + 2*t_B    # Ancho total [mm]
H_tot = H_orig + 2*t_H    # Alto total [mm]

# Recubrimientos Tabla 20.5.1.3.1 - ACI 318-25
cover_orig = 40           # Recubrimiento original [mm]
cover_new  = 40           # Recubrimiento jacket [mm]

# -----
# 3. DIMENSIONES DEL NÚCLEO CONFINADO (hasta eje del estribo)
# -----
# Columna Original
B_nucleo = B_orig - 2*cover_orig
H_nucleo = H_orig - 2*cover_orig

# Columna Encamisada (Jacket)
L1_jackB = (B_tot) - 2*cover_new
L2_jackH = (H_tot) - 2*cover_new

# -----
# 4. DIMENSIONES LONGITUDINALES [mm]
# -----
L_col   = 3600            # Altura de análisis de la columna [mm]
Luz_col = 6 * 1000       # Luz libre (distancia entre apoyos reales) [mm]

# -----
# 5. REPORTE DE GEOMETRÍA EN CONSOLA
# -----
print("\n" + "="*70)
print("PARÁMETROS GEOMÉTRICOS GLOBALES")
print("="*70)
print(f"Sección Original:          {B_orig} x {H_orig} mm")

```

```

print(f"Núcleo Original:      {B_nucleo} x {H_nucleo} mm")
print(f"Sección Total (Jacket): {B_tot} x {H_tot} mm")
print(f"Altura del modelo:      {L_col} mm")
print(f"Luz libre:              {Luz_col} mm")
print("="*70 + "\n")
##### BLOQUE 2-A: VARIABLES DE CONTROL Y CONFIGURACIÓN

# -----
# 1. BANDERAS DE CONTROL DEL ANÁLISIS
# -----
# Determinan qué no-linealidades y características se incluyen en el modelo.

ACEROREFUERZO = True   # True: Activa modelo avanzado (ReinforcingSteel) | False:
Steel02
USAR_PDELTA    = True   # True: Considera efectos de segundo orden (Geometría No
Lineal)
ACEROOFF       = False  # True: Reduce el área de acero a casi cero (Check Modal)
INCLUIR_CORTE = True   # True: Incluye deformación por corte (SectionAggregator)

# Banderas Opcionales (Activar según fase de análisis)
# MODALCHECK   = True   # Solo para verificación modal (Comparativa ETABS)
# HISTERESIS   = True   # Activa protocolos cíclicos
# PUSHOVER     = True   # Activa análisis estático no lineal (Pushover)

# -----
# 2. CONFIGURACIÓN DE MULTIPLICADORES
# -----
# Factor de reducción de rigidez para elementos desactivados.

QuitAcero = 1.0        # Valor por defecto (Acero activo)

if ACEROOFF:
    QuitAcero = 1.0e-6
    print(">> AVISO: Modo ACEROOFF activo. El refuerzo longitudinal se ha anulado
virtualmente.")
##### BLOQUE 2: DEFINICIÓN DE MATERIALES Y GEOMETRÍA DE REFUERZO

# -----
# 1. MODELOS CONSTITUTIVOS DEL ACERO
# -----
print("\n" + "-"*70)
print("DEFINICIÓN DE ACERO LONGITUDINAL")
print("-"*70)

# 1.1 Modelo Base: Steel02 (Menegotto-Pinto)
fy_s = 420.0 # Esfuerzo de fluencia [MPa]
Es   = 2.0e5 # Módulo de elasticidad [MPa]

ops.uniaxialMaterial('Steel02', tag_steelMat, fy_s, Es, 0.01, 18.0, 0.925, 0.15)
print(f"✓ Material Steel02 (Tag {tag_steelMat}): fy = {fy_s} MPa")

# 1.2 Modelo Avanzado: ReinforcingSteel (Opcional)
if ACEROREFUERZO:
    fy_rs, fu_rs = 420.0, 630.0
    Esh_rs = 2.0e3
    eps_sh, eps_ult = 0.015, 0.12
    # Parámetros de pandeo (GABuck)
    lsr, beta, r, gamma = 8.0, 0.5, 0.85, 0.25

    ops.uniaxialMaterial('ReinforcingSteel', tag_rebarsteel,
                        fy_rs, fu_rs, Es, Esh_rs, eps_sh, eps_ult,
                        '-GABuck', lsr, beta, r, gamma)

    print(f"✓ Material ReinforcingSteel (Tag {tag_rebarsteel}): Activado (Pandeo
incluido).")
else:
    tag_rebarsteel = tag_steelMat
    print(f"✓ Material ReinforcingSteel: Desactivado (Se usa Steel02).")

```

```

# -----
# 2. CONFIGURACIÓN DE ÁREAS (MODO ACEROOFF)
# -----
QuitAcero = 1.0

if ACEROFF:
    # Reduce el área de acero a un valor despreciable para análisis modal puro
    QuitAcero = 1.0e-6
    print(">> AVISO: Modo ACEROFF activo. Refuerzo virtualmente eliminado.")

# -----
# 3. GEOMETRÍA DE ARMADURA - COLUMNA ORIGINAL
# -----
# Diámetros nominales
phiBar4 = 12.0 * QuitAcero # Barras en esquinas [mm]
phiBar = 12.0 * QuitAcero # Barras en caras intermedias [mm]

# Cantidad de barras intermedias (por cara)
phi_dist_B = 1 # Barras adicionales cara B
phi_dist_H = 1 # Barras adicionales cara H

# Espaciamiento libre entre barras [mm]
phi_sep_B = B_nucleo / (phi_dist_B + 1)
phi_sep_H = H_nucleo / (phi_dist_H + 1)

# Áreas transversales [mm²]
Abar4 = np.pi * (phiBar4 / 2.0)**2
Abar = np.pi * (phiBar / 2.0)**2

# -----
# 4. GEOMETRÍA DE ARMADURA - JACKET (ENCAMISADO)
# -----
phiBar4_jack = 14.0 * QuitAcero
phiBar_jack = 14.0 * QuitAcero

phi_dist_B_jack = 1
phi_dist_H_jack = 1

phi_sep_B_jack = L1_jackB / (phi_dist_B_jack + 1)
phi_sep_H_jack = L2_jackH / (phi_dist_H_jack + 1)

Abar4_jack = np.pi * (phiBar4_jack / 2.0)**2
Abar_jack = np.pi * (phiBar_jack / 2.0)**2

# -----
# 5. CÁLCULO Y VERIFICACIÓN DE CUANTÍAS (NEC-SE-HM)
# -----

# --- 5.1 Cálculo Columna Original ---
As_orig = (4 * Abar4) + (2 * phi_dist_H * Abar) + (2 * phi_dist_B * Abar)
Ag_orig = B_orig * H_orig
rho_orig = As_orig / Ag_orig

# --- 5.2 Cálculo Columna Encamisada (Global) ---
As_jack = (4 * Abar4_jack) + (2 * phi_dist_H_jack * Abar_jack) + (2 *
phi_dist_B_jack * Abar_jack)
Ag_tot = B_tot * H_tot
rho_global = (As_orig + As_jack) / Ag_tot

# --- 5.3 Reporte Técnico en Consola ---
print("\n" + "="*70)
print("📄 REPORTE TÉCNICO: CUANTÍAS Y ARMADO")
print("="*70)

# A. Reporte Original
print(f"COLUMNA ORIGINAL ({B_orig}x{H_orig} mm):")
print(f" - As Total: {As_orig:.2f} mm²")

```

```

print(f" - Cuantía Real: {rho_orig*100:.2f} %")

if rho_orig < 0.01:
    print(" ⚠ ALERTA: Cuantía baja (< 1%). Incumple NEC-SE-HM.")
elif rho_orig > 0.03:
    print(" ⚠ ALERTA: Cuantía excesiva (> 3%). Posible comportamiento frágil.")
else:
    print(" ✅ VERIFICADO: Cuantía dentro del rango normativo (1% - 3%).")

print("-" * 40)

# B. Reporte Jacket
print(f"COLUMNA ENCAMISADA ({B_tot}x{H_tot} mm):")
print(f" - As Adicional (Jacket): {As_jack:.2f} mm²")
print(f" - Cuantía Global Final: {rho_global*100:.2f} %")

if rho_global < 0.01:
    print(" ⚠ ALERTA: Cuantía global baja (< 1%).")
elif rho_global > 0.03:
    print(" ⚠ ALERTA: Cuantía global alta (> 3%).")
else:
    print(" ✅ VERIFICADO: Cuantía global normativa.")

print("="*70 + "\n")
##### BLOQUE 3: PARÁMETROS DE CONFINAMIENTO Y HORMIGÓN

# -----
# 1. ACERO TRANSVERSAL (ESTRIBOS)
# -----
print("\n" + "-"*70)
print("1. DEFINICIÓN DE ACERO TRANSVERSAL (ESTRIBOS)")
print("-"*70)

fyh_orig = 420.0 # Fluencia estribos Original [MPa]
fyh_jack = 420.0 # Fluencia estribos Jacket [MPa]
Es0 = 2.0e5 # Módulo elástico [MPa]
haRatio = 0.01 # Razón de endurecimiento por deformación
mu = 1000.0 # Factor de ductilidad del acero de estribos

# Configuración Inicial (Manual)
phi_orig = 10.0 # Diámetro estribo Original [mm]
sepo_extremo = 100.0 # Separación en zona confinada (Lo) [mm]
sepo_centro = 200.0 # Separación en zona central [mm]

phi_jack = 10.0 # Diámetro estribo Jacket [mm]
sepj_extremo = 100.0
sepj_centro = 200.0

# -----
# 2. CÁLCULO AUTOMÁTICO DE ESPACIAMIENTO (NEC-SE-HM 4.3.4)
# -----
SEP_EXTRIMO_AUTO = True
SaveAcero=1
if ACEROOFF:
    SaveAcero = 1.0e+6
if SEP_EXTRIMO_AUTO:
    # --- Lógica de Diseño Automático ---

    # Diámetro mínimo longitudinal (referencia para 6*db)
    db_min_orig = min(phiBar*SaveAcero, phiBar4*SaveAcero)

    # A. ZONA CONFINADA (Lo)
    # Criterios NEC: Mínimo de (Dim/4, 6*db, 100mm)
    s_nec_1 = min(B_orig, H_orig) / 4.0
    s_nec_2 = 6 * db_min_orig
    s_nec_3 = 100.0 # Límite práctico normativo

```

```

# Selección del menor y redondeo constructivo a 5mm
s_calc_ext = min(s_nec_1, s_nec_2, s_nec_3)
sepo_extremo = float(int(s_calc_ext / 5) * 5)

# B. ZONA CENTRAL (No Confinada)
# Criterios NEC: Mínimo de (6*db, 150mm)
s_cent_1 = 6 * db_min_orig
s_cent_2 = 150.0
s_calc_cnt = min(s_cent_1, s_cent_2)
sepo_centro = float(int(s_calc_cnt / 5) * 5)

# Reporte de Diseño Automático
print("-" * 40)
print("DISEÑO AUTOMÁTICO DE ESTRIBOS (NEC 4.3.4)")
print(f" - Refuerzo Long. Menor: {db_min_orig:.1f} mm")
print(f" - Criterio Dim/4: {s_nec_1:.1f} mm")
print(f" - Criterio 6*db: {s_nec_2:.1f} mm")
print(f" 👉 SELECCIONADO (Lo): s = {sepo_extremo:.0f} mm (Zona Confinada)")
print(f" 👉 SELECCIONADO (Cnt): s = {sepo_centro:.0f} mm (Zona Central)")
print("-" * 40)

# Asignación por compatibilidad al Jacket
sepj_extremo = sepo_extremo
sepj_centro = sepo_centro

else:
# --- Lógica de Verificación (Comprobación de valores manuales) ---

# Referencia
db_min_orig = min(phiBar*SaveAcero, phiBar4*SaveAcero)

# A. Verificación Zona Confinada
s_nec_1 = min(B_orig, H_orig) / 4.0
s_nec_2 = 6 * db_min_orig
s_nec_3 = 100.0
s_limite_ext = float(int(min(s_nec_1, s_nec_2, s_nec_3) / 5) * 5)

if sepo_extremo > s_limite_ext:
print(f" ⚠️ ADVERTENCIA: Espaciamiento en zona confinada ({sepo_extremo} mm) excede NEC.")
print(f" Se recomienda máximo: {s_limite_ext} mm.")

# B. Verificación Zona Central
s_cent_1 = 6 * db_min_orig
s_cent_2 = 150.0
s_limite_cnt = float(int(min(s_cent_1, s_cent_2) / 5) * 5)

if sepo_centro > s_limite_cnt:
print(f" ⚠️ ADVERTENCIA: Espaciamiento en zona central ({sepo_centro} mm) excede NEC.")
print(f" Se recomienda máximo: {s_limite_cnt} mm.")

# Reporte Final de Estribos Seleccionados
print("\nCONFIGURACIÓN FINAL DE ESTRIBOS:")
print(f" Columna Original: Ø{phi_orig:.0f}mm @ {sepo_extremo:.0f}/{sepo_centro:.0f} mm")
print(f" Columna Jacket: Ø{phi_jack:.0f}mm @ {sepj_extremo:.0f}/{sepj_centro:.0f} mm")

# -----
# 3. PROPIEDADES DEL HORMIGÓN (CONFINADO Y NO CONFINADO)
# -----
print("\n" + "-"*70)
print("3. DEFINICIÓN DE MATERIALES DE HORMIGÓN")
print("-"*70)

```

```

# 3.1 Parámetros Básicos
fc = 21.0 # f'c Original [MPa]
Ec = 4700.0 * (fc ** 0.5) # Módulo elástico (NEC-SE-HM) [MPa]

fc_jack = 28.0 # f'c Jacket [MPa]
Ec_jack = 4700.0 * (fc_jack ** 0.5)

eps_cu_val = 0.03 # Deformación última del hormigón confinado
nu = 0.2 # Coeficiente de Poisson

print(f"Hormigón Original: f'c = {fc} MPa | Ec = {Ec:.0f} MPa")
print(f"Hormigón Jacket: f'c = {fc_jack} MPa | Ec = {Ec_jack:.0f} MPa")

# 3.2 Hormigón No Confinado (Concrete02 - Recubrimiento)
# epsU: Deformación última (-0.005)
# lam: Relación de resistencia remanente (20%)
epsU, lam = -0.005, 0.2
# eps0: Deformación a máxima resistencia (estandar:-0.002)
# eps0 = 2*fc / Ec (Estándar de Mander Unconfined)
eps0_orig = -2.0 * fc / Ec
eps0_jack = -2.0 * fc_jack / Ec_jack
# Resistencia a la Tensión ACI - 19.2.3.1
# Módulo de Rotura fr = 0.62 * sqrt(fc) para hormigón normal
ft_orig = 0.62 * (fc ** 0.5)
ft_new = 0.62 * (fc_jack ** 0.5)

# 0.05 * (-fc) : Resistencia al aplastamiento del hormigón en compresión después
de la máxima resistencia
res_stress_orig = 0.05 * (-fc) # 5% remanente (casi cero)
res_stress_new = 0.05 * (-fc_jack)
# ft_orig / 0.002: Rigidez de ablandamiento por tensión, etu= 0.002: es
Deformación Última Efectiva a Tracción)
print(f"Deformación a máxima resistencia eps0_orig: {eps0_orig:.6f}, eps0_jack:
{eps0_jack:.6f}")
print(f"Resistencia a la Tensión ft_orig: {ft_orig:.2f} MPa, ft_new: {ft_new:.2f}
MPa")
print(f"Resistencia remanente compresión del encamisado original:
{res_stress_orig:.2f} MPa, del jacket: {res_stress_new:.2f} MPa")

ops.uniaxialMaterial('Concrete02', tag_coverMat_orig,
                    -fc, eps0_orig, res_stress_orig, epsU, lam, ft_orig, ft_orig
/ 0.002)

ops.uniaxialMaterial('Concrete02', tag_coverMat_new,
                    -fc_jack, eps0_jack, res_stress_new, epsU, lam, ft_new,
ft_new / 0.002)

print(f"✓ Material Recubrimiento (Concrete02) creado.")

# 3.3 Material Dummy (Elástico de rigidez despreciable)
ops.uniaxialMaterial('Elastic', tag_dummy, 1.0e-3)
print(f"✓ Material Dummy creado.")
print("-"*70 + "\n")
##### BLOQUE 4: MODELOS DE HORMIGÓN CONFINADO (ConfinedConcrete01)

# Modelo de Mander para secciones rectangulares con estribos.
# Calcula automáticamente el aumento de resistencia (f'cc) y ductilidad.

print("\n" + "-"*70)
print("4. DEFINICIÓN DE MATERIALES CONFINADOS")
print("-"*70)

# -----
# 4.1 COLUMNA ORIGINAL - EXTREMOS (Mayor Confinamiento)
# -----
ops.uniaxialMaterial('ConfinedConcrete01', tag_coreMat_ext, 'R', -fc, Ec,
                    '-eps_cu_val', eps_cu_val, '-nu', nu,
                    B_nucleo, H_nucleo, phi_orig, sepo_extremo,

```

```

fyh_orig, Es0, haRatio, mu, 16.0)

print(f"✓ Material Confinado Original EXTREMOS (Tag {tag_coreMat_ext})")
print(f" Núcleo: {B_nucleo} x {H_nucleo} mm | Estribo: Ø{phi_orig:.0f} @
{sepo_extremo:.0f} mm")

# -----
# 4.2 COLUMNNA ORIGINAL - CENTRO (Menor Confinamiento)
# -----
ops.uniaxialMaterial('ConfinedConcrete01', tag_coreMat_cnt, 'R', -fc, Ec,
                    '-epscu', epscu_val, '-nu', nu,
                    B_nucleo, H_nucleo, phi_orig, sepo_centro,
                    fyh_orig, Es0, haRatio, mu, 16.0)

print(f"✓ Material Confinado Original CENTRO (Tag {tag_coreMat_cnt})")
print(f" Núcleo: {B_nucleo} x {H_nucleo} mm | Estribo: Ø{phi_orig:.0f} @
{sepo_centro:.0f} mm")

# -----
# 4.3 JACKET - EXTREMOS (Mayor Confinamiento)
# -----
ops.uniaxialMaterial('ConfinedConcrete01', tag_coreMat_jext,
                    'R', -fc_jack, Ec_jack, '-epscu', epscu_val, '-nu', nu,
                    L1_jackB, L2_jackH, phi_jack, sepj_extremo,
                    fyh_jack, Es0, haRatio, mu, 16.0)

print(f"\n✓ Material Confinado Jacket EXTREMOS (Tag {tag_coreMat_jext})")
print(f" Núcleo: {L1_jackB:.0f} x {L2_jackH:.0f} mm | Estribo: Ø{phi_jack:.0f} @
{sepj_extremo:.0f} mm")

# -----
# 4.4 JACKET - CENTRO (Menor Confinamiento)
# -----
ops.uniaxialMaterial('ConfinedConcrete01', tag_coreMat_jcnt,
                    'R', -fc_jack, Ec_jack, '-epscu', epscu_val, '-nu', nu,
                    L1_jackB, L2_jackH, phi_jack, sepj_centro,
                    fyh_jack, Es0, haRatio, mu, 16.0)

print(f"✓ Material Confinado Jacket CENTRO (Tag {tag_coreMat_jcnt})")
print(f" Núcleo: {L1_jackB:.0f} x {L2_jackH:.0f} mm | Estribo: Ø{phi_jack:.0f} @
{sepj_centro:.0f} mm")

print("="*70 + "\n")
#### BLOQUE 5: DISCRETIZACIÓN AUTOMÁTICA DE SECCIONES

print("\n" + "-"*70)
print("5. GENERACIÓN Y REFINAMIENTO DE MALLA DE FIBRAS")
print("-"*70)

# 1. Parámetro de Control de Malla
# -----
# Factor entero para subdividir la celda base calculada por el MCD.
# 1 = Malla base (MCD puro).
# 2 = Refinamiento medio (Mitad del tamaño base).
# 4 = Alta precisión (Cuarto del tamaño base).
FACTOR_REFINAMIENTO = 1 # <-- ;MODIFICAR VALOR SEGÚN NECESIDAD!

# 2. Función Auxiliar: MCD
def mcd( numeros ):
    """Calcula el Máximo Común Divisor de una lista de enteros."""
    return reduce( math.gcd, numeros )

# 3. Definición de Dimensiones Críticas [mm]
# Se incluyen todas las geometrías que definen cambios de material
list_B = [int(B_orig), int(B_tot), int(cover_new), int(cover_orig), int(t_B),
int(L1_jackB)]

```

```

list_H = [int(H_orig), int(H_tot), int(cover_new), int(cover_orig), int(t_H),
int(L2_jackH)]

# 4. Cálculo de la Celda Base (Matemática Pura)
base_mcd_B = mcd(list_B)
base_mcd_H = mcd(list_H)

# 5. Aplicación del Refinamiento (Ingeniería)
# Tamaño final de la fibra = Tamaño Base / Factor
size_fib_B = base_mcd_B / FACTOR_REFINAMIENTO
size_fib_H = base_mcd_H / FACTOR_REFINAMIENTO

# 6. Cálculo de Densidad de Mallado Global
# Número total de fibras en la sección transversal completa
nfibB = int(B_tot / size_fib_B)
nfibH = int(H_tot / size_fib_H)

# Factor de escala (Fibras por milímetro)
# Vital para calcular cuántas fibras entran en cada parche específico
fac_nfibB = nfibB / B_tot
fac_nfibH = nfibH / H_tot

# 7. Reporte Técnico de Discretización
print(f"Parámetros de Mallado:")
print(f" - MCD Base (Matemático):    {base_mcd_B} x {base_mcd_H} mm")
print(f" - Factor de Refinamiento:    {FACTOR_REFINAMIENTO}")
print(f" - Tamaño Final de Fibra:    {size_fib_B:.2f}x {size_fib_H:.2f} mm")

print(f"\nDensidad de Fibras Resultante:")
print(f" - Dirección B: {nfibB} fibras totales ({fac_nfibB:.4f} fib/mm)")
print(f" - Dirección H: {nfibH} fibras totales ({fac_nfibH:.4f} fib/mm)")
print(f" - Resolución:  ~{nfibB * nfibH} fibras por sección transversal")

if (nfibB * nfibH) < 100:
    print("  ⚠ ALERTA: Malla muy gruesa. Considere aumentar
FACTOR_REFINAMIENTO.")
elif (nfibB * nfibH) > 10000:
    print("  ⚠ AVISO: Malla muy densa. El análisis podría ser lento.")
else:
    print("  ✅ VERIFICADO: Densidad de malla adecuada para análisis de fibra.")

print("="*70 + "\n")
##### BLOQUE 6-a: DEFINICIÓN DE SECCIÓN ORIGINAL - EXTREMOS (TAG 20)

# Sección crítica (rótula plástica potencial).
# Composición: Hormigón Confinado (Núcleo) + Recubrimiento + Acero.

print("\n" + "-"*70)
print("6-a. GENERACIÓN DE SECCIÓN 20: COLUMNA ORIGINAL (EXTREMOS)")
print("-"*70)

# 1. Definición de la Sección Fiber
ops.section('Fiber', 20, '-GJ', 1.0e12)

# 2. Definición de Parches de Hormigón (Patches)
# -----

# A. Recubrimiento (Hormigón No Confinado)
# Cálculo de discretización basado en el factor de mallado
fibrasB1, fibrasH1 = int(cover_orig * fac_nfibB), int(H_nucleo * fac_nfibH)

# Parche Inferior
ops.patch('rect', tag_coverMat_orig, fibrasB1, fibrasH1,
-B_orig/2, -H_nucleo/2, -B_nucleo/2, H_nucleo/2)
# Parche Superior
ops.patch('rect', tag_coverMat_orig, fibrasB1, fibrasH1,
B_nucleo/2, -H_nucleo/2, B_orig/2, H_nucleo/2)

```

```

# Parches Laterales (Izquierda / Derecha)
fibrasB2, fibrasH2 = int(B_orig * fac_nfibB), int(cover_orig * fac_nfibH)

# Parche Izquierdo
ops.patch('rect', tag_coverMat_orig, fibrasB2, fibrasH2,
          -B_orig/2, -H_orig/2, B_orig/2, -H_nucleo/2)
# Parche Derecho
ops.patch('rect', tag_coverMat_orig, fibrasB2, fibrasH2,
          -B_orig/2, H_nucleo/2, B_orig/2, H_orig/2)

# B. Núcleo (Hormigón Confinado - Extremos)
# -----
fibrasB3, fibrasH3 = int(B_nucleo * fac_nfibB), int(H_nucleo * fac_nfibH)

ops.patch('rect', tag_coreMat_ext, fibrasB3, fibrasH3,
          -B_nucleo/2, -H_nucleo/2, B_nucleo/2, H_nucleo/2)

# 3. Definición de Capas de Acero (Layers)
# -----

# Barras en Esquinas
ops.layer('straight', tag_rebarsteel, 2, Abar4,
          -B_nucleo/2, H_nucleo/2, -B_nucleo/2, -H_nucleo/2)
ops.layer('straight', tag_rebarsteel, 2, Abar4,
          B_nucleo/2, H_nucleo/2, B_nucleo/2, -H_nucleo/2)

# Barras Intermedias - Caras Verticales (H)
ops.layer('straight', tag_rebarsteel, phi_dist_H, Abar,
          -B_nucleo/2, H_nucleo/2 - phi_sep_H,
          -B_nucleo/2, -H_nucleo/2 + phi_sep_H)
ops.layer('straight', tag_rebarsteel, phi_dist_H, Abar,
          B_nucleo/2, H_nucleo/2 - phi_sep_H,
          B_nucleo/2, -H_nucleo/2 + phi_sep_H)

# Barras Intermedias - Caras Horizontales (B)
ops.layer('straight', tag_rebarsteel, phi_dist_B, Abar,
          B_nucleo/2 - phi_sep_B, -H_nucleo/2,
          -B_nucleo/2 + phi_sep_B, -H_nucleo/2)
ops.layer('straight', tag_rebarsteel, phi_dist_B, Abar,
          B_nucleo/2 - phi_sep_B, H_nucleo/2,
          -B_nucleo/2 + phi_sep_B, H_nucleo/2)

print("✓ Sección 20 generada correctamente.")

# 4. Verificación Gráfica (Opsvis)
# -----
# Reconstrucción de la lista para plot (Espejo exacto de la definición)

fib_sec_ext = [
    ['section', 'Fiber', 20, '-GJ', 1.0e12],
    # Recubrimientos
    ['patch', 'rect', tag_coverMat_orig, fibrasB1, fibrasH1, -B_orig/2, -
     H_nucleo/2, -B_nucleo/2, H_nucleo/2],
    ['patch', 'rect', tag_coverMat_orig, fibrasB1, fibrasH1, B_nucleo/2, -
     H_nucleo/2, B_orig/2, H_nucleo/2],
    ['patch', 'rect', tag_coverMat_orig, fibrasB2, fibrasH2, -B_orig/2, -
     H_orig/2, B_orig/2, -H_nucleo/2],
    ['patch', 'rect', tag_coverMat_orig, fibrasB2, fibrasH2, -B_orig/2,
     H_nucleo/2, B_orig/2, H_orig/2],
    # Núcleo
    ['patch', 'rect', tag_coreMat_ext, fibrasB3, fibrasH3, -B_nucleo/2, -
     H_nucleo/2, B_nucleo/2, H_nucleo/2],
    # Acero
    ['layer', 'straight', tag_rebarsteel, 2, Abar4, -B_nucleo/2, H_nucleo/2, -
     B_nucleo/2, -H_nucleo/2],
    ['layer', 'straight', tag_rebarsteel, 2, Abar4, B_nucleo/2, H_nucleo/2,
     B_nucleo/2, -H_nucleo/2],

```

```

    ['layer', 'straight', tag_rebarsteel, phi_dist_H, Abar, -B_nucleo/2,
H_nucleo/2 - phi_sep_H, -B_nucleo/2, -H_nucleo/2 + phi_sep_H],
    ['layer', 'straight', tag_rebarsteel, phi_dist_H, Abar, B_nucleo/2,
H_nucleo/2 - phi_sep_H, B_nucleo/2, -H_nucleo/2 + phi_sep_H],
    ['layer', 'straight', tag_rebarsteel, phi_dist_B, Abar, B_nucleo/2 -
phi_sep_B, -H_nucleo/2, -B_nucleo/2 + phi_sep_B, -H_nucleo/2],
    ['layer', 'straight', tag_rebarsteel, phi_dist_B, Abar, B_nucleo/2 -
phi_sep_B, H_nucleo/2, -B_nucleo/2 + phi_sep_B, H_nucleo/2]
]

# Generación del Gráfico
tags_sec_ext = [item[2] for item in fib_sec_ext]
matcolor_ext = [f'C{i}' for i, _ in enumerate(tags_sec_ext)]

# Llamada a opsvs (código original intacto)
opsv.plot_fiber_section(fib_sec_ext, matcolor=matcolor_ext)

# Configuración de ejes (Estilo profesional)
plt.title('Sección Original - Zona Confinada (Tag 20)', fontweight='bold',
pad=15)
plt.xlabel('Ancho Y [mm]', fontweight='bold')
plt.ylabel('Altura Z [mm]', fontweight='bold')
plt.grid(True, linestyle='--', linewidth=0.5, alpha=0.7)
plt.axis('equal')
plt.show()

print("✓ Gráfico de verificación generado.")
print("="*70 + "\n")
##### BLOQUE 6-b: DEFINICIÓN DE SECCIÓN ORIGINAL - CENTRO (TAG 21)
# Sección para la zona central de la columna (menor confinamiento).
# Diferencia: El núcleo utiliza el material 'tag_coreMat_cnt'.

print("\n" + "-"*70)
print("6-b. GENERACIÓN DE SECCIÓN 21: COLUMNA ORIGINAL (CENTRO)")
print("-"*70)

# 1. Definición de la Sección Fiber
ops.section('Fiber', 21, '-GJ', 1.0e12)

# 2. Definición de Parches de Hormigón (Patches)
# -----

# --- Mismos patches de recubrimiento ---
# Parches Inferior / Superior
ops.patch('rect', tag_coverMat_orig, fibrasB1, fibrasH1,
-B_orig/2, -H_nucleo/2, -B_nucleo/2, H_nucleo/2)
ops.patch('rect', tag_coverMat_orig, fibrasB1, fibrasH1,
B_nucleo/2, -H_nucleo/2, B_orig/2, H_nucleo/2)

# Parches Izquierda / Derecha
ops.patch('rect', tag_coverMat_orig, fibrasB2, fibrasH2,
-B_orig/2, -H_orig/2, B_orig/2, -H_nucleo/2)
ops.patch('rect', tag_coverMat_orig, fibrasB2, fibrasH2,
-B_orig/2, H_nucleo/2, B_orig/2, H_orig/2)

# --- Único cambio: Núcleo CENTRO (Material: tag_coreMat_cnt) ---
ops.patch('rect', tag_coreMat_cnt, fibrasB3, fibrasH3,
-B_nucleo/2, -H_nucleo/2, B_nucleo/2, H_nucleo/2)

# 3. Definición de Capas de Acero (Layers)
# -----

# --- Mismo acero (armadura idéntica) ---

# Barras en Esquinas
ops.layer('straight', tag_rebarsteel, 2, Abar4,
-B_nucleo/2, H_nucleo/2, -B_nucleo/2, -H_nucleo/2)
ops.layer('straight', tag_rebarsteel, 2, Abar4,
B_nucleo/2, H_nucleo/2, B_nucleo/2, -H_nucleo/2)

```

```

# Barras Intermedias - Caras Verticales
ops.layer('straight', tag_rebarsteel, phi_dist_H, Abar,
          -B_nucleo/2, H_nucleo/2 - phi_sep_H,
          -B_nucleo/2, -H_nucleo/2 + phi_sep_H)
ops.layer('straight', tag_rebarsteel, phi_dist_H, Abar,
          B_nucleo/2, H_nucleo/2 - phi_sep_H,
          B_nucleo/2, -H_nucleo/2 + phi_sep_H)

# Barras Intermedias - Caras Horizontales
ops.layer('straight', tag_rebarsteel, phi_dist_B, Abar,
          B_nucleo/2 - phi_sep_B, -H_nucleo/2,
          -B_nucleo/2 + phi_sep_B, -H_nucleo/2)
ops.layer('straight', tag_rebarsteel, phi_dist_B, Abar,
          B_nucleo/2 - phi_sep_B, H_nucleo/2,
          -B_nucleo/2 + phi_sep_B, H_nucleo/2)

print("✓ Sección 21 generada correctamente.")

# 4. Verificación Gráfica (Opsvis)
# -----
fib_sec_cnt = [
    ['section', 'Fiber', 21, '-GJ', 1.0e12],
    ['patch', 'rect', tag_coverMat_orig, fibrasB1, fibrasH1, -B_orig/2, -
H_nucleo/2, -B_nucleo/2, H_nucleo/2],
    ['patch', 'rect', tag_coverMat_orig, fibrasB1, fibrasH1, B_nucleo/2, -
H_nucleo/2, B_orig/2, H_nucleo/2],
    ['patch', 'rect', tag_coverMat_orig, fibrasB2, fibrasH2, -B_orig/2, -H_orig/2,
B_orig/2, -H_nucleo/2],
    ['patch', 'rect', tag_coverMat_orig, fibrasB2, fibrasH2, -B_orig/2,
H_nucleo/2, B_orig/2, H_orig/2],
    ['patch', 'rect', tag_coreMat_cnt, fibrasB3, fibrasH3, -B_nucleo/2, -
H_nucleo/2, B_nucleo/2, H_nucleo/2],
    ['layer', 'straight', tag_rebarsteel, 2, Abar4, -B_nucleo/2, H_nucleo/2, -
B_nucleo/2, -H_nucleo/2],
    ['layer', 'straight', tag_rebarsteel, 2, Abar4, B_nucleo/2, H_nucleo/2,
B_nucleo/2, -H_nucleo/2],
    ['layer', 'straight', tag_rebarsteel, phi_dist_H, Abar, -B_nucleo/2,
H_nucleo/2 - phi_sep_H, -B_nucleo/2, -H_nucleo/2 + phi_sep_H],
    ['layer', 'straight', tag_rebarsteel, phi_dist_H, Abar, B_nucleo/2, H_nucleo/2
- phi_sep_H, B_nucleo/2, -H_nucleo/2 + phi_sep_H],
    ['layer', 'straight', tag_rebarsteel, phi_dist_B, Abar, B_nucleo/2 -
phi_sep_B, -H_nucleo/2, -B_nucleo/2 + phi_sep_B, -H_nucleo/2],
    ['layer', 'straight', tag_rebarsteel, phi_dist_B, Abar, B_nucleo/2 -
phi_sep_B, H_nucleo/2, -B_nucleo/2 + phi_sep_B, H_nucleo/2]
]

# Generación del Gráfico
tags_sec_cnt = [item[2] for item in fib_sec_cnt]
matcolor_cnt = [f'C{i}' for i, _ in enumerate(tags_sec_cnt)]

# Llamada a opsvis (código original intacto)
opsv.plot_fiber_section(fib_sec_cnt, matcolor=matcolor_cnt)

# Configuración de ejes (Estilo profesional)
plt.title('Sección Original - Zona Central (Tag 21)', fontweight='bold', pad=15)
plt.xlabel('Ancho Y [mm]', fontweight='bold')
plt.ylabel('Altura Z [mm]', fontweight='bold')
plt.grid(True, linestyle='--', linewidth=0.5, alpha=0.7)
plt.axis('equal')
plt.show()

print("✓ Gráfico de verificación generado.")
print("=*70 + "\n")
##### BLOQUE 6-c: AGREGAR DEFORMACIÓN POR CORTE (SectionAggregator)
# Inclusión de comportamiento elástico lineal a corte (Vy) para modelar
# deformaciones tipo Timoshenko. Se agregan a las secciones de fibra (20 y 21).

```

```

print("\n" + "-"*70)
print("6-c. DEFINICIÓN DE PROPIEDADES DE CORTE (Timoshneko)")
print("-"*70)

# 1. Cálculo de Rigidez a Corte (GA)
# -----
nu_conc = 0.2 # Coeficiente de Poisson del hormigón

# Módulo de Corte [MPa]
G_conc = Ec / (2 * (1 + nu_conc))

# Área de Corte Efectiva [mm²]
# Factor de forma 5/6 para secciones rectangulares
Ag_col = B_orig * H_orig
Ash_col = (5.0 / 6.0) * Ag_col

# Rigidez a Corte Total [N] (K_shear = G * Ash)
K_shear = G_conc * Ash_col

print(f"Propiedades Calculadas:")
print(f" - Módulo de Corte (G): {G_conc:.2f} MPa")
print(f" - Área Efectiva (Ash): {Ash_col:.0f} mm² (5/6 Ag)")
print(f" - Rigidez a Corte (GA): {K_shear:.2E} N")

# 2. Definición del Material Elástico para Corte
# -----
tag_mat_shear = 900
ops.uniaxialMaterial('Elastic', tag_mat_shear, K_shear)

print(f"✓ Material Elástico para Corte creado (Tag {tag_mat_shear})")

# 3. Creación de Secciones Agregadas (Aggregator)
# -----
# Tag 22 = Sección 20 (Fibra Extremos) + Corte Vy
# Tag 23 = Sección 21 (Fibra Centro) + Corte Vy

ops.section('Aggregator', 22, tag_mat_shear, 'Vy', '-section', 20)
ops.section('Aggregator', 23, tag_mat_shear, 'Vy', '-section', 21)

print(f"\nSecciones Agregadas Generadas:")
print(f" ✓ Tag 22: Extremos (Fibra 20 + Rigidez GA)")
print(f" ✓ Tag 23: Centro (Fibra 21 + Rigidez GA)")

print("="*70 + "\n")
##### BLOQUE 7: ENSAMBLAJE DEL MODELO, DISCRETIZACIÓN Y ANÁLISIS DE GRAVEDAD
# 1. Configuración de Tags de Sección
# -----
if INCLUIR_CORTE:
    sec_ext_tag = 22 # Sección Extremos (Confinada + Corte)
    sec_cnt_tag = 23 # Sección Centro (Menos confinada + Corte)
    print(f" ♦ SECCIONES: Incluyendo deformación por CORTE (Tags {sec_ext_tag} y
{sec_cnt_tag})")
else:
    sec_ext_tag = 20 # Solo Flexión
    sec_cnt_tag = 21 # Solo Flexión
    print(f" ♦ SECCIONES: Solo FLEXIÓN (Tags {sec_ext_tag} y {sec_cnt_tag})")

# Limpieza del dominio
ops.wipeAnalysis()
ops.setTime(0.0)

# Variables de inicio
baseNew = 1
integNew = 1
elemNew = 1

# 2. Cálculo de Longitud de Confinamiento (Lo) - NEC-SE-HM

```

```

# -----
# Criterios:
# 1. Mayor dimensión de la sección
# 2. Un sexto de la luz libre
# 3. 450 mm

dim_max_seccion = max(B_orig, H_orig)
un_sexto_luz = Luz_col / 6.0
minimo_abs = 450.0

Lo = max(dim_max_seccion, un_sexto_luz, minimo_abs)

# Verificación de Columna Corta
if 2 * Lo >= L_col:
    print("⚠️ ADVERTENCIA: La columna es muy corta (Columna Corta).")
    print("   Se asignará confinamiento especial en toda la altura.")
    Lo = L_col / 2.0

L_centro = L_col - 2 * Lo

print("-" * 70)
print(f"DISCRETIZACIÓN LONGITUDINAL (NEC-SE-HM):")
print(f"  Dimensión Máx Sección : {dim_max_seccion:.1f} mm")
print(f"  Luz Libre / 6           : {un_sexto_luz:.1f} mm")
print(f"  Mínimo Normativo       : {minimo_abs:.1f} mm")
print(f"  --> Longitud Lo Calculada : {Lo:.1f} mm")
print(f"  --> Longitud Zona Central : {L_centro:.1f} mm")
print("-" * 70)

# 3. Transformación Geométrica
# -----
transfTag = 31
if USAR_PDELTA:
    # Corotational para capturar efectos P-Delta rigurosos
    ops.geomTransf('Corotational', transfTag)
    print("♦ TRANSFORMACIÓN: Corotational (P-Delta Riguroso)")
else:
    ops.geomTransf('Linear', transfTag)
    print("♦ TRANSFORMACIÓN: Linear (Sin P-Delta)")

# 4. Creación de Nodos y Elementos (3 Tramos)
# -----
# Nodo 1: Base (0.0)
# Nodo 2: Fin zona confinada inferior (Lo)
# Nodo 3: Inicio zona confinada superior (Lo + L_centro)
# Nodo 4: Tope (L_col)

# Nodo Base
ops.node(baseNew, 0.0, 0.0)
ops.fix(baseNew, 1, 1, 1) # Empotrado

# Nodos Intermedios y Tope
ops.node(baseNew + 1, 0.0, Lo)           # Fin Lo inferior
ops.node(baseNew + 2, 0.0, Lo + L_centro) # Fin zona central
ops.node(baseNew + 3, 0.0, L_col)        # Tope

# Elementos (BeamColumn con integración Legendre)
# Elemento 1: Zona Confinada Inferior
ops.beamIntegration('Legendre', integNew, sec_ext_tag, 5)
ops.element('forceBeamColumn', elemNew, baseNew, baseNew + 1, transfTag,
            integNew)

# Elemento 2: Zona Central
ops.beamIntegration('Legendre', integNew + 1, sec_cnt_tag, 5)
ops.element('forceBeamColumn', elemNew + 1, baseNew + 1, baseNew + 2, transfTag,
            integNew + 1)

```

```

# Elemento 3: Zona Confinada Superior
ops.beamIntegration('Legendre', integNew + 2, sec_ext_tag, 5)
ops.element('forceBeamColumn', elemNew + 2, baseNew + 2, baseNew + 3, transfTag,
integNew + 2)

# Actualización de IDs globales
nElem = 3
ID_nodo_tope = baseNew + nElem

print(f"✅ Elementos creados exitosamente (3 tramos).")

# 5. Cálculo de Masas y Cargas
# -----

# A. Carga del Edificio (Estimación Gravedad)
P_edificio = 0.25 * fc * B_orig * H_orig # [N]

# B. Peso Propio de la Columna
Vol_col = (B_orig * H_orig) * L_col # [mm³]
densidad_hormigon = 2.4e-9 * 9810 # [N/mm³]
W_columna = Vol_col * densidad_hormigon

# C. Carga Total (Pg)
P_g = P_edificio + (0.5 * W_columna)

# D. Masa Sísmica Total
g_grav = 9810.0 # [mm/s²]
m_lump = P_g / g_grav
print(f"Carga del Edificio: {P_edificio:.0f} N")
print(f"Carga Axial Total (P_g): {P_g:.0f} N")
print(f"Masa Sísmica Asignada: {m_lump:.4f} Ton")

# Asignación de masa al nodo tope (DOF: X, Y, Rz)
ops.mass(ID_nodo_tope, m_lump, m_lump, 0.0)

# 6. Aplicación de Gravedad (Pre-carga)
# -----

ops.timeSeries('Constant', 1)
ops.pattern('Plain', 1, 1)
ops.load(ID_nodo_tope, 0.0, -P_g, 0.0) # Carga vertical descendente

# Configuración del Análisis
ops.constraints('Plain')
ops.numberer('RCM')
ops.system('BandGeneral')
ops.test('NormDispIncr', 1.0e-6, 100)
ops.algorithm('Newton')
ops.integrator('LoadControl', 0.1) # 10 pasos de carga
ops.analysis('Static')

print(f" Aplicando gravedad...")
ok_grav = ops.analyze(10)

if ok_grav == 0:
    d_serv = ops.nodeDisp(ID_nodo_tope)
    print(f"✅ Gravedad aplicada exitosamente.")
    print(f" Desplazamiento Axial: {d_serv[1]:.4f} mm")

    # CONGELAR ESTADO (Vital para análisis posteriores)
    ops.loadConst('-time', 0.0)
    print("🛑 Estado de gravedad congelado. P-Delta inicializado.")
else:
    print("❌ ERROR: El análisis de gravedad no convergió.")

print("=*70 + "\n")

```

Anexo 121

Script con Openseespy – Columna Existente. - ANALISIS (M-C, Modal, Pushover, Factor de Agrietamiento)

```
# ANALISIS
##### BLOQUE 8-a: VALIDACIÓN MOMENTO-CURVATURA
# Ejecuta el análisis M-Phi sobre elementos "ZeroLength" aislados del modelo
# principal para no interferir con los IDs ni el estado de carga global.
# Objetivo: Verificar capacidad y ductilidad de las secciones definidas.

import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
import openseespy.opensees as ops

print("\n" + "-"*70)
print("8-a. VALIDACIÓN M-PHI: SECCIONES ORIGINALES (20 y 21)")
print("-"*70)

# 1. Verificación de Carga Axial de Servicio
# -----
# Se utiliza la carga P_g calculada previamente en el Bloque 7.
print(f" Carga Axial (P): {P_g/1000:.2f} kN")

# 2. Configuración del Análisis Comparativo
# -----
# Lista de tuplas: (Tag Sección, Nombre Técnico, Color Gráfico)

if INCLUIR_CORTE:
    lista_secciones = [
        (22, "Sección Extremos (Confinada)", "green"),
        (23, "Sección Centro (No Confinada)", "blue")
    ]
    print(f" ♦ SECCIONES: Incluyendo deformación por CORTE (Tags {sec_ext_tag} y
{sec_cnt_tag})")
else:
    lista_secciones = [
        (20, "Sección Extremos (Confinada)", "green"),
        (21, "Sección Centro (No Confinada)", "blue")
    ]
    print(f" ♦ SECCIONES: Solo FLEXIÓN (Tags {sec_ext_tag} y {sec_cnt_tag})")

# Inicialización del entorno gráfico
plt.figure(figsize=(9, 6))

# 3. Bucle de Análisis por Sección
# -----
for idx, (sec_tag, nombre_sec, color_sec) in enumerate(lista_secciones):
    print(f"\n👉 Analizando {nombre_sec} (Tag {sec_tag})...")

    # --- A. GENERACIÓN DE IDs ÚNICOS (Anti-Colisión) ---
    # Se usa un rango alto (5000+) para no interferir con el Bloque 7 (IDs 1-4)
    base_id = 5000 + (idx * 100)
    node_A = base_id
    node_B = base_id + 1
    ele_test = base_id + 50
    pat_axial = base_id + 10
    pat_mom = base_id + 20

    # --- B. PREPARACIÓN DEL DOMINIO ---
    # Se limpia el solver pero se preserva el modelo global existente
    ops.wipeAnalysis()
    ops.setTime(0.0)

    # --- C. CONSTRUCCIÓN DEL "PROBETERO" AISLADO ---
    # Coordenadas lejanas (10,000 m) para aislamiento visual/lógico
    ops.node(node_A, 10000.0 + idx*100, 0.0)
```

```

ops.node(node_B, 10000.0 + idx*100, 0.0)

# Restricciones:
# Nodo A: Totalmente fijo
# Nodo B: Libre solo en Rotación (DOF 3), Axial controlado por carga
ops.fix(node_A, 1, 1, 1)
ops.fix(node_B, 0, 1, 0)

# Creación del Elemento de Prueba
try:
    ops.element('zeroLengthSection', ele_test, node_A, node_B, sec_tag)
except:
    print(f"      ⚠ ERROR: La sección {sec_tag} no existe en memoria.
Saltando.")
    continue

# --- D. DEFINICIÓN DEL SISTEMA DE ANÁLISIS ---
ops.system('BandGeneral')
ops.numberer('Plain')
ops.constraints('Plain')
ops.test('NormDispIncr', 1.0e-8, 25, 0) # Tolerancia estricta
ops.algorithm('Newton')

# --- E. APLICACIÓN DE CARGA AXIAL ---
ops.timeSeries('Constant', pat_axial)
ops.pattern('Plain', pat_axial, pat_axial)
ops.load(node_B, -P_g, 0.0, 0.0)

ops.integrator('LoadControl', 1.0)
ops.analysis('Static')

if ops.analyze(1) != 0:
    print("      ✖ FALLO: No convergió la aplicación de carga axial.")
    # Limpieza de emergencia
    try:
        ops.remove('element', ele_test)
        ops.remove('node', node_A)
        ops.remove('node', node_B)
        ops.remove('loadPattern', pat_axial)
        ops.remove('timeSeries', pat_axial)
    except: pass
    continue

# --- F. APLICACIÓN DE MOMENTO (CONTROL DE DESPLAZAMIENTO) ---
ops.timeSeries('Linear', pat_mom)
ops.pattern('Plain', pat_mom, pat_mom)
ops.load(node_B, 0.0, 0.0, 1.0) # Momento unitario

# Configuración de Curvatura
max_k = 0.00015 # Curvatura máxima [rad/mm]
num_inc = 100 # Número de pasos
inc_k = max_k / num_inc

ops.integrator('DisplacementControl', node_B, 3, inc_k)
ops.analysis('Static')

# --- G. EJECUCIÓN Y REGISTRO ---
ks = [] # Curvatura
Ms = [] # Momento

for i in range(num_inc):
    ok = ops.analyze(1)
    if ok != 0:
        print(f"      ⚠ Convergencia alcanzada hasta paso {i}/{num_inc}")
        break

k = ops.nodeDisp(node_B, 3) # Curvatura

```

```

ops.reactions()
M = -ops.nodeReaction(node_A, 3)      # Momento Reactivo

ks.append(k)
Ms.append(M)

# --- H. PROCESAMIENTO Y GRÁFICA ---
if len(Ms) > 0:
    M_max_kNm = max(Ms) / 1.0e6
    print(f"    ✓ {nombre_sec}: Mmax = {M_max_kNm:.2f} kN-m")

    # Exportación de datos
    nombre_archivo = f"Mphi_Tag{sec_tag}.txt"
    np.savetxt(nombre_archivo, np.column_stack((ks, Ms)),
               header="Curvatura (rad/mm) Momento (N-mm)", fmt='%.6E')

    # Ploteo acumulativo
    label_grafica = f'{nombre_sec}\n($M_{{max}})$ = {M_max_kNm:.0f} kN-m)'
    plt.plot(ks, np.array(Ms)/1e6, linewidth=2, color=color_sec,
             label=label_grafica)

else:
    print("    ⚠ No se generaron datos válidos.")

# --- I. LIMPIEZA QUIRÚRGICA (CRÍTICO) ---
# Se eliminan los objetos temporales para liberar memoria y evitar conflictos
try:
    ops.remove('loadPattern', pat_axial)
    ops.remove('loadPattern', pat_mom)
    ops.remove('timeSeries', pat_axial)
    ops.remove('timeSeries', pat_mom)
    ops.remove('element', ele_test)
    ops.remove('node', node_A)
    ops.remove('node', node_B)
except:
    pass

# 4. Finalización y Visualización Gráfica
# -----
ops.wipeAnalysis() # Limpia el solver local
ops.setTime(0.0)  # Resetea el tiempo

# Configuración Estilo Ingeniería
plt.xlabel(r'Curvatura  $\phi$  [rad/mm]', fontweight='bold')
plt.ylabel(r'Momento  $M$  [kN-m]', fontweight='bold')
plt.title(f'Diagrama Momento-Curvatura: Columna Original (P = {P_g/1000:.0f} kN)', fontweight='bold')
plt.grid(True, which='major', linestyle='-', alpha=0.6)
plt.grid(True, which='minor', linestyle=':', alpha=0.3)
plt.minorticks_on()
plt.legend(loc='lower right', frameon=True, shadow=True)
plt.tight_layout()

print("\n✂ Generando gráfico comparativo...")
plt.show()

print("✓ Validación M-Phi completada. El modelo global (Bloque 7) permanece intacto.")
print("====*70 + "\n")
##### BLOQUE 9: ANÁLISIS MODAL (PERIODO Y RIGIDEZ)

# Determinación de las propiedades dinámicas de la estructura (Vibración Libre).
# Requiere que la masa nodal haya sido asignada previamente (Bloque 7) -
Rejecución del Bloque 7.

import math

```

```

print("\n" + "-"*70)
print("9. ANÁLISIS MODAL (VALORES Y VECTORES PROPIOS)")
print("-"*70)

# 1. Preparación del Solver
# -----
# Se limpia el análisis previo para asegurar un estado neutro,
# pero manteniendo la rigidez y masa del modelo.
ops.wipeAnalysis()

# 2. Cálculo de Valores Propios (Eigenvalues)
# -----
# Se solicita el modo fundamental (num_modos = 1)
# '-fullGenLapack': Algoritmo robusto para matrices generales.
num_modos = 1
valores_propios = ops.eigen('-fullGenLapack', num_modos)

# 3. Procesamiento de Resultados
# -----
if len(valores_propios) > 0:
    # Extracción del valor propio (lambda = omega^2)
    w2 = valores_propios[0]          # [rad^2/s^2]

    # Cálculo de propiedades derivadas
    w = w2 ** 0.5                    # Frecuencia Angular [rad/s]
    T1 = 2 * math.pi / w            # Periodo Fundamental [s]
    f1 = 1 / T1                      # Frecuencia Cíclica [Hz]

    # Cálculo de Rigidez Lateral Dinámica (K = m * w^2)
    # m_lump [N*s^2/mm] * w2 [rad^2/s^2] = K [N/mm]
    K_dinamica = w2 * m_lump        # Rigidez en N/mm
    K_dinamica_kN = K_dinamica / 1000 # Rigidez en kN/mm (Referencia)

    # 4. Reporte Técnico en Consola
    # -----
    print(f"Resultados del Modo Fundamental (Modo 1):")
    print(f" 🖱 Periodo (T1):           {T1:.4f} s")
    print(f" 🖱 Frecuencia (f):             {f1:.4f} Hz")
    print(f" 🖱 Frecuencia Angular (w):      {w:.4f} rad/s")
    print(f" 🖱 Valor Propio (λ):           {w2:.4f}")

    print(f"\nRigidez Lateral Efectiva:")
    print(f" 💎 K_dinámica:                   {K_dinamica:.2f} N/mm")
    print(f" 💎 K_dinámica:                   {K_dinamica_kN * 1000:.2f} kN/m")

    # 5. Exportación de Resultados
    # -----
    nombre_modal = "Resultados_Modal_Original.txt"

    try:
        with open(nombre_modal, "w") as f:
            f.write("REPORTE DE ANÁLISIS MODAL - COLUMNA ORIGINAL\n")
            f.write("=====\n")
            f.write(f"Periodo_Fundamental_T1_(s)\t{T1:.6f}\n")
            f.write(f"Frecuencia_f1_(Hz)\t{f1:.6f}\n")
            f.write(f"Frecuencia_Angular_w_(rad/s)\t{w:.6f}\n")
            f.write(f>Rigidez_Dinamica_K_(N/mm)\t{K_dinamica:.4f}\n")
            f.write(f>Masa_Sismica_(Ton)\t{m_lump:.4f}\n")

        print(f"\n✅ Archivo de resultados generado: '{nombre_modal}'")

    except IOError:
        print(f"\n⚠ ERROR: No se pudo escribir el archivo {nombre_modal}")

else:
    print(f"\n❌ ERROR CRÍTICO: El análisis de valores propios falló.")

```

```

    print(" Posibles causas: Masa no asignada, matriz de rigidez singular o
inestable.")
    print(" Verifique: Bloque 7 (ops.mass) y Bloque 6 (Secciones).")

print("="*70 + "\n")
##### BLOQUE 9: ANÁLISIS PUSHOVER (LÓGICA "LATCH" + GRÁFICA)

# =====
# BLOQUE 9: ANÁLISIS PUSHOVER - COLUMNA ORIGINAL (CORREGIDO)
# =====
# Corrección: Selección de Vmax basada en el pico positivo de la curva,
# ignorando valores negativos grandes provocados por inestabilidad P-Delta.

import time
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import matplotlib.ticker as ticker
import openseespy.opensees as ops

print("\n" + "-"*70)
print("9. ANÁLISIS PUSHOVER - COLUMNA ORIGINAL")
print("-"*70)

# 1. Configuración General
# -----
ID_nodo_control = baseNew + nElem
ID_nodo_base = baseNew
DOF_control = 1

Deriva_Meta = 0.06
D_max_teorico = Deriva_Meta * L_col
Paso_Despl = 1 # mm (Paso Objetivo)
Paso_Salida_TXT = 5.0 # mm (Intervalo para guardar datos)

# Límites de Desempeño (Norma ASCE 41-06 / NEC-SE-HM)
lim_IO = 0.02 # 2% (Ocupación Inmediata)
lim_LS = 0.04 # 4% (Seguridad de Vida)
disp_IO = lim_IO * L_col
disp_LS = lim_LS * L_col
disp_CP = disp_LS

print(f"Parámetros Pushover:")
print(f" - Nodo Control: {ID_nodo_control}")
print(f" - Meta Drift: {Deriva_Meta*100:.1f}% ({D_max_teorico:.1f} mm)")
print(f" - Límite Servicio: {disp_IO:.1f} mm")
print(f" - Límite Seguridad: {disp_LS:.1f} mm")

# 2. Preparación del Solver
# -----
ops.wipeAnalysis()

# Patrón de Carga Lateral
tag_lat = 2
ops.timeSeries('Linear', tag_lat)
ops.pattern('Plain', tag_lat, tag_lat)
ops.load(ID_nodo_control, 1.0, 0.0, 0.0)

# Configuración del Sistema
ops.system('UmfPack')
ops.constraints('Plain')
ops.numberer('RCM')

# Test de Convergencia: NormUnbalance
ops.test('NormUnbalance', 1.0e-3, 500, 0)

# Integrador inicial
ops.integrator('DisplacementControl', ID_nodo_control, DOF_control, Paso_Despl)

```

```

# 3. Función de Resolución Inteligente
# -----
def analyze_smart_step(forzar_inelastico, step_size):
    ops.integrator('DisplacementControl', ID_nodo_control, DOF_control,
step_size)

    # CASO A: Zona Elástica (Intento NewtonLineSearch)
    if not forzar_inelastico:
        ops.algorithm('NewtonLineSearch', 0.80)
        ops.analysis('Static')
        if ops.analyze(1) == 0:
            return True, 'NewtonLineSearch', False

    # CASO B: Zona Inelástica o Fallo de Newton (KrylovNewton)
    ops.algorithm('KrylovNewton')
    ops.analysis('Static')
    if ops.analyze(1) == 0:
        return True, 'KrylovNewton', True

    return False, None, forzar_inelastico

# 4. Bucle Principal (Lógica Latch)
# -----
desplazamientos = [0.0]
cortantes = [0.0]
drifts = [0.0]

disp_actual = 0.0
step_actual = Paso_Despl
modo_inelastico_activo = False
algoritmo_usado = "Inicio"

print(f"\n🚀 Iniciando Pushover...")
start_time = time.time()

while disp_actual < D_max_teorico:

    # A. Detección de Pico (Criterio Físico)
    if not modo_inelastico_activo and len(cortantes) > 1:
        if abs(cortantes[-1]) < abs(cortantes[-2]) * 0.999:
            modo_inelastico_activo = True
            print(f" ⚠️ Pico detectado en D={disp_actual:.1f}mm. Bloqueando en
KrylovNewton.")

    # B. Ejecución del Paso
    success, alg_nombre, pasar_a_inelastico =
analyze_smart_step(modo_inelastico_activo, step_actual)

    if pasar_a_inelastico and not modo_inelastico_activo:
        modo_inelastico_activo = True
        print(f" 🛑 Newton falló en D={disp_actual:.1f}mm. Cambiando a
KrylovNewton.")

    if success:
        # --- ÉXITO ---
        disp_actual = ops.nodeDisp(ID_nodo_control, DOF_control)
        ops.reactions()
        v_actual = -ops.nodeReaction(ID_nodo_base, 1)

        desplazamientos.append(disp_actual)
        cortantes.append(v_actual)
        drifts.append(disp_actual / L_col)

        algoritmo_usado = alg_nombre

    if step_actual < Paso_Despl:
        step_actual *= 2.0

```

```

        if step_actual > Paso_Despl: step_actual = Paso_Despl

    else:
        # --- FALLO (Bisección) ---
        step_actual /= 2.0

        if step_actual < 1.0e-4:
            print(f"    🚫 Convergencia fallida en D={disp_actual:.1f} mm. Paso
infinitesimal.")
            break

# 5. Post-Procesamiento de Resultados
# -----
elapsed = time.time() - start_time

# Conversión a arrays numpy para manejo numérico
arr_cortantes = np.array(cortantes)
arr_desplazamientos = np.array(desplazamientos)
arr_drifts = np.array(drifts)

# CORRECCIÓN: Selección del Máximo
# Usamos np.argmax sobre el array con signo. Esto encuentra el pico positivo más
alto.
# Ignora valores negativos grandes (colapso P-Delta) que serían seleccionados por
np.abs().
idx_max = np.argmax(arr_cortantes)

# Validación de seguridad: V_max debe ser positivo
if arr_cortantes[idx_max] <= 0:
    idx_max = 0 # Fallback si no hay capacidad positiva (raro)

V_max_kN = arr_cortantes[idx_max] / 1000.0
D_at_max = arr_desplazamientos[idx_max]
Drift_at_max = arr_drifts[idx_max] * 100
D_final = arr_desplazamientos[-1]

# Interpolación regular para exportación
d_regular = np.arange(0, D_final, Paso_Salida_TXT)
v_regular = np.interp(d_regular, desplazamientos, cortantes)
drift_regular = d_regular / L_col

print("-" * 50)
print(f"RESULTADOS FINALES:")
print(f"    📌 Cortante Máximo (Vmax): {V_max_kN:.2f} kN")
print(f"    📌 Despl. en Vmax:          {D_at_max:.1f} mm")
print(f"    📌 Drift en Vmax:           {Drift_at_max:.2f}%")
print(f"    📌 Tiempo CPU:              {elapsed:.2f} s")
print("-" * 50)

# Exportación
nombre_archivo_datos = "Datos_Pushover_Original.txt"
np.savetxt(nombre_archivo_datos,
           np.column_stack((d_regular, v_regular, drift_regular)),
           header=f"Disp_{Paso_Salida_TXT}mm Shear_N Drift_Ratio", fmt='%.6f')
print(f"📄 Datos exportados en '{nombre_archivo_datos}'")

# 6. Visualización Profesional
# -----
print(f"\n📊 Generando gráfico de capacidad...")

plt.style.use('seaborn-v0_8-whitegrid')
fig, ax = plt.subplots(figsize=(8, 5), dpi=110)

# --- ZONAS DE DESEMPEÑO ---
ax.axvspan(0, disp_IO, color='#C8E6C9', alpha=0.6,
           label=f'Ocupación Inmediata (< {lim_IO*100:.0f}%)')

```

```

ax.axvspan(displ_IO, displ_LS, color='#FFE082', alpha=0.6,
            label=f'Seguridad de Vida ({lim_IO*100:.0f}% - {lim_LS*100:.0f}%)')
ax.axvspan(displ_LS, max(D_final*1.05, displ_LS*1.05), color='#FFCCBC', alpha=0.6,
            label=f'Prevención Colapso (> {lim_LS*100:.0f}%)')

# Líneas Verticales
ax.axvline(displ_IO, color='#F39C12', linestyle='--', linewidth=1.5, zorder=4)
ax.axvline(displ_LS, color='#E67E22', linestyle='--', linewidth=1.5, zorder=4)

# --- CURVA DE CAPACIDAD ---
ax.plot(desplazamientos, np.array(cortantes)/1000.0, color='#1F77B4',
        linewidth=2.8,
        label='Curva de Capacidad', zorder=10)

# --- PUNTO DE RESISTENCIA MÁXIMA ---
ax.plot(D_at_max, V_max_kN, 'o', color='#D32F2F', markersize=10,
        markeredgecolor='white', markeredgewidth=2, zorder=15, label='Pico de
Resistencia')

# --- CUADRO DE INFORMACIÓN ---
info_box = (
    "RESISTENCIA MÁXIMA\n" +
    f"$V_{{max}}$ = {V_max_kN:.2f} kN\n" +
    f"$\\Delta_{{max}}$ = {D_at_max:.1f} mm\n" +
    f"Drift = {Drift_at_max:.2f}%"
)
props = dict(boxstyle='round', facecolor='white', alpha=0.95, edgecolor='#666',
            linewidth=1)
ax.text(0.98, 0.05, info_box, transform=ax.transAxes, fontsize=10,
        va='bottom', ha='right', bbox=props, zorder=20, family='monospace')

# Configuración de Ejes
ax.set_title('CURVA DE CAPACIDAD - COLUMNA ORIGINAL', fontsize=12,
            fontweight='bold', pad=15)
ax.set_xlabel('Desplazamiento Lateral (mm)', fontsize=11, fontweight='bold')
ax.set_ylabel('Cortante Basal (kN)', fontsize=11, fontweight='bold')

# Límites (Asegura que solo se vea la parte positiva en Y)
xmax_plot = max(D_final, displ_LS) * 1.05
ymax_plot = V_max_kN * 1.25 # Basado en el Vmax positivo corregido
ax.set_xlim(0, xmax_plot)
ax.set_ylim(0, ymax_plot)

# Grilla
ax.xaxis.set_major_locator(ticker.MultipleLocator(25))
ax.xaxis.set_minor_locator(ticker.MultipleLocator(5))
ax.yaxis.set_major_locator(ticker.MultipleLocator(10))
ax.yaxis.set_minor_locator(ticker.MultipleLocator(2))

ax.grid(True, which='major', linestyle='-', linewidth=1.0, alpha=0.5)
ax.grid(True, which='minor', linestyle=':', linewidth=0.7, alpha=0.3)

# Leyenda
ax.legend(loc='upper right', frameon=True, framealpha=0.95, fontsize=10,
        shadow=True)

plt.tight_layout()
plt.show()

print("✓ Pushover completado exitosamente.")
print("="*70 + "\n")
##### BLOQUE 12: CÁLCULO DE MODIFICADORES DE RIGIDEZ (ETABS LINK) - CORREGIDO
# =====
# =====
# Objetivo: Determinar el factor de agrietamiento 'alpha' para la sección
# compuesta, comparando la rigidez efectiva (OpenSees) vs rigidez bruta
# (Teórica).

```

```

# Metodología: Rigidez secante al 75% de la carga máxima (Vmax).
# CORRECCIÓN: Selección de Vmax consistente con los Bloques Pushover (índice
positivo).

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from IPython.display import display, Math # Para renderizado LaTeX

print("\n" + "-"*70)
print("12. CÁLCULO DE INERCIA EFECTIVA (MODIFIERS)")
print("-"*70)

# 1. Recuperación de Datos del Pushover (Bloque 11)
# -----
d_push = np.array(arr_desplazamientos) #mm
v_push = np.array(arr_cortantes/1000) #kN

# 2. Determinación de Rigidez Efectiva (K_eff)
# -----
# CORRECCIÓN: Usamos np.argmax para encontrar el índice del pico positivo.
# Esto asegura consistencia con los bloques 9 y 11, ignorando colapsos negativos.

idx_max_peak = np.argmax(v_push)
V_max_abs = v_push[idx_max_peak]

# Validación de seguridad (por si el modelo colapsó sin resistencia)
if V_max_abs <= 0:
    V_max_abs = 0.001 # Valor dummy para evitar división por cero
    print("⚠️ ADVERTENCIA: No se encontró capacidad positiva. Revise el modelo.")

# Definición del punto de cedencia teórica (75% del Vmax real encontrado)
V_75 = 0.75 * V_max_abs

# Buscar el primer índice donde la fuerza supera V_75 (Rama ascendente)
# np.argmax sobre una condición booleana devuelve el primer True
idx_75 = np.argmax(v_push >= V_75)

d_75 = d_push[idx_75]
v_75 = v_push[idx_75]

# Cálculo de Rigidez Secante
if d_75 != 0:
    K_eff_opensees = v_75 / d_75 # [kN/mm]
else:
    K_eff_opensees = 0

print(f"Análisis de la Curva de Capacidad (OpenSees):")
print(f" 🖱️ V_max Sistema:      {V_max_abs:.2f} kN")
print(f" 🖱️ V_75% (Servicio):    {v_75:.2f} kN")
print(f" 🖱️ Despl. @ 75%:       {d_75:.2f} mm")
print(f" 🖱️ Rigidez Efectiva:    {K_eff_opensees:.2f} kN/mm")

# 3. Cálculo de Rigidez Bruta Teórica (K_gross)
# -----
Ig_total = (B_orig * H_orig**3) / 12.0 # Inercia Bruta [mm4]
E_etabs = Ec / 1000.0
L_mm = L_col
K_gross_etabs = (3 * E_etabs * Ig_total) / (L_mm**3)

print(f"\nReferencia Teórica (Sección Bruta Monolítica):")
print(f" 💎 Sección Total:      {B_orig:.0f} x {H_orig:.0f} mm")
print(f" 💎 Inercia Bruta (Ig): {Ig_total:.2E} mm4")
print(f" 💎 Módulo E (Jacket):  {E_etabs:.2f} kN/mm2")
print(f" 💎 Rigidez Bruta (Kg): {K_gross_etabs:.2f} kN/mm")

# 4. Cálculo del Factor Modificador (Alpha)

```

```

# -----
alpha = K_eff_opensees / K_gross_etabs

print(f"\n" + "="*50)
print(f"🌀 RESULTADO FINAL (INPUT PARA ETABS)")
print(f"="*50)
print(f" Modifier de Inercia (f11/f22): {alpha:.4f}")
print(f"="*50)

# --- PRESENTACIÓN DE FÓRMULAS (LaTeX) ---
# CORRECCIÓN: Se usa r"... para evitar advertencias de sintaxis
print("\n[Formulación Matemática Utilizada:]")
display(Math(r"K_{eff} = \frac{V_{75\%}}{\Delta_{75\%}} = \frac{" + f"{v_75:.2f}"
+ r"}{" + f"{d_75:.2f}" + r"} = " + f"{K_eff_opensees:.2f}" + r"\ kN/mm"))
display(Math(r"K_{gross} = \frac{3 E_{jack} I_g}{L^3} = " +
f"{K_gross_etabs:.2f}" + r"\ kN/mm"))
display(Math(r"\alpha_{crack} = \frac{K_{eff}}{K_{gross}} = \mathbf{" +
f"{alpha:.4f}" + r"}"))

# 5. Gráfica de Validación (Comparativa de Rigideces)
# -----
plt.style.use('seaborn-v0_8-whitegrid')
plt.figure(figsize=(9, 6), dpi=110)

# Curva Real (Pushover)
# Nota: Graficamos todos los datos, pero los límites (xlim/ylim) ocultarán la
parte negativa si existe.
plt.plot(d_push, v_push, color='#922B21', linewidth=3, label='Curva Real
(OpenSees)', zorder=5)

# Proyección de Rigideces
x_lim_plot = d_75 * 2.5
x_vals = np.linspace(0, x_lim_plot, 100)

# 1. Rigidez Efectiva (Secante)
y_eff = K_eff_opensees * x_vals
plt.plot(x_vals, y_eff, color='#2980B9', linestyle='--', linewidth=2,
label=f'Rigidez Efectiva ($K_{\{eff\}}$) [Mod={alpha:.2f}]')

# 2. Rigidez Bruta (Teórica)
y_gross = K_gross_etabs * x_vals
plt.plot(x_vals, y_gross, color='gray', linestyle=':', linewidth=1.5,
label='Rigidez Bruta ($K_{\{gross\}}$) [Mod=1.00]')

# Marcadores
plt.plot(d_75, v_75, 'o', color='#2980B9', markersize=8, zorder=10,
markeredgecolor='white', label=r'Punto de Fluencia ($V_{75\%}$)')

# Decoración
plt.title(f'CÁLCULO DE RIGIDEZ EFECTIVA (Alpha = {alpha:.3f})',
fontweight='bold', pad=15)
plt.xlabel('Desplazamiento Lateral (mm)', fontweight='bold')
plt.ylabel('Fuerza Cortante (kN)', fontweight='bold')
plt.legend(loc='lower right', frameon=True, framealpha=0.95, shadow=True)

# Límites y Grilla
# Aseguramos que el límite Y se base en el V_max_abs CORRECTO (positivo)
plt.xlim(0, x_lim_plot)
plt.ylim(0, V_max_abs * 1.2)
plt.grid(True, linestyle='--', alpha=0.5)

plt.tight_layout()
plt.show()

print("✓ Cálculo de modifiers completado.")

```

Anexo 122

Script con Openseespy – Columna Encamisada. – MODELACIÓN DE COLUMNA FEM ENCAMISADA

```
# MODELACIÓN DE COLUMNA FEM ENCAMISADA
##### CONFIGURACIÓN DE LIBRERÍAS Y MODELO BASE
# Importar dependencias principales
import openseespy.opensees as ops
import opsvis as opsv
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
import pandas as pd
import math
from functools import reduce
import matplotlib.patches as patches
from matplotlib.patches import Patch

# Configurar backend gráfico interactivo
%matplotlib widget

# Aplicar estilo visual profesional
plt.style.use("seaborn-v0_8")

# =====
# INICIALIZACIÓN DEL MODELO ESTRUCTURAL
# =====
# Sistema de Coordenadas: 2D (NDM=2) con 3 grados de libertad (NDF=3)
# DOF: [u_x, u_y,  $\theta_z$ ] (desplazamiento horizontal, vertical, rotación)

ops.wipe() # Limpiar cualquier modelo anterior
ops.model('basic', '-ndm', 2, '-ndf', 3)
##### BLOQUE 2: DEFINICIÓN DE SISTEMA DE UNIDADES CONSISTENTE [mm - N - MPa]
# Sistema Consistente: [mm, N, MPa]
# Derivadas: [mm2, mm3, kN, s]

cm = 1 # Centímetro [1 cm]
kgf = 1 # Kilofuerza [base]
s = 1 # Segundo [base]
N = kgf * cm / s**2 # Newton [N]
kN = 1000 * N # Kilonewton [kN]
mm = 0.1 * cm # Milímetro [mm]
m = 100 * cm # Metro [m]

# =====
# BLOQUE 1: DEFINICIÓN DE IDENTIFICADORES Y GEOMETRÍA
# =====

# -----
# 1. IDENTIFICADORES DE MATERIALES (Tags)
# -----
tag_steelMat = 1 # Acero longitudinal (Steel02)
tag_rebarsteel = 18 # Acero longitudinal (ReinforcingSteel)
tag_coreMat_ext = 2 # Núcleo original extremos
tag_coverMat_orig = 3 # Recubrimiento original
tag_coreMat_cnt = 4 # Núcleo original centro
tag_coverMat_new = 5 # Recubrimiento jacket
tag_coreMat_jext = 6 # Núcleo jacket extremos
tag_coreMat_jcnt = 7 # Núcleo jacket centro
tag_dummy = 30 # Material nulo (picado)

# -----
# 2. DIMENSIONES GLOBALES [mm]
# -----
# Sección transversal de la columna original
B_orig, H_orig = 300, 300 # Ancho x Alto [mm]
t_B, t_H = 175, 175 # Espesor del encamisado (Jacket) [mm]
```

```

# Dimensiones totales
B_tot = B_orig + 2*t_B      # Ancho total [mm]
H_tot = H_orig + 2*t_H      # Alto total [mm]

# Recubrimientos Tabla 20.5.1.3.1 - ACI 318-25
cover_orig = 40             # Recubrimiento original [mm]
cover_new = 40              # Recubrimiento jacket [mm]

# -----
# 3. DIMENSIONES DEL NÚCLEO CONFINADO (hasta eje del estribo)
# -----
# Columna Original
B_nucleo = B_orig - 2*cover_orig
H_nucleo = H_orig - 2*cover_orig

# Columna Encamisada (Jacket)
L1_jackB = (B_tot) - 2*cover_new
L2_jackH = (H_tot) - 2*cover_new

# -----
# 4. DIMENSIONES LONGITUDINALES [mm]
# -----
L_col = 3600                # Altura de análisis de la columna [mm]
Luz_col = 6 * 1000         # Luz libre (distancia entre apoyos reales) [mm]

# -----
# 5. REPORTE DE GEOMETRÍA EN CONSOLA
# -----
print("\n" + "="*70)
print("PARÁMETROS GEOMÉTRICOS GLOBALES")
print("="*70)
print(f"Sección Original:      {B_orig} x {H_orig} mm")
print(f"Núcleo Original:      {B_nucleo} x {H_nucleo} mm")
print(f"Sección Total (Jacket):  {B_tot} x {H_tot} mm")
print(f"Altura del modelo:      {L_col} mm")
print(f"Luz libre:                {Luz_col} mm")
print("="*70 + "\n")
##### BLOQUE 2-A: VARIABLES DE CONTROL Y CONFIGURACIÓN

# -----
# 1. BANDERAS DE CONTROL DEL ANÁLISIS
# -----
# Determinan qué no-linealidades y características se incluyen en el modelo.

ACEROREFUERZO = True      # True: Activa modelo avanzado (ReinforcingSteel) | False: Steel02
USAR_PDELTA = True        # True: Considera efectos de segundo orden (Geometría No Lineal)
ACEROOFF = False          # True: Reduce el área de acero a casi cero (Check Modal)
INCLUIR_CORTE = True      # True: Incluye deformación por corte (SectionAggregator)

# Banderas Opcionales (Activar según fase de análisis)
# MODALCHECK = True       # Solo para verificación modal (Comparativa ETABS)
# HISTERESIS = True       # Activa protocolos cíclicos
# PUSHOVER = True         # Activa análisis estático no lineal (Pushover)

# -----
# 2. CONFIGURACIÓN DE MULTIPLICADORES
# -----
# Factor de reducción de rigidez para elementos desactivados.

QuitAcero = 1.0           # Valor por defecto (Acero activo)

if ACEROOFF:
    QuitAcero = 1.0e-6
    print(">> AVISO: Modo ACEROOFF activo. El refuerzo longitudinal se ha anulado virtualmente.")
##### BLOQUE 2: DEFINICIÓN DE MATERIALES Y GEOMETRÍA DE REFUERZO

```

```

# -----
# 1. MODELOS CONSTITUTIVOS DEL ACERO
# -----
print("\n" + "-"*70)
print("DEFINICIÓN DE ACERO LONGITUDINAL")
print("-"*70)

# 1.1 Modelo Base: Steel02 (Menegotto-Pinto)
fy_s = 420.0 # Esfuerzo de fluencia [MPa]
Es = 2.0e5 # Módulo de elasticidad [MPa]

ops.uniaxialMaterial('Steel02', tag_steelMat, fy_s, Es, 0.01, 18.0, 0.925, 0.15)
print(f"✓ Material Steel02 (Tag {tag_steelMat}): fy = {fy_s} MPa")

# 1.2 Modelo Avanzado: ReinforcingSteel (Opcional)
if ACEROREFUERZO:
    fy_rs, fu_rs = 420.0, 630.0
    Esh_rs = 2.0e3
    eps_sh, eps_ult = 0.015, 0.12
    # Parámetros de pandeo (GABuck)
    lsr, beta, r, gamma = 8.0, 0.5, 0.85, 0.25

    ops.uniaxialMaterial('ReinforcingSteel', tag_rebarsteel,
                        fy_rs, fu_rs, Es, Esh_rs, eps_sh, eps_ult,
                        '-GABuck', lsr, beta, r, gamma)

    print(f"✓ Material ReinforcingSteel (Tag {tag_rebarsteel}): Activado (Pandeo
incluido).")
else:
    tag_rebarsteel = tag_steelMat
    print(f"✓ Material ReinforcingSteel: Desactivado (Se usa Steel02).")

# -----
# 2. CONFIGURACIÓN DE ÁREAS (MODO ACEROOFF)
# -----
QuitAcero = 1.0

if ACEROOFF:
    # Reduce el área de acero a un valor despreciable para análisis modal puro
    QuitAcero = 1.0e-6
    print(">> AVISO: Modo ACEROOFF activo. Refuerzo virtualmente eliminado.")

# -----
# 3. GEOMETRÍA DE ARMADURA - COLUMNA ORIGINAL
# -----
# Diámetros nominales
phiBar4 = 12.0 * QuitAcero # Barras en esquinas [mm]
phiBar = 12.0 * QuitAcero # Barras en caras intermedias [mm]

# Cantidad de barras intermedias (por cara)
phi_dist_B = 1 # Barras adicionales cara B
phi_dist_H = 1 # Barras adicionales cara H

# Espaciamiento libre entre barras [mm]
phi_sep_B = B_nucleo / (phi_dist_B + 1)
phi_sep_H = H_nucleo / (phi_dist_H + 1)

# Áreas transversales [mm²]
Abar4 = np.pi * (phiBar4 / 2.0)**2
Abar = np.pi * (phiBar / 2.0)**2

# -----
# 4. GEOMETRÍA DE ARMADURA - JACKET (ENCAMISADO)
# -----
phiBar4_jack = 18.0 * QuitAcero
phiBar_jack = 16.0 * QuitAcero

```

```

phi_dist_B_jack = 3
phi_dist_H_jack = 3

phi_sep_B_jack = L1_jackB / (phi_dist_B_jack + 1)
phi_sep_H_jack = L2_jackH / (phi_dist_H_jack + 1)

Abar4_jack = np.pi * (phiBar4_jack / 2.0)**2
Abar_jack = np.pi * (phiBar_jack / 2.0)**2

# -----
# 5. CÁLCULO Y VERIFICACIÓN DE CUANTÍAS (NEC-SE-HM)
# -----

# --- 5.1 Cálculo Columna Original ---
As_orig = (4 * Abar4) + (2 * phi_dist_H * Abar) + (2 * phi_dist_B * Abar)
Ag_orig = B_orig * H_orig
rho_orig = As_orig / Ag_orig

# --- 5.2 Cálculo Columna Encamisada (Global) ---
As_jack = (4 * Abar4_jack) + (2 * phi_dist_H_jack * Abar_jack) + (2 *
phi_dist_B_jack * Abar_jack)
Ag_tot = B_tot * H_tot
rho_global = (As_orig + As_jack) / Ag_tot

# --- 5.3 Reporte Técnico en Consola ---
print("\n" + "="*70)
print("📄 REPORTE TÉCNICO: CUANTÍAS Y ARMADO")
print("="*70)

# A. Reporte Original
print(f"COLUMNA ORIGINAL ({B_orig}x{H_orig} mm):")
print(f" - As Total: {As_orig:.2f} mm²")
print(f" - Cuantía Real: {rho_orig*100:.2f} %")

if rho_orig < 0.01:
    print(" ⚠️ ALERTA: Cuantía baja (< 1%). Incumple NEC-SE-HM.")
elif rho_orig > 0.03:
    print(" ⚠️ ALERTA: Cuantía excesiva (> 3%). Posible comportamiento frágil.")
else:
    print(" ✅ VERIFICADO: Cuantía dentro del rango normativo (1% - 3%).")

print("-" * 40)

# B. Reporte Jacket
print(f"COLUMNA ENCAMISADA ({B_tot}x{H_tot} mm):")
print(f" - As Adicional (Jacket): {As_jack:.2f} mm²")
print(f" - Cuantía Global Final: {rho_global*100:.2f} %")

if rho_global < 0.01:
    print(" ⚠️ ALERTA: Cuantía global baja (< 1%).")
elif rho_global > 0.03:
    print(" ⚠️ ALERTA: Cuantía global alta (> 3%).")
else:
    print(" ✅ VERIFICADO: Cuantía global normativa.")

print("="*70 + "\n")
#### BLOQUE 3: PARÁMETROS DE CONFINAMIENTO Y HORMIGÓN

# -----
# 1. ACERO TRANSVERSAL (ESTRIBOS)
# -----

print("\n" + "-"*70)
print("1. DEFINICIÓN DE ACERO TRANSVERSAL (ESTRIBOS)")
print("-" * 70)

fyh_orig = 420.0 # Fluencia estribos Original [MPa]

```

```

fyh_jack = 420.0 # Fluencia estribos Jacket [MPa]
Es0      = 2.0e5 # Módulo elástico [MPa]
haRatio  = 0.01 # Razón de endurecimiento por deformación
mu       = 1000.0 # Factor de ductilidad del acero de estribos

# Configuración Inicial (Manual)
phi_orig = 10.0 # Diámetro estribo Original [mm]
sepo_extremo = 100.0 # Separación en zona confinada (Lo) [mm]
sepo_centro = 200.0 # Separación en zona central [mm]

phi_jack = 10.0 # Diámetro estribo Jacket [mm]
sepj_extremo = 100.0
sepj_centro = 200.0

# -----
# 2. CÁLCULO AUTOMÁTICO DE ESPACIAMIENTO (NEC-SE-HM 4.3.4)
# -----
SEP_EXTRIMO_AUTO = True
SaveAcero=1
if ACEROOFF:
    # Reduce el área de acero a un valor despreciable para análisis modal puro
    SaveAcero = 1.0e+6
if SEP_EXTRIMO_AUTO:
    # --- Lógica de Diseño Automático ---

    # Diámetro mínimo longitudinal (referencia para 6*db)
    db_min_orig = min(phiBar*SaveAcero, phiBar4*SaveAcero)

    # A. ZONA CONFINADA (Lo)
    # Criterios NEC: Mínimo de (Dim/4, 6*db, 100mm)
    s_nec_1 = min(B_orig, H_orig) / 4.0
    s_nec_2 = 6 * db_min_orig
    s_nec_3 = 100.0 # Límite práctico normativo

    # Selección del menor y redondeo constructivo a 5mm
    s_calc_ext = min(s_nec_1, s_nec_2, s_nec_3)
    sepo_extremo = float(int(s_calc_ext / 5) * 5)

    # B. ZONA CENTRAL (No Confinada)
    # Criterios NEC: Mínimo de (6*db, 150mm)
    s_cent_1 = 6 * db_min_orig
    s_cent_2 = 150.0
    s_calc_cnt = min(s_cent_1, s_cent_2)
    sepo_centro = float(int(s_calc_cnt / 5) * 5)

    # Reporte de Diseño Automático
    print("-" * 40)
    print("DISEÑO AUTOMÁTICO DE ESTRIBOS (NEC 4.3.4)")
    print(f" - Refuerzo Long. Menor: {db_min_orig:.1f} mm")
    print(f" - Criterio Dim/4: {s_nec_1:.1f} mm")
    print(f" - Criterio 6*db: {s_nec_2:.1f} mm")
    print(f" 👉 SELECCIONADO (Lo): s = {sepo_extremo:.0f} mm (Zona Confinada)")
    print(f" 👉 SELECCIONADO (Cnt): s = {sepo_centro:.0f} mm (Zona Central)")
    print("-" * 40)

    # Asignación por compatibilidad al Jacket
    sepj_extremo = sepo_extremo
    sepj_centro = sepo_centro
else:
    # --- Lógica de Verificación (Comprobación de valores manuales) ---

    # Referencia
    db_min_orig = min(phiBar*SaveAcero, phiBar4*SaveAcero)

    # A. Verificación Zona Confinada
    s_nec_1 = min(B_orig, H_orig) / 4.0

```

```

s_nec_2 = 6 * db_min_orig
s_nec_3 = 100.0
s_limite_ext = float(int(min(s_nec_1, s_nec_2, s_nec_3) / 5) * 5)

if sepo_extremo > s_limite_ext:
    print(f" ⚠️ ADVERTENCIA: Espaciamiento en zona confinada ({sepo_extremo}
mm) excede NEC.")
    print(f"   Se recomienda máximo: {s_limite_ext} mm.")

# B. Verificación Zona Central
s_cent_1 = 6 * db_min_orig
s_cent_2 = 150.0
s_limite_cnt = float(int(min(s_cent_1, s_cent_2) / 5) * 5)

if sepo_centro > s_limite_cnt:
    print(f" ⚠️ ADVERTENCIA: Espaciamiento en zona central ({sepo_centro} mm)
excede NEC.")
    print(f"   Se recomienda máximo: {s_limite_cnt} mm.")

# Reporte Final de Estribos Seleccionados
print("\nCONFIGURACIÓN FINAL DE ESTRIBOS:")
print(f" Columna Original: Ø{phi_orig:.0f}mm @
{sepo_extremo:.0f}/{sepo_centro:.0f} mm")
print(f" Columna Jacket:   Ø{phi_jack:.0f}mm @
{sepj_extremo:.0f}/{sepj_centro:.0f} mm")

# -----
# 3. PROPIEDADES DEL HORMIGÓN (CONFINADO Y NO CONFINADO)
# -----
print("\n" + "-"*70)
print("3. DEFINICIÓN DE MATERIALES DE HORMIGÓN")
print("-"*70)

# 3.1 Parámetros Básicos
fc = 21.0 # f'c Original [MPa]
Ec = 4700.0 * (fc ** 0.5) # Módulo elástico (NEC-SE-HM) [MPa]

fc_jack = 28.0 # f'c Jacket [MPa]
Ec_jack = 4700.0 * (fc_jack ** 0.5)

epscu_val = 0.03 # Deformación última del hormigón confinado
nu = 0.2 # Coeficiente de Poisson

print(f"Hormigón Original: f'c = {fc} MPa | Ec = {Ec:.0f} MPa")
print(f"Hormigón Jacket:   f'c = {fc_jack} MPa | Ec = {Ec_jack:.0f} MPa")

# 3.2 Hormigón No Confinado (Concrete02 - Recubrimiento)
# epsU: Deformación última (-0.005)
# lam: Relación de resistencia remanente (20%)
epsU, lam = -0.005, 0.2
# eps0: Deformación a máxima resistencia (estandar:-0.002)
# eps0 = 2*fc / Ec (Estándar de Mander Unconfined)
eps0_orig = -2.0 * fc / Ec
eps0_jack = -2.0 * fc_jack / Ec_jack
# Resistencia a la Tensión ACI - 19.2.3.1
# Módulo de Rotura fr = 0.62 * sqrt(fc) para hormigon normal
ft_orig = 0.62 * (fc ** 0.5)
ft_new = 0.62 * (fc_jack ** 0.5)

# 0.05 * (-fc) : Resistencia al aplastamiento del hormigón en compresión después
de la máxima resistencia
res_stress_orig = 0.05 * (-fc) # 5% remanente (casi cero)
res_stress_new = 0.05 * (-fc_jack)
# ft_orig / 0.002: Rigidez de ablandamiento por tensión, etu= 0.002: es
Deformación Última Efectiva a Tracción)
print(f"Deformación a maxima resistencia eps0_orig: {eps0_orig:.6f}, eps0_jack:
{eps0_jack:.6f}")

```

```

print(f"Resistencia a la Tensión ft_orig: {ft_orig:.2f} MPa, ft_new: {ft_new:.2f} MPa")
print(f"Resistencia remanente compresión del encamisado original: {res_stress_orig:.2f} MPa, del jacket: {res_stress_new:.2f} MPa")

ops.uniaxialMaterial('Concrete02', tag_coverMat_orig,
                    -fc, eps0_orig, res_stress_orig, epsU, lam, ft_orig, ft_orig / 0.002)

ops.uniaxialMaterial('Concrete02', tag_coverMat_new,
                    -fc_jack, eps0_jack, res_stress_new, epsU, lam, ft_new, ft_new / 0.002)

print(f"✓ Material Recubrimiento (Concrete02) creado.")

# 3.3 Material Dummy (Elástico de rigidez despreciable)
ops.uniaxialMaterial('Elastic', tag_dummy, 1.0e-3)
print(f"✓ Material Dummy creado.")
print("="*70 + "\n")
##### BLOQUE 4: MODELOS DE HORMIGÓN CONFINADO (ConfinedConcrete01)

# Modelo de Mander para secciones rectangulares con estribos.
# Calcula automáticamente el aumento de resistencia (f'cc) y ductilidad.

print("\n" + "-"*70)
print("4. DEFINICIÓN DE MATERIALES CONFINADOS")
print("-"*70)

# -----
# 4.1 COLUMNA ORIGINAL - EXTREMOS (Mayor Confinamiento)
# -----
ops.uniaxialMaterial('ConfinedConcrete01', tag_coreMat_ext, 'R', -fc, Ec,
                    '-epscu', epscu_val, '-nu', nu,
                    B_nucleo, H_nucleo, phi_orig, sepo_extremo,
                    fyh_orig, Es0, haRatio, mu, 16.0)

print(f"✓ Material Confinado Original EXTREMOS (Tag {tag_coreMat_ext})")
print(f" Núcleo: {B_nucleo} x {H_nucleo} mm | Estribo: Ø{phi_orig:.0f} @ {sepo_extremo:.0f} mm")

# -----
# 4.2 COLUMNA ORIGINAL - CENTRO (Menor Confinamiento)
# -----
ops.uniaxialMaterial('ConfinedConcrete01', tag_coreMat_cnt, 'R', -fc, Ec,
                    '-epscu', epscu_val, '-nu', nu,
                    B_nucleo, H_nucleo, phi_orig, sepo_centro,
                    fyh_orig, Es0, haRatio, mu, 16.0)

print(f"✓ Material Confinado Original CENTRO (Tag {tag_coreMat_cnt})")
print(f" Núcleo: {B_nucleo} x {H_nucleo} mm | Estribo: Ø{phi_orig:.0f} @ {sepo_centro:.0f} mm")

# -----
# 4.3 JACKET - EXTREMOS (Mayor Confinamiento)
# -----
ops.uniaxialMaterial('ConfinedConcrete01', tag_coreMat_jext,
                    'R', -fc_jack, Ec_jack, '-epscu', epscu_val, '-nu', nu,
                    L1_jackB, L2_jackH, phi_jack, sepj_extremo,
                    fyh_jack, Es0, haRatio, mu, 16.0)

print(f"\n✓ Material Confinado Jacket EXTREMOS (Tag {tag_coreMat_jext})")
print(f" Núcleo: {L1_jackB:.0f} x {L2_jackH:.0f} mm | Estribo: Ø{phi_jack:.0f} @ {sepj_extremo:.0f} mm")

# -----
# 4.4 JACKET - CENTRO (Menor Confinamiento)
# -----

```

```

ops.uniaxialMaterial('ConfinedConcrete01', tag_coreMat_jcnt,
                    'R', -fc_jack, Ec_jack, '-epscu', epscu_val, '-nu', nu,
                    L1_jackB, L2_jackH, phi_jack, sepj_centro,
                    fyh_jack, Es0, haRatio, mu, 16.0)

print(f"✓ Material Confinado Jacket CENTRO      (Tag {tag_coreMat_jcnt})")
print(f"  Núcleo: {L1_jackB:.0f} x {L2_jackH:.0f} mm | Estribo: Ø{phi_jack:.0f} @
{sepj_centro:.0f} mm")

print("="*70 + "\n")
##### BLOQUE 5: DISCRETIZACIÓN AUTOMÁTICA DE SECCIONES
print("\n" + "-"*70)
print("5. GENERACIÓN Y REFINAMIENTO DE MALLA DE FIBRAS")
print("-"*70)

# 1. Parámetro de Control de Malla
# -----
# Factor entero para subdividir la celda base calculada por el MCD.
# 1 = Malla base (MCD puro).
# 2 = Refinamiento medio (Mitad del tamaño base).
# 4 = Alta precisión (Cuarto del tamaño base).
FACTOR_REFINAMIENTO = 1 # <-- ;MODIFICAR VALOR SEGÚN NECESIDAD!

# 2. Función Auxiliar: MCD
def mcd( numeros ):
    """Calcula el Máximo Común Divisor de una lista de enteros."""
    return reduce( math.gcd, numeros )

# 3. Definición de Dimensiones Críticas [mm]
# Se incluyen todas las geometrías que definen cambios de material
list_B = [int(B_orig), int(B_tot), int(cover_new), int(cover_orig), int(t_B),
int(L1_jackB)]
list_H = [int(H_orig), int(H_tot), int(cover_new), int(cover_orig), int(t_H),
int(L2_jackH)]

# 4. Cálculo de la Celda Base (Matemática Pura)
base_mcd_B = mcd(list_B)
base_mcd_H = mcd(list_H)

# 5. Aplicación del Refinamiento (Ingeniería)
# Tamaño final de la fibra = Tamaño Base / Factor
size_fib_B = base_mcd_B / FACTOR_REFINAMIENTO
size_fib_H = base_mcd_H / FACTOR_REFINAMIENTO

# 6. Cálculo de Densidad de Mallado Global
# Número total de fibras en la sección transversal completa
nfibB = int(B_tot / size_fib_B)
nfibH = int(H_tot / size_fib_H)

# Factor de escala (Fibras por milímetro)
# Vital para calcular cuántas fibras entran en cada parche específico
fac_nfibB = nfibB / B_tot
fac_nfibH = nfibH / H_tot

# 7. Reporte Técnico de Discretización
print(f"Parámetros de Mallado:")
print(f"  - MCD Base (Matemático):    {base_mcd_B} x {base_mcd_H} mm")
print(f"  - Factor de Refinamiento:    {FACTOR_REFINAMIENTO}")
print(f"  - Tamaño Final de Fibra:    {size_fib_B:.2f} x {size_fib_H:.2f} mm")

print(f"\nDensidad de Fibras Resultante:")
print(f"  - Dirección B: {nfibB} fibras totales ({fac_nfibB:.4f} fib/mm)")
print(f"  - Dirección H: {nfibH} fibras totales ({fac_nfibH:.4f} fib/mm)")
print(f"  - Resolución: ~{nfibB * nfibH} fibras por sección transversal")

if (nfibB * nfibH) < 100:
    print("  ⚠ ALERTA: Malla muy gruesa. Considere aumentar
FACTOR_REFINAMIENTO.")

```

```

elif (nfibB * nfibH) > 10000:
    print(" ⚠️ AVISO: Malla muy densa. El análisis podría ser lento.")
else:
    print(" ✅ VERIFICADO: Densidad de malla adecuada para análisis de fibra.")

print("="*70 + "\n")
##### BLOQUE 6-a: DEFINICIÓN DE SECCIÓN ORIGINAL - EXTREMOS (TAG 20)

# Sección crítica (rótula plástica potencial).
# Composición: Hormigón Confinado (Núcleo) + Recubrimiento + Acero.

print("\n" + "-"*70)
print("6-a. GENERACIÓN DE SECCIÓN 20: COLUMNA ORIGINAL (EXTREMOS)")
print("-"*70)

# 1. Definición de la Sección Fiber
ops.section('Fiber', 20, '-GJ', 1.0e12)

# 2. Definición de Parches de Hormigón (Patches)
# -----

# A. Recubrimiento (Hormigón No Confinado)
# Cálculo de discretización basado en el factor de mallado
fibrasB1, fibrasH1 = int(cover_orig * fac_nfibB), int(H_nucleo * fac_nfibH)

# Parche Inferior
ops.patch('rect', tag_coverMat_orig, fibrasB1, fibrasH1,
          -B_orig/2, -H_nucleo/2, -B_nucleo/2, H_nucleo/2)
# Parche Superior
ops.patch('rect', tag_coverMat_orig, fibrasB1, fibrasH1,
          B_nucleo/2, -H_nucleo/2, B_orig/2, H_nucleo/2)

# Parches Laterales (Izquierda / Derecha)
fibrasB2, fibrasH2 = int(B_orig * fac_nfibB), int(cover_orig * fac_nfibH)

# Parche Izquierdo
ops.patch('rect', tag_coverMat_orig, fibrasB2, fibrasH2,
          -B_orig/2, -H_orig/2, B_orig/2, -H_nucleo/2)
# Parche Derecho
ops.patch('rect', tag_coverMat_orig, fibrasB2, fibrasH2,
          -B_orig/2, H_nucleo/2, B_orig/2, H_orig/2)

# B. Núcleo (Hormigón Confinado - Extremos)
# -----
fibrasB3, fibrasH3 = int(B_nucleo * fac_nfibB), int(H_nucleo * fac_nfibH)

ops.patch('rect', tag_coreMat_ext, fibrasB3, fibrasH3,
          -B_nucleo/2, -H_nucleo/2, B_nucleo/2, H_nucleo/2)

# 3. Definición de Capas de Acero (Layers)
# -----

# Barras en Esquinas
ops.layer('straight', tag_rebarsteel, 2, Abar4,
          -B_nucleo/2, H_nucleo/2, -B_nucleo/2, -H_nucleo/2)
ops.layer('straight', tag_rebarsteel, 2, Abar4,
          B_nucleo/2, H_nucleo/2, B_nucleo/2, -H_nucleo/2)

# Barras Intermedias - Caras Verticales (H)
ops.layer('straight', tag_rebarsteel, phi_dist_H, Abar,
          -B_nucleo/2, H_nucleo/2 - phi_sep_H,
          -B_nucleo/2, -H_nucleo/2 + phi_sep_H)
ops.layer('straight', tag_rebarsteel, phi_dist_H, Abar,
          B_nucleo/2, H_nucleo/2 - phi_sep_H,
          B_nucleo/2, -H_nucleo/2 + phi_sep_H)

# Barras Intermedias - Caras Horizontales (B)
ops.layer('straight', tag_rebarsteel, phi_dist_B, Abar,

```

```

        B_nucleo/2 - phi_sep_B, -H_nucleo/2,
        -B_nucleo/2 + phi_sep_B, -H_nucleo/2)
ops.layer('straight', tag_rebarsteel, phi_dist_B, Abar,
        B_nucleo/2 - phi_sep_B, H_nucleo/2,
        -B_nucleo/2 + phi_sep_B, H_nucleo/2)

print("✓ Sección 20 generada correctamente.")

# 4. Verificación Gráfica (Opsvis)
# -----
# Reconstrucción de la lista para plot (Espejo exacto de la definición)

fib_sec_ext = [
    ['section', 'Fiber', 20, '-GJ', 1.0e12],
    # Recubrimientos
    ['patch', 'rect', tag_coverMat_orig, fibrasB1, fibrasH1, -B_orig/2, -
H_nucleo/2, -B_nucleo/2, H_nucleo/2],
    ['patch', 'rect', tag_coverMat_orig, fibrasB1, fibrasH1, B_nucleo/2, -
H_nucleo/2, B_orig/2, H_nucleo/2],
    ['patch', 'rect', tag_coverMat_orig, fibrasB2, fibrasH2, -B_orig/2, -
H_orig/2, B_orig/2, -H_nucleo/2],
    ['patch', 'rect', tag_coverMat_orig, fibrasB2, fibrasH2, -B_orig/2,
H_nucleo/2, B_orig/2, H_orig/2],
    # Núcleo
    ['patch', 'rect', tag_coreMat_ext, fibrasB3, fibrasH3, -B_nucleo/2, -
H_nucleo/2, B_nucleo/2, H_nucleo/2],
    # Acero
    ['layer', 'straight', tag_rebarsteel, 2, Abar4, -B_nucleo/2, H_nucleo/2, -
B_nucleo/2, -H_nucleo/2],
    ['layer', 'straight', tag_rebarsteel, 2, Abar4, B_nucleo/2, H_nucleo/2,
B_nucleo/2, -H_nucleo/2],
    ['layer', 'straight', tag_rebarsteel, phi_dist_H, Abar, -B_nucleo/2,
H_nucleo/2 - phi_sep_H, -B_nucleo/2, -H_nucleo/2 + phi_sep_H],
    ['layer', 'straight', tag_rebarsteel, phi_dist_H, Abar, B_nucleo/2,
H_nucleo/2 - phi_sep_H, B_nucleo/2, -H_nucleo/2 + phi_sep_H],
    ['layer', 'straight', tag_rebarsteel, phi_dist_B, Abar, B_nucleo/2 -
phi_sep_B, -H_nucleo/2, -B_nucleo/2 + phi_sep_B, -H_nucleo/2],
    ['layer', 'straight', tag_rebarsteel, phi_dist_B, Abar, B_nucleo/2 -
phi_sep_B, H_nucleo/2, -B_nucleo/2 + phi_sep_B, H_nucleo/2]
]

# Generación del Gráfico
tags_sec_ext = [item[2] for item in fib_sec_ext]
matcolor_ext = [f'C{i}' for i, _ in enumerate(tags_sec_ext)]

# Llamada a opsvis (código original intacto)
opsv.plot_fiber_section(fib_sec_ext, matcolor=matcolor_ext)

# Configuración de ejes (Estilo profesional)
plt.title('Sección Original - Zona Confinada (Tag 20)', fontweight='bold',
pad=15)
plt.xlabel('Ancho Y [mm]', fontweight='bold')
plt.ylabel('Altura Z [mm]', fontweight='bold')
plt.grid(True, linestyle='--', linewidth=0.5, alpha=0.7)
plt.axis('equal')
plt.show()

print("✓ Gráfico de verificación generado.")
print("="*70 + "\n")
##### BLOQUE 6-b: DEFINICIÓN DE SECCIÓN ORIGINAL - CENTRO (TAG 21)
# Sección para la zona central de la columna (menor confinamiento).
# Diferencia: El núcleo utiliza el material 'tag_coreMat_cnt'.

print("\n" + "-"*70)
print("6-b. GENERACIÓN DE SECCIÓN 21: COLUMNA ORIGINAL (CENTRO)")
print("-"*70)

# 1. Definición de la Sección Fiber

```

```

ops.section('Fiber', 21, '-GJ', 1.0e12)

# 2. Definición de Parches de Hormigón (Patches)
# -----

# --- Mismos parches de recubrimiento ---
# Parches Inferior / Superior
ops.patch('rect', tag_coverMat_orig, fibrasB1, fibrasH1,
          -B_orig/2, -H_nucleo/2, -B_nucleo/2, H_nucleo/2)
ops.patch('rect', tag_coverMat_orig, fibrasB1, fibrasH1,
          B_nucleo/2, -H_nucleo/2, B_orig/2, H_nucleo/2)

# Parches Izquierda / Derecha
ops.patch('rect', tag_coverMat_orig, fibrasB2, fibrasH2,
          -B_orig/2, -H_orig/2, B_orig/2, -H_nucleo/2)
ops.patch('rect', tag_coverMat_orig, fibrasB2, fibrasH2,
          -B_orig/2, H_nucleo/2, B_orig/2, H_orig/2)

# --- Único cambio: Núcleo CENTRO (Material: tag_coreMat_cnt) ---
ops.patch('rect', tag_coreMat_cnt, fibrasB3, fibrasH3,
          -B_nucleo/2, -H_nucleo/2, B_nucleo/2, H_nucleo/2)

# 3. Definición de Capas de Acero (Layers)
# -----

# --- Mismo acero (armadura idéntica) ---

# Barras en Esquinas
ops.layer('straight', tag_rebarsteel, 2, Abar4,
          -B_nucleo/2, H_nucleo/2, -B_nucleo/2, -H_nucleo/2)
ops.layer('straight', tag_rebarsteel, 2, Abar4,
          B_nucleo/2, H_nucleo/2, B_nucleo/2, -H_nucleo/2)

# Barras Intermedias - Caras Verticales
ops.layer('straight', tag_rebarsteel, phi_dist_H, Abar,
          -B_nucleo/2, H_nucleo/2 - phi_sep_H,
          -B_nucleo/2, -H_nucleo/2 + phi_sep_H)
ops.layer('straight', tag_rebarsteel, phi_dist_H, Abar,
          B_nucleo/2, H_nucleo/2 - phi_sep_H,
          B_nucleo/2, -H_nucleo/2 + phi_sep_H)

# Barras Intermedias - Caras Horizontales
ops.layer('straight', tag_rebarsteel, phi_dist_B, Abar,
          B_nucleo/2 - phi_sep_B, -H_nucleo/2,
          -B_nucleo/2 + phi_sep_B, -H_nucleo/2)
ops.layer('straight', tag_rebarsteel, phi_dist_B, Abar,
          B_nucleo/2 - phi_sep_B, H_nucleo/2,
          -B_nucleo/2 + phi_sep_B, H_nucleo/2)

print("✓ Sección 21 generada correctamente.")

# 4. Verificación Gráfica (Opsvis)
# -----
fib_sec_cnt = [
    ['section', 'Fiber', 21, '-GJ', 1.0e12],
    ['patch', 'rect', tag_coverMat_orig, fibrasB1, fibrasH1, -B_orig/2, -
H_nucleo/2, -B_nucleo/2, H_nucleo/2],
    ['patch', 'rect', tag_coverMat_orig, fibrasB1, fibrasH1, B_nucleo/2, -
H_nucleo/2, B_orig/2, H_nucleo/2],
    ['patch', 'rect', tag_coverMat_orig, fibrasB2, fibrasH2, -B_orig/2, -H_orig/2,
B_orig/2, -H_nucleo/2],
    ['patch', 'rect', tag_coverMat_orig, fibrasB2, fibrasH2, -B_orig/2,
H_nucleo/2, B_orig/2, H_orig/2],
    ['patch', 'rect', tag_coreMat_cnt, fibrasB3, fibrasH3, -B_nucleo/2, -
H_nucleo/2, B_nucleo/2, H_nucleo/2],
    ['layer', 'straight', tag_rebarsteel, 2, Abar4, -B_nucleo/2, H_nucleo/2, -
B_nucleo/2, -H_nucleo/2],
    ['layer', 'straight', tag_rebarsteel, 2, Abar4, B_nucleo/2, H_nucleo/2,
B_nucleo/2, -H_nucleo/2],

```

```

    ['layer', 'straight', tag_rebarsteel, phi_dist_H, Abar, -B_nucleo/2,
H_nucleo/2 - phi_sep_H, -B_nucleo/2, -H_nucleo/2 + phi_sep_H],
    ['layer', 'straight', tag_rebarsteel, phi_dist_H, Abar, B_nucleo/2, H_nucleo/2
- phi_sep_H, B_nucleo/2, -H_nucleo/2 + phi_sep_H],
    ['layer', 'straight', tag_rebarsteel, phi_dist_B, Abar, B_nucleo/2 -
phi_sep_B, -H_nucleo/2, -B_nucleo/2 + phi_sep_B, -H_nucleo/2],
    ['layer', 'straight', tag_rebarsteel, phi_dist_B, Abar, B_nucleo/2 -
phi_sep_B, H_nucleo/2, -B_nucleo/2 + phi_sep_B, H_nucleo/2]
]

# Generación del Gráfico
tags_sec_cnt = [item[2] for item in fib_sec_cnt]
matcolor_cnt = [f'C{i}' for i, _ in enumerate(tags_sec_cnt)]

# Llamada a opsvs (código original intacto)
opsv.plot_fiber_section(fib_sec_cnt, matcolor=matcolor_cnt)

# Configuración de ejes (Estilo profesional)
plt.title('Sección Original - Zona Central (Tag 21)', fontweight='bold', pad=15)
plt.xlabel('Ancho Y [mm]', fontweight='bold')
plt.ylabel('Altura Z [mm]', fontweight='bold')
plt.grid(True, linestyle='--', linewidth=0.5, alpha=0.7)
plt.axis('equal')
plt.show()

print("✓ Gráfico de verificación generado.")
print("="*70 + "\n")
##### BLOQUE 6-c: AGREGAR DEFORMACIÓN POR CORTE (SectionAggregator)
# Inclusión de comportamiento elástico lineal a corte (Vy) para modelar
# deformaciones tipo Timoshenko. Se agregan a las secciones de fibra (20 y 21).

print("\n" + "-"*70)
print("6-c. DEFINICIÓN DE PROPIEDADES DE CORTE (Timoshenko)")
print("-"*70)

# 1. Cálculo de Rigidez a Corte (GA)
# -----
nu_conc = 0.2 # Coeficiente de Poisson del hormigón

# Módulo de Corte [MPa]
G_conc = Ec / (2 * (1 + nu_conc))

# Área de Corte Efectiva [mm²]
# Factor de forma 5/6 para secciones rectangulares
Ag_col = B_orig * H_orig
Ash_col = (5.0 / 6.0) * Ag_col

# Rigidez a Corte Total [N] (K_shear = G * Ash)
K_shear = G_conc * Ash_col

print(f"Propiedades Calculadas:")
print(f" - Módulo de Corte (G):    {G_conc:.2f} MPa")
print(f" - Área Efectiva (Ash):     {Ash_col:.0f} mm² (5/6 Ag)")
print(f" - Rigidez a Corte (GA):    {K_shear:.2E} N")

# 2. Definición del Material Elástico para Corte
# -----
tag_mat_shear = 900
opsv.uniaxialMaterial('Elastic', tag_mat_shear, K_shear)

print(f"✓ Material Elástico para Corte creado (Tag {tag_mat_shear})")

# 3. Creación de Secciones Agregadas (Aggregator)
# -----
# Tag 22 = Sección 20 (Fibra Extremos) + Corte Vy
# Tag 23 = Sección 21 (Fibra Centro) + Corte Vy

opsv.section('Aggregator', 22, tag_mat_shear, 'Vy', '-section', 20)

```

```

ops.section('Aggregator', 23, tag_mat_shear, 'Vy', '-section', 21)

print(f"\nSecciones Agregadas Generadas:")
print(f"  ✓ Tag 22: Extremos (Fibra 20 + Rigidez GA)")
print(f"  ✓ Tag 23: Centro (Fibra 21 + Rigidez GA)")

print("=*70 + "\n")
##### BLOQUE 7: ENSAMBLAJE DEL MODELO, DISCRETIZACIÓN Y ANÁLISIS DE GRAVEDAD
# 1. Configuración de Tags de Sección
# -----
if INCLUIR_CORTE:
    sec_ext_tag = 22 # Sección Extremos (Confinada + Corte)
    sec_cnt_tag = 23 # Sección Centro (Menos confinada + Corte)
    print(f" ♦ SECCIONES: Incluyendo deformación por CORTE (Tags {sec_ext_tag} y
{sec_cnt_tag})")
else:
    sec_ext_tag = 20 # Solo Flexión
    sec_cnt_tag = 21 # Solo Flexión
    print(f" ♦ SECCIONES: Solo FLEXIÓN (Tags {sec_ext_tag} y {sec_cnt_tag})")

# Limpieza del dominio
ops.wipeAnalysis()
ops.setTime(0.0)

# Variables de inicio
baseNew = 1
integNew = 1
elemNew = 1

# 2. Cálculo de Longitud de Confinamiento (Lo) - NEC-SE-HM
# -----
# Criterios:
# 1. Mayor dimensión de la sección
# 2. Un sexto de la luz libre
# 3. 450 mm

dim_max_seccion = max(B_orig, H_orig)
un_sexto_luz = Luz_col / 6.0
minimo_abs = 450.0

Lo = max(dim_max_seccion, un_sexto_luz, minimo_abs)

# Verificación de Columna Corta
if 2 * Lo >= L_col:
    print(" ⚠ ADVERTENCIA: La columna es muy corta (Columna Corta).")
    print("   Se asignará confinamiento especial en toda la altura.")
    Lo = L_col / 2.0

L_centro = L_col - 2 * Lo

print("-" * 70)
print(f"DISCRETIZACIÓN LONGITUDINAL (NEC-SE-HM):")
print(f"  Dimensión Máx Sección : {dim_max_seccion:.1f} mm")
print(f"  Luz Libre / 6          : {un_sexto_luz:.1f} mm")
print(f"  Mínimo Normativo      : {minimo_abs:.1f} mm")
print(f"  --> Longitud Lo Calculada : {Lo:.1f} mm")
print(f"  --> Longitud Zona Central : {L_centro:.1f} mm")
print("-" * 70)

# 3. Transformación Geométrica
# -----
transfTag = 31
if USAR_PDELTA:
    # Corotational para capturar efectos P-Delta rigurosos
    ops.geomTransf('Corotational', transfTag)
    print(f" ♦ TRANSFORMACIÓN: Corotational (P-Delta Riguroso)")
else:

```

```

ops.geomTransf('Linear', transfTag)
print(" ♦ TRANSFORMACIÓN: Linear (Sin P-Delta)")

# 4. Creación de Nodos y Elementos (3 Tramos)
# -----
# Nodo 1: Base (0.0)
# Nodo 2: Fin zona confinada inferior (Lo)
# Nodo 3: Inicio zona confinada superior (Lo + L_centro)
# Nodo 4: Tope (L_col)

# Nodo Base
ops.node(baseNew, 0.0, 0.0)
ops.fix(baseNew, 1, 1, 1) # Empotrado

# Nodos Intermedios y Tope
ops.node(baseNew + 1, 0.0, Lo) # Fin Lo inferior
ops.node(baseNew + 2, 0.0, Lo + L_centro) # Fin zona central
ops.node(baseNew + 3, 0.0, L_col) # Tope

# Elementos (BeamColumn con integración Legendre)
# Elemento 1: Zona Confinada Inferior
ops.beamIntegration('Legendre', integNew, sec_ext_tag, 5)
ops.element('forceBeamColumn', elemNew, baseNew, baseNew + 1, transfTag,
integNew)

# Elemento 2: Zona Central
ops.beamIntegration('Legendre', integNew + 1, sec_cnt_tag, 5)
ops.element('forceBeamColumn', elemNew + 1, baseNew + 1, baseNew + 2, transfTag,
integNew + 1)

# Elemento 3: Zona Confinada Superior
ops.beamIntegration('Legendre', integNew + 2, sec_ext_tag, 5)
ops.element('forceBeamColumn', elemNew + 2, baseNew + 2, baseNew + 3, transfTag,
integNew + 2)

# Actualización de IDs globales
nElem = 3
ID_nodo_tope = baseNew + nElem

print(f"✅ Elementos creados exitosamente (3 tramos).")

# 5. Cálculo de Masas y Cargas
# -----

# A. Carga del Edificio (Estimación Gravedad)
P_edificio = 0.25 * fc * B_orig * H_orig # [N]

# B. Peso Propio de la Columna
Vol_col = (B_orig * H_orig) * L_col # [mm³]
densidad_hormigon = 2.4e-9 * 9810 # [N/mm³]
W_columna = Vol_col * densidad_hormigon

# C. Carga Total (Pg)
P_g = P_edificio + (0.5 * W_columna)

# D. Masa Sísmica Total
g_grav = 9810.0 # [mm/s²]
m_lump = P_g / g_grav
print(f"Carga del Edificio: {P_edificio:.0f} N")
print(f"Carga Axial Total (P_g): {P_g:.0f} N")
print(f"Masa Sísmica Asignada: {m_lump:.4f} Ton")

# Asignación de masa al nodo tope (DOF: X, Y, Rz)
ops.mass(ID_nodo_tope, m_lump, m_lump, 0.0)

# 6. Aplicación de Gravedad (Pre-carga)
# -----
ops.timeSeries('Constant', 1)

```

```

ops.pattern('Plain', 1, 1)
ops.load(ID_nodo_tope, 0.0, -P_g, 0.0) # Carga vertical descendente

# Configuración del Análisis
ops.constraints('Plain')
ops.numberer('RCM')
ops.system('BandGeneral')
ops.test('NormDispIncr', 1.0e-6, 100)
ops.algorithm('Newton')
ops.integrator('LoadControl', 0.1) # 10 pasos de carga
ops.analysis('Static')

print(f" Aplicando gravedad...")
ok_grav = ops.analyze(10)

if ok_grav == 0:
    d_serv = ops.nodeDisp(ID_nodo_tope)
    print(f"✅ Gravedad aplicada exitosamente.")
    print(f" Desplazamiento Axial: {d_serv[1]:.4f} mm")

    # CONGELAR ESTADO (Vital para análisis posteriores)
    ops.loadConst('-time', 0.0)
    print(f"🟡 Estado de gravedad congelado. P-Delta inicializado.")
else:
    print(f"❌ ERROR: El análisis de gravedad no convergió.")

print("="*70 + "\n")
##### BLOQUE 8-a: SECCIÓN ENCAMISADO - EXTREMOS (TAG 24)

# =====
# =====
# Definición de la sección compuesta para la zona de alto confinamiento.
# Incluye la sección original (implícita) + el encamisado reforzado.

print("\n" + "-"*70)
print("8-a. GENERACIÓN DE SECCIÓN 24: JACKET (EXTREMOS)")
print("-"*70)

# Función auxiliar para evitar errores de dimensión cero
def n_min(val):
    return max(1, int(val))

# 1. Definición de la Sección Fiber
ops.section('Fiber', 24, '-GJ', 1.0e12)

# 2. Definición de Parches de Hormigón (Patches)
# -----

# --- Encamisado No Confinado ---
fibrasJB1, fibrasJH1 = n_min(cover_new * fac_nfibB), n_min(L2_jackH * fac_nfibH)
# Parche Inferior
ops.patch('rect', tag_coverMat_new, fibrasJB1, fibrasJH1,
          -B_tot/2, -L2_jackH/2, -L1_jackB/2, L2_jackH/2)
# Parche Superior
ops.patch('rect', tag_coverMat_new, fibrasJB1, fibrasJH1,
          L1_jackB/2, -L2_jackH/2, B_tot/2, L2_jackH/2)

fibrasJB2, fibrasJH2 = n_min(B_tot * fac_nfibB), n_min(cover_new * fac_nfibH)
# Parche Izquierdo
ops.patch('rect', tag_coverMat_new, fibrasJB2, fibrasJH2,
          -B_tot/2, -H_tot/2, B_tot/2, -L2_jackH/2)
# Parche Derecho
ops.patch('rect', tag_coverMat_new, fibrasJB2, fibrasJH2,
          -B_tot/2, L2_jackH/2, B_tot/2, H_tot/2)

# --- Encamisado Confinado ---

```

```

fibrasJB3, fibrasJH3 = n_min((t_B-cover_new) * fac_nfibB), n_min(H_orig*
fac_nfibH)
# Parche Inferior (Relleno)
ops.patch('rect', tag_coreMat_jext, fibrasJB3, fibrasJH3,
          -L1_jackB/2, -H_orig/2, -B_orig/2, H_orig/2)
# Parche Superior (Relleno)
ops.patch('rect', tag_coreMat_jext, fibrasJB3, fibrasJH3,
          B_orig/2, -H_orig/2, L1_jackB/2, H_orig/2)

fibrasJB4, fibrasJH4 = n_min(L1_jackB* fac_nfibB), n_min((t_H - cover_new) *
fac_nfibH)
# Parche Izquierdo (Relleno)
ops.patch('rect', tag_coreMat_jext, fibrasJB4, fibrasJH4,
          -L1_jackB/2, -L2_jackH/2, L1_jackB/2, -H_orig/2)
# Parche Derecho (Relleno)
ops.patch('rect', tag_coreMat_jext, fibrasJB4, fibrasJH4,
          -L1_jackB/2, H_orig/2, L1_jackB/2, L2_jackH/2)

# 3. Definición de Capas de Acero (Layers)
# -----
# Esquinas
ops.layer('straight', tag_rebarsteel, 2, Abar4_jack,
          -L1_jackB/2, L2_jackH/2, -L1_jackB/2, -L2_jackH/2)
ops.layer('straight', tag_rebarsteel, 2, Abar4_jack,
          L1_jackB/2, L2_jackH/2, L1_jackB/2, -L2_jackH/2)

# Caras Verticales (H)
ops.layer('straight', tag_rebarsteel, phi_dist_H_jack, Abar_jack,
          -L1_jackB/2, L2_jackH/2 - phi_sep_H_jack,
          -L1_jackB/2, -L2_jackH/2 + phi_sep_H_jack)
ops.layer('straight', tag_rebarsteel, phi_dist_H_jack, Abar_jack,
          L1_jackB/2, L2_jackH/2 - phi_sep_H_jack,
          L1_jackB/2, -L2_jackH/2 + phi_sep_H_jack)

# Caras Horizontales (B)
ops.layer('straight', tag_rebarsteel, phi_dist_B_jack, Abar_jack,
          L1_jackB/2 - phi_sep_B_jack, -L2_jackH/2,
          -L1_jackB/2 + phi_sep_B_jack, -L2_jackH/2)
ops.layer('straight', tag_rebarsteel, phi_dist_B_jack, Abar_jack,
          L1_jackB/2 - phi_sep_B_jack, L2_jackH/2,
          -L1_jackB/2 + phi_sep_B_jack, L2_jackH/2)

print("✓ Sección 24 (Jacket Extremos) generada correctamente.")

# 4. Visualización (Opsvis)
# -----
fib_sec_ext_jack = [
['section', 'Fiber', 24, '-GJ', 1.0e12],
# Seccion original extremos tag 20
['patch', 'rect', tag_coverMat_orig, fibrasB1, fibrasH1,
  -B_orig/2, -H_nucleo/2, -B_nucleo/2, H_nucleo/2],
['patch', 'rect', tag_coverMat_orig, fibrasB1, fibrasH1,
  B_nucleo/2, -H_nucleo/2, B_orig/2, H_nucleo/2],
['patch', 'rect', tag_coverMat_orig, fibrasB2, fibrasH2,
  -B_orig/2, -H_orig/2, B_orig/2, -H_nucleo/2],
['patch', 'rect', tag_coverMat_orig, fibrasB2, fibrasH2,
  -B_orig/2, H_nucleo/2, B_orig/2, H_orig/2],
['patch', 'rect', tag_coreMat_ext, fibrasB3, fibrasH3,
  -B_nucleo/2, -H_nucleo/2, B_nucleo/2, H_nucleo/2],
['layer', 'straight', tag_rebarsteel, 2, Abar4,
  -B_nucleo/2, H_nucleo/2, -B_nucleo/2, -H_nucleo/2],
['layer', 'straight', tag_rebarsteel, 2, Abar4,
  B_nucleo/2, H_nucleo/2, B_nucleo/2, -H_nucleo/2],
['layer', 'straight', tag_rebarsteel, phi_dist_H, Abar,
  -B_nucleo/2, H_nucleo/2 - phi_sep_H,
  -B_nucleo/2, -H_nucleo/2 + phi_sep_H],
['layer', 'straight', tag_rebarsteel, phi_dist_H, Abar,
  B_nucleo/2, H_nucleo/2 - phi_sep_H,

```

```

    B_nucleo/2, -H_nucleo/2 + phi_sep_H],
['layer', 'straight', tag_rebarsteel, phi_dist_B, Abar,
    B_nucleo/2 - phi_sep_B, -H_nucleo/2,
    -B_nucleo/2 + phi_sep_B, -H_nucleo/2],
['layer', 'straight', tag_rebarsteel, phi_dist_B, Abar,
    B_nucleo/2 - phi_sep_B, H_nucleo/2,
    -B_nucleo/2 + phi_sep_B, H_nucleo/2],

# Jacketing
['patch', 'rect', tag_coverMat_new, fibrasJB1, fibrasJH1,
    -B_tot/2, -L2_jackH/2, -L1_jackB/2, L2_jackH/2],
['patch', 'rect', tag_coverMat_new, fibrasJB1, fibrasJH1,
    L1_jackB/2, -L2_jackH/2, B_tot/2, L2_jackH/2],
['patch', 'rect', tag_coverMat_new, fibrasJB2, fibrasJH2,
    -B_tot/2, -H_tot/2, B_tot/2, -L2_jackH/2],
['patch', 'rect', tag_coverMat_new, fibrasJB2, fibrasJH2,
    -B_tot/2, L2_jackH/2, B_tot/2, H_tot/2],

# Jacketing confinado
['patch', 'rect', tag_coreMat_jext, fibrasJB3, fibrasJH3,
    -L1_jackB/2, -H_orig/2, -B_orig/2, H_orig/2],
['patch', 'rect', tag_coreMat_jext, fibrasJB3, fibrasJH3,
    B_orig/2, -H_orig/2, L1_jackB/2, H_orig/2],
['patch', 'rect', tag_coreMat_jext, fibrasJB4, fibrasJH4,
    -L1_jackB/2, -L2_jackH/2, L1_jackB/2, -H_orig/2],
['patch', 'rect', tag_coreMat_jext, fibrasJB4, fibrasJH4,
    -L1_jackB/2, H_orig/2, L1_jackB/2, L2_jackH/2],

# Acero
['layer', 'straight', tag_rebarsteel, 2, Abar4_jack,
    -L1_jackB/2, L2_jackH/2, -L1_jackB/2, -L2_jackH/2],
['layer', 'straight', tag_rebarsteel, 2, Abar4_jack,
    L1_jackB/2, L2_jackH/2, L1_jackB/2, -L2_jackH/2],
['layer', 'straight', tag_rebarsteel, phi_dist_H_jack, Abar_jack,
    -L1_jackB/2, L2_jackH/2 - phi_sep_H_jack,
    -L1_jackB/2, -L2_jackH/2 + phi_sep_H_jack],
['layer', 'straight', tag_rebarsteel, phi_dist_H_jack, Abar_jack,
    L1_jackB/2, L2_jackH/2 - phi_sep_H_jack,
    L1_jackB/2, -L2_jackH/2 + phi_sep_H_jack],
['layer', 'straight', tag_rebarsteel, phi_dist_B_jack, Abar_jack,
    L1_jackB/2 - phi_sep_B_jack, -L2_jackH/2,
    -L1_jackB/2 + phi_sep_B_jack, -L2_jackH/2],
['layer', 'straight', tag_rebarsteel, phi_dist_B_jack, Abar_jack,
    L1_jackB/2 - phi_sep_B_jack, L2_jackH/2,
    -L1_jackB/2 + phi_sep_B_jack, L2_jackH/2],
]

# Generación del Gráfico
tags_sec_ext_jack = [item[2] for item in fib_sec_ext_jack]
matcolor_ext_jack = [f'C{i}' for i, _ in enumerate(tags_sec_ext_jack)]

# Llamada a opsvis (código original intacto)
opsv.plot_fiber_section(fib_sec_ext_jack, matcolor=matcolor_ext_jack)

# Configuración de ejes (Estilo profesional)
plt.title('Sección Encamisado EXTREMOS (tag 24)', fontweight='bold', pad=15)
plt.xlabel('Ancho Y [mm]', fontweight='bold')
plt.ylabel('Altura Z [mm]', fontweight='bold')
plt.grid(True, linestyle='--', linewidth=0.5, alpha=0.7)
plt.axis('equal')
plt.show()

print("✓ Gráfico de verificación generado.")
print("="*70 + "\n")
##### BLOQUE 8-b: SECCIÓN ENCAMISADO - CENTRO (TAG 25)

# =====
# =====

```

```

# Definición de la sección compuesta para la zona central (menor confinamiento).
# Diferencia: El núcleo del jacket utiliza el material 'tag_coreMat_jcnt'.

print("\n" + "-"*70)
print("8-b. GENERACIÓN DE SECCIÓN 25: JACKET (CENTRO)")
print("-"*70)

# 1. Definición de la Sección Fiber
ops.section('Fiber', 25, '-GJ', 1.0e12)

# 2. Definición de Parches de Hormigón (Patches)
# -----

# --- Encamisado No Confinado Central ---

# Parches Inferior / Superior
ops.patch('rect', tag_coverMat_new, fibrasJB1, fibrasJH1, # inf
          -B_tot/2, -L2_jackH/2, -L1_jackB/2, L2_jackH/2)
ops.patch('rect', tag_coverMat_new, fibrasJB1, fibrasJH1, # sup
          L1_jackB/2, -L2_jackH/2, B_tot/2, L2_jackH/2)

# Parches Izquierda / Derecha
ops.patch('rect', tag_coverMat_new, fibrasJB2, fibrasJH2, # izq
          -B_tot/2, -H_tot/2, B_tot/2, -L2_jackH/2)
ops.patch('rect', tag_coverMat_new, fibrasJB2, fibrasJH2, # der
          -B_tot/2, L2_jackH/2, B_tot/2, H_tot/2)

# --- Encamisado Confinado Central ---

# Parches Inferior / Superior
ops.patch('rect', tag_coreMat_jcnt, fibrasJB3, fibrasJH3, # inf
          -L1_jackB/2, -H_orig/2, -B_orig/2, H_orig/2)
ops.patch('rect', tag_coreMat_jcnt, fibrasJB3, fibrasJH3, # sup
          B_orig/2, -H_orig/2, L1_jackB/2, H_orig/2)

# Parches Izquierda / Derecha
ops.patch('rect', tag_coreMat_jcnt, fibrasJB4, fibrasJH4, # izq
          -L1_jackB/2, -L2_jackH/2, L1_jackB/2, -H_orig/2)
ops.patch('rect', tag_coreMat_jcnt, fibrasJB4, fibrasJH4, # der
          -L1_jackB/2, H_orig/2, L1_jackB/2, L2_jackH/2)

# 3. Definición de Capas de Acero (Layers)
# -----

# Esquinas
ops.layer('straight', tag_rebarsteel, 2, Abar4_jack,
          -L1_jackB/2, L2_jackH/2, -L1_jackB/2, -L2_jackH/2)
ops.layer('straight', tag_rebarsteel, 2, Abar4_jack,
          L1_jackB/2, L2_jackH/2, L1_jackB/2, -L2_jackH/2)

# Caras Verticales (H)
ops.layer('straight', tag_rebarsteel, phi_dist_H_jack, Abar_jack,
          -L1_jackB/2, L2_jackH/2 - phi_sep_H_jack,
          -L1_jackB/2, -L2_jackH/2 + phi_sep_H_jack)
ops.layer('straight', tag_rebarsteel, phi_dist_H_jack, Abar_jack,
          L1_jackB/2, L2_jackH/2 - phi_sep_H_jack,
          L1_jackB/2, -L2_jackH/2 + phi_sep_H_jack)

# Caras Horizontales (B)
ops.layer('straight', tag_rebarsteel, phi_dist_B_jack, Abar_jack,
          L1_jackB/2 - phi_sep_B_jack, -L2_jackH/2,
          -L1_jackB/2 + phi_sep_B_jack, -L2_jackH/2)
ops.layer('straight', tag_rebarsteel, phi_dist_B_jack, Abar_jack,
          L1_jackB/2 - phi_sep_B_jack, L2_jackH/2,
          -L1_jackB/2 + phi_sep_B_jack, L2_jackH/2)

print("✓ Sección 25 (Jacket Centro) generada correctamente.")

# 4. Visualización Profesional (Estilo Ingeniería)

```

```

# -----
fib_sec_cnt_jack = [
    ['section', 'Fiber', 25, '-GJ', 1.0e12],
    # Seccion original centro tag 21
    ['patch', 'rect', tag_coverMat_orig, fibrasB1, fibrasH1, -B_orig/2, -
H_nucleo/2, -B_nucleo/2, H_nucleo/2],
    ['patch', 'rect', tag_coverMat_orig, fibrasB1, fibrasH1, B_nucleo/2, -
H_nucleo/2, B_orig/2, H_nucleo/2],
    ['patch', 'rect', tag_coverMat_orig, fibrasB2, fibrasH2, -B_orig/2, -H_orig/2,
B_orig/2, -H_nucleo/2],
    ['patch', 'rect', tag_coverMat_orig, fibrasB2, fibrasH2, -B_orig/2,
H_nucleo/2, B_orig/2, H_orig/2],
    ['patch', 'rect', tag_coreMat_cnt, fibrasB3, fibrasH3, -B_nucleo/2, -
H_nucleo/2, B_nucleo/2, H_nucleo/2],
    ['layer', 'straight', tag_rebarsteel, 2, Abar4, -B_nucleo/2, H_nucleo/2, -
B_nucleo/2, -H_nucleo/2],
    ['layer', 'straight', tag_rebarsteel, 2, Abar4, B_nucleo/2, H_nucleo/2,
B_nucleo/2, -H_nucleo/2],
    ['layer', 'straight', tag_rebarsteel, phi_dist H, Abar, -B_nucleo/2,
H_nucleo/2 - phi_sep_H, -B_nucleo/2, -H_nucleo/2 + phi_sep_H],
    ['layer', 'straight', tag_rebarsteel, phi_dist_H, Abar, B_nucleo/2, H_nucleo/2
- phi_sep_H, B_nucleo/2, -H_nucleo/2 + phi_sep_H],
    ['layer', 'straight', tag_rebarsteel, phi_dist_B, Abar, B_nucleo/2 -
phi_sep_B, -H_nucleo/2, -B_nucleo/2 + phi_sep_B, -H_nucleo/2],
    ['layer', 'straight', tag_rebarsteel, phi_dist_B, Abar, B_nucleo/2 -
phi_sep_B, H_nucleo/2, -B_nucleo/2 + phi_sep_B, H_nucleo/2],
    # Jacketing
    ['patch', 'rect', tag_coverMat_new, fibrasJB1, fibrasJH1, -B_tot/2, -
L2_jackH/2, -L1_jackB/2, L2_jackH/2],
    ['patch', 'rect', tag_coverMat_new, fibrasJB1, fibrasJH1, L1_jackB/2, -
L2_jackH/2, B_tot/2, L2_jackH/2],
    ['patch', 'rect', tag_coverMat_new, fibrasJB2, fibrasJH2, -B_tot/2, -H_tot/2,
B_tot/2, -L2_jackH/2],
    ['patch', 'rect', tag_coverMat_new, fibrasJB2, fibrasJH2, -B_tot/2,
L2_jackH/2, B_tot/2, H_tot/2],
    # Jacketing Confinado
    ['patch', 'rect', tag_coreMat_jcnt, fibrasJB3, fibrasJH3, -L1_jackB/2, -
H_orig/2, -B_orig/2, H_orig/2],
    ['patch', 'rect', tag_coreMat_jcnt, fibrasJB3, fibrasJH3, B_orig/2, -
H_orig/2, L1_jackB/2, H_orig/2],
    ['patch', 'rect', tag_coreMat_jcnt, fibrasJB4, fibrasJH4, -L1_jackB/2, -
L2_jackH/2, L1_jackB/2, -H_orig/2],
    ['patch', 'rect', tag_coreMat_jcnt, fibrasJB4, fibrasJH4, -L1_jackB/2,
H_orig/2, L1_jackB/2, L2_jackH/2],
    # Acero
    ['layer', 'straight', tag_rebarsteel, 2, Abar4_jack, -L1_jackB/2, L2_jackH/2,
-L1_jackB/2, -L2_jackH/2],
    ['layer', 'straight', tag_rebarsteel, 2, Abar4_jack, L1_jackB/2, L2_jackH/2,
L1_jackB/2, -L2_jackH/2],
    ['layer', 'straight', tag_rebarsteel, phi_dist_H_jack, Abar_jack, -
L1_jackB/2, L2_jackH/2 - phi_sep_H_jack, -L1_jackB/2, -L2_jackH/2 +
phi_sep_H_jack],
    ['layer', 'straight', tag_rebarsteel, phi_dist_H_jack, Abar_jack, L1_jackB/2,
L2_jackH/2 - phi_sep_H_jack, L1_jackB/2, -L2_jackH/2 + phi_sep_H_jack],
    ['layer', 'straight', tag_rebarsteel, phi_dist_B_jack, Abar_jack, L1_jackB/2
- phi_sep_B_jack, -L2_jackH/2, -L1_jackB/2 + phi_sep_B_jack, -L2_jackH/2],
    ['layer', 'straight', tag_rebarsteel, phi_dist_B_jack, Abar_jack, L1_jackB/2
- phi_sep_B_jack, L2_jackH/2, -L1_jackB/2 + phi_sep_B_jack, L2_jackH/2]
]

# Generación del Gráfico
tags_sec_cnt_jack = [item[2] for item in fib_sec_cnt_jack]
matcolor_cnt_jack = [f'C{i}' for i, _ in enumerate(tags_sec_cnt_jack)]

# Llamada a opsvis (código original intacto)
opsv.plot_fiber_section(fib_sec_cnt_jack, matcolor=matcolor_cnt_jack)

# Configuración de ejes (Estilo profesional)

```

```

plt.title('Sección Compuesta Jacket - Centro (Tag 25)', fontweight='bold',
pad=15)
plt.xlabel('Ancho Y [mm]', fontweight='bold')
plt.ylabel('Altura Z [mm]', fontweight='bold')
plt.grid(True, linestyle='--', linewidth=0.5, alpha=0.7)
plt.axis('equal')
plt.show()

print("✓ Gráfico de verificación generado.")
print("="*70 + "\n")
##### BLOQUE 8-c: AGREGAR DEFORMACIÓN POR CORTE - JACKET (SectionAggregator)

# =====
# =====
# Cálculo de la rigidez a corte del encamisado (sección compuesta) y
# creación de las secciones finales (Tags 26 y 27) que incluyen comportamiento
Vy.

print("\n" + "-"*70)
print("8-c. DEFINICIÓN DE PROPIEDADES DE CORTE (JACKET)")
print("-"*70)

# 1. Cálculo de Rigidez a Corte del Anillo (GA_jack)
# -----
# Se considera que el aporte principal a corte lo da el anillo nuevo + original.
# Aquí se calcula la rigidez basada en el área neta del anillo.

# Geometría
Ag_jack_total = B_tot * H_tot          # Área bruta total (50x50 cm aprox)
Ag_orig_total = B_orig * H_orig       # Área bruta núcleo viejo (30x30 cm)
Ag_anillo     = Ag_jack_total - Ag_orig_total # Área neta del recrecido

# Propiedades Material (Hormigón Nuevo)
nu_jack = 0.2
G_jack  = Ec_jack / (2 * (1 + nu_jack)) # Módulo de Corte [MPa]

# Rigidez a Corte Total (K_shear = G * Ash)
# Se asume factor de forma 5/6 válido para secciones rectangulares/cajón
K_shear_jack = G_jack * (Ag_anillo * 5.0/6.0)

print(f"Propiedades Calculadas (Anillo de Refuerzo):")
print(f" - Área Bruta Total:      {Ag_jack_total/100:.2f} cm²")
print(f" - Área Neta Anillo:      {Ag_anillo/100:.2f} cm²")
print(f" - Módulo de Corte (G):    {G_jack:.2f} MPa")
print(f" - Rigidez a Corte (GA):   {K_shear_jack:.2E} N")

# 2. Definición del Material Elástico para Corte
# -----
tag_shear_jack = 901

# Definición segura del material uniaxial
try:
    ops.uniaxialMaterial('Elastic', tag_shear_jack, K_shear_jack)
    print(f"✓ Material de Corte creado (Tag {tag_shear_jack})")
except:
    # Si ya existe (por re-ejecución), se actualiza internamente o se omite
    pass

# 3. Creación de Secciones Agregadas (Aggregator)
# -----
# Se combinan las secciones de fibra (24 y 25) con la rigidez a corte (Vy).
# Tag 26 = Sección 24 (Extremos Jacket) + Corte
# Tag 27 = Sección 25 (Centro Jacket) + Corte

ops.section('Aggregator', 26, tag_shear_jack, 'Vy', '-section', 24)
ops.section('Aggregator', 27, tag_shear_jack, 'Vy', '-section', 25)

print(f"\nSecciones Finales Generadas (Flexión + Corte):")

```

```

print(f" ✓ Tag 26: Extremos Jacket (Confinada)")
print(f" ✓ Tag 27: Centro Jacket (Menos Confinada)")
print(f" ⚠ Nota: Estas secciones se usarán en la re-construcción del modelo
(Bloque 10).")

print("="*70 + "\n")
##### BLOQUE 9: INSTALACIÓN DEL JACKET (ELEMENTOS EN PARALELO)

# Se instalan nuevos elementos 'forceBeamColumn' que comparten los nodos de la
# columna existente (1, 2, 3, 4), trabajando en paralelo (compatibilidad de
# deformaciones). La columna se convierte en una sección compuesta estructural.

import sys

print("\n" + "-"*70)
print("10. INSTALACIÓN DEL REFUERZO (ENCAMISADO)")
print("-"*70)

# 1. Verificación del Estado del Modelo
# -----
# Aseguramos que la carga de gravedad se mantenga constante y el tiempo en 0.
ops.loadConst('-time', 0.0)
time_current = ops.getTime()

print(f"Estado del Modelo:")
print(f" - Tiempo Actual:      {time_current:.2f} s")
print(f" - Carga de Gravedad:   Mantenida (Constant)")

# 2. Configuración de Elementos del Jacket
# -----
ID_ele_Jacket = 2000
ID_int_Jacket = 2000
transfTag      = 31      # Misma transformación del Bloque 7 (Corotational/Linear)

# Mapeo de Tramos (Coincidencia exacta con discretización Bloque 7):
# - Tramo 1 (Base -> Lo):      Sección 26 (Jacket Extremos)
# - Tramo 2 (Lo -> Lo_sup):    Sección 27 (Jacket Centro)
# - Tramo 3 (Lo_sup -> Tope):  Sección 26 (Jacket Extremos)

config_jacket = [
    # (Nodo_i, Nodo_j, Tag_Seccion)
    (1, 2, 26),
    (2, 3, 27),
    (3, 4, 26)
]

# 3. Bucle de Instalación
# -----
print(f"\nInstalando elementos de refuerzo...")
count_jack = 0

for i, (iNode, jNode, secTag) in enumerate(config_jacket):

    # IDs únicos para los componentes del Jacket
    ele_id = ID_ele_Jacket + i + 1
    int_id = ID_int_Jacket + i + 1

    try:
        # Definición de la Integración (Legendre 5 ptos - Igual a Columna Base)
        ops.beamIntegration('Legendre', int_id, secTag, 5)

        # Creación del Elemento
        # Se conecta a los mismos nodos iNode, jNode existentes
        ops.element('forceBeamColumn', ele_id, iNode, jNode, transfTag, int_id)

        # Reporte
        tipo_sec = "Extremos" if secTag == 26 else "Centro "

```

```

        print(f" + Elemento {ele_id} (Jacket) -> Nodos {iNode}-{jNode} |
Sección {secTag} ({tipo_sec})")
        count_jack += 1

    except Exception as e:
        print(f" ✖ ERROR instalando elemento {ele_id}: {e}")

# 4. Actualización del Sistema de Ecuaciones
# -----
# Al agregar rigidez y nuevos DOFs (si los hubiera), el sistema debe
reconfigurarse.
ops.system('UmfPack') # Solver robusto asimétrico
ops.numberer('RCM') # Renumeración para optimizar ancho de banda

print(f"\n✅ Instalación Completada: {count_jack} elementos agregados.")
print(f" Estado: Columna Compuesta (Hormigón Original + Encamisado)")

# =====
# 5. VERIFICACIÓN VISUAL (VFO / VISUALIZACIÓN 3D)
# =====
# Genera un archivo .odb para visualizar el modelo compuesto.

try:
    import vfo.vfo as vfo
    VFO_AVAILABLE = True
except ImportError:
    VFO_AVAILABLE = False
    print("\n⚠ Librería 'vfo' no instalada. Se omite visualización 3D.")

if VFO_AVAILABLE:
    print(f"\nGenerando renderizado del modelo (VFO)...")

    # --- Parche para Jupyter ---
    # PyVista/VFO pueden fallar si leen los argumentos del kernel de Jupyter.
    # Guardamos y limpiamos sys.argv temporalmente.
    original_argv = sys.argv[:]
    sys.argv = [sys.argv[0]]

    try:
        # 1. Crear Base de Datos
        vfo.createODB(model="Modelo_Columna_Jacket", loadcase="Estado_Inicial",
Nmodes=0)

        # 2. Definición de Grupos para Coloreado
        # IDs Bloque 7: 1, 2, 3 (Asumidos secuenciales desde elemNew=1)
        # IDs Jacket: 2001, 2002, 2003
        grupo_original = [1, 2, 3]
        grupo_jacket = [2001, 2002, 2003]

        # 3. Generación del Gráfico
        vfo.plot_model(
            model="Modelo_Columna_Jacket",
            show_nodes="yes",
            show_eletags="yes",
            elementgroups=[grupo_original, grupo_jacket], ['grey', 'red'],
            line_width=3
        )
        print(" ✓ Gráfico 3D generado exitosamente.")

    except Exception as e:
        print(f" ⚠ No se pudo renderizar el gráfico: {e}")
        print(" (El modelo numérico es válido, solo falló la visualización)")

finally:
    # Restaurar argumentos del sistema (Vital para estabilidad de Jupyter)
    sys.argv = original_argv

```

```
print("\n--> SISTEMA LISTO PARA ANÁLISIS PUSHOVER (Bloque 9 Modificado).")
print("=*70 + "\n")
```

Anexo 123

Script con Openseespy – Columna Encamisada. – EJECUTAR ENCAMISAR -Análisis M-C, Modal, Pushover y Rigidez efectiva.

```
# EJECUTAR ENCAMISAR
##### BLOQUE 10-a: ANÁLISIS MOMENTO-CURVATURA (AMBAS SECCIONES) - VERSIÓN
DINÁMICA
# =====
# BLOQUE 10-a: VALIDACIÓN MOMENTO-CURVATURA (SECCIONES JACKET)
# =====
# Análisis de la capacidad a flexión de las secciones compuestas (26 y 27).
# Se utiliza una estrategia de elementos aislados para no interferir con el
# modelo global de la columna.

import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
import openseespy.opensees as ops

print("\n" + "-"*70)
print("10-a. ANÁLISIS MOMENTO-CURVATURA (SECCIONES JACKET)")
print("-"*70)

# 1. Parámetros de Carga
# -----
# Se utiliza la carga P_serv calculada en el Bloque 7 (Edificio + Columna
Original).
# Nota: Es conservador no sumar el peso propio del Jacket para el confinamiento.
print(f"Condición de Carga Axial (P): {P_g/1000:.2f} kN")

# 2. Configuración del Análisis Comparativo
# -----
lista_secciones_jacket = [
    (26, "Sección Jacket Extremos", "red"),
    (27, "Sección Jacket Centro", "magenta")
]

# Inicialización de figura
plt.figure(figsize=(9, 6))

# 3. Bucle de Análisis
# -----
for idx, (sec_tag, nombre_sec, color_sec) in enumerate(lista_secciones_jacket):
    print(f"\n--> Analizando: {nombre_sec} (Tag {sec_tag})...")

    # --- A. Gestión de IDs (Anti-Colisión) ---
    # Rango 6000+ para estar lejos del modelo principal
    base_id = 6000 + (idx * 100)
    node_A = base_id
    node_B = base_id + 1
    ele_test = base_id + 50
    pat_axial = base_id + 10
    pat_mom = base_id + 20

    # --- B. Preparación del Solver ---
    # Limpiamos solo el análisis, manteniendo el dominio físico del modelo global
    ops.wipeAnalysis()
    ops.setTime(0.0)

    # --- C. Construcción del Probeta (Aislada) ---
    # Coordenadas lejanas (100 km) para evitar visualización superpuesta
    ops.node(node_A, 100000.0 + idx*1000, 0.0)
    ops.node(node_B, 100000.0 + idx*1000, 0.0)
```

```

# Restricciones: A fijo, B libre solo en Rotación
ops.fix(node_A, 1, 1, 1)
ops.fix(node_B, 0, 1, 0)

try:
    ops.element('zeroLengthSection', ele_test, node_A, node_B, sec_tag)
except:
    print(f"    ⚠ ERROR: La sección {sec_tag} no está definida. Saltando.")
    continue

# --- D. Sistema de Análisis Local ---
ops.system('BandGeneral')
ops.numberer('Plain')
ops.constraints('Plain')
ops.test('NormDispIncr', 1.0e-8, 25, 0)
ops.algorithm('Newton')

# --- E. Carga Axial ---
ops.timeSeries('Constant', pat_axial)
ops.pattern('Plain', pat_axial, pat_axial)
ops.load(node_B, -P_g, 0.0, 0.0)

ops.integrator('LoadControl', 1.0)
ops.analysis('Static')

if ops.analyze(1) != 0:
    print("    ✖ FALLO: No convergió la carga axial.")
    # Limpieza de emergencia
    try:
        ops.remove('element', ele_test)
        ops.remove('node', node_A); ops.remove('node', node_B)
        ops.remove('loadPattern', pat_axial)
    except: pass
    continue

# --- F. Momento (Pushover Seccional) ---
ops.timeSeries('Linear', pat_mom)
ops.pattern('Plain', pat_mom, pat_mom)
ops.load(node_B, 0.0, 0.0, 1.0) # Momento unitario

# Configuración de Curvatura
max_k = 0.00015
num_inc = 100
inc_k = max_k / num_inc

ops.integrator('DisplacementControl', node_B, 3, inc_k)
ops.analysis('Static')

# Registro
ks = []
Ms = []

for i in range(num_inc):
    ok = ops.analyze(1)
    if ok != 0:
        print(f"    ⚠ Límite de convergencia en paso {i}")
        break

    k = ops.nodeDisp(node_B, 3)
    ops.reactions()
    M = -ops.nodeReaction(node_A, 3)

    ks.append(k)
    Ms.append(M)

# --- G. Procesamiento ---

```

```

if len(Ms) > 0:
    M_max_kNm = max(Ms) / 1.0e6
    print(f"    ✓ Momento Máximo: {M_max_kNm:.2f} kN-m")

    # Exportar
    np.savetxt(f"Mphi_Jacket_Tag{sec_tag}.txt", np.column_stack((ks, Ms)),
               header="Curvatura(rad/mm) Momento(N-mm)", fmt='%%.6E')

    # Plot
    label_graf = f'{nombre_sec}\n($M_{{max}})$ = {M_max_kNm:.0f} kN-m)'
    plt.plot(ks, np.array(Ms)/1e6, linewidth=2, color=color_sec,
             label=label_graf)

else:
    print("    ⚠ Sin datos generados.")

# --- H. Limpieza Quirúrgica ---
# Borramos los objetos temporales para dejar el modelo global intacto
try:
    ops.remove('loadPattern', pat_axial); ops.remove('loadPattern', pat_mom)
    ops.remove('timeSeries', pat_axial); ops.remove('timeSeries', pat_mom)
    ops.remove('element', ele_test)
    ops.remove('node', node_A); ops.remove('node', node_B)
except:
    pass

# 4. Visualización Final
# -----
ops.wipeAnalysis()
ops.setTime(0.0)

plt.xlabel(r'Curvatura  $\phi$  [rad/mm]', fontweight='bold')
plt.ylabel(r'Momento  $M$  [kN-m]', fontweight='bold')
plt.title(f'Diagrama M-Phi: Secciones Compuestas (P = {P_g/1000:.0f} kN)',
          fontweight='bold')
plt.grid(True, which='major', linestyle='--', alpha=0.7)
plt.minorticks_on()
plt.grid(True, which='minor', linestyle=':', alpha=0.3)
plt.legend(loc='lower right', frameon=True, shadow=True)
plt.tight_layout()

print("\n🚧 Generando gráfico comparativo...")
plt.show()

print("✓ Validación de secciones completada.")
print("="*70 + "\n")
#### BLOQUE 10: ANÁLISIS MODAL (JACKET)
# Determinación de propiedades dinámicas de la columna reforzada.
# Se evalúa el incremento de rigidez lateral comparando el periodo T1.

import math
import matplotlib.pyplot as plt
import openseespy.opensees as ops

print("\n" + "-"*70)
print("10. ANÁLISIS MODAL - COLUMNA REFORZADA (JACKET)")
print("-" * 70)

# 1. Análisis de Masa Sísmica
# -----
# Cálculo informativo del peso adicional del jacket.
# No se añade a la masa dinámica para comparar puramente la ganancia de rigidez.

# Volumen del Jacket (Área Neta * Altura)
Vol_jacket = (Ag_jack_total - Ag_orig_total) * L_col # [mm³]
W_jacket   = Vol_jacket * 2.4e-9 * 9810             # [N] (Densidad 2.4 Ton/m³)
m_jacket   = W_jacket / 9810.0                     # [Ton]

```

```

# Masa del sistema (ESTRATEGIA: Mantener masa original)
# Si aumentáramos la masa, el periodo T aumentaría, ocultando el efecto de K.
# m_total_sistema = m_lump + m_jacket
print(f"👉 Masa Sísmica Asignada: {m_lump:.4f} Ton (Consistente con Original)")
print(f"    (Nota: Peso del Jacket {W_jacket/1000:.2f} kN no incluido en masa
dinámica)")
print(f"    (Objetivo: Aislar el incremento de rigidez lateral K)")

# 2. Preparación del Solver
# -----
# Limpieza suave que mantiene el modelo físico y la gravedad
ops.wipeAnalysis()

# 3. Cálculo de Valores Propios (Eigenvalues)
# -----
num_modos = 1
valores_propios = ops.eigen('-fullGenLapack', num_modos)

if len(valores_propios) > 0:
    w2_jack = valores_propios[0]          # Omega cuadrado
    w_jack = w2_jack ** 0.5              # Frecuencia angular [rad/s]
    T1_jack = 2 * math.pi / w_jack      # Periodo [s]
    f1_jack = 1 / T1_jack                # Frecuencia [Hz]

    # Rigidez Dinámica Aproximada (K = w2 * m)
    K_dinamica_jack = w2_jack * m_lump  # [N/mm]

# 4. Reporte Técnico en Consola
# -----
print("-" * 60)
print(f"{'PARÁMETRO':<25} | {'VALOR JACKET':<15} | {'UNIDAD'}")
print("-" * 60)
print(f"{'Periodo (T1)':<25} | {T1_jack:<15.4f} | s")
print(f"{'Frecuencia (f)':<25} | {f1_jack:<15.4f} | Hz")
print(f"{'Rigidez Lat. (K_din)':<25} | {K_dinamica_jack:<15.2f} | N/mm")
print("-" * 60)

# 5. Exportación de Resultados
# -----
nombre_modal = "Resultados_Modal_Jacket.txt"
with open(nombre_modal, "w") as f:
    f.write("REPORTE MODAL - COLUMNA ENCAMISADA\n")
    f.write("=====\n")
    f.write(f"Periodo_T1\t{T1_jack:.6f}\tts\n")
    f.write(f"Frecuencia_f1\t{f1_jack:.6f}\tHz\n")
    f.write(f"Omega_w\t{w_jack:.6f}\trad/s\n")
    f.write(f"K_Dinámica\t{K_dinamica_jack:.4f}\tN/mm\n")
    f.write(f"Masa_Ref\t{m_lump:.4f}\tTon\n")

print(f"📁 Archivo generado: '{nombre_modal}'")

# 6. Gráfica de Perfil Modal
# -----
print(f"\n👉 Generando perfil modal del refuerzo...")

# Extracción de la forma modal
alturas_m = []
modo_shape = []
# Nodos originales (1 a 4) controlan la deformación global
nodos_columna = range(baseNew, baseNew + nElem + 1)

for nodo in nodos_columna:
    h = ops.nodeCoord(nodo, 2)          # Altura Y
    val = ops.nodeEigenvector(nodo, 1, 1) # Modo 1, DOF X
    alturas_m.append(h/1000.0)          # m
    modo_shape.append(val)

```

```

# Normalización a la unidad (Tope = 1.0)
max_val = modo_shape[-1]
phi_norm = [x / max_val for x in modo_shape]

# Configuración del Gráfico
fig, ax = plt.subplots(figsize=(6, 8), dpi=100)

# Límites y Grilla
ax.set_xlim(-0.2, 1.2)
ax.set_ylim(0, max(alturas_m) * 1.1)
ax.grid(True, which='major', linestyle='--', linewidth=0.5, color='gray',
alpha=0.5)

# Referencia Eje Neutro
ax.axvline(0, color='black', linestyle='-.', linewidth=0.8, alpha=0.6,
label='Eje Neutro')

# Silueta del Jacket (Visualización física del ancho)
ancho_visual = B_tot / 1000.0 # [m]
ax.fill_betweenx(alturas_m, -ancho_visual/2, ancho_visual/2,
color='#D7BDE2', alpha=0.4, label='Jacket (Geometría)')

# Forma Modal
ax.plot(phi_norm, alturas_m, marker='D', markersize=8,
color='#8E44AD', linewidth=2.5, linestyle='-', zorder=3,
label=r'Modo Fundamental $\phi_1$')

# Etiquetas de Nivel
for i, (phi, h) in enumerate(zip(phi_norm, alturas_m)):
    if i > 0:
        ax.text(phi + 0.08, h, f"Nivel {i}\n({h:.1f}m)",
verticalalignment='center', fontsize=9, color='#8E44AD',
fontweight='bold')

# Cuadro Informativo
info_text = (
r"$\bf{Jacket\ Dinámico}$" + "\n" +
r"$T_1 = " + f"{T1_jack:.4f}" + r"\ s$" + "\n" +
r"$K_{lat} = " + f"{K_dinamica_jack/1000:.1f}" + r"\ kN/mm$"
)
props = dict(boxstyle='round', facecolor='white', alpha=0.95,
edgecolor='purple')
ax.text(0.05, 0.95, info_text, transform=ax.transAxes, fontsize=11,
verticalalignment='top', bbox=props)

# Decoración
ax.set_title("PERFIL MODAL - COLUMNA ENCAMISADA", fontsize=14,
fontweight='bold', pad=15)
ax.set_xlabel(r"Desplazamiento Normalizado ($\phi$)", fontsize=12,
fontweight='bold')
ax.set_ylabel("Altura (m)", fontsize=12, fontweight='bold')
ax.legend(loc='lower right', frameon=True, fancybox=True, shadow=True)

plt.tight_layout()
plt.show()

else:
    print("\n✗ ERROR: El solver Eigen no convergió.")
    print(" Verifique que la masa y rigidez del sistema compuesto estén
definidas.")

print("="*70 + "\n")
##### BLOQUE 11: PUSHOVER FINAL - COLUMNA ENCAMISADA (JACKET)

##### BLOQUE 11: PUSHOVER FINAL - COLUMNA ENCAMISADA (JACKET)

import time

```

```

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import matplotlib.ticker as ticker
import openseespy.opensees as ops

print("\n" + "-"*70)
print("11. ANÁLISIS PUSHOVER - COLUMNA REFORZADA (CRITERIO ASCE 41-17)")
print("-"*70)

# 1. Configuración General
# -----
ID_nodo_control = baseNew + nElem
ID_nodo_base     = baseNew
DOF_control      = 1

Deriva_Meta      = 0.06
D_max_teorico   = Deriva_Meta * L_col
Paso_Despl      = 1.0   # mm
Paso_Salida_TXT = 5.0   # mm

print(f"Parámetros Pushover (Jacket):")
print(f" - Nodo Control:      {ID_nodo_control}")
print(f" - Meta Drift:         {Deriva_Meta*100:.1f}% ({D_max_teorico:.1f} mm)")

# 2. Preparación del Solver
# -----
ops.wipeAnalysis()

# Patrón de Carga Lateral (Tag 200)
tag_lat = 200
ops.timeSeries('Linear', tag_lat)
ops.pattern('Plain', tag_lat, tag_lat)
ops.load(ID_nodo_control, 1.0, 0.0, 0.0)

# Configuración del Sistema
ops.system('UmfPack')
ops.constraints('Plain')
ops.numberer('RCM')
ops.test('NormUnbalance', 1.0e-3, 500, 0)
ops.integrator('DisplacementControl', ID_nodo_control, DOF_control, Paso_Despl)

# 3. Función de Resolución Inteligente
# -----
def analyze_smart_step(forzar_inelastico, step_size):
    ops.integrator('DisplacementControl', ID_nodo_control, DOF_control,
step_size)

    # CASO A: Zona Elástica
    if not forzar_inelastico:
        ops.algorithm('NewtonLineSearch', 0.80)
        ops.analysis('Static')
        if ops.analyze(1) == 0:
            return True, 'NewtonLineSearch', False

    # CASO B: Zona Inelástica
    ops.algorithm('KrylovNewton')
    ops.analysis('Static')
    if ops.analyze(1) == 0:
        return True, 'KrylovNewton', True

    return False, None, forzar_inelastico

# 4. Bucle Principal
# -----
desplazamientos = [0.0]
cortantes = [0.0]
drifts = [0.0]

```

```

disp_actual = 0.0
step_actual = Paso_Despl
modo_inelastico_activo = False

print(f"\n🚀 Iniciando Pushover Jacket...")
start_time = time.time()

while disp_actual < D_max_teorico:

    # A. Detección de Pico
    if not modo_inelastico_activo and len(cortantes) > 1:
        if abs(cortantes[-1]) < abs(cortantes[-2]) * 0.999:
            modo_inelastico_activo = True
            print(f" ⚠️ Pico detectado en Jacket (D={disp_actual:.1f}mm).
Bloqueando en Krylov.")

    # B. Ejecución del Paso
    success, alg_nombre, pasar_a_inelastico =
analyze_smart_step(modo_inelastico_activo, step_actual)

    if pasar_a_inelastico and not modo_inelastico_activo:
        modo_inelastico_activo = True
        print(f" 🛑 Newton falló en D={disp_actual:.1f}mm. Bloqueando en
Krylov.")

    if success:
        disp_actual = ops.nodeDisp(ID_nodo_control, DOF_control)
        ops.reactions()
        v_actual = -ops.nodeReaction(ID_nodo_base, 1)

        desplazamientos.append(disp_actual)
        cortantes.append(v_actual)
        drifts.append(disp_actual / L_col)

        if step_actual < Paso_Despl:
            step_actual *= 2.0
            if step_actual > Paso_Despl: step_actual = Paso_Despl

    else:
        step_actual /= 2.0
        if step_actual < 1.0e-4:
            print(f" 🛑 Convergencia fallida en D={disp_actual:.1f} mm.")
            break

# 5. Post-Procesamiento (CÁLCULO DINÁMICO ASCE 41-17)
# -----
elapsed = time.time() - start_time
arr_cortantes = np.array(cortantes)
arr_desplazamientos = np.array(desplazamientos)
arr_drifts = np.array(drifts)

# --- Definir D_final ---
D_final = arr_desplazamientos[-1]
# -----

# A. Identificar Vmax
idx_max = np.argmax(arr_cortantes)
if arr_cortantes[idx_max] <= 0: idx_max = 0
V_max_kN = arr_cortantes[idx_max] / 1000.0
D_at_max = arr_desplazamientos[idx_max]

# B. Cálculo de Fluencia (Dy/IO) - Método Secante Priestley
idx_75 = np.argmax(arr_cortantes >= 0.75 * arr_cortantes[idx_max])
if idx_75 == 0: idx_75 = 1
D_75 = arr_desplazamientos[idx_75]
D_yield_calc = D_75 * (1.0 / 0.75)

```

```

# C. Definición de Niveles de Desempeño
D_IO_calc = D_yield_calc

# CP: Caída al 80% de Vmax post-pico o final
indices_post_pico = np.where((arr_desplazamientos > D_at_max) &
                             (arr_cortantes < 0.80 * arr_cortantes[idx_max]))[0]

if len(indices_post_pico) > 0:
    D_CP_calc = arr_desplazamientos[indices_post_pico[0]]
else:
    D_CP_calc = D_final

# LS: 75% de CP
D_LS_calc = 0.75 * D_CP_calc

print("-" * 50)
print(f"RESULTADOS JACKET (CRITERIO DINÁMICO):")
print(f" 🖱️ Vmax: {V_max_kN:.2f} kN")
print(f" 🖱️ Despl. @ Vmax: {D_at_max:.1f} mm")
print(f" -----")
print(f" 💠 IO (Fluencia): {D_IO_calc:.1f} mm (Drift {D_IO_calc/L_col*100:.2f}%)")
print(f" 💠 LS (0.75 x CP): {D_LS_calc:.1f} mm (Drift {D_LS_calc/L_col*100:.2f}%)")
print(f" 💠 CP (Límite): {D_CP_calc:.1f} mm (Drift {D_CP_calc/L_col*100:.2f}%)")
print("-" * 50)

# Exportación
d_regular = np.arange(0, D_final, Paso_Salida_TXT)
v_regular = np.interp(d_regular, desplazamientos, cortantes)
drift_regular = d_regular / L_col
np.savetxt("JACKET_datos_pushover.txt",
           np.column_stack((d_regular, v_regular, drift_regular)),
           header=f"Disp Shear Drift", fmt='%%.6f')
print(f" 📄 Datos exportados en 'JACKET_datos_pushover.txt'")

# 6. Visualización Profesional (Estilo Jacket - Rojo Vino)
# -----
print(f"\n 🖱️ Generando gráfico de capacidad...")
plt.style.use('seaborn-v0_8-whitegrid')
fig, ax = plt.subplots(figsize=(8, 5), dpi=110)

# --- ZONAS DE DESEMPEÑO (Calculadas) ---
ax.axvspan(0, D_IO_calc, color='#C8E6C9', alpha=0.6, label='IO (Elástico)')
ax.axvspan(D_IO_calc, D_LS_calc, color='#FFE082', alpha=0.6, label='LS (Daño Controlado)')
ax.axvspan(D_LS_calc, D_CP_calc*1.05, color='#FFCCBC', alpha=0.6, label='CP (Prevención Colapso)')

# Líneas Verticales
ax.axvline(D_IO_calc, color='#2E7D32', linestyle='--', linewidth=1.2)
ax.axvline(D_LS_calc, color='#F39C12', linestyle='--', linewidth=1.2)
ax.axvline(D_CP_calc, color='#C0392B', linestyle='--', linewidth=1.2)

# --- CURVA DE CAPACIDAD (Rojo Vino) ---
ax.plot(desplazamientos, arr_cortantes/1000.0, color='#922B21', linewidth=3.0,
        label='Columna Encamisada (Jacket)', zorder=10)

# --- PUNTO MÁXIMO ---
ax.plot(D_at_max, V_max_kN, 'o', color='red', markersize=9,
        markeredgewidth=1, markeredgewidth=1, zorder=15, label='Pico de Resistencia')

# --- CUADRO DE INFORMACIÓN ---
info_box = (

```

```

r"$\bf{Resistencia\ Jacket}$" + "\n" +
f"$V_{\max}$ = {V_max_kN:.2f} kN\n" +
f"$D_{\{y\}}$ (IO) = {D_IO_calc:.1f} mm\n" +
f"$D_{\{LS\}}$ = {D_LS_calc:.1f} mm\n" +
f"$D_{\{CP\}}$ = {D_CP_calc:.1f} mm"
)
props = dict(boxstyle='round', facecolor='white', alpha=0.95,
edgecolor='#922B21', linewidth=1.0)
ax.text(0.98, 0.05, info_box, transform=ax.transAxes, fontsize=10,
va='bottom', ha='right', bbox=props, zorder=20, family='monospace')

# Configuración Ejes
ax.set_title('CURVA DE CAPACIDAD - COLUMNA REFORZADA', fontsize=12,
fontweight='bold', pad=15)
ax.set_xlabel('Desplazamiento Lateral (mm)', fontsize=11, fontweight='bold')
ax.set_ylabel('Cortante Basal (kN)', fontsize=11, fontweight='bold')

# Ahora D_final ya está definido
xmax_plot = max(D_final, D_CP_calc)*1.05
ymax_plot = V_max_kN * 1.25
ax.set_xlim(0, xmax_plot)
ax.set_ylim(0, ymax_plot)

ax.xaxis.set_major_locator(ticker.MultipleLocator(25))
ax.xaxis.set_minor_locator(ticker.MultipleLocator(5))
ax.yaxis.set_major_locator(ticker.MultipleLocator(20))
ax.yaxis.set_minor_locator(ticker.MultipleLocator(5))

ax.grid(True, which='major', linestyle='-', linewidth=1.0, alpha=0.5)
ax.grid(True, which='minor', linestyle=':', linewidth=0.7, alpha=0.3)
ax.legend(loc='upper right', frameon=True, framealpha=0.95, fontsize=10,
shadow=True)

plt.tight_layout()
plt.show()

print("✓ Pushover Jacket completado.")
##### BLOQUE 11: PUSHOVER JACKET (DESGLOSE POR EQUILIBRIO ESTRICTO)
# Análisis de contribución estructural mediante equilibrio de fuerzas.
# CORRECCIÓN: Selección de Vmax basada en pico positivo (np.argmax con signo).
# Se ignoran caídas negativas por P-Delta en el reporte y la gráfica.

import time
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import matplotlib.ticker as ticker
import openseespy.opensees as ops

print("\n" + "-"*70)
print("11-Extra. PUSHOVER: DESGLOSE DE APORTES (MÉTODO DE EQUILIBRIO)")
print("-"*70)

# 1. Configuración del Análisis
# -----
ID_nodo_control = baseNew + nElem
ID_nodo_base = baseNew
DOF_control = 1
Deriva_Meta = 0.06
D_max_teorico = Deriva_Meta * L_col
Paso_Despl = 1.0
Paso_Salida_TXT = 5.0

# Límites de Referencia
disp_LS = 0.02 * L_col
disp_CP = 0.04 * L_col

# 2. Preparación del Solver
# -----

```

```

ops.wipeAnalysis()
tag_lat = 200
ops.timeSeries('Linear', tag_lat)
ops.pattern('Plain', tag_lat, tag_lat)
ops.load(ID_nodo_control, 1.0, 0.0, 0.0)

ops.system('UmfPack')
ops.constraints('Plain')
ops.numberer('RCM')
ops.test('NormUnbalance', 1.0e-3, 500, 0)
ops.integrator('DisplacementControl', ID_nodo_control, DOF_control, Paso_Despl)

# 3. Función de Resolución (Estrategia Blindada)
# -----
def analyze_smart_step(forzar_inelastico, step_size):
    ops.integrator('DisplacementControl', ID_nodo_control, DOF_control,
step_size)

    # Fase Elástica
    if not forzar_inelastico:
        ops.algorithm('NewtonLineSearch', 0.80)
        ops.analysis('Static')
        if ops.analyze(1) == 0: return True, 'NewtonLineSearch', False

    # Fase Inelástica
    ops.algorithm('KrylovNewton')
    ops.analysis('Static')
    if ops.analyze(1) == 0: return True, 'KrylovNewton', True
    return False, None, forzar_inelastico

# 4. Bucle de Análisis con Desglose
# -----
desplazamientos = [0.0]
v_total = [0.0]
v_jacket = [0.0]
v_nucleo = [0.0]
drifts = [0.0]

disp_actual = 0.0
step_actual = Paso_Despl
modo_inelastico = False

# Identificación del elemento basal del Jacket para cálculo de cortante
ele_jacket_base = 2001 # Tramo inferior del Jacket

print(f"🚀 Ejecutando Pushover con desglose por equilibrio...")
start_time = time.time()

while disp_actual < D_max_teorico:

    success, _, pasar_a_inelastico = analyze_smart_step(modo_inelastico,
step_actual)
    if pasar_a_inelastico and not modo_inelastico: modo_inelastico = True

    if success:
        disp_actual = ops.nodeDisp(ID_nodo_control, DOF_control)

        # --- A. FUERZA TOTAL (Reacción Global) ---
        ops.reactions()
        val_total = -ops.nodeReaction(ID_nodo_base, 1)

        # --- B. FUERZA JACKET (Equilibrio de Momentos) ---
        # V = (M_base + M_tope) / L_elemento
        f_jack = ops.eleResponse(ele_jacket_base, 'force')
        if f_jack:
            M_base_j = f_jack[2]
            M_tope_j = f_jack[5]
            # Obtención de longitud exacta del elemento base

```

```

        y2 = ops.nodeCoord(baseNew+1, 2)
        L_ele_base = y2
        val_jacket = (M_base_j + M_tope_j) / L_ele_base
    else:
        val_jacket = 0.0

    # --- C. FUERZA NÚCLEO (Por Sustracción) ---
    val_nucleo = val_total - val_jacket

    # Almacenamiento
    desplazamientos.append(displ_actual)
    v_total.append(val_total)
    v_jacket.append(val_jacket)
    v_nucleo.append(val_nucleo)
    drifts.append(displ_actual / L_col)

    # Gestión de Paso
    if step_actual < Paso_Despl:
        step_actual *= 2.0
        if step_actual > Paso_Despl: step_actual = Paso_Despl

else:
    step_actual /= 2.0
    if step_actual < 1.0e-4: break

# 5. Procesamiento de Resultados
# -----
elapsed = time.time() - start_time
v_tot_kN = np.array(v_total) / 1000.0
v_jack_kN = np.array(v_jacket) / 1000.0
v_nuc_kN = np.array(v_nucleo) / 1000.0

# Usamos np.argmax sobre el array con signo para hallar el pico algebraico.
# Si hay colapso negativo (-500), argmax lo ignorará y se quedará con el pico
positivo (+100).

# 1. TOTAL
idx_max_tot = np.argmax(v_tot_kN)
if v_tot_kN[idx_max_tot] <= 0: idx_max_tot = 0 # Safety check
V_max_tot = v_tot_kN[idx_max_tot]
D_max_tot = desplazamientos[idx_max_tot]

# 2. JACKET
idx_max_jack = np.argmax(v_jack_kN)
if v_jack_kN[idx_max_jack] <= 0: idx_max_jack = 0
V_max_jack = v_jack_kN[idx_max_jack]
D_max_jack = desplazamientos[idx_max_jack]

# 3. NÚCLEO
idx_max_nuc = np.argmax(v_nuc_kN)
if v_nuc_kN[idx_max_nuc] <= 0: idx_max_nuc = 0
V_max_nuc = v_nuc_kN[idx_max_nuc]
D_max_nuc = desplazamientos[idx_max_nuc]

print(f"✅ Análisis finalizado ({elapsed:.2f} s).")
print(f" Vmax Total: {V_max_tot:.2f} kN")
print(f" Vmax Jacket: {V_max_jack:.2f} kN")
print(f" Vmax Núcleo: {V_max_nuc:.2f} kN")

# Exportación de datos
np.savetxt("JACKET_Desglose_Fuerzas_Equilibrio.txt",
           np.column_stack((desplazamientos, v_tot_kN, v_nuc_kN, v_jack_kN)),
           header="Disp_mm V_Total V_Nucleo V_Jacket", fmt='%0.4f')

# 6. Gráfica de Desglose (Estilo Profesional Corregido)
# -----
print(f"\n🚧 Generando gráfico de contribución estructural...")

```

```

plt.style.use('seaborn-v0_8-whitegrid')
fig, ax = plt.subplots(figsize=(9, 6), dpi=110)

# --- CURVAS CON LEYENDA INFORMATIVA ---

# 1. Total (Rojo Vino)
label_tot = f'Total Compuesta ($V_{{max}})=${V_max_tot:.0f} kN)'
ax.plot(desplazamientos, v_tot_kN, color='#922B21', linewidth=3.0,
        label=label_tot, zorder=10)
# Marcador Pico Total
ax.plot(D_max_tot, V_max_tot, 'o', color='#922B21', markersize=6,
        markeredgewidth=1, zorder=11)

# 2. Aporte Jacket (Rojo Claro)
label_jack = f'Aporte Jacket ($V_{{max}})=${V_max_jack:.0f} kN)'
ax.plot(desplazamientos, v_jack_kN, color='#E74C3C', linestyle='--',
        linewidth=2.0,
        label=label_jack, zorder=5)
# Marcador Pico Jacket
ax.plot(D_max_jack, V_max_jack, 's', color='#E74C3C', markersize=5,
        markeredgewidth=1, zorder=6)

# 3. Aporte Núcleo (Gris)
label_nuc = f'Aporte Núcleo ($V_{{max}})=${V_max_nuc:.0f} kN)'
ax.plot(desplazamientos, v_nuc_kN, color='#7F8C8D', linestyle='-', linewidth=1.5,
        label=label_nuc, zorder=4)
# Marcador Pico Núcleo
ax.plot(D_max_nuc, V_max_nuc, '^', color='#7F8C8D', markersize=5,
        markeredgewidth=1, zorder=5)

# Línea de Referencia (Límite NEC)
ax.axvline(displ_LS, color='#F39C12', linestyle='-.', alpha=0.8, linewidth=1.5,
zorder=3)
ax.text(displ_LS, V_max_tot*0.95, ' Límite NEC', rotation=90,
        color='#D35400', fontsize=9, fontweight='bold', ha='right', va='top')

# Línea Base
ax.axhline(0, color='black', linewidth=0.8)

# Configuración de Ejes
ax.set_title('DESGLOSE DE FUERZAS POR EQUILIBRIO GLOBAL', fontsize=12,
fontweight='bold', pad=15)
ax.set_xlabel('Desplazamiento Lateral (mm)', fontsize=11, fontweight='bold')
ax.set_ylabel('Fuerza Cortante (kN)', fontsize=11, fontweight='bold')

# Límites (CORREGIDO: Enfocados en el cuadrante positivo)
ax.set_xlim(0, max(desplazamientos)*1.05)
# Fijamos el mínimo en 0 para evitar que el gráfico muestre la caída por P-Delta
negativa
ax.set_ylim(bottom=0, top=V_max_tot*1.25)

# Grilla Detallada
ax.xaxis.set_major_locator(ticker.MultipleLocator(25))
ax.xaxis.set_minor_locator(ticker.MultipleLocator(5))
ax.yaxis.set_major_locator(ticker.MultipleLocator(20))
ax.yaxis.set_minor_locator(ticker.MultipleLocator(5))

ax.grid(True, which='major', linestyle='-', linewidth=1.0, alpha=0.5)
ax.grid(True, which='minor', linestyle=':', linewidth=0.7, alpha=0.3)

# Leyenda
ax.legend(loc='lower right', frameon=True, framealpha=0.95, fontsize=10,
shadow=True)

plt.tight_layout()
plt.show()

```

```

print("✓ Desglose de fuerzas completado.")
print("="*70 + "\n")
##### BLOQUE 12: CÁLCULO DE FACTORES DE RIGIDEZ EFECTIVA (MODIFIERS)
# =====
# BLOQUE 12: CÁLCULO DE MODIFICADORES DE RIGIDEZ (ETABS LINK) - CORREGIDO
# =====
# Objetivo: Determinar el factor de agrietamiento 'alpha' para la sección
# compuesta, comparando la rigidez efectiva (OpenSees) vs rigidez bruta
# (Teórica).
# Metodología: Rigidez secante al 75% de la carga máxima (Vmax).
# CORRECCIÓN: Selección de Vmax consistente con los Bloques Pushover (índice
# positivo).

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from IPython.display import display, Math # Para renderizado LaTeX

print("\n" + "-"*70)
print("12. CÁLCULO DE INERCIA EFECTIVA (MODIFIERS)")
print("-"*70)

# 1. Recuperación de Datos del Pushover (Bloque 11)
# -----
d_push = np.array(arr_desplazamientos) #mm
v_push = np.array(arr_cortantes/1000) #kN

# 2. Determinación de Rigidez Efectiva (K_eff)
# -----
# CORRECCIÓN: Usamos np.argmax para encontrar el índice del pico positivo.
# Esto asegura consistencia con los bloques 9 y 11, ignorando colapsos negativos.

idx_max_peak = np.argmax(v_push)
V_max_abs = v_push[idx_max_peak]

# Validación de seguridad (por si el modelo colapsó sin resistencia)
if V_max_abs <= 0:
    V_max_abs = 0.001 # Valor dummy para evitar división por cero
    print("⚠️ ADVERTENCIA: No se encontró capacidad positiva. Revise el modelo.")

# Definición del punto de cedencia teórica (75% del Vmax real encontrado)
V_75 = 0.75 * V_max_abs

# Buscar el primer índice donde la fuerza supera V_75 (Rama ascendente)
# np.argmax sobre una condición booleana devuelve el primer True
idx_75 = np.argmax(v_push >= V_75)

d_75 = d_push[idx_75]
v_75 = v_push[idx_75]

# Cálculo de Rigidez Secante
if d_75 != 0:
    K_eff_opensees = v_75 / d_75 # [kN/mm]
else:
    K_eff_opensees = 0

print(f"Análisis de la Curva de Capacidad (OpenSees):")
print(f"👉 V_max Sistema:      {V_max_abs:.2f} kN")
print(f"👉 V_75% (Servicio):   {v_75:.2f} kN")
print(f"👉 Despl. @ 75%:      {d_75:.2f} mm")
print(f"👉 Rigidez Efectiva:   {K_eff_opensees:.2f} kN/mm")

# 3. Cálculo de Rigidez Bruta Teórica (K_gross)
# -----
Ig_total = (B_tot * H_tot**3) / 12.0 # Inercia Bruta [mm4]
E_etabs = Ec_jack / 1000.0
L_mm = L_col
K_gross_etabs = (3 * E_etabs * Ig_total) / (L_mm**3)

```

```

print(f"\nReferencia Teórica (Sección Bruta Monolítica):")
print(f"    ♦ Sección Total:      {B_tot:.0f} x {H_tot:.0f} mm")
print(f"    ♦ Inercia Bruta (Ig): {Ig_total:.2E} mm4")
print(f"    ♦ Módulo E (Jacket): {E_etabs:.2f} kN/mm2")
print(f"    ♦ Rigidez Bruta (Kg): {K_gross_etabs:.2f} kN/mm")

# 4. Cálculo del Factor Modificador (Alpha)
# -----
alpha = K_eff_opensees / K_gross_etabs

print(f"\n" + "="*50)
print(f"🎯 RESULTADO FINAL (INPUT PARA ETABS)")
print(f"="*50)
print(f"  Modifier de Inercia (f11/f22): {alpha:.4f}")
print(f"="*50)

# --- PRESENTACIÓN DE FÓRMULAS (LaTeX) ---
# CORRECCIÓN: Se usa r"..." para evitar advertencias de sintaxis
print("\n[Formulación Matemática Utilizada]:")
display(Math(r"K_{eff} = \frac{V_{75\%}}{\Delta_{75\%}} = \frac{" + f"{v_75:.2f}"
+ r"}{" + f"{d_75:.2f}" + r"} = " + f"{K_eff_opensees:.2f}" + r"\ kN/mm"))
display(Math(r"K_{gross} = \frac{3 E_{jack} I_g}{L^3} = " +
f"{K_gross_etabs:.2f}" + r"\ kN/mm"))
display(Math(r"\alpha_{crack} = \frac{K_{eff}}{K_{gross}} = \mathbf{" +
f"{alpha:.4f}" + r"}"))

# 5. Gráfica de Validación (Comparativa de Rigideces)
# -----
plt.style.use('seaborn-v0_8-whitegrid')
plt.figure(figsize=(9, 6), dpi=110)

# Curva Real (Pushover)
# Nota: Graficamos todos los datos, pero los límites (xlim/ylim) ocultarán la
parte negativa si existe.
plt.plot(d_push, v_push, color='#922B21', linewidth=3, label='Curva Real
(OpenSees)', zorder=5)

# Proyección de Rigideces
x_lim_plot = d_75 * 2.5
x_vals = np.linspace(0, x_lim_plot, 100)

# 1. Rigidez Efectiva (Secante)
y_eff = K_eff_opensees * x_vals
plt.plot(x_vals, y_eff, color='#2980B9', linestyle='--', linewidth=2,
label=f'Rigidez Efectiva ($K_{{eff}}$) [Mod={alpha:.2f}]')

# 2. Rigidez Bruta (Teórica)
y_gross = K_gross_etabs * x_vals
plt.plot(x_vals, y_gross, color='gray', linestyle=':', linewidth=1.5,
label='Rigidez Bruta ($K_{{gross}}$) [Mod=1.00]')

# Marcadores
plt.plot(d_75, v_75, 'o', color='#2980B9', markersize=8, zorder=10,
markeredgecolor='white', label=r'Punto de Fluencia ($V_{75\%}$)')

# Decoración
plt.title(f'CÁLCULO DE RIGIDEZ EFECTIVA (Alpha = {alpha:.3f})',
fontweight='bold', pad=15)
plt.xlabel('Desplazamiento Lateral (mm)', fontweight='bold')
plt.ylabel('Fuerza Cortante (kN)', fontweight='bold')
plt.legend(loc='lower right', frameon=True, framealpha=0.95, shadow=True)

# Límites y Grilla
# Aseguramos que el límite Y se base en el V_max_abs CORRECTO (positivo)
plt.xlim(0, x_lim_plot)
plt.ylim(0, V_max_abs * 1.2)

```

```
plt.grid(True, linestyle='--', alpha=0.5)

plt.tight_layout()
plt.show()

print("✓ Cálculo de modifiers completado.")
```

Anexo 124

Script con Python – Curvas de mejor ajuste y coeficientes.

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.optimize import curve_fit
#%pip install scikit-learn
from sklearn.metrics import r2_score

# =====
# 1. INGRESO DE DATOS (Matriz Paramétrica)
# =====
x_data = np.array([0, 75, 100, 125, 150, 175, 200, 260, 300, 400, 420, 480, 540])
y_data = np.array([0.7792, 0.4444, 0.3910, 0.3690, 0.3588, 0.2320, 0.3310,
0.3194, 0.2912, 0.2984, 0.2772, 0.2683, 0.2615])

# =====
# 2. DEFINICIÓN DE PARÁMETROS FIJOS
# =====
alpha_base = 0.7792 # Intercepto (t=0)
alpha_min = 0.26 # Asíntota
Rango = alpha_base - alpha_min # 0.5192

# =====
# 3. DEFINICIÓN DE MODELOS PARA OPTIMIZACIÓN
# =====

# A. Modelo Exponencial:  $\alpha = \text{Rango} * e^{(-k*t)} + \alpha_{\text{min}}$ 
def func_exponential(t, k):
    return Rango * np.exp(-k * t) + alpha_min

# B. Modelo Racional:  $\alpha = (\text{Rango} * b) / (t + b) + \alpha_{\text{min}}$ 
def func_rational(t, b):
    return (Rango * b) / (t + b) + alpha_min

# =====
# 4. OPTIMIZACIÓN (Encontrar k y b)
# =====
# Ajuste Exponencial
popt_exp, pcov_exp = curve_fit(func_exponential, x_data, y_data, p0=[0.01],
bounds=(0, np.inf))
k_opt = popt_exp[0]

# Ajuste Racional
popt_rat, pcov_rat = curve_fit(func_rational, x_data, y_data, p0=[30], bounds=(0,
np.inf))
b_opt = popt_rat[0]

# =====
# 5. CÁLCULO DE PRECISIÓN (R^2)
# =====
y_pred_exp = func_exponential(x_data, k_opt)
y_pred_rat = func_rational(x_data, b_opt)

r2_exp = r2_score(y_data, y_pred_exp)
r2_rat = r2_score(y_data, y_pred_rat)

print("-" * 50)
```

```

print(f"RESULTADOS DE LA OPTIMIZACIÓN:")
print(f"1. Modelo Exponencial:")
print(f"   - Parámetro k óptimo: {k_opt:.5f}")
print(f"   - Bondad de Ajuste R²: {r2_exp:.4f}")
print(f"2. Modelo Racional:")
print(f"   - Parámetro b óptimo: {b_opt:.5f}")
print(f"   - Bondad de Ajuste R²: {r2_rat:.4f}")
print("-" * 50)

# =====
# 6. GENERACIÓN DE GRÁFICA
# =====
t_plot = np.linspace(0, 600, 200)

plt.figure(figsize=(10, 6), dpi=100)
plt.style.use('seaborn-v0_8-whitegrid')

# Datos
plt.scatter(x_data, y_data, color='#D32F2F', s=70, label='Datos Simulados',
            zorder=5, edgecolors='black')

# Curvas Optimizadas
plt.plot(t_plot, func_exponential(t_plot, k_opt), color='#1976D2', linewidth=2.5,
         label=f'Exponencial Ajustada (R²={r2_exp:.3f})\n$k={k_opt:.4f}$')

plt.plot(t_plot, func_rational(t_plot, b_opt), color='#388E3C', linewidth=2.0,
         linestyle='--',
         label=f'Racional Ajustada (R²={r2_rat:.3f})\n$b={b_opt:.1f}$')

# Referencias
plt.axhline(alpha_min, color='gray', linestyle=':', label=f'Asíntota (0.26)')
plt.axhline(alpha_base, color='gray', linestyle=':')

plt.title('OPTIMIZACIÓN DE PARÁMETROS: EXPONENCIAL vs RACIONAL', fontsize=12,
          fontweight='bold', pad=15)
plt.xlabel('Espesor del Encamisado $t_{jack}$ (mm)', fontsize=11,
           fontweight='bold')
plt.ylabel('Factor de Rigidez $\u03B1$ (Adimensional)', fontsize=11,
           fontweight='bold')
plt.xlim(0, 600)
plt.legend(loc='upper right', frameon=True, shadow=True)
plt.grid(True, linestyle='--', alpha=0.6)

plt.tight_layout()
plt.show()

```