



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

**IMPLEMENTACIÓN DE UN MODELO DE REFUERZO DE ACERO CON
PANDEO EN OPENSEES**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

ALVARO FELIPE PABLO MESA PEÑA

PROFESOR GUÍA:
LEONARDO MASSONE SÁNCHEZ.

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
FABIÁN ROJAS BARRALES
RICARDO HERRERA MARDONES

SANTIAGO DE CHILE
2021

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE:** Ingeniero Civil con mención en
Estructuras, Construcción y Geotecnia.
ESTUDIANTE: Alvaro Felipe Pablo Mesa Peña
FECHA: Septiembre, 2021
PROF. GUÍA: Leonardo Massone Sánchez

IMPLEMENTACIÓN DE UN MODELO DE REFUERZO DE ACERO CON PANDEO EN OPENSEES

La estructuración habitacional en Chile está centrada principalmente en estructuras de hormigón armado, donde las solicitaciones sísmicas toman mayor relevancia determinando esfuerzos de corte y axiales a los distintos elementos que la componen, entre ellos a los elementos de bordes de muros y columnas, cuyas grandes compresiones afectarán principalmente a las barras de refuerzo que son susceptibles a fallar por inestabilidad, pandeo. De esta forma, es que se han realizado diversos estudios para proveer herramientas que permitan determinar la respuesta histerética de una barra de refuerzo con degradación de esfuerzos por pandeo, entre ellos el modelo de Massone & Moroder, de formulación analítica que se centra en la idealización del pandeo en 4 rótulas plásticas, a las cuales mediante discretización e hipótesis de Bernoulli, se busca el equilibrio de momento a través de la iteración sobre la curvatura de la barra. Las iteraciones demandan un alto uso de recursos y de tiempo de ejecución, lo cual resulta ineficiente para una cantidad de deformaciones en análisis elevada, de modo que el modelo es modificado eliminando las iteraciones sobre la curvatura de la barra mediante una linealización de la curvatura de pandeo mediante compatibilización con modelos analíticos de la literatura con la misma formulación analítica pero con una distribución de tensiones en la rótula plástica de manera uniforme. El presente trabajo de título se centra en implementar el modelo no iterativo en el software de código abierto OpenSees, realizándose algunas modificaciones en cuanto al desarrollo de curvaturas para evitar que la barra se pandee en el otro sentido para cuando ésta se traccione, las cuales no se evitan solo con la linealización de la curvatura de la barra, sino mediante una restricción. Se hace uso de ensayos experimentales monotónicos y cíclicos extraídos de la literatura para verificar la precisión del modelo comparándose principalmente con el modelo iterativo para diferentes configuraciones de esbelteces y propiedades mecánicas, cuyo error se calcula mediante una diferencia de áreas bajo la curva esfuerzo - deformación, obteniéndose errores promedios por cantidad de ciclos cursado del orden del 5%, en el cual sin embargo el equilibrio de momento se transgrede al no ser requisito de convergencia en el modelo no iterativo. Aún es necesario mejorar el modelo no iterativo, para que se logre capturar degradación de curvaturas por cada ciclo transcurrido sin efectos de fatiga. Por último, se desprende de la linealización un ahorro del 80% del tiempo de ejecución del modelo no iterativo frente al iterativo, y por ende también de recursos computacionales.

Adicionalmente, se analiza la aplicabilidad tanto del modelo iterativo y no iterativo para secciones no circulares, presentando resultados consistentes para fases de carga que no presenten pandeo local, tomándose como base una sección doble T ensayada en un arriostramiento extraída de la literatura. Actualmente no se logra captar el efecto de pandeo local, sin embargo se estima que es posible hacerlo con una implementación del modelo desarrollado a cada fibra discretizada.

*A mi familia,
y a mis amigos de toda la vida*

Agradecimientos

Esta experiencia no ha sido fácil, mas enormemente enriquecedora de la cual he podido disfrutar áreas que antes parecían un poco más lejanas a mis aspiraciones. Este logro se debe enormemente al apoyo de mi familia, mis amigos y a los profesores de mi comisión, al profe Leo y al profesor Fabián en la guía para el desarrollo de ésta memoria.

Quiero agradecer en primer lugar a mi abuelita, mi vieja chica que ha estado desde que era una guagua cuidándome, de no ser por ella no estaría titulándome como ingeniero, también a mi mamá, cuyo apoyo a pesar de todas las diferencias que podamos tener, sigue estando ahí para mí; mi viejo que con todas las dificultades que la vida nos ha traído, se ha preocupado por nosotros regalandonos experiencias inolvidables. Agradecer también el apoyo de mis hermanos, Gonzalo y Diego, que han estado ahí tanto como hermanos y como amigos, Gonzalo que me ayudó a sobrellevar esta pandemia todas esas tardes viendo los videos del argentino Te lo resumo así nomas, viendo dragon ball z, jugando donkey kong y muchas otras cosas, del apoyo que ha representado toda la vida. Dieguin, por otra parte, a pesar de la distancia siempre en contacto y un gran apoyo en lo que ha sido mi desarrollo personal. Los quiero mucho!!

A mi familia de La Serena, mis tios y mis primos, que también han sido un pilar fundamental para mí, la infancia y esas escapadas para allá siempre han sido reponedoras, los quiero mucho!

A todos los que han formado parte de mi formación académica, al apoyo del profesor L.Massone que ha sido fundamental para el desarrollo de este trabajo, que siempre estuvo disponible para resolver cualquier duda que se presentase, y que a pesar de las falencias que uno presentase, el siempre estuvo ahí como una red de apoyo directa para lograr subsanarlas.

Agradecer también a todos mis amigos: A Mario, que ya nos hemos conocido desde 3º básico y la unión no se ha perdido. A mis amigos de la infancia: Pancho, Nico, Yury, Mumo, Benja, Talina por los años de amistad. A Cepeda y Scarlett que los he podido conocer mejor en etapa post colegio y hemos compartido harto. Y a cada persona que ha formado parte de mi circulo en la U: amigos de primer año y de especialidad. Gracias a todos por todos estos años de amistad y muchos más por venir!

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivos	5
1.2.1. Objetivo general	5
1.2.2. Objetivos específicos	5
1.3. Metodología	6
1.4. Entorno de OpenSees.	6
1.5. Resultados esperados	7
2. Antecedentes generales	8
2.1. Modelo de pandeo de una barra de refuerzo con imperfecciones: Massone & Moroder (2008)	8
2.1.1. Comportamiento monotónico en tracción	9
2.1.2. Comportamiento monotónico en compresión	10
2.1.3. Modelo cíclico	10
2.1.4. Modelo de barra de refuerzo con imperfección.	11
2.2. Modelo de Gomes & Appleton (1996)	13
2.3. Modelo histerético no iterativo de pandeo local	14
2.3.1. Análisis monotónico en compresión	15
2.3.2. Análisis cíclico de la barra de refuerzo	16
2.3.3. Ajuste de curvatura	18
3. Implementación en OpenSees	23
3.1. Estructura y jerarquía del entorno	23
3.1.1. Clases utilizadas para implementación	24
3.1.2. Estructura de un material uniaxial	26
3.2. Función implementada	27
3.2.1. Steel05	27
3.2.2. RSNonIterative	28
4. Verificación de implementación del Modelo	29
4.1. Comparación con Datos experimentales	30
4.1.1. Respuesta monotónica	30
4.1.2. Respuesta cíclica	32
4.2. Cuantificación de la precisión del modelo	39
4.3. Análisis de equilibrio de momento	42
4.4. Análisis de eficiencia de modelo implementado	45
4.5. Limitaciones del modelo	46

5. Aplicabilidad a otras secciones	47
5.1. Introducción de análisis y verificación	47
5.2. Comparación de resultados	48
6. Conclusiones	52
Bibliografía	54
Anexo A. Código de implementación en C++	56
A.1. Encabezado	56
A.2. Archivo de implementación del modelo	60
A.2.1. Inicialización de variables	61
A.2.2. Modelo no iterativo	64
Anexo B. Script de verificación de modelo implementado	72
Anexo C. Calibración de R en curva de recarga y descarga	75
Anexo D. Transgresión de equilibrio de momento	77

Índice de Tablas

1.1.	Modelos y estudios experimentales que incluyen Pandeo inelástico de barra de refuerzo	3
2.1.	Error porcentual de curvatura en máxima compresión	20
2.2.	Puntos de análisis asintótico de curvatura	21
3.1.	Parámetros de entrada Steel05	28
3.2.	Parámetros de entrada modelo RSNonIterative	28
4.1.	Propiedades mecánicas nominales de las barras de Tripathi y Egger et al.	29
4.2.	Error porcentual del modelo no iterativo	41
4.3.	Tiempos de ejecución de cada modelo.	45
5.1.	Propiedades nominales Acero SS400	48
5.2.	Fenómenos en fases de carga de cada configuración, Takeuchi (2015)	50
C.1.	Parametros de transición en curva de recarga y descarga	76

Índice de Ilustraciones

1.1.	Modos de pandeo de barras de refuerzo, Massone & Lopez [1].	2
1.2.	Comparación de respuesta con pandeo y sin pandeo de refuerzo	2
1.3.	Análisis según diferentes modelos	4
2.1.	Curva monótonica en tracción, Mander (1984)	9
2.2.	Modelo cíclico, Lacaze, C. (2009)	10
2.3.	Modelo de pandeo de barra de refuerzo, Massone & Moroder (2008).	11
2.4.	Discretización de barra y aplicación de hipótesis de Bernoulli, Massone & Moroder (2008).	12
2.5.	Modelo de 3 rótulas plásticas de Gomes & Appleton (1996)	13
2.6.	Distribución de tensiones en la zona de rótula plástica, Gomes & Appleton (1996).	13
2.7.	Modelo geométrico de 4 rótulas plásticas	14
2.8.	Comparación ϕ_p v/s ϵ_{cmax} , $\bar{\epsilon} = 5\%$, Rosa (2021)	15
2.9.	Relación de offset con esbeltez, Rosa (2021)	17
2.10.	Degradación de esfuerzo en tracción y curvatura.	18
2.11.	Esquema de ajuste asintótico de curvatura	19
2.12.	Solución de curvaturas no ajustadas, L/D = 15	20
2.13.	Modelo con ajuste asintótico de la curvatura.	21
2.13.	Modelo con ajuste asintótico de la curvatura (Continuación).	22
3.1.	Estructura de OpenSees, Fuente: OpenSees [16]	23
3.2.	Diagrama de funcionamiento de modelo ParallelMaterial	24
3.3.	Comportamiento monótonico de material Steel02	25
3.4.	Diagrama de modelo a implementar en OpenSees	25
4.1.	Comparación resultados experimental e iterativo con modelo implementado en respuesta monótonica, Bayrak & Sheik, L/D = 6	30
4.2.	Comparación resultados experimental e iterativo con modelo implementado en respuesta monótonica, Bayrak & Sheik, L/D = 8	30
4.3.	Comparación resultados experimental e iterativo con modelo implementado en respuesta monótonica, Bayrak & Sheik, L/D = 10	31
4.4.	Comparación resultados experimental e iterativo con modelo implementado, Barra 300E Tripathi et al. L/D = 6	32
4.5.	Comparación resultados experimental e iterativo con modelo implementado, Barra 300E Tripathi et al. L/D = 12	32
4.5.	Comparación resultados experimental e iterativo con modelo implementado, Barra 300E Tripathi et al. L/D = 12, Continuación	33
4.6.	Comparación respuesta experimental y modelo iterativo con modelo implementado, Barra 300E Tripathi et al. L/D = 15.	33
4.7.	Degradación de esfuerzos, L/D = 12 y $\epsilon_{max} = 6\%$	34

4.8.	Comparación resultados experimental e iterativo con modelo implementado, Barra 500E Tripathi et al. $L/D = 6$	34
4.9.	Comparación resultados experimental e iterativo con modelo implementado, Barra 500E Tripathi et al. $L/D = 12$	35
4.10.	Comparación resultados experimental e iterativo con modelo implementado, Barra 500E Tripathi et al. $L/D = 15$	36
4.11.	Comparación modelo experimental e iterativo con modelo implementado, Barra ASTM A706 Gr.80. y $L/D = 10$	37
4.12.	Comparación modelo experimental e iterativo con modelo implementado, Barra ASTM A706 Gr.80. y $L/D = 15$	38
4.13.	Curva esfuerzo-deformación en fibra más traccionada y comprimida, $L/D = 10$ & $\epsilon_a = 0.045$	39
4.14.	Esquema de área bajo la curva para esfuerzos de igual signo.	40
4.15.	Esquema de área bajo la curva para esfuerzos de distinto signo	40
4.16.	Comparación de equilibrio de momento, Modelo iterativo y no iterativo, $L/D = 6$, $\epsilon_{\max} = 0.04 - \epsilon_{\min} = -0.04$	42
4.17.	Comparación de equilibrio de momento, Modelo iterativo y no iterativo, $L/D = 12$, $\epsilon_{\max} = 0.06 - \epsilon_{\min} = -0.03$	43
4.18.	Comparación de equilibrio de momento, Modelo iterativo y no iterativo, $L/D = 12$, $\epsilon_{\max} = 0.1 - \epsilon_{\min} = 0$	43
4.19.	Comparación de equilibrio de momento, Modelo iterativo y no iterativo, $L/D = 15$, $\epsilon_{\max} = 0.04 - \epsilon_{\min} = -0.04$	44
4.20.	Configuración con esbeltez y amplitud de deformaciones elevada.	46
5.1.	Sección en análisis y discretización	47
5.2.	Historial de deformaciones configuración de ciclos con amplitud en aumento gradual	48
5.3.	Comparación de respuesta de configuración con incremento gradual entre modelo iterativo, no iterativo y respuesta experimental Takeuchi, 2015.	49
5.4.	Historial de deformaciones configuración de ciclos con amplitud en decremento gradual	49
5.5.	Comparación de respuesta de configuración con decremento gradual entre modelo iterativo, no iterativo y respuesta experimental Takeuchi, 2015.	49
5.6.	Historial de deformaciones configuración de ciclos con amplitud en aumento excéntrico	50
5.7.	Comparación de respuesta de configuración con incremento excéntrico entre modelo iterativo, no iterativo y respuesta experimental Takeuchi, 2015.	50
B.1.	Esquema de barra a modelar en OpenSees	72
C.1.	Efecto de variación del parametro de curvatura de transición en Menegoto - Pinto	75
C.2.	Comparación de variación de parámetro de transición de curvatura.	76
C.3.	Desplazamiento de curva de transición en curva de recarga	76
D.1.	Comparación de equilibrio de momento, Modelo iterativo y no iterativo, $L/D = 6$, $\epsilon_{\max} = 0.04 - \epsilon_{\min} = -0.04$, Barra 500E	77
D.2.	Comparación de equilibrio de momento, Modelo iterativo y no iterativo, $L/D = 12$, $\epsilon_{\max} = 0.06 - \epsilon_{\min} = -0.03$, Barra 500E	78
D.3.	Comparación de equilibrio de momento, Modelo iterativo y no iterativo, $L/D = 12$, $\epsilon_{\max} = 0.1 - \epsilon_{\min} = 0$, Barra 500E	78

D.4.	Comparación de equilibrio de momento, Modelo iterativo y no iterativo, L/D = 15, $\epsilon_{\max} = 0.04$ - $\epsilon_{\min} = -0.04$, Barra 500E	78
D.5.	Comparación de equilibrio de momento, Modelo iterativo y no iterativo, L/D = 10, $\epsilon_a = 0.031$	79
D.6.	Comparación de equilibrio de momento, Modelo iterativo y no iterativo, L/D = 10, $\epsilon_a = 0.045$	79
D.7.	Comparación de equilibrio de momento, Modelo iterativo y no iterativo, L/D = 15, $\epsilon_a = 0.031$	80
D.8.	Comparación de equilibrio de momento, Modelo iterativo y no iterativo, L/D = 15, $\epsilon_a = 0.045$	80

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación

En un país sísmico como lo es Chile, las estructuras se encuentran sometidas recurrentemente a cargas cíclicas derivadas de los sismos. En rasgos generales, esta particularidad implica que las estructuras de hormigón armado, en sus elementos estructurales, tales como marcos y muros, estén sometidos a ésta situación, lo cual determina ciclos de tracción y compresión a las barras de refuerzo de los elementos de borde.

Dependiendo de la magnitud de los eventos sísmicos, se puede llegar a la situación en que se incurre en deformaciones inelásticas, al aceptar daño en sus bases de diseño, según el código chileno. De alcanzarse mayores deformaciones inelásticas, el recubrimiento de hormigón comienza a desprenderse y el refuerzo de acero tiene mayor libertad para deformarse transversalmente, en un fenómeno conocido como Pandeo.

El acero es un material que se caracteriza por una gran capacidad a tracción, en contraste a su comportamiento en compresión, donde en lugar de una falla por resistencia, ocurre una falla por inestabilidad, pandeo. Según el modo de pandeo de las barras de refuerzo, se describen dos tipos:

- Pandeo local: Falla de barras de refuerzo entre dos estribos consecutivos. El nivel de sollicitación, las condiciones de apoyo y las propiedades del material influyen en la manera en que la barra se deforma.
- Pandeo global: Se denomina pandeo global cuando la falla ocurre en un largo mayor a la separación de dos estribos consecutivos. Controlado por las condiciones de las barras de refuerzo como también las propiedades del material del estribo que confina las barras de refuerzo de las columnas o elementos de borde del muro.

La figura (1.1) esquematiza cada tipo de pandeo en el elemento confinado:

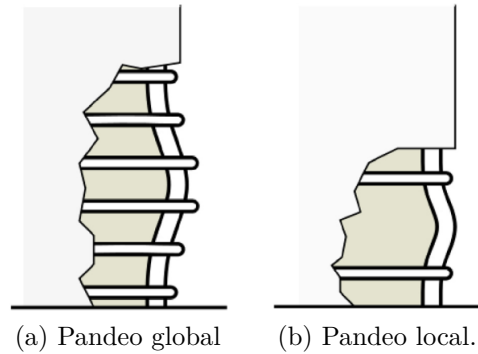


Figura 1.1: Modos de pandeo de barras de refuerzo, Massone & Lopez [1].

De hecho, el utilizar o no utilizar un modelo que considere esta problemática afecta enormemente la respuesta dependiendo de las condiciones en que se disponga la barra de refuerzo, a modo de ejemplo, la figura (1.2) muestra las grandes diferencias entre datos experimentales de una barra con una esbeltez $L/D = 12$ y tensión de fluencia $F_y = 311.5$ [MPa] que incluyen el efecto de pandeo y fatiga, y un modelo cíclico simple de Menegoto - Pinto que no considera la inestabilidad geométrica planteada.

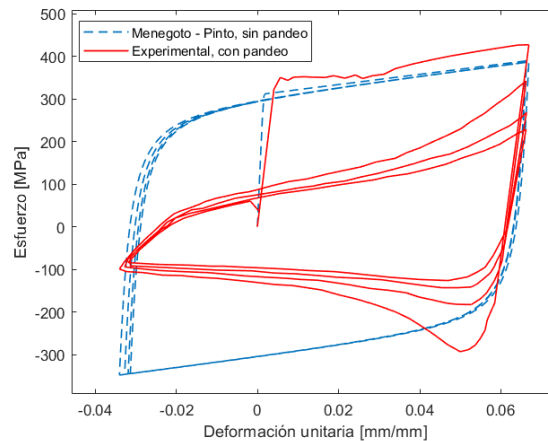


Figura 1.2: Comparación de respuesta con pandeo y sin pandeo de refuerzo

Dada esta problemática, es que ha sido de gran interés el estudio de este mecanismo de falla, habiendo hoy en día una variedad de modelos que analizan el comportamiento tanto monotónico e histerético de los refuerzos de acero. Se distinguen modelos analíticos, experimentales, energéticos, por modelación mediante elementos finitos, etc. caracterizando este modo de falla a través de las propiedades del material; tensión de fluencia (F_y) y propiedades geométricas: relación largo - diámetro de barra, denominado esbeltez.

Actualmente, en OpenSees, plataforma en la cual se pretende implementar un modelo de solución eficiente y simple, cuenta con dos modelos que incluyen pandeo en su formulación, detallados en la tabla (1.1), y otros que por el momento aun no han sido implementados en el entorno mencionado.

Tabla 1.1: Modelos y estudios experimentales que incluyen Pandeo inelástico de barra de refuerzo

Modelos de refuerzo de acero con pandeo local		Estudios experimentales
Modelos implementados en OpenSees	Modelos no implementados en OpenSees	
Dhakal & Maekawa (2002)	Monti & Nuti (1992)	Bayrak & Sheikh (2001)
Gomes & Appleton (1996)	Mau & El-Mabsout (1989)	Cosenza & Prota (2005)
	Fragiadakis (2008)	Bae et al (2005)
	Massone & Moroder (2008)	Tripathi et al (2018)
	Sosa & Kowalsky (2020)	
	Urmson & Mander (2012)	
	Minafo (2018)	
	Zhou et al (2016)	

En esta extensa librería de modelos y estudios experimentales disponibles para el análisis de la respuesta histerética de la barra de refuerzo con Pandeo, estos sientan sus bases en diferentes supuestos y/o metodologías de análisis: Se tienen modelos analíticos como el Gomes & Appleton [2], el cual se caracteriza por un análisis de plasticidad concentrada en 3 rótulas plásticas con una simplificación en la distribución de tensiones en las rótulas; modelos analíticos como el de Massone & Moroder [3], que además de analizar el comportamiento histerético por medio de plasticidad concentrada, lo expande a un modelo de 4 rótulas plásticas, lo que permite un análisis más cercano al comportamiento de la barra en el pandeo, al cual adicionalmente, a diferencia del modelo de Gomes & Appleton, se analiza el comportamiento a nivel de fibras mediante hipótesis de Bernoulli (Secciones planas permanecen planas).

Otros modelos como el de Monti & Nuti [4], estudian el comportamiento cíclico de la barra con la inclusión de reglas de endurecimiento isotrópico y cinemático y reglas de memoria y saturación cíclica. Este modelo ha sido usado como base a modificaciones hechas por Fragiadakis [5], quien soluciona errores del modelo en donde se generaban curvas espurias, como también Zhou et al [6], quienes desarrollan algunas mejoras al modelo de Monti & Nuti e implementan el mismo en OpenSees. Cabe decir que el modelo aun no está disponible en la librería actual de OpenSees, por lo cual no se incluye en la sección correspondiente de la tabla 1.1.

Por otra parte, modelos como el de Dhakal & Maekawa ([7],[8]), quienes mediante un enfoque de elementos finitos, modifican la envolvente en compresión, considerando las propiedades mecánicas de la barra (F_y) y la esbeltez (L/D). Posterior a este avance, desarrollan un modelo cíclico, modificando el modelo de Menegotto - Pinto, mediante un ajuste de las rigideces de las curvas de recarga y descarga. El aspecto ventajoso que presenta este modelo consiste en que es de solución simple y eficiente en cuanto a uso computacional, lo cual ha implicado que sea utilizado en la formulación de varios estudios en ésta área.

Existe una cartera extensa de modelos que describen este fenómeno, como el Urmson & Mander [9] que desarrollan una relación simple mediante el análisis acoplado de la deformación lateral con la compresión axial de la barra por medio de formulación de elementos finitos, que

al igual que Dhakal & Maekawa, definen el comportamiento tomando en consideración las propiedades mecánicas de la barra como las condiciones geométricas de la misma. Finalmente Minafo [10], comparando el modelo de Dhakal & Maekawa y Urmson & Mander, decide modificar el modelo de Dhakal & Maekawa mediante el ajuste de algunos parámetros para mejorar su precisión.

Modelos más recientes han tratado de analizar el pandeo de la barra incluyendo la restricción de pandeo al interior del nucleo confinado, como lo hizo Sosa & Kowalsky [11], en un modelo que ha sido implementado en SeismoStruct, que a diferencia de OpenSees, es un programa comercial. El modelo sin embargo, es apto de implementación en OpenSees.

Con la finalidad de verificar los modelos que se estudian, se han desarrollado algunos estudios experimentales tales como Bayrak & Sheikh [12], Cosenza & Prota [13], Bae et al. [14], quienes han analizado el comportamiento de la barra en compresión dada diferentes condiciones de esbeltez, excentricidades y propiedades mecánicas, rescatándose las siguientes conclusiones:

- La esbeltez limite frente a la cual la ductilidad es tal que el pandeo se desprecia es $L/D = 5$ a 6 .
- Logran aseverar la existencia de una directa relación de la tensión de fluencia en el pandeo de la barra.
- Para esbelteces mayores a 20 , el pandeo se acerca más a un pandeo elástico euleriano, donde la tensión de fluencia no se alcanza a producir.

A modo de ejemplo, se muestra en la figura 1.3, el análisis según diferentes modelo de una barra con esbeltez igual a 12 y una tensión de fluencia $F_y = 350$ [MPa]: Menegotto - Pinto, Gomes & Appleton; donde el pandeo es implementado con factores de ajuste de modo que el usuario defina la degradación en el punto máximo de compresión, Dhakal & Maekawa y también el modelo iterativo de Massone & Moroder. El modelo de Gomes & Appleton es utilizado con un factor de ajuste $r = 0.2$.

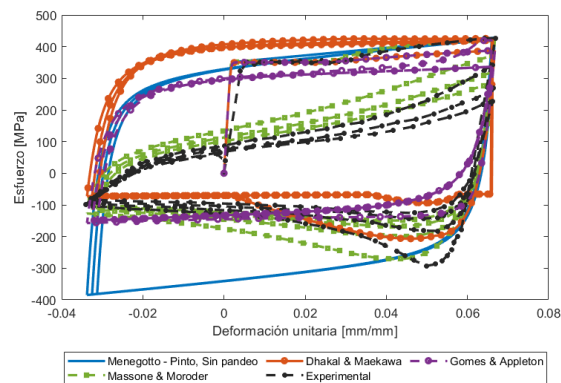


Figura 1.3: Análisis según diferentes modelos

En este sentido, considerándose los dos modelos ya implementados dentro de OpenSees, es posible distinguir diferencias notables de formulación y eficacia en el procesamiento del análisis entre cada uno de estos: El modelo de Dhakal & Maekawa, es un modelo eficiente de bajos

recursos computacionales, pero que tiene su sustento en la modificación directa del modelo constitutivo del acero. Por otra parte, el modelo de Gomes & Appleton, tiene la particularidad de ser un modelo analítico, pero que simplifica la distribución de tensiones en la rótula, lo que conlleva a un uso del modelo con precaución dado estos supuestos. Adicionalmente, según la figura 1.3, que la curva de recarga desde las compresiones a las tracciones de la barra, el desarrollo de esfuerzos del modelo iterativo es similar al experimental, mientras que el modelo de Gomes & Appleton y Dhakal & Maekawa no, cuya curva de recarga se asemeja al modelo sin pandeo.

En base a estas ventajas y desventajas, se observa que el modelo de Massone & Moroder cumple con las características de ser un modelo analítico, en base a un análisis de la curvatura de la barra mediante una distribución no uniforme de tensiones en la rótula plástica, el cual ha sido verificado con una buena correlación con estudios experimentales desarrollados. Sin embargo, su formulación iterativa sobre la curvatura, a diferencia del modelo de Dhakal & Maekawa, implica un uso excesivo de recursos computacionales, en el cual cada análisis toma un tiempo elevado para ser llevado a cabo.

Es en base a esto, que Rosa (2021) [15], modifica el modelo de Massone & Moroder y elimina las iteraciones disminuyendo en gran medida el tiempo de ejecución y el consecuente requerimiento computacional para ejecutarlo, de tal manera que se hace necesario implementar el modelo desarrollado en una plataforma de modelación en elementos finitos, como lo es OpenSees.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Implementar modelo no iterativo de refuerzo de acero con pandeo local, desarrollado por Rosa (2021), en el entorno OpenSees, de tal manera que pueda ser utilizado en el análisis de modelos de edificios en sus muros y columnas.

1.2.2. Objetivos específicos

- Implementar y/o modificar código computacional en OpenSees de modelo de pandeo local.
- Verificar mediante comparación con modelo iterativo original, Massone & Moroder (2008).
- Verificar modelo implementado con estudios experimentales que analicen el efecto del pandeo local de la barra.
- Revisar viabilidad de aplicación de modelo en secciones de acero compactas sometidas a pandeo global.

1.3. Metodología

Dado los objetivos planteados, es que es necesario conocer tanto el funcionamiento del modelo a implementar como el funcionamiento interno del entorno OpenSees, por lo cual el procedimiento a seguir fue el siguiente:

- Revisión de literatura existente de modelos existentes que analizan el pandeo de refuerzo.
- Estudio del modelo a implementar.
- Estudio del funcionamiento de OpenSees y determinar vías de implementación que faciliten el proceso.
- Verificación del modelo implementado en OpenSees mediante comparación con modelo implementado en Matlab, en conjunto con el modelo iterativo.

1.4. Entorno de OpenSees.

OpenSees [16] es un entorno de código abierto, proyecto que surgió en base a la tesis doctoral de Dr. Frank McKenna en la Universidad de California, Berkeley, el cual cuenta con el soporte continuo por parte de la *red para simulaciones de ingeniería sísmica* ("*Network for Earthquake Engineering Simulation [NEES]*"). Este entorno cuenta con diferentes subrutinas y rutinas que definen materiales, elementos, integradores, métodos numéricos de resolución tales como Newton-Raphson, etc., dispuestos para la resolución de diferentes modelos de sistemas estructurales y/o geotécnicos.

Una de las ventajas de ser un software de código abierto, es que el código es de libre acceso para quién lo necesite, de tal modo que ha existido una gran participación de la comunidad científica de ingenieros, los cuales se han encargado de aportar nuevas soluciones de materiales, elementos, etc., que permiten modelar sistemas estructurales y/o geotécnicos con la suficiente precisión y control sobre el mismo que se estime necesario.

Este mismo hecho es lo que lo diferencia de programas comerciales como Etabs, SAP2000, etc, programas que cumplen la misma función mediante rutinas desarrolladas por aquel que provee el software, sin conocer el código interno lo que conlleva a realizar soluciones con modelos que tienen supuestos diferentes de lo cual se quiera modelar. Sin embargo, en contraparte de OpenSees, aquellos programas de código cerrado, están en constante mantenimiento y desarrollo por parte de un equipo especializado, lo cual de todas maneras entrega garantías para que empresas lo utilicen con el suficiente resguardo.

En base a lo anteriormente explicado, es que se reconocen dos tipos de usuarios:

- Usuario: Corresponde a aquel que utiliza las rutinas existentes dentro del entorno de OpenSees para obtener soluciones para un modelo de un sistema estructural y/o geotécnico en específico, mediante el uso del lenguaje de programación Tcl/Tk.
- Desarrollador: Corresponde a aquel que desarrolla y define nuevos modelos de materiales, nuevos integradores, nuevos elementos, etc. mediante el uso de lenguaje de programación C / C++ o Fortran.

1.5. Resultados esperados

Se espera lograr una correcta implementación del modelo en OpenSees, tanto en términos técnicos del modelo como factores de forma, es decir, manejo de datos ingresados por el usuario, manejo de la memoria computacional de forma de no saturar el sistema con escritura de memoria innecesaria y así lograr la eficiencia computacional deseada.

Luego se espera que la implementación del modelo sea similar al modelo iterativo en términos de degradación de esfuerzos por pandeo para distintas esbelteces de acuerdo a set de ensayos experimentales cíclicos y monotónicos, lo cual se verificará de acuerdo a los ensayos de Tripathi, Egger y Bayrak & Sheikh.

Capítulo 2

Antecedentes generales

2.1. Modelo de pandeo de una barra de refuerzo con imperfecciones: Massone & Moroder (2008)

El modelo desarrollado por Rosa (2021) [15], está principalmente basado en el modelo de pandeo de las barras de refuerzo con imperfecciones de Massone & Moroder (2008), quienes determinan la respuesta esfuerzo - deformación de la barra con pandeo por medio de una no linealidad geométrica y no en el modelo constitutivo base.

El modelo base es un modelo iterativo sobre la curvatura generada por la deflexión de la barra en el pandeo y sobre una imperfección inicial, iteración que se ha eliminado mediante la linealización de la misma.

El modelo consiste en un análisis de una barra con plasticidad concentrada en 4 rótulas plásticas, cuya sección transversal se analiza con una discretización a nivel de fibras mediante el cumplimiento de la hipótesis de Bernoulli, es decir, que las secciones planas permanecen planas.

Se considera el análisis cíclico mediante el uso de la envolvente en tracción descrita en el modelo de Mander (1984) [17], el ajuste de Dodd & Restrepo-Posada (1995) [18] en el ajuste de la zona de compresión producto del efecto Poisson y la consecuente disminución de los esfuerzos.

2.1.1. Comportamiento monotónico en tracción

El modelo define un comportamiento monotónico en tracción asociado al modelo de Mander, con un comportamiento elasto-plástico con endurecimiento:

- Rango elástico - lineal hasta alcanzar el punto de fluencia: $\epsilon_y - F_y$.
- Plateau de fluencia: Zona de tensiones generalmente constante, hasta alcanzar un punto de endurecimiento del material. El comportamiento de la zona de endurecimiento depende del tipo de acero, pues pueden obtenerse cambios suavizados entre la zona elástica y la zona de endurecimiento del material.
- Zona de endurecimiento del material: Proceso bajo el cual existe un aumento en las tensiones del material asociado a un aumento en las deformaciones plásticas, hasta alcanzar una tensión máxima.
- Zona de degradación en tracción: Zona de la curva $\sigma - \epsilon$, en la cual el esfuerzo decrece con el aumento de las deformaciones. El modelo por simplicidad y utilidad, lo representa mediante una degradación lineal hasta la tensión de rotura.

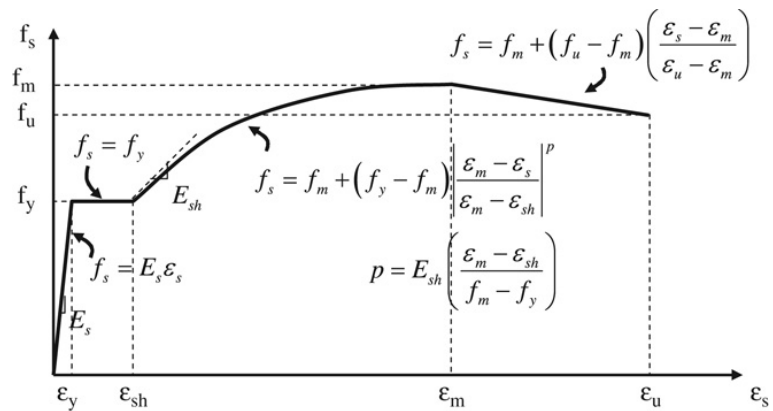


Figura 2.1: Curva monotónica en tracción, Mander (1984)

2.1.2. Comportamiento monotónico en compresión

El comportamiento monotónico en compresión, se define en base a la envolvente del comportamiento en tracción, con las medidas dispuestas por Dodd & Restrepo [18], en la corrección de los esfuerzos en compresión dado el ensanche de la sección transversal de la barra producto del efecto Poisson. Esto se describe mediante las ecuaciones 2.1 y 2.2 :

$$f_{s,c} = -f_{s,t} \cdot (1 + \epsilon_{s,t})^2 \quad (2.1)$$

$$\epsilon_{s,c} = -\frac{\epsilon_{s,t}}{1 + \epsilon_{s,t}} \quad (2.2)$$

Donde:

- $f_{s,c}$: Esfuerzo de compresión en coordenadas ingenieriles.
- $f_{s,t}$: Esfuerzo de tracción en coordenadas ingenieriles.
- $\epsilon_{s,c}$: Deformación unitaria de compresión, en coordenadas ingenieriles.
- $\epsilon_{s,t}$: Deformación unitaria de tracción , en coordenadas ingenieriles.

2.1.3. Modelo cíclico

Tal como se ha descrito anteriormente, el asumir comportamiento en tracción y compresión no siempre es totalmente correcto, más aun cuando se estudian barras con imperfecciones, para los cuales ya los primeros ciclos presentan relativamente altas deformaciones, es por esto que se hace necesario un modelo que permita el análisis para bajos ciclos con deformaciones medianamente altas.

El modelo define una curva simple, descrita en la figura 2.2, que incorpora la ley de Bauschinger, considerando los comportamientos monotónicos en tracción y compresión. El efecto de Bauschinger define un comportamiento del material, en el cual cuando ocurre una inversión de cargas (descarga o recarga), luego de sobrepasado el límite plástico, el módulo de elasticidad es menor. Se simplifica una expresión que describe este efecto según el modelo de Menegotto - Pinto, asumiendo una rigidez inicial y final de la curva que une ambas envolventes, descrita en la ecuación 2.3:

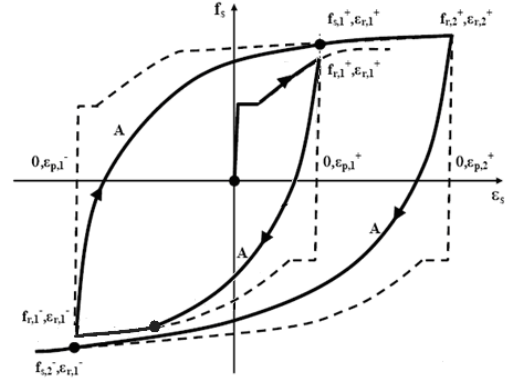


Figura 2.2: Modelo cíclico, Lacaze, C. (2009)

$$f_s = f_0 + E_0(\epsilon_s - \epsilon_0) \left[Q + \frac{1 - Q}{\left(1 + \left[E_0 \left(\frac{\epsilon_s - \epsilon_0}{f_f - f_0} \right) \right]^R \right)^{1/R}} \right] \quad (2.3)$$

Donde:

$$Q = \frac{E_{\text{sec}}/E_0 - a}{1 - a}$$

$$E_{\text{sec}} = \frac{f_f - f_0}{\epsilon_f - \epsilon_0}$$

$$a = \left(1 + \left[\frac{E_0}{E_{\text{sec}}}\right]^R\right)^{-1/R}$$

R : Parámetro que representa el efecto Bauschinger.
 E_0 : Módulo inicial de descarga o recarga de la barra
 f_0 / ϵ_0 : Esfuerzo y deformación unitaria inicial de la curva de descarga/recarga.
 f_f / ϵ_f : Esfuerzo y deformación unitaria final de la curva de descarga/recarga.

De esta forma, conociéndose el valor del módulo inicial de la curva de descarga/recarga y el parámetro R, se logra definir completamente la ecuación representativa de la curva. De tal forma que Chang & Mander definen estos parámetros, luego de una calibración experimental, según las ecuaciones 2.4 a 2.7, teniéndose en consideración que $\Delta\epsilon = \frac{|\epsilon_f - \epsilon_0|}{2}$:

Curva de descarga:

$$E_0 = E_s (1 - 3\Delta\epsilon) \quad (2.4)$$

$$R = 16 (1 - 10\Delta\epsilon) \left(\frac{f_y}{E_s}\right)^{1/3} \quad (2.5)$$

Curva de recarga:

$$E_0 = E_s (1 - \Delta\epsilon) \quad (2.6)$$

$$R = 20 (1 - 20\Delta\epsilon) \left(\frac{f_y}{E_s}\right) \quad (2.7)$$

2.1.4. Modelo de barra de refuerzo con imperfección.

La barra de refuerzo, tal como se requiere definir asociado a un pandeo local, se modela como una barra vertical con los dos extremos fijos excepto el superior, que puede deslizarse longitudinalmente para compatibilización de deformaciones. Se describe una barra que concentra sus deformaciones en cuatro rótulas plásticas.

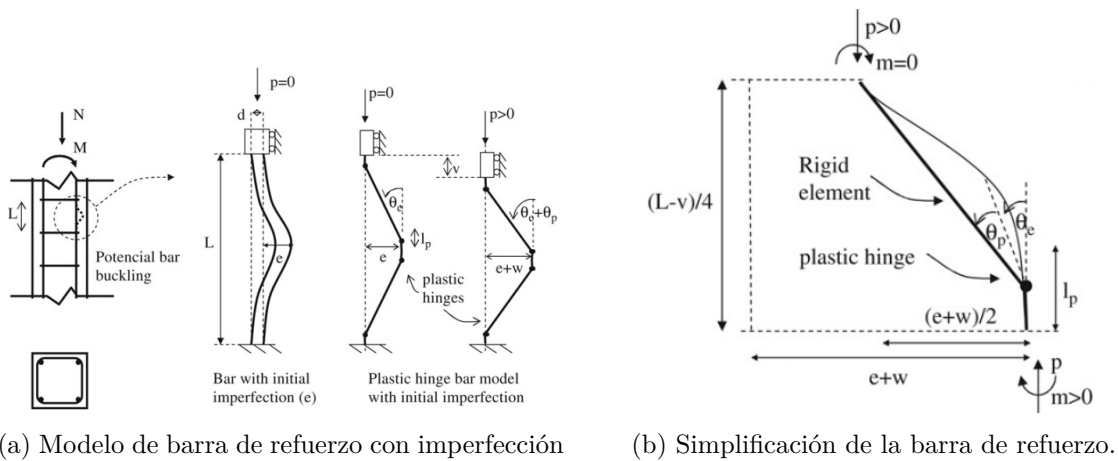


Figura 2.3: Modelo de pandeo de barra de refuerzo, Massone & Moroder (2008).

El modelo describe un procedimiento consistente en dos grandes etapas:

I Generación de imperfección inicial:

El modelo original inicia con la generación de una imperfección inicial mediante la aplicación de una carga transversal, sin embargo, el modelo histerético a implementar no toma en consideración la imperfección de la misma, por lo cual este proceso no tiene mayor relevancia para el presente trabajo.

II Aplicación de carga axial:

Se aplica una carga axial, a la cual según análisis simplificado de acuerdo a la figura (2.3.b), se realiza un análisis seccional de la barra discretizada, definiendo el comportamiento de cada fibra acorde a la hipótesis de Bernoulli, tal como lo muestra la figura 2.4.

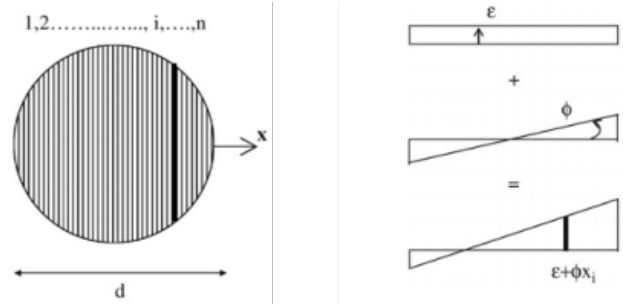


Figura 2.4: Discretización de barra y aplicación de hipótesis de Bernoulli, Massone & Moroder (2008).

De este modo se busca asegurar equilibrio de momento dada la aplicación de la carga y la deflexión 'w' producto del pandeo, cuyo momento producido es descrito mediante la ecuación (2.8):

$$m = p \cdot \frac{w}{2} \quad (2.8)$$

La deflexión de la barra, mediante razones trigonométricas, se deduce de la figura (2.3.b), tomándose en cuenta la distribución de la curvatura sobre un largo de rótula plástica, que se mantiene constante e igual al diámetro de la barra durante todo el proceso, hecho que también lo sostienen Dhakal & Maekawa al momento de describir el cambio de deformaciones en el centro de la barra acorde el pandeo se produce [7]. También se describe la curvatura a la cual la barra se somete a medida que el pandeo ocurre idealizado mediante esta concentración de deformaciones sobre el largo de la rótula plástica.

$$w = \sin(\theta_p) \cdot \left(\frac{L}{2} - l_p\right) \quad (2.9)$$

$$\theta_p = -\phi_p l_p \quad (2.10)$$

Adicionalmente, el desplazamiento longitudinal tanto por la imperfección, que se desprecia, y la aplicación de la carga axial, se describe de tal forma que se pueden definir desacopladamente, de la manera descrita en la ecuación 2.11

$$v = v_\epsilon + v_\phi = (L - 2l_p) [1 - \cos(\theta_p)] + 4l_p \epsilon_p \quad (2.11)$$

Por otra parte, cabe mencionar que Lacaze (2009) [19] modifica el modelo, de tal forma que se concentran las rotaciones en las rótulas plásticas, mas no las deformaciones axiales, las cuales son distribuidas a lo largo de la barra, de modo que se modifica la ecuación 2.11 de la manera descrita en la ecuación 2.12

$$v = (L - 2l_p) [1 - \cos(\theta_p)] + \epsilon_0 L \quad (2.12)$$

De este modo, el modelo a implementar, modificado por Rosa, busca eliminar la iteración sobre la curvatura y así simplificar el análisis e implementarlo en la plataforma de OpenSees.

2.2. Modelo de Gomes & Appleton (1996)

Una de las bases en la cual la modificación desarrollada por Rosa, recae en el uso del modelo de Gomes & Appleton al ser también un modelo de plasticidad concentrada.

El modelo originalmente está idealizado con una concentración de deformaciones en 3 rótulas plásticas y no 4, como lo analiza el modelo iterativo de Massone & Moroder, tal como se describe en la figura 2.5 :

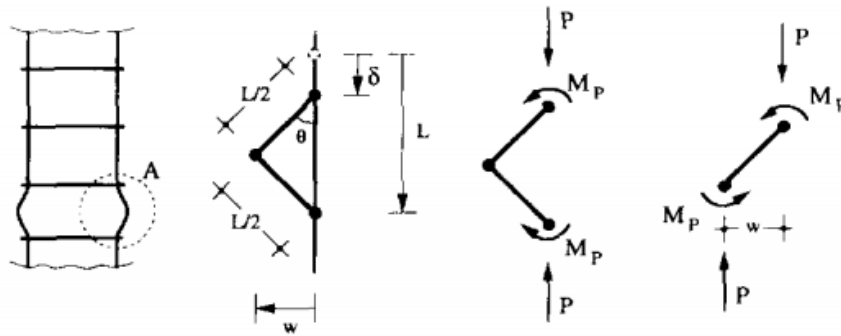


Figura 2.5: Modelo de 3 rótulas plásticas de Gomes & Appleton (1996)

Del mismo modo que el modelo de Massone & Moroder, Gomes & Appleton busca asegurar el equilibrio de momento generado por la deflexión de la barra, sin embargo con la salvedad que simplifica la distribución de tensiones en la sección transversal de la rótula plástica, con una distribución uniforme, tal cual lo describe la figura 2.6 :

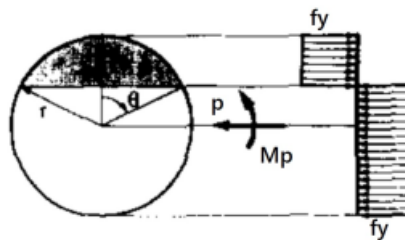


Figura 2.6: Distribución de tensiones en la zona de rótula plástica, Gomes & Appleton (1996).

2.3.1. Análisis monotónico en compresión

Rosa compara el modelo original de Massone & Moroder con el modelo modificado de Gomes & Appleton, donde determina un parámetro que otorgue mayor semejanza entre ambos modelos, tal como lo muestra la figura (2.8), el cual es la deformación en la fibra más comprimida, expresada según la curvatura y la deformación en el centro de la barra.

$$\epsilon_{cmax} = \epsilon_0 + \phi_p \frac{d}{2} \quad (2.15)$$

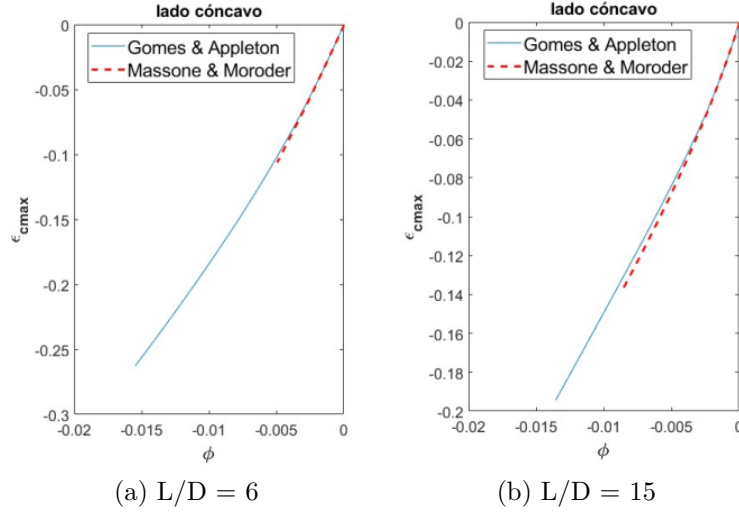


Figura 2.8: Comparación ϕ_p v/s ϵ_{cmax} , $\bar{\epsilon} = 5\%$, Rosa (2021)

Para el equilibrio, siguen siendo válidas la configuración original propuestas en el modelo de Massone & Moroder, sin considerar imperfecciones iniciales, por lo que la compatibilidad geométrica, según fibra más comprimida se describe en la ecuación 2.16

$$\bar{\epsilon} = \left(1 - \frac{2l_p}{L}\right) \cdot \frac{(\phi \cdot d)^2}{2} + \epsilon_{cmax} - \frac{\phi \cdot d}{2} \quad (2.16)$$

De tal forma, que mediante la aplicación de las compatibilidades geométricas del modelo de Gomes & Appleton modificado, junto con los desplazamientos transversales que se pueden extraer del análisis, Rosa deduce la expresión descrita en la ecuación 2.17:

$$\left. \begin{aligned} \omega &= \sqrt{\frac{(\bar{\epsilon} - \epsilon_0) L (L - 2l_p)}{2}} \\ \theta_p &= -\phi l_p \\ l_p &= d \end{aligned} \right\} \rightarrow \phi = \frac{-8 \sin^3(\theta)}{(3\pi + 3 \sin(2\theta) - 6\theta)(L - 2d)} \quad (2.17)$$

De esta manera, Rosa determina diferentes relaciones para distintas esbelteces en un rango de deformaciones de 0 al 20 %, con tal de no perder precisión en las esbelteces altas. Estas relaciones se estiman, considerando que es posible determinar la curvatura mediante una ecuación cuadrática descrita en la ecuación 2.18, en conjunto con la ecuación de compatibilidad 2.16:

$$\epsilon_{max} = C_0 + C_1(\phi \cdot d) + C_2 \cdot (\phi \cdot d)^2 \quad (2.18)$$

De tal manera que las constantes para cada configuración geométrica se detallan en las ecuaciones 2.19, 2.20 y 2.21.

▪ C_0 :

$$C_0 = \begin{cases} 6 \cdot 10^{-5} \left(\frac{L}{d}\right)^2 - 1.2 \cdot 10^{-3} \left(\frac{L}{d}\right) + 2.6 \cdot 10^{-3} & \text{si } \frac{L}{d} < 10 \\ 6 \cdot 10^{-7} \left(\frac{L}{d}\right)^2 + 3 \cdot 10^{-5} \left(\frac{L}{d}\right) - 3.7 \cdot 10^{-3} & \text{si } \frac{L}{d} \geq 10 \end{cases} \quad (2.19)$$

▪ C_1 :

$$C_1 = 1.1912 \left(\frac{L}{d}\right)^{-0.211} \quad (2.20)$$

▪ C_2 :

$$C_2 = 3 \cdot 10^{-4} \left(\frac{L}{d}\right)^2 - 1.89 \cdot 10^{-2} \left(\frac{L}{d}\right) + 0.4603 \quad (2.21)$$

2.3.2. Análisis cíclico de la barra de refuerzo

Se ha descrito el comportamiento de la barra de refuerzo en comportamiento monotónico en compresión, por lo que para la implementación cíclica del modelo consiste en compatibilizar el modelo cíclico de Menegoto-Pinto con el comportamiento de la barra de refuerzo en compresión.

De esta manera, el modelo tiene validez cuando se han generado las 4 rótulas plásticas, lo cual no sucede en el primer semi-ciclo si es que la barra se ha traccionado inicialmente, por lo cual la curvatura es nula y el comportamiento se analiza en base a la envolvente en tracción.

Sin embargo, al momento de haber una reversión de cargas, se espera que la formación de las rótulas plásticas se produzca en un intervalo de deformaciones asemejable al doble de la deformación de fluencia. A pesar de esto, Rosa define un parámetro llamado "offset", en base a la máxima deformación en tracción que determina el punto en base al cual la curvatura deja de ser nula, obtenido gracias al análisis iterativo de Massone & Moroder, cuyo intervalo resulta ser finalmente mayor al antes mencionado. Éste parámetro depende de la esbeltez de la barra, pues cuan mayor sea ésta, mayor facilidad para pandearse lo que implica un intervalo

de deformaciones menor, con un consecuente offset menor. Se observa la relación que obtiene Rosa mediante la utilización de las propiedades mecánicas de las barras de Tripathi, cuyos desarrollos de offset se pueden observar en la figura 2.9

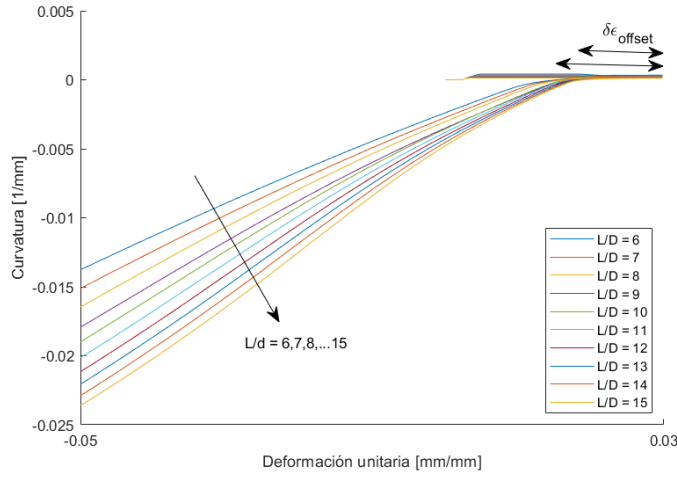


Figura 2.9: Relación de offset con esbeltez, Rosa (2021)

De modo que se puede describir éste parámetro, denominado offset o desfase ($\delta\epsilon_{\text{offset}}$), mediante la ecuación 2.22, en función de la esbeltez de la barra, relación que Rosa obtuvo en tomando en consideración análisis de barras con propiedades mecánicas dispuestas en el estudio de Tripathi et al (2018) [20], con tensiones de fluencias diferentes:

$$\delta\epsilon_{\text{offset}} = \begin{cases} -1.7 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{L}{D} + 0.0275 & \text{si } \frac{L}{d} < 10 \\ 0.01 & \text{si } \frac{L}{d} \geq 10 \end{cases} \quad (2.22)$$

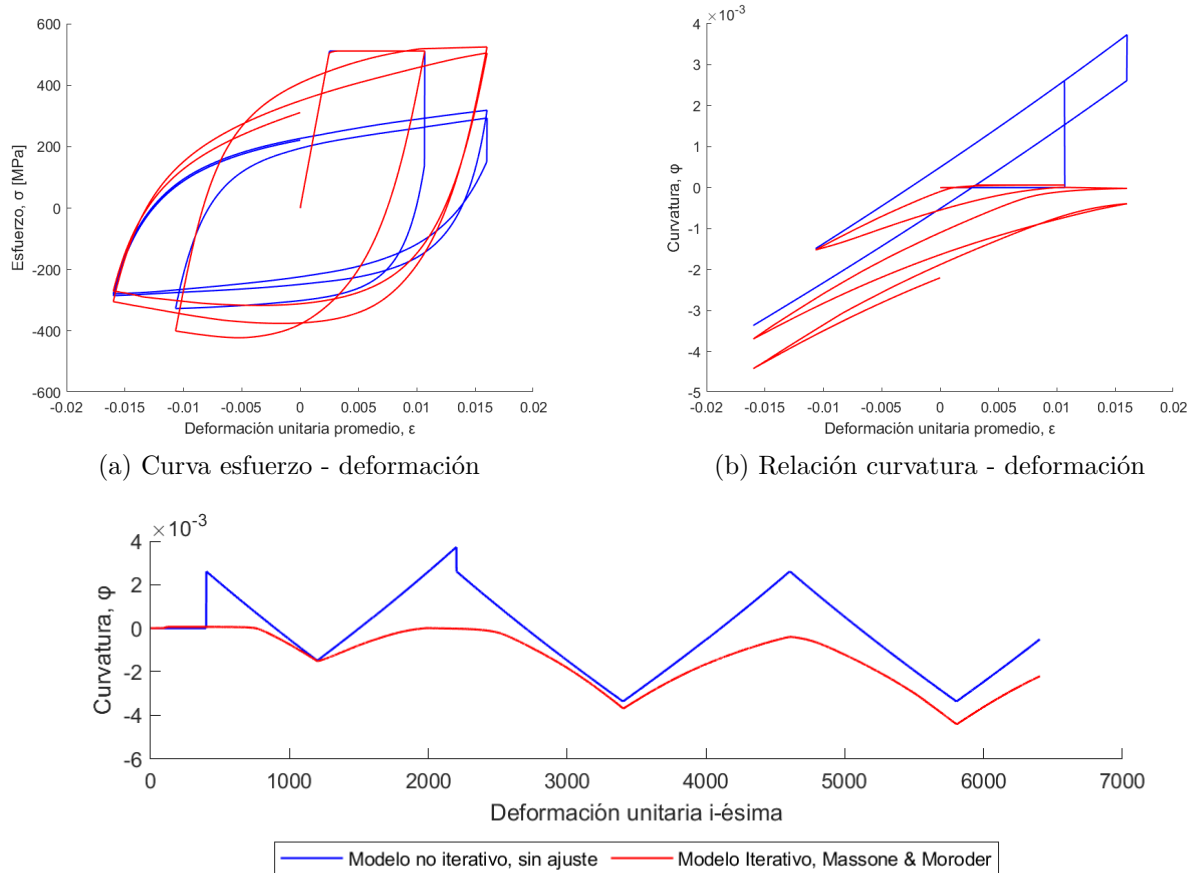
Por otra parte, si el historial de deformaciones inicia con un proceso compresivo, el comportamiento estará determinado con un inicio del pandeo simplificado cercano al punto de fluencia de la envolvente en compresión.

Finalmente, Rosa calibra la esbeltez de la barra para que la precisión del modelo modificado con la curvatura linealizada contenga los menores errores posibles en relación al modelo iterativo de Massone & Moroder, obteniendo de esta forma una esbeltez calibrada con un factor $m=3.5$, mediante la ecuación 2.23:

$$\left(\frac{L}{d}\right)_{\text{calibrado}} = \left(\frac{L}{d}\right)_{\text{real}} - 3.5 \quad (2.23)$$

2.3.3. Ajuste de curvatura

El modelo presenta una inusual degradación de tensiones en la zona de tracción, tal como se muestra en la figura 2.10, lo cual ocurre debido a la solución de la ecuación linealizada de la curvatura que no restringe que la barra se pandee hacia el núcleo de la sección confinada de hormigón armado.



Rosa verifica que el modelo tiene una buena correlación en la curva de descarga, sin embargo se genera una discontinuidad en el punto de máxima deformación en tracción, producido por el cambio brusco en las curvaturas luego de la inversión. Es por esto que para además de evitar las curvaturas positivas, se busca evitar estas discontinuidades en el desarrollo de las curvaturas.

Frente a esta problemática, se debe ajustar la curvatura solamente a valores negativos o muy cercanos a un valor nulo, observando que el modelo iterativo en un principio toma valores positivos, pero de mucha menor magnitud en comparación con los valores de curvatura que la barra desarrolla en el modelo no iterativo. Por otra parte, se necesita una transición suave para que no existan cambios bruscos de rigidez que se traduzcan en discontinuidades muy evidentes en el comportamiento esfuerzo - deformación de la barra.

En este sentido se decide adoptar una solución asintótica entre la curva linealizada y una curvatura nula, del mismo modo que se desarrolla el modelo de Menegotto-Pinto con la transición de esfuerzos entre el rango elástico e inelástico en su comportamiento monotónico, del modo que se describe en la figura 2.11, definiéndose la misma curva de recarga como la de descarga, exceptuando el caso en el cual se inicia en compresiones o la deformación máxima alcanzada es muy cercana a cero.

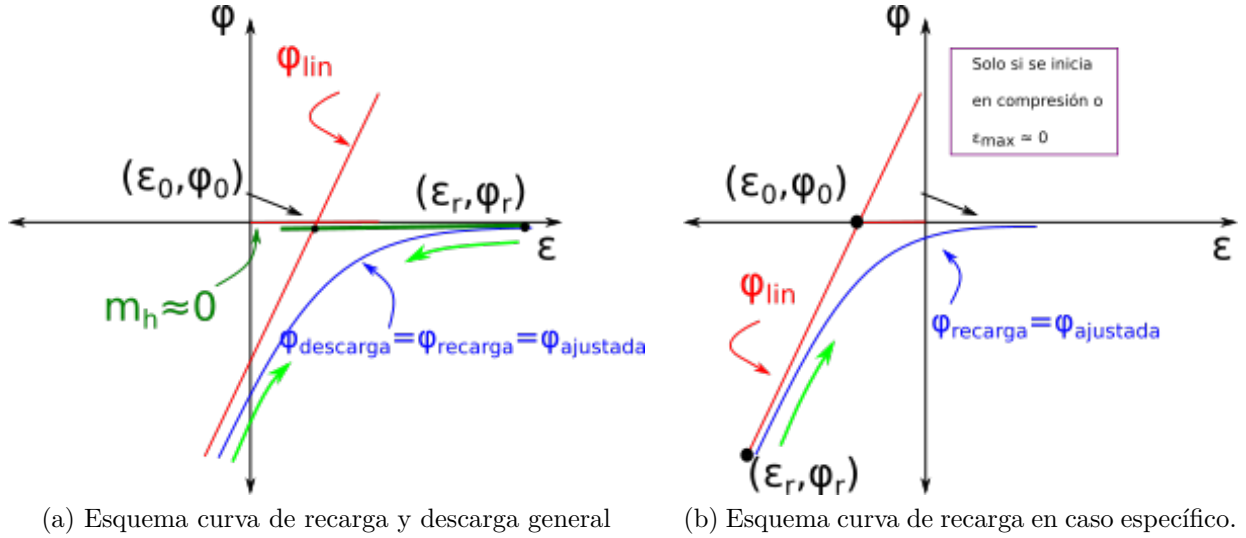


Figura 2.11: Esquema de ajuste asintótico de curvatura

Es necesario mencionar que la resolución asintótica realiza el ajuste en base a dos puntos y dos pendientes de líneas rectas, sin embargo la curva linealizada se obtiene en base a la ecuación 2.17, que corresponde a la solución cuadrática, de modo que la pendiente que se elegiría para realizar el ajuste asintótico no es única, lo que hace necesario modificar la solución original a una solución únicamente lineal cuya pendiente no dependa del historial de deformaciones desarrollado. Para ello, se linealiza la solución de las curvaturas mediante expansión en series de Taylor al primer orden, en torno a una deformación promedio nula.

$$\left. \begin{aligned} a &= 2C_2L - L + 2d \\ b &= -2C_1L + L \\ c &= 2(\epsilon_{max} - \delta\epsilon_{offset})L + 2C_0L \end{aligned} \right\} \rightarrow \phi = \frac{b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2ad} + \frac{2L}{d\sqrt{b^2 - 4ac}} \cdot \bar{\epsilon} \quad (2.24)$$

El error de la solución de la curvatura linealizada con respecto a la cuadrática depende del historial de deformaciones y de la esbeltez con la cual se analice, midiéndose el error porcentual en el punto máximo de compresión ya que el ajuste asintótico no considera el tramo positivo de las curvaturas linealizadas. La figura 2.12 muestra el desarrollo de curvaturas sin ajuste para una barra con una tensión de fluencia de 300 [MPa] y con una esbeltez de $L/D = 15$ desde 4 % a -4 % de deformaciones. La tabla 2.1 extiende el análisis para casos simétricos para distintas esbelteces que se desarrollan desde 4 % a -4 % de deformaciones unitarias, distintas esbelteces con desarrollo de deformaciones asimétricos desde 6 % a -3 % con el error en el punto máximo de compresión.

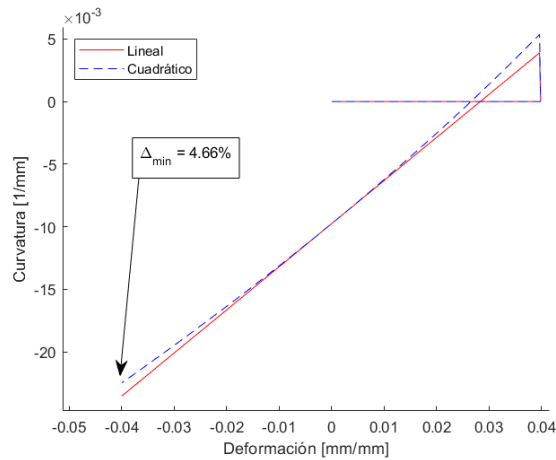


Figura 2.12: Solución de curvaturas no ajustadas, $L/D = 15$

Tabla 2.1: Error porcentual de curvatura en máxima compresión

Caso	Esbeltez	Error [%]
Simétrico $\epsilon_{max} = 0.04$ $\epsilon_{min} = -0.04$	6	4.62 %
	10	0.12 %
	15	4.66 %
Asimétrico $\epsilon_{max} = 0.06$ $\epsilon_{min} = -0.03$	6	2.54 %
	10	0.06 %
	15	1.91 %

De este modo es posible usar el ajuste linealizado a primer orden habiéndose determinado las diferencias de curvaturas que afectará al ajuste asintótico.

En este análisis se toman las consideraciones expuestas en la tabla 2.2 para los puntos iniciales del ajuste asintótico y el centro de curvatura de este análisis para la curva de descarga y recarga:

Tabla 2.2: Puntos de análisis asintótico de curvatura

Análisis	Punto Inicial		Centro de curvatura de análisis	
	ϵ_r	ϕ_r	ϵ_0	ϕ_0
Curva de descarga y recarga general	Deformación máxima alcanzada	Curvatura asociada al punto de deformación máxima alcanzada	Intersección entre recta con pendiente $m_h \approx 0$ con solución lineal de la curvatura $(\bar{\epsilon}, \phi)$	
Curva de recarga en caso específico	Deformación mínima del ciclo en curso	Curvatura asociada a la deformación mínima del ciclo en curso	Deformación asociada a curvatura nula en solución lineal de la curvatura.	0

Se utiliza un valor de R, parámetro referente a la transición entre las dos asintotas, igual a 2, para que la transición sea suave, donde si se escogen valores de R más altos, la transición sería más brusca, por lo tanto un cambio de rigidez más brusco. Adicionalmente, el término "b", expresa la relación entre las pendientes de ambas asintotas:

$$b = \begin{cases} 0 & \rightarrow \text{Curva de recarga específica} \\ \frac{m_{\text{descarga}}}{m_h} & \rightarrow \text{Curva de descarga y recarga general} \end{cases} \quad (2.25)$$

De este modo la curvatura para la curva ajustada queda definida según las ecuaciones 2.26, 2.27 y 2.28 :

$$\epsilon^* = \frac{\epsilon_i - \epsilon_r}{\epsilon_0 - \epsilon_r} \quad (2.26) \quad \phi^* = b \epsilon^* + \frac{(1-b) \epsilon^*}{(1 + \epsilon^{*R})^{1/R}} \quad (2.27)$$

$$\phi_{\text{ajustada}} = \phi^* \cdot (\phi_0 - \phi_r) + \phi_r \quad (2.28)$$

Los resultados del ajuste se pueden ver plasmados en la figura 2.13.

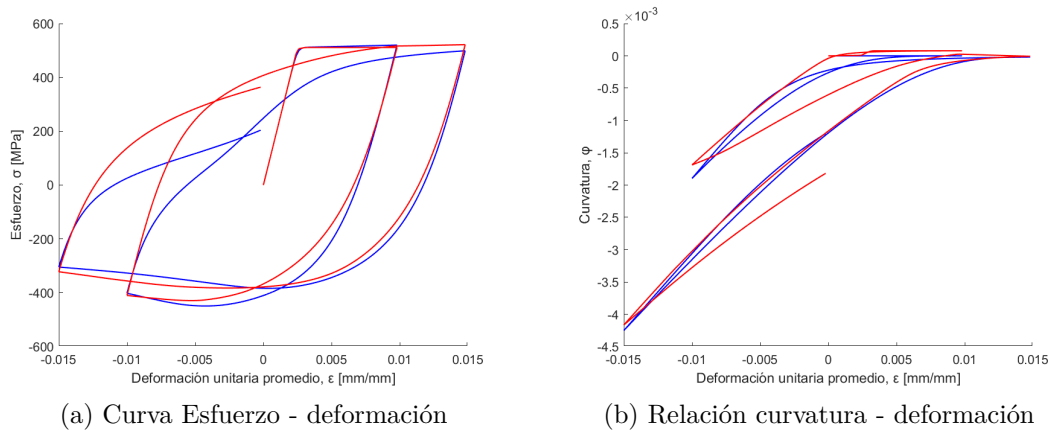
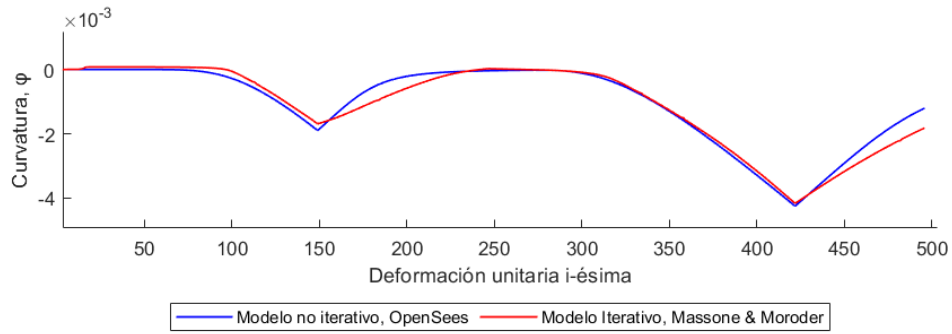


Figura 2.13: Modelo con ajuste asintótico de la curvatura.



(c) Comportamiento cíclico de la curvatura en modelo iterativo y no iterativo con ajuste.

Figura 2.13: Modelo con ajuste asintótico de la curvatura (Continuación).

De este modo, se observa que se evitan las curvaturas positivas, y las discontinuidades tanto de esfuerzos y curvaturas, obteniéndose resultados que si bien no son exactamente igual al modelo iterativo, que es aquel que asegura la respuesta en base al equilibrio, son respuestas bastante similares. La verificación del modelo implementado se realiza aparte en una sección enfocado a ello.

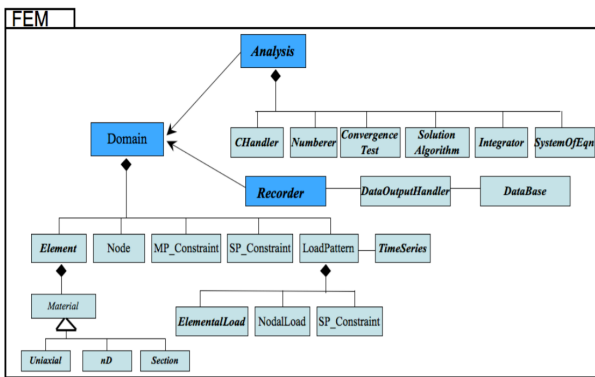
Capítulo 3

Implementación en OpenSees

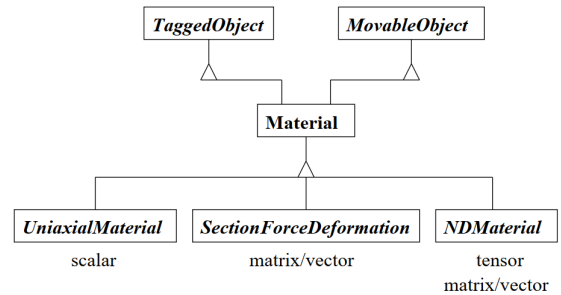
3.1. Estructura y jerarquía del entorno

Tal como se ha descrito anteriormente, OpenSees es una librería de rutinas que permiten al usuario resolver complejos sistemas estructurales, entorno que tal como la pagina oficial de OpenSees detalla es un sistema de clases interrelacionados para crear: Materiales, elementos, métodos de resolución, integradores, etc mediante clases y subclases, las cuales están interrelacionadas con una jerarquía determinada.

No es necesario conocer toda la estructura de OpenSees para desarrollar una nueva clase, solo basta con conocer las clases directas con las cuales se va a codifica, aun así se explicita en la figura (3.1) el esquema completo de OpenSees, centrándose en que sector se sitúa la clase 'Material' y sus tres sub-clases.



(a) Esquema Completo de OpenSees



(b) Esquema clase Material, OpenSees

Figura 3.1: Estructura de OpenSees, Fuente: OpenSees [16]

Las tres sub-clases de la clase Material en donde se implementa el modelo del material en estudio corresponden a las siguientes:

- **UniaxialMaterial**: Clase relacionada con todos los modelos de materiales unidimensionales, ya sea para esfuerzo deformación o carga - desplazamiento. Esta sub-clase define la respuesta esfuerzo - deformación de elementos tipo "truss", comportamiento de fibra uniaxial de una sección viga - columna, respuesta carga - desplazamiento de una viga o elemento tipo "zeroLength". De acuerdo a la figura 3.1.b, el "output" es un escalar

correspondiente al esfuerzo relacionado a una deformación asociada o su equivalente en el caso carga - desplazamiento.

- **NDMaterial**: Generalización de la clase **UniaxialMaterial**, para elementos de varios grados de libertad que provee la respuesta esfuerzo - deformación en un punto de un elemento. La salida de esta sub-clase es un vector o matriz tensor de los grados de libertad analizados.
- **SectionForceDeformation**: Sub-clase que provee la interfaz para las resultantes de esfuerzos de modelos utilizados para describir comportamientos tanto de placas como elementos tipo viga-columna, ya sea respuesta carga-desplazamiento como respuesta constitutiva más generalizada de elementos "zeroLength". El output corresponde a una matriz o vector.

De esta forma, el modelo que se implementa en OpenSees se incluye en la clase de material uniaxial, el cual busca obtener la respuesta esfuerzo - deformación promedio de la barra de refuerzo.

3.1.1. Clases utilizadas para implementación

Para la implementación, se buscó un modelo que facilitara la confección del código, con una base ya construida y testeada interiormente en el entorno de OpenSees. Para ello, se hace uso de dos modelos de material internos para la confección del modelo de Rosa:

- **ParallelMaterial**: Clase de material uniaxial que analiza el comportamiento de varios materiales uniaxiales trabajando paralelamente, cuya respuesta esfuerzo deformación la obtiene en base al aporte de cada material que se incluye en el material "Parallel". La forma de obtener la respuesta se esquematiza en la figura 3.2:

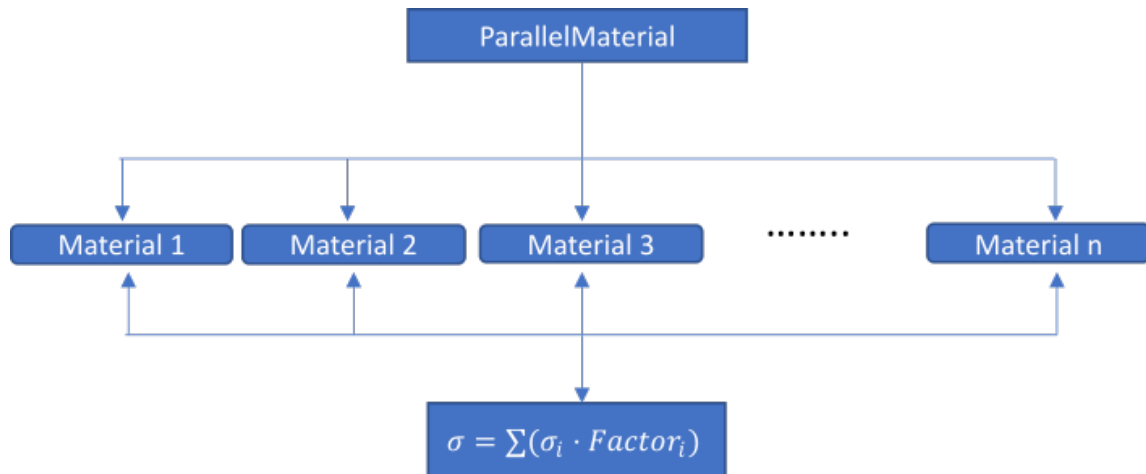


Figura 3.2: Diagrama de funcionamiento de modelo **ParallelMaterial**

- **Steel02**: Modelo de material que define el comportamiento cíclico en base al modelo de Menegotto - Pinto con endurecimiento isotrópico. A diferencia del modelo de Mander, este modelo determina el comportamiento sin pandeo incluido, sin el plateau de fluencia, con el endurecimiento producido inmediatamente después del punto de fluencia del acero,

con el cambio de elasticidad controlada con parámetros asociados al endurecimiento isotrópico a modelar. El comportamiento monotónico descrito se esquematiza en la figura 3.3 :

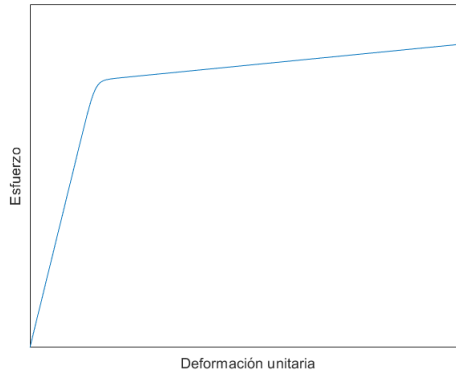


Figura 3.3: Comportamiento monotónico de material Steel02

De este modo, utilizándose el código del material "Parallel", se ingresan las no linealidades geométricas, de forma que se determina una deformación unitaria para cada fibra de la barra discretizada mediante la hipótesis de Bernoulli, y un consecuente comportamiento a nivel de fibras modelado según el comportamiento determinado por Steel02. El comportamiento se esquematiza en la figura 3.4

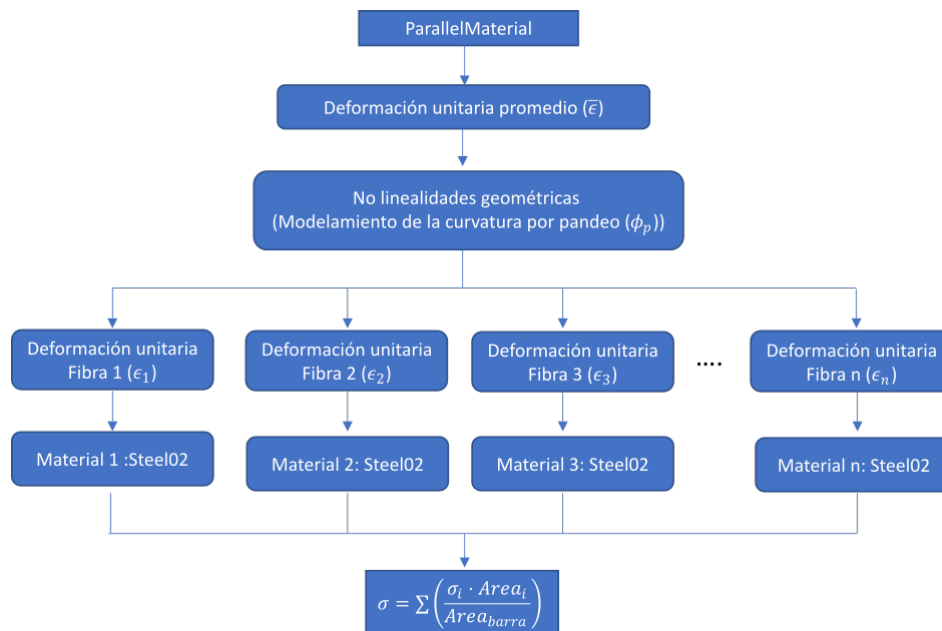


Figura 3.4: Diagrama de modelo a implementar en OpenSees

3.1.2. Estructura de un material uniaxial

Al ser un entorno escrito en C++, el modelo del material consta de dos archivos:

- Encabezado (“Nombre_de_Clase.h”)
- Archivo principal (“Nombre_de_Clase.cpp”)

En el primer archivo se declaran las funciones y variables que se utilizarán para confeccionar el modelo, y en el segundo las características y la implementación misma.

El programar algún tipo de material en OpenSees, como requisito primario se debe modelar de tal manera que a éste no se le otorga información alguna del modelo estructural en análisis, sino que es responsabilidad del material mismo almacenar la información que requiriese, lo cual incluye:

- Parámetros que definen el material y sus propiedades.
- Variables de estado: Información que determina el estado actual del material
- Variables de historia: Información que determina el historial del material (estados previamente convergidos).

La clase uniaxial, siendo una clase de base abstracta, es decir que cuenta con una función virtual pura, tiene como propósito hacer de interfaz para que otras clases sean capaces de heredar sus propiedades, la cual en este caso provee el esqueleto de como OpenSees trabaja aquellas funciones que si o sí se deben implementar en cualquier tipo de modelo a desarrollar, las cuales se detallan a continuación:

- OPS_ClassName(): Función base de OpenSees que hace de link con el modelo del usuario y determina y controla la cantidad de variables a ser ingresada para crear el material.
- Constructores y destructores que inicializan variables a utilizar en la computación del material, y eliminar aquella información alojada en la memoria RAM que después no se vaya a utilizar.
- getTangent(): Método utilizado para obtener la tangente asociada a una deformación unitaria del material. Se obtiene en base a la derivada parcial del esfuerzo con respecto a la deformación: $\partial\sigma/\partial\epsilon$
- getStress(): Método utilizado para obtener el esfuerzo asociado a la deformación unitaria de prueba del material (“trialStrain”). Ésta es una función de la deformación y la razón de cambio de la deformación unitaria: $\sigma = \sigma(\epsilon, \epsilon')$
- setTrialStrain(): Método de implementación obligatoria que recibe por argumento una deformación de prueba: “trialStrain” y un parámetro opcional: razón de cambio de la deformación unitaria : “strainRate”. Este busca encontrar un estado del material que satisfaga el algoritmo de resolución del modelo, mediante sucesivos llamados a getTangent() y getStress().
- CommitState(): Se utiliza una vez que el par esfuerzo - trialStrain cumple la condición del algoritmo de modo de actualizar el estado del material.

- `revertToLastCommit()`: Método utilizado cuando el algoritmo no logra encontrar una solución de tal manera que define el estado del material como el último estado convergido.
- `revertToStart()`: Método utilizado para revertir el estado del material a su estado inicial.
- `setResponse()` y `getResponse()`: Métodos opcionales para obtener información acerca del material uniaxial, y así definir aquellos parámetros que serán registrados por los "recorders" del modelo del usuario.

De modo que, tal como se puede deducir de la descripción previa, la forma de implementación del modelo se centra principalmente en la función "`setTrialStrain()`", método en el cual se definen las no linealidades geométricas del modelo de Rosa y se entregan a cada uno de los materiales de las fibras que componen la barra de refuerzo, diferentes deformaciones de prueba acorde a la hipótesis de Bernoulli dado por la curvatura de pandeo.

3.2. Función implementada

El modelo se implementa en OpenSees, de tal forma que el usuario debe utilizar dos materiales uniaxiales para utilizar el modelo no iterativo de Rosa:

- Steel05
- RSNonIterative:

3.2.1. Steel05

El modelo "Steel05", en lugar de adoptar el modelo de Chang & Mander que es utilizado tanto en el modelo original de Rosa y el modelo iterativo de Massone & Moroder, hace uso del modelo de Menegotto - Pinto [21] para representar los ciclos de esfuerzo - deformación.

Este material se implementa como un material extra, que es exactamente igual al modelo Steel02, salvo que para el cálculo de los esfuerzos, las deformaciones y esfuerzos de compresión son transformados a coordenadas naturales, para tener en cuenta la variación de área transversal de la barra.

Para utilizar el material primero se debe declarar un material Steel05 de la manera descrita en el código 3.1, material al cual se le deben asignar los parámetros especificados en la tabla 3.1:

Código 3.1: Material Steel05

```
...
uniaxialMaterial Steel05 $Tag_Steel05 $Fy $Es $b $R0 $cR1 $cR2
...
```

Tabla 3.1: Parámetros de entrada Steel05

Notación de parámetro	Parámetro
\$Tag_Steel05	Identificador del material que representará el comportamiento de cada fibra de la barra.
\$Fy	Tensión de fluencia en tracción de la barra de fluencia
\$Es	Módulo de elasticidad del acero en rango elástico del material.
\$b	Razón de endurecimiento del material, representa el cambio entre el módulo de elasticidad elástico al módulo de elasticidad de endurecimiento.
\$R0, \$cR1 y \$cR2	Parámetros que controlan el cambio entre la rama elástica y el rango plástico.

3.2.2. RSNonIterative

Se elige el nombre con siglas y nombres en Inglés dado que el software donde se implementa es principalmente de lengua inglesa, aludiéndose a “*Non-Iterative Reinforcing Steel*”.

Este material representa el modelo no iterativo de refuerzo de acero con pandeo, cuyos datos de ingreso corresponden a los descritos en la tabla 3.2. Se crea el material según el código 3.2. Se elige el nombre teniendo en cuenta

Código 3.2: Material RSNonIterative

```
...
uniaxialMaterial RSNonIterative $Tag_Modelo $Tag_Steel05 $Num_Fibras $L $D $Es $Fy ;
...
```

Tabla 3.2: Parámetros de entrada modelo RSNonIterative

Notación parámetro	Parámetro
\$Tag_Modelo	Identificador del material que representará el comportamiento uniaxial de la barra de refuerzo.
\$Tag_Steel02	Identificador del material previamente creado que representa cada fibra de la barra.
\$Num_Fibras	Número de fibras de discretización de la barra.
\$L	Separación de estribos de la barra de refuerzo.
\$D	Diámetro de la barra de refuerzo.
\$Es	Módulo de elasticidad del material previamente creado.
\$Fy	Tensión de fluencia en tracción del material previamente creado.

Cabe decir que las propiedades mecánicas que se re-ingresan como datos de ingreso del usuario en el modelo “RSNonIterative” se debe a que no es posible extraer aquellas propiedades directamente del material “Steel05”, por lo que se simplifica a un simple re-ingreso del parámetro al material implementado.

Capítulo 4

Verificación de implementación del Modelo

Para la verificación del modelo implementado en OpenSees se pretende realizar comparaciones con: El modelo no iterativo original desarrollado por Rosa en la plataforma Matlab, con el modelo iterativo de Massone & Moroder y con datos experimentales extraídos de la literatura.

En cuanto a los datos experimentales, se hace uso del estudio de Tripathi [20], quienes desarrollan pruebas cíclicas con 2 tipos de barras de grado 300E y 500E, barras comunes en las estructuras de hormigón armado en Nueva Zelanda, cuyas propiedades son detalladas en la tabla 4.1, con una configuración geométrica de esbeltez de $L/D = 6, 9, 12$ y 15 y una barra de 12 mm de diámetro, bajo una condición de carga sinusoidal y compresión axial constante con amplitudes de deformaciones del orden del 1 al 5% . Cabe decir que el estudio considera degradación por fatiga en bajos ciclajes, por lo que se considerará solo los primeros ciclos para comparación.

También se hará uso de las pruebas cíclicas experimentales del estudio de Egger et al. [22], quienes mediante fotogrametría estudian la fatiga de barras de diámetro de 12 mm, con propiedades mecánicas correspondientes a un acero ASTM A706 Gr.80, bajo ciclos de histeriésis con distintas amplitudes de deformación que varían entre 1 a 5% .

Tabla 4.1: Propiedades mecánicas nominales de las barras de Tripathi y Egger et al.

	Barra 300E	Barra 500E	ASTM A706 Gr. 80
Tensión de Fluencia, F_y [MPa]	311.45	511.3	550.0
Módulo de elasticidad, E_s [MPa]	206946	203662	203878
Deformación de fluencia, ϵ_y [mm/mm]	0.0015	0.0026	0.0027
Tensión última, f_u [MPa]	427.5	611.2	714.9
Deformación última, ϵ_u [mm/mm]	0.269	0.142	0.113

Al existir una diferencia en las envolventes en tracción a utilizar entre la formulación del modelo y la implementación en OpenSees, se definen razones de endurecimiento diferentes para OpenSees, pues el modelo de Menegoto - Pinto no considera la zona del plateau de fluencia como sí lo hace el modelo de Mander.

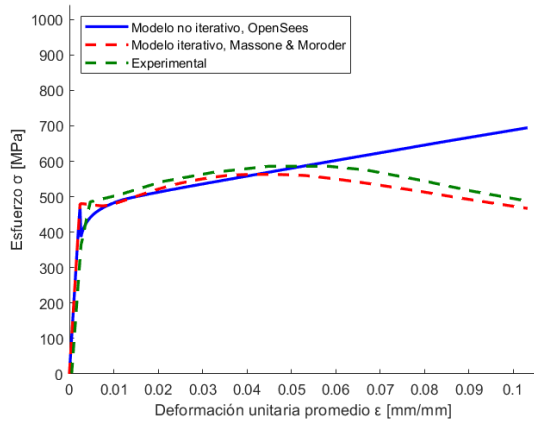
4.1. Comparación con Datos experimentales

En esta sección se mostrará las comparaciones del modelo no iterativo con el modelo iterativo de Massone & Moroder, respuesta experimental y modelo de Menegotto - Pinto sin pandeo, para distintas configuraciones de esbeltez, historial de deformaciones cíclicas y monotónicas.

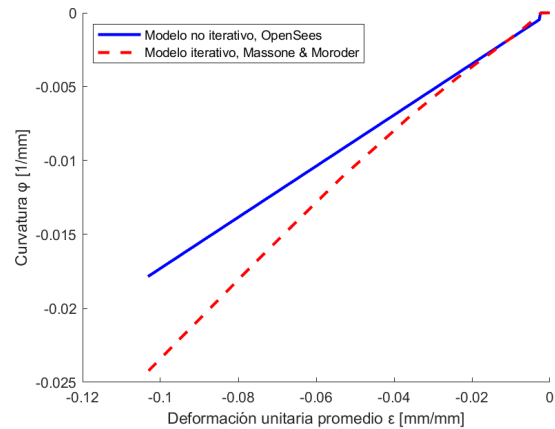
4.1.1. Respuesta monotónica

Para la respuesta monotónica, se hace uso de los ensayos de Bayrak & Sheikh con esbelteces $L/D = 6, 8$ y 10 .

■ Bayrak & Sheik

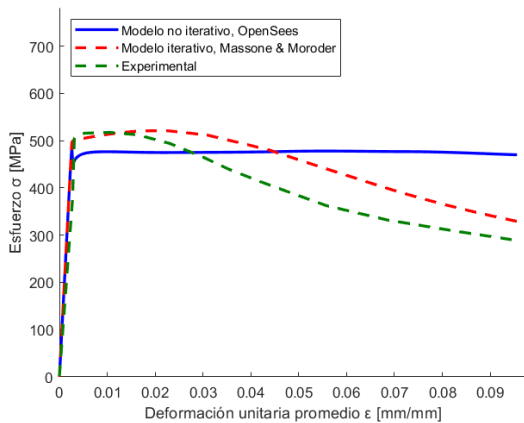


(a) Comparación de respuesta $\sigma - \epsilon$, Bayrak & Sheik y modelo iterativo y no iterativo

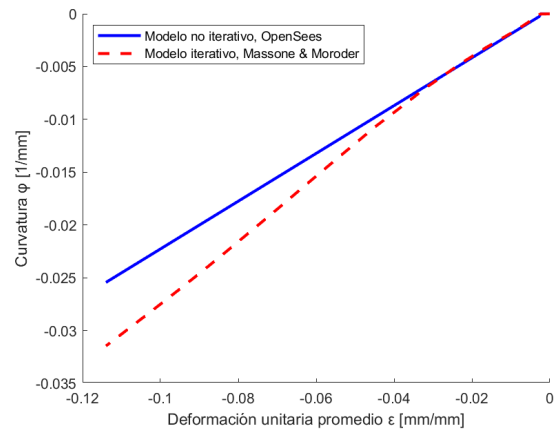


(b) Comparación desarrollo de curvaturas modelo iterativo y no iterativo

Figura 4.1: Comparación resultados experimental e iterativo con modelo implementado en respuesta monotónica, Bayrak & Sheik, $L/D = 6$

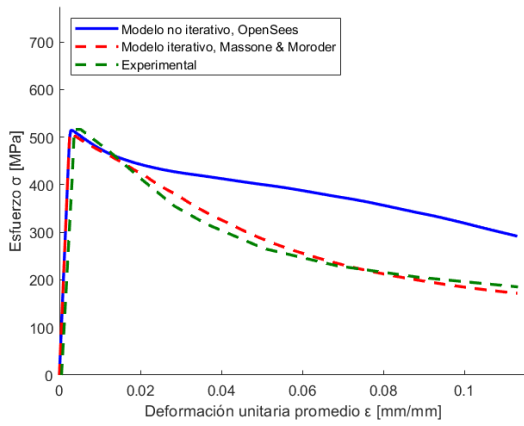


(a) Comparación de respuesta $\sigma - \epsilon$, Bayrak & Sheik y modelo iterativo y no iterativo

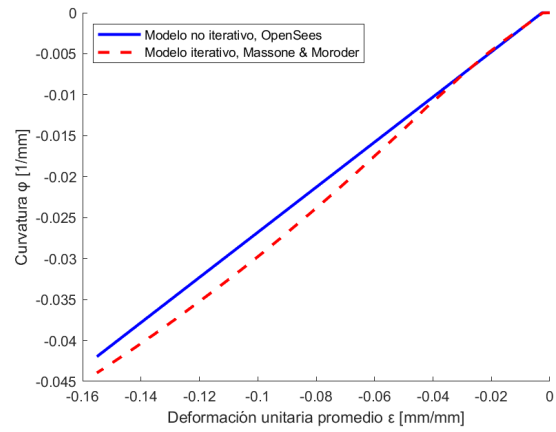


(b) Comparación desarrollo de curvaturas modelo iterativo y no iterativo

Figura 4.2: Comparación resultados experimental e iterativo con modelo implementado en respuesta monotónica, Bayrak & Sheik, $L/D = 8$



(a) Comparación de respuesta $\sigma - \epsilon$, Bayrak & Sheik y modelo iterativo y no iterativo



(b) Comparación desarrollo de curvaturas modelo iterativo y no iterativo

Figura 4.3: Comparación resultados experimental e iterativo con modelo implementado en respuesta monotónica, Bayrak & Sheik, $L/D = 10$

Es posible observar que el modelo no iterativo logra captar la degradación por pandeo, aunque con discontinuidades al inicio de este como se muestra en los resultados de la figura 4.1.

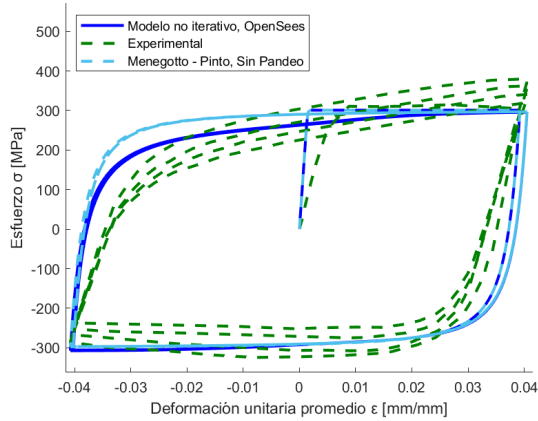
Si bien la respuesta no es exacta tomando en consideración tanto respuesta experimental e iterativa, presenta resultados que son consistentes en cuanto a que mientras mayor sea la esbeltez de la barra, mayor es la degradación que presenta la respuesta esfuerzo - deformación. Por otra parte, como se había mencionado, en la formulación del modelo no iterativo, el factor de endurecimiento del acero en el modelo de Menegoto - Pinto influye en las diferencias de respuestas entre modelo iterativo y no iterativo, modelo que estaba originalmente formulado con el modelo de material de Chang & Mander, de modo que es imperante definir un rango de endurecimiento esperado para que no haya una sobre-estimación de esfuerzos en las fibras más comprimidas.

Tal como se analiza en los estudios de Dhakal & Maekawa [7], la respuesta esfuerzo deformación luego de ocurrida la degradación por pandeo, debiese estabilizarse, tal como se modela en el modelo de Dhakal & Maekawa, y que es captado por el modelo iterativo, sin embargo, al definir una respuesta lineal de curvaturas, aquella estabilización no se produce, e incluso en el caso de esbeltez igual a 6 no se produce pandeo de barra de refuerzo, lo cual en términos prácticos es consistente.

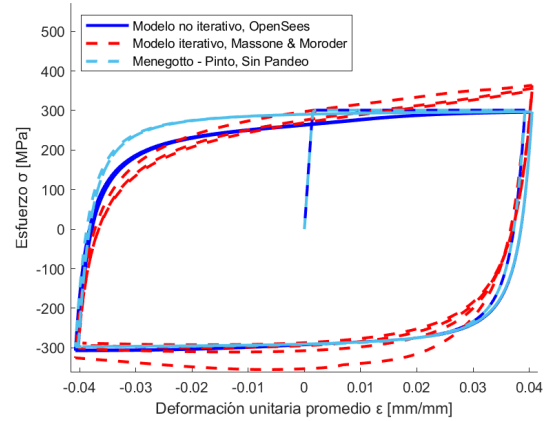
4.1.2. Respuesta cíclica

Esta sección presenta los resultados de los ensayos cíclicos y los análisis según los diferentes modelos en uso para barras con distintas propiedades mecánicas.

■ Barra 300E

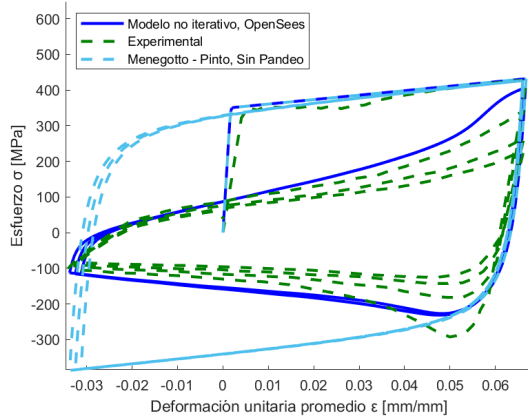


(a) Comparación de respuesta $\sigma - \epsilon$, Tripathi y modelo no iterativo, $\epsilon_a = 0.04$

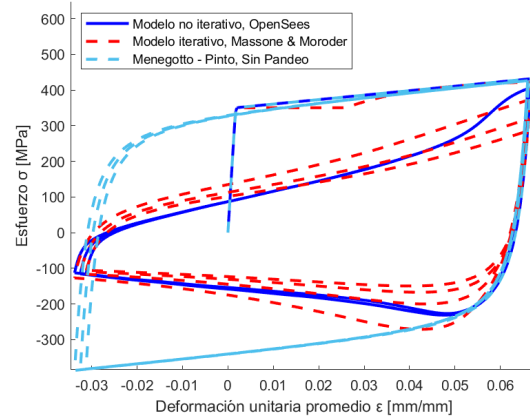


(b) Comparación de respuesta $\sigma - \epsilon$, Modelo iterativo y no iterativo, $\epsilon_a = 0.04$

Figura 4.4: Comparación resultados experimental e iterativo con modelo implementado, Barra 300E Tripathi et al. $L/D = 6$

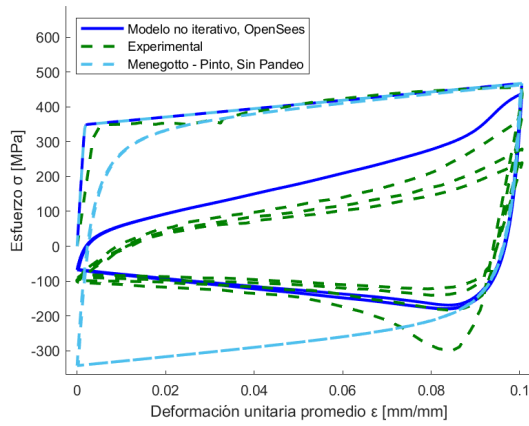


(a) Comparación de respuesta $\sigma - \epsilon$, Tripathi y modelo no iterativo, $\epsilon_{\max} = 0.06$ y $\epsilon_{\min} = -0.03$

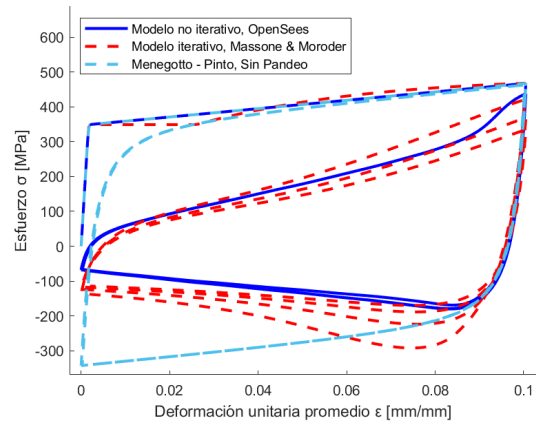


(b) Comparación de respuesta $\sigma - \epsilon$, Modelo iterativo y no iterativo, $\epsilon_{\max} = 0.06$ y $\epsilon_{\min} = -0.03$

Figura 4.5: Comparación resultados experimental e iterativo con modelo implementado, Barra 300E Tripathi et al. $L/D = 12$

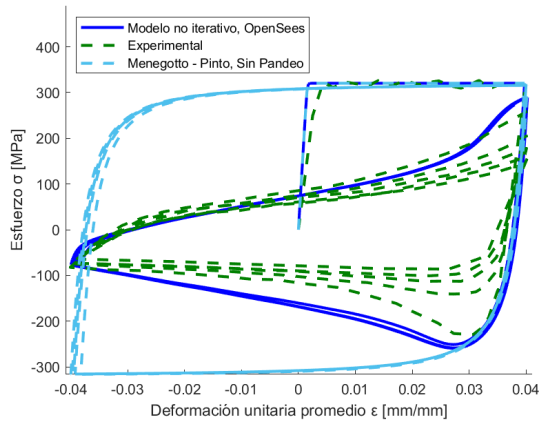


(c) Comparación de respuesta $\sigma - \epsilon$, Tripathi y modelo no iterativo, $\epsilon_{\max} = 0.1$ y $\epsilon_{\min} = 0$

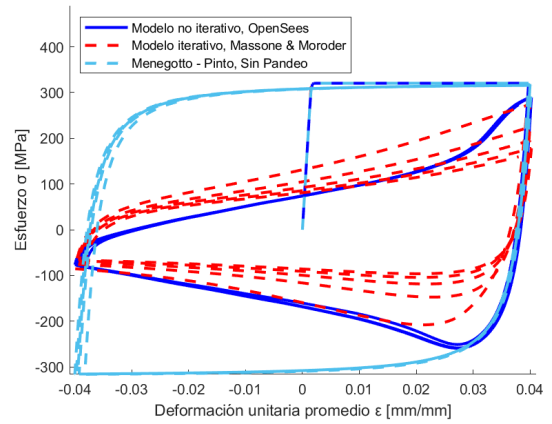


(d) Comparación de respuesta $\sigma - \epsilon$, Modelo iterativo y no iterativo, $\epsilon_{\max} = 0.1$ y $\epsilon_{\min} = 0$

Figura 4.5: Comparación resultados experimental e iterativo con modelo implementado, Barra 300E Tripathi et al. $L/D = 12$, Continuación



(a) Comparación de respuesta $\sigma - \epsilon$, Tripathi y modelo no iterativo, $\epsilon_a = 0.04$



(b) Comparación de respuesta $\sigma - \epsilon$, Modelo iterativo y no iterativo, $\epsilon_a = 0.04$

Figura 4.6: Comparación respuesta experimental y modelo iterativo con modelo implementado, Barra 300E Tripathi et al. $L/D = 15$.

La respuesta que presenta el modelo no iterativo, se observa similar al comportamiento del modelo iterativo y experimental para los ensayos referentes a una tensión de fluencia de 300 [MPa], sin embargo en general se observa que el modelo no iterativo no es capaz de captar la degradación de esfuerzos que el modelo iterativo si capta sin considerar fatiga de las barras de refuerzo. En la figura 4.7 se muestra el desarrollo de esfuerzos en cada paso (4.7.a) y la respuesta curvatura - deformación para el ensayo con deformación máxima del 6% (4.7.b), donde se ve que la degradación en el modelo iterativo se produce dada la degradación de curvatura.

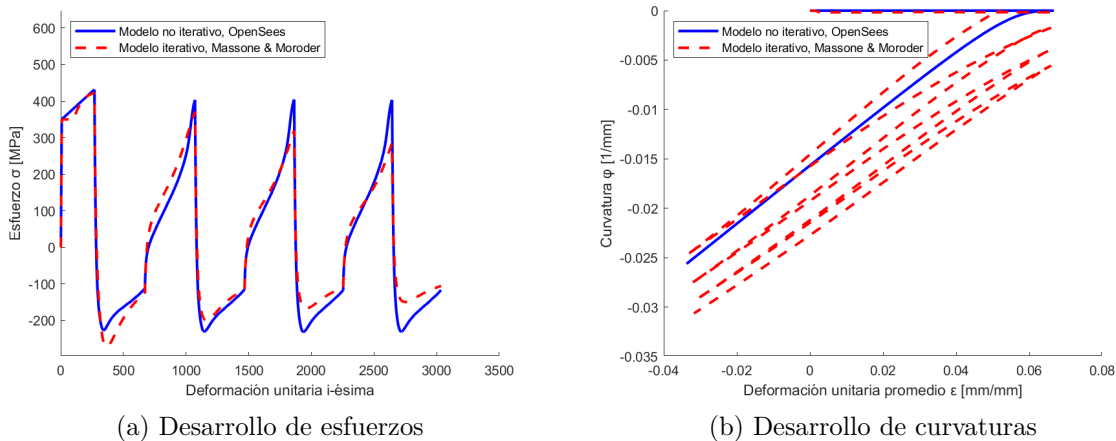
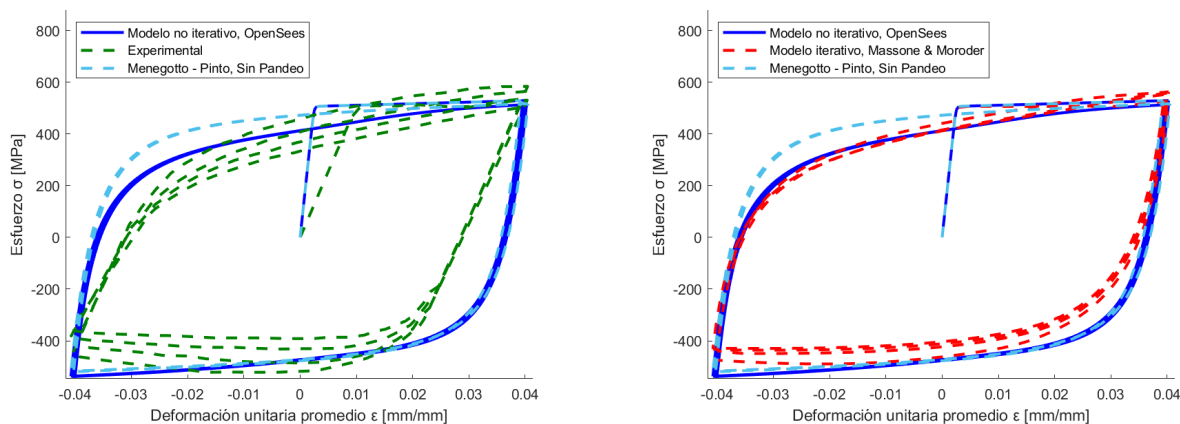


Figura 4.7: Degradación de esfuerzos, $L/D = 12$ y $\epsilon_{\max} = 6\%$

Además de ello, se observa que la respuesta para esbelteces mayores se produce una sobreestimación de esfuerzos en la barra, lo cual es producido por la diferencia en el desarrollo de curvaturas de la barra dada la linealización de la misma. Cabe decir, que el modelo presenta una optimización en recursos computacionales pero se transgrede la ecuación de equilibrio que si satisface el modelo iterativo.

■ Barra 500E

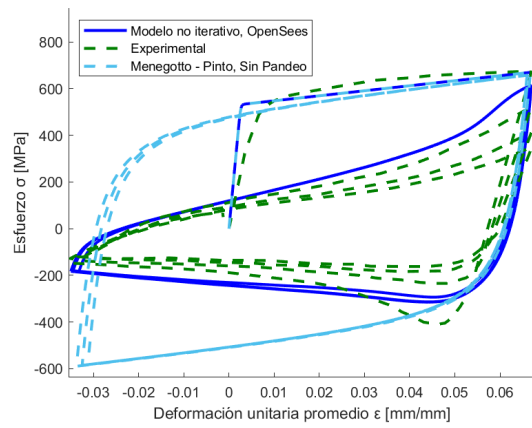
Esta sección presenta los resultados de los análisis de las barras con tensiones de fluencia nominal de 511.3 [MPa], comparándose con resultados experimentales de los ensayos de Tripathi y analíticos con el modelo iterativo.



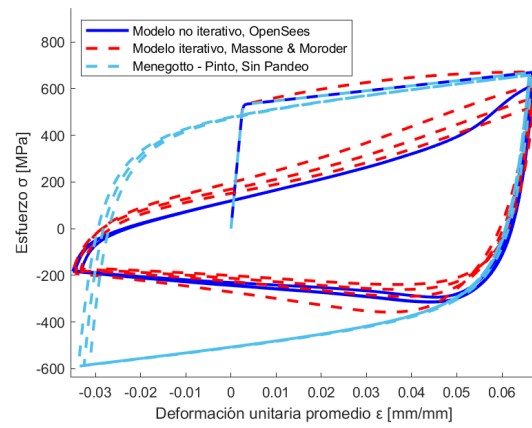
(a) Comparación de respuesta $\sigma - \epsilon$, Tripathi y modelo no iterativo, $\epsilon_a = 0.04$

(b) Comparación de respuesta $\sigma - \epsilon$, Modelo iterativo y no iterativo, $\epsilon_a = 0.04$

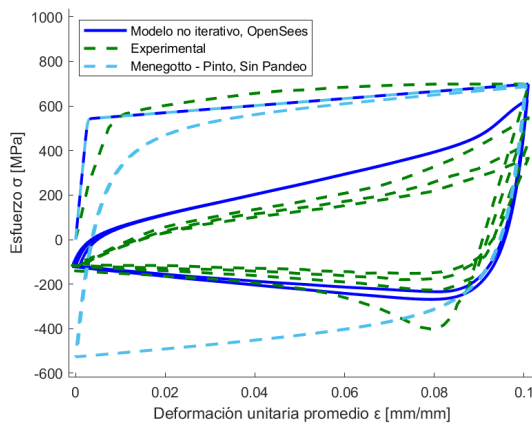
Figura 4.8: Comparación resultados experimental e iterativo con modelo implementado, Barra 500E Tripathi et al. $L/D = 6$



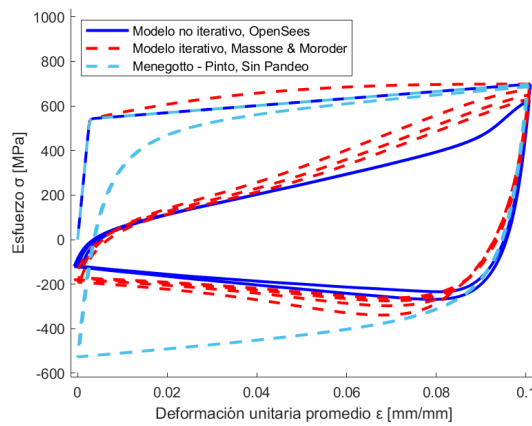
(a) Comparación de respuesta $\sigma - \epsilon$, Tripathi y modelo no iterativo, $\epsilon_{\max} = 0.06$ y $\epsilon_{\min} = -0.03$



(b) Comparación de respuesta $\sigma - \epsilon$, Modelo iterativo y no iterativo, $\epsilon_{\max} = 0.06$ y $\epsilon_{\min} = -0.03$

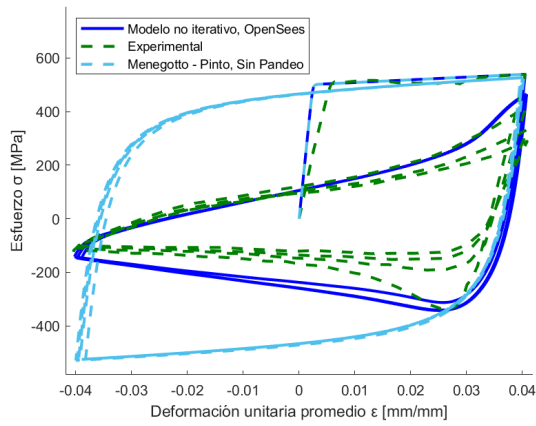


(c) Comparación de respuesta $\sigma - \epsilon$, Tripathi y modelo no iterativo, $\epsilon_{\max} = 0.1$ y $\epsilon_{\min} = 0$

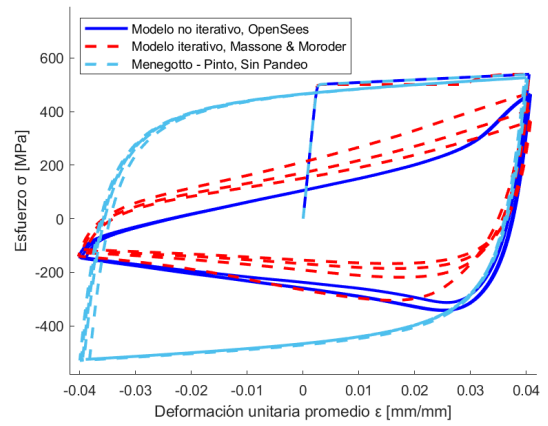


(d) Comparación de respuesta $\sigma - \epsilon$, Modelo iterativo y no iterativo, $\epsilon_{\max} = 0.1$ y $\epsilon_{\min} = 0$

Figura 4.9: Comparación resultados experimental e iterativo con modelo implementado, Barra 500E Tripathi et al. $L/D = 12$



(a) Comparación de respuesta $\sigma - \epsilon$, Tripathi y modelo no iterativo, $\epsilon_a = 0.04$

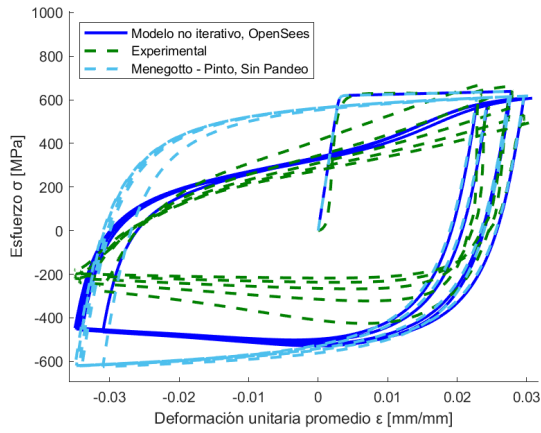


(b) Comparación de respuesta $\sigma - \epsilon$, Modelo iterativo y no iterativo, $\epsilon_a = 0.04$

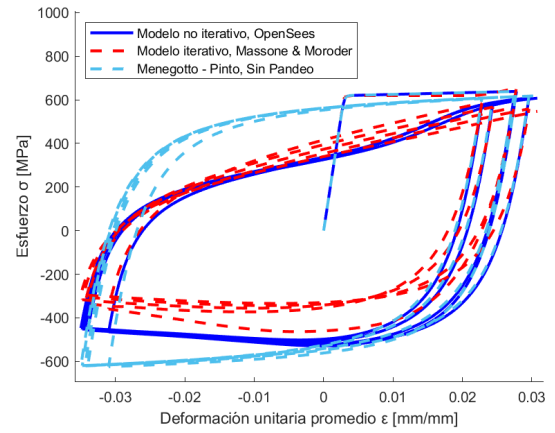
Figura 4.10: Comparación resultados experimental e iterativo con modelo implementado, Barra 500E Tripathi et al. $L/D = 15$

La respuesta que presenta la barra de más alta resistencia presenta las mismas diferencias en cuanto al modelo iterativo como lo presenta la barra con menor tensión de fluencia, lo cual es un buen indicador ya que indica que el modelo es capaz de captar la respuesta con diferentes tensiones de fluencia, y representar el pandeo en base al desarrollo de la curvatura de la barra.

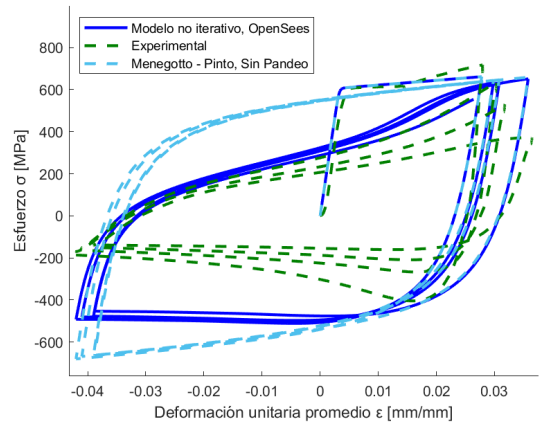
■ ASTM A706 Gr.80



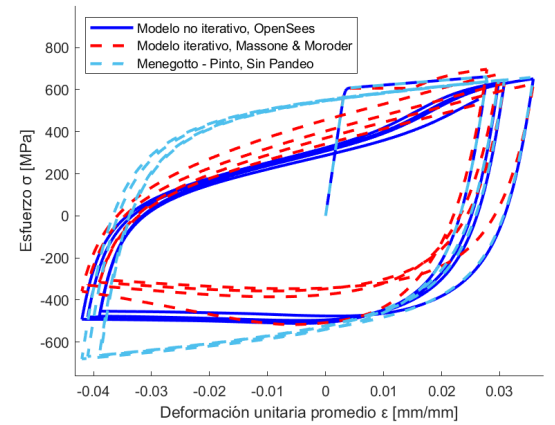
(a) Comparación de respuesta $\sigma - \epsilon$, Egger y Modelo no iterativo. $\epsilon_a = 0.031$



(b) Comparación de respuesta $\sigma - \epsilon$, Modelo iterativo y no iterativo, $\epsilon_a = 0.031$

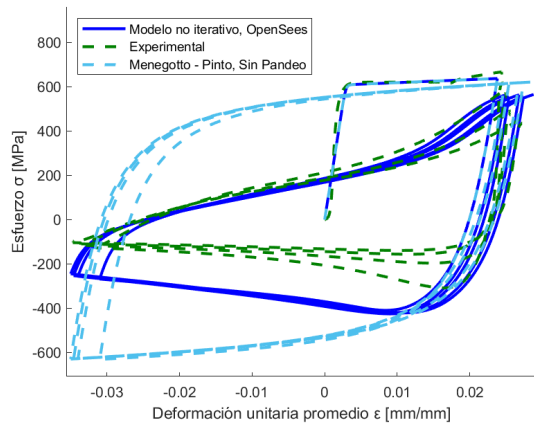


(c) Comparación de respuesta $\sigma - \epsilon$, Egger y Modelo no iterativo. $\epsilon_a = 0.045$

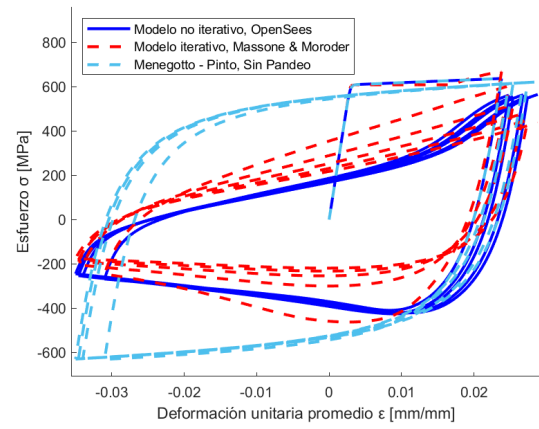


(d) Comparación de respuesta $\sigma - \epsilon$, Modelo iterativo y no iterativo, $\epsilon_a = 0.045$

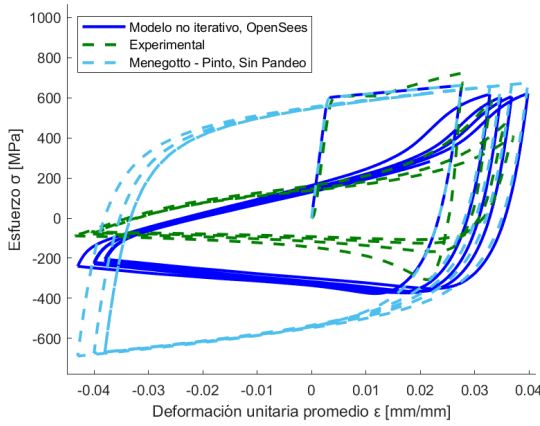
Figura 4.11: Comparación modelo experimental e iterativo con modelo implementado, Barra ASTM A706 Gr.80. y $L/D = 10$



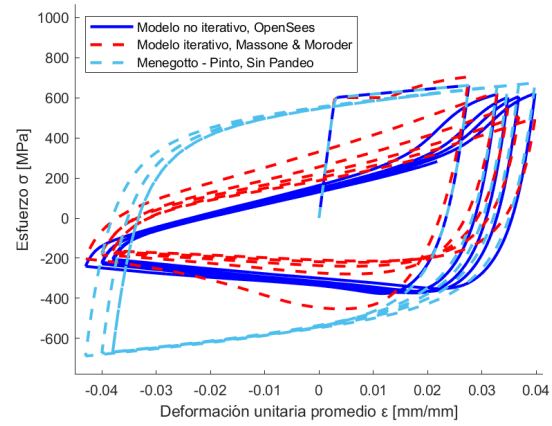
(a) Comparación de respuesta $\sigma - \epsilon$, Egger y Modelo no iterativo. $\epsilon_a = 0.031$



(b) Comparación de respuesta $\sigma - \epsilon$, Modelo iterativo y no iterativo, $\epsilon_a = 0.031$



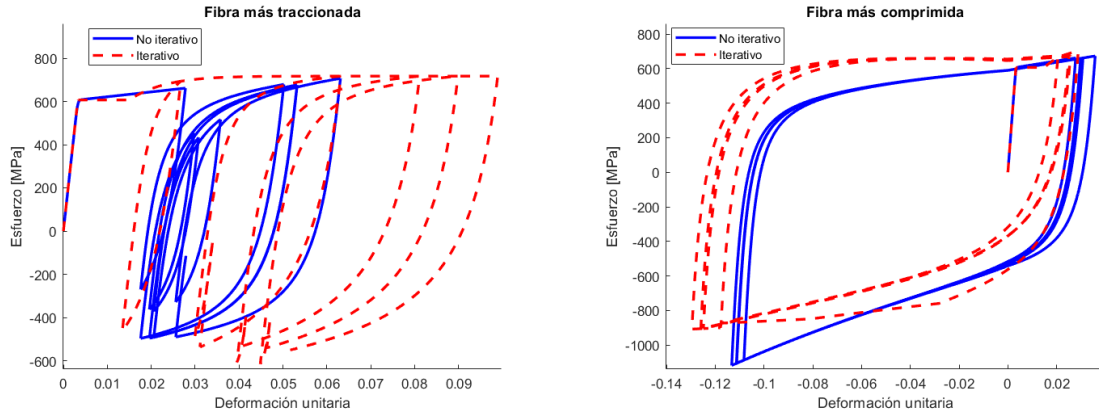
(c) Comparación de respuesta $\sigma - \epsilon$, Egger y Modelo no iterativo. $\epsilon_a = 0.045$



(d) Comparación de respuesta $\sigma - \epsilon$, Modelo iterativo y no iterativo, $\epsilon_a = 0.045$

Figura 4.12: Comparación modelo experimental e iterativo con modelo implementado, Barra ASTM A706 Gr.80. y $L/D = 15$

En el caso de estas barras experimentales, se presentan mayores diferencias, incluso entre modelo iterativo y experimental, lo cual puede deberse al modo de obtención de los mismos datos experimentales en el proceso de fotogrametría. Sin embargo, en la comparación con el modelo iterativo, la diferencia no es despreciable, acentuándose la problemática con esbeltez igual a 10. La figura 4.13 muestra el desarrollo de esfuerzos de la fibra más traccionada (4.13.a) y comprimida (4.13.b) :



(a) Desarrollo de esfuerzos en fibra más traccionada

(b) Desarrollo de esfuerzos en fibra más comprimida

Figura 4.13: Curva esfuerzo-deformación en fibra más traccionada y comprimida, $L/D = 10$ & $\epsilon_a = 0.045$

Se observa una gran diferencia en la respuesta de la fibra más traccionada, principalmente producido por la diferencia en el desarrollo de curvaturas, tal como se discutió en la comparación con los ensayos de Tripathi. Sin embargo uno de los puntos que genera la sobre-estimación de esfuerzos en la curva uniaxial de esfuerzo - deformación es la razón de endurecimiento que se utiliza en el modelo de Menegotto - Pinto, ya que se observa como la fibra más comprimida desarrolla compresiones mayores a las desarrolladas por el modelo iterativo con el modelo constitutivo de Chang & Mander.

4.2. Cuantificación de la precisión del modelo

En secciones anteriores se mostraron los resultados de los ensayos experimentales y los análisis de los modelos no iterativo, iterativo y sin pandeo, sin embargo es necesario definir alguna métrica que cuantifique la precisión del modelo respecto al iterativo.

Se calcula el área bajo la curva tanto para el modelo iterativo y no iterativo mediante suma de áreas infinitesimales en cada discretización de la curva. El error porcentual del modelo no iterativo se define en función del área bajo la curva del modelo no iterativo (A_{NI}) y la del modelo iterativo (A_{It}) según la ecuación :

$$\text{Error} = \frac{A_{It} - A_{NI}}{A_{It}} \cdot 100\% \quad (4.1)$$

Para el cálculo del área infinitesimal se tienen dos casos posibles que definen como se calcula:

- El signo de esfuerzos consecutivos son iguales, cuyo caso esquemático se representa en la figura 4.14:

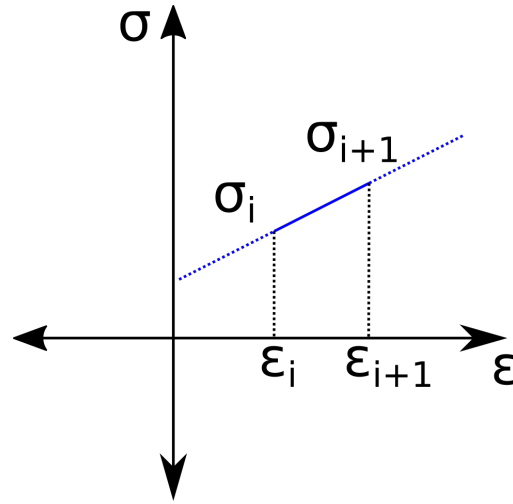


Figura 4.14: Esquema de área bajo la curva para esfuerzos de igual signo.

Donde la forma de cálculo es simple, mediante la ecuación 4.2

$$\Delta A = \frac{|\sigma_{i+1} + \sigma_i| \cdot |\epsilon_{i+1} - \epsilon_i|}{2} \quad (4.2)$$

- Cuando los signos de los esfuerzos consecutivos son diferentes, el cálculo se complejiza levemente, el esquema de cálculo se muestra en la figura 4.15

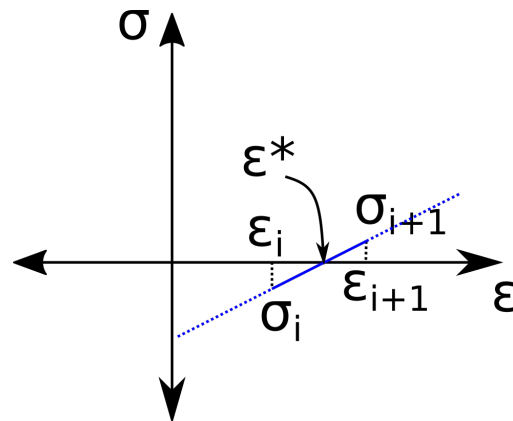


Figura 4.15: Esquema de área bajo la curva para esfuerzos de distinto signo

El modo de cálculo se centra en encontrar el punto ϵ^* , mediante una interpolación lineal entre puntos consecutivos y encontrar el punto que define esfuerzo nulo. De modo que la forma de cálculo se esquematiza en la ecuación 4.3 :

$$\left. \begin{aligned} \epsilon^* &= \epsilon_i - \frac{\sigma_i \cdot (\epsilon_{i+1} - \epsilon_i)}{\sigma_{i+1} - \sigma_i} \\ \delta A_1 &= \left| \frac{\sigma_{i+1} \cdot (\epsilon_{i+1} - \epsilon^*)}{2} \right| \\ \delta A_2 &= \left| \frac{\sigma_i \cdot (\epsilon^* - \epsilon_i)}{2} \right| \end{aligned} \right\} \rightarrow \Delta A = \delta A_1 + \delta A_2 \quad (4.3)$$

De este modo el área bajo la curva de cada análisis viene dado por la suma de cada área infinitesimal de los datos discretizados.

En la tabla 4.2 se describe el área bajo la curva de cada caso analizado anteriormente para el modelo iterativo y no iterativo y el error total porcentual del modelo no iterativo y el error promedio por cantidad de ciclos realizados. No se expresa error frente a ensayo experimental.

Tabla 4.2: Error porcentual del modelo no iterativo

Análisis		Área bajo la curva [Mpa]		Error Total [%]	Error por ciclo [%]	
		Modelo iterativo	Modelo no iterativo		N° de ciclos	Error promedio [%]
Monotónico	Bayrak & Sheikh - 20M Grade 400 - L/D = 6 $\epsilon_{max} = -0.1$	53.26	59.26	-11.05 %	1	-11.05 %
	Bayrak & Sheikh - 20M Grade 400 - L/D = 8 $\epsilon_{max} = -0.14$	48.13	53.41	-10.96 %	1	-10.96 %
	Bayrak & Sheikh - 20M Grade 400 - L/D = 10 $\epsilon_{max} = -0.15$	39.66	58.66	-47.89 %	1	-47.89 %
Cíclico	Tripathi - 300E - L/D = 6 - $\epsilon_{max} = 0.04$ & $\epsilon_{min} = -0.04$	162.99	159.468	2.16 %	4	0.54 %
	Tripathi - 300E - L/D = 12 - $\epsilon_{max} = 0.06$ & $\epsilon_{min} = -0.03$	133.26	137.89	-3.48 %	4	-0.87 %
	Tripathi - 300E - L/D = 12 - $\epsilon_{max} = 0.1$ & $\epsilon_{min} = 0$	161.26	148.12	-8.14 %	4	-2.04 %
	Tripathi - 300E - L/D = 15 - $\epsilon_{max} = 0.04$ & $\epsilon_{min} = -0.04$	93.91	112.43	-19.71 %	5	-3.94 %
	Tripathi - 500E - L/D = 6 - $\epsilon_{max} = 0.04$ & $\epsilon_{min} = -0.04$	233.42	253.5	-8.6 %	4	-2.15 %
	Tripathi - 500E - L/D = 12 - $\epsilon_{max} = 0.06$ & $\epsilon_{min} = -0.03$	212.98	205.3	-3.61 %	4	-0.90 %
	Tripathi - 500E - L/D = 12 - $\epsilon_{max} = 0.1$ & $\epsilon_{min} = 0$	254.62	221.32	13.08 %	4	3.27 %
	Tripathi - 500E - L/D = 15 - $\epsilon_{max} = 0.04$ & $\epsilon_{min} = -0.04$	121.28	130.98	-8.0 %	4	-2.0 %
	Egger - G80 - L/D = 10 - $\epsilon_a = 0.031$	211.14	247.56	-17.25 %	5	-3.45 %
	Egger - G80 - L/D = 10 - $\epsilon_a = 0.045$	209.1	225.51	-7.85 %	4	-1.96 %
	Egger - G80 - L/D = 15 - $\epsilon_a = 0.031$	157.9	168.97	-7.01 %	5	-1.40 %
Egger - G80 - L/D = 15 - $\epsilon_a = 0.045$	185.55	190.73	-2.79 %	5	-0.56 %	

La tabla 4.2 explica que el modelo no llega a ser exacto, sin embargo debe considerarse que para los ensayos cíclicos, como se había mencionado anteriormente, el modelo no iterativo no logra captar la degradación de esfuerzos y curvatura por ciclaje sin fatiga como si lo hace el modelo iterativo, lo que influye en la diferencia entre ambos modelos. Se verifica el mayor error para casos donde la esbeltez es elevada, en este caso de 3.94 % para la barra 300E de Tripathi con esbeltez igual a 15.

Por el hecho anterior de no considerar degradación por curvaturas, lo que determina errores diferentes para el primer ciclo y los ciclos posteriores, es que se normaliza en relación a la cantidad de ciclos analizados, obteniéndose errores relativamente menores del orden del 5 % para casos cíclicos. De hecho, en general se observa una mayor área bajo la curva para el

modelo no iterativo, precisamente por éste aspecto.

Distinto escenario se observa para el análisis monotónico, donde el único factor de error es la linealización de la curvatura. El error porcentual de la curvatura en el caso monotónico con esbeltez igual a 10 es de un 7.8% lo que se traduce en un error porcentual para la curva esfuerzo - deformación del 47.9%. Se infiere de esto que el análisis es sensible al desarrollo de las curvaturas.

4.3. Análisis de equilibrio de momento

El modelo iterativo tiene por requisito de convergencia garantizar el equilibrio de momento por pandeo, no así el modelo no iterativo, donde se ajusta el desarrollo de curvaturas.

El equilibrio de momento se toma en consideración en base al momento producido por el pandeo de la barra y el desarrollo de curvatura, según la idealización del pandeo expresado en el modelo de Massone & Moroder (M_1) expresado en la ecuación 4.4 y el momento interno producido por el desarrollo de esfuerzos por fibra según el centroide de la barra (M_2), expresado en la ecuación 4.5.

$$M_1 = \bar{\sigma} \cdot A_{\text{barra}} \cdot \left(\frac{L}{2} - l_p \right) \cdot \frac{\sin(\theta_p)}{2} \quad (4.4)$$

$$M_2 = \sum \sigma_{\text{fibra}_i} \cdot A_{\text{fibra}_i} \cdot x_{b_{\text{fibra}_i}} \quad (4.5)$$

Donde x_b representa la distancia al centroide de la barra de refuerzo de la fibra i -ésima.

Se muestran los resultados para la barra ensayadas con el estudio de Tripathi con una fluencia de 300 [MPa], que indican cuanto se transgrede la ecuación de equilibrio. Los casos restantes se presentan en el Anexo D.

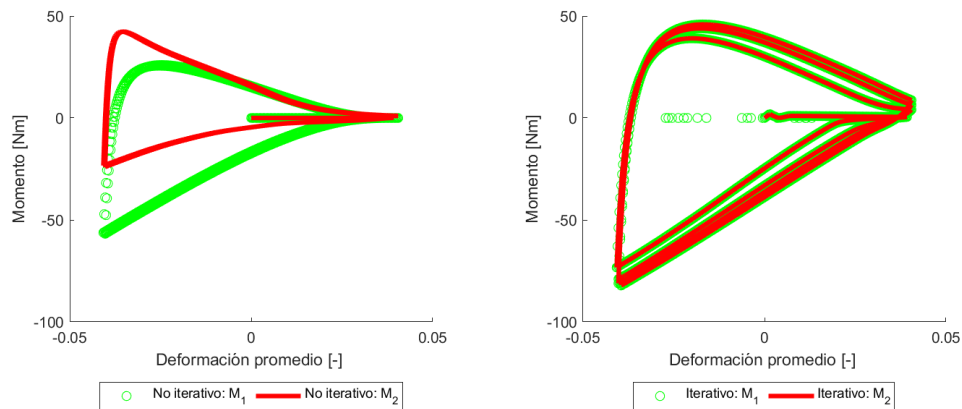


Figura 4.16: Comparación de equilibrio de momento, Modelo iterativo y no iterativo, $L/D = 6$, $\epsilon_{\max} = 0.04$ - $\epsilon_{\min} = -0.04$

En el caso de la barra con una esbeltez de $L/D = 6$, expresado en la figura 4.16, se espera una baja influencia del pandeo producto de que el desarrollo de curvaturas es de baja magnitud. De todas maneras es notoria la transgresión del equilibrio de momento, donde el momento generado por el pandeo (M_1) es similar al equilibrio de momento del modelo iterativo en la máxima compresión distinto a lo que se produce a lo largo de la curva de recarga.

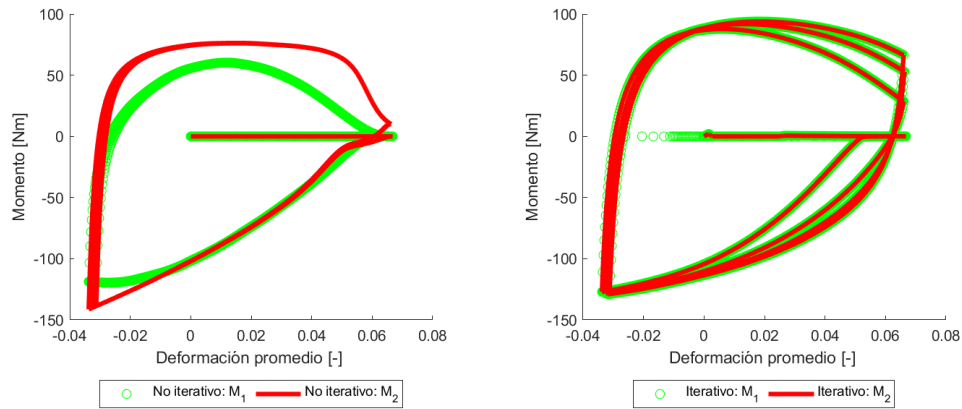


Figura 4.17: Comparación de equilibrio de momento, Modelo iterativo y no iterativo, $L/D = 12$, $\epsilon_{\max} = 0.06$ - $\epsilon_{\min} = -0.03$

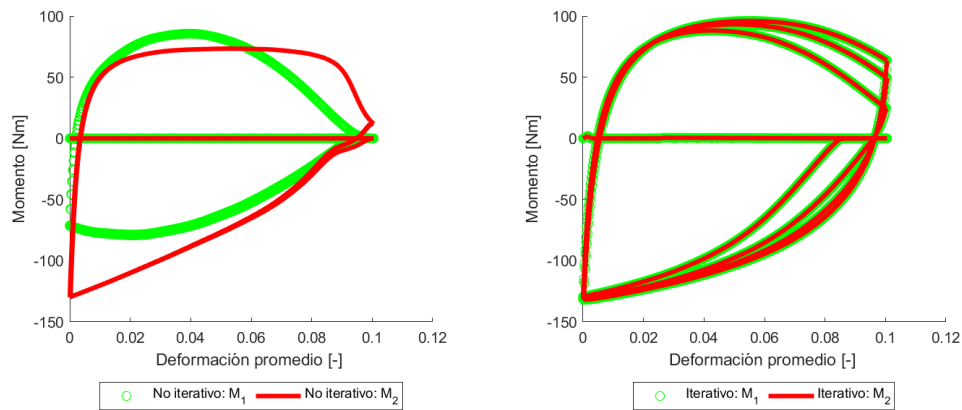


Figura 4.18: Comparación de equilibrio de momento, Modelo iterativo y no iterativo, $L/D = 12$, $\epsilon_{\max} = 0.1$ - $\epsilon_{\min} = 0$

Para los casos expresados en la figura 4.17 y 4.18, se muestra un mayor equilibrio a lo largo del historial de deformaciones, sin embargo siempre una mayor transgresión del equilibrio en la curva de recarga de la barra, lo cual se debe a la formulación de las curvas asintóticas de la curvatura, donde en las curvas de recarga, el desarrollo de curvaturas definido en el modelo no iterativo se expresa sin ningún tipo de degradación de curvatura por ciclaje, donde además existe influencia del modelo de Menegotto - Pinto en el no iterativo, a diferencia del equilibrio garantizado en el modelo iterativo según modelo constitutivo de Mander.

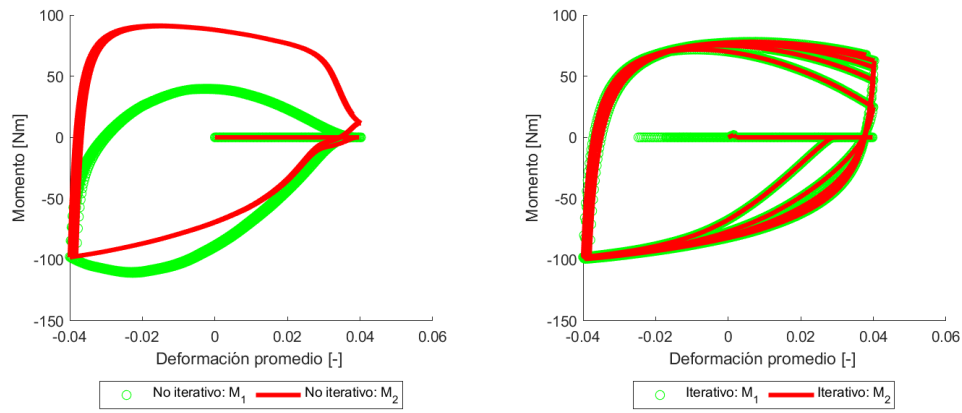


Figura 4.19: Comparación de equilibrio de momento, Modelo iterativo y no iterativo, $L/D = 15$, $\epsilon_{\max} = 0.04 - \epsilon_{\min} = -0.04$

El caso para esbeltez $L/D = 15$, representado en la figura 4.19, muestra con mayor claridad la diferencia producida en el primer ciclo y ciclos posteriores, donde la respuesta del modelo no iterativo es única para el historial de deformaciones que el caso define, en contraste del modelo iterativo, donde el desarrollo de curvaturas en varios ciclos difiere con un equilibrio de momento notoriamente diferente.

4.4. Análisis de eficiencia de modelo implementado

Es necesario cuantificar el ahorro de recursos del modelo no iterativo con respecto al modelo iterativo, de tal forma que se presenta en la tabla 4.3 el tiempo de ejecución del modelo no iterativo e iterativo para cada caso analizado previamente. De este modo se calcula la eficiencia según la ecuación 4.6

$$\% \text{Eficiencia} = \frac{t_{\text{Iterativo}} - t_{\text{No iterativo}}}{t_{\text{Iterativo}}} \cdot 100 \% \quad (4.6)$$

Tabla 4.3: Tiempos de ejecución de cada modelo.

Análisis	Número de datos	Tiempo modelo iterativo [s]	Tiempo modelo no iterativo [s]	% Eficiencia
Tripathi - 300E - L/D = 6 - $\epsilon_{\max} = 0.04$ & $\epsilon_{\min} = -0.04$	2415	10.91	2.27	79.16 %
Tripathi - 300E - L/D = 12 - $\epsilon_{\max} = 0.06$ & $\epsilon_{\min} = -0.03$	3028	12.53	2.7	78.4 %
Tripathi - 300E - L/D = 12 - $\epsilon_{\max} = 0.1$ & $\epsilon_{\min} = 0$	3205	14.46	2.18	84.93 %
Tripathi - 300E - L/D = 15 - $\epsilon_{\max} = 0.04$ & $\epsilon_{\min} = -0.04$	3327	15.54	2.93	81.17 %
Tripathi - 500E - L/D = 6 - $\epsilon_{\max} = 0.04$ & $\epsilon_{\min} = -0.04$	2414	10.52	2.28	78.35 %
Tripathi - 500E - L/D = 12 - $\epsilon_{\max} = 0.06$ & $\epsilon_{\min} = -0.03$	3077	13.03	2.94	77.42 %
Tripathi - 500E - L/D = 12 - $\epsilon_{\max} = 0.1$ & $\epsilon_{\min} = 0$	3219	14.72	2.79	81.07 %
Tripathi - 500E - L/D = 15 - $\epsilon_{\max} = 0.04$ & $\epsilon_{\min} = -0.04$	2413	10.38	1.54	85.17 %

4.5. Limitaciones del modelo

Es necesario mencionar, adicionalmente a la verificación por cada caso experimental extraído de la literatura, algunas limitaciones con casos particulares en los cuales el modelo presenta irregularidades y pierde precisión. Sumo cuidado se debe tener al momento de analizar configuraciones de esbelteces elevadas, del orden de $L/D = 15$ o más, que se acentúa con amplitudes de deformaciones elevadas, volviéndose a acentuar cuando se generan deformaciones de compresión elevadas mayores a 5%. Esto se muestra en la figura 4.20:

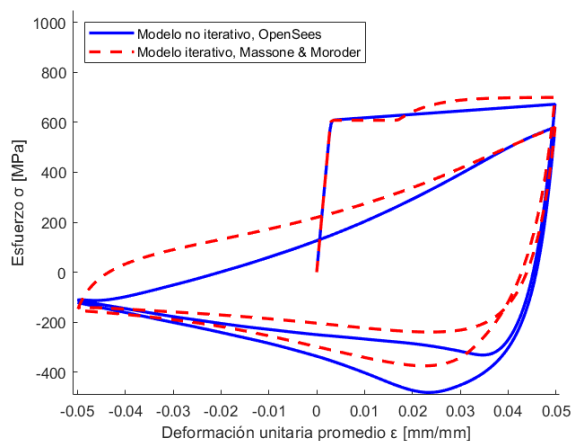


Figura 4.20: Configuración con esbeltez y amplitud de deformaciones elevada.

Se observa que se tiende a presentar una discontinuidad en el punto máximo de compresión, la cual sería mayor si la amplitud aumentase. De hecho tal como se discute en los estudios de Dhakal & Maekawa [?], la respuesta de esfuerzos después de la degradación por pandeo se debiese estabilizar en $0.2F_y$, sin embargo como se utiliza una respuesta de curvatura lineal, aquella estabilización no se produce. Sin embargo, con la solución cuadrática tampoco se capta aquella estabilización solo siendo captada por el modelo iterativo. La figura muestra la respuesta monotónica con esbeltez igual a 10 y la respuesta de las curvaturas

Por otra parte, tal como se discutió en la comparación con los ensayos de Egger, existe una sobre-estimación de los esfuerzos de compresión cuando la razón de endurecimiento utilizada es elevada, de modo que se deben utilizar valores tales que la respuesta pueda degradar sin verse afectado por esta sobre-estimación en las fibras más comprimidas.

Capítulo 5

Aplicabilidad a otras secciones

5.1. Introducción de análisis y verificación

El modelo originalmente está centrado en el uso en barras redondas de refuerzo para hormigón armado, sin embargo, se verificará de igual manera la aplicabilidad del modelo no iterativo en secciones de acero estructural no necesariamente redondas, como lo son las secciones doble T, secciones canal, etc.

El modo de análisis para determinar el pandeo global de estas secciones está centrado en determinar el eje en el cual ésta se pandeará dado su radio de giro, de modo que se utiliza el ancho correspondiente al eje con el radio de giro menor para determinar la esbeltez utilizada para la aplicabilidad del modelo.

Se analizará únicamente una sección doble T, comparando resultados tanto con datos experimentales, como con el análisis mediante modelo iterativo. Las dimensiones corresponden a un perfil H90x90x4.5x4.5, esquematizado en la figura 5.1, utilizado en un arriostramiento con un largo de pandeo de 1511 [mm] :

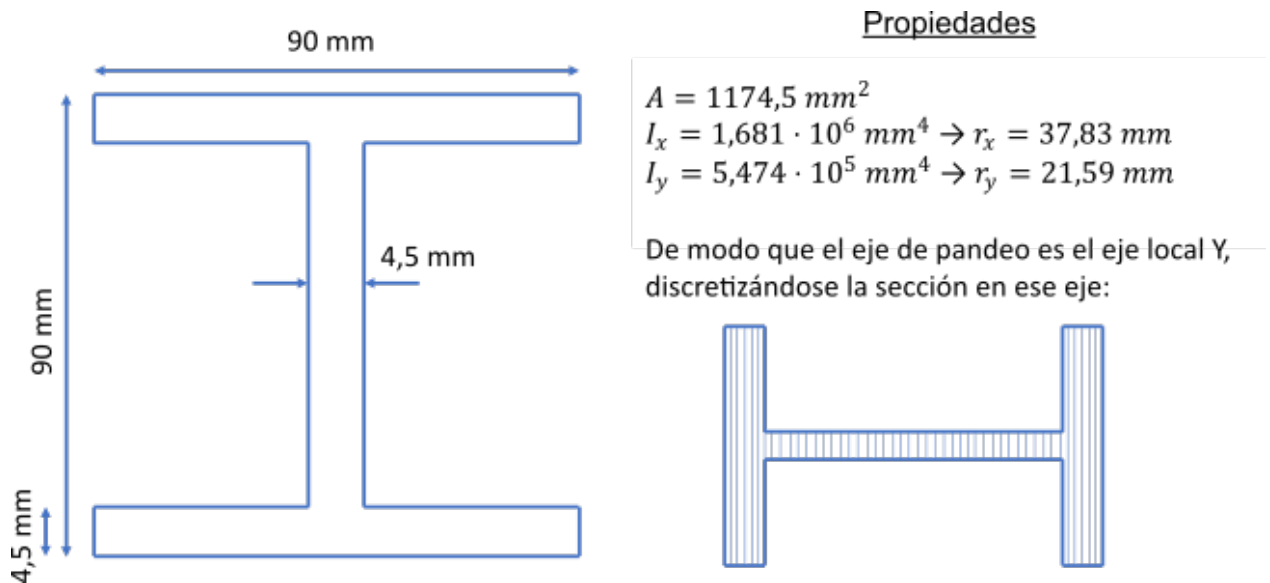


Figura 5.1: Sección en análisis y discretización

La sección, como se muestra en la figura 5.1, se discretiza en el eje con la mayor esbeltez dada por el radio de giro, sin embargo la esbeltez utilizada en el modelo iterativo y no iterativo, se extrae con el ancho de la sección en la dirección discretizada, en este caso es la altura de la sección doble T. Tal como en el caso de barras redondas, se hace uso como largo de la rótula plástica, l_p , como el ancho de la sección utilizada para la definición de la esbeltez, sin embargo esto requiere un mayor estudio para la determinación de éste parámetro.

Las propiedades nominales utilizadas en el estudio de Takeuchi [23], corresponden a un acero SS400, notaciones de aceros provenientes de la JIS, en conjunto con la elasticidad asociada al acero.

Tabla 5.1: Propiedades nominales Acero SS400

Fluencia, F_y [MPa]	Tensión última, F_u [MPa]
327	430

5.2. Comparación de resultados

Se testean tres configuraciones de deformaciones diferentes, experimentos para los cuales se presentan fenómenos que el planteamiento actual del modelo tanto iterativo como no iterativo, no logran captar, que es el pandeo local de la sección, mas teniendo en consideración este factor se comparan las respuestas del análisis:

- Ciclos simétricos con incremento gradual: El historial de deformaciones corresponden a ciclos simétricos de tracción y compresión, de acuerdo a la figura 5.2, cuya respuesta se muestra en la figura 5.3:

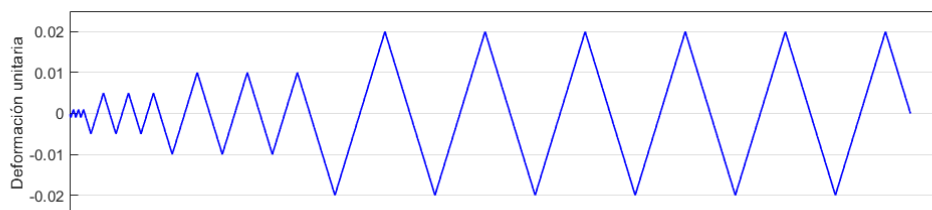


Figura 5.2: Historial de deformaciones configuración de ciclos con amplitud en aumento gradual

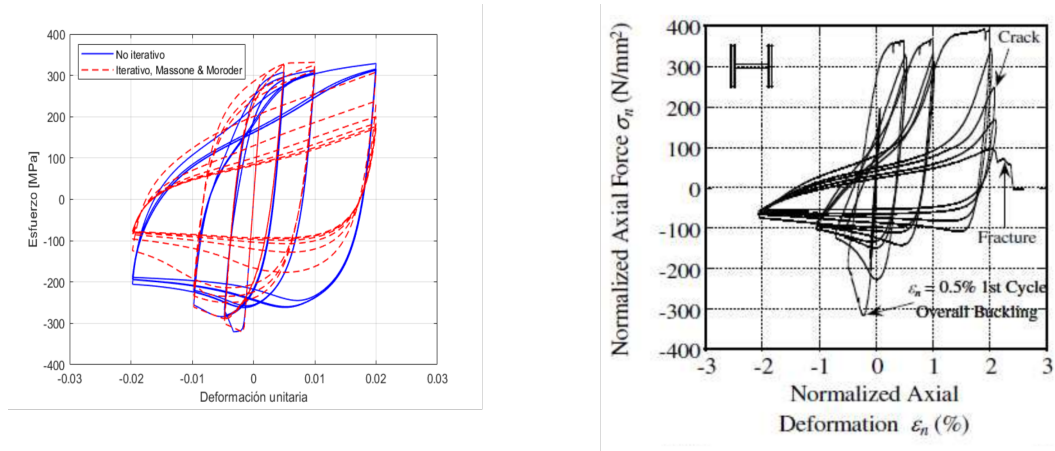


Figura 5.3: Comparación de respuesta de configuración con incremento gradual entre modelo iterativo, no iterativo y respuesta experimental Takeuchi, 2015.

- Ciclos simétricos con decremento gradual: Amplitud cíclica con decremento de acuerdo al historial de la figura 5.4, cuya respuesta experimental y analítica se muestra en la figura 5.5:

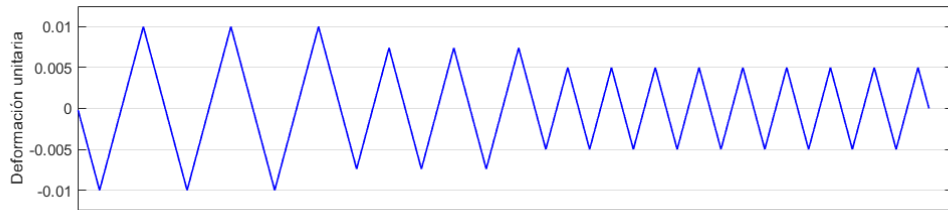


Figura 5.4: Historial de deformaciones configuración de ciclos con amplitud en decremento gradual

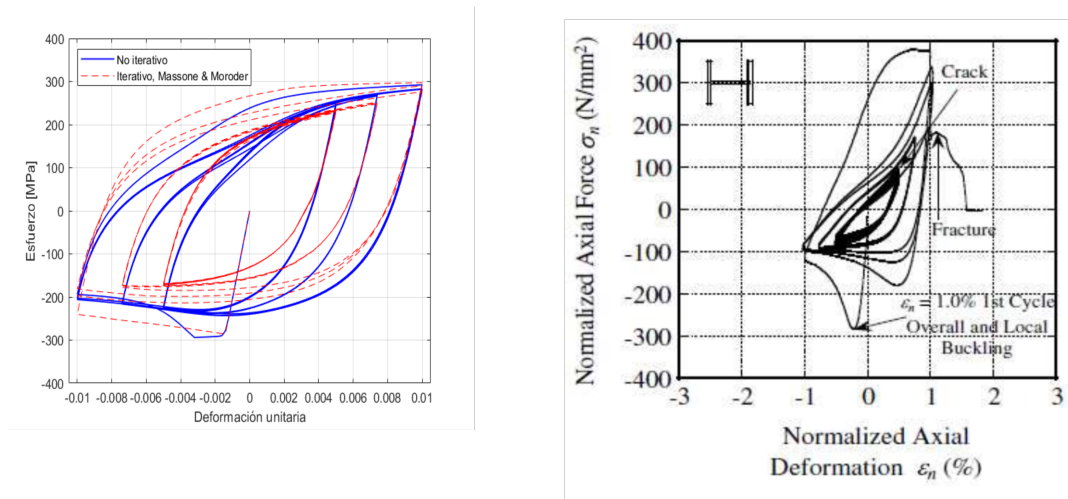


Figura 5.5: Comparación de respuesta de configuración con decremento gradual entre modelo iterativo, no iterativo y respuesta experimental Takeuchi, 2015.

- Amplitud cíclica con incremento excéntrico: Corresponde a una configuración de ciclos asimétricos, con el historial de deformaciones de acuerdo a la figura 5.6, cuya respuesta experimental y analítica se muestra en la figura 5.7

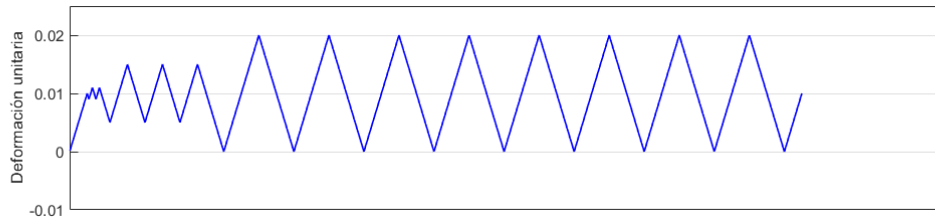


Figura 5.6: Historial de deformaciones configuración de ciclos con amplitud en aumento excéntrico

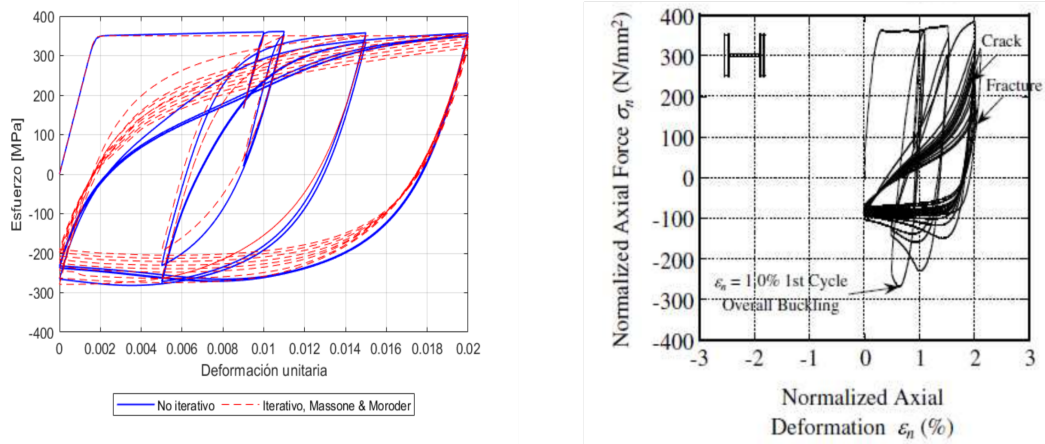


Figura 5.7: Comparación de respuesta de configuración con incremento excéntrico entre modelo iterativo, no iterativo y respuesta experimental Takeuchi, 2015.

Se tiene como antecedente respecto a los resultados experimentales, en los estudios realizados por Takeuchi, que cada uno de los especímenes estuvo afectado por el pandeo local en alguna de sus fases de carga, las cuales son explicitadas en la tabla 5.2 :

Tabla 5.2: Fenómenos en fases de carga de cada configuración, Takeuchi (2015)

Configuración de ciclo	Pandeo global	Pandeo local	Agrietamiento	Fractura
Simétrico con incremento gradual	1° ciclo en 0.5 %	2° ciclo en 0.5 %	3° ciclo en 2.0 %	5° ciclo en 2.0 %
Simétrico con decremento gradual	1° ciclo en 1.0 %	1° ciclo en 1.0 %	21° ciclo en 0.5 %	37° ciclo en 0.5 %
Asimétrico con incremento excéntrico	1° ciclo en 0.5 %	2° ciclo en 0.5 %	10° ciclo en 1.0 %	10° ciclo en 1.0 %

Se puede observar en base a la primera configuración con ciclos con amplitud en incremento gradual que en los primeros ciclos tanto modelo iterativo y no iterativo muestran respuestas iguales, cuya respuesta difiere por la misma razón que existe diferencias entre ambos en el caso de barras de refuerzo, es decir, la degradación por curvatura que el modelo no iterativo no logra captar. Con esa salvedad, si se compara la respuesta con la respuesta experimental

de la figura 5.3, el modelo iterativo muestra buena correlación con la respuesta experimental del arriostamiento, para todas las fases de carga, independiente del pandeo local que se genera en el segundo ciclo. La respuesta no iterativo difiere en gran medida, dada la razón ya expuesta.

Diferente es el caso de la configuración con amplitud en decremento gradual, donde tanto la respuesta no iterativa como iterativa no logran captar la degradación producida en la respuesta experimental, lo cual podría deberse al pandeo local que se produce en el primer ciclo de las fases de carga, lo cual produce que las fibras tengan una respuesta degradada y no con el modelo constitutivo sin pandeo, como se realiza actualmente en cada una de las fibras del modelo iterativo y no iterativo. Independiente de eso, se observa entre la respuesta analítica iterativa y no iterativa, que el modelo iterativo degrada en los ciclos posteriores más de lo que lo hace el modelo no iterativo, lo cual se debe netamente al desarrollo de curvaturas entre ambos modelos.

Lo mismo ocurre con la tercera configuración entre la respuesta analítica y experimental, observándose que en el primer ciclo donde se produce el pandeo global, llegan a compresiones similares entre ambos modelos, mas no cuando el pandeo local de la sección se produce en el segundo ciclo.

De modo que se observan diferencias entre respuesta experimental y analítica, las cuales; sin embargo, se puede producir debido a la presencia de pandeo local en las fases de carga. Con eso en consideración, para el modelo iterativo no se observa un modo de implementar el efecto del pandeo local, además de que existe una ineficiencia en su uso en términos de tiempos de ejecución y uso de memoria. Por otra parte se vislumbra un escenario distinto para el modelo no iterativo, donde se puede implementar el pandeo local modelando cada fibra con el modelo no iterativo y de este modo captar la degradación de esfuerzos por cada fibra de la sección en análisis.

De este modo, se senta un precedente para estudiar la respuesta del modelo en otras secciones no circulares como secciones ángulo, canales, etc. del mismo modo, definiendo el eje de pandeo dado los radios de giros de cada eje local de la sección.

Capítulo 6

Conclusiones

Este trabajo consiste en la implementación de un modelo de refuerzo de acero en el software de código abierto, OpenSees, modelo que se basa en el modelo iterativo de Massone & Moroder, eliminándose las iteraciones sobre la curvatura por pandeo sin análisis de imperfecciones. A medida que se implementa el modelo en OpenSees, se realizan modificaciones para evitar el desarrollo de curvaturas en procesos de tracción mediante ajustes asintóticos de la curvatura en las curvas de recarga y descarga, similar a la formulación del análisis monotónico del modelo de Menegotto - Pinto.

Habiéndose realizado las comparaciones mostradas en capítulos anteriores se pueden observar ventajas y desventajas del modelo implementado con respecto al iterativo, las cuales serán detalladas a lo largo de este capítulo.

Dentro de las ventajas que se pueden observar del modelo no iterativo son:

- Permite obtener la respuesta histerética en un tiempo reducido y con una gran optimización de recursos en cuanto a memoria computacional, logrando ahorros de tiempo de alrededor del 80 % respecto al modelo iterativo.
- A partir de la formulación del modelo se desprende que podría ser utilizado para representar el pandeo local de una sección no circular, al representar cada fibra con el modelo de pandeo no iterativo.

Por otra parte se tienen desventajas con respecto al uso del no iterativo por sobre el iterativo:

- Al linealizar la curvatura, se pierde la garantía de seguir el equilibrio al 100 %, el cual es requisito en el desarrollo del modelo iterativo, mas no en el no iterativo, lo cual se verifica en los resultados expuestos en la sección correspondiente, donde las fases de recarga (Desde la máxima compresión a la máxima tracción) son las que presentan mayor desequilibrio de momento.
- El modelo no iterativo no logra captar la degradación de curvaturas ni de esfuerzos por factores no relacionados con fatiga, como si lo hace el modelo iterativo en cada ciclo histerético.
- Otra desventaja, que viene dada en la implementación en OpenSees, y no con la formulación del modelo, es en el uso del modelo de Menegotto - Pinto con la consecuente diferencia entre este y el modelo de Mander, al no considerar una degradación de esfuerzos luego del esfuerzo máximo en la envolvente en tracción. Sin embargo, ésta diferencia

puede ser más o menos controlado con el endurecimiento considerado para la barra, donde si ésta es muy elevada, se sobre-estimarán tanto la repuesta en tracción como en compresión.

Sin embargo, a pesar de la desventaja que representa no garantizar por completo el equilibrio, los resultados obtenidos en base a las verificaciones realizadas con los ensayos experimentales y los resultados del modelo iterativo, el modelo no iterativo entrega resultados consistentes con el comportamiento en pandeo para esbelteces desde 6 a 15 con algunas limitaciones, con errores porcentuales promedio por ciclo que van desde 0.54 % a 3.94 % en respuestas cíclicas. Distinto es el caso para las respuestas monotónicas, donde ya el error se eleva a errores del 50 %, sin embargo con deformaciones de compresión elevadas en las cuales el modelo pierde precisión y está dentro de las consideraciones limitantes de análisis.

Las principales limitaciones en cuanto a las esbelteces de la barra son:

- Para esbelteces elevadas (15 o más), el modelo pierde precisión y se forma una discontinuidad en el punto máximo de compresión para amplitudes de deformación elevadas, especialmente cuando se incurren en grandes deformaciones de compresión. Por ejemplo, en casos no experimentales de prueba que tienen un historial de deformaciones del 5 al -5 % de deformaciones unitarias con una esbeltez igual a 15, la respuesta del modelo no iterativo e iterativo difiere principalmente en el punto máximo de compresión:
- La otra limitante respecto a las esbelteces corresponde a utilizar una esbeltez mayor o igual a 4 para no generar inestabilidades matemáticas, principalmente en la discriminante de la solución cuadrática de la cual se obtiene la expansión en series de Taylor. Cabe decir que esto no es realmente una limitante, sino más bien un detalle, pues disponer de separaciones menores generan otros problemas constructivos, específicamente con el vibrado del hormigón.

En relación a la degradación de curvaturas que el modelo no iterativo no captura, puede ser resuelto implementandose además del desfase en deformaciones ("offset"), un desfase aplicado a las curvaturas y no a las deformaciones mismas, de modo que no se determine siempre la misma recta de curvaturas para una deformación máxima dada.

Tal como se analiza en el capítulo correspondiente a secciones no circulares, el modelo presenta una respuesta similar a la respuesta experimental, teniéndose en consideración las modificaciones a realizar por desfase de curvaturas en aquellas fases de carga que no están expuestas a pandeo local. Sin embargo, dada la eficiencia antes expuesta, se logra concluir que es posible captar ésta degradación mayor, considerando cada fibra de la sección susceptible a pandeo con el modelo implementado en OpenSees, el cual debe ser implementado considerando las deficiencias en terminos de estabilidad matemática en cuanto a las esbelteces que el modelo acepta, es decir, se debe generar discretizaciones de fibra tal que la esbeltez de la discretización sea mayor o igual a 5, dado el factor de ajuste utilizado.

Bibliografía

- [1] Massone, L. and López, E., “Modeling of reinforcement global buckling in RC elements,” *Engineering Structures*, vol. 59, pp. 484–494, feb 2014.
- [2] Gomes, A. & Appleton, J., “Nonlinear cyclic stress-strain relationship of reinforcing bars including buckling,” *Engineering Structures*, vol. 19, no. 10, pp. 822–826, 1997.
- [3] Massone, L. & Moroder, D., “Buckling modeling of reinforcing bars with imperfections,” *Engineering Structures*, vol. 31, pp. 758–767, mar 2009.
- [4] G. Monti and C. Nuti, “Nonlinear Cyclic Behavior of Reinforcing Bars Including Buckling,” *Journal of Structural Engineering*, vol. 118, no. 12, pp. 3268–3284, 1992.
- [5] Antoniou, S. & Fragiadakis, M. & Pinho, R., “Modelling inelastic buckling of reinforcing bars under earthquake loading,” pp. 347–361, dec 2008.
- [6] Zhou, Z. and Nuti, C. and Lavorato, D., “Modified Monti-Nuti Model for Different Types of Reinforcing Bars Including Inelastic Buckling,” *Applied Mechanics and Materials*, vol. 847, pp. 166–172, 2016.
- [7] Dhakal, R. & Maekawa, K., “Modeling for Postyield Buckling of Reinforcement,” *Journal of Structural Engineering*, vol. 128, no. 9, pp. 1139–1147, 2002.
- [8] Dhakal, R. & Maekawa, K., “Path-dependent cyclic stress-strain relationship of reinforcing bar including buckling,” *Engineering Structures*, vol. 24, no. 11, pp. 1383–1396, 2002.
- [9] Urmson, C. and Mander, J., “Local Buckling Analysis of Longitudinal Reinforcing Bars,” *Journal of Structural Engineering*, vol. 138, no. 1, pp. 62–71, 2012.
- [10] Minafò, G., “Local Buckling of reinforcing steel bars in RC members under compression forces,” *Computers and Concrete*, vol. 22, pp. 527–538, dec 2018.
- [11] Sosa, D. & Kowalsky, M., “Predictive fiber model for rebar buckling,” in *The 17th World Conference on Earthquake Engineering*, 2020.
- [12] Bayrak, O. & Sheikh, S., “Plastic Hinge Analysis,” *Journal of Structural Engineering*, vol. 127, no. 9, pp. 1092–1100, 2001.
- [13] Cosenza, E. & Prota, A., “Experimental behaviour and numerical modelling of smooth steel bars under compression,” *Journal of Earthquake Engineering*, vol. 10, no. 3, pp. 313–329, 2006.
- [14] Bae, S. & Miseses, A. & Bayrak, O., “Inelastic Buckling of Reinforcing Bars,” *Journal of Structural Engineering*, vol. 131, pp. 314–321, feb 2005.
- [15] Rosa, J., “Modelo histerético de barras de acero de refuerzo susceptibles al pandeo local

- y global,” Master’s thesis, Universidad de Chile, 2021. Ingeniería Civil, Tesis de Magister en proceso.
- [16] “Opensees.” <https://opensees.berkeley.edu>. [Fecha última consulta: 05 de Junio de 2021].
- [17] Mander, J., *Seismic Design of Bridge Piers*. PhD thesis, University of Canterbury, 1983.
- [18] Dodd, L L & Restrepo-Posada, J., “Model for Predicting Cyclic Behavior of Reinforcing Steel,” *Journal of Structural Engineering*, vol. 121, no. 3, pp. 433–445, 1995.
- [19] Lacaze, C., “Estudio y modelamiento del impacto del pandeo en la fatiga de bajos ciclos en barras longitudinales para hormigón armado,” 2009. Tesis de pregrado, Universidad de Chile.
- [20] Tripathi, M. & Dhakal, R. & Dashti, F. & Massone, L., “Low-cycle fatigue behaviour of reinforcing bars including the effect of inelastic buckling,” *Construction and Building Materials*, vol. 190, pp. 1226–1235, 2018.
- [21] M. Menegotto and P. E. Pinto, “Method of Analysis for Cyclically Loaded R. C. Plane Frames Including Changes in Geometry and Non-Elastic Behavior of Elements under Combined Normal Force and Bending,” *proceedings of IABSE Symposium on Resistance and Ultimate Deformability of Structures Acted on by Well Defined Loads*, pp. 15–22, 1973.
- [22] Egger, J. and Rojas, F. and Massone, L., “High strength reinforcing steel bars: Low cycle fatigue behavior using photogrammetry,” *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 2021.
- [23] Takeuchi, T. and Matsui, R., “Cumulative Deformation Capacity of Steel Braces under Various Cyclic Loading Histories,” *Journal of Structural Engineering*, vol. 141, no. 7, p. 04014175, 2015.

Anexo A

Código de implementación en C++

Se anexa el código implementado en C++, separado por secciones para mayor facilidad de comprensión:

A.1. Encabezado

En este apartado se declaran todas las variables a utilizar en la implementación del modelo de pandeo como también las funciones que son utilizadas dentro del archivo “.cpp”.

Los modelos utilizados como base tienen funciones predefinidas para obtener como output el esfuerzo, deformación y tangente del material. Se crea una nueva función y un nuevo output que entrega la curvatura desarrollada por la barra en los estados de deformación en análisis.

Código A.1: Encabezado modelo de pandeo

```
#include <UniaxialMaterial.h>

class RSNonIterative : public UniaxialMaterial
{
public:
    RSNonIterative(int tag,
        int numMaterial,
        UniaxialMaterial** theMaterials,
        double L,
        double d,
        double E,
        double Fy
    );

    RSNonIterative();
    ~RSNonIterative();

    const char* getClassType(void) const { return "RSNonIterative"; };

    int setTrialStrain(double strain, double strainRate = 0.0);

    double x_Intersection(double x1, double y1, double x2, double y2, double m1, double m2)
```

```

↪ ;
void initializeDiscretizationParameters(void);
void initializeBuckParameters(void);
void setBuckState(void);
void phi_unload(void);
void phi_reload(void);
void phi_cuadratico(void);

double getStrain(void);
double getStrainRate(void);
double getStress(void);
double getTangent(void);
double getDampTangent(void);
double getInitialTangent(void);
double getPhi(void);

int commitState(void);
int revertToLastCommit(void);
int revertToStart(void);

double getAdic(void);
double getAdicv2(void);
double getstrainFib(int i);

UniaxialMaterial* getCopy(void);

int sendSelf(int commitTag, Channel& theChannel);
int recvSelf(int commitTag, Channel& theChannel,
             FEM_ObjectBroker& theBroker);

void Print(OPS_Stream& s, int flag = 0);

Response* setResponse(const char** argv, int argc,
                     OPS_Stream& theOutputStream);
int getResponse(int responseID, Information& matInformation);

protected:

private:
double trialStrain;
double trialStrainRate;
double sig_old;
double stress;
double stress_aux;
int numMaterials; // the number of UniaxialMaterials in the aggregation
double d_bar;
UniaxialMaterial** theModels; // an array of pointers to the UniaxialMaterials
double Es;
double Fy;

/* Variables modelo Rosas*/

```

```

double eavg_max_trial;//Maxima deformación unitaria promedio.
double eps_previous;// Deformación previamente convergida.
double eps_antep;// Deformación antepenultima convergida
double L_sep; // Separación de estribos
Vector x_b; // Vector de posición de fibra de barra
double m_offset; // Parámetro de calibración de esbeltez Modelo Rosas -> Massonne &
↳ Moroder
double LDmodified; // Relación largo - diametro calibrado
double eps_offset; // Parámetro ajustado para cálculo del offset
double offset; // Offset de barra para calculo de curvatura linealizada
double L_discr; // Largo de barra ajustado
double C_0; // Constante para cálculo de curvatura linealizada
double C_1; // Constante para cálculo de curvatura linealizada
double C_2;// Constante para cálculo de curvatura linealizada

double phi_lin; // Curvatura linealizada
double raiz; // Raiz de solución cuadrática aplicada a la expansión de la solución en S. de
↳ Taylor.

double L_p; // Largo de rótula plástica Modelo Massone & Moroder
double theta_A; // Desangulación debido al pandeo de la barra según curvatura
↳ producida
double v_P; // Deformación transversal de la barra por el pandeo de la barra.
double eps_0; //Deformación unitaria en el eje neutro
double eavg_max_trial_lastCommit;
unsigned int cyc_past;
double eps_antep;// Deformaciones anteriores a la antepenultima convergida (
↳ eps_antep -> eps_antep -> eps_previous -> trialStrain )
double A_triang; // Area triangulo formado por sector circular y radio en discretización
↳ de barra
double A_sectorCirc; // Area de sector circular de discretización de barra
Vector Area_fibra; // Area de cada fibra discretizada
double Area_acum;
double eps_y; // Deformación unitaria de fluencia
double theta;

unsigned int cyc;

Vector Dj; // Vector de deformación unitaria de cada fibra de la barra, asociado a la
↳ posición x_b(i).
Vector Factors_Area; // Factores de cálculo de esfuerzo/tangente/tangente inicial
↳ promedio ponderado.

double eavg_min;
double eavg_minpast;
double phi_eavgmin;
double phi_eavgminpast;
unsigned int cyc_Ini;

double phi_linpast;

```

```

double phi_linnotadjusted;
double phi_linnotadjustedpast;

double a;// Parametro de la Solucion cuadratica de la curvatura  $ax^2 + bc + c = 0 \rightarrow$ 
↳ Para encontrar solucion linealizada con S.de Taylor
double b;// Parametro de la Solucion cuadratica de la curvatura  $ax^2 + bc + c = 0 \rightarrow$ 
↳ Para encontrar solucion linealizada con S.de Taylor
double c;// Parametro de la Solucion cuadratica de la curvatura  $ax^2 + bc + c = 0 \rightarrow$  Para
↳ encontrar solucion linealizada con S.de Taylor

// Parametros curvatura positiva en curva de recarga
double m_reload;
double phi_r_recarga;
double phi_0_recarga;
double eps_r_recarga;
double eps_0_recarga;
double phi_ast_recarga;
double eps_ast_recarga;
double Rrecarga;

// Parametros curvatura positiva en curva de descarga
double phi_r_descarga;
double eps_r_descarga;
double phi_0_descarga;
double eps_0_descarga;
double b_asintota;
double m_unload;
double mh;
double eps_ast_descarga;
double phi_ast_descarga;
double Rdescarga;
double phi_max_cyc;
double eavg_max_cyc;

double phi_antep;
double phi_anteantep;

double phi_max_cyc_notadjusted;
double R_aux;
double eps_aux;

int dec_epsy;

//phicuadratico
double a_cuad;
double b_cuad;
double c_cuad;
double discr_cuad;

```

```

double phi_cuad;
double eps_avg_GA;

double eavg_max_t;
double phi_max;

};

```

A.2. Archivo de implementación del modelo

Habiéndose definido las variables a utilizar en el modelo, el código consta de varias secciones, de las cuales solo se mostrarán algunas, dado que el propósito es entender la implementación del código de pandeo y no la manipulación de manejo de variables internas del código fuente:

- `void* OPS_RSNonIterative(void)`: Asocia el input del usuario en el script tcl con las variables internas del modelo del material.
- `RSNonIterative::RSNonIterative(int tag, int num_fibers, UniaxialMaterial** theMaterialModels ↪ , double L, double d, double E, double fy)`: Inicializa las variables a utilizar dentro del modelo del material.

Se define la discretización de la barra y los parámetros del modelo de pandeo.

- `RSNonIterative::~~RSNonIterative()`: Elimina memoria del programa a no utilizar.
- `int RSNonIterative::setTrialStrain(double strain, double strainRate)`: Define un estado de esfuerzo asociado a una deformación unitaria promedio de prueba. En esta sección se implementa el procedimiento del modelo no iterativo de pandeo.
- `double RSNonIterative::getStrain(void)`, `double RSNonIterative::getStress(void)` y `double RSNonIterative::getTangent(void)`: Procedimientos que entregan, respectivamente, la deformación unitaria promedio, el esfuerzo asociado a esa deformación unitaria y la rigidez tangente asociada a ese estado de $\sigma - \epsilon$.
- `CommitState(void)`, `revertToLastCommit(void)` y `revertToStart(void)`: Procedimientos que tienen como propósito ya sea guardar el estado del material convergido, volver al último estado convergido si es que la deformación de prueba no es satisfactoria y volver al estado inicial del material en caso de ser necesario.

A.2.1. Inicialización de variables

Se inicializan variables de historia, discretización de barra y parámetros asociados al modelo de pandeo.

Código A.2: Inicialización de variables

```
RSNonIterative::RSNonIterative(  
    int tag,  
    int num_fibers,  
    UniaxialMaterial** theMaterialModels,  
    double L,  
    double d,  
    double E,  
    double fy  
)  
:UniaxialMaterial(tag, MAT_TAG_RSBUckRosa),  
trialStrain(0.0), trialStrainRate(0.0), numMaterials(num_fibers),  
theModels(0), Factors_Area(num_fibers), x_b(num_fibers), Dj(numMaterials), d_bar(d),  
    ↪ L_sep(L),  
Area_fibra(num_fibers), Fy(fy), Es(E)  
{  
  
    for (int i = 0; i < numMaterials; i++) {  
        Dj(i) = 0.0; // -> trialStrain de cada fibra  
    }  
  
    this->initializeDiscretizationParameters();  
    this->initializeBuckParameters();  
  
    //Initialize history parameters  
    cyc = 0;  
    eavg_max_trial = 0.00001;  
    eps_previous = 0.0;  
    eps_antep = 0.0;  
    eps_anteantep = 0.0;  
    phi_cuad = 0.0;  
    eavg_min = 0.0;  
    eavg_max_cyc = 0.0;  
    phi_eavgmin = 0.0;  
    phi_max_cyc = 0.0;  
  
    eps_0_recarga = 0.0;  
    eps_r_recarga = 0.0;  
    phi_0_recarga = 0.0;  
    phi_0_recarga = 0.0;  
  
    eps_0_descarga = 0.0;  
    eps_r_descarga = 0.0;  
    phi_0_descarga = 0.0;
```

```

phi_r_descarga = 0.0;

Rrecarga = 2.0;
Rdescarga = 2.0;
R_aux = Rdescarga;
eps_aux = 0.0;

eavg_max_t = 0.00001;
phi_max = 0.0;

dec_epsy = 0;
stress = 0.0;
sig_old = 0.0;
stress_aux = 0.0;

// create an array (theModels) to store copies of the MaterialModels
theModels = new UniaxialMaterial * [numMaterials];

if (theModels == 0) {
    opserr << "FATAL RSNonIterative::RSNonIterative() ";
    opserr << " ran out of memory for array of size: " << numMaterials << "\n";
    exit(-1);
}

// into the newly created array store a pointer to a copy
// of the UniaxialMaterial stored in theMaterialModels
for (int i = 0; i < numMaterials; i++) {
    theModels[i] = theMaterialModels[i]->getCopy();
}
}

```

Se crean procedimientos para ordenar los procesos internos del programa, cuyo fin es inicializar variables de discretización y de los parámetros del modelo no iterativo de pandeo.

- Discretización de barra y factores de área

Se discretiza la barra y se crea vector de tal forma de que el modelo entrega el esfuerzo de promedio de la barra, ponderando el esfuerzo del material de la fibra i -ésima por el porcentaje de área que esa fibra representa.

$$\bar{\sigma} = \sum \frac{A_i \cdot \sigma_i}{A_{\text{total}}} \quad (\text{A.1})$$

Código A.3: Discretización de barra

```

void
RSNonIterative::initializeDiscretizationParameters(void)
{
    double x_0;
    x_0 = -d_bar / 2.0 + d_bar / (2.0 * numMaterials);
}

```



```

double delta_x;
delta_x = d_bar / numMaterials;

double A_total = 2 * asin(1.0) * pow(d_bar, 2.0) / 4.0;
Area_fibra(0) = 0.0;
Area_acum = 0.0;

int indice; // Variable auxiliar
for (int i = 0; i < numMaterials / 2; i++) {
    indice = i + 1;
    A_triangu = sqrt(pow(d_bar / 2.0, 2.0) - pow(d_bar / 2.0 - indice * delta_x, 2.0)) * (
↪ d_bar / 2.0 - indice * delta_x);
    theta = 2 * acos((d_bar / 2.0 - indice * delta_x) / (d_bar / 2.0));
    A_sectorCirc = theta * pow(d_bar, 2.0) / 8.0;
    if (i == 0) {
        Area_fibra(i) = A_sectorCirc - A_triangu;
        Area_acum = Area_fibra(i);
    }
    else
    {
        Area_fibra(i) = A_sectorCirc - A_triangu - Area_acum;
        Area_acum += Area_fibra(i);
    }
    Factors_Area(i) = Area_fibra(i) / A_total;
}

int contador = 1;
for (int i = numMaterials / 2; i < numMaterials; i++) {
    Factors_Area(i) = Factors_Area(i - contador);
    contador += 2;
}
for (int i = 0; i < numMaterials; i++) {
    x_b(i) = x_0 + i * delta_x;
}
}

```

- Definición de parámetros del modelo no iterativo de pandeo.

Procedimiento donde se definen los valores asociados a las constantes de calibración del modelo de pandeo con respecto al iterativo.

Código A.4: Definición de parámetros del modelo no iterativo

```

void
RSNonIterative::initializeBuckParameters(void)
{
    m_offset = 3.5; // Parámetro de calibración de esbeltez modelo no iterativo -> Massone &
↪ Moroder (2008)
    LDmodified = L_sep / d_bar - m_offset; // Esbeltez modificada

    if (LDmodified < 10) {

```

```

    eps_offset = -0.0017 * LDmodified + 0.0275;
}
else {
    eps_offset = 0.01;
}

L_discr = LDmodified * d_bar; // Largo no soportado con respecto a esbeltez modificada

if (LDmodified < 10) {
    C_0 = 6 * pow(10, -5.0) * pow(LDmodified, 2.0) - 0.0012 * LDmodified + 0.0026;
}
else {
    C_0 = 6 * pow(10, -7.0) * pow(LDmodified, 2.0) + 0.00003 * LDmodified - 0.0037;
}

C_1 = 1.19121 * pow(LDmodified, -0.211);
C_2 = 0.0003 * pow(LDmodified, 2.0) - 0.0189 * LDmodified + 0.4603;
}

```

A.2.2. Modelo no iterativo

El estado del material se define en el procedimiento `setTrialStrain()`, distinguiendo entre comportamiento sin pandeo, que se cumple hasta la máxima tracción en el primer ciclo, si es que el historial de deformaciones inicia en tracción.

Código A.5: Implementación `setTrialStrain()`

```

int
RSNonIterative::setTrialStrain(double strain, double strainRate)
{
    // set the trialStrain and the trialStrain in each of the
    // local MaterialModel objects
    trialStrain = strain; //
    trialStrainRate = strainRate;

    if (dec_epsy == 0 && fabs(trialStrain) > Fy / Es) {
        dec_epsy = 1;
    }

    if (trialStrain == 0 && cyc_past == 0)
    {
        cyc = 0;
    }
    else if (trialStrain > 0 && cyc_past == 0)
    {
        cyc_Ini = 1; // 1 -> Traccion
        if (eps_previous >= eavg_max_trial && eps_previous >= eps_antep &&
            ↪ eps_previous > trialStrain)

```

```

    {
        eavg_max_trial = eps_previous;
        cyc = 2;
    }
}
else if (trialStrain < 0 && cyc_past == 0)
{
    cyc = 1;
    cyc_Ini = 0; // 0 -> Compresion
    if (eps_previous <= eps_antep && eps_previous < trialStrain)
    {
        cyc = 3;
    }
}
else if (trialStrain < 0 && cyc_past == 1)
{
    if (eps_previous <= eps_antep && eps_previous < trialStrain)
    {
        cyc = 3;
    }
}
else
{
    if (eps_previous >= eavg_max_trial && eps_previous >= eps_antep &&
    ↪ eps_previous > trialStrain && trialStrain > 0)
    {
        eavg_max_trial = eps_previous;
        cyc = cyc_past + 2;
    }
    else if (eps_previous <= eps_antep && eps_previous < trialStrain)
    {
        cyc = cyc_past + 2;
    }
}

if (dec_epsy == 0) {
    cyc = 0;
}

if (cyc == 1)
{
    offset = 0.0;
}
else if (cyc == 3)
{
    offset = 0.0;
}
else
{
    offset = eavg_max_trial - eps_offset;
}

```

```

if (cyc == 0 || dec_epsy == 0) {
    phi_lin = 0.0;
    phi_linnotadjusted = 0.0;
    theta_A = 0.0;
    eps_0 = trialStrain;
    for (int i = 0; i < numMaterials; i++) {
        Dj(i) = eps_0;
    }

    for (int i = 0; i < numMaterials; i++) {
        theModels[i]->setTrialStrain(Dj(i), strainRate);
    }
}
else
{
    this->setBuckState();
}

stress_aux = 0.0;

for (int i = 0; i < numMaterials; i++) {
    stress_aux += Factors_Area(i) * theModels[i]->getStress();
}

stress = stress_aux;

return 0;
}

```

Donde los procedimientos auxiliares se describen aparte, para mayor legibilidad del código fuente del modelo.

- `setBuckState()`:

Código A.6: Procedimiento del modelo de pandeo

```
void
RSNonIterative::setBuckState(void)
{
    // Find linearized curvature.
    if (trialStrain != eps_previous)
    {
        eps_aux = 0.0;

        a = 2 * C_2 * L_discr - L_discr + 2 * d_bar;
        b = -2 * C_1 * L_discr + L_discr;
        c = -2 * (eps_aux - offset) * L_discr + 2 * C_0 * L_discr;
        raiz = sqrt(pow(b, 2.0) - 4 * a * c);

        phi_lin = (b + raiz) / (2 * d_bar * a) + 2 * L_discr * trialStrain / (d_bar * raiz) - 2
        ↪ * L_discr * (eps_aux) / (d_bar * raiz);

        phi_linnotadjusted = phi_lin;

        this->phi_cuadratico();

        if (cyc == 1 && trialStrain >= -Fy / Es) {
            phi_lin = 0.0;
        }

        if (cyc == 1 && phi_lin > 0) {
            phi_lin = 0.0;
        }

        if (trialStrain < eps_previous)
        {
            this->phi_unload(); // Evitar curvaturas positivas en curva de descarga
        }
        if (trialStrain > eps_previous)
        {
            this->phi_reload(); // Evitar curvaturas positivas en curva de recarga
        }
    }
    else
    {
        phi_lin = phi_linpast;
    }

    // Configuración geométrica de la barra
}
```

```

theta_A = -phi_lin * d_bar;
v_P = -(L_sep - 2 * d_bar) * (1 - cos(theta_A)) / 4.0;
eps_0 = trialStrain - v_P / (L_sep / 4.0);
for (int i = 0; i < numMaterials; i++) {
    Dj(i) = eps_0 + phi_lin * x_b(i);
}
for (int i = 0; i < numMaterials; i++) {
    theModels[i]->setTrialStrain(Dj(i), trialStrainRate);
}
}

```

- `void phi_unload()` & `void phi_reload()`

Código A.7: Procedimientos de ajuste asintótico de curvatura en curva de descarga y recarga

```

void
RSNonIterative::phi_reload()
{
    if (eavg_max_trial == 0.00001 || cyc == 5) {
        if (eps_previous < trialStrain && eps_previous <= eps_antep)
        {
            eavg_min = eps_previous;
            phi_eavgmin = phi_linpast;

            m_reload = 2 * L_discr / (d_bar * raiz);
            eps_r_recarga = eavg_min;
            phi_r_recarga = phi_eavgmin;
            mh = pow(10.0, -10.0);
            phi_0_recarga = 0.0;
            eps_0_recarga = eps_aux - (raiz * (b + raiz)) / (4 * L_discr * a);
        }

        if (cyc_Ini == 0) {//Inicia en compresión
            if (trialStrain > eps_previous) {
                eps_ast_recarga = (trialStrain - eps_r_recarga) / (eps_0_recarga -
↪ eps_r_recarga);
                phi_ast_recarga = eps_ast_recarga / (pow(1 + pow(eps_ast_recarga, Rrecarga
↪ ), 1 / Rrecarga));
                if (eps_ast_recarga == 0.0) {
                    phi_lin = phi_linpast;
                }
                else
                {
                    phi_lin = phi_ast_recarga * (phi_0_recarga - phi_r_recarga) +
↪ phi_r_recarga;
                }
            }
        }
    }
}

```

```

else if (cyc_Ini == 1)
{
    if (trialStrain >= eps_previous && cyc != 2) {
        eps_ast_recarga = (trialStrain - eps_r_recarga) / (eps_0_recarga -
↪ eps_r_recarga);
        phi_ast_recarga = eps_ast_recarga / (pow(1 + pow(eps_ast_recarga, Rrecarga)
↪ ), 1 / Rrecarga));
        if (eps_ast_recarga == 0.0) {
            phi_lin = phi_linpast;
        }
        else
        {
            phi_lin = phi_ast_recarga * (phi_0_recarga - phi_r_recarga) +
↪ phi_r_recarga;
        }
    }
}
else
{
    mh = pow(10.0, -10.0);
    m_reload = 2 * L_discr / (d_bar * raiz);
    b_asintota = m_reload / mh;
    eps_r_recarga = eavg_max_t;
    phi_r_recarga = phi_max;
    eps_0_recarga = x_Intersection(eavg_max_t, phi_max, trialStrain,
↪ phi_linnotadjusted, mh, m_reload); // Interseccion curva m_unload con mh
    phi_0_recarga = mh * (eps_0_descarga - eps_r_descarga) + phi_r_descarga;
    if (cyc_Ini == 0) { //Inicia en compresión
        if (trialStrain > eps_previous) {
            eps_ast_recarga = (trialStrain - eps_r_recarga) / (eps_0_recarga -
↪ eps_r_recarga);
            phi_ast_recarga = b_asintota * eps_ast_recarga + (1 - b_asintota) *
↪ eps_ast_recarga / (pow(1 + pow(eps_ast_recarga, Rrecarga), 1 / Rrecarga));
            if (eps_ast_recarga == 0.0) {
                phi_lin = phi_linpast;
            }
            else
            {
                phi_lin = phi_ast_recarga * (phi_0_recarga - phi_r_recarga) +
↪ phi_r_recarga;
            }
        }
    }
}
else if (cyc_Ini == 1)
{
    if (trialStrain >= eps_previous && cyc != 2) {
        eps_ast_recarga = (trialStrain - eps_r_recarga) / (eps_0_recarga -
↪ eps_r_recarga);
        phi_ast_recarga = b_asintota * eps_ast_recarga + (1 - b_asintota) *
↪ eps_ast_recarga / (pow(1 + pow(eps_ast_recarga, Rrecarga), 1 / Rrecarga));
        if (eps_ast_recarga == 0.0) {

```

```

        phi_lin = phi_linpast;
    }
    else
    {
        phi_lin = phi_ast_recarga * (phi_0_recarga - phi_r_recarga) +
↪ phi_r_recarga;
    }
}

if (trialStrain >= eps_r_recarga) {
    phi_lin = mh * (trialStrain - eps_r_recarga) + phi_r_recarga;
}
}

void
RSNonIterative::phi_unload()
{
    if (trialStrain < eps_previous && eps_previous >= eps_antep) {

        if (eps_previous >= eavg_max_trial) {
            eavg_max_t = eavg_max_trial;
            phi_max = phi_linpast;
        }

        mh = pow(10.0, -10.0);
        m_unload = 2 * L_discr / (d_bar * raiz);

        eps_r_descarga = eavg_max_t;
        phi_r_descarga = phi_max;
        eps_0_descarga = x_Intersection(eps_r_descarga, phi_max, trialStrain,
↪ phi_linnotadjusted, mh, m_unload); // Interseccion curva m_unload con mh
        b_asintota = m_unload / mh;
        phi_0_descarga = mh * (eps_0_descarga - eps_r_descarga) + phi_r_descarga;
    }

    if (trialStrain < eps_previous && cyc != 1 && cyc != 3) {
        eps_ast_descarga = (trialStrain - eps_r_descarga) / (eps_0_descarga -
↪ eps_r_descarga);
        if (cyc_Ini == 1 && cyc == 2) {
            phi_ast_descarga = b_asintota * eps_ast_descarga + (1 - b_asintota) *
↪ eps_ast_descarga / pow(1 + pow(eps_ast_descarga, Rdescarga), 1 / Rdescarga);
        }
        else
        {
            phi_ast_descarga = b_asintota * eps_ast_descarga + (1 - b_asintota) *
↪ eps_ast_descarga / pow(1 + pow(eps_ast_descarga, Rdescarga), 1 / Rdescarga);
        }
    }
}

```



```

    if (eps_ast_descarga == 0) {
        phi_lin = phi_linpast;
    }
    else
    {
        phi_lin = phi_ast_descarga * (phi_0_descarga - phi_r_descarga) +
↪ phi_r_descarga;
    }
}
}

```

- Obtención de esfuerzos, `getStress()`:

Código A.8: Obtención de esfuerzo promedio

```

double
RSNonIterative::getStress(void)
{
    return stress;
}

```

Anexo B

Script de verificación de modelo implementado

Se requiere verificar la correcta implementación del modelo, para lo cual se define un script en tcl donde se describe una barra con sus extremos con condiciones de apoyos tal como se describe en la figura B.1, modelado como un elemento tipo biela, con el material implementado en OpenSees.

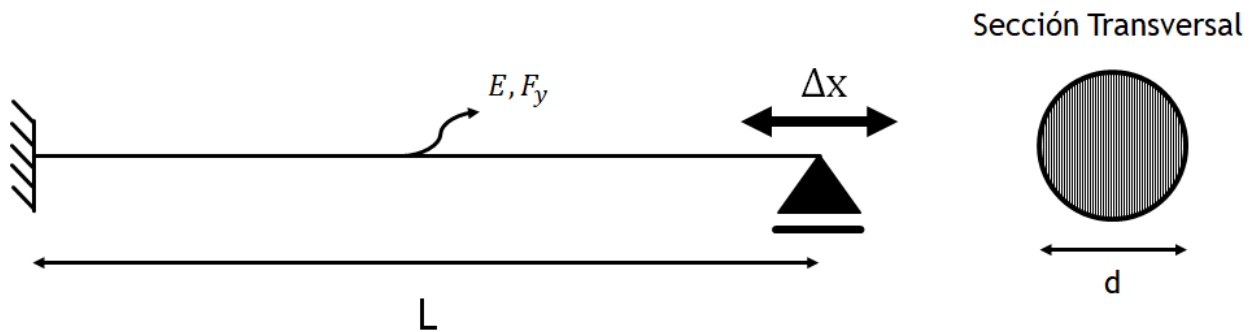


Figura B.1: Esquema de barra a modelar en OpenSees

Se analiza la barra mediante un integrador por desplazamiento en el nodo deslizante con desplazamientos incrementales positivos y negativos que definirán el comportamiento histerético de la barra, con un test de balance de fuerzas: “NormUnbalance” con una tolerancia de 10^{-12} unidades de fuerza y con bajas iteraciones.

Código B.1: Script de verificación de modelo no iterativo

```
wipe;
model BasicBuilder -ndm 2 -ndf 3;

#Unidades
set mm 1.0;
set N 1.0;
set MPa [expr $N/pow($mm,2.0)];
set m [expr 1000.0*$mm];
```

```

#Parámetros barra

#Propiedades mecanicas
set E [expr 203878.560 *$MPa];
set Fy [expr 550.000 *$MPa];
set Es2 [expr 3900.000 *$MPa];
set b [expr $Es2/$E];
set R0 18.0;
set cR1 0.925;
set cR2 0.15;
set fu [expr 714.90*$MPa];
set ey [expr $Fy/$E];

#Propiedades geométricas
set d [expr 12.00 *$mm];
set pi [expr 2.0*asin(1.0)];
set As [expr $pi*pow($d,2.0)/4.0];

set lsr [expr 15];
set L [expr $lsr*$d];

#Parametros modelo
set num_fiber 20;

#IDs
#Materiales
set Steel05ID 1;
set RSNNonIterativeID 2;
set TrussID 1;

set node1 1;
set node2 2;

node $node1 0.0 0.0;
node $node2 $L 0.0;

fix 1 1 1 1;
fix 2 0 1 1;

#Elementos
uniaxialMaterial Steel05 $Steel05ID $Fy $E $b $R0 $cR1 $cR2;
uniaxialMaterial RSNNonIterative $RSNNonIterativeID $Steel05ID $num_fiber $L $d $E $Fy;
puts "Material creado"

#element truss $eleTag $inode $jnode $A $matTag
element truss $TrussID $node1 $node2 $As $RSNNonIterativeID;
puts "Elemento creado"

pattern Plain 1 "Linear" {
  load 2 1.0 0.0 0.0;

```

```

}

recorder Element -file Stress.out -time -ele $TrussID material stress;
recorder Element -file Strain.out -time -ele $TrussID material strain;
recorder Element -file component.out -time -ele $TrussID material strains;
recorder Element -file phi.out -time -ele $TrussID material phi;#Recorder creado en
↳ implementacion
recorder Element -file adic.out -time -ele $TrussID material adic;#Recorder para controlar
↳ variables en implementacion

foreach du { 0.00000 0.03600 0.03600 0.03600 0.03600 0.03600 0.03600 0.03600 0.03600 0
↳ .03600 0.03600 0.03600 0.03600 ...-0.03600 -0.00360... } {
constraints Transformation
numberer Plain;
system BandGeneral
test NormUnbalance 1e-12 10;
set algorith Linear;
algorithm $algorith;
integrator DisplacementControl 2 1 [expr $du]
analysis Static

analyze 1
}
puts Hecho!

```

Anexo C

Calibración de R en curva de recarga y descarga

Para la solución del desarrollo de curvaturas se adoptó la solución asintótica de Menegotto - Pinto, tal como se explicó en la sección correspondiente. Esta metodología se basa en dos puntos en los cuales se desarrolla esta transición de la curvatura entre dos asintotas y un parámetro que representa la suavidad de ésta transición: R .

En la figura se puede observar en el desarrollo del modelo de Menegotto - Pinto que a medida que R aumenta, la transición es más brusca, y por el contrario si el parámetro R se disminuye en exceso, la transición al suavizarse demasiado, no alcanza los valores estimados de las rectas asintóticas definidas en un rango de deformaciones acotadas.

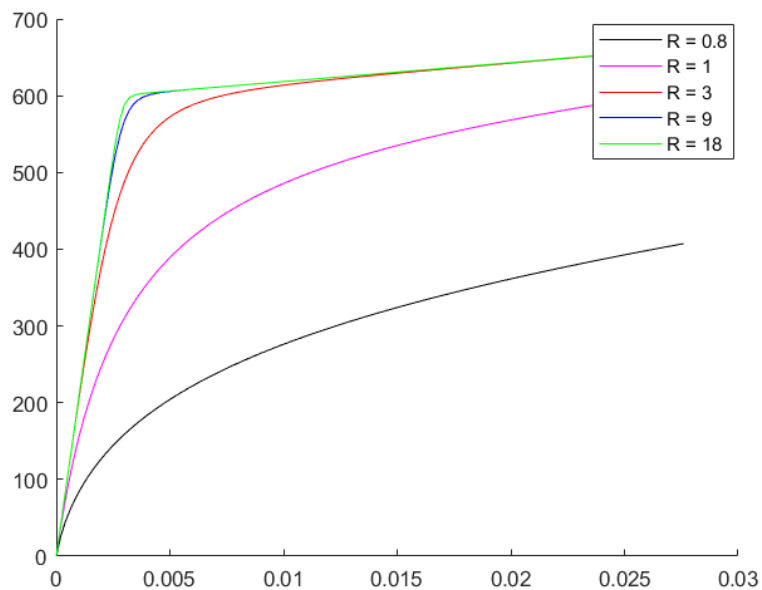


Figura C.1: Efecto de variación del parámetro de curvatura de transición en Menegotto - Pinto

De esta manera es de esperar que el desarrollo de las curvaturas sea más rápido si se aumenta el parámetro R , ya sea en la curva de descarga o en la curva de recarga.

Los valores de R para los cuales el modelo presenta mejores resultados son descritos en la tabla (C.1)

Tabla C.1: Parametros de transición en curva de recarga y descarga

	Recarga	Descarga
R	2.0	2.0

La figura (C.2) muestra el comportamiento en una barra 300E con una esbeltez igual a 12, para diferentes parámetros de transición, donde por simplicidad se hace uso del mismo parámetro de transición tanto para recarga como para la descarga:

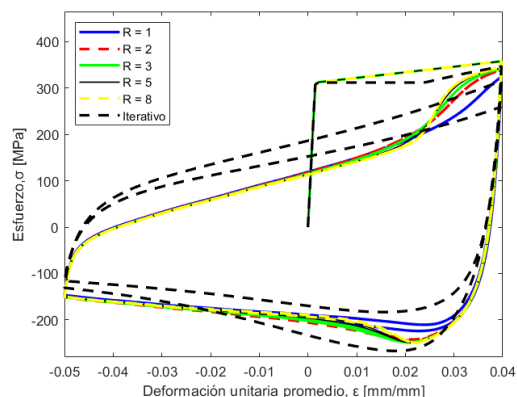


Figura C.2: Comparación de variación de parámetro de transición de curvatura.

Se observa que no existe mucha diferencia entre los parámetros de transición analizados, de hecho, de haber continuado las deformaciones a tracciones mayores, entonces la transición que se observa para parámetros de transición de 2 a 8, se desplaza, mas no desaparece, tal como se observa en la figura C.3 .

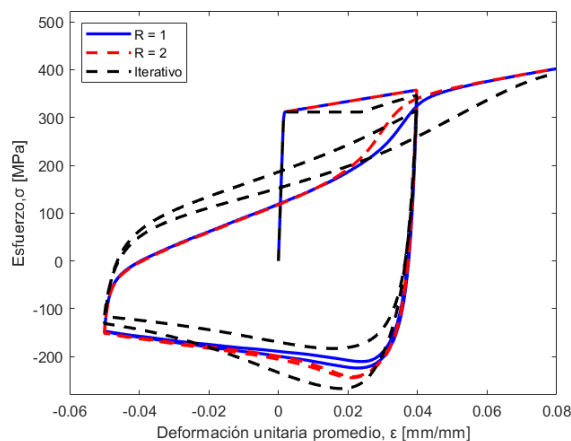


Figura C.3: Desplazamiento de curva de transición en curva de recarga

Anexo D

Transgresión de equilibrio de momento

En esta sección se muestra el desarrollo de momento producido por el pandeo y por el desarrollo de esfuerzos en cada fibra de acuerdo a la distancia al centroide de la barra para ensayos cíclicos:

- Tripathi: Barra 500E

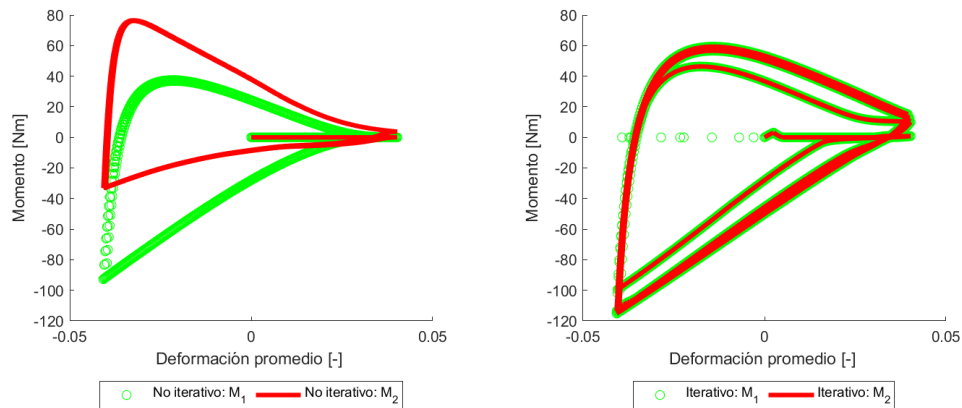


Figura D.1: Comparación de equilibrio de momento, Modelo iterativo y no iterativo, $L/D = 6$, $\epsilon_{\max} = 0.04$ - $\epsilon_{\min} = -0.04$, Barra 500E

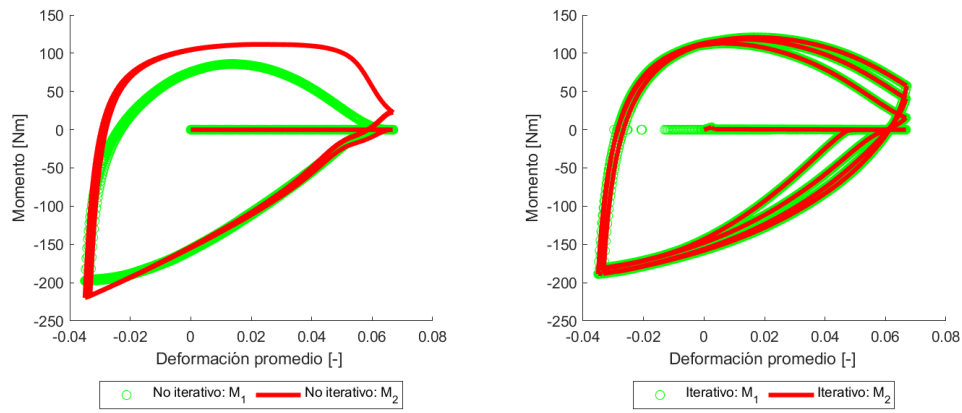


Figura D.2: Comparación de equilibrio de momento, Modelo iterativo y no iterativo, $L/D = 12$, $\epsilon_{\max} = 0.06 - \epsilon_{\min} = -0.03$, Barra 500E

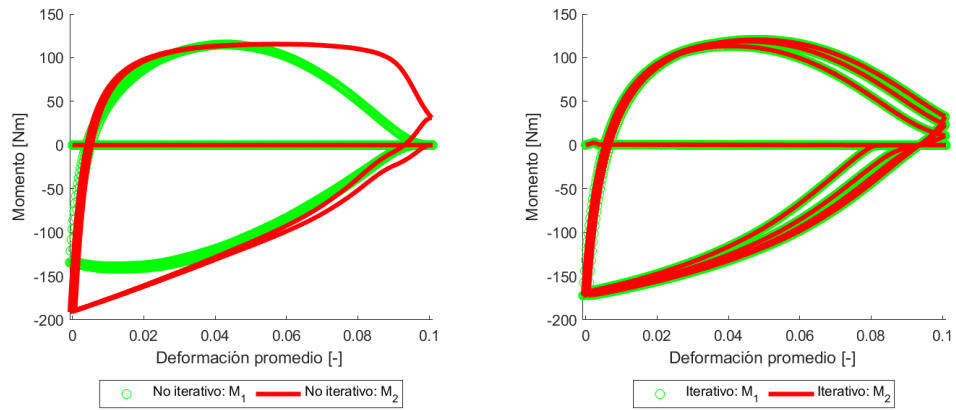


Figura D.3: Comparación de equilibrio de momento, Modelo iterativo y no iterativo, $L/D = 12$, $\epsilon_{\max} = 0.1 - \epsilon_{\min} = 0$, Barra 500E

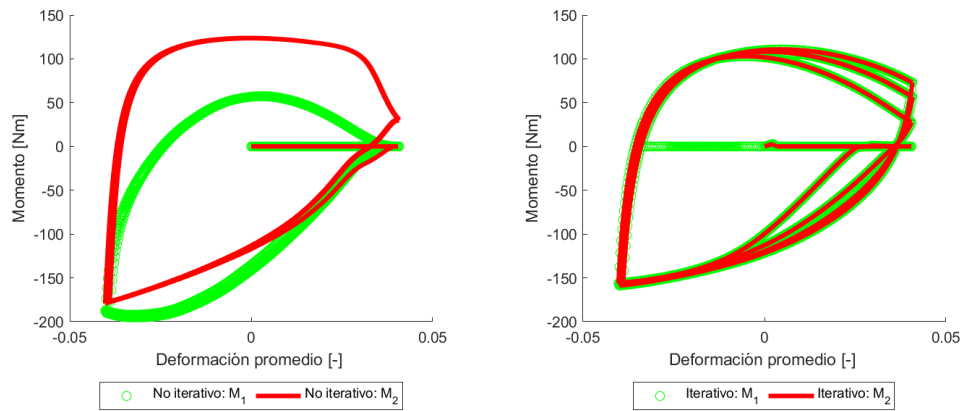


Figura D.4: Comparación de equilibrio de momento, Modelo iterativo y no iterativo, $L/D = 15$, $\epsilon_{\max} = 0.04 - \epsilon_{\min} = -0.04$, Barra 500E

Los casos analizados en las figuras D.1, D.2, D.3 y D.4 muestra las mismas tendencias analizadas en las barras con menor tensión de fluencia.

- Ensayos de Egger para la barra ASTM A706 Gr. 80.

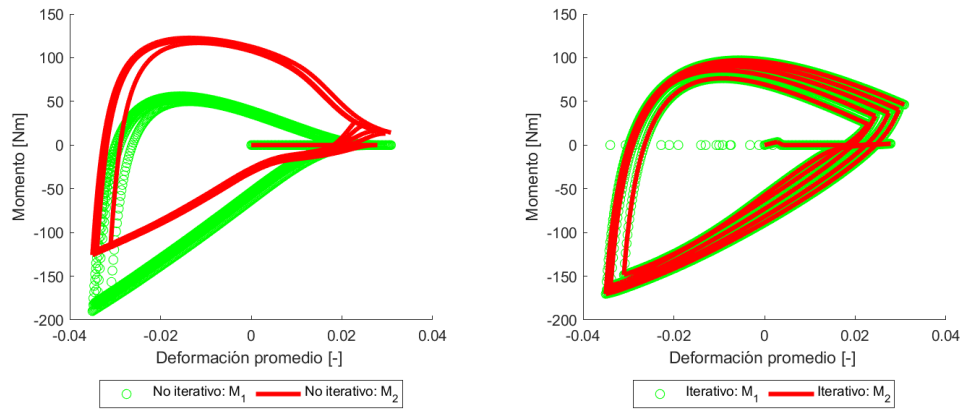


Figura D.5: Comparación de equilibrio de momento, Modelo iterativo y no iterativo, $L/D = 10$, $\epsilon_a = 0.031$

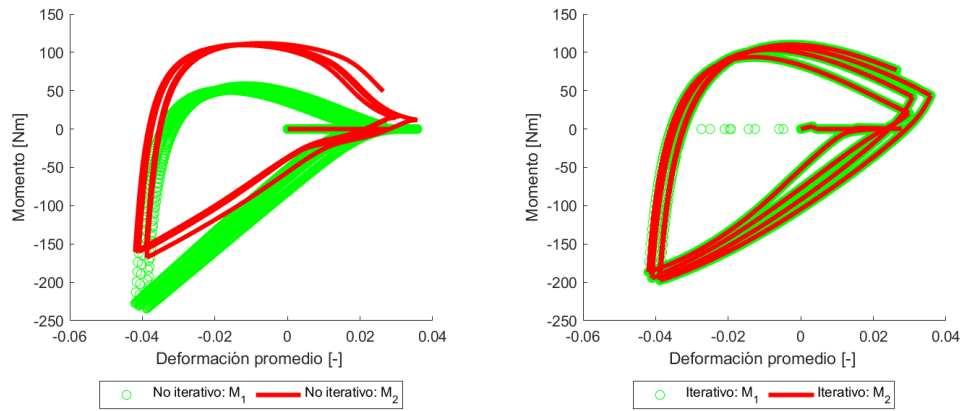


Figura D.6: Comparación de equilibrio de momento, Modelo iterativo y no iterativo, $L/D = 10$, $\epsilon_a = 0.045$

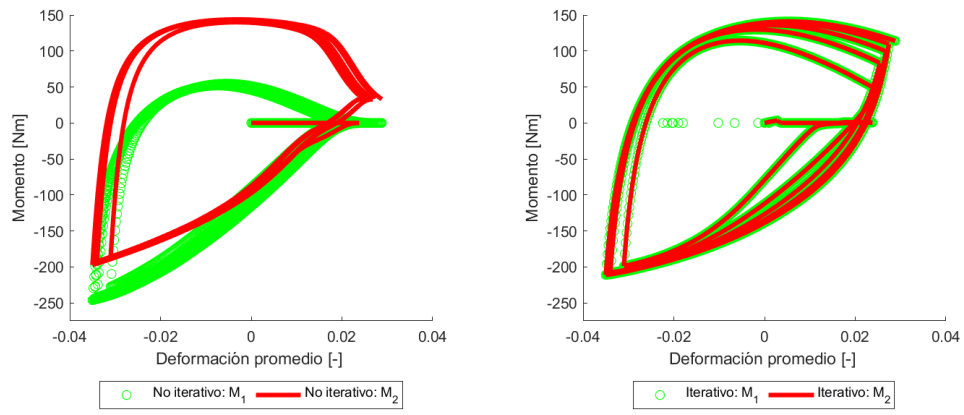


Figura D.7: Comparación de equilibrio de momento, Modelo iterativo y no iterativo, $L/D = 15$, $\epsilon_a = 0.031$

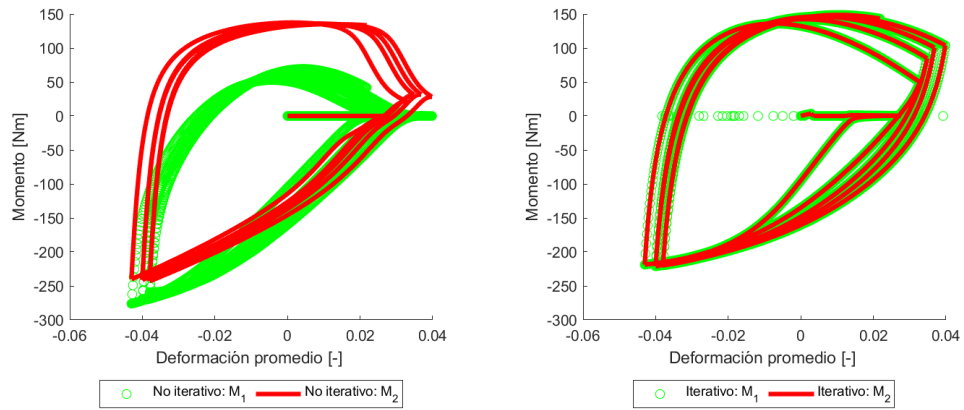


Figura D.8: Comparación de equilibrio de momento, Modelo iterativo y no iterativo, $L/D = 15$, $\epsilon_a = 0.045$