



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**MODELACIÓN NUMÉRICA DE VIGAS SOMETIDAS A CARGAS PSEUDO-
ESTÁTICAS Y DINÁMICAS UTILIZANDO EL PROGRAMA SEISMOSTRUC**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
título de Ingeniera e Ingeniero Civil

AUTORES: Estefany Yomaira Arias Romo
Carlos Julio Vivanco Obando

TUTOR: José Domingo Alviar Malabet

Quito - Ecuador
2022

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Estefany Yomaira Arias Romo con documento de identificación N°0401644562 y Carlos Julio Vivanco Obando con documento de identificación N°1725053308; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 25 de marzo del 2022

Atentamente,



Estefany Yomaira Arias Romo
0401644562



Carlos Julio Vivanco Obando
1725053308

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, Estefany Yomaira Arias Romo con documento de identificación N°0401644562 y Carlos Julio Vivanco Obando con documento de identificación N°1725053308; expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Artículo Académico: “Modelación numérica de Vigas sometidas a Cargas Pseudo-Estáticas y Dinámicas utilizando el Programa Seismostruct”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingenieros Civiles, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 25 de marzo del 2022

Atentamente,



Estefany Yomaira Arias Romo
0401644562



Carlos Julio Vivanco Obando
1725053308

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, José Domingo Alviar Malabet con documento de identificación N°1757837602, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **MODELACIÓN NUMÉRICA DE VIGAS SOMETIDAS A CARGAS PSEUDO-ESTÁTICAS Y DINÁMICAS UTILIZANDO EL PROGRAMA SEISMOSTRUC**, realizado por Estefany Yomaira Arias Romo con documento de identificación N°0401644562 y por Carlos Julio Vivanco Obando con documento de identificación N°1725053308, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción de Artículo Académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 25 de marzo del 2022

Atentamente,



Ing. José Domingo Alviar Malabet, PhD

1757837602

MODELACIÓN NUMÉRICA DE VIGAS SOMETIDAS A CARGAS PSEUDO-ESTÁTICAS Y DINÁMICAS UTILIZANDO EL PROGRAMA SEISMOSTRUCT

NUMERICAL MODELING OF BEAMS SUBJECTED TO PSEUDO-STATIC AND DYNAMIC LOADS USING THE SEISMOSTRUCT PROGRAM

Estefany Arias-Romo¹, Carlos Vivanco-Obando², José Alviar-Malabet³.

Resumen

En el presente trabajo se realizó una búsqueda en bibliografía existente de vigas de hormigón armado sometidas a cargas pseudo-estáticas y dinámicas. Mediante un proceso de selección se optó por escoger las pruebas de carga que tienen la mayor cantidad de datos y parámetros que satisfagan los modelos del programa SeismoStruct, se seleccionó tres pruebas de carga pseudo-estáticas y tres pruebas de cargas dinámicas. Ya teniendo los datos que alimentan al software SeismoStruct, se procedió al modelado tanto las pruebas de carga pseudo-estáticas como dinámicas, utilizando modelos constitutivos de hormigón (Mander - con_ma, Chang-Mander - con_cm, Kappos y Konstantinidis - con_hs) y modelos constitutivos de acero (Menegotto-Pinto - stl_mp, Ramberg-Osgood - stl_ro, Dodd-Restrepo - stl_dr), se obtuvieron veinte y siete modelados de vigas sometidas a cargas pseudo-estáticas y veinte y siete modelados de vigas sometidas a cargas dinámicas, y, los resultados de estos modelos (lazo de histéresis) se compararon con la bibliografía existente encontrada, a fin de determinar cuál es el mejor

Abstract

In the present paper, a search was carried out in the existing bibliography of reinforced concrete beams subjected to pseudo-static and dynamic loads, through a selection process it was decided to choose the load tests that have the greatest amount of data and parameters that satisfy the models of the SeismoStruct program, three pseudo-static load tests and three dynamic load tests were selected. Once we had the data to feed the SeismoStruct software, we proceeded to model both the pseudo-static and dynamic load tests, using concrete constitutive models (Mander - con_ma, Chang-Mander - con_cm, Kappos and Konstantinidis - con_hs) and constitutive models (Menegotto-Pinto - stl_mp, Ramberg-Osgood - stl_ro, Dodd-Restrepo - stl_dr), twenty-seven models of beams subjected to pseudo-static loads and twenty-seven models of beams subjected to dynamic loads were obtained, and, The results of these models (hysteresis loop) were compared with the existing bibliography found, in order to determine which is the best model that fits the behavior of reinforced concrete beams.

¹ Departamento de Ingeniería Civil-Universidad Politécnica Salesiana- Quito, Ecuador
Autor para correspondencia: eariasr@est.ups.edu.ec

² Departamento de Ingeniería Civil-Universidad Politécnica Salesiana- Quito, Ecuador
Autor para correspondencia: cvivanco@est.ups.edu.ec

³ Departamento de Ingeniería Civil-Universidad Politécnica Salesiana- Quito, Ecuador

modelo que se ajusta al comportamiento de vigas de hormigón armado.

Palabras Clave: dinámicos, pseudo estáticos, modelos constitutivos, Seismostruct.

Keywords: dynamic, pseudo static, constitutive models, Seismostruct.

1. Introducción

En la actualidad, se están estudiando varios modelos para determinar el desempeño de la estructura y evaluar la fragilidad, a fin de diseñar una estructura duradera, económica y segura. Para reproducir la respuesta estructural y el daño relacionado con la estructura, se toma en cuenta y es necesario modelar con precisión la deformación inelástica que ocurre en la rótula plástica.

La viga es un elemento importante en la estructura y puede estar hecha de varios materiales, uno de los cuales es el hormigón armado. Estas piezas están sujetas a esfuerzos de flexión, por lo tanto, los materiales que las componen deben soportar esfuerzos de tracción como de compresión.

El análisis y diseño de estos elementos es una parte compleja de la ingeniería estructural, los cálculos realizados deben ser datos fiables, y es necesario conocer el comportamiento de las vigas de hormigón armado en los estados de plastificación y de rotura, para poder definir el comportamiento de las rótulas plásticas generadas durante el análisis estructural.

El programa SeismoStruct [1] es uno de los programas que se utiliza en análisis estructural, ya que es un paquete de Elementos Finitos, capaz de predecir el comportamiento de grandes desplazamientos en marcos espaciales bajo cargas estáticas o dinámicas, tomando en cuenta no linealidades geométricas e inelasticidad en materiales [2].

Considerando que las expresiones empíricas de los modelos están calibradas a través de pruebas experimentales, y desde el punto de vista computacional, a medida que aumenta el nivel de detalle, aumenta también el desarrollo de programas computacionales. El presente trabajo tiene la finalidad de modelar diferentes vigas de hormigón armado con el programa SeismoStruct, [1] y requieren la evaluación de múltiples parámetros como: geometría, configuración de armaduras y propiedades mecánicas del material.

Teniendo en cuenta lo antes mencionado, se pondrá en comparación datos de vigas de

hormigón armado existentes en la literatura bajo cargas estáticas y dinámicas, con modelos de análisis que posee el programa SeismoStruct, [1] para obtener el modelo que mejor se ajusta al comportamiento de vigas de hormigón armado mediante el lazo de histéresis.

2. Materiales y Métodos

El proyecto se basa en dos etapas, el primero el sustento teórico, donde se busca bibliografía existente y se da a conocer los parámetros que intervienen en los modelos del programa SeismoStruct; [1], la segunda parte es la analítica, donde en base a los parámetros encontrados se realiza el modelado de vigas de hormigón armado y su posterior comparación.

2.1. Vigas isostáticas

Se considera que una viga es estáticamente determinada o isostática cuando se pueden determinar las reacciones mediante la aplicación de las ecuaciones de equilibrio; esto implica que el número de reacciones en la viga sea igual a tres. Esta condición es necesaria, pero no suficiente para que la viga este completamente inmovilizada; por ello antes de resolver una viga isostática se debe analizar la estabilidad [3].

2.1.1 Vigas simplemente apoyadas

$$\# \text{ reacciones} = 3 (R_1, R_2, R_3)$$

$$\# \text{ ecuaciones} = 3 (\Sigma F_x, \Sigma F_y, \Sigma M_A)$$

$$G.I. = 0$$

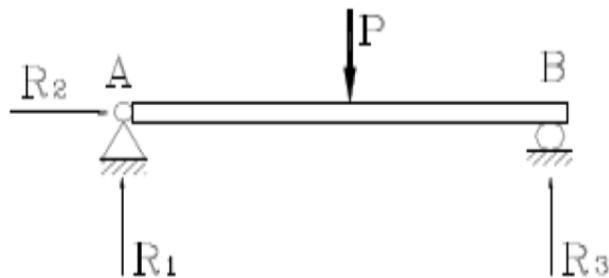


Figura 1: Viga simplemente apoyada de un tramo.[3]

2.1.2 Vigas en cantilever o voladizo.

reacciones = 3 (R_1, R_2, M_1)
 # ecuaciones = 3 ($\Sigma F_x, \Sigma F_y, \Sigma M_A$)
 G.I. = 0

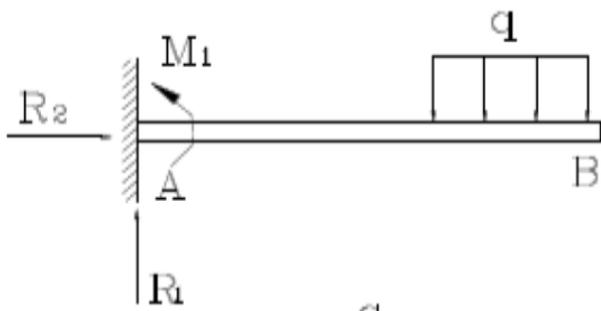


Figura 2: Viga en cantilever, voladizo o ménsula.[3]

2.2. Programa SeismoStruct

Mediante el software SeismoStruct [1] y para el análisis de vigas sometidas a carga pseudo-estáticas se optó por el Análisis Pushover Estático, este análisis permite introducir carga o desplazamiento definido inicialmente por el usuario. A su vez, también se introduce un factor de carga o desplazamiento que es incrementado automáticamente por el programa hasta alcanzar un límite definido por el usuario o una inestabilidad numérica.

Para el análisis de vigas sometidas a cargas dinámicas se utilizó el Análisis Time-History Estático, para este análisis se puede aplicar desplazamientos, cargas o combinación de ambos; pueden variar independientemente en el dominio de pseudo-tiempo, de acuerdo con una distribución de carga preestablecida. Este tipo de análisis se utiliza habitualmente para modelar pruebas dinámicas sobre estructuras sometidas a varias distribuciones de carga o desplazamiento (por ejemplo, cargas cíclicas).

Los modelos constitutivos utilizados en el modelado de vigas sometidas a cargas pseudo-estáticas y dinámicas se los presenta a continuación:

2.2.1 Modelos constitutivos de hormigón

1) Modelo no lineal de Mander - con_ma: Se trata de un modelo uniaxial no lineal de confinamiento constante. Los efectos del

confinamiento provisto por la armadura transversal son incorporados mediante las leyes propuestas por Mander, en las cuales se asume una presión de confinamiento constante a lo largo de todo el rango de esfuerzos-deformaciones [2].

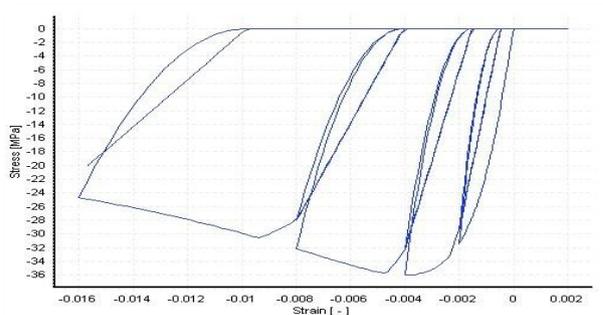


Figura 3: Modelo no lineal de Mander para hormigón. [2]

2) Modelo no lineal de Chang-Mander - con_cm: Este modelo pone énfasis particular en la transición de esfuerzo-deformación cuando ocurre la apertura y cierre de grietas, contrario a otros modelos similares que asumen un cierre de grietas con un cambio rápido en el módulo de elasticidad de la sección. El concreto en tensión se modela con un comportamiento cíclico similar al de compresión, y las envolventes de compresión y tensión tiene control en la pendiente del comportamiento esfuerzo deformación en el origen, y en la forma las ramas ascendentes y descendentes del comportamiento de esfuerzo deformación [2].

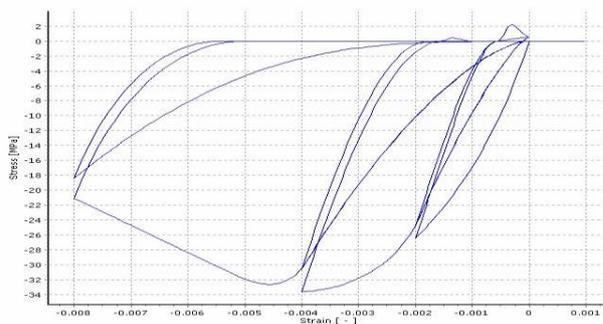


Figura 4: Modelo no lineal de concreto de Chang-Mander. [2]

3) Modelo no lineal de Kappos y Konstantinidis - con_hs: Se trata de un modelo uniaxial no lineal de confinamiento constante para hormigón de

alta resistencia, y ha sido calibrado estadísticamente con un amplio rango de datos experimentales.

Los efectos del confinamiento provisto por la armadura transversal son incorporados mediante el coeficiente de eficacia del confinamiento, asumiendo que una presión de confinamiento constante es aplicada a lo largo de todo el rango de esfuerzos-deformaciones [2].

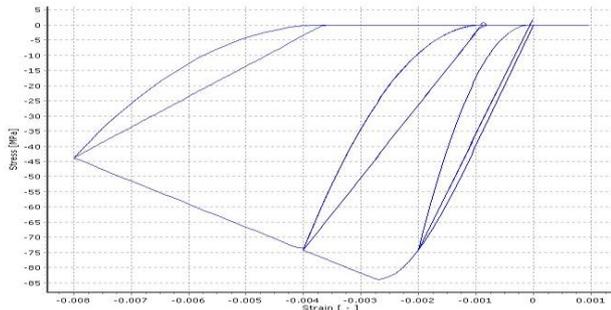


Figura 5: Modelo No Lineal de Kappos and Konstantinidis para hormigón de alta resistencia.[2]

Se presenta los parámetros que alimentan a los modelos constitutivos de hormigón:

Tabla 1: Glosario de parámetros que alimentan a los modelos constitutivos de hormigón

Símbolo	Descripción
f_c	Resistencia a compresión (MPa)
f_t	Resistencia a tracción (Mpa)
ϵ_c	Deformación al valor máximo pico de esfuerzo (mm/mm)
k_c	Factor de confinamiento
γ	Peso específico (N/m ³)
E_c	Módulo de elasticidad (MPa)
ϵ_t	Deformación pico de tracción
r	Deformación adimensional crítica compresiva
D_{cc}	Deformación crítica a compresión adimensional
D_{ct}	Deformación crítica a tracción adimensional

2.2.2 Modelos constitutivos de acero

1) Modelo de Ramberg-Osgood – stl_{ro} : Este modelo utiliza una ecuación de tres parámetros para expresar la relación entre el esfuerzo y la deformación ingenieril hasta un

valor ligeramente mayor al esfuerzo de fluencia del material. Los tres parámetros considerados son el módulo de elasticidad E_0 , la resistencia a la fluencia S_y y el parámetro n que define la forma de la curva [4].

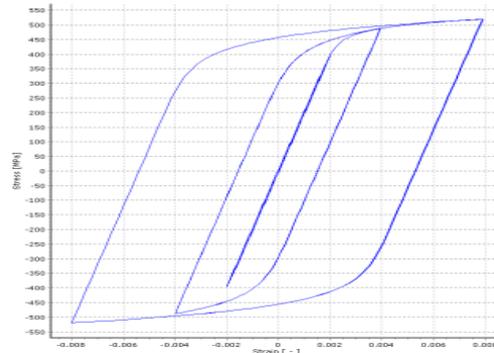


Figura 6: Modelo de acero Ramberg-Osgood.[2]

2) Modelo de Menegotto-Pinto - stl_{mp} : Su utilización debe ser limitada al modelado de estructuras de hormigón armado, en particular de aquellas sometidas a historiales de carga complejos, en los cuales pueden ocurrir inversiones de carga significativas. Puede ser utilizado también para el modelado de barras lisas, encontradas con frecuencia en estructuras existentes [2].

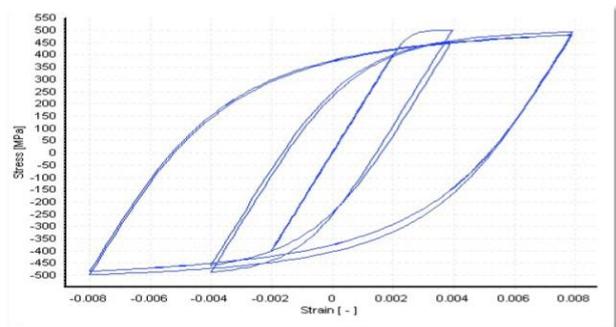


Figura 7: Modelo de Menegotto-Pinto para acero.[2]

3) Modelo de Dodd-Restrepo - stl_{dr} : Este Emodelo uniaxial de acero considera la reducción del módulo de descarga con la deformación plástica, mientras que la reducción de la deformación a tensión última se toma únicamente como una función de la deformación

compresiva máxima, cuando el número de ciclos es lo suficientemente pequeño para ignorar efectos de fatiga [2].

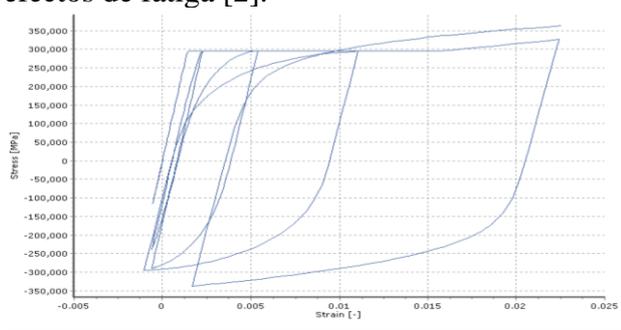


Figura 8: Modelo de Acero Dodd-Restrepo.[2]

Los parámetros que alimentan a los modelos constitutivos de acero se los presenta a continuación:

Tabla 2: Glosario de parámetros que alimentan a los modelos constitutivos de acero

Símbolo	Descripción
E	Módulo de elasticidad (MPa)
f_y	Límite de fluencia - f_y (MPa)
μ	Parámetro de endurecimiento por deformación
R_o	Parámetro de forma inicial de la curva de transición
a_1 & a_2	Coefficientes de calibración de la forma de la curva de transición
a_3 & a_4	Coefficientes de calibración del endurecimiento isotrópico
ϵ_{ult}	Deformación de rotura/pandeo (mm)
$\sigma_{máx}$	Esfuerzo en el punto de carga máxima (MPa)
δ_f	Deformación al iniciar la curva de endurecimiento por deformación (mm)
$\delta_{máx}$	Deformación en el punto de carga máxima (mm)
δ_{pi}	Deformación en el punto intermedio de la curva de endurecimiento por deformación (mm)
σ_{pi}	Esfuerzo en el punto intermedio de la curva de endurecimiento por deformación (MPa)
RO	Parámetro de Ramberg Osgood
β_1	Límite de convergencia para el procedimiento Newton-Raphson
γ	Peso específico (N/m ³)

Y finalmente, se presenta en la Tabla 3 la referencia bibliográfica donde se seleccionó las

pruebas de carga pseudo-estáticas y dinámicas, como la nomenclatura de cada viga seleccionada.

Tabla 3. Tabla de tipo de carga, referencia bibliográfica, vigas seleccionadas y longitud.

Cargas	Referencia	Viga	Longitud (mm)
Pseudo - estáticas	M. A. Rashid and M. A. Mansur, 2005	B313	3600
	Ali Kheyroddin y Hosein Naderpour, 2007	C5	3080
	M.S. Henriksen, R. Brincker and G. Heshe, 1999	Viga 4	1200
	Yu-Chen Ou y Hou-Heng Chen, 2010	Bt-0	1850
Dinámica s	R.C. Fenwick y A. Fong, 1979	Viga 1A	1100
	Cem Aydemir, Müberra Eser Aydemir y Pinar Yildirim, 2020	K6.0YP1	3000

Por otra parte, se hace necesario conocer los parámetros, valores y combinaciones utilizadas para generar los modelos expuestos anteriormente, todos los datos que se utilizarán para alimentar los modelos del SeismoStruct se presentan en el anexo 1, así como también, una breve descripción del procedimiento seguido para obtener los modelos analíticos (anexo 2).

3. Resultados y Discusión

Los resultados del presente trabajo indican un análisis comparativo de la curva esfuerzo vs deformación y los lazos de histéresis en vigas con carga pseudo – estática y dinámica respectivamente, tomando en cuenta los siguientes criterios: inicialmente se tomó el criterio de la forma y el área que encierra la curva esfuerzo – deformación o el lazo de histéresis (A), la cual representa la capacidad del modelo de disipar energía. También se toma en cuenta los criterios de resistencia inicial (R_o) y final (R_f), lograda en cada modelo y su variación en porcentaje (%red). Y finalmente se tomó los criterios de la pendiente secante final (P_f) y pendiente secante inicial (P_o) de la curva fuerza-desplazamiento y su variación (deg%). Estos

criterios se los puede observar en las tablas de cada autor.

Mediante los criterios descritos anteriormente se obtuvieron las gráficas comparativas de cada modelo y las gráficas de error porcentual. Los símbolos de las gráficas de error porcentual se representan con triángulo, círculo y cuadrado para los modelos de hormigón de Chang-Mander, Mander y Kappos-Konstantinidis, respectivamente.

Por otra parte, para representar en las gráficas el error porcentual de los modelos de acero Menegotto-Pinto, Ramberg-Osgood y Dodd-Restrepo se vinculó con los colores azul, negro y rojo respectivamente.

3.1 Modelos Pseudo – estáticos

En esta fase se elaboró el análisis experimental de las tres pruebas de carga pseudo – estáticas en donde, las vigas son simplemente apoyadas y en las cuales se impuso cargas puntuales en el eje z, conforme especifica cada prueba de carga de cada autor.

En estos modelos se aplicó inicialmente una carga incremental que se define en el programa SeismoStruct hasta alcanzar la carga deseada o una inestabilidad numérica, a fin, de llegar a obtener los modelos experimentales en el programa, los cuales serán comparados con los modelos teóricos de cada autor.

3.1.1 Modelo de M. A. Rashid and M. A. Mansur, 2005

El autor expone dieciséis pruebas de carga de vigas de hormigón armado de las cuales se seleccionó la viga B313, ya que posee los parámetros que alimentan los modelos del software SeismoStruct como se muestra en la tabla 4.

En esta tabla se muestra el lazo de histéresis, resumen de datos, detalle del armado de la viga seleccionada y además se indican los valores de los criterios que se tomaron en cuenta para la respectiva comparación.

Tabla 4. Resumen de datos de M. A. Rashid and M. A. Mansur, 2005[5]

MODELO PSEUDOESTÁTICO 1																
LAZO DE HISTERESIS	RESUMEN DE DATOS	DETALLE DE ARMADO														
	Altura(mm)	400														
	Base (mm)	250														
	Longitud (mm)	3600														
	Acero	2 φ 13														
	Longitudinal	6 φ 25														
	Acero Transversal	10 @ 66.														
	Geometria	RECTANGULO R														
	Tipo de conexión	SIMPLEMENTE APOYADA														
	f _c (Mpa)	72.8														
	f _y (Mpa)	537														
	S(mm)	66.7														
	E _c (Mpa)	36634.76														
	E(Mpa)	200000														
		<table border="1"> <tr> <td>A (KN*mm)</td> <td>47577.00</td> </tr> <tr> <td>Ro(KN)</td> <td>742.97</td> </tr> <tr> <td>Rf (KN)</td> <td>584.40</td> </tr> <tr> <td>%red</td> <td>21.34</td> </tr> <tr> <td>Po(KN/mm)</td> <td>35.15</td> </tr> <tr> <td>Pf(KN/mm)</td> <td>7.21</td> </tr> <tr> <td>%deg</td> <td>79.47</td> </tr> </table>	A (KN*mm)	47577.00	Ro(KN)	742.97	Rf (KN)	584.40	%red	21.34	Po(KN/mm)	35.15	Pf(KN/mm)	7.21	%deg	79.47
A (KN*mm)	47577.00															
Ro(KN)	742.97															
Rf (KN)	584.40															
%red	21.34															
Po(KN/mm)	35.15															
Pf(KN/mm)	7.21															
%deg	79.47															

A continuación, se presentan en las tablas 5 a 10 los resultados de la fase analítica que se desarrolló en el programa SeismoStruct.

Tabla 5. Lazo de Histéresis en Seismostruct con Modelo no lineal de Chang-Mander.

MODELO PSEUDOESTÁTICO 1		
MENEGOTTO PINTO	RAMBERG OSGOOD	DODD RESTREPO

Tabla 6. Criterios de comparación del modelo no lineal de Chang-Mander.

MODELO PSEUDOESTÁTICO 1			
	MENEGOTTO PINTO	RAMBERG OSGOOD	DODD RESTREPO
A (KN*mm)	60071.61	39422.99	70046.55
Ro(KN)	818.19	503.71	825.52
Rf (KN)	858.77	523.72	978.20
%red	-4.96	-3.97	-18.50
Po(KN/mm)	51.57	41.31	52.49
Pf(KN/mm)	10.44	6.26	12.04
%deg	79.76	84.84	77.06

Tabla 7. Lazo de Histéresis en Seismostruct con Modelo no lineal de Mander.

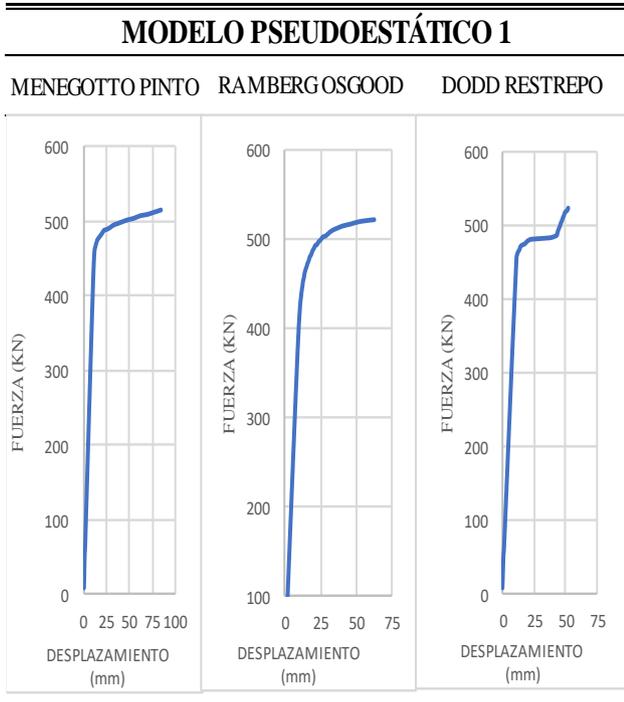


Tabla 8. Criterios de comparación del modelo no lineal de Mander.

MODELO PSEUDOESTÁTICO 1			
	MENEGOTTO PINTO	RAMBERG OSGOOD	DODD RESTREPO
A (KN*mm)	39291.95	28009.30	19294.04
Ro(KN)	487.42	502.00	481.97
Rf (KN)	514.47	521.32	524.27
%red	-5.55	-3.85	-8.78
Po(KN/mm)	41.60	39.62	49.61
Pf(KN/mm)	6.06	6.42	10.09
%deg	85.44	83.81	79.67

Tabla 9. Lazo de Histéresis en Seismostruct con Modelo de Kappos & Konstantinidis

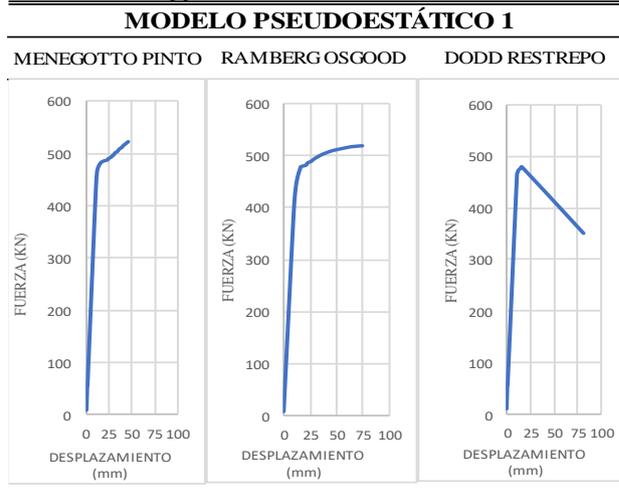


Tabla 10. Criterios de comparación del modelo no lineal de Kappos & Konstantinidis

MODELO PSEUDOESTÁTICO 1			
	MENEGOTTO PINTO	RAMBERG OSGOOD	DODD RESTREPO
A (KN*mm)	16116.99	39422.99	31722.07
Ro(KN)	481.32	476.65	479.01
Rf (KN)	523.82	519.10	350.19
%red	-8.83	-4.32	26.89
Po(KN/mm)	42.00	40.92	42.56
Pf(KN/mm)	11.51	6.99	4.32
%deg	72.60	82.93	89.84

En la gráfica a continuación se presenta el error porcentual de los criterios de comparación.

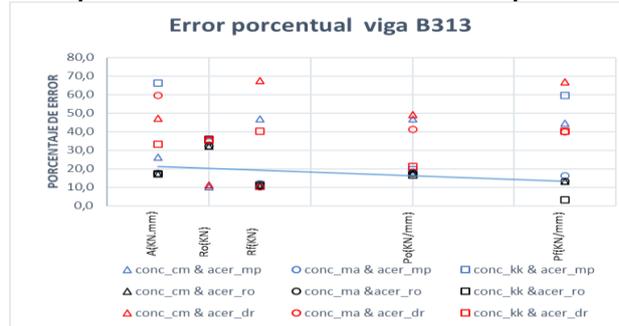


Figura 9: Error porcentual del modelo M. A. Rashid and M. A. Mansur, viga B313.

Como se puede observar en la Figura 9 y la tabla 55 del anexo 3, los modelos combinados que mejor se ajustan al modelo teórico son los modelos constitutivos de concreto Mander y acero Ramberg Osgood, con los menores porcentajes de error; estando estos porcentajes entre 10.4%-32.2%, seguido de los modelos de Chang-Mander y Menegotto Pinto con un porcentaje de error entre 12.0% - 45 %.

Aunque cualitativamente los modelos no describen el comportamiento y se encuentran muy alejados, los modelos que más se acercan cuantitativamente son los anteriormente mencionados y que se tomó en consideración para la posterior comparación.

3.1.2 Modelo de Ali Kheyroddin y Hosein Naderpour, 2007

El autor toma como viga base para todas las pruebas de carga la viga C5, por lo tanto, se seleccionó esta viga para el análisis.

Para presentar la parte experimental se sigue la misma base del modelo anterior y los resultados se exponen en las tablas 11 a 17.

Tabla 11. Resumen de datos de Ali Kheyroddin y Hosein Naderpour[6]

MODELO PSEUDOESTÁTICO 2				
LAZO DE HISTÉRESIS	RESUMEN DE DATOS	DETALLE DE ARMADO		
	Altura(mm)	280	2φ10	
	Base (mm)	152	10@67	
	Longitud (mm)	3080		
	Acero	2 φ 10	4φ19	
	Longitudinal	4 φ 19		
	Acero Transversal	10 @ 67		
	Geometría	RECTANGULAR	A (KN*mm)	5099.97
	Tipo de conexión	SIMPLEMENTE APOYADA	Ro(KN)	120.00
	f _c (Mpa)	23.4	R _f (KN)	120.00
	f _y (Mpa)	328.2	%red	0.00
	S(mm)	67	Po(KN/mm)	13.60
	Ec(Mpa)	23145	Pf(KN/mm)	2.57
	E(Mpa)	195130	%deg	81.10

Tabla 12. Lazo de Histéresis en Seismostruct con Modelo no lineal de Chang-Mander.

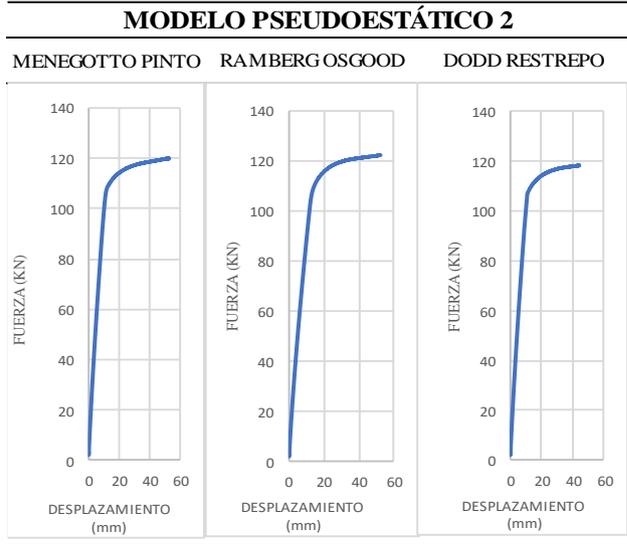


Tabla 13. Criterios de comparación del modelo no lineal de Chang-Mander.

MODELO PSEUDOESTÁTICO 2			
	MENEGOTTO PINTO	RAMBERG OSGOOD	DODD RESTREPO
A (KN*mm)	5004.88	5151.82	5090.15
Ro (KN)	110.20	111.00	108.27
Rf (KN)	119.93	122.19	118.77
%red	-8.83	-10.08	-9.70
Po (KN/mm)	10.47	9.21	10.69
Pf (KN/mm)	2.31	2.36	2.29
%deg	77.90	74.40	78.55

Tabla 14. Lazo de Histéresis en Seismostruct con Modelo no lineal de Mander.

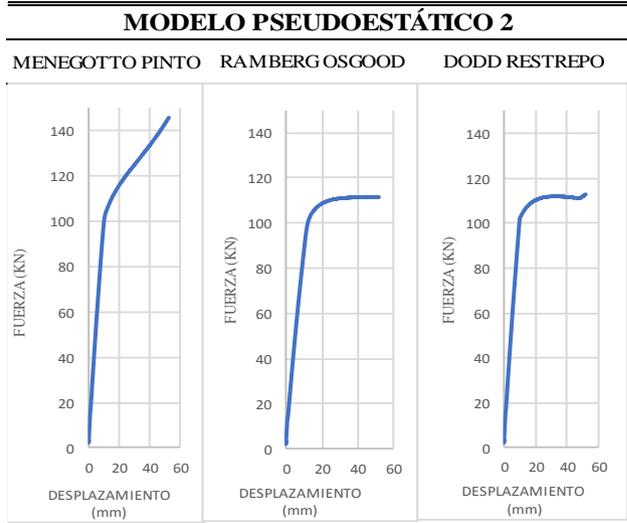


Tabla 15. Criterios de comparación de modelo no lineal de Mander.

	MODELO PSEUDOESTÁTICO 2		
	MENEGOTTO PINTO	RAMBERG OSGOOD	DODD RESTREPO
A (KN*mm)	5704.96	4997.11	5173.82
Ro (KN)	105.03	102.12	102.51
Rf (KN)	145.77	111.65	112.97
%red	-38.79	-9.33	-10.20
Po (KN/mm)	10.61	8.74	10.67
Pf (KN/mm)	2.81	2.15	2.18
%deg	73.52	75.40	79.58

Tabla 16. Lazo de Histéresis en Seismostruct con Modelo de Kappos & Konstantinidis

	MODELO PSEUDOESTÁTICO 2		
	MENEGOTTO PINTO	RAMBERG OSGOOD	DODD RESTREPO
A (KN*mm)	5368.85	4831.43	2114.36
Ro (KN)	111.57	110.51	111.35
Rf (KN)	132.25	103.22	102.04
%red	-18.54	6.60	8.36
Po (KN/mm)	11.52	10.09	11.22
Pf (KN/mm)	2.56	1.99	1.97
%deg	77.76	80.29	82.44

Tabla 17. Criterios de comparación del modelo no lineal de Kappos & Konstantinidis

	MODELO PSEUDOESTÁTICO 2		
	MENEGOTTO PINTO	RAMBERG OSGOOD	DODD RESTREPO
A (KN*mm)	5368.85	4831.43	2114.36
Ro (KN)	111.57	110.51	111.35
Rf (KN)	132.25	103.22	102.04
%red	-18.54	6.60	8.36
Po (KN/mm)	11.52	10.09	11.22
Pf (KN/mm)	2.56	1.99	1.97
%deg	77.76	80.29	82.44

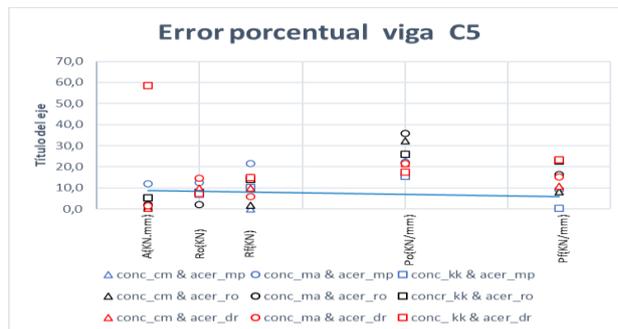


Figura 10: Error porcentual del modelo Ali Kheyroddin y Hosein Naderpour, viga C5.

En este caso se puede observar en la Figura 10 y la Tabla 56 del anexo 3 el modelo que más se asemeja al modelo teórico es el modelo constitutivo de Kappos & Konstantinidis y Menegotto Pinto con un porcentaje de error entre 0.4% - 15.3%, y en segundo lugar con un error entre 9.3% y 22% tenemos el modelo de Mander y Menegotto Pinto, en este caso podemos notar que el modelo de acero Menegotto Pinto se acopla de mejor manera al modelo teórico.

3.1.3 Modelo de M.S. Henriksen, R. Brincker and G. Heshe.

Las pruebas de carga que presenta el autor consideran la longitud de la viga, porcentaje de acero longitudinal y la sección, teniendo así nueve tipos de vigas y se optó por la viga cuadrada y un porcentaje de acero de 0.78%, con hormigón de resistencia normal.

Para presentar los resultados experimentales de este modelo se desarrolla de la misma manera que los modelos anteriores y se expone los resultados en las tablas 18 a 24.

Así como también, se observan los valores de error porcentual cuantitativos y cualitativos en la Tabla 54 del anexo 3 y la Figura 11 respectivamente.

Tabla 18. Resumen de datos de M.S. Henriksen, R. Brincker and G. Heshe[7]

MODELO PSEUDOESTÁTICO 3				
LAZO DE HISTERESIS	RESUMEN DE DATOS	DETALLE DE ARMADO		
	Altura	100		
	Base	100		
	Longitud	1200		
	Acero Longitudinal	4 φ 5		
	Acero Transversal	MIN		
	Geometria	CUADRADA	A (KN*mm)	241.28
	Tipo de conexión	SIMPLEMENTE APOYADA	Ro(KN)	15.18
	f _c (Mpa)	64	R _f (KN)	11.95
	f _y (Mpa)	708	%red	21.29
	S(mm)	200	Po(KN/mm)	3.59
	E _c (Mpa)	42300	Pf(KN/mm)	0.63
	E(Mpa)	201000	%deg	82.47

Tabla 19. Lazo de Histéresis en Seismostruct con Modelo no lineal de Chang-Mander.

MODELO PSEUDOESTÁTICO 3			
MENEGOTTO PINTO	RAMBERG OSGOOD	DODD RESTREPO	

Tabla 20. Criterios de comparación Modelo no lineal de Chang-Mander.

	MODELO PSEUDOESTÁTICO 3		
	MENEGOTTO PINTO	RAMBERG OSGOOD	DODD RESTREPO
A (KN*mm)	181.50	206.83	200.22
Ro (KN)	16.64	17.55	16.56
Rf (KN)	13.18	10.25	5.86
%red	20.82	41.60	64.59
Po (KN/mm)	5.59	5.86	4.92
Pf (KN/mm)	1.11	0.77	0.42
%deg	80.15	86.90	91.45

Tabla 21. Lazo de Histéresis en Seismostruct con Modelo no lineal de Mander.

MODELO PSEUDOESTÁTICO 3			
MENEGOTTO PINTO	RAMBERG OSGOOD	DODD RESTREPO	

Tabla 22. Criterios de comparación modelo no lineal de Mander.

	MODELO PSEUDOESTÁTICO 3		
	MENEGOTTO PINTO	RAMBERG OSGOOD	DODD RESTREPO
A (KN*mm)	376.75	345.04	366.52
Ro (KN)	17.04	18.32	16.53
Rf (KN)	16.18	16.48	16.61
%red	5.07	10.06	-0.48
Po (KN/mm)	4.91	6.06	4.84
Pf (KN/mm)	0.67	0.79	0.69
%deg	86.28	87.04	85.77

Tabla 23. Lazo de Histéresis en Seismostruct con Modelo de Kappos & Konstantinidis

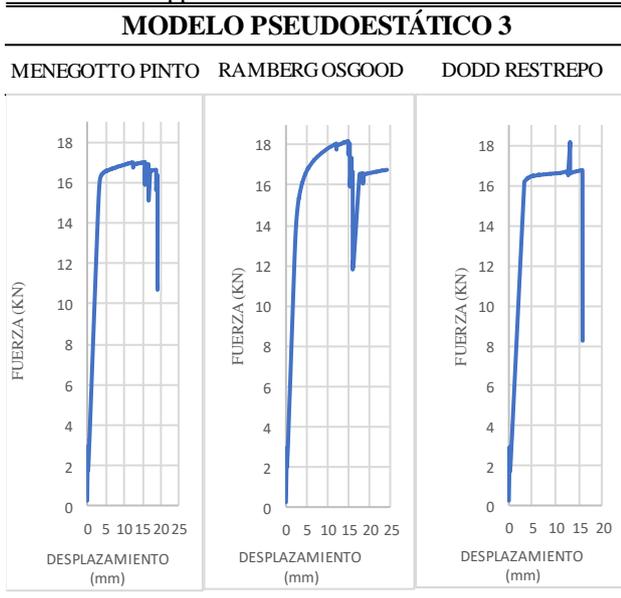


Tabla 24. Criterios de comparación modelo no lineal de Kappos & Konstantinidis

MODELO PSEUDOESTÁTICO 3

	MENEGOTTO PINTO	RAMBERG OSGOOD	DODD RESTREPO
A (KN*mm)	292.80	380.97	234.29
Ro (KN)	16.91	18.20	16.55
Rf (KN)	10.82	16.78	8.25
%red	36.01	7.80	50.14
Po (KN/mm)	4.87	6.10	4.99
Pf (KN/mm)	0.56	0.70	0.52
%deg	88.47	88.58	89.53

Como se puede observar en la Figura 11 Kappos & Konstantinidis y Dodd Restrepo tiene una relación más parecida al modelo teórico, ya que su porcentaje de error varía de 0.4% - 15.3%, y seguido del modelo Kappos & Konstantinidis y Menegotto Pinto con un porcentaje de error de 9% - 39%, obtenidos estos valores se puede notar un comportamiento similar al del anterior autor y también, se reitera que Kappos & Konstantinidis proporciona una similitud mayor con el modelo teórico.

3.2 Modelos dinámicos

En esta fase se realizó el análisis experimental de tres pruebas de carga dinámica, donde se analizó tres vigas en voladizo o cantiléver, mediante el análisis time-history estático; se requiere de una curva time-history que relaciona el desplazamiento con periodos cortos de tiempo, habitualmente se utiliza este tipo de análisis para cargas cíclicas.

Mediante la curva time-history se tiene una carga en el eje z que va variando en el tiempo, hasta alcanzar la carga o desplazamiento deseado o una inestabilidad numérica. Mediante este análisis se obtuvieron los modelos analíticos a ser posteriormente comparados.

A continuación, se presentan los resultados de los modelos teóricos seguidos de los resultados analíticos y sus respectivas gráficas del error porcentual de cada autor.

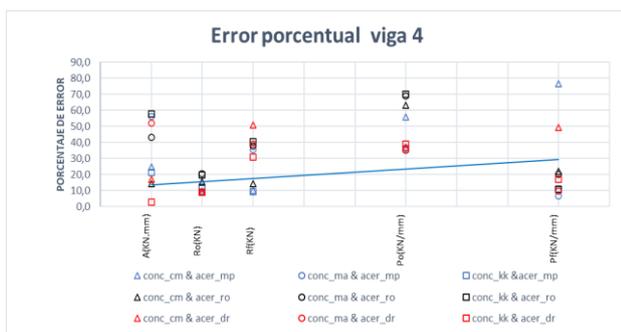


Figura 11: Error porcentual del modelo M.S. Henriksen, R. Brincker and G. Heshe, viga 4.

3.2.1 Modelo Yu-Chen Ou y Hou-Heng Chen.

El autor relaciona la curva esfuerzo-deformación con la corrosión y presenta 7 vigas con diferentes niveles de corrosión y una viga base que no presenta corrosión, por eso se tomó en cuenta la viga Bt-0(base) para el análisis.

Se presentan los resultados del modelo dinámico 1 en las tablas 25 a 31, con la misma modalidad presentada en los modelos pseudo - estáticos.

Tabla 25. Resumen de datos de Yu-Chen Ou y Hou-Heng Chen[8]

MODELO DINÁMICO 1				
LAZO DE HISTERESIS	RESUMEN DE DATOS	DETALLE DE ARMADO		
	Altura	500		
	Base	300		
	Longitud	2800		
	Acero	3 φ 28		
	Longitudinal	3 φ 28		
	Acero	12 @ 100		
	Geometría	RECTANGULAR	A (KN*mm)	3301.44
	Tipo de conexión	CANTILVER	Ro(KN)	359.13
	f _c (Mpa)	28	R _f (KN)	74.00
	f _y (Mpa)	412	%red	79.39
	S(mm)	100	Po(KN/mm)	90.79
	E _c (Mpa)	22960	Pf(KN/mm)	12.33
	E(Mpa)	200000	%deg	86.42

Tabla 26. Lazo de Histéresis en Seismostruct con Modelo no lineal de Chang-Mander.

MODELO DINÁMICO 1			
MENEGOTTO PINTO	RAMBERG OSGOOD	DODD RESTREPO	

Tabla 27. Criterios de comparación modelo no lineal de Chang-Mander.

MODELO DINÁMICO 1			
	MENEGOTTO PINTO	RAMBERG OSGOOD	DODD RESTREPO
A (KN*mm)	2503.20	2786.06	3105.49
Ro (KN)	332.67	307.28	272.57
R _f (KN)	159.50	373.25	276.59
%red	52.05	-21.47	-1.47
Po (KN/mm)	128.10	102.43	127.25
Pf (KN/mm)	26.58	62.21	46.10
%deg	79.25	39.27	63.77

Tabla 28. Lazo de Histéresis en Seismostruct con Modelo no lineal de Mander.

MODELO DINÁMICO 1			
MENEGOTTO PINTO	RAMBERG OSGOOD	DODD RESTREPO	

Tabla 29. Criterios de comparación modelo no lineal de Mander.

MODELO DINÁMICO 1			
	MENEGOTTO PINTO	RAMBERG OSGOOD	DODD RESTREPO
A (KN*mm)	3190.11	2973.07	3180.48
Ro (KN)	325.68	278.47	279.99
R _f (KN)	132.02	306.20	272.55
%red	59.46	-9.96	2.66
Po (KN/mm)	108.56	92.82	93.33
Pf (KN/mm)	22.00	51.03	45.43
%deg	79.73	45.02	51.32

Tabla 30. Lazo de Histéresis en Seismostruct con Modelo de Kappos & Konstantinidis

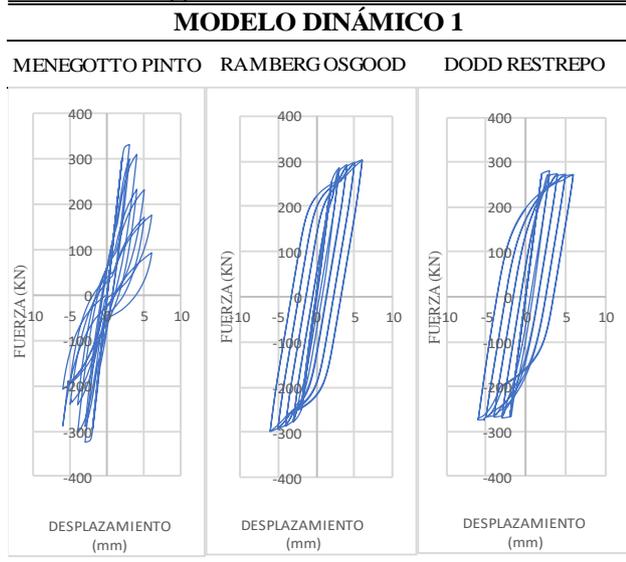


Tabla 31. Criterios de comparación modelo no lineal de Kappos & Konstantinidis

MODELO DINÁMICO 1

	MENEGOTTO PINTO	RAMBERG OSGOOD	DODD RESTREPO
A (KN*mm)	3077.21	3330.03	3254.25
Ro (KN)	331.01	285.64	280.39
Rf (KN)	92.79	303.06	272.57
%red	71.97	-6.10	2.79
Po (KN/mm)	110.34	95.21	93.46
Pf (KN/mm)	15.46	50.51	45.43
%deg	85.99	46.95	51.39

Se presenta la tabla de error porcentual del análisis del primer modelo dinámico.

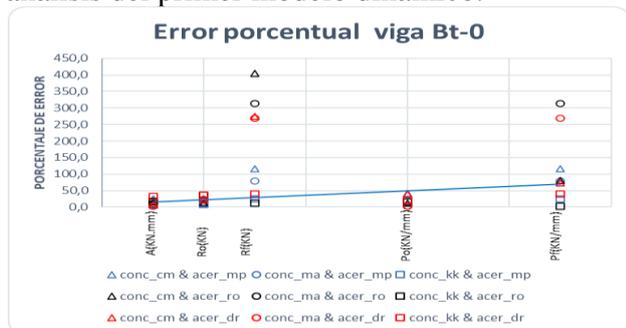


Figura 12: Error porcentual del modelo Yu-Chen Ou y Hou-Heng Chen, viga Bt-0.

Para este modelo dinámico encontramos que el modelo experimental que mejor se acopla

al modelo teórico es el conformado por Mander y Menegotto Pinto con un error porcentual entre 3.4% - 19.6%, seguido del modelo constituido por Kappos & Konstantinidis y Menegotto Pinto con un error 6.8% - 21.5%, en este caso se excluye para el análisis la resistencia final (Rf) y la pendiente final (Pf) a causa de que varios modelos constitutivos presentan una variación considerable de resistencia y pendiente final, y no muestran paridad con el modelo del autor, siendo estos porcentajes comprendidos entre 25 y 75 %, como se evidencia en la tabla 58 del anexo 3.

3.2.2 Modelo de R.C. Fenwick y A. Fong.

En esta referencia bibliográfica se ensaya vigas de hormigón armado bajo cargas cíclicas y se seleccionó la viga 1A, dado que contiene todos los parámetros requeridos por los modelos del SeismoStruct.

A continuación, se presentan los resultados del modelo dinámico 2 en las tablas 32 a 38, y la gráfica del error porcentual de los parámetros analizados.

Tabla 32. Resumen de datos de R.C. Fenwick y A. Fong.[9]

MODELO DINÁMICO 2

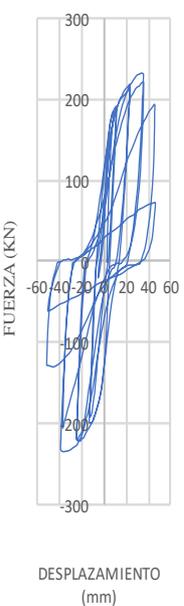
LAZO DE HISTÉRESIS	RESUMEN DE DATOS	DETALLE DE ARMADO
	Altura 500 Base 200 Longitud 1100 Acero Longitudinal 5 φ 20 Acero Transversal 10 @ 200 Geometria RECTANGULAR Tipo de conexión CANTILIVER f _c (Mpa) 34.7 f _y (Mpa) 280 S(mm) 200 E _c (Mpa) 25000 E(Mpa) 200000	
	A (KN*mm) 20067.43 Ro(KN) 230.89 Rf (KN) 71.99 %red 68.82 Po(KN/mm) 6.44 Pf(KN/mm) 1.54 %deg 76.09	

Tabla 33. Lazo de Histéresis en Seismostruct con Modelo no lineal de Chang-Mander.

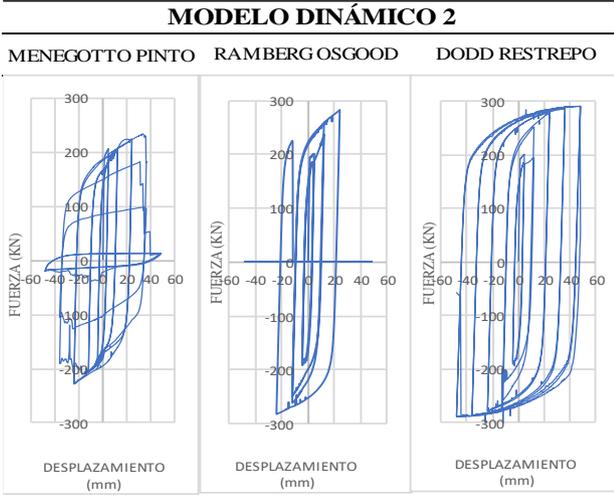


Tabla 34. Criterios de comparación modelo no lineal de Chang-Mander.

MODELO DINÁMICO 2			
	MENEGOTTO PINTO	RAMBERG OSGOOD	DODD RESTREPO
A (KN*mm)	24811.64	20111.44	46886.38
Ro (KN)	230.42	283.14	291.45
Rf (KN)	13.48	0.00	185.91
%red	94.15	100.00	36.21
Po (KN/mm)	6.58	11.80	6.07
Pf (KN/mm)	0.28	0.00	48.72
%deg	95.74	100.00	702.64

Tabla 35. Lazo de Histéresis en Seismostruct con Modelo no lineal de Mander.

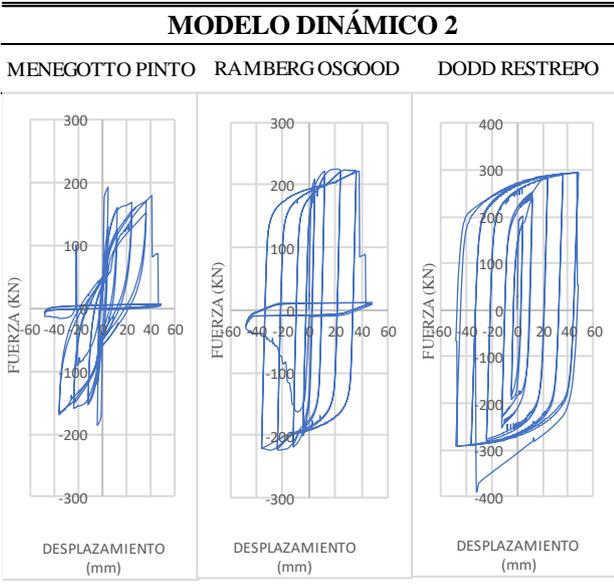


Tabla 36. Criterios de comparación modelo no lineal de Mander.

MODELO DINÁMICO 2			
	MENEGOTTO PINTO	RAMBERG OSGOOD	DODD RESTREPO
A (KN*mm)	12644.22	27778.83	50960.31
Ro (KN)	178.48	222.04	294.40
Rf (KN)	6.23	11.98	190.75
%red	96.51	94.60	35.21
Po (KN/mm)	4.43	18.50	6.13
Pf (KN/mm)	0.13	0.25	141.30
%deg	97.07	98.65	2205.06

Tabla 37. Lazo de Histéresis en Seismostruct con Modelo de Kappos & Konstantinidis

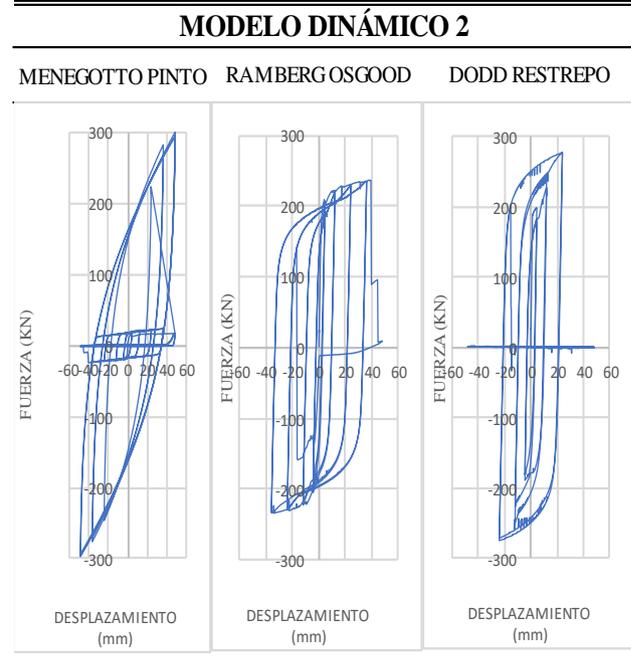


Tabla 38. Criterios de comparación modelo no lineal de Kappos & Konstantinidis

MODELO PSEUDOESTÁTICO 2			
	MENEGOTTO PINTO	RAMBERG OSGOOD	DODD RESTREPO
A (KN*mm)	26479.95	27845.70	20346.67
Ro (KN)	295.16	236.89	277.83
Rf (KN)	16.32	96.14	1.08
%red	94.47	59.42	99.61
Po (KN/mm)	6.15	6.03	11.58
Pf (KN/mm)	0.34	2.17	0.02
%deg	94.47	64.01	99.83

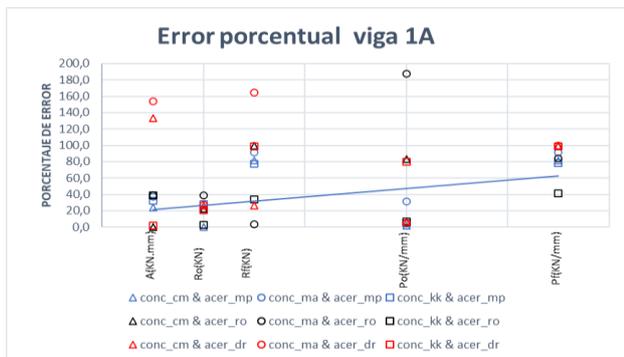


Figura 13: Error porcentual del modelo R.C. Fenwick y A. Fong, viga 1A.

En base al análisis de la Figura 13 y la Tabla 59 del anexo 3 se tiene que el modelo experimental que se acopla al modelo del autor es Chang Mander y Menegotto Pinto con un error del 0.2% y 23.6%, seguido de Kappos Konstantinidis y Menegotto Pinto con un porcentaje de 4.5% y 32%, tomando en cuenta que en este análisis no se considera la resistencia final (Rf) y le pendiente final (Pf), ya que existe una variación considerable con porcentajes elevados de error.

3.2.3 Modelo de Cem Aydemir, Müberra Eser Aydemir y Pınar Yildirim.

Se seleccionó la viga K6.0YP1 entre dos vigas que presenta el autor, ya que esta tiene una carga cíclica homogénea y contaba con los parámetros requeridos por los modelos del SeismoStruct.

Se presentan los resultados del modelo dinámico 3 en las tablas 39 a 45 y su respectiva gráfica de error porcentual del análisis de los parámetros.

Tabla 39. Resumen de datos de Cem AYDEMİR Müberra ESER AYDEMİR Pınar YILDIRIM.[10]

MODELO DINÁMICO 3			
LAZO DE HISTERESIS	RESUMEN DE DATOS	DETALLE DE ARMADO	
	Altura	500	
	Base	250	
	Longitud	3000	
	Acero Longitudinal	6 φ 16 3	
	Acero Transversal	8 @ 125	
	Geometria	RECTANGULAR	A (KN*mm) 13425.75
	Tipo de conexión	CANTILEVER	Ro(KN) 90.13
	f _c (Mpa)	48.6	Rf (KN) 59.91
	f _y (Mpa)	498	%red 33.53
	S(mm)	125	Po(KN/mm) 2.81
	E _c (Mpa)	25000	Pf(KN/mm) 0.50
	E(Mpa)	200000	%deg 82.21

Tabla 40. Lazo de Histéresis en Seismostruct con Modelo no lineal de Chang-Mander.

MODELO DINÁMICO 3		
MENEGOTTO PINTO	RAMBERG OSGOOD	DODD RESTREPO

Tabla 41. Criterios de comparación modelo no lineal de Chang-Mander.

MODELO DINÁMICO 3			
	MENEGOTTO PINTO	RAMBERG OSGOOD	DODD RESTREPO
A (KN*mm)	26188.50	26231.31	37072.05
Ro (KN)	106.34	157.99	136.93
Rf (KN)	62.65	124.14	74.16
%red	41.09	21.43	45.84
Po (KN/mm)	3.59	3.97	2.31
Pf (KN/mm)	0.46	0.90	0.54
%deg	87.32	77.27	76.62

Tabla 42. Lazo de Histéresis en Seismostruct con Modelo no lineal de Mander.

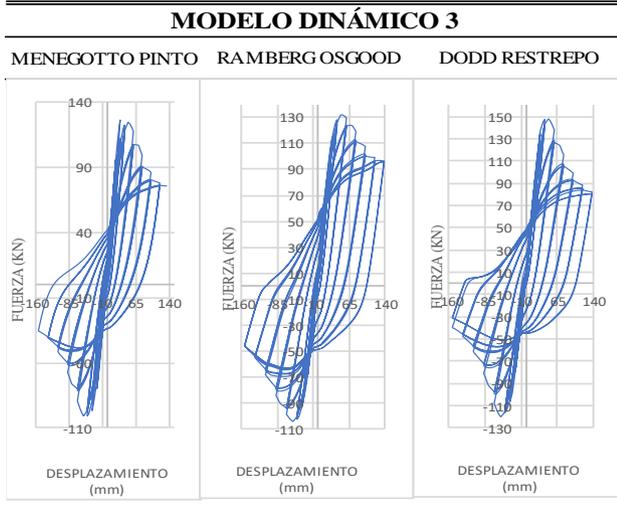


Tabla 43. Criterios de comparación modelo no lineal de Mander.

MODELO DINÁMICO 3			
	MENEGOTTO PINTO	RAMBERG OSGOOD	DODD RESTREPO
A (KN*mm)	25275.00	28790.50	29677.50
Ro (KN)	126.24	130.13	146.95
Rf (KN)	75.44	95.91	80.33
%red	40.24	26.30	45.34
Po (KN/mm)	4.25	2.22	2.93
Pf (KN/mm)	0.55	0.70	0.58
%deg	87.06	68.47	80.20

Tabla 44. Lazo de Histéresis en Seismostruct con Modelo de Kappos & Konstantinidis

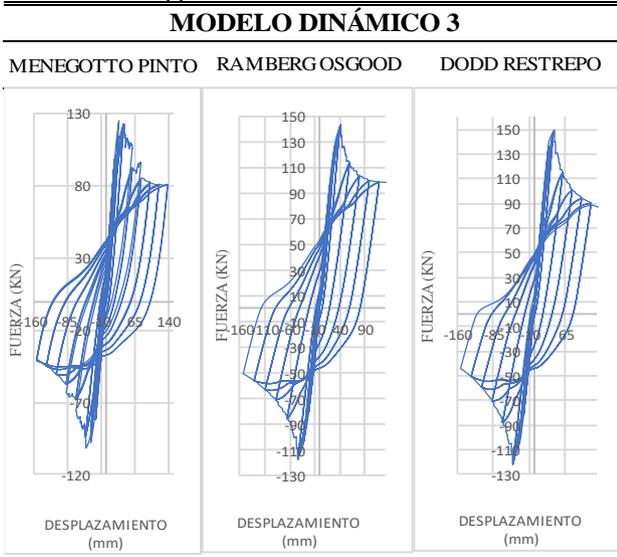


Tabla 45. Criterio de comparación modelo no lineal de Kappos & Konstantinidis

MODELO DINÁMICO 3			
	MENEGOTTO PINTO	RAMBERG OSGOOD	DODD RESTREPO
A (KN*mm)	24458.63	26756.36	28686.30
Ro (KN)	125.03	143.65	149.60
Rf (KN)	80.92	98.53	86.73
%red	35.28	31.41	42.03
Po (KN/mm)	4.21	3.45	3.57
Pf (KN/mm)	0.59	0.72	0.63
%deg	85.99	79.13	82.35

Se presenta la gráfica de error porcentual para el modelo dinámico 3.

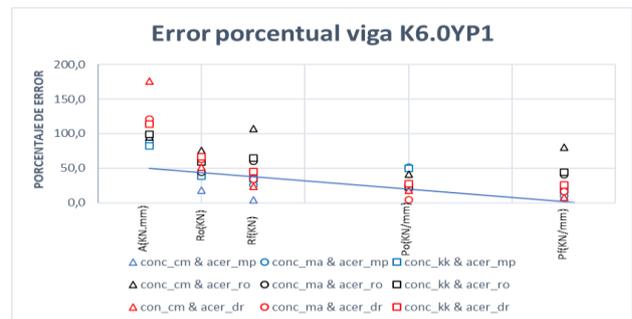


Figura 14: Error porcentual del modelo Cem Aydemir, Müberra Eser Aydemir y Pınar Yildirim, viga K6.0YP1.

El modelo experimental que mejor se ajusta al modelo teórico es Chang-Mander y Menegotto Pinto, seguido del modelo Mander y Menegotto Pinto, con un error porcentual que varía entre 4.6% - 27.8% y 10% - 51.2% respectivamente, en este caso se observa también que el área (A) es mucho mayor en los modelos experimentales, por ende, no se tomó en consideración este criterio en la selección del mejor modelo que se asemeja al del autor, ya que los errores de este criterio se encuentran en 176%.

En referencia a los lazos de histéresis obtenidos de los modelos experimentales dinámicos, utilizando modelos constitutivos de acero de Ramberg-Osgood y Dodd-Restrepo se observa que la curva de histéresis tiende a un crecimiento de resistencia, como se puede

observar de mejor manera en los lazos de histéresis del modelo dinámico 2 , y no hay una degradación de resistencia, como sucede en el modelo teórico, en base a esto se tiene un área mayor que la teórica y esto dificulta la comparación, tomando esto en consideración no se tomó en cuenta las áreas como criterio para el análisis del error porcentual.

Los valores cuantitativos de las gráficas de error porcentual se pueden visualizar en el anexo3, en la Tabla 60.

Finalmente, se presenta en la Tabla 46 y 47 el resumen de resultados de los modelos Pseudo estáticos y dinámicos, donde se visualiza claramente los modelos constitutivos con un nivel bueno y aceptable, siendo bueno el modelo que mejor se asemeja al modelo teórico, y tienen el menor porcentaje de error según la gráfica correspondiente de errores porcentuales y el modelo constitutivo que le sigue en mayor error se considera en un nivel aceptable; además también se da a conocer el modelo reiterativo en estas tablas.

Tabla 46: Resumen de Resultados Modelos Pseudo estáticos

VIGAS	Modelos Constitutivos	
	Bueno	Aceptable
B313	Mander & Ramberg Osgood	Chang Mander y Menegotto Pinto
C5	Kappos Konstantinidis & Menegotto Pinto	Mander y Menegotto Pinto
VIGA 4	Kappos & Konstantinidis y Dodd Restrepo	Kappos & Konstantinidis y Menegotto Pinto
	Modelo Constitutivo reiterativo	
Acero	Menegotto Pinto	
Hormigón	Kappos & Konstantinidis	

Tabla47: Resumen de Resultados Modelos Dinámicas

VIGAS	Modelo Constitutivos	
	Bueno	Aceptable
Bt-0	Mander y Menegotto Pinto	Kappos-Konstantinidis y Menegotto Pinto
1A	Chang Mander y Menegotto Pinto	Kappos Konstantinidis y Menegotto Pinto
K6.0YPI	Chang-Mander y Menegotto Pinto	Mander & y Menegotto Pinto
	Modelo Constitutivo reiterativo	
Acero	Menegotto Pinto	
Hormigón	Se puede elegir varias	

4) Conclusiones

En este artículo académico, se realizó un análisis comparativo de tres pruebas de carga pseudo estáticas de vigas simplemente apoyadas y tres pruebas de carga dinámicas con conexión en voladizo, de este análisis realizado se puede concluir que:

Respecto de los modelos Pseudo estáticos de vigas simplemente apoyadas modelados en el software SeismoStruct, se evidencia, tomando en cuenta la parte cuantitativa que los modelos para hormigón que representan y se asemejan a los modelos de cada autor son dos modelos Kappos Konstantinidis y Mander; por otra parte en lo que respecta al modelo de acero que más se adapta a los datos del modelo teórico es el Modelo de Menegotto Pinto, siendo este el más representativo, como se puede evidenciar en la tabla 46.

Para poder tomar una decisión en cuanto a que modelo de hormigón es el más representativo, se consideró la parte cualitativa, donde se define que el modelo representativo del hormigón es el modelo de Kappos&Konstantinidis, y la combinación de estos dos modelos Kappos Konstantinidis y

Menegotto Pinto es la que reproduce un mejor resultado.

En cuanto a lo que se refiere a los modelos dinámicos con conexión en voladizo, también se procedió a analizar primero la parte cuantitativa obtenido como modelo de acero representativo, el modelo de Menegotto Pinto y en cuanto al modelo de Hormigón no se puede evidenciar claramente que modelo es reiterativo, sin embargo se procedió también a realizar el análisis cualitativo el modelo de hormigón representativo es Kappos& Konstantinidis y la combinación de estos modelos es la que simula un mejor resultado con respecto a los modelos teóricos.

Finalmente, con lo expuesto anteriormente se puede sugerir que la combinación de los modelos Kappos& Konstantinidis y Menegotto Pinto es recomendable para obtener buenos resultados. Siendo estos modelos los más representativos en nuestro estudio.

El presente estudio también refleja que Seismostruct constituye una herramienta eficiente para simular acciones tanto estáticas como dinámicas en elementos estructurales como vigas, y que a través de la clase de elemento que se eligió en el presente estudio, que fue elemento inelástico de pórtico con rótula plástica (infrmFBPH), se obtuvo buenos resultados.

Para futuros estudios, se recomienda que se realice una comparación entre el programa SeismoStruct con programas más conocidos en nuestro medio, como ETABS o SAP, a fin de determinar cuál producen un menor error y cual se adapta mejor a las pruebas de carga, utilizando modelos constitutivos diferentes a los presentados en el presente estudio.

Referencias

- [1] SeismoStruct, Software de elemento finito. Desarrollado Seismosoft Ltd.
- [2] Seismosoft Ltd, “Manual de Usuario Seismostruck”, pp.313-314-316-317-319-320-321-328,2020.
- [3] O. Quille, “Vigas Isostaticas e Hiperestaticas,” Universidad Privada de Tacna, pp. 3-13, 2018.
- [4] G. Aparicio, H. D’Armas, M. Ciaccia, “Comportamiento elastoplástico en tracción de láminas de acero ASTM A-569,” Rev. INGENIERÍA UC. Vol. 14, No 1, pp. 58, 2007.
- [5] MA Rashid y MA Mansur, “Reinforced High-Strength Concrete Beams in Flexure” ACI STRUCTURAL JOURNAL, TECHNICAL PAPER, pp. 462-463, 2005.
- [6] A. Kheyroddin, H. Naderpour. “Capacidad de rotación plástica en vigas de hormigón armado,” IEEE, Revista Internacional de Ingeniería Civil, 2007.
- [7] M. Henriksen, R. Brincker, G. Heshe, “Test Programme for Bending Failure of reinforced Concrete Beams of Different Scale,” In A. Carpinteri (Ed.), Minimum Reinforcement in Concrete Members: ESIS Publication 24 (pp. 138-149). Pergamon Press. European Structural Integrity Society Vol. 24, 1999.
- [8] Yu-Chen Ou, Hou-Heng Chen. “Cyclic Behavior of Reinforced Concrete Beams with Corroded Transverse Steel Reinforcement,” Department of Construction Engineering, National Taiwan University of Science and Technology, Taipei, Taiwan 2013.
- [9] R.C. Fenwick, A. Fong, “The Behaviour of Reinforced Concrete Beams Under Cyclic Loading”. Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering, vol. 12, pp. 158-167,1979.
- [10] C. Aydemir, M. E. Aydemir y P. Yildirim,” Belirgin düşey yük etkisindeki betonarme

kirişlerin çevrimsel yükler altındaki davranışı üzerine bir inceleme”, pp. 5-11, 2020.

- [11] M. Scott and G Fenves,” Plastic Hinge Integration Methods for Force-Based Beam–Column Elements”, Journal of Structural Engineering © ASCE, 2006, pp 246.
- [12] T. Paulay, M.priestley,” Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings”, John Willey & Sons,INC,1992, pp – 142.

5) Anexos

Anexo 1:

Tabla 48: Tabla resumen de parámetros que alimentan a los modelos experimentales

Parámetros	Vigas con carga Dinámicas			Vigas con carga pseudo-estáticas		
	Bt-0	1A	K6.0YP1	B313	Viga 3	Viga 4
Sección de la viga						
base - b (mm)	300	200	250	250	152	100
altura - h (mm)	500	500	500	400	280	100
Propiedades del Hormigón						
Resistencia a compresión - f_c (MPa)	28	34,7	48,6	72,8	23,4	64
Resistencia a tracción - f_t (MPa)	2,2	2,2	4,86	4,27	3	4,09
Deformación al valor pico de esfuerzo - ϵ_c (mm/mm)	0,002	0,0022	0,002	0,0037	0,0078	0,002
Peso específico- γ (N/m ³)	24	24	24	24	24	24
Módulo de elasticidad - E_c (MPa)	22960	25000	25000	36634,76	23145	42300
Deformación al valor pico del esfuerzo de tracción - ϵ_t (mm/mm)	0,0002	0,00022	0,0002	0,0002	0,05	0,00022
Deformación crítica a compresión adimensional - D_{cc}	1,2	1	1,3	1,3	1,3	1,3
Deformación crítica a tracción adimensional - D_{ct}	5	3	3	3	3	3
Propiedades del acero						
Acero longitudinal (mm)	3 ϕ 28 3 ϕ 28	5 ϕ 20 5 ϕ 20	6 ϕ 16 3 ϕ 16	2 ϕ 13 6 ϕ 25	2 ϕ 10 4 ϕ 19	4 ϕ 5
Acero transversal (mm)	12 @ 100	10 @ 200	8 @ 125	10 @ 66.7	10 @ 67	MIN
Módulo de elasticidad - E (MPa)	200000	200000	200000	200000	195130	201000
Límite de fluencia - f_y (MPa)	412	280	498	537	328,2	708
Parámetro de endurecimiento por deformación - μ	0,015	0,005	0,005	0,005	0,0015	0,005
Parámetro de forma inicial de la curva de transición - R_o	18,6	18,5	20	20	20	20
Coefficientes de calibración de la forma de la curva de transición - a_1 & a_2	18.5 - 0.15	18 - 0.15	18.5 - 0.15	18.5 - 0.15	18.5 - 0.15	18.5 - 0.15
Coefficientes de calibración del endurecimiento isotrópico - a_3 & a_4	0,025 - 3	0 - 1	0 - 1	0 - 1	0 - 1	0 - 1
Deformación de rotura/pandeo - ϵ_{ult}	0,1	0,1	0,1	0,1	0,045	0,1
Esfuerzo en el punto de carga máxima (MPa)	450	479.5	602	871,67	532,74	850
Deformación al iniciar la curva de endurecimiento por deformación	0,016	0,016	0,016	0,016	0,018	0,014
Deformación en el punto de carga máxima	0.207	0.207	0.207	0,207	0,207	0,207
Deformación en el punto intermedio de la curva de endurecimiento por deformación	0.053	0.053	0.053	0,053	0,053	0,053
Esfuerzo en el punto intermedio de la curva de endurecimiento por deformación (MPa)	420	420	420	763,51	466,64	750
Parámetro de Ramberg Osgood - RO	10	20	20	15	50	20
Límite de convergencia para el procedimiento Newton-Raphson - β_1	0.001	0.001	0.001	0,001	0,001	0,001
Peso específico - γ (N/m ³)	78.00	78.00	78.00	78	78	78

Anexo 2:

Construcción del modelo en SeismoStruct, de viga de hormigón armado bajo carga dinámica.

En este apartado se muestra un breve resumen sobre cómo se realiza el modelado y análisis de vigas bajo cargas dinámicas en SeismoStruct. Para ello se describe algunas instrucciones orientadas con la construcción del modelo y los parámetros que utiliza. Sin embargo, es importante mencionar que el detalle de cada uno de los modelos y parámetros que se utilizaron se encuentra en el Manual de Usuario de Seismostruct.

Modelo en SeismoStruct

- Definir el tipo de análisis
- Materiales
- Secciones
- Clase de elementos
- Nodos
- Conectividad de elementos
- Vínculos internos
- Restricciones
- Curvas time-history
- Cargas aplicadas
- Revisiones basadas en código

1. Definir tipo de análisis

De entre los 9 tipos de análisis que posee el programa se opta por el análisis time-history estático.

2. Materiales

En este apéndice se encuentra en detalle todos los tipos de materiales disponibles ya sea de concreto y acero.

3. Secciones

Actualmente, setenta y dos tipos de secciones están disponibles en SeismoStruct, que incluyen desde simples secciones macizas de un solo material hasta secciones más complejas, tanto en concreto armado como compuestas.[2]

Se adoptada una sección rectangular para el modelado de miembros de hormigón armado.

4. Clase de elementos

Seleccionamos elementos inelásticos de pórtico con rótula plástica – infrmFBPH, es necesario definir el número de fibras y a la vez la longitud de rotula plástica.

Las rótulas plásticas se pueden definir como mecanismos localizados en zonas específicas de los elementos estructurales que permiten la disipación de energía, logrando así la redistribución de acciones y junto a esto un mejor comportamiento global de la estructura. [12]

En la teoría de la viga de ingeniería estructural, el término "bisagra plástica" se utiliza para describir la deformación de una sección de una viga donde se produce la flexión plástica. Insertando una bisagra de plástico con una carga límite de plástico en una viga estáticamente determinada, se puede formar un mecanismo cinemático que permita un desplazamiento ilimitado del sistema. Es conocido como mecanismo de colapso.[11]

A continuación, se presenta la ecuación utilizada para determinar la longitud de rótula plástica. [12]

$$L_p = 0.08 * l + 0.022 * f_y * d_b \text{ (MPa)} \quad (1)$$

$$L_p = 0.08 * l + 0.15 * f_y * d_b \text{ (ksi)} \quad (2)$$

Donde:

l = luz libre de la viga,

f_y = Esfuerzo de fluencia del acero,

d_b = Diámetro de barra de acero longitudinal.

Cabe mencionar que el valor por defecto en el programa SeismoStruct para la longitud de rótula plástica es 16,67 % la luz libre que es un valor estándar, sin embargo, para el análisis de los modelos experimentales se utilizó tanto el valor del programa como el obtenido con la ecuación 1, para garantizar una representación

adecuada de la distribución de esfuerzos-deformaciones en la sección de elemento.

5. Nodos

Todos los elementos estructurales están conectados por nodos estructurales a los que se asignan grados de libertad.

6. Conectividad de elementos

Los diferentes elementos de la estructura son definidos en el apartado Conectividad de Elementos, en donde se especifican sus nombres, clases, nodos correspondientes, conectores o brazos rígidos, liberaciones de fuerza/momento y eventualmente su tiempo de activación.[2]

7. Vínculos internos

Las diversas condiciones de vínculos internos de la estructura son definidas en el módulo Vínculos Internos, en el cual se especifican el tipo de vínculo, el nodo maestro asociado, los GDLs restringidos y los nodos esclavos.

8. Restricciones

Se define las condiciones de borde de un modelo, en el cual todos los nodos estructurales se encuentran enumerados y pueden ser restringidos en cualquiera de los seis grados de libertad.

9. Curvas time-history

En los análisis time-history estáticos, además de soportar cargas permanentes, las estructuras son sometidas a cargas transitorias, que pueden ser fuerzas/desplazamientos que varían en el tiempo.

10. Cargas aplicadas

Éstas pueden ser aplicadas a cualquier modelo estructural, ya sea en forma aislada o combinada, dependiendo del tipo de análisis que se desea realizar.

11. Revisiones basadas en código

En este apartado se selecciona la norma la cual define la clasificación del elemento modelado, así como todos los parámetros que debe cumplir según norma.

Es importante mencionar que los modelos pseudo-estáticos y dinámicos, siguen la misma secuencia de construcción mencionada anteriormente. Con la excepción que para modelos pseudo-estáticos se toma el tipo de Análisis pushover estático.

Teniendo en cuenta lo anteriormente mencionado se presenta tablas resumen de las características de los modelos en vigas sometidas a cargas pseudo-estáticas.

Tabla 49: Características del modelado de viga B313

Parámetros utilizados	
Tipo de análisis	Análisis pushover estático
Materiales	Concreto y acero
Sección	Sección rectangular de concreto armado - rcrs
Clase de elemento	Elementos inelásticos de pórtico con rótula plástica - infrmFBPH con Lp de 16,67%
Nodos	N1, N2, N3, N4, N5, N6 y N7
Conectividad de elementos	beam1, beam2, beam3, beam4, beam5 y beam6
Restricciones	N2 restringido en: x+y+z+rx+ry+rz y N5 restringido en: y+z+rx+rz
Cargas aplicadas	Se aplica una carga incremental de fuerza en N3 y N4 en dirección Z. La carga aplicada en la viga B313 es de 500000N y se la ejecuta con intervalos de 100N.
Fase de carga	
Revisiones basadas en código	ASCE 41 - 17

Tabla 50: Características del modelado de C5

Parámetros utilizados	
Tipo de análisis	Análisis pushover estático
Materiales	Concreto y acero
Sección	Sección rectangular de concreto armado - rcrs
Clase de elemento	Elementos inelásticos de pórtico con rótula plástica - infrmFBPH con Lp de 16,67%
Nodos	N1, N2, N3 N4 y N5
Conectividad de elementos	viga1, viga2, viga3 y viga4
Restricciones	N2 y N4 restringido en: x+y+z+rx+rz
Cargas aplicadas	Se aplica desplazamiento en N5 en dirección Z La deformación ultima de la viga C5 es 46.74 mm
Fase de carga	
Revisiones basadas en código	ASCE 41 - 17

Tabla 51: Características del modelado de viga 4

Parámetros utilizados	
Tipo de análisis	Análisis pushover estático
Materiales	Concreto y acero
Sección	Sección rectangular de concreto armado - rcrs
Clase de elemento	Elementos inelásticos de pórtico con rótula plástica - infrmFBPH con Lp de 14,42583 %
Nodos	N1, N2, N3, N4 y N5
Conectividad de elementos	viga1, viga2, viga3 y viga4 N2 restringido en: $x+y+z+rx+ry+rz$ y N4 restringido en: $y+z+rx+rz$
Restricciones	Carga incremental en N5, dirección Z y desplazamiento
Cargas aplicadas	La deformación última de la viga 4 es de 15 mm
Fase de carga	mm
Revisiones basadas en código	ASCE 41 - 17

Características de los modelos de vigas sometidas a cargas dinámicas.

Tabla 52: Características del modelado de viga Bt-0

Parámetros utilizados	
Tipo de análisis	Análisis time-history estático
Materiales	Concreto y acero
Sección	Sección rectangular de concreto armado - rcrs
Clase de elemento	Elementos inelásticos de pórtico con rótula plástica - infrmFBPH con Lp de 8%
Nodos	N1, N2 y N3
Conectividad de elementos	Viga1, Viga2
Restricciones	N1 restringido en: $x+y+z+rx+ry+rz$
Curvas time-history	Curvas time-history definida por el usuario "TiempVsDespl"
Cargas aplicadas	Carga estática time-history en N2, dirección Z y desplazamiento
Revisiones basadas en código	ASCE 41 - 17

Tabla 53: Características del modelado de viga 1A

Parámetros utilizados	
Tipo de análisis	Análisis time-history estático
Materiales	Concreto y acero
Sección	Sección rectangular de concreto armado - rcrs
Clase de elemento	Elementos inelásticos de pórtico con rótula plástica - infrmFBPH con Lp de 16,67%

Nodos	N1, N2 y N3
Conectividad de elementos	VigaA1, Viga2
Restricciones	N1 restringido en: $x+y+z+rx+ry+rz$
Curvas time-history	Curvas time-history definida por el usuario "Curva Desplazamiento(mm)I"
Cargas aplicadas	Carga estática time-history en N2, dirección Z y desplazamiento
Revisiones basadas en código	ASCE 41 - 17

Tabla 54: Características del modelado de viga K6.0YP1

Parámetros utilizados	
Tipo de análisis	Análisis time-history estático
Materiales	Concreto y acero
Sección	Sección rectangular de concreto armado - rcrs
Clase de elemento	Elementos inelásticos de pórtico con rótula plástica - infrmFBPH con Lp de 13.3%
Nodos	N1, N2 y N3
Conectividad de elementos	Viga1, Viga*
Restricciones	N1 restringido en: $x+y+z+rx+ry+rz$
Curvas time-history	Curvas time-history definida por el usuario "Desplazamiento"
Cargas aplicadas	Carga estática time-history en N2, dirección Z y desplazamiento
Revisiones basadas en código	ASCE 41 - 17

Anexo 3:

A continuación, se presenta el error porcentual de los modelos pseudo-estáticos.

Tabla 55: Error porcentual del modelo M. A. Rashid and M. A. Mansur, viga B313.

MODELO PSEUDOESTÁTICO 1										
		conc_cm \$	conc_ma\$	conc_kk \$	conc_cm \$	conc_ma\$	conc_kk \$	conc_cm \$	conc_ma\$	conc_kk \$
		acer_mp	acer_mp	acer_mp	acer_ro	acer_ro	acer_ro	acer_dr	acer_dr	acer_dr
A (KN*mm)	10.0	26.3	17.4	66.1	17.1	41.1	17.1	47.23	59.4	33.3
Ro(KN)	20.0	10.1	34.4	35.2	32.2	32.4	35.8	11.11	35.1	35.5
Rf (KN)	30.0	46.9	12.0	10.4	10.4	10.8	11.2	67.39	10.3	40.1
Po(KN/mm)	60.0	46.7	18.4	19.5	17.5	12.7	16.4	49.35	41.1	21.1
Pf(KN/mm)	90.0	44.7	16.1	59.5	13.2	11.1	3.2	66.93	39.8	40.1

Tabla 56: Error porcentual del modelo Ali Kheyroddin y Hosein Naderpour, viga C5.

MODELO PSEUDOESTÁTICO 2										
		conc_cm \$	conc_ma\$	conc_kk \$	conc_cm \$	conc_ma\$	conc_kk \$	conc_cm \$	conc_ma\$	conc_kk \$
		acer_mp	acer_mp	acer_mp	acer_ro	acer_ro	acer_ro	acer_dr	acer_dr	acer_dr
A (KN*mm)	10.0	1.9	11.9	5.3	1.0	2.0	5.3	0.19	1.4	58.5
Ro(KN)	20.0	8.2	12.5	7.0	7.5	2.0	7.9	9.78	14.6	7.2
Rf (KN)	30.0	0.1	21.5	10.2	1.8	14.9	14.0	9.78	5.9	15.0
Po(KN/mm)	60.0	23.0	22.0	15.3	32.3	35.7	25.8	21.43	21.5	17.5
Pf(KN/mm)	90.0	9.9	9.3	0.4	8.3	16.3	22.6	10.82	15.2	23.3

Tabla 57: Error porcentual del modelo M.S. Henriksen, R. Brincker and G. Heshe, viga 4.

MODELO PSEUDOESTÁTICO 3										
		conc_cm \$	conc_ma\$	conc_kk \$	conc_cm \$	conc_ma\$	conc_kk \$	conc_cm \$	conc_ma\$	conc_kk \$
		acer_mp	acer_mp	acer_mp	acer_ro	acer_ro	acer_ro	acer_dr	acer_dr	acer_dr
A (KN*mm)	10.0	24.8	56.1	21.4	14.3	43.0	57.9	17.02	51.9	2.9
Ro(KN)	20.0	9.6	12.2	11.4	15.6	20.7	19.9	9.08	8.9	9.0
Rf (KN)	30.0	10.3	35.4	9.5	14.2	37.9	40.4	50.9	39.0	30.9
Po(KN/mm)	60.0	55.9	36.8	35.8	63.3	68.9	70.0	37.20	35.0	39.0
Pf(KN/mm)	90.0	76.5	6.6	10.7	22.1	19.9	10.7	49.38	9.6	16.9

A continuación, se presenta el error porcentual de los modelos dinámicos.

Tabla 58: Error porcentual del modelo Yu-Chen Ou y Hou-Heng Chen, viga Bt-0.

MODELO DINÁMICO 1										
	x	conc_cm \$ acer_mp	conc_ma\$ acer_mp	conc_kk \$ acer_mp	conc_cm \$ acer_ro	conc_ma\$ acer_ro	conc_kk \$ acer_ro	conc_cm \$ acer_dr	conc_ma\$ acer_dr	conc_kk \$ acer_dr
A (KN*mm)	10.0	24.2	3.4	6.8	15.6	9.9	17.1	5.94	3.7	33.3
Ro(KN)	20.0	7.4	9.3	7.8	14.4	22.5	35.8	24.10	22.0	35.5
Rf (KN)	30.0	115.5	78.4	25.4	404.4	313.8	11.2	273.77	268.3	40.1
Po(KN/mm)	60.0	41.1	19.6	21.5	12.8	2.2	16.4	40.16	2.8	21.1
Pf(KN/mm)	90.0	115.5	78.4	25.4	80.2	313.8	3.2	73.25	268.4	40.1

Tabla 59: Error porcentual del modelo R.C. Fenwick y A. Fong, viga 1A.

MODELO DINÁMICO 2										
	x	conc_cm \$ acer_mp	conc_ma\$ acer_mp	conc_kk \$ acer_mp	conc_cm \$ acer_ro	conc_ma\$ acer_ro	conc_kk \$ acer_ro	conc_cm \$ acer_dr	conc_ma\$ acer_dr	conc_kk \$ acer_dr
A (KN*mm)	10.0	23.6	37.0	32.0	0.2	38.4	38.8	133.64	153.9	1.4
Ro(KN)	20.0	0.2	22.7	27.8	22.6	38.4	2.6	26.23	27.5	20.3
Rf (KN)	30.0	81.3	91.3	77.3	100.0	3.8	33.5	26.23	165.0	98.5
Po(KN/mm)	60.0	2.2	31.2	4.5	83.2	187.3	6.4	5.75	4.8	79.8
Pf(KN/mm)	90.0	81.8	91.6	77.9	100.0	83.8	40.9	100.00	100.0	98.7

Tabla 60: Error porcentual del modelo Cem Aydemir, Müberra Eser Aydemir y Pınar Yildirim, viga K6.0YP1.

MODELO DINÁMICO 3										
	x	conc_cm \$ acer_mp	conc_ma\$ acer_mp	conc_kk \$ acer_mp	conc_cm \$ acer_ro	conc_ma\$ acer_ro	conc_kk \$ acer_ro	conc_cm \$ acer_dr	conc_ma\$ acer_dr	conc_kk \$ acer_dr
A (KN*mm)	10.0	95.1	88.3	82.2	95.4	114.4	99.3	176.13	121.0	113.7
Ro(KN)	20.0	18.0	40.1	38.7	75.3	44.4	59.4	51.92	63.0	66.0
Rf (KN)	30.0	4.6	25.9	35.1	107.2	60.1	64.5	23.8	34.1	44.8
Po(KN/mm)	60.0	27.8	51.2	49.8	41.1	21.0	22.8	17.79	4.3	27.0
Pf(KN/mm)	90.0	9.0	10.0	18.0	80.3	40.0	44.0	8.00	16.0	26.0