

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD
CATÓLICA DEL PERÚ**

Escuela de Posgrado



Estimación del factor de reducción de fuerza sísmica
para sistemas estructurales duales de edificaciones
esenciales categoría A2

Tesis para obtener el grado académico de Maestro en Ingeniería Civil
con mención en Estructuras Sismorresistentes que presenta:

Benjamín Víctor Aduato Illanes

Asesor:

José Martín Velásquez Vargas

Lima, 2024


Informe de Similitud

Yo, José Martín Velásquez Vargas, docente de la Escuela de Posgrado de la Pontificia Universidad Católica del Perú, asesor de la tesis titulada “Estimación para el factor de reducción de fuerza sísmica para sistemas estructurales duales de edificaciones esenciales categoría A2”, de el autor Benjamín Víctor Aduato Illanes, dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de 13%. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el 15/04/2024.
- He revisado con detalle dicho reporte y la Tesis o Trabajo de investigación, y no se advierte indicios de plagio.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lugar y fecha:

Lima, 30 de mayo del 2024.

Apellidos y nombres del asesor: <u>Velásquez Vargas, José Martín</u>	
DNI: 18196864	Firma
ORCID: 0000-0002-6338-7455	

Resumen

Las normas sísmicas emplean un factor de reducción de la fuerza sísmica (R) para ajustar los espectros de diseño elásticos a inelásticos, crucial para indicar la demanda de ductilidad y determinar la fuerza cortante basal de diseño. Las estructuras esenciales de categoría "A2", como hospitales, centros educativos y cuarteles, deben mantener su funcionalidad tras un sismo significativo. En zonas sísmicas Z4, Z3 y Z2, estas estructuras, de baja altura y con periodos menores a 0.5s, utilizan sistemas duales con un factor $R=7$ (MVCS, 2018). Sin embargo, estas edificaciones, aunque rígidas y de baja ductilidad, tienen un factor de reducción sísmica elevado. Este estudio busca estimar el factor R para estructuras esenciales "A2" y asociar estos factores a niveles de ductilidad.

Para ello, se evaluaron 74 estructuras regulares con derivas menores a 0.007 y fuerzas cortantes en muros entre 20% y 80% de la cortante basal. El factor de reducción por ductilidad para sistemas de un grado de libertad ($R_{\mu 1GDL}$) se calculó usando el modelo de histéresis gamma (Lestuzzi & Badoux, 2003). Factores R_Q y R_Y se obtuvieron mediante análisis estáticos no lineales (Pushover), y los factores $R_{\mu VGDL}$ se determinaron con análisis no lineales tiempo historia. El diseño en concreto armado y los análisis no lineales se realizaron en el software Opensees v2.5.0, y Matlab R2017b se usó para la demanda sísmica.

Los resultados indican que el factor R para sistemas estructurales duales de edificaciones esenciales categoría A2, con periodos de 0.12s a 0.34s y ductilidades de 2 a 4, varía entre $R=1.10$ y $R=2.11$, sugiriendo que deben diseñarse para fuerzas sísmicas mayores a las requeridas actualmente.

PALABRAS CLAVES: Reducción de fuerza sísmica, sistemas estructurales duales, edificaciones esenciales, factor de reducción, ductilidad, análisis no lineales.

Abstract

Seismic standards employ a seismic force reduction factor (R) to adjust elastic to inelastic design spectra, crucial for indicating ductility demand and determining the design basal shear force. Essential structures of category “A2”, such as hospitals, educational centers and barracks, must maintain their functionality after a significant earthquake. In seismic zones Z4, Z3 and Z2, these structures, of low height and with periods less than 0.5s, use dual systems with a factor $R=7$ (MVCS, 2018). However, these buildings, although rigid and low ductility, have a high seismic reduction factor. This study seeks to estimate the R factor for essential structures “A2” and associate these factors with ductility levels.

For this, 74 regular structures were evaluated with drifts less than 0.007 and shear forces in walls between 20% and 80% of the basal shear. The ductility reduction factor for one degree of freedom systems ($R_{\mu 1GDL}$) was calculated using the gamma hysteresis model (Lestuzzi & Badoux, 2003). R_{Ω} and R_Y factors were obtained through nonlinear static analysis (Pushover), and $R_{\mu VGDL}$ factors were determined with nonlinear time history analysis. The reinforced concrete design and nonlinear analyzes were performed in Opensees v2.5.0 software, and Matlab R2017b was used for the seismic demand.

The results indicate that the R factor for dual structural systems of essential buildings category A2, with periods of 0.12s to 0.34s and ductilities of 2 to 4, varies between $R=1.10$ and $R=2.11$, suggesting that they should be designed for seismic forces greater than the currently required.

KEYWORDS: Seismic force reduction, dual structural systems, essential buildings, reduction factor, ductility, nonlinear analysis.

Índice de contenido

Carátula	1
Informe de Similitud	2
Resumen	3
Abstract	4
Índice de contenido.....	5
Índice de Tablas	7
Índice de figuras	8
Capítulo I: Introducción	11
1.1 . Planteamiento del problema	11
1.2. Antecedentes y justificación.....	11
1.3. Hipótesis.....	14
1.4. Objetivos.....	14
Capítulo II: Marco teórico y metodología.....	15
2.1 Marco Teórico.....	15
2.1.1. Modelos de Histéresis	15
2.2 Metodología de Trabajo	18
2.2.1 Análisis elástico con OPENSEES.....	18
2.2.2 Respuesta sísmica no lineal para sistemas con un grado de libertad (1GDL)	19
2.2.3 Análisis no lineal estático.....	19
2.2.4 Factor de modificación α_{VGDL}	20
2.2.5 Estimación del factor de reducción de fuerzas sísmicas	20
Capítulo III: Análisis elástico con OPENSEES	21
3.1. Selección de estructuras Duales.....	21
3.2. Selección del espectro de respuesta de aceleraciones.....	27
3.3. Diseño en Concreto Armado	27
3.3.1 Diseño de vigas.....	28
3.3.2 Diseño de columnas	31
3.3.3 Diseño de muros de corte.....	36
Capítulo IV: Respuesta sísmica no lineal para sistemas con un grado de libertad 40	
4.1 Selección de registros sísmicos y ductilidad objetivo	42

4.2 Sistema equivalente de VGDL a 1GDL	44
4.3 Programación de modelos de histéresis en MATLAB	44
4.4 Resultados del análisis no lineal tiempo historia para sistemas 1GDL	50
Capítulo V: Análisis no lineal estático	64
5.1 Materiales No Lineales	64
5.1.1 Concreto Armado	64
5.1.2 Acero de refuerzo	65
5.2 Secciones Fibra	65
5.3 Elección del nudo de control	66
5.4 Distribución de cargas laterales	66
5.5 Periodo fundamental efectivo (T_e)	67
5.6 Desplazamiento objetivo	68
5.7 Representación bilineal de la curva de capacidad	69
5.8 Resultados del Análisis No Lineal Estático - Pushover	70
5.9 Cálculo del factor de reducción por sobre resistencia R_Q	72
5.10 Cálculo del factor de reducción por diseño R_Y	73
Capítulo VI: Factor de modificación α_{VGDL} y factor de reducción por ductilidad $R_{\mu VGDL}$	75
6.1 Esquema de cálculo de la cortante basal V_{VGDL}	75
6.2 Análisis no lineal tiempo historia para el sistema VGDL	76
6.3 Cálculo del factor de modificación α_{VGDL}	77
6.4 Factor reducción por ductilidad $R_{\mu VGDL}$	78
Capítulo VII: Estimación del factor de reducción de fuerzas sísmicas	82
Conclusiones	85
Recomendaciones	86
Referencias bibliográficas	87

Índice de Tablas

Tabla 1	Modelo de Histéresis	16
Tabla 2	Estructuras Duales de un Nivel.....	25
Tabla 3	Estructuras Duales de 2 y 3 Niveles	26
Tabla 4	Distribución de acero en Vigas Principales	29
Tabla 5	Distribución de acero en Columnas C1.....	35
Tabla 6	Distribución de acero en Columnas C2.....	35
Tabla 7	Distribución de acero en Columnas C4.....	35
Tabla 8	Distribución de acero en muros de corte Mx y Mz	38
Tabla 9	Sismos peruanos.....	42
Tabla 10	Registros Seleccionados	43
Tabla 11	Resultados del análisis no lineal tiempo historia para sistemas 1GDL, Modelo de histéresis Gamma, Ductilidad $\mu=2$	50
Tabla 12	Resultados del análisis no lineal tiempo historia para sistemas 1GDL, Modelo de histéresis Gamma, Ductilidad $\mu=3$	53
Tabla 13	Resultados del análisis no lineal tiempo historia para sistemas 1GDL, Modelo de histéresis Gamma, Ductilidad $\mu=4$	57
Tabla 14	Factor de Modificación C0 (FEMA, 2000).....	68
Tabla 15	Resultados principales del análisis No Lineal Estático.....	70

Índice de figuras

Figura 1	Procedimiento sugerido para estimar μ y R.....	12
Figura 2	Etapas de carga en modelos histeréticos	16
Figura 3	Modelo Elastoplástico	17
Figura 4	Modelo de Histéresis Gamma γ	18
Figura 5	Estructura E2N4V2M150LM – Vista planta	21
Figura 6	Ejes Globales – Vista Elevación	22
Figura 7	Diagrama de Flujo Selección de estructuras en OPENSEES	23
Figura 8	Espectro de respuesta de aceleraciones.....	27
Figura 9	Diseño de Vigas	30
Figura 10	Diagrama de Flujo Diseño de Columnas C1.....	32
Figura 11	Diagrama de Flujo Diseño de Columna C2	33
Figura 12	Diagrama de Flujo N° 0.1 Diseño de Columna C4.....	34
Figura 13	Diagrama de Flujo Diseño de muro de corte	37
Figura 14	Diagrama de Flujo Cálculo del factor de reducción por ductilidad R_u	41
Figura 15	Diagrama de Flujo N° 0.2 Modelo Gamma γ – Parte I.....	45
Figura 16	Diagrama de Flujo N° 0.3 Modelo Gamma γ – Parte II	46
Figura 17	Diagrama de Flujo N° 0.4 Modelo Gamma γ – Parte III	47
Figura 18	Fuerza de Reacción vs Desplazamiento del Sistema no Lineal, Usando Material Gamma γ , Estructura Dual E1N8V4M175LM	48
Figura 19	Fuerza de Reacción vs Desplazamiento del Sistema no Lineal, Usando Material Gamma γ , Estructura Dual E2N8V4M175LM	48
Figura 20	Fuerza de Reacción vs Desplazamiento del Sistema no Lineal, Usando Material Gamma γ , Estructura Dual E3N8V4M225LM	49
Figura 21	Factor de ductilidad ($R_{\mu_{1GDL}}$) versus periodo fundamental (T) para ductilidades de $u=2$	61
Figura 22	Factor de ductilidad ($R_{\mu_{1GDL}}$) versus periodo fundamental (T) para ductilidades de $u=3$	61

Figura 23	Factor de ductilidad ($R_{\mu_{1GDL}}$) versus periodo fundamental (T) para ductilidades de $u=4$	62
Figura 24	Factor de reducción por ductilidad ($R_{\mu_{1GDL}}$) para 3 niveles de ductilidad, modelo de histéresis Gamma γ	62
Figura 25	Factor de reducción por ductilidad ($R_{\mu_{1GDL}}$) para 3 niveles de ductilidad, modelo de histéresis Bilineal.....	63
Figura 26	Factor de reducción por ductilidad ($R_{\mu_{1GDL}}$) para modelos de histéresis Gamma y Bilineal.....	63
Figura 27	Diagrama de Flujo Generación de curvas de capacidad	64
Figura 28	Detalle de subdivisiones de las Secciones de Fibra para las columnas C1, C2, C4, Viga y Muro de corte	66
Figura 29	Distribución de cargas Laterales proporcional al primer modo	67
Figura 30	Pendiente positiva Post fluencia.....	67
Figura 31	Representación Bilineal de la Curva de Capacidad ($\Delta Y_{VGDL}=0.008133m$)– E1N8V4M175LM.....	69
Figura 32	Representación Bilineal de la Curva de Capacidad ($\Delta Y_{VGDL}=0.030833m$)– E2N8V4M175LM.....	69
Figura 33	Representación Bilineal de la Curva de Capacidad ($\Delta Y_{VGDL}=0.04815m$) – E3N8V4M225LM	70
Figura 34	Factores de reducción por sobre resistencia R_{Ω} para las 74 estructuras duales	73
Figura 35	Factor de Reducción por Diseño R_Y para las 74 estructuras analizadas	74
Figura 36	Diagrama de Flujo Cálculo de la fuerza cortante inelástica V_{VGDL}	76
Figura 37	Resultados promedios para los 6 registros - Factor de modificación α_{VGDL}	77
Figura 38	Factor de Reducción $R_{\mu_{VGDL}}$ para las ductilidades de 2, 3 y 4	78
Figura 39	Factor de Reducción $R_{\mu_{VGDL}}$ para ductilidad de 2.....	79
Figura 40	Factor de Reducción $R_{\mu_{VGDL}}$ para ductilidad de 3.....	79
Figura 41	Factor de Reducción $R_{\mu_{VGDL}}$ para ductilidad de 4.....	80

Figura 42	Factor de Reducción $R_{\mu_{VGD L}}$ para ductilidad de 4.....	81
Figura 43	Factor de reducción de fuerza sísmica para sistemas estructurales duales de edificaciones esenciales categoría A2, ductilidad $\mu=2$	82
Figura 44	Factor de reducción de fuerza sísmica para sistemas estructurales duales de edificaciones esenciales categoría A2, ductilidad $\mu=3$	82
Figura 45	Factor de reducción de fuerza sísmica para sistemas estructurales duales de edificaciones esenciales categoría A2, ductilidad $\mu=4$	83
Figura 46	Factor de reducción de fuerza sísmica para sistemas estructurales duales de edificaciones esenciales categoría A2.....	84



Capítulo I: Introducción

1.1 . Planteamiento del problema

Nuestra Norma Peruana E030 categoriza a los establecimientos de salud, centros educativos, policiales y otros como estructuras de categoría "A2", siendo los sistemas permisibles en concreto armado: sistemas duales y muros de concreto. El ministerio de Educación 2006, en sus normas técnicas para el diseño de locales escolares de primaria y secundaria limita a 3 pisos máximo en sus estructuras, mientras que para las otras estructuras de la misma categoría el promedio de pisos varía de 3 a 4. Asimismo, la configuración estructural y diseño para el sistema estructural permitido (vigas, columnas y muros de corte), especialmente los muros de corte y el sistema estructural permitido conllevan a que el periodo de las estructuras sea menor a 0.5seg. Esto nos indica que el factor de reducción de fuerzas sísmica (factor R) debería ser menor al factor R considerado para estructuras con periodos mayores a 0.5seg.

El factor de reducción R considerado por el RNE es constante para todo el rango de periodos, así como la ductilidad de demanda $0.75R$. El valor constante puede sobre estimar o sub estimar la fuerza cortante de diseño.

Al considerar un factor R mayor al real, la cortante basal de diseño es menor al real; realizando un diseño sub dimensionado. Por lo contrario, al considerar un factor R menor al real el cortante basal de diseño considerado es mayor al real; realizando un diseño sobre dimensionado (Daza Duarte, 1996).

1.2. Antecedentes y justificación

La propuesta del factor R indicado en los códigos estadounidenses ha influenciado en América Latina. A pesar que dicho factor R propuesto no cuenta con un respaldo bibliográfico, los países latinos han considerado al factor propuesto como base de sus códigos sismorresistente. Sin embargo, a medida que un país se desarrolla busca responder a sus problemas mejorando sus normas que se ajusten a su propia realidad.

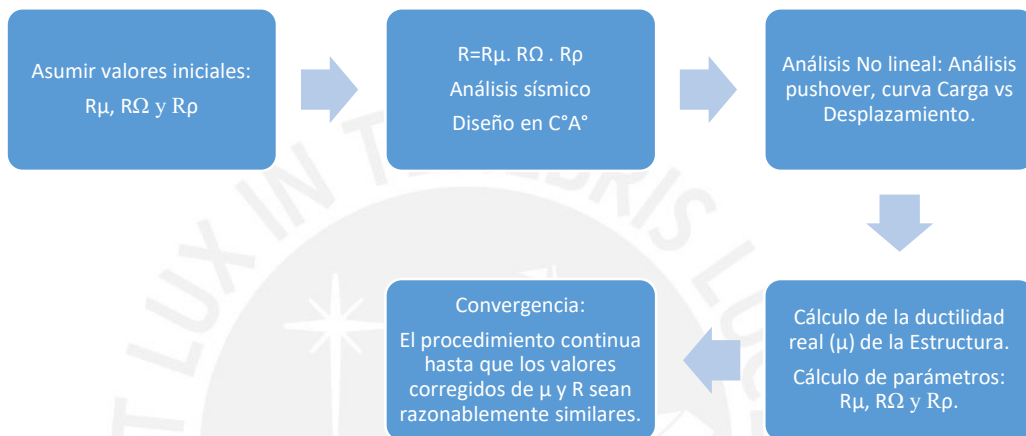
Los factores de reducción que sugieren los códigos provienen exclusivamente de la experiencia y poseen muy poco rigor cuantitativo, pudiendo llevar a sobre estimar o reducir excesivamente las cargas sísmicas de diseño (Daza Duarte, 1996).

El procedimiento sugerido para estimar el factor R propuesto por Daza Duarte podemos resumirlo de la siguiente manera: Primero, selección de

parámetros sísmicos; Segundo, pre diseño estructural; Tercero, realizar un análisis no-lineal; Cuarto, cómputo de parámetros; Quinto, ajustar las cargas sísmicas; Sexto, diseño estructural; Séptimo, convergencia. También, podemos mostrarlo de la siguiente forma:

Figura 1

Procedimiento sugerido para estimar μ y R



Fuente: (Daza Duarte, 1996)

Unas de las conclusiones de Daza Duarte son: *“La metodología propuesta para estimar el valor de R y su inclusión como parte del proceso de diseño resulta urgente. Su justificación comienza a partir del hecho de que los valores propuestos en los códigos de construcción son basados en la experiencia y asignan un mismo valor de R y Ω_0 para todas las estructuras que tienen la misma tipología. Los valores actuales propuestos por el código UBC-97 pueden resultar inadecuados e ilógicos, pudiendo llevar a situaciones extremas; por un lado, valores de cortantes sísmicos inferiores a los requeridos y por el otro, fuerzas sísmicas extremadamente altas.”*

El factor de modificación de respuesta, R , recomendado por los códigos sísmicos de Estados Unidos, presenta una tabla con los diferentes sistemas estructurales y sus respectivos valores, y no establece ninguna variación de este factor para estructura de período corto. El valor recomendado es constante para todo periodo de la estructura (Ramírez, 2001)

La propuesta de Ramírez para modificar el factor R es la siguiente:

$$R^* = \Omega_0 \left[1.0 + \left(\frac{R}{\Omega_0} - 1 \right) \frac{T}{T_0} \right] \text{ para } T \leq T_0$$

Donde Ω_0 es el factor de sobre-resistencia, sus valores para diferentes tipos de sistemas sismo-resistente oscila entre 2 y 3. Específicamente, para marcos de concreto reforzado y acero (especial, intermedio y ordinario) el valor de Ω_0 asignado es 3.0; mientras que para muros de corte (especiales y ordinarios) el valor de Ω_0 asignado es 2.5. El término R/Ω_0 es igual a la ductilidad de demanda para periodos largos μ .

Las conclusiones más importantes fueron los siguientes (Ramírez, 2001):

- *La demanda de ductilidad impuesta por el sismo de diseño en edificios de período corto diseñados utilizando el factor R recomendado por el REP-94, no puede ser atendida por el sistema estructural.*
- *La expresión del factor R propuesta en este estudio garantiza que la demanda de ductilidad en estructuras de periodo corto no sobrepase la reserva de ductilidad teórica implícita en los valores de R recomendados en el REP-94*
- *Al utilizar la expresión del factor R propuesta en este estudio para edificios de periodo corto, se debe diseñar para fuerzas sísmicas mayores a las requeridas actualmente.*

Las investigaciones sobre la corrección del factor R no solo se dio en estructuras de periodo corto, también hay investigaciones partiendo de la influencia de los altos modos en sistemas de múltiples grados de libertad (Gerami, Siahpolo, & Vahdani, 2017), donde por medio de 36 pórticos con diferentes alturas se determinó el factor de reducción por ductilidad R_μ , que es de interés en el presente trabajo.

Es importante estimar el factor R en relación a la demanda de ductilidad para estructuras esenciales con sistemas estructural dual por representar el mayor porcentaje de edificaciones de categoría "A2" construidas por el estado peruano (Establecimientos de salud, centros educativos, cuarteles de las fuerzas armadas y otros) y así determinar la cortante basal de diseño para estas estructuras. Al no estimar la demanda de ductilidad y el factor R apropiado para estas estructuras esenciales, los resultados del análisis elástico para estas estructuras no son confiables.

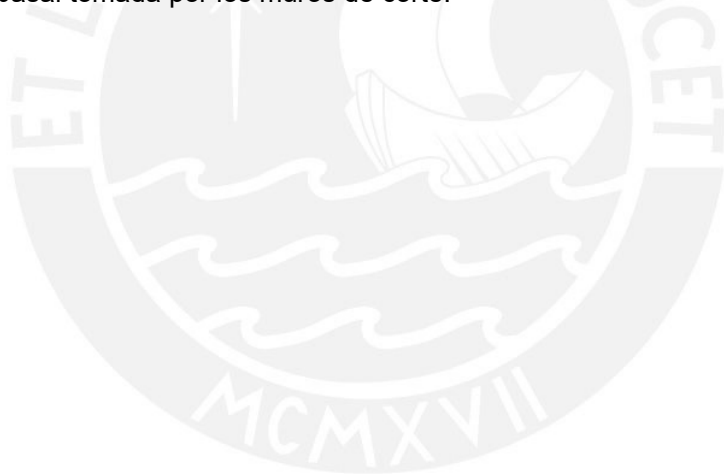
1.3. Hipótesis

El Factor de Reducción Sísmica R para sistemas estructurales duales con periodos cortos es menor a lo indicado por la norma E030. Obteniendo valores de R entre 4.5 a 5 y la demanda de ductilidad está en relación a $R_{\mu} = \sqrt{2\mu - 1}$.

1.4. Objetivos

El objetivo general de este estudio es estimar el factor de reducción de fuerza sísmica R para sistemas estructurales duales de edificaciones esenciales categoría A2. Los objetivos específicos del proyecto son:

- a. Realizar una rutina principal en Matlab para el cálculo del factor de reducción de fuerza sísmica.
- b. Obtener la relación entre el factor de reducción de fuerza sísmica R_u y la de desplazamiento $R_u=f(u)$ para las estructuras esenciales A2 con periodos menores a 0.5s usando un análisis tiempo – historia no lineal.
- c. Automatizar el análisis y diseño estructural elástico en función al factor de reducción de fuerza sísmica R, verificando las derivas máximas y la cortante basal tomada por los muros de corte.



Capítulo II: Marco teórico y metodología

Las normas para diseño sísmico presentan valores de factores de reducción sísmica (Factor R) muy variables para sistemas duales en concreto armado. El reglamento de la Republica Dominicana 2011 muestra un valor de $R=4.5$, la norma chilena 2009, considera un valor de $R\approx 4$, la norma venezolana 2001, considera un valor de $R=4.5$. El código ecuatoriano 2002 tiene un valor de $R=12$ y la norma peruana E030 considera $R=7$.

La variabilidad de los factores de R se debe a las combinaciones de carga en cada norma, a la deriva máxima de piso, la forma como se obtienen la deriva, el tipo de espectro de diseño y las propiedades de los materiales considerados (Aguiar, 2003)

La mayoría de los códigos de diseño sísmico incluyen el factor de reducción sísmica R para un diseño elástico, y así, facilitar el cálculo y diseño. El factor R indica la capacidad de la estructura para disipar la energía sísmica. Sin embargo, al no existir un procedimiento único para su estimación y determinación ha conllevado a realizar investigaciones y estudios.

Recientes estudios se han enfocado en estructuras de varios pisos, donde se ha demostrado que los altos modos de participación afectan el factor de reducción R. Como resultado, estos estudios han propuesto reducir los Múltiples grados de libertad a un solo grado de libertad corregido por un factor α . Es importante destacar que el factor R no depende únicamente del sistema estructural y/o del material, sino que también está influenciado por el periodo de vibración de la estructura. En la ecuación de diseño, R se define como el producto del factor de reducción por ductilidad, el factor de sobre resistencia, y el factor de diseño, es decir, $R = R_{\mu} \cdot \Omega \cdot Y$. (Gerami et al., 2017)

2.1 Marco Teórico

2.1.1. Modelos de Histéresis

Los modelos de histéresis son de importancia para el cálculo de la demanda sísmica, estos modelos reflejan el comportamiento del sistema estructural ante el acelerogramas. Las respuestas de los sistemas pueden variar para diferentes modelos y parámetros usados, para mejores estimaciones de comportamiento estos modelos deben ser ajustados a los resultados obtenidos en laboratorio.

Los muros estructurales son elementos que frecuentemente son aplicados en edificaciones de categoría A2 para el control del desplazamiento lateral. Por lo tanto, la demanda sísmica para estas edificaciones debe ser obtenida por modelos

histeréticos que represente a estos muros. En la tabla N°2.1 se muestran los diferentes modelos histeréticos.

Tabla 1

Modelo de Histéresis

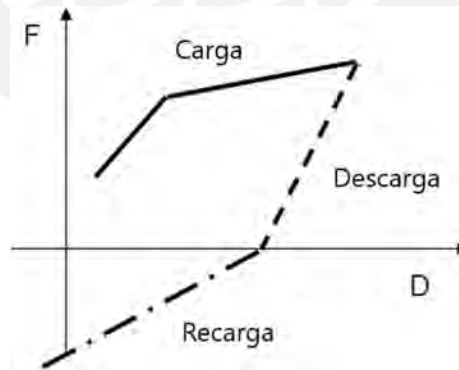
MODELO HISTÉRESIS	OPCIONES							Número Parámetros Histéresis
	Bilineal	Trilineal	Tensión Compresión	Degradación Rigidez	Deterioro Resistencia	Deslizamiento, Pinching	Ablandamiento (Softening)	
Elastoplástico	■			■				1
Takeda	■						■	2
Clough Modificado	■			■				1
Gamma	■				■			2
Modelo Q	■		■					2

Fuente: Propia

Los modelos considerados para el estudio y comparación serán el modelo bilineal y el modelo γ . Estos modelos son sencillos y pueden aplicarse a muros estructurales. Las etapas de un modelo histerético constan de tres fases: carga, descarga y recarga, como se muestra en la siguiente figura.

Figura 2

Etapas de carga en modelos histeréticos



2.1.1.2 Modelo elastoplástico.

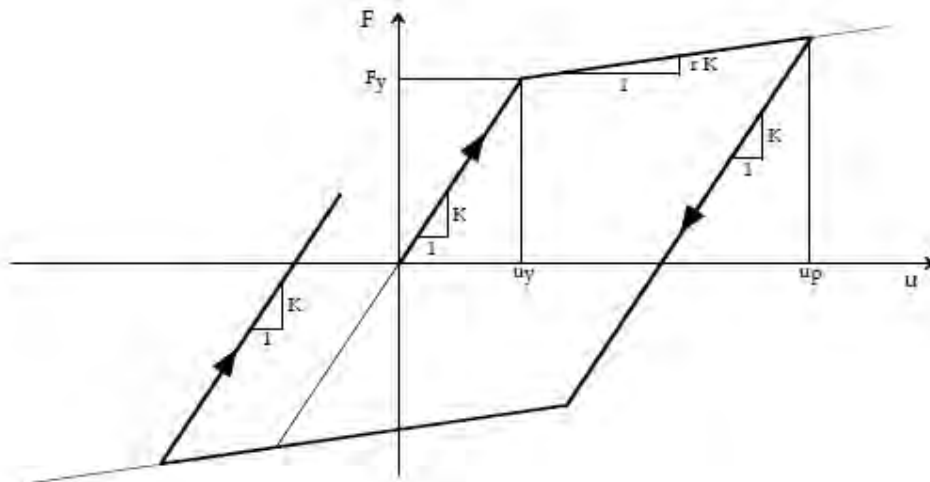
El modelo elastoplástico, llamado también modelo bilineal, mostrado en la figura 2. Usado principalmente para materiales elastoplásticos como el acero. Sin embargo, este modelo es muy usado para todo tipo de materiales por su simplicidad.

La gráfica de esfuerzo deformación del modelo elastoplástico es especificado por tres parámetros: La elasticidad del material (E), esfuerzo de fluencia (f_y) y la elasticidad del material después de la fluencia expresado como una porción (rE) de la rigidez. (Lestuzzi & Badoux, 2003).

La respuesta del sistema se mantendrá en la línea elástica del modelo mientras no se haya superado el esfuerzo de fluencia del sistema (f_y). Una vez que se supera el esfuerzo de fluencia, la respuesta del sistema se desplaza a lo largo de la línea plástica hasta que se descargue el sistema. Durante la descarga, el sistema se moverá de manera paralela a la línea elástica.

Figura 3

Modelo Elastoplástico



Fuente: Lestuzzi & Badoux, 2003

2.1.1.2. Modelo Gamma (γ)

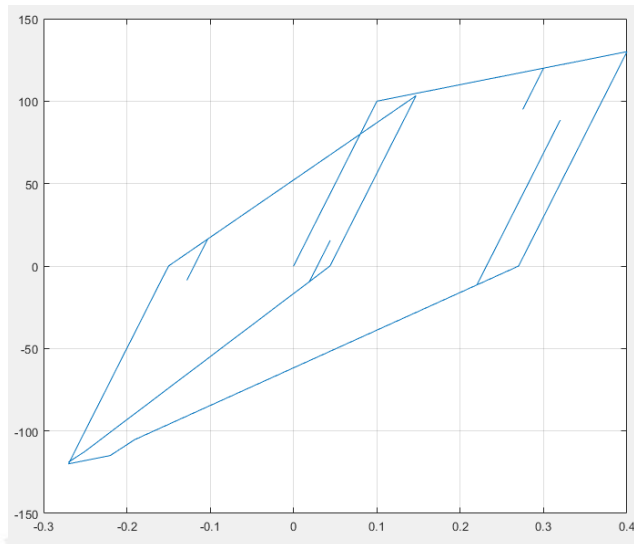
El modelo Gamma (γ) deriva de la modificación del modelo elastoplástico para la línea de recarga, lo cual será modificado por un parámetro γ .

Cuando el sistema no ha superado la fluencia en la carga, seguido por la descarga paralela a la elasticidad del material, la recarga se dirigirá a la fluencia reducida por γ . Por otro lado, si el sistema no ha superado el esfuerzo de fluencia durante la carga y sigue con una descarga a lo largo de la línea elástica del material, la recarga se dirigirá al esfuerzo máximo previamente alcanzado (Lestuzzi & Badoux, 2003)

Se programó el modelo gamma en el programa Matlab, considerando las reglas propias del modelo.

Figura 4

Modelo de Histéresis Gamma γ



2.2 Metodología de Trabajo

Para el desarrollo del proyecto se han revisado artículos de los últimos años sobre el factor de reducción sísmica para estructuras de diferentes materiales (acero, concreto y albañilería).

La metodología empleada en el proyecto es de forma secuencial.

2.2.1 Análisis elástico con OPENSEES

Para los análisis no lineales estáticos y tiempo historia es necesario contar con estructuras definidas como: Geometría, propiedades de los materiales y cuantías de refuerzo. En ese sentido, la realización del análisis lineal elástico antecederá a los análisis no lineales, de forma que podamos definir el número de estructuras duales y sus propiedades principales que intervendrán posteriormente.

En este trabajo, los análisis lineales elásticos para las estructuras preseleccionadas con diferentes configuraciones superan a los 800 análisis lineales elásticos, por consiguiente, el uso del programa libre OPENSEES es apropiado, ya que permitirá realizar análisis masivos a través del lenguaje de programación Tool Comand Language (TCL).

Para esta sección se consideraron los siguientes apartados:

- a. Selección de estructuras para el análisis. Al llevar a cabo el análisis elástico de las estructuras, se seleccionaron aquellas que cumplen con la deriva máxima permitida para el concreto armado (0.007). También se incluyeron aquellas estructuras donde la fuerza cortante basal en los muros de corte se encuentra en el rango del 20% al 80%, tal como lo indica la norma E030 y E060. (MVCS, 2018)

- b. Selección del espectro de Diseño. Los análisis se realiza para la zona costa del Perú (zona 4) y suelo intermedio S2 (MVCS, 2018)
- c. Diseño de concreto armado. Una vez seleccionado las estructuras se procede al diseño en concreto armado teniendo como base la norma E060.

2.2.2 Respuesta sísmica no lineal para sistemas con un grado de libertad (1GDL)

En esta sección se dan por concluidos los análisis lineales elásticos y se disponen de las propiedades principales de las estructuras seleccionadas, tales como el periodo fundamental, la fuerza cortante de diseño y la masa total. Además, se incluyen los modelos de histéresis que serán considerados en el proyecto. Para la obtención de las respuestas sísmicas no lineales se utilizará el programa MATLAB.

- a. Selección de registros sísmicos y valores de objetivos de ductilidad.
- b. Elección de sistemas equivalentes con un solo grado de libertad (1GDL)
- c. Análisis no lineal tiempo historia para los sistemas 1GDL y obtención del máximo desplazamiento.
- d. Con la rigidez elástica y la resistencia de fluencia obtenemos el desplazamiento de fluencia. Luego, calculamos la ductilidad del sistema 1GDL y comparamos con la ductilidad objetivo. Repetimos los pasos anteriores variando la fuerza de fluencia hasta que la ductilidad calculada sea igual a la ductilidad objetivo.
- e. Concluido el paso d, determinamos la fuerza cortante inelástica asociado al máximo desplazamiento para el sistema 1GDL seleccionado. Asimismo, calculamos el factor $R_{\mu_{1GDL}}$.
- f. Repetimos todos los pasos anteriores para diferentes ductilidades objetivos.

2.2.3 Análisis no lineal estático

El análisis no lineal estático se realizará para todas las estructuras seleccionadas con sistemas de múltiples grados de libertad y se obtendrá los siguientes resultados:

- a. La curva de capacidad
- b. Representación bilineal de la curva de capacidad y obtención del desplazamiento de fluencia (ΔY_{VGDL}).
- c. Asimismo, de la curva de capacidad obtendremos el factor de reducción por sobre resistencia R_{Ω} y factor de reducción por diseño R_Y

2.2.4 Factor de modificación α_{VGDL}

El factor de modificación α_{VGDL} es la relación de fuerza cortante para el sistema con múltiples grados de libertad (V_{VGDL}) y la fuerza cortante para el sistema con un solo grado de libertad (V_{1GDL}), ambos calculados para la misma ductilidad.

Para su obtención se deberá seguir los siguientes pasos:

- a. Seleccionar los registros sísmicos y valores objetivos de ductilidad.
- b. Realizar el análisis no lineal tiempo historia para el sistema VDGL y calcular el desplazamiento máximo.
- c. Con los resultados del análisis no lineal estático (desplazamiento de fluencia) calculamos la ductilidad μ_{VGDL} .
- d. Si la ductilidad calculada en el paso c es similar o igual a la ductilidad objetiva entonces determinamos la fuerza cortante inelástica V_{VGDL} . Repetimos los pasos anteriores hasta que la ductilidad objetivo y la ductilidad calculada sean iguales o similares.
- e. Teniendo la fuerza cortante V_{VGDL} y V_{1GDL} , relacionamos ambos valores y obtenemos α_{VGDL} .
 - a. Repetimos todos los pasos anteriores para diferentes ductilidades objetivos.

2.2.5 Estimación del factor de reducción de fuerzas sísmicas

La estimación del Factor R es el producto de 3 parámetros: Ductilidad ($R\mu_{VGDL}$), Sobre resistencia ($R\Omega$) y Resistencia de diseño (RY). Habiendo calculado todos los factores anteriores se procede a estimar el factor de reducción de fuerzas sísmicas.

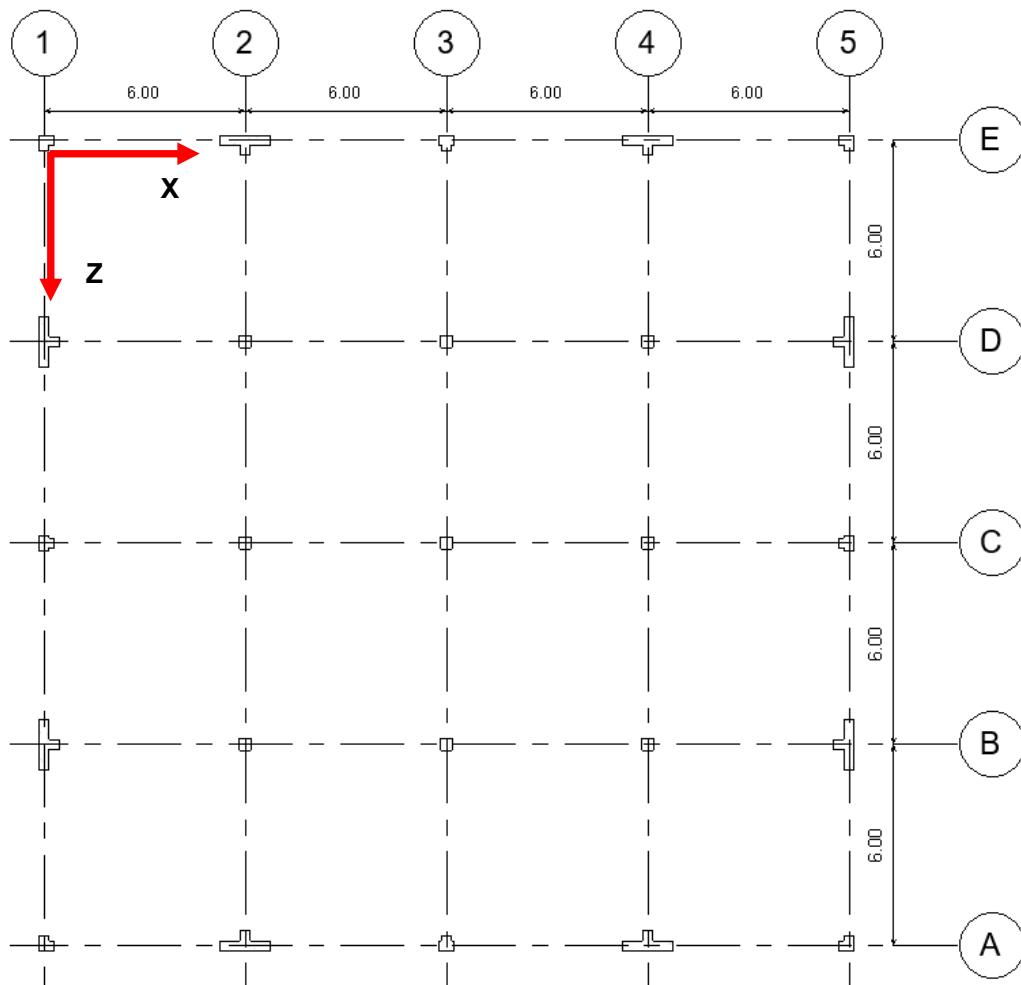
Capítulo III: Análisis elástico con OPENSEES

3.1. Selección de estructuras Duales

Para la selección de las estructuras realizaremos combinaciones de parámetros como número de pisos o Niveles (N), número de vanos (V), número de muros (M) y longitud de muros (LM). El parámetro piso variará de 1 a 3 pisos, los números de vanos variarán de 3 a 8, mientras, los números de muros de 2 a 5 y las longitudes de muros de 1.00 m, 1.25 m, 1.50 m, 1.75 m, 2.00 m, 2.25 m, 2.50 m, 2.75 m y 3.00 m. Los nombres de las estructuras estarán conformados por los parámetros asignados, por ejemplo, E2N4V2M150LM. El nombre de la estructura indica que tiene 2 niveles, 4 vanos, 2 muro y 1.50m de longitud de muro.

Figura 5

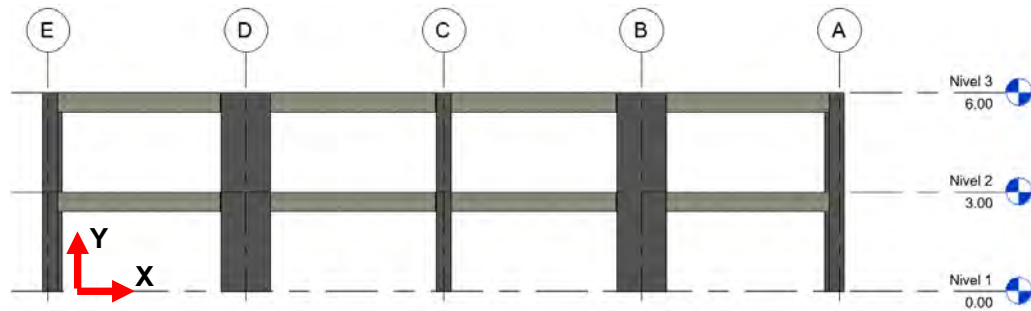
Estructura E2N4V2M150LM – Vista planta



Asimismo, los ejes globales para la modelación en OPENSEES se consideró los ejes X y Z definen la planta; y el eje Y, define la altura de los niveles o pisos. Para todas las estructuras la distancia entre los ejes es 6m.

Figura 6

Ejes Globales – Vista Elevación



La configuración estructural de cada estructura obedece a la distribución de muros de corte en el perímetro de la estructura como se muestra en la figura N°3.1 Las secciones de las columnas, las vigas y losas aligeradas fueron pre dimensionado siguiendo los criterios indicados en el libro de concreto armado (Morales, 2004). Las columnas centrales serán asignadas como columnas C1, las columnas laterales en la dirección X o eje A y E columnas C2, las columnas laterales en la dirección Z o eje 1 y 5 columnas C3, por último, las columnas esquineras serán designados como columnas C4. Los muros de corte en la dirección X fueron designados como Mx y de manera similar los muros en la dirección Z, Mz.

Las cargas asignadas a las estructuras como carga muerta: peso propio, piso terminado 100 kgf/m², acabados y otros 50 kgf/m² y peso de tabiquería 100 kgf/m². La carga viva o sobrecarga de 300 kgf/m² y sobrecarga en azotea 100 kgf/m².

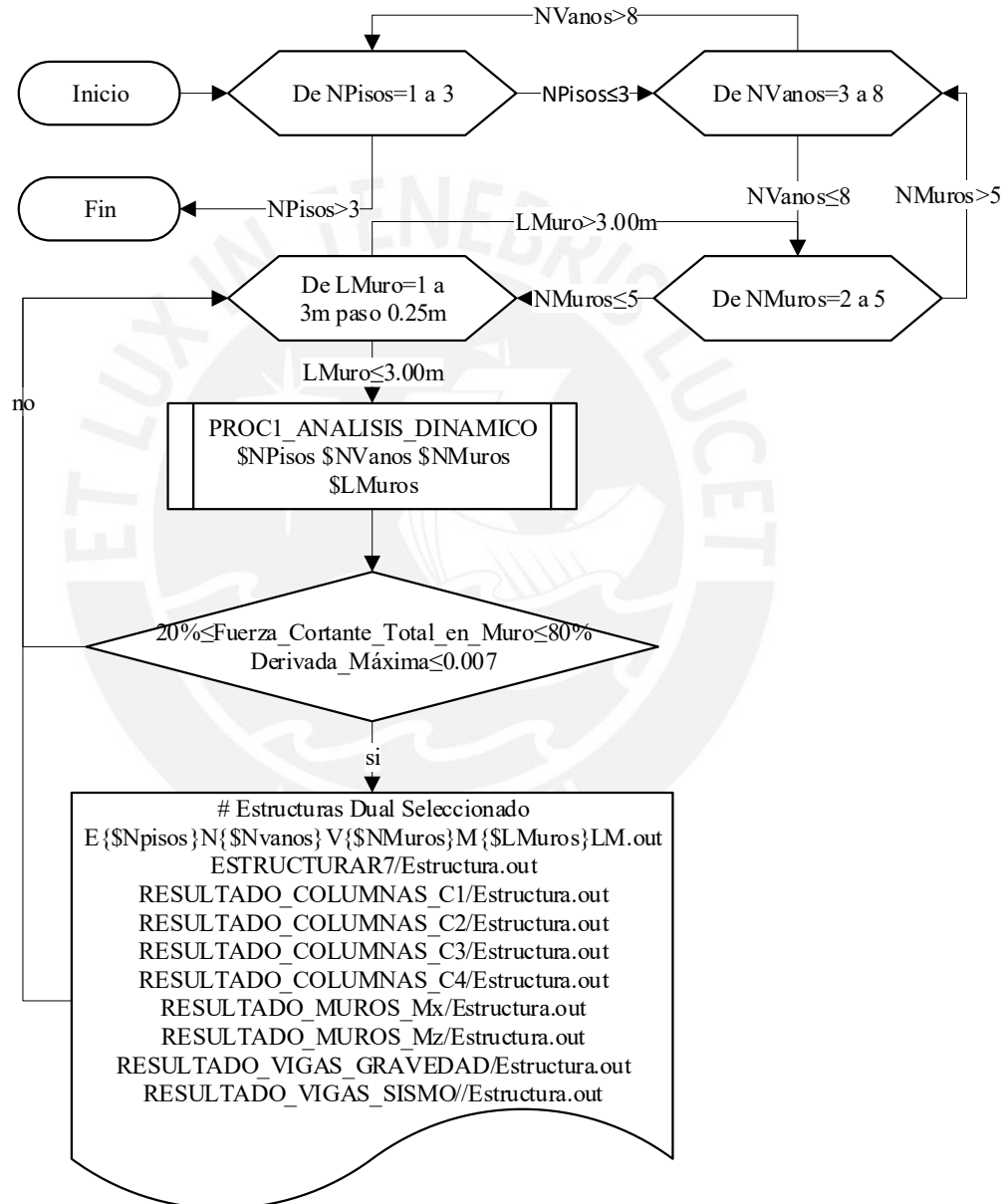
Respecto a la definición de materiales para el concreto armado se consideró: esfuerzo a la compresión $f'c=210$ kgf/cm² y módulo de elasticidad para el concreto $15000(f'c)^{0.5}$, para el acero de refuerzo $Fy=4200$ kgf/cm² como esfuerzo a la fluencia y 2000000 kgf/cm² como elasticidad del acero.

Teniendo presente las definiciones anteriores combinaremos los parámetros (Niveles, vanos, cantidad de muros y longitudes de muros) para seleccionar a las estructuras que cumplan los requisitos mínimos de nuestra norma peruana E030. Estos requisitos principales son la fuerza cortante que toma los muros de corte y el desplazamiento lateral relativo admisible, así como precisa el artículo 16 y 32 de la norma peruana E030 (MVCS, 2018)

Las fuerzas cortantes tomadas por los muros de corte deben estar comprendidas entre 20% y 80% del cortante en la base del edificio y la deriva máxima permisible en la estructura será de 0.007. Todas las estructuras seleccionadas son regulares en planta y altura por las configuraciones asignadas.

Figura 7

Diagrama de Flujo Selección de estructuras en OPENSEES



Las estructuras duales seleccionadas de un nivel son 39 estructuras, el periodo de estas estructuras varían de 0.1199s a 0.2463s. Mientras, las estructuras de 2 niveles son 23 y presentan periodos comprendidos entre 0.2519s a 0.3173s. Y, las estructuras con 3 niveles son 12 y sus periodos están comprendidos entre 0.3393s a 0.3656s.

Para el cálculo de las masas se consideró el 100% de la carga muerta, 50% de la carga viva y 25% de la carga viva en azotea. Estas masas calculadas y los periodos correspondientes se emplearán en los análisis no lineales tiempo historia para las estructuras reducidas a sistemas de un solo grado de libertad.

Los desplazamientos máximos inelásticos fueron calculados multiplicando por $0.75R$ los resultados obtenidos del análisis lineal elástico con las sollicitaciones sísmicas reducidas. El valor de R seleccionado para los análisis elásticos fue 7 correspondiente a sistemas duales.

La deriva máxima se calculó dividiendo el máximo desplazamiento de entrepiso y la altura de entrepiso. En las estructuras de un solo nivel la deriva máxima es 6.06 % (6 por mil), mientras, la mínima deriva es 1.44. Las estructuras de 2 niveles presentan derivas comprendidas entre 4.53 a 6.66. Finalmente, las estructuras de 3 niveles presentan derivas entre 6.02 y 6.98.

El porcentaje de fuerza cortante que toman los muros en las estructuras de un nivel está comprendido entre 31.66% y 79.67%. Los muros de corte de las estructuras de dos niveles toman la fuerza cortante entre 56.72% y 79.65%, mientras que las estructuras de tres niveles la fuerza cortante tomada por los muros esta entre 74.14% y 79.95%.

Tabla 2

Estructuras Duales de un Nivel

OPENSEES (ELÁSTICO) - Según Norma E030								
N°	ESTRUCTURA	T (seg)	Masa Total tonf.seg ² /m	Δmax_Inel (m)	Deriva Max.	Vtotal (tonf)	FCM (%)	T (seg) Fiber
1	E1N4V2M100LM	0.1682	44.6099	0.0016	2.83	100.54	56.40	0.3830
2	E1N4V2M125LM	0.1422	44.9844	0.0012	2.02	101.4	67.78	0.3270
3	E1N4V2M150LM	0.1199	45.3588	0.0008	1.44	102.24	76.41	0.2838
4	E1N5V2M100LM	0.1926	68.5176	0.0021	3.71	154.44	48.45	0.4397
5	E1N5V2M125LM	0.166	68.8921	0.0016	2.75	155.28	60.71	0.3823
6	E1N5V2M150LM	0.142	69.2665	0.0012	2.02	156.11	70.59	0.3358
7	E1N5V2M175LM	0.1216	69.6409	0.0008	1.48	156.97	78.00	0.2934
8	E1N6V2M100LM	0.2134	97.6126	0.0026	4.55	220.02	41.72	0.4882
9	E1N6V2M125LM	0.1872	97.987	0.002	3.5	220.85	54.24	0.4314
10	E1N6V2M150LM	0.1624	98.3615	0.0015	2.64	221.7	64.96	0.3832
11	E1N6V2M175LM	0.1404	98.7359	0.0011	1.97	222.53	73.36	0.3381
12	E1N6V2M200LM	0.1218	99.1104	0.0008	1.48	223.4	79.67	0.2993
13	E1N6V3M100LM	0.1971	98.0245	0.0022	3.88	220.94	52.42	0.4475
14	E1N6V3M125LM	0.168	98.5861	0.0016	2.82	222.22	64.40	0.3854
15	E1N6V3M150LM	0.1424	99.1478	0.0012	2.03	223.47	73.73	0.3362
16	E1N7V2M100LM	0.2311	131.8949	0.003	5.34	297.29	36.21	0.5293
17	E1N7V2M125LM	0.2058	132.2693	0.0024	4.23	298.12	48.58	0.4744
18	E1N7V2M150LM	0.1809	132.6437	0.0019	3.27	298.98	59.74	0.4260
19	E1N7V2M175LM	0.1579	133.0182	0.0014	2.49	299.8	68.88	0.3792
20	E1N7V2M200LM	0.1379	133.3926	0.0011	1.9	300.65	75.96	0.3380
21	E1N7V3M100LM	0.2153	132.3067	0.0026	4.63	298.21	46.57	0.4899
22	E1N7V3M125LM	0.1863	132.8684	0.002	3.47	299.47	59.04	0.4278
23	E1N7V3M150LM	0.1598	133.4301	0.0015	2.55	300.73	69.22	0.3768
24	E1N7V3M175LM	0.1371	133.9917	0.0011	1.88	302.03	76.93	0.3300
25	E1N8V2M100LM	0.2463	171.3644	0.0035	6.06	386.25	31.66	0.5512
26	E1N8V2M125LM	0.2222	171.7388	0.0028	4.93	387.08	43.61	0.5119
27	E1N8V2M150LM	0.1975	172.1133	0.0022	3.9	387.92	54.92	0.4642
28	E1N8V2M175LM	0.1742	172.4877	0.0017	3.03	388.8	64.57	0.4169
29	E1N8V2M200LM	0.1532	172.8621	0.0013	2.34	389.63	72.30	0.3742
30	E1N8V2M225LM	0.135	173.2366	0.001	1.82	390.48	78.26	0.3365
31	E1N8V3M100LM	0.2312	171.7763	0.0031	5.34	387.17	41.56	0.5268
32	E1N8V3M125LM	0.2028	172.3379	0.0023	4.11	388.43	54.15	0.4659
33	E1N8V3M150LM	0.1759	172.8996	0.0018	3.09	389.7	64.91	0.4141
34	E1N8V3M175LM	0.1521	173.4613	0.0013	2.31	390.98	73.35	0.3653
35	E1N8V3M200LM	0.1318	174.0229	0.001	1.74	392.24	79.67	0.3235
36	E1N8V4M100LM	0.219	172.1882	0.0027	4.79	388.09	48.95	0.4967
37	E1N8V4M125LM	0.1882	172.937	0.002	3.54	389.78	61.31	0.4313
38	E1N8V4M150LM	0.1606	173.6859	0.0015	2.58	391.49	71.19	0.3782
39	E1N8V4M175LM	0.1371	174.4348	0.0011	1.88	393.16	78.54	0.3301

Tabla 3

Estructuras Duales de 2 y 3 Niveles

OPENSEES (ELÁSTICO) - Según Norma E030								
N°	ESTRUCTURA	T (seg)	Masa Total tonf.seg ² /m	Δmax_Inel (m)	Deriva Max.	Vtotal (tonf)	FCM (%)	T (seg) Fiber
40	E2N4V2M100LM	0.3074	102.0918	0.0066	5.87	232.97	56.72	0.7152
41	E2N4V2M125LM	0.2783	103.1711	0.0054	5.22	235.99	68.11	0.6502
42	E2N4V2M150LM	0.2519	104.2503	0.0044	4.53	238.9	76.14	0.5973
43	E2N5V2M125LM	0.3121	157.4547	0.0068	6.37	359.82	60.75	0.6885
44	E2N5V2M150LM	0.2859	158.534	0.0057	5.69	362.98	70.04	0.6401
45	E2N5V2M175LM	0.2613	159.6132	0.0048	4.96	366	76.80	0.6263
46	E2N6V2M150LM	0.3147	224.5703	0.0069	6.73	513.79	64.30	0.6311
47	E2N6V2M175LM	0.2905	225.6496	0.0059	6.01	517.09	71.94	0.5752
48	E2N6V2M200LM	0.2673	226.7288	0.005	5.26	520.17	77.69	0.5833
49	E2N6V3M125LM	0.3173	225.2179	0.007	6.66	514.85	63.59	0.6973
50	E2N6V3M150LM	0.2895	226.8368	0.0059	5.9	519.56	72.37	0.6450
51	E2N6V3M175LM	0.2635	228.4557	0.0049	5.09	524.02	78.69	0.6306
52	E2N7V2M175LM	0.3152	303.4387	0.0069	6.94	694.89	67.35	0.6336
53	E2N7V2M200LM	0.2923	304.5179	0.006	6.2	698.23	73.74	0.5826
54	E2N7V2M225LM	0.2704	305.5972	0.0051	5.45	701.39	78.67	0.5405
55	E2N7V3M150LM	0.3139	304.6259	0.0069	6.79	697.26	67.66	0.6232
56	E2N7V3M175LM	0.2882	306.2448	0.0058	5.99	702.06	74.76	0.6191
57	E2N8V2M225LM	0.2925	395.139	0.006	6.29	906.49	75.37	0.4936
58	E2N8V2M250LM	0.2717	396.2183	0.0052	5.55	909.68	79.65	0.4787
59	E2N8V3M175LM	0.3096	395.7866	0.0067	6.8	906.79	70.98	0.6155
60	E2N8V3M200LM	0.2854	397.4055	0.0057	5.98	911.6	76.84	0.5627
61	E2N8V4M150LM	0.3169	396.4341	0.007	6.96	907.62	69.05	0.6262
62	E2N8V4M175LM	0.2902	398.5927	0.0059	6.11	913.92	75.90	0.6221
63	E3N4V2M175LM	0.35	164.277	0.009	6.44	377.91	75.03	0.8166
64	E3N5V2M200LM	0.3623	250.642	0.0097	6.89	576.76	74.14	0.7538
65	E3N5V2M225LM	0.3393	252.4408	0.0086	6.02	581.6	78.92	0.7466
66	E3N6V2M250LM	0.349	357.1704	0.0091	6.35	823.03	78.25	0.7131
67	E3N6V3M200LM	0.3628	359.149	0.0097	6.9	826.68	75.32	0.8077
68	E3N6V3M225LM	0.3393	361.8472	0.0086	6.01	833.9	79.93	0.7447
69	E3N7V2M275LM	0.3552	480.2645	0.0094	6.57	1106.88	77.97	0.6279
70	E3N7V3M225LM	0.3651	483.1425	0.0099	6.97	1112.54	75.80	0.7589
71	E3N7V3M250LM	0.3432	485.8407	0.0088	6.13	1119.91	79.95	0.6961
72	E3N8V2M300LM	0.359	621.7231	0.0096	6.7	1433.07	77.93	0.6507
73	E3N8V3M250LM	0.3656	625.5005	0.0099	6.98	1440.86	76.43	0.6551
74	E3N8V4M225LM	0.3655	629.278	0.0099	6.98	1449.29	76.37	0.7586

Donde: N° (posición de la estructura), Estructura (codificación de la estructura), T (periodo en segundos), Masa Total (en tonf.seg²/m), Δmax_Inel (Máximo desplazamiento inelástico en m), deriva Max (deriva máxima), Vtotal (Cortante total de Diseño en tonf), FCM % (Porcentaje fuerza cortante tomado por los muros de corte), T (seg) Fiber (Periodo de las estructuras modeladas con elementos fiber de OPENSEES)

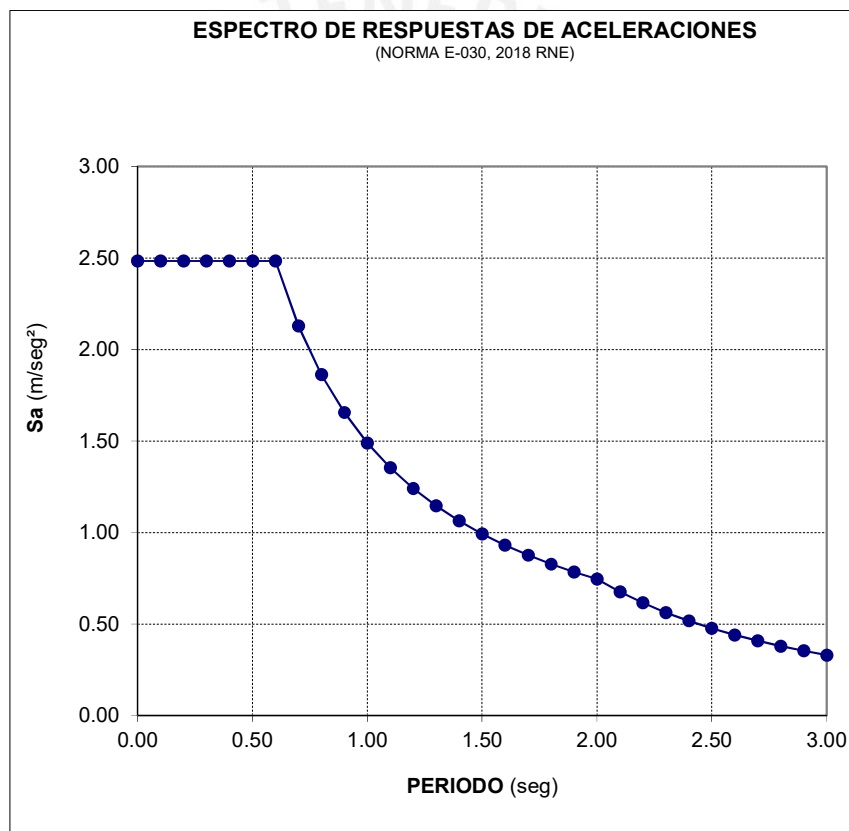
3.2. Selección del espectro de respuesta de aceleraciones

Para el análisis modal espectral se ha seleccionado los siguientes factores: Factor zona 4 $Z=0.45$, factor uso $U=1.5$ y parámetros de sitio para suelo intermedio $S_2=1.05$ $T_p(s)=0.6$ y $T_L(s)=2.0$. Con estos factores se construye el espectro de respuesta de aceleraciones que estarán sometidos las estructuras seleccionadas.

Por la simetría que presenta la estructura en la dirección X y Z el espectro de respuesta se consideró igual. Por lo tanto, el análisis modal espectral se realizó únicamente en la dirección X, siendo los elementos resistentes las vigas paralelas al eje X y los muros de corte Mx principalmente.

Figura 8

Espectro de respuesta de aceleraciones



3.3. Diseño en Concreto Armado

Obtenido los resultados de los análisis lineales elásticos el siguiente paso importante es definir la cantidad de refuerzo, diseño en concreto armado para las vigas, columnas y muros de corte, ya que estos elementos intervendrán en los análisis no lineales. Para tal fin, el diseño de los elementos estructurales para las 74 estructuras se emplearán diagramas momentos curvatura con carga axial $P=0$ para las vigas y $P \neq 0$ para columnas y muros de corte.

3.3.1 Diseño de vigas

Las vigas principales de todas las estructuras fueron diseñadas empleando momento curvatura con carga axial $P=0$. La programación fue realizada OPENSEES y las consideraciones principales para el diseño en concreto armado de las vigas fueron:

- Se verificó el área de acero mínima y área de acero máximo.
- Espacio libre mínimo entre las varillas longitudinales de 2.54cm. En caso que el área de acero no cumpla en una capa, el área de acero se distribuirá en dos capas.
- Los diámetros de aceros empleados fueron de $\varnothing 3/4$ " y $\varnothing 1$ "

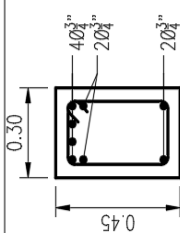
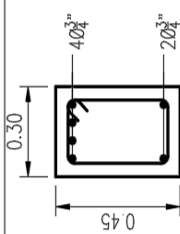
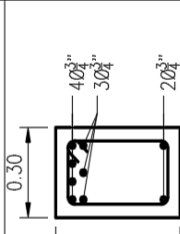
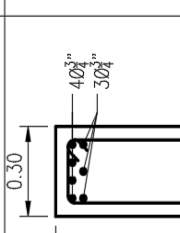
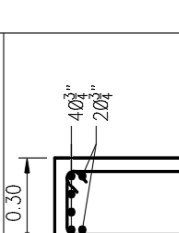
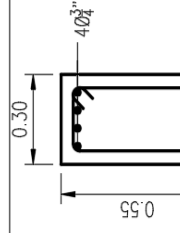
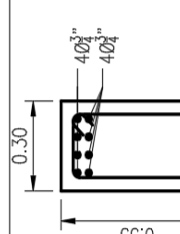
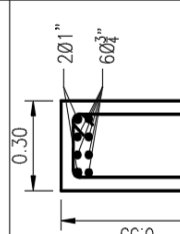
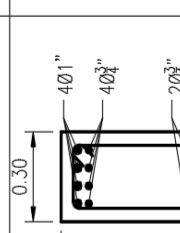
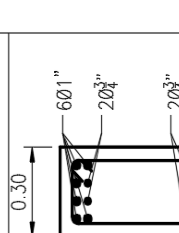
Para el diseño de concreto armado de todas las vigas se generó 18 secciones para el momento negativo (SEC_SUP(i)) y 18 secciones para el momento positivo (SEC_INF(i)). Todas las secciones cumplen el área de acero mínimo y posteriormente formando la sección completa (SEC_SUP(i), SEC_INF(i)) se verificará el área de acero máximo. Estas secciones se encuentran almacenadas en el archivo DATA2_SECCIONES_VIGAS.tcl.

Para ingresar al programa principal debemos contar con las siguientes carpetas provenientes del análisis lineal elástico: ESTRUCTURASR7, la carpeta contiene 74 archivos con nombres de las estructuras y cada archivo contiene las dimensiones de las vigas (ancho \$BVig y peralte \$HVig); RESULTADO_VIGAS_GRAVEDAD, RESULTADO_VIGAS_SISMO, cada una de las carpetas contienen 74 archivos con nombres de las estructuras y cada archivo contiene las fuerzas actuantes en los 6 grados de libertad de la viga, de donde obtendremos los momentos positivos y negativos. También es necesario contar el procedimiento PROC7_MOMENTO_CURVATURA_VIGAS.tcl antes de ingresar al programa principal.

El programa principal almacena en la carpeta DISENO_VIGAS el código de la sección, la forma de distribución de acero (SEC_SUP(i), SEC_INF(i)) que verifican ante las fuerzas actuantes. En la carpeta DATA_SECCIONES se almacena las secciones de las vigas con comandos propio de OPENSEES, asimismo, la información necesaria para el concreto confinado (uniaxialMaterial ConfinedConcrete01). Estos archivos generados son: SECCIONES_VIGA y SECCIONES_VIGAZ. Estos archivos posteriormente son cargados en los análisis no lineales.

Tabla 4

Distribución de acero en Vigas Principales

CUADRO DE VIGAS					
FIBER	8001	8002	8003	8004	8005
GJ	2190.7397	2190.7397	2190.7397	3001.7185	3001.7185
SECCIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE REFUERZOS EN VIGAS					
ØLONGITUDINAL	803/4"	603/4"	903/4"	903/4"	803/4"
ØESTRIBOS	1□ Ø3/8": 1@0.05, 9@0.10, Rsto@0.20 a/e	1□ Ø3/8": 1@0.05, 9@0.10, Rsto@0.20 a/e	1□ Ø3/8": 1@0.05, 9@0.10, Rsto@0.20 a/e	1□ Ø3/8": 1@0.05, 11@0.10, Rsto@0.25 a/e	1□ Ø3/8": 1@0.05, 11@0.10, Rsto@0.25 a/e
FIBER	8006	8007	8008	8009	8010
GJ	3001.7185	3001.7185	3001.7185	3001.7185	3001.7185
SECCIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE REFUERZOS EN VIGAS					
ØLONGITUDINAL	603/4"	1003/4"	803/4" + 2Ø1"	1003/4" + 4Ø1"	803/4" + 6Ø1"
ØESTRIBOS	1□ Ø3/8": 1@0.05, 11@0.10, Rsto@0.25 a/e	1□ Ø3/8": 1@0.05, 11@0.10, Rsto@0.25 a/e	1□ Ø3/8": 1@0.05, 11@0.10, Rsto@0.25 a/e	1□ Ø3/8": 1@0.05, 11@0.10, Rsto@0.25 a/e	1□ Ø3/8": 1@0.05, 11@0.10, Rsto@0.25 a/e

3.3.2 Diseño de columnas

El diseño en concreto armado de las columnas C1, C2, C3 y C4 se realizaron por medio del momento curvatura con cargas axiales $P \neq 0$. Las principales verificaciones programadas en OPENSEES fueron los siguientes.

- Se verificó el área de acero mínima y área de acero máximo.
- Espacio libre mínimo entre las varillas longitudinales de 4cm.
- Concentrar el área de acero en los extremos de las secciones y así generar mayor momento nominal M_n .
- Los diámetros de aceros empleados fueron de $\varnothing 5/8$ ", $\varnothing 3/4$ " y $\varnothing 1$ "

Para ingresar al programa principal debemos contar con las siguientes carpetas provenientes del análisis lineal elástico: ESTRUCTURASR7, la carpeta contiene 74 archivos con nombres de las estructuras y cada archivo contiene las dimensiones de las columnas (lado H_{col} y ancho B_{col}); RESULTADO_COLUMNA_C1, RESULTADO_COLUMNA_C2, RESULTADO_COLUMNA_C3, RESULTADO_COLUMNA_C4, cada una de las carpetas contienen 74 archivos con nombres de las estructuras y cada archivo contiene las fuerzas actuantes en los 6 grados de libertad de la columna, de donde obtendremos los momentos y carga axial según la dirección de análisis de la sección.

Asimismo, los programas principales contienen subrutinas llamado en OPENSEES procedimientos, estos procedimientos son:

PROC1_MOMENTO_CURVATURA_COL_CUADRADAS.tcl,
PROC2_MOMENTO_CURVATURA_COL_TEE_ALA.tcl,
PROC3_MOMENTO_CURVATURA_COL_TEE_ALMAP.tcl,
PROC4_MOMENTO_CURVATURA_COL_TEE_ALMAN.tcl,
PROC5_MOMENTO_CURVATURA_COL_ELEP.tcl, y
PROC6_MOMENTO_CURVATURA_COL_ELEN.tcl. Estos procedimientos serán aplicados según el tipo de columna.

El programa principal almacena el código de la sección que cumple las fuerzas actuantes, la forma de distribución de los aceros longitudinales y el tamaño de los aceros longitudinales. Las carpetas de almacenamiento son:

DISENO_COLUMNS_C1, DISENO_COLUMNS_C2 y
DISENO_COLUMNS_C4.

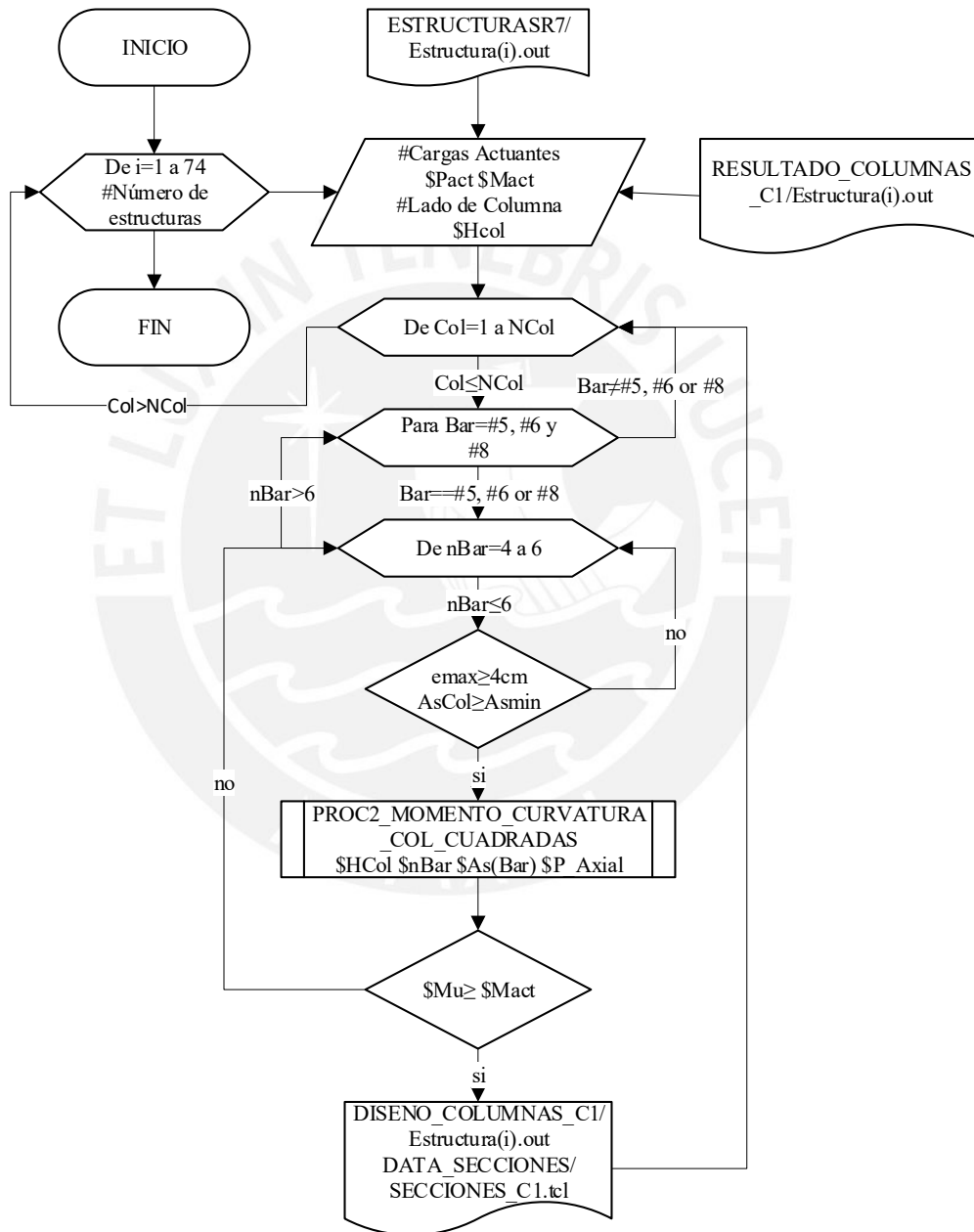
En la carpeta DATA_SECCIONES se almacena las secciones de las columnas según los comandos propios de OPENSEES, también, la información necesaria para el concreto confinado (uniaxialMaterial ConfinedConcrete01). Estos archivos generados son: SECCIONES_C1.tcl, SECCIONES_C2.tcl y

SECCIONES_C4. para las columnas C1, C2, y C4 respectivamente. Estos archivos posteriormente son cargados en los análisis no lineales.

A continuación, mostraremos los diagramas de flujo para el diseño en concreto armado para las columnas.

Figura 10

Diagrama de Flujo Diseño de Columnas C1

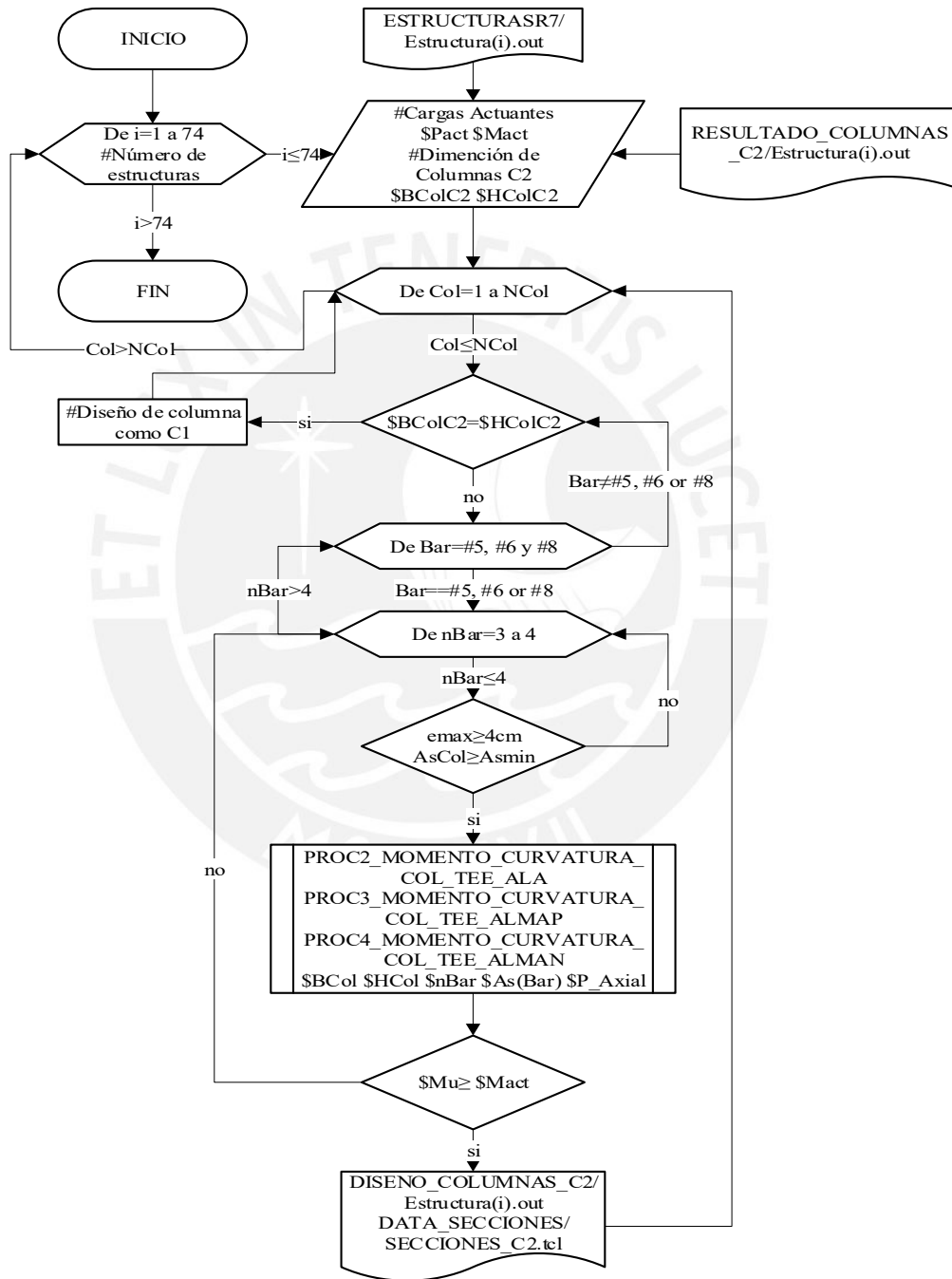


El criterio de distribución del reforzamiento longitudinal para las columnas centrales C1 (sección cuadrada) fue distribuir las barras acero en todo el perímetro, de tal forma que el momento resistente sean iguales en sus dos ejes principales.

Las verificaciones del momento ultimo resistente (M_u) y el momento actuante (M_{act}) es iterativo, iniciando con aceros de 4Ø5/8" o 4#5 a cada extremo hasta 6Ø1" o 6#8.

Figura 11

Diagrama de Flujo Diseño de Columna C2



A diferencia del diseño de columnas C1, para el diseño de las columnas C2 (columnas Tee) de deben realizar verificaciones cuando el alma se comprime conjuntamente con el ala y cuando la misma se tracciona.

El diseño de las columnas C3 son similares a las columnas C2.

Figura 12

Diagrama de Flujo N° 0.1 Diseño de Columna C4

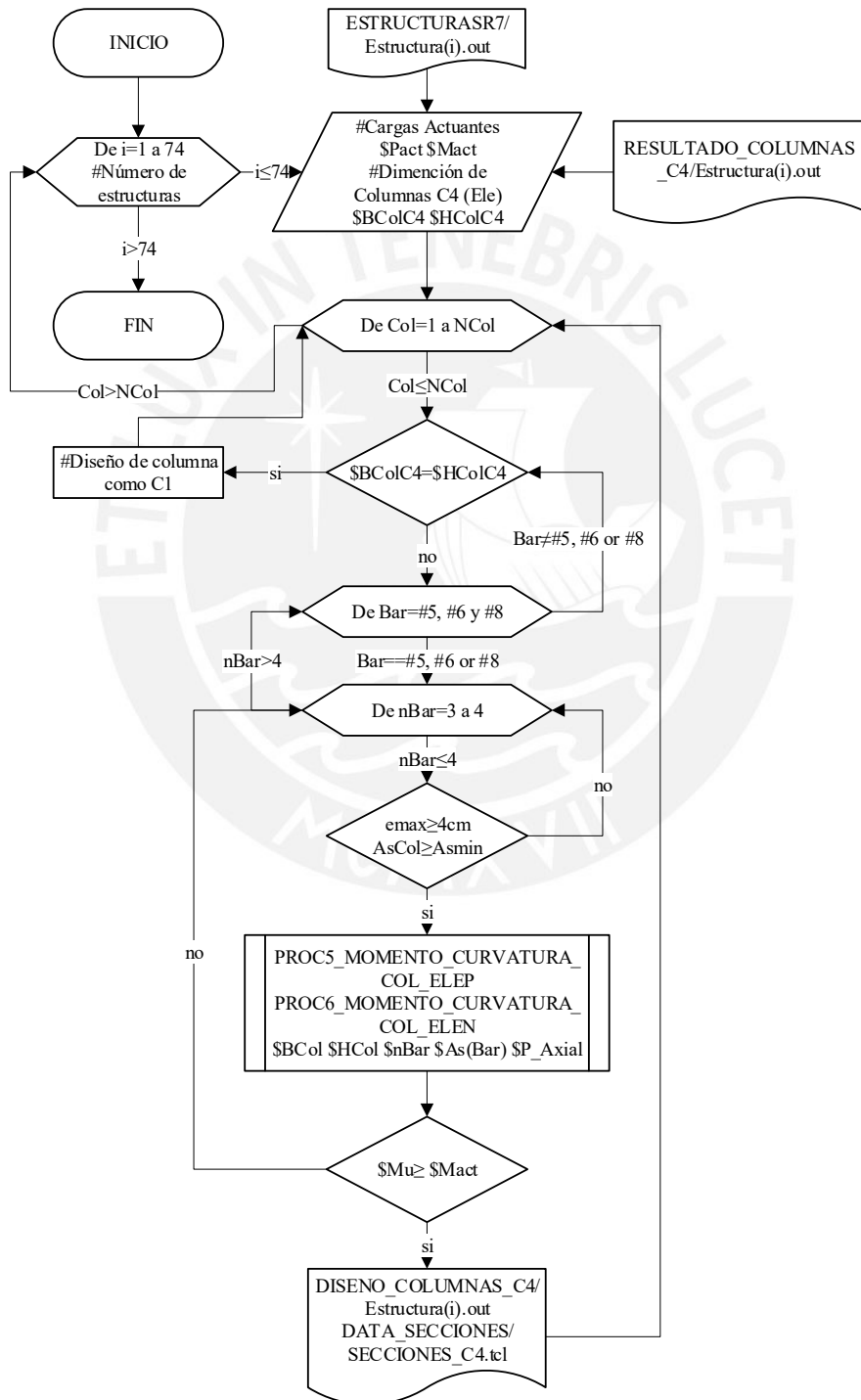


Tabla 5

Distribución de acero en Columnas C1

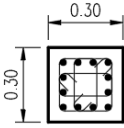
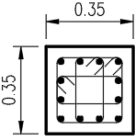
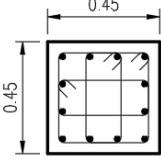
COLUMNAS C1			
FIBER	1001	1002	1003
GJ	1048.7896	1943.0122	5309.4973
SECCIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE REFUERZOS EN COLUMNAS			
ØLONGITUDINAL	12Ø5/8"	12Ø5/8"	12Ø5/8"
ØESTRIBOS	1[] Ø3/8": 1@0.05, 5@0.10, Rsto@0.25 a/e	1[] Ø3/8": 1@0.05, 5@0.10, Rsto@0.25 a/e	1[] Ø3/8": 1@0.05, 5@0.10, Rsto@0.25 a/e

Tabla 6

Distribución de acero en Columnas C2

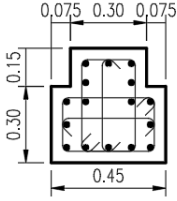
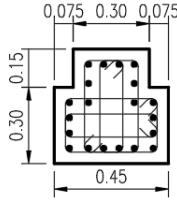
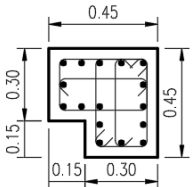
COLUMNAS C2		
FIBER	2001	2002
GJ	2404.0029	2404.0029
SECCIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE REFUERZOS EN COLUMNAS		
ØLONGITUDINAL	16Ø5/8"	20Ø5/8"
ØESTRIBOS	1[] Ø3/8": 1@0.05, 5@0.10, Rsto@0.25 a/e	1[] Ø3/8": 1@0.05, 5@0.10, Rsto@0.25 a/e

Tabla 7

Distribución de acero en Columnas C4

COLUMNAS C4	
FIBER	4001
GJ	2404.0029
SECCIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE REFUERZOS EN COLUMNAS	
ØLONGITUDINAL	16Ø5/8"
ØESTRIBOS	1[] Ø3/8": 1@0.05, 5@0.10, Rsto@0.25 a/e

3.3.3 Diseño de muros de corte

El diseño en concreto armado de los muros de corte Mx y Mz se realizaron por medio del momento curvatura con cargas axiales $P \neq 0$ y concentrando los aceros de refuerzo en los bordes de confinamiento. Para el diseño de los muros de corte se consideró el capítulo 21 de la norma E060 primordialmente el cálculo del borde de confinamiento. Las principales verificaciones programadas en OPENSEES fueron los siguientes.

- Se verificó el área de acero mínimo en los bordes de confinamiento.
- Espacio libre mínimo entre las varillas longitudinales de 4cm en los bordes de confinamiento.
- Cálculo del borde de confinamiento acorde al ítem 21.9.7 de la norma E060.
- Para el alma de los muros de corte se utilizó varillas de $\varnothing 1/2''$ con cuantía de 0.0025.

El confinamiento en los bordes de los muros con los aceros de refuerzo transversal será con $\varnothing 3/8'' @ 0.10\text{cm}$

Para ingresar al programa principal debemos contar con las siguientes carpetas provenientes del análisis lineal elástico: ESTRUCTURASR7, la carpeta contiene 74 archivos con nombres de las estructuras y cada archivo contiene las dimensiones de los muro de corte (ancho \$Bm, Alto \$Hm y Largo \$Lm); RESULTADO_MUROS_Mx y RESULTADO_MUROS_Mz, cada una de las carpetas contienen 74 archivos con nombres de las estructuras y cada archivo contiene las fuerzas actuantes en los 6 grados de libertad del muro, de donde obtendremos los momentos y carga axial según la dirección de análisis de la sección.

También, el programa principal contiene los procedimientos siguientes:
PROC8_MOMENTO_CURVATURA_MURO1.tcl,
PROC9_MOMENTO_CURVATURA_MURO2.tcl, y
PROC10_MOMENTO_CURVATURA_MURO3.tcl,

El programa principal almacena la carpeta DISEÑO_MUROS_Mx el código de la sección que cumple las fuerzas actuantes, la forma de distribución de los aceros longitudinales y el tamaño de los aceros longitudinales.

En la carpeta DATA_SECCIONES se almacena las secciones de los muros de corte según los comandos propios de OPENSEES, también, la información necesaria para el concreto confinado (uniaxialMaterial ConfinedConcrete01). El archivo generado es SECCIONES_MX.tcl.

Las características del muro de corte (geometría y reforzamiento) es igual para todos los muros de corte en la estructura en análisis.

Figura 13

Diagrama de Flujo Diseño de muro de corte

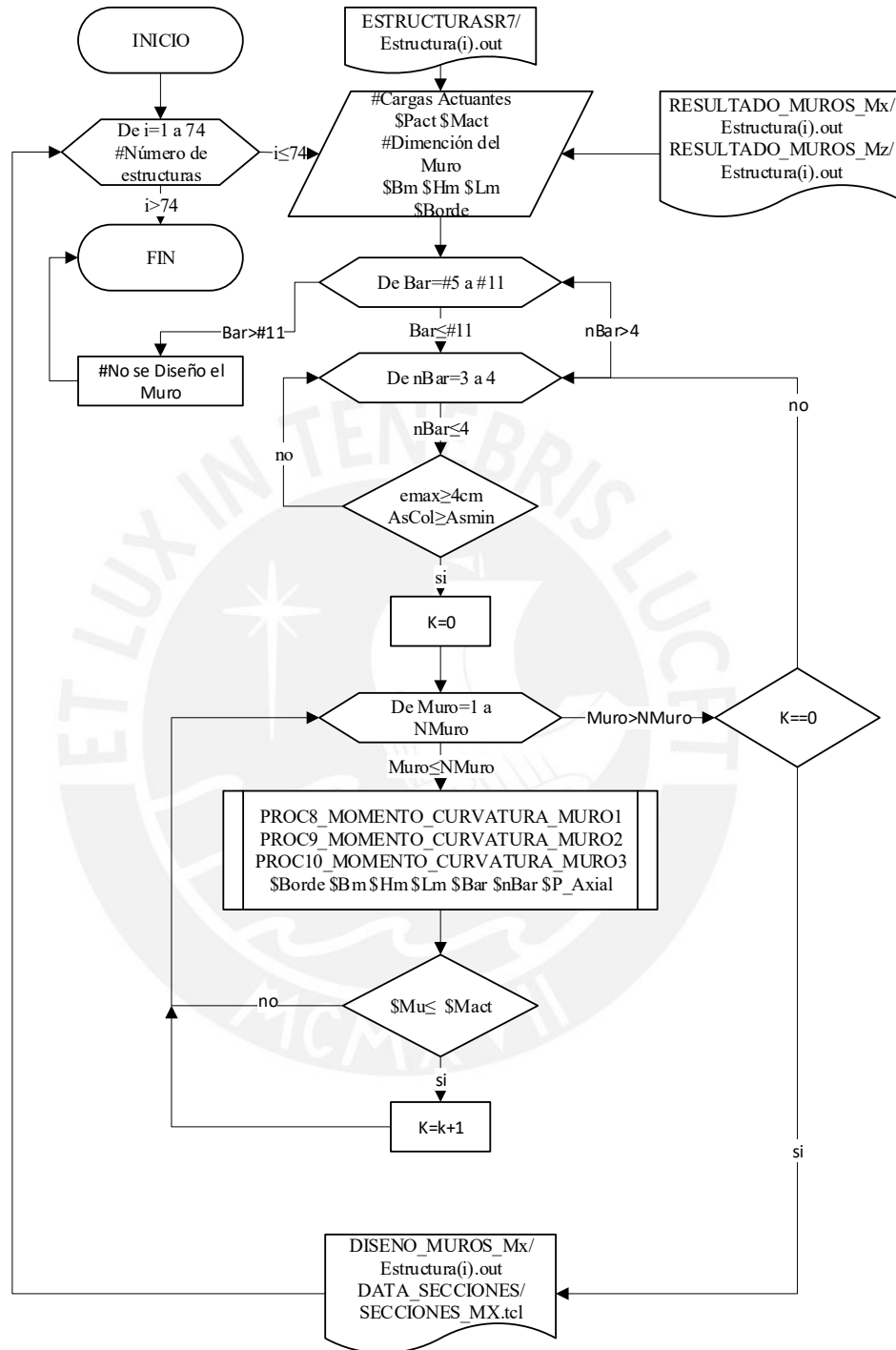


Tabla 8

Distribución de acero en muros de corte Mx y Mz

MUROS DE CORTE			
FIBER	6001	6002	6003
GJ	6935.5651	9007.8729	11080.2566
SECCIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE REFUERZOS EN MUROS			
FIBER	6004	6005	
GJ	13152.6458	15225.0355	
SECCIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE REFUERZOS EN MUROS			
FIBER	6006	6007	
GJ	17297.4252	9007.8729	
SECCIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE REFUERZOS EN MUROS			
FIBER	6008	6009	6010
GJ	11080.2566	11080.2566	13152.6458
SECCIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE REFUERZOS EN MUROS			
FIBER	6011		6012
GJ	15225.0355		15225.0355
SECCIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE REFUERZOS EN MUROS			
FIBER	6013		6014
GJ	17297.4252		13152.6458
SECCIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE REFUERZOS EN MUROS			

FIBER	6015	6016
GJ	17297.4252	19369.8148
SECCIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE REFUERZOS EN MUROS		
FIBER	6017	6018
GJ	13152.6458	15225.0355
SECCIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE REFUERZOS EN MUROS		
FIBER	6019	6020
GJ	17297.4252	19369.8148
SECCIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE REFUERZOS EN MUROS		
FIBER	6021	6022
GJ	15225.0355	21442.2045
SECCIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE REFUERZOS EN MUROS		
FIBER	6023	6024
GJ	17297.4252	23514.5942
SECCIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE REFUERZOS EN MUROS		
FIBER	6025	
GJ	19369.8148	
SECCIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE REFUERZOS EN MUROS		

Capítulo IV: Respuesta sísmica no lineal para sistemas con un grado de libertad

El objetivo principal del presente capítulo es calcular los factores de reducción por ductilidad ($R\mu$) y la cortante máxima inelástica (V_{1GDL}) para sistemas de un solo grado de libertad.

El cálculo se realizará para las 74 estructuras duales previamente seleccionadas, considerando los registros sísmicos y ductilidades objetivos de 2, 3 y 4. En el análisis se considerará un sistema equivalente de VGDL a 1GDL, tomando las propiedades principales de periodo (T) y masa (M).

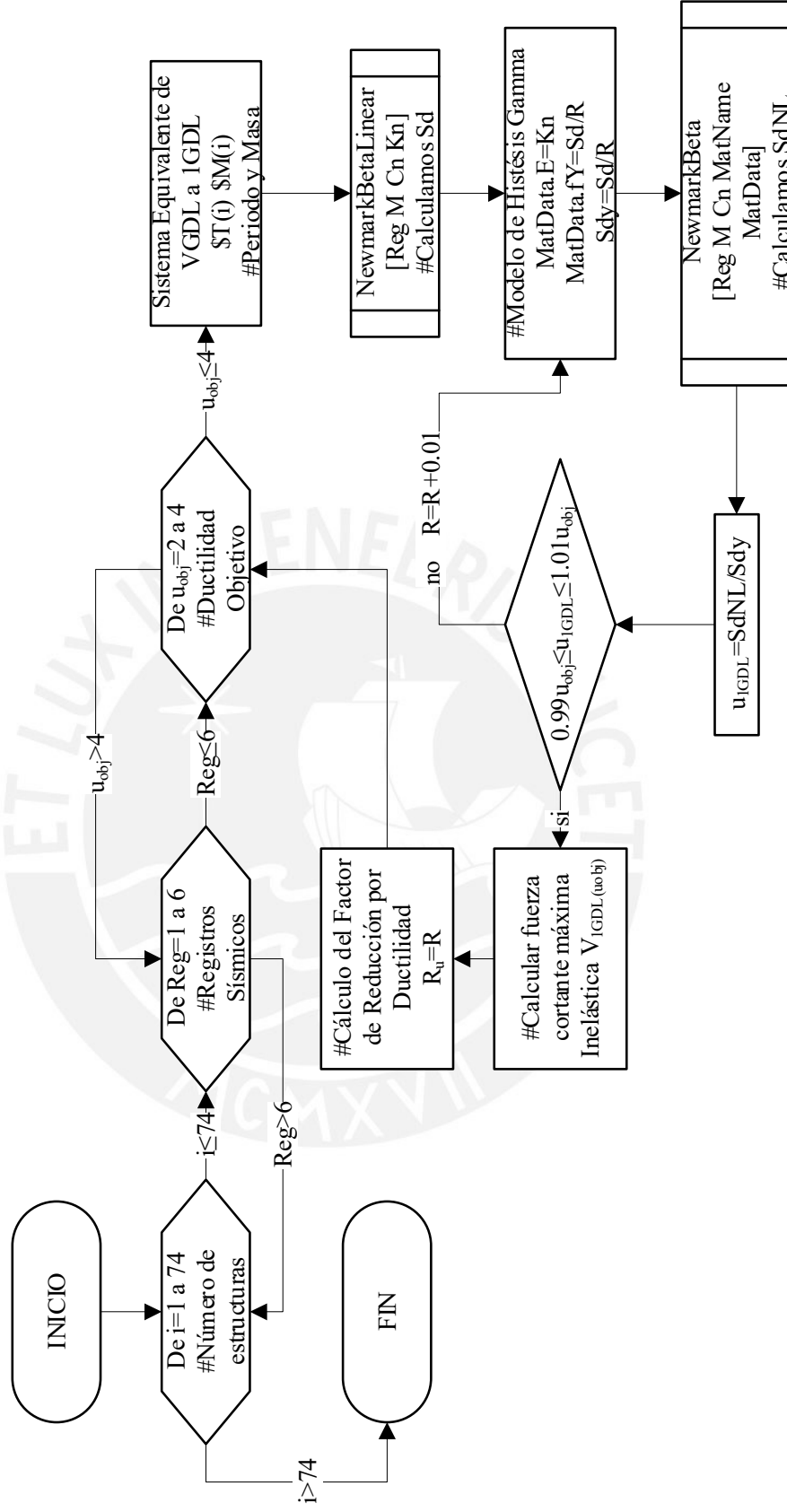
Una vez obtenido el sistema equivalente se someterá al análisis tiempo historial con material lineal (NewmarkBetaLinear), luego, someteremos el sistema al análisis tiempo historia no lineal (NewmarkBeta) usando un modelo de histéresis gamma propio para muros de corte. En los resultados obtenidos buscamos las ductilidades objetivas y las fuerzas de corte máxima inelástica.

La programación principal, funciones, modelo de histéresis fue realizado en MATLAB. Los análisis tiempo historia Lineal y no lineal fue elaborado por el profesor Rodrigo Carreño de la universidad de California San Diego cuyos programas formaron parte del curso de Dinámica Estructural en la Pontificia universidad católica del Perú (PUCP). Las modificaciones e implementaciones de modelo de histéresis gamma forman parte del desarrollo de tesis.

El siguiente diagrama de flujo muestra la secuencia de cálculo del factor $R\mu_{1GDL}$ y V_{1GDL}

Figura 14

Diagrama de Flujo Cálculo del factor de reducción por ductilidad Ru



4.1 Selección de registros sísmicos y ductilidad objetivo

La selección de registros sísmicos es de vital importancia en los análisis no lineales tiempo historia donde influye el tipo y el número de los registros de aceleración. Normalmente, la selección de estos registros apunta a que los sismos tengan un rango de contenido de frecuencias adecuado a los alrededores del dominio de interés (Burgos Namuche, 2007)

Tabla 9

Sismos peruanos

FECHA	DENOMINACIÓN	COMPONENTE	DATA	PGA	PGA (g)	M	OBS
31-ene-51	1639 GCT-N82W	HORIZONTAL	1478	-60.44	0.06	5.0	
31-ene-51	1639 GCT-NO8W	HORIZONTAL	1480	45.70	0.05	5.0	
17-oct-66	N82W	HORIZONTAL	3283	-180.59	0.18	7.5	NTE 030
17-oct-66	NO8E	HORIZONTAL	3282	-269.34	0.27	7.5	NTE 030
31-may-70	Huaraz	HORIZONTAL	2259	-104.82	0.11	7.7	NTE 030
31-may-70	Huaraz	HORIZONTAL	2259	-97.75	0.10	7.7	NTE 030
29-nov-71	N82W	HORIZONTAL	2010	53.55	0.05	5.3	
29-nov-71	NO8E	HORIZONTAL	2010	86.54	0.09	5.3	
05-ene-74	N82W	HORIZONTAL	1804	66.76	0.07	6.6	
05-ene-74	NO8E	HORIZONTAL	1804	-72.28	0.07	6.6	
05-ene-74	ZARATE L	HORIZONTAL	1641	-139.59	0.14	6.6	
05-ene-74	ZARATE V	HORIZONTAL	1642	-156.18	0.16	6.6	
03-oct-74	1421 GCT NO8E (Lima)	HORIZONTAL	4899	178.95	0.18	7.5	NTE 030
03-oct-74	1421 GCT N82W (Lima)	HORIZONTAL	4899	-192.49	0.20	7.5	NTE 030
03-oct-74	1421 GCT N82W HUACO (Lima)	HORIZONTAL	4879	192.35	0.20	7.5	
03-oct-74	1421 GCT HUACO (Lima)	HORIZONTAL	4879	-207.12	0.21	7.5	
09-nov-74		HORIZONTAL	2392	46.21	0.05	6.2	
09-nov-74		HORIZONTAL	2391	-69.21	0.07	6.2	
09-nov-74	LA MOLINA	HORIZONTAL	1972	-116.78	0.12	6.2	
09-nov-74	LA MOLINA	HORIZONTAL	1971	-93.71	0.10	6.2	

12-nov-96	Nazca (Estación Camacho)	HORIZONTAL	6207	539.90	0.55	7.5
12-nov-96	Nazca (Estación Camacho)	HORIZONTAL	6207	539.90	0.55	7.5

Fuente: CISMID

Siendo el interés del proyecto la estimación del factor de reducción de fuerzas sísmicas, emplearemos los registros considerados para la elaboración de la norma E030, de tal forma que los resultados obtenidos guarden relación con el espectro de respuesta de aceleración considerados en el análisis lineal elástico de las estructuras duales.

Tabla 10

Registros Seleccionados

FECHA	DENOMINACIÓN	COMPONENTE	DATA	PGA	PGA (g)	M
17-oct-66	N82W	HORIZONTAL	3283	-180.59	0.18	7.5
17-oct-66	NO8E	HORIZONTAL	3282	-269.34	0.27	7.5
31-may-70	Huaraz	HORIZONTAL	2259	-104.82	0.11	7.7
31-may-70	Huaraz	HORIZONTAL	2259	-97.75	0.10	7.7
03-oct-74	1421 GCT NO8E (Lima)	HORIZONTAL	4899	178.95	0.18	7.5
03-oct-74	1421 GCT N82W (Lima)	HORIZONTAL	4899	-192.49	0.20	7.5

Fuente: CISMID

Para facilidad de programación en lenguaje TCL los registros serán nombrados como RegistroN1.tcl (1966_PQR_EW), RegistroN2.tcl (1966_PQR_NS), RegistroN3.tcl (1970_PQR_EW), RegistroN4.tcl (1970_PQR_NS), RegistroN5.tcl (1974_Oct_PQR_EW) y RegistroN6.tcl (1974_Oct_PQR_NS).

La ductilidad en estructuras con periodos menores a 0.4s fueron de 2, 3 y 4, mientras que para periodos superiores a 0.4s la ductilidad alcanza hasta 10 (Riddell, Hidalgo, & Cruz, 1989). Por lo tanto, tomando en consideración estudios anteriores iniciaremos con ductilidades objetivos $\mu=2$, $\mu=3$ y $\mu=4$. En todas las etapas del proyecto se tendrá presente estas ductilidades.

4.2 Sistema equivalente de VGDL a 1GDL

Las 74 estructuras duales previamente seleccionados serán transformados a un sistema equivalente de 1GDL. Las propiedades de este sistema equivalente 1GDL son: el peso total del sistema equivalente 1GDL es igual al peso total del sistema de VGDL, el periodo fundamental y el amortiguamiento del sistema equivalente 1GDL es igual a las propiedades del primer modo del sistema de VGDL (Gerami et al., 2017)

Al tratarse de estructuras de periodos cortos la influencia por los altos modos de vibración no influirán en la estimación del factor R del presente proyecto.

4.3 Programación de modelos de histéresis en MATLAB

Para la estimación de demanda de ductilidad para muros de corte se programó el modelo de histéresis gamma (γ) para los análisis no lineales en sistemas 1GDL, se aplicó las reglas de cargas, descarga y recarga según (Lestuzzi & Badoux, 2003)

La programación fue realizada en MATLAB, el programa inicia con el ingreso de datos del material: F_y (Fuerza de fluencia del material), E_{Mat} (Elasticidad del material), r (factor para post fluencia), gam (parámetro empírico varía entre 0 a 1).

MATLAB permite estructuras sobre estructuras y fueron aplicadas en la programación, las principales estructuras realizadas fueron State.Past y State.Pres los cuales almacenan datos y matrices de forma organizada. La estructura State.Past almacena resultados de la última corrida, mientras, la estructura State.Pres almacena resultados actuales y extrayendo resultados de ambas estructuras aplicamos las reglas de carga, descarga y recarga.

Los puntos importantes en el modelo gamma son: MxPts (Puntos máximos), F_y Pts (Puntos de fluencia), RevPts (Puntos de descargas), GmPts (Puntos de fluencia reducido γF_y). Estos puntos se van actualizando de acuerdo al desplazamiento del sistema.

Un factor importante para el desarrollo del modelo gamma es identificar el movimiento entre los cuadrantes. Se identificó todos los movimientos posibles que puede darse en el sistema: Dentro del primer cuadrante (1C), 2C, 3C y 4C, asimismo, también se puede desplazar del 1C al 4C, 4C al 3C, 3C al 2C y 2C al 1C. Y en todos los posibles desplazamientos existe la posibilidad de carga, descarga y recarga.

Figura 15

Diagrama de Flujo N° 0.1 Modelo Gamma y – Parte I

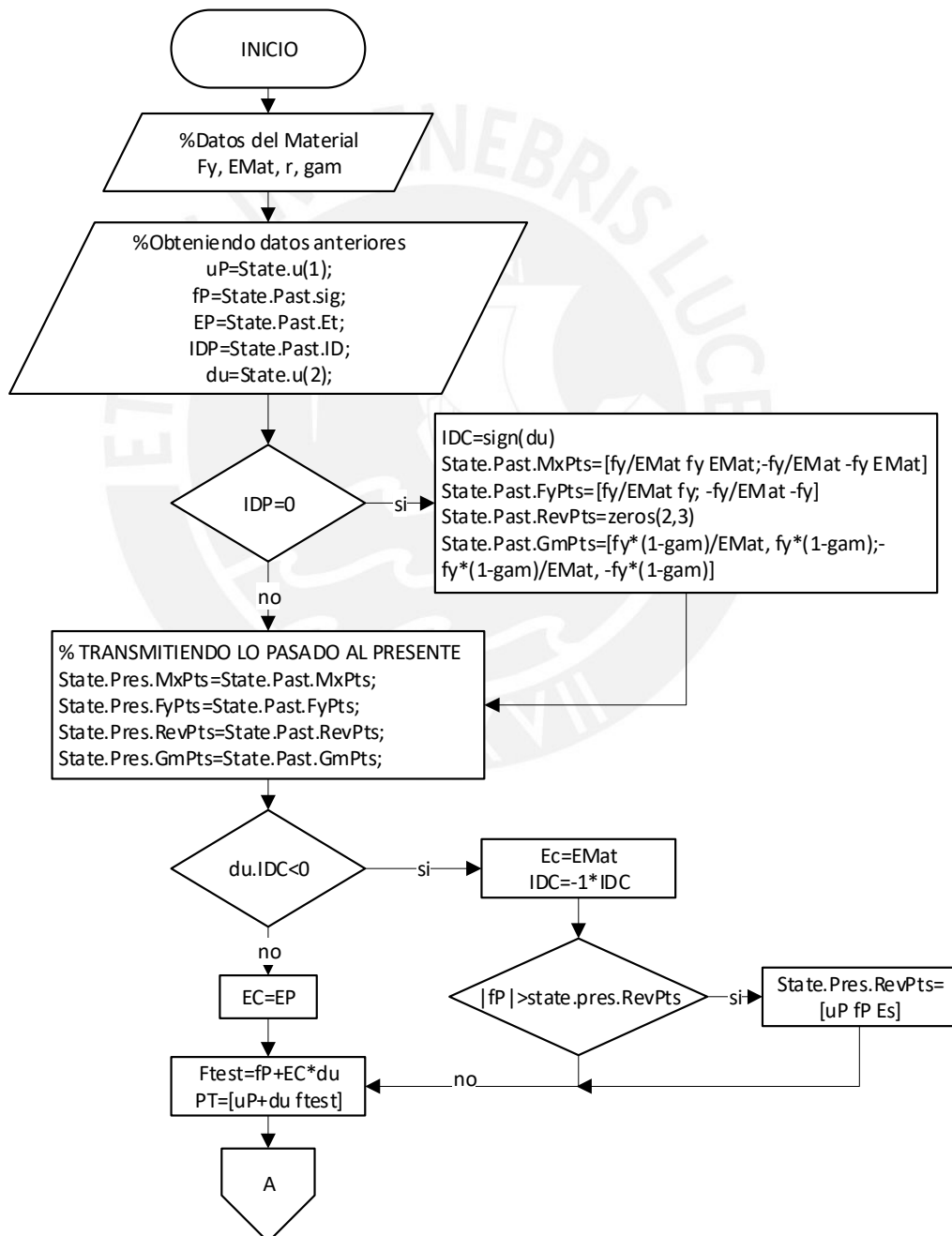


Figura 16

Diagrama de Flujo N° 0.2 Modelo Gamma γ – Parte II

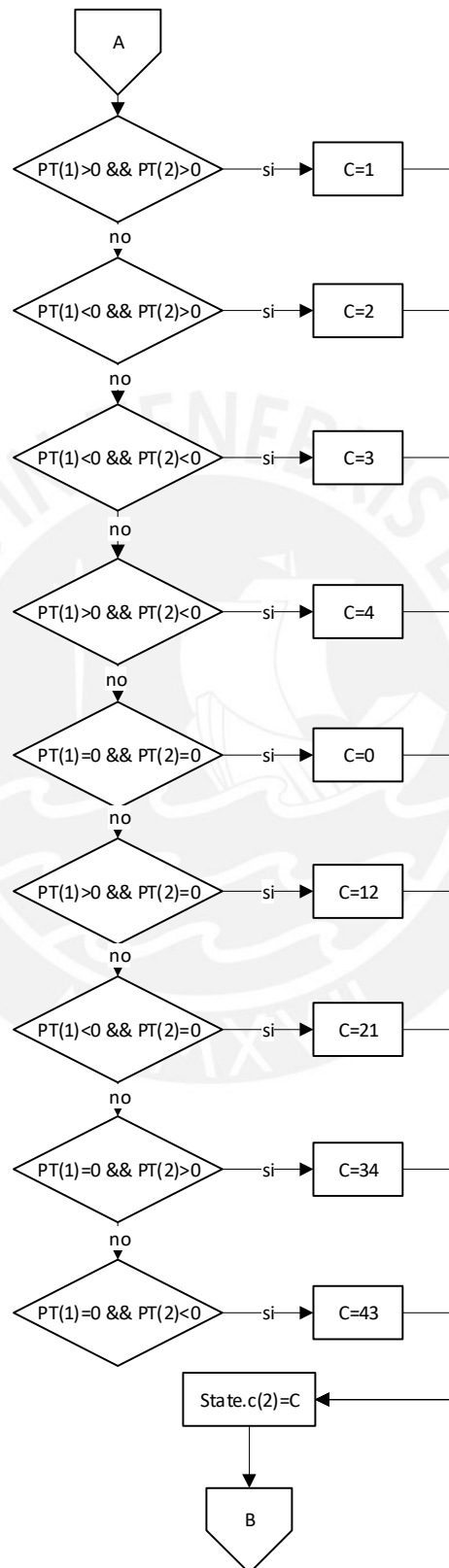


Figura 17

Diagrama de Flujo N° 0.3 Modelo Gamma y – Parte III

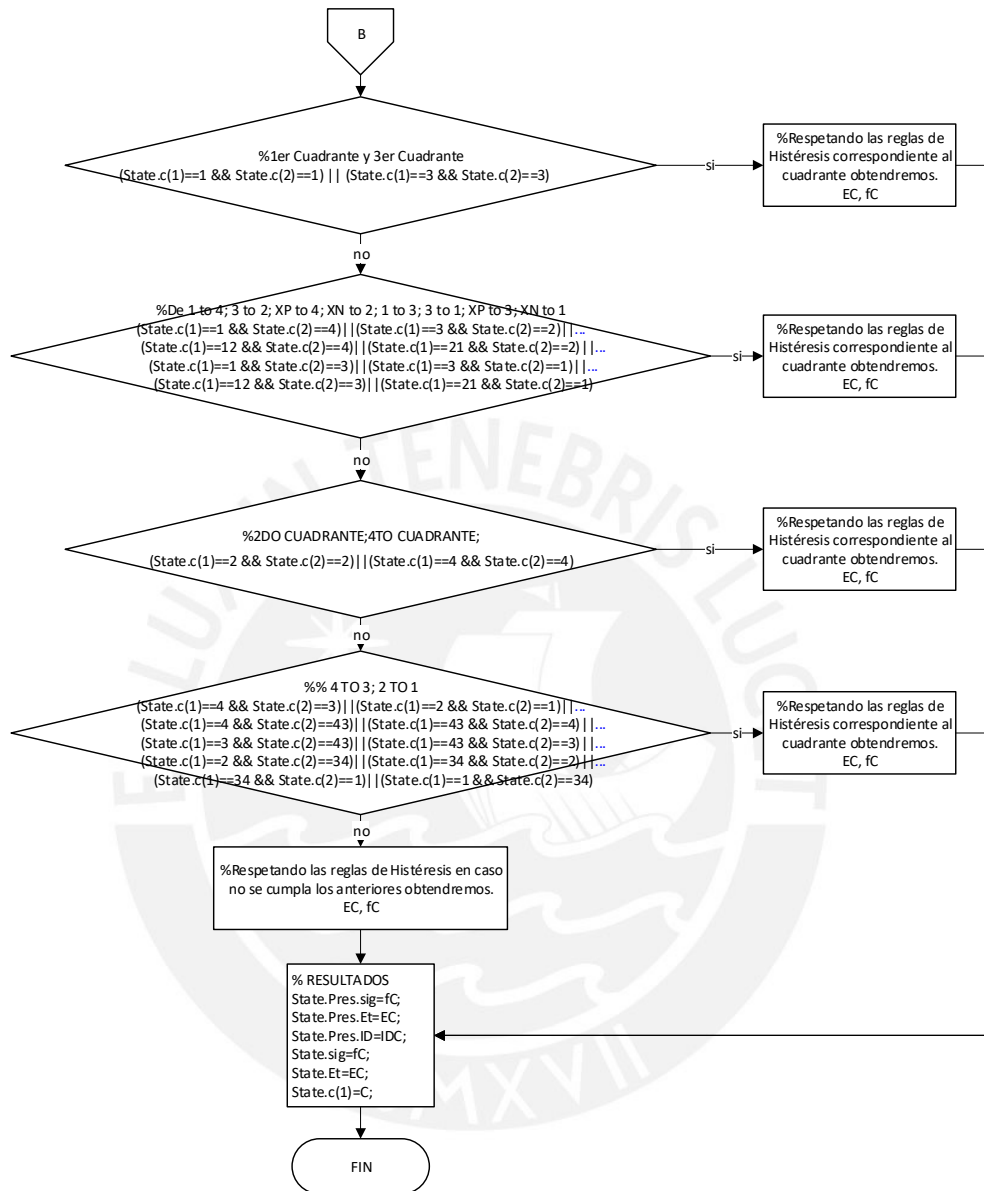


Figura 18

Fuerza de Reacción vs Desplazamiento del Sistema no Lineal, Usando Material Gamma γ , Estructura Dual E1N8V4M175LM

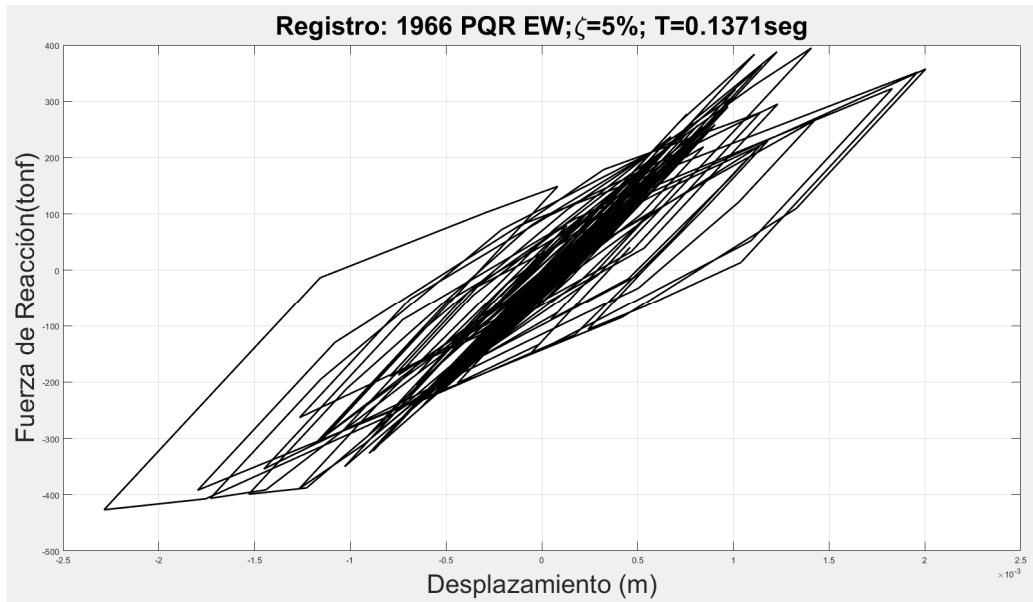


Figura 19

Fuerza de Reacción vs Desplazamiento del Sistema no Lineal, Usando Material Gamma γ , Estructura Dual E2N8V4M175LM

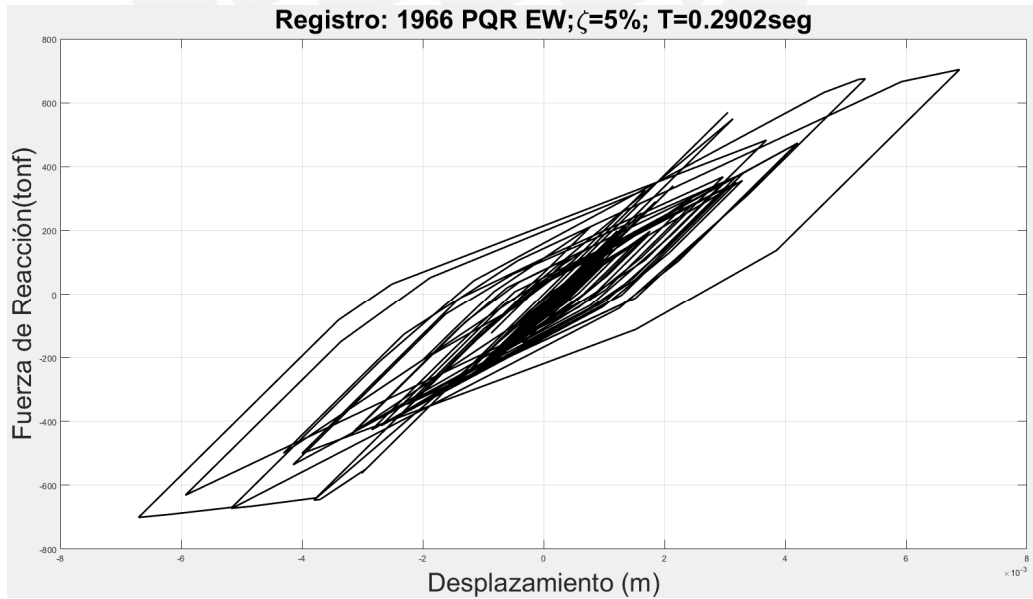
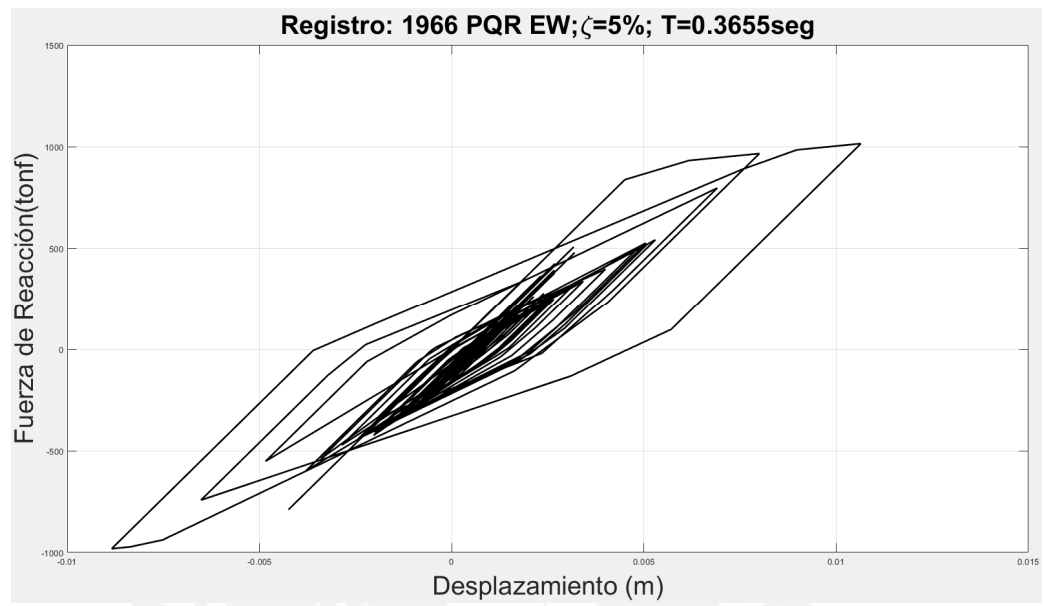


Figura 20

Fuerza de Reacción vs Desplazamiento del Sistema no Lineal, Usando Material Gamma γ , Estructura Dual E3N8V4M225LM



4.4 Resultados del análisis no lineal tiempo historia para sistemas 1GDL

Los resultados se muestran para las 74 estructuras, indicando el código de la estructura y los 6 registros sísmicos. Los resultados principales fueron el factor de reducción por ductilidad $R\mu_{1GDL}$ y V_{1GDL} para estructuras con ductilidad de $\mu=2$, 3 y 4.

Tabla 11

Resultados del análisis no lineal tiempo historia para sistemas 1GDL, Modelo de histéresis Gamma, Ductilidad $\mu=2$

N°	ESTUCTURA	MATLAB (Modelo de Histéresis Gamma)																	
		Según (Mohsen Gerami)						MATLAB (Modelo de Histéresis Gamma)						V_1GDL (tonf)					
		REG01	REG02	REG03	REG04	REG05	REG06	REG01	REG02	REG03	REG04	REG05	REG06	REG01	REG02	REG03	REG04	REG05	REG06
1	E1N4V2M100LM	1.74	1.39	2.46	1.68	1.92	2.01	119.01	144.77	46.81	64.89	115.53	90.30						
2	E1N4V2M125LM	1.59	2.00	2.99	2.25	1.65	1.47	127.41	152.75	51.77	56.40	106.43	111.44						
3	E1N4V2M150LM	2.51	1.82	2.17	2.46	1.84	1.54	99.89	173.16	58.55	65.25	131.41	126.03						
4	E1N5V2M100LM	1.67	1.61	2.12	1.92	1.63	1.77	176.16	223.56	70.94	95.46	201.05	161.30						
5	E1N5V2M125LM	1.78	1.40	2.52	1.72	1.87	2.02	186.26	222.17	71.47	94.79	181.24	143.86						
6	E1N5V2M150LM	1.61	1.99	2.98	2.31	1.51	1.68	193.76	236.33	79.75	85.74	176.84	149.55						
7	E1N5V2M175LM	2.33	1.86	1.99	2.76	1.75	1.49	164.14	275.07	90.24	90.41	202.80	186.20						
8	E1N6V2M100LM	2.76	1.74	1.47	2.59	1.63	1.86	217.88	326.70	131.53	143.37	289.05	210.50						
9	E1N6V2M125LM	1.76	1.66	2.03	1.91	1.52	1.82	250.89	323.27	97.96	132.23	310.20	209.77						
10	E1N6V2M150LM	1.79	1.70	2.35	1.65	1.75	2.03	273.56	288.78	108.04	131.71	257.90	212.34						
11	E1N6V2M175LM	1.74	2.02	2.89	2.38	1.60	1.52	252.83	339.81	113.61	123.55	237.37	235.70						
12	E1N6V2M200LM	2.44	1.86	2.00	2.76	1.75	1.48	223.79	392.84	128.36	129.08	288.56	264.93						
13	E1N6V3M100LM	1.80	1.65	1.87	2.10	1.81	1.99	249.14	318.11	108.47	134.51	264.18	215.01						
14	E1N6V3M125LM	1.74	1.39	2.60	1.68	1.89	1.89	263.83	319.76	98.21	143.31	257.99	213.44						
15	E1N6V3M150LM	1.59	1.95	2.99	2.24	1.66	1.64	281.34	345.51	114.33	123.79	234.24	220.52						
16	E1N7V2M100LM	2.70	2.13	1.76	2.50	2.14	1.87	279.73	457.45	185.34	183.57	351.81	278.13						

N°	ESTRUCTURA	Rμ_1GDL,2 Según (Mohsen Gerami)						V_1GDL (tonf)					
		REG01	REG02	REG03	REG04	REG05	REG06	REG01	REG02	REG03	REG04	REG05	REG06
17	E1N7V2M125LM	2.93	1.67	1.49	2.42	1.76	1.82	252.78	434.81	160.40	194.21	376.41	293.19
18	E1N7V2M150LM	1.90	1.75	1.89	1.61	1.87	1.72	316.51	430.83	143.28	200.49	351.51	268.83
19	E1N7V2M175LM	1.84	1.74	2.33	1.62	1.63	1.77	364.19	430.51	141.16	172.96	349.71	316.54
20	E1N7V2M200LM	1.64	2.12	2.72	2.53	1.68	1.57	342.62	465.40	152.19	160.93	318.72	321.27
21	E1N7V3M100LM	2.75	1.72	1.68	2.53	1.66	1.77	291.42	444.16	156.66	198.68	392.23	291.58
22	E1N7V3M125LM	1.83	1.69	1.86	1.91	1.90	1.82	332.42	436.36	145.23	178.55	338.81	284.32
23	E1N7V3M150LM	1.83	1.68	2.09	1.56	1.68	1.95	366.14	430.76	160.91	176.41	343.60	298.10
24	E1N7V3M175LM	1.70	2.25	2.67	2.59	1.51	1.69	336.17	447.73	152.25	160.88	355.26	307.05
25	E1N8V2M100LM	2.26	2.19	2.69	2.10	1.63	1.59	338.95	504.57	202.92	235.49	512.04	379.97
26	E1N8V2M125LM	2.83	2.04	1.48	2.46	1.86	1.69	367.89	553.69	251.15	249.72	492.18	378.99
27	E1N8V2M150LM	1.82	1.66	1.85	2.11	1.66	1.97	436.39	558.35	191.17	236.76	503.36	379.10
28	E1N8V2M175LM	1.82	1.58	2.45	1.62	1.93	1.73	414.56	537.61	177.85	250.36	446.22	338.59
29	E1N8V2M200LM	1.77	1.97	2.60	1.73	1.65	1.58	493.64	555.20	203.34	221.65	445.53	415.54
30	E1N8V2M225LM	1.76	2.20	2.40	2.73	1.41	1.71	430.66	607.00	202.72	202.47	480.14	414.61
31	E1N8V3M100LM	2.70	2.13	1.77	2.50	2.18	1.88	363.94	595.62	240.63	238.76	453.41	360.79
32	E1N8V3M125LM	2.10	1.58	1.43	2.31	1.83	1.86	422.19	596.24	215.71	249.63	478.18	378.90
33	E1N8V3M150LM	1.79	1.73	2.37	1.61	1.86	1.69	421.46	519.57	179.82	251.48	458.53	341.15
34	E1N8V3M175LM	1.85	2.03	2.75	1.73	1.68	1.32	484.12	553.89	203.78	222.47	437.54	497.62
35	E1N8V3M200LM	1.70	2.17	2.20	2.97	1.53	1.73	433.33	616.14	194.99	208.89	479.31	408.28
36	E1N8V4M100LM	2.80	1.85	1.99	2.42	1.72	1.71	373.36	578.60	181.97	253.37	499.53	381.29
37	E1N8V4M125LM	1.69	1.64	2.05	1.90	1.62	1.71	449.97	569.70	174.08	235.35	511.45	389.79
38	E1N8V4M150LM	1.82	1.65	2.06	1.57	1.69	2.00	478.32	559.92	211.75	231.37	449.07	381.38
39	E1N8V4M175LM	1.70	2.25	2.67	2.59	1.51	1.69	437.64	582.87	198.20	209.44	462.49	399.73
40	E2N4V2M100LM	3.18	2.10	2.36	1.85	2.05	2.63	180.80	314.85	132.15	122.85	248.01	198.31
41	E2N4V2M125LM	2.25	1.73	1.90	2.01	1.99	1.92	199.04	303.67	131.00	128.82	262.13	232.23

N°	ESTRUCTURA	Rp_1GDL,2 Según (Mohsen Gerami)						V_1GDL (tonf)					
		REG01	REG02	REG03	REG04	REG05	REG06	REG01	REG02	REG03	REG04	REG05	REG06
42	E2N4V2M150LM	2.06	1.83	2.32	1.84	1.74	1.48	206.78	313.35	143.75	142.21	305.90	231.80
43	E2N5V2M125LM	3.08	2.13	2.43	1.85	2.24	2.44	264.49	495.14	206.83	185.99	358.37	314.73
44	E2N5V2M150LM	2.78	1.74	1.92	2.10	1.85	2.01	302.32	472.30	204.82	188.12	414.28	360.44
45	E2N5V2M175LM	1.97	1.58	2.25	1.83	1.87	1.71	318.13	474.44	204.72	213.77	449.95	302.27
46	E2N6V2M150LM	3.03	2.15	2.58	1.77	2.29	2.39	367.38	713.56	276.05	270.06	491.69	448.15
47	E2N6V2M175LM	3.22	1.74	2.01	2.10	1.78	2.13	398.51	673.53	290.41	267.07	579.98	501.43
48	E2N6V2M200LM	2.08	1.67	2.23	1.72	2.03	1.61	442.64	663.39	286.08	313.37	595.79	517.10
49	E2N6V3M125LM	2.90	2.21	2.50	1.71	2.07	2.27	365.60	720.32	281.42	274.16	535.57	454.54
50	E2N6V3M150LM	3.13	1.75	1.99	2.10	1.80	2.12	406.58	673.55	291.89	267.89	583.10	503.37
51	E2N6V3M175LM	1.99	1.62	2.23	1.77	1.98	1.60	455.46	674.11	297.16	316.44	618.65	483.27
52	E2N7V2M175LM	3.02	2.16	2.48	1.72	2.48	2.37	493.49	965.35	383.83	374.07	616.22	606.41
53	E2N7V2M200LM	3.28	1.76	2.04	2.10	1.79	2.16	534.20	909.54	392.41	359.66	782.78	681.50
54	E2N7V2M225LM	2.15	1.68	2.10	1.71	1.92	1.73	590.19	892.19	387.58	419.45	836.03	690.08
55	E2N7V3M150LM	3.05	2.15	2.58	1.82	2.31	2.36	502.19	963.53	376.00	360.20	666.19	623.73
56	E2N7V3M175LM	2.94	1.75	1.97	2.08	1.82	2.06	578.98	908.16	392.76	361.99	789.56	690.82
57	E2N8V2M225LM	3.29	1.76	2.04	2.10	1.79	2.14	692.86	1,182.31	509.85	466.34	1,016.62	892.45
58	E2N8V2M250LM	2.17	1.68	2.05	1.72	1.94	1.76	763.72	1,156.18	502.24	546.27	1,071.60	898.81
59	E2N8V3M175LM	3.14	2.12	2.69	1.85	2.12	2.55	685.14	1,229.54	464.36	473.12	947.43	774.87
60	E2N8V3M200LM	2.74	1.74	1.92	2.11	1.85	1.99	759.62	1,183.20	512.41	471.94	1,040.81	907.19
61	E2N8V4M150LM	2.92	2.20	2.49	1.72	1.88	2.29	644.26	1,267.36	496.84	481.58	1,042.14	798.39
62	E2N8V4M175LM	3.21	1.75	2.01	2.10	1.78	2.14	704.20	1,184.55	511.89	471.56	1,027.10	881.28
63	E3N4V2M175LM	2.06	2.35	3.06	2.09	2.14	2.17	264.57	516.50	146.02	199.69	321.70	333.37
64	E3N5V2M200LM	1.94	2.30	3.14	2.53	2.02	2.11	413.30	762.04	214.89	291.49	487.95	517.50
65	E3N5V2M225LM	2.11	2.39	2.64	1.57	2.20	2.17	393.08	803.20	254.26	330.22	492.66	497.17
66	E3N6V2M250LM	2.07	2.35	3.05	2.04	2.16	2.17	573.27	1,124.02	318.94	435.71	698.30	723.47

N°	ESTRUCTURA	R μ _1GDL,2 Según (Mohsen Gerami)						V_1GDL (tonf)					
		REG01	REG02	REG03	REG04	REG05	REG06	REG01	REG02	REG03	REG04	REG05	REG06
67	E3N6V3M200LM	1.94	2.30	3.14	2.57	1.96	2.12	590.95	1,090.66	307.82	412.79	713.48	739.35
68	E3N6V3M225LM	2.11	2.39	2.64	1.57	2.20	2.17	563.44	1,151.30	364.46	473.33	706.18	712.65
69	E3N7V2M275LM	2.03	2.34	3.13	2.32	2.04	2.16	785.70	1,490.98	422.30	570.35	943.63	978.60
70	E3N7V3M225LM	1.90	2.31	3.12	2.65	1.99	2.11	795.20	1,453.16	414.93	543.87	947.54	1,002.21
71	E3N7V3M250LM	2.12	2.38	2.88	1.74	2.28	2.26	759.59	1,538.41	456.16	614.18	920.13	935.46
72	E3N8V2M300LM	1.99	2.31	3.14	2.43	2.04	2.14	1,023.02	1,906.37	539.20	730.59	1,211.49	1,270.04
73	E3N8V3M250LM	1.89	2.31	3.12	2.67	1.95	2.11	1,029.78	1,878.26	536.29	699.27	1,241.32	1,299.30
74	E3N8V4M225LM	1.89	2.31	3.12	2.66	1.95	2.11	1,036.59	1,890.23	539.72	705.94	1,249.03	1,306.78

Tabla 12

Resultados del análisis no lineal tiempo historia para sistemas 1GDL, Modelo de histéresis Gamma, Ductilidad $\mu=3$

N°	ESTRUCTURA	R μ _1GDL,3 Según (Mohsen Gerami)						MATLAB (Modelo de Histéresis Gamma)					
		REG01	REG02	REG03	REG04	REG05	REG06	REG01	REG02	REG03	REG04	REG05	REG06
1	E1N4V2M100LM	2.40	1.78	2.66	2.06	2.38	2.40	92.66	120.77	47.15	58.36	101.83	81.01
2	E1N4V2M125LM	2.14	2.56	3.86	2.69	1.85	1.64	99.62	130.10	43.71	51.47	104.00	109.04
3	E1N4V2M150LM	2.70	2.58	2.91	3.42	2.24	1.70	98.39	133.35	47.67	49.88	117.94	118.81
4	E1N5V2M100LM	2.69	1.98	2.13	2.56	2.40	2.57	119.31	198.20	76.84	77.64	149.07	121.29
5	E1N5V2M125LM	2.47	1.63	2.72	2.00	2.16	2.49	144.56	207.45	72.12	89.96	170.89	124.86
6	E1N5V2M150LM	2.14	2.56	3.85	2.71	1.87	1.67	153.17	200.40	67.24	79.27	159.38	165.17
7	E1N5V2M175LM	2.71	2.45	2.70	3.68	2.34	2.05	149.82	218.90	112.95	74.22	167.30	147.56
8	E1N6V2M100LM	4.16	2.41	1.86	3.35	2.06	2.38	155.59	256.70	114.86	115.98	250.08	179.33

N°	ESTUCTURA	Rμ_1GDL,3 Según (Mohsen Gerami)						V_1GDL (tonf)					
		REG01	REG02	REG03	REG04	REG05	REG06	REG01	REG02	REG03	REG04	REG05	REG06
		9	E1N6V2M125LM	2.73	2.05	2.15	2.27	2.40	2.36	176.54	285.72	100.78	121.41
10	E1N6V2M150LM	2.32	1.83	2.71	1.91	2.23	2.62	230.02	297.35	102.47	124.11	220.66	176.84
11	E1N6V2M175LM	2.24	2.61	3.77	2.84	1.84	1.98	212.15	286.90	94.99	113.11	230.10	197.28
12	E1N6V2M200LM	2.72	2.45	2.72	3.72	2.00	2.05	213.27	312.00	160.24	105.31	267.62	209.17
13	E1N6V3M100LM	2.91	2.09	1.92	2.63	2.38	2.80	168.38	276.82	115.35	114.31	219.22	168.73
14	E1N6V3M125LM	2.41	1.78	2.69	1.99	2.37	2.34	204.73	266.87	104.25	131.78	225.10	184.80
15	E1N6V3M150LM	2.15	2.57	3.87	2.68	1.86	1.82	219.02	286.41	96.46	113.01	229.05	215.81
16	E1N7V2M100LM	4.01	3.18	2.32	3.24	2.55	2.36	205.62	334.22	153.53	151.41	322.08	240.70
17	E1N7V2M125LM	3.74	2.14	1.63	3.05	2.13	2.30	213.84	368.49	161.30	160.81	337.19	253.71
18	E1N7V2M150LM	2.36	2.12	2.30	2.06	2.49	2.02	278.20	388.70	129.47	170.84	286.50	242.69
19	E1N7V2M175LM	2.34	2.19	2.63	1.88	1.93	2.39	308.51	373.43	135.45	162.56	322.30	255.29
20	E1N7V2M200LM	2.15	2.75	3.56	2.92	1.98	1.96	283.86	391.64	126.90	153.17	293.51	281.22
21	E1N7V3M100LM	4.20	2.33	1.85	3.37	2.13	2.32	210.34	355.24	155.59	157.22	333.94	242.63
22	E1N7V3M125LM	2.76	2.08	2.16	2.46	2.44	2.36	240.57	387.05	136.31	150.82	288.32	239.84
23	E1N7V3M150LM	2.33	2.11	2.67	1.82	2.00	2.58	313.17	375.15	137.49	164.60	311.89	244.48
24	E1N7V3M175LM	2.17	2.78	3.49	3.03	1.95	2.21	284.02	394.87	126.83	150.21	299.71	257.85
25	E1N8V2M100LM	3.22	2.84	3.15	2.68	2.37	2.12	259.66	423.32	189.72	192.83	384.53	311.72
26	E1N8V2M125LM	4.16	2.75	1.99	3.19	2.34	2.21	273.27	445.35	204.15	203.57	427.65	316.12
27	E1N8V2M150LM	2.93	2.10	1.90	2.63	2.42	2.79	295.82	486.05	202.88	114.31	381.19	295.81
28	E1N8V2M175LM	2.37	1.82	2.97	1.96	2.56	2.05	344.79	509.23	162.58	225.92	371.77	312.33
29	E1N8V2M200LM	2.32	2.65	3.32	2.00	1.93	2.26	400.25	452.19	173.81	208.97	412.92	316.99
30	E1N8V2M225LM	2.26	2.83	3.11	3.08	1.93	2.18	363.61	514.30	170.86	195.81	383.76	354.96
31	E1N8V3M100LM	4.00	3.18	2.32	3.23	2.54	2.35	267.91	435.25	200.22	197.39	420.42	314.16
32	E1N8V3M125LM	3.38	2.14	1.73	2.91	2.05	2.57	285.46	484.60	195.70	215.87	456.90	300.54
33	E1N8V3M150LM	2.22	1.92	2.88	1.95	2.48	2.01	373.33	510.28	164.35	226.10	376.64	314.23

N°	ESTUCTURA	R μ _1GDL,3 Según (Mohsen Gerami)												V_1GDL (tonf)					
		REG01	REG02	REG03	REG04	REG05	REG06	REG01	REG02	REG03	REG04	REG05	REG06						
		34	E1N8V3M175LM	2.37	2.76	3.52	2.01	1.99	2.07	402.45	447.34	173.56	209.07	402.80	346.40				
35	E1N8V3M200LM	2.21	2.83	2.71	3.53	2.00	2.33	364.62	516.03	172.65	194.18	404.15	329.71						
36	E1N8V4M100LM	4.09	2.61	2.00	3.17	2.23	2.24	279.09	447.69	199.60	204.20	420.47	317.63						
37	E1N8V4M125LM	2.68	2.03	2.20	2.46	2.38	2.35	309.70	502.60	178.59	197.71	380.49	310.28						
38	E1N8V4M150LM	2.33	2.07	2.68	1.84	2.03	2.47	407.19	488.50	179.82	215.65	405.06	336.00						
39	E1N8V4M175LM	2.17	2.78	3.49	3.03	1.95	2.21	369.74	514.06	165.12	195.55	390.17	335.67						
40	E2N4V2M100LM	4.29	2.65	3.95	2.49	3.10	3.70	146.26	272.48	86.35	99.64	178.56	153.87						
41	E2N4V2M125LM	3.49	2.13	2.57	2.78	2.50	2.64	140.63	269.22	105.72	103.65	227.89	184.36						
42	E2N4V2M150LM	3.09	2.41	3.22	2.39	2.39	1.94	150.60	259.50	112.98	114.41	242.94	193.21						
43	E2N5V2M125LM	3.94	2.77	4.12	2.47	3.20	3.62	225.63	415.58	131.95	151.06	275.15	232.55						
44	E2N5V2M150LM	4.22	2.14	2.68	2.70	2.47	2.75	214.30	418.77	160.27	159.91	336.24	287.71						
45	E2N5V2M175LM	2.97	2.05	2.97	2.66	2.56	1.88	230.33	398.47	169.35	162.34	361.94	300.04						
46	E2N6V2M150LM	3.77	2.84	4.20	2.46	3.04	3.52	321.91	589.82	183.89	212.09	405.32	330.71						
47	E2N6V2M175LM	4.05	2.12	2.77	2.70	2.61	2.92	346.17	603.64	230.15	226.87	431.45	399.51						
48	E2N6V2M200LM	3.14	2.10	2.96	2.50	2.64	2.17	320.20	576.79	235.24	235.18	500.54	418.72						
49	E2N6V3M125LM	3.59	2.95	4.43	2.45	3.18	3.48	322.52	588.88	173.33	209.14	382.65	324.19						
50	E2N6V3M150LM	3.98	2.13	2.88	2.69	2.36	2.91	350.11	604.23	219.60	228.22	483.33	400.49						
51	E2N6V3M175LM	3.03	2.09	3.03	2.62	2.63	1.96	326.71	570.12	238.77	235.54	509.14	429.83						
52	E2N7V2M175LM	3.74	2.86	4.19	2.46	3.03	3.54	434.85	795.99	248.15	285.70	546.89	441.25						
53	E2N7V2M200LM	4.14	2.13	3.01	2.70	2.67	2.96	462.12	819.39	290.26	305.41	573.43	542.47						
54	E2N7V2M225LM	3.23	2.07	3.01	2.48	2.58	2.34	428.41	791.35	292.87	315.69	678.98	556.06						
55	E2N7V3M150LM	3.83	2.82	4.20	2.46	3.05	3.55	436.46	801.54	250.43	288.85	551.50	449.26						
56	E2N7V3M175LM	3.88	2.13	2.85	2.66	2.50	2.83	475.57	813.70	296.04	308.78	633.46	550.01						
57	E2N8V2M225LM	4.15	2.14	3.01	2.69	2.67	2.97	599.50	1,062.10	376.95	396.95	744.41	703.58						
58	E2N8V2M250LM	3.27	2.06	3.03	2.51	2.66	2.40	552.99	1,027.90	369.75	408.31	853.64	719.70						

N°	ESTUCTURA	R μ _1GDL,3 Según (Mohsen Gerami)												V_1GDL (tonf)																																																																																																																																																																																																																	
		REG01	REG02	REG03	REG04	REG05	REG06	REG01	REG02	REG03	REG04	REG05	REG06	REG01	REG02	REG03	REG04	REG05	REG06																																																																																																																																																																																																												
		59	E2N8V3M175LM	4.14	2.71	4.07	2.49	2.99	3.67	567.31	1,050.46	332.54	384.14	716.73	589.13	59	E2N8V3M200LM	4.17	2.14	2.67	2.71	2.47	2.73	536.65	1,048.97	401.72	401.29	845.77	721.39	61	E2N8V4M150LM	3.62	2.94	4.42	2.45	2.91	3.49	567.79	1,035.84	305.67	369.52	732.53	572.14	62	E2N8V4M175LM	4.03	2.12	2.76	2.70	2.38	2.92	612.64	1,065.75	406.94	400.63	834.14	704.81	63	E3N4V2M175LM	2.47	3.32	5.45	3.76	2.84	3.09	240.93	399.47	89.35	121.19	264.63	255.82	64	E3N5V2M200LM	2.38	3.28	4.97	4.64	2.85	3.25	368.53	583.62	148.13	173.47	375.08	367.56	65	E3N5V2M225LM	2.51	3.32	5.08	2.83	2.84	2.97	360.68	631.40	143.06	198.99	416.69	396.48	66	E3N6V2M250LM	2.48	3.31	5.46	3.66	2.86	3.05	522.69	871.65	194.34	264.40	575.91	562.29	67	E3N6V3M200LM	2.37	3.28	4.97	4.67	2.86	3.26	528.03	835.27	212.10	247.92	534.73	525.23	68	E3N6V3M225LM	2.51	3.32	5.08	2.83	2.84	2.97	517.00	905.05	205.07	285.22	597.28	568.31	69	E3N7V2M275LM	2.46	3.31	4.86	4.18	2.88	3.19	707.37	1,150.50	296.12	345.56	738.48	723.91	70	E3N7V3M225LM	2.32	3.30	4.95	4.77	2.64	3.30	710.52	1,110.86	284.27	328.86	773.65	700.22	71	E3N7V3M250LM	2.51	3.32	4.50	3.11	2.90	3.41	700.19	1,203.80	318.66	373.95	789.68	678.96	72	E3N8V2M300LM	2.43	3.28	4.69	4.42	2.71	3.21	915.58	1,465.46	392.29	438.39	999.16	925.16	73	E3N8V3M250LM	2.31	3.30	4.79	4.78	2.64	3.31	919.70	1,435.75	381.36	423.84	1,001.10	904.95	74	E3N8V4M225LM	2.31	3.30	4.79	4.78	2.64	3.31	925.78	1,444.92	383.82	426.26

Tabla 13

Resultados del análisis no lineal tiempo historia para sistemas 1GDL, Modelo de histéresis Gamma, Ductilidad $\mu=4$

N°	ESTRUCTURA	MATLAB (Modelo de Histéresis Gamma)											
		R μ _1GDL,4 Según (Mohsen Gerami)						V_1GDL (tonf)					
		REG01	REG02	REG03	REG04	REG05	REG06	REG01	REG02	REG03	REG04	REG05	REG06
1	E1N4V2M100LM	3.17	1.92	2.88	2.31	2.58	2.60	77.27	123.88	47.37	55.82	102.84	82.69
2	E1N4V2M125LM	2.67	2.81	4.01	2.91	2.04	2.23	89.01	128.46	45.68	52.05	100.77	86.89
3	E1N4V2M150LM	3.60	2.55	3.36	3.62	2.84	2.59	82.36	145.96	42.85	50.13	98.05	86.44
4	E1N5V2M100LM	3.26	2.38	2.36	2.73	2.56	2.82	106.70	178.69	74.94	79.33	151.41	119.62
5	E1N5V2M125LM	3.22	1.91	2.91	2.27	2.57	2.74	121.62	192.38	73.05	86.18	156.14	121.43
6	E1N5V2M150LM	2.66	2.81	4.00	3.49	2.03	2.31	137.21	197.82	70.30	65.62	155.15	130.25
7	E1N5V2M175LM	3.03	2.97	3.05	4.05	2.68	2.42	138.86	203.87	68.08	70.84	154.26	133.23
8	E1N6V2M100LM	4.77	2.93	2.23	3.90	2.48	2.78	149.04	228.34	102.96	105.66	225.49	162.49
9	E1N6V2M125LM	3.40	2.45	2.26	2.54	2.99	2.66	153.08	259.53	102.60	117.58	187.20	169.92
10	E1N6V2M150LM	3.25	2.13	2.91	2.10	2.42	3.00	178.42	277.28	103.02	122.45	220.32	163.30
11	E1N6V2M175LM	2.62	2.87	3.87	3.77	2.08	2.27	196.02	282.47	99.83	92.29	212.45	186.45
12	E1N6V2M200LM	3.04	2.98	3.06	4.06	2.68	2.41	197.67	289.95	97.07	100.89	219.56	190.20
13	E1N6V3M100LM	3.48	2.46	2.23	2.90	2.70	3.05	152.54	252.40	107.69	106.31	209.77	166.14
14	E1N6V3M125LM	3.18	1.92	2.88	2.31	2.44	2.87	170.87	273.78	104.77	123.40	236.97	160.97
15	E1N6V3M150LM	2.67	3.26	4.01	2.87	2.05	2.26	196.33	237.17	100.73	113.85	222.11	189.43
16	E1N7V2M100LM	5.02	3.93	2.88	3.97	3.01	2.72	176.38	293.09	134.10	129.91	294.92	226.52
17	E1N7V2M125LM	4.31	2.56	2.01	3.61	2.66	2.80	203.76	335.17	142.02	144.34	291.91	217.29
18	E1N7V2M150LM	3.34	2.49	2.28	2.48	3.00	2.46	212.92	358.61	143.33	154.00	257.85	218.38
19	E1N7V2M175LM	3.19	2.33	2.86	2.01	2.15	2.68	248.83	380.74	136.41	164.34	312.88	247.13

N°	ESTUCTURA	Rp_1GD_L,4 Según (Mohsen Gerami)						V_1GD_L (tonf)					
		REG01	REG02	REG03	REG04	REG05	REG06	REG01	REG02	REG03	REG04	REG05	REG06
		20	E1N7V2M200LM	2.51	3.06	3.68	3.13	2.36	2.34	264.17	381.73	134.84	153.94
21	E1N7V3M100LM	4.71	2.94	2.25	4.06	2.82	2.70	201.28	307.38	138.79	146.50	276.47	221.94
22	E1N7V3M125LM	3.45	2.47	2.29	2.52	2.99	2.59	208.18	353.23	138.86	160.23	254.86	232.80
23	E1N7V3M150LM	3.21	2.26	2.86	1.95	2.43	2.87	246.94	379.53	139.00	166.75	278.36	239.97
24	E1N7V3M175LM	2.52	3.10	3.64	3.17	2.36	2.39	265.89	383.78	135.57	154.01	268.40	256.18
25	E1N8V2M100LM	4.03	3.34	3.92	3.44	2.76	2.68	219.44	391.01	165.28	170.03	362.58	267.55
26	E1N8V2M125LM	4.93	3.40	2.48	3.79	2.88	2.62	249.87	383.24	177.30	180.43	376.41	288.78
27	E1N8V2M150LM	3.51	2.47	2.22	2.91	2.91	3.01	267.77	443.34	188.73	186.60	343.16	293.28
28	E1N8V2M175LM	3.13	2.13	3.15	2.33	2.95	2.28	285.59	471.87	166.39	206.03	346.00	308.21
29	E1N8V2M200LM	3.10	2.76	3.59	2.16	2.34	2.44	333.22	483.90	178.83	209.09	368.07	317.25
30	E1N8V2M225LM	2.55	3.68	3.37	3.25	2.28	2.53	347.95	429.60	170.07	196.47	351.70	330.97
31	E1N8V3M100LM	5.01	3.93	2.88	3.96	3.09	2.72	229.78	381.77	174.83	169.26	380.21	295.06
32	E1N8V3M125LM	3.93	2.54	1.98	3.39	3.12	2.83	266.87	441.46	186.66	188.22	327.97	287.23
33	E1N8V3M150LM	3.16	2.25	3.06	2.33	2.94	2.26	283.97	472.26	167.83	205.52	343.98	302.97
34	E1N8V3M175LM	3.15	2.68	3.79	2.21	2.35	2.48	336.13	497.37	179.62	208.04	370.52	311.86
35	E1N8V3M200LM	2.46	3.17	2.97	3.67	2.25	2.52	351.74	499.37	170.80	194.93	389.48	331.69
36	E1N8V4M100LM	4.82	3.19	2.38	3.84	2.70	2.68	256.57	397.09	179.96	188.92	376.65	287.51
37	E1N8V4M125LM	3.33	2.42	2.30	2.57	2.98	2.60	268.84	456.68	187.11	205.96	329.51	301.49
38	E1N8V4M150LM	3.22	2.22	2.88	1.98	2.49	2.85	319.80	492.93	180.80	216.85	362.38	316.37
39	E1N8V4M175LM	2.52	3.10	3.64	3.17	2.36	2.39	346.15	499.62	176.49	200.49	349.41	333.51
40	E2N4V2M100LM	4.91	3.42	7.16	3.54	3.51	4.25	138.57	228.97	51.67	72.74	171.32	146.93
41	E2N4V2M125LM	3.91	2.50	3.55	3.39	3.05	3.97	135.99	248.36	82.92	91.23	202.49	132.60
42	E2N4V2M150LM	3.60	2.81	4.02	3.04	2.92	2.47	137.98	241.43	98.17	101.86	215.74	166.58
43	E2N5V2M125LM	4.50	3.59	7.47	3.68	3.65	4.18	214.17	347.70	79.07	108.20	260.12	220.92
44	E2N5V2M150LM	4.70	2.57	3.99	3.46	2.99	4.25	210.03	378.19	116.67	135.27	301.08	201.46

N°	ESTUCTURA	Rp_1GDL,4 Según (Mohsen Gerami)						V_1GDL (tonf)					
		REG01	REG02	REG03	REG04	REG05	REG06	REG01	REG02	REG03	REG04	REG05	REG06
		3.56	2.39	3.79	3.07	3.06	2.57	200.81	371.22	143.88	151.12	326.70	238.60
45	E2N5V2M175LM	4.31	3.68	7.45	3.67	3.67	3.93	305.60	493.65	112.32	151.97	364.25	321.02
46	E2N6V2M150LM	5.05	2.63	4.25	3.59	3.18	4.47	300.52	527.49	162.63	178.85	388.81	282.77
47	E2N6V2M175LM	3.67	2.45	3.70	3.82	3.48	3.11	289.81	535.78	204.04	164.91	409.65	316.65
48	E2N6V2M200LM	4.10	3.83	6.42	3.64	3.68	3.82	306.39	491.68	129.39	150.59	357.16	320.12
49	E2N6V3M125LM	5.00	2.63	4.18	3.51	2.90	4.19	301.75	530.57	164.55	189.56	425.89	300.09
50	E2N6V3M150LM	3.60	2.42	3.82	3.09	3.18	2.68	289.24	533.57	205.16	214.28	456.03	341.18
51	E2N6V3M175LM	4.27	3.70	7.41	3.67	3.67	3.91	412.96	666.82	151.86	204.78	489.99	433.48
52	E2N7V2M175LM	5.10	2.68	4.36	3.61	3.14	4.77	406.41	707.01	217.26	239.60	528.21	363.77
53	E2N7V2M200LM	3.74	2.45	3.68	3.86	3.40	3.65	394.53	724.39	261.75	217.57	557.75	387.04
54	E2N7V2M225LM	4.37	3.65	7.47	3.67	3.67	4.13	414.56	671.17	152.57	206.90	496.99	423.90
55	E2N7V3M150LM	4.91	2.61	4.10	3.45	3.01	4.22	406.75	720.94	223.24	258.15	564.87	399.88
56	E2N7V3M175LM	5.11	2.68	4.38	3.61	3.15	4.78	527.52	918.59	281.22	310.64	684.35	472.27
57	E2N8V2M225LM	3.77	2.44	3.63	3.92	3.42	2.96	513.68	941.80	335.98	280.32	719.60	629.86
58	E2N8V2M250LM	4.73	3.50	7.36	3.67	3.61	4.21	538.18	881.98	199.48	277.08	658.01	563.74
59	E2N8V3M175LM	4.64	2.57	3.97	3.47	3.09	4.26	526.40	947.84	293.20	339.93	730.29	502.74
60	E2N8V3M200LM	4.13	3.81	6.43	3.65	3.68	3.83	539.53	865.92	227.55	265.42	629.98	565.10
61	E2N8V4M150LM	5.04	2.63	4.23	3.58	3.19	4.50	530.61	931.96	287.83	316.56	687.31	496.03
62	E2N8V4M175LM	2.95	4.56	6.87	5.34	3.62	4.57	218.80	315.30	76.97	92.49	230.22	187.49
63	E3N4V2M175LM	2.90	4.64	6.82	6.39	3.18	5.79	327.70	447.27	117.09	136.51	354.29	222.85
64	E3N5V2M200LM	2.90	4.44	6.44	4.03	3.49	4.04	338.19	511.78	123.34	152.02	367.20	315.99
65	E3N5V2M225LM	2.95	4.54	6.87	5.21	3.34	4.55	476.47	688.96	167.54	201.81	518.11	408.51
66	E3N6V2M250LM	2.89	4.65	6.82	6.44	3.17	5.79	469.20	638.80	167.78	194.95	508.07	319.15
67	E3N6V3M200LM	2.90	4.44	6.44	4.03	3.49	4.04	484.77	733.58	176.80	217.91	526.34	452.93
68	E3N6V3M225LM	2.97	4.59	6.95	5.88	3.40	4.91	635.41	899.87	224.82	266.26	668.63	509.88
69	E3N7V2M275LM												

N°	ESTUCTURA	Rp_1GDL,4 Según (Mohsen Gerami)						V_1GDL (tonf)					
		REG01	REG02	REG03	REG04	REG05	REG06	REG01	REG02	REG03	REG04	REG05	REG06
70	E3N7V3M225LM	2.85	4.71	6.79	6.54	3.21	5.09	627.33	843.43	225.69	260.76	698.70	492.27
71	E3N7V3M250LM	2.93	4.48	6.75	4.41	3.43	5.46	650.11	966.85	230.36	284.72	711.66	453.86
72	E3N8V2M300LM	2.94	4.58	6.89	6.15	3.17	5.75	819.61	1,137.67	290.60	341.48	916.89	560.10
73	E3N8V3M250LM	2.84	4.73	6.77	6.55	3.20	5.11	811.17	1,085.95	292.30	337.22	904.95	635.70
74	E3N8V4M225LM	2.84	4.72	6.78	6.55	3.20	5.10	816.64	1,094.86	293.93	339.29	910.53	640.41



A continuación, mostramos las gráficas - periodo (T) versus Factor de Reducción por Ductilidad ($R\mu$)

Figura 21

Factor de ductilidad ($R\mu_{1GDL}$) versus periodo fundamental (T) para ductilidades de $u=2$

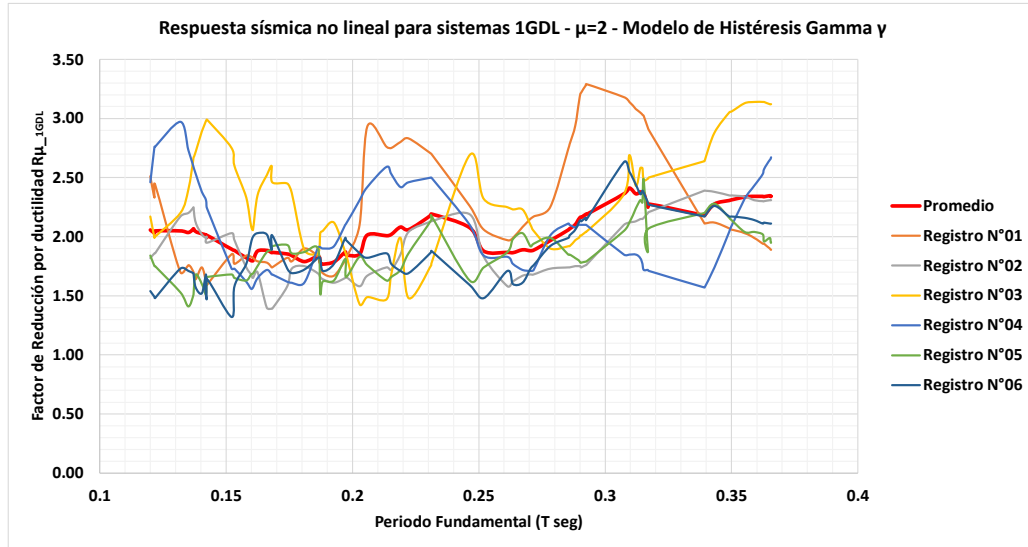


Figura 22

Factor de ductilidad ($R\mu_{1GDL}$) versus periodo fundamental (T) para ductilidades de $u=3$

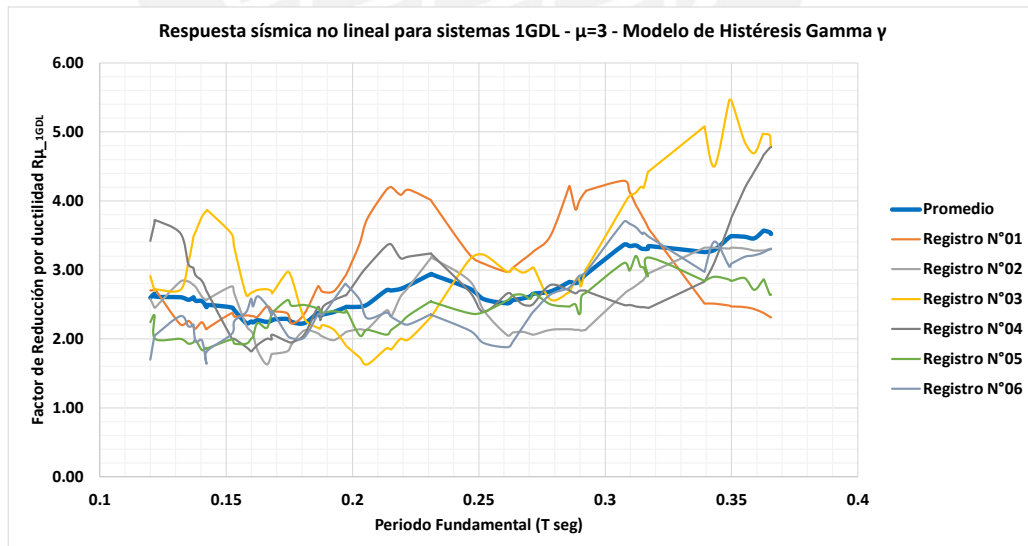


Figura 23

Factor de ductilidad ($R_{\mu_{1GDL}}$) versus periodo fundamental (T) para ductilidades de $u=4$

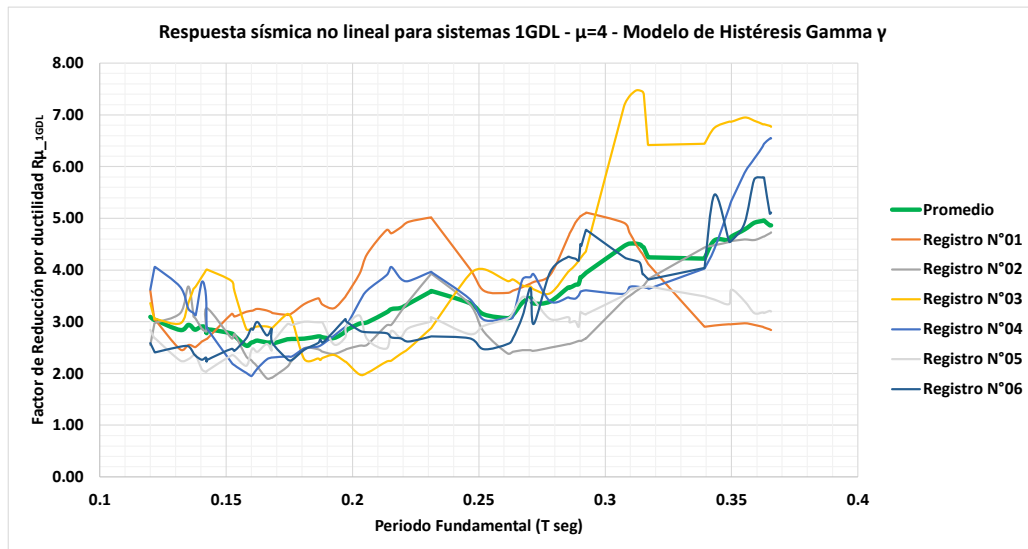
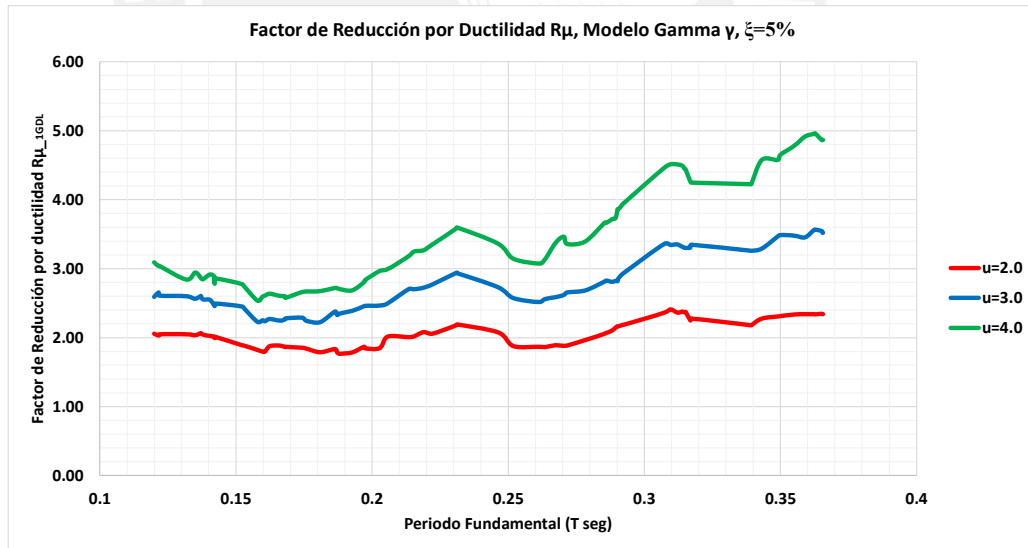


Figura 24

Factor de reducción por ductilidad ($R_{\mu_{1GDL}}$) para 3 niveles de ductilidad, modelo de histéresis Gamma γ



Podemos observar que para estructuras duales con ductilidades de $\mu=2$ el factor de reducción próximo a $R_{\mu_{1GDL}}=2$, mientras, las estructuras con ductilidades de $\mu=3$ el factor $R_{\mu_{1GDL}}$ varía entre 2.20 a 3.60. Y para estructuras con ductilidades de $\mu=4$ el factor $R_{\mu_{1GDL}}$ varía entre 2.45 a 5.0

También, se realizó el análisis no lineal tiempo historia empleando un modelo de histéresis bilineal, se aplicó el modelo por la simplicidad de sus reglas.

Figura 25

Factor de reducción por ductilidad ($R\mu_{1GDL}$) para 3 niveles de ductilidad, modelo de histéresis Bilineal

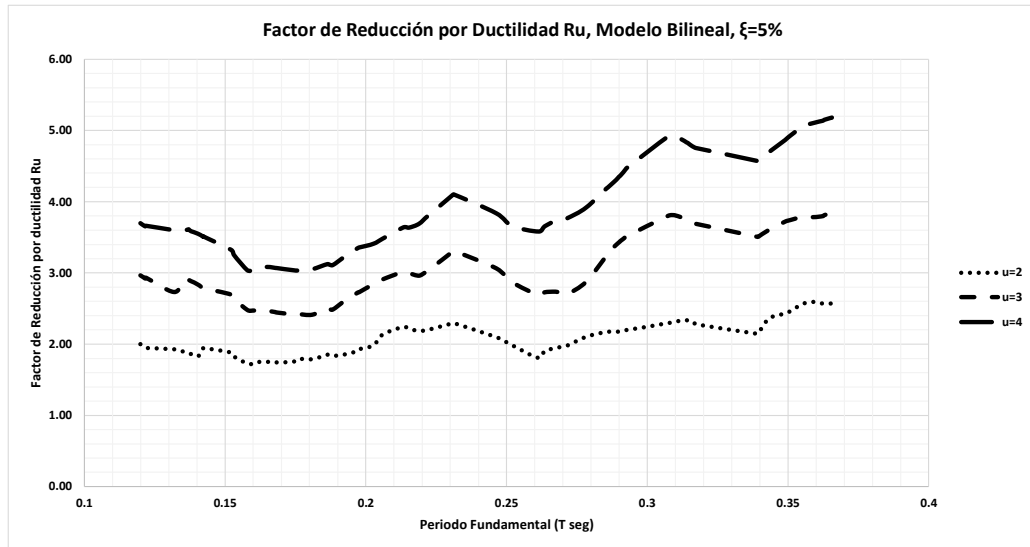
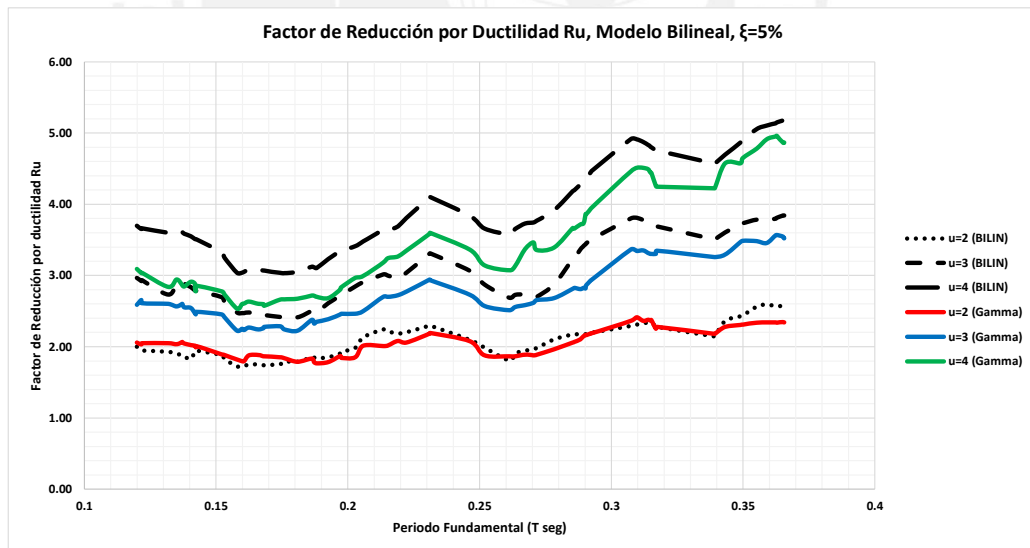


Figura 26

Factor de reducción por ductilidad ($R\mu_{1GDL}$) para modelos de histéresis Gamma y Bilineal



Para estructuras duales con ductilidades de $\mu=2$ ambos modelos presentan resultados similares, mientras, las estructuras con ductilidades de $\mu=3$ y 4 el modelo Bilineal muestra resultados mayores al modelo gamma γ . Esta reducción del factor $R\mu_{1GDL}$ en el modelo gamma a la presencia del factor γ en la recarga (γF_y).

Capítulo V: Análisis no lineal estático

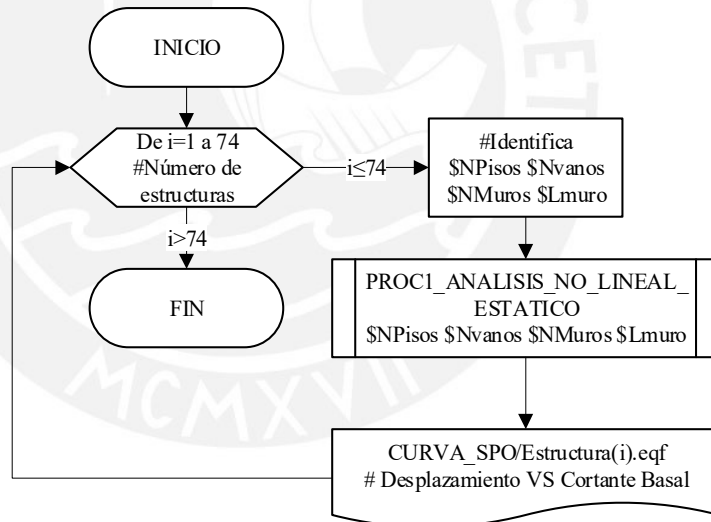
En este capítulo obtendremos las curvas de capacidad para las estructuras duales seleccionadas, luego de una representación bilineal obtendremos el desplazamiento de fluencia (ΔY_{VGDL}). El desplazamiento de fluencia y el desplazamiento máximo ($\Delta \max_{VGDL}$) que se obtendrá en los análisis no lineales tiempo historia determinará la ductilidad de la estructura dual.

Los análisis se realizarán para las 74 estructuras duales, de forma que se ha creado un procedimiento en OPENSEES llamado PROC1_ANALISIS_NO_LINEAL_ESTATICO.tcl, el análisis Pushover está basado por control de desplazamientos, el análisis en cada paso se asignan incrementos de desplazamiento.

Para determinar el desplazamiento objetivo en el análisis Pushover aplicaremos el código FEMA 365 y el desplazamiento máximo inelástico estimado para la estructura en el análisis elástico.

Figura 27

Diagrama de Flujo Generación de curvas de capacidad



5.1 Materiales No Lineales

5.1.1 Concreto Armado

El material empleado para el concreto armado (vigas, columnas y muros de corte) será el concreto confinado, donde consideraremos los efectos de confinamiento debido a diferentes disposiciones de refuerzo transversal en las columnas y muros de corte. Para obtener la curva envolvente de compresión, se realiza un enfoque no lineal en cada incremento de deformación axial del elemento vertical. El comando en OPENSEES “ConfinedConcrete01” está basado en el trabajo de Braga, Gigliotti y Laterza (Braga, Gigliotti, & Laterza, 2006)

El comando “ConfinedConcrete01” tiene las siguientes partes y las unidades a utilizar son MPa, mm.

```
uniaxialMaterial ConfinedConcrete01 $tag $secType $fpc $Ec (<-epscu $epscu> OR <-gamma $gamma>) (<-nu $nu> OR <-varub> OR <-varnoub>) $L1 ($L2) ($L3) $phis $S $fyh $Es0 $haRatio $mu $phiLon <-internal $phisi $Si $fyhi $Es0i $haRatioi $mui> <-wrap $cover $Am $Sw $fuil $Es0w> <-gravel> <-silica> <-tol $tol> <-maxNumIter $maxNumIter> <-epscuLimit $epscuLimit> <-stRatio $stRatio>
```

5.1.2 Acero de refuerzo

Se empleó el modelo Steel02 de OPENSEES, para representar al acero. Este modelo considera, además del módulo de elasticidad y punto de fluencia, parámetros de endurecimiento ante solicitaciones cíclicas (Filippou, Popov, & Bertero, 1983). Se consideró las varillas convencionales de acero con fluencia a 4200kg/cm², módulo de elasticidad inicial de 20'000'000 kg/cm², razón de endurecimiento de 0.01. Los argumentos para la curvatura e histéresis de la relación esfuerzo deformación usados fueron los valores por defecto en el programa.

El comando “uniaxialMaterial Steel02” presenta las siguientes partes y están definidas en el manual de OPENSEES (Mazzoni, McKenna, Scott, Fennes, & others, 2006)

```
uniaxialMaterial Steel02 $matTag $Fy $E $b $R0 $cR1 $cR2 <$a1 $a2 $a3 $a4 $siglnit>
```

5.2 Secciones Fibra

Los elementos viga-columna con integración de la respuesta del material inelástico sobre la sección transversal, denominados elementos “fiber beam-column”, ofrecen robustez numérica y flexibilidad de modelado para la respuesta inelástica 3D de elementos estructurales, así como una precisión superior en la estimación de parámetros de respuesta local tales como Curvatura de sección y valores de deformación del material (Kostic & Filippou, 2012)

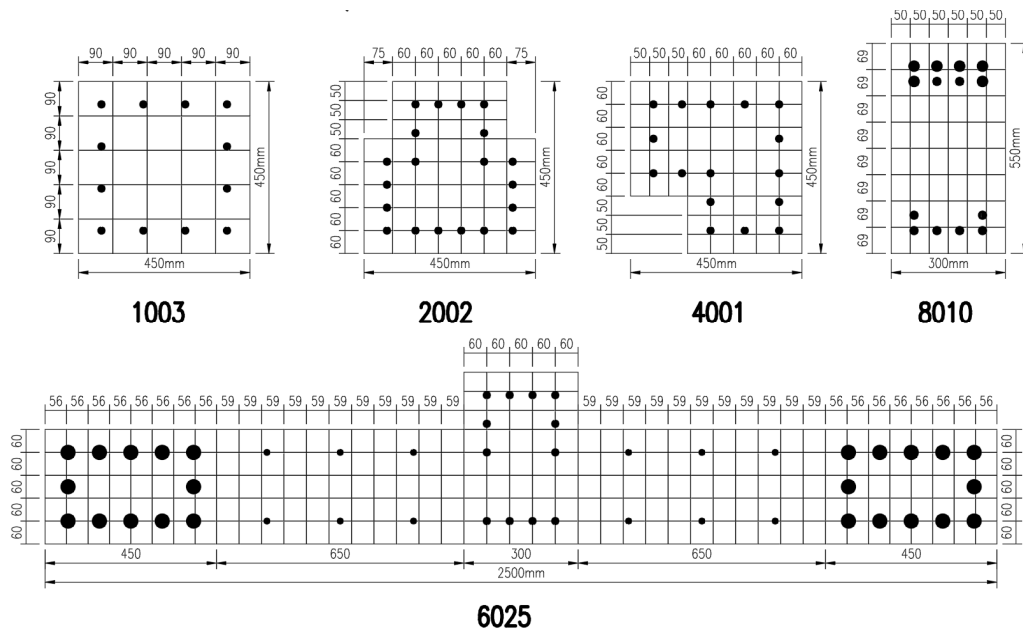
Los elementos columnas, viga y muros de corte serán modelados son secciones fibra, que están compuestos por sub elementos que describen la geometría y el comportamiento del material uniaxial.

Las secciones tipo fibra, permiten el empleo de diferentes propiedades de los materiales, a lo largo de un elemento no – lineal; es decir se describe mejor las propiedades resistentes de elemento estructural a lo largo del mismo, en función de su armado longitudinal, transversal.

Las subdivisiones o secciones fibra que describen la ubicación y condiciones de borde, para ambos tipos de hormigón (confinado y no confinado), deben poseer tamaños de subdivisión iguales entre las diferentes secciones fibra, de manera que estas puedan conectarse entre sí.

Figura 28

Detalle de subdivisiones de las Secciones de Fibra para las columnas C1, C2, C4, Viga y Muro de corte



5.3 Elección del nudo de control

Los nudos de control se ubicarán en el centro de masa de las estructuras, siendo la estructura regular y considerando cargas uniformes, el centro de masa y el centro geométrico para cada piso tienen las mismas coordenadas. Por lo tanto, el punto de control para los análisis no lineales será el centro geométrico del último nivel.

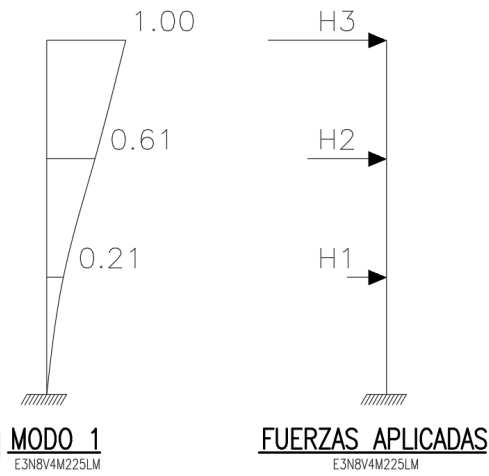
5.4 Distribución de cargas laterales

Siguiendo las recomendaciones del FEMA 356 en la sección 3.3.3.2.3, las distribuciones de cargas laterales son proporcionales al modo fundamental en la dirección de análisis. Ya que las estructuras son regulares y la masa participativa del primer modo supera el 75% de la masa total.

Los modos fundamentales son obtenidos por OPENSEES y son almacenados en la carpeta ESTRUCTURASR7 con otras propiedades más de las estructuras.

Figura 29

Distribución de cargas Laterales proporcional al primer modo



5.5 Periodo fundamental efectivo (Te)

Será calculado con la siguiente ecuación:

$$T_e = T_i \sqrt{\frac{K_i}{K_e}}$$

Donde:

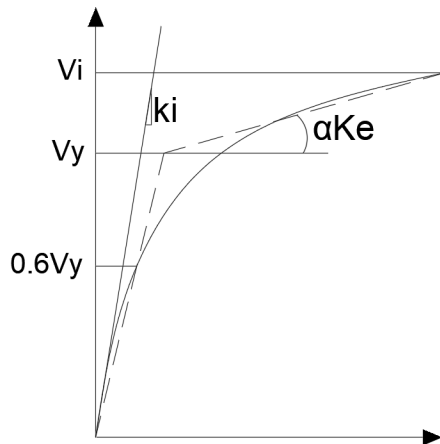
Ti : Periodo Fundamental Elástico (en segundo), en la dirección para el análisis elástico dinámico.

Ki : Rigidez Lateral elástico de la estructura en la dirección de análisis.

Ke : Rigidez Lateral efectivo de la estructura en la dirección de análisis.

Figura 30

Pendiente positiva Post fluencia



Fuente: (FEMA, 2000)

Observando las curvas de capacidad para estructuras duales, la rigidez lateral inicial y la rigidez lateral efectiva de las estructuras se asemejan debido a la rigidez de los muros de corte, por lo tanto, para el cálculo del desplazamiento efectivo tomaremos el periodo inicial.

5.6 Desplazamiento objetivo

El desplazamiento objetivo será determinado para el nudo de control que se ubica en el último nivel de la estructura. Para esto emplearemos la ecuación propuesto por el FEMA 356.

$$\delta_{obj} = C_0 C_1 C_2 C_3 S_a \frac{T_e^2}{4\pi^2} g$$

EC. Desplazamiento Objetivo

Donde:

C_0 : Factor de modificación que relaciona el desplazamiento espectral para el sistema 1GDL y el desplazamiento de techo para el sistema VGDL. Se usó la tabla 3-2 del FEMA 356.

Tabla 14

Factor de Modificación C_0 (FEMA, 2000)

Tabla 3-2 Valores del Factor de Modificación C_0			
Número de Pisos	Edificaciones de Corte		Otras edificaciones
	Patrón de carga Triangular (1.1, 1.2, 1.3)	Patrón de carga uniforme (2.1)	Cualquier patrón de carga
1	1.0	1.0	1.0
2	1.2	1.15	1.2
3	1.2	1.2	1.3
5	1.3	1.2	1.4
10+	1.3	1.2	1.5

C_1 : Factor de modificación que relaciona los máximos desplazamientos inelásticos esperados y los desplazamientos calculados en el análisis elástico.

$C_1 = 1.0$ para $T_e \geq T_s$

$C_1 = [1.0 + (R-1) T_s / T_e] / R$ para $T_e < T_s$

C_2 : Factor de modificación para representar el efecto de la forma de histéresis, degradación de rigidez, disminución de la fuerza sobre la respuesta de desplazamiento máximo. El valor de C_2 será igual a 1 permitido para procedimientos no lineales.

C_3 : Factor de modificación para representar el incremento del desplazamiento debido los efectos P- Δ . Para edificaciones con rigidez post fluencia positiva, C_3 será igual a 1.

5.7 Representación bilineal de la curva de capacidad

Con los resultados de las curvas de capacidad (cortante basal versus desplazamiento), realizaremos la representación bilineal para cada una de las curvas. Luego obtendremos el desplazamiento de fluencia ($\Delta Y_{V_{GDL}}$)

Figura 31

*Representación Bilineal de la Curva de Capacidad ($\Delta Y_{V_{GDL}}=0.008133m$)–
E1N8V4M175LM*

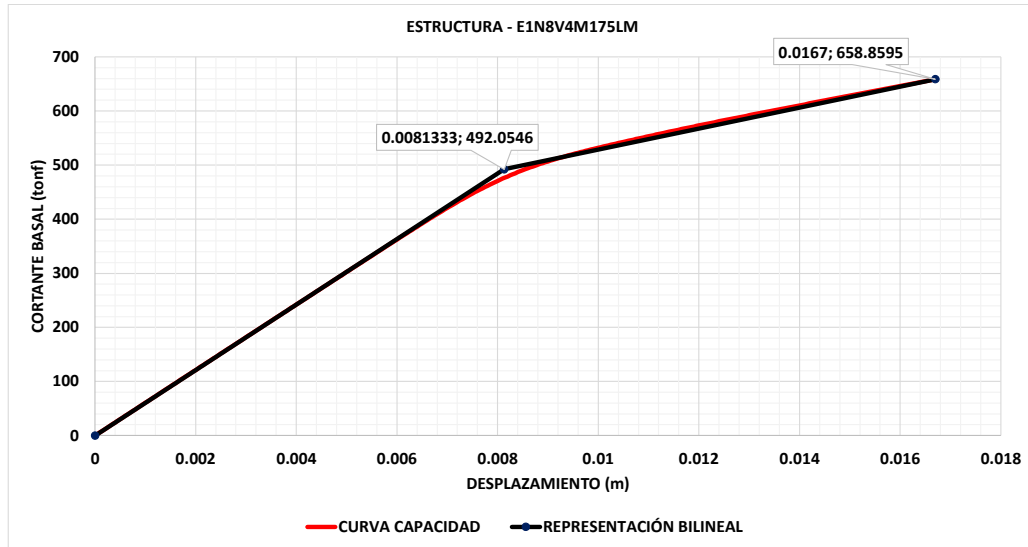


Figura 32

*Representación Bilineal de la Curva de Capacidad ($\Delta Y_{V_{GDL}}=0.030833m$)–
E2N8V4M175LM*

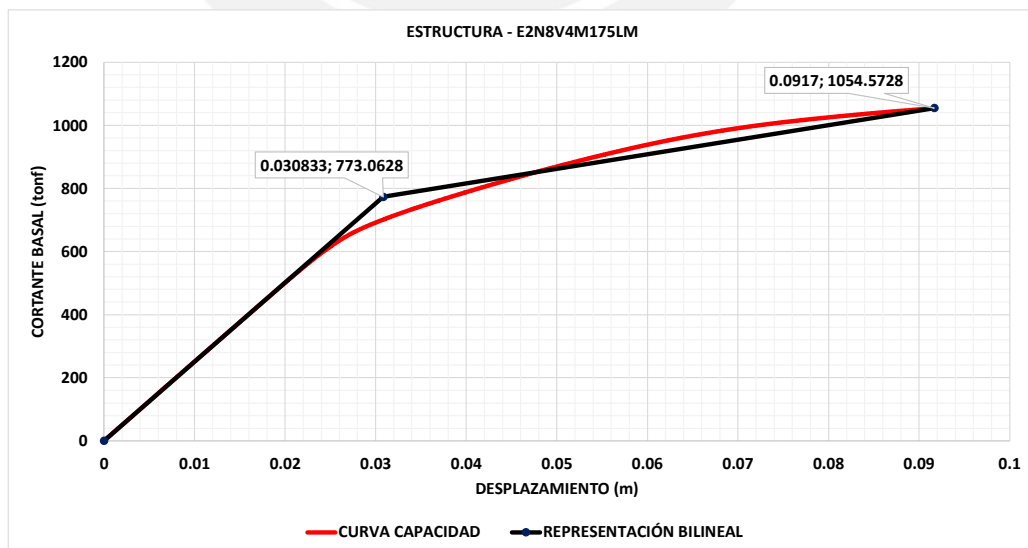
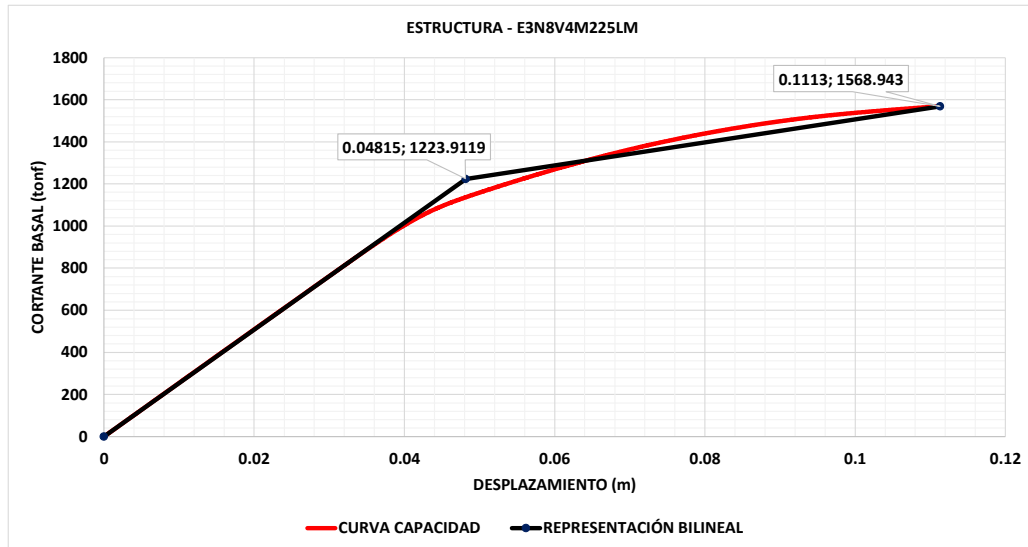


Figura 33

Representación Bilineal de la Curva de Capacidad ($\Delta Y_{VGDL}=0.04815m$) – E3N8V4M225LM



5.8 Resultados del Análisis No Lineal Estático - Pushover

Resultados de análisis no lineal estático, V_{1f} (Cortante de la primera fluencia), ΔY_{VGDL} (Desplazamiento de fluencia), $V_{y_{VGDL}}$ (Cortante de fluencia), $R\Omega$ (Factor de reducción por sobre resistencia) y R_Y (Factor de reducción por Diseño)

Tabla 15

Resultados principales del análisis No Lineal Estático

N°	ESTUCTURA	PUSHOVER				
		V_{1f} (tonf)	Δy_{VGDL} (m)	$V_{y_{VGDL}}$ (tonf)	$R\Omega$	R_Y
1	E1N4V2M100LM	141.18	0.0145	169.00	1.20	1.40
2	E1N4V2M125LM	159.37	0.0111	178.62	1.12	1.57
3	E1N4V2M150LM	176.47	0.0090	192.90	1.09	1.73
4	E1N5V2M100LM	165.42	0.0162	218.63	1.32	1.07
5	E1N5V2M125LM	180.07	0.0120	214.82	1.19	1.16
6	E1N5V2M150LM	192.30	0.0094	219.81	1.14	1.23
7	E1N5V2M175LM	216.00	0.0079	243.19	1.13	1.38
8	E1N6V2M100LM	190.99	0.0182	283.41	1.48	0.87
9	E1N6V2M125LM	201.08	0.0131	261.99	1.30	0.91
10	E1N6V2M150LM	212.02	0.0098	250.15	1.18	0.96
11	E1N6V2M175LM	261.77	0.0081	265.61	1.01	1.18
12	E1N6V2M200LM	257.31	0.0070	293.34	1.14	1.15
13	E1N6V3M100LM	227.85	0.0161	300.82	1.32	1.03

N°	ESTRUCTURA	V1f (tonf)	Δy_{VGDL} (m)	Vy_VGDL (tonf)	R Ω	RY
14	E1N6V3M125LM	250.69	0.0120	303.03	1.21	1.13
15	E1N6V3M150LM	274.02	0.0095	314.33	1.15	1.23
16	E1N7V2M100LM	222.60	0.0207	367.96	1.65	0.75
17	E1N7V2M125LM	226.38	0.0145	323.88	1.43	0.76
18	E1N7V2M150LM	233.90	0.0106	293.57	1.26	0.78
19	E1N7V2M175LM	250.35	0.0084	293.16	1.17	0.84
20	E1N7V2M200LM	283.25	0.0072	315.35	1.11	0.94
21	E1N7V3M100LM	258.32	0.0179	374.02	1.45	0.87
22	E1N7V3M125LM	276.56	0.0128	353.12	1.28	0.92
23	E1N7V3M150LM	293.71	0.0097	346.86	1.18	0.98
24	E1N7V3M175LM	328.07	0.0081	377.76	1.15	1.09
25	E1N8V2M100LM	273.18	0.0234	494.85	1.81	0.71
26	E1N8V2M125LM	254.91	0.0166	411.46	1.61	0.66
27	E1N8V2M150LM	255.85	0.0115	349.09	1.36	0.66
28	E1N8V2M175LM	287.96	0.0089	333.17	1.16	0.74
29	E1N8V2M200LM	291.44	0.0073	339.57	1.17	0.75
30	E1N8V2M225LM	314.85	0.0064	367.92	1.17	0.81
31	E1N8V3M100LM	291.96	0.0200	468.41	1.60	0.75
32	E1N8V3M125LM	302.38	0.0138	415.85	1.38	0.78
33	E1N8V3M150LM	315.06	0.0103	391.61	1.24	0.81
34	E1N8V3M175LM	371.66	0.0083	405.29	1.09	0.95
35	E1N8V3M200LM	386.16	0.0071	446.44	1.16	0.98
36	E1N8V4M100LM	326.60	0.0180	476.81	1.46	0.84
37	E1N8V4M125LM	353.85	0.0127	449.47	1.27	0.91
38	E1N8V4M150LM	379.06	0.0097	447.65	1.18	0.97
39	E1N8V4M175LM	426.46	0.0081	492.05	1.15	1.08
40	E2N4V2M100LM	150.43	0.0401	205.95	1.37	0.65
41	E2N4V2M125LM	162.09	0.0350	212.88	1.31	0.69
42	E2N4V2M150LM	170.65	0.0301	214.87	1.26	0.71
43	E2N5V2M125LM	229.45	0.0381	318.08	1.39	0.64
44	E2N5V2M150LM	237.05	0.0330	314.08	1.32	0.65
45	E2N5V2M175LM	210.26	0.0283	278.95	1.33	0.57
46	E2N6V2M150LM	367.32	0.0354	496.32	1.35	0.71
47	E2N6V2M175LM	399.74	0.0308	514.46	1.29	0.77
48	E2N6V2M200LM	331.63	0.0266	429.50	1.30	0.64
49	E2N6V3M125LM	321.67	0.0387	447.64	1.39	0.62
50	E2N6V3M150LM	336.52	0.0336	447.73	1.33	0.65
51	E2N6V3M175LM	297.80	0.0287	397.56	1.33	0.57
52	E2N7V2M175LM	439.98	0.0328	611.44	1.39	0.63
53	E2N7V2M200LM	462.80	0.0285	622.38	1.34	0.66
54	E2N7V2M225LM	492.10	0.0246	622.11	1.26	0.70
55	E2N7V3M150LM	519.80	0.0353	684.94	1.32	0.75
56	E2N7V3M175LM	445.03	0.0306	595.92	1.34	0.63
57	E2N8V2M225LM	806.70	0.0258	1017.99	1.26	0.89

N°	ESTUCTURA	V1f (tonf)	Δy_{VGDL} (m)	Vy_VGDL (tonf)	R Ω	RY
58	E2N8V2M250LM	759.37	0.0223	933.99	1.23	0.83
59	E2N8V3M175LM	612.66	0.0321	822.73	1.34	0.68
60	E2N8V3M200LM	661.83	0.0278	846.16	1.28	0.73
61	E2N8V4M150LM	673.96	0.0356	888.77	1.32	0.74
62	E2N8V4M175LM	577.63	0.0308	773.06	1.34	0.63
63	E3N4V2M175LM	201.98	0.0479	256.63	1.27	0.53
64	E3N5V2M200LM	347.05	0.0489	460.69	1.33	0.60
65	E3N5V2M225LM	325.39	0.0436	417.02	1.28	0.56
66	E3N6V2M250LM	572.00	0.0445	717.60	1.25	0.69
67	E3N6V3M200LM	436.10	0.0482	567.65	1.30	0.53
68	E3N6V3M225LM	483.17	0.0444	610.46	1.26	0.58
69	E3N7V2M275LM	929.48	0.0418	1137.65	1.22	0.84
70	E3N7V3M225LM	738.76	0.0481	944.62	1.28	0.66
71	E3N7V3M250LM	791.41	0.0434	962.96	1.22	0.71
72	E3N8V2M300LM	1,027.86	0.0396	1293.37	1.26	0.72
73	E3N8V3M250LM	1,212.69	0.0461	1513.94	1.25	0.84
74	E3N8V4M225LM	959.08	0.0482	1223.91	1.28	0.66

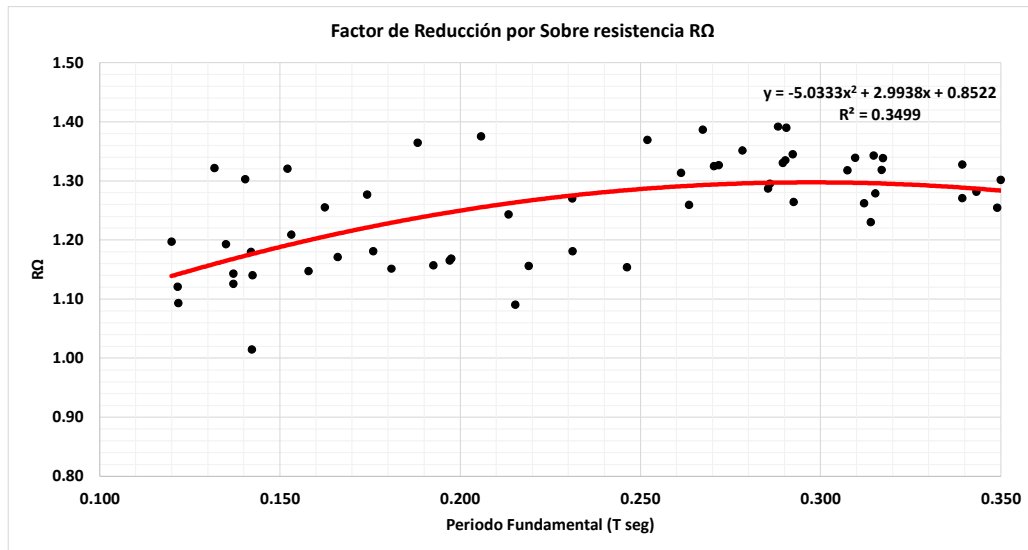
5.9 Cálculo del factor de reducción por sobre resistencia R Ω

El factor de reducción por sobre resistencia esta dado por la relación de la fuerza cortante de fluencia por y la cortante de la primera fluencia.

$$R\Omega = \frac{Vy}{V1f}$$

Figura 34

Factores de reducción por sobre resistencia $R\Omega$ para las 74 estructuras duales



El porcentaje de variación entre los datos es 34.99% y el factor $R\Omega$ varía de 1.14 a 1.30. Y aplicando regresión lineal polinómica de segundo grado obtenemos la ecuación que más se ajusta a los datos:

$$R\Omega = -5.0333 T^2 + 2.9938 T + 0.8522$$

EC. Factor $R\Omega$ en función del periodo

Tomando el promedio de todos los factores de reducción por sobre resistencia obtenemos $R\Omega=1.28$, el cual también podría ser considerado en los cálculos posteriores.

5.10 Cálculo del factor de reducción por diseño R_Y

El factor de reducción por diseño R_Y calcularemos con la siguiente relación:

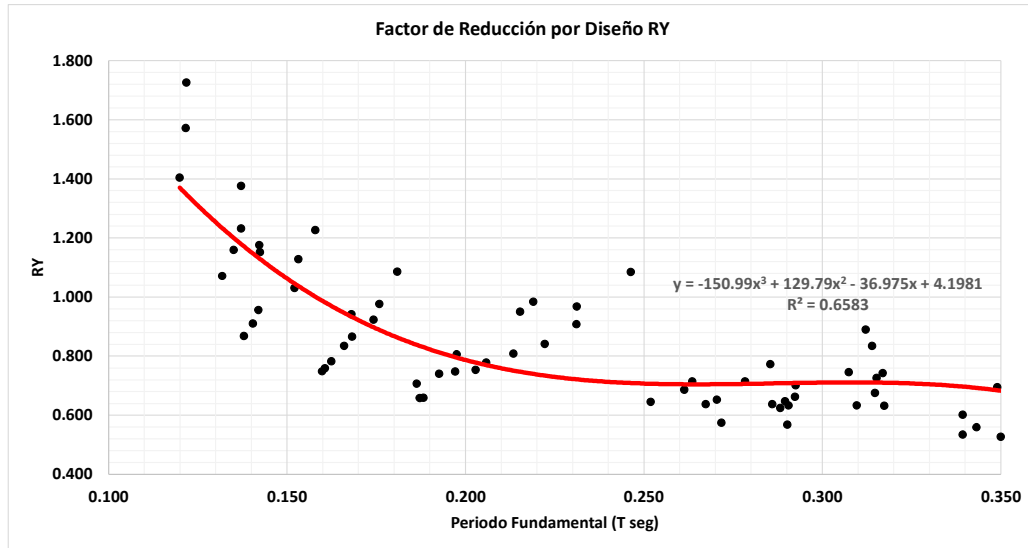
$$R_Y = \frac{V1f}{V_{diseño}}$$

EC. Factor de reducción por diseño R_Y

La cortante de diseño viene dado el análisis lineal elástico para estructuras con sistema dual. Los valores están indicados en la tabla N°5.2 y a continuación mostramos el gráfico de los factores R_Y y la ecuación de la regresión lineal polinómico de tercer grado.

Figura 35

Factor de Reducción por Diseño RY para las 74 estructuras analizadas



El porcentaje de ajuste entre los datos es 65.83% y la ecuación de ajuste esta dado por:

$$RY = -150.99 T^3 + 129.79 T^2 - 36.975 T + 4.1981$$

EC. Factor RY en función del Periodo

Observamos que para periodos menores a 0.20s el factor RY son superiores a 0.80 y para periodos mayores a 0.20s el factor RY se mantiene aproximadamente constante a 0.66.

Capítulo VI: Factor de modificación α_{VGDL} y factor de reducción por ductilidad $R_{\mu VGDL}$

El factor de modificación α_{VGDL} proviene de la relación de la cortante basal para sistemas de varios grados de libertad (VGDL) y la cortante basal para sistemas de un solo grado de libertad (1GDL).

$$\alpha_{VGDL} = \frac{V_{VGDL(\mu=Obj)}}{V_{1GDL(\mu=Obj)}}$$

EC. Factor de modificación α_{VGDL}

La cortante basal para sistemas 1GDL fue determinado en el capítulo 4 empleando el modelo de histéresis gamma para las ductilidades 2, 3 y 4. Asimismo, el cálculo de la cortante basal para sistemas VGDL se empleará el análisis no lineal tiempo historia considerando un modelo 3D donde los elementos de la estructura ingresaran al rango no lineal.

Si el factor de modificación α_{VGDL} es igual o similar a 1 entonces los resultados del factor de reducción por ductilidad ($R_{\mu 1GDL}$) para sistemas 1GDL podrán usarse directamente en la estimación del factor de reducción de fuerzas sísmicas (R), caso contrario, los factores de reducción por ductilidad ($R_{\mu 1GDL}$) serán corregidos por el factor de modificación α_{VGDL} , como se indica en la siguiente expresión.

$$R_{\mu VGDL} = \frac{R_{\mu 1GDL}}{\alpha_{VGDL}}$$

EC. Factor de reducción por Ductilidad para sistemas VGDL

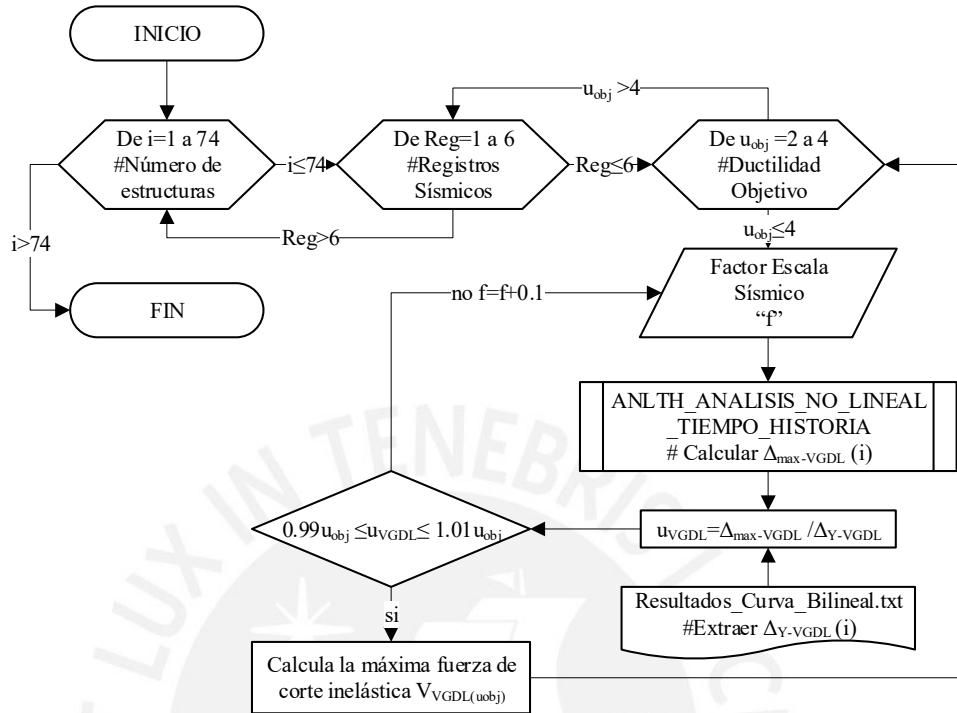
6.1 Esquema de cálculo de la cortante basal V_{VGDL}

La cortante basal V_{VGDL} o fuerza de corte inelástica se determinará para las 74 estructuras seleccionadas. En el cálculo se considerará los 6 registros sísmico y las ductilidades objetivas de 2, 3 y 4. Asimismo, se considerará un factor “f” para escalar los registros sísmicos, este factor variará en el análisis hasta encontrar la ductilidad objetiva para la estructura analizada.

El procedimiento creado en OPENSEES “ANLTH_ANALISIS_NO LINEAL_TIEMPO_HISTORIA” calculará el desplazamiento máximo inelástico Δ_{max_VGDL} y desplazamiento de fluencia ΔY_{VGDL} determinado anteriormente en el análisis no lineal estático calculamos la ductilidad para la estructura en análisis. Si la ductilidad encontrada es igual o similar a la ductilidad objetivo (μ_{obj}), entonces, el procedimiento realizado en OPENSEES extrae la fuerza de corte inelástica $V_{VGDL(\mu_{obj})}$, caso contrario, el factor de escala sísmico “f” se modifica hasta encontrar la ductilidad objetiva.

Figura 36

Diagrama de Flujo Cálculo de la fuerza cortante inelástica V_{VGDL}



6.2 Análisis no lineal tiempo historia para el sistema VGDL

El análisis no lineal tiempo historia para sistemas de VGDL se realizará en OPENSEES y es similar al análisis no lineal estático. A continuación, se muestra los comandos de opensees para la creación del análisis no lineal tiempo historia.

“constrains transformation” transforma la matriz de rigidez condensando los grados de libertad restringidos. Este método reduce el tamaño del sistema para múltiples puntos restringidos. Este es el método recomendado para un análisis transitorio.

“numberer RCM” Este comando se usa para construir un objeto de numeración de grado de libertad RCM para proporcionar el mapeo entre los grados de libertad en los nodos y los números de ecuación. Un numerador RCM utiliza el esquema de Cuthill-McKee inverso para ordenar las ecuaciones matriciales.

“system SparseGeneral” Este comando se utiliza para construir un objeto de sistema disperso general de ecuaciones que se factorizará y resolverá durante el análisis utilizando el solucionador SuperLU.

“test EnergyIncr \$tol \$maxNumIter” Este comando se usa para construir una prueba de convergencia que usa el producto escalar del vector solución y la norma del lado derecho de la ecuación matricial para determinar si se ha alcanzado la convergencia. El significado físico de esta cantidad depende del integrador y del

manejador de restricciones elegido. Normalmente, aunque no siempre, es igual al desequilibrio energético del sistema.

“algorithm KrylovNewton” Este comando se usa para construir un objeto de algoritmo KrylovNewton que usa un acelerador subespacial Krylov para acelerar la convergencia del método newton modificado.

“integrator Newmark \$gamma \$beta” Este comando es usado para construir un objeto integrador Newmark.

“analysis Transient” este comando hace posible el análisis no lineal tiempo historia.

Todos los comandos mencionados fueron implementados en OPENSEES y son necesarios para el análisis no lineal tiempo historia (Mazzoni et al., 2006)

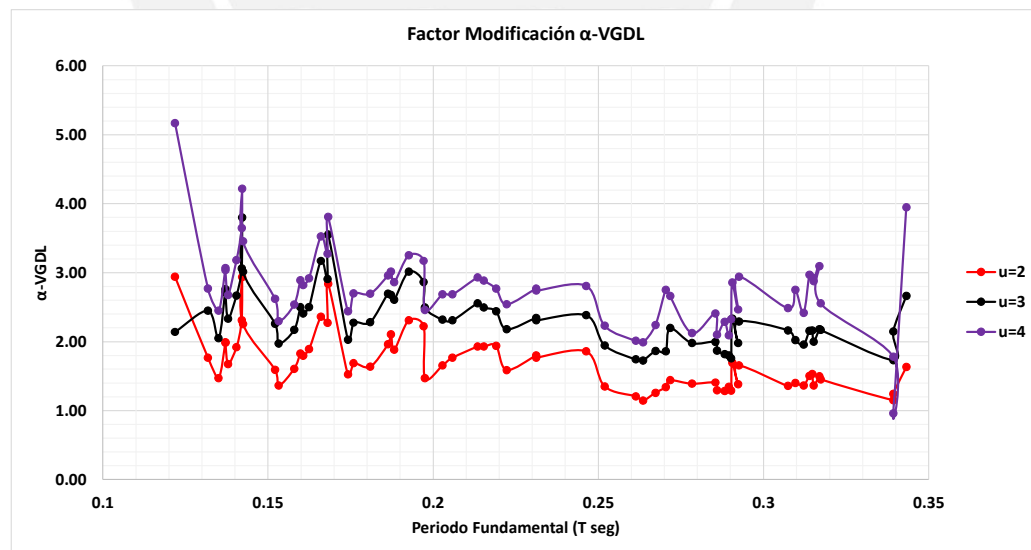
6.3 Cálculo del factor de modificación α_{VGDL}

Terminando los análisis no lineales tiempo historia para sistemas VGDL y 1GDL para los 6 registros y ductilidades de 2, 3 y 4, podemos calcular el factor α_{VGDL} mediante la ecuación que lo define.

En el siguiente gráfico mostramos los resultados promedio de los 6 registros para las diferentes ductilidades.

Figura 37

Resultados promedios para los 6 registros - Factor de modificación α_{VGDL}



El factor de modificación α_{VGDL} es superior a 1.00 para el rango de periodos [0.12;0.34]s. La cortante basal proveniente del análisis no lineal V_{VGDL} es hasta 5 veces mayor a la cortante basal V_{1GDL} del análisis para sistemas reducidos a 1GDL.

El factor α_{VGDL} se va incrementando con la ductilidad objetivo, es decir, a mayor ductilidad en la estructura la variación de cortantes es mayor.

Como el factor de modificación α_{VGDL} es superior a 1 entonces será necesario la corrección del factor de reducción por ductilidad obtenido para sistemas 1GDL.

Nassar concluye que las demandas de ductilidad para sistemas VGDL difiere significativamente de los sistemas 1GDL. Se encontró que la cortante requerida para las ductilidades objetivas dependen fuertemente del tipo de mecanismo de falla (Nassar, 1992)

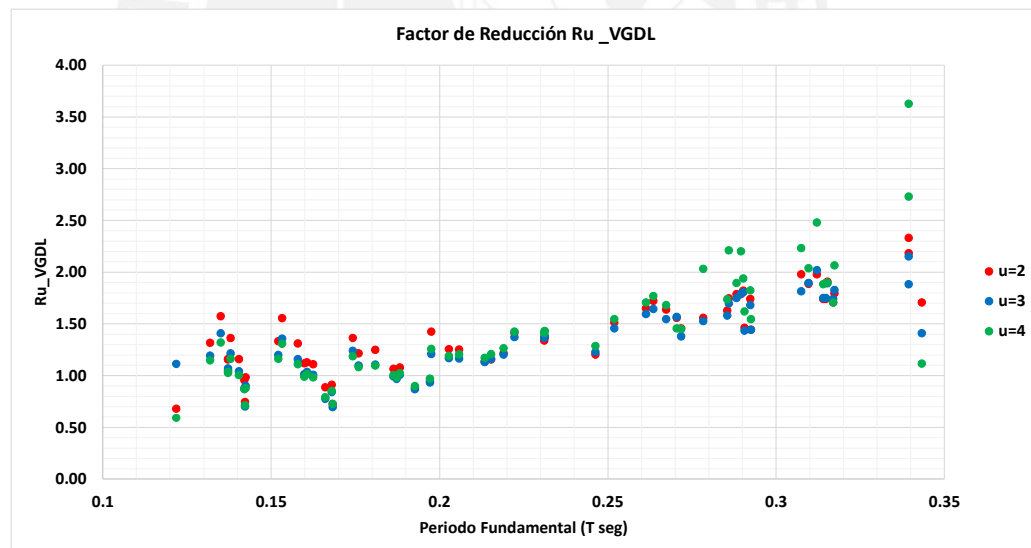
La relación de los factores de reducción en sistemas VGDL y 1GDL es principalmente afectado por el número de pisos y el nivel de deformación inelástico (Santana & Miranda, 2000)

6.4 Factor reducción por ductilidad $R_{\mu VGDL}$

Aplicando la ecuación 6.2 determinaremos el factor de reducción por ductilidad para sistemas de VGDL.

Figura 38

Factor de Reducción $R_{\mu VGDL}$ para las ductilidades de 2, 3 y 4



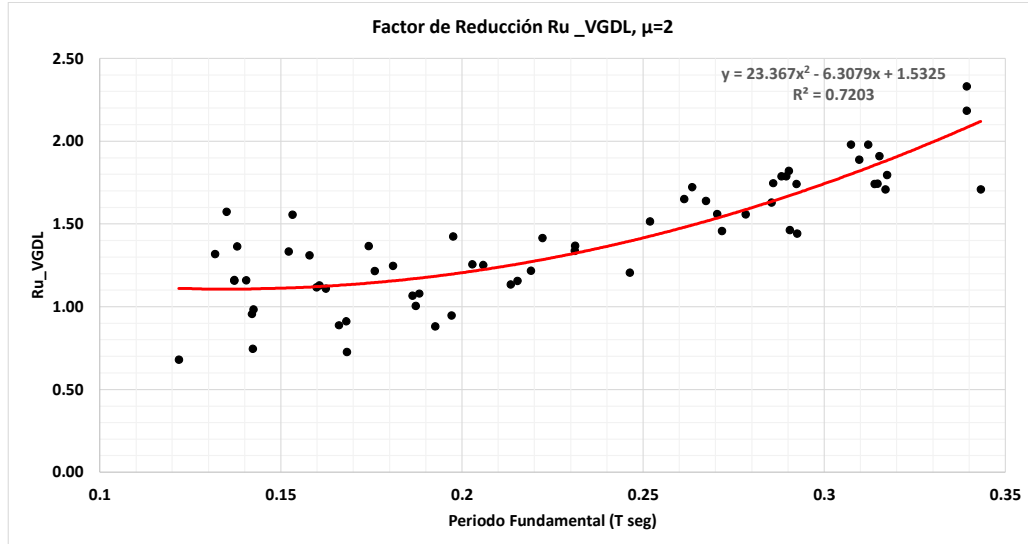
Cada punto en la gráfica representa el promedio de resultados obtenidos para los 6 registros sísmicos. Asimismo, cada punto en el gráfico representa a una estructura con su respectivo periodo fundamental.

Aplicando Regresión lineal polinómica de segundo grado encontraremos la expresión que más se ajusta cada grupo de estructuras con la misma ductilidad. El rango de periodo que se consideró para el análisis de regresión fue [0.12;0.34]s ya que los resultados obtenidos dentro del rango superaron a los 4 registros sísmicos.

La regresión lineal fue realizada en Excel cuyos gráficos se muestran a continuación.

Figura 39

Factor de Reducción $R_{\mu_{VGDL}}$ para ductilidad de 2



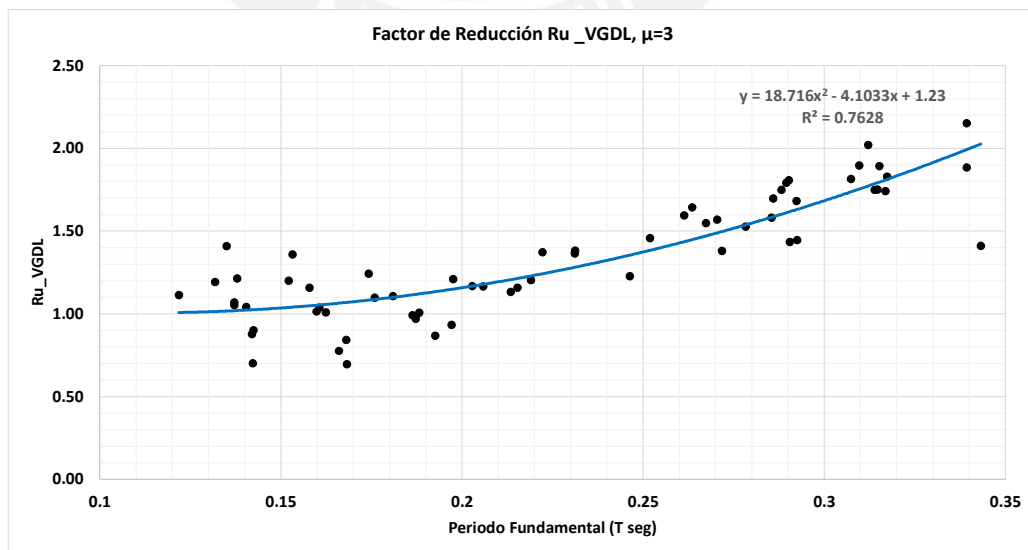
El factor $R_{\mu_{VGDL}}$ para ductilidad de 2 son mayores a 1.10 y alcanzando un máximo de 2.10. El porcentaje de variación entre los datos es 72.03% y la ecuación que representa a factor $R_{\mu_{VGDL}}$ $\mu=2$ es:

$$R_{\mu_{VGDL};\mu=2} = 23.367 T^2 - 6.3079 T + 1.5325$$

EC. Factor $R_{\mu_{VGDL}}$ en función del periodo para ductilidad $\mu=2$

Figura 40

Factor de Reducción $R_{\mu_{VGDL}}$ para ductilidad de 3



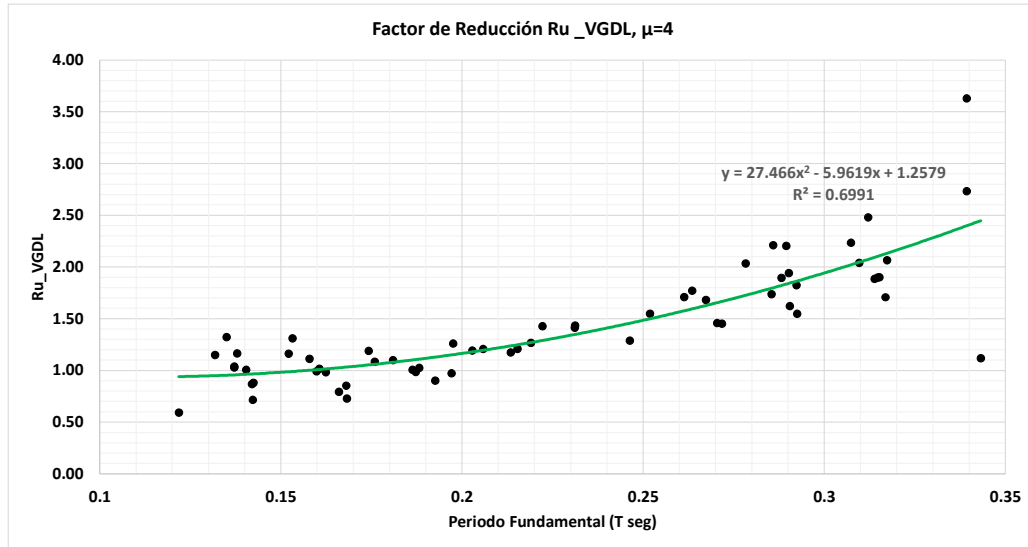
El factor $R_{\mu_{VGDL}}$ para ductilidad de 3 son mayores a 1.00 y alcanzando un máximo de 2.00. El porcentaje de variación entre los datos es 76.28% y la ecuación que representa a factor $R_{\mu_{VGDL}} \mu=3$ es:

$$R_{\mu_{VGDL};\mu=3} = 18.716 T^2 - 4.1033T + 1.23$$

EC. Factor $R_{\mu_{VGDL}}$ en función del periodo para ductilidad $\mu=3$

Figura 41

Factor de Reducción $R_{\mu_{VGDL}}$ para ductilidad de 4



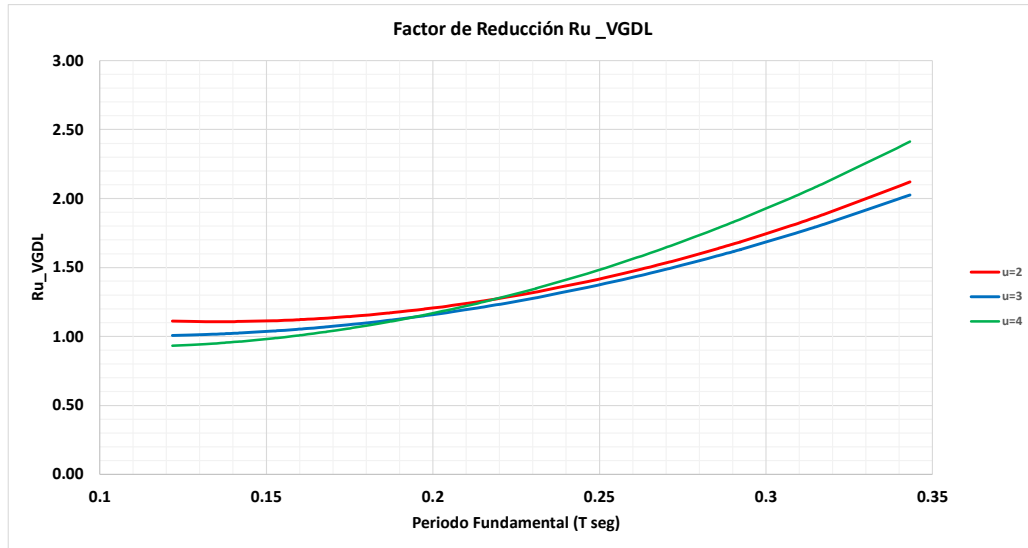
El factor $R_{\mu_{VGDL}}$ para ductilidad de 4 son mayores a 0.90 y alcanzando un máximo de 2.40. El porcentaje de variación entre los datos es 69.91% y la ecuación que representa a factor $R_{\mu_{VGDL}} \mu=4$ es:

$$R_{\mu_{VGDL};\mu=4} = 27.466 T^2 - 5.9619T + 1.2579$$

EC. Factor $R_{\mu_{VGDL}}$ en función del periodo para ductilidad $\mu=4$

Figura 42

Factor de Reducción $R_{\mu_{VGDL}}$ para ductilidad de 4



Sobre poniendo los gráficos anteriores podemos observar una zona de inflexión en el rango de [0.19;0.22]. Para periodos menores a 0.19s, los factores $R_{\mu_{VGDL}}$ decrecen a mayor ductilidad de la estructura, estos periodos corresponden en su mayoría a estructuras de un solo nivel. Para periodos mayores a 0.22s, los factores $R_{\mu_{VGDL}}$ crecen a mayor ductilidad en la estructura, en este rango de periodos las estructuras son de 2 a 3 pisos.

Capítulo VII: Estimación del factor de reducción de fuerzas sísmicas

El factor R es el producto de 3 parámetros: Ductilidad ($R\mu$), Sobre resistencia ($R\Omega$) y diseño (RY) (Gerami et al., 2017)

$$R = R\mu_{VGD L} \cdot R\Omega \cdot RY$$

EC. Factor de reducción de fuerzas sísmicas

Los factores de reducción por sobre resistencia y diseño fueron determinados en el capítulo 5 y el factor de reducción por ductilidad fue calculada en el capítulo 6.

Figura 43

Factor de reducción de fuerza sísmica para sistemas estructurales duales de edificaciones esenciales categoría A2, ductilidad $\mu=2$

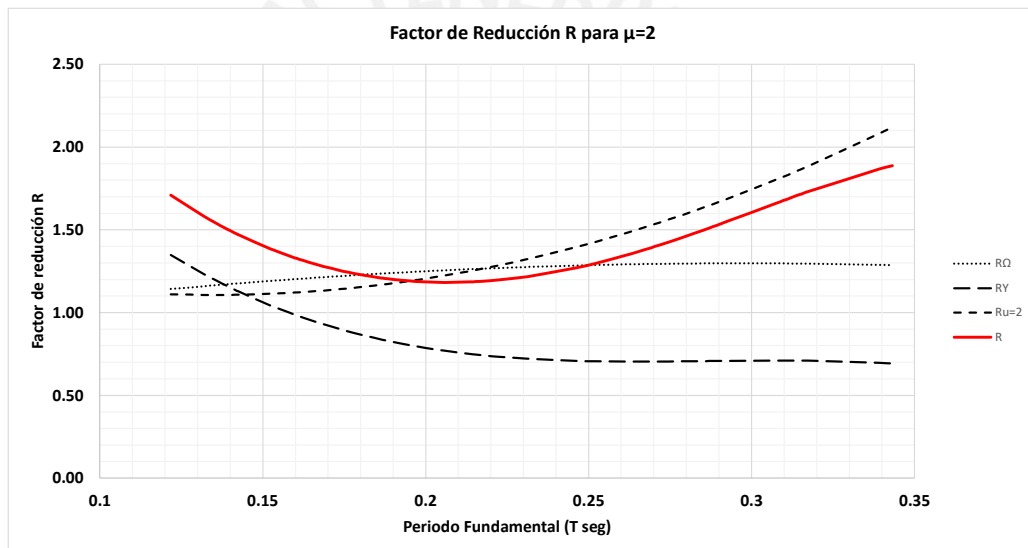


Figura 44

Factor de reducción de fuerza sísmica para sistemas estructurales duales de edificaciones esenciales categoría A2, ductilidad $\mu=3$

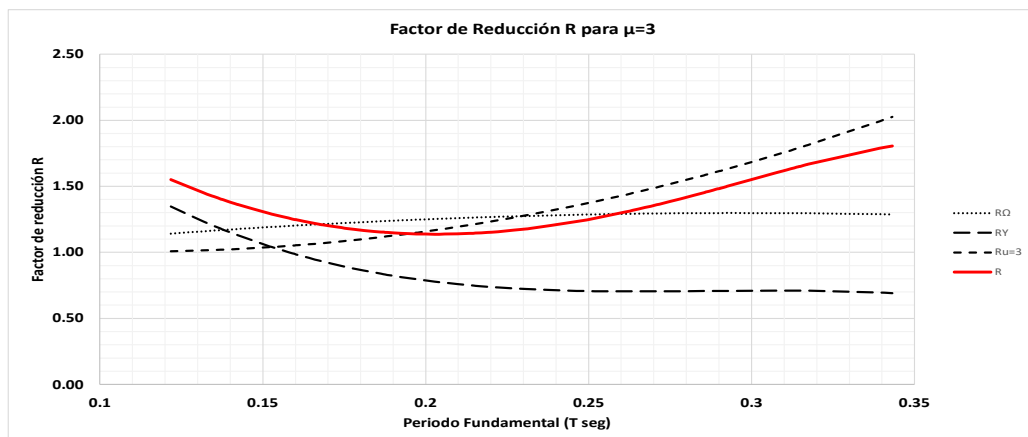
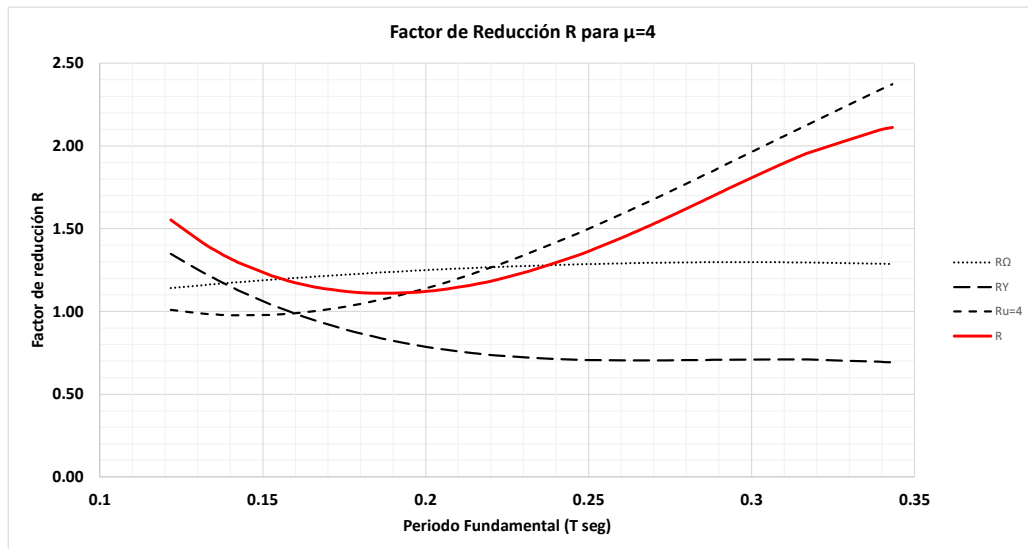


Figura 45

Factor de reducción de fuerza sísmica para sistemas estructurales duales de edificaciones esenciales categoría A2, ductilidad $\mu=4$

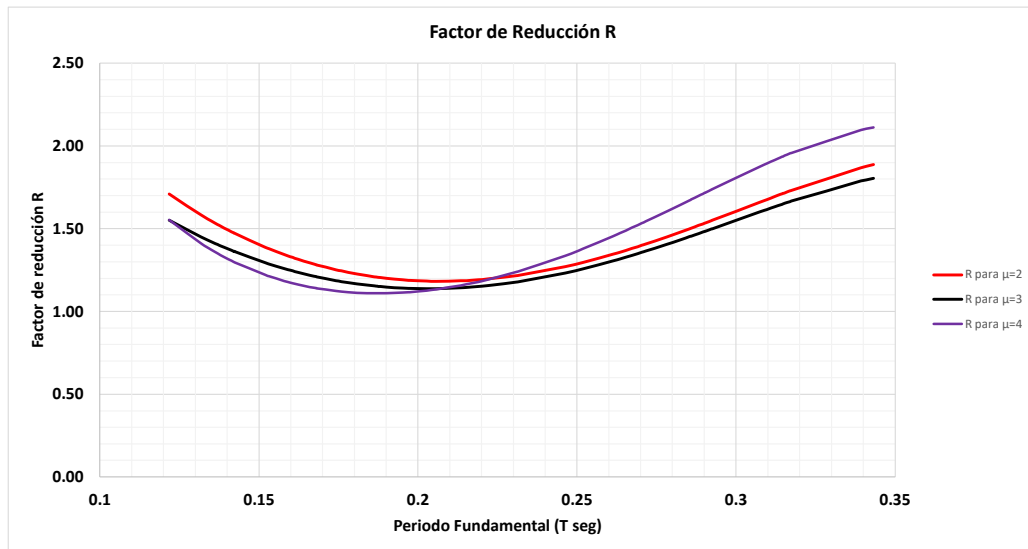


EL factor $R_{\mu_{VGD L}}$ presenta valores crecientes en función al periodo, mientras, el factor RY muestra valores decrecientes en función al periodo, caso contrario, los factores $R\Omega$ muestran valores regularmente constantes.

El producto de los tres parámetros $R_{\mu_{VGD L}}$, $R\Omega$ y RY dan lugar a una nueva función. Donde el factor R para periodos menores a 0.19s es dominado por los valores de RY, por otro lado, para periodos superiores a 0.19s es regido por los valores $R_{\mu_{VGD L}}$.

Figura 46

Factor de reducción de fuerza sísmica para sistemas estructurales duales de edificaciones esenciales categoría A2



El factor de reducción de fuerzas sísmicas R para las ductilidades de análisis está comprendida en [1.1; 2.11], donde los valores mayores a $R=1.50$ corresponden a periodos superiores a 0.30s y periodos menores a 0.13s.

Conclusiones

- El factor de reducción de fuerzas sísmicas debe ser en función del periodo fundamental de la estructura y para una ductilidad objetiva de la estructura. Ver Figura N°7.4
- El Factor de reducción de fuerza sísmica para sistemas estructurales duales de edificaciones esenciales categoría A2 con periodos de 0.12s a 0.34s y ductilidades de 2, 3 y 4 está comprendido entre $R=1.10$ a $R=2.11$. El análisis realizado comprende estructuras duales con derivas menores a 0.007 y los muros de corte toman entre 20% a 80% de la cortante basal. Asimismo, la configuración estructural distribuye a los muros de corte perimetralmente.
- Al emplear la expresión del factor R propuesta en este estudio para edificios similares al estudio, se debe diseñar para fuerzas sísmicas mayores a las requeridas actualmente según la norma E.030 para factor de uso $U=1.50$ (Edificaciones Esenciales)
- El Factor de reducción por ductilidad para sistemas 1GDL ($R_{\mu_{1GDL}}$) para los niveles de ductilidad 2, 3 y 4 varía entre 2.20 y 5.0. Cuyos resultados se obtuvieron empleando el modelo de histéresis gamma y que simula el comportamiento para muros de corte.
- El factor de reducción por sobre resistencia R_{Ω} para todas las estructuras analizadas varía entre 1.14 a 1.30, siendo el promedio de todas las estructuras 1.28.
- El factor de reducción por diseño R_Y presenta una ecuación decreciente en función al periodo. Para periodos menores a 0.20s el factor R_Y son superiores a 0.80 y para periodos mayores a 0.20s el factor R_Y se mantiene aproximadamente constante a 0.66.
- EL empleo del programa OPENSEES en la elaboración de Tesis fue vital para obtención de resultados masivos. El lenguaje de programación TCL y los comandos propios de OPENSEES de libre acceso facilitaron los análisis lineales y no lineales.

Recomendaciones

Los análisis realizados consideran una configuración típica para sistemas duales, se recomienda realizar el análisis para diferentes configuraciones y reforzar los resultados ya obtenidos.



Referencias bibliográficas

- Aguiar, R. (2003). *Análisis Sísmico Por Desempeño*. (September), 341.
- Braga, F., Gigliotti, R., & Laterza, M. (2006). Analytical stress-strain relationship for concrete confined by steel stirrups and/or FRP jackets. *Journal of Structural Engineering*, 132(9), 1402–1416.
- Burgos Namuche, M. (2007). *Estudio de la metodología “diseño por capacidad” en edificaciones aperticadas de concreto armado para ser incorporada a la norma peruana E-060 como alternativa de diseño*.
- Daza Duarte, L. G. (1996). *Nuevo enfoque para determinar el factor de Modificación de Respuesta*. (1), 33–48.
- FEMA, B. S. S. (2000). *Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings*. Washington, DC.
- Filippou, F. C., Popov, E. P., & Bertero, V. V. (1983). *Effects of bond deterioration on hysteretic behavior of reinforced concrete joints*.
- Gerami, M., Siahpolo, N., & Vahdani, R. (2017). Effects of higher modes and MDOF on strength reduction factor of elastoplastic structures under far and near-fault ground motions. *Ain Shams Engineering Journal*, 8(2), 127–143.
<https://doi.org/10.1016/j.asej.2015.08.015>
- Kostic, S. M., & Filippou, F. C. (2012). Section discretization of fiber beam-column elements for cyclic inelastic response. *Journal of Structural Engineering*, 138(5), 592–601.
- Lestuzzi, P., & Badoux, M. (2003). *the Γ -Model: a Simple Hysteretic Model for Reinforced Concrete Walls*. (126), 1–12.
- Mazzoni, S., McKenna, F., Scott, M. H., Fenves, G. L., & others. (2006). OpenSees command language manual. *Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) Center*, 264.
- Morales, R. M. (2004). *Diseño en concreto armado*. Fondo Editorial ICG.
- MVCS. (2018). DECRETO SUPREMO QUE MODIFICA LA NORMA TÉCNICA E.030 “DISEÑO SISMORRESISTENTE” DEL REGLAMENTO NACIONAL DE EDIFICACIONES, APROBADA POR DECRETO SUPREMO N°011-2006-VIVIENDA, MODIFICADA CON DECRETO SUPREMO N°002-2014-VIVIENDA. *El Peruano*, I(DECRETO SUPREMO N°003-2016-VIVIENDA), 32.
- Nassar, A. A. (1992). *Seismic demands for SDOF and MDOF systems*.
- Ramírez, O. M. (2001). El factor de modificación de respuesta, R, para edificios de período corto. *Universidad Tecnológica de Panamá*, 1(1), 10.
- Riddell, R., Hidalgo, P., & Cruz, E. (1989). Response modification factors for earthquake resistant design of short period buildings. *Earthquake Spectra*,

5(3), 571–590.

Santana, P., & Miranda, E. (2000). Strength Reduction Factors for Multi-Degree-of-Freedom Systems. *12Wcee*, (2), 1–8.

