



# UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA

*La Universidad Católica de Loja*

## TITULACIÓN DE INGENIERÍA CIVIL

**Sensibilidad a parámetros de modelamiento estructural e incertidumbre relacionada**

Trabajo de fin de titulación.

**Autor:**

Mendoza Calva, Daniel Anibal

**Directora:**

Ayala Mendoza, Adriana del Carmen, Ing.

LOJA – ECUADOR

2012

# CERTIFICACIÓN

Ingeniera.

Adriana del Carmen Ayala Mendoza.

## DIRECTORA DEL TRABAJO DE FIN DE TITULACIÓN

### CERTIFICA:

Que el presente trabajo, denominado: **“Sensibilidad a parámetros de modelamiento estructural e incertidumbre relacionada”** realizado por el profesional en formación: Mendoza Calva Daniel Anibal; cumple con los requisitos establecidos en las normas generales para la Graduación en la Universidad Técnica Particular de Loja, tanto en el aspecto de forma como de contenido, por lo cual me permito autorizar su presentación para los fines pertinentes.

Loja, octubre de 2012

f) .....

CI: .....

## **CESIÓN DE DERECHOS**

“Yo Mendoza Calva Daniel Anibal declaro ser autor del presente trabajo y eximo expresamente a la Universidad Técnica Particular de Loja y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Adicionalmente declaro conocer y aceptar la disposición del Art. 67 del Estatuto Orgánico de la Universidad Técnica Particular de Loja que en su parte pertinente textualmente dice: “Forman parte del patrimonio de la Universidad la propiedad intelectual de investigaciones, trabajos científicos o técnicos y tesis de grado que se realicen a través, o con el apoyo financiero, académico o institucional (operativo) de la universidad”.

**f)**.....

**Autor:** Mendoza Calva Daniel Anibal

**CI:** 1104049141

## **DEDICATORIA**

“A mi familia por ser lo más importante en mi vida, gracias por apoyarme siempre y estar a mi lado en cada nuevo objetivo”

Daniel Anibal Mendoza Calva

## **AGRADECIMIENTO**

El culminar con el proyecto de investigación ha supuesto un importante enriquecimiento personal y a la vez una gran satisfacción pues lo que se obtiene con esfuerzo y dedicación es lo que más se valora. A lo largo de este camino he tenido algunos obstáculos y dificultades, sin embargo, he contado con la ayuda, el apoyo y la compañía de muchas personas a las que quiero expresar mi agradecimiento.

En primer lugar agradezco a mi Directora de Tesis, Ing. Adriana del Carmen Ayala, por el interés y la dedicación que le ha procurado al desarrollo de este proyecto de investigación, transmitiéndome la confianza necesaria para llevarlo a cabo.

A la Universidad Técnica Particular de Loja por la formación académica que me brindó, así como a todos y cada de uno de los profesores de la Escuela de Ingeniería Civil, quienes desinteresadamente y tolerantes compartieron sus conocimientos.

A mis padres y a mis hermanas por su apoyo incondicional, su abnegación y comprensión durante el largo camino de mi carrera universitaria.

Finalmente a mis amigos y compañeros, por la confianza que me han otorgado y de quienes he tenido la suerte de aprender a lo largo de estos años.

Daniel Anibal Mendoza Calva

## RESUMEN

La calidad de los resultados del análisis y diseño de estructuras depende directamente de la forma de representar el comportamiento de las mismas a través de un modelo adecuado lo más realista posible. A través de la historia del cálculo estructural se han propuesto muchas formas de modelamiento de cada uno de los componentes de la estructura, de tal modo que hoy en día se tienen varias opciones cada una con diferencias sustanciales.

El proceso de modelamiento estructural siempre ha sido motivo de preocupación para la comunidad de ingenieros ocupados de las estructuras, dicho proceso es producto de una serie de toma de decisiones que determinarán los resultados finales de la modelación y simulación de estructuras. Debido al avance en la tecnología e investigación, los analistas tienen al alcance varias herramientas de modelamiento estructural que permiten acceder al uso de múltiples formas de concebir el comportamiento de las estructuras, esto significa que el analista a cargo de la modelación estará sometido a la necesidad de decidir durante varias etapas del proceso, añadiendo al proceso una variable relacionada con quien realiza el análisis y su experiencia en el uso de la teoría estructural y los modelos utilizados. Establecer cuáles son las opciones más apropiadas en cada caso dependerá entonces en gran medida del conocimiento de las consecuencias para cada una de las opciones disponibles, es decir el analista debe tener completa conciencia del modelo y lo que esto significa en los resultados.

En vista de la importancia que tiene el proceso de modelación en todas sus etapas y con el objetivo de aportar con el conocimiento racional de la sensibilidad a los parámetros, entendida como la influencia de las decisiones del analista en los resultados del análisis, el presente trabajo se enfoca en el estudio de la “**Sensibilidad a parámetros de modelamiento estructural e incertidumbre relacionada**”, esto a través de un estudio paramétrico que facilite entender bajo que parámetros o condiciones los modelos producen resultados más cercanos al comportamiento real de las estructuras.

Para el presente estudio se analizará el comportamiento de modelos que corresponden a tres edificios regulares de configuraciones diferentes entre sí, en los programas OpenSees y SeismoStruct. Para ello se ha realizado análisis no-lineales de las estructuras en las que se ha considerado la variación de múltiples parámetros, calibrados y seleccionados adecuadamente con la finalidad de observar la respuesta a la acción de cargas estáticas y/o dinámicas y estudiar las variaciones relacionadas con los parámetros considerados en los diferentes modelos generados.

Los resultados obtenidos determinarán la combinación más adecuada de parámetros que permitan el modelamiento confiable de las estructuras consideradas en el análisis, además se contribuye con un fundamento científico que aporta con datos sobre la influencia de los parámetros de modelación en los resultados.

## ABSTRACT

The quality of the structural analysis and design depend directly on the way of representing the structural behavior through a suitable model as realistic as possible. Through history it had been proposed many ways of modeling structures and its members each one with differences that sometimes can determine the accuracy in the results. So that today there are several options each with substantial differences and are structural engineers who have to take the decision of selecting each parameter to be considered on their model.

The structural modeling process has always been a concern for the structural engineering community; the whole process is the product of a series of decisions that will determine the final result of the structural modeling and simulation. Due to the advancement in technology and research, analysts have several tools available for structural modeling that allow the use of multiple ways of understanding the structural behavior, this means that the analyst in charge of modeling will need to take several decisions during various stages of the process, such situation is adding to the modeling procedure one more variable related with the person who performs the analysis and his/her experience in the use of structural theory and the models conception. The correct selection of the most appropriate options in each case will depend largely on the knowledge of the consequences for each of the available options, i.e. the analyst must have full awareness of the model procedures and its parameters with a complete understanding of the impact of each decision in the final results.

Given the importance of the modeling process at all its stages and in order to contribute to the rational knowledge of the sensitivity parameters, and the influence of the analyst's decisions on the analysis results, this paper focuses on the study of "**Structural modeling parameter sensitivity and related uncertainty**", through a parametric study to better understand the impact of parameters or conditions under the model's results and the best way of ensuring results closer to the real structural behavior.



During the present investigation it is analyzed the model behavior corresponding to three different regular building configurations in each of OpenSees and SeismoStruct programs. This analysis has been performed non-linear structures where the variation has been considered as multiple parameters appropriately selected and calibrated with the aim of observing the response during static and / or dynamic analysis for all the different models generated.

The results will determine the best combination of parameters for reliable modeling of the structures considered in the present analysis, and will contribute as a scientific foundation that will provide data related with the influence of modeling parameters on the results.

# ARTÍCULO TÉCNICO

## Introducción

Cualquier proyecto de estructuras, antes de su análisis y diseño debe ser previamente representado en un modelo matemático. En la actualidad existen al alcance múltiples herramientas que permiten la modelación estructural en niveles cada vez más variados, sin embargo la pluralidad de opciones genera un escenario en el que el ingeniero analista debe seleccionar el tipo de modelo y calibrarlo en función de la estructura en estudio, reflejándose en un conjunto de decisiones durante varias etapas de la modelación que determinarán los resultados finales del proceso de modelamiento y simulación de estructuras.

Con el objetivo de determinar la combinación más adecuada de parámetros que permitan el modelamiento confiable de las estructuras consideradas en el análisis; es decir la combinación que produzca los resultados más realistas; con el ánimo de contribuir con un fundamento científico que aporte con datos sobre la influencia de los parámetros de modelación en los resultados, se analizará el comportamiento de modelos que corresponden a tres edificios regulares de configuraciones diferentes, en los programas OpenSees y SeismoStruct.

## Problema

El principal problema radica en la falta de estudios detallados que proporcionen información sobre la incertidumbre respecto al modelo que se debe usar en un análisis. Existen muchos tipos de modelo tanto para materiales, elementos, solución de ecuaciones implícitas, etc. lo que provoca muchas opciones, y el analista debe ser consciente de que de la toma de decisiones dependerán los resultados que deben ser lo más representativos posibles del comportamiento real de la estructura.

## **Metodología**

Se pretende realizar el análisis de sensibilidad a cuatro parámetros de modelamiento estructural que son: tipo de concreto, tipo de acero, tipo de elemento y número de puntos de integración. Para ello se analizará el comportamiento de los modelos que corresponden a tres edificios regulares de configuraciones diferentes mientras se varía los parámetros mencionados, todo esto a través de la interpretación de los resultados que se obtengan de los programas OpenSees y SeismoStruct.

### **Características de la estructura**

La estructura está sometida a cargas gravitatorias; se ha asignado masa en los nudos donde las columnas se conectan, cada conexión toma la mitad de la masa de cada elemento dentro de este pórtico. El tamaño de las fibras usadas en la creación de las secciones de los miembros y el análisis no-lineal son constantes. Los “recorders” (datos de salida) serán almacenados en una carpeta llamada “Data” que contendrá todos los resultados de la totalidad de los análisis. Los modelos en OpenSees han sido escritos de tal manera que todo el proceso se ha expresado en función de variables en lugar de valores, con la finalidad de generalizar su uso para toda la gama de modelos que se han producido. La variación de los parámetros se ha hecho de forma aleatoria de modo que el investigador no introduce ningún tipo de sesgo en la selección de los parámetros. Además con el objetivo de optimizar el rendimiento del modelamiento y como iniciativa adicional al proyecto de investigación, se utiliza el programa Matlab para automatizar el trabajo, es decir, a través del uso del software se escoge aleatoriamente las variables del proceso de modelamiento que corresponden a los parámetros utilizados para el análisis de sensibilidad, además de automatizar los procesos de generación de modelos, que de otro modo representaría una tarea muy ardua.

El mapa de procesos de los códigos generados en Matlab se presenta en el siguiente flujograma, en donde se describe la generación de parámetros y la construcción de los modelos tanto para el análisis dinámico cuanto para el análisis Pushover estático.

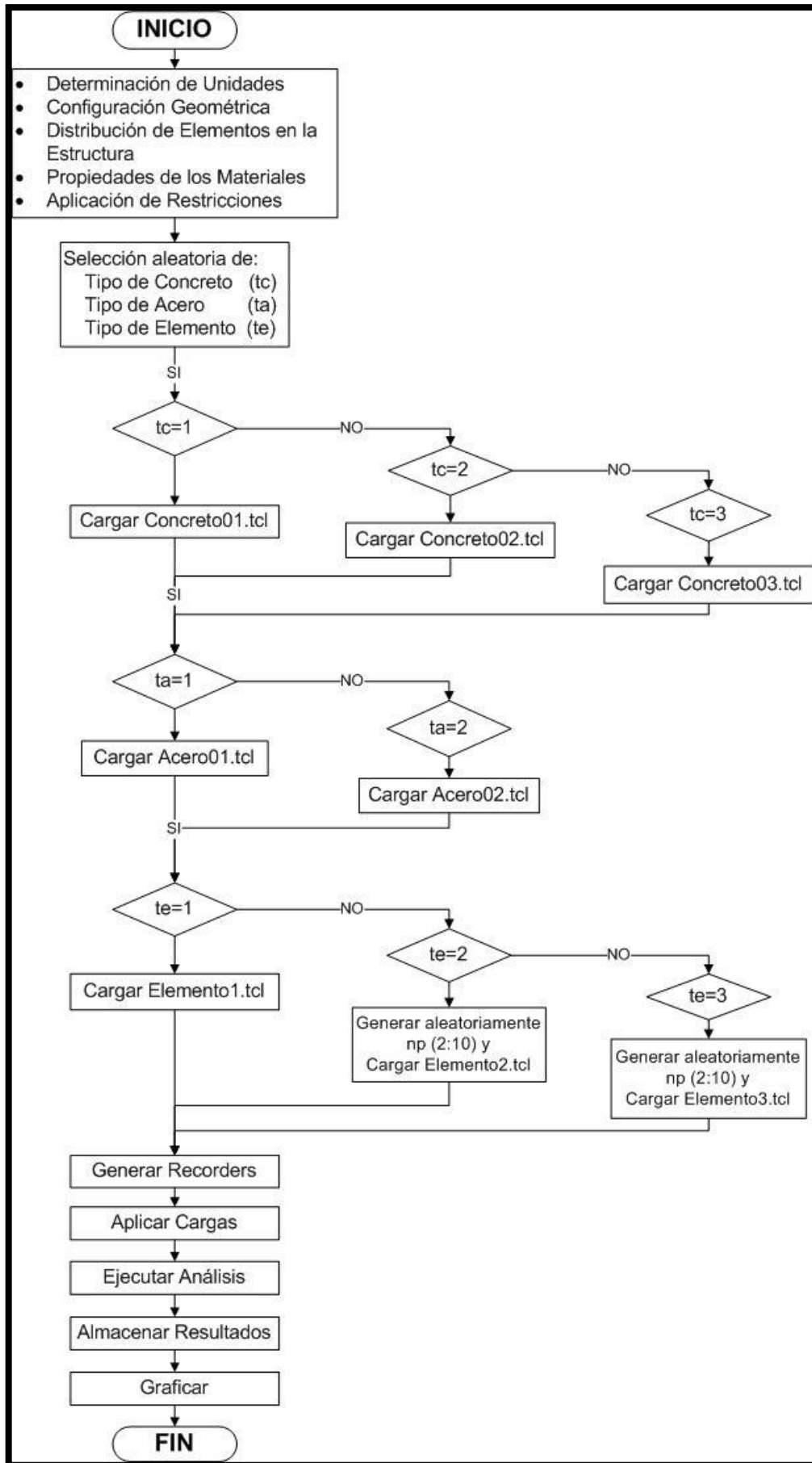


Figura1. Flujograma del proceso de modelamiento estructural

## Resultados

Los modelos de los parámetros que se consideraron para el análisis de sensibilidad y que se encuentran disponibles en la galería de OpenSees, son los siguientes:

- **Tipo de Concreto**

**Cuadro1.** Diferencias en el tipo de concreto

Concreto	Resistencia a la Tensión	Zona de Tensión
01	NO	-----
02	SI	Lineal
03	SI	No-lineal

- **Tipo de Acero**

**Cuadro2.** Diferencias en el tipo de acero

Acero	Endurecimiento
01	NO
02	SI

- **Tipo de Elemento**

**Elemento1.-** Describe al elemento elástico. Depende de la dimensión del problema, de las propiedades del material y las constantes geométricas.

**Elemento2.-** Describe el elemento no-lineal. Está basado en una formulación iterativa o no iterativa de fuerza y considera plasticidad distribuida a lo largo del elemento.

**Elemento3.-** Este tipo de elemento es no-lineal y está basado en una formulación iterativa o no iterativa de flexibilidad que considera plasticidad concentrada al final de los miembros.

- **Número de puntos de integración.-** Este parámetro está asociado con la subdivisión del elemento.

De las opciones disponibles en OpenSees, los modelos producen resultados más cercanos al comportamiento real de las estructuras utilizando los siguientes parámetros:

- Concreto02
- Acero02
- Elemento3 (elemento no-lineal con rótulas plásticas)
- Número de puntos de integración 5

## **Conclusiones**

Los resultados varían en mayor proporción de concreto a concreto, seguido del tipo de elemento, número de puntos de integración y tipo de acero, en ese orden respectivamente. En las tablas siguientes se muestra las diferencias que se producen al utilizar cada uno de los parámetros considerados en el análisis de sensibilidad. Para determinar estas diferencias en cada caso se mantuvo constantes tres de los cuatro parámetros de sensibilidad.

**Tabla1.** Derivas del Edificio 1

	Identificación	Derivas máximas	Diferencia	Diferencia en Porcentaje (%)
<b>Solamente varía el tipo de concreto</b>				
<b>Caso N° 1</b>	Concreto01	0.5049	0.236	46.70
	Concreto02	0.2691		
ta=Acero01 te=Elemento3 np=8	Concreto02	0.2691	0.002	0.74
	Concreto03	0.2711		
	Concreto01	0.5049	0.234	46.31
	Concreto03	0.2711		
<b>Solamente varía el tipo de elemento</b>				
<b>Caso N° 2</b>	Elemento1	0.3444	0.205	37.28
	Elemento2	0.5491		
tc=Concreto01 ta=Acero01 np=7	Elemento2	0.5491	0.044	8.07
	Elemento3	0.5048		
	Elemento1	0.3444	0.160	31.77
	Elemento3	0.5048		
<b>Solamente varía el número de puntos de integración</b>				
<b>Caso N° 3</b>	2	0.4008	0.113	28.24
tc=Concreto02	6	0.2876		
ta=Acero02 te=Elemento2	6	0.2876	0.001	0.35
	10	0.2866		
<b>Solamente varía el tipo de acero</b>				
<b>Caso N° 4</b>	Acero01	0.2711	0	0
tc=Concreto03 te=Elemento3 np=8	Acero02	0.2711		

**Tabla2.** Desplazamientos del Edificio 1

	Identificación	Desplazamientos máximos (cm)	Diferencia	Diferencia en Porcentaje (%)
<b>Solamente varía el tipo de concreto</b>				
<b>Caso N° 1</b>	Concreto01	3.601	1.654	45.93
	Concreto02	1.947		
ta=Acero01 te=Elemento3 np=8	Concreto02	1.947	0.016	0.82
	Concreto03	1.963		
	Concreto01	3.601	1.638	45.49
	Concreto03	1.963		
<b>Solamente varía el tipo de elemento</b>				
<b>Caso N° 2</b>	Elemento1	2.474	1.517	38.01
	Elemento2	3.991		
tc=Concreto01 ta=Acero01 np=7	Elemento2	3.991	0.388	9.72
	Elemento3	3.603		
	Elemento1	2.474	1.129	31.33
	Elemento3	3.603		
<b>Solamente varía el número de puntos de integración</b>				
<b>Caso N° 3</b>	2	3.06	0.968	31.63
tc=Concreto02	6	2.092		
ta=Acero02 te=Elemento2	6	2.092	0.005	0.24
	10	2.087		
<b>Solamente varía el tipo de acero</b>				
<b>Caso N° 4</b>	Acero01	1.963	0	0
tc=Concreto03 te=Elemento3 np=8	Acero02	1.963		



## Referencias

- I. E. BAL , H. CROWLEY y R. PINHO. Displacement-Based Earthquake Loss Assessment: Method Development and Application to Turkish Building Stock, Centre for Post-Graduate Training and Research in Earthquake Engineering and Engineering Seismology, December 2010.
- MAZZONI, FRANK MCKENNA, MICHAEL H. SCOTT, ET AL. Open System for Earthquake Engineering Simulation User Command-Language Manual. PACIFIC EARTHQUAKE ENGINEERING RESEARCH CENTER, UNIVERSITY OF CALIFORNIA, BERKELEY. MAY 2009.
- ABO AL EZZ, A. [2007]. Deformation and strength based assessment of seismic failure mechanisms for existing RC frame buildings, Centre for Post-Graduate Training and Research in Earthquake Engineering and Engineering Seismology (ROSE School), University of Pavia, Italy.
- American Concrete Institute [1984], Earthquake Effects on Reinforcement Concrete Structures, Publication SP-84, US-Japan Research, American Concrete Institute, Detroit.
- ANTONIOU, S., PINHO, R [2004a]. Advantages and Limitations of Adaptive and Non-Adaptive Force-Based Pushover Procedures, Journal of Earthquake Engineering, 8(4), pp. 497-522.
- ANTONIOU S. and PINHO, R [2004b]. Development and Verification of a Displacement-Based Adaptive Pushover Procedures, Journal of Earthquake Engineering, Vol. 8, No. 5, pp. 643-661.
- ELNASHAI, A. S. [2001]. Advanced inelastic static (pushover) analysis for earthquake applications, Structural Engineering and Mechanics, 12(1), pp. 51-69.
- MAZZONI SILVIA, MCKENNA FRANK, SCOTT MICHAEL, FENVES GREGORY, ET AL. (Printed on 1 July, 2007), OpenSees Command Language Manual. 451p.

# ÍNDICE DE CONTENIDOS

## PÁGINAS PRELIMINARES

CERTIFICACIÓN.....	i
CESIÓN DE DERECHOS.....	ii
DEDICATORIA .....	iii
AGRADECIMIENTO .....	iv
RESUMEN.....	v
ABSTRACT .....	vii
ARTÍCULO TÉCNICO .....	ix
Introducción.....	ix
Problema.....	ix
Metodología.....	x
Resultados.....	xii
Conclusiones.....	xiii
Referencias .....	xvi

## CAPÍTULO I

1. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO .....	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Alcance .....	2
1.3 Objetivos de la investigación .....	3
1.3.1 Objetivo general.....	3
1.3.2 Objetivos específicos.....	3
1.4 Organización de la investigación .....	3

## **CAPÍTULO II**

2.	MODELOS DE ESTUDIO Y TIPOS DE ANÁLISIS.....	4
2.1	Modelos de estudio.....	4
2.2	Tipos de análisis.....	5

## **CAPÍTULO III**

3.	MODELAMIENTO DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO ARMADO .....	8
3.1	Introducción.....	8
3.2	Características físicas de los edificios .....	8
3.3	Modelamiento en OpenSees.....	10
3.3.1	Parámetros utilizados en análisis de sensibilidad.....	12
3.3.2	Proceso del modelamiento estructural.....	16
3.4	Modelamiento en SeismoStruct.....	18
3.4.1	Parámetros utilizados en análisis de sensibilidad.....	19
3.4.2	Proceso del modelamiento estructural.....	22

## **CAPÍTULO IV**

4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	31
4.1	Calibración del modelo.....	32
4.2	Análisis del Edificio 1 .....	35
4.2.1	Análisis Dinámico .....	35
4.2.1.1	Derivas.....	35
4.2.1.2	Desplazamientos.....	42
4.2.2	Análisis Pushover .....	48
4.2.2.1	Derivas.....	48
4.2.2.2	Desplazamientos.....	54
4.3	Análisis del Edificio 2 y Edificio 3.....	60
4.4	Combinación óptima .....	61

4.4.1	Edificio 1 .....	61
4.4.2	Edificio 2 .....	63
4.4.3	Edificio 3 .....	65

## **CAPÍTULO V**

5.	CONCLUSIONES.....	68
	BIBLIOGRAFÍA.....	71
	ANEXOS.....	72
	Anexo1. Construcción del modelo en OpenSees .....	72
	Anexo2. Instrucciones para la secuencia de código.....	86

# 1. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO

## 1.1 Introducción

La calidad de los resultados del análisis y diseño de estructuras depende directamente de la forma de representar el comportamiento de las mismas a través de un modelo adecuado lo más realista posible. A través de la historia del cálculo estructural se han propuesto muchas formas de modelamiento de cada uno de los componentes de la estructura, de tal modo que hoy en día se tienen varias opciones cada una con diferencias sustanciales.

El proceso de modelamiento estructural siempre ha sido motivo de preocupación para la comunidad de ingenieros ocupados de las estructuras, dicho proceso es producto de una serie de toma de decisiones que determinarán los resultados finales de la modelación y simulación de estructuras. Debido al avance en la tecnología e investigación, los analistas tienen al alcance varias herramientas de modelamiento estructural que permiten acceder al uso de múltiples formas de concebir el comportamiento de las estructuras, esto significa que el analista a cargo de la modelación estará sometido a la necesidad de decidir durante varias etapas del proceso, añadiendo al proceso una variable relacionada con quien realiza el análisis y su experiencia en el uso de la teoría estructural y los modelos utilizados. Establecer cuáles son las opciones más apropiadas en cada caso dependerá entonces en gran medida del conocimiento de las consecuencias para cada una de las opciones disponibles, es decir el analista debe tener completa conciencia del modelo y lo que esto significa en los resultados.

En general, los programas de análisis de estructuras más poderosos ofrecen múltiples posibilidades y opciones que el usuario puede aplicar. En la etapa de creación del modelo, se representa la estructura real por medio de una construcción simplificada de los elementos que lo conforman. Los programas de análisis de estructuras permiten realizar el modelamiento de una estructura, el procesamiento numérico de los datos y el análisis de los resultados por

medio de las etapas de pre procesamiento, procesamiento y post procesamiento.

La variedad de parámetros que se utilizan en la modelación se reparten en un amplio espectro empezando por el tipo de elemento y la formulación del tipo de análisis, a pesar de que existen ciertas “Reglas de Oro”, no hay indicaciones obvias y claras para muchas de las opciones disponibles. Es más existen casos en los que los resultados obtenidos pueden resultar significativamente diferentes para cada tipo y conjunto de parámetros utilizados.

Con el objetivo de determinar la combinación más adecuada de parámetros que permitan el modelamiento confiable de las estructuras consideradas en el análisis y con el ánimo de contribuir con un fundamento científico que aporte con datos sobre la influencia de los parámetros de modelación en los resultados, se analizará el comportamiento de modelos que corresponden a tres edificios regulares de configuraciones diferentes, en los programas OpenSees y SeismoStruct.

Para ello se ha realizado análisis no-lineales de las estructuras en las que se ha considerado la variación de múltiples parámetros, calibrados y seleccionados adecuadamente con la finalidad de observar la respuesta a la acción de cargas estáticas y/o dinámicas y estudiar las variaciones relacionadas con los parámetros correspondientes.

## **1.2 Alcance**

El proyecto de investigación pretende realizar el análisis de sensibilidad a cuatro parámetros de modelamiento estructural que son: tipo de concreto, tipo de acero, tipo de elemento y número de puntos de integración.

Para ello se generan múltiples modelos cada uno con una combinación de parámetros diferente con el objetivo de analizar de forma paramétrica el comportamiento de los modelos que corresponden a tres edificios regulares de configuraciones diferentes, todo esto a través de la interpretación de los resultados que se obtengan de los programas OpenSees y SeismoStruct.

## **1.3 Objetivos de la investigación**

### **1.3.1 Objetivo general**

- Proponer una combinación adecuada de parámetros que permita un modelamiento confiable de estructuras basado en el conocimiento racional de la sensibilidad, entendida como la influencia de las decisiones del analista en los resultados del análisis.

### **1.3.2 Objetivos específicos**

- Modelar y analizar un edificio regular de tres pisos y dos vanos.
- Analizar el edificio en al menos dos programas (OpenSees y SeismoStruct), variando los parámetros de análisis.
- Realizar un análisis comparativo de los resultados
- Establecer y proponer la combinación más eficiente.

## **1.4 Organización de la investigación**

En lo que se refiere al ámbito organizativo, el proyecto de investigación se ha estructurado en un texto principal continuo, que corresponde al Capítulo I y II de la investigación. El Capítulo III es modelamiento de estructuras en donde se pretende realizar un análisis de sensibilidad tomando en consideración los efectos de la formulación de elementos, el número de puntos de integración y la subdivisión de elementos en la predicción de la capacidad estructural de un edificio; todo esto a través de un estudio paramétrico. En el Capítulo IV se expone el análisis de los resultados y finalmente en el Capítulo V se observa las conclusiones del proyecto de investigación.

## **2. MODELOS DE ESTUDIO Y TIPOS DE ANÁLISIS**

### **2.1 Modelos de estudio**

Existen dos opciones básicas de modelamiento para investigar la conducta de las estructuras de concreto reforzado. Una opción es el uso de modelos de inelasticidad concentrada, mientras que la otra opción requiere el uso de elementos basados en fibras, que son computacionalmente mucho más exigentes.

#### **Modelos de inelasticidad concentrada**

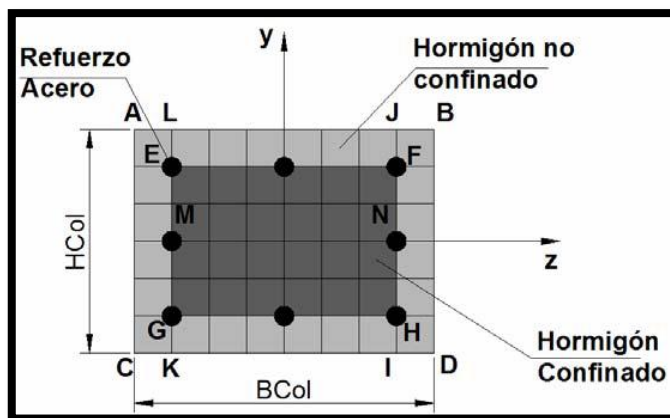
Las limitaciones de este tipo de modelamiento son que las deformaciones inelásticas tienen lugar en localizaciones predefinidas en los miembros. A pesar de que esta suposición es lo bastante razonable para los pisos inferiores, es cuestionable restringir la posible formación de rótulas plásticas en los elementos de los pisos superiores.

Si bien estos modelos son computacionalmente más baratos, en casos más serios, los elementos de inelasticidad concentrada requieren calibración de los parámetros históricos como respuesta del elemento tipo pórtico bajo condiciones de idealización de cargas. Para ello el analista necesita de una gran cantidad de experiencia.

#### **Modelos basados en fibras**

Una fibra es una sección que se discretiza en regiones más pequeñas llamadas “parches”, las cuales tienen formas geométricas simples y regulares (circulares, rectangulares, cuadriláteros), para estas subregiones la respuesta esfuerzo-deformación de los materiales es integrada a fin de obtener un comportamiento resultante para la sección. Por ejemplo las secciones de hormigón armado se pueden considerar algunas fibras internas en función del confinamiento como se muestra en la Figura1.





**Figura1.** Sección tipo Fibra  
**Fuente:** Manual de Usuario de OpenSees

Estos modelos son mucho más costosos desde el punto de vista computacional pero permiten el modelamiento por parte de analistas menos experimentados sin el riesgo de cometer errores en la calibración de los parámetros requeridos.

En el presente proyecto de investigación se utilizará modelos basados en fibras debido a dos razones en especial; aunque el número de iteraciones requeridas para la solución de los algoritmos es mayor las soluciones tiene errores más pequeños; otra razón es que puesto que las secciones se dividen en fibras cada una de ellas posee información independiente del comportamiento de cada una de modo que un modelo de esta naturaleza posee información mucho más detallada de valores de esfuerzo cortante para cada una de las fibras.

## 2.2 Tipos de análisis

Para este estudio se utilizará cuatro tipos de análisis de sensibilidad:

1. El primer conjunto de análisis apunta a investigar el efecto del modelo de concreto usado; en OpenSees están disponibles tres tipos modelo de concreto; la diferencia se encuentra en la consideración de la resistencia a tensión del material y en el caso del concrete03 la forma de modelamiento del comportamiento a tensión.
2. El segundo parámetro examinado es el tipo de acero; en OpenSees están disponibles dos tipos modelo de acero; la diferencia se encuentra en la consideración del endurecimiento.

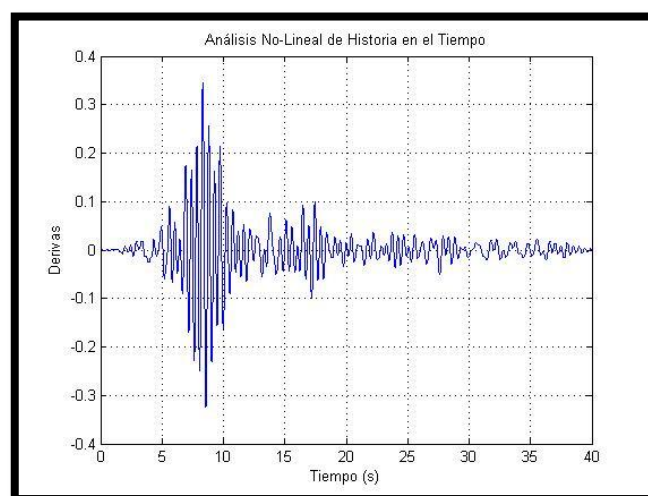
3. El tercer parámetro analiza el efecto del tipo de elemento usado (formulación basada en fuerza); los tipos de modelo de elemento que se utilizaron y que se encuentran en OpenSees son elástico, no-lineal y no-lineal con rótulas plásticas.
4. El último conjunto de análisis investiga el número de puntos de integración (np) y/o la subdivisión del elemento.

Para realizar el análisis de sensibilidad en primer lugar se inducirá una acción dinámica para realizar el análisis dinámico y luego se aplicara una fuerza horizontal sostenida para efectuar el análisis Pushover estático.

### **Análisis dinámico**

El análisis dinámico de estructuras se refiere al análisis de las pequeñas oscilaciones o vibraciones que puede sufrir una estructura alrededor de su posición de equilibrio.

En algunas ocasiones para analizar el comportamiento estructural de un edificio basta con encontrar las derivas o desplazamientos máximos, sin embargo, es también muy importante identificar el rango en el que estos valores máximos se presentan ya que las estructuras no siempre fallan por esta razón sino más bien por la intensidad y la frecuencia en que estos se muestran. El análisis dinámico permite observar claramente los rangos en los que se presentan los valores máximos.

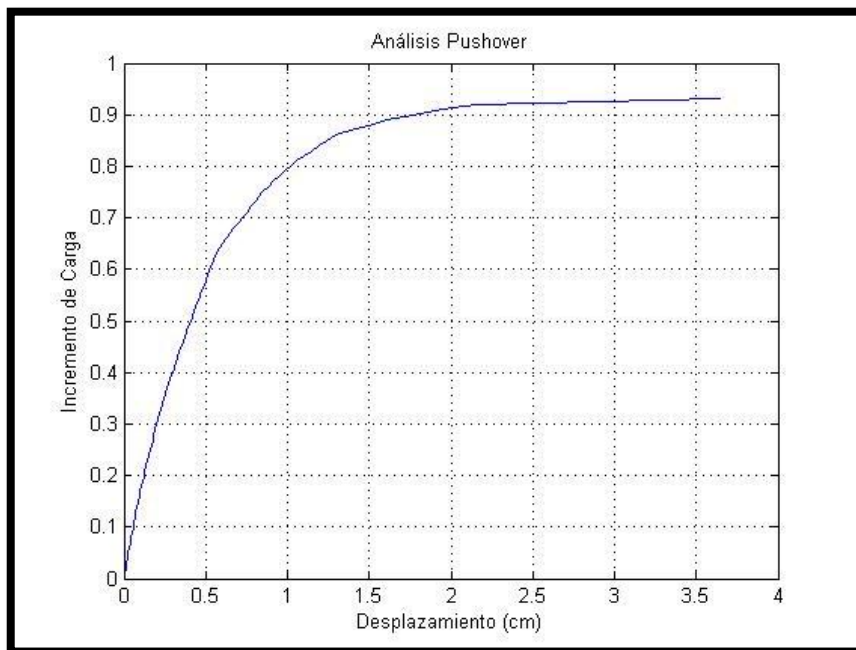


**Gráfica1.** Curva característica del análisis dinámico

## Análisis Pushover estático

El análisis Pushover involucra un análisis inelástico de la estructura considerada, bajo un incremento gradual de vectores de fuerza o desplazamientos, representando el patrón de fuerzas de inercia o desplazamientos de respuesta en la estructura. Tiene la habilidad de modelar la formación de rótulas plásticas en la estructura y por lo tanto puede ser de gran valor en la verificación del diseño.

Además, se complementa muy bien con el análisis dinámico ya que la ventaja de este análisis es que permite observar claramente las variaciones que en el dinámico no se diferencian.



**Gráfica2.** Curva característica del análisis Pushover estático

## 3. MODELAMIENTO DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO ARMADO

### 3.1 Introducción

Modelar, de acuerdo a su estricta definición, significa ajustar a un modelo, en nuestro caso ese modelo será matemático. Es decir que a partir de un número discreto de parámetros se tratará de producir resultados más cercanos al comportamiento real de las estructuras.

Si bien existe una amplia gama de programas y herramientas que se utilizan para el modelamiento estructural, centraremos nuestro análisis en el manejo de OpenSees y SeismoStruct. Ambos programas poseen varias posibilidades y casos que se pueden emplear al momento de analizar. La variedad en parámetros se extiende sobre un amplio espectro, que inicia desde el tipo y formulación del elemento hasta el tipo de análisis que se requiere.

### 3.2 Características físicas de los edificios

Los tres edificios son regulares con configuraciones diferentes, en donde se asume lo siguiente:

1. Los edificios no están detallados para resistencia sísmica.
2. El recubrimiento asumido para las vigas y columnas es de 50 mm.
3. Se aplica una carga muerta de 25 KN/m distribuida uniformemente, a más de la carga muerta producida por el peso propio del pórtico.

Los detalles de los pórticos de concreto reforzado usados para el análisis del modelamiento estructural de los edificios 1, 2 y 3 se muestran a continuación.

**Edificio 1.-** El pórtico es de tres pisos y dos vanos en dos dimensiones (ndm 2) y tres grados de libertad por nudo (ndf 3), columnas y vigas definidas como elemento fibra. La estructura esta empotrada en su base.

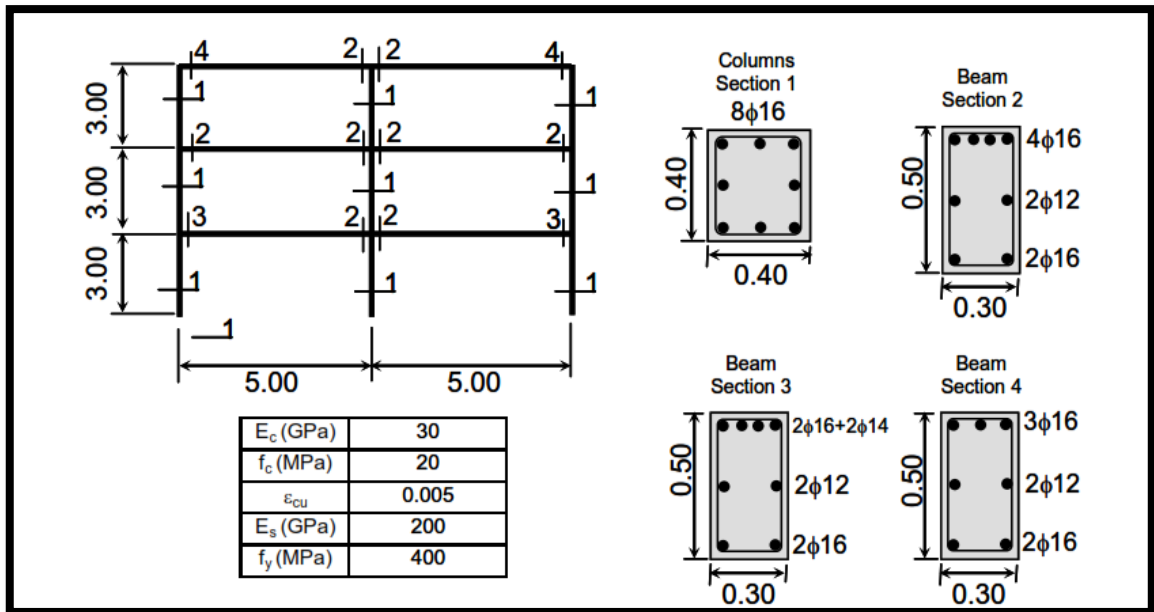


Figura2. Edificio 1 (dimensiones en m)

**Edificio 2.-** El pórtico es de cuatro pisos y dos vanos en dos dimensiones (ndm 2) y tres grados de libertad por nudo (ndf 3), columnas y vigas definidas como elemento fibra. La estructura esta empotrada en su base.

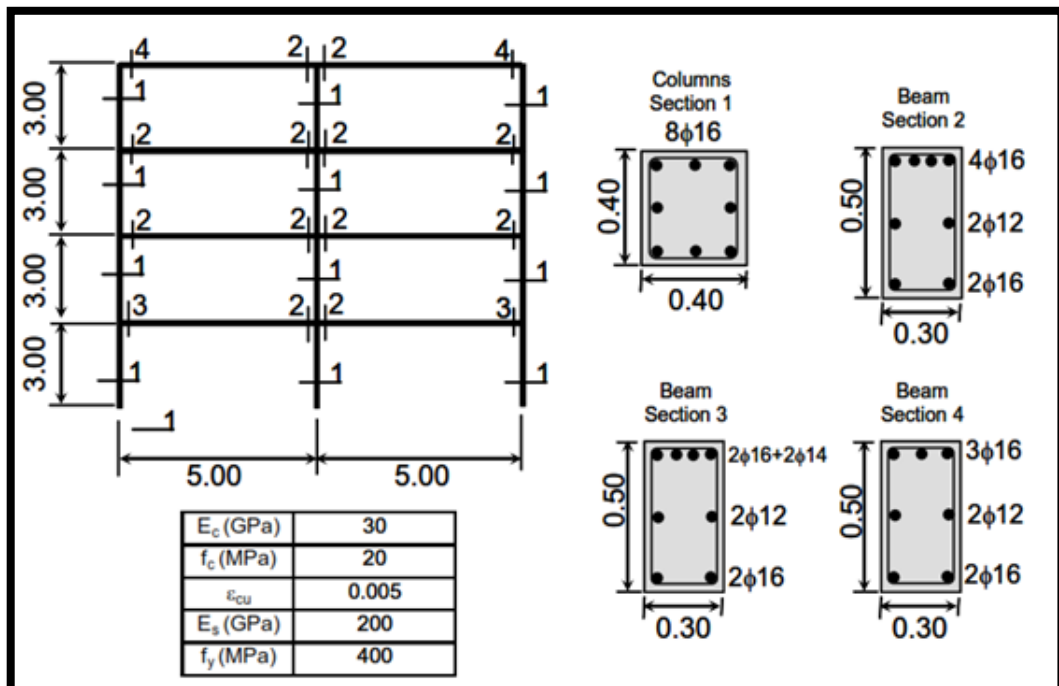


Figura3. Edificio 2 (dimensiones en m)

**Edificio 3.-** El pórtico es de tres pisos y tres vanos en dos dimensiones (ndm 2) y tres grados de libertad por nudo (ndf 3), columnas y vigas definidas como elemento fibra. La estructura esta empotrada en su base.

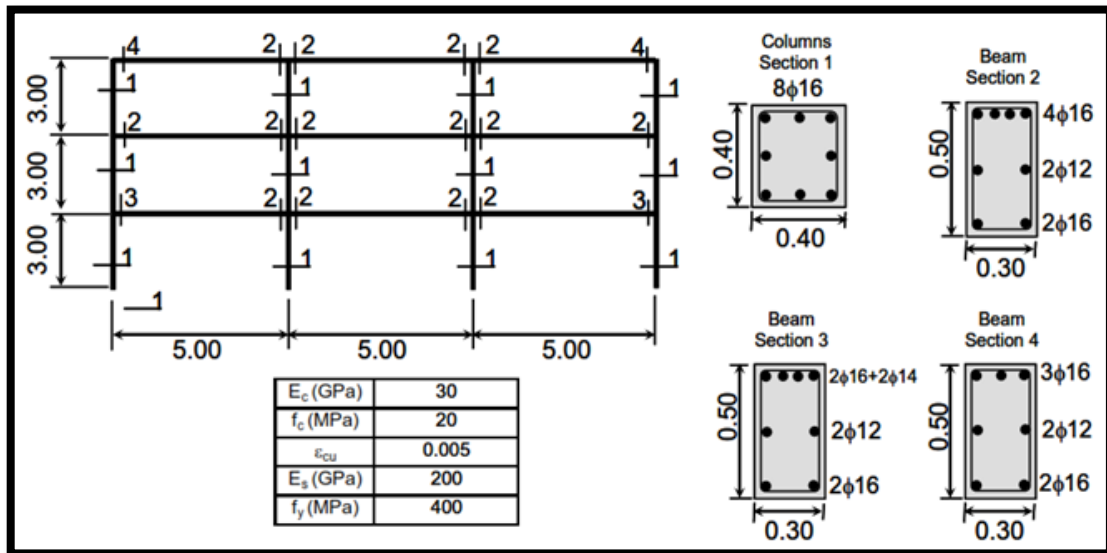


Figura4. Edificio 3 (dimensiones en m)

### 3.3 Modelamiento en OpenSees

OpenSees (Open System for Earthquake Engineering Simulation), ha sido promovido por el Pacific Earthquake Engineering Research Center a través de la Fundación Nacional de Ciencia de los Estados Unidos. Es una plataforma informática para el desarrollo de aplicaciones de simulación del comportamiento de sistemas estructurales y geotécnicos, sometidos a eventos sísmicos, posee capacidades avanzadas para la modelación y análisis de la respuesta no-lineal de sistemas estructurales, para ello dispone de un amplio rango de modelos de materiales, elementos y algoritmos de solución.

OpenSees utiliza métodos basados en elementos finitos, por lo tanto el primer paso para la modelación es subdividir el sistema en elementos y nudos, para de esta manera definir la acción de cargas, y las restricciones nodales. La característica principal de OpenSees es que dicha modelación y simulación se la realiza a través de una fuente abierta.

El lenguaje de interpretación llamado lenguaje tcl, originado del acrónimo en inglés "Tool Command Language" o lenguaje de herramientas de comando, ha sido utilizado para soporte de los comandos de OpenSees, los cuales son usados para la definición de la geometría del problema, estados de carga, formulación y solución. Tcl provee útiles herramientas de programación, permite manipulación de variables, contiene estructuras básicas de control (if, while, for, foreach), evaluación de expresiones matemáticas y manipulación de archivos.

Entre las principales características del lenguaje Tcl podemos mencionar las siguientes:

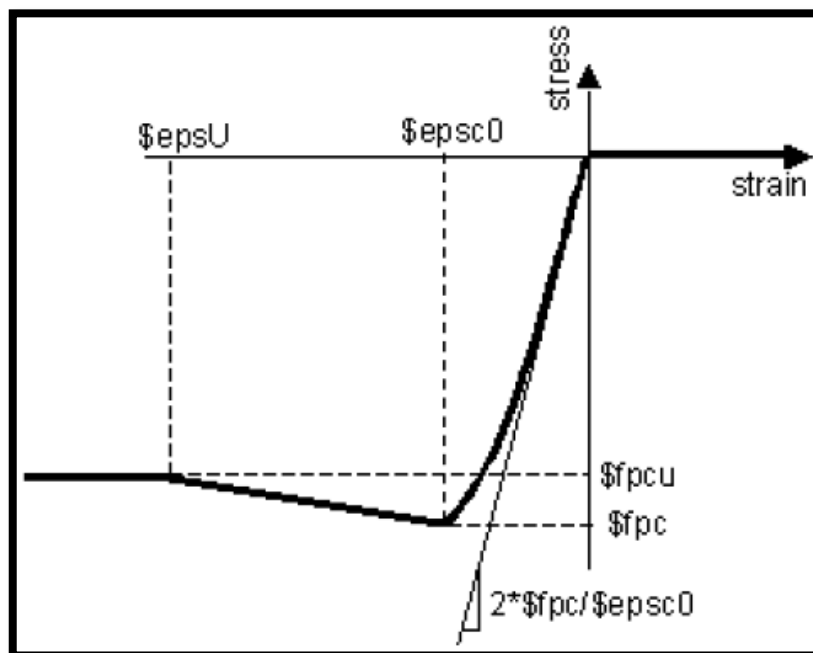
- Es un lenguaje interpretado, y su código puede ser creado y modificado dinámicamente.
- Todos los elementos del programa son comandos, incluyendo las estructuras del lenguaje.
- Todos los comandos pueden ser redefinidos o sobrescritos de manera dinámica.
- Todos los datos son manejados como cadenas de caracteres Unicode, incluyendo el código fuente.
- Sus reglas sintácticas son extremadamente simples.
- Posee reglas de alcance dinámico.
- También son posibles los eventos basados en tiempo y los definidos por el usuario.
- Permite escribir código fácil de mantener. Los "scripts" Tcl son a menudo más compactos y legibles que los programas funcionalmente equivalentes en otros lenguajes de programación.
- Su principal característica es su extensibilidad y justamente gracias a ello es que se ha podido incluir comandos adicionales para el uso con OpenSees.

### 3.3.1 Parámetros utilizados en análisis de sensibilidad

En esta sección se hablará del tipo de concreto, tipo de acero, tipo de elemento y número de puntos de integración, que son los parámetros que se consideraron para el análisis de sensibilidad y que se encuentran disponibles en la galería de OpenSees.

- **Tipo de concreto**

**Concrete01.-** Este material asume que el concreto no posee resistencia a la tensión. Es un modelo propuesto por Kent-Scott-Park (1971) con degradación lineal de rigidez carga-descarga de acuerdo con el trabajo de Karsan-Jirsa (Karsan and Jirsa 1969).

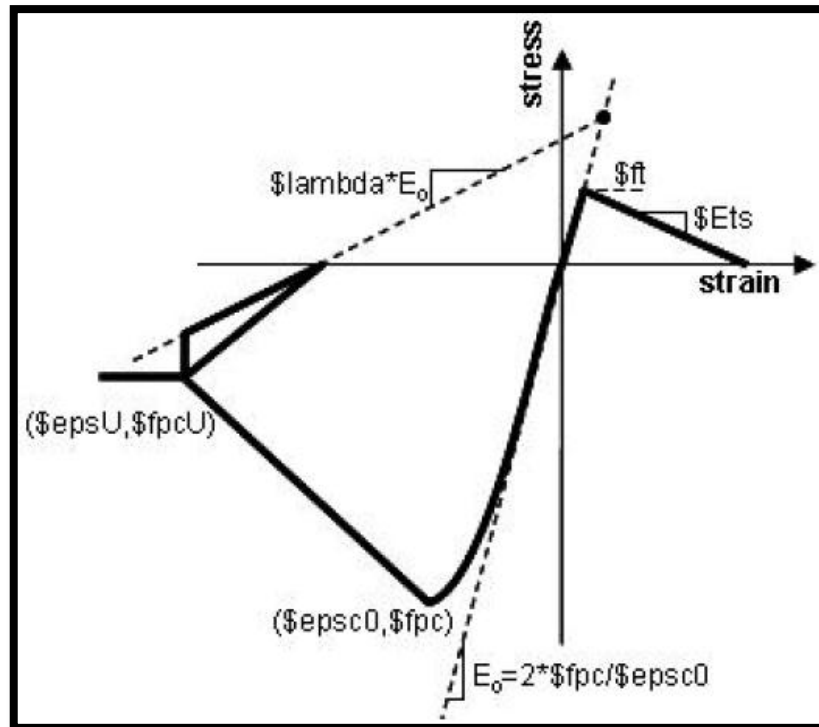


**Figura5.** Diagrama Esfuerzo-Deformación Concrete01

**Fuente:** Manual de Usuario de OpenSees

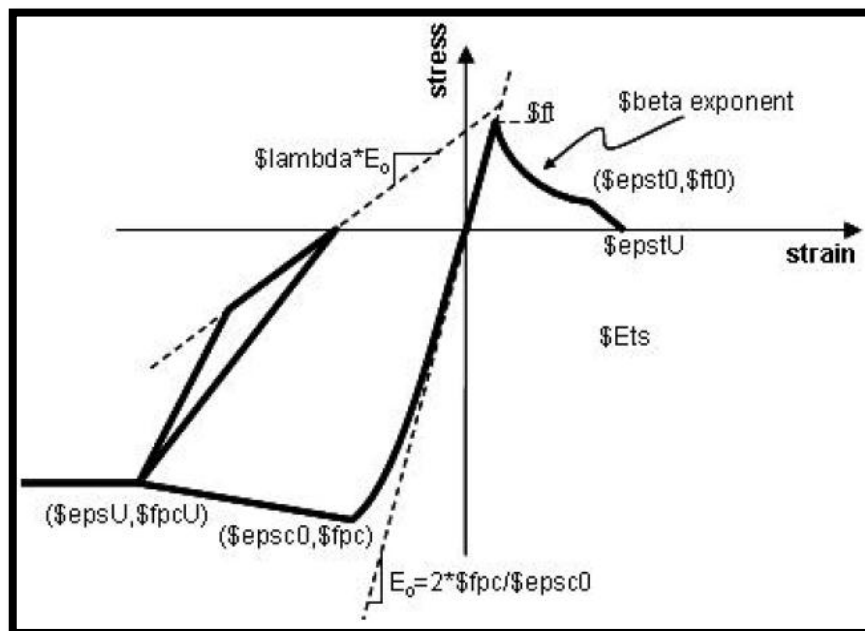
**Concrete02.-** Este material uniaxial asume que el concreto posee resistencia a la tensión y considera un suavizado lineal en la zona de tensión.





**Figura6.** Diagrama Esfuerzo-Deformación Concreto02  
**Fuente:** Manual de Usuario de OpenSees

- **Concrete03.-** Es un modelo de material que considera al concreto con resistencia a tensión y suavizado no lineal en la zona de tensión del diagrama esfuerzo-deformación.



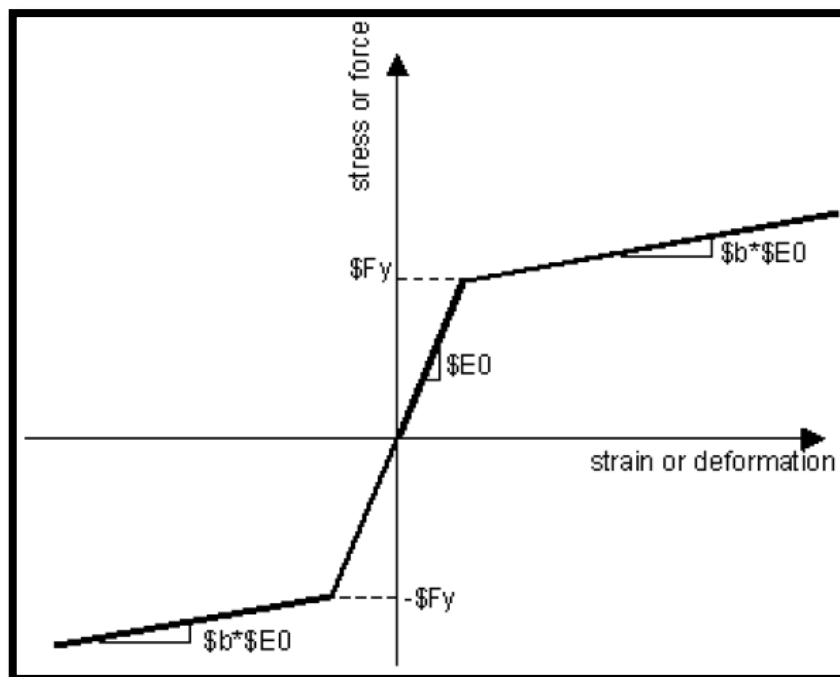
**Figura7.** Diagrama Esfuerzo-Deformación Concreto03  
**Fuente:** Manual de Usuario de OpenSees

**Cuadro1.** Diferencias en el tipo de concreto

Concreto	Resistencia a la Tensión	Zona de Tensión
1	NO	-----
2	SI	Lineal
3	SI	No-lineal

- **Tipo de acero**

**Acero01.-** Este tipo de material representa acero con propiedades esfuerzo-deformación que siguen un diagrama bilineal con endurecimiento cinemático y endurecimiento isotrópico opcional descrito por una ecuación no lineal.



**Figura8.** Diagrama Esfuerzo-Deformación Acero01  
**Fuente:** Manual de Usuario de OpenSees

**Acero02.-** Con este modelo se obtiene un material de acero uniaxial con endurecimiento de deformación isotrópico, además provee control sobre la transición de la región elástica a la plástica. Los efectos de endurecimiento de deformación son opcionales y pueden ser especificados en compresión o tensión.

**Cuadro2.** Diferencias en el tipo de acero

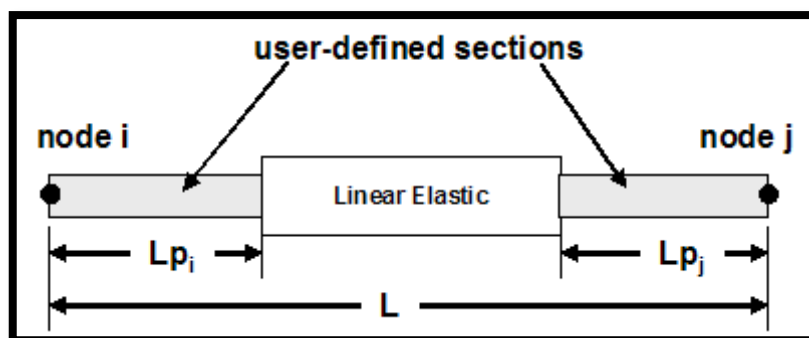
Acero	Endurecimiento
1	NO
2	SI

- **Tipo de elemento**

**Elemento1.-** Corresponde al elemento elástico. Los argumentos necesarios para la construcción del elemento dependen de la dimensión del problema (2D o 3D), de las propiedades del material y las constantes geométricas.

**Elemento2.-** Describe el elemento no-lineal. Hay básicamente dos tipos de elementos no-lineales: elementos basados en fuerzas y elementos basados en desplazamientos. El Elemento2 está basado en una formulación iterativa o no iterativa de fuerza y considera plasticidad distribuida a lo largo del elemento.

**Elemento3.-** Este tipo de elemento es no-lineal y está basado en una formulación iterativa o no iterativa de flexibilidad que considera plasticidad concentrada al final de los miembros. El elemento se divide en tres partes: dos rótulas plásticas al final del elemento y una región elástica lineal en la mitad.



**Figura9.** Elemento no-lineal con rótulas plásticas  
**Fuente:** Manual de Usuario de OpenSees

- **Número de puntos de integración.-** Este parámetro está asociado con la subdivisión del elemento.

### 3.3.2 Proceso del modelamiento estructural

La estructura está sometida a cargas gravitatorias. Se ha asignado masa en los nudos donde las columnas se conectan, cada conexión toma la mitad de la masa de cada elemento dentro de este pórtico ( $\text{masa} = \text{peso} / \text{gravedad}$ ). El tamaño de las fibras usadas en la creación de las secciones de los miembros y el análisis no-lineal son constantes. Los recorders serán almacenados en una carpeta llamada "Data" que contendrá todos los resultados de la totalidad de los análisis. Además se ha procurado no trabajar en función de valores, sino en función de variables para facilitar la adaptación del modelo al cambio de parámetros y dar generalidad al archivo tcl creado.

Por otro lado con el objeto de optimizar el rendimiento del modelamiento y como iniciativa adicional al proyecto de investigación, se utiliza el programa Matlab para automatizar el trabajo, es decir, a través del uso del software se escoge aleatoriamente las variables del proceso de modelamiento que corresponden a los parámetros utilizados para el análisis de sensibilidad, además de automatizar los procesos de generación de modelos, que de otro modo representaría una tarea muy ardua.

El mapa de procesos de los códigos generados en Matlab se presenta en el siguiente flujograma, en donde se describe la generación de parámetros y la construcción de los modelos tanto para el análisis dinámico cuanto para el análisis Pushover estático.

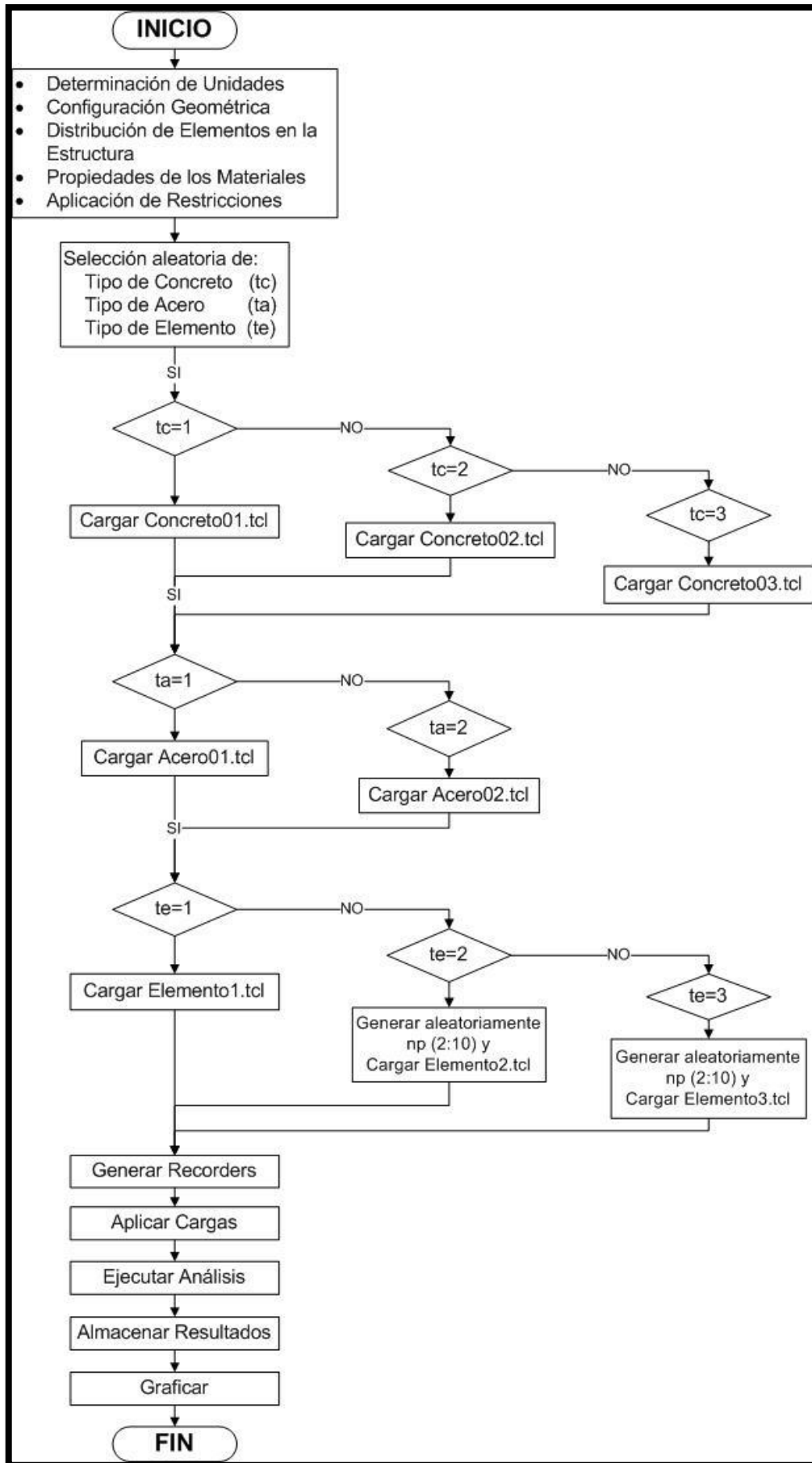


Figura10. Flujograma del proceso de modelamiento estructural

### 3.4 Modelamiento en SeismoStruct

SeismoStruct es un software que utiliza un conjunto de elementos finitos capaz de predecir el comportamiento de los desplazamientos de las estructuras bajo la acción de cargas estáticas o dinámicas, teniendo en cuenta tanto la no-linealidad geométrica y la inelasticidad del material. El concreto, acero y otros modelos de material están disponibles, junto con una gran biblioteca de elementos que se pueden utilizar con una amplia variedad de acero pre-definido, concreto y secciones compuestas.

Algunas de las características más importantes de SeismoStruct se resumen a continuación:

- Interfaz completamente visual. Ningún archivo o configuración de entrada, lenguaje de programación o cualquier otro retraso de tiempo y ningún requisito complejo de edición de texto.
- Completa integración con el entorno Windows. Los datos de entrada creados en programas de hojas de cálculo, como Microsoft Excel, pueden ser pegados en las tablas de entrada de SeismoStruct, para facilitar el pre-procesamiento. Por otro lado, toda información visible dentro del interfaz gráfica de SeismoStruct se puede copiar a aplicaciones de software externas (por ejemplo, a los programas de procesamiento de textos, como Microsoft Word), incluidos los datos de entrada y salida, gráficos de alta calidad, las formas de los modelos deformados y sin deformar y mucho más.
- Con la instalación del Asistente el usuario puede crear modelos regulares/irregulares en 2D o 3D y ejecutar todo tipo de análisis sobre la marcha. Todo el proceso no toma más de unos pocos segundos.
- Posee siete tipos diferentes de análisis: historia en el tiempo estático y dinámico, pushover convencional y adaptativo, análisis dinámico incremental, valor propio (eigenvalor), y carga estática no variable.
- La carga aplicada puede ser fuerza constante o variable, desplazamientos y aceleraciones en los nudos.
- El programa supone inelasticidad del material y no-linealidad geométrica.

- Una gran variedad de concreto reforzado, acero y secciones compuestas están disponibles.
- SeismoStruct posee la capacidad de dividir el incremento de carga, cada vez que surgen problemas de convergencia. El nivel de subdivisión depende de las dificultades de convergencia encontradas. Cuando se superan las dificultades de convergencia, el programa aumenta automáticamente el incremento de la carga nuevamente a su valor original.
- El procesador de SeismoStruct grafica en tiempo real las curvas de desplazamiento y la forma deformada de la estructura, junto con la capacidad de pausar y reiniciar el análisis.

### 3.4.1 Parámetros utilizados en análisis de sensibilidad

En vista de que uno de los objetivos del proyecto de investigación es realizar un análisis comparativo de los resultados obtenidos con OpenSees, el programa SeismoStruct utilizará los parámetros equivalentes que se consideraron para el análisis de sensibilidad en OpenSees. Es decir que el tipo de concreto, tipo de acero, tipo de elemento y número de puntos de integración presentarán las mismas características en ambos programas.

- **Tipo de concreto**

**Modelo de concreto no-lineal, Mander et al. (con\_ma).**- Se trata de un modelo uniaxial no-lineal de confinamiento permanente, en un principio programado por Madas [1993], que sigue la relación constitutiva propuesta por Mander et al. [1988] y las reglas cíclicas propuestas por Martínez-Rueda y Elnashai [1997]. Para este modelo cinco parámetros deben ser definidos para determinar las características mecánicas del material, y estas son: resistencia a la compresión ( $f_c$ ), resistencia a la tracción ( $f_t$ ), deformación pico ( $\epsilon_c$ ), factor de confinamiento ( $k_c$ ) y peso específico ( $\gamma$ ).

- **Tipo de acero**

**Modelo de acero bilineal (stl\_bl).**- Este tipo de material representa acero con propiedades esfuerzo-deformación que siguen un diagrama bilineal con endurecimiento cinemático descrito por una ecuación no lineal. Este modelo simple se caracteriza también por la fácil identificación de los parámetros de calibración y por su eficiencia computacional. Se puede utilizar en el modelado de estructuras de acero, donde el acero suave es empleado, así como en modelos de concreto reforzado, donde el trabajo del acero es utilizado comúnmente. Para este modelo cinco parámetros deben ser definidos para determinar las características mecánicas del material, y estas son: módulo de elasticidad ( $E_s$ ), esfuerzo de fluencia ( $F_y$ ), parámetro de endurecimiento ( $\mu$ ), fractura/pandeo ( $\epsilon_{ult}$ ) y peso específico ( $\gamma$ ).

**Modelo de acero Menegotto-Pinto (stl\_mp).**- Este es un modelo de acero uniaxial inicialmente programado por Yassin [1994], basada en una simple, pero eficiente, relación esfuerzo-deformación propuesto por Menegotto y Pinto [1973], junto con las reglas de endurecimiento isotrópico propuestos por Filippou et al. [1983]. La implementación actual se deduce que se lleva a cabo por Monti et al. [1996]. Su empleo debe limitarse a la modelización de estructuras de concreto armado, en particular los sometidos a las historias de carga complejas. Para este modelo diez parámetros deben ser definidos para determinar las características mecánicas del material, y estas son: módulo de elasticidad ( $E_s$ ), esfuerzo de fluencia ( $F_y$ ), parámetro de endurecimiento ( $\mu$ ), parámetro inicial de forma de la transición de la curva ( $R_0$ ), coeficientes de calibración de forma de la transición de la curva ( $a_1$  y  $a_2$ ), coeficientes de calibración del endurecimiento isotrópico ( $a_3$  y  $a_4$ ), fractura/pandeo ( $\epsilon_{ult}$ ) y peso específico ( $\gamma$ ).

- **Tipo de elemento**

**Elemento elástico (elfrm).**- Con el fin de caracterizar completamente este tipo de elementos, existen dos opciones: en la primera es necesario especificar la sección ya creada (el programa calcula automáticamente todas las propiedades



elasto mecánicas necesarias), mientras que la otra opción es especificar los valores personalizados de EA,  $EI_2$ , y  $EI_3$  GJ, donde E es el módulo de elasticidad, A es el área de sección transversal y  $I_2$  e  $I_3$  son los momentos de inercia (o momentos segundos) alrededor de los ejes locales (2) y (3). La constante de torsión está representada por J (que no debe confundirse con el momento polar de inercia), mientras que G representa el módulo de rigidez.

**Elemento inelástico basado en fuerzas (infrmFB).**- Esta opción es típicamente la preferida, ya que no hace referencia a la discretización del elemento, lo que conduce a modelos considerablemente más pequeños y por tanto a análisis mucho más rápidos. En este modelo es necesario definir el número de fibras de la sección suficientes para garantizar una adecuada reproducción de la distribución esfuerzo-deformación a través de la sección transversal del elemento y además es necesario incluir el número de puntos de integración.

**Elemento inelástico con rótulas plásticas (infrmFBPH).**- Las ventajas de esta formulación no sólo tienen que ver con la reducción del tiempo de análisis (dado que la integración de fibra se lleva a cabo para la sección final de los miembros), sino también un control total en la calibración de la longitud de la rótula plástica (o dispersión de inelasticidad), que permite la superación de los problemas de localización. En este modelo es necesario definir el número de fibras de la sección suficientes para garantizar una adecuada reproducción de la distribución esfuerzo-deformación a través de la sección transversal del elemento y además es necesario incluir la longitud de la rótula plástica.

**Cuadro3.** Relación de parámetros para análisis de sensibilidad

	OpenSees	SeismoStruct
<b>Concreto</b>	Concreto01	con_ma
<b>Acero</b>	Acero01	stl_bl
	Acero02	stl_mp
<b>Elemento</b>	Elemento1	elfrm
	Elemento2	infrmFB
	Elemento3	infrmFBPH

### 3.4.2 Proceso del modelamiento estructural

En el presente apartado se describen los pasos para la solución y análisis del edificio 1 en el programa SeismoStruct. Estas instrucciones corresponden a una combinación de parámetros, es decir que para el modelo se utilizará Concreto01, Acero01, Elemento2 y cinco puntos de integración.

La creación del modelo y el posterior análisis se divide en varias etapas que se exponen a través del siguiente esquema:

- Definición del tipo de análisis
  - Estático (Carga No-Variable)
  - Dinámico (Historia en el tiempo)
  - Pushover Estático
- Construcción del modelo
  - Materiales
  - Secciones
  - Clases de elementos
- Geometría Estructural
  - Nudos
  - Conectividad de Elementos
  - Restricciones Nodales
  - Restricciones
- Aplicación de Cargas
- Criterios de Ejecución y análisis de salida

**Esquema1.** Proceso del modelamiento estructural en SeismoStruct

#### 3.4.2.1 Definición del tipo de análisis

En primer lugar se determina el tipo de análisis ya que de acuerdo a esto se requiere la aplicación de más o menos criterios relacionados con el modelamiento de la estructura, como se muestra en el Esquema1.

### 3.4.2.2 Etapas de Construcción del Modelo

**Materiales.-** En cuanto a los materiales SeismoStruct dispone de una amplia gama de materiales que pueden ser usados para el análisis, sin embargo, los materiales utilizados presentan características iguales a los materiales que se usaron en OpenSees, esto con el fin de establecer la comparación de resultados entre los dos programas. De esta manera se procede a ingresar los datos necesarios para generar el Concreto01 (Figura11) y Acero01 (Figura12).

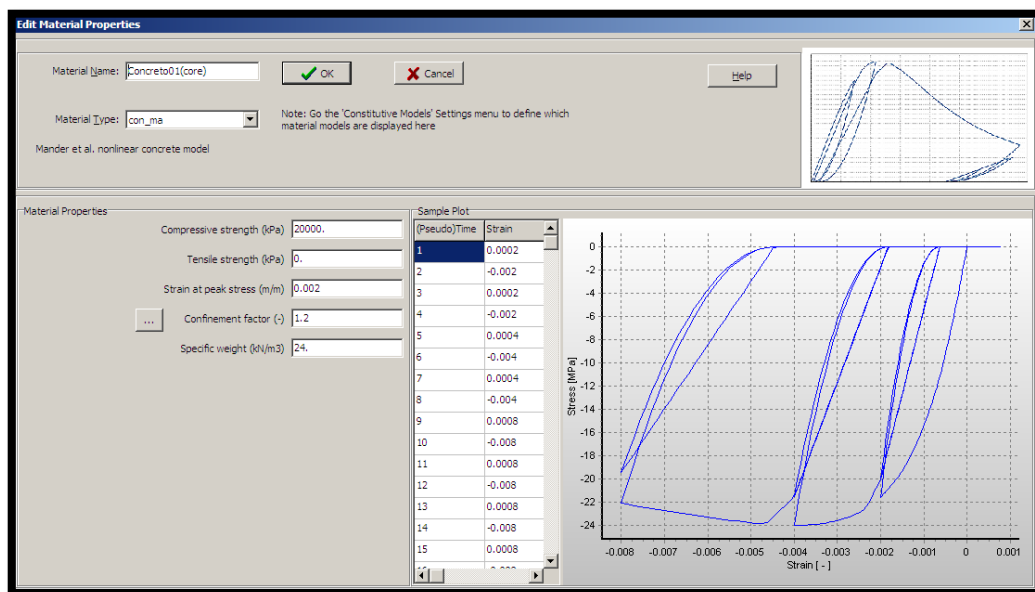


Figura11. Propiedades del Concreto01

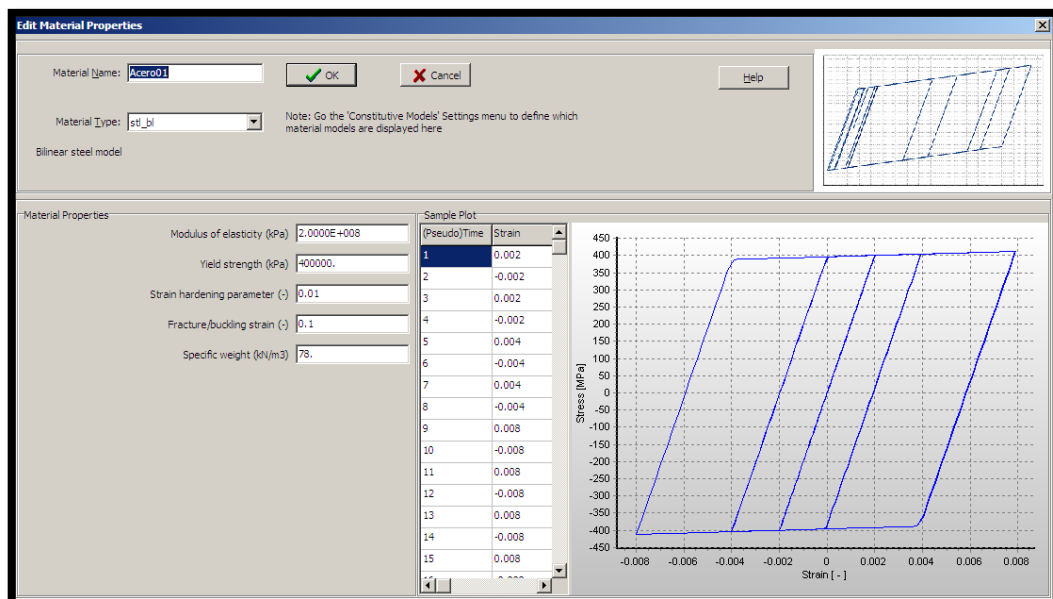
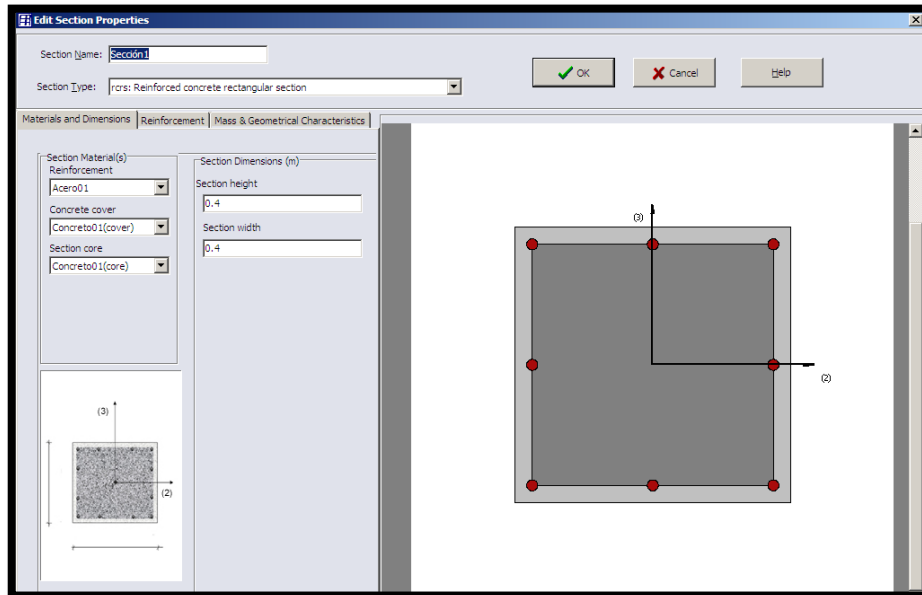


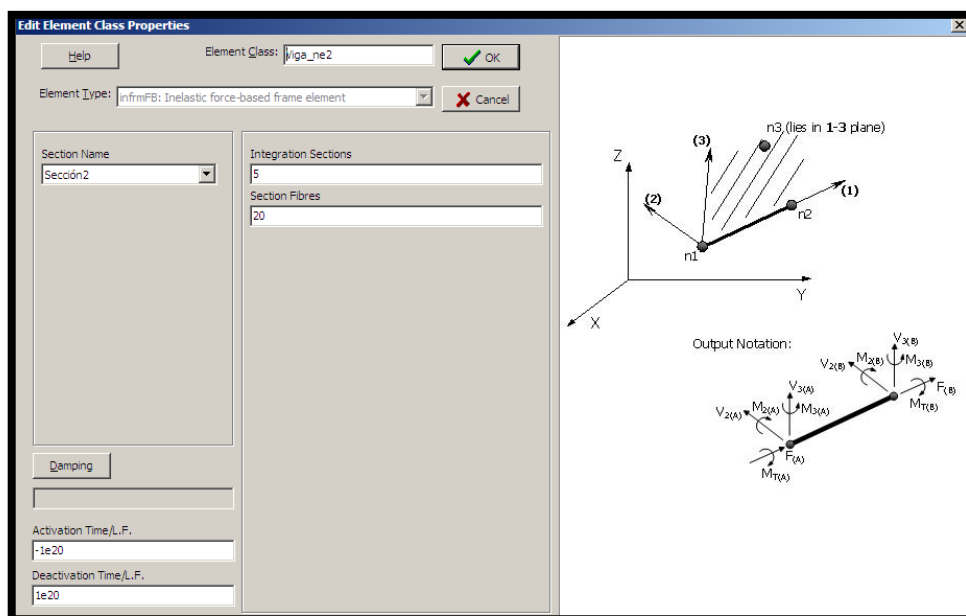
Figura12. Propiedades del Acero01

**Sección.-** la sección que se utilizó en SeismoStruct es rectangular de concreto reforzado (rcrs). Esta es una sección adoptada frecuentemente para el modelamiento de columnas y vigas rectangulares de concreto reforzado. Tres diferentes materiales son definidos para utilizar esta sección y estos son: reforzamiento, recubrimiento y núcleo de la sección.



**Figura13.** Sección1 de concreto reforzado (Columnas)

**Clases de elementos.-** Para la generación del Elemento 2 es necesario ingresar el número de puntos de integración y el número de fibras de la sección



**Figura14.** Elemento inelástico basado en fuerzas

### 3.4.2.3 Geometría estructural

**Nudos.-** Dos tipos de nudos están disponibles; estructurales y no-estructurales. Los nudos estructurales son todos aquellos que unen elementos, de cualquier tipo, de hecho en SeismoStruct no es posible ejecutar un análisis si un nudo que se ha definido como “estructural” no se encuentra por lo menos conectado a un elemento. En otras palabras, los nudos estructurales son todos aquellos que se asignan grados de libertad y se incluye la matriz de rigidez y los vectores de carga/desplazamiento.

Los nudos no-estructurales no son considerados en el análisis y solución de la estructura pero en cambio son necesarios para definir la orientación de los ejes locales de cierto tipo de elementos. Ningún elemento de cualquier tipo puede ser conectado a estos nudos y aunque es obvio que también pueden usarse nudos estructurales como puntos de referencia para definir los ejes locales, normalmente resulta más simple y claro utilizar los nudos no-estructurales.

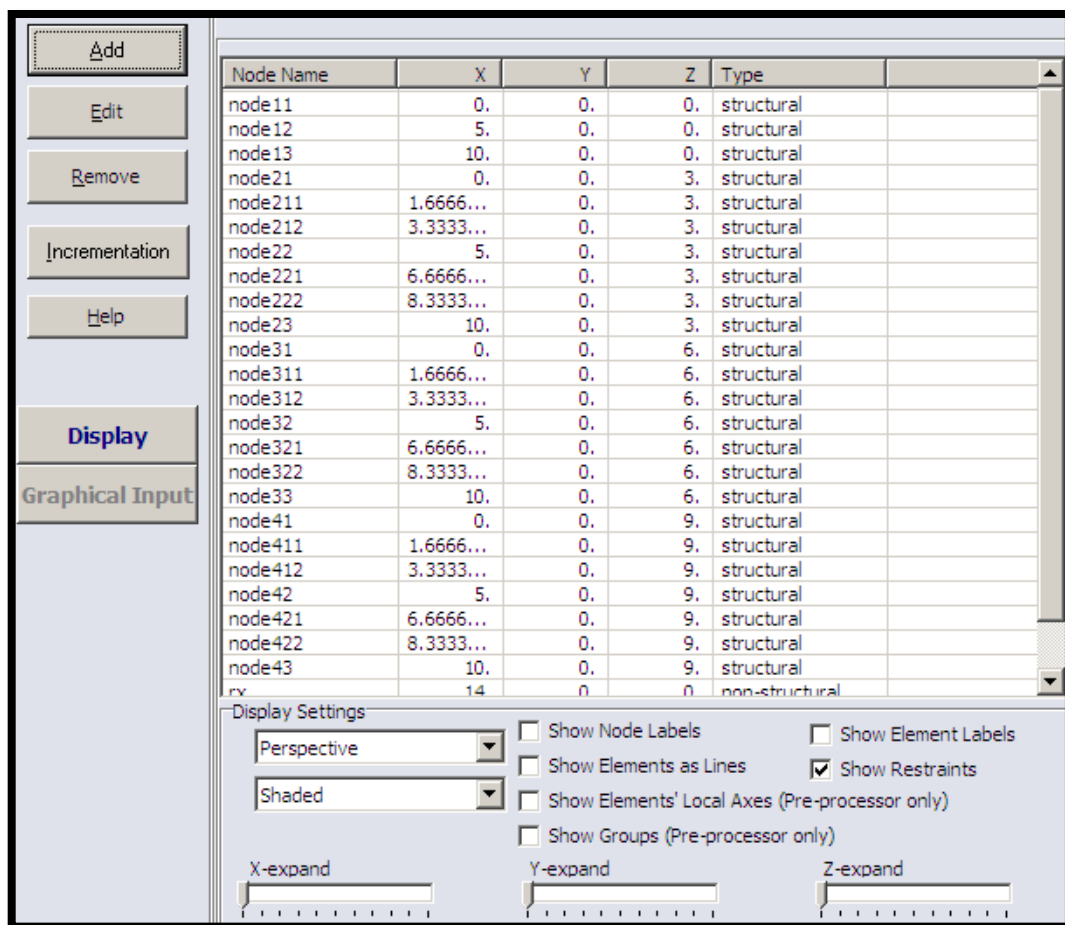
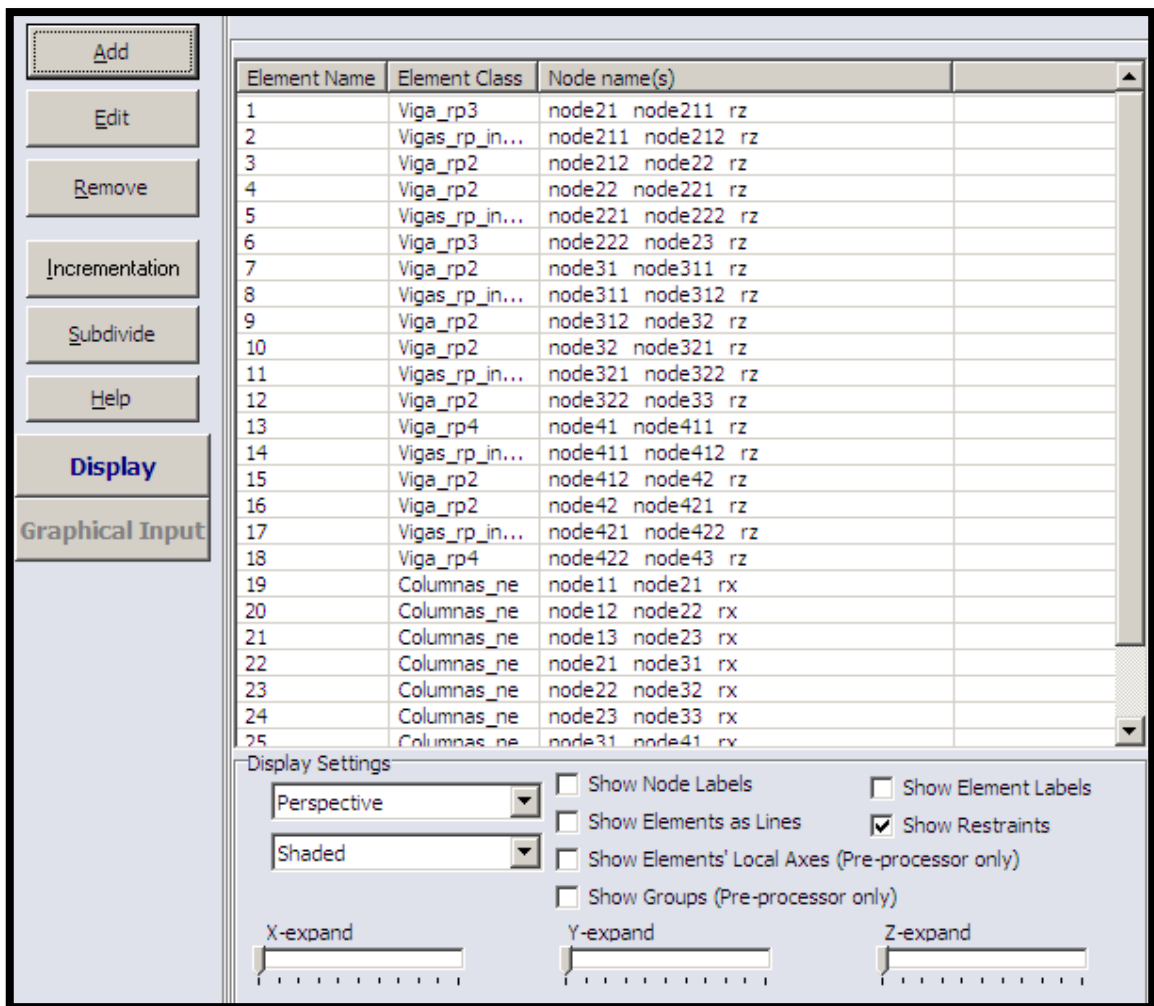


Figura15. Configuración geométrica (Nudos)

**Conectividad de Elementos.-** Los diferentes elementos de la estructura son definidos en la etapa de “conectividad de elementos”, donde se identifica: su nombre, clase de elemento y nudos correspondientes. Como en todas las otras etapas, el usuario es capaz de añadir nuevos elementos y al igual que en el caso de los nudos, el incremento de elementos habilita la generación automática de nuevos elementos a través de la “repetición” de elementos ya existentes.



**Figura16.** Configuración geométrica (Conectividad de elementos)

**Restricciones Nodales.-** Las diferentes condiciones de restricción de la estructura son definidos en el módulo de “restricciones nodales”, donde se identifica: el tipo de restricción, el nudo principal, el grado de libertad que se restringe y el nudo secundario. Tres diferentes tipos de restricción nodal están

disponibles en SeismoStruct y estas son: Rigid Link, Rigid Diaphragm y Equal DOF.

Para el proyecto de investigación se utilizó Equal DOF, que reprime cierto grado de libertad del nudo secundario que es igual a restricción del nudo principal. En este caso tanto el nudo principal como el nudo secundario ofrecen exactamente el mismo valor.

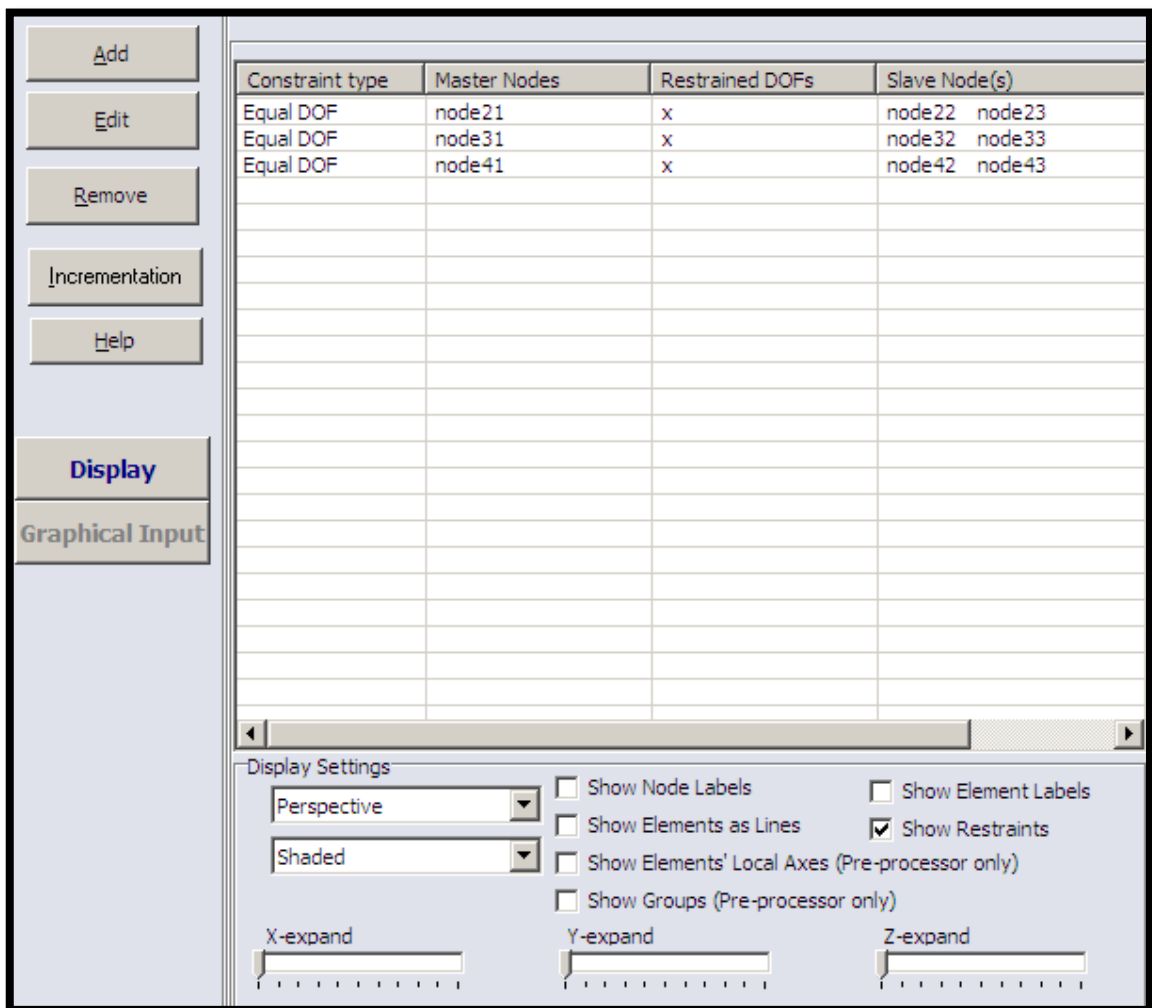
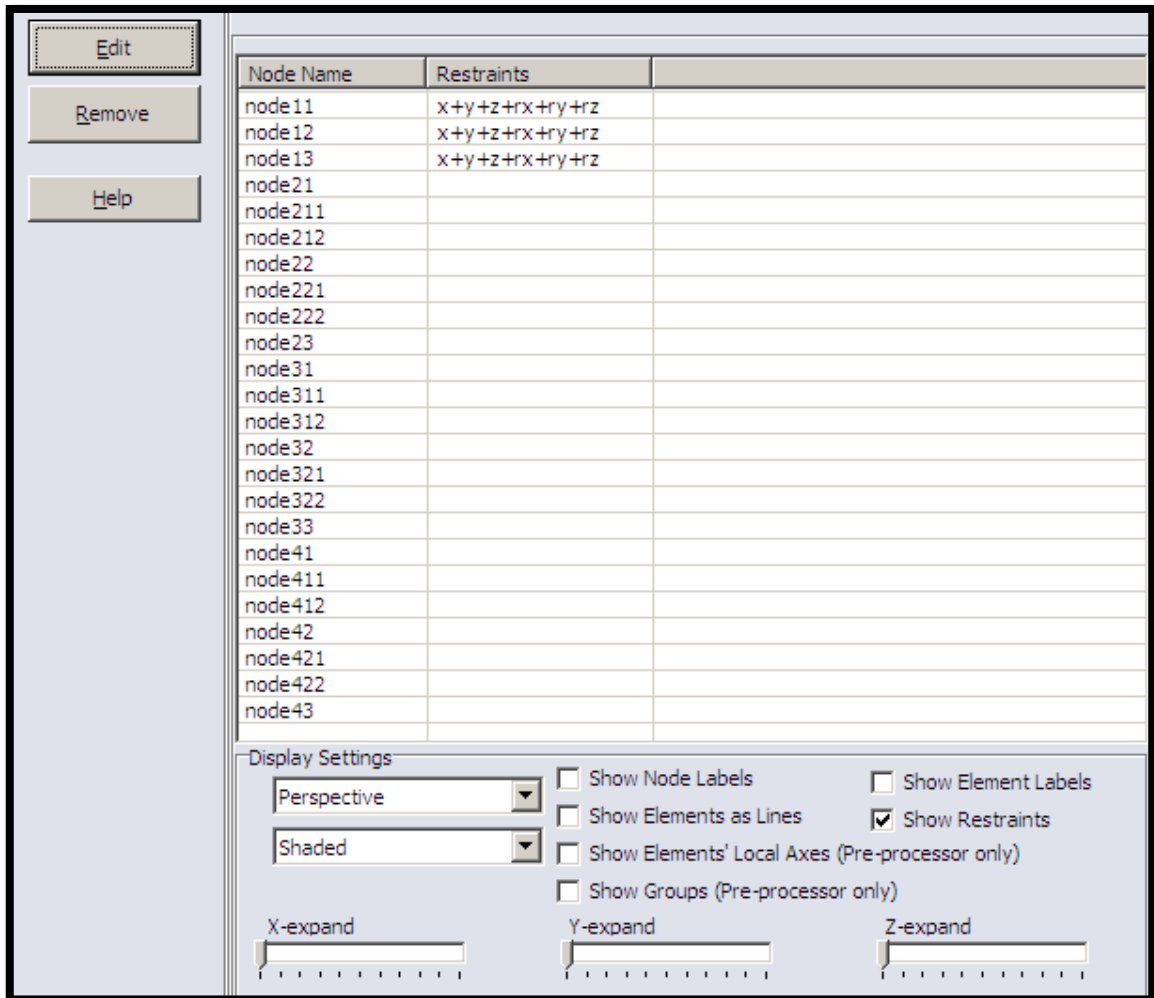


Figura17. Configuración geométrica (Restricciones nodales)

**Restricciones.-** Las condiciones de límite para el modelo son definidas en el módulo de restricciones, donde se listan todos los nudos estructurales y están disponibles para la selección y restricción de cualquiera de los seis grados de libertad.



**Figura18.** Configuración geométrica (Restricciones)

#### 3.4.2.4 Aplicación de cargas

Solamente cuando existe un análisis dinámico o un análisis pushover estático se utiliza la etapa aplicación de cargas. En SeismoStruct existen cuatro categorías de carga, que pueden aplicarse a cualquier modelo estructural dependiendo del tipo de análisis que se lleve a cabo. Además, es necesario decir que el término carga, empleado en SeismoStruct, se refiere a cualquier clase de acción que puede aplicarse a una estructura, y puede consistir en: fuerzas, desplazamientos y/o aceleraciones.



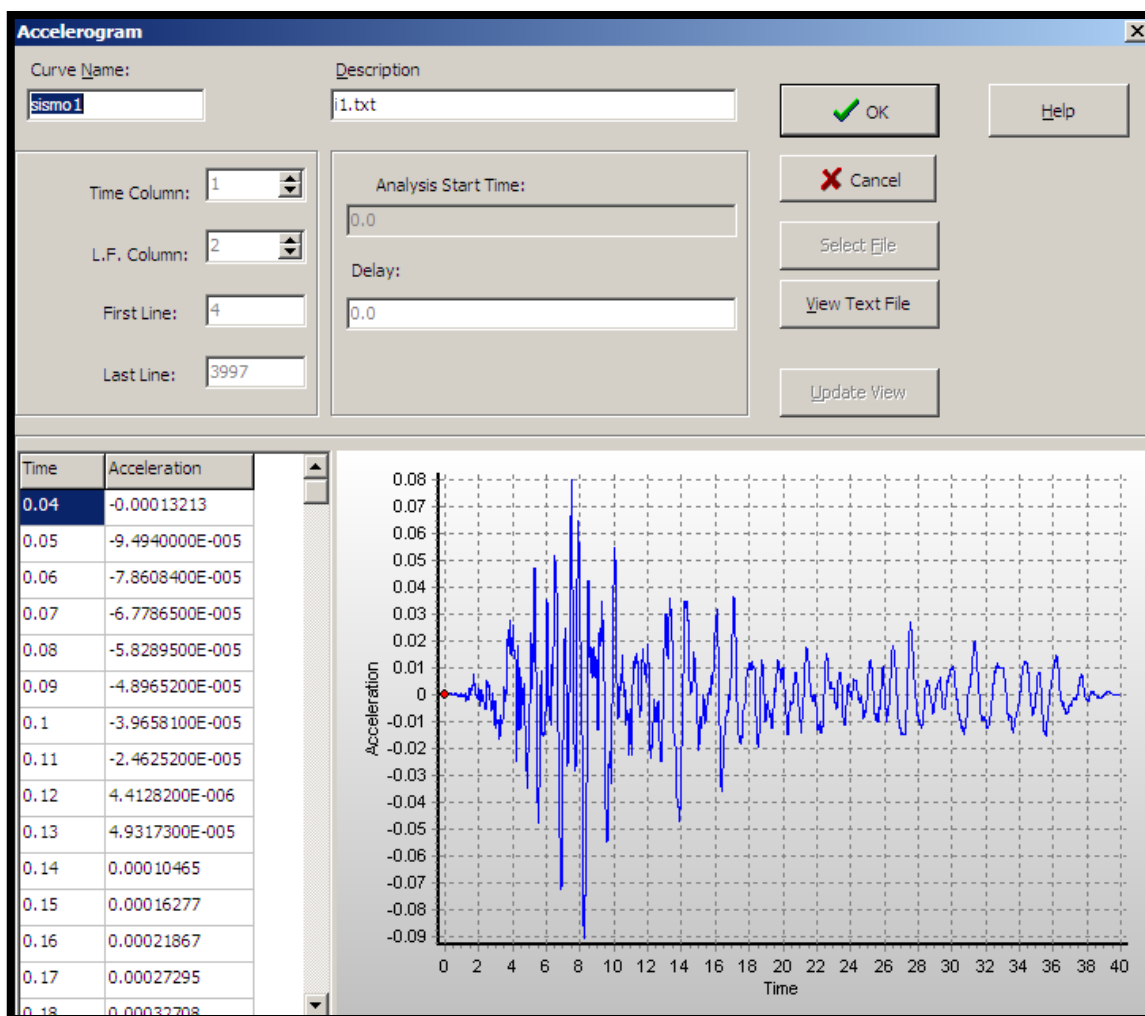


Figura19. Aplicación de cargas (Sismo1 - Análisis dinámico)

Category	Node Name	Direction	Type	Value	Curve Na...
Incremental Load	node21	x	force	60.	
Incremental Load	node31	x	force	90.	
Incremental Load	node41	x	force	150.	

Figura20. Aplicación de cargas (Carga incremental – Pushover estático)

### 3.4.2.5 Criterios de ejecución y análisis de salida

Siendo un programa de análisis de fibras, SeismoStruct computacionalmente genera un gran número de parámetros de respuesta por ejemplo: esfuerzos, tensiones, curvaturas, fuerzas internas en los miembros, desplazamientos nodales, etc.

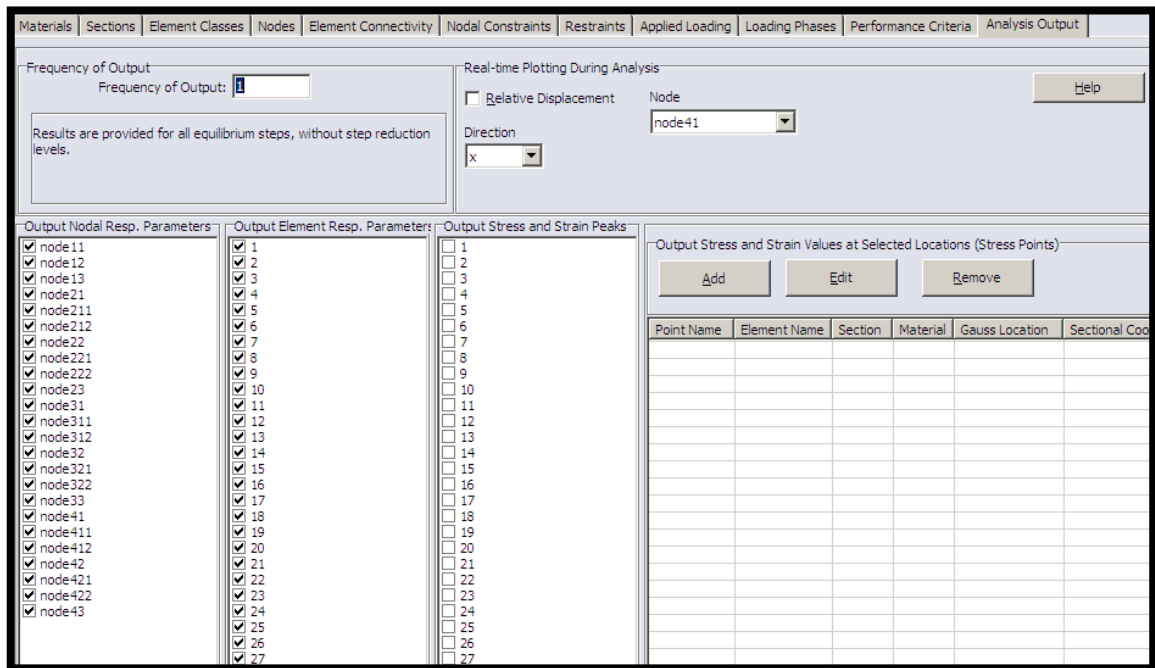


Figura21. Análisis de salida

## 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Al inicio de este capítulo se muestra la calibración del modelo, es decir, se establece un análisis comparativo entre los programas OpenSees y SeismoStruct en los casos en los que los parámetros de modelamiento son comparables, esto con el objeto de establecer que los resultados obtenidos en ambos software sean correctos.

A continuación se presentan los resultados de las simulaciones de la respuesta del Edificio 1 utilizado como prototipo para el estudio paramétrico del proyecto de investigación. Los registros obtenidos contienen las derivas de cada piso y el desplazamiento del nudo de la parte superior del edificio, asumido como nudo de control. Estos resultados corresponden a la aplicación del análisis dinámico y de la misma manera para el análisis Pushover.

Es importante recordar que los Edificios se modelaron manteniendo constante las propiedades generales de los materiales así como las dimensiones y el armado de las secciones:

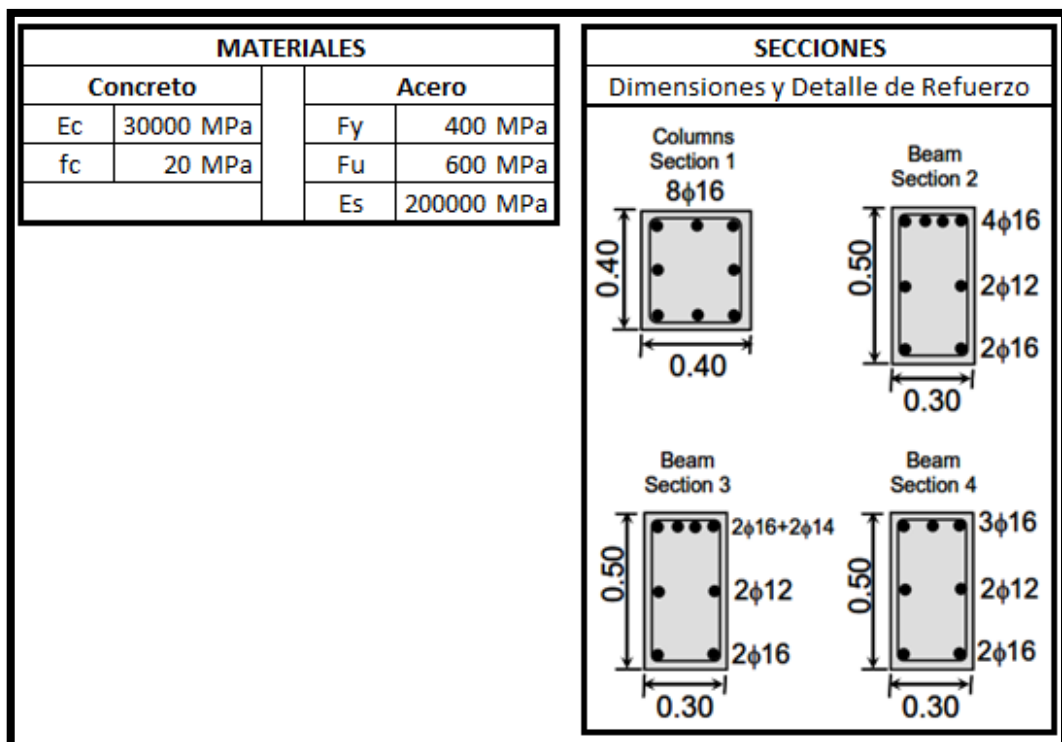


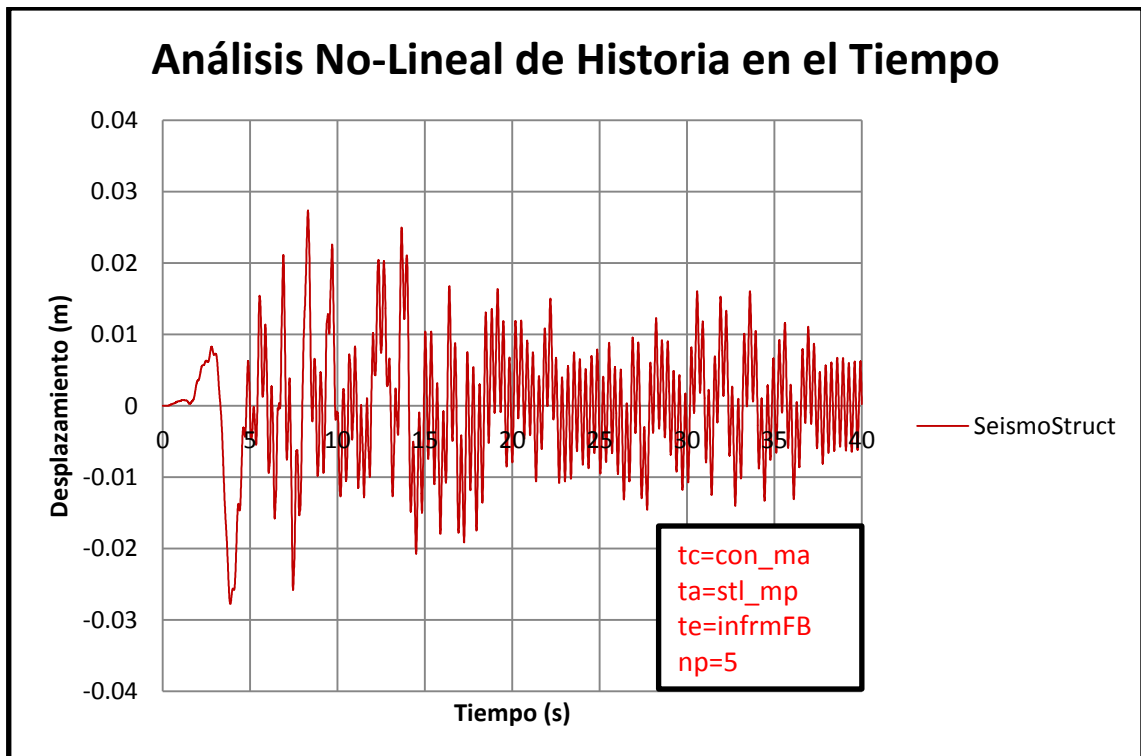
Figura22. Materiales y secciones

## 4.1 Calibración del modelo

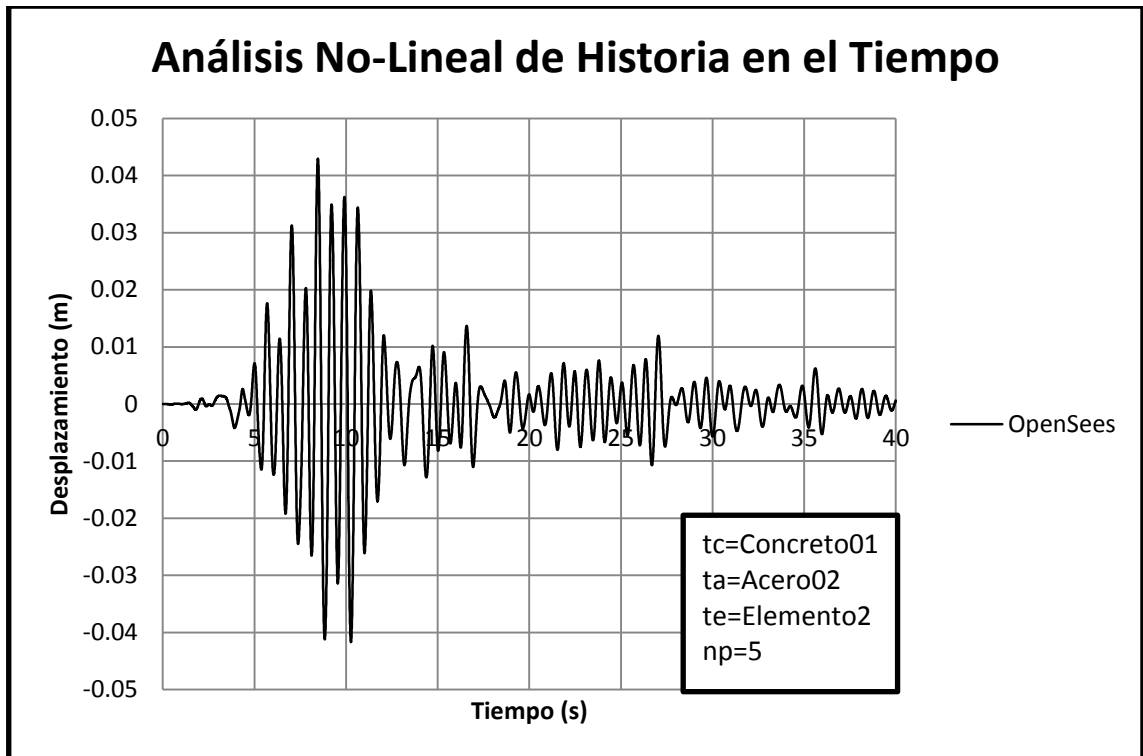
Para determinar que los resultados obtenidos con el programa OpenSees son correctos se comparará con los resultados registrados en SeismoStruct, tanto para el análisis dinámico como para el análisis Pushover estático, utilizando parámetros equivalentes (tipo de concreto, acero, elemento y número de puntos de integración).

En vista de que el programa SeismoStruct no cuenta con la opción de registrar derivas, las comparaciones entre ambos programas se realizarán sobre los desplazamientos del nudo del piso superior, utilizado como nudo de control.

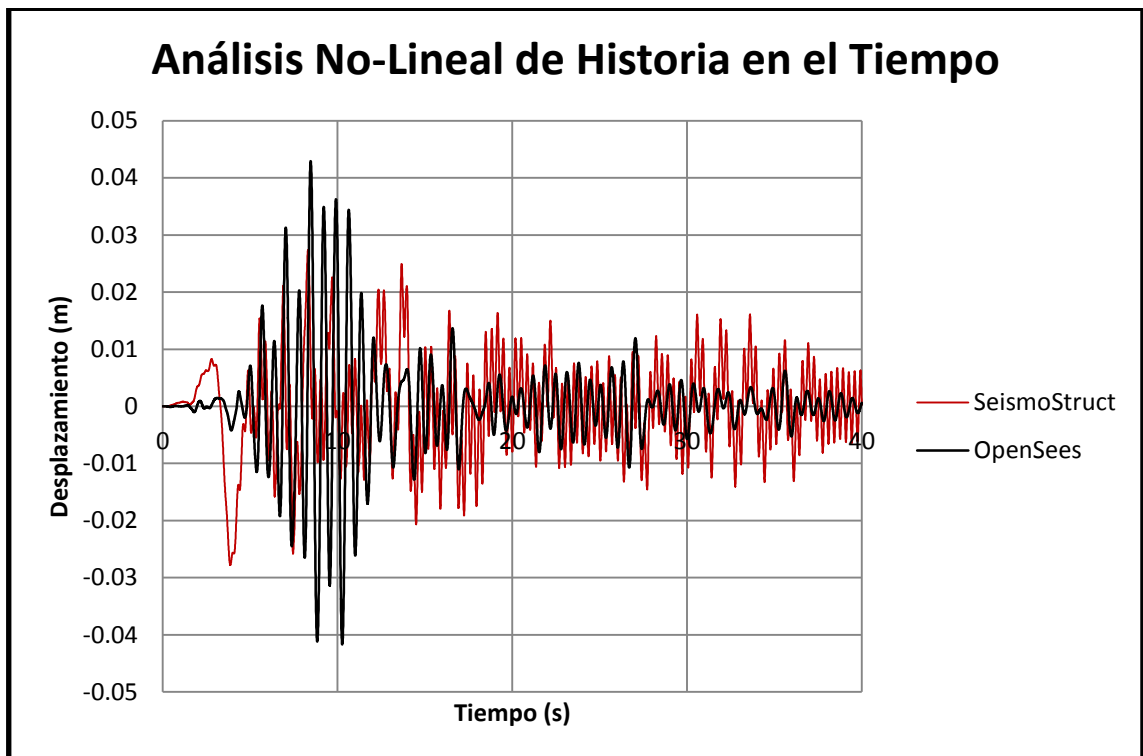
### Análisis dinámico



Gráfica3. Desplazamientos registrados en SeismoStruct

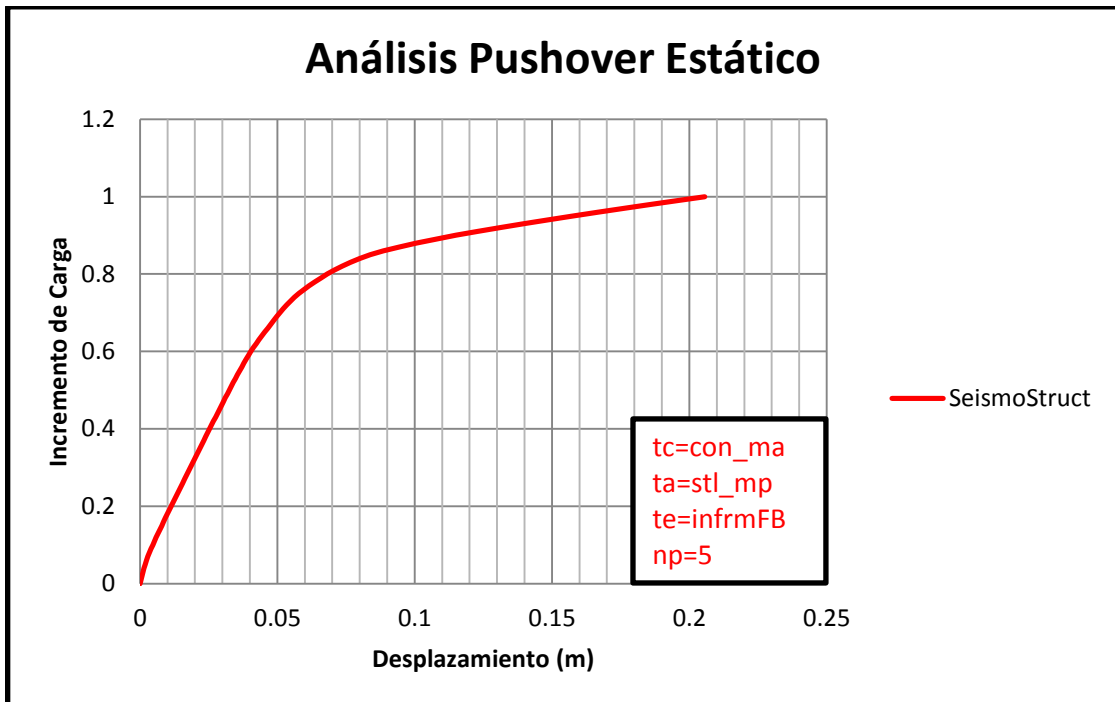


**Gráfica4.** Desplazamientos registrados en OpenSees

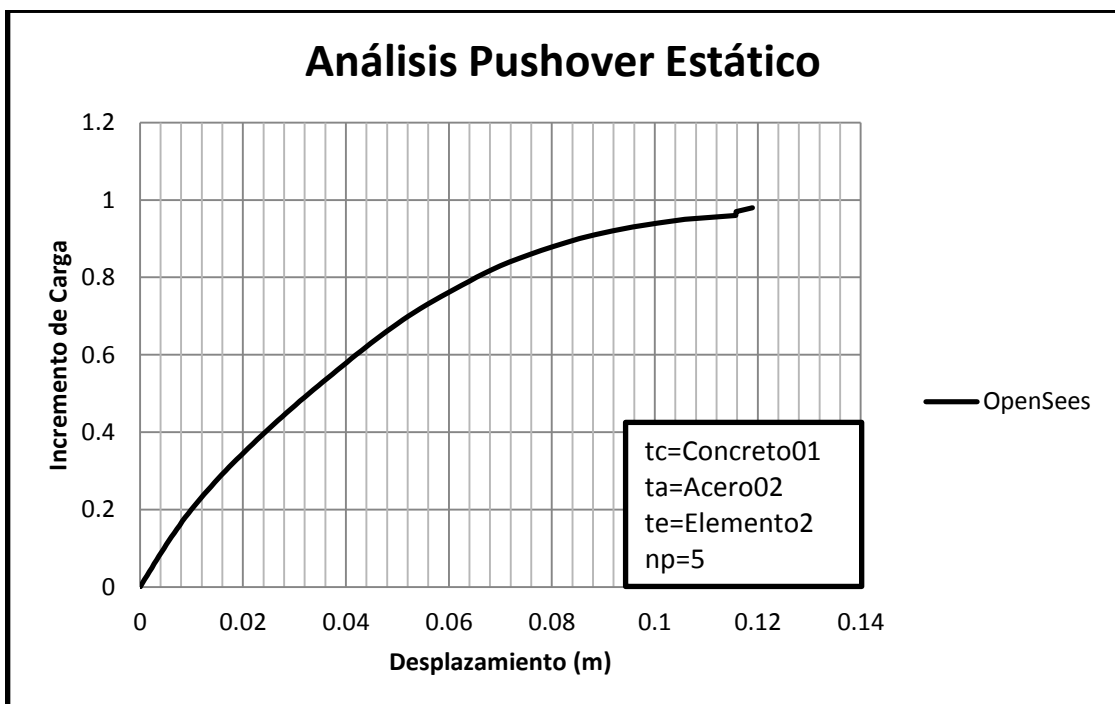


**Gráfica5.** Gráficas 3 y 4 superpuestas

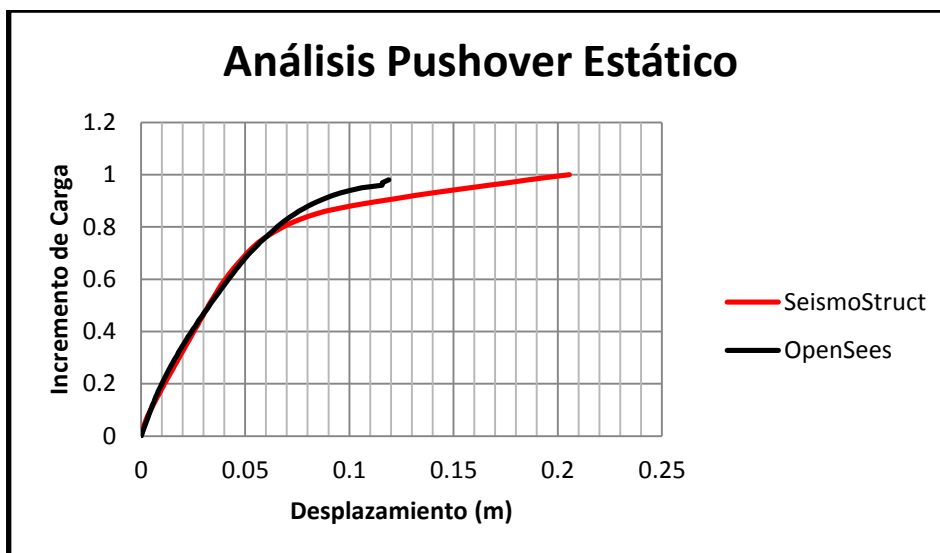
## Análisis Pushover estático



Gráfica6. Desplazamientos registrados en SeismoStruct



Gráfica7. Desplazamientos registrados en OpenSees



**Gráfica8.** Gráficas 6 y 7 superpuestas

## 4.2 Análisis del Edificio 1

### 4.2.1 Análisis Dinámico

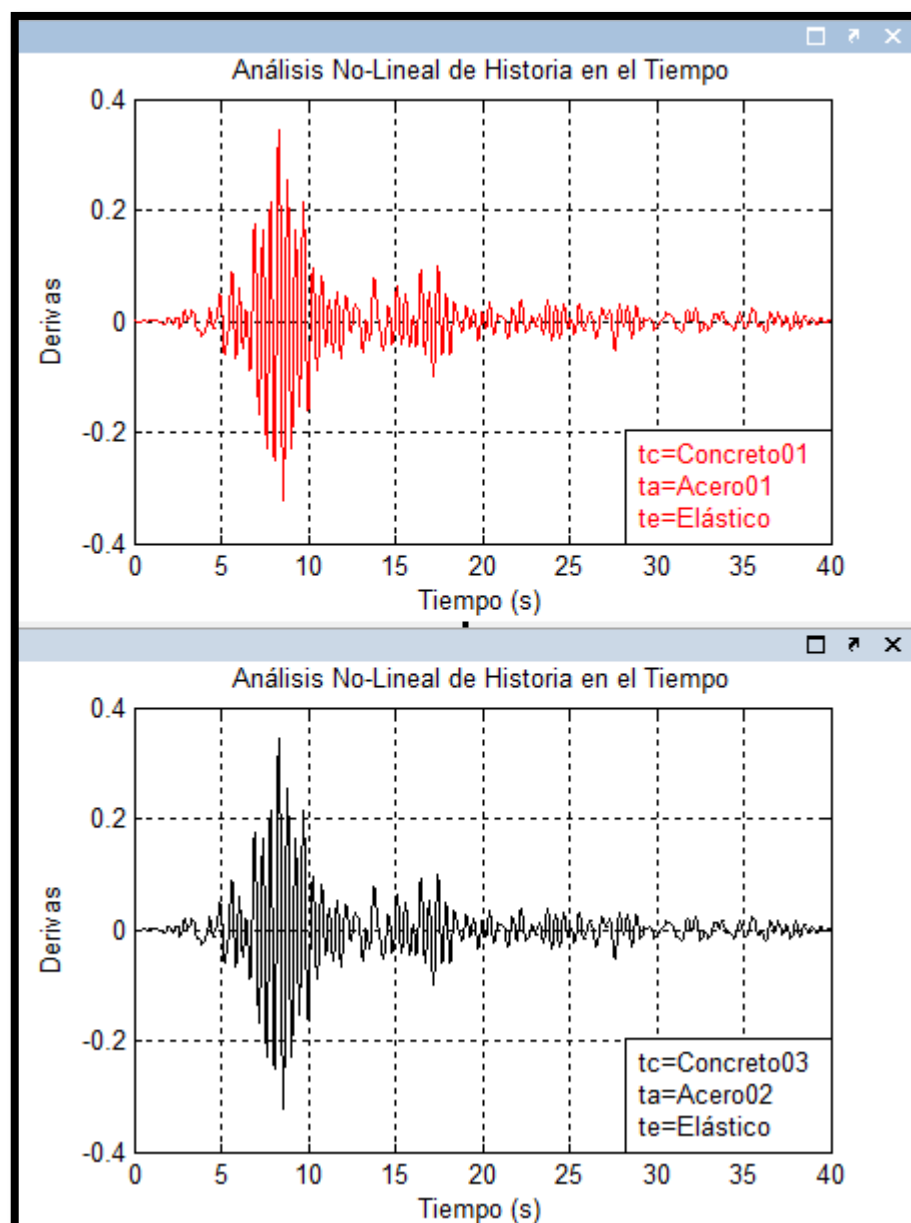
Con el objetivo de determinar las diferencias que se producen al utilizar diferentes combinaciones con los parámetros de modelamiento se realizarán tres observaciones, tanto para las derivas como para los desplazamientos obtenidos. La observación N°1 describe las consecuencias de utilizar el elemento elástico, la observación N°2 describe la influencia del número de puntos de integración y la observación N°3 muestra las implicaciones en los elementos 2 y 3 al variar el tipo de concreto y el tipo de acero.

Para el análisis dinámico se utilizó un sismo real que se produjo el 2 de mayo de 1983 en el Estado de California, en el Condado de Fresno en la localidad de Coalinga. La magnitud del sismo fue de 6.36 grados en la escala de Richter, el epicentro se situó a 54.61 Km del sismo y la estación que lo registro fue CDMG 36452 Parkfield-Cholame1E.

#### 4.2.1.1 Derivas

A partir de la elección aleatoria de los datos de entrada y luego de la aplicación del sismo que tarda 40 segundos y cuyo paso de tiempo (Dt) es de 0.005 segundos se obtiene las siguientes derivas

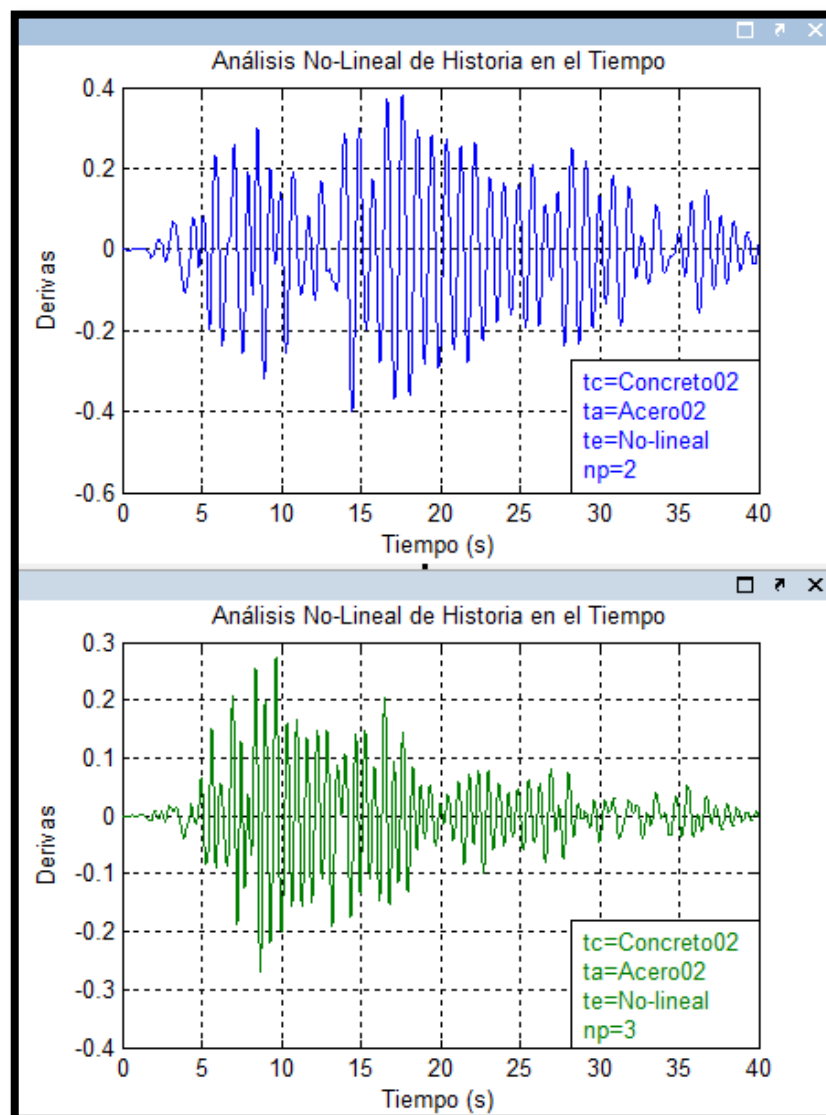
**Observación N°1.-** Si el elemento es elástico (Elemento1) no se incluye el número de puntos de integración, puesto que no es necesario comparar de un punto a otro el cambio de pendiente ya que siempre es constante. Además, con este tipo de elemento se determinó que no existe ninguna variación en las derivas ni al modificar el concreto ni al cambiar el acero. En la gráfica se muestra dos diferentes combinaciones con el mismo tipo de elemento.



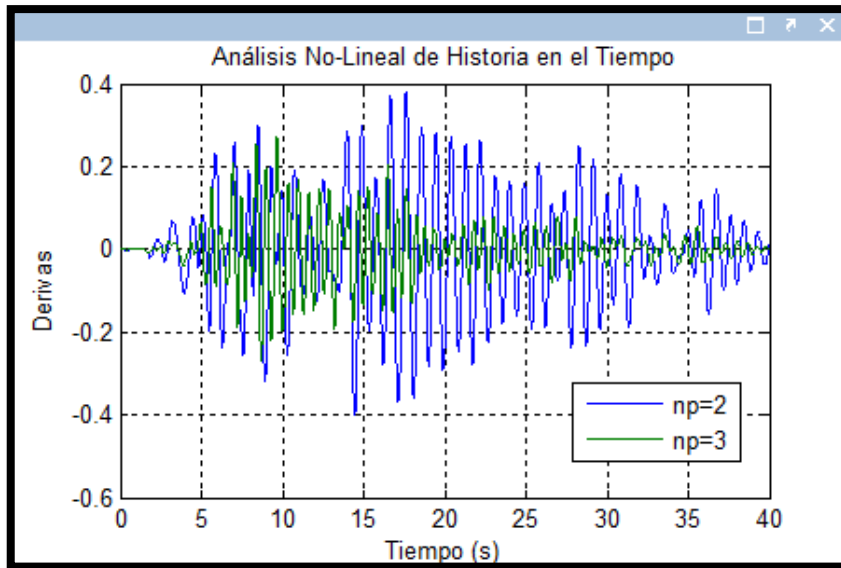
**Gráfica9.** Derivas al utilizar elemento elástico



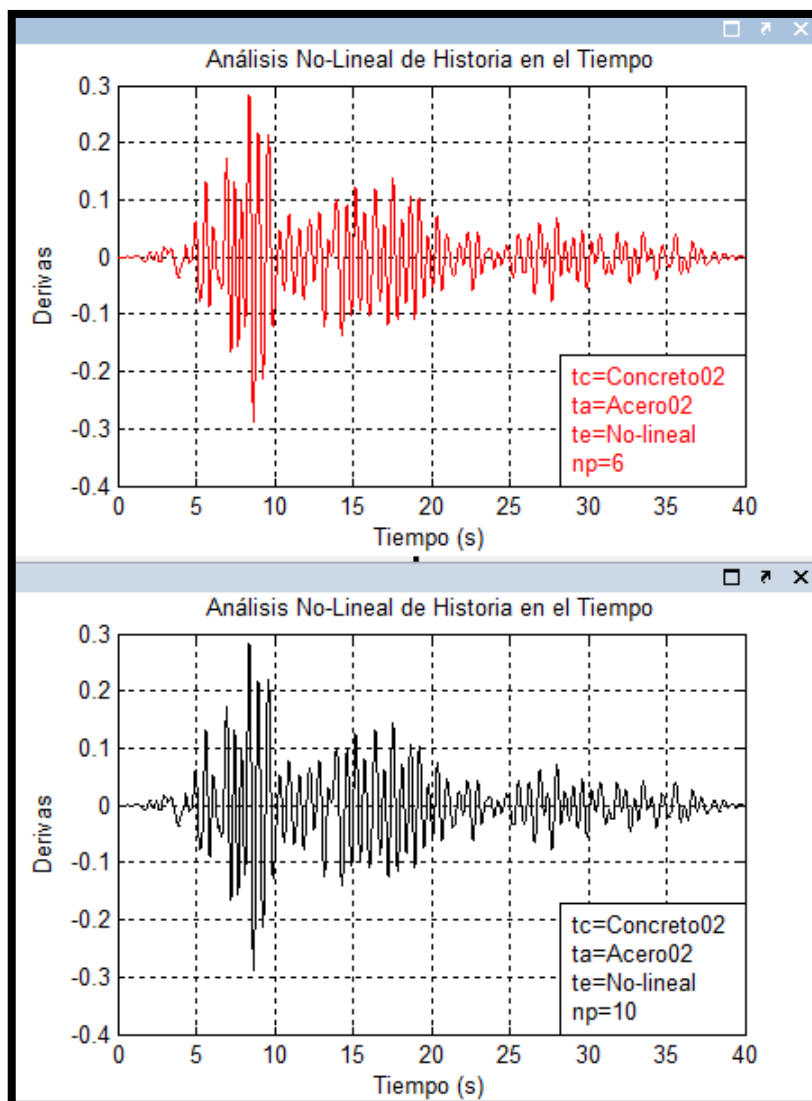
**Observación N°2.-** Los elementos dos y tres del proyecto son no-lineales por tanto es necesario incluir el número de puntos de integración (np). Es así que, luego de varias simulaciones se identificó que este parámetro es de suma importancia ya que se observó que al utilizar 2 y 3 puntos de integración los resultados varían significativamente y además se producen mayores derivas (Gráfica10), mientras que al utilizar de 4 a 10 puntos de integración los resultados no varían considerablemente y se producen derivas menores (Gráfica12). El rango que se usó para los puntos de integración es de 2 a 10 y se utilizó Concreto02, Acero02 y Elemento2.



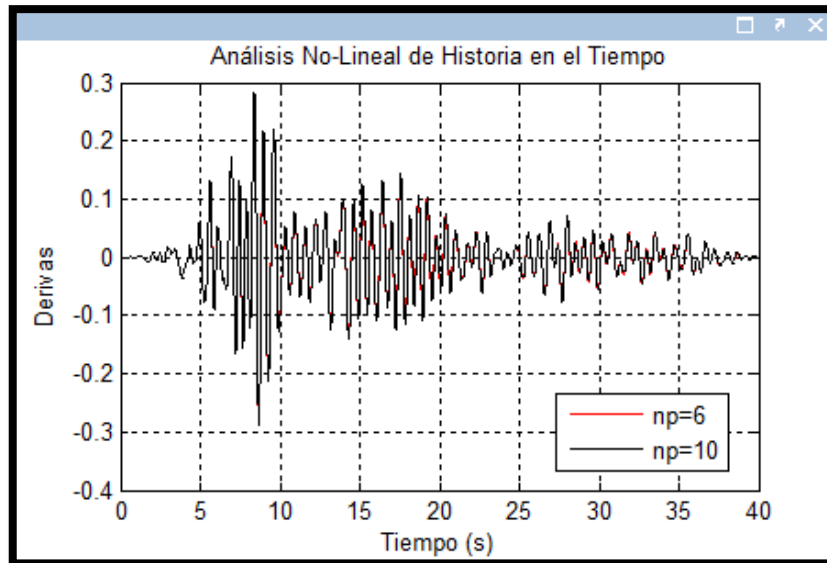
**Gráfica10.** Derivas con dos y tres puntos de integración respectivamente



Gráfica11. Gráfica10 superpuesta



Gráfica12. Derivas con seis y diez puntos de integración respectivamente

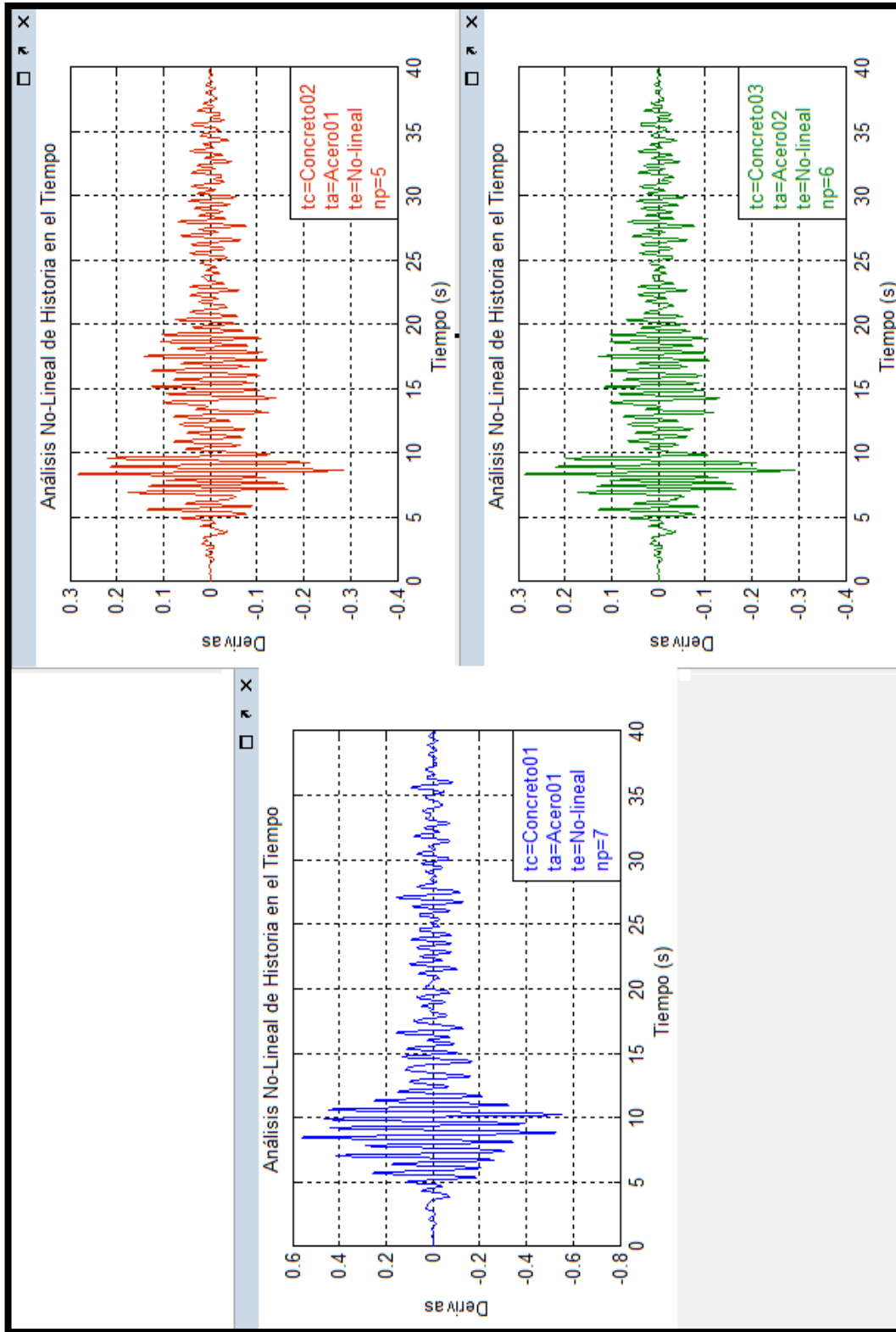


**Gráfica13.** Gráfica12 superpuesta

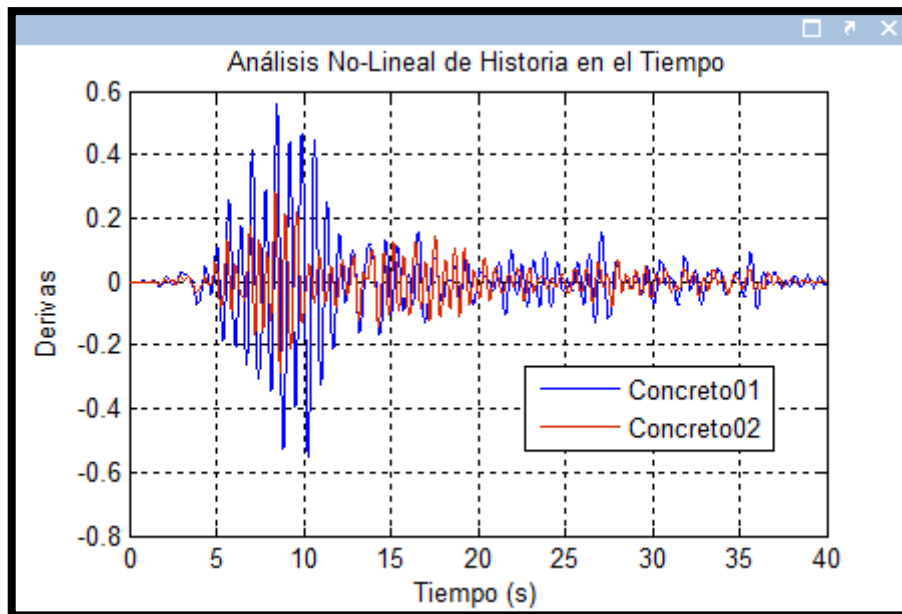
Al finalizar la observación N°2 se decidió continuar el análisis de los elementos no-lineales con cinco o más puntos de integración ya que con menos los datos no son comparables.

**Observación N°3.-** Corresponde a los elementos no-lineales en donde las mayores diferencias se producen al variar el tipo de concreto. Es así que, al considerar que el concreto no posee resistencia a la tensión (Concreto01) las derivas son mayores, por el contrario si el concreto considera resistencia a la tensión (Concreto02 y Concreto03), la diferencia en los resultados son pequeñas. En lo que tiene que ver con el acero si existen variaciones en las derivas pero no son tan significativas. Con el análisis Pushover se podrá observar más claramente estas diferencias.

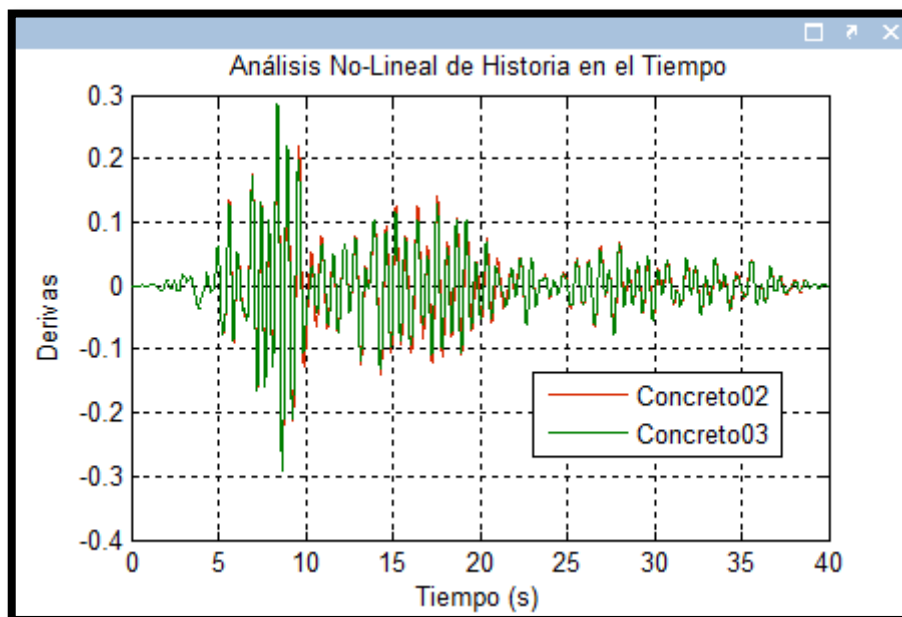
En la gráfica siguiente se muestra la comparación entre los resultados obtenidos al no considerar resistencia a la tensión (Concreto01, gráfica de la izquierda) y al considerar resistencia a la tensión (Concreto02 y Concreto03, gráficas de la derecha) en el tipo de concreto. En ambas comparaciones se utiliza diferente tipo de acero y número de puntos de integración.



Gráfica14. Derivas al cambiar el tipo de concreto



**Gráfica15.** Concreto01 Vs Concreto02 de la Gráfica14



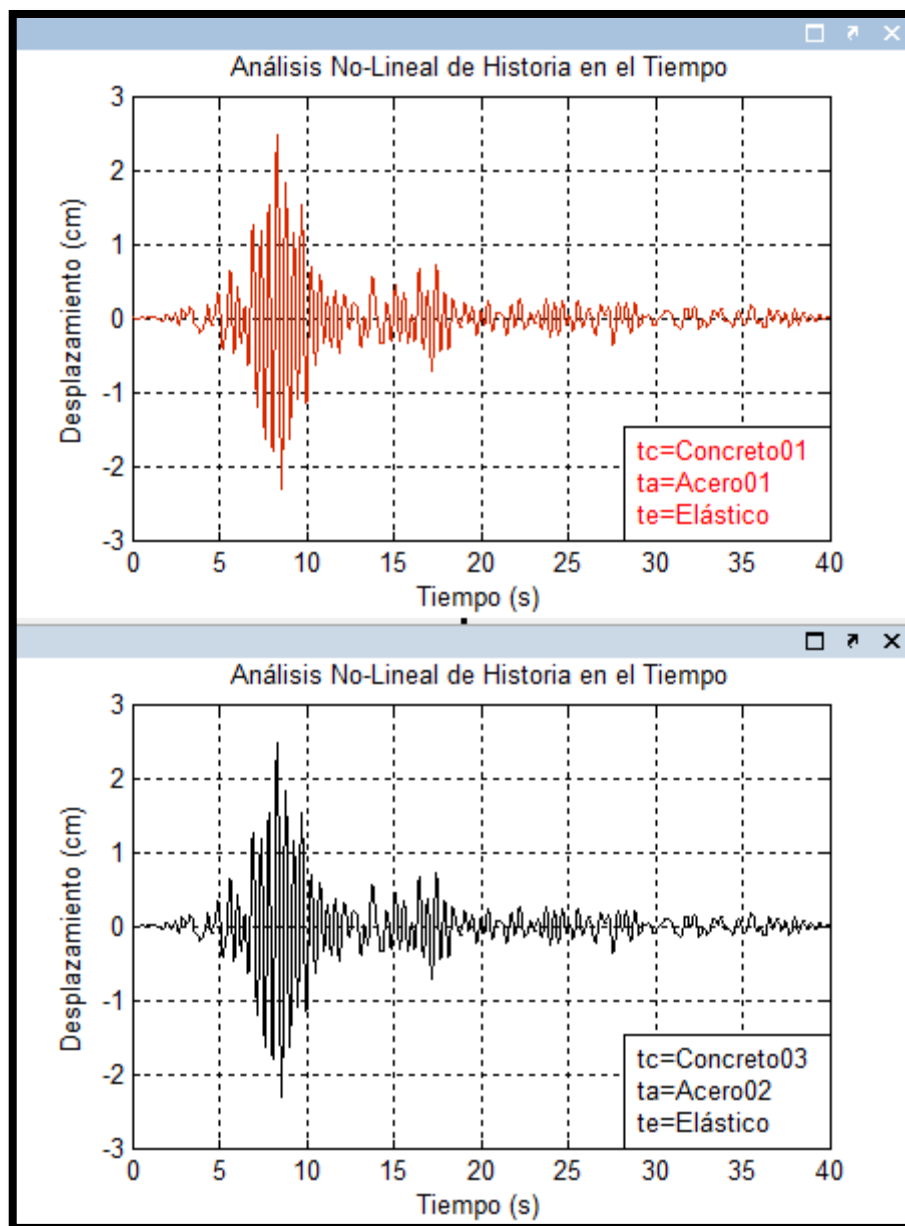
**Gráfica16.** Concreto02 Vs Concreto03 de la Gráfica14

El apartado que corresponde a derivas del análisis dinámico presenta el análisis y observación del Elemento2, sin embargo el análisis para el Elemento3 es el mismo, con la diferencia en los valores de los resultados que se obtuvieron ya que este tipo de elemento a más de ser no-lineal posee vigas con rótulas plásticas.

#### 4.2.1.2 Desplazamientos

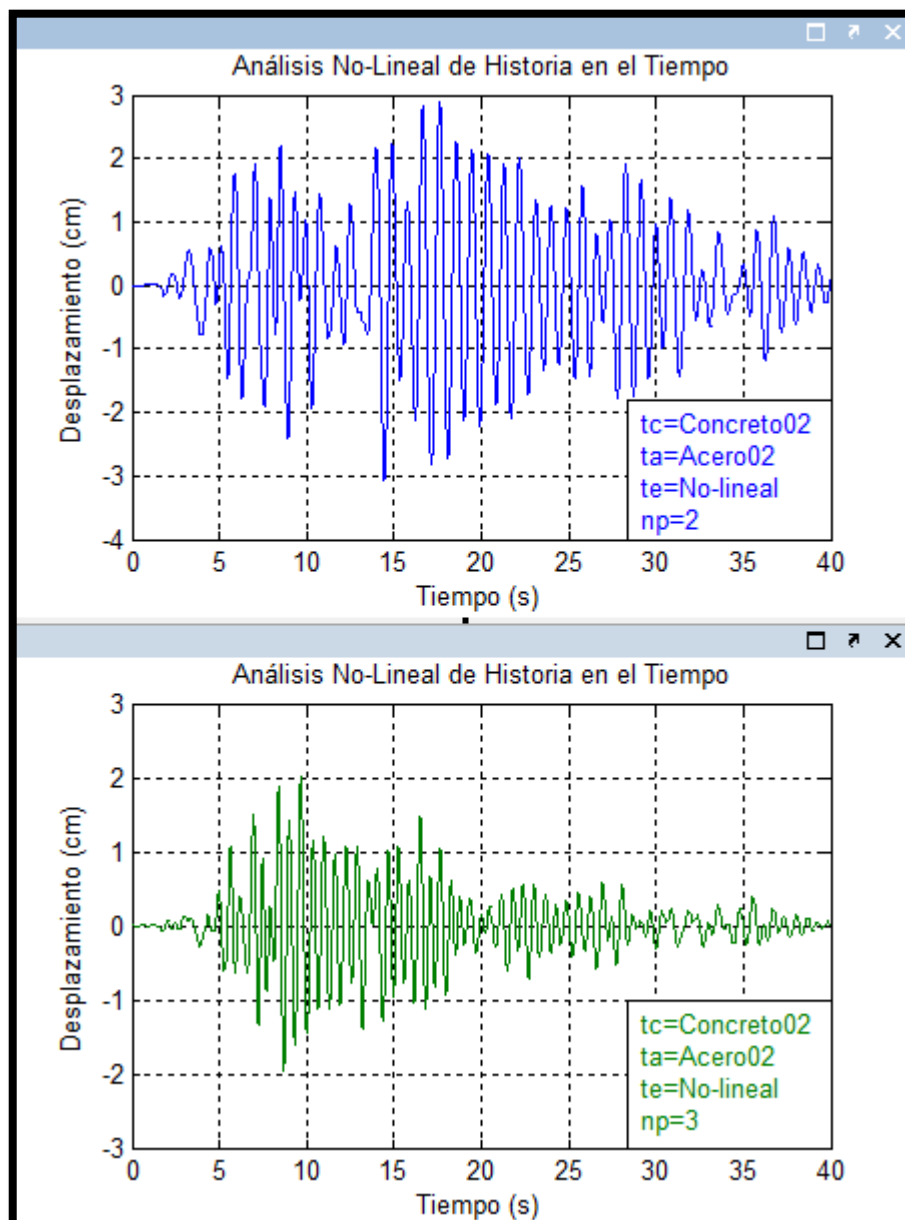
Para el control del desplazamiento se utilizó un nudo específico en el modelo, que es el nudo 41, correspondiente al primer nudo del último piso.

**Observación N°1.-** Al emplear el elemento elástico el desplazamiento que sufre el nudo 41 (nudo de control) durante el periodo de la inducción sísmica es el mismo al utilizar diferente concreto y acero. En la siguiente gráfica se muestra dos de las seis combinaciones con el elemento elástico, todas con resultados iguales.

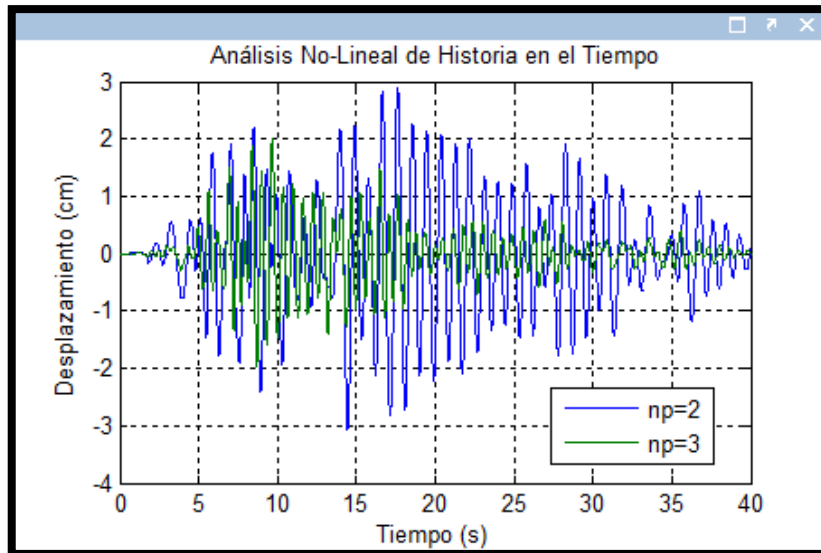


Gráfica17. Desplazamientos al utilizar elemento elástico

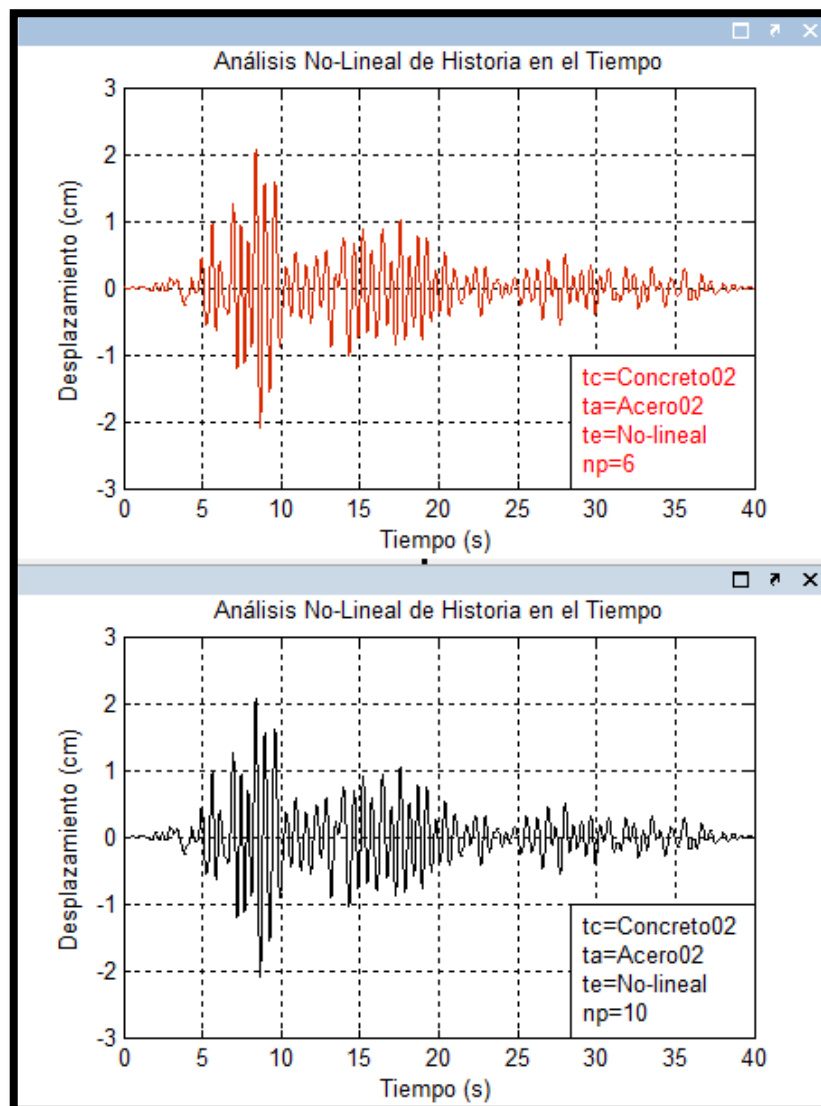
**Observación N°2.-** Para determinar la influencia en los desplazamientos al ingresar el número de puntos de integración (np) en los elementos no-lineales se utilizará Concreto03, Acero02 y 2, 3, 6 y 10 puntos de integración como se muestra en las siguientes figuras. Se observó que 2 y 3 puntos de integración no permiten establecer comparaciones ya que los resultados se disparan y con 4 o más los resultados son los mismos.



**Gráfica18.** Desplazamientos con dos y tres puntos de integración respectivamente

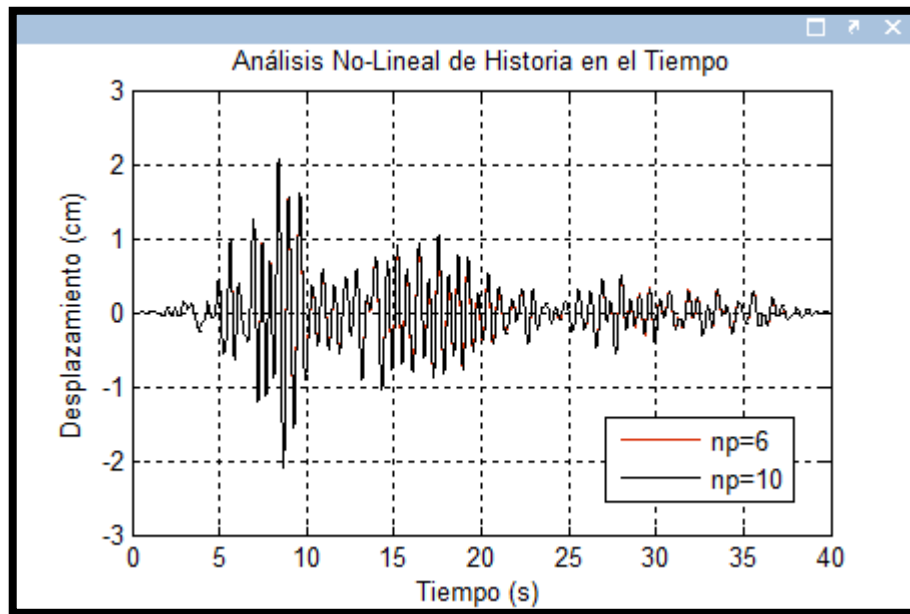


Gráfica19. Gráfica18 superpuesta



Gráfica20. Desplazamientos con seis y diez puntos de integración respectivamente

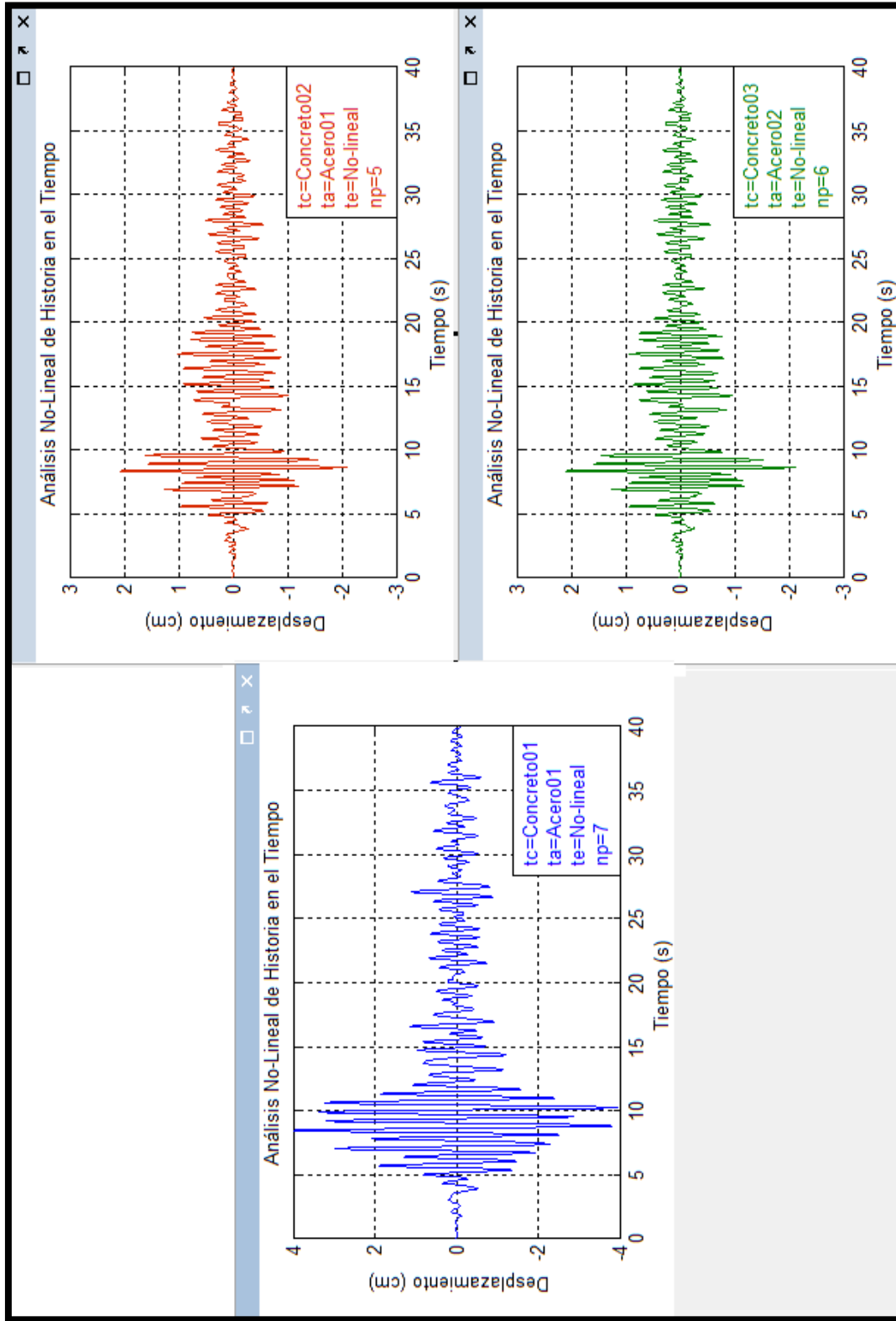




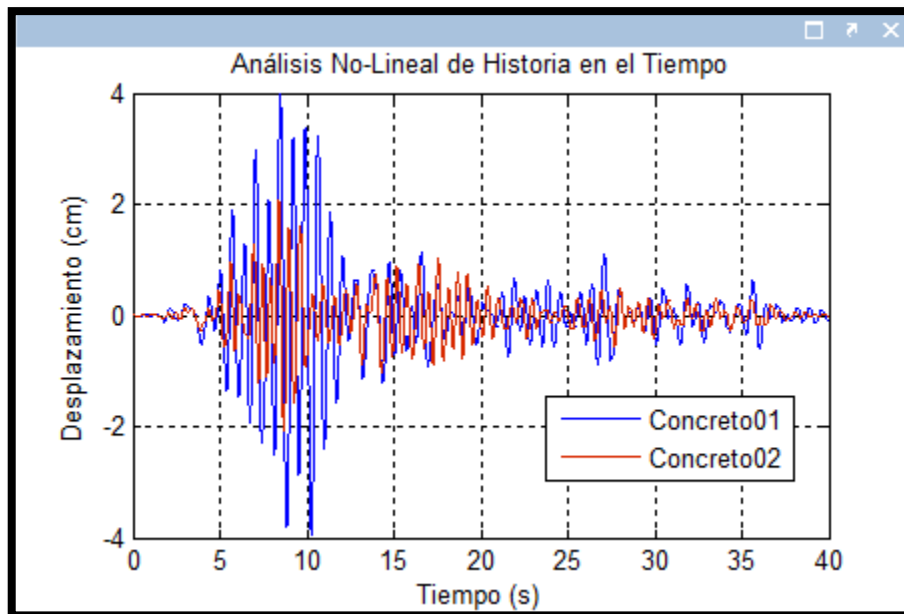
**Gráfica21.** Gráfica20 superpuesta

**Observación N°3.-** tras varias simulaciones se observó que el tipo de acero no produce variaciones significativas en los resultados, sin embargo, el tipo de concreto si, ya que si se toma o no en consideración la resistencia a la tensión existe diferencias.

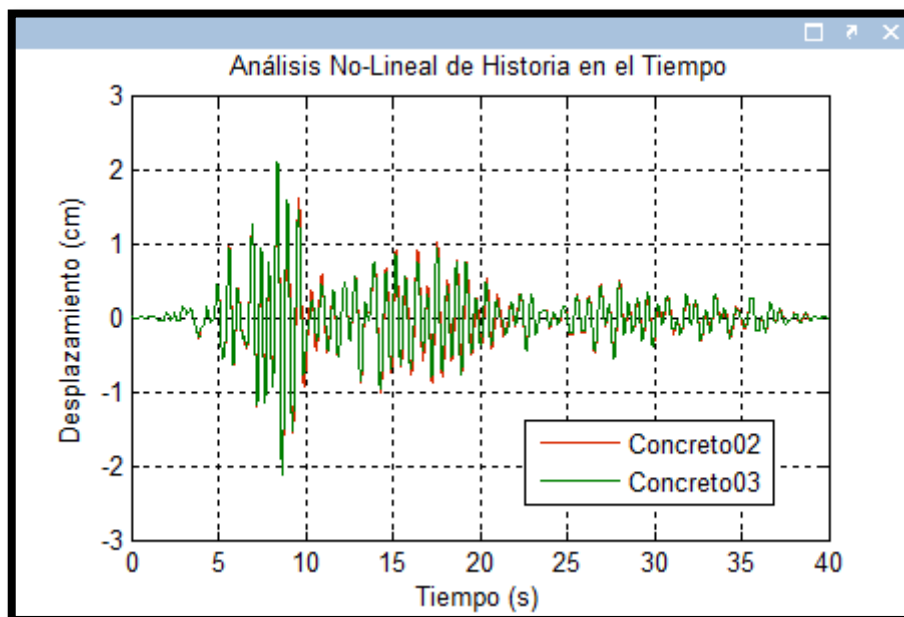
Como se observa la gráfica de la izquierda (Concreto01) muestra diferencias significativas con respecto a las gráficas de la derecha (Concreto02 y Concreto03, respectivamente), mientras que al comparar solamente las de la derecha a pesar de tener diferente tipo de concreto y acero muestran variaciones muy pequeñas entre ellas.



**Gráfica22.** Variaciones al cambiar el tipo de concreto



**Gráfica23.** Concreto01 Vs Concreto02 de la Gráfica22



**Gráfica24.** Concreto02 Vs Concreto03 de la Gráfica22

La sección correspondiente a desplazamientos del análisis dinámico presenta el análisis del Elemento2. Para el Elemento3 las observaciones son las mismas, con la diferencia en los resultados que se obtuvieron ya que este tipo de elemento a más de ser no-lineal posee la capacidad de concentrar la inelasticidad con el uso de rótulas plásticas.

## 4.2.2 Análisis Pushover

El análisis pushover estático ayuda a entender el desempeño de la estructura bajo una fuerza horizontal sostenida. Las fuerzas que se aplicaron en el análisis son las que se muestran a continuación:

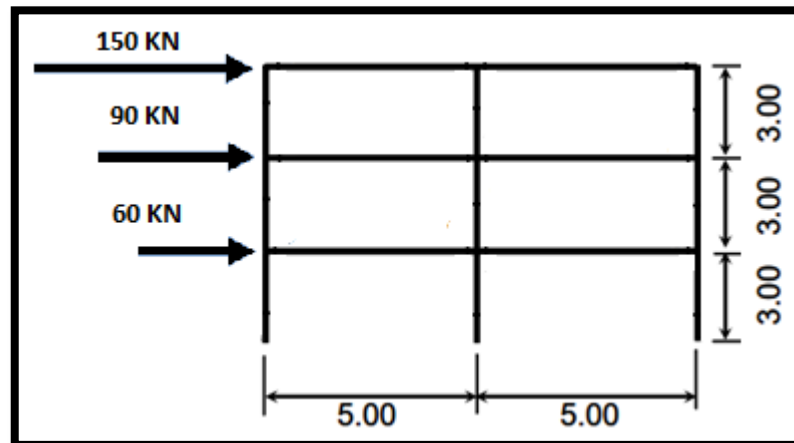
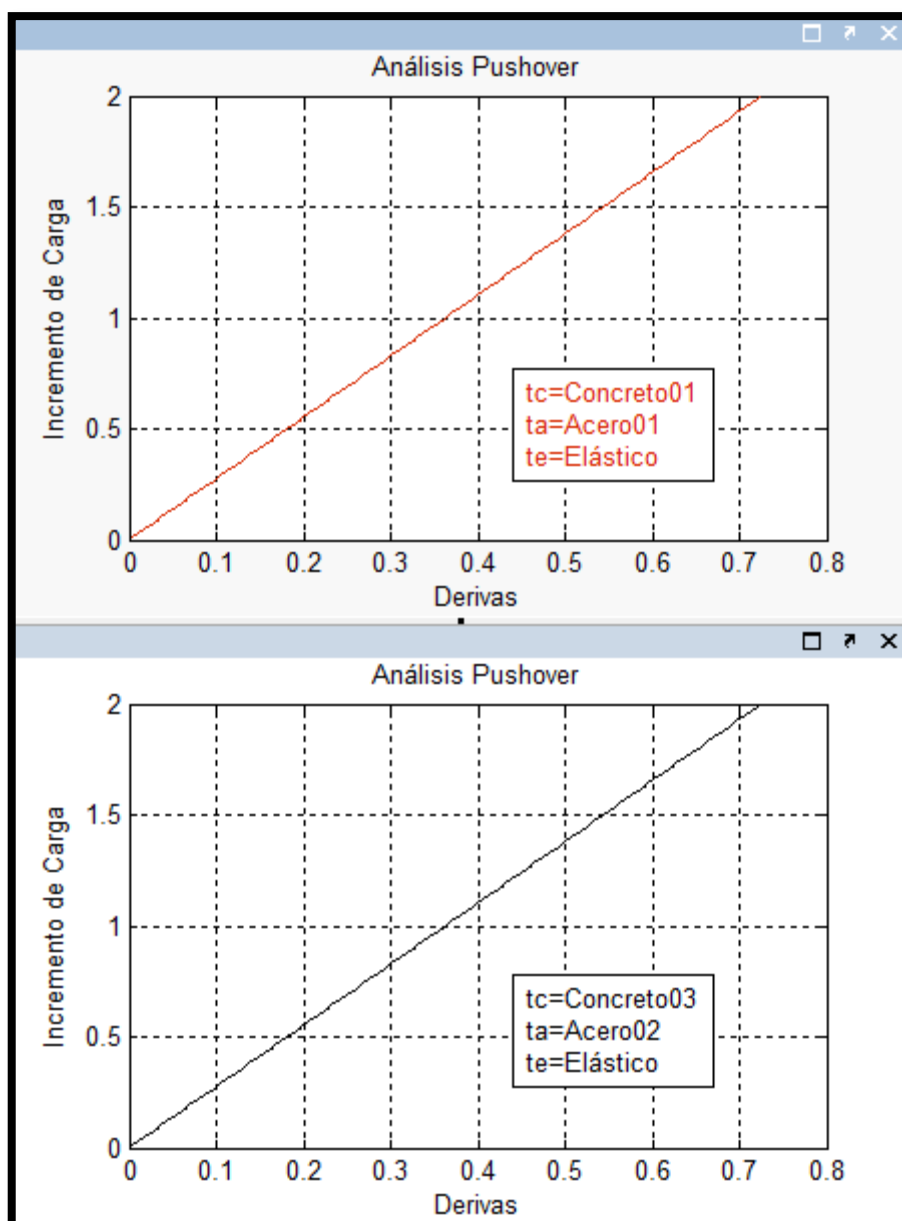


Figura23. Fuerzas aplicadas en la estructura

### 4.2.2.1 Derivas

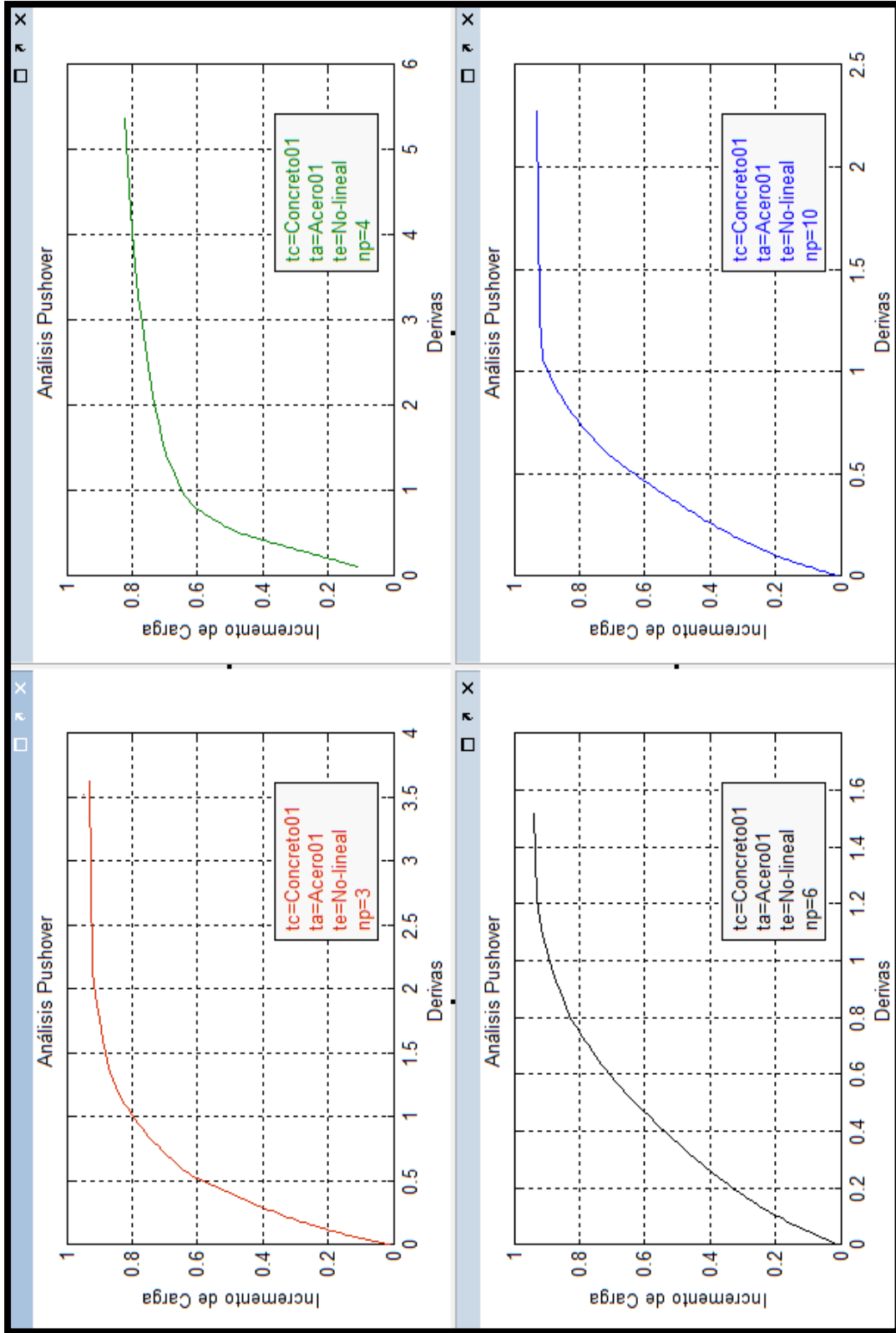
**Observación N°1.-** Si el elemento es elástico (Elemento1) no se incluye el número de puntos de integración, puesto que no es necesario comparar de un punto a otro el cambio de pendiente ya que siempre es constante. Además, con este tipo de elemento se determinó que no existe ninguna variación en las derivas ni al modificar el concreto ni al cambiar el acero. Las gráficas muestran siempre la misma tendencia.

En la siguiente gráfica se muestra dos de las seis posibles combinaciones con el elemento elástico, en la primera se utiliza Concreto01 y Acero01, mientras que en la segunda Concreto03 y Acero02.

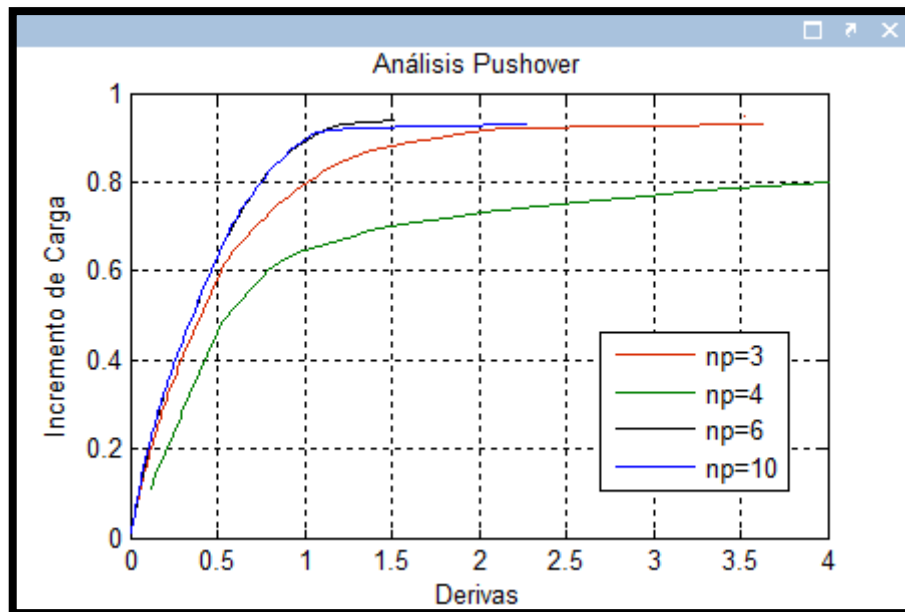


**Gráfica25.** Derivas al utilizar elemento elástico

**Observación N°2.-** La aplicación del análisis Pushover permite obtener resultados más visibles, por decirlo de alguna manera, ya que por ejemplo para este análisis en particular lo que deseamos es ver hasta qué punto influye el número de puntos de integración (np). Es así que las siguientes gráficas muestran simulaciones con el mismo tipo de concreto, acero y elemento, con diferentes puntos de integración (3, 4, 6 y 10 respectivamente).



**Gráfica26.** Derivas con tres, cuatro, seis y diez puntos de integración respectivamente

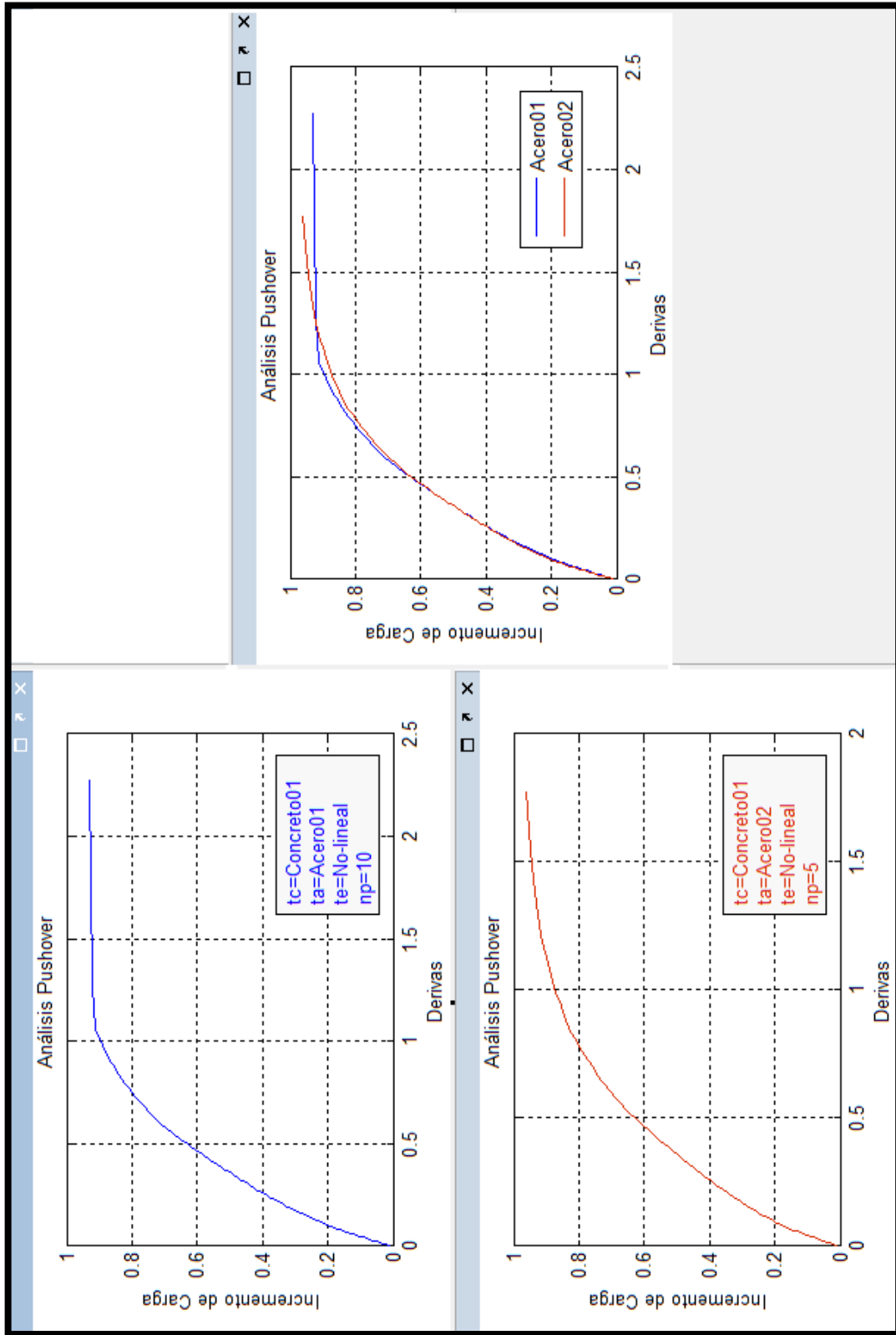


**Gráfica27.** Gráfica26 superpuerta

**Observación N°3.-** En este caso las observaciones corresponden a los elementos no-lineales. Luego de varias simulaciones se observó que el tipo de concreto produce mayores diferencias en los resultados ya que toma o no en consideración la resistencia a la tensión. Por otro lado, el análisis Pushover permite observar claramente las variaciones en las derivas que produce el tipo de acero a pesar de que no son tan evidentes como las del concreto.

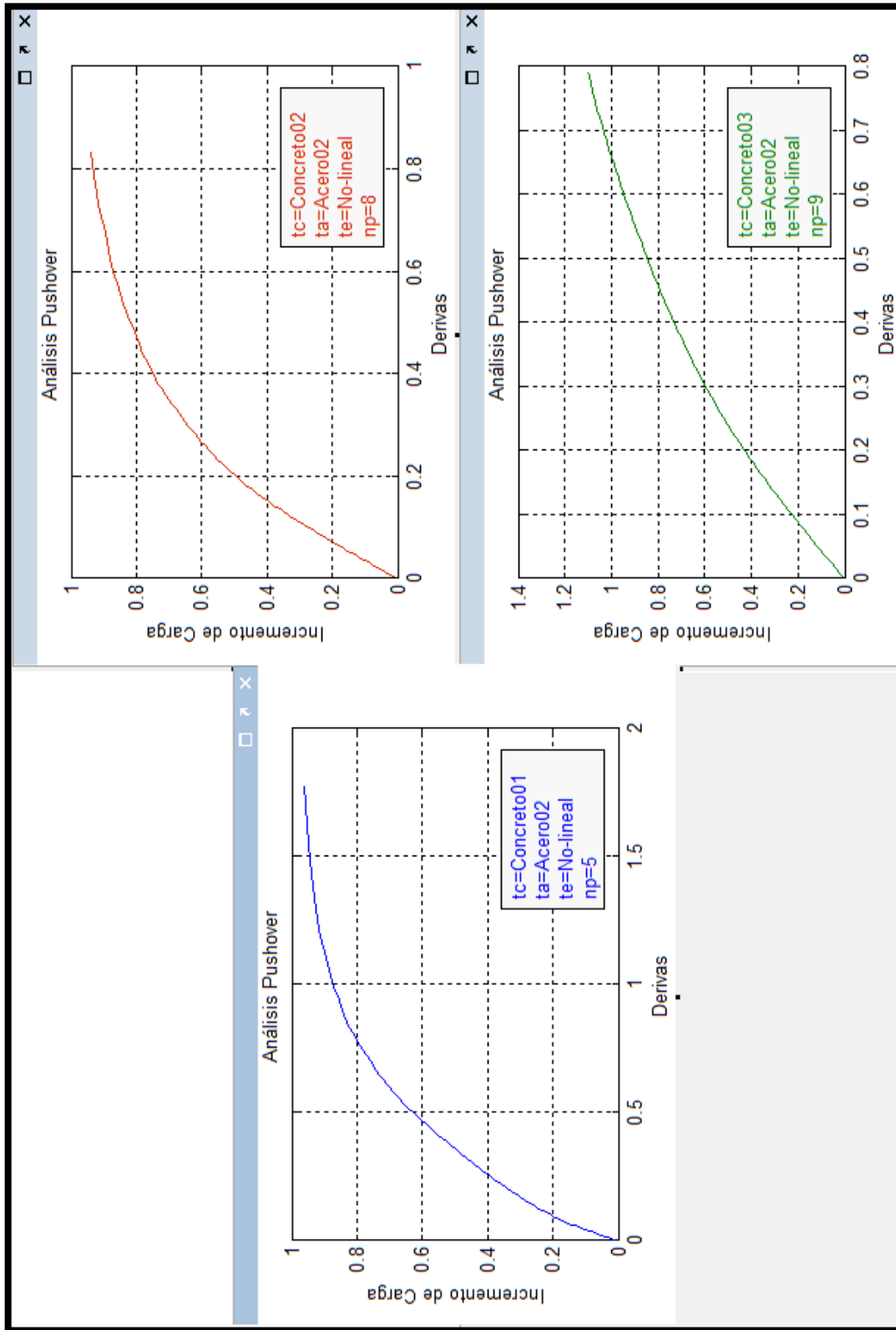
En la Gráfica28 se muestra las variaciones que produce el tipo de acero. A la izquierda se encuentran dos gráficas con el mismo tipo de concreto (Concreto02) y diferente tipo de acero, mientras que a la derecha se muestra la superposición de ambas gráficas.

En la Gráfica29 se observa las variaciones que produce el tipo de concreto. A la izquierda se muestra el Concreto01 mientras que a la derecha el Concreto02 y Concreto03, respectivamente.

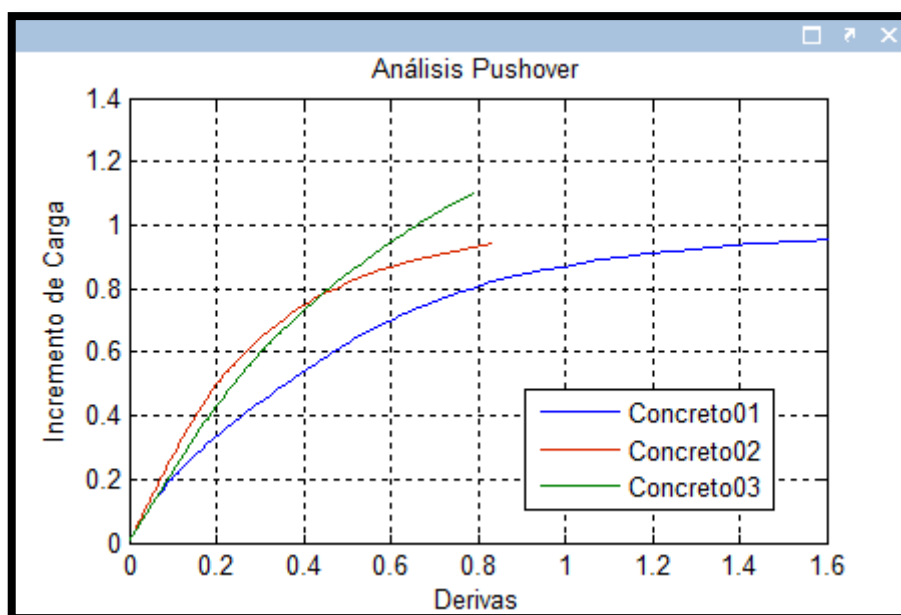


Gráfica28. Derivas al cambiar el tipo de acero





**Gráfica29.** Derivas al cambiar el tipo de concreto



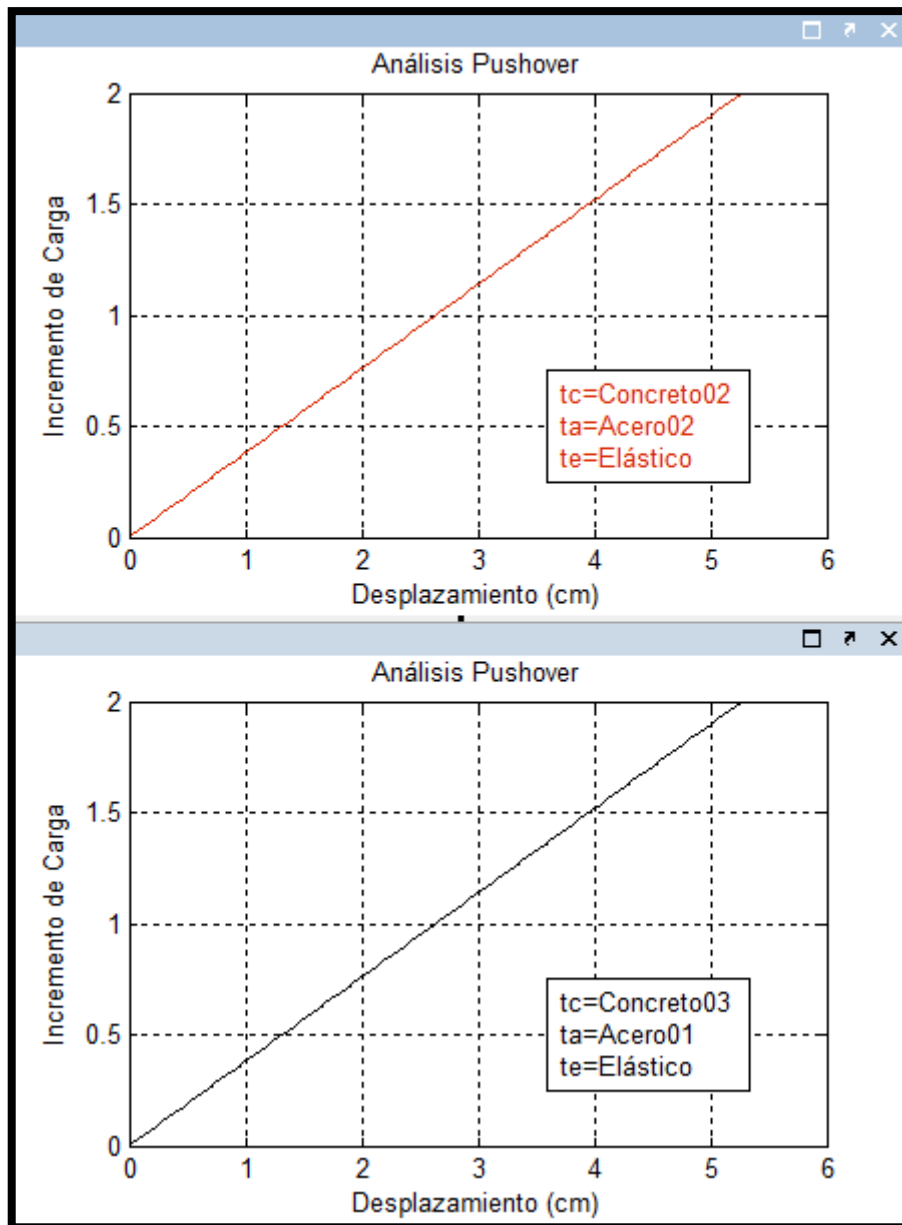
**Gráfica30.** Concreto01, Concreto02 y Concreto03 de la Gráfica29

El apartado que corresponde a derivas del análisis Pushover presenta el análisis y observación del Elemento2, sin embargo el análisis para el Elemento3 es el mismo, con la diferencia en los resultados que se obtuvieron ya que este tipo de elemento a más de ser no-lineal posee vigas con rótulas plásticas.

#### 4.2.2.2 Desplazamientos

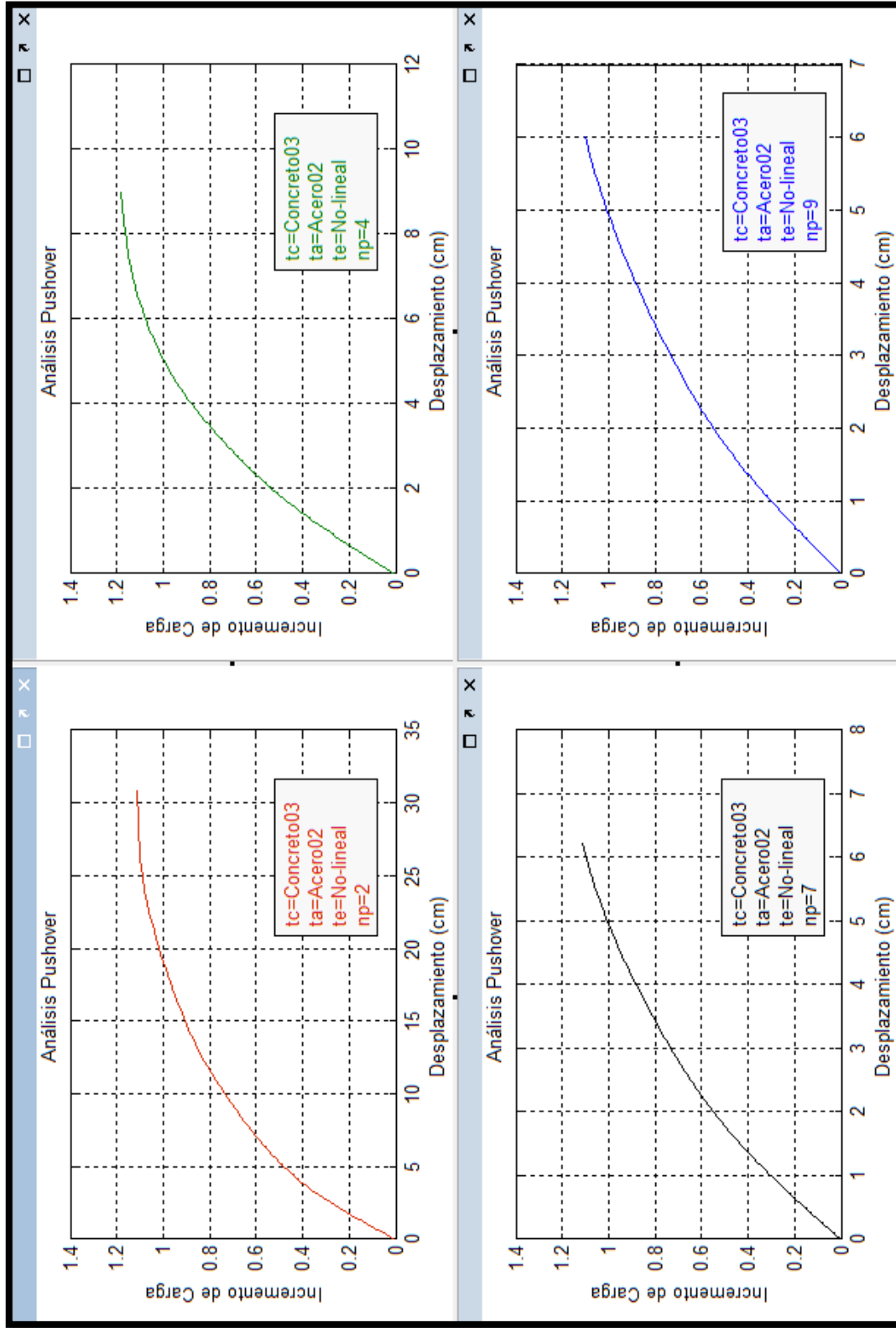
**Observación N°1.-** en este caso como el elemento es elástico no es necesario ingresar el número de puntos de integración (np). Luego del análisis se observó que los resultados son los mismos y que no afecta el cambiar el tipo de concreto y el tipo de acero. Las gráficas muestran siempre la misma tendencia.

En la gráfica siguiente se muestra dos de las seis posibles combinaciones con el elemento elástico, en la primera se utiliza Concreto02 y Acero02, mientras que en la segunda Concreto03 y Acero01.

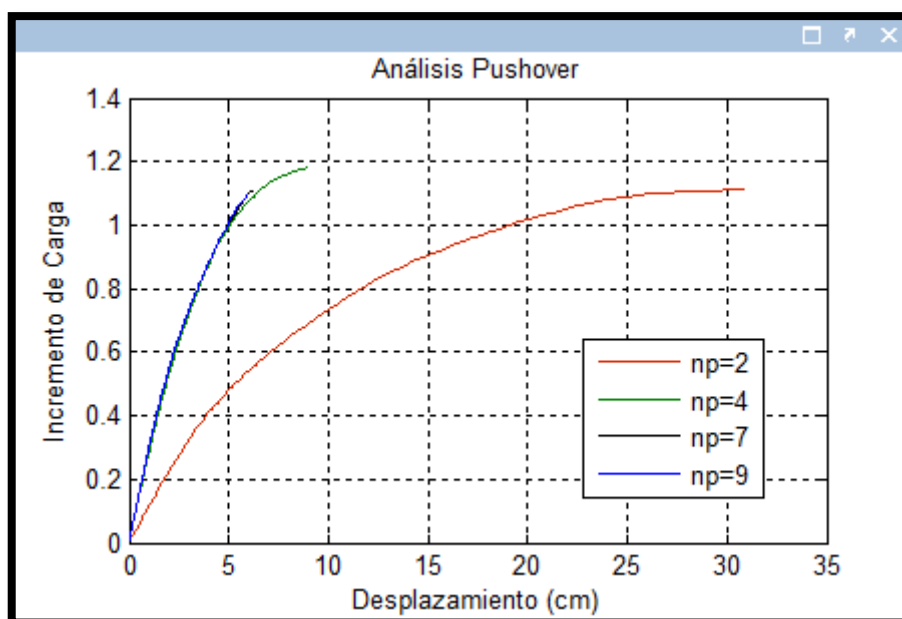


**Gráfica31.** Derivas al utilizar elemento elástico

**Observación N°2.-** La aplicación del análisis Pushover permite obtener resultados más visibles, por decirlo de alguna manera, ya que por ejemplo para este análisis en particular lo que deseamos es ver hasta qué punto influye el número de puntos de integración (np). Es así que las siguientes gráficas muestran simulaciones con el mismo tipo de concreto, acero y elemento, con diferentes puntos de integración (2, 4, 7 y 9 respectivamente).



**Gráfica32.** Derivas con dos, cuatro, siete y nueve puntos de integración respectivamente

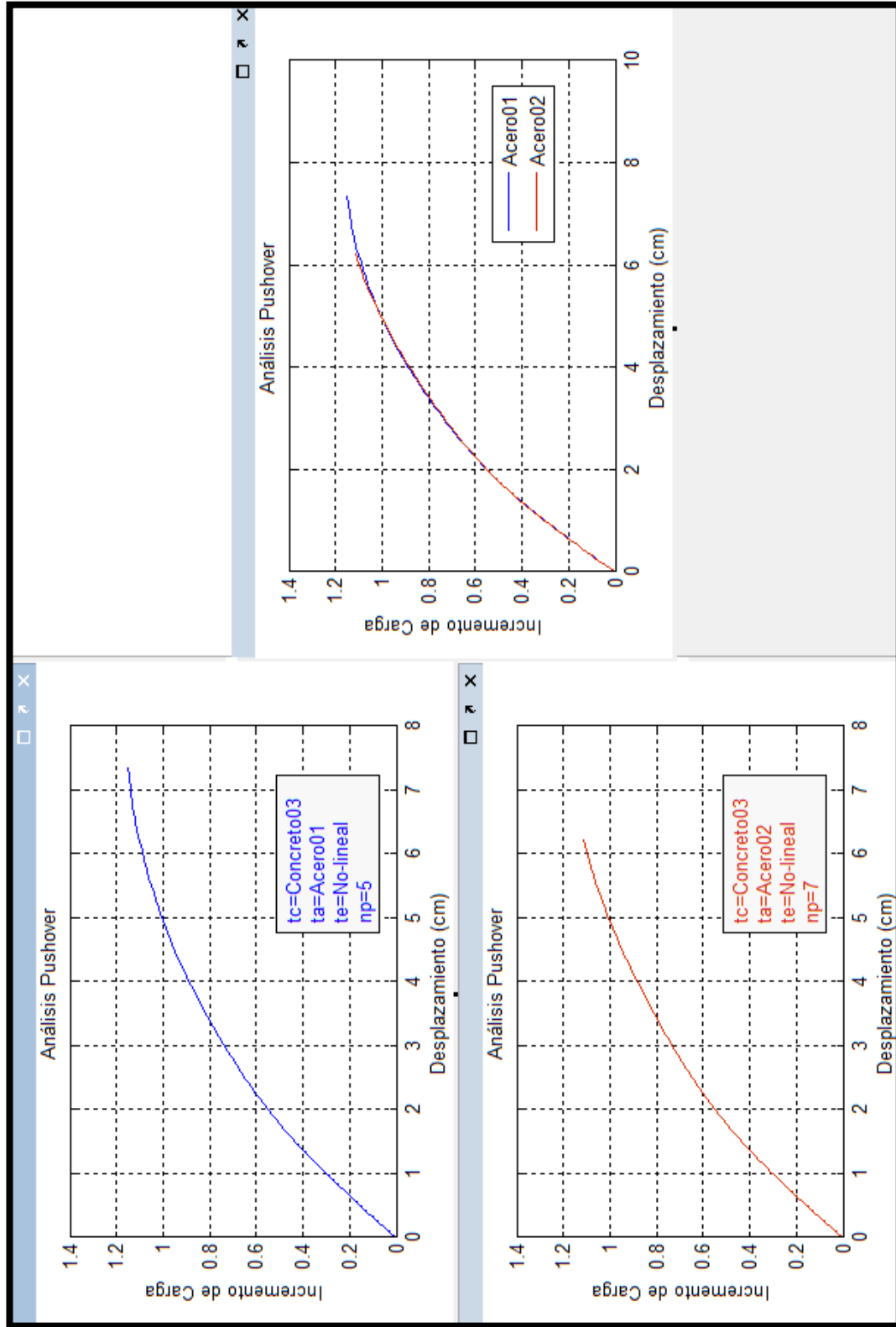


**Gráfica33.** Gráfica32 superpuesta

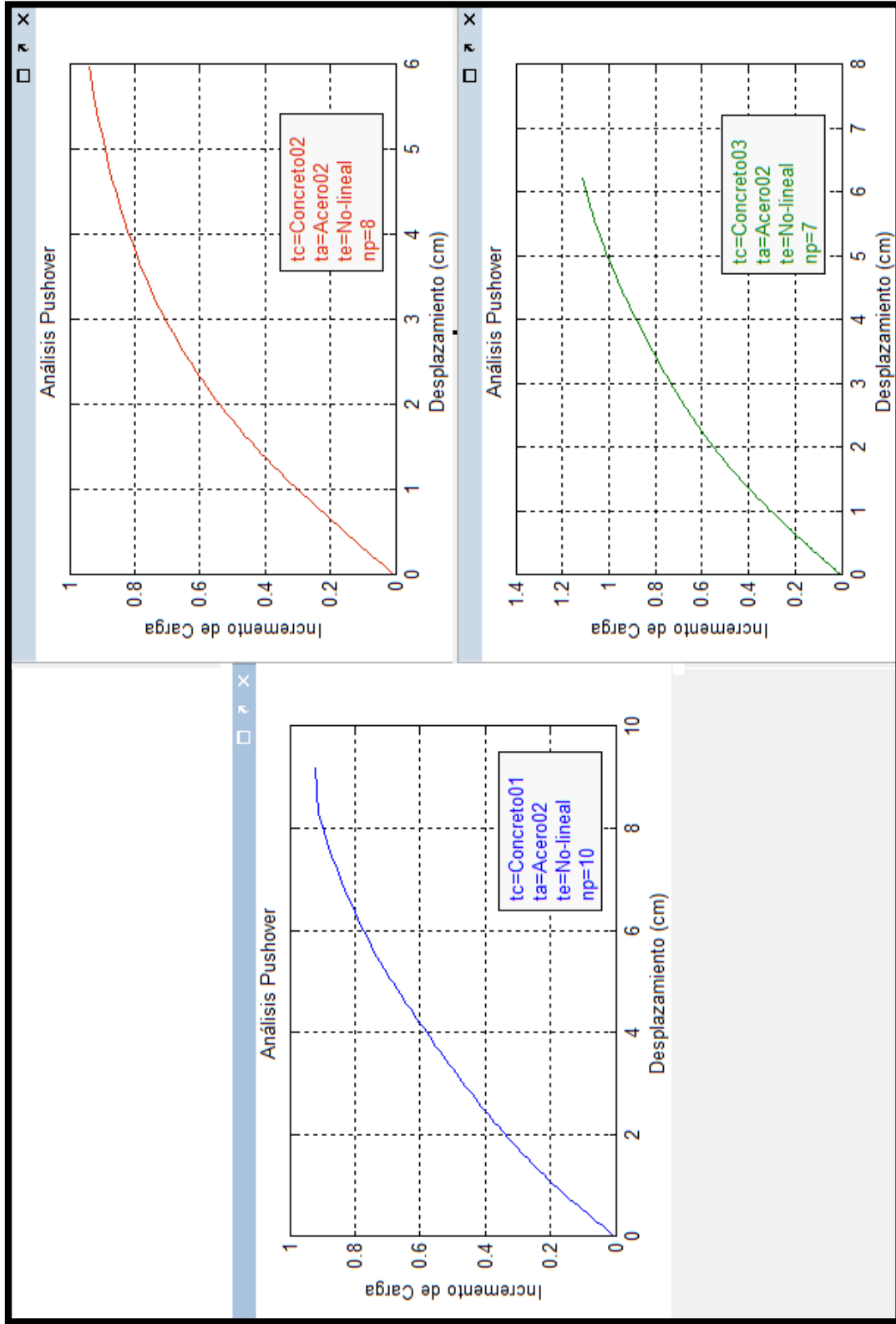
**Observación N°3.-** En este caso las observaciones corresponden a los elementos no-lineales. Luego de varias simulaciones se observó que el tipo de concreto produce mayores diferencias en los resultados ya que toma o no en consideración la resistencia a la tensión. Por otro lado, el análisis Pushover permite observar claramente las variaciones en los desplazamientos que produce el tipo de acero a pesar de que no son tan evidentes como las del concreto.

En la Gráfica34 se muestra las variaciones que produce el tipo de acero. A la izquierda se encuentran dos gráficas con el mismo tipo de concreto (Concreto03) y diferente tipo de acero, mientras que a la derecha se muestra la superposición de ambas gráficas.

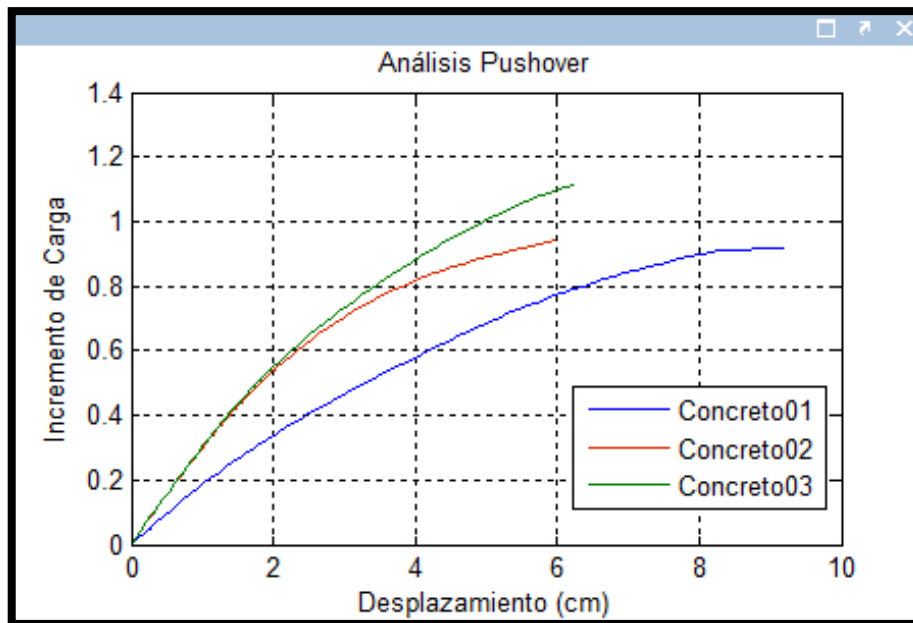
En la Gráfica35 se observa las variaciones que produce el tipo de concreto. A la izquierda se muestra el Concreto01 mientras que a la derecha el Concreto02 y Concreto03, respectivamente.



**Gráfica34.** Desplazamientos al cambiar el tipo de acero



Gráfica35. Desplazamientos al cambiar el tipo de concreto



**Gráfica36.** Concreto01, Concreto02 y Concreto03 de la Gráfica35

El apartado que corresponde a desplazamientos del análisis Pushover presenta el análisis y observación del Elemento2, sin embargo el análisis para el Elemento3 es el mismo, con la diferencia en los resultados que se obtuvieron ya que este tipo de elemento a más de ser no-lineal posee vigas con rótulas plásticas.

### 4.3 Análisis del Edificio 2 y Edificio 3

En vista de que tanto para el Edificio2 y Edificio3 el resultado del análisis es el mismo no se mostrará nuevamente las mismas gráficas ya que al igual que el Edificio1 se observó que los resultados varían en mayor proporción de concreto a concreto, seguido del tipo de elemento, número de puntos de integración y tipo de acero, en ese orden respectivamente.

No obstante, los resultados en lo que se refiere a valores de derivas y desplazamientos son diferentes debido a la configuración geométrica de cada edificio y a la aplicación de cargas sobre los elementos estructurales de los mismos.



**Cuadro4.** Configuración geométrica de los edificios










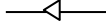
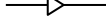


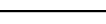






	N° de pisos	N° de vanos
<b>Edificio1</b>	3	2
<b>Edificio2</b>	4	2
<b>Edificio3</b>	3	3

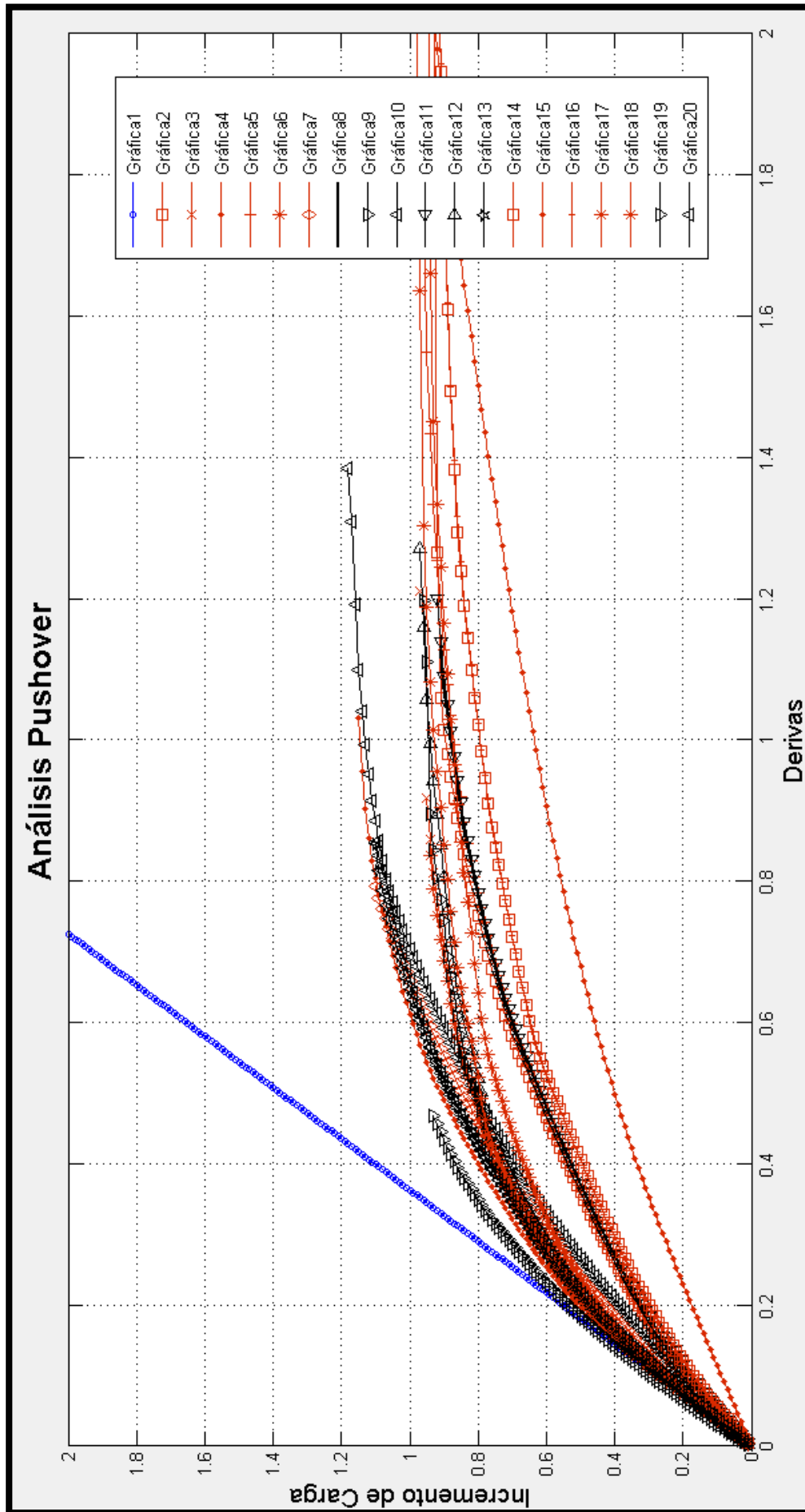
## 4.4 Combinación óptima

Para determinar bajo que parámetros o condiciones los modelos producen resultados más cercanos al comportamiento real de las estructuras se observará los valores de las derivas obtenidos con el análisis Pushover estático en el programa OpenSees.

### 4.4.1 Edificio 1

**Tabla1.** Parámetros de las gráficas del Edificio 1

Gráfica	Tipo de Concreto (tc)	Tipo de Acero (ta)	Tipo de Elemento (te)	Número de puntos de integración (np)	Símbolo
<b>1</b>	1	1	1	-----	
<b>2</b>	1	1	2	10	
<b>3</b>	2	1	2	7	
<b>4</b>	3	1	2	5	
<b>5</b>	1	2	2	5	
<b>6</b>	2	2	2	10	
<b>7</b>	3	2	2	9	
<b>8</b>	1	1	3	9	
<b>9</b>	2	1	3	10	
<b>10</b>	3	1	3	7	
<b>11</b>	1	2	3	8	
<b>12</b>	2	2	3	5	
<b>13</b>	3	2	3	6	
<b>14</b>	1	1	2	3	
<b>15</b>	3	1	2	2	
<b>16</b>	1	2	2	3	
<b>17</b>	2	2	2	4	
<b>18</b>	2	2	2	3	
<b>19</b>	2	1	3	3	
<b>20</b>	3	1	3	4	













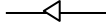
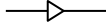







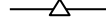
**Gráfica 37.** Derivas del Edificio 1 al aplicar el análisis Pushover

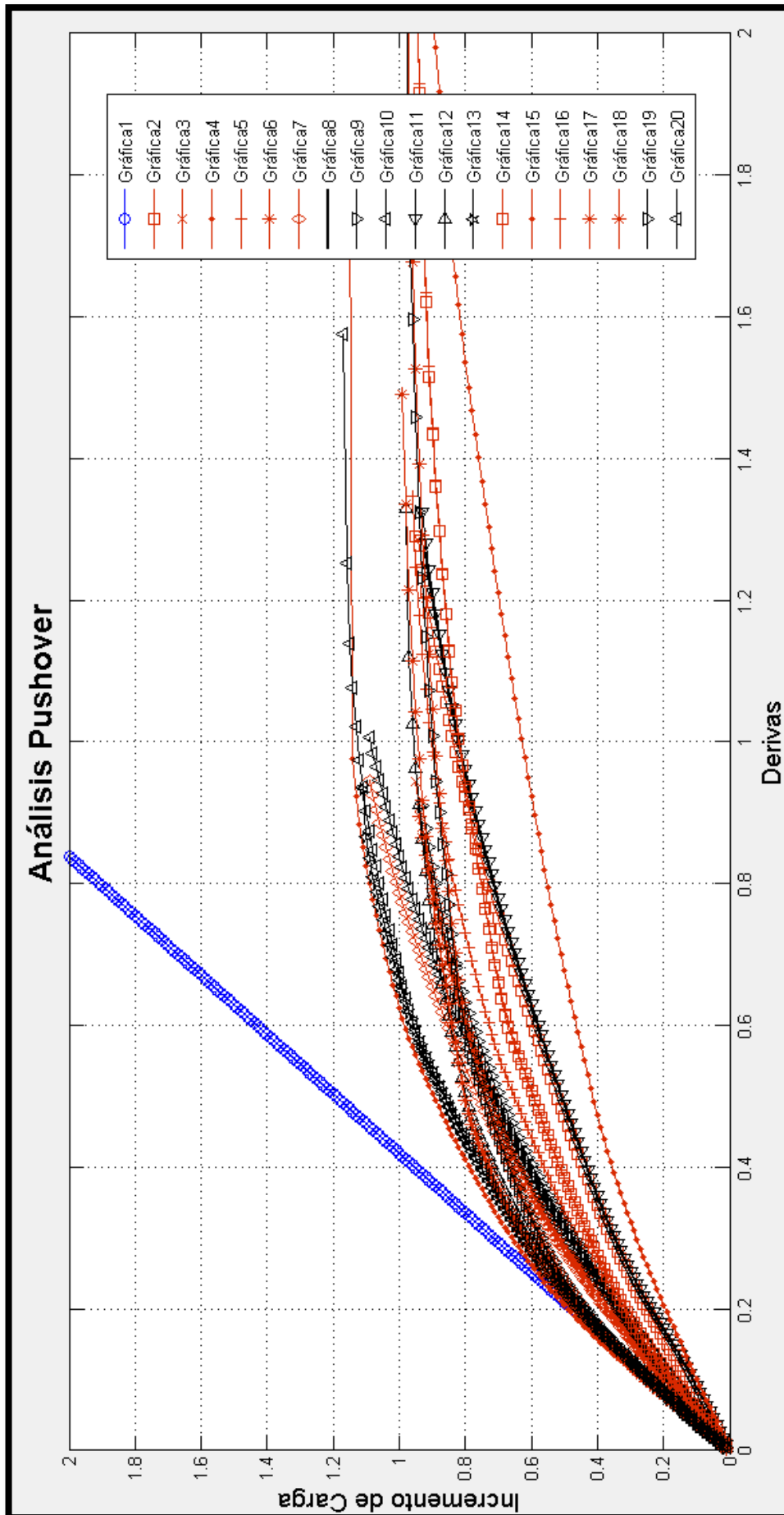
La densidad o dicho de otra manera la concentración de los resultados que se reflejen en la gráfica establece que la combinación óptima para el Edificio 1 es:

- Concreto02
- Acero02
- Elemento3 (elemento no-lineal con rótulas plásticas)
- Número de puntos de integración mayor a 5

#### 4.4.2 Edificio 2

**Tabla2.** Parámetros de las gráficas del Edificio 2

Gráfica	Tipo de Concreto (tc)	Tipo de Acero (ta)	Tipo de Elemento (te)	Número de puntos de integración (np)	Símbolo
1	1	1	1	-----	
2	1	1	2	10	
3	2	1	2	7	
4	3	1	2	5	
5	1	2	2	5	
6	2	2	2	10	
7	3	2	2	9	
8	1	1	3	9	
9	2	1	3	10	
10	3	1	3	7	
11	1	2	3	8	
12	2	2	3	5	
13	3	2	3	6	
14	1	1	2	3	
15	3	1	2	2	
16	1	2	2	3	
17	2	2	2	4	
18	2	2	2	3	
19	2	1	3	3	
20	3	1	3	4	












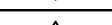
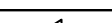
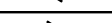
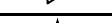
















Gráfica 38. Derivas del Edificio 2 al aplicar el análisis Pushover

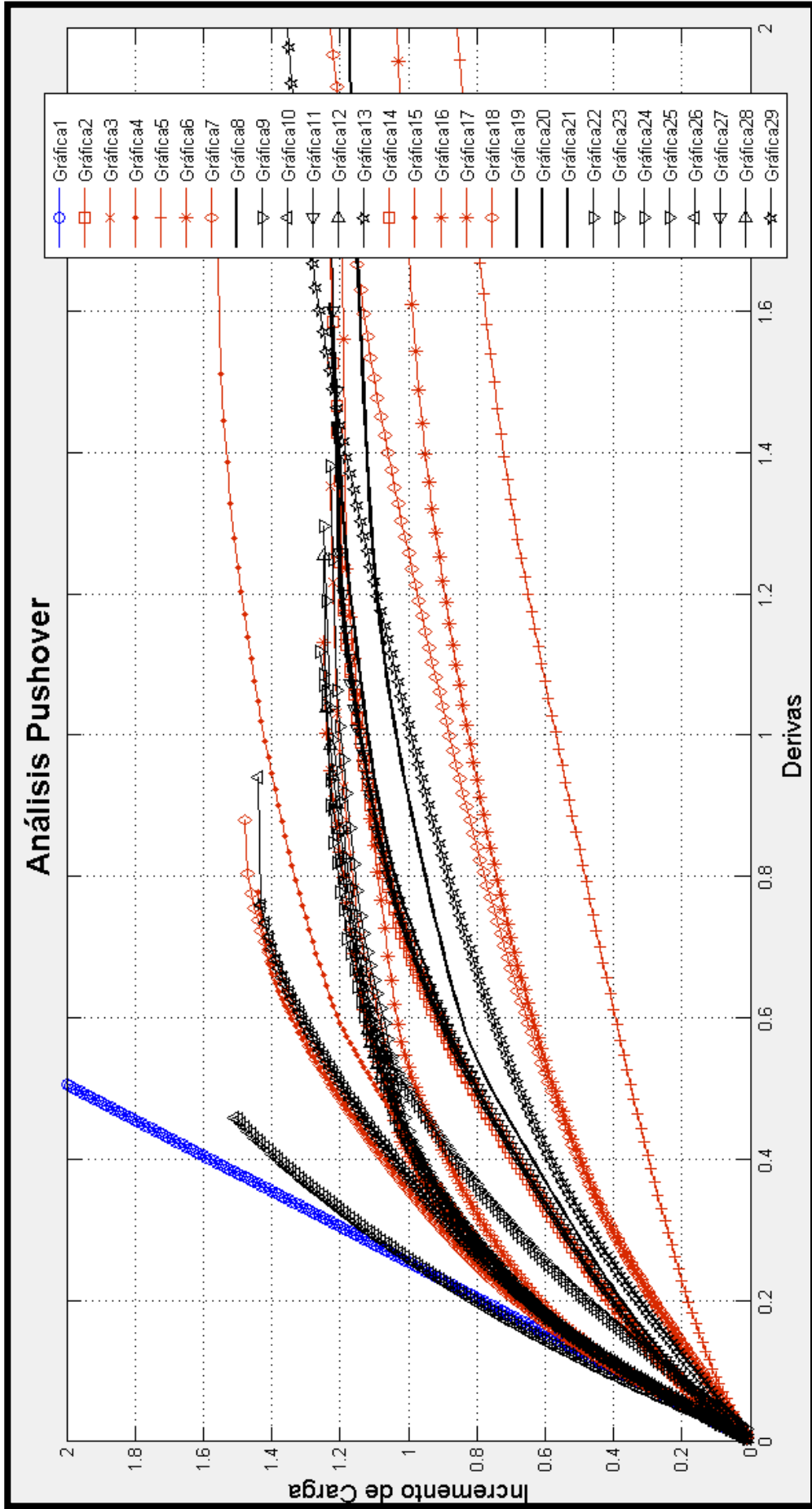
La concentración de los resultados que se reflejen en la gráfica establece que la combinación óptima para el Edificio 2 es:

- Concreto02
- Acero02
- Elemento3 (elemento no-lineal con rótulas plásticas)
- Número de puntos de integración mayor a 5

#### 4.4.3 Edificio 3

**Tabla3.** Parámetros de las gráficas del Edificio 3

Gráfica	Tipo de Concreto (tc)	Tipo de Acero (ta)	Tipo de Elemento (te)	Número de puntos de integración (np)	Símbolo
1	1	1	1	-----	
2	1	1	2	7	
3	2	1	2	4	
4	3	1	2	10	
5	1	2	2	2	
6	2	2	2	6	
7	3	2	2	2	
8	1	1	3	8	
9	2	1	3	9	
10	3	1	3	5	
11	1	2	3	10	
12	2	2	3	10	
13	3	2	3	8	
14	1	1	2	6	
15	3	1	2	3	
16	2	2	2	2	
17	2	2	2	3	
18	3	2	2	6	
19	1	1	3	5	
20	1	1	3	3	
21	1	1	3	7	
22	2	1	3	4	
23	2	1	3	2	
24	2	1	3	5	
25	2	1	3	7	
26	3	1	3	8	
27	1	2	3	6	
28	2	2	3	6	
29	3	2	3	2	



**Gráfica 39.** Desplazamientos al cambiar el tipo de concreto

La concentración de los resultados que se reflejen en la gráfica establece que la combinación óptima para el Edificio 3 es:

- Concreto02
- Acero02
- Elemento3 (elemento no-lineal con rótulas plásticas)
- Número de puntos de integración 5

### **Características de la combinación óptima**

- **Concreto02.-** Posee resistencia a la tensión y considera suavizado lineal en la zona de tensión.
- **Acero02.-** Considera endurecimiento y provee control sobre la transición de la región elástica a la plástica.
- **Elemento3.-** Considera plasticidad concentrada al final de los miembros y una región elástica lineal en la mitad.

## 5. CONCLUSIONES

Las conclusiones que se exponen a continuación describen los resultados de las derivas previo un análisis Pushover estático. En cuanto a los resultados de desplazamientos, éstos reflejan conclusiones similares; por lo que no se han mencionado en las conclusiones.

1. Los resultados varían en mayor proporción en función de la variación del modelo de concreto; seguido del tipo de elemento, número de puntos de integración y tipo de acero, en ese orden respectivamente.
2. La diferencia al intercambiar entre Concreto01 y Concreto02 es bastante considerable, los resultados de las derivas reflejan una variación de 46.70%; es decir que la resistencia a tensión que considera el concreto02 aporta una influencia bastante importante en los resultados de la modelación. Algo parecido sucede en el intercambio entre Concreto01 y Concreto03, el porcentaje de diferencia es de 46.31%, por razones similares al caso anterior, mientras que al usar Concreto02 y Concreto03; puesto que ambos tipos de modelo consideran resistencia a tensión del concreto con pequeñas variaciones en la idealización de la curva de tensión; la variación en los resultados tiene un orden de 0.74%.
3. En lo que se refiere a la variación entre tipo de elemento; el Elemento1 y Elemento2 muestran variaciones en las derivas del 37.28%; esto principalmente a que el primero considera un comportamiento perfectamente lineal del elemento; mientras que el Elemento2 considera el comportamiento como no lineal, con no-linealidad uniformemente distribuida a lo largo del mismo. En cuanto al caso de variación entre Elemento 1 y Elemento3 se observó una diferencia del 31.77%, por razones similares a las del primer caso. El último caso considerado es la variación entre los elementos Elemento2 vs el Elemento3 que presentan diferencias del 8.07%, puesto que el Elemento 3 considera la linealidad concentrada en rótulas plásticas lo que permite al usuario una mayor versatilidad en la idealización



del proceso de falla de la estructura pero también requiere mayor experiencia en la calibración de los parámetros para el elemento en particular.

4. En cuanto a la variación del número de puntos de integración; los resultados muestran una diferencia mínima al utilizar cuatro o diez puntos de integración con un porcentaje de 0.35% de diferencia, sin embargo al realizar una comparación entre dos y tres puntos de integración el porcentaje de error sube al 28.24%. De las observaciones realizadas además de rescata que cuando el número de puntos de integración es mayor que cuatro y menor que diez la diferencia entre los resultados obtenidos siempre es mínima; mientras que cuando el rango va de 2 a 4 las diferencias son bastante importantes, lo que permite concluir que cuando el número de puntos de integración es mayor a 4 los algoritmos tienden a converger; por lo que se sugiere un número ideal de 5 puntos de integración para lograr un equilibrio entre exactitud y eficiencia computacional.
  
5. Del análisis paramétrico se puede concluir entonces que la combinación ideal para un edificio regular de características similares a los expuestos en la presente investigación es:
  - Concreto02
  - Acero02
  - Elemento3 (elemento no-lineal con rótulas plásticas)
  - Número de puntos de integración 5

Puesto que en todos los casos de estudio la mayor densidad de resultados se condensa en la combinación de parámetros mencionada; cabe mencionar que los resultados son bastante confiables debido a que la combinación sugiere la necesidad de considerar resistencia a la tensión en el concreto, endurecimiento post-fluencia del acero e inelasticidad concentrada en los elementos sometidos a flexión; además de ratificar la conclusión número 4 referente al número de puntos de integración.

6. A pesar de que los resultados sugieren la necesidad de modelar la resistencia a la tensión del concreto armado, es importante recalcar que es suficiente modelar la resistencia a tensión como un comportamiento lineal (concreto02); en lugar de no-lineal como lo considera el concreto03; asegurando de ese modo una mejor representación del comportamiento real sin requerir demasiada complejidad en el modelo y la consecuente demanda excesiva de capacidad tanto en hardware como en software.
  
7. En cuanto al comportamiento de los modelos en función de la concentración de linealidad hay que destacar que el elemento apropiado (elemento3) lo es solo para la configuración y método de falla específicos considerados en la presente investigación, puesto que la decisión del parámetro en particular siempre dependerá del analista y de la configuración particular de la estructura en análisis.

## BIBLIOGRAFÍA

- I. E. BAL , H. CROWLEY y R. PINHO. Displacement-Based Earthquake Loss Assessment: Method Development and Application to Turkish Building Stock, Centre for Post-Graduate Training and Research in Earthquake Engineering and Engineering Seismology, December 2010.
- MAZZONI, FRANK MCKENNA, MICHAEL H. SCOTT, ET AL. Open System for Earthquake Engineering Simulation User Command-Language Manual. PACIFIC EARTHQUAKE ENGINEERING RESEARCH CENTER, UNIVERSITY OF CALIFORNIA, BERKELEY. MAY 2009.
- ABO AL EZZ, A. [2007]. Deformation and strength based assessment of seismic failure mechanisms for existing RC frame buildings, Centre for Post-Graduate Training and Research in Earthquake Engineering and Engineering Seismology (ROSE School), University of Pavia, Italy.
- American Concrete Institute [1984], Earthquake Effects on Reinforcement Concrete Structures, Publication SP-84, US-Japan Research, American Concrete Institute, Detroit.
- ANTONIOU, S., PINHO, R [2004a]. Advantages and Limitations of Adaptive and Non-Adaptive Force-Based Pushover Procedures, Journal of Earthquake Engineering, 8(4), pp. 497-522.
- ANTONIOU S. and PINHO, R [2004b]. Development and Verification of a Displacement-Based Adaptive Pushover Procedures, Journal of Earthquake Engineering, Vol. 8, No. 5, pp. 643-661.
- ELNASHAI, A. S. [2001]. Advanced inelastic static (pushover) analysis for earthquake applications, Structural Engineering and Mechanics, 12(1), pp. 51-69.
- MAZZONI SILVIA, MCKENNA FRANK, SCOTT MICHAEL, FENVES GREGORY, ET AL. (Printed on 1 July, 2007), OpenSees Command Language Manual. 451p.

# ANEXOS

## Anexo1. Construcción del modelo en OpenSees

En esta sección se muestra una breve referencia de lo que constituye el análisis en OpenSees. Para ello se describe algunas instrucciones orientadas con la construcción de la secuencia de código que se utilizó para los modelos. Sin embargo, es importante mencionar que el detalle de cada uno de los comandos y parámetros que se utilizaron se encuentra en el Manual de Usuario de OpenSees.

### 1. Modelo en OpenSees

- Construcción del modelo
  - Definir variables y parámetros
  - Construir modelo y definir nudos
  - Definición de materiales
  - Definición de elementos
- Definición archivos de salida
  - Definir la generación de archivos de salida
  - Definir la impresión de datos durante el análisis
- Cargas Gravitatorias
  - Definir cargas gravitatorias
  - Realizar Análisis de cargas gravitatorias
- Análisis Estático
  - Definir análisis estático pushover
  - Realizar análisis estático pushover
- Análisis Dinámico
  - Definir Análisis considerando acción sísmica
  - Realizar Análisis considerando acción sísmica

**Esquema2.** Proceso del modelamiento estructural en OpenSees

Cabe recalcar que los materiales, elementos y demás condiciones o parámetros que se mencionan en esta sección, corresponden a los que se utilizaron para los modelos del proyecto de investigación. De acuerdo al Esquema2, el proceso de modelamiento estructural inicia con:

### 1.1 Construcción del Modelo

**Comando [wipe].-** Este comando es usado para limpiar la memoria antes de empezar a generar un nuevo modelo. Es una práctica correcta colocarlo al inicio de cada aplicación.

**Comando [set].-** Este comando es usado para asignar un valor a una variable.

```
set variable $value
```

**Comando [Basic Model Builder].-** Este comando es usado para construir un modelo, el cual puede ser definido en 1, 2, o 3 dimensiones.

```
model BasicBuilder -ndm $ndm <-ndf $ndf>
```

**\$ndm** Dimensiones del problema (1, 2,3)

**\$ndf** Número de grados de libertad por nudo (opcional)

(los valores por defecto dependen del valor de ndm:

ndm=1 → ndf=1

ndm=2 → ndf=3

ndm=3 → ndf=6)

Por ejemplo:

```
model BasicBuilder -ndm 2 -ndf 3; # Modelo en dos dimensiones y 3 GDL  
                                por nudo
```

**Comando [node].-** Este comando es usado para construir un nudo. Este asigna las coordenadas y las masas al nudo.

```
node $nodeTag (ndm $coords) <-mass (ndf $MassValues)>
```

**\$nodeTag** etiqueta que identifica al nudo

**\$coords** coordenadas nodales

**\$MassValues** masas nodales correspondientes a cada GDL

Por ejemplo:

```
node 11 $X1 $Y1; # nudo 11, coordenadas x, y (X1, Y1), variables que deben  
haber sido definidas previamente
```

**Comando [fix].-** Este comando es usado para definir las restricciones en los nudos correspondientes a los apoyos.

```
fix $nodeTag (ndf $ConstrValues)
```

**\$nodeTag** etiqueta que identifica al nudo

**\$ConstrValues** tipo de restricción. Se establece restringido (1) y no restringido (0)

Por ejemplo:

```
fix 11 1 1 1; # nudo 11, totalmente restringido (Para modelo 2D)
```

En cuanto a los materiales OpenSees dispone de una amplia gama materiales que pueden ser usados para el análisis (la esta lista está en permanente actualización). Los modelos de materiales disponibles en OpenSees se utilizan para construir un objeto uniaxial el cual representa relaciones uniaxiales fuerza-deformación.

**Comando [Concrete01].-** Este comando es usado para construir un material uniaxial Concreto con degradación lineal de rigidez carga – descarga acorde con el trabajo de Karsan y Jirsa, no soporta esfuerzos de tensión.

```
uniaxialMaterial Concrete01 $matTag $fpc $epsc0 $fpcu $epsU
```

**\$matTag** etiqueta que identifica al material

**\$fpc** resistencia a la compresión a los 28 días (compresión es negativa).

**\$epsc0** deformación del concreto en el esfuerzo máximo

**\$fpcu** esfuerzo de fractura del concreto

**\$epsU** deformación del concreto al esfuerzo de fractura

**Comando [Concrete02].-** Este comando es usado para construir un material uniaxial de Concreto con esfuerzo de tensión, considera un suavizado lineal en la zona de tensión.

```
uniaxialMaterial Concrete02 $matTag $fpc $epsc0 $fpcu $epsU  
$lambda $ft $Ets
```

**\$matTag** etiqueta que identifica al material

**\$fpc** resistencia a la compresión a los 28 días.

**\$epsc0** deformación del concreto en la resistencia a la compresión.

**\$fpcu** esfuerzo de fractura del concreto

**\$epsU** deformación del concreto al esfuerzo de fractura

**\$lambda** coeficiente entre la pendiente descarga al \$epsU y la pendiente inicial del esfuerzo de tensión

**\$ft** esfuerzo de tensión

**\$Ets** resistencia a tensión (pendiente de la rama lineal de tensión).

**Nota:** Los parámetros de resistencia y deformación a compresión deben ser definidos como negativos, mientras que los parámetros de resistencia y deformación a tensión del concreto son ingresados como positivos.

**Comando [Concrete03].-** Este comando es usado para construir un material uniaxial de Concreto resistencia a la tensión, considera un suavizado no lineal en la zona de tensión del diagrama esfuerzo deformación.

<code>uniaxialMaterial Concrete03 \$matTag \$fpc \$epsc0 \$fpcu \$epscu \$lambda \$ft \$epst0 \$ft0 \$beta \$epstu</code>
---

**\$matTag** etiqueta que identifica al material

**\$fpc** resistencia a la compresión a los 28 días

**\$epsc0** deformación del concreto en la resistencia a la compresión

**\$fpcu** esfuerzo de fractura del concreto

**\$epscu** deformación del concreto al esfuerzo de fractura

**\$lambda** coeficiente entre la pendiente descarga al \$epscu y la pendiente inicial del esfuerzo de tensión

**\$ft** esfuerzo de tensión

**\$epst0** deformación de tensión en la transición del suavizado no lineal a lineal

**\$ft0** esfuerzo de tensión en la transición del suavizado no lineal a lineal

**\$beta** exponente de la curva de suavizado de tensión

**\$epstu** deformación última de tensión



**Comando [Steel01].-** Este comando es usado para construir un material uniaxial bilineal de Acero con endurecimiento cinemático y endurecimiento isotrópico opcional descrito por una ecuación no lineal.

```
uniaxialMaterial Steel01 $matTag $Fy $E0 $b <$a1 $a2 $a3 $a4>
```

**\$matTag** etiqueta que identifica al material

**\$Fy** esfuerzo de fluencia

**\$E0** rigidez elástica inicial

**\$b** coeficiente endurecimiento - deformación (entre la rigidez post fluencia y la rigidez elástica inicial)

**\$a1, \$a2, \$a3** parámetros de endurecimiento isotrópico.

A continuación se describe el comando y las instrucciones para la creación de la sección Fibra:

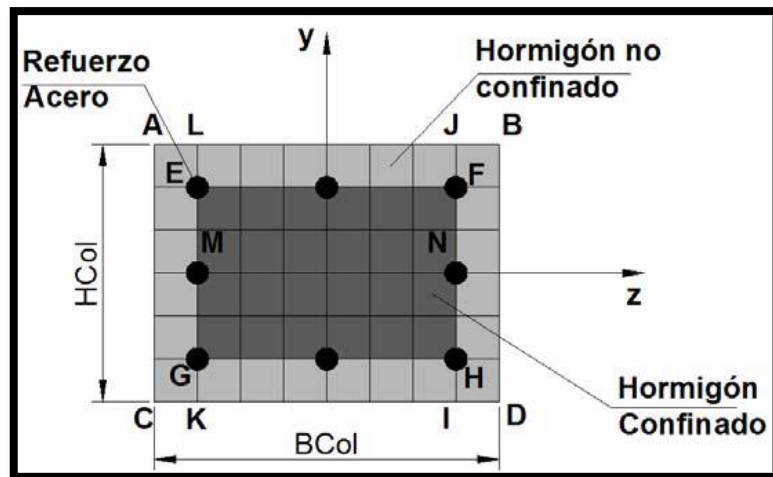
**Sección Fibra [Fiber Section].-** Este comando es usado para construir una sección tipo fibra.

```
section Fiber $secTag{
    fiber <fiber arguments>
    patch <patch arguments>
    layer <layer arguments>
}
```

**\$secTag** etiqueta que identifica a la sección.

Por ejemplo:

La sección de concreto armado de las columnas del Edificio 1 está compuesta de tres capas o parches: concreto no confinado, concreto confinado y refuerzo de acero. La altura de la sección es HCol y la base Bcol.



**Figura24.** Sección tipo Fibra  
**Fuente:** Manual de Usuario de OpenSees

En lo que se refiere a los elementos, OpenSees tiene una serie de alternativas para generarlos.

- Elementos Armadura (Truss Element)
- Elementos Armadura Corotacionales (Corotational Truss Element)
- Elementos Viga – Columna Elásticos (Elastic Beam Column Element)
- Elementos Viga – Columna No Lineales (Non Linear Beam Column Elements)
- Elementos de longitud Cero (Zero – Length Elements)
- Elementos Muro (Brick Elements)
- Elementos membrana (Shell Elements)
- Elementos con rótulas plásticas (Beam with hinges)
- Etc.

La lista de elementos que pueden ser creados en OpenSees es bastante extensa y sumado a este hecho debemos recordar que es una plataforma de fuente abierta por lo que la lista de elementos sigue incrementándose permanentemente. En tal virtud es importante mantener las bases siempre actualizadas.

**Comando [elasticBeamColumn].-** Este comando es usado para construir un elemento Viga – Columna elástico, los argumento necesarios para construir el elemento depende de la dimensión del problema. Para el caso de dos dimensiones (2D), se tiene:

```
element elasticBeamColumn $eleTag $iNode $jNode $A $E $Iz $transfTag
```

- \$eleTag**            etiqueta que identifica al elemento
- \$iNode \$jNode**    nudos extremos
- \$A**                área transversal del elemento
- \$E**                módulo de Young
- \$Iz**                inercia de la sección respecto al eje local z
- \$transfTag**        identificador para la transformación de coordenadas

**Comando [nonlinearBeamColumn].-** Este comando es usado para construir un elemento Viga Columna no lineal, el cual está basado en una formulación iterativa o no iterativa de fuerza, además que considera plasticidad distribuida a lo largo del elemento.

```
element nonlinearBeamColumn $eleTag $iNode $jNode $numIntgrPts
$secTag $transfTag <-mass $massDens> <-iter $maxIters $tol>
```

- \$eleTag**            etiqueta que identifica al elemento
- \$iNode \$jNode**    nudos extremos
- \$numIntgrPts**    número de puntos de integración a lo largo del elemento
- \$secTag**            identificador de una sección previamente definida
- \$transfTag**        identificador para la transformación de coordenadas
- \$massDens**        densidad de masa del elemento (por unidad de longitud,  
opcional, por defecto=0.0)

- \$maxlter** máximo número de iteraciones para alcanzar a satisfacer la compatibilidad del elemento (opcional, por defecto=1)
- \$tol** tolerancia para satisfacción de compatibilidad del elemento (opcional, por defecto= $10^{-16}$ )

**Comando [beamWithHinges].-** Este comando es usado para construir un elemento Viga con rótulas plásticas, el cual está basado en una formulación iterativa o no iterativa de flexibilidad, y considera una plasticidad concentrada especificada en la rótula plástica a lo largo del elemento.

```
element beamWithHinges $eleTag $iNode $jNode $secTagI $Lpi $secTagJ $Lpj
$E $A $Iz $transfTag <-mass $massDens> <-iter $maxlter $tol>
```

- \$eleTag** etiqueta que identifica al elemento
- \$iNode \$jNode** nudos extremos
- \$secTagI** identificador de una sección previamente definida correspondiente al nudo i
- \$Lpi** longitud de la rótula plástica en el nudo i
- \$secTagJ** identificador de una sección previamente definida correspondiente al nudo j
- \$Lpj** longitud de la rótula plástica en el nudo j
- \$E** módulo de Young
- \$A** área transversal del elemento
- \$Iz** inercia de la sección respecto al eje local z
- \$transfTag** identificador para la transformación de coordenadas
- \$massDens** densidad de masa del elemento (por unidad de longitud,

	opcional, por defecto=0.0)
<b>\$maxltns</b>	máximo número de iteraciones para alcanzar a satisfacer la compatibilidad del elemento (opcional, por defecto=1)
<b>\$tol</b>	tolerancia para satisfacción de compatibilidad del elemento (opcional, por defecto= $10^{-16}$ )

## 1.2 Definición archivos de salida (Recorder)

Los recorders permiten monitorear parámetros definidos por el usuario en el modelo durante el análisis. Por citar algunos tenemos:

- La historia de desplazamientos en un nudo durante un análisis no estático.
- Fuerzas en los elementos, en coordenadas globales o locales.
- Derivas de piso.
- Reacciones en nudos de apoyo.
- Estado total del modelo en cada paso del proceso de solución, etc.

El usuario define mediante los “recorders” la información que desea obtener del análisis del modelo. Los recorders generarán archivos de salida en formato out, txt etc., el cual puede ser editado en bloc de notas, o puede ser importado desde Excel o Matlab para su manipulación y generación de gráficas.

Por ejemplo:

```
recorder Drift -file $dataDir/1.out -time -iNode 11 -jNode 21 -dof 1 -perpDirn 2
```

A través de este recorder se generará una carpeta llamado dataDir.out, que contendrá la deriva del primer piso que va desde el Nudo 11 hasta el Nudo 21 con grado de libertad en **x** (dof 1) y computarizada desde la dirección perpendicular **y** del eje global (perpDirn 2).

### 1.3 Cargas Gravitatorias

En OpenSees la aplicación de carga es un proceso compuesto de tres pasos:

- Primero se definen las cargas en un patrón de carga.
- Se define el análisis y sus características.
- Las cargas son aplicadas cuando se ejecuta el análisis.

Los patrones de carga son definidos usando el comando **pattern**. Tres tipos de patrón de carga están disponibles actualmente:

a) **plain Pattern**: Este comando es usado para definir:

- Cargas nodales: cargas gravitatorias, cargas laterales.
- Restricciones single point, control de desplazamiento en el nudo.
- Cargas en los elementos: cargas gravitacionales distribuidas.

b) **UniformExcitation Pattern**: Este patrón aplica las aceleraciones de un registro definido por el usuario a todos los nudos fijos, en una dirección específica.

c) **MultipleSupport Pattern**: Este patrón aplica los desplazamientos de un registro definido por el usuario en los nudos especificados, en una dirección especificada, o también un acelerograma.

En el modelamiento del Edificio 1 los patrones de carga que se utilizaron son de tipo **plain Pattern**. A continuación se muestra el ejemplo de la aplicación de este tipo de carga:

```

pattern Plain 101 Linear {
    eleLoad -ele 221 222 -type -beamUniform -$QdlBeam; ;
    eleLoad -ele 231 232 -type -beamUniform -$QdlBeam;
    eleLoad -ele 241 242 -type -beamUniform -$QdlBeam
    eleLoad -ele 111 112 113 -type -beamUniform 0 -$QdlCol;
    eleLoad -ele 121 122 123 -type -beamUniform 0 -$QdlCol;
    eleLoad -ele 131 132 133 -type -beamUniform 0 -$QdlCol;
}

```

#### 1.4 Definición del Análisis

En la parte correspondiente al análisis, OpenSees permite hacer uso de diferentes herramientas disponibles para análisis lineal y no lineal. Para cada análisis se deben definir los siguientes ítems, y de acuerdo a la recomendación del manual de usuario de OpenSees, preferentemente deberán ser definidos en el orden mostrado:

**Comando [constraints]:** Este comando es usado para construir un objeto gestor de las restricciones. El gestor determina como las ecuaciones de las restricciones son aplicadas en el análisis. Las ecuaciones de las restricciones aplican un valor específico para un grado de libertad (GDL), o una relación entre los grados de libertad.

- Plain
- Lagrange
- Transformation
- Penalty

**Comando [numberer]:** Esta instrucción construye un objeto para numeración de los grados de libertad. Éste determina la asignación entre el número de ecuaciones y los grados de libertad, como los grados de libertad son numerados. Para ello se tienen dos opciones:

- Plain: Usa la numeración dada por el usuario.
- RCM: Vuelve a numerar los grados de libertad para minimizar el ancho de banda de la matriz usando el algoritmo reverso de Cuthill-McKee.

**Comando [system]:** Este comando es usado para construir un Sistema de Ecuaciones lineal y un objeto de solución lineal.

**Comando [test]:** Este comando es usado para construir un objeto para prueba de convergencia. Algunos algoritmos de solución requieren pruebas de convergencia para determinar si la convergencia ha sido alcanzada al final de un paso de iteración.

**Comando [algorithm]:** Este comando es usado para construir un objeto para determinar el algoritmo de solución, el cual determina la secuencia de pasos tomados para resolver la ecuación no lineal.

- Linear: Usa la solución de la primera iteración y continúa.
- Newton: Usa la tangente en la iteración actual para iterar la convergencia.
- Modified Newton: Usa la tangente a la primera iteración para iterar la convergencia.

**Comando [integrator]:** Este comando se usa para construir un objeto Integrador. Éste determina el significado de los términos en el sistema de ecuaciones.

- Newmark: Método desarrollado por Newmark, es necesario definir los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$ .
- HHT: Método de Hilbert-Hughes-Taylor.
- Central Difference: Aproxima la velocidad y la aceleración centrandos diferencias finitas de desplazamiento.



**Comando [analysis]:** Este comando es usado para construir un objeto de Análisis, el cual define el tipo de análisis que será realizado, los cuales pueden ser:

- Análisis Estático: Resuelve el problema  $Q=K*q$ , sin matrices de masa o amortiguamiento.
- Análisis Transient: Resuelve un análisis dependiente del tiempo. El paso de tiempo en este análisis es constante.
- Análisis Transient Variable: Resuelve el análisis dependiente del tiempo. El paso de tiempo en este análisis es variable.

## Anexo2. Instrucciones para la secuencia de código

Al utilizar los programas OpenSees y Matlab se generó la secuencia de código que se aplicará para determinar el efecto de la variación de los parámetros en los resultados obtenidos en el análisis.

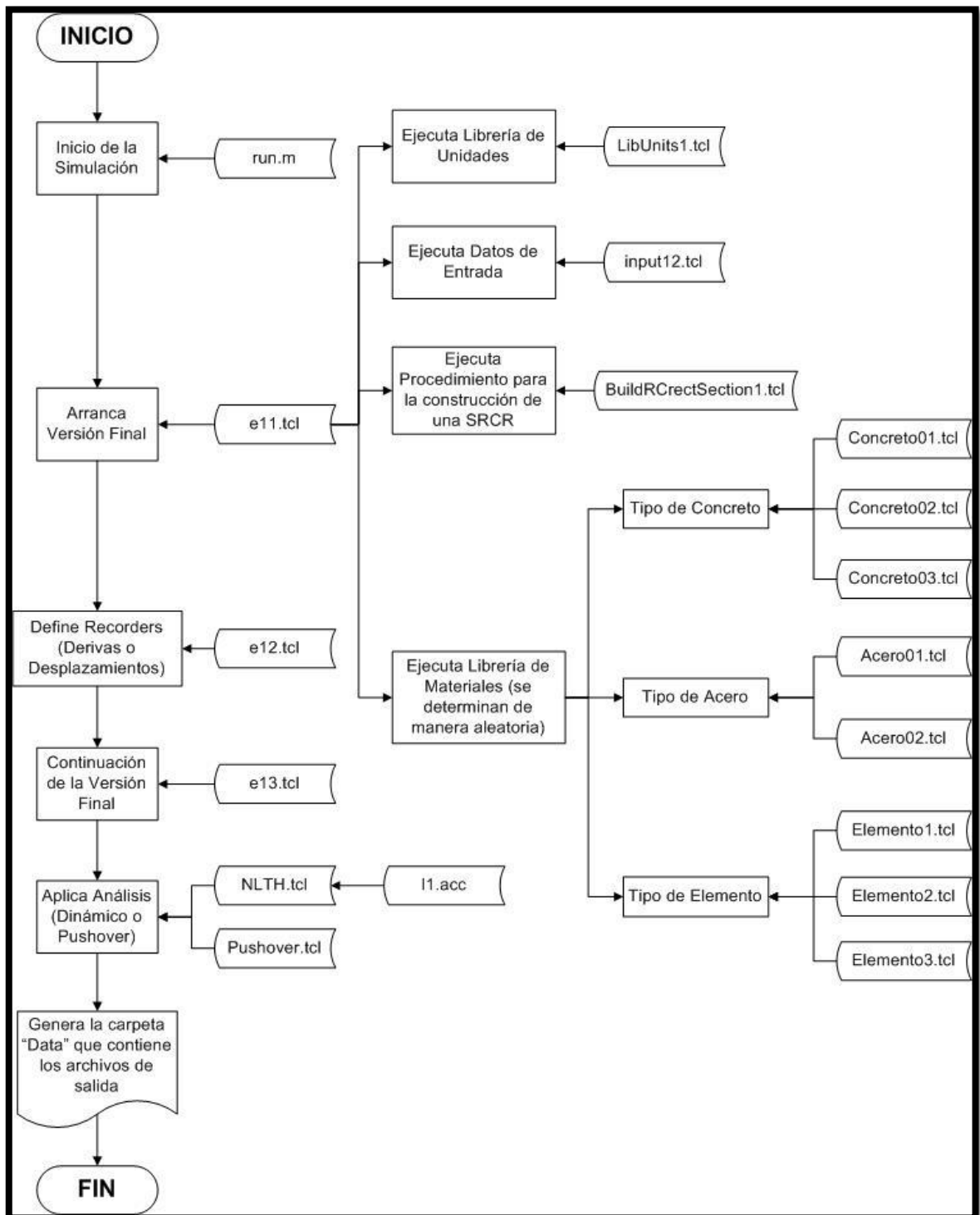


Figura25. Flujograma de la secuencia de código

Esta sección describe la secuencia de pasos necesarios para obtener las derivas o desplazamientos de los modelos que se evaluarán, al aplicar un análisis Dinámico o un análisis Pushover estático.

**Paso #1.-** La simulación inicia con el archivo **rum.m**, que corresponde al programa Matlab. En su codificación se requiere únicamente del ingreso del número de ejemplos que se quiere realizar (variable ni). El resto de pasos se ejecutan automáticamente.

**Paso #2.-** El primer paso que se ejecuta automáticamente es la versión final **e11.tcl**. Es importante mencionar que previamente se han elaborado varios archivos tcl que luego son llamados por el archivo e11.tcl, esto con el objeto de establecer de forma ordenada todo el proceso de modelado. Los siguientes archivos tcl son constantes en cada simulación y se ejecutan en el siguiente orden:

- a) Librería de Unidades (LibUnits1.tcl)
- b) Datos de entrada (input12.tcl)
- c) Procedimiento para la construcción de una sección rectangular de concreto reforzado tipo fibra (BuildRCrectSection1.tcl)

A más de esto el archivo e11.tcl en su codificación contiene coordenadas de los nudos, parámetros particulares para el control del desplazamiento del modelo y condiciones de límite. A continuación se ejecutan de manera aleatoria las variables del modelamiento que corresponden a los parámetros utilizados para el análisis de sensibilidad.

- Tipo de concreto: Concreto01.tcl, Concreto02.tcl y Concreto03.tcl.
- Tipo de Acero: Acero01.tcl y Acero02.tcl.
- Tipo de Elemento: Elemento1.tcl, Elemento2.tcl y Elemento3.tcl.

La codificación del archivo e11.tcl termina con la definición de las cargas por gravedad y la asignación de masa en los nudos donde las columnas se conectan.

**Paso #3.-** En este paso es importante mencionar que existe la opción de generar recorders para desplazamientos, derivas o cualquier otro criterio de evaluación que se requiera para el análisis, modificando el archivo run.m de Matlab. Para este estudio generaremos recorders en primera instancia para determinar las derivas de cada piso y luego para controlar los desplazamientos utilizaremos el nudo del piso superior.

**Paso #4.-** La continuación de la versión final es el archivo e13.tcl que contiene en su codificación los parámetros finales que se requieren para el análisis estático.

**Paso #5.-** Luego de que el análisis de gravedad se ha completado se ejecuta el análisis dinámico (NLTH.tcl) o el análisis Pushover estático (Pushover.tcl) según sea el caso. En este paso se debe mencionar que la acción dinámica inducida para el análisis dinámico es por el sismo i1.acc.

**Paso #6.-** Finalmente los resultados generados se almacenan en la carpeta "Data" que contiene todos los resultados de la totalidad de los análisis.

En resumen para el proyecto de investigación se realizaron varias simulaciones en el Edificio 1 utilizado como prototipo para el estudio paramétrico con el objetivo de determinar las derivas de cada piso y los desplazamientos del nudo del piso superior utilizado como nudo de control, tanto para el análisis dinámico como para el análisis Pushover estático.

Este mismo procedimiento se realizó para los otros dos edificios modificando las características geométricas y la aplicación de las cargas de acuerdo a cada edificio.