

**“ESTUDIO DE LA RESPUESTA DE UN TRAMO DE TUBERIA DE GAS  
ENTERRADA ANTE EXITACIONES SISMICAS EN LA CIUDAD DE  
BUCARAMANGA”**

**LUIS IVÁN TARAZONA TARAZONA  
EDGAR ALFONSO ORDOÑEZ GÓMEZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO- MECANICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL  
BUCARAMANGA**

**2012**

**“ESTUDIO DE LA RESPUESTA DE UN TRAMO DE TUBERIA DE GAS  
ENTERRADA ANTE EXITACIONES SISMICAS EN LA CIUDAD DE  
BUCARAMANGA”**

**LUIS IVÁN TARAZONA TARAZONA  
EDGAR ALFONSO ORDOÑEZ GÓMEZ**

**Trabajo de Grado Presentado como Requisito Parcial para Optar al Título de  
ingeniero civil.**

**Director:  
OSCAR JAVIER BEGAMBRE CARRILLO  
ING. civil, PhD.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO- MECANICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL  
BUCARAMANGA**

**2012**

## DEDICATORIA

*Este proyecto de grado es una parte esencial en mi vida para cumplir mi sueño, de ser ingeniero civil de la universidad industrial de Santander.*

*A Dios que con su voluntad y poder permitió el desarrollo de este sueño, quien me mostro el camino, me dio salud y fortaleza para alcanzarlo.*

*A mis padres Carlos Alfonso Tarazona y Elisa Tarazona quienes me apoyaron incondicionalmente en este proceso, me aconsejaron y mantuvieron en su regazo para hacer esto posible.*

*A mi hijo Nicolás Tarazona Santos y su madre Laura Juliana Santos quienes aparecieron en mi vida en el momento más adecuado para incentivar y afianzar mi deseo de ser ingeniero civil.*

*A mis amigos con los que estude y compartí tristezas, alegrías y muchas anécdotas en mi vida estudiantil.*

**Luis Iván Tarazona Tarazona**

*Dedico este trabajo de grado a Dios y a mi Papa que me guiaron  
A mi Mama que siempre me apoyo e impulso a lograr este éxito  
A mis Hermanos que siempre fueron un apoyo cuando los necesite  
A Haydee Torrado y Amelia Torrado quienes nunca perdieron la fe en mí  
A mi tía Rosa María quien siempre creyó que lo lograría.  
A los amigos que siempre me apoyaron en todas las circunstancias.*

*Edgar Alfonso Ordoñez Gómez*

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios por nuestras familias que han sido nuestro apoyo incondicional en cada uno de los objetivos propuestos por nosotros.

A la universidad industrial de Santander que como alma mater nos dio la oportunidad de estudiar en ella y permitió el desarrollo completo de este proyecto.

Agradecemos de una manera sincera y especial al profesor Óscar Javier Begambre Carrillo por brindarnos su apoyo, confianza y por aceptarnos para realizar este trabajo de grado bajo su dirección, además de su capacidad para guiar nuestras ideas, también le agradecemos por facilitarnos los medios suficientes para llevar a cabo este trabajo investigativo.

A nuestros profesores que contribuyeron a nuestra formación profesional como ingenieros.

A todas las empresas que nos dieron la información pertinente para el desarrollo de cada etapa del proyecto.

A nuestros amigos de la universidad, por soportarnos y colaborarnos, gracias a todos por aportar algo a este trabajo de investigación.

Al Mid-American Earthquake Center por facilitarnos el programa ZeusNL para realizar este estudio.

## TABLA DE CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCION	19
1. GENERALIDADES	21
1.1 OBJETIVO GENERAL	21
1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS	21
2. MARCO TEORICO	22
2.1 DEFINICION DEL PROBLEMA	22
2.1.1 Condiciones de entorno de la tubería	25
2.1.2 Materiales y colocación de la tubería	26
2.1.3 Tratamiento del problema	27
2.2 SISMOS	28
2.2.1 Como se producen los sismos	29
2.2.2 Influencia del suelo sobre la onda	31
2.3 COMPORTAMIENTO DINAMICO DEL SUELO	32
2.3.1 Factores que influyen en las propiedades dinámicas del suelo	32
2.3.2 Clases de suelos presentes en la ciudad	34
2.3.3 Comportamiento de acción-reacción de la tubería	36
3. MODELOS MATEMATICOS	41
3.1 MÉTODO DE ELEMENTOS LINEALES CON FORMULACIÓN CUBICA INELÁSTICA	41
3.2 MÉTODO DE WINKLER	44
3.3 REPRESENTACION DEL MODELO DEL SUELO	45

4. PROGRAMA COMPUTACIONAL	48
4.1 SEUZ NL.	48
4.1.1 Características del Programa	48
4.2 METODOLOGÍA Y ORIENTACIÓN DEL SOFTWARE	50
4.2.1 Capacidades Técnicas	50
4.2.2 Convenciones	51
4.2.3 Requerimientos Del Sistema	52
4.2.4 Instalando Zeus	52
5. MODELAMIENTO	54
5.1 METODOLOGÍA	54
5.2 SELECCIÓN DE LOS MATERIALES Y PROPIEDADES PARA EL MODELO	55
5.2.1 Tubería	55
5.2.2 Capacidad de la tubería enterrada	56
5.2.3 Representación del suelo.	57
5.2.4 Perfil del Tramo de Tubería	59
5.2.5 Acelerogramas de sismos	60
5.2.6 Montaje en el Software Seleccionado.	61
6. VERIFICACION DEL MODELO	75
6.1 DESPLAZAMIENTOS LONGITUDINALES Y TRANSVERSALES:	75
6.1.1 Máxima Respuesta al Desplazamiento Relativo de la Tubería en la Dirección Axial	76
6.1.2 Máxima Respuesta Al Desplazamiento Relativo de la Tubería en la Dirección Transversal.	78
7. APLICACIÓN EN UN TRAMO DE TUBERIA EN BUCARAMANGA	81
7.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS	81
7.1.1 Análisis de Desplazamientos Axiales	82

7.1.1.1 Arcilla Blanda	83
7.1.1.2 Arena Densa	84
7.1.2 Análisis de Desplazamientos Transversales	85
7.1.2.1 Arcilla Blanda	86
7.1.2.2 Arena Densa	87
7.2 ANÁLISIS DE DEFORMACIÓN DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL DE LA TUBERÍA.	88
7.2.1 Deformación Causada por el Sismo en Dirección Axial	89
7.2.2 Deformación Causada por el Sismo en Dirección Transversal.	91
8. CONCLUSIONES	93
BIBLIOGRAFIA	94
ANEXOS	96

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Ondas de cuerpo	28
Figura 2. Ondas Superficiales	29
Figura 3. Estructura Interna de la tierra.	30
Figura 4. Diagrama de Cuerpo Libre de la tubería.	36
Figura 5. Sección Transversal de la Tubería Enterrada.	38
Figura 6. Discretización de la Tubería y el Suelo	38
Figura 7. Elemento lineal con Formulación cubica Inelástica.	42
Figura 8. Modelo bilineal Elasto-plástico del material.	43
Figura 9. Modelo del Metodo de Winkler.	45
Figura 10. Metodología Para el Desarrollo del Proyecto.	54
Figura 11. Propiedades de la Tubería API-5LX42.	55
Figura 12. Dimensiones de la Tubería Seleccionada.	56
Figura 13. Perfil del Modelo de Tubería.	60
Figura 14. Registro de Acelerograma en dirección axial.	61
Figura 15. Registro de Acelerograma en dirección transversal.	61
Figura 16. Pantalla Inicial del Programa.	62
Figura 17. Definición de la plantilla.	63
Figura 18. Definición de la estructura.	63
Figura 19. Definición de acelerograma.	64
Figura 20. Selección del material.	64
Figura 21. Tipo de sección transversal.	65
Figura 22. Elección del elemento de clase para la tubería.	66
Figura 23. Elección del elemento de junta para representar el suelo.	67
Figura 24. Representación de la masa del sistema.	68
Figura 25. Nodos de la estructura.	69

Figura 26. Conectividad de los elementos.	69
Figura 27. Restricciones de la tubería en los extremos.	70
Figura 28. Menú de curvas de carga donde se agregan los acelerogramas.	71
Figura 29. Cargas y dirección de aplicación.	72
Figura 30. Insertando las etapas.	72
Figura 31. Ejecución del programa.	73
Figura 32. Menú del post- procesador.	74
Figura 33. Menú de forma deformada.	74
Figura 34. Cuadro Comparativo de Desplazamientos Relativos	77
Figura 35. Desplazamiento Relativo Arena Densa Sentido Axial.	77
Figura 36. Desplazamiento Relativo Arcilla blanda Sentido axial.	78
Figura 37. Cuadro Comparativo de Desplazamientos Relativos	78
Figura 38. Desplazamiento Relativo Arena Densa Sentido Transversal.	79
Figura 39. Desplazamiento Relativo Arcilla blanda Sentido Transversal.	79
Figura 40. Desplazamiento Relativo Axial Empotrado-Empotrado.	83
Figura 41. Desplazamiento Relativo Axial Empotrado-Articulado.	83
Figura 42. Desplazamiento Relativo Axial Articulado-Articulado.	84
Figura 43. Desplazamiento Relativo Axial Empotrado-Empotrado.	84
Figura 44. Desplazamiento Relativo Axial Empotrado-Articulado.	85
Figura 45. Desplazamiento Relativo Axial Articulado-Articulado.	85
Figura 46. Máximo Desplazamiento Relativo Transversal Arcilla condición Empotrado-Empotrado.	86
Figura 47. Máximo Desplazamiento Transversal Relativo Arcilla condición Articulado-Articulado.	86
Figura 48. Máximo Desplazamiento Relativo Transversal de la Arena Densa condición Empotrado-Empotrado.	87
Figura 49. Máximo Desplazamiento Relativo Transversal de la Arena Densa Condición Empotrado-Articulado.	87
Figura 50. Máximo Desplazamiento Relativo Transversal de la Arena Densa Condición Articulado-Articulado.	88

Figura 51. Cuadro Comparativo de las deformaciones Relativas.	88
Figura 52. Deformación máxima de la Sección Transversal condición Empotrado-Empotrado.	89
Figura 53. Deformación Máxima de la Sección Transversal condición Empotrado-Articulado.	90
Figura 54. Deformación máxima de la Sección Transversal condición Articulado-Articulado.	90
Figura 55. Deformación Máxima de la Sección Transversal Tubería Condición Empotrado-Empotrado.	91
Figura 56. Deformación Máxima de la Sección Transversal Tubería Condición Empotrado-Articulado.	92
Figura 57. Deformación Máxima de la Sección Transversal Tubería Condición Articulado-Articulado.	92

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Valores Medios del Índice de Poros	33
Tabla 2. Estudio de Microzonificación Sísmica de Bucaramanga (Zona 3)	35
Tabla 3. Estudio de Microzonificación Sísmica de Bucaramanga (Zona 4)	35
Tabla 4. Estudio de Microzonificación Sísmica de Bucaramanga (Zona 5)	36
Tabla 5. Requerimientos de Sistema para ZeusNL.	52
Tabla 6. Deformaciones y Desplazamientos Admisibles.	57
Tabla 7. Propiedades de los Suelos.	58
Tabla 8. Propiedades de los Resortes Representativos de los Suelos.	59
Tabla 9. Resultados de Desplazamientos del Montaje de Verificación.	76

## RESUMEN

**TÍTULO:** ESTUDIO DE LA RESPUESTA DE UN TRAMO DE TUBERIA DE GAS ENTERRADA ANTE EXITACIONES SISMICAS EN LA CIUDAD DE BUCARAMANGA\*

**AUTORES:** EDGAR ALFONSO ORDÓÑEZ GÓMEZ  
LUIS IVAN TARAZONA TARAZONA\*\*

### **PALABRAS CLAVES:**

TUBERIAS ENTERRADAS, LINEAS VITALES, INTERACCION SUELO TUBERIA, COEFICIENTE DE BALASTO, SISMOS.

### **DESCRIPCIÓN:**

El informe contiene una breve reseña de la historia del gas en Colombia, el Plan de masificación del gas, y demás aspectos que justifican la realización de un estudio de estas características y el por qué es importante obtener esta información; además se tratan las consecuencias que produce el colapso de una red de gas enterrada dentro de una ciudad; Contiene este informe además un breve manual del programa utilizado para realizar el estudio.

Se realizó un análisis dinámico a un tramo de tubería enterrada para el transporte de gas en la ciudad de Bucaramanga, y se evaluó la repuesta ante excitaciones sísmicas. Para este propósito se seleccionó el modelo de fundaciones de Winkler para la interacción suelo-tubería, algunos suelos característicos de la ciudad y sus propiedades y las condiciones en los extremos del tramo de red de gas de la ciudad.

Se realiza una verificación del modelo seleccionado realizando un estudio comparativo con las respuestas de investigaciones similares reportadas en la literatura. Para la evaluación de los resultados obtenidos se realizara una comparación con respecto a la tensión admisible y la capacidad de deformación de la tubería. Con los resultados obtenidos se espera proporcionar información y estudio más profundo y eficaz de una tubería de gas enterrada.

Finalmente, se evalúa la respuesta de un tramo de tubería enterrada en Bucaramanga y se reportan las conclusiones.

---

\* Proyecto de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas, Escuela de Ingeniera Civil, Director Oscar Javier Begambre Carrillo

## SUMMARY

**TITLE:** STUDY OF THE RESPONSE OF A BURIED GAS LINE TO SUCCESSFUL SEISMICITY IN THE CITY OF BUCARAMANGA\*

**AUTHORS:** EDGAR ALFONSO ORDÓÑEZ GÓMEZ  
LUIS IVAN TARAZONA\*\*

### KEY WORDS:

BURIED PIPELINES, LIFE LINES, SOIL-PIPELINES INTERACTION, EARTHQUAKES.

### DESCRIPTIONS:

The report contains a brief overview of the history of the gas in Colombia, the Plan of gas mass, and other aspects that justify a study of these characteristics and why it is important to obtain this information. Also discusses the consequences that produces the collapse of a buried pipeline of gas network in a city, this report also contains a brief manual of the program used to conduct the study.

Dynamic analysis was performed on a section of buried pipeline to transport gas in the city of Bucaramanga, and were the response to seismic excitations evaluated, for this purpose it selected the Winkler foundation model for soil-pipe interaction, some soils characteristic of the city and its properties and the conditions at the ends of the gas network pipeline section of the city.

Performs a check on the model selected by a comparative study with the responses of similar investigations reported in the literature. For the evaluation of the results are a comparison with respect to the allowable stress and deformation capacity of the pipeline. The results obtained are expected to provide useful information a more thorough and effective in a buried gas pipeline.

Finally, we evaluate the response of a pipe buried in Bucaramanga and reported the findings.

---

\* Thesis of Grade

\*\* Mechanical Engineering Faculty of Physics, School of Civil Engineering, Director Oscar Javier Carrillo Begambre

## INTRODUCCION

Con el constante crecimiento en la demanda de energía a nivel mundial podemos afirmar que el gas se ha convertido en una de las materias más solicitadas por la civilización ya que presta un importante servicio para su consumo como podemos darnos cuenta; en el mercado su utilidad es variable ya sea en urbanizaciones, gasolineras e industrias; manejando diferentes entornos los cuales se han visto afectados por fenómenos naturales.

Esta utilidad ha traído consecuencias buenas y malas pero esto es algo impredecible, encontramos a nivel literario muchos modelos cualitativos y cuantitativos que nos permiten representar estos fenómenos de una manera aproximada, más no exacta; debido a las condiciones del medio, esto nos lleva a crear una imagen cercana de un evento o desastre y tratar de crear estrategias para remediar los daños posibles.

El estudio del medio y del entorno en el que se encuentran localizadas las diferentes estructuras construidas, y los procesos propuestos por una ingeniería sísmica a nivel mundial, han permitido recaudar valiosa información de eventos sísmicos, los cuales permiten distinguir ciertos parámetros a tener en cuenta en el momento de hacer análisis y obtener conclusiones sobre las causas, los factores del colapso y la destrucción de dichas obras debido a grandes movimientos telúricos.

El hombre ha logrado crear herramientas tecnológicas de monitoreo, análisis y modelamiento que le permiten entender las causas y hacer estudios para prever las consecuencias de estos fenómenos que han cobrado miles de vidas humanas. En este proyecto nos enfocamos en el análisis y el comportamiento de tuberías enterradas de gas ante excitaciones sísmicas, para ello se usa el software

SEUZ.NL y se realiza una comparación entre los resultados obtenidos en este estudio y los reportados por (Korea), finalmente, se evalúa la respuesta de un tramo de tubería enterrada en Bucaramanga y se reportan las conclusiones.

## **1. GENERALIDADES**

### **1.1 OBJETIVO GENERAL**

Evaluar la respuesta de un tramo de tubería enterrada de gas en la ciudad, ante excitaciones sísmicas con el modelo matemático de elementos lineales con formulación cubica inelástica y modelar el suelo usando el método de fundaciones de Winkler en el cual el comportamiento de la interacción es representado por resortes helicoidales no lineales y discretos en tres dimensiones.

### **1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Presentar las hipótesis que plantea el modelo de elementos lineales con formulación cubica inelástica y sus parámetros de estudio y utilizarlo para el modelamiento de tuberías enterradas sometidas a acciones sísmicas.
- Aplicar el modelo de interacción suelo tubería de la fundación Winkler.
- Elegir un software libre (o de licencia gratuita) que aplique el modelo de elementos lineales con formulación cubica inelástica y permita usar el modelo de la fundación Winkler.
- Evaluar la respuesta de la tubería y sus conexiones.
- Comparar los resultados con datos de otras investigaciones reportadas en la literatura.

## **2. MARCO TEORICO**

### **2.1 DEFINICION DEL PROBLEMA**

En el caso de redes de tuberías enterradas vitales se ha podido determinar la importancia en el análisis de las condiciones del sitio, las propiedades de los materiales, tanto de la tubería como de la conformación del suelo y las condiciones de colocación.

Un parámetro importante que se debe tener en cuenta al momento de un desastre son los incendios; estas tuberías de gas son propensas a desencadenarlos debido a las fugas del material transportado después de su colapso, por tal motivo debemos tener en cuenta la vulnerabilidad de este tipo de tubería enterrada, su comportamiento, las capacidades de soporte y resistencia ante las deformaciones y esfuerzos a los que las tuberías se ven enfrentadas por movimientos sísmicos, pueden representar una restauración localizada y menores traumas de una red de tuberías a una reconstrucción total de un sistema de redes de tuberías.

Esta vulnerabilidad puede representarse al citar en la literatura eventos sísmicos ocurridos en el pasado como:

En armenia Colombia, el sismo del 25 de enero de 1999, produjo 963 puntos de fugas visibles en redes principales y se tuvieron que llevar a cabo más de 7000 reparaciones de tuberías. Las obras tardaron meses para restablecer el 35% del servicio. Fuente: [www.google.com/vulnerabilidadsismica/link7](http://www.google.com/vulnerabilidadsismica/link7).

Terremoto de san Fernando california E.E.U.U., el 9 de febrero de 1971, ocurrieron 1400 fallas en varios sistemas de tuberías enterradas, la ciudad quedo

temporalmente si servicio de gas, agua y alcantarillado. Fuente: [www.google.com/vulnerabilidadsismica/link7](http://www.google.com/vulnerabilidadsismica/link7).

El 13 de Agosto de 1868, un terremoto que fue sentido entre Guayaquil y Valparaíso azotó el norte de Chile. Primero fue el terremoto, de dimensión notable en esa ciudad, luego una serie de incendios a consecuencia del mismo, por fallas en tuberías enterradas y finalmente un tsunami que provocó olas de 18 m de altura y que fue el que provocó el mayor daño, todo esto produjo Trescientos muertos y cuantiosos daños materiales. Fuente: [www.google.com/vulnerabilidadsismica/link7](http://www.google.com/vulnerabilidadsismica/link7).

El terremoto de Chi-Chi de 1999 en Taiwán también causo graves daños a los sistemas de suministro de gas natural. Más de 100.000 clientes industriales y residenciales en la zona de desastre, quedaron sin gas natural después del terremoto, y la pérdida económica estimada de cinco grandes compañías de gas natural fue de aproximadamente 25 millones de dólares. Fuente: Article “Seismic behavior of a buried gas pipeline under earthquake excitations.”

Es muy probable que estas cifras de daños en los sistemas de tuberías hubieran podido ser menores si se hubiera tomado las medidas oportunas de adecuación y prevención.

## **IMPORTANCIA DE LAS TUBERIAS DE GAS**

Durante los años 90 el Gobierno Nacional definió en los documentos CONPES, los denominados: el Plan de Gas y el Programa para la Masificación del Consumo de Gas, las acciones necesarias para promover una matriz de consumo de energía más eficiente y conveniente para el país, mediante la sustitución de recursos energéticos de alto costo por gas natural y GLP (gas propano) en los sectores:

industrial, comercial, residencial y termoeléctrico. Se trazaron dos metas para el logro de este objetivo:

- Llevar gas natural y propano a más de 3.7 millones de familias en el mediano plazo, con el concurso del sector privado.
- Fortalecer la oferta, por medio de la interconexión de los principales campos de producción de gas natural de la Costa Atlántica (Ballena) y el interior del país (Cusiana- Cupiagua) con los principales mercados regionales del País, a través de la construcción de una infraestructura de transporte y distribución de gas natural.

El mejor método de transporte, que es eficaz y seguro según la literatura, se da por medio de tuberías enterradas por que pueden acumular mayores volúmenes con velocidades de suministros importantes, esto reduce gastos y además provee de mayor seguridad para la sociedad a nivel de un evento o desastre. Se le denomina a esta construcción gasoducto y consiste en la conducción de tuberías enterradas por las cuales el gas circula a altas presiones; desde un lugar de origen que puede ser una planta de regasificación hasta su entrega que puede ser domiciliaria, industrial, etc.; teniendo en cuenta intervalos determinados en los cuales por medio de válvulas se controle el flujo del gas.

Con posterioridad, en el año 1994, se expidió la Ley 142 que definió el marco legal para la prestación de los servicios públicos domiciliarios. Ámbito en el cual se define el gas combustible (Gas Natural y GLP) como un servicio público y se crea la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG), como la entidad encargada de desarrollar el marco regulatorio y normativo para las actividades asociadas al transporte, distribución y comercialización del gas natural. No obstante la anterior normatividad y competencias expresas en el Código de Petróleos y el Contrato de Asociación continúan rigiendo para las actividades de exploración, explotación y producción del gas natural.

A partir de ese momento, se presentaron cambios importantes en materia institucional y regulatoria que han consolidado el desarrollo de la industria del gas natural. Institucionalmente, Ecopetrol dejó de asumir la responsabilidad de ejecutar el Plan de Masificación de Gas de forma centralizada y así mismo de acometer la totalidad de las inversiones en infraestructura básica, particularmente, lo concerniente a la construcción de gasoductos troncales, para dedicarse exclusivamente a la exploración y explotación de hidrocarburos, actividad objeto de su razón de negocio. Bajo este nuevo esquema institucional, se dividieron los activos de transporte del patrimonio de Ecopetrol y fueron capitalizados en la Empresa Colombiana de Gas (Ecogas) creada mediante la Ley 401 de 1997 para el transporte de gas.

En el mismo sentido las empresas distribuidoras de gas natural comenzaron a ejercer su actividad bajo el régimen jurídico de la Ley 142 de 1.994, sin necesidad de la mediación de un contrato de concesión con la nación, excepción aplicable sólo a las áreas de servicio exclusivo para distribución de gas natural por red.

El Ministerio de Minas y Energía en cumplimiento de los lineamientos trazados por el Gobierno Nacional a través de su Plan de Desarrollo, ha apoyado la ejecución de programas que lleven a ubicar al Gas Natural y al Gas Licuado del Petróleo GLP en aquellos sectores de consumo donde la prestación del servicio sea técnica y económicamente viable.

### **2.1.1 Condiciones de entorno de la tubería**

Una tubería enterrada puede presentar dos condiciones en relación con el suelo la primera es que la tubería se encuentre posicionada en un corte del suelo y la segunda que esta se encuentre en un terraplén. En el presente análisis solo se analizan condiciones de entorno cuando la tubería se encuentra en corte.

Para aquellas tuberías que se encuentran en corte se debe tener en cuenta:

- La profundidad de enterramiento
- Condiciones de zanja
- Propiedades de la tubería
- Tipo de suelo

Para aquellas tuberías que se encuentran en terraplén se debe tener en cuenta:

- Material y cantidad de relleno
- Condiciones de apoyo
- Propiedades de la tubería

Todos estos parámetros son estipulados para verificar como actúa el suelo sobre la tubería, referente a los esfuerzos que éste produce y cómo reacciona la tubería a dichos esfuerzos.

### **2.1.2 Materiales y colocación de la tubería**

Las tuberías enterradas son diseñadas esencialmente para soportar las presiones de los fluidos que transportan, para resistir las posibles causas de desgaste, deterioro, corrosión y para soportar las cargas y sobrepresiones del suelo sobre ellas.

Estas características de soporte y resistencia determinan el diseño de las secciones, los materiales y los tipos de colocación de las tuberías.

Las propiedades de los materiales de la tubería y las longitudes entre apoyos o empotramientos, serán determinantes en el momento de soportar grandes flexiones y curvaturas impuestas por los movimientos del suelo provenientes de los sismos.

De los materiales de las juntas y sus dimensiones dependen los posibles desacoples de las tuberías.

La selección correcta de los materiales de relleno y las diferentes formas de apoyo conforman un factor importante en la resistencia de las tuberías frente a los esfuerzos a causa de las deformaciones inducidas por los movimientos sísmicos.

### **2.1.3 Tratamiento del problema**

Con relación a tuberías enterradas surge una serie de factores que determinan las deformaciones a las que van a ser sometidas y sus características de resistencia. Las deformaciones debidas a la propagación de onda se presentan en áreas de gran magnitud y dependen de la ubicación de las fallas del suelo sobre las tuberías. Se debe estimar a partir del análisis de las siguientes variables:

- La distancia al epicentro del sismo, y las propiedades de los mantos de roca definen las características de la señal.
- Las propiedades de los materiales como peso específico, velocidad de propagación y disipación de energía, determinan la forma de propagación de la onda a través del subsuelo del sitio en consideración.
- Los espesores y las inclinaciones de los diferentes estratos, dan origen a rebotes y desviaciones de las ondas incidentes.
- Las relaciones entre las frecuencias naturales de los perfiles de suelo y las frecuencias de la señal sísmica producen efectos de atenuación, amplificación y en algunos casos de resonancia.
- Las características de superficie como presencia de laderas y en general la topografía puede afectar las ondas que se propagan, en algunos casos aumentando sus valores pico.
- Las condiciones de colocación determinan la rigidez de la estructura ante las deformaciones impuestas.

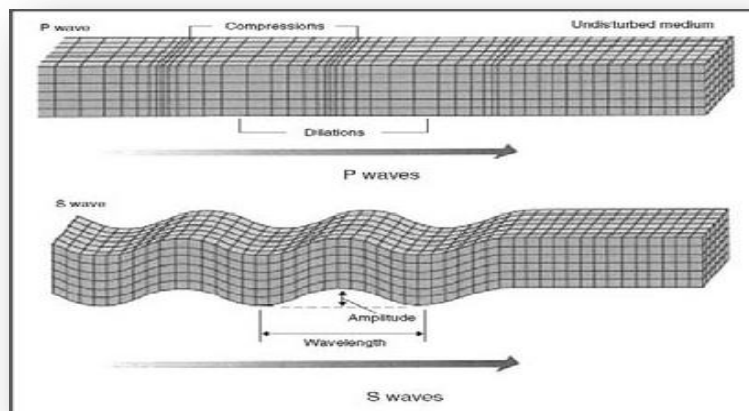
## 2.2 SISMOS

Los Sismos ya sean terremotos o Maremotos son movimientos vibratorios que sufre la corteza terrestre sobre un área determinada, el sismo es un fenómeno natural, tal vez el que más impresiona al hombre por las pérdidas humanas y materiales. La transmisión de las ondas sísmicas, las ondas sísmicas es lo que producen los terremotos. Como es difícil ver o presenciar un terremoto se provocan con barrenas, el punto donde se produce el terremoto es el HIPOCENTRO, y la vertical encima del hipocentro es el EPICENTRO. Se producen “olas en la corteza”.

Las ondas sísmicas son recogidas por un sismógrafo, y se quedan grabadas en un papel, película fotográfica, ordenador, etc.

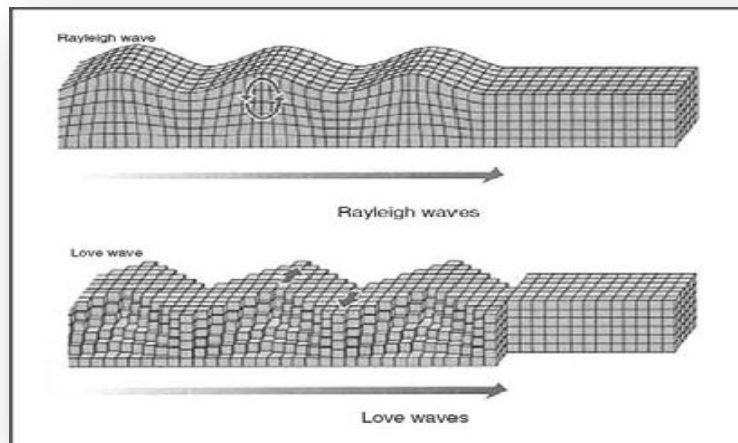
Las ondas sísmicas son P, S y L como lo muestra la figuras 1 y 2.

**Figura 1. Ondas de cuerpo**



Fuente: Hunt, 2005

**Figura 2. Ondas Superficiales**



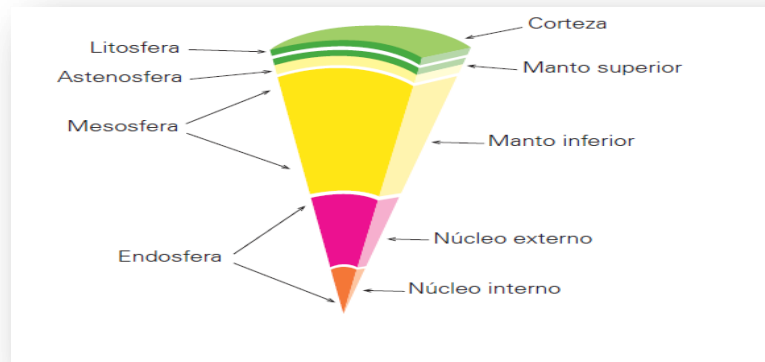
Fuente: (Hunt, 2005)

- **Ondas Primarias.** Son de presión o longitudinales, y pueden pasar a través de los sólidos, líquidos y gaseosos; en las profundidades donde la roca es más elástica viajan rápidamente por las Cuencas Oceánicas y las masas Continentales.
- **Ondas Secundarias.** Son por sacudimiento y transversales no se admiten a través de los líquidos, son lentas y su velocidad es proporcional a la rigidez del material que atraviesan.
- **Ondas Largas o Superficiales.** Son las que llegan a la superficie terrestre; se propagan en círculos en forma análoga a los que producen en el agua al arrojar la piedra sobre esta.

### 2.2.1 Como se producen los sismos

La estructura interna de la tierra está constituida como lo muestra la figura 3.

**Figura 3. Estructura Interna de la tierra.**



Fuente: <http://publicaciones.administracion.es/riesgosismico>

La litosfera no es continua en la superficie de la tierra sino que está formada por diferentes placas que hacen contacto entre sí, estas placas sufren movimientos relativos debido a las fuerzas de tensión y compresión que se producen en algunas de sus márgenes, dando como resultado la subducción de una placa sobre otra. La tierra está formada por ocho placas tectónicas principales, que agrupan parte de los océanos y los continentes; hay 3 zonas Sísmicas principales una recorre los bordes del Océano Pacífico, otra en el centro del Atlántico, y la tercera, el sur de Asia, desde Indonesia hasta el mar Mediterráneo. En estas zonas la roca que yace bajo el suelo no es firme. Lo cual se debe a que la parte sólida debajo de la corteza terrestre está formada por placas rocosas, y cada placa es un fragmento de litosfera que se mueve sobre la astenosfera, y este movimiento es el que desencadena los terremotos por los bordes de las fallas normalmente, aunque también se pueden producir en su interior, determinando así el tipo de movimiento y la intensidad del mismo.

Las fallas Se producen por fuerzas de tensión que actúan sobre las capas de la Corteza y las fracturan. La tensión determina el deslizamiento de alguna porción de la Corteza sobre otra, o bien, que algunos bloques del terreno permanezcan en

el mismo lugar o se elevan ligeramente. Hay tres tipos de Fallas Vertical, Horizontal, y Mixta.

- **Falla Vertical.** Se presenta cuando el deslizamiento del terreno ocurre de arriba hacia abajo, o viceversa, este tipo de Falla es la más común en la corteza Terrestre.
- **Falla Horizontal.** Se origina cuando el deslizamiento es en sentido Horizontal y al mismo nivel de la Superficie; por ejemplo la Famosa Falla de San Andrés, en California, que produjo el terremoto de San Francisco, en 1906.
- **Falla Mixta.** Como su nombre lo indica, el deslizamiento se efectúa tanto en sentido Horizontal como Vertical

El estado de esfuerzos producido por esta perturbación se transmite por todo el medio a través de las ondas sísmicas y su disipación obedece a fenómenos de fricción y al debilitamiento de la intensidad de energía, al aumentar el área de propagación a medida que el frente de onda se aleja de la fuente que lo origina.

### **2.2.2 Influencia del suelo sobre la onda**

Este efecto es muy complejo en la naturaleza, pues incluye: efectos de resonancia de ondas en una, dos y/o tres dimensiones; el efecto del comportamiento no lineal del suelo para grandes deformaciones (el cual varía la intensidad de los efectos de sitio cuanto menos linealmente se comporta el suelo); los fenómenos de licuefacción de las capas arenosas; la ruptura del suelo (deslizamientos y agrietamientos) accidentes topográficos etc. y requiere estudios de gran detalle para su determinación, incluso para zonas de pequeña extensión.

Desde que se produce la perturbación inicial en la roca, y a medida que esta se va propagando por los distintos estratos la onda sufre los fenómenos de reflexión y

refracción cada vez que su frente atraviesa medios de diferente rigidez, peso unitario, forma, etc.

Otros fenómenos tienen relación con las propiedades mecánicas del medio transmisor son la amplificación y el amortiguamiento.

## **2.3 COMPORTAMIENTO DINAMICO DEL SUELO**

La naturaleza y la distribución del daño sísmico están muy influenciadas por la respuesta del suelo frente a cargas cíclicas. Dicha respuesta está controlada en gran medida por las propiedades del suelo. Por ejemplo, la susceptibilidad de un depósito de suelo para amplificar el movimiento depende de las propiedades dinámicas, siendo el módulo de corte y el amortiguamiento principales parámetros para modelar la respuesta sísmica del suelo. Estos parámetros se relacionan con otras propiedades del suelo, de carácter más físico, como por ejemplo el índice de poros, la densidad relativa y la velocidad de las ondas de corte.

Las relaciones entre las propiedades dinámicas (módulo de corte, razón de amortiguamiento y la deformación unitaria), se pueden obtener en el laboratorio, pero no siempre se cumplen en el terreno, debido a la dependencia de factores que no se conocen o no se pueden reproducir fielmente en el laboratorio, como la estructura, la edad y la trayectoria de tensiones del suelo.

### **2.3.1 Factores que influyen en las propiedades dinámicas del suelo**

Los factores claves que influyen en las propiedades dinámicas del suelo son: la tensión efectiva de confinamiento, el nivel de tensiones en el suelo, el índice de poros y la plasticidad del suelo.

- **Tensión efectiva de confinamiento:** Cuando se coloca la tubería esta queda confinada o empotrada en el suelo produciendo cierto tipo de tensiones que causan un acople entre el suelo y la tubería, al proporcionarse este equilibrio sin presentar ninguna anomalía al conjunto, se dice que hay una relación efectiva.
- **Nivel de tensiones en el suelo:** La tensión del suelo es la fuerza con la cual el agua es retenida en los poros del suelo entre las partículas del mismo, cuando esta se libera la tensión aumenta puesto que los poro se cierran; luego el suelo produce tensión a la tubería provocado por este fenómeno, cambiando así las propiedades del sistema, la mejor forma de manejo de este tipo de situaciones es controlando la humedad del lugar.
- **Índice de poros (e):** El índice de poros se define como volumen de huecos relativo al volumen de sólido ( $e = V_h / V_s$ ). Valores de (e): máx y min para los principales tipos de suelos:

**Tabla 1. Valores Medios del Índice de Poros**

Tipo de suelo	e máx.	e min.
Arena	0.9	0.2
Limo	1.1	0.4
Arcilla blanda	2.3	0.6
Turba	2.5	2

Fuente: Mecánica de suelos, (Braja Dass)

- **Plasticidad del suelo:** En mecánica de suelos, sólo se utiliza para los suelos finos que, dependiendo del contenido de agua y su mineralogía, fluyen sin romperse. La plasticidad de un suelo se atribuye a la deformación de la capa de agua adsorbida alrededor de los minerales; desplazándose como sustancia

viscosa a lo largo de la superficie mineral, controlada por atracción iónica entre sus partículas.

Un suelo está en estado líquido (arcilla o limo muy húmedos) cuando se comporta como un fluido viscoso, deformándose por su propio peso y con resistencia a la cizalladura casi nula. Al perder agua, ese suelo pierde su fluidez, pero continúa deformándose plásticamente; dado que pierde su forma, sin agrietarse. Si se continúa con el proceso de secado (de la arcilla o limo), el suelo alcanza el estado semisólido, si al intentar el remolde se desmorona.

Si se saca más agua, a un punto en el cual su volumen ya no se reduce por la pérdida de agua, y el color toma un tono más claro, el estado del suelo se define como sólido. El estado plástico se da en un rango estrecho de humedades, comprendidas entre los límites líquido y plástico. Este rango genera el Índice de Plasticidad IP, definido así:

$$IP = WL - WP \quad (1)$$

### **2.3.2 Clases de suelos presentes en la ciudad**

En la ciudad de Bucaramanga se presentan diversidad de suelos que veremos a continuación.

En el estudio de microzonificación sísmica, **(ingeminas, junio 2001, director Adolfo Alarcón Guzmán)**, se trataron varias zonas para la ciudad, las cuales se van a tener en cuenta en el análisis del modelo; y éstas están representadas por:

- **Zona 3. Barrios del norte de Bucaramanga**

**Tabla 2. Estudio de Microzonificación Sísmica de Bucaramanga (Zona 3)**

Sitio	Longitud Arreglo, m	V	Vp, m/s	Vs, m/s	Profundidad de Tope, m	Unidad	Correlación litológica
Villa Helena 1	185	V1	700	400	-	Qda	Suelos alterados, cantos, arenas, limos y arcillas deleznales
		V2	2000	1150	8 a 20	Qbo	Conglomerados y arcillas arenosas del miembro Órganos.
		V3	3450	1950	42 a 54	Jg	Areniscas, limolitas y arcillolitas de la formación Girón
Villa Helena 2	172	V1	790	400	-	Qda	Suelos alterados, cantos, arenas, limos y arcillas deleznales
		V2	2500	1150	14 a 17	Qbo	Conglomerados y arcillas arenosas del miembro Órganos.
Villa Rosa	170	V1	670	425	-	Qda	Suelos alterados, cantos, arenas, limos y arcillas deleznales
		V2	2260	1275	6 a 14	Qbo	Conglomerados y arcillas arenosas del miembro Órganos.
		V3	3600	1850	33 a 45	Jg	Areniscas, limolitas y arcillolitas de la formación Girón
José María Córdoba	165	V1	580	355	-	Qda	Suelos alterados, cantos, arenas, limos y arcillas deleznales
		V2	1735	1140	7 a 16	Qdi, Qbg?	Cantos, gravas, arenas y arcillas.
		V3	2145	1465	23 a 32	Qbo	Conglomerados y arcillas arenosas del miembro Órganos.

Fuente: INGEOMINAS, junio 2001, director Adolfo Alarcón Guzmán

- **Zona 4 parte central y sur de Bucaramanga**

**Tabla 3. Estudio de Microzonificación Sísmica de Bucaramanga (Zona 4)**

Sitio	Longitud Arreglo, m	V	Vp, m/s	Vs, m/s	Profundidad de Tope, m	Unidad	Correlación litológica
Parque de Mejoras Públicas	192	V1	760	455	-	Qblr Qbg?	Suelo alterado, arenas arcillosas, gravas y limos del miembro Limos Rojos y miembro Gravoso?
		V2	2450	1050	18 a 23	Qbo	Conglomerados y arcillas arenosas del miembro Órganos.
Marsella Real	215	V1	670	400	-	Qblr Qbg?	Suelo alterado, arenas arcillas, gravas, limos arenosos y limos.
		V2	1900	1020	17 a 22	Qbf, Qbo?	Arcillas y limos arenosos del miembro Finos ó material del miembro Órganos?
		V3	2585	1450	35 a 52	Qbo	Conglomerados y arcillas arenosas del miembro Órganos.
Villa Mallorca – Terragona	290	V1	515	330	-	Qblr	Suelo alterado, arenas arcillosas, gravas y limos del miembro Limos Rojos.
		V2	1850	1240	16 a 20	Qbf, Qbo?	Arcillas y limos arenosos del miembro Finos ó material del miembro Órganos?
		V3	3300	2250	71 a 88	Jg	Areniscas, limolitas y arcillolitas de la formación Girón.

Fuente INGEOMINAS, junio 2001, director Adolfo Alarcón Guzmán

- Zona 5 parte oriental de Bucaramanga

**Tabla 4. Estudio de Microzonificación Sísmica de Bucaramanga (Zona 5)**

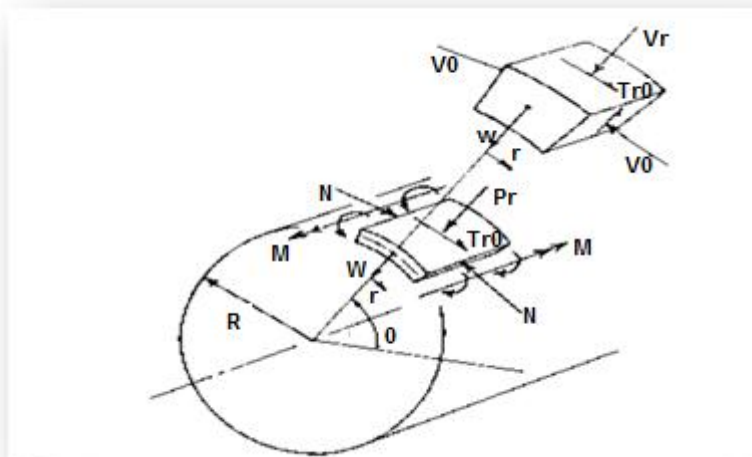
Sitio	Longitud Arreglo, m	V	Vp, m/s	Vs, m/s	Profundidad de Tope, m	Unidad	Correlación litológica
La Albania – Cantabria	155	V1	670	340	-	Qblr, Qbg	Suelo alterado, arenas arcillosas, gravas, limos y limos arenosos.
		V2	1550	790	2 a 8	Qbf	Arcillas, limos arenosos y arenas limosas del miembro Finos.
		V3	2290	1370	30 a 40	JRcg	Rocas ígneas, granodioritas y cuarzomonzonitas altamente meteorizadas.
Estadio La Flora	290	V1	935	575	-	Qblr	Suelo alterado, arenas arcillosas, gravas y limos del miembro Limos Rojos.
		V2	1905	1010	9 a 14	Qbf?, Qbo	Conglomerados y arcillas arenosas o material del miembro Finos?
		V3	3135	1910	59 a 75	JRcg, Jg?	Rocas ígneas, granodioritas cuarzomonzonitas, meteorizadas.

Fuente: INGEOMINAS, junio 2001, director Adolfo Alarcón Guzmán

Luego de analizar estos resultados de los estudios se decidió trabajar con arenas y arcillas que son los dos tipos de suelo que son los más se presentan en la ciudad

### 2.3.3 Comportamiento de acción-reacción de la tubería

**Figura 4. Diagrama de Cuerpo Libre de la tubería.**



Fuente: [www.ads-chile.com](http://www.ads-chile.com), ficha técnica 2.130, Burns & Richard

DONDE:

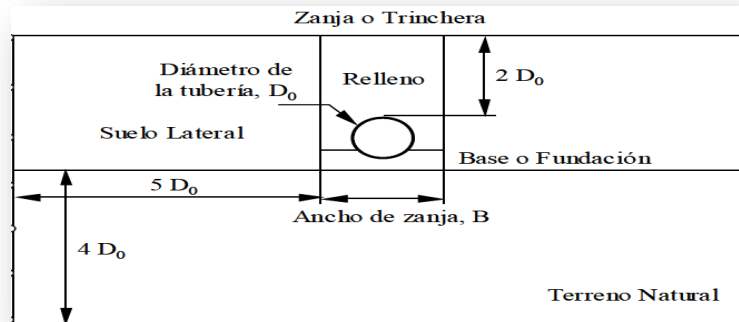
- (Pr) es La presión radial del suelo
- (w) la deflexión radial (incrementada al doble para proporcionar la deflexión total)
- (v) la deflexión tangencial
- (N) el empuje circunferencial de la pared
- (M) el momento de flexión de la pared.

De éstos resultados se generan, el esfuerzo de compresión del aro, los esfuerzos de flexión de la pared interior, los esfuerzos de flexión de la pared exterior, el esfuerzo total (paredes interiores y exteriores; el esfuerzo de compresión de la pared, el acortamiento del aro, la deflexión vertical total, la deflexión horizontal total, y el acortamiento circunferencial.

- **CONDICION DE ZANJA Y CARGA SOBRE LA TUBERIA**

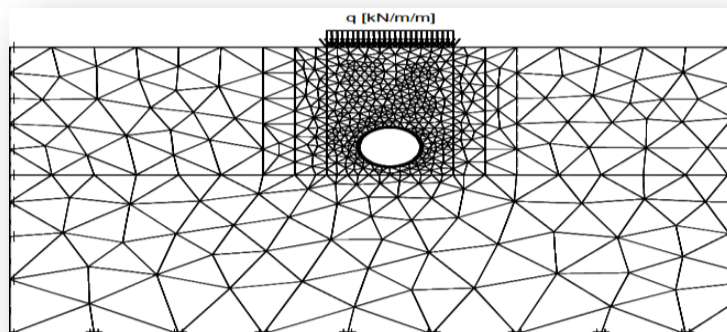
Es muy importante comprender como se encuentra la tubería y bajo qué condiciones, porque estos parámetros nos permiten obtener respuestas sobre el comportamiento de la tubería ante eventos sísmicos; la figura 5 nos muestra las condiciones de colocación de una tubería enterrada, y la figura 6 nos permite ver, de manera general como sería la discretización e interacción de carga sobre el suelo y la tubería.

**Figura 5. Sección Transversal de la Tubería Enterrada.**



Fuente: [www.google.com/interaccionsuelotuberia/link1](http://www.google.com/interaccionsuelotuberia/link1).

**Figura 6. Discretización de la Tubería y el Suelo**



Fuente: [www.google.com/interaccionsuelotuberia/link1](http://www.google.com/interaccionsuelotuberia/link1).

En el diseño de las tuberías enterradas es muy importante la carga que soportara la tubería debido al relleno que se coloca sobre la clave del tubo. Esta carga no solo se distribuye al tubo sino que también hacia las paredes verticales de la zanja y es donde se produce esa interacción suelo tubería. La carga de relleno que actúa sobre la tubería se calcula mediante la siguiente expresión:

$$P = \gamma HR + P_0 \quad (2)$$

**Donde:**

P: Presión debida al peso del suelo, a la profundidad HR incluida la Presión por Carga Viva  
Po(kg/m2).

( $\gamma$ ): Peso específico del suelo (kg/m3).

HR: Profundidad del relleno sobre la corona del tubo (m).

Po: Carga viva por vehículo de eje simple (kg/m2).

En la figura 6, la carga viva se considera en 957 kg/m2 para un vehículo de eje simple que transita sobre el terreno del tendido de la tubería a la profundidad HR = 2.0 m.

Además la carga de relleno produce un esfuerzo de compresión en las paredes del tubo que se obtiene con la expresión:

$$\sigma_c = \frac{9.81PD}{2 \cdot 1000A} \quad (3)$$

**Donde:**

$\sigma_c$ : Esfuerzo de compresión en la pared del tubo (kN/m2).

A: Área de sección de la pared del perfil por unidad de longitud (m2/m).

D: Diámetro de exterior de la tubería (m).

Este esfuerzo de compresión no debe sobrepasar el smáx de compresión en la tubería, por lo tanto el factor de seguridad al límite de este esfuerzo en la pared es:

$$n_{cru} = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_c} > 2$$

(4).

**NOTA:** este parámetro se analizó para indicar la importancia de la condición de zanja y carga sobre la tubería, pero en nuestro análisis no lo tenemos en cuenta debido a que es una de las hipótesis que el artículo en comparación “**Seismic behavior of a buried gas pipeline under earthquake excitations**” no considera, (la carga viva sobre la superficie es ignorada) puesto que solo se remite a la influencia del sismo.

### **3. MODELOS MATEMATICOS**

La existencia actualmente de diversos modelos de análisis matemáticos, que reproducen comportamientos estructurales complejos, con ecuaciones constitutivas no lineales e incluyendo una geometría que también es expresada como no lineal; nos permite analizar el problema a investigar y conocer los parámetros que van a gobernar dicho problema.

Con estos modelos se puede obtener de forma aproximada ciertos resultados los cuales pueden llegar a ser muy cercanos con respecto a ensayos de laboratorio como: (cargas máximas, deformaciones, reacciones o estados tensionales, etc,) para poder adoptar el esquema de instrumentación más adecuado en cada experimento, y permiten hacer una comparación de sus resultados con los producidos empíricamente.

#### **3.1 MÉTODO DE ELEMENTOS LINEALES CON FORMULACIÓN CUBICA INELÁSTICA**

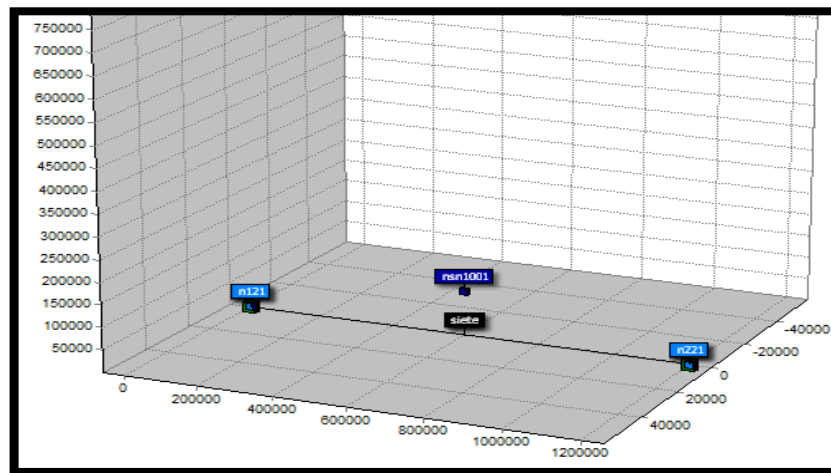
Es un método novedoso que pretende una nueva discretización de los elementos que componen un sistema. Está basado en el método de elementos finitos el cual permite reproducir comportamientos estructurales complejos con ecuaciones constitutivas no lineales, e incluyendo la no linealidad tanto del material como geométrica; dicho estudio debe hacerse mediante la utilización de un modelo numérico que tenga en cuenta todas las variables que intervienen en el problema, por esta razón se utilizó el software SEUZ.NL y también porque el artículo en comparación (“Seismic behavior of a buried gas pipeline under earthquake excitations”) lo aplicó. En la parte analítica indica que el método necesita mínimo

tres puntos de referencia para evaluar un elemento. ZEUS.NL presenta el método de elementos finitos, al cual se le aplican los tipos y modificaciones necesarias para la implementación del análisis en curso.

### Elementos finitos tipo viga:

En la teoría de vigas se desarrolla una aproximación unidimensional del continuo en tres dimensiones; esto es debido a que la sección transversal es mucho más pequeña en comparación a su sentido longitudinal, por este motivo los análisis pertinentes se hacen de una manera desacoplada; esto procura un análisis más sencillo, se han utilizado elementos de viga cúbicos de dos nodos, el primer y segundo punto identificados en la figura7, como N121 y N221 respectivamente, definen la línea en la cual se encuentra el elemento, en este caso la tubería con su nombre SIETE y el tercer punto me indica un plano de coordenadas en el cual se desarrolla la discretización, este se identifica como NSN1001; y es un nodo no estructural.

**Figura 7. Elemento lineal con Formulación cubica Inelástica.**



Fuente: ZEUS.NL

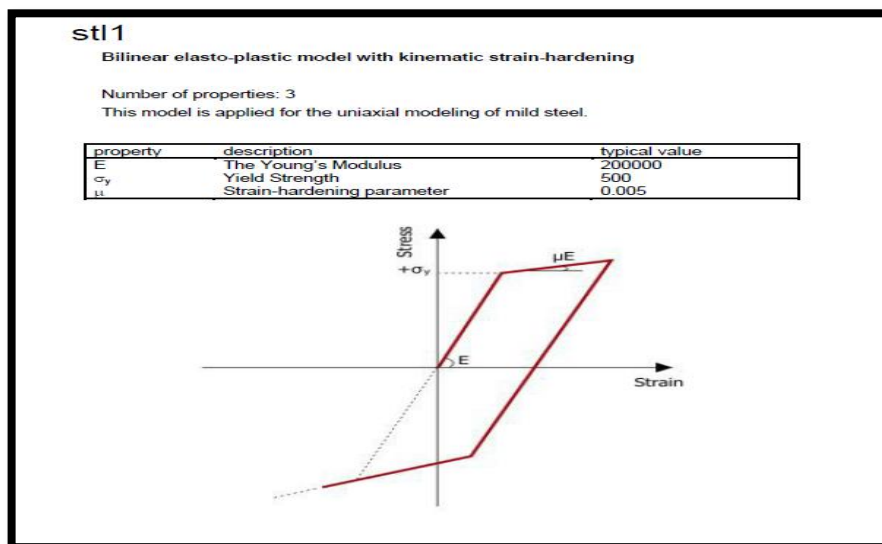
En cuanto a la parte cuantitativa el método trabaja con ecuaciones de Euler Bernoulli, de tercer grado para una mejor aproximación. Las cuales no tienen en cuenta la deformación transversal por cortante, es decir que las secciones planas perpendiculares al eje de la viga permanecen planas y perpendiculares a dicho eje después de la deformación, con esto corroboramos una vez más que el análisis desacoplado es necesario debido al plano de deformación del elemento tipo viga.

En estos elementos la integración longitudinal se realiza con una cuadratura de gauss a lo largo del eje del elemento y la integración seccional se realiza con 100 puntos de monitoreo. [Ref. Manual SEUZ.NL]

El software también presenta gráficas de esfuerzo vs tensión de diferentes materiales, realizando así un análisis para el rango elasto-plástico del material mostrando la no linealidad del mismo.

La siguiente grafica muestra dicho análisis.

**Figura 8. Modelo bilineal Elasto-plástico del material.**



Fuente: [Ref. Manual SEUZ.NL]

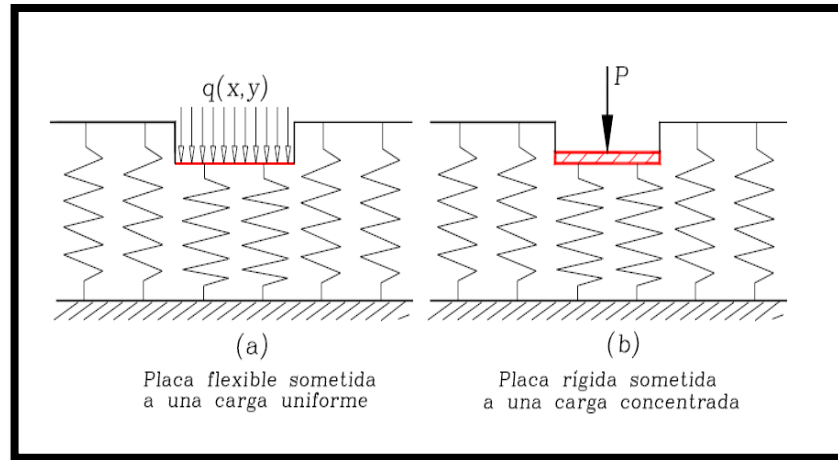
### 3.2 MÉTODO DE WINKLER

Winkler propone que la deflexión,  $w$ , en cualquier punto de la superficie del suelo de soporte es linealmente proporcional a la presión de contacto que en ese punto, e independiente de los esfuerzos de contacto en otros puntos (esto es, el suelo de soporte consiste en un sistema de elementos resortes lineales mutuamente independientes como se muestra en la fig. (9), es decir:

$$q(x,y) = k_1 w(x,y) \quad (5)$$

Donde:  $k_1$ = módulo de balasto del suelo o medio soportante (su unidad es esfuerzo por unidad de longitud). En este modelo los desplazamientos de una región cargada uniformemente serían constantes, independientes si la viga es infinitamente flexible o infinitamente rígida, como lo muestra las figura 9(en la parte a y b respectivamente). La inhabilidad de este modelo para deformarse fuera del área cargada restringe su aplicabilidad a los suelos o medios con alguna cohesión o con capacidad a cortante. Sin embargo, existen muchos problemas en la ingeniería para los cuales este modelo representa una idealización adecuada y precisa de las condiciones de soporte existentes, tales como miembros flotantes (vigas, entramados, capas de hielo) los cuales son una consecuencia simple del principio de Arquímedes.

**Figura 9. Modelo del Método de Winkler.**



Fuente: [www.google.com/metododefundacioneswinkler/link4](http://www.google.com/metododefundacioneswinkler/link4)

### 3.3 REPRESENTACION DEL MODELO DEL SUELO

En este estudio debemos tener en cuenta el fenómeno de transmisibilidad de esfuerzos entre materiales. Sabemos que la onda viaja por el suelo en donde se encuentra instalada la tubería, de modo que éste transmite a la tubería toda la fuerza producida por el sismo. Para calcular las propiedades de estos resortes que representaran el suelo con el método expuesto en el Manual del American LifeLines Alliance [Ref.8], estas expresiones para la fuerza máxima de los resortes que representaran el suelo se basan en investigaciones en laboratorio y experimentos en campo de la respuesta de las tuberías, así como en los enfoques generales geotécnicos de las estructuras relacionadas, tales como: pilas, anclajes de placas integradas y zapatas. Para facilitar su uso en la hoja de cálculo u otras aplicaciones por ordenador.

- **Resorte Axial:** La fuerza axial máxima ( $T_u$ ), por unidad de longitud que el suelo transmitiría a la tubería estaría dada por las ecuaciones:

$$Tu = \pi D \alpha c + \pi D H \gamma \frac{1+K_0}{2} \tan \delta \quad (6)$$

$$\alpha = 0.608 - 0.123c - \frac{0.274}{c^2+1} + \frac{0.695}{c^3+1} \quad (6-1)$$

DONDE:

- (Tu) es la fuerza axial máxima.
- (D) es el diámetro exterior del tubo.
- (C) es la cohesión del suelo.
- (H) es la distancia a la tubería central.
- ( $\gamma$ ) es el peso de la unidad efectiva de la tierra.
- (K<sub>0</sub>) es el coeficiente de la presión en reposo.
- ( $\alpha$ ) es el factor de adherencia.
- ( $\delta$ ) es el ángulo de fricción en la interfaz de la tubería y el suelo (=fΦ).
- (Φ) es el ángulo de fricción interna del suelo, y f es un factor (aproximadamente igual a 0,8 para el acero en bruto).

Los desplazamientos ( $\Delta tu$ ) producidos por (Tu) se encontrarían en un rango más o menos de 3 mm, 5 mm y 10 mm para la arena densa, arena suelta y arcilla blanda, respectivamente, como se sugiere por la Alianza Americana de Lifeline.[Ref.8].

- Resorte Transversal: La fuerza transversal máxima (Pu), por unidad de longitud que el suelo transmitiría a la tubería estaría dada por la ecuación:

$$Pu = NchCD + NqhyHD \quad (7)$$

$$Nch = a + bx + \frac{c}{(x+1)^2} + \frac{d}{(x+1)^3} \leq 9 \quad (7-1)$$

$$Nqh = a + b(x) + c(x^2) + d(x^3) + e(x^4) \quad (7-2)$$

**DONDE:**

- (Pu) es la fuerza transversal máxima.
- (Nch) y ( Nqh) son el factor de capacidad de carga horizontal, en las arcillas (Cero para c = 0) y en arenas (cero para  $\Phi = 0$ ), Respectivamente, y pueden determinarse en función del ángulo de fricción interna, y el valor de (x)= H/D.[Ref.8]

El desplazamiento ( $\Delta p_u$ ) producido por (Pu) puede ser determinado por:

$$\Delta p = 0.04(H + \frac{D}{2}) \leq 0.1D \sim 0.15D \quad (8)$$

- **Resorte Vertical:** La ecuación para la determinación de la fuerza vertical ascendente (Qu), producida por el suelo a la tubería por unidad de longitud está dada por la ecuación:

$$Q_u = N_{cv}CD + N_{qv}\gamma HD \quad (9)$$

$$N_{cv} = 2 \left( \frac{H}{D} \right) \leq 10 \quad (9-1)$$

$$N_{qv} = \left( \frac{\phi H}{44D} \right) \leq N_q \quad (9-2)$$

$$N_q = \exp(\pi \tan \phi) \tan^2 \left( 45 + \frac{\phi}{2} \right) \quad (9-3)$$

**DONDE:**

- (Qu) es la fuerza vertical ascendente.
- ( Ncv) es el factor de elevación vertical de arcilla (cero para c = 0)
- ( Nqv) es el factor de elevación vertical de arena (cero para  $\Phi = 0$ )

Los desplazamientos correspondientes ( $\Delta q_u$ ) producidos por (Qu), se calculan a 0.01H, 0.02H y 0.2H; en arena densa, arena suelta y arcilla blanda respectivamente. [Ref.8]

## **4. PROGRAMA COMPUTACIONAL**

### **4.1 SEUZ NL.**

Zeus Non linear (ZeusNL) provee una fácil y eficiente forma para realizar análisis no lineales dinámicos de tiempo-historia, presiones variables y convencionales; y análisis de eigenvalores. A diferencia de otros paquetes de análisis similares, el análisis dinámico básico es una cuestión de pasos simples, usando un entorno completamente visual. A continuación se presentan las principales características del programa.

#### **4.1.1 Características del Programa**

- Interfaz completamente visual. No hay archivos de entrada de configuración o secuencias de programación
- Completo control sobre la adición, modificación y eliminación de materiales, secciones tipo, nodos, elementos, restricciones y cargas.
- Seis diferentes tipos de análisis: dinámico y tiempo-historia, adaptativo y convencional de pushover, eigenvalores y estático con carga no variable.
- El programa cuenta tanto con materiales como geometrías no lineales.
- Modelos de materiales precisos y probados para el acero y para el concreto
- Una gran variedad de secciones compuestas tanto de concreto reforzado como de acero
- La propagación inelástica a lo largo de la longitud del miembro y a lo profundo de la sección transversal es modelada explícitamente en ZeusNL permitiendo un estimación precisa de la acumulación de daños. Esta función establece una diferencia de ZeusNL con las demás herramientas que usan inelasticidad lamped para modelar el comportamiento de miembros no lineales.

- Alta estabilidad y precisión a niveles muy altos de tensión lo que permite la precisa determinación de la carga de colapso de las estructuras.
- La carga aplicada puede consistir de fuerzas constante o variables, desplazamientos y aceleraciones en los nodos. La carga variable aplicada puede variar proporcionalmente o independientemente en el pseudo dominio del tiempo.
- La innovación del procedimiento de Pushover adaptativo. En esta método de pushover, la carga distribuida lateral no permanece constante. Pero se actualiza constantemente durante el análisis de acuerdo a las formas modales y factores de participación derivados de un análisis de eigenvalores realizado durante el paso actual. De esta manera, el estado de la rigidez y la elongación del periodo de la estructura en cada paso, así como los altos efectos de la forma modal, son tenidos en cuenta.
- La integración con el entorno del sistema operativo Windows®. Los datos puede ser pegados a las tablas de ingreso de datos de ZeusNL desde los programas de hojas de cálculo, como Microsoft® Excel; y todo lo que aparecerá en las ventanas de Zeus.NL se puede copiar de regreso nuevamente (por ejemplo a programas de procesamiento de texto como Microsoft® Word), Incluido el ingreso y salida de datos, graficas de alta calidad, los modelos de las formas Deformadas y no deformadas y más. Más aun, películas en formato AVI pueden ser creados describiendo la secuencia de las formas deformadas de la estructura.
- Gestor de plantillas templates, el usuario puede crear modelos regulares o irregulares en 2D o 3D y correr todo tipo de análisis en unos cuantos segundos.
- Avanzados post-procesos facilita los gráficos derivados y las formas modales fácil y eficientemente.
- El software presenta una versión libre y renovable anualmente.

## 4.2 METODOLOGÍA Y ORIENTACIÓN DEL SOFTWARE

### 4.2.1 Capacidades Técnicas

Zeus NL se puede utilizar para predecir las longitudes de desplazamiento de marcos en 2D y 3D bajo cargas estáticas o dinámicas, teniendo en cuenta el comportamiento no lineal de ambos, en la geometría y los materiales. Están disponibles los modelos de materiales como el concreto y el acero, ambos con una amplia librería de elementos en 3D que pueden ser usados como: tuberías, hormigón y configuraciones de secciones compuestas. La carga aplicada puede ser constante o variable respecto a las fuerzas, aceleraciones y desplazamientos.

Zeus NL tiene la capacidad de realizar análisis de: valores propios, cargas estáticas, estático de tiempo-historia y análisis dinámicos como sigue:

- **Análisis de Valores Propios** Se usa el eficiente algoritmo de Lacnoz es usado para la evaluación de las frecuencias naturales de la estructura y las formas modales
- **Análisis Estático de Empujes (Convencional y adaptativo)** En el análisis convencional de cargas estáticas. La carga aplicada (desplazamientos, cargas o una combinación de ambos) el usuario hace click en algunas de las ventanas de ZeusNL. Estos menús permiten la ejecución rápida y fácil de las funciones más utilizadas. Los menús emergentes están atados a todas las tablas y diagramas de ZeusNL.
- **Análisis Estático de Tiempo Historia** La carga aplicada (desplazamiento, fuerzas o una combinación de ambos) varía independiente en el pseudo dominio del tiempo, de acuerdo a un patrón prescrito.
- **Análisis Dinámico** La carga aplicada generalmente es la aceleración en los apoyos (aunque también se pueden usar fuerzas). Se puede modelar tanto

excitaciones simétricas como asimétricas. Se puede emplear tanto el algoritmo de Hilbert-Hughes como el algoritmo de Integración de Newmark.

#### 4.2.2 Convenciones

Hay un número de términos y convenciones usados en este manual con los que el usuario deberá familiarizarse:

- Comandos: Por ejemplo, Nombre del Menú > Nombre del Comando, así como File > Save, que quiere decir “abra el menú File y de click en el comando Save”.
- Modelo: El modelo de la estructura que es creado con ZeusNL. Incluye la completa descripción de la estructura desde los materiales y tipos de secciones, hasta los nodos, los elementos y las restricciones.
- Windows®: Aquí nos referimos a la línea de productos de Microsoft Windows®; que son Windows® 95/98, Windows® Me, Windows® NT, Windows® 2000, Windows® XP, Windows® Vista, Windows® 7; note que el programa no es soportado por sistemas Windows® 3.1 o anteriores.
- Proyecto: Esto se refiere al conjunto de archivos y opciones que son usadas en ZeusNL para cualquier análisis. Los archivos de datos ingresados en ZeusNL son salvados y se cargan con la extensión .dat. Sin embargo existen otros tipos de archivos creados durante la formación del modelo (por ejemplo; los archivos de datos de curvas .crv que describen la carga del modelo de la estructura).
- Cuadros de Dialogo: Estos son las ventanas que se abren para el ingreso de datos. El usuario entonces ingresa los datos requeridos y da click en OK para aceptar los datos a ingresar o da click en Cancel para cancelar la operación.
- Menús Emergentes: Son menús de atajo que aparecen cuando el usuario da click derecho en partes de la ventanas de ZeusNL. Estos menús están disponibles para ejecutar fácilmente las funciones más comúnmente utilizadas. Menús emergentes están atados a todas las tablas, ventanas y diagramas de ZeusNL.

### 4.2.3 Requerimientos Del Sistema

La siguiente tabla muestra los requerimientos para usar ZeusNL.

**Tabla 5. Requerimientos de Sistema para ZeusNL.**

<b>Parte</b>	<b>Requerimiento</b>
<b>Procesador</b>	<b>Pentium III o superior</b>
<b>RAM</b>	<b>64 MB o superior (128 es lo recomendado)</b>
<b>Disco Duro</b>	<b>11 MB de espacio libre para la instalación; sin embargo, para ejecutar los proyectos con grandes modelos (cientos de nodos), especialmente en análisis tiempo-historia pueden resultar archivos extremadamente grandes, en algunos casos de mas de 100MB</b>
<b>Adaptador de Video</b>	<b>Adaptador grafico que soporte el sistema operativo Windows®</b>
<b>Sistema Operativo</b>	<b>Windows® 95/98, Windows® Me, Windows® NT, Windows® 2000, Windows® XP, Windows® Vista, Windows® 7</b>

Fuente: manual SEUZ.NL

### 4.2.4 Instalando Zeus

- Inicie el sistema operativo Windows®
- Inserte el CD-ROM de instalación en la unidad de CD
- Normalmente el Set-Up del programa arrancara automáticamente. Sino ocurre abra los contenidos del CD y corre el ejecutable.

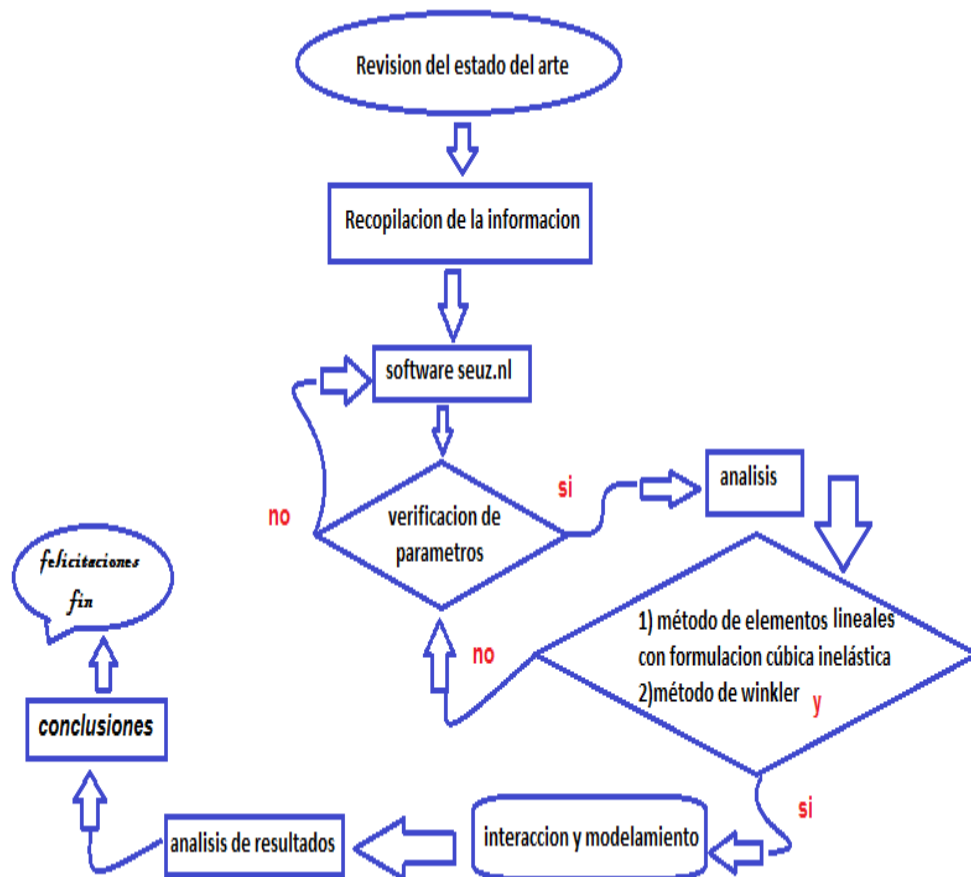
- Sigue las instrucciones y el programa de instalación automatizado procederá a copiar ZeusNL en el disco duro. Normalmente, la configuración sugerida por el instalador debería funcionar bien. Se crearan archivos de acceso rápido se agregaran al escritorio y al menu > start abajo en Programs > ZeusNL.

## 5. MODELAMIENTO

### 5.1 METODOLOGÍA

Explicaremos paso a paso como es el desarrollo de un modelo, las propiedades de cada material y otras características; al tiempo se explicara un montaje realizado con el software para una arena densa, los siguientes modelos se desarrollan de la misma manera, con los datos correspondientes para cada uno.

Figura 10. Metodología Para el Desarrollo del Proyecto.




Fuente: los Autores del proyecto.

## 5.2 SELECCIÓN DE LOS MATERIALES Y PROPIEDADES PARA EL MODELO

### 5.2.1 Tubería

En este estudio se uso un tipo de tubería de acero al carbón que se empleó en la construcción de un gasoducto ubicado en la sección Payoa – Bucaramanga llegando al palenque en Girón; [Ref.11] se usa este tipo de material dado que el software utilizado maneja este tipo de tuberías de acero, la tubería seleccionada tiene la denominación API-5LX42 que posee las siguientes propiedades:

**Figura 11. Propiedades de la Tubería API-5LX42.**



**TUBERÍA DE ACERO CARBON**

CALIDADES	Composición Química					Características Mecánicas			
	C	Mn	Si	P	S	Limite	Elásticas	Resistencia a la tracción	
API -5Lx42	0.29	1.35	-	0.04	0.05	42.000 PSI	289 MPA	60.000 PSI	413 MPA
ASTM-A53GRA	0.25	0.9	-	0.05	0.06	30.000 PSI	207 MPA	48.000 PSI	331 MPA
ASTM - A 53 GR B	0.3	1.2	-	0.05	0.06	35.000 PSI	241 MPA	60.000 PSI	413 MPA
ASTM - A 1 06 GR B	0.3	0.29/106	0.1	0.048	0.058	35.000 PSI	241 MPA	60.000 PSI	413 MPA

Fuente: [www.codiacero.com](http://www.codiacero.com) [Ref.12]

Se trabaja una tubería de 8” que es la que se encuentra instalada en este gasoducto.

**Figura 12. Dimensiones de la Tubería Seleccionada.**

DIÁMETRO			Espesor Pared		Peso Nominal		Weigh Class	Schedule
Nominal	Exterior		Pulg.	MM	L/P	Kg/m		
Pulg.	Pulg.	MM						
2 1/2"	2.875	73	0.276	7.01	7.66	11.41	XS	80
2 1/2"	2.875	73	0.375	9.53	10.01	14.92		160
3"	3.5	88.9	0.216	5.49	7.58	11.29	STD	40
3"	3.5	88.9	0.3	7.62	10.25	15.27	XS	80
3"	3.5	88.9	0.438	11.13	14.32	21.35		160
4"	4.5	114.3	0.237	6.02	10.79	16.07	STD	40
4"	4.5	114.3	0.337	8.56	14.98	22.32	XS	80
4"	4.5	114.3	0.531	13.49	22.51	33.54		160
5"	5.563	141.3	0.258	6.55	14.62	21.77	STD	40
5"	5.563	141.3	0.375	9.53	20.78	30.97	XS	80
5"	5.563	141.3	0.625	15.88	32.96	49.11		160
6"	6.625	168.3	0.28	7.11	18.97	28.26	STD	40
6"	6.625	168.3	0.432	10.97	28.57	42.56	XS	80
6"	6.625	168.3	0.719	18.26	45.35	67.56		160
8"	8.625	219.1	0.322	8.18	28.55	42.55	STD	40
8"	8.625	219.1	0.5	12.7	43.39	64.64	XS	80
8"	8.625	219.1	0.906	23.01	74.69	111.27		160
10"	10.750	273.1	0.365	9.27	40.48	60.31	STD	40
10"	10.750	273.1	0.594	15.09	64.43	96.01	XS	80
12"	12.750	323.9	0.406	10.31	53.52	79.7	STD	40
14"	14.875	377.9	0.44	11.13	63.51	94.49	STD	40
16"	17.000	431.8	0.5	12.7	82.86	123.29	STD	40
18"	19.125	485.8	0.506	14.27	104.78	155.91	STD	40
20"	21.185	538.2	0.59	15.08	123.03	183.05	STD	40
24"	25.375	644.5	0.69	17.48	171.49	255.14	STD	40

Fuente: [www.codiacero.com](http://www.codiacero.com)[Ref.12]

Tenemos las siguientes propiedades:

- **Diámetro externo:** 219.1mm
- **Espesor de pared:** 12.7 mm
- **Modulo de Young:** 289000 N/mm<sup>2</sup>
- **Resistencia a la fluencia:** 413 N/mm<sup>2</sup>
- **Peso por unidad de longitud:** 64.64 Kg/m
- **Parámetro de endurecimiento:** 0.00

### 5.2.2 Capacidad de la tubería enterrada

La siguiente Tabla muestra la capacidad de la tubería enterrada, calculada tanto para la deformación admisible como para los desplazamientos en las direcciones axial y transversal, proporcionada por el artículo en comparación. [Ref. 10, Manual Kogas]

**Tabla 6. Deformaciones y Desplazamientos Admisibles.**

<b>Deformación Admisible</b>	<b>Capacidad de Desplazamiento (mm)</b>	
	<b>Dirección Axial</b>	<b>Dirección Transversal</b>
<b>6.98E-03</b>	<b>3874.4 (1936.7)</b>	<b>2106.3 (351.05)</b>

Fuente: artículo "Seismic behavior of a buried gas pipeline under earthquake excitations", [Ref.3]

### **5.2.3 Representación del suelo.**

Se tiene en cuenta el estudio de suelos para la ciudad de Bucaramanga desarrollado por ingeominas; el cuál estratifica la ciudad en zonas dependiendo de la velocidad de propagación de ondas, tomamos la zona 3 y 5 del estudio, en las cuales se encuentran suelos arcillosos y arenas densas respectivamente.

Estas zonas han sido seleccionadas para obtener conclusiones en base a los tipos de suelos utilizados en el artículo, con el fin de establecer un criterio, sobre el comportamiento de nuestras tuberías de gas.

Las propiedades de estos suelos y los valores medios del peso específico seco se seleccionan para estos tipos de suelo como se ve en la tabla 7, que son de vital importancia para incluir en las ecuaciones del capítulo 3, así poder desarrollar la representación del suelo como resortes por el modelo de winkler.

**Tabla 7. Propiedades de los Suelos.**

Tipo de suelo	Relación de vacíos	Contenido de agua natural En condición saturada (%)	Peso específico seco ( $\gamma_d$ )	
	E		[lb/pie <sup>3</sup> ]	[Kn/m <sup>3</sup> ]
Arena suelta	0.8	30	92	14.5
Arena densa	0.45	16	115	18
Arena limosa suelta	0.65	25	102	16
Arena limosa densa	0.4	15	120	19
Arcilla dura	0.6	21	108	17
Arcilla suave	0.9-1.4	30-50	73-92	11.5-14.5
Loes	0.9	25	86	13.5
Arcilla orgánica suave	2.5-3.2	90-120	38-51	06-ago
Morrena glacial	0.3	10	134	21

Fuente: (Mecánica de Suelos, Braja Dass) Ref [13]

Además se usan los ángulos de fricción internos reportados en el artículo “Seismic behavior of a buried gas pipeline under earthquake excitations” que son de 35° para la arena densa y de 0° para la arcilla.

Con estas propiedades se usa una hoja de cálculo para hallar la rigidez de los resortes que representan el suelo usando las ecuaciones mostradas en el capítulo 3.

**Tabla 8. Propiedades de los Resortes Representativos de los Suelos.**

<b>RIGIDEZ DE LOS RESORTES POR UNIDAD DE LONGITUD</b>				
		<b>Axial</b>	<b>Transversal</b>	<b>Vertical</b>
<b>Arena Densa</b>	<b>Rigidez por unidad de longitud</b>	<b>23.95</b>	<b>129.35</b>	<b>51.24</b>
	<b>D<sub>0</sub> desplazamiento</b>	<b>3</b>	<b>80</b>	<b>18.9</b>
<b>Arena Suelta</b>	<b>Rigidez por unidad de longitud</b>	<b>16.94</b>	<b>40.1</b>	<b>29.48</b>
	<b>D<sub>0</sub> desplazamiento</b>	<b>5</b>	<b>80</b>	<b>18.9</b>
<b>Arcilla Blanda</b>	<b>Rigidez por unidad de longitud</b>	<b>24.48</b>	<b>26.51</b>	<b>0.03</b>
	<b>D<sub>0</sub> desplazamiento</b>	<b>10</b>	<b>80</b>	<b>378.09</b>

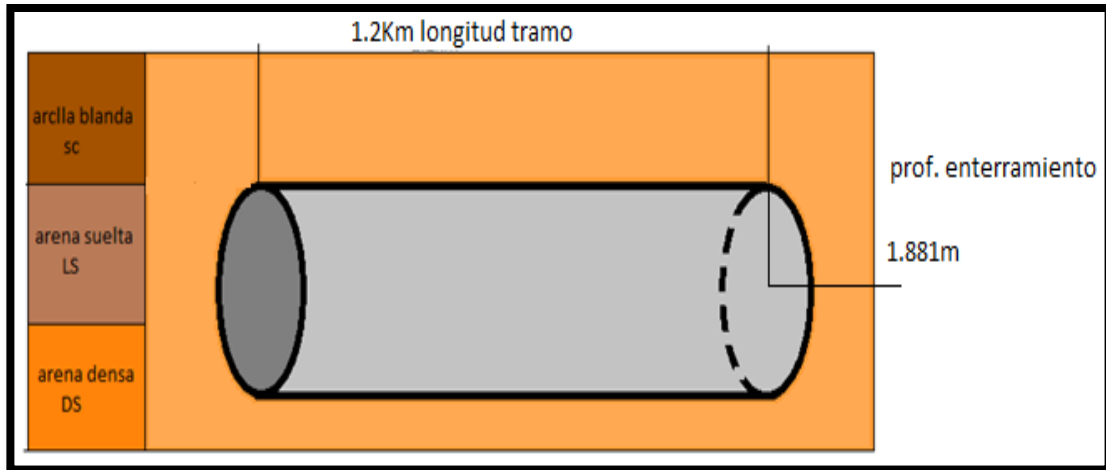
Fuente: los Autores del proyecto.

#### **5.2.4 Perfil del Tramo de Tubería**

El estudio de tubería se desarrolla a una profundidad de 1.881m que es muy similar a la profundidad de enterramiento de nuestras tuberías y considerando tramos rectos de 1.2 km como se muestra en la figura 13, para efectos de comparación. [Ref.3]

Para los extremos se trabajan las tres condiciones tratadas en el artículo “Seismic Behavior Under Earthquake Excitations”; [Ref.3] que son empotrado-empotrado, empotrado-articulado, articulado-articulado en busca de mantener la concordancia en el estudio y poder comparar los resultados obtenidos.

**Figura 13. Perfil del Modelo de Tubería.**



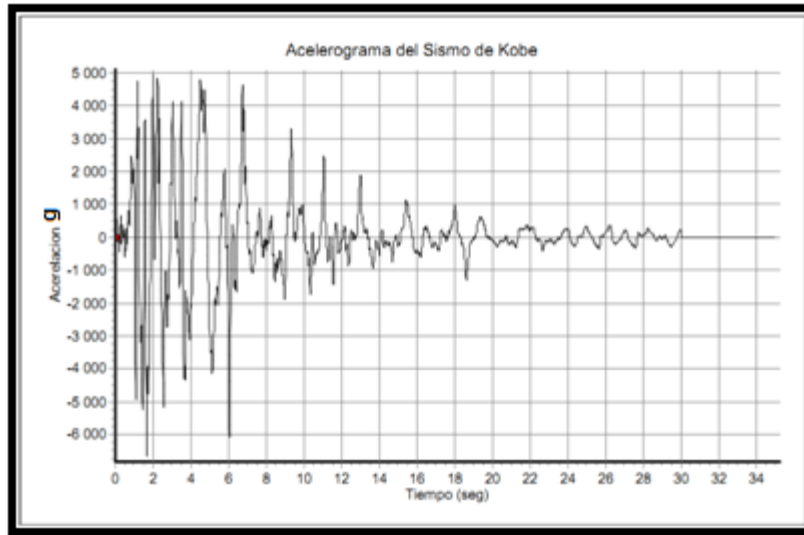
Fuente: los Autores del proyecto.

### **5.2.5 Acelerogramas de sismos**

Los dos acelerogramas empleados en el artículo “seismic behavior of a buried gas pipeline under earthquake excitations”. Del sismo de hyogo-ken nanbu en 1995 japon (estación kobe), [Ref.7].

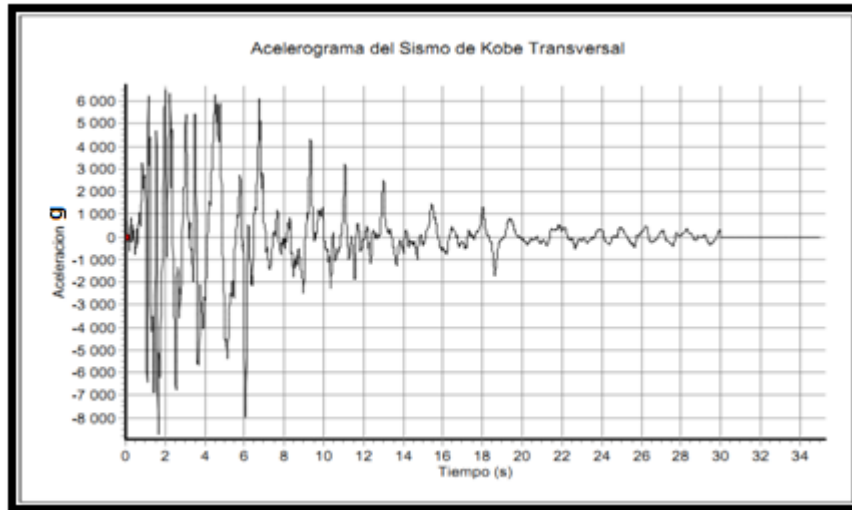
Se observan en las figuras 14 y 15 los acelerogramas en la dirección axial y transversal respectivamente. Tomados como tablas de valores de la [Ref.7] y presentados gráficamente con el programa SEUZ.NL.

**Figura 14. Registro de Acelerograma en dirección axial.**



Fuente: [Ref.7], programa SEUZ.NL.

**Figura 15. Registro de Acelerograma en dirección transversal.**



Fuente: [Ref.7], programa SEUZ.NL.

### 5.2.6 Montaje en el Software Seleccionado.

Explicaremos paso a paso como se desarrollo el modelo para una arena densa, los siguientes modelos se desarrollan de la misma manera, con los datos

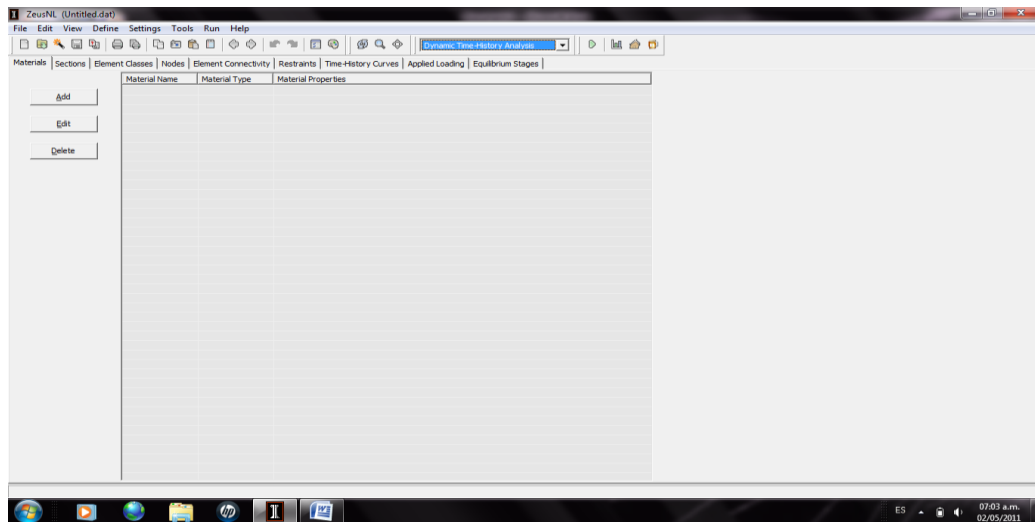
correspondientes para cada uno.

En cuanto a los otros modelos, presentaremos junto con el primero un análisis de resultados que fueron evaluados de igual manera.

Los montajes se hicieron en el programa ZEUS.NL. de la siguiente manera:

1. Al abrir el programa lo primero que se debe tener en cuenta son las unidades de trabajo, en este caso la fuerza se debe estar en [N] y la longitud en [mm].
2. En la barra de herramientas se debe escoger el análisis que se desea utilizar, para este caso utilizaremos un **análisis dinámico de tiempo-historia**.

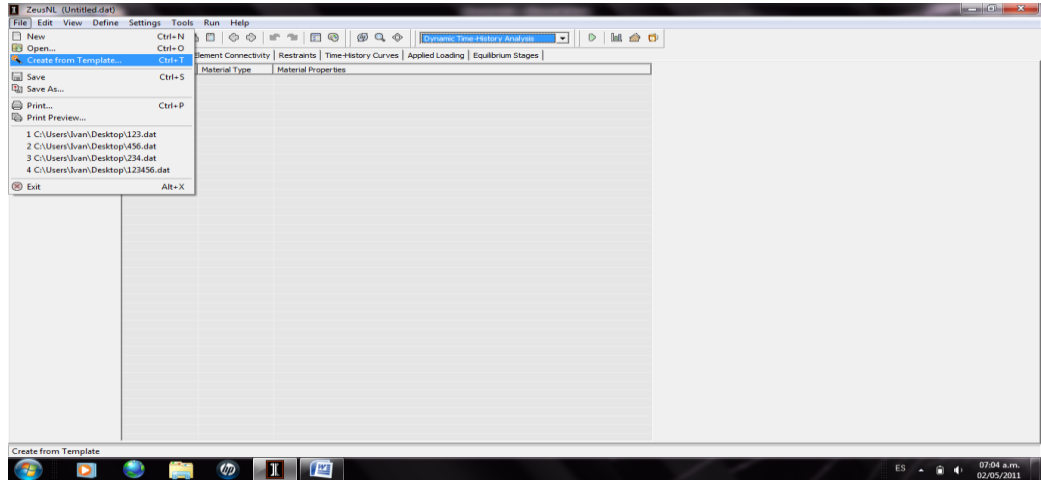
**Figura 16. Pantalla Inicial del Programa.**



Fuente: SEUZ.NL.

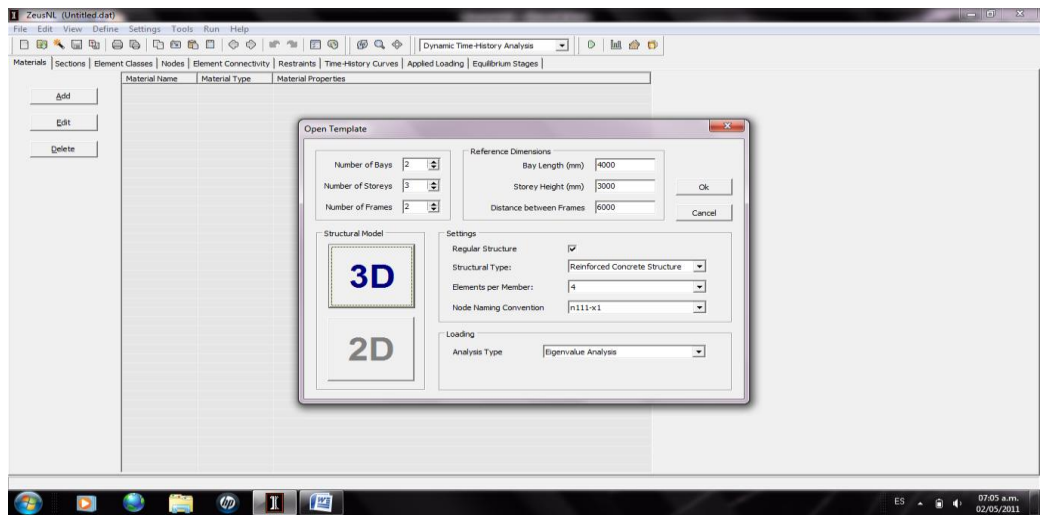
3. **plantilla o template:** el cual proporciona una visualización de la estructura a analizar, en conjunto se define el acelerograma a utilizar. **Nota:** todos estos datos son modificables luego se puede saltar este paso.

**Figura 17. Definición de la plantilla.**



Fuente: SEUZ.NL.

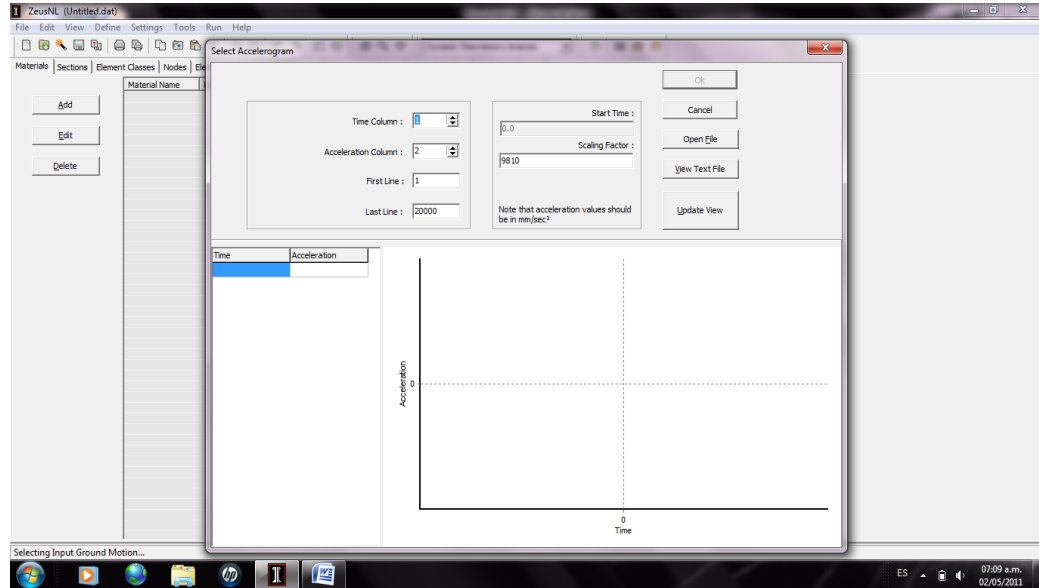
**Figura 18. Definición de la estructura.**



Fuente: SEUZ.NL.

En el caso de seleccionar trabajar desde la plantilla se debe ingresar el sismo con el que se va a trabajar.

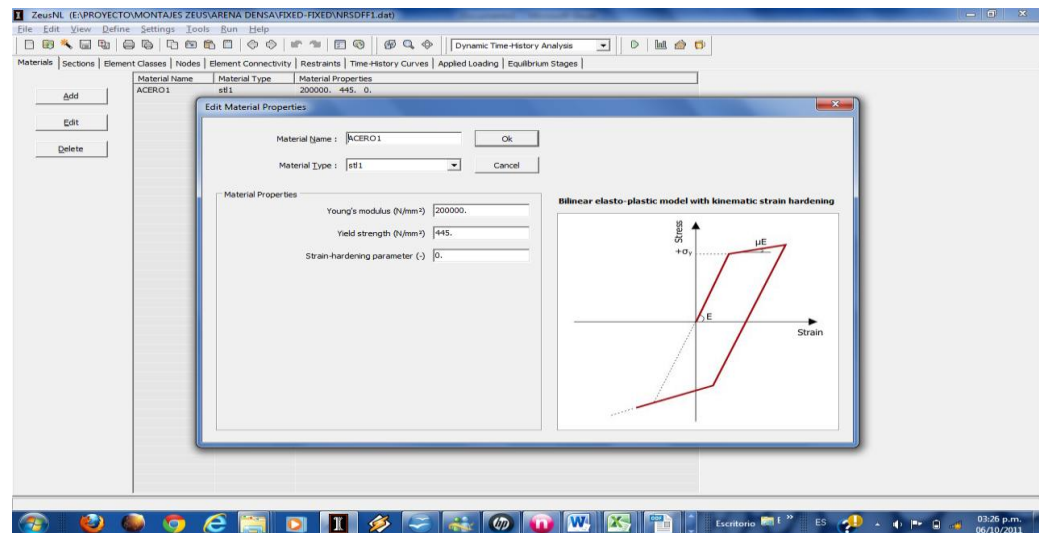
**Figura 19. Definición de acelerograma.**



Fuente: SEUZ.NL.

- 4. Materiales:** agregamos el tipo de material y el nombre del mismo. Utilizando el método bilineal elasto-plástico que el software tiene en su librería para hacer el análisis. Como se especificó en el numeral 3.1 en la figura 8.

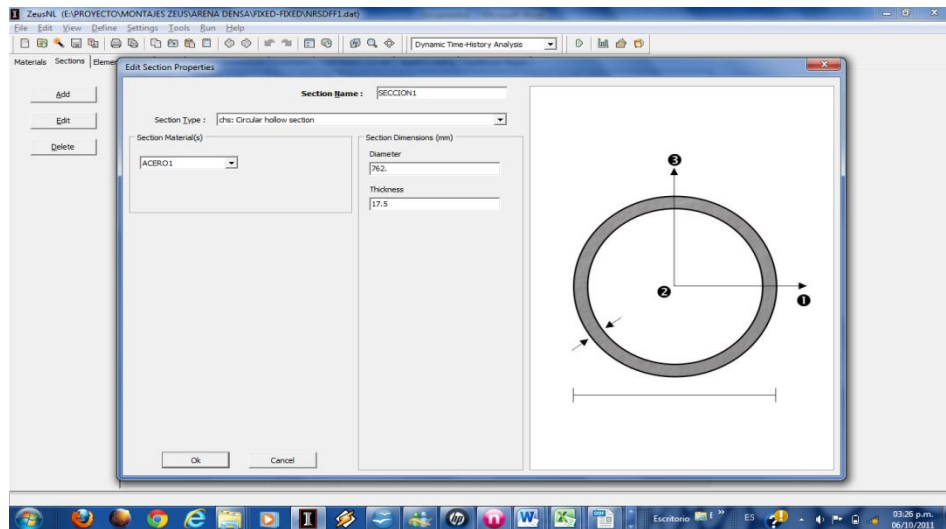
**Figura 20. Selección del material.**



Fuente: SEUZ.NL.

5. **Sección:** Se agrega el nombre y tipo de sección transversal, enlazado al material utilizado.

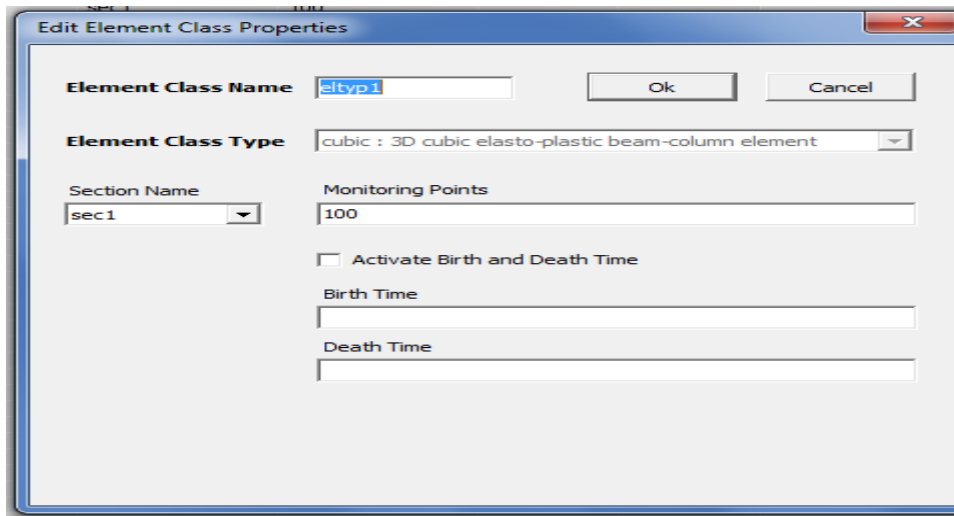
**Figura 21. Tipo de sección transversal.**



Fuente: SEUZ.NL.

6. **Elementos de clase:** Se crean tres tipos de elementos de clase, de los seis que dispone la librería del programa; (**cubic**, **joint**, **Imass**, **dmass**, **ddamp**, **rdamp**), para este análisis:
- **Cubico:** el cual nos representa el modelo de elementos de línea con formulación cubica inelástica.

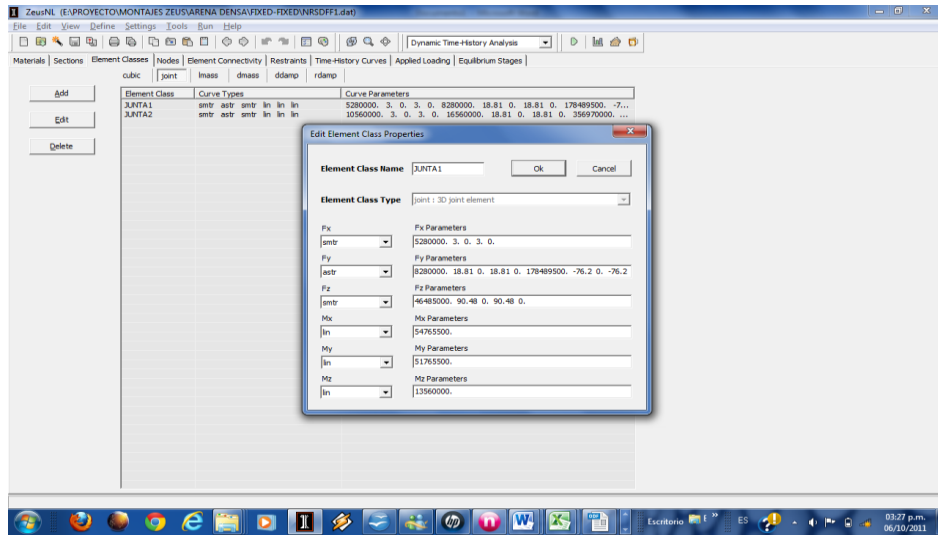
**Figura 22. Elección del elemento de clase para la tubería.**



Fuente: SEUZ.NL.

- **Junta:** este elemento de clase nos permite modelar el suelo por medio de resortes helicoidales no lineales en tres dimensiones, esto nos representa el modelo de fundaciones de winkler. Y además es el medio por el cual se presenta la interacción suelo estructura. **Nota:** las juntas se representan en coordenadas locales, se indica para el paso 8, en el cual los nodos de la estructura deben conectarse en coordenadas locales para su representación.

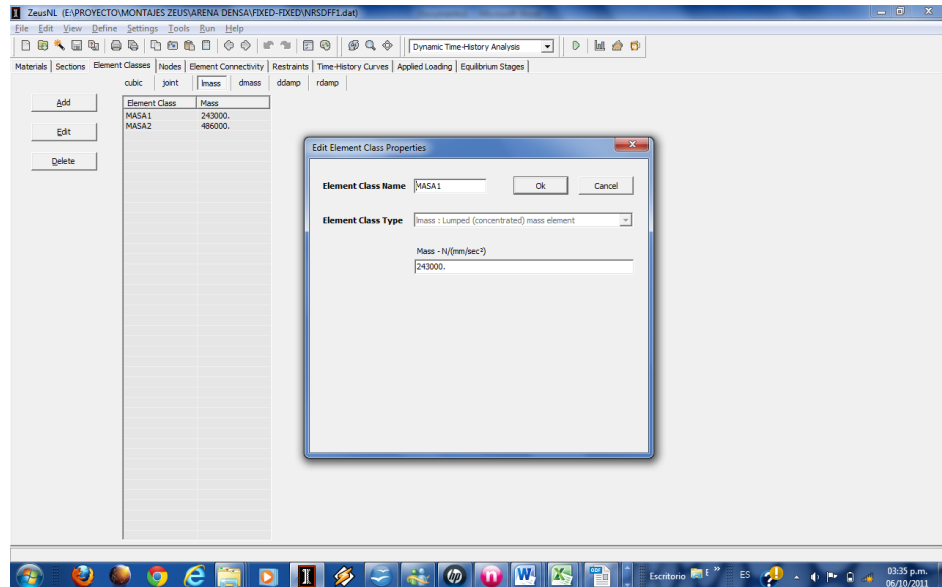
**Figura 23. Elección del elemento de junta para representar el suelo.**



Fuente: SEUZ.NL.

- **Masa:** Se presenta con dos componentes ya que puedo agregar la masa del sistema tanto distribuida como concentrada, permitiendo el desacople para el análisis de resultados. Se optó este modelo de masa concentrada porque para hacer una comparación en ciertos puntos del sistema es más consistente debido al desacople del mismo.

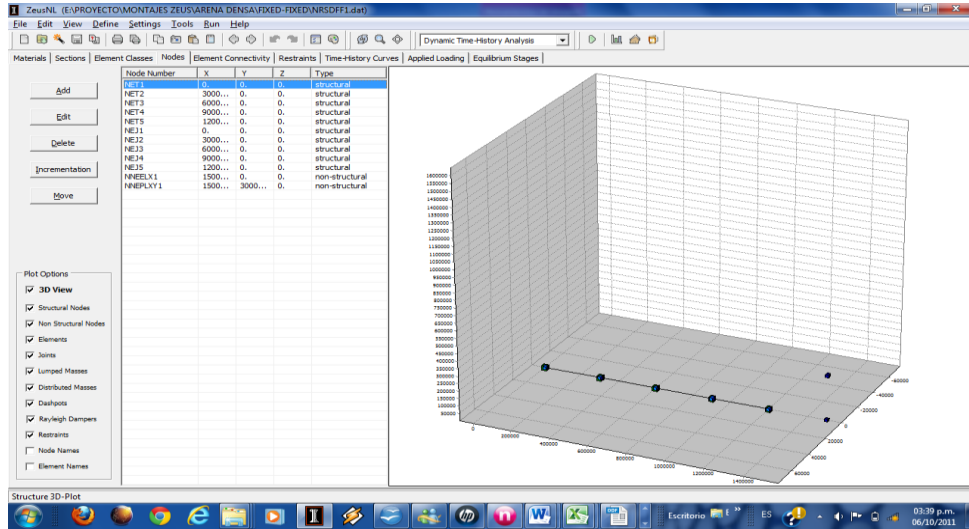
**Figura 24. Representación de la masa del sistema.**



Fuente: SEUZ.NL.

- 7. Nodos:** en este paso si utilizó el paso 3. Hay que hacer las modificaciones necesarias para el montaje geométrico de la estructura, teniendo en cuenta todos los pasos definidos anteriormente, si no se utilizó el paso 3, entonces solamente hay que anexar los nodos que me definen la geometría de la estructura. **Nota:** estos nodos pueden ser estructurales y no estructurales dependiendo del sistema como se trato anteriormente.

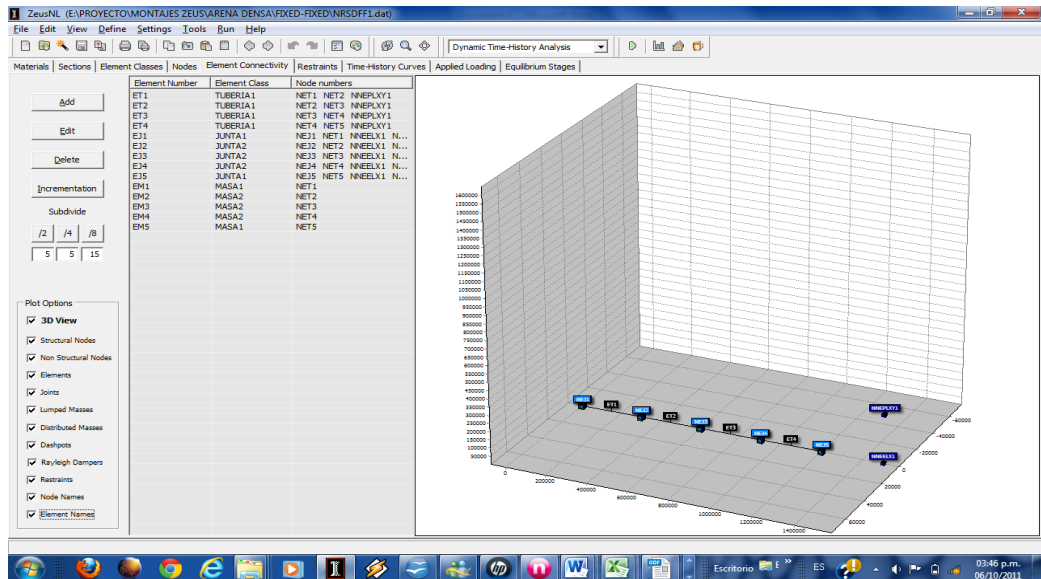
Figura 25. Nodos de la estructura.



Fuente: SEUZ.NL.

8. **Elementos de conectividad:** al tener todos los nodos que representan el sistema, estos se deben conectar; para este paso se debe tener en cuenta el paso 6, ya que este me provee la clase de elemento que quiero para conectar dos nodos.

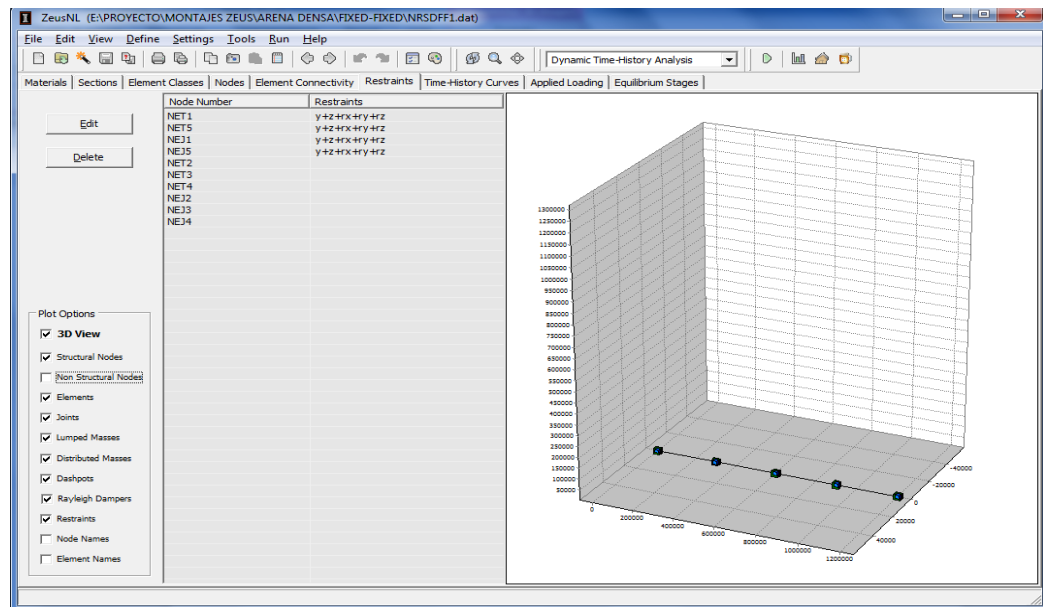
Figura 26. Conectividad de los elementos.



Fuente: SEUZ.NL.

9. **Restricciones:** Se definen cuales nodos deben ser liberados o atados para obtener resultados en las direcciones requeridas por el análisis teniendo en cuenta su sistema de coordenadas globales. **Nota:** el software indica que hay que liberar los nodos en la dirección en que se dirige el sismo con sus debidas componentes.

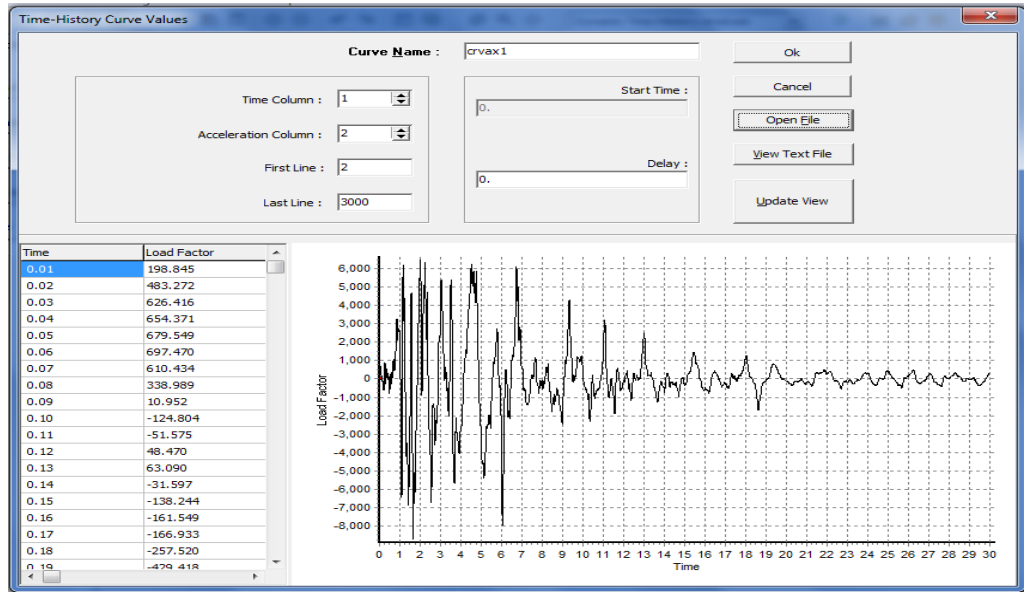
Figura 27. Restricciones de la tubería en los extremos.



Fuente: SEUZ.NL.

10. **Curvas tiempo-historia:** en este paso se agregaron las curvas de los acelerogramas en función del tiempo requeridas para el análisis; en este caso los acelerogramas de los sismos de northridge y kobe respectivamente.

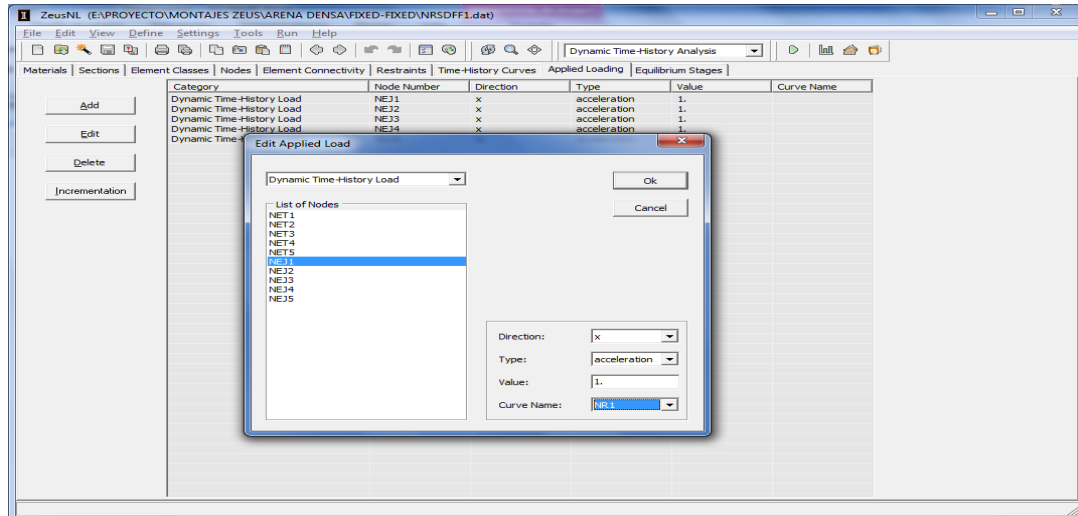
Figura 28. Menú de curvas de carga donde se agregan los acelerogramas.



Fuente: SEUZ.NL.

**11. Aplicación de carga:** ZEUS.NL. presenta una librería de aplicación. (anexo: manual del programa). En el estudio la carga la proporcionaba el sismo, entonces se cargaron con las aceleraciones del mismo; los respectivos nodos de análisis con su respectiva dirección. **Nota:** hay que tener en cuenta las unidades en las que se encuentra el acelerograma en la base de datos, ya que al montarlo en el programa, este tiene un factor de conversión preestablecido.

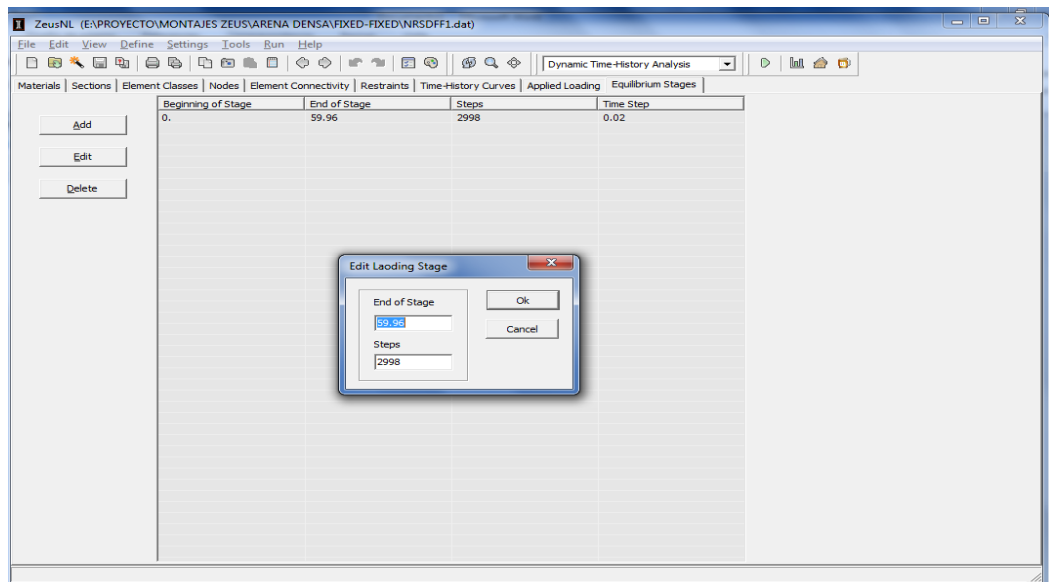
Figura 29. Cargas y dirección de aplicación.



Fuente: SEUZ.NL.

**12. Equilibrio de etapas:** con este paso culminaríamos con el montaje requerido para poner el programa a correr y obtener resultados; **Nota:** el programa por defecto asume este equilibrio para puntualizar el análisis tiempo-historia y agrupar el sistema en estudio. Este análisis depende de la duración y el paso del sismo.

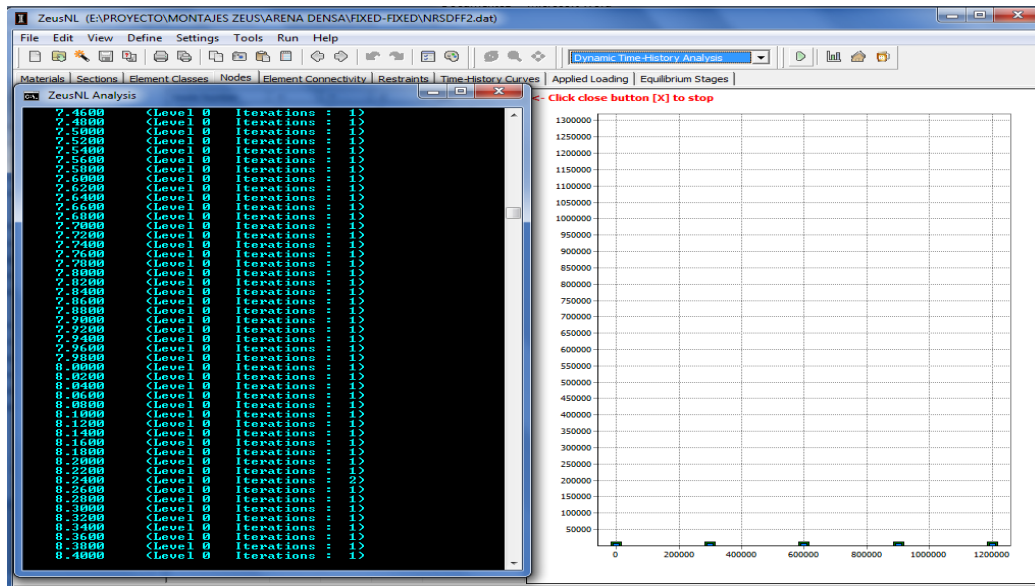
Figura 30. Insertando las etapas.



Fuente: SEUZ.NL.

**13.Correr:** el programa compila los datos y efectúa un análisis iterativo para enviar resultados, los cuales se muestran como: (archivos.num), que son necesarios para ingresar al post procesador y al visor de forma deformada, que se encuentran en la barra de herramientas al lado del icono correr; en donde se muestran los resultados del análisis.

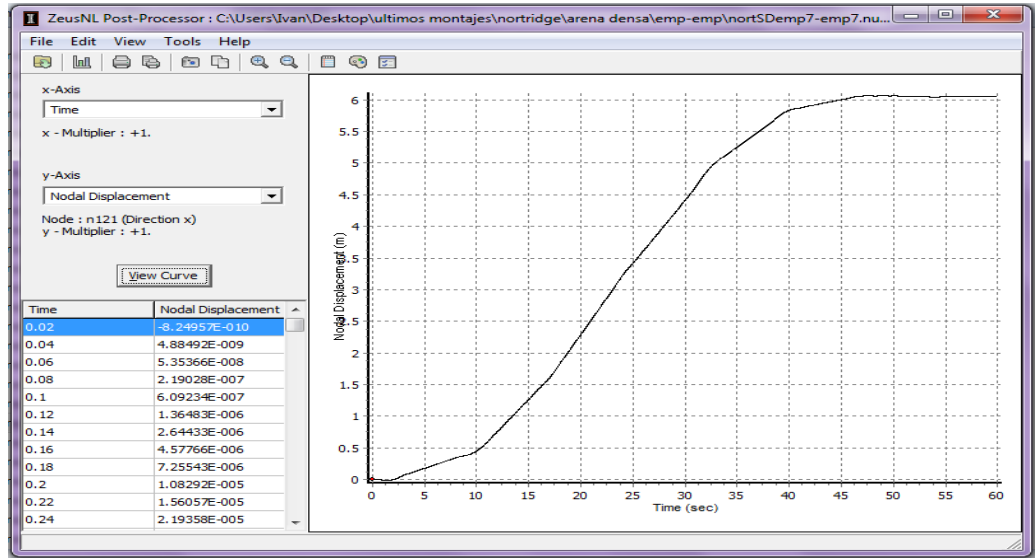
**Figura 31. Ejecución del programa.**



Fuente: SEUZ.NL.

**14.Post-procesador:** con este paso se tiene una gran cantidad de análisis que el programa efectúa, encontramos desplazamientos, fuerzas en los nodos o en los elementos, cortantes, momentos y se pueden visualizar estos análisis por medio de gráficos ya que son tabulados.

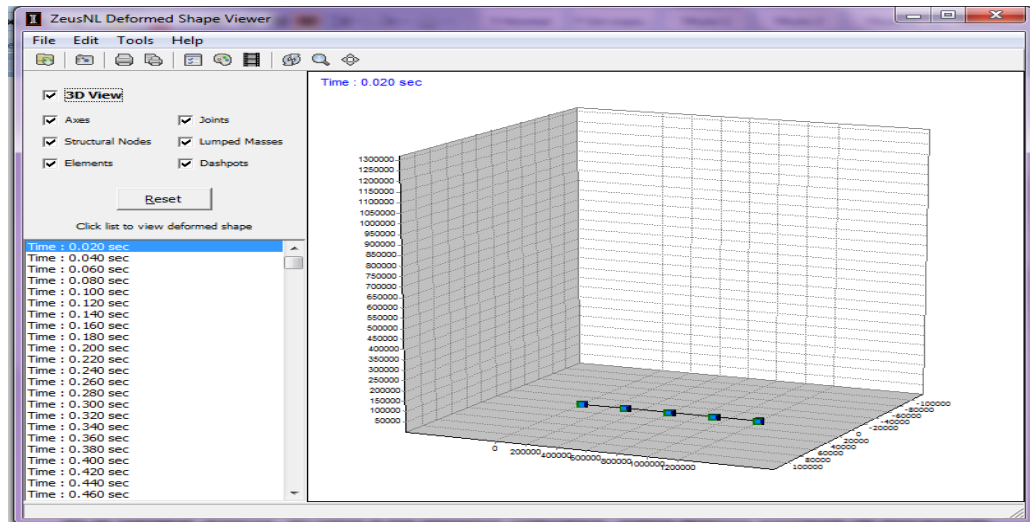
Figura 32. Menú del post- procesador.



Fuente: SEUZ.NL.

**15. Visor de forma deformada:** este paso presenta una imagen de la estructura deformada en cada instante de tiempo, es importante saber en la discretización del tiempo como es el comportamiento de la estructura.

Figura 33. Menú de forma deformada.



Fuente: SEUZ.NL.

## 6. VERIFICACION DEL MODELO

Para dar verificación de los resultados aquí presentados se empleo el artículo “seismic behavior of a buried gas pipeline under earthquake excitations” [Ref.3]. Se realizaron interpretaciones en el modelo desarrollado en el numeral anterior, con base en los estudios realizados sobre análisis sísmicos de estructuras, suelos y su interacción. Los modelos se montaron tratando de llegar a unos análisis coherentes dado que en algunas situaciones no se presentaban los datos de una forma explícita sino deducible y dependiente de otros parámetros o gráficos que se empleaban en el artículo. [Ref. 3]

En este estudio se tuvieron en cuenta dos puntos de comparación:

- Desplazamientos longitudinales y transversales
- Capacidad de la tubería enterrada; (desplazamientos y deformaciones permitidas por kogas).

Obtenemos los siguientes resultados:

### 6.1 DESPLAZAMIENTOS LONGITUDINALES Y TRANSVERSALES:

Se presenta una parte de los datos de los desplazamientos en [mm] [tabla 9], tanto del suelo como la tubería en función del tiempo, por cuestiones de resumen, debido a la gran cantidad de datos ya que el  $\Delta t = 0.02$  seg; se resalta en rojo el desplazamiento máximo de la tubería que se da en un tiempo de 47.54 seg. Que es el que se usa para realizar los análisis pertinentes.

**Tabla 9. Resultados de Desplazamientos del Montaje de Verificación.**

Time	n121-x1	n121	n122-x1	n122	n123-x1	n123	n124-x1	n124	n125-x1	n125
47.4	6030.51	6069.06	6030.51	6069.06	6030.51	6069.06	6030.51	6069.06	6030.51	6069.06
47.42	6030.17	6069.21	6030.17	6069.21	6030.17	6069.21	6030.17	6069.21	6030.17	6069.21
47.44	6029.86	6069.33	6029.86	6069.33	6029.86	6069.33	6029.86	6069.33	6029.86	6069.33
47.46	6029.57	6069.43	6029.57	6069.43	6029.57	6069.43	6029.57	6069.43	6029.57	6069.43
47.48	6029.29	6069.5	6029.29	6069.5	6029.29	6069.5	6029.29	6069.5	6029.29	6069.5
47.5	6029.06	6069.55	6029.06	6069.55	6029.06	6069.55	6029.06	6069.55	6029.06	6069.55
47.52	6028.88	6069.56	6028.88	6069.56	6028.88	6069.56	6028.88	6069.56	6028.88	6069.56
47.54	6028.76	6069.56	6028.76	6069.56	6028.76	6069.56	6028.76	6069.56	6028.76	6069.56
47.56	6028.65	6069.52	6028.65	6069.52	6028.65	6069.52	6028.65	6069.52	6028.65	6069.52
47.58	6028.5	6069.46	6028.5	6069.46	6028.5	6069.46	6028.5	6069.46	6028.5	6069.46
47.6	6028.29	6069.38	6028.29	6069.38	6028.29	6069.38	6028.29	6069.38	6028.29	6069.38
47.62	6028.02	6069.26	6028.02	6069.26	6028.02	6069.26	6028.02	6069.26	6028.02	6069.26
47.64	6027.75	6069.13	6027.75	6069.13	6027.75	6069.13	6027.75	6069.13	6027.75	6069.13
47.66	6027.5	6068.96	6027.5	6068.96	6027.5	6068.96	6027.5	6068.96	6027.5	6068.96
47.68	6027.28	6068.77	6027.28	6068.77	6027.28	6068.77	6027.28	6068.77	6027.28	6068.77
47.7	6027.13	6068.55	6027.13	6068.55	6027.13	6068.55	6027.13	6068.55	6027.13	6068.55
47.72	6027.04	6068.31	6027.04	6068.31	6027.04	6068.31	6027.04	6068.31	6027.04	6068.31
47.74	6026.99	6068.05	6026.99	6068.05	6026.99	6068.05	6026.99	6068.05	6026.99	6068.05
47.76	6026.95	6067.76	6026.95	6067.76	6026.95	6067.76	6026.95	6067.76	6026.95	6067.76
47.78	6026.94	6067.45	6026.94	6067.45	6026.94	6067.45	6026.94	6067.45	6026.94	6067.45
47.8	6026.94	6067.13	6026.94	6067.13	6026.94	6067.13	6026.94	6067.13	6026.94	6067.13
47.82	6026.95	6066.79	6026.95	6066.79	6026.95	6066.79	6026.95	6066.79	6026.95	6066.79
47.84	6026.97	6066.44	6026.97	6066.44	6026.97	6066.44	6026.97	6066.44	6026.97	6066.44

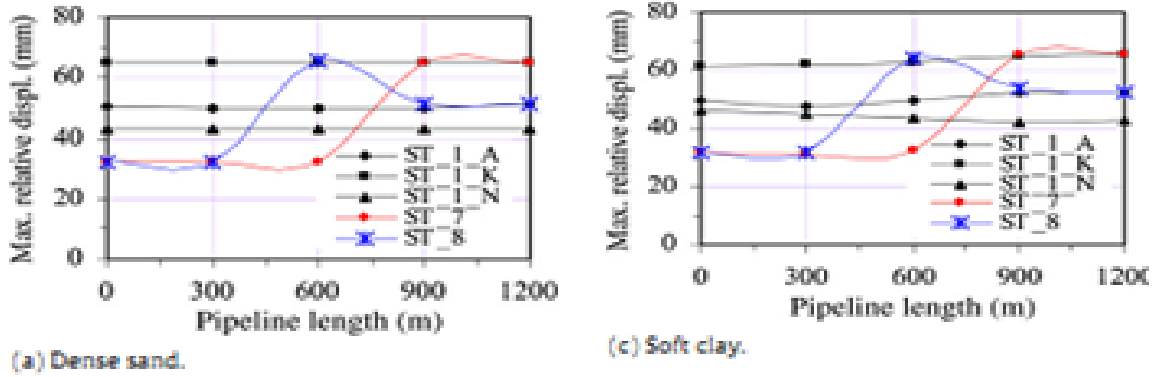
Fuente: SEUZ.NL.

De esta tabla evaluamos los resultados para obtener los desplazamientos relativos entre el suelo y la tubería en un mismo punto de análisis: Estos desplazamientos se encuentran con la diferencia entre los valores de la tubería y los del suelo respectivamente:  $n121 - n121-x1 = 40.8$  mm. Encontrando que para cada punto de análisis se presenta un valor de desplazamiento relativo constante entre la tubería y el suelo en la dirección axial.

### 6.1.1 Máxima Respuesta al Desplazamiento Relativo de la Tubería en la Dirección Axial

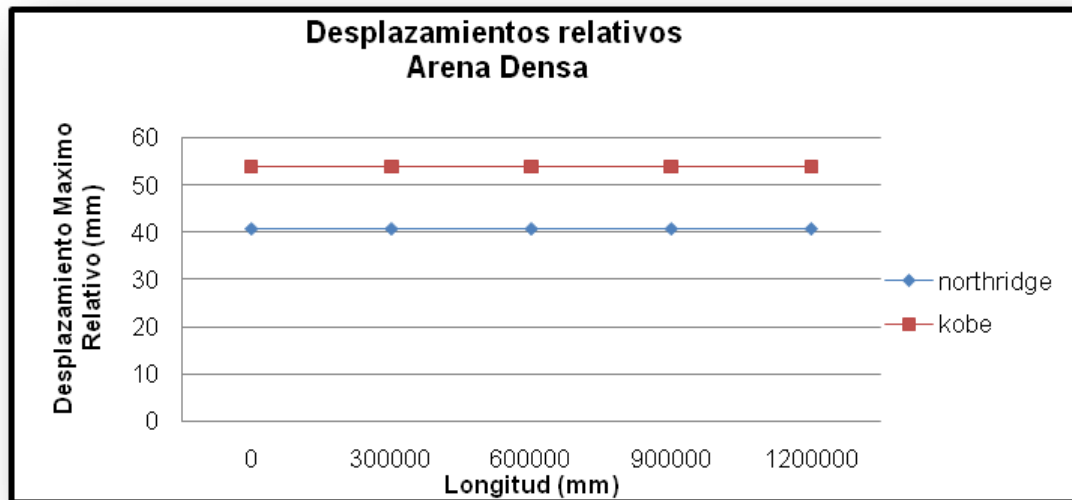
Para una condición de empotrado – empotrado, la Gráfica proporcionada por el artículo en comparación: donde ST\_1K y ST1\_N corresponden a los desplazamientos bajo los sismos de Kobe y Northridge respectivamente en dirección axial.

**Figura 34. Cuadro Comparativo de Desplazamientos Relativos**



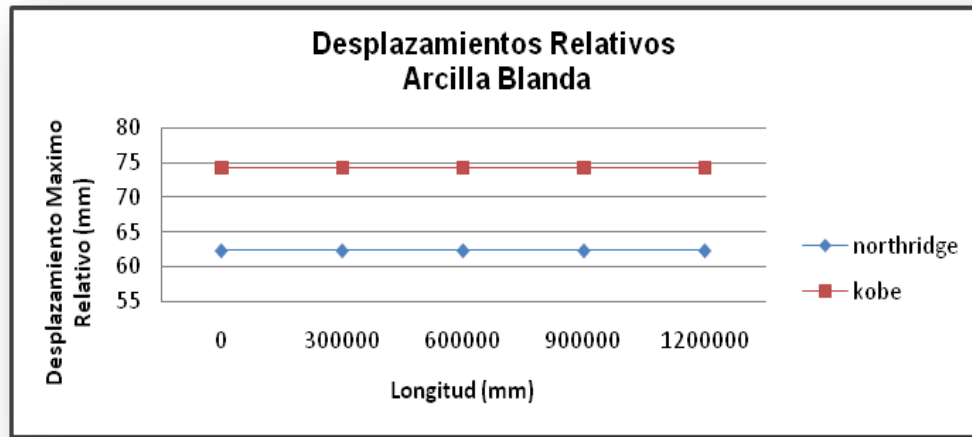
Fuente: article "Seismic behavior of a buried gas pipeline under earthquake excitations", [Ref.3]

**Figura 35. Desplazamiento Relativo Arena Densa Sentido Axial.**



Fuente: los Autores del proyecto.

**Figura 36. Desplazamiento Relativo Arcilla blanda Sentido axial.**

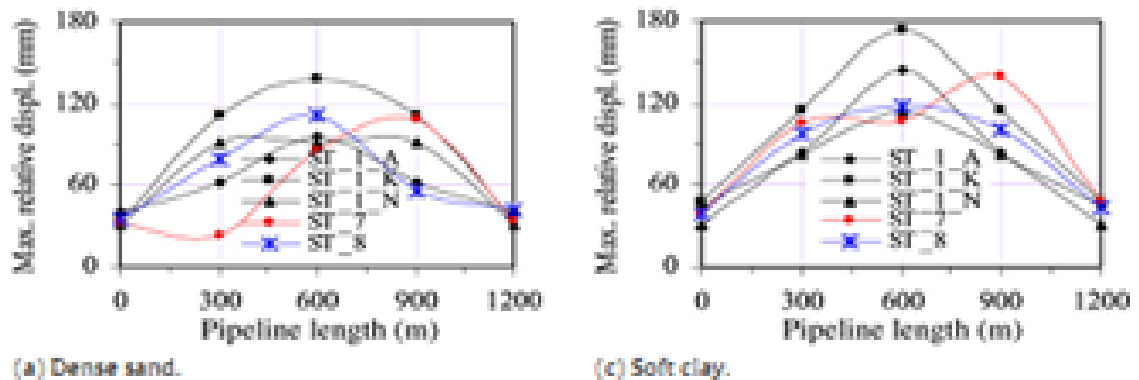


Fuente: los Autores del proyecto.

### 6.1.2 Máxima Respuesta al Desplazamiento Relativo de la Tubería en la Dirección Transversal.

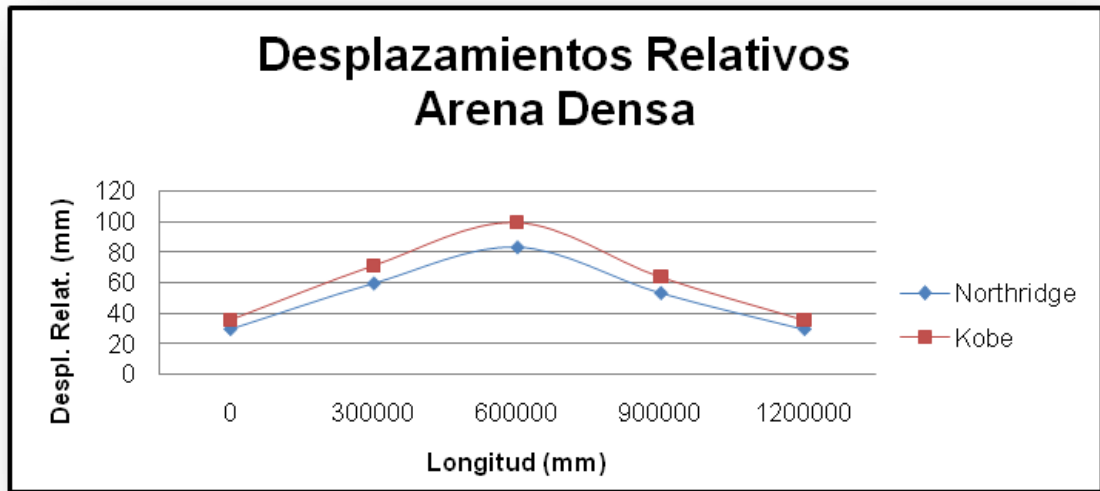
Para una condición de empotrado- empotrado, la Gráfica proporcionada por el artículo en comparación: donde ST\_1K y ST1\_N corresponden a los desplazamientos bajo los sismos de Kobe y Northridge en dirección transversal.

**Figura 37. Cuadro Comparativo de Desplazamientos Relativos**



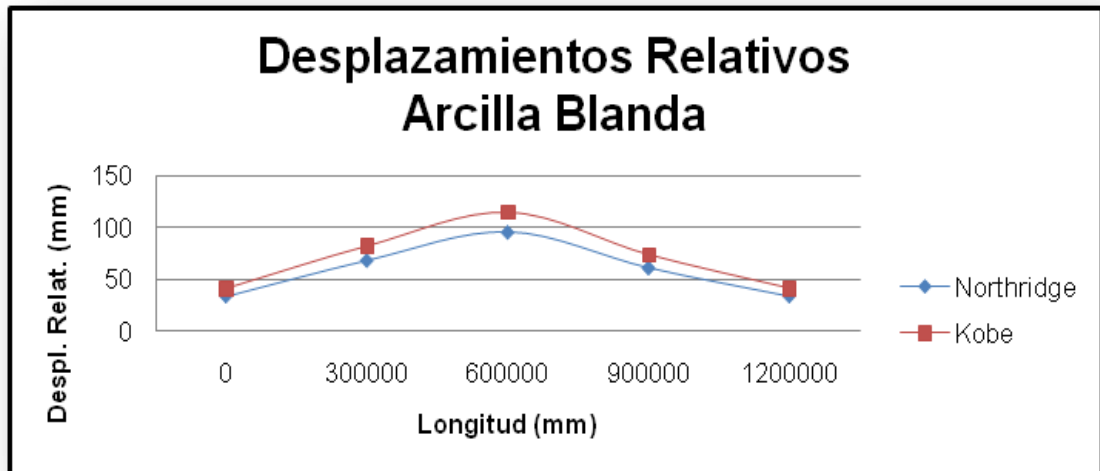
Fuente: article "Seismic behavior of a buried gas pipeline under earthquake excitations", [Ref.3]

**Figura 38. Desplazamiento Relativo Arena Densa Sentido Transversal.**



Fuente: los Autores del proyecto.

**Figura 39. Desplazamiento Relativo Arcilla blanda Sentido Transversal.**



Fuente: los Autores del proyecto.

Se analizó el desplazamiento máximo relativo de la tubería, en dirección axial y en dirección transversal para los dos sismos utilizados teniendo en cuenta:

- El tipo de suelo que más se desplaza, en esta condición es la arcilla blanda; verificando que cumplan con la norma para tuberías de KOGAS. [Ref.10].
- La tubería se encuentra sujeta a una estructura la cuál provee una gran resistencia al desplazamiento, es decir que uno de sus extremos esta fijo a otro sistema de referencia.
- Al analizar las respuestas obtenidas notamos que los mayores desplazamientos se producen bajo la acción del sismo JMA Kobe, por lo que se decide trabajar con este sismo los montajes para los análisis de la ciudad.

## **7. APLICACION EN UN TRAMO DE TUBERIA EN BUCARAMANGA**

### **7.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS**

Para los análisis de los resultados se estudian primero los desplazamientos de la tubería, los desplazamientos totales y los desplazamientos relativos. En el primero de ellos se observa la respuesta general al desplazamiento y con la segunda nos enfocamos más en el comportamiento de la interacción suelo-tubería.

Con relación a los resultados en los desplazamientos generales se observan altos valores para todos los casos lo que nos indica este ítem no parece verse afectado por el tipo de suelo en el que se encuentre la tubería; esto no implica que no haya una interacción suelo tubería, indica que los desplazamientos en este caso se presentan a un nivel más bajo.

Se observa también que los elementos sometidos a empotramiento son los que sufren las mayores deformaciones.

En este caso se evidencia que estos elementos muestran mayor fragilidad; en este ítem se nota que se debería estudiar los casos en que los extremos de la tubería se encuentran articulados.

### **7.1.1 Análisis de Desplazamientos Axiales**

En los desplazamientos relativos se observan diferencias entre la arena y la arcilla, aunque es leve, indica que esta diferencia está dada más por las propiedades de la tubería que por resistencia de los suelos.

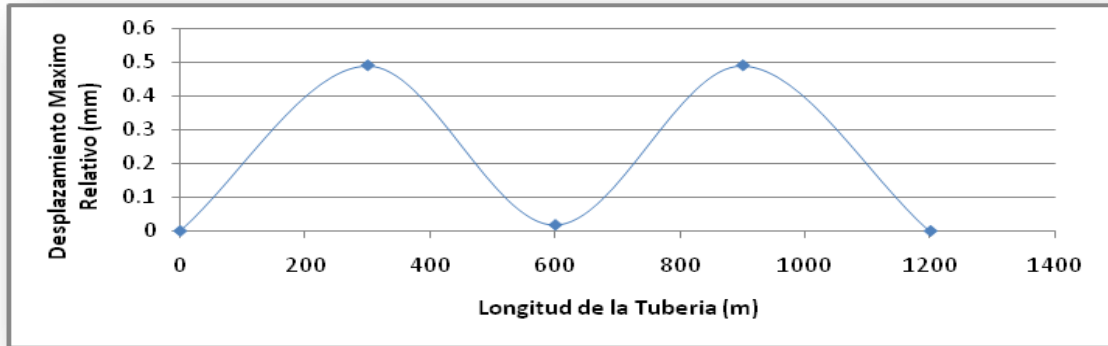
Para la arcilla como se dijo anteriormente los desplazamientos generales muestran datos que superan los valores máximos permitidos. (Tabla 6. [Ref.3] y [Ref.10]) Esto cobra especial cuidado en la condición empotrado-empotrado ya que es en estos elementos donde se concentra la mayor parte de la deformación causada.

Al analizar los desplazamientos relativos, se observa para la condición articulado-articulado una disminución en el desplazamiento a partir de la mitad de la tubería.

Para los desplazamientos generales en la arena, se muestran los mismos comportamientos que los presentados en la arcilla. En el caso de los desplazamientos relativos este desplazamiento no presenta la variación que se presento en la arcilla en la condición articulada-articulada.

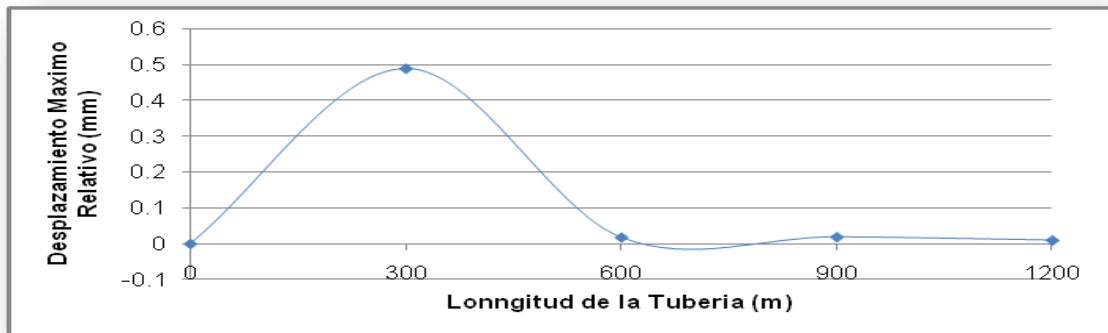
7.1.1.1 Arcilla Blanda. Análisis para considerar las condiciones de restricción.

**Figura 40. Desplazamiento Relativo Axial Empotrado-Empotrado.**



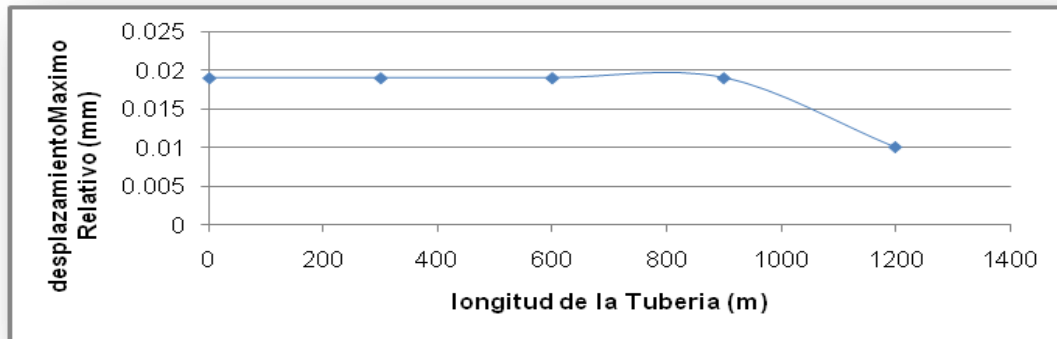
Fuente: Los Autores del proyecto

**Figura 41. Desplazamiento Relativo Axial Empotrado-Articulado.**



Fuente: Los Autores del proyecto

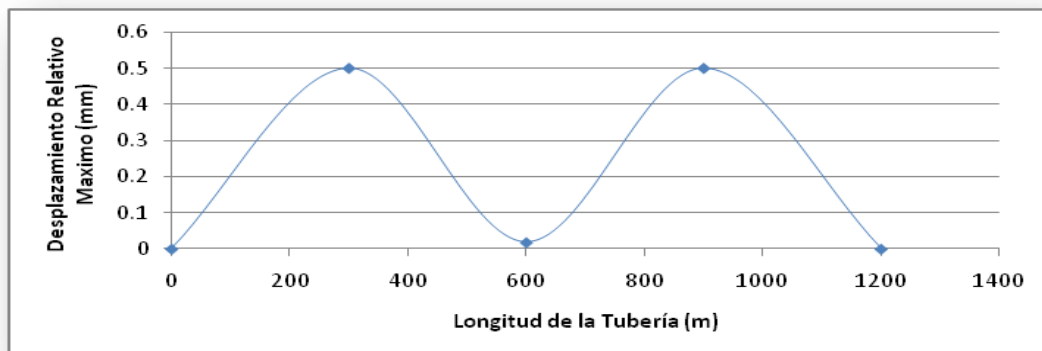
**Figura 42. Desplazamiento Relativo Axial Articulado-Articulado.**



Fuente: Los Autores del proyecto

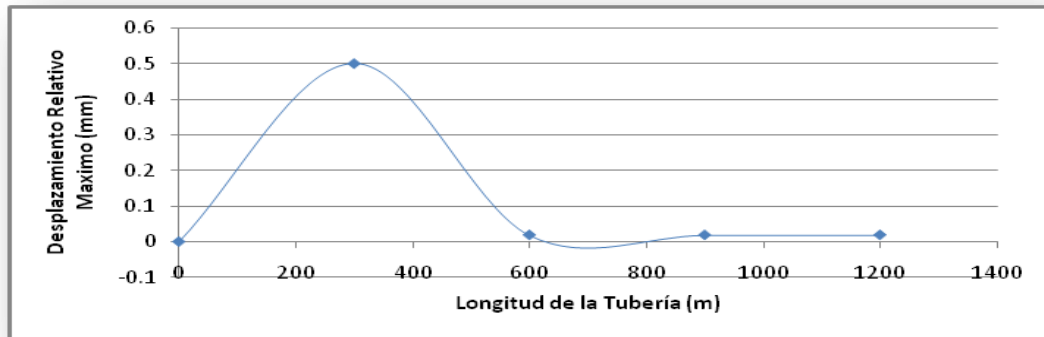
**7.1.1.2 Arena Densa: Análisis para considerar las condiciones de restricción.**

**Figura 43. Desplazamiento Relativo Axial Empotrado-Empotrado.**



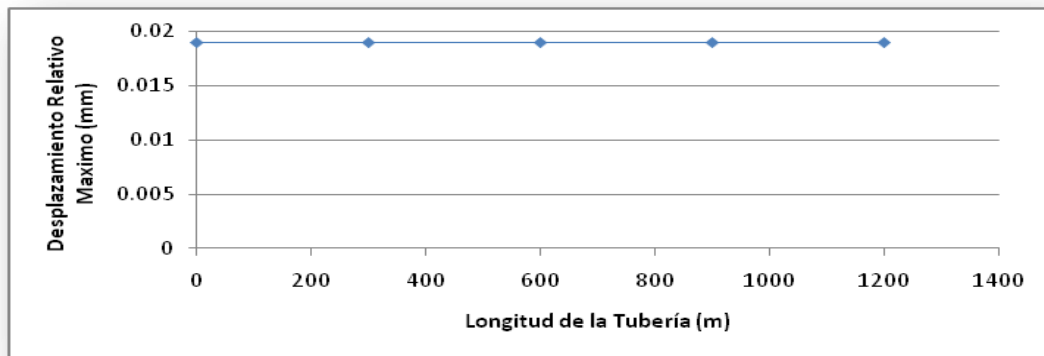
Fuente: Los Autores del proyecto

**Figura 44. Desplazamiento Relativo Axial Empotrado-Articulado.**



Fuente: Los Autores del proyecto

**Figura 45. Desplazamiento Relativo Axial Articulado-Articulado.**



Fuente: Los Autores del proyecto

### 7.1.2 Análisis de Desplazamientos Transversales

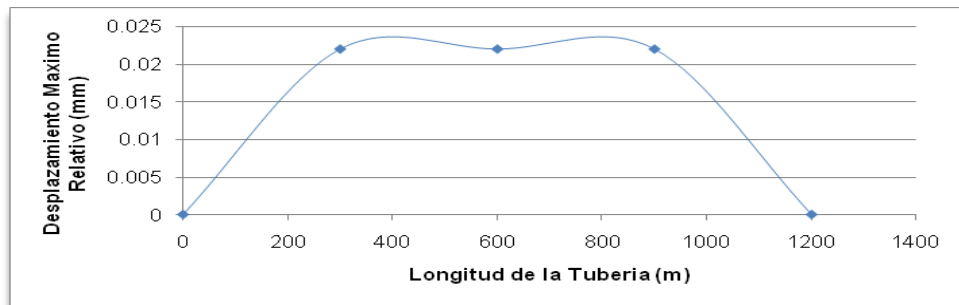
Para la arcilla los desplazamientos transversales muestran un comportamiento similar al axial, en el que los desplazamientos totales superan los permitidos, (Tabla 6. [Ref.3] y [Ref.10]) y nuevamente la interacción suelo-tubería se presenta en niveles pequeños; el caso crítico se presenta en los empotramientos ya que en estos puntos es donde se concentra el desplazamiento.

Se observa una disminución de los desplazamientos relativos en el caso de la condición articulado-articulado a partir de la mitad de la tubería.

Para la arena los desplazamientos transversales muestran los mismos comportamientos de la arcilla pero en este punto se nota una mayor interacción suelo-tubería ya que los desplazamientos relativos disminuyen en todas las condiciones de los extremos.

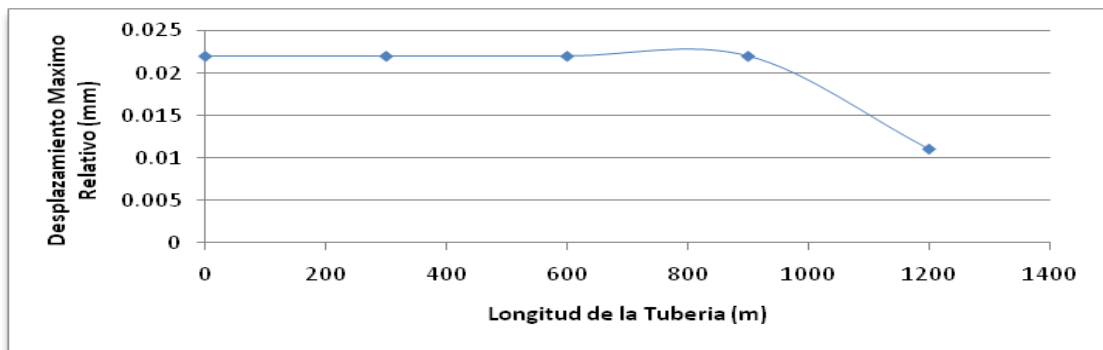
### 7.1.2.1 Arcilla Blanda. Análisis para considerar las condiciones de restricción.

**Figura 46. Máximo Desplazamiento Relativo Transversal Arcilla condición Empotrado-Empotrado.**



Fuente: los Autores de proyecto.

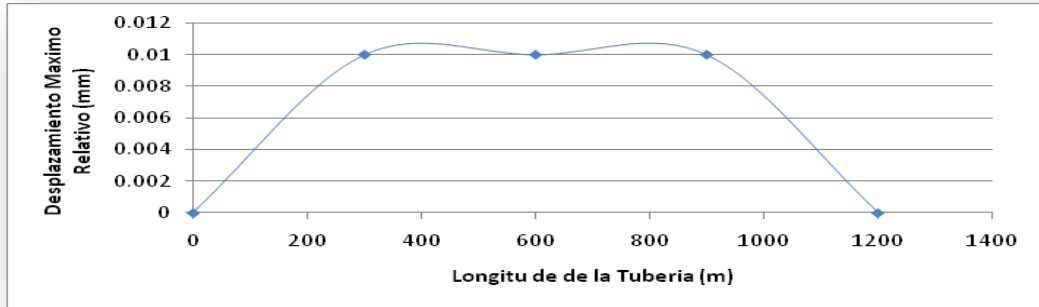
**Figura 47.1 Máximo Desplazamiento Transversal Relativo Arcilla condición Articulado-Articulado.**



Fuente: los Autores de proyecto.

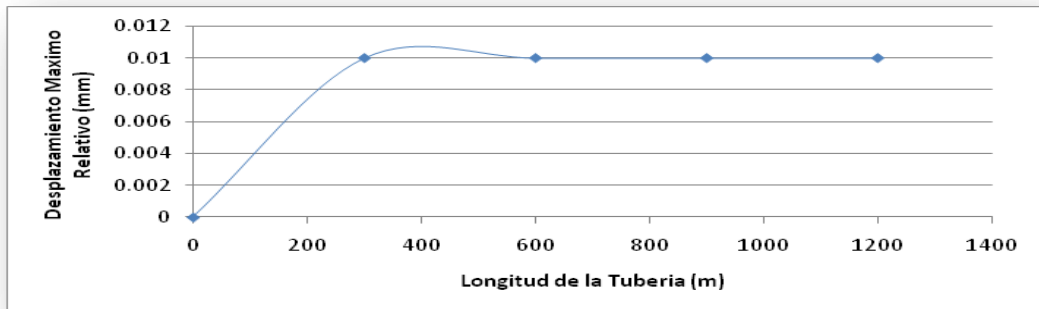
7.1.2.2 Arena Densa. Análisis para considerar las condiciones de restricción.

**Figura 48. Máximo Desplazamiento Relativo Transversal de la Arena Densa condición Empotrado-Empotrado.**



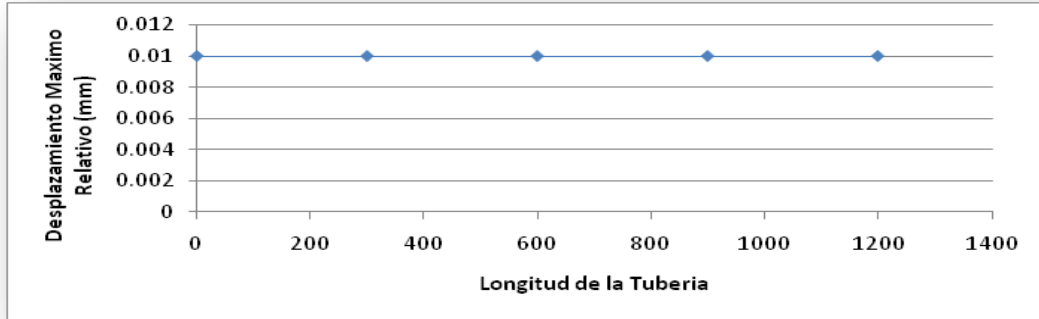
Fuente: los Autores de proyecto.

**Figura 49. Máximo Desplazamiento Relativo Transversal de la Arena Densa Condición Empotrado-Articulado.**



Fuente: los Autores de proyecto.

**Figura 50. Máximo Desplazamiento Relativo Transversal de la Arena Densa Condición Articulado-Articulado.**

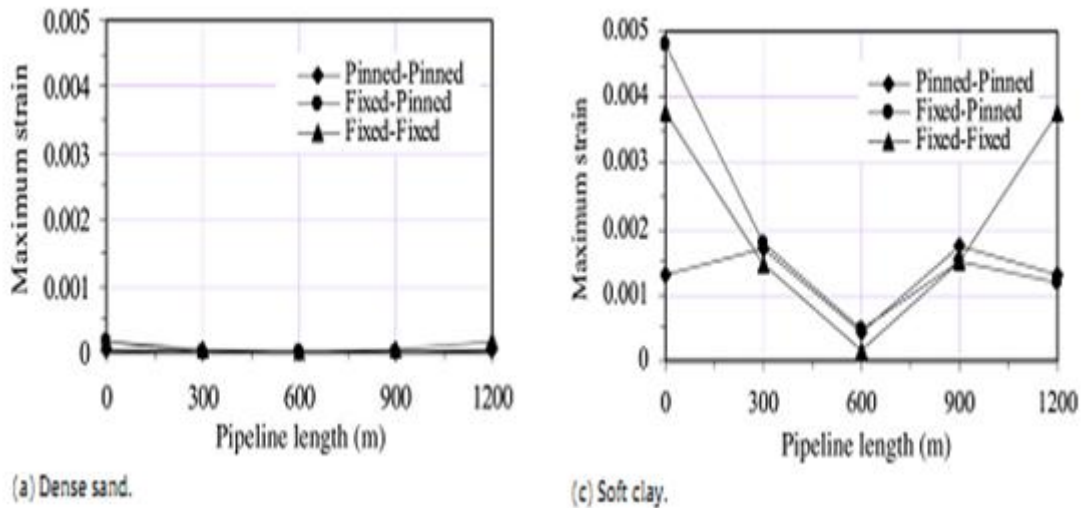


Fuente: los Autores de proyecto.

## 7.2 ANÁLISIS DE DEFORMACIÓN DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL DE LA TUBERÍA.

Para las tres condiciones de restricción, la Gráfica proporcionada por el artículo en comparación corresponde a las deformaciones bajo el sismo de kobe.

**Figura 51. Cuadro Comparativo de las deformaciones Relativas.**



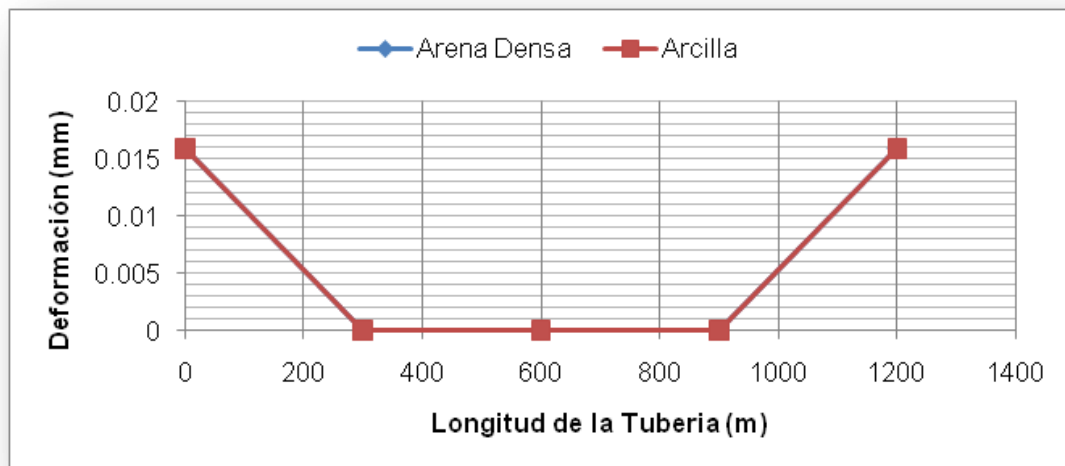
Fuente: article "Seismic behavior of a buried gas pipeline under earthquake excitations", [Ref.3]

### 7.2.1 Deformación Causada por el Sismo en Dirección Axial

Como se esperaría del análisis de los desplazamientos las deformaciones superan los máximos permitidos, (Tabla 6. [Ref.3] y [Ref.10]) adicionalmente los puntos críticos son los empotramientos.

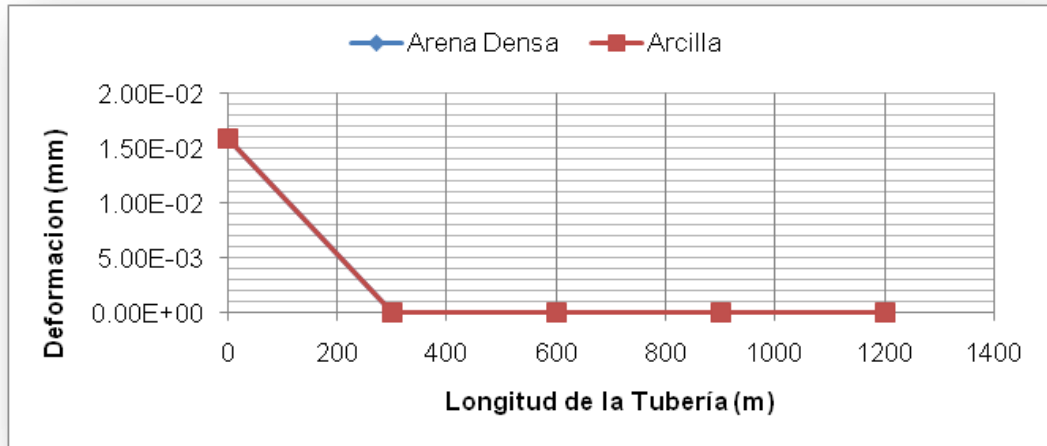
En este caso las deformaciones son las mismas para los dos tipos de suelos, lo que indicaría que no hay influencia de este en la deformación, salvo en la condición articulado-articulado donde se observa una leve disminución en la deformación en la arcilla.

**Figura 52. Deformación máxima de la Sección Transversal condición Empotrado-Empotrado.**



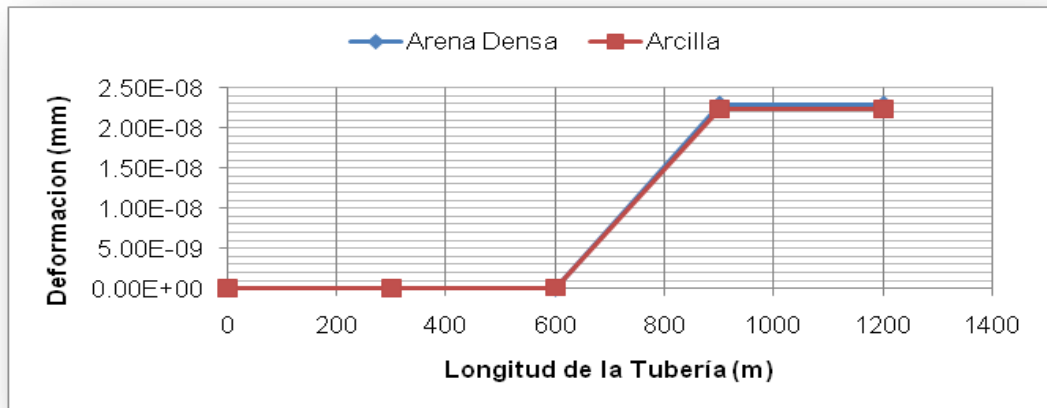
Fuente: los Autores de proyecto.

**Figura 53. Deformación Máxima de la Sección Transversal condición Empotrado-Articulado.**



Fuente: los Autores de proyecto.

**Figura 54. Deformación máxima de la Sección Transversal condición Articulado-Articulado.**

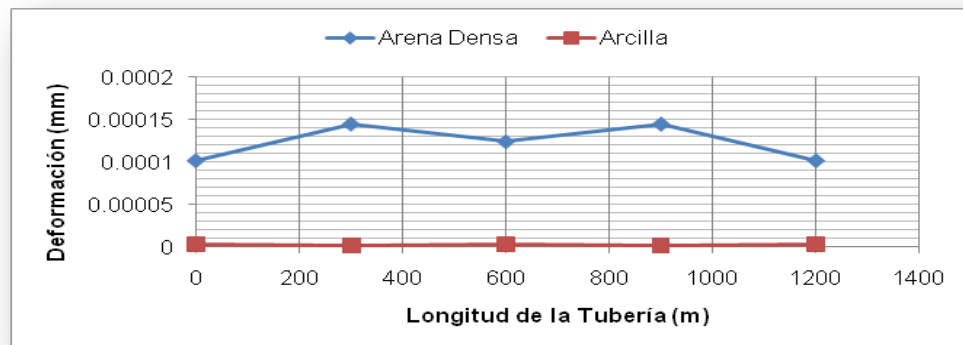


Fuente: los Autores de proyecto.

### 7.2.2 Deformación Causada por el Sismo en Dirección Transversal.

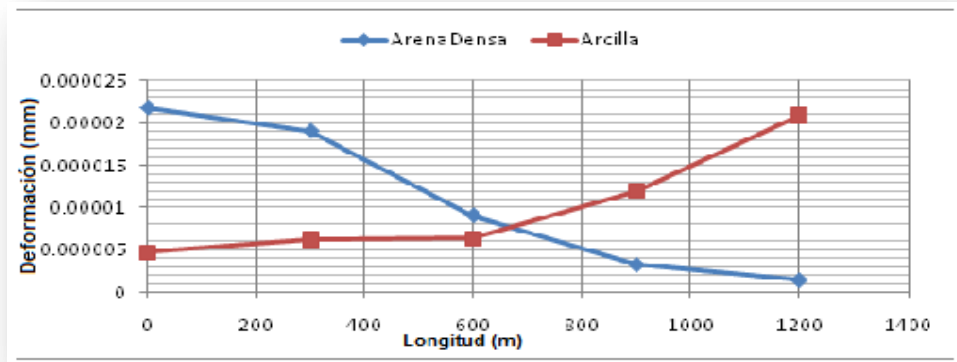
Las deformaciones en la sección de la tubería debido al sismo en dirección transversal muestran una dependencia del tipo de suelo en el que se encuentra la tubería. En el caso de la arena para la condición empotrado-empotrado las deformaciones son mayores que las de la arcilla contrario a lo que ocurre en la condición articulado-articulado en la que las deformaciones de la arcilla son mayores, en la condición empotrado-articulado se observa un comportamiento completamente inverso ya que mientras que en la arena las deformaciones máximas disminuyen a lo largo de la tubería en la arcilla estas aumentan.

**Figura 55. Deformación Máxima de la Sección Transversal Tubería Condición Articulado- Articulado.**



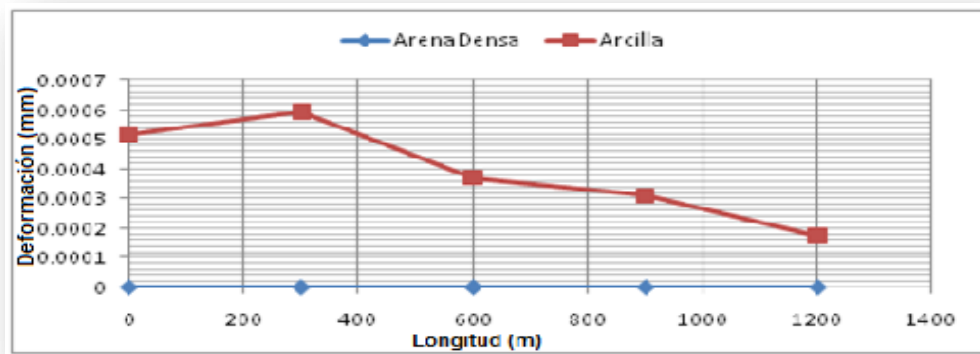
Fuente: los Autores de proyecto.

**Figura 56. Deformación Máxima de la Sección Transversal Tubería Condición Empotrado-Articulado.**



Fuente: los Autores de proyecto.

**Figura 57. Deformación Máxima de la Sección Transversal Tubería Condición Empotrado-Empotrado.**



Fuente: los Autores de proyecto.

## 8. CONCLUSIONES

- Se realizó el montaje de la tubería y se compararon los resultados con el artículo de referencia; con la dificultad que no encontramos las mismas componentes de los acelerogramas para los terremotos utilizados; sin embargo, encontramos valores de desplazamientos y deformaciones, coherentes y muy similares tanto para el análisis longitudinal como transversal, con esto confirmaríamos la utilidad del programa y la viabilidad de un estudio completo para las tuberías en Bucaramanga.
- Se corrobora que si hay influencia del tipo de suelo al hacer análisis de desplazamientos ya sean longitudinales o transversales, aunque el artículo en comparación no considere este parámetro para el análisis longitudinal porque los valores que ellos presentan son muy similares y podrían despreciarse, pero nosotros si lo tenemos en cuenta ya que se presenta una diferencia de un 20% y esto es notorio para nuestras consideraciones.
- Los resultados muestran que en el caso de las tuberías de gas enterradas en la Ciudad podrían no estar preparadas para un evento sísmico de gran magnitud, puesto que las tuberías sufrirían deformaciones relativas mayores a los permitidos, en el caso de la arcilla blanda en una condición de empotrado-empotrado presenta una deformación de 0.015 siendo la permitida 0.000698 según tabla 6.[Ref.3]
- Se abre con este trabajo de grado el camino a futuros estudios que profundicen y mejoren los modelos que se usaron y que permitan una mejor comprensión del comportamiento de las tuberías enterradas.

## BIBLIOGRAFIA

1. Chopra, Anil K; Dinamic of Structures: theory and applications to Earthquake Engineering. Prentice-Hall, Inc. 1995.
2. Eurocode 8: Desigs of estructures for earthquakes resisitance tanks, silos and pipelines  
<http://products.ihs.com/cis/Doc.aspx?AuthCode=&DocNum=280371>  
[http://www.techstreet.com/cgi-bin/detail?doc\\_no=BS\\_EN%7C1998\\_4\\_2006&product\\_id=1285515](http://www.techstreet.com/cgi-bin/detail?doc_no=BS_EN%7C1998_4_2006&product_id=1285515)
3. ARTICULO "Seismic behavior of a buried gas pipeline under earthquake excitations"  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029608004306>
4. Mid American Eartquake Center (Seuz.NL programa para ingeniería sísmica)  
[http://mae.cee.uiuc.edu///software\\_and\\_tools/zeus\\_nl.html](http://mae.cee.uiuc.edu///software_and_tools/zeus_nl.html)
5. Hipótesis del Modelo lineal con formulación cubica inelástica.  
<http://tdx.cat/bitstream/handle/10803/6149/capitulo03.PDF?sequence=4>
6. Modelo winkler.  
<http://www.demecanica.com/Geotecnia/geotecnia.htm>
7. Acelerogramas utilizados para el modelo.  
<http://nisee.berkeley.edu/elibrary/browse.html>

8. American lifelines alliance. Guidelines for the design of buried steel pipe. ASCE; 2001.
9. Estudio de micro-zonificación sísmica para la ciudad de Bucaramanga  
[www.ingeminas.com.co](http://www.ingeminas.com.co)
10. KOGAS. Guidelines for the seismic design of buried gas pipelines. Korea Gas Corporation; 2003.
11. Selección de tubería API. 5Lx42, tesis de grado U.I.S. “práctica empresarial construcción del gasoducto barranca-payoa” luz Karina barba rincón 2004
12. Propiedades de la tubería API 5LX 42  
[www.codiacero.com/catalogos /productos\\_industriacomercio\\_tuberia.pdf](http://www.codiacero.com/catalogos /productos_industriacomercio_tuberia.pdf)
13. Mecánica de suelos ( Braja M. Dass)

## **ANEXOS**

### **ANEXO A. MANUAL PARA ORIENTACIÓN DEL PROGRAMA COMPUTACIONAL**

Se realizo una traducción al español del manual para facilitar su futuro uso. [Ref.4]

#### **CONTENIDO**

Como Usar Este Manual	99
TUTORIALES	99
TUTORIAL 1- ANÁLISIS DINÁMICO	100
TUTORIAL 2 – ANÁLISIS DE VALORES PROPIOS (EIGENVALUE)	125
TUTORIAL 3 – ANÁLISIS PASO A PASO (PUSHOVER)	128
TUTORIAL 4 –ANÁLISIS ESTÁTICO DE TIEMPO-HISTORIA (STATIC TIME-HISTORY ANÁLISIS)	132

## LISTA DE FIGURAS

Fig. 1 Pantalla de la Ventana de Plantillas (configuración estructural)	100
Fig. 2 Pantalla de Plantilla 2 (selección de acelerograma)	102
Fig. 3 Modelo con la Lista de Nodos Creados	104
Fig. 4 Cuadro de Dialogo de Propiedades del Material	106
Fig. 5 Cuadro de Dialogo de Propiedades de la Sección	109
Fig. 6 Cuadro de Dialogo de Opciones de Grafico en 3D. Nodos no Estructurales	111
Fig. 7 Incrementación Automática de Nodos	112
Fig. 8 Nodos Generados con la Incrementación Automática	113
Fig. 9 Ejecución del Análisis	120
Fig. 10 Post- Processor de ZeusNL	121
Fig. 11 Visor de la Forma Deformada (análisis dinámico)	124
Fig. 12 Visor de la Forma Deformada (análisis de valores propios)	126
Fig. 13 Pantalla de Plantillas (análisis pushover)	127
Fig. 14 Pantalla de Plantillas 2 (análisis pushover)	127
Fig. 15 Modelo Creado Para el Análisis Paso a Paso	130
Fig. 16 Curva de Desplazamiento Máximo vs Factor de Carga	130
Fig. 17 Forma Deformada al final del Procedimiento	131
Fig. 18 Ensayo Cíclico en un Muro RC	132
Fig. 19 Materiales Utilizados en el Análisis Estático de Tiempo-Historia	133
Fig. 20 Sección de Muro Usado Para el Análisis	133
Fig. 21 Modelamiento de los Nodos	134
Fig. 22 Modelamiento de los Elementos	134
Fig. 23 Uso del Incremento Automático de Elementos para Obtener los Elementos 2-10 a Partir del Elemento 1	135
Fig. 24 Restricciones del Modelo	135

Fig. 25 Nueva Curva de Carga Definida por el Usuario	136
Fig. 26 Cargas Aplicadas al Modelo	136
Fig. 27 Diagrama de la Curva de Histéresis	138

## **Como Usar Este Manual**

Este manual explica la operación y las características de ZeusNL. Se ha separado en secciones, las cuales le permiten ser usado como guía de referencia, así como un tutorial para iniciarse en el uso de esta programa.

Para iniciarse como usuario de este programa, siga las instrucciones, adelante en este capítulo se explicara como instalar ZeusNL. Una vez que esté instalado, el resto del programa puede ser explorado siguiendo los tutoriales paso a paso en la Sección 2. Es altamente sugerido el seguir los Tutoriales, para que el usuario obtenga un mejor funcionamiento en el menor tiempo posible.[Ref.4]

## **TUTORIALES**

Este capítulo encaminara al usuario a través de los primeros tipos de análisis en ZeusNL. ZeusNL fue diseñado con dos cosas en mente facilidad de uso y flexibilidad. El objetivo es correr análisis en tan solo minutos (incluso análisis dinámico de tiempo-historia). Es actualmente más fácil usar ZeusNL de lo que es describirlo. Una vez que el usuario se ha familiarizado con algunos conceptos importantes, el proceso es bastante intuitivo.

A pesar de que el proceso no tome más que unos minutos, el modelo creado tiene muchas características y puede eficientemente y con precisión simular la estructura real. Para mucha gente, esto es toda la funcionalidad que necesitaran del ZeusNL. En la sección 3 nos adentramos en detalles de todas las potentes funciones con que cuenta el ZeusNL y las formas de aumentas su productividad.

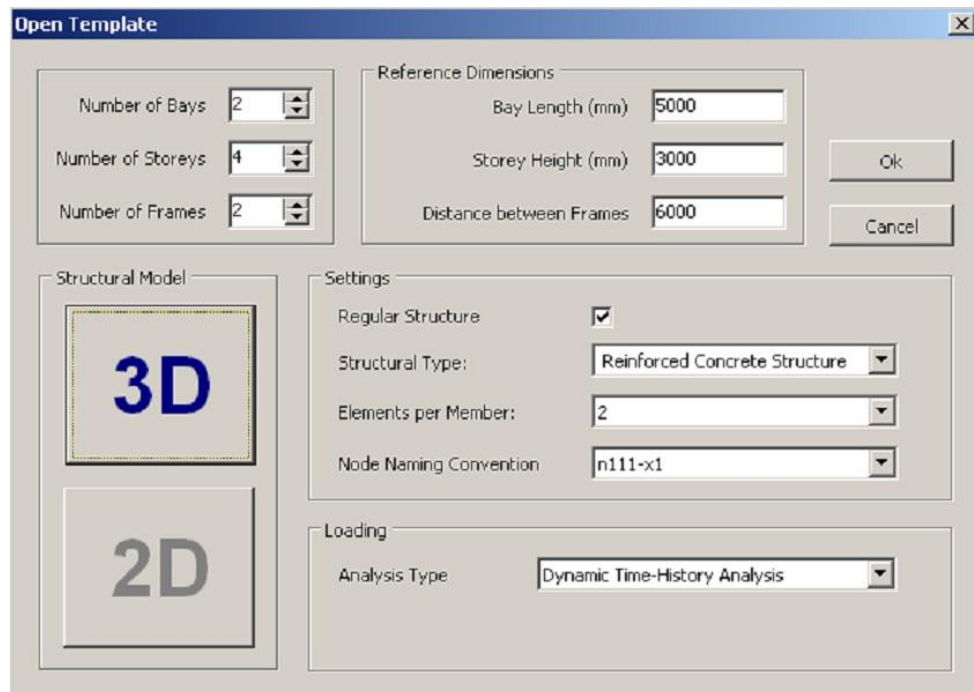
## TUTORIAL 1- ANÁLISIS DINÁMICO

Se supone en lo sucesivo, que el usuario está tratando con un modelo en 3D, de una estructura en RC de cuatro pisos y corre un análisis dinámico de tiempo-historia de un registro específico. Se asume también que la estructura es regular y tiene dos luces y consiste de dos marcos paralelos. Las luces son de una longitud de 5m, la altura de las placas es de 3m y la distancia entre los dos marcos es de 4m. [Ref.4].

### Configuración Estructural

Para abrir la ventana de Templates, seleccione File>Crea from templete, menú comandos o click en el botón de Template en la barra de herramientas. Al usuario se le presentara una ventana con una todas las opciones concernientes a la configuración estructural:

**Fig. 1 Pantalla de la Ventana de Plantillas (configuración estructural)**



- **Marco 2D o Marco 3D** escoja un marco en 3D.
- **Numero de luces, Placas y marcos** seleccione dos luces, cuatro pisos y dos marcos.
- **Estructura Regular.** Por el momento se usara, una estructura regular. En la sección 3, se discutirán las opciones para el modelado de estructuras irregulares.
- **Longitud de luces, altura de pisos y distancia entre marcos.** ZeusNL usa mm para las unidades de longitud; escoja 5000mm, 3000mm y 6000mm respectivamente.
- **Tipo de Estructura (RC o estructuras de acero).** Seleccione RC
- **Elementos por miembro.** Esta opción determina en cuantos elementos se subdivide cada uno de los miembros de la estructura (columnas y vigas). Seleccione dos elementos por miembro
- **Convención para la nomenclatura de los nodos.** Esta opción determina la forma en la que los nodos serán nombrados. La primera opción valor por defecto (default) registra nombres fáciles de leer. Seleccione valor por defecto.
- **Tipo de Análisis.** El usuario puede seleccionar uno de los seis diferentes tipos de análisis que tiene ZeusNL. Escoja dynamic time-history análisis.

En ZeusNL, las unidades de longitud son siempre en milímetros y las unidades de fuerza son los Newton; de click en el botón OK para proceder al siguiente paso

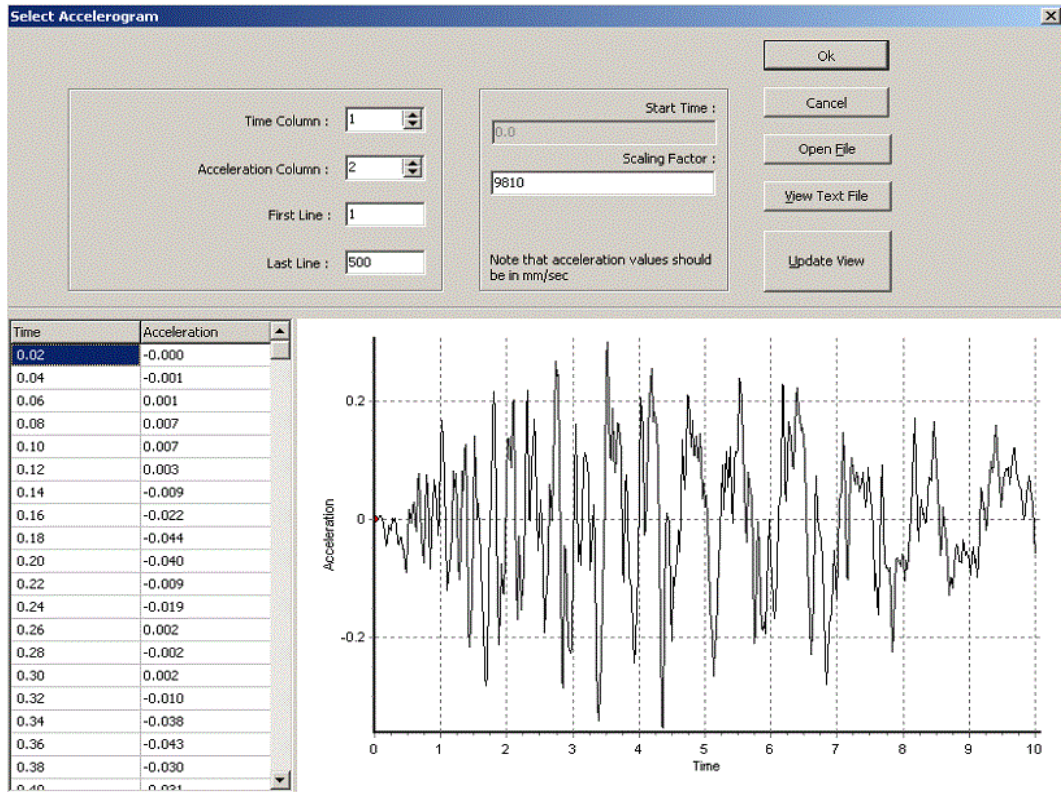
### **Carga Aplicada**

En esta pantalla, se especifica el acelerograma que se va a usar en el análisis dinámico. El programa asume que los valores de la aceleración y de tiempo se dan en un archivo de texto .txt, en formato de tabla, como:

*Loma Prieta Earthquake 17 OCT 1989*

2.000000E-02	-4.534576E-04
4.000000E-02	-8.691271E-04
6.000000E-02	9.069152E-04
8.000000E-02	7.255322E-03
1.000000E-01	7.255322E-03
1.200000E-01	2.569593E-03
1.400000E-01	-8.653483E-03
1.600000E-01	-2.191712E-02
1.800000E-01	-4.394760E-02
2.000000E-01	-4.039552E-02
2.200000E-01	-8.955788E-03
2.400000E-01	-1.900743E-02
2.600000E-01	1.549314E-03
2.800000E-01	-2.191712E-03
3.000000E-01	2.494017E-03
3.200000E-01	-1.012722E-02

**Fig. 2 Pantalla de Plantilla 2 (selección de acelero-grama)**



El usuario puede especificar las columnas de tiempo y valores de aceleración la primera y última línea que se leerán y el factor de escala. El archivo puede ser seleccionado con el botón Select File, mientras que si el usuario quiere ver los contenidos específicos de un archivo, el botón View Text File abre un lector de archivos de texto. El botón Update View simplemente actualiza la entrada (es decir, la última línea) se ha cambiado.

Aquí hay un par de cosas importantes para tener en cuenta:

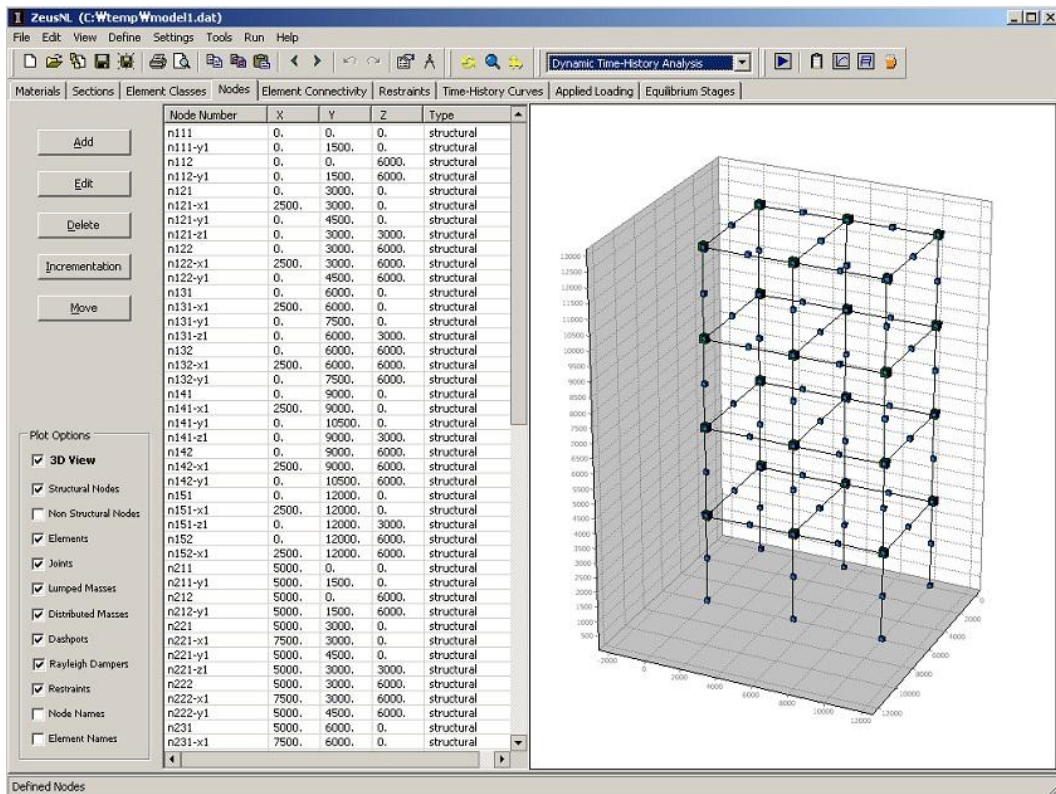
- Los valores del tiempo deben estar en orden ascendente y mayores a cero. Los valores menores o iguales a cero son simplemente ignorados por el lector. Por otra parte entradas no numéricas no son aceptadas.
- Si la aceleración dada esta en unidades [g] (gravedad), entonces el factor de escala de 9810 es necesario para cambiar las unidades a mm/sec<sup>2</sup>.
- El acelerómetro, por defecto, será aplicado en la dirección X
- Haciendo click derecho sobre la gráfica o la tabla, un menu desplegable muy útil aparecerá. El usuario puede copiar o imprimir los valores de aceleración o tiempo seleccionados en otras aplicaciones, procesadores de texto (por ejemplo Microsoft® Word) o hojas de cálculo (por ejemplo, Microsoft® Excel). Por otra parte, el usuario puede cambiar numerosas opciones en la gráfica (color y espesor de la línea, el fondo, los valores de los ejes, etc.) antes de copiarla o imprimirla. En ZeusNL, caso todas las tablas o grafico tienen una ventana de menu emergente.

Después de ingresar el acelerómetro seleccionado, de click en el botón Ok. Un modelo estructural en 3D de una construcción de cuatro pisos, que está compuesto por más de 1000 elementos, ha sido creado. Las cargas estáticas (cargas de gravedad) y las cargas dinámicas (el sismo) también han sido aplicadas.

## Módulos del Programa

Aparte de los menús y de las barras de herramientas que se encuentran normalmente en cualquier aplicación para el sistema operativo Windows®, en ZeusNL hay una serie de páginas (módulos) En cada página, se especifican diferentes datos de entrada. Después de la terminación del modelo, el programa se centra en la página de nodos y aparece la estructura. La pantalla se verá como Fig. 3.

Fig. 3 Modelo con la Lista de Nodos Creados



Dependiendo del tipo de análisis que se esté corriendo, aparecerán diferentes módulos. Por ejemplo, en análisis dinámico, hay una página marcada como Time Historia Curves para la descripción de la carga (aceleración), la curva aplicada a los soportes. Aparentemente, este módulo no es necesario en un análisis de empujes (convencional o adaptativo) o un análisis de valores propios (eigenvalues

análisis). En el mismo sentido, en el análisis de empujes hay una ventana de la llamada Loading Phases que no es necesario para el análisis dinámico. Para una completa descripción de los módulos disponibles en ZeusNL, consulte la Sección 3. Salve el proyecto con File>Save A Tenga en cuenta que los archivos de datos de ZeusNL debe tener siempre tener la extensión .dat

## **Análisis**

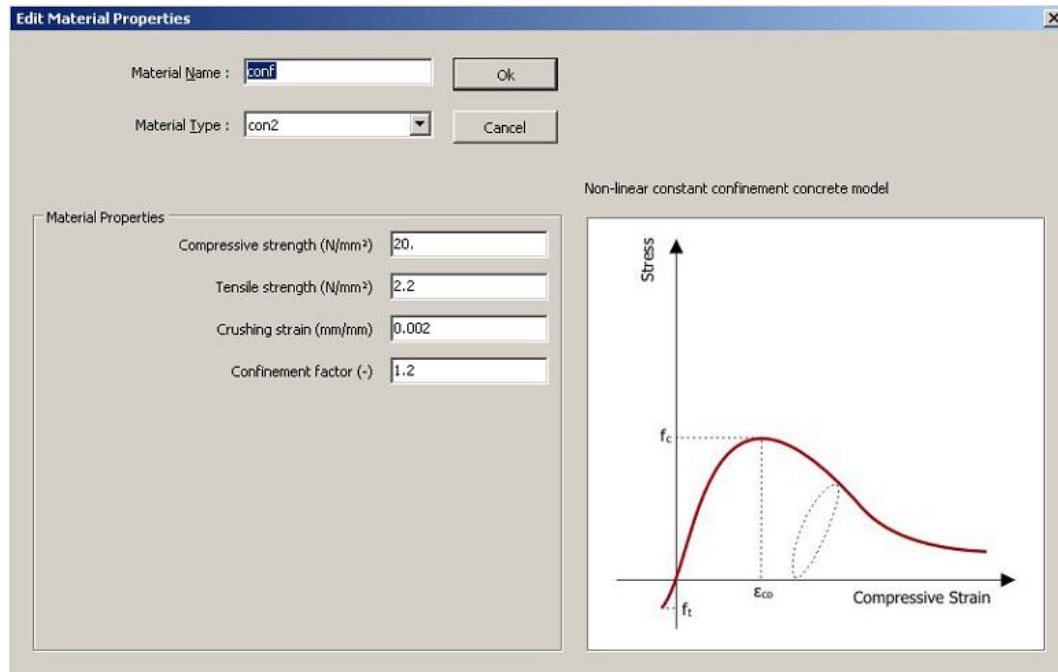
Seleccione el tipo de análisis: Dinamic Time-History, Static Time -History, conventional pushover, adaptative pushover, eigenvalues o static con non-variable loading.

## **Materiales**

En el módulo Materials, el usuario puede especificar los materiales de los que dispondrá en el proyecto en curso. Estos materiales son luego usados en la definición de secciones en el módulo Sections. Cada material cuenta con un modelo tipo (stl0, stl1, stl2, para aceros, con1, con2, con3, con4, o frp1, para concreto-consulte el apéndice A para una descripción detallada del tipo de material), y propiedades específicas del material por ejemplo, resistencia al esfuerzo, módulo de Young, endurecimiento por deformación, etc. Cada material tiene también se especifica con un nombre el cual es especificado en el módulo Sections. No hay que confundir los materiales definidos en este módulo con los materiales disponibles en las librerías de ZeusNL. En este caso, hay dos materiales de concreto, conf y unconfined para concretos confinados y no confinados respectivamente, con propiedades diferentes pero el mismo tipo de material que con2. Para una descripción comprensiva de las propiedades de un material, seleccione un material y de click en el botón Edit o simplemente doble click en el material. Una ventana similar a la que aparecerá en la Fig. 4, en la que el usuario puede cambiar las propiedades del material o incluso el tipo o el nombre

del material seleccionado. Aparte de editar los materiales existentes, es fácil agregar nuevos materiales dando click en el botón Add y seleccionando un nombre, el tipo y las correspondientes propiedades. Por otra parte, el usuario puede remover el material(es) seleccionado(s) con el botón Remove.

**Fig. 4 Cuadro de Dialogo de Propiedades del Material**



Si, por error, el usuario elimina un material, bien es muy fácil realizar un hacer - deshacer Undo-Redo en ZeusNL. Simplemente seleccione Edit > Undo en el menu de comandos(o el correspondiente botón en la barra de herramientas) y el material será restaurado. Edit>Redo restaura la última acción des-hecha.

Note, que hay algunas limitaciones en los nombres que ZeusNL usa para los materiales (y secciones, clases de elementos, nodos y elementos).

En ZeusNL, materiales, clases de elementos, nodos y nombres de elementos deben ser de más de 8 caracteres de tamaño. Por otra parte, no deben contener espacios o los caracteres # o &

También, note los materiales cortados pueden ser copiados y pegados (Edit>Copy and Edit>Paste o usando las ventanas emergentes del click derecho en la tabla). Cuando un material (refiriéndonos a las entradas para definir un material en ZeusNL) es pegada en la tabla de materiales, si el nombre es el mismo que un material existente en ZeusNL, una estrella '\*' es agregada al final del nombre del material pegado. Las propiedades del material pueden ser copiadas y pegadas y desde otros programas, por ejemplo Microsoft® Excel, siempre y cuando las entradas sean consistentes con el formato de ZeusNL.

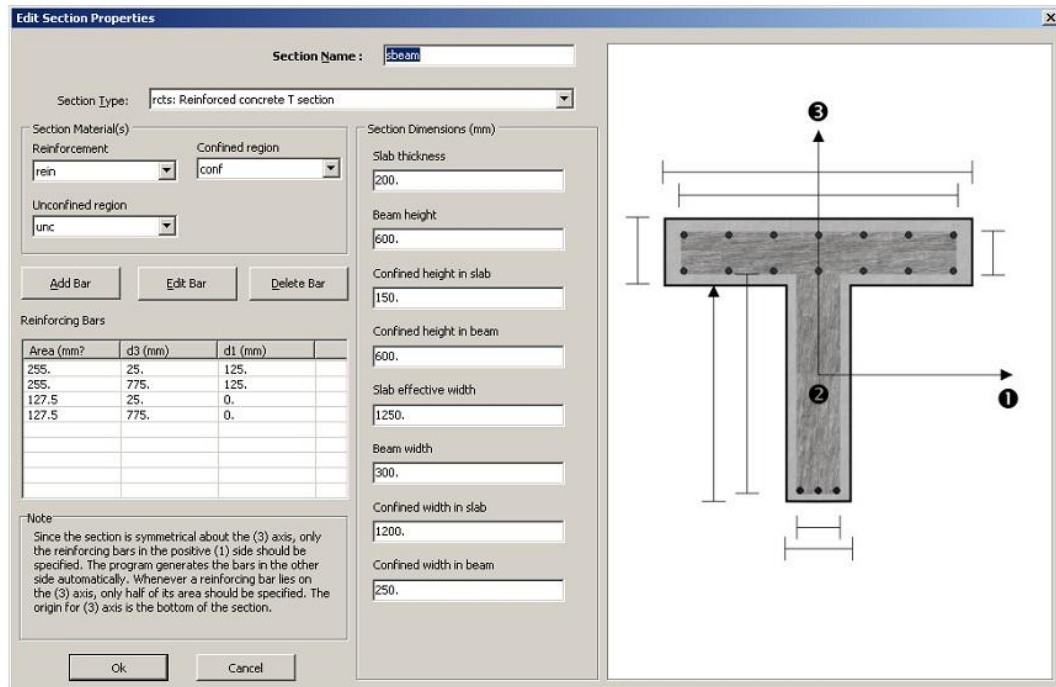
## **Secciones**

En este módulo, las diferentes secciones del modelo son especificadas. Hay disponibles 14 secciones tipos, incluyendo secciones de acero, de RC y compuestas. Cada sección es descrita con un set de dimensiones de la sección y si es una sección RC con el área y la localización de las barras de los aceros de refuerzo. Como en módulo de Materials, cada sección tiene un nombre único y puede ser copiado, pegado y editado. En el ejemplo, ZeusNL ha creado dos secciones RC: una rectangular llamada 'scol' para las columnas (tipo rcrs) y una T-shaped llamada 'sbeam' para las vigas (tipo rcts). Para este ejemplo el programa asume que todos los elementos columnas/vigas tienen secciones idénticas. Si el usuario edita una de las secciones, por ejemplo 'sbeam' (de nuevo con el botón Edit o con doble click), un cuadro de dialogo de Section Properties aparecerá, que es similar a la Fig 5. En esta cuadro de dialogo, el nombre de la sección, el tipo, el material, las dimensiones y el refuerzo pueden ser modificadas.

Dependiendo del tipo de sección seleccionada diferentes número de materiales (una para secciones de acero, de tres a cuatro para RC y secciones compuestas) y dimensiones (de una a nueve) son especificadas. Los materiales disponibles son aquellos definidas el módulo de Materials (reinf, conf, y unc). El programa ha seleccionado reinf para el refuerzo, conf para la región confinada y unc para la región no confinada. Hay una descripción de las dimensiones necesarias, pero también note que cuando el usuario se centra en un cuadro de texto, una línea roja es dibujada en la sección ejemplo que muestra específicamente la dimensión que va a ser editada.

Para secciones RC, el área y la localización de las barras de acero del refuerzo deben ser definidas. Agregar, remover y editar el refuerzo el fácil con los correspondientes botones y se realiza de la misma manera que en que los materiales fueron agregados, editados y removidos. Note, todas las barras de refuerzo deben estar en la región confinada del concreto. Sin embargo, dado que la sección es simétrica solo el acero del cuadrante positivo en los ejes 1-3 deben ser especificados para la sección rectangular y solo el acero en el eje positivo del eje 1 de la sección T. El programa genera el resto del acero. Finalmente si el usuario da click en el botón OK, el refuerzo se dispone en la tabla de Reinforcement Section las entradas están dispuestas en tres datos (As,d3,d1).

**Fig. 5 Cuadro de Dialoga de Propiedades de la Seccion**



## Clases de Elementos

La librería de elementos de ZeusNL contiene un conjunto de elementos que se usan para modelar los elementos estructurales (vigas y columnas), elementos no estructurales (masa y amortiguamiento) y condiciones de borde (apoyos y juntas):

**Cubic.** Elementos de vigas-columnas 3D elastoplásticos de formulación cubica. Se usa para detallar modelos inelásticos, haciendo uso de modelos de materiales inelásticos uniaxiales descritos anteriormente. Es responsable de la distribución de la inelasticidad a lo largo del miembro y en los profundo de la sección transversal.

**Joint.** Elementos 3D de junta desacoplada de acciones cortantes, axiales y de momentos.

**Lmass.** Masas agrupadas (concentradas) usadas en análisis dinámicos y de valores propios.

**Dmass.** Elementos de masa de distribución cubica.

**Ddamp.** Elemento amortiguador (concentrado) de amortiguamiento viscoso utilizado en los análisis dinámicos.

**Rdamp.** Elemento de amortiguación que usa el modelo de amortiguamiento de **Rayleigh** usado para el análisis dinámico.

Estos tipos de elementos se usan para definir las clases de elementos. Un elemento de clase es un grupo de propiedades que se refieren a un elemento de una categoría en particular. Los tipos de elementos (diferentes tipos de elementos disponibles en las librerías de ZeusNL) no deben ser confundidos en la con los elementos de clase. En cada proyecto de ZeusNL, probablemente hay diferentes elementos de clase en el mismo tipo de elemento. Por ejemplo, en nuestro modelo, hay dos elementos de clase (columnas y vigas) del tipo de elemento cubico y tres elementos de clase para el elemento de tipo lmas (mass1, mass2, mass4). Los elementos de clase definidos aquí son usados el módulo Element Connectivity para definir la configuración de la malla de conectividad de los elementos.

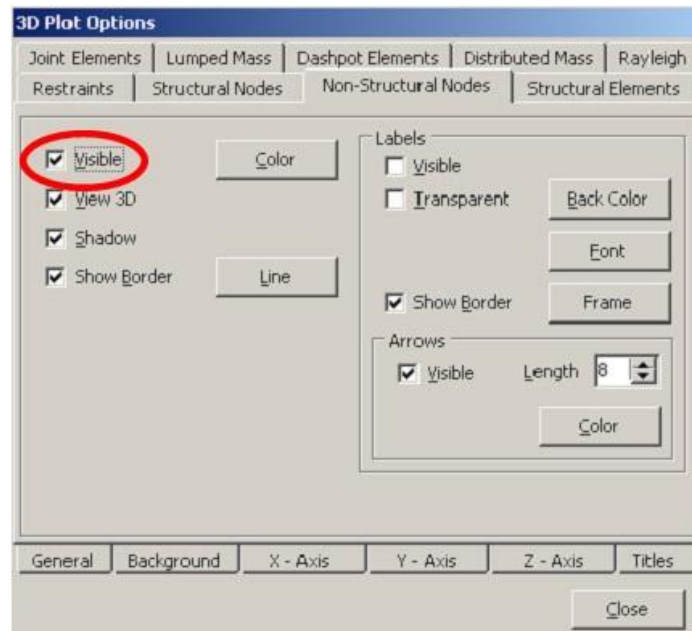
## **Nodos**

Después de definir los elementos de clase, el usuario necesita configurar la malla de nodos del elemento. En el módulo Nodes, además de una lista de nodos, se encuentra un gráfico en 3D de la estructura que permite una mayor visualización y comprensión del modelo.

La mayoría de los nodos son estructurales, aunque hay también nodos no estructurales. La pregunta que surge es: ¿Cuál es la diferencia entre un nodo estructural y un nodo no estructural? Para algunos tipos de elementos (cubics, joint, dmass y rdamp) nodos adicionales a los de los extremos, deben ser especificados. Los nodos adicionales definen la orientación de los ejes locales de los elementos. En particular, cubic, dmass, y dramp requieren un tercer nodo para

definir el eje local (1) y joint requiere un tercer y cuarto nodo para definir los ejes locales (1) - (2). Por defecto, el efecto nodo no estructural no es visible en el área de dibujo. Para hacerlo visible, simplemente active la opción dibujar nodos no estructurales en el módulo Nodes. Otra alternativa es seleccionar Settings > 3D Plot Settings. Esto abre un cuadro de dialogo, en el que el usuario puede cambiar las configuraciones de la pantalla del grafico del modelo en 3D. Dirijase a la pestaña de nodos no estructurales y de click en la opción Visible, como en la Fig. 6. El nodo no estructural aparecerá en rojo en todo alrededor del modelo.

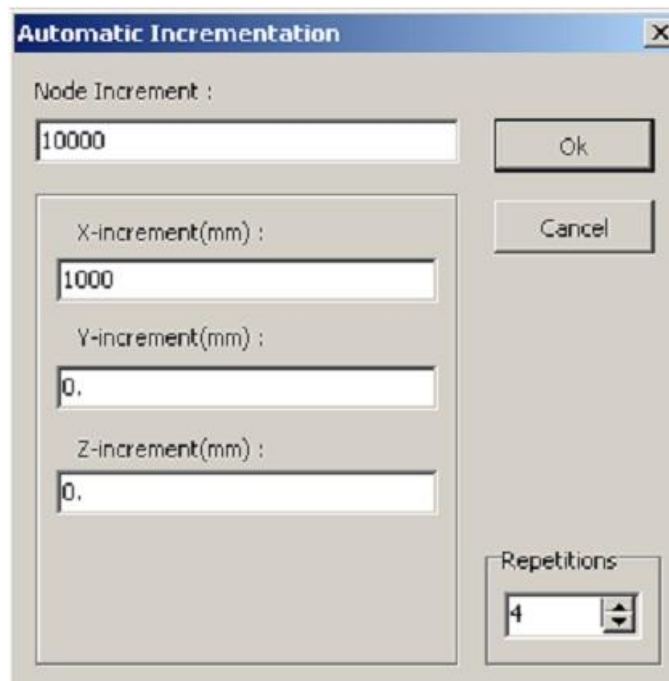
**Fig. 6 Cuadro de Dialogo de Opciones de Grafico en 3D. Nodos no Estructurales**



Trate de navegar por las pestañas. Hay numerosas características de la apariencia del modelo. El usuario puede cambiar el color, el estilo y el ancho de las líneas, el tamaño de los nodos y los cubos de masa, insertar títulos y pies de página, cambiar la escala y mostrar o esconder los ejes y los muros alrededor del modelo.( Los detalles de esos ajustes están mas halla del alcance de este tutorial.) Las únicas opciones que mereces una atención especial se encuentran en la

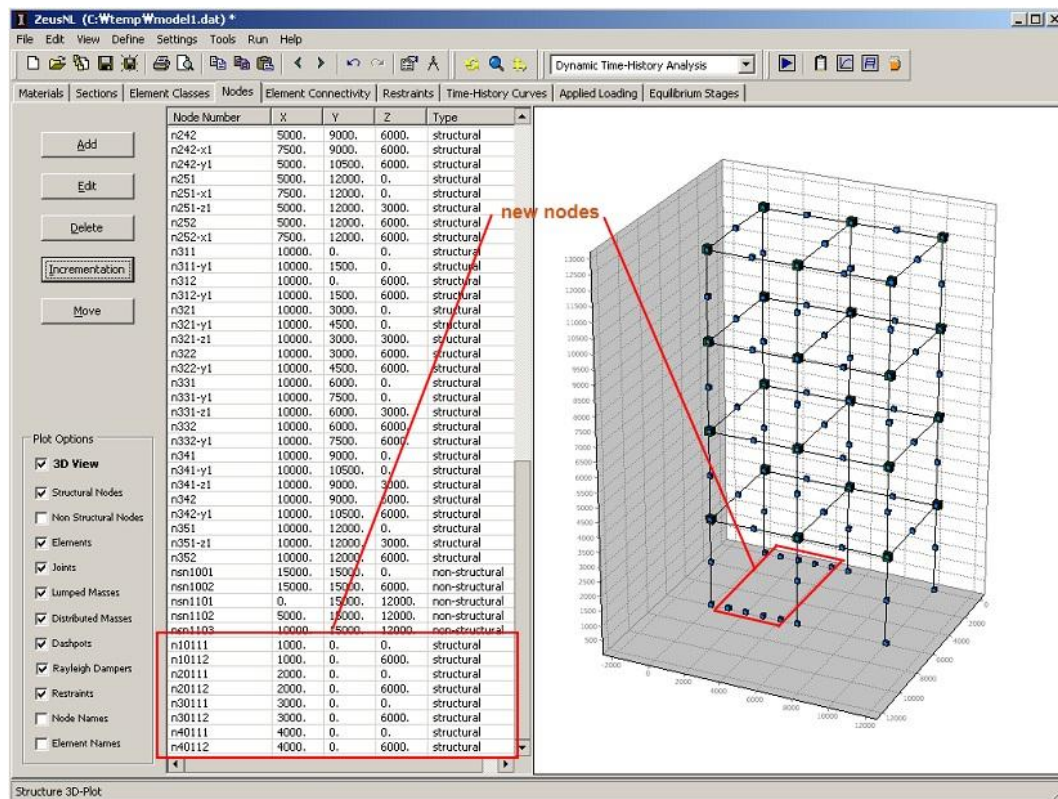
pestaña General. Las propiedades 3D cambian la rotación, localización, la captura y la perspectiva del gráfico. Considerando que el usuario puede desear desbloquear el cuadro de dialogo Automatic 3D Plot Update en los casos de grandes estructuras (cientos o miles de nodos y elementos) y le tomara algunos segundos al programa actualizar el grafico. El grafico cambiara automáticamente cada vez que algo cambie. Si la opción es bloqueada, el usuario puede actualizar manualmente el grafico desde el menu emergente del gráfico. Después de tener una vista a las opciones cierre el cuadro de dialogo. A partir de ahora los nodos no estructurales no se van a necesitar, el usuario puede desear ocultarlos nuevamente con el fin de ampliar la vista de la estructura. El módulo Nodes contiene los botones estándar Add, Remove y Edit, pero además hay un botón Incrementation. Esto activa la instalación de Nodos de Incremento una opción de ZeusNL. El usuario puede seleccionar uno o más nodos y generar nuevos de manera repetida.

**Fig. 7 Incrementacion Automatica de Nodos**



Por ejemplo, seleccione los nodos n111 y n112 (para seleccionar múltiples elementos en las tablas de ZeusNL, de click sobre el elemento que desea seleccionar, manteniendo presionada la tecla Ctrl). Luego, con los dos nodos seleccionados, de click en el botón Incrementation. Seleccione un incremento en los nodos de 10000. Esto quiere decir que los nodos generados tendrán nombres como n10111, n20111 (desde n111) y n10112, nn20112 (desde n112). También, un incremento en x de 1000 e incrementos en y- y z- de 0. Escoja cuatro repeticiones (esto quiere decir que por cada nodo 4 nuevos nodos serán creados en decir 8 nodos en total). De click en OK y vea los nuevos nodos en el grafico en 3D. Debería ver algo como la Fig. 8.

**Fig. 8 Nodos Generados con la Incrementación Automática**



La incrementación automática en los módulos Nodes, Element Conectivity y Applied Loading, es una poderosa herramienta que permite al usuario generar una

estructura fácil y eficientemente en minutos. Sin embargo, hay una restricción con la identificación de los nodos o elementos que va a ser incrementados: deben estar en formato (texto) + (numero), por ejemplo, n111 y nod201; o el texto puede ser omitido y solo usar números para la identificación, por ejemplo, 22 y 44. Si el usuario trata de incrementar el nodo n111-y1, un error de mensaje le indicara que el nodo no puede ser incrementado, debido a que no tiene el formato correcto.

La identificación de nodos y elementos debe ser en el formato correcto (texto) + (números) [ o simplemente números] para ser incrementada

Por el momento, como los nodos extras no son necesarios, se remueven Edit>Undo para eliminar la última acción y así volver al estado anterior, de lo contrario el programa no se ejecutara con nodos no conectados a la estructura.

Hay algunas opciones en el grafico en 3D a la izquierda de la pantalla. Estas son las opciones más usadas frecuentemente. Hay también un botón Reset que regresa el grafico al estado predeterminado y un cuadro de chequeo Animate que permite al usuario ver el modelo desde diferentes perspectivas. El usuario también puede rotar el elemento si el diagrama es seleccionado con el ratón.

Una característica importante es la habilidad para identificar los nodos por su número o por sus coordenadas x-, y- o z- . El usuario tiene que debe de hacer click en el encabezado del nodo o en las columnas de las coordenadas (x, y o z) para ordenarlos en forma descendente.

### **Elementos de Conectividad**

Los diferentes elementos de la estructura se definen aquí. Cada elemento pertenece específicamente a una clase de elemento, y dependiendo de este elemento de clase pueden tener un (Imass, ddamp), tres (cubic, dmas, rdamp), o

cuatro nodos (junta). El modelo solo tiene elementos cúbicos estructurales y elementos de masa Imas. Como se mencionó en la sección previa, los elementos cúbicos están definidos, además de los dos nodos en los extremos, con un tercer nodo en que puede ser estructural o no estructural.

Por ejemplo, los nodos de los extremos del primer elemento de columna 'col1111', son 'n111' y 'n111-y1'. Estos definen la geometría precisa del elemento, pero que define su sección y su orientación? La sección es 'scol' como se definió en el módulo Sections. Es claro que los (2) ejes locales de la sección coinciden con el eje (y) global. Pero que hay acerca de los otros dos ejes?Cuál de los ejes globales (x- o z-) coincide con el eje local (1) de la sección? Este el porqué se requiere de un tercer nodo para precisar la definición del elemento. Los nodos de los extremos junto con el tercer nodo nsn1001 definen un tercer plano en el espacio. El eje central de la sección [es decir, el eje 3] se equivoca en ese plano y coincide con el eje global (x).

Como en los otros módulos, el usuario puede agregar, eliminar y editar los elementos seleccionados. Sin embargo, también hay la facilidad Incrementation y Subdivisión. El incremento automático de los elementos trabaja más o menos igual al incremento de nodos. Sin embargo, en este caso el incremento del número de elementos junto con el incremento del número de nodos, debe ser especificado. La subdivisión solo puede ser aplicada a elementos lineales y permite la división fácil y rápida de cada elemento en dos con la creación de un nuevo nodo en centro del elemento. El usuario puede querer subdividir un elemento en las áreas críticas de la estructura, con el fin de incrementar la precisión del análisis.

Una característica del que el usuario encontrara muy útil, es la habilidad para cambiar los elementos de clase de varios elementos en un paso haciendo una selección múltiple y dando clic en el botón Edit. Por ejemplo, esto es muy útil

cuando el usuario quiere cambiar los elementos de las columnas de un piso desde un elemento de de clase para otro.

## **Restricciones**

El usuario puede fácilmente especificar las restricciones de los nodos seleccionándolos y dando click en el botón Edit. El proceso entero es en si sencillo sin embargo, tenga en cuenta algo muy importante con respecto a las restricciones:

En el análisis dinámico, El DOF contenido en los soportes, debe ser liberado, en el sentido del sismo.

Esto es por qué la restricción DOF contenida en el modelo son  $y+z+rx+ry+rz$ , pero no el eje  $x$  ( $x$  es la dirección del sismo)

## **Curvas Tiempo-Historia**

En este módulo se especifican los tramos se curvas lineales para el análisis dinámico (o time-history). Uno ha sido creado con la plantilla (template) al seleccionar el registro. La curva definida se aplicara con ciertas reglas a la estructura en el próximo modulo, Aplied Loading.

Hay un cuadro a la izquierda de la ventana principal para el tiempo de inicio Star Time del análisis. Este el tiempo para el inicio del análisis (cero para el modelo).

Si el usuario da doble click sobre la curva, El cuadro de dialogo Edit Curve se abrirá. Aquí la curva aplicada puede ser cambiada, por ejemplo la duración e incluso el archivo seleccionado. Para cada curva hay un parámetro de retraso. El retraso (que siempre debe ser positivo) es el tiempo a partir del tiempo de la hora

de inicio que la curva se aplica a la estructura. De esta manera es muy fácil simular una excitación asincrónica especificando la misma curva con diferentes retrasos.

## **Carga Aplicada**

En este módulo se especifican las cargas aplicadas. Hay cuatro diferentes tipos de carga

**Initial.** Estas son cargas estáticas que se aplican antes de cualquier carga variable. Pueden ser fuerzas o desplazamientos que se prevén aplicar a los nodos

**Proportional.** Estas son cargas estáticas que tienen una variación proporcional. La magnitud de la carga está dada en cada paso por el valor nominal (que es constante) y por un factor de carga (la cual es variable). Las cargas tipo Proportional pueden ser fuerzas o desplazamientos aplicados en los nodos.

**Time-History** Estas son cargas estáticas que varían según las diferentes curvas de cargas en el dominio del pseudo-tiempo. La magnitud de la carga en cada paso está dado por el producto de su valor nominal (que es constante) y el correspondiente valor de carga que varía según la curva de carga. Las cargas time-history pueden ser fuerzas o desplazamientos en los nodos.

**Dinamic.** Estas son aceleraciones o fuerzas que varían de acuerdo a diferentes curvas de carga en el dominio del tiempo real. El producto de su valor nominal constante y el factor de carga variable es obtenido de la curva de carga que para un tiempo da la magnitud de la carga. Las cargas dinamic pueden ser fuerzas o aceleraciones aplicadas en los nodos en las coordenadas globales.

Para el análisis dinámico del ejemplo se usaran, las cargas iniciales (aplicadas por la masa de la estructura) y las cargas dinámicas (aplicadas en los apoyos en la dirección -x). Nuevamente el usuario puede agregar, remover, editar o incrementar las cargas.

Observe que en este módulo el usuario puede agregar la misma carga (valor, dirección, tipo) a varios nodos en un simple paso, especificando varios nodos en el cuadro de dialogo Add Load (usando la tecla ctrl para realizar la selección múltiple)

### **Estados de Equilibrio**

En este módulo se especifican las etapas de intervalos de tiempo en los que el equilibrio estructural se establece. En otras palabras, el usuario especifica los puntos en el tiempo en los cuales las fuerzas y los desplazamientos de la estructura se equilibran.

El usuario puede tener diferentes etapas con diferentes pasos de tiempo, dependiente de la dificultad en la convergencia que puedan surgir en diferentes tiempos del análisis dinámico (para un análisis más exhaustivo se requiere más puntos de tiempo es decir un menor paso del tiempo). Esto se hace especificando el tiempo final de la etapa (que deberá ser mayor que el tiempo de final de la etapa anterior) y el número de puntos. En el módulo de curvas Time-history dividido por el número de pasos.

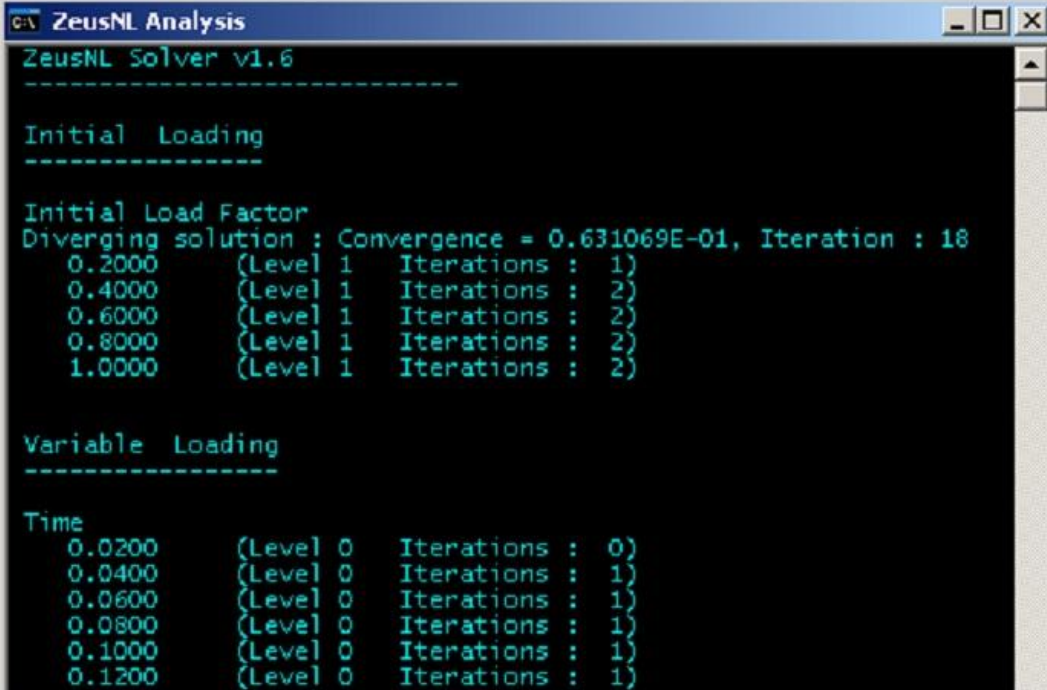
El usuario puede tener diferentes etapas con diferentes pasos de tiempo, dependiente de la dificultad en la convergencia que puedan surgir en diferentes tiempos del análisis dinámico (para un análisis más exhaustivo se requiere más puntos de tiempo es decir un menor paso del tiempo). Esto se hace especificando el tiempo final de la etapa (que deberá ser mayor que el tiempo de final de la etapa

anterior) y el número de puntos. En el módulo de curvas Time-history dividido por el número de pasos.

### **Ejecución del Análisis**

Después de revisar los diferentes módulos, es el momento de ejecutar los análisis. Guarde el proyecto (File > Save) y seleccione Run > Run o el correspondiente botón de la tabla de herramientas. Después de realizar algunas comprobaciones de integridad, el programa inicia a funcionar. Dependiendo del tamaño de la estructura, las cargas aplicadas y el procesador de la PC, el análisis puede tardar desde unos segundos hasta varias horas. Esto es significativamente mayor que el tiempo requerido en otros paquetes de elementos finitos y esto es atribuido a la manera en que se modela la propagación de la inelasticidad a través de la longitud del miembro y en lo profundo de la sección recta. Sin embargo, los resultados se ven incrementados en estabilidad y una significativa mejora en la precisión.

Fig. 9 Ejecución del Análisis



```
CAE ZeusNL Analysis
ZeusNL Solver v1.6
-----
Initial Loading
-----
Initial Load Factor
Diverging solution : Convergence = 0.631069E-01, Iteration : 18
0.2000 (Level 1 Iterations : 1)
0.4000 (Level 1 Iterations : 2)
0.6000 (Level 1 Iterations : 2)
0.8000 (Level 1 Iterations : 2)
1.0000 (Level 1 Iterations : 2)

Variable Loading
-----
Time
0.0200 (Level 0 Iterations : 0)
0.0400 (Level 0 Iterations : 1)
0.0600 (Level 0 Iterations : 1)
0.0800 (Level 0 Iterations : 1)
0.1000 (Level 0 Iterations : 1)
0.1200 (Level 0 Iterations : 1)
```

### Obtención de los Resultados

ZeusNL tiene dos herramientas para realizar el post-proceso que se complementan. El Post-Processor, el cual crea curvas con los efectos de la acción del análisis (Desplazamientos, fuerzas, tensiones, etc.) y el visor de la forma deformada, con el cual se puede ver la forma deformada de la estructura en los diferentes pasos del tiempo del análisis. Tanto para abrir el tipo de archivo de base de los resultados de ZeusNL (de extensión .num), leerlos y mostrar los datos. El usuario puede ejecutarlos con los comandos correspondientes del menú de herramientas.

### Post-Processor

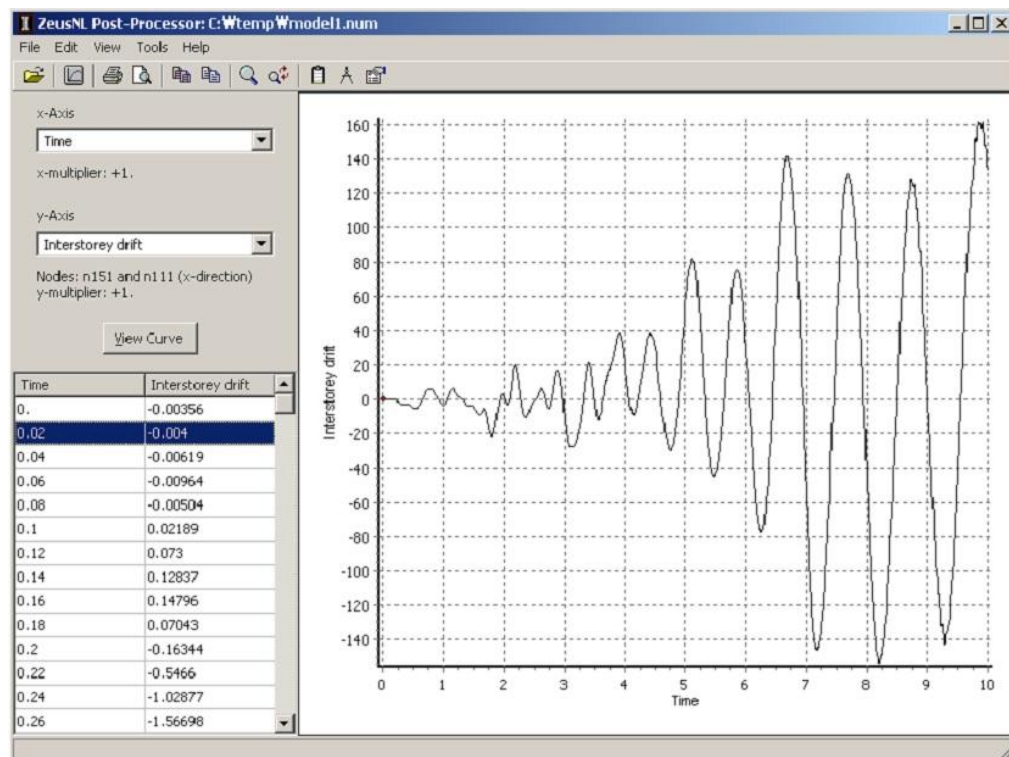
El post-processor es una habilidad que facilita la derivación de diagramas con los resultados de los análisis.

Por ejemplo, si el usuario está tratando de trazar la deriva de entrepiso entre el nodo superior izquierdo y en la parte inferior izquierda de los nodos del primer pórtico (N151 y N111 respectivamente) contra el tiempo, Ejecute el post-processor con Tool > Post-processor y abriendo el archivo del proyecto .num.

Seleccione de una de las listas desplegables en la esquina superior izquierda de la ventana: Time para el eje -x y Interstorey Drift para el eje -y. En el cuadro de dialogo que se abre, escoja los nodos n151 y n111, seleccione la direccion apropiada (Ux es la dirección del sismo y de click en el botón OK).

En muchos casos, el usuario tendra que encontrar un elemento (por ejemplo, un nodo) en un lista desplegable con cientos de elementos. Si el nombre de elemento (el nodo) es conocido, comience a digitarlo cuando la lista desplegable se resalte y ZeusNL lo encontrara.

**Fig. 10 Post- Processor de ZeusNL**



De click en el botón View Curve y el grafico será creado. Los valores del grafico se mostraran en la tabla en la esquina inferior izquierda.

Para convertir los valores de desplazamiento de mm a cm, multiplique todos los valores del eje -y del dibujo por 0.1 seleccione Tools > Settings y cambie el factor multiplicador del eje -y por 0.1. El diagrama será nuevamente dibujado con todos los valores del eje -y multiplicados por 1/10. Note, que el usuario puede escoger cualquier valor (positivo, negativo, o incluso cero) para los factores multiplicadores de los ejes -y y -x.

Con el Post-Processor, el usuario puede fácilmente crear varios diagramas, desplazamiento nodal y rotaciones, derivas de entresijos, reacciones en los apoyos, fuerzas de corte, etc.

El diagrama y las tablas de valores pueden ser copiadas a otras aplicaciones como, Microsoft® Word y Microsoft® Excel. Hay muchas opciones (Tool > Graph Options) para el diagrama y el usuario puede cambiar casi todos los aspectos de este el fondo, el color, el estilo y el grosor de la línea, las etiquetas de los ejes, etc. Note, que el usuario puede realizar acercamientos con el menu de comandos o con el correspondiente botón de la barra de herramientas. Para realizar un acercamiento en un área especifica selecciónela moviendo el puntero del ratón desde la esquina superior izquierda hasta la esquina inferior derecha. Para deshacer la selección, mueva el ratón en la dirección contraria (desde la derecha hacia la izquierda), el diagrama vuelve al inicio.

Para eliminar la pendiente de la gráfica, vaya a la pestaña Panel de la ventana Options y desactive la casilla de verificación Gradient-Visible. El resultado es un gráfico plano con un fondo blanco listo para copiar a un procesador de texto.

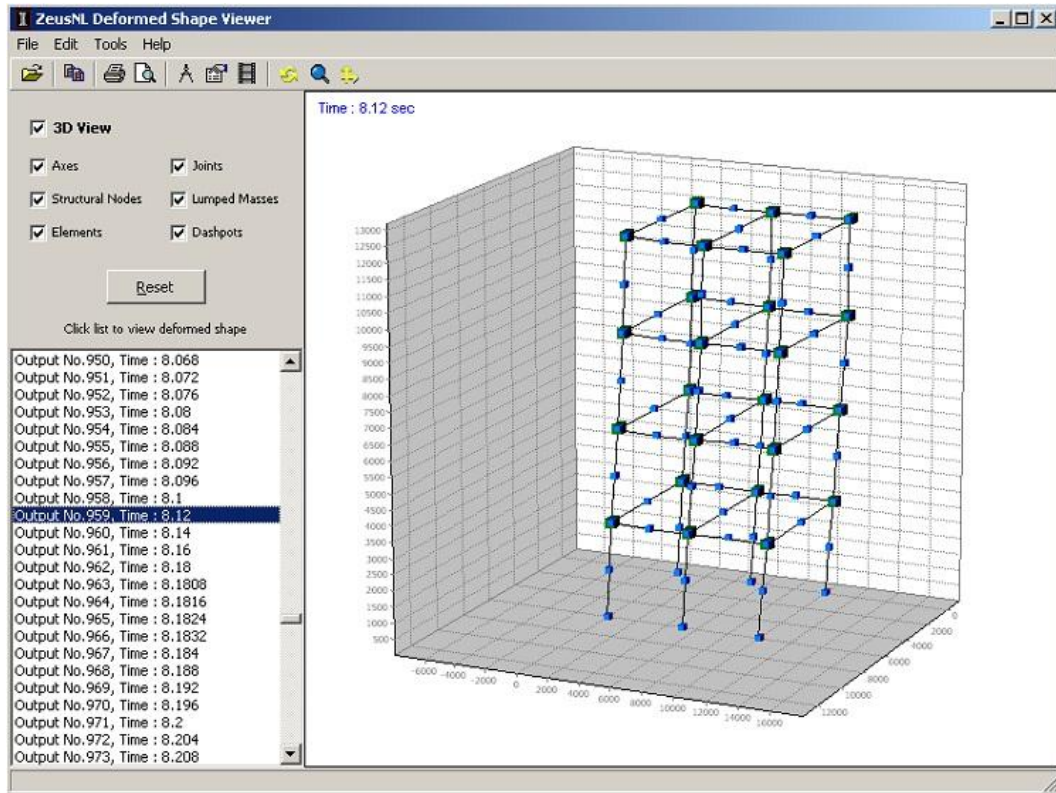
## **Visor de la Forma Deformada del Modelo**

Con el Post-Processor, el usuario puede crear rápida y fácilmente diagramas seleccionados de un análisis y copiar o imprimir. Sin embargo, surgen preguntas. Por ejemplo: ¿Que sucede cuando el usuario quiere ver como se ve la estructura realmente a los 6.02seg, cuando ocurre el máximo desplazamiento en el nodo n151? ¿Hay una manera de identificar los entrepisos? ¿Cómo se ve a segunda forma modal de la estructura?

El visor de la forma deformada de la estructura responde a estas preguntas. Cierre el Post-Processor (esto lleva al usuario a la ventana principal del programa (Main Program) y abra Tools > Deformed Shape Viewer.

Desde el visor de formas, abra el archivo num este archivo se ha creado junto con el análisis. Después de que el archivo se ha cargado, una lista con los pasos del tiempo utilizados en el análisis aparecen en pantalla. Seleccione el paso de tiempo 6.68sec y de click en el botón View Shape. En un par de segundos la forma deformada aparece y está lista para ser copiada o pegada.

Fig. 11 Visor de la Forma Deformada (análisis dinámico)



## TUTORIAL 2 – ANÁLISIS DE VALORES PROPIOS (EIGENVALUE)

El análisis dinámico se ha ejecutado con una estructura de 4 pisos, pero si el fin es obtener las características dinámicas de dicha estructura, por ejemplo, los periodos y las formas modales, un análisis de valores propios (eigenvalues) debe ser realizado.

Hay dos formas para hacer esto. La más vigorosa sería modificar el modelo existente a las necesidades del análisis de valor propio. Sin embargo podrían aparecer problemas al cambiar de un análisis a otro. La segunda forma es creando una nueva estructura idéntica a la del modelo desde las plantillas.

Seleccione File > Create from Template y especifique las mismas características estructurales del ejemplo anterior, pero ahora escoja análisis de eigenvalues en vez de análisis dinámico.

Hay un par de cambios en este modelo, en comparación con el primer modelo de análisis:

Hay unos módulos que no están: Time-History Curves, Loads, y Equilibrium Stages. Todos estos módulos están relacionados con la carga aplicada y por consiguiente, no son necesarios para el análisis de valores propios.

El x-DOF de los soportes que se relaciona con el análisis dinámico está ahora restringido.

Además de estas diferencias, los módulos deberían ser idénticos. Guarde el proyecto y ejecútelo. Luego de que el análisis sea completado (por que el análisis de valores propios, no debería de demorar más de unos segundos), abra el visor de la forma deformada y abra del archivo de análisis .num. Una lista de las formas

modales convergentes aparecerá. Seleccione cada uno de ellos y de click View Shape para ver las formas modales (fig. 12). Nuevamente, el usuario puede copiar, imprimir o cambiar la apariencia del grafico en 3D.

**Fig. 12 Visor de la Forma Deformada (análisis de valores propios)**

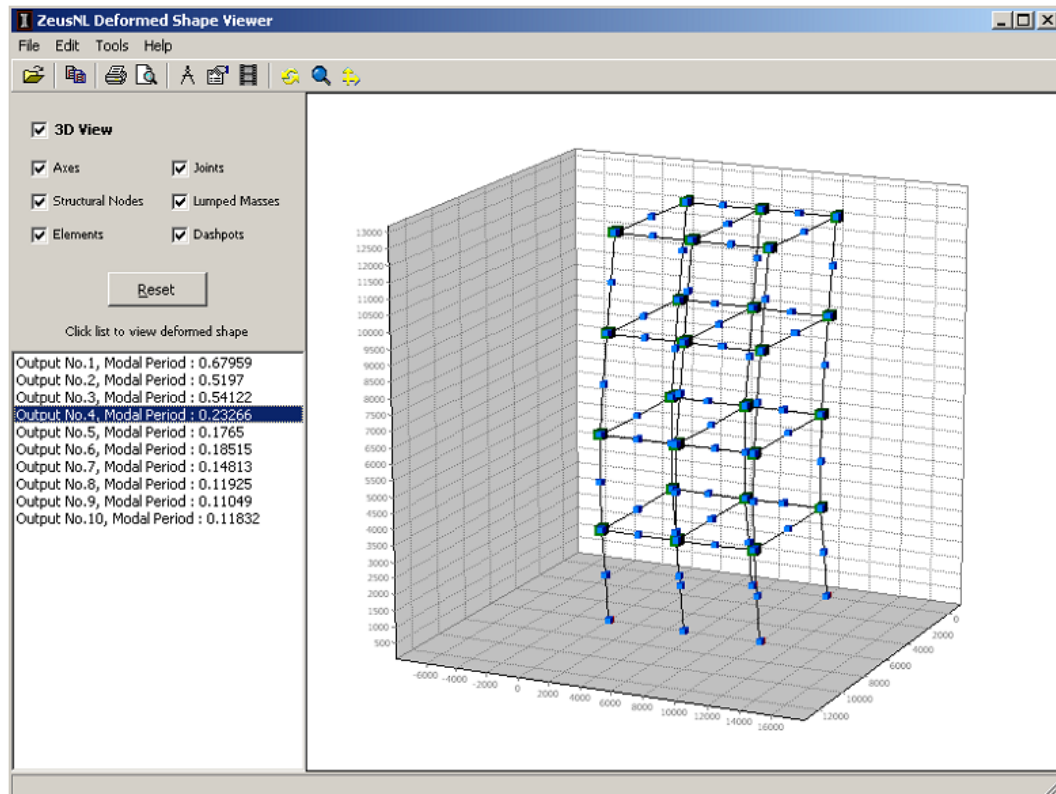


Fig. 13 Pantalla de Plantillas (análisis pushover)

The 'Open Template' dialog box is divided into several sections:

- Reference Dimensions:** Includes three input fields: 'Bay Length (mm)' with value 5000, 'Storey Height (mm)' with value 3000, and 'Distance between Frames' with value 6000.
- Structural Model:** Contains two large buttons labeled '3D' and '2D'. The '3D' button is highlighted in blue.
- Settings:** Includes a checked 'Regular Structure' checkbox, a 'Structural Type' dropdown menu set to 'Reinforced Concrete Structure', an 'Elements per Member' dropdown set to '2', and a 'Node Naming Convention' dropdown set to 'n111-x1'.
- Loading:** Includes an 'Analysis Type' dropdown set to 'Static Pushover Analysis' and a 'Loading Type' dropdown set to 'Uniform distribution'.

Buttons for 'Ok' and 'Cancel' are located on the right side of the dialog.

Fig. 14 Pantalla de Plantillas 2 (análisis pushover)

The 'Maximum Nominal Proportional Load' dialog box contains a text input field labeled 'Top node nominal proportional load' with the value '100e3' entered. Below the input field are 'OK' and 'Cancel' buttons.

### TUTORIAL 3 – ANÁLISIS PASO A PASO (PUSHOVER)

La usara la plantilla de ZeusNL para crear un modelo de la estructura para un análisis de paso a paso. Seleccione Static Pushover Análisis como el tipo de análisis, aparecerá una lista desplegable aparecerá preguntando al usuario por la distribución de las cargas (uniforme o triangular). Seleccione la que se encuentra seleccionada por defecto Uniform (fig. 13). De click en OK y un nuevo cuadro de dialogo se abrirá en el que se especifica el valor objetivo de la carga proporcional aplicada en cada entrepiso (Fig. 14).

Las principales diferencias entre los modelos para el análisis dinámico y el análisis paso a paso son:

No hay masas. Las masas no son necesarias ya que no hay fuerzas de inercia en el análisis estático paso a paso.

La X-DOF es restringida en los soportes.

Los módulos Time-History Curves y Equilibrium Stages no se encuentran. En cambio hay un nuevo módulo extra llamado Loading Phases. Este módulo define las fases controladas que se usaran para trazar las curvas de deflexión de carga para carga proporcional. Tres tipos de control están disponibles:

- Control de la Carga (Load Control) Se refiere a la situación donde el factor de carga  $\lambda$  es directamente incrementado y los desplazamientos globales de la estructura son determinados en cada nivel del factor de carga. Las cargas aplicadas pueden ser fuerzas o desplazamientos.
- Control de la Respuesta (Response Control) Se refiere a la situación donde la respuesta (desplazamiento/rotación) de un nodo, especificado por el usuario, aumenta en cada incremento. La carga aplicada y las deformaciones en los otros nodos, se determina por la solución del programa.

Control de Respuesta Automática (Automatic Response Control) Se refiere al procedimiento en el cual un nuevo DOF se escoge automáticamente para el control de la respuesta, cada vez que surgen problemas con la convergencia durante el análisis. El nodo elegido es el que tienen la mayor tasa de la respuesta tangencial.

Existen diferentes esquemas que pueden ser aplicados. Por el momento, el creado por defecto por la plantilla será usado: una fase de control de carga y una fase de control de respuesta automático. Por el momento, solo vale la pena mencionar el objetivo del desplazamiento del control automático (cuál es la momento en el que el análisis se detendrá, si no se ha detenido antes por problemas de divergencia) y la dirección de la libertad controlada (en este caso dejamos la dirección  $-x$ ).

Después de la terminación del análisis, al igual que en los anteriores tutoriales, los resultados pueden ser procesados con el Post-Procesador y con el visor de la forma deformada. (Fig. 16 y 17)

Fig. 15 Modelo Creado Para el Analisis Paso a Paso

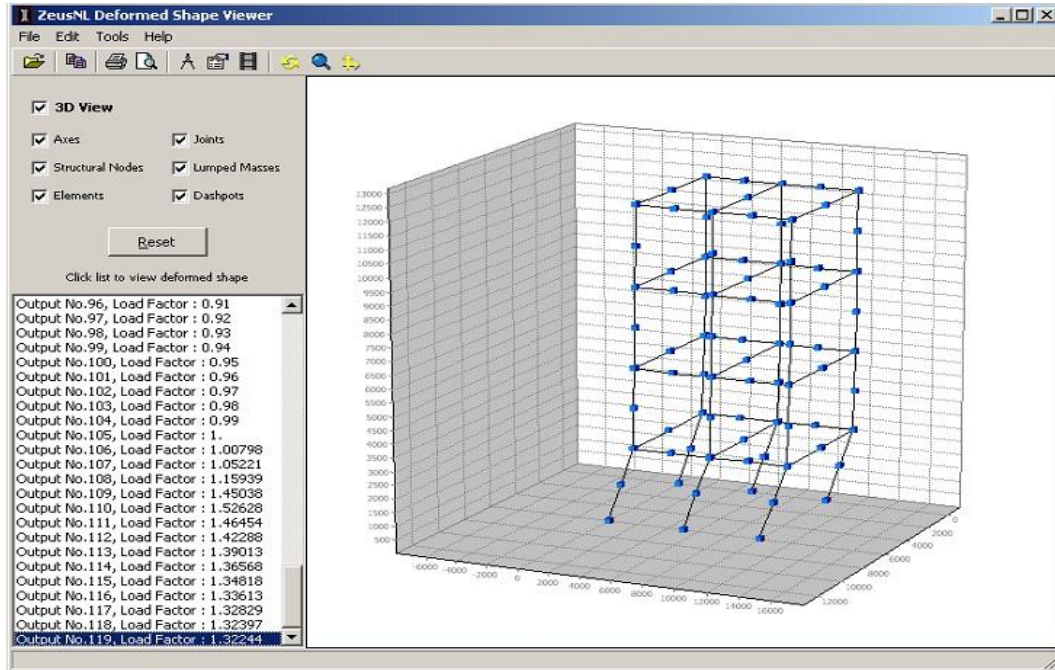


Fig. 16 Curva de Desplazamiento Maximo vs Factor de Carga

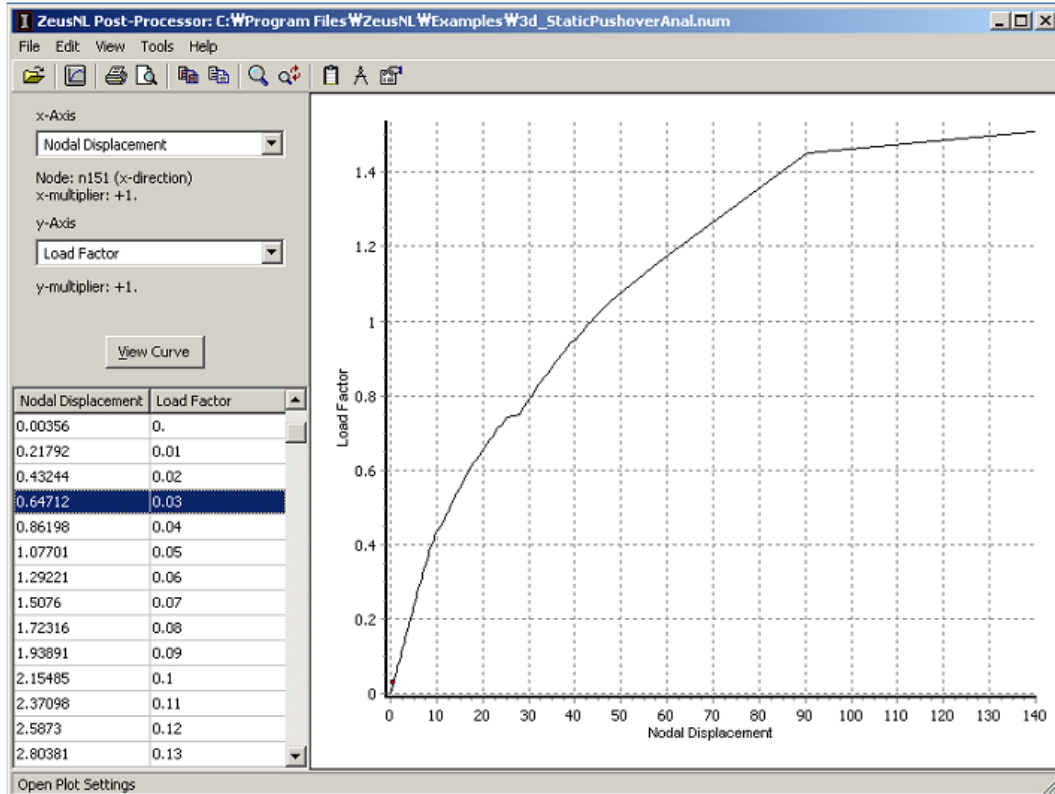
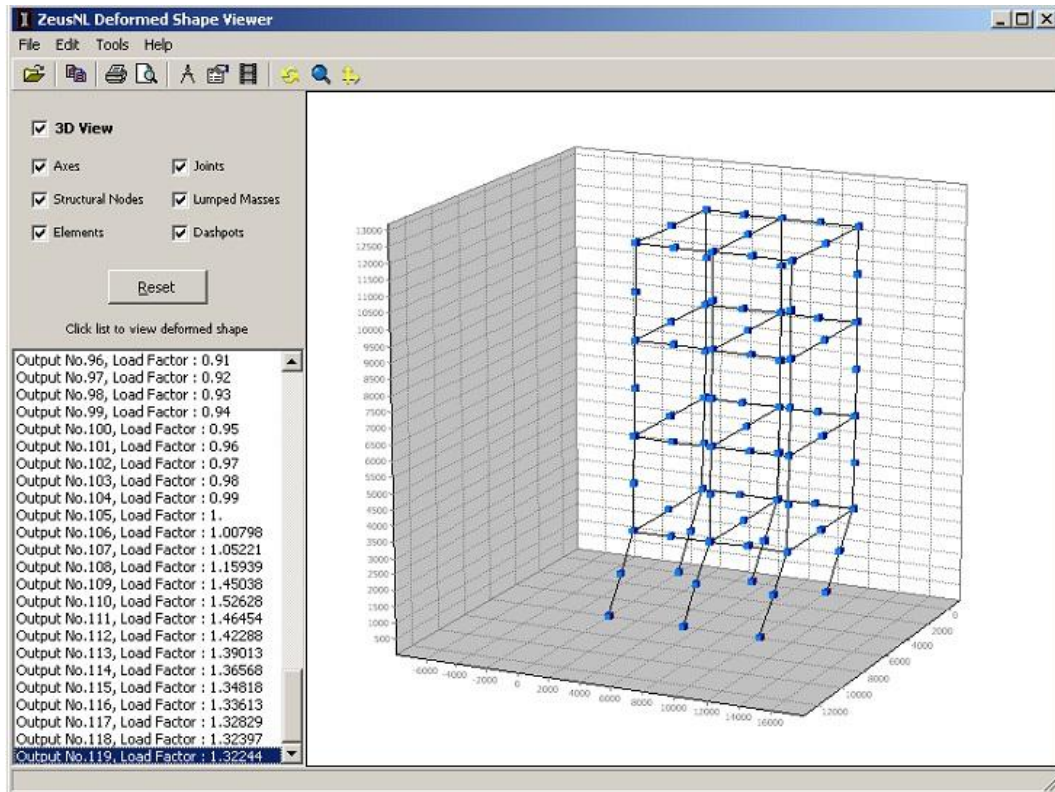


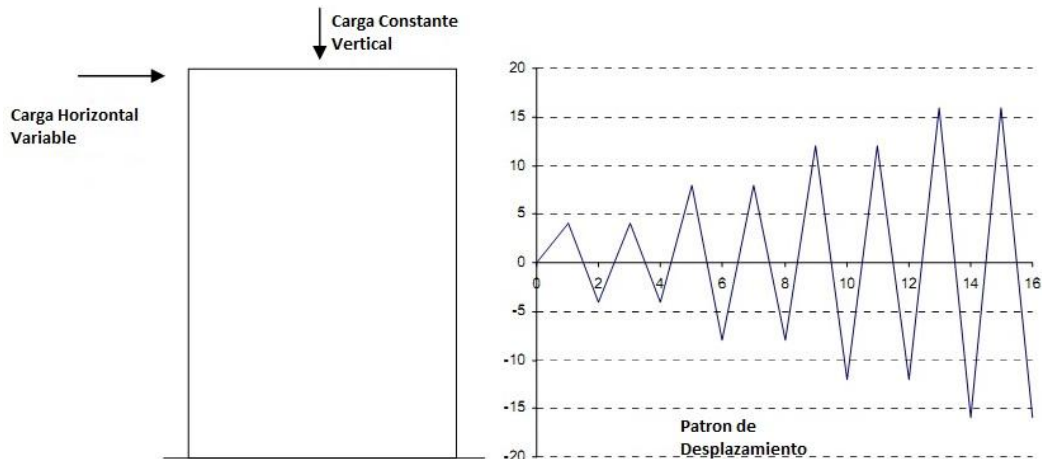
Fig. 17 Forma Deformada al final del Procedimiento



## TUTORIAL 4 –ANÁLISIS ESTÁTICO DE TIEMPO-HISTORIA (STATIC TIME-HISTORY ANÁLISIS)

Este análisis es usualmente usado para la simulación de ensayos. Por ejemplo, el usuario puede imaginar modelar un ensayo cíclico en un muro RC. Suponer que la carga se compone de una fuerza vertical y un desplazamiento variable aplicado en la parte superior del muro (Fig. 18), de acuerdo a un patrón predefinido

**Fig. 18 Ensayo Cíclico en un Muro RC**



Esta vez no se usó una plantilla. El modelo se generó a partir de cero, módulo por módulo. Incluso sin la facilidad de la función Template, crear un modelo con ZeusNL es simple.

### Configuración Estructural

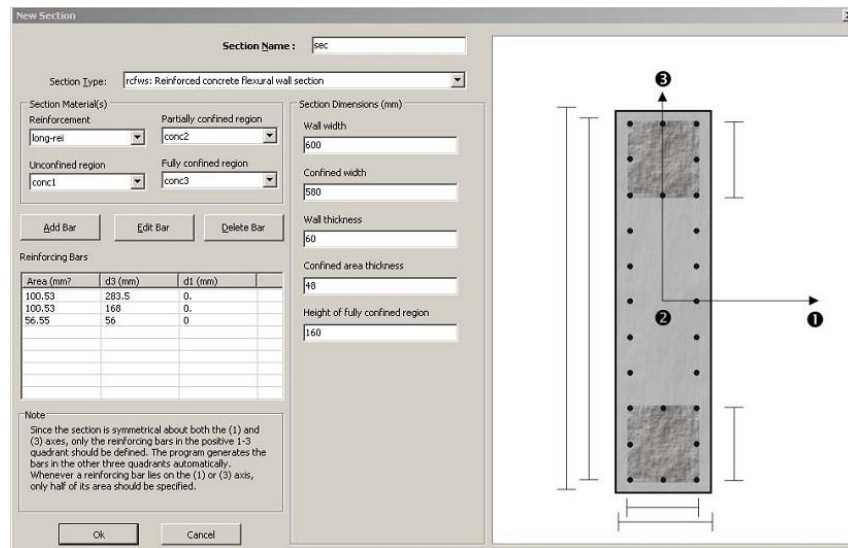
En el módulo Analysis, seleccione el análisis Static Time-History. En el módulo Materials, el usuario definirá cuatro materiales para el proyecto, uno para las barras reforzadas y tres para el concreto, ya que la sección de la pared RC es rcfws consiste de cuatro diferentes materiales.

Use el tipo de material stl1 para el acero a lo largo del muro y material tipo 2 para los tres materiales de concreto (no confinados: con1; confinamiento parcial: con2; totalmente confinados: con3). Tenga en cuenta, que los parámetros de con1, con2 y con3 son exactamente los iguales (a la compresión y resistencia a la tracción, trituración por la tensión), además del factor de confinamiento.

**Fig. 19 Materiales Utilizados en el Análisis Estático de Tiempo-Historia**

Material Name	Material Type	Material Properties
long-rei	stl1	200000, 500, 0.05
concl	con2	20, 2.2, 0.002, 1
con2	con2	20, 2.2, 0.002, 1.03
con3	con2	20, 2.2, 0.002, 4

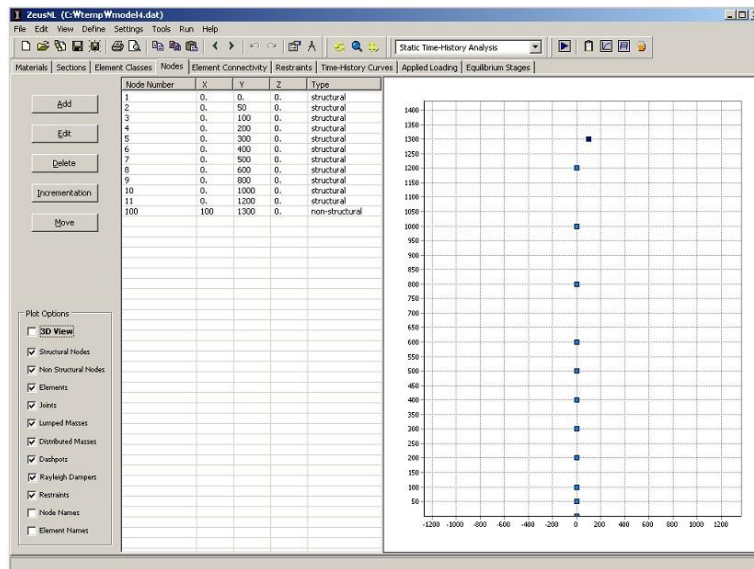
**Fig. 20 Sección de Muro Usado Para el Análisis**



Con estos cuatro materiales, el usuario puede ahora definir la sección del muro (Fig. 20) usando el tipo de sección rcfws y también definir un elemento de clase cubico al que llamara Wall, con la nueva sección y (por ejemplo) por lo menos 250 puntos de control. Los nodos, elementos y restricciones del modelo se muestran en las Fig. 22, 23 y 24. Para su obtención, es recomendable usar la función

Incrementación del programa. Por ejemplo, después de definir el primer elemento 1, el usuario puede fácilmente obtener los otros elementos como en la Fig. 23. Además, note que el nodo no estructural 100 que es usado para la definición de los elementos y que todos los nodos están restringidos para deformaciones fuera de los planos ( $z + rx + ry$ ).

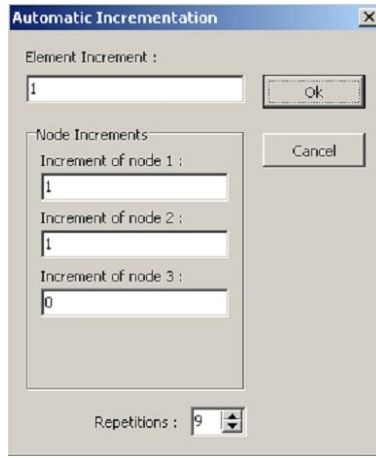
**Fig. 21 Modelamiento de los Nodos**



**Fig. 22 Modelamiento de los Elementos**

Element Number	Element Class	Node numbers
1	wall	1 2 100
2	wall	2 3 100
3	wall	3 4 100
4	wall	4 5 100
5	wall	5 6 100
6	wall	6 7 100
7	wall	7 8 100
8	wall	8 9 100
9	wall	9 10 100
10	wall	10 11 100

**Fig. 23 Uso del Incremento Automatico de Elementos para Obtener los Elementos 2-10 a Partir del Elemento 1**

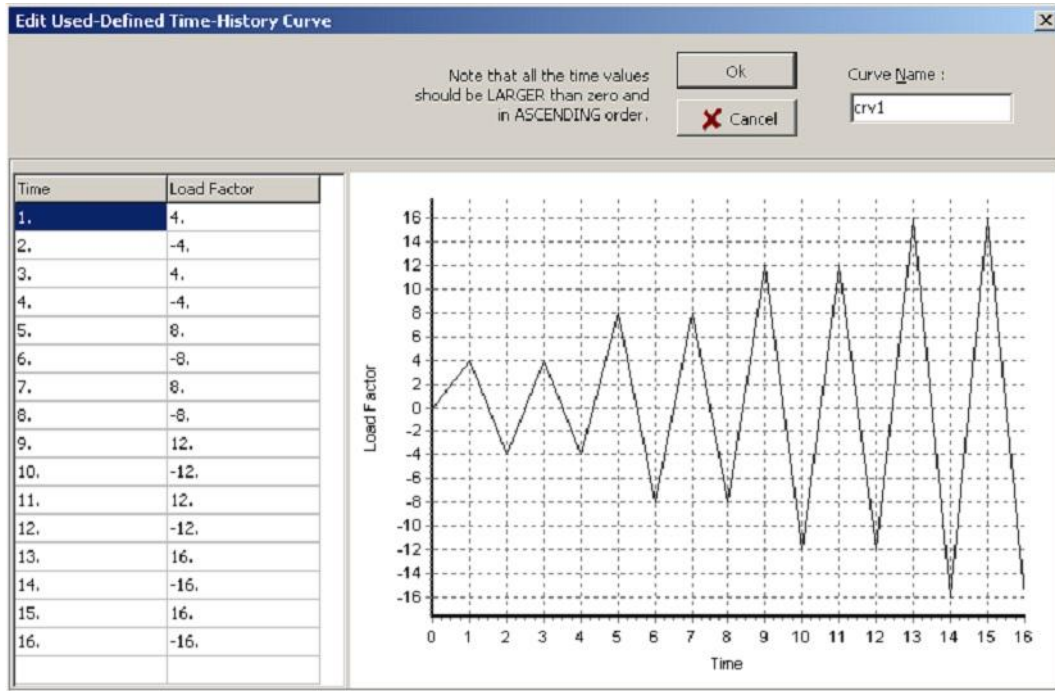


**Fig. 24 Restricciones del Modelo**

Node Number	Restrictions
1	x+y+z+rx+ry+rz
2	z+rx+ry
3	z+rx+ry
4	z+rx+ry
5	z+rx+ry
6	z+rx+ry
7	z+rx+ry
8	z+rx+ry
9	z+rx+ry
10	z+rx+ry
11	z+rx+ry

El siguiente paso es determinar la carga aplicada, la cual consiste de una fuerza constante vertical y un desplazamiento variable horizontal en el nodo 11. Primero describa el patrón de para la carga horizontal. Esto lo hace en el módulo Time-History Curve. Selecciones Create a Curve, lo que lleva al usuario al cuadro de dialogo New User-Defined Curve. Defina el dominio del tiempo y las coordenadas y el factor de carga de la carga en la tabla, así como el nombre de la curva (Fig. 25) y de click en OK.

**Fig. 25 Nueva Curva de Carga Definida por el Usuario**



Las cargas aplicadas se puede definir en el módulo Applied Loading como una carga inicial y una carga estática de tiempo-historia (Fig. 26). El proceso es extremadamente sencillo. Note que, la carga vertical se dirige hacia abajo por lo tanto debe ser negativa y que para aplicar dos o tres veces la carga variable horizontal, el usuario solo tendría que cambiar el valor del parámetro del factor de carga de 1.0 a 2.0 o 3.0, respectivamente.

**Fig. 26 Cargas Aplicadas al Modelo**

Category	Node Number	Direction	Type	Value	Curve Name
Initial Load	11	y	force	-1500	
Static Time-History Load	11	x	displacement	1	crv1

Finalmente, los estados de equilibrio necesitan ser definidos. Para nuestro test en los 16seg del tiempo se definirán 320 pasos. El paso del tiempo será entonces de 0.05seg.

El modelo está listo para correr. De click en Run > Run y espere a que termine el análisis. Después de terminar, la curva de histéresis del muro debe ser trazada. Ejecute el post procesador (Tool > Post-Processor) y abra el archivo del proyecto con extensión .num. Escoja el desplazamiento en  $-x$  para el nodo 11 para el eje  $-x$  del gráfico y el momento  $M_z$  en el apoyo en el nodo 1 para el eje  $-y$  del gráfico. De click en el botón View Curve para observar el resultado de la curva de histéresis. En este punto se necesita formatear.

Las unidades del momento por defecto son  $N \cdot mm$ . Vaya al cuadro de dialogo Tools > Settings y cambie el factor multiplicador en el eje  $-y$  por  $1e-6$  o  $0.000001$ . Ahora seleccione Tools > Graph Options y en la pestaña Panel desactive la casilla Gradient-Visible. En pestaña Axis, diríjase al sub-menú Title a la izquierda y cambie los títulos del eje por 'Support Moment (kNm) y 'Top Displacement (mm), respectivamente. Como resultado ya tendrá una grafica

Fig. 27 Diagrama de la Curva de Histéresis

