

**Validación de un nuevo modelo para el cálculo de deformaciones inducidas
por sismo en tuberías superficiales**

Jorge Humberto Arcila Zea

**Grupo de Mecánica Aplicada
Departamento de Ingeniería Civil
Escuela de Ingeniería
Universidad EAFIT
Medellín, Colombia**

2014

**Validación de un nuevo modelo para el cálculo de deformaciones inducidas
por sismo en tuberías superficiales**

Jorge Humberto Arcila Zea

**Trabajo presentado como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ingeniería**

Asesor:

Juan Diego Jaramillo Fernández Ph. D.

**Grupo de Mecánica Aplicada
Departamento de Ingeniería Civil
Escuela de Ingeniería
Universidad EAFIT
Medellín, Colombia**

2014

Nota de aceptación

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

Ciudad y Fecha

“Todos somos genios. Pero si juzgas a un pez por su capacidad para trepar árboles, vivirá toda su vida pensando que es un inútil”

Albert Einstein (1879 – 1955)

“El genio se compone del 2% de talento y del 98% de perseverante aplicación”

Ludwig van Beethoven (1770 – 1827)

Agradecimientos

A la Universidad EAFIT por brindarme la oportunidad de poder llevar a cabo mis estudios de posgrado a nivel de Maestría.

A todos los docentes que tuve en el posgrado porque de todos ellos pude aprender algo que enriqueciera mi formación profesional y académica.

A mi asesor Juan Diego Jaramillo por no sólo guiarme en la elaboración de mi proyecto de Maestría sino por enseñarme otras perspectivas en la forma de afrontar los problemas de Ingeniería más allá de lo inmediato y evidente.

A mis profesores de la Universidad de Antioquia del área de estructuras por haber sembrado en mí el gusto y la pasión por la Ingeniería Estructural, y de forma especial al profesor Carlos Alberto Riveros Jerez por iniciarme en los quehaceres de la investigación en Ingeniería y enseñarme el hábito del autoaprendizaje.

A mi Familia por su apoyo incondicional durante la realización de mis estudios de Maestría.

A mi Novia Oriana por su apoyo, su ánimo y sobre todo su comprensión por tantos sacrificios que tuvimos que hacer durante mis estudios de Maestría.

Tabla de contenido	
Resumen	7
Abstract	8
Introducción	9
Objetivos	10
Objetivo general	10
Objetivos específicos	10
Planteamiento del problema	11
Capítulo 1 – Conceptos y definiciones.....	12
1.1. Variación espacial de los movimientos sísmicos del terreno	12
1.1.1. Definición	12
1.1.2. Causas	13
1.1.3. Análisis de la variación espacial de los movimientos del terreno	14
1.2. Dinámica de estructuras con múltiples apoyos.....	17
Capítulo 2 – Antecedentes.....	18
Capítulo 3 – Nuevo modelo propuesto.....	20
3.1. Hipótesis del modelo a validar	20
3.2. Expresiones matemáticas del modelo.....	21
Capítulo 4 – Definición de las tuberías y de las excitaciones sísmicas.....	25
4.1. Definición de las tuberías para el análisis	25
4.2. Creación de las historias de tiempo de la excitación	27
Capítulo 5 – Cálculo de las deformaciones	29
5.1. Análisis dinámico de las tuberías	29
5.2. Cálculo de las deformaciones en las tuberías	30
Capítulo 6 – Resultados y conclusiones	33
6.1. Respuestas espectrales medias.....	33
6.2. Deformaciones en tuberías con tramos iguales	34
6.2.1. Sensibilidad de las deformaciones	34
6.2.2. Comparación de los resultados.....	46
6.3. Deformaciones en tuberías con tramos diferentes	53
6.3.1. Sensibilidad de las deformaciones	54

6.3.2. Comparación de los resultados.....	78
6.4. Conclusiones.....	105
Anexo – Tablas con deformaciones	110
A.1. Resultados para las tuberías con tramos iguales.....	110
A.2. Resultados para las tuberías con tramos diferentes	114

Listado de figuras

Figura 1 – Registros sísmicos del SMART-I en estaciones separadas 200 m en de un mismo evento.....	13
Figura 2 – Esquema de los efectos que causan variaciones en el movimiento sísmico del terreno	14
Figura 3 – Espectros de respuesta aceleración típicos de las historias usadas en esta investigación	28
Figura 4 – Variación de las deformaciones con el número de apoyos – Suelo blando	38
Figura 5 – Variación de las deformaciones con el número de apoyos – Suelo duro.....	39
Figura 6 – Variación de las deformaciones con la correlación– Suelo blando.....	40
Figura 7 – Variación de las deformaciones con la correlación– Suelo duro	41
Figura 8 – Variación de las deformaciones con la longitud – Suelo blando	43
Figura 9 – Variación de las deformaciones con la longitud – Suelo duro.....	44
Figura 10 – Variación del error relativo con la longitud – Suelo blando	49
Figura 11– Variación del error relativo con la longitud – Suelo duro.....	50
Figura 12 – Variación del error relativo con el número de apoyos – Suelo blando	51
Figura 13 – Variación del error relativo con el número de apoyos – Suelo duro.....	52
Figura 14 – Variación del error relativo con la correlación (N=10) – Suelo blando.....	54
Figura 15 – Variación del error relativo con la correlación (N=10) – Suelo duro	55
Figura 16 – Variación del error relativo con la correlación (L=10.0 m) – Suelo blando	56
Figura 17 – Variación del error relativo con la correlación (L=10.0 m) – Suelo duro.....	57
Figura 18 – Variación de la deformación axial con la longitud en tuberías tipo 1 – Suelo blando.....	60
Figura 19 – Variación de la deformación flectora con la longitud en tuberías tipo 1 – Suelo blando	61
Figura 20 – Variación de la deformación total con la longitud en tuberías tipo 1 – Suelo blando.....	62
Figura 21 – Variación de la deformación axial con la longitud en tuberías tipo 1 – Suelo duro	63
Figura 22 – Variación de la deformación flectora con la longitud en tuberías tipo 1 – Suelo duro.....	64
Figura 23 – Variación de la deformación total con la longitud en tuberías tipo 1 – Suelo duro.....	65
Figura 24 – Variación de la deformación axial con la longitud en tuberías tipo 2 – Suelo blando.....	66
Figura 25 – Variación de la deformación flectora con la longitud en tuberías tipo 2 – Suelo blando	67
Figura 26 – Variación de la deformación total con la longitud en tuberías tipo 2 – Suelo blando.....	68
Figura 27 – Variación de la deformación axial con la longitud en tuberías tipo 2 – Suelo duro	69
Figura 28 – Variación de la deformación flectora con la longitud en tuberías tipo 2 – Suelo duro.....	70
Figura 29 – Variación de la deformación total con la longitud en tuberías tipo 2 – Suelo duro.....	71
Figura 30 – Variación de la deformación axial con la longitud en tuberías tipo 3 – Suelo blando.....	72
Figura 31 – Variación de la deformación flectora con la longitud en tuberías tipo 3 – Suelo blando	73
Figura 32 – Variación de la deformación total con la longitud en tuberías tipo 3 – Suelo blando.....	74

Figura 33 – Variación de la deformación axial con la longitud en tuberías tipo 3 – Suelo duro	75
Figura 34 – Variación de la deformación flectora con la longitud en tuberías tipo 3 – Suelo duro.....	76
Figura 35 – Variación de la deformación total con la longitud en tuberías tipo 3 – Suelo duro	77
Figura 36 – Error relativo para deformación axial en tuberías tipo 1 – Suelo blando.....	83
Figura 37 – Error relativo para deformación flectora en tuberías tipo 1 – Suelo blando	84
Figura 38 – Error relativo para deformación total en tuberías tipo 1 – Suelo blando	85
Figura 39 – Error relativo para deformación axial en tuberías tipo 1 – Suelo duro	86
Figura 40 – Error relativo para deformación flectora en tuberías tipo 1 – Suelo duro.....	87
Figura 41 – Error relativo para deformación total en tuberías tipo 1 – Suelo duro.....	88
Figura 42 – Error relativo para deformación axial en tuberías tipo 2 – Suelo blando.....	89
Figura 43 – Error relativo para deformación flectora en tuberías tipo 2 – Suelo blando	90
Figura 44 – Error relativo para deformación total en tuberías tipo 2 – Suelo blando	91
Figura 45 – Error relativo para deformación axial en tuberías tipo 2 – Suelo duro	92
Figura 46 – Error relativo para deformación flectora en tuberías tipo 2 – Suelo duro.....	93
Figura 47 – Error relativo para deformación total en tuberías tipo 2 – Suelo duro.....	94
Figura 48 – Error relativo para deformación axial en tuberías tipo 3 – Suelo blando.....	95
Figura 49 – Error relativo para deformación flectora en tuberías tipo 3 – Suelo blando	96
Figura 50 – Error relativo para deformación total en tuberías tipo 3 – Suelo blando	97
Figura 51 – Error relativo para deformación axial en tuberías tipo 3 – Suelo duro	98
Figura 52 – Error relativo para deformación flectora en tuberías tipo 3 – Suelo duro.....	99
Figura 53 – Error relativo para deformación total en tuberías tipo 3 – Suelo duro.....	100
Figura 54 – Variación del error relativo con la correlación en tuberías tipo 1 – Suelo blando.....	101
Figura 55 – Variación del error relativo con la correlación en tuberías tipo 2 – Suelo blando.....	102
Figura 56 – Variación del error relativo con la correlación en tuberías tipo 3 – Suelo blando.....	102
Figura 57 – Variación del error relativo con la correlación en tuberías tipo 1 – Suelo duro	103
Figura 58 – Variación del error relativo con la correlación en tuberías tipo 2 – Suelo duro	104
Figura 59 – Variación del error relativo con la correlación en tuberías tipo 3 – Suelo duro	104

Listado de tablas

Tabla 1– Longitudes usadas para las tuberías con tramos iguales	26
Tabla 2 – Longitudes usadas para las tuberías con tramos diferentes y 3 apoyos.....	26
Tabla 3 – Longitudes usadas para las tuberías con tramos diferentes y 14 apoyos ($L_1=L_2$)	26
Tabla 4– Longitudes usadas para las tuberías con tramos de diferentes y 14 apoyos ($L_1\neq L_2$).....	27
Tabla 5 – Periodos fundamentales y desplazamientos espectrales medios	33
Tabla 6 – Desviaciones estándar para los desplazamientos espectrales medios	34
Tabla 7 – Deformaciones de la tubería con 2 apoyos y $L=10.0$ m (Suelo blando)	110
Tabla 8 – Deformaciones de la tubería con 2 apoyos y $L=10.0$ m (Suelo duro).....	111
Tabla 9 – Deformaciones de la tubería con 5 apoyos y $L=10.0$ m (Suelo blando)	111
Tabla 10 – Deformaciones de la tubería con 5 apoyos y $L=10.0$ m (Suelo duro).....	112
Tabla 11 – Deformaciones de la tubería con 10 apoyos y $L=5.0$ m (Suelo blando)	112
Tabla 12 – Deformaciones de la tubería con 10 apoyos y $L=5.0$ m (Suelo duro).....	112
Tabla 13 – Deformaciones de la tubería con 10 apoyos y $L=10.0$ m (Suelo blando)	113
Tabla 14– Deformaciones de la tubería con 10 apoyos y $L=10.0$ m (Suelo duro).....	113
Tabla 15– Deformaciones de la tubería con 10 apoyos y $L=20.0$ m (Suelo blando)	113
Tabla 16– Deformaciones de la tubería con 10 apoyos y $L=20.0$ m (Suelo duro).....	114
Tabla 17– Deformaciones de la tubería con 20 apoyos y $L=10.0$ m (Suelo blando)	114
Tabla 18– Deformaciones de la tubería con 20 apoyos y $L=10.0$ m (Suelo duro).....	114
Tabla 19 – Deformaciones de las tuberías tipo 1 – Clase 1 (Suelo blando).....	115
Tabla 20 – Deformaciones de las tuberías tipo 1 – Clase 1 (Suelo duro).....	115
Tabla 21 – Deformaciones de las tuberías tipo 1 – Clase 2 (Suelo blando).....	116
Tabla 22 – Deformaciones de las tuberías tipo 1 – Clase 2 (Suelo duro).....	116
Tabla 23 – Deformaciones de las tuberías tipo 1 – Clase 3 (Suelo blando).....	117
Tabla 24 – Deformaciones de las tuberías tipo 1 – Clase 3 (Suelo duro).....	117
Tabla 25 – Deformaciones de las tuberías tipo 1 – Clase 4 (Suelo blando).....	118
Tabla 26 – Deformaciones de las tuberías tipo 1 – Clase 4 (Suelo duro).....	118
Tabla 27 – Deformaciones de las tuberías tipo 2 – Clase 1 (Suelo blando).....	119
Tabla 28 – Deformaciones de las tuberías tipo 2 – Clase 1 (Suelo duro).....	119
Tabla 29 – Deformaciones de las tuberías tipo 2 – Clase 1 (Suelo blando).....	120
Tabla 30 – Deformaciones de las tuberías tipo 2 – Clase 1 (Suelo duro).....	120
Tabla 31 – Deformaciones de las tuberías tipo 2 – Clase 2 (Suelo blando).....	121
Tabla 32 – Deformaciones de las tuberías tipo 2 – Clase 2 (Suelo duro).....	121

Tabla 33– Deformaciones de las tuberías tipo 3 (Suelo blando)..... 122

Tabla 34– Deformaciones de las tuberías tipo 3 (Suelo duro) 122

Tabla 35– Deformaciones de las tuberías tipo 3 (Suelo blando)..... 123

Tabla 34– Deformaciones de las tuberías tipo 3 (Suelo duro) 123

Resumen

Se presentan los resultados obtenidos de la aplicación de un modelo propuesto para estimar las deformaciones medias en tuberías superficiales teniendo en cuenta la variación de los movimientos sísmicos del terreno a lo largo de los apoyos de la tubería.

Para validar el modelo propuesto se llevaron a cabo análisis dinámicos utilizando historias de tiempo de los desplazamientos en los apoyos de tuberías con diferentes longitudes y número de apoyos. En estos análisis se utilizó el programa comercial SAP2000®. Para definir las historias de tiempo usadas en cada uno de los apoyos de la tubería se consideraron diferentes valores del coeficiente de correlación entre ellas.

Los resultados de la investigación muestran que el modelo propuesto es adecuado para predecir las deformaciones inducidas por sismo en tuberías con tramos iguales en cualquier condición de suelo y no tan adecuado para tuberías con tramos diferentes. Se pudo evidenciar a partir de los resultados numéricos que para tuberías con tramos diferentes las componentes inerciales de deformación tienen una participación en la respuesta total casi que igual a la cuasiestática, debido fundamentalmente a la aparición de modos de vibración no considerados en el modelo simplificado propuesto.

Abstract

The results of the application of a proposed model for estimating the average strain in surface pipelines taking into account the variation of seismic displacements along the pipe supports are presented.

To validate the proposed model dynamic analysis were conducted using time histories of displacements at the pipe supports with different lengths and number of supports. In these analysis the commercial program SAP2000® was used. To define the time histories used in each of the pipe supports, different correlation coefficient between them were considered.

The research results show that the proposed model is suitable for predicting earthquake -induced deformations in pipes with supports at equal distances in any soil condition and not so good for pipes with supports at different lengths . It was evident from the numerical results that for pipes with supports at different lengths, the inertial deformation is as important as quasi-static deformation in the total response, mainly due to the participation of deformation modes no considered in the proposed model.

Introducción

Uno de los objetivos de la Ingeniería Estructural es desarrollar métodos que permitan reducir el potencial destructivo que los sismos pueden tener en las estructuras y su consecuente afectación a las personas. Existen muchas estructuras que por su importancia deben ser capaces funcionar durante y después de un sismo, como por ejemplo las tuberías. Éstas son estructuras vitales para el funcionamiento de los grandes y pequeños centros urbanos. Su importancia en el transporte de agua potable, gas natural, petróleo o aguas residuales las constituyen en estructuras que deben ser resistentes a la mayoría de eventos sísmicos. Por eso su análisis y diseño debe hacerse con la precisión que su importancia requiere.

Desde el punto de vista de la Ingeniería, las tuberías son unas de las estructuras que se ven afectadas por la llamada *variación espacial de los movimientos sísmicos del terreno*. Esta situación hace que no se puedan analizar por los medios convencionales que se aplican en otros tipos de estructuras.

La presente investigación se realizó con el objetivo de validar un nuevo método de análisis de tuberías superficiales propuesto en [1], el cual está pensado para ser aplicado en las etapas de prediseño de nuevas tuberías o estimación de la vulnerabilidad en tuberías existentes.

El método se caracteriza por tener expresiones simples para estimar la esperanza de las deformaciones por sismo en tuberías superficiales, en función de la geometría de la estructura y de algunos parámetros usuales que describen la amenaza sísmica del sitio.

La validación se llevó a cabo comparando las deformaciones calculadas por medio del método de elementos finitos con las calculadas con el modelo para diversos tipos de tuberías en condición de suelo blando y suelo duro. Los resultados muestran que el modelo predice en forma precisa las deformaciones por sismo en tuberías superficiales, y por lo tanto puede ser usado en etapas de prediseño o estimación de vulnerabilidad en tuberías superficiales.

Objetivos

Objetivo general

Validar un nuevo modelo para estimar las deformaciones inducidas por sismo en tuberías superficiales.

Objetivos específicos

- Definir la geometría, el número de apoyos y las propiedades mecánicas de las tuberías que serán usadas en la validación del modelo.
- Definir las historias de tiempo de desplazamiento que se usarán en los apoyos de las tuberías para representar los movimientos sísmicos del terreno.
- Evaluar la aplicabilidad del modelo propuesto en las tuberías con tramos de diferente longitud.
- Determinar los efectos de las hipótesis del modelo en la estimación de deformaciones en tuberías.
- Calibrar el modelo propuesto a partir de los resultados obtenidos de las simulaciones numéricas de tuberías.

Planteamiento del problema

En el análisis de estructuras convencionales se suelen hacer dos suposiciones respecto a los movimientos sísmicos del terreno: la primera supone que dichos movimientos son iguales en todos los apoyos de la estructura para un mismo instante de tiempo y la segunda, si bien supone que los movimientos son diferentes, asume que dicha diferencia se da sólo por una diferencia en el tiempo de llegada de la onda sísmica a los apoyos (movimiento coherente). Si bien para muchos casos las dos suposiciones anteriores son válidas, para otros, tales como los de estructuras apoyadas en el suelo en múltiples apoyos separados distancias apreciables, dichas hipótesis dejan de ser ciertas. Se ha comprobado por medio de evidencia instrumental obtenida de acelerogramas ubicados a distancias comparables a las dimensiones de algunas estructuras tales como puentes o tuberías, que los movimientos sísmicos del terreno pueden variar en forma significativa entre los diferentes soportes.

En el presente trabajo se presentan los resultados de la validación de un nuevo modelo propuesto para la estimación de deformaciones inducidas por sismo en tuberías superficiales.

Capítulo 1 – Conceptos y definiciones

1.1. Variación espacial de los movimientos sísmicos del terreno

1.1.1. Definición

El término *variación espacial de los movimientos del terreno* denota la diferencia de amplitudes y fase de movimientos sísmicos registrados sobre áreas extensas. Esta variación puede afectar la respuesta sísmica de estructuras que estén apoyadas en el terreno en puntos separados distancias apreciables, como sucede con tuberías, puentes y sistemas de transmisión de comunicaciones. Los movimientos diferenciales de los apoyos pueden incrementar la respuesta sísmica de dichas estructuras más allá de la respuesta esperada cuando se suponen iguales los movimientos en los apoyos. De acuerdo con lo que han planteado quienes han investigado el tema, la variación de los movimientos sísmicos del terreno no puede ser omitida cuando se analizan estructuras extendidas sobre la superficie del terreno [2].

La variación espacial de los movimientos sísmicos del terreno ha sido conocida desde hace muchos años. Este fenómeno ha ocasionado daños significativos en estructuras como puentes, como lo reportan varios investigadores [3, 4]. Sin embargo, sería sólo después de la instalación de arreglos densos de acelerógrafos cuando se pudo realmente dimensionar el fenómeno. Aunque el primer arreglo de acelerógrafos en El Centro (California) data de 1979, es el arreglo SMART-I

Capítulo 1 – Conceptos y definiciones

(*Strong Motion ARray in Taiwan*) el que más datos de sismos de pequeña y gran magnitud ha aportado. Este arreglo, instalado en 1985, ha permitido hacer estudios más precisos sobre la variación espacial de los movimientos del terreno sobre y cerca de la superficie del suelo.

En la figura 1 aparecen dos registros de un mismo sismo en el arreglo SMART-I. Aunque parecen ser similares, en sólo 200 m de separación ya se observan algunas diferencias. Con el aumento de la distancia las diferencias en amplitudes y fase se incrementan.

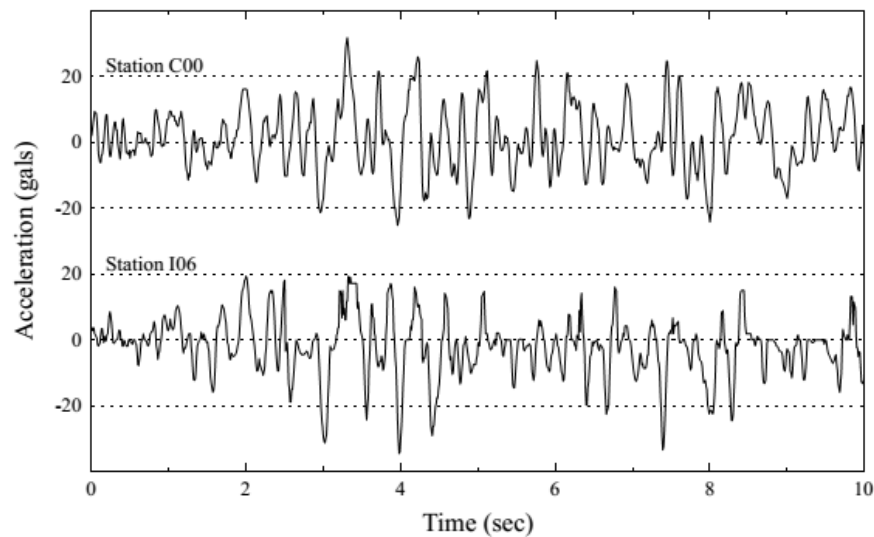


Figura 1 – Registros sísmicos del SMART-I en estaciones separadas 200 m en de un mismo evento (Tomado de la referencia [5])

1.1.2. Causas

Tres fenómenos son los responsables de estas variaciones en los movimientos sísmicos del terreno: el primero se conoce como el *efecto de paso de onda*, el cual se debe a la diferencia en los tiempos de llegada de las ondas sísmicas a los diferentes apoyos; el segundo es el *efecto de incoherencia*, el cual se debe a la pérdida de coherencia del movimiento ondulatorio debido a las reflexiones, a las refracciones, y a las interferencias y maneras de superposición de las ondas sísmicas en los distintos apoyos de la estructura; y el tercero es el *efecto de sitio*, el cual se debe a

Capítulo 1 – Conceptos y definiciones

la presencia de distintos tipos de suelo en cada uno de los apoyos, lo que hace que cambie la amplitud y contenido frecuencial en una u otra condición de suelo.

En la figura 2 se ilustra en forma esquemática las causas que ocasionan la variación espacial de los movimientos sísmicos del terreno.

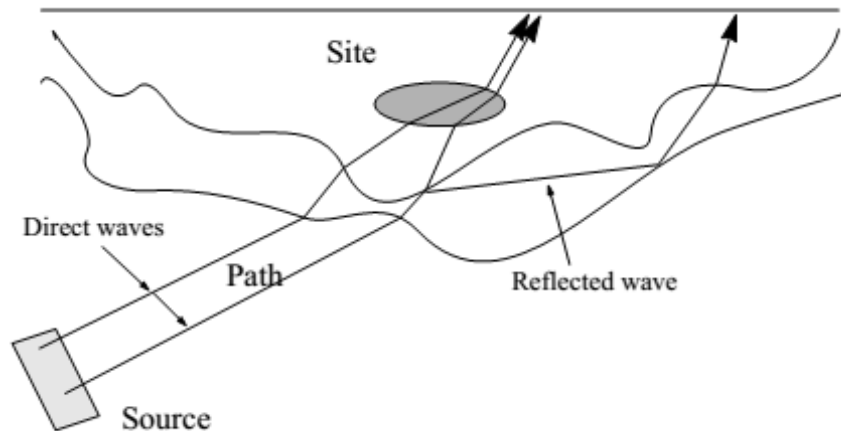


Figura 2 – Esquema de los efectos que causan variaciones en el movimiento sísmico del terreno (Tomado de la referencia [5])

1.1.3. Análisis de la variación espacial de los movimientos del terreno

De acuerdo con [2,5] los métodos que se han usado para estudiar la variación de los movimientos sísmicos del terreno se pueden agrupar en tres categorías: la primera es mediante una descripción determinista de los movimientos de los apoyos, la segunda es mediante una descripción estocástica y la tercera es mediante espectros de respuesta.

- **Descripción determinista**

La primera estrategia se fundamenta en el uso de diferentes historias de tiempo de aceleración o desplazamiento en cada apoyo.

Capítulo 1 – Conceptos y definiciones

Dichas historias pueden ser obtenidas de varias formas: *i)* mediante movimientos sísmicos reales registrados en arreglos de estaciones acelerográficas en sitios con condiciones *similares* a las del sitio que se está estudiando, *ii)* mediante simulaciones numéricas de la fuente sísmica y de la propagación de las ondas en un medio elástico y *iii)* mediante simulaciones basadas en vibraciones aleatorias para obtener historias de tiempo sintéticas.

Este enfoque permite tener en cuenta la naturaleza no estacionaria de la excitación sísmica, así como el comportamiento no lineal que la estructura pueda sufrir por la acción del sismo. Sin embargo, este enfoque tiene sus limitantes: sea cual sea el origen de las historias a usar, el análisis dinámico que se haga con éstas siempre conducirán a resultados específicos al conjunto de historias seleccionadas. Incluso, haciendo análisis dinámicos con dos grupos de historias de tiempo obtenidas o generadas en condiciones similares, se puede llegar a resultados diferentes.

- **Descripción estocástica**

La segunda estrategia está basada en la caracterización estadística del conjunto de movimientos en los apoyos. En este enfoque se asumen varias hipótesis sobre las historias de tiempo que representan el movimiento de los apoyos:

- i. Se consideran procesos estocásticos *estacionarios*. Esto quiere decir que los parámetros estadísticos de los movimientos no dependen de un instante de tiempo sino del lapso de tiempo entre dos instantes. Esta hipótesis conlleva a asumir que las historias de tiempo no tienen principio ni fin.
- ii. Se consideran procesos estocásticos *ergódicos*. Esto quiere decir que la media que se obtiene a partir de una sola realización del proceso es igual a la media de un ensamble o grupo de procesos.

La desventaja que podría presentar este enfoque es que requiere conocimientos de probabilidad y estadística, y es difícil de implementar en análisis no lineales.

Capítulo 1 – Conceptos y definiciones

- **Descripción por media de espectros de respuesta**

La tercera estrategia está basada en los espectros de respuesta de los movimientos en los apoyos. Cuando no se tiene una definición precisa de éstos, sólo puede usarse el espectro de respuesta de dichos movimientos. El espectro de respuesta es la máxima respuesta de sistemas de un grado de libertad sometidos a una misma excitación sísmica.

El método basado en espectros fue propuesto por [4]. En su desarrollo se tuvieron en cuenta los efectos de paso de onda, de la incoherencia y de sitio.

Además tiene en cuenta la correlación entre los movimientos en los apoyos y los diferentes modos de vibración. La principal ventaja de este enfoque es que al usar el concepto de espectro de respuesta, se hace fácilmente aplicable en la práctica y permite su incorporación en las normas de diseño sísmico. A diferencia de las descripciones anteriores, este método permite incluir el efecto de la no estacionalidad de la excitación y permite incluir efectos de análisis no lineales en forma aproximada.

Después del desarrollo del método se han propuesto otros basados también en los espectros de respuesta para los movimientos en cada apoyo. Algunos de estos tienen en cuenta algunas características: el efecto de incoherencia, los efectos locales, la correlación entre la componente cuasiestática y dinámica del movimiento de la estructura etc.

En esta última estrategia está basado el modelo planteado en [1], y es justamente este modelo el que se quiere validar en esta investigación.

Capítulo 1 – Conceptos y definiciones

1.2. Dinámica de estructuras con múltiples apoyos

El principio básico para el análisis dinámico de estructuras con múltiples apoyos sometidas a un sismo es considerar la respuesta total de la estructura como la suma o superposición de dos componentes: una componente *inercial* debida a la vibración de la estructura y otra componente *cuasiestática* debida a los desplazamientos relativos de los apoyos [6,7]. El cálculo de la componente inercial se lleva a cabo mediante análisis modal cronológico (si se cuenta con las historias de tiempo del movimiento en los apoyos) o mediante análisis modal espectral (si no se cuenta con las historias de tiempo, sino con un espectro de respuesta).

De acuerdo con [6] la respuesta en desplazamiento de una estructura con múltiples apoyos viene dada por:

$$u_k^t(x,t) = \sum_{i=1}^{Ng} \gamma_{ik}(x) u_{gik}(t) + \sum_{i=1}^{Ng} \sum_{j=1}^m \Gamma_{ijk} \phi_{jk}(x) D_{ijk}(t) \quad (1)$$

Donde $\gamma_{ik}(x)$ es la función de influencia de un desplazamiento del apoyo i en dirección k ($k=x,y,z$), $u_{gik}(t)$ es la historia de desplazamiento del apoyo i en dirección k , Γ_{ijk} es el factor de participación del modo j en dirección k debido a un movimiento sísmico del apoyo i en la misma dirección, $\phi_{jk}(x)$ es la forma del modo j en dirección k y $D_{ijk}(t)$ representa respuesta del modo j de la tubería en dirección k a un movimiento del apoyo i igual a $u_{gik}(t)$.

En (1) el primer término del miembro derecho representa la componente cuasiestática y el segundo término la componente inercial.

Capítulo 2 – Antecedentes

Desde hace muchos años se ha sabido que la variación espacial de los movimientos sísmicos del terreno puede afectar de manera significativa la respuesta sísmica de puentes de grandes luces [3, 8, 9] y de luces cortas [10]. Además de los puentes, las tuberías superficiales son otro tipo de estructuras cuya respuesta sísmica se puede ver afectada por la variación espacial de los movimientos sísmicos del terreno.

Los primeros métodos usados para estudiar el problema consistían en crear historias de tiempo que representaran la variación espacial de los movimientos sísmicos del terreno. Por ejemplo, en [11] se analiza una metodología basada en historias de tiempo generadas para un modelo de ondas sísmicas planas SH y en donde se determina los efectos que tiene la frecuencia y dirección de incidencia de las ondas sísmicas sobre la estructura.

Los métodos en los que se considera la excitación sísmica como un proceso estocástico datan de principios de la década de los 80. Por ejemplo, en [8] la excitación sísmica es definida a través de la transformada finita de Fourier de registros de desplazamientos del terreno en sitios separados distancias cercanas a las de la estructura estudiada; en [12] se plantea un modelo del movimiento del terreno que tiene en cuenta tanto la pérdida de correlación como el efecto de propagación de la onda sísmica, en [13] se plantea un análisis de la sensibilidad de la respuesta estructural en vigas a la pérdida de correlación entre los movimientos de los apoyos de la misma, y en [14] se presenta un método para simular movimientos sísmicos del terreno correlacionados. En [15] se

Capítulo 2 – Antecedentes

comparan los distintos métodos basados en la teoría de vibraciones aleatorias que se han usado para estudiar la variación espacial de los movimientos sísmicos del terreno.

Los métodos basados en espectros de respuesta surgen luego del trabajo publicado por [4]. En dicho trabajo se presenta una solución novedosa que se basa en el concepto de espectro de respuesta y que además tiene en cuenta la naturaleza aleatoria del fenómeno sísmico.

Desde el trabajo publicado por [4] se han desarrollado muchos otros métodos, los cuales buscan mejorar o cambiar algo del anterior, pero que en esencia abordan el problema de la misma manera. Como algunos ejemplos se pueden citar los trabajos de [16, 17, 18, 19] entre otras muchas referencias, en las cuales se referencian métodos basados en espectros de respuesta y vibraciones aleatorias para el estudio de estructuras sujetas a movimientos sísmicos del terreno que varían espacialmente.

En [2] se presenta un resumen basado en la revisión de 133 artículos que hablan sobre el tema, y se remite a ella al lector interesado en profundizar sobre el tema.

Capítulo 3 – Nuevo modelo propuesto

3.1. Hipótesis del modelo a validar

El modelo que se aplicó en este trabajo [1] permite calcular la esperanza de las deformaciones axiales, flectoras y totales (efectos combinados) inducidas por sismos en tuberías superficiales de tramos rectilíneos de igual longitud y sección transversal tubular.

En este método se considera que las todas excitaciones en los apoyos de las tuberías tienen el mismo espectro de respuesta y además se usa una descripción simple de la correlación entre los movimientos de los apoyos. Esto permite llegar expresiones sencillas de la respuesta sísmica de tuberías superficiales.

Para el desarrollo del modelo se asume que los movimientos del terreno en cada apoyo y en las tres direcciones del espacio son como procesos estocásticos independientes, con variancias iguales en las dos direcciones horizontales y diferentes en la dirección vertical. Lo anterior permite tomar los ejes principales del movimiento así: el eje de la tubería como eje x y los restantes dos ejes perpendiculares a éste como ejes y y z . Además en el modelo no se toman en cuenta los efectos de interacción suelo-estructura (ISE).

Como condiciones de frontera en el modelo, se asumió que la tubería tenía restringidos sus 6 grados de libertad en los extremos de la misma (condición empotrada). Esta condición es

Capítulo 3 – Nuevo modelo propuesto

adecuada teniendo en cuenta que en realidad las tuberías suelen llegar a estructuras mucho más rígidas que ellas como tanques o silos.

En la respuesta dinámica de la tubería, en el modelo se supone que está constituido sólo por la participación del primer modo de vibración longitudinal o transversal (según el caso), el cual se supone que es igual en todos los tramos de ésta.

El coeficiente de correlación usado en el modelo, el cual se muestra en (2), está basado en la propuesta que hacen [7], el cual sólo toma en cuenta el efecto de incoherencia entre los movimientos del terreno.

$$\rho_{DDij} = e^{-\alpha_{DD}|d_{ij}|} \quad (2)$$

En (2), d_{ij} es la distancia entre los sitios de registro y α_{DD} es un coeficiente que indica que tan rápido decrece la correlación entre sitios separados esta distancia.

3.2. Expresiones matemáticas del modelo

El modelo plantea expresiones simples que permiten obtener la esperanza de las deformaciones axiales y flectoras, considerando por separado sus componentes cuasiestáticas e inerciales.

La esperanza de la componente cuasiestática de la deformación axial viene dada por:

$$E(\varepsilon_x(0)|_{\max}) = \left(\frac{D_{gx}}{L} \right) \sqrt{2(1 - e^{-\alpha L})} \quad (3)$$

Capítulo 3 – Nuevo modelo propuesto

La esperanza de la componente inercial de la deformación axial viene dada por:

$$E(\varepsilon_x(0)|_{\max}) = 2 \frac{Sd_x(T_x, \zeta)}{L} \sqrt{\frac{(2n+1)}{n^2}} \quad (4)$$

La esperanza de la componente cuasiestática de la deformación flectora viene dada por:

$$E(\varepsilon_k(0)|_{\max}) = 6 \left(\frac{R}{L} \right) \left(\frac{D_{gk}}{L} \right) \sqrt{(1 - e^{-\alpha L})} \quad k=y,z \quad (5)$$

La esperanza de la componente inercial de la deformación flectora viene dada por:

$$E(\varepsilon_k(x)|_{\max}) = 18.57 \left(\frac{R}{L} \right) \left[\frac{Sd_k(T_k, \zeta)}{L} \right] \sqrt{\frac{2n+1}{n^2}} \quad k=y,z \quad (6)$$

En las ecuaciones (3) a (6), L es la longitud de los tramos de la tubería, R el radio de su sección transversal tubular, n es el número de apoyos a cada lado del apoyo central (tomado como apoyo cero), αL es la pérdida de correlación entre los movimientos de los apoyos, D_{gk} (con $k=x,y,z$) es el máximo desplazamiento del terreno, $Sd_k(T_k, \zeta)$ (con $k=x,y,z$) es el desplazamiento espectral para un periodo fundamental T_k y un coeficiente de amortiguamiento crítico ζ . Las ecuaciones (3) a (6) son para cuando $\rho \neq 1.0$.

Para el caso en el que n es muy grande ($n \rightarrow \infty$), las componentes inerciales de deformación desaparecen, con lo cual las ecuaciones (4) y (5) se hacen cero, y el cálculo de la esperanza de las deformaciones se simplifica pues se reduce sólo a las ecuaciones (3) y (6).

Para el caso en el que $\rho=1.0$, es decir, cuando son iguales los movimientos en todos los apoyos, las esperanzas de las deformaciones axiales y flectoras respectivamente son:

$$E(\varepsilon_x(0)|_{\max}) = \frac{4Sd_x}{L} \quad (7)$$

Capítulo 3 – Nuevo modelo propuesto

$$E(\varepsilon_k(0)|_{\max}) = \frac{2(0.83)(4.73)^2 RSd_k}{L^2} \quad (8)$$

Las ecuaciones (7) y (8) coinciden con las que se obtienen de la dinámica al estudiar el movimiento de una barra a movimientos iguales en los apoyos.

Es importante mencionar que en el caso en el que la correlación entre movimientos es total, las deformaciones sólo presentan componentes inerciales.

Para los casos en los que es necesario calcular la respuesta espectral de la tubería, se emplean las siguientes ecuaciones para hallar el periodo de vibración del primer modo longitudinal y transversal respectivamente:

$$T_x = 2L\sqrt{\frac{m}{EA}} \quad (9)$$

$$T_{y,z} = 0.28\sqrt{\frac{mL^4}{EI_{y,z}}} \quad (10)$$

En (9) y (10), m es la masa por unidad de longitud de la tubería, E es el módulo de elasticidad del material, A es el área transversal de la tubería, L la longitud del tramo de tubería e $I_{y,z}$ es el momento de inercia de la sección transversal de la tubería alrededor de los ejes y o z .

Finalmente, una vez se han calculado las esperanzas de las deformaciones axiales y flectoras, se puede obtener la deformación total o combinada como:

$$E(\varepsilon(\eta, \xi)_{\max}) = \sqrt{E^2(\varepsilon_x|_{\max}) + E^2(\varepsilon_y(0)|_{\max})\left(\frac{\eta}{R}\right)^2 + E^2(\varepsilon_z(0)|_{\max})\left(\frac{\xi}{R}\right)^2} \quad (11)$$

Capítulo 3 – Nuevo modelo propuesto

En (11), η y ξ son las coordenadas de algún punto de la tubería respecto al centroide de la misma en las direcciones y y z respectivamente.

Teniendo en cuenta que las intensidades en las direcciones principales horizontales son mayores que en la dirección vertical para la mayoría de los casos, se tiene que la deformación máxima se presenta en $\eta=R$ y $\xi=0.0$.

Capítulo 4 – Definición de las tuberías y de las excitaciones sísmicas

4.1. Definición de las tuberías para el análisis

Se definieron tuberías de sección circular de radio $R=1.0\text{ m}$, y espesor $t=0.03\text{ m}$, construidas en material compuesto de fibra de vidrio y resina, con densidad de masa $\rho=2,240\text{ kg/m}^3$, relación de Poisson $\nu=0.27$ y módulo de elasticidad $E=32.0\text{ GPa}$.

Desde el punto de vista de las longitudes de los tramos, se definieron dos clases de tuberías: las primeras tienen la misma longitud en todos sus tramos y las segundas tienen distintas longitudes en algunos de sus tramos.

Aquellas tuberías con la misma longitud en sus tramos se definieron para 2, 5, 10 y 20 apoyos, mientras que para aquellas con diferente longitud en sus tramos se definieron para 3 y 14 apoyos.

Para las tuberías con tramos de igual longitud y con 2, 5, y 20 apoyos se tomó un valor de L de 10.0 m, en tanto que para aquellas con 10 apoyos se tomaron valores de L de 5.0 m, 10.0 m y 20.0 m. Lo anterior con el fin de aplicar el modelo a tuberías que fueran flexibles, rígidas y semi-flexibles.

Capítulo 4 – Definición de las tuberías y excitaciones sísmicas

Para las tuberías con tramos de diferentes longitudes y con 14 apoyos, se consideraron tres tramos con longitudes variables y los demás se definieron con una longitud fija de 5.0 m. Los tres tramos de longitudes variables se ubican en el centro de cada tubería: el primer tramo es de longitud L_1 , el segundo de longitud L y el tercero de longitud L_2 . En estas tuberías se definieron dos casos: el tipo 1 en el que las longitudes de los tramos adyacentes al tramo central son iguales (esto es, $L_1=L_2$) y el tipo 2 en el que las longitudes de los tramos adyacentes al tramo central son diferentes (esto es, $L_1 \neq L_2$). Finalmente las tuberías con 3 apoyos se definieron como tuberías tipo 3. En las tablas 1, 2, 3 y 4 se presenta el resumen de las longitudes de tramos usadas en los distintos tipos de tuberías estudiadas.

Tabla 1– Longitudes usadas para las tuberías con tramos iguales

Número de apoyos	L (m)		
2	10.0		
5	10.0		
10	5.0	10.0	20.0
20	10.0		

Tabla 2 – Longitudes usadas para las tuberías con tramos diferentes y 3 apoyos

Caso	L_1 (m)	L (m)
1	5.0	10.0
2	5.0	20.0

Tabla 3 – Longitudes usadas para las tuberías con tramos diferentes y 14 apoyos ($L_1=L_2$)

Caso	L_1 (m)	L (m)	L_2 (m)
1	10.0	5.0	10.0
2	5.0	10.0	5.0
3	20.0	10.0	20.0
4	10.0	20.0	10.0

Capítulo 4 – Definición de las tuberías y excitaciones sísmicas

Tabla 4– Longitudes usadas para las tuberías con tramos de diferentes y 14 apoyos ($L_1 \neq L_2$)

Caso	L_1 (m)	L (m)	L_2 (m)
1	10.0	5.0	20.0
2	5.0	10.0	20.0
3	5.0	20.0	10.0

4.2. Creación de las historias de tiempo de la excitación

En la creación de las historias de tiempo se consideraron cinco valores para αL : 0.0, 0.5, 1.0, 2.0 y 5.0, que permiten obtener los siguientes valores de correlaciones entre dos apoyos consecutivos calculados de acuerdo con (2) e iguales a: 1.0, 0.6, 0.36, 0.14 y 0.007.

Las historias de tiempo se generaron para el desplazamiento, ya que así lo requería el software SAP2000[®] para que se pudiera llevar a cabo el análisis en el mismo.

La creación de las historias de tiempo se hizo usando el programa SERIES[®], desarrollado en ambiente MATLAB[®]. El método que usa el programa está basado en el propuesto por [21] y [22]

Las historias de tiempo se generaron para condiciones de suelo blando y duro, considerando dos direcciones ortogonales, y con el mismo desplazamiento máximo en todos los casos.

Para un valor de correlación dado se obtenía el número deseado de historias. Lo único que cambiaba entre una historia y otra era la fase, garantizándose que la pérdida de correlación con la distancia entre apoyos se comportara de acuerdo al modelo propuesto en (2). La correlación entre dos historias de tiempo de direcciones perpendiculares, de acuerdo con [7], es bastante débil.

Los espectros de la figura 3 son típicos de las historias de tiempo generadas ya que todas provienen del mismo espectro de potencia.

Capítulo 4 – Definición de las tuberías y excitaciones sísmicas

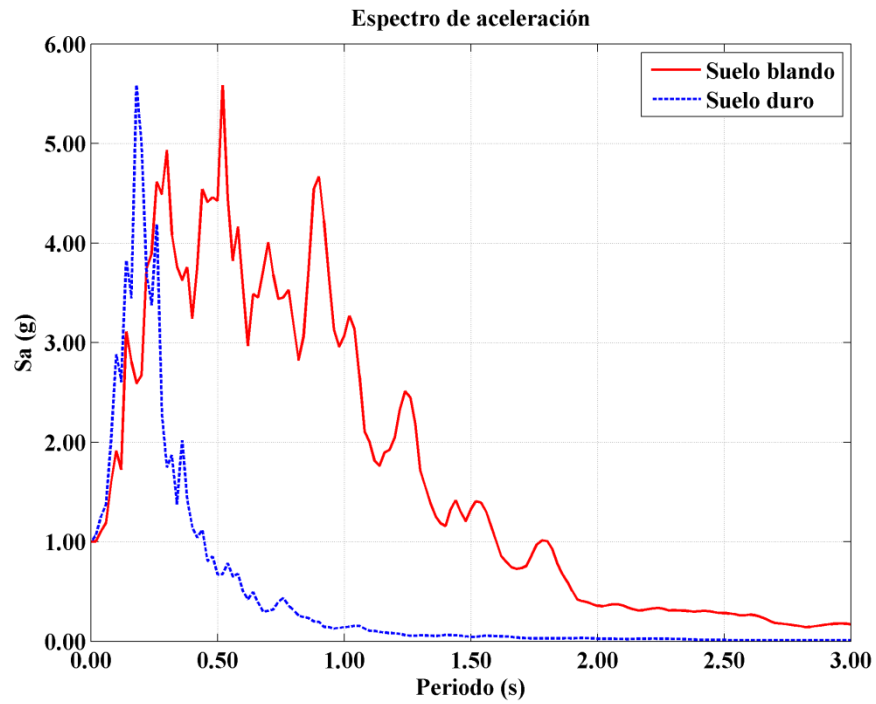


Figura 3 – Espectros de respuesta aceleración típicos de las historias usadas en esta investigación

Capítulo 5 – Cálculo de las deformaciones

5.1. Análisis dinámico de las tuberías

Para las dos clases de tuberías definidas (con tramos iguales y con tramos diferentes), se calcularon las deformaciones usando el método de elementos finitos a partir de las traslaciones y rotaciones obtenidas mediante el software SAP2000[®], considerando dos situaciones: la primera consistía en llevar a cabo el análisis considerando la masa definida para la tubería (análisis dinámico) y la segunda considerando una masa igual a cero (análisis cuasiestático). El objetivo de lo anterior era evaluar la precisión de la componente cuasiestática propuesta por el modelo y compararla con los resultados numéricos obtenidos del análisis de las tuberías sin masa, teniendo en cuenta, a partir de lo demostrado en el modelo, que la componente cuasiestática es la que más pesa en la deformación total. Los análisis anteriores se hicieron para todos los valores de correlación entre señales en los apoyos ya definidos.

A los modelos de las tuberías en SAP2000[®] se mallaron de tal forma que captara la mayor cantidad de modos de vibración posible en el rango de frecuencias de las señales.

Finalmente, debe recordarse que las deformaciones calculadas a partir de las traslaciones y rotaciones calculadas en SAP2000[®] incluyen las componentes dinámicas y cuasiestáticas de las deformaciones.

Capítulo 5 –Cálculo de las deformaciones

5.2. Cálculo de las deformaciones en las tuberías

De todos los elementos en los que se subdividieron las tuberías en los modelos numéricos, se escogieron para calcular las deformaciones tres antes y después de cada apoyo, pues allí, cerca de apoyos, es en donde presentan las deformaciones máximas en las tuberías. Para el cálculo de las deformaciones se usaron las historias de tiempo de los desplazamientos y las rotaciones en los nodos de los elementos antes mencionados.

En un elemento k de una tubería con nodos i y j , los desplazamientos transversales en un punto x y en un instante t quedan descritos por medio de [23]:

$$Y^k(x,t) = a_0^k + a_1^k x + a_2^k x^2 + a_3^k x^3 \quad 0 \leq x \leq Le \quad (12)$$

Donde Le es la longitud del elemento k .

En (12), los valores de los coeficientes del polinomio se hallan como:

$$a_0^k = y_i \quad (13)$$

$$a_1^k = \theta_i \quad (14)$$

$$a_2^k = \frac{3}{L_e^2}(y_j - y_i) - \frac{1}{L_e}(2\theta_i + \theta_j) \quad (15)$$

$$a_3^k = \frac{2}{L_e^3}(y_i - y_j) + \frac{1}{L_e^2}(\theta_i + \theta_j) \quad (16)$$

En las ecuaciones (13) a (16), y_i y y_j son los desplazamientos transversales y θ_i y θ_j son las rotaciones en los nodos i y j respectivamente en un instante t .

Capítulo 5 –Cálculo de las deformaciones

Por su parte, los desplazamientos longitudinales en el mismo elemento vienen dados por:

$$X^k(x,t) = a_0^k + a_1^k x \quad 0 \leq x \leq Le \quad (17)$$

Donde Le es la longitud del elemento Le .

En (17), los valores de los coeficientes del polinomio se hallan como:

$$a_0^k = x_i \quad (18)$$

$$a_1^k = \frac{x_j - x_i}{Le} \quad (19)$$

En las ecuaciones (18) a (19), x_i y x_j son los desplazamientos longitudinales en los nodos i y j respectivamente en un instante t .

Las historias de tiempo de los desplazamientos y rotaciones de los nodos i y j se obtenían de SAP2000[®]. Sin embargo, dado que lo que se deseaba calcular eran las deformaciones, se usaba la segunda derivada de (12) con respecto a x para el caso flector, y la primera derivada de (17) con respecto a x para el caso axial, con lo que los coeficientes a_0^k y a_1^k de (12) y el coeficiente a_0^k de (17) se anulaban.

A partir de lo anterior, se creó una rutina en MATLAB[®] que permitiera calcular las medias de las deformaciones máximas axiales y flectoras a partir de las historias de tiempo de desplazamientos y rotaciones de los nodos estudiados. Para las tuberías con tramos iguales la deformación máxima media (axial, flectora o total) se calculó promediando las deformaciones máximas por tramo. Por su parte, para las tuberías con tramos diferentes se seleccionaron las deformaciones máximas en cada uno de los tres tramos centrales de las mismas. Estas deformaciones máximas medias fueron las que se usaron para compararse con el modelo.

Capítulo 5 –Cálculo de las deformaciones

Respecto a lo anterior es importante aclarar que para calcular una deformación axial media se promediaban sólo aquellas deformaciones que fueran de tuberías que tuviesen la misma longitud, y para una deformación flectora media, se promediaron sólo aquellas deformaciones que fueran de tuberías con la misma longitud y el mismo número de apoyos. En todos los casos, los promedios se calcularon según el valor de correlación que correspondiera.

Los resultados de las deformaciones calculadas con el procedimiento antes descrito se reportan como las “exactas” en las tablas 7 a 34 del anexo A.

Capítulo 6 – Resultados y conclusiones

6.1. Respuestas espectrales medias

A cada historia en el tiempo generada se le calculó su espectro de respuesta de desplazamiento. En cada uno de estos espectros se determinó el desplazamiento espectral correspondiente a los periodos fundamentales longitudinal y transversal (calculados previamente para las tuberías con las longitudes entre apoyos ya definidas). Una vez obtenidos estos valores, se promediaron aquellos que correspondían a historias de tiempo generadas con una misma correlación y un mismo tipo de suelo, sin tener en cuenta la dirección ni el número de historias que se habían obtenido en cada grupo. Los valores reportados en la tabla 5 y 6 corresponden a las medias y las desviaciones estándar de los desplazamientos espectrales en suelo blando y en suelo duro.

Tabla 5 – Periodos fundamentales y desplazamientos espectrales medios

Luz (m)	Periodo (s)		Blando		Duro	
	Axial	Flexión	Sd axial (m)	Sd flexión (m)	Sd axial (m)	Sd flexión (m)
10.00	0.0054	0.0108	5.05E-06	2.21E-05	4.38E-05	1.90E-04
5.00	0.0027	0.0027	8.62E-07	8.73E-07	7.06E-06	7.16E-06
20.00	0.0107	0.0432	2.09E-05	3.31E-04	1.84E-04	2.56E-03

Capítulo 6 – Resultados y conclusiones

Tabla 6 – Desviaciones estándar para los desplazamientos espectrales medios

Luz (m)	Blando		Duro	
	Sd axial (m)	Sd flexión (m)	Sd axial (m)	Sd flexión (m)
10.00	1.60E-06	6.56E-06	7.46E-06	2.87E-05
5.00	2.47E-07	2.50E-07	1.26E-06	1.28E-06
20.00	4.06E-06	6.31E-05	2.15E-05	2.95E-04

6.2. Deformaciones en tuberías con tramos iguales

Los resultados obtenidos para las deformaciones muestran que en tuberías con tramos iguales la componente inercial del movimiento es despreciable cuando se compara con la componente cuasiestática. Esto es un resultado esperable, ya que las tuberías son estructuras que por su poca masa y alta rigidez tienen frecuencias naturales de vibración bastante altas en las que en la mayoría de los casos de los movimientos sísmicos exhiben respuestas espectrales en desplazamiento despreciables.

6.2.1. Sensibilidad de las deformaciones

A continuación se analizan cómo se afectan las deformaciones con la variación de aquellas variables que de acuerdo con el modelo, controlan la respuesta dinámica de las tuberías superficiales.

- **Deformaciones vs tipo de suelo**

El modelo predice que el tipo de suelo sobre el que está la tubería afecta en la misma forma las componentes cuasiestáticas axial y flectora de la deformación. Para ambos casos, el modelo plantea que dichas componentes son proporcionales al desplazamiento máximo del terreno D_g el cual depende de si es suelo blando o duro.

Capítulo 6 –Resultados y conclusiones

Los resultados numéricos de las deformaciones cuasiestáticas, muestran que para tuberías de la misma longitud de tramo y con un mismo valor de correlación entre los movimientos de sus apoyos, no hay variaciones cuando se consideran historias de tiempo en suelo blando o suelo duro. Esto se debe a que las historias usadas en esta investigación se generaron con el mismo valor de desplazamiento máximo, por lo que las deformaciones cuasiestáticas halladas con el modelo no muestran cambios según el tipo de suelo.

Por otro lado, las componentes inerciales de deformación también se ven afectadas por el tipo de suelo. De acuerdo con el modelo, la componente inercial de deformaciones depende del desplazamiento espectral, el cual varía dependiendo de si el espectro de respuesta es en suelo blando o en suelo duro. Los resultados numéricos muestran mayores valores de la componente inercial de deformación en suelo duro que en suelo blando. Este resultado era de esperarse, ya que los desplazamientos espectrales son mayores en suelo duro que en suelo blando.

- **Deformaciones vs número de apoyos**

El modelo planteado indica que el número de apoyos afecta sólo la componente inercial de la deformación para todos los casos con $\rho \neq 1.0$. Sin embargo, dado que dicha componente es despreciable comparada con la cuasiestática, es de esperar que el efecto del número de tramos en la deformación también sea despreciable.

Los resultados numéricos permiten comprobar lo que el modelo predice sobre el efecto del número de apoyos en las deformaciones. Para un valor fijo de L , las deformaciones halladas con los modelos numéricos no muestran variaciones conforme aumenta el número de apoyos. Esto no va en contravía del modelo: por el contrario confirma el hecho de que el número de apoyos sólo afecta la componente inercial de la deformación, por lo que su efecto es despreciable cuando se le compara con la componente cuasiestática, y dado que es ésta quien controla la respuesta total, la influencia del número de apoyos no se evidencia en la deformación total. Esta tendencia se mantiene para todos los casos con $\rho \neq 1.0$. Incluso, para los modelos de tubería con dos apoyos (el

Capítulo 6 –Resultados y conclusiones

menor número de apoyos posible) se evidencia que ésta variable no afecta las deformaciones en las tuberías.

Para movimientos de los apoyos con correlación total, las ecuaciones (7) y (8) muestran que las componentes inerciales de deformación flectora y axial no dependen del número de apoyos.

Aunque el modelo plantea que la componente inercial de deformación flectora y axial dependen del número de apoyos para $\rho \neq 1.0$, la relación entre éstas no. Dicha relación sólo depende de las relaciones R/L y Sd_y/Sd_x . A este resultado se llega fácilmente a partir de las ecuaciones (4) y (5). A pesar que $R/L < 1.0$, que $Sd_y/Sd_x > 1.0$ (las tuberías son más flexibles transversal que longitudinalmente) y que las relaciones anteriores están multiplicadas por un factor de 9.3, no es posible decir en forma general que la componente inercial de deformación flectora sea mayor que la axial debido a que los cambios en la longitud del tramo de tubería alteran los valores de los desplazamientos espectrales por que se afecta el periodo de vibración.

Los resultados numéricos confirman que la relación entre las componentes inerciales de deformación es independiente del número de apoyos y de la correlación, aunque sólo en el caso con $\rho = 1.0$ se puede ver claramente esta situación. La razón de esto es que para todos los demás casos de correlación, los resultados numéricos tienen incorporada la componente cuasiestática, que terminan opacando la inercial.

Los resultados de variación de las deformaciones “exactas” respecto al número de apoyos de la tubería se muestran en las figuras 4 y 5, para condición de suelo blando y duro respectivamente.

- **Deformaciones vs correlación**

La correlación entre los movimientos del terreno en los apoyos de la tubería es quien determina el grado de participación que tienen las componentes inerciales y cuasiestáticas en la deformación total. Cuando la correlación es total, la única componente de deformación es la inercial y cuando la correlación es nula y además el número de tramos tiende a infinito, la única componente de deformación es la cuasiestática.

Capítulo 6 –Resultados y conclusiones

De acuerdo con el modelo planteado, la correlación sólo afecta las componentes cuasiestáticas de la deformación, y al ser éstas en la mayoría de los casos las de mayor participación en la respuesta total, es de esperar que la correlación influencie de manera importante la deformación total. El modelo predice un aumento en las deformaciones al disminuir la correlación.

Los resultados del modelo numérico muestran aumentos notables en las deformaciones con la disminución en la correlación, confirmando lo predicho por el modelo propuesto. El hecho de que las deformaciones del modelo numérico tengan cambios importantes según cambie la correlación, muestra que ésta afecta en forma importante la componente cuasiestática de la deformación, ya que su efecto es bastante notorio en la deformación completa. De igual manera, los resultados numéricos muestran que tanto las deformaciones axiales como las flectoras decaen rápidamente con la correlación, tal como lo predice el modelo.

Otro resultado interesante que se obtiene a partir del modelo es que la relación entre componentes cuasiestáticas de deformación no depende de la correlación. Estos resultados se demuestran fácilmente a partir de (3) y (5), llegándose a que dicha relación sólo depende del radio y la longitud de la tubería y de los desplazamientos máximos del terreno. Respecto al caso inercial, tal como lo muestra el modelo fácilmente, no hay dependencia de la correlación pues físicamente esta componente sólo depende de la vibración de la tubería. De hecho, el cociente entre (4) y (6) para $\rho \neq 1.0$ es igual al cociente entre (7) y (8) para $\rho = 1.0$, como debería ser, ya que independientemente de cómo se muevan los apoyos entre sí, la relación entre las deformaciones inerciales no debe cambiar pues la vibración de la tubería es la misma.

Los resultados de variación de las deformaciones “exactas” con respecto a la correlación se muestran en las figuras 6 y 7, para condición de suelo blando y duro respectivamente.

Capítulo 6 – Resultados y conclusiones

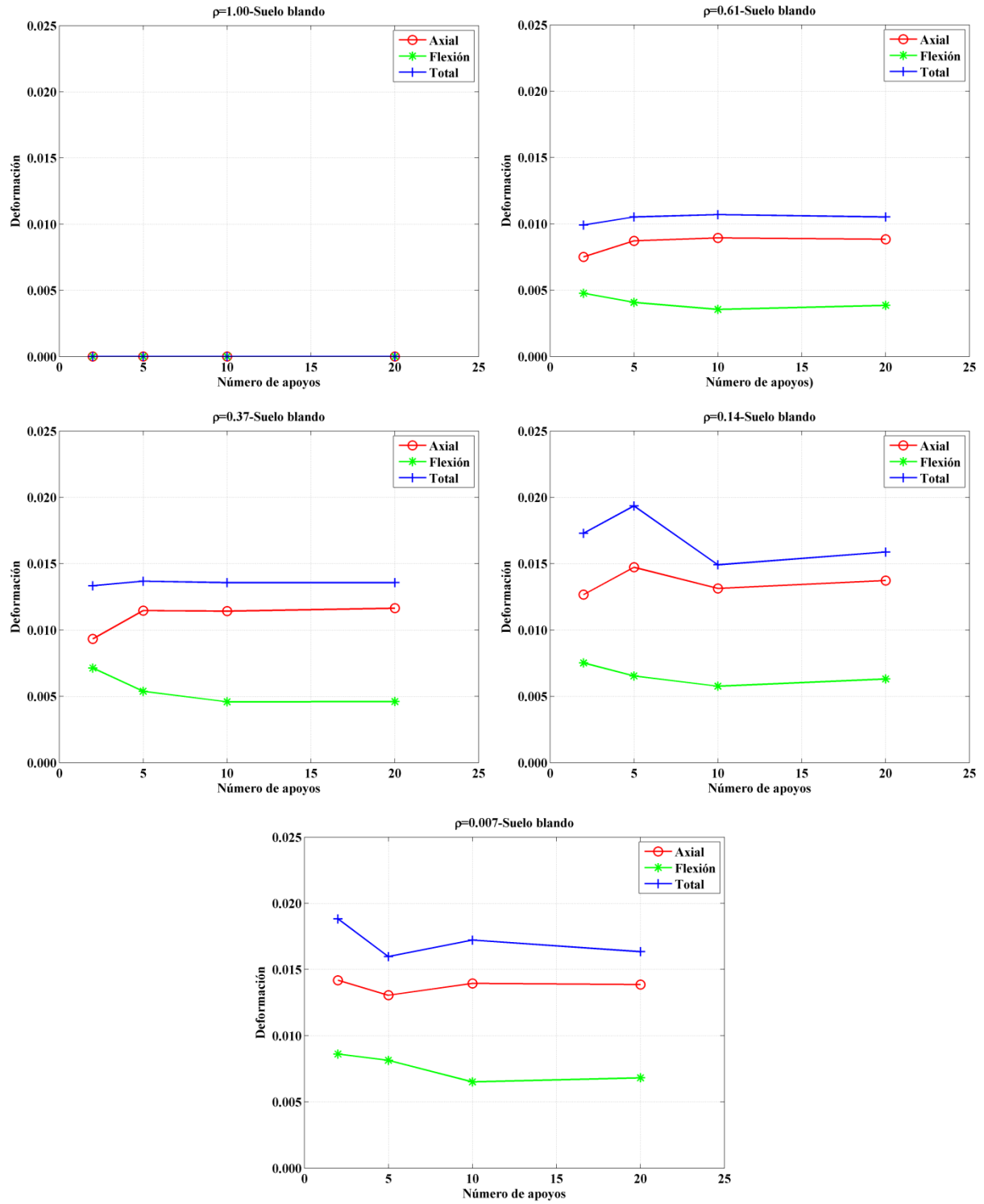


Figura 4 – Variación de las deformaciones con el número de apoyos – Suelo blando

Capítulo 6 – Resultados y conclusiones

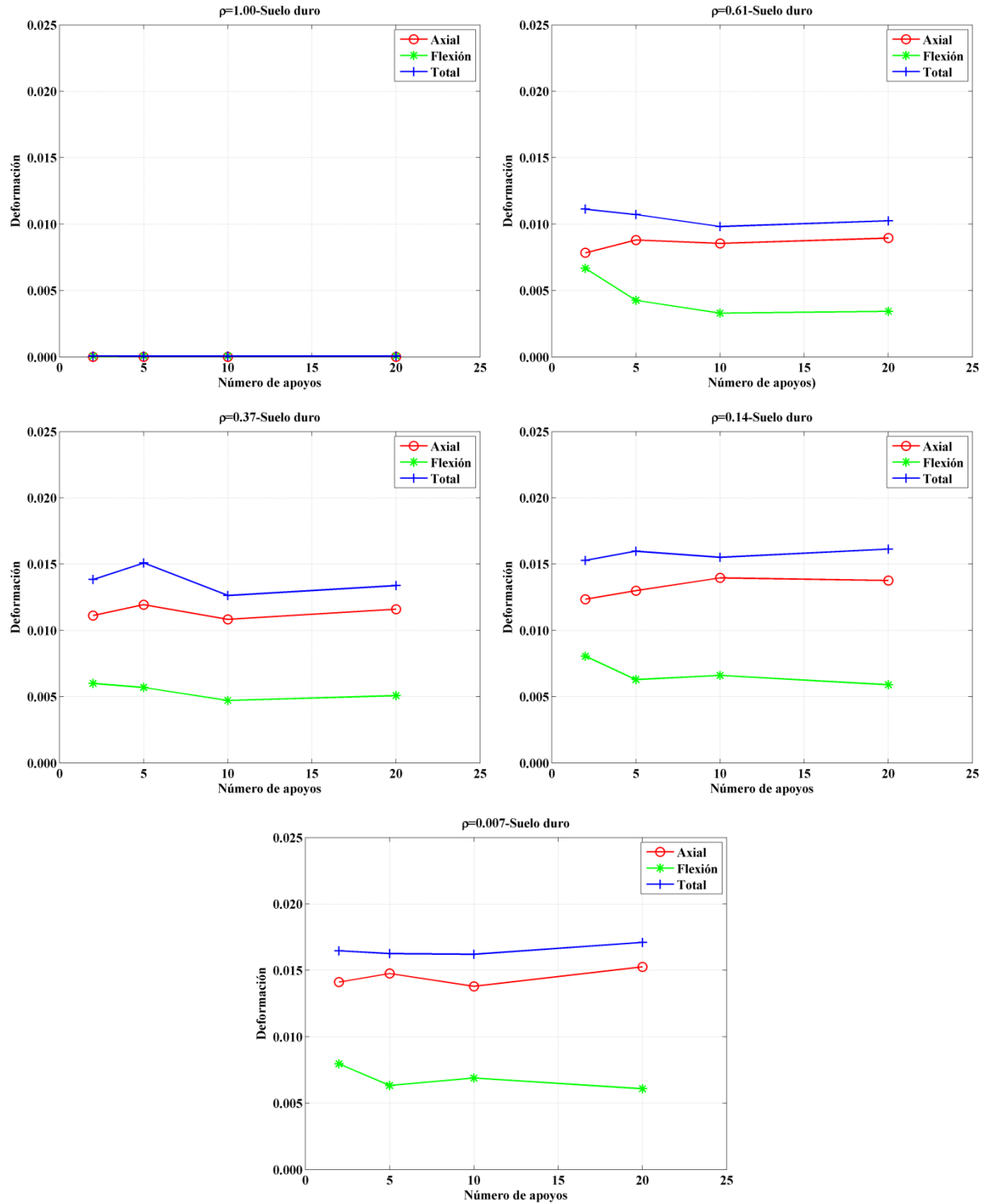


Figura 5 – Variación de las deformaciones con el número de apoyos – Suelo duro

Capítulo 6 – Resultados y conclusiones

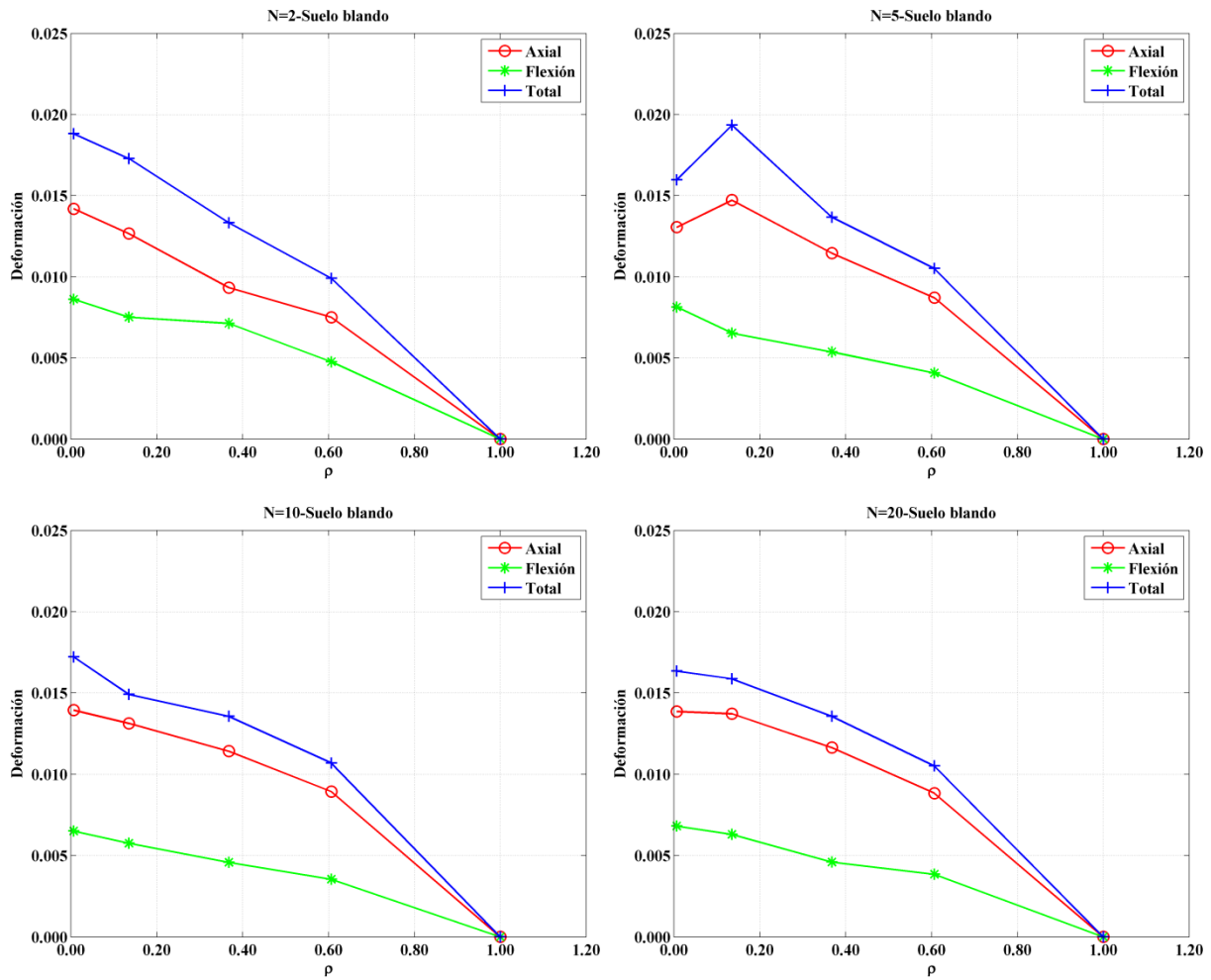


Figura 6 – Variación de las deformaciones con la correlación– Suelo blando

• Deformaciones vs longitud

La longitud de los tramos es una variable bastante importante en el análisis dinámico de tuberías, ya que controla en cierta medida la rigidez o flexibilidad de la misma afectando su respuesta inercial ya que puede modificar los periodos de vibración longitudinal y transversal. En el primer caso el periodo de vibración es proporcional a L en tanto que en el segundo lo es a L^2 . Esto explica por qué la longitud aumenta mucho más la respuesta espectral a flexión que axial.

Pasando a las deformaciones, de acuerdo con el modelo la longitud de los tramos de tubería controla la componente cuasiestática axial por medio del término D_g/L y cuasiestática flectora por

Capítulo 6 – Resultados y conclusiones

medio de los términos D_g/L y R/L . Para las componentes inerciales, tanto para los casos con $\rho=1.0$ y $\rho \neq 1.0$, la longitud está en el caso axial en el término Sd_y/L y para el caso flector en los términos R/L y Sd_y/L . Lo anterior permite concluir que un aumento en la longitud reduce más drásticamente las deformaciones flectoras que axiales, ya que la componente inercial y cuasiestática de las primeras quedan divididas por L^2 mientras que las segundas por L .

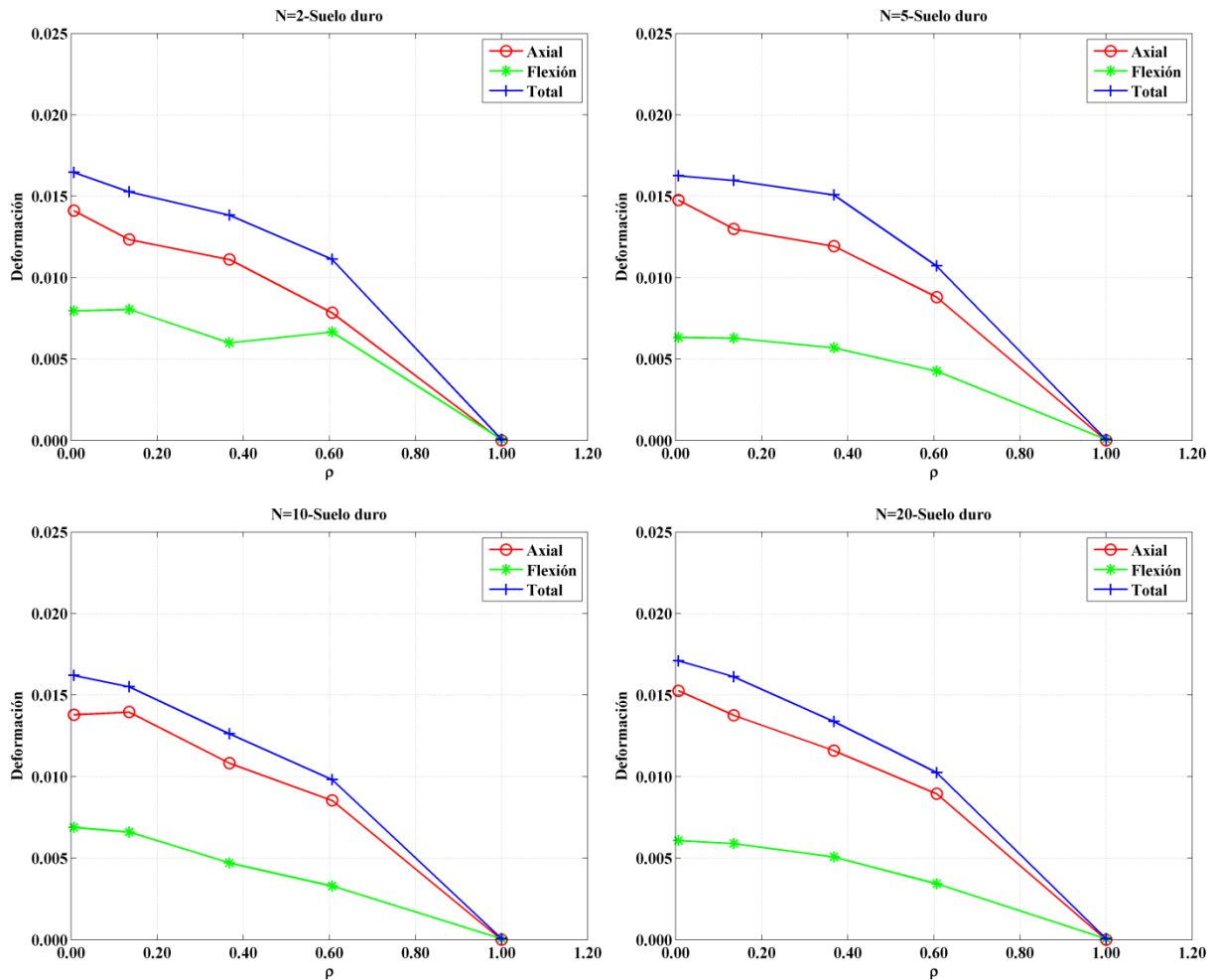


Figura 7 – Variación de las deformaciones con la correlación– Suelo duro

Los resultados numéricos muestran que las deformaciones axiales y flectoras para tuberías con movimientos en sus apoyos con correlaciones diferentes a 1.0, muestran una significativa reducción al aumentar la longitud, tal como lo predice el modelo. Sin embargo, para el caso en donde la correlación entre los movimientos en los apoyos es total, la componente cuasiestática es

Capítulo 6 –Resultados y conclusiones

nula, y por lo tanto la componente inercial es quien controla la deformación. Para este caso los resultados numéricos muestran que las deformaciones axiales y flectoras aumentaron con la longitud, algo contrario a lo que se esperaría. Revisando las expresiones que el modelo plantea para la componente inercial (independiente del valor de correlación para el cual sirvan) aparece el término Sd_x/L o Sd_y/L según el tipo de deformación que se tenga. Este desplazamiento espectral es función del periodo de vibración el cual, como ya se mencionó, aumenta con la L y L^2 según sea el caso. Es así se puede concluir que los incrementos en las componentes inerciales de las deformaciones son debidas a un incremento en el desplazamiento espectral, anulando el efecto contrario que la longitud haría en las mismas. Por lo tanto, los desplazamientos espectrales son quienes realmente controlan la respuesta inercial de una tubería.

Basado en la evidencia numérica obtenida se puede afirmar que un aumento en la longitud conlleva a una disminución en la componente cuasiestática de la deformación, y en el caso de la componente inercial conlleva a un aumento siempre y cuando el incremento en la respuesta espectral con el periodo de vibración sea lo suficientemente grande como para invertir la tendencia predicha por el modelo de deformaciones inversamente proporcionales a la longitud del tramo. La situación antes descrita aplica para todos los casos donde $\rho \neq 1.0$: lo que sucede es que la componente cuasiestática al ser la que más participa en la deformación total no permite ver el incremento en la componente inercial, el cual aun cuando pueda ser grande, será despreciable con respecto a la componente cuasiestática.

En las figuras 8 y 9 se muestra la variación de las deformaciones “exactas” con la longitud para condiciones de suelo blando y duro respectivamente.

Capítulo 6 – Resultados y conclusiones

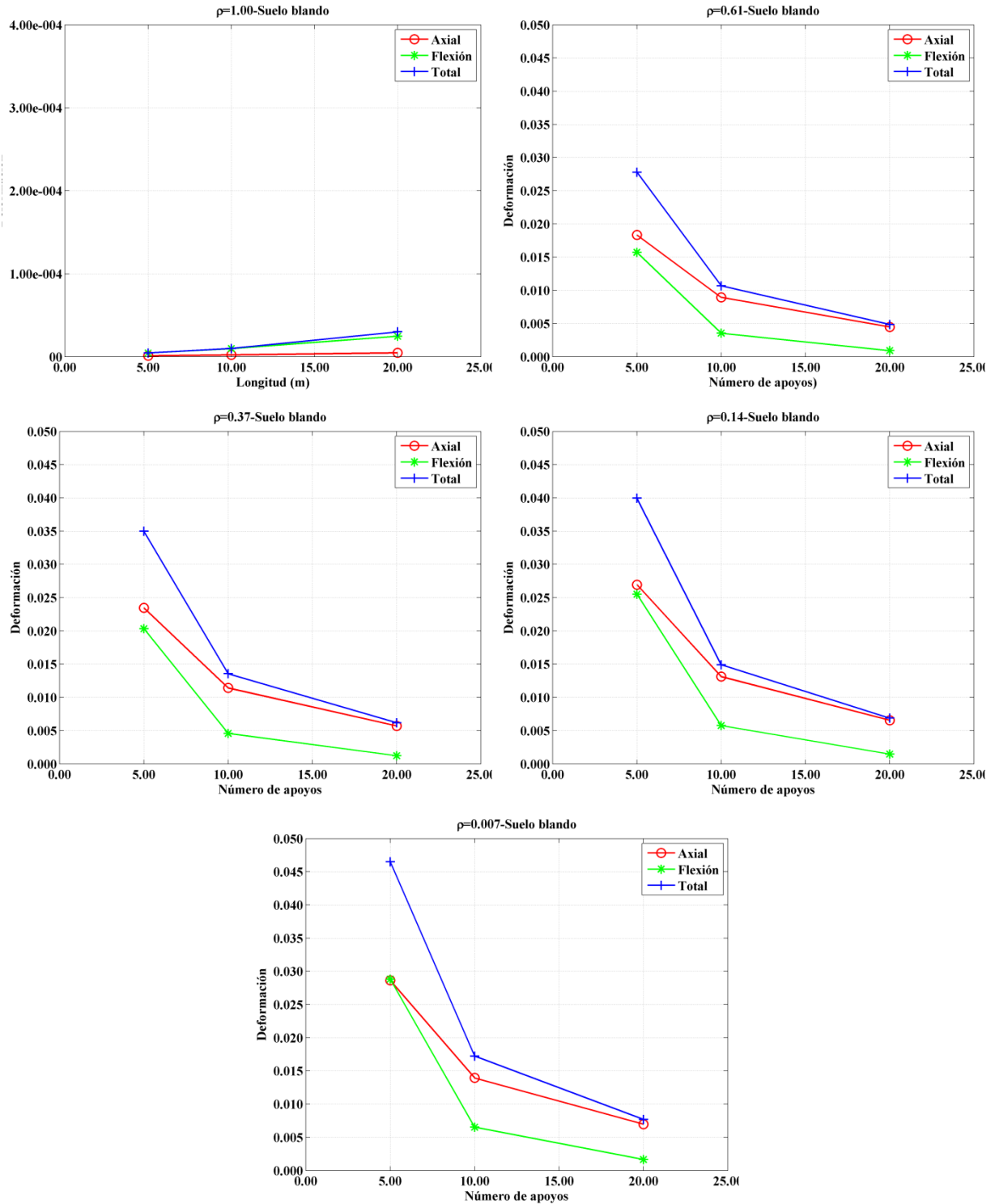


Figura 8 – Variación de las deformaciones con la longitud – Suelo blando

Capítulo 6 – Resultados y conclusiones

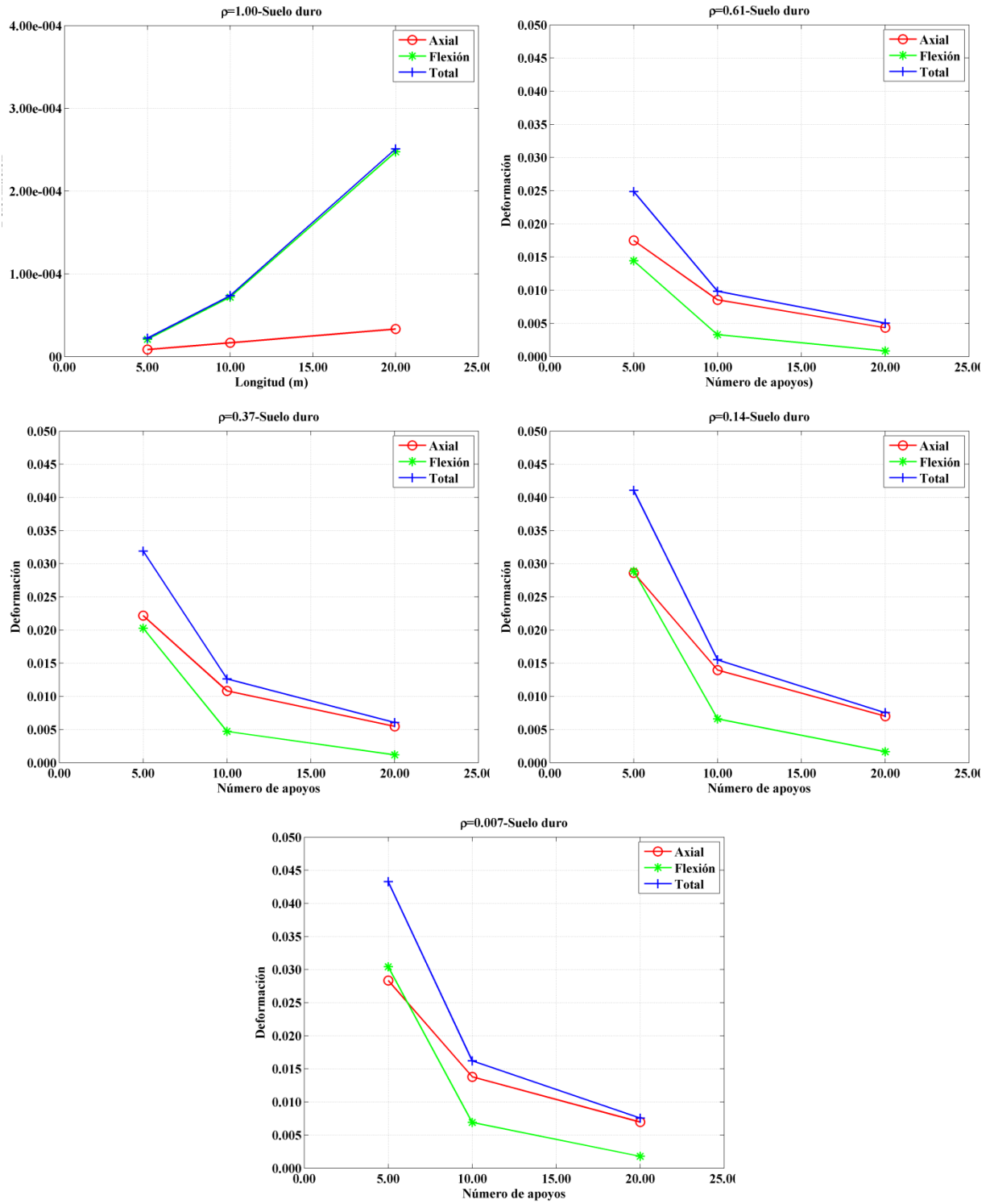


Figura 9 – Variación de las deformaciones con la longitud – Suelo duro

Capítulo 6 –Resultados y conclusiones

- **Deformaciones vs radio**

Aunque las tuberías modeladas en esta investigación tienen un radio constante en todos los casos, es posible predecir cómo variarían las deformaciones respecto al radio, teniendo en cuenta que se está usando un modelo de viga de Euler-Bernoulli.

Según se plantea en el modelo, la componente cuasiestática de la deformación axial no varía conforme cambia el radio de la tubería, ya que ésta depende de la distancia entre los apoyos de la misma. Para el caso de flexión, esta componente aumenta en forma lineal con el radio ya que un mayor radio implica mayores deformaciones en las fibras extremas de la sección transversal de la tubería.

Respecto a las componentes inerciales tanto axial como flectora, un aumento en el radio de la tubería la hará más rígida. Esto se explica a partir de la relación entre el radio y el periodo de vibración de una tubería. Para el caso longitudinal, el periodo varía con $1/R$ y en el caso transversal con $1/R^2$. Es así como un aumento en el radio disminuye en forma más drástica el periodo de vibración transversal que longitudinal, haciendo la tubería más rígida especialmente frente a vibraciones transversales que longitudinales. De la misma forma como sucede con la longitud, el radio es una de las variables que controla el carácter rígido o flexible de una tubería a través de modificaciones en su periodo de vibración, con la consecuente variación en los valores del desplazamiento espectral.

- **Deformaciones vs propiedades mecánicas del material de la tubería**

Sólo la componente inercial de deformación tanto axial como flectora depende de las propiedades mecánicas del material (densidad y módulos). Estas propiedades hacen más o menos rígida la tubería con lo cual varía su respuesta espectral, que sólo participa en la componente inercial de deformación. Los periodos de vibración axial y flexión dependen exactamente de la misma forma de la densidad de masa y del módulo de elasticidad de la tubería.

Capítulo 6 –Resultados y conclusiones

6.2.2. Comparación de los resultados

El error medio relativo de las deformaciones para tuberías sobre suelo blando halladas con el modelo propuesto y las halladas con el modelo numérico se mantienen inferiores al 11 % para el caso axial, al 15 % para el caso flector y al 9 % para la deformación total, en todos los casos de correlación considerados.

De forma general, las discrepancias entre los resultados del modelo y los resultados numéricos se pueden explicar a partir de tres consideraciones importantes:

El primer punto tiene que ver con la hipótesis que se hace en el modelo de que en la respuesta dinámica sólo aporta el primer modo de vibración. Los resultados numéricos muestran que la respuesta dinámica toma en cuenta muchos más modos de vibración que el modelo, y aunque hay algunos modos con poca participación en la respuesta total, hay otros con factores de participación iguales o incluso superiores al del modo fundamental. Sin embargo, el efecto de la participación de otros modos de vibración en la respuesta de las tuberías con iguales tramos no se detecta con facilidad dado que los modos afectan sólo la componente inercial de la deformación, que para las estructuras analizadas es despreciable cuando se compara con la componente cuasiestática. En palabras más simples: la componente cuasiestática oculta los efectos que otros modos de vibración diferentes al fundamental hacen en la componente inercial. Lo anterior queda bastante claro en aquellos casos donde la correlación entre los movimientos de los apoyos es total: para este caso la única componente de deformación es la inercial, por lo que el error entre el valor predicho por el modelo y el obtenido en forma numérica es tan alto en algunos casos.

El segundo punto tiene que ver con las funciones de influencia de los desplazamientos longitudinales y transversales. El modelo parte de la hipótesis de una tubería con un número de apoyos tal que se puede considerar infinita. Esto permite que la función de influencia para el desplazamiento de un apoyo dado tenga dos características importantes, de las que se saca provecho en la obtención del modelo: la primera es su simetría respecto al apoyo desplazado y la segunda es el hecho de que siempre será la misma función independiente del apoyo que se mueva. Así, la función de influencia en un apoyo cualquiera se obtiene *desplazando* la función de

Capítulo 6 –Resultados y conclusiones

un apoyo de referencia en las abscisas. Estas hipótesis son bastante cercanas a la realidad cuando se calculan las deformaciones en tramos de tuberías *lejos* de los extremos de las mismas y para un número “grande” de tramos. Cuando se calculan deformaciones *cerca* de los extremos de la tubería o en aquellas tuberías con uno o dos tramos se empiezan a obtener errores debidos a que las hipótesis en las cuales se basa el modelo se alejan del problema en cuestión.

El tercer punto que causa diferencias entre los resultados del modelo y los numéricos es la concepción misma del modelo. El modelo está planteado de acuerdo con el método modal espectral y busca estimar la esperanza o la media de las deformaciones en una tubería como respuesta a cualquier conjunto de movimientos en sus apoyos de los cuales sólo se conoce su desplazamiento máximo, sus espectros de respuesta y la correlación entre ellos. Por su parte, los resultados numéricos corresponden a un conjunto particular de movimientos en los apoyos. Estadísticamente hablando, las deformaciones obtenidas por medio del modelo numérico constituyen unos valores específicos de una variable aleatoria (las deformaciones).

A continuación se analiza los errores obtenidos a la luz de las variables más relevantes del modelo.

- **Error vs longitud**

Al analizar cómo cambia el error conforme varía la longitud de los tramos de la tubería se pudo determinar que para las deformaciones axiales, sin importar la correlación que haya entre los movimientos de los apoyos, el error tiende a reducirse conforme aumenta la longitud de los tramos. Esto se debe a que a medida que se incrementa la longitud en los tramos de tubería, la componente inercial de deformación disminuye más rápidamente que la cuasiestática lo que hace que la primera, que de por sí tiene poca participación en la respuesta total, llegue a tener una participación nula en la respuesta total, acercándose más a la respuesta que predice el modelo. Si bien es cierto que el modelo permite predecir el valor de la componente inercial, no hay que olvidar que en esta es en donde más ruido se introduce como consecuencia de las hipótesis que el

Capítulo 6 –Resultados y conclusiones

modelo hace sobre la componente inercial, como por ejemplo, en la participación de modos superiores al primero.

Los mayores errores se presentan para las deformaciones flectoras para la correlación de $\rho=0.36$, que corresponde a un valor de $\alpha L=1.0$. Para los demás valores de correlación el error disminuye conforme se reduce la longitud de los tramos. Para las deformaciones axial y total, se presenta una reducción del error con el incremento en la longitud para todos los valores de correlación considerados. En las figuras 10 y 11 se presenta la variación del error relativo para las diferentes longitudes de tuberías usadas en este estudio, para suelo blando y suelo duro respectivamente.

- **Error vs número de apoyos**

Para el caso de correlación total, tanto en suelo blando como en suelo duro, se observa que el error no varía con el número de apoyos. Esta situación era de esperar, ya que para este caso todos los tramos de la tubería vibran en la misma forma independiente del número de apoyos o tramos de la tubería.

Para los demás valores de correlación el error tiende a reducirse conforme aumenta el número de apoyos, aunque los valores más altos ocurren para las deformaciones flectoras. Esto se explica teniendo en cuenta que la función de influencia para los desplazamientos transversales se extiende por varios apoyos de la tubería, aún cuando ésta decae rápidamente con el número de tramos. Por su parte, para los desplazamientos longitudinales la influencia termina un apoyo antes y uno después del apoyo desplazado, por lo que depende menos del número de éstos. En el modelo, la influencia de los desplazamientos transversales se anula más allá de cierto número de apoyos ya que la tubería se consideraba infinita. Por otro lado, la función de influencia se considera la misma para todos los apoyos y por tanto es simétrica respecto al apoyo en cuestión. Los dos aspectos anteriores hacen que cuando el modelo se aplique a una tubería con un número finito de apoyos se presenten mayores errores, especialmente en las deformaciones flectoras.

En las figuras 11 y 12 aparece la variación del error relativo con respecto al número de apoyos.

Capítulo 6 – Resultados y conclusiones

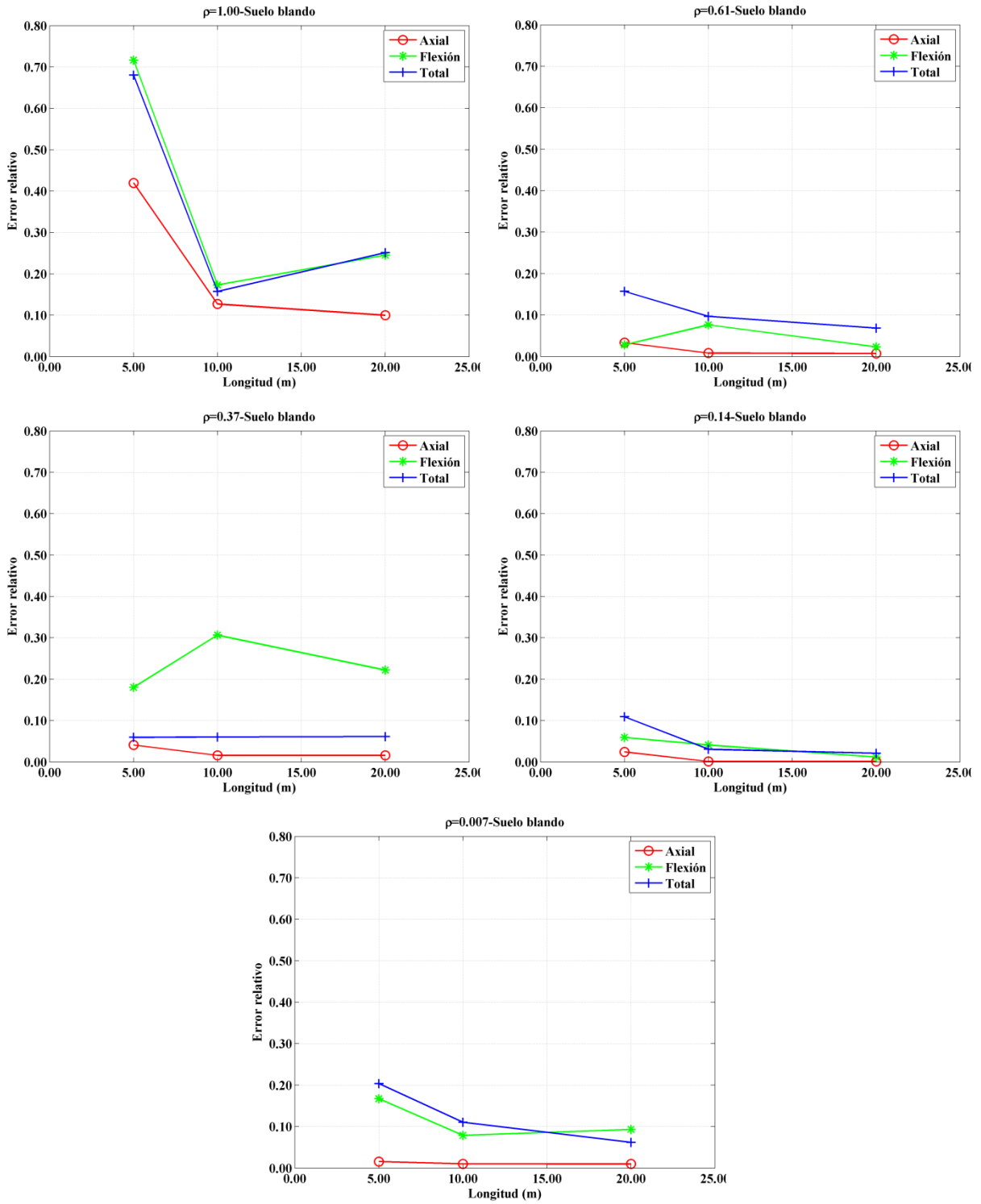


Figura 10 – Variación del error relativo con la longitud – Suelo blando

Capítulo 6 – Resultados y conclusiones

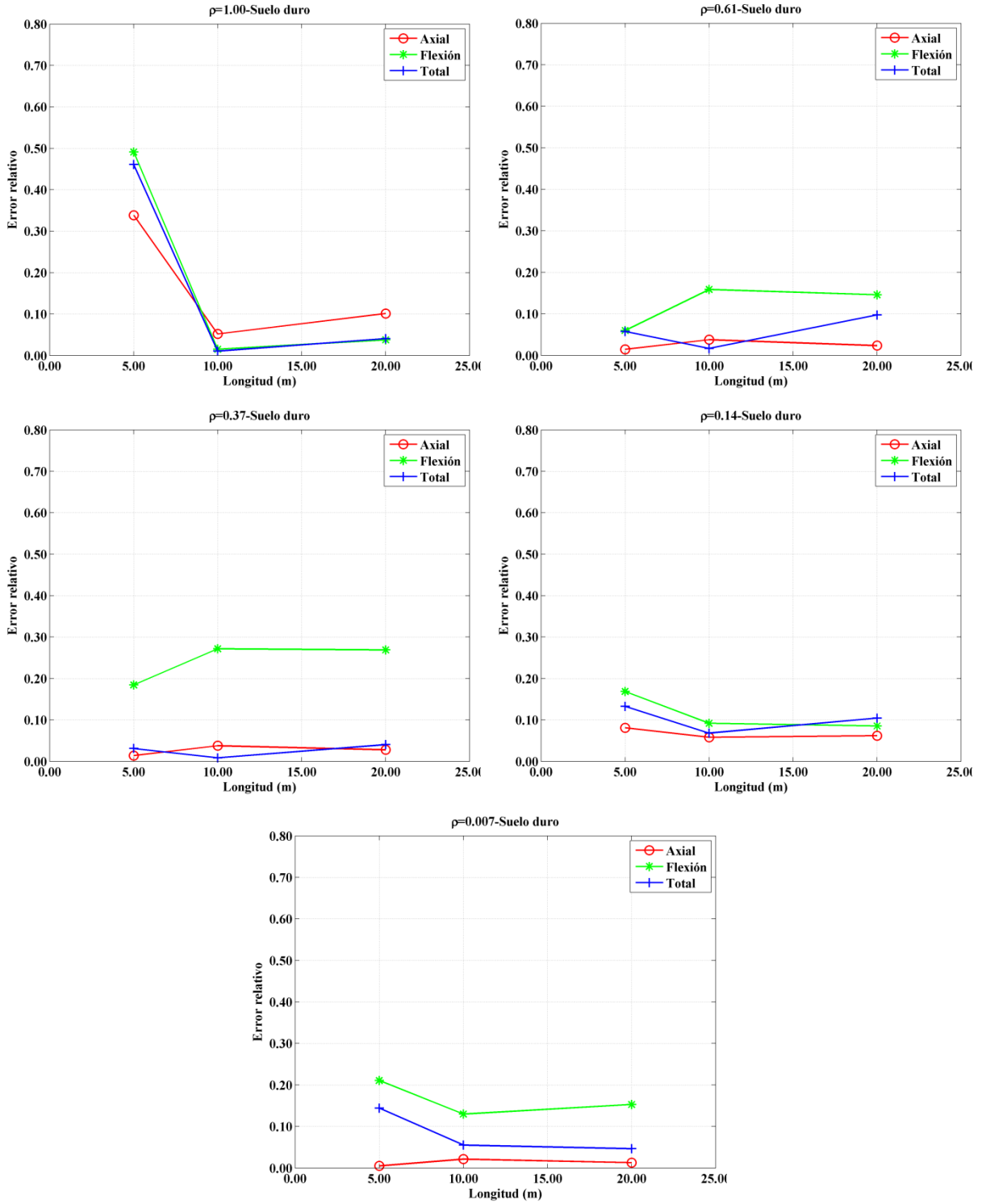


Figura 11- Variación del error relativo con la longitud – Suelo duro

Capítulo 6 – Resultados y conclusiones

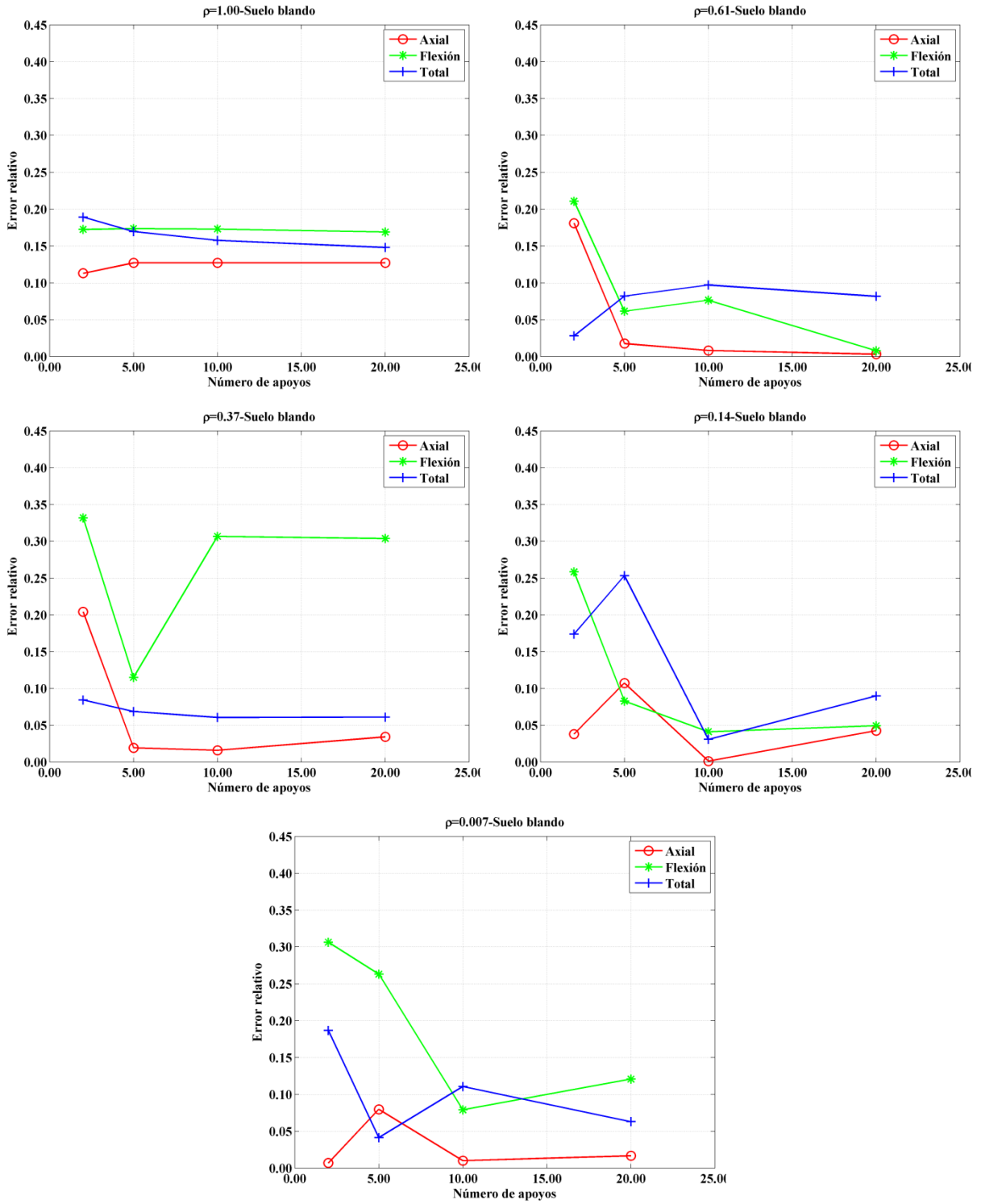


Figura 12 – Variación del error relativo con el número de apoyos – Suelo blando

Capítulo 6 – Resultados y conclusiones

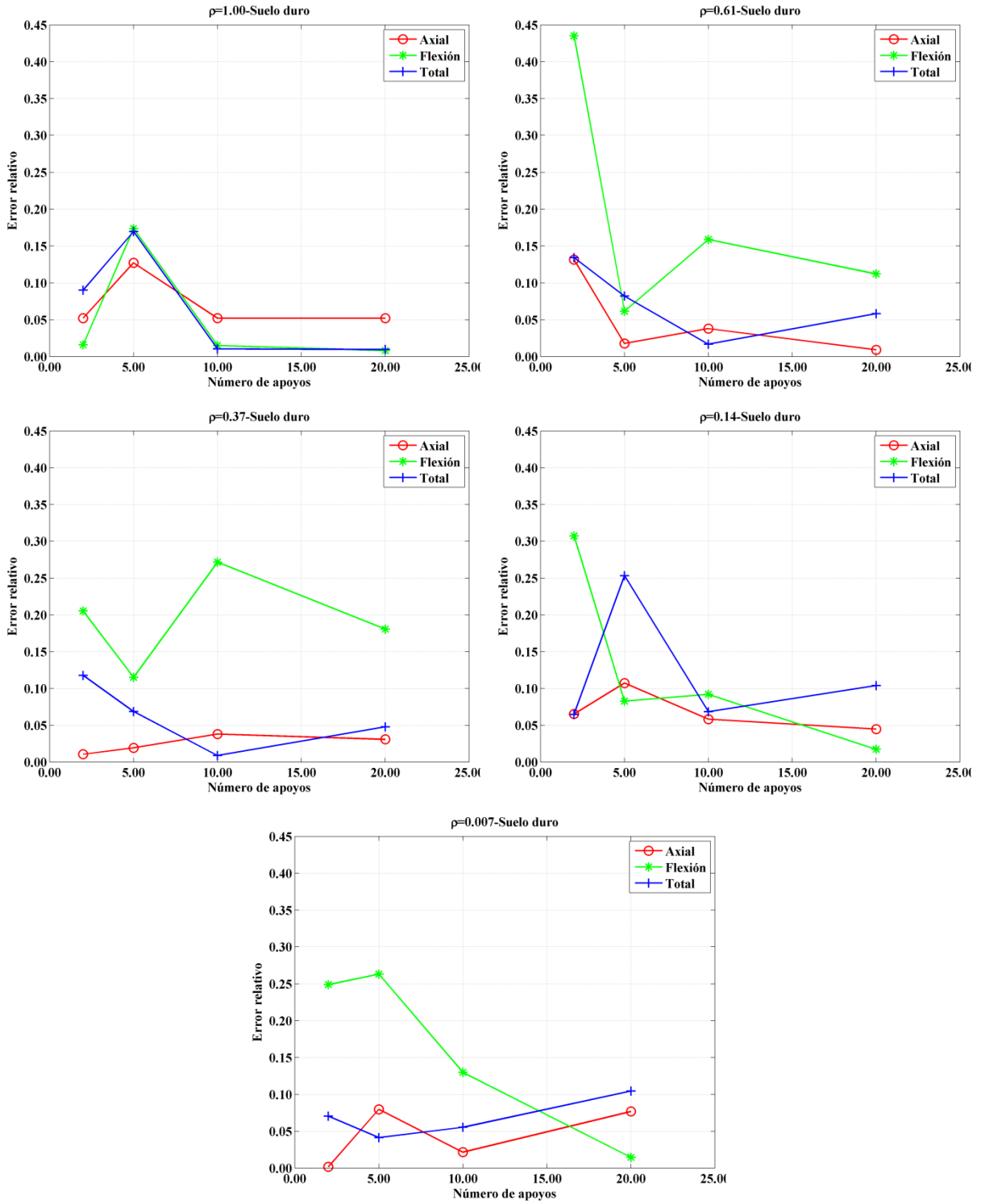


Figura 13 – Variación del error relativo con el número de apoyos – Suelo duro

Capítulo 6 –Resultados y conclusiones

- **Error vs correlación**

Tanto para condición de suelo blando como de suelo duro, se observa una tendencia al aumento en el error con el aumento en la correlación. Esto era de esperar ya que un aumento en la correlación le da mayor participación a la componente inercial de deformación, con el consecuente aumento del error entre el valor predicho por el modelo y el obtenido en forma numérica.

Para las tuberías con tramos de longitudes de 10.0 m y 20.0 m, sin embargo, se observa un pico en el error por deformación flectora para $\rho=0.36$, que corresponde a $\alpha L=1.0$. A pesar de lo anterior, el error medio por deformación axial no sobrepasa el 30% tanto para suelo blando como para suelo duro.

En las figuras 14 y 15 se observa la variación del error relativo con respecto a los diferentes valores de correlación para los modelos de tubería con 10 apoyos en suelo blando y suelo duro, respectivamente, y en las figuras 16 y 17 la variación del error relativo con respecto a la correlación para los modelos de tubería con $L=10.0$ m en suelo blando y suelo duro respectivamente.

6.3. Deformaciones en tuberías con tramos diferentes

Los resultados numéricos obtenidos para las deformaciones en tuberías con tramos iguales muestran que la componente inercial de las mismas es despreciable cuando se compara con la componente cuasiestática. Estos resultados coinciden con lo que el modelo estudiado predice sobre la participación de la primera en la respuesta total.

Sin embargo, en las tuberías con tramos diferentes se observa en general un incremento en la componente inercial de deformación, principalmente en flexión. Este incremento se maximiza cuando la tubería es analizada en condiciones de suelo duro.

Capítulo 6 – Resultados y conclusiones

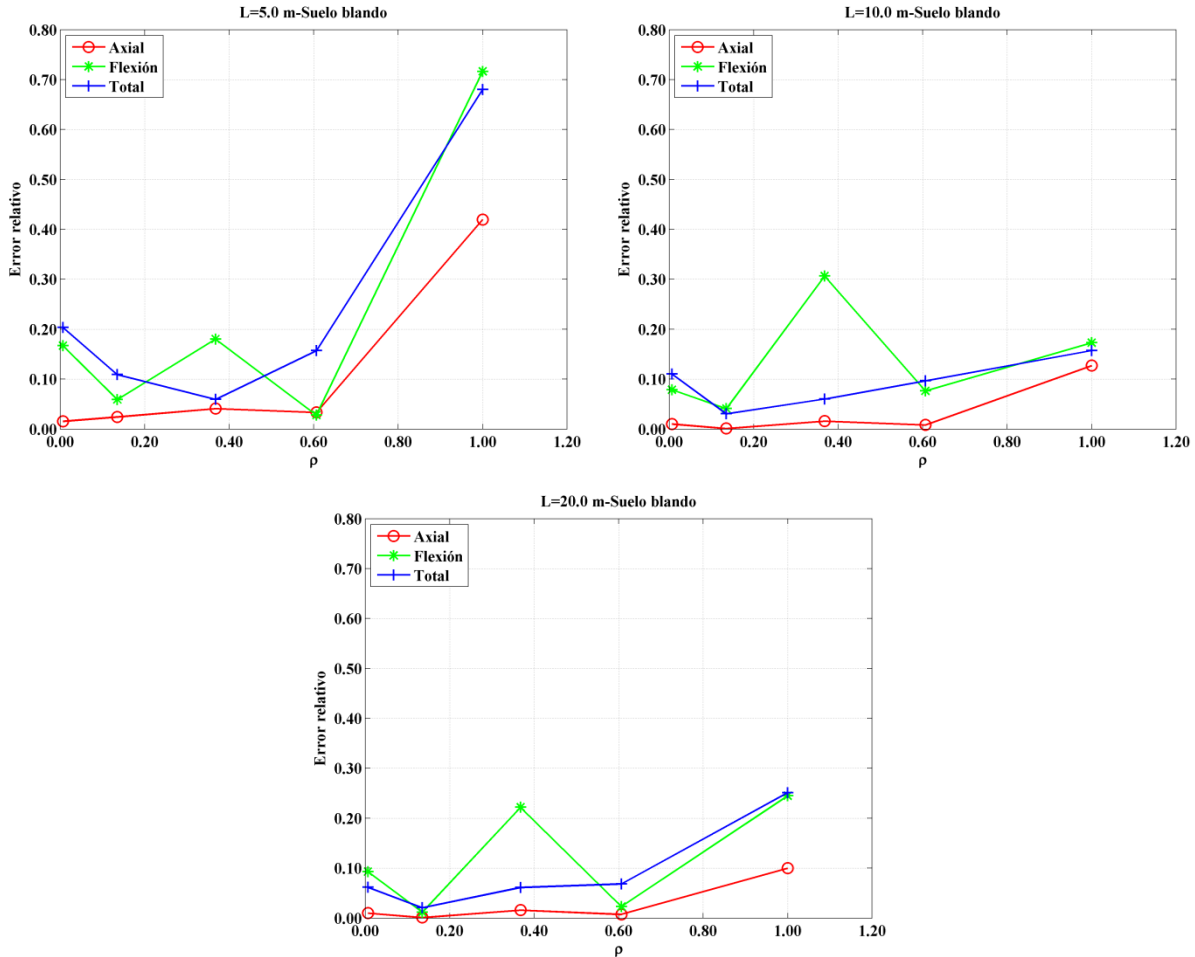


Figura 14 – Variación del error relativo con la correlación ($N=10$) – Suelo blando

6.3.1. Sensibilidad de las deformaciones

A continuación se analizan cómo se afectan de las deformaciones con la variación de aquellas variables que de acuerdo con el modelo, controlan la respuesta dinámica de las tuberías superficiales.

- **Deformaciones vs tipo de suelo**

Los resultados numéricos muestran que las tuberías con tramos diferentes se ven seriamente afectadas cuando se encuentran en suelo duro. La excitación en suelo duro tiene amplitudes que

Capítulo 6 – Resultados y conclusiones

pueden ser 10 veces mayores que en suelo blando en frecuencias cercanas a las del modo fundamental de la tubería (que tiene además el más alto factor de participación en la respuesta), lo cual amplifica la componente inercial de la respuesta dinámica haciéndola casi igual que la componente cuasiestática. Esta situación no puede ser predicha por el modelo planteado, ya que éste parte del hecho de que las frecuencias de vibración de las tuberías son las debidas a tuberías de tramos iguales, que son mucho más altas que las que se presentan en tuberías de tramos desiguales.

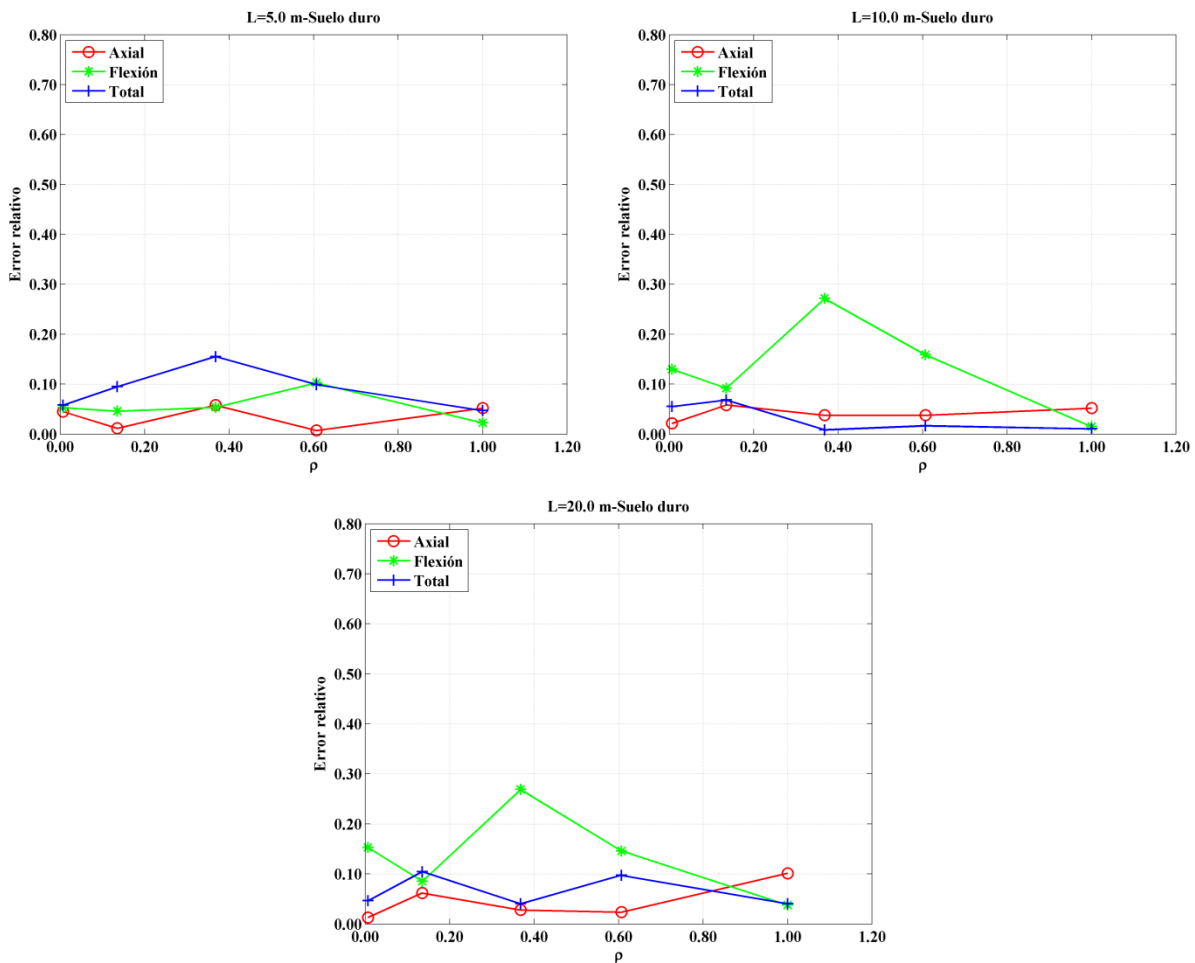


Figura 15 – Variación del error relativo con la correlación ($N=10$) – Suelo duro

Otra variable que afecta las deformaciones de la tubería es el desplazamiento máximo del terreno. De acuerdo con el modelo, esta variable afecta las componentes cuasiestáticas axial y flectora.

Capítulo 6 – Resultados y conclusiones

Para el presente caso, debido a que todas las historias de tiempo usadas tienen el mismo valor de desplazamiento máximo del terreno, no es posible, a partir de los resultados numéricos, verificar lo que el modelo plantea sobre la influencia de ésta variable en las deformaciones. Esta misma situación se da para las tuberías con tramos iguales.

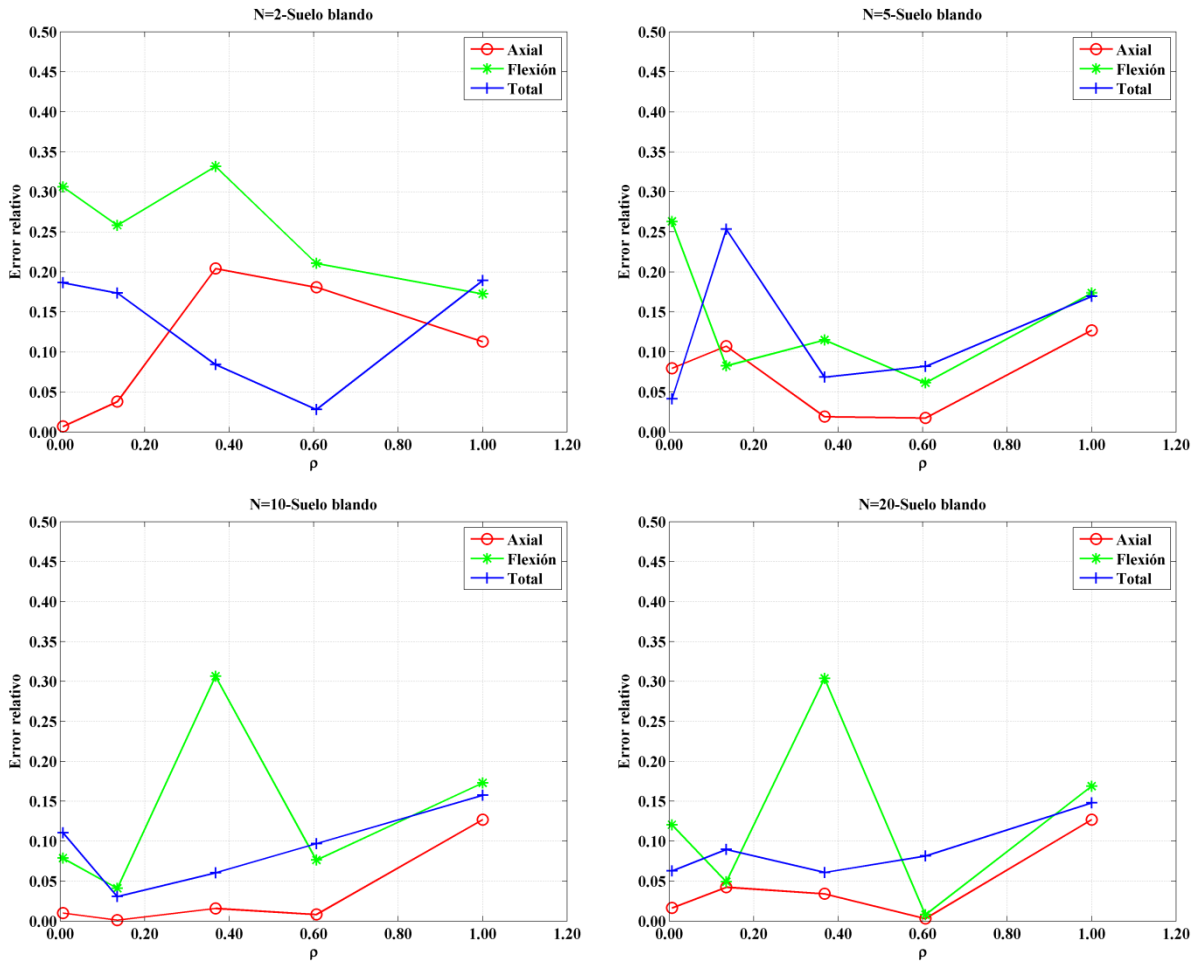


Figura 16 – Variación del error relativo con la correlación ($L=10.0\text{ m}$) – Suelo blando

Capítulo 6 – Resultados y conclusiones

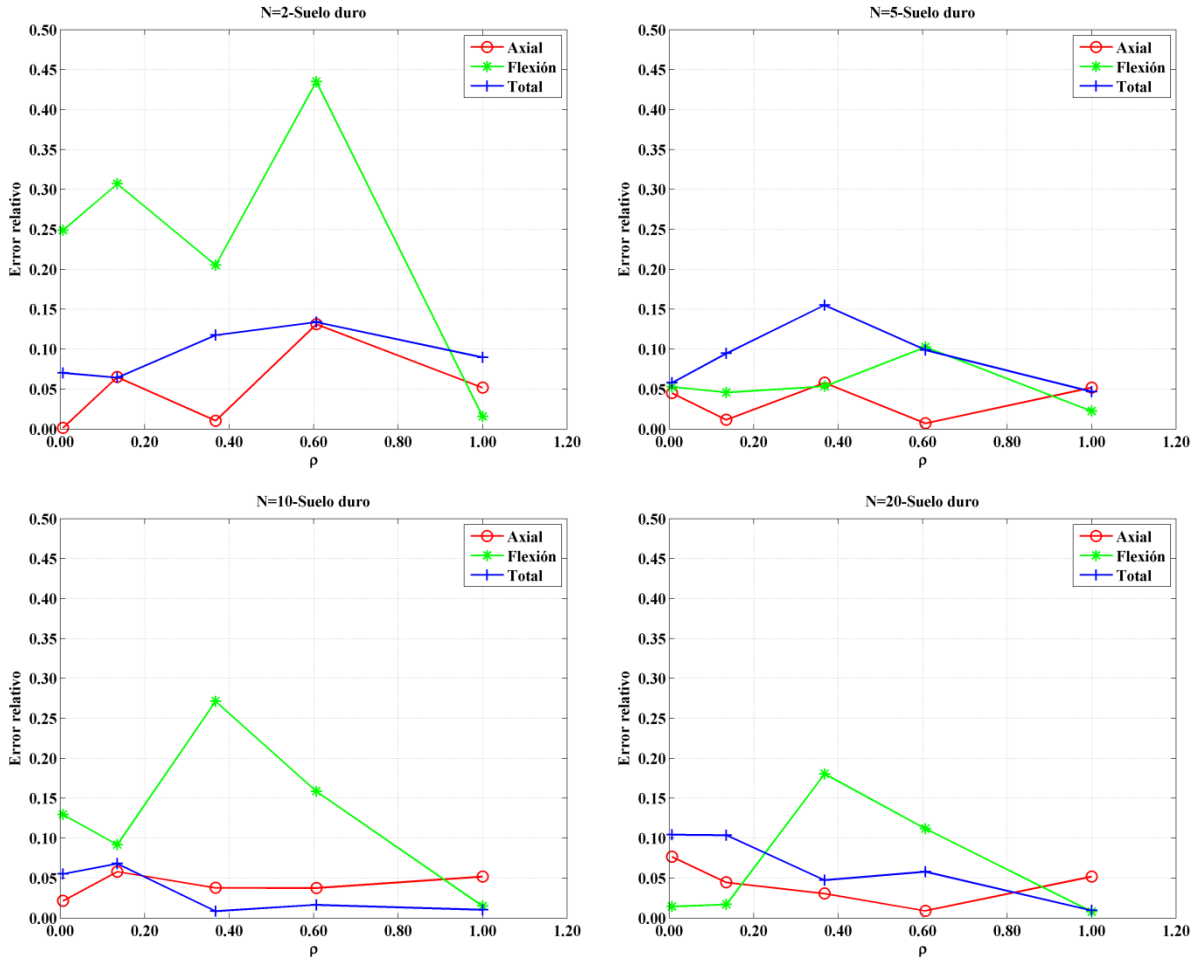


Figura 17 – Variación del error relativo con la correlación ($L=10.0$ m) – Suelo duro

- **Deformaciones vs longitud**

Los resultados numéricos muestran que las deformaciones axiales y flectoras disminuyen con la longitud, tal como lo plantea el modelo.

De acuerdo con lo que predice el modelo, la deformación axial debe ser mayor que la deformación flectora. Los resultados numéricos de todas las tuberías estudiadas muestran esta misma tendencia, con excepción de aquellas que tuvieran al menos un tramo de 20.0 m de longitud y estuvieran en condición de suelo duro donde la deformación flectora es mayor que la axial en el tramo de 20.0 m. Esto se explica teniendo en cuenta que, en general, las componentes

Capítulo 6 –Resultados y conclusiones

inerciales aumentan en condición de suelo duro, aunque el aumento es mucho mayor para el caso flector, ya que el periodo de vibración transversal aumenta con L^2 mientras que en el caso axial aumenta con L . Es por esto que para la longitud de 20.0 m el aumento en la componente inercial de deformación es mucho mayor que para las otras longitudes en estudio.

La variación de las deformaciones axial, flectora y total en todos los casos de las tuberías tipo 1, en condición de suelo blando, se presentan en las figuras 18, 19 y 20 respectivamente y en condición de suelo duro en las figuras 21, 22 y 23 respectivamente.

La variación de las deformaciones axial, flectora y total en todos los casos de las tuberías tipo 2, en condición de suelo blando, se presentan en las figuras 24, 25 y 26 respectivamente y en condición de suelo duro en las figuras 27, 28 y 29 respectivamente.

La variación de las deformaciones axial, flectora y total en todos los casos de las tuberías tipo 3, en condición de suelo blando, se presentan en las figuras 30, 31 y 32 respectivamente y en condición de suelo duro en las figuras 33, 34 y 35 respectivamente.

- **Deformaciones vs correlación**

Los resultados numéricos muestran que las deformaciones axiales, flectoras y totales tienden a disminuir conforme aumenta la correlación, tal como lo predice el modelo. Las menores deformaciones se obtuvieron, como era de esperarse, para el caso de correlación total entre los movimientos de los apoyos, ya que en estas sólo está presente la componente inercial de deformación. Incluso, a pesar que dicha componente es 10 veces mayor en suelo duro que en suelo blando para tuberías con al menos un tramo de 20.0 m, sigue siendo pequeña cuando se compara con las deformaciones obtenidas con $\rho \neq 1.0$, donde participa también la componente de deformación cuasiestática.

Capítulo 6 –Resultados y conclusiones

- **Deformaciones vs relación entre tramos adyacentes**

Los resultados numéricos no muestran una influencia en las deformaciones de las relaciones L_1/L ó L_2/L , sino más bien de los valores particulares que puedan tomar L_1 , L_2 ó L . Lo anterior permite concluir que las deformaciones en un tramo particular de tubería dependen de su longitud y no de la longitud de sus tramos adyacentes. Este hecho coincide con el modelo, donde la deformación en cualquier tramo de tubería es independiente de los tramos vecinos.

Una conclusión importante que se obtiene del modelo, y que los resultados numéricos permitieron comprobar, es el hecho de que la deformación en un tramo de tubería (independiente de si tiene o no los tramos iguales) depende exclusivamente de la longitud de ese tramo. La ventaja de las tuberías con tramos iguales respecto de aquellas con tramos diferentes radica en que al analizar las deformaciones en un tramo de tubería, es como si se analizaran las de la tubería completa, mientras que cuando hay tramos diferentes es necesario analizar tantos tramos como longitudes diferentes hayan. Así, para todos los tramos de longitud L independiente de las longitudes de los tramos adyacentes, tienen siempre la misma deformación.

- **Deformaciones vs número de apoyos**

Teniendo en cuenta que las deformaciones en cada tramo dependen sólo de la longitud de éste, y no de los adyacentes (como se concluyó antes), se procedió a comparar los resultados numéricos de dos casos diferentes: en el primero se comparan las deformaciones de la tubería de 14 apoyos con $L_1=5.0$ m, $L=10.0$ m y $L_2=20.0$ m con las de la tubería de 3 apoyos de $L_1=5.0$ m, $L=10.0$ m; en el segundo caso las deformaciones de la tubería también de 14 apoyos con $L_1=5.0$ m, $L=20.0$ m y $L_2=10.0$ m con las de la tubería de 3 apoyos de $L_1=5.0$ m, y $L=20.0$ m. Los resultados muestran que, como se esperaba de acuerdo con lo planteado por el modelo, las deformaciones no dependen del número de apoyos.

Capítulo 6 – Resultados y conclusiones



Figura 18 – Variación de la deformación axial con la longitud en tuberías tipo 1 – Suelo blando

Capítulo 6 – Resultados y conclusiones

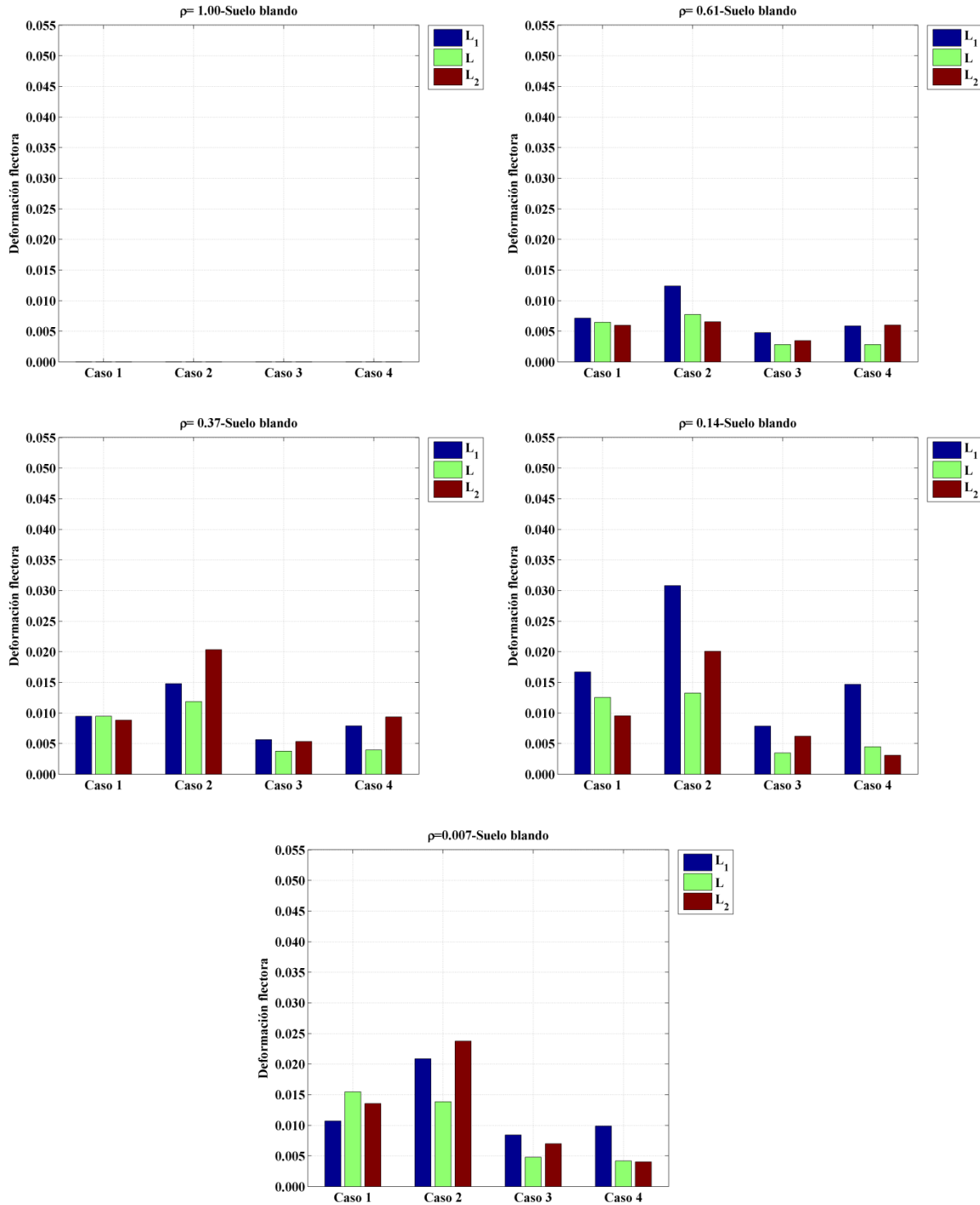


Figura 19 – Variación de la deformación flectora con la longitud en tuberías tipo 1 – Suelo blando

Capítulo 6 – Resultados y conclusiones

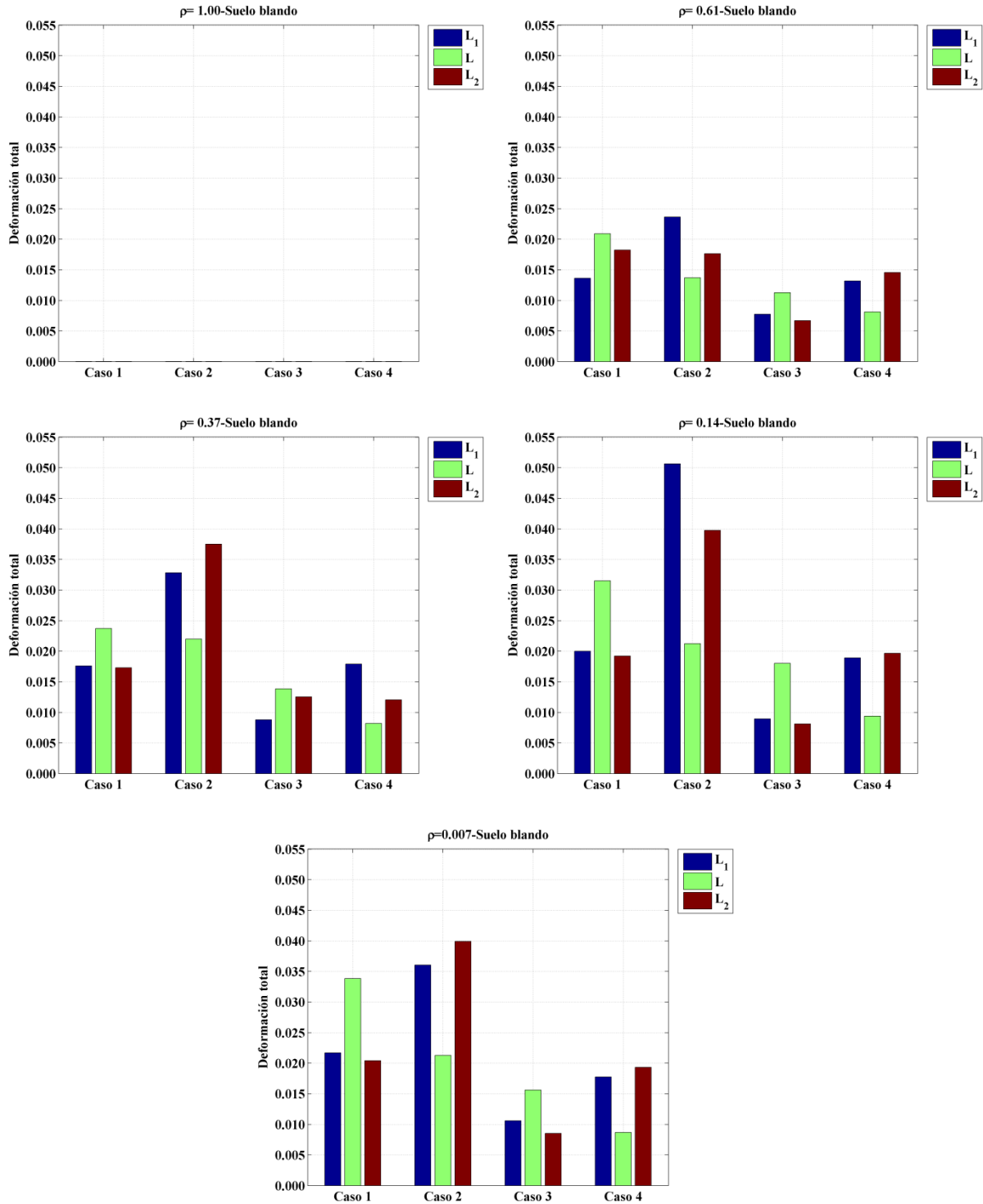


Figura 20 – Variación de la deformación total con la longitud en tuberías tipo 1 – Suelo blando

Capítulo 6 – Resultados y conclusiones

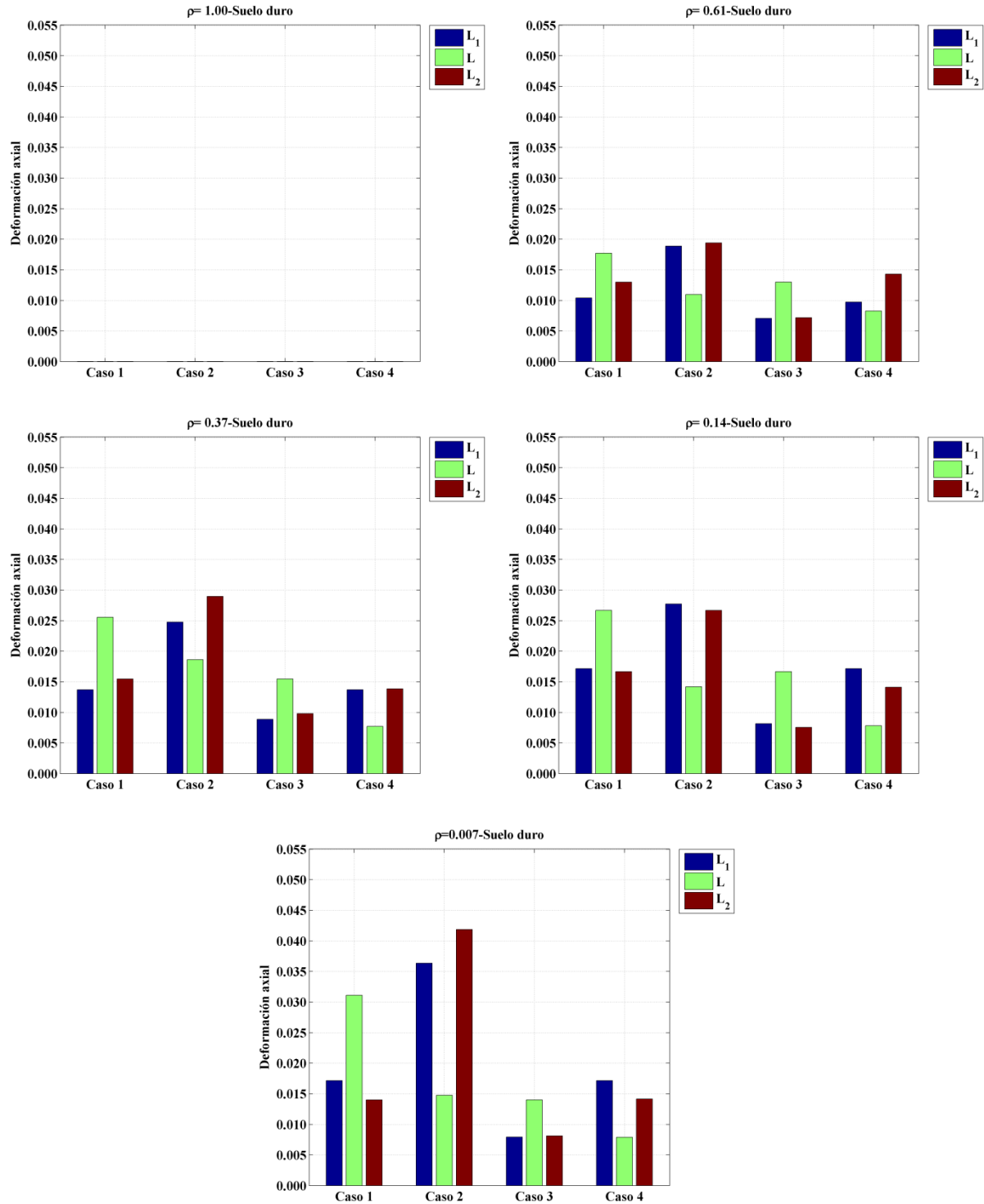


Figura 21 – Variación de la deformación axial con la longitud en tuberías tipo 1 – Suelo duro

Capítulo 6 – Resultados y conclusiones



Figura 22 – Variación de la deformación flexora con la longitud en tuberías tipo 1 – Suelo duro

Capítulo 6 – Resultados y conclusiones

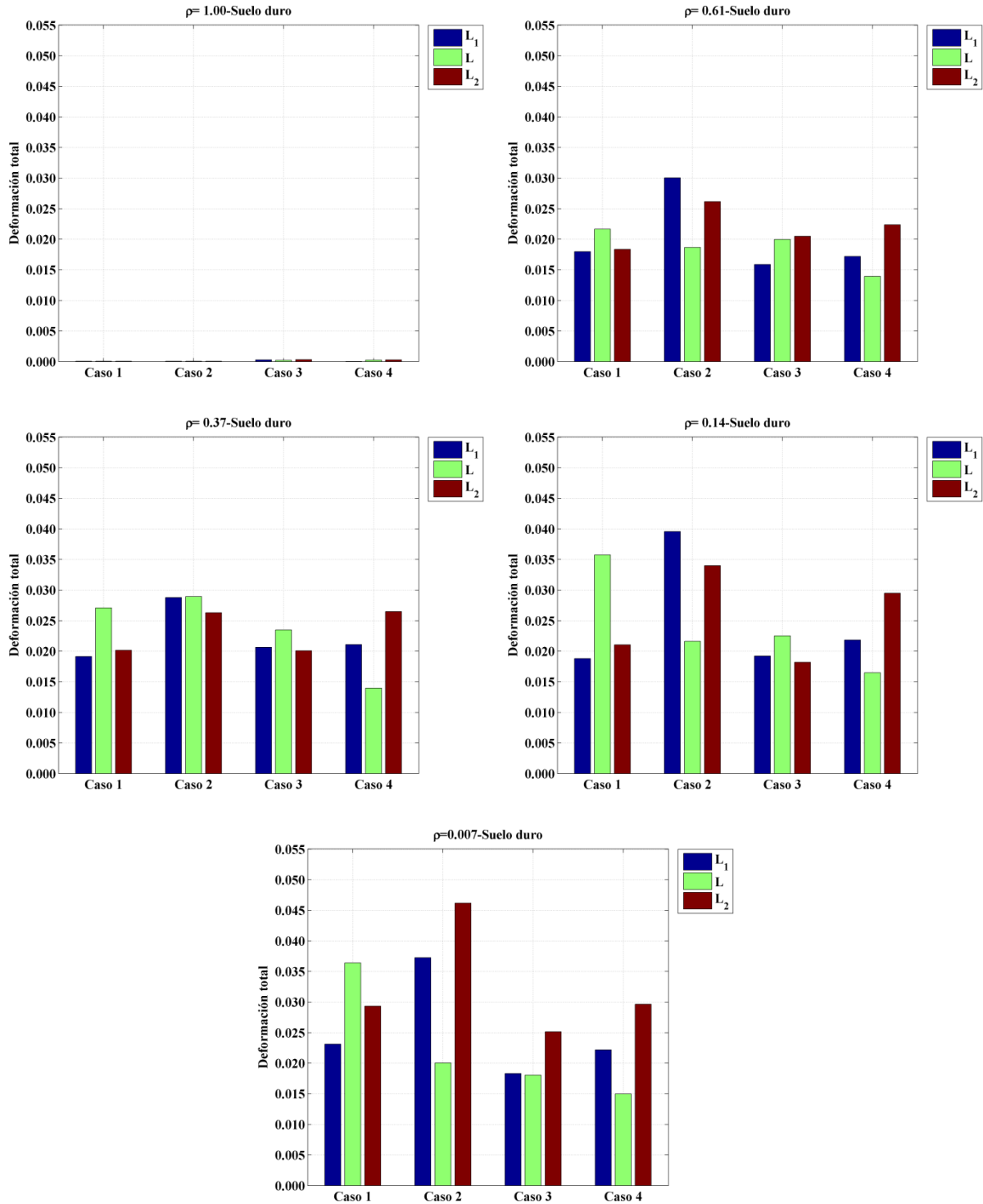


Figura 23 – Variación de la deformación total con la longitud en tuberías tipo 1 – Suelo duro

Capítulo 6 – Resultados y conclusiones

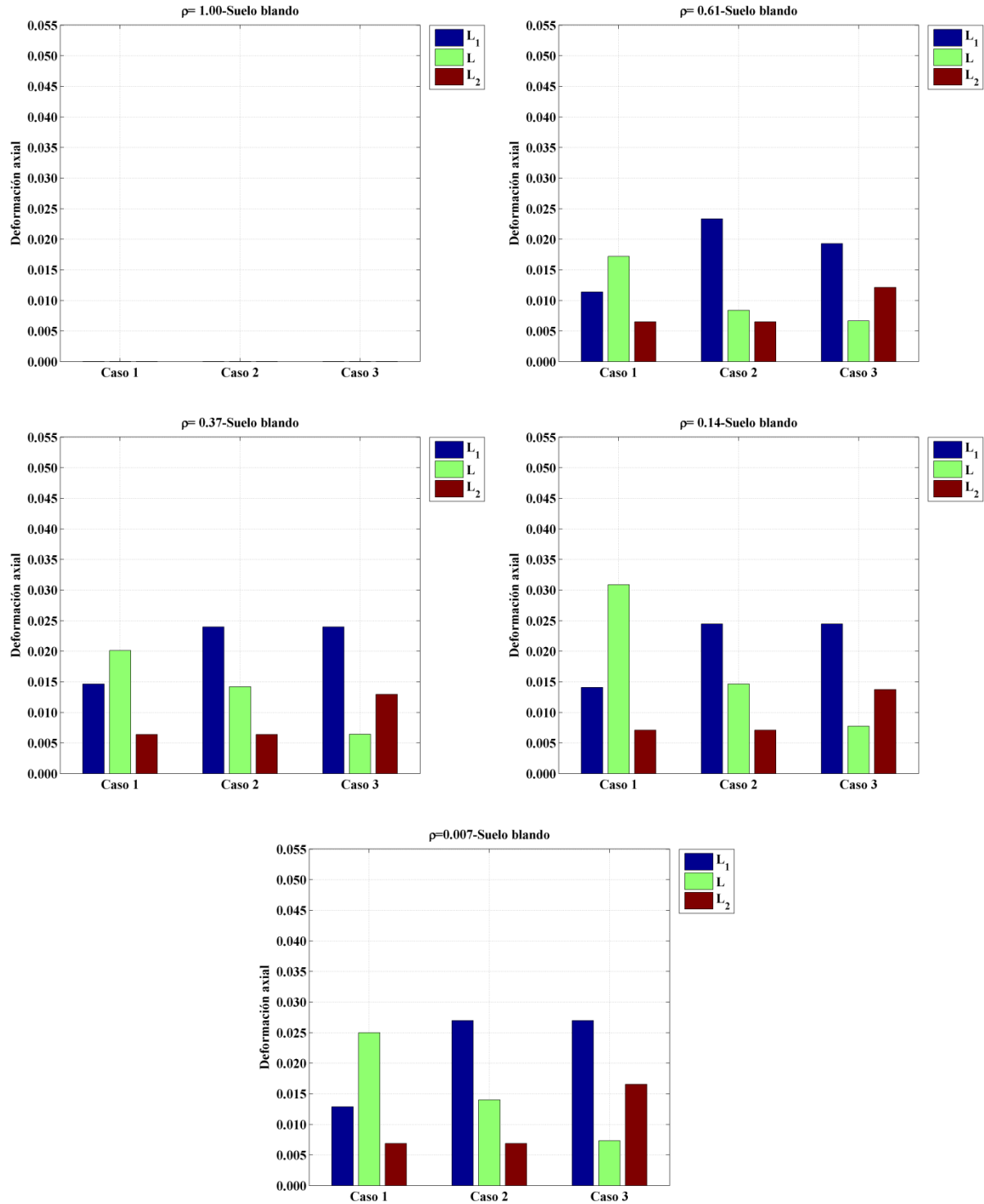


Figura 24 – Variación de la deformación axial con la longitud en tuberías tipo 2 – Suelo blando

Capítulo 6 – Resultados y conclusiones

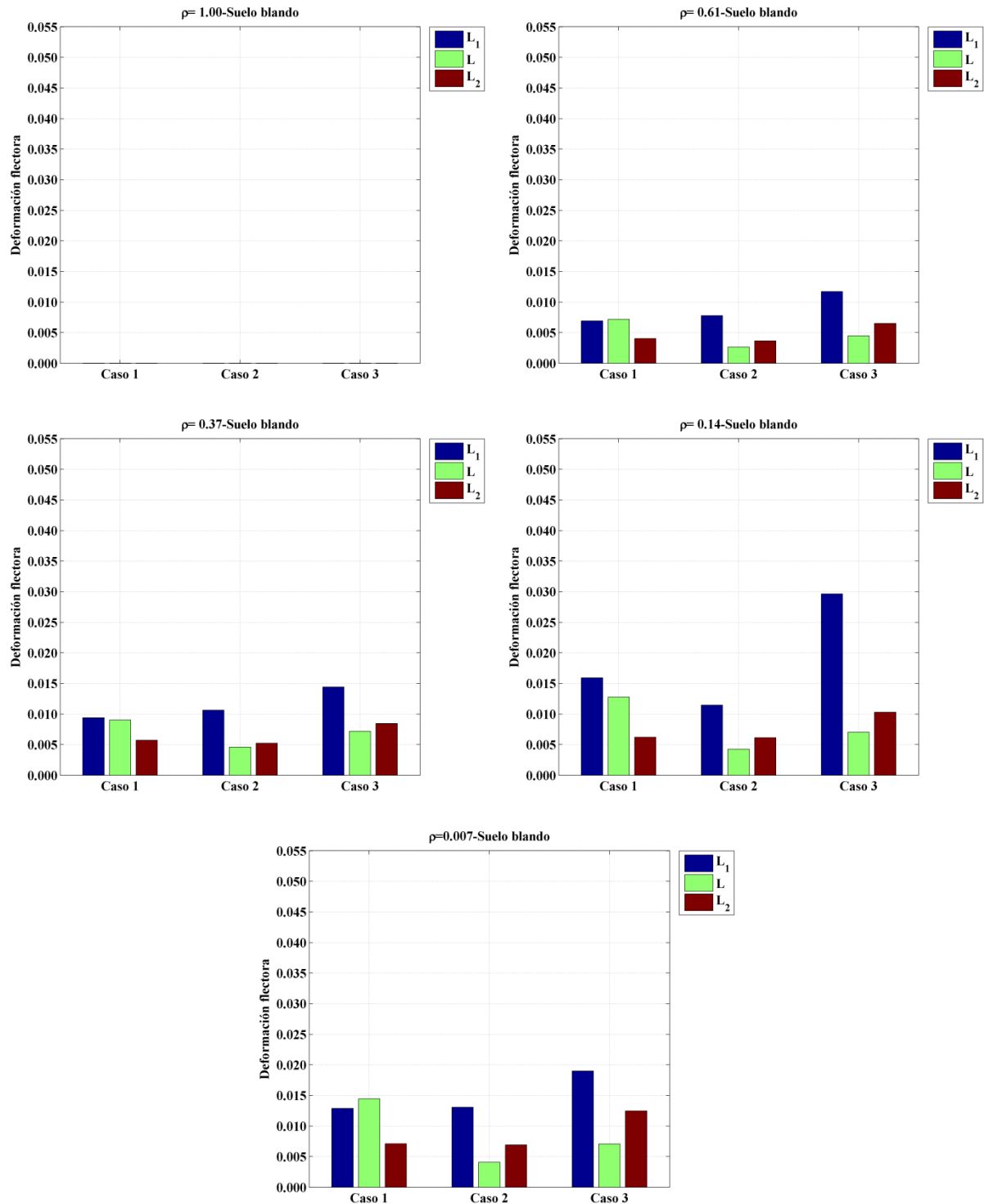


Figura 25 – Variación de la deformación flectora con la longitud en tuberías tipo 2 – Suelo blando

Capítulo 6 – Resultados y conclusiones

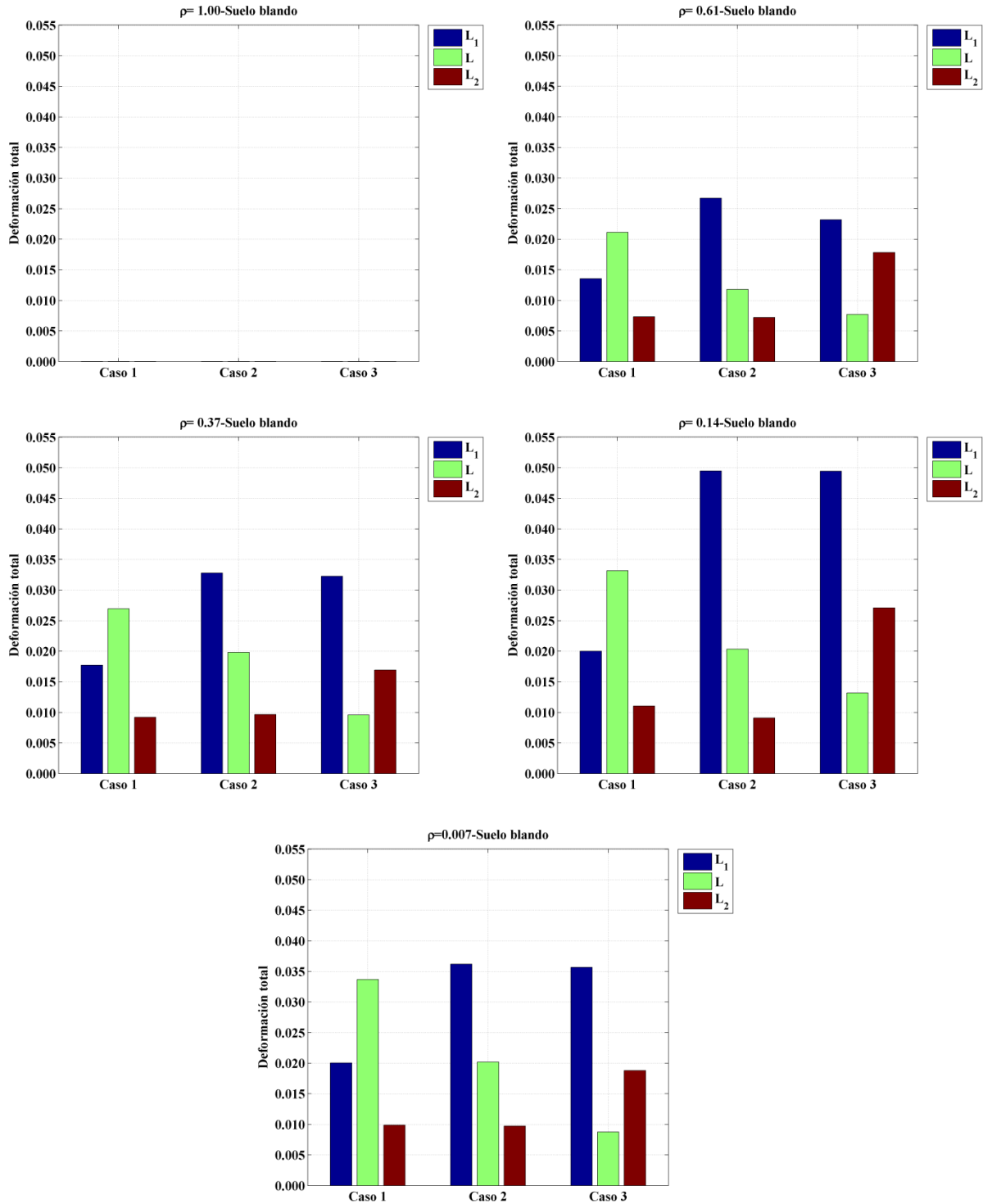


Figura 26 – Variación de la deformación total con la longitud en tuberías tipo 2 – Suelo blando

Capítulo 6 – Resultados y conclusiones

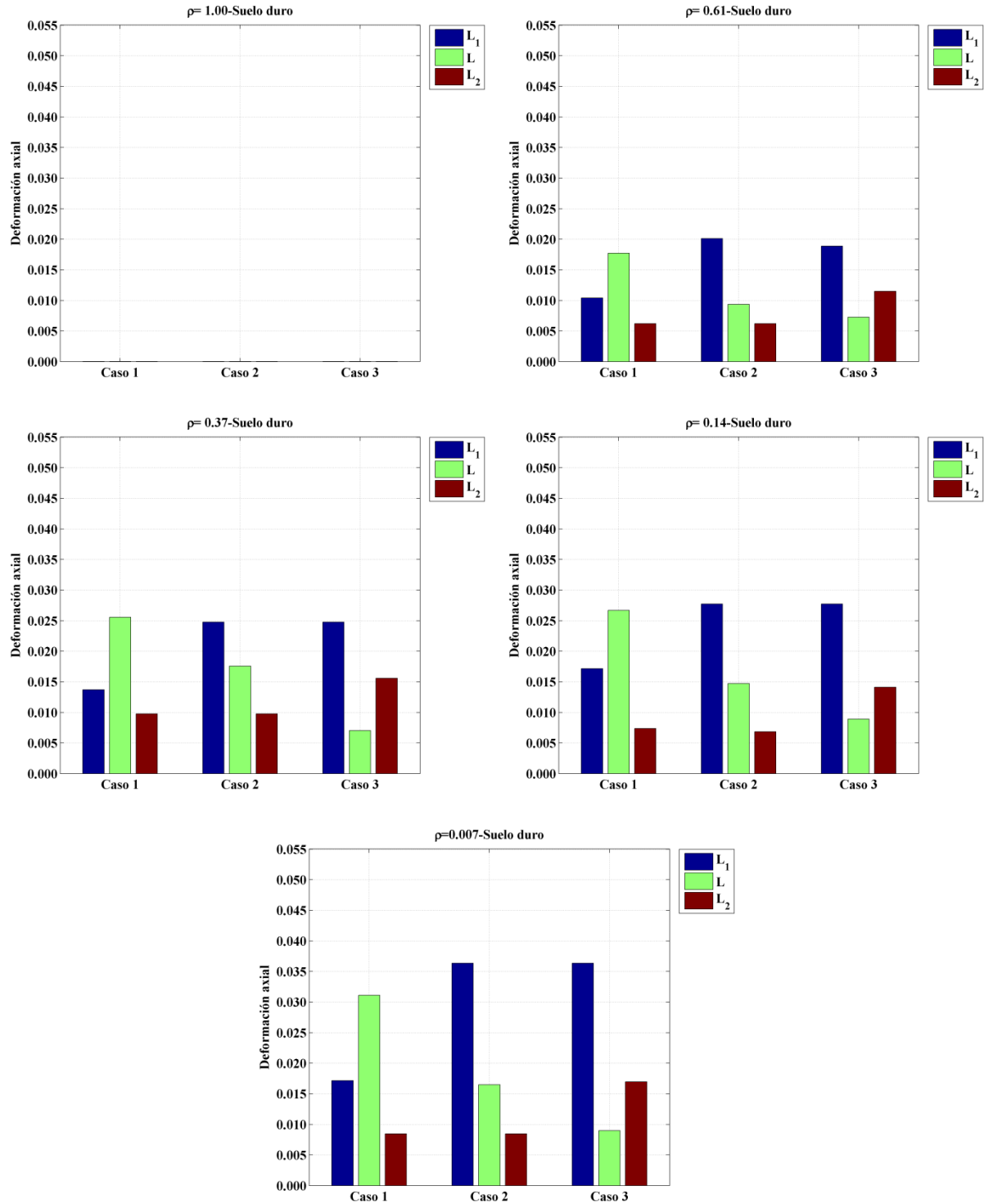


Figura 27 – Variación de la deformación axial con la longitud en tuberías tipo 2 – Suelo duro

Capítulo 6 – Resultados y conclusiones

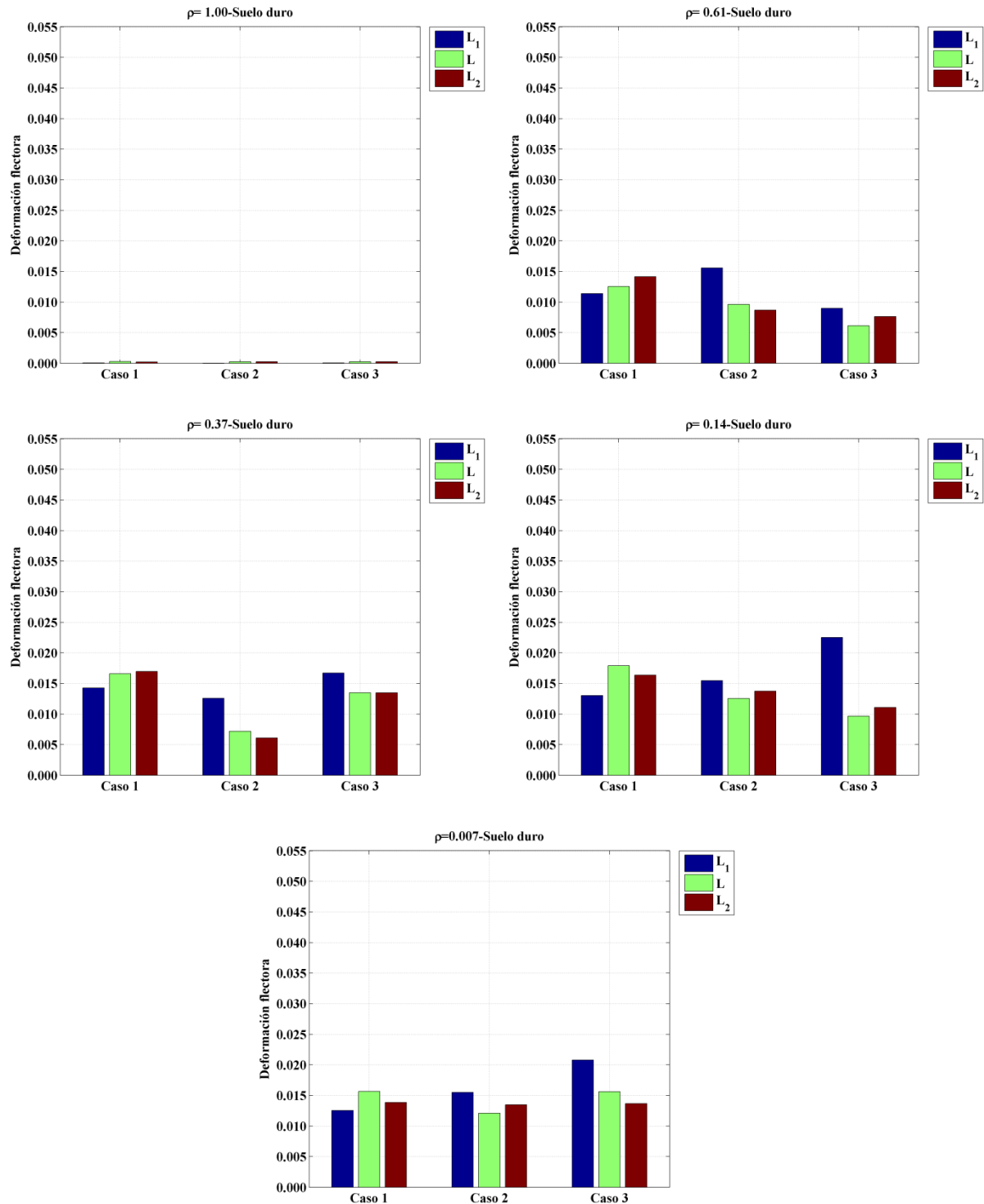


Figura 28 – Variación de la deformación flexora con la longitud en tuberías tipo 2 – Suelo duro

Capítulo 6 – Resultados y conclusiones

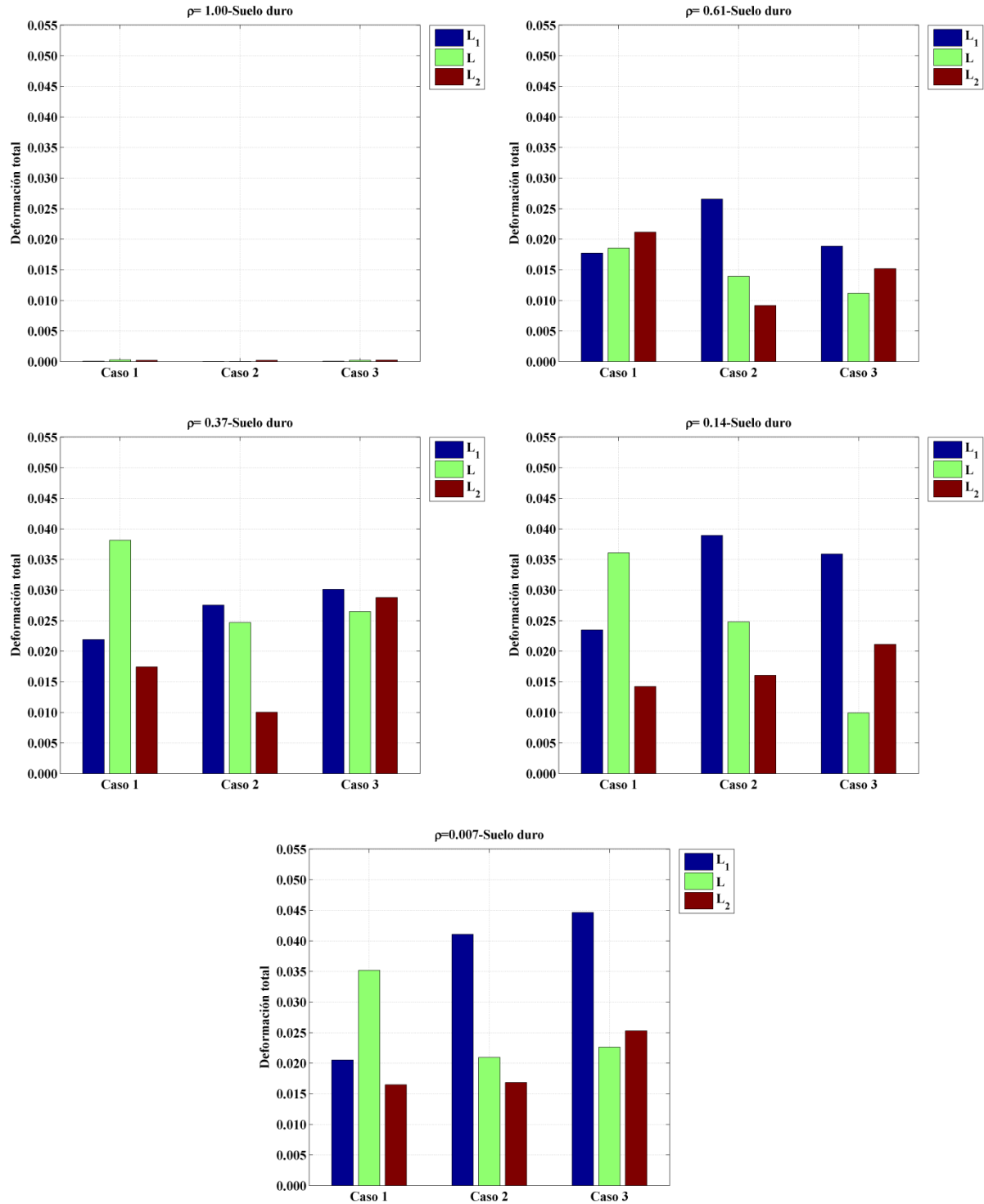


Figura 29 – Variación de la deformación total con la longitud en tuberías tipo 2 – Suelo duro

Capítulo 6 – Resultados y conclusiones

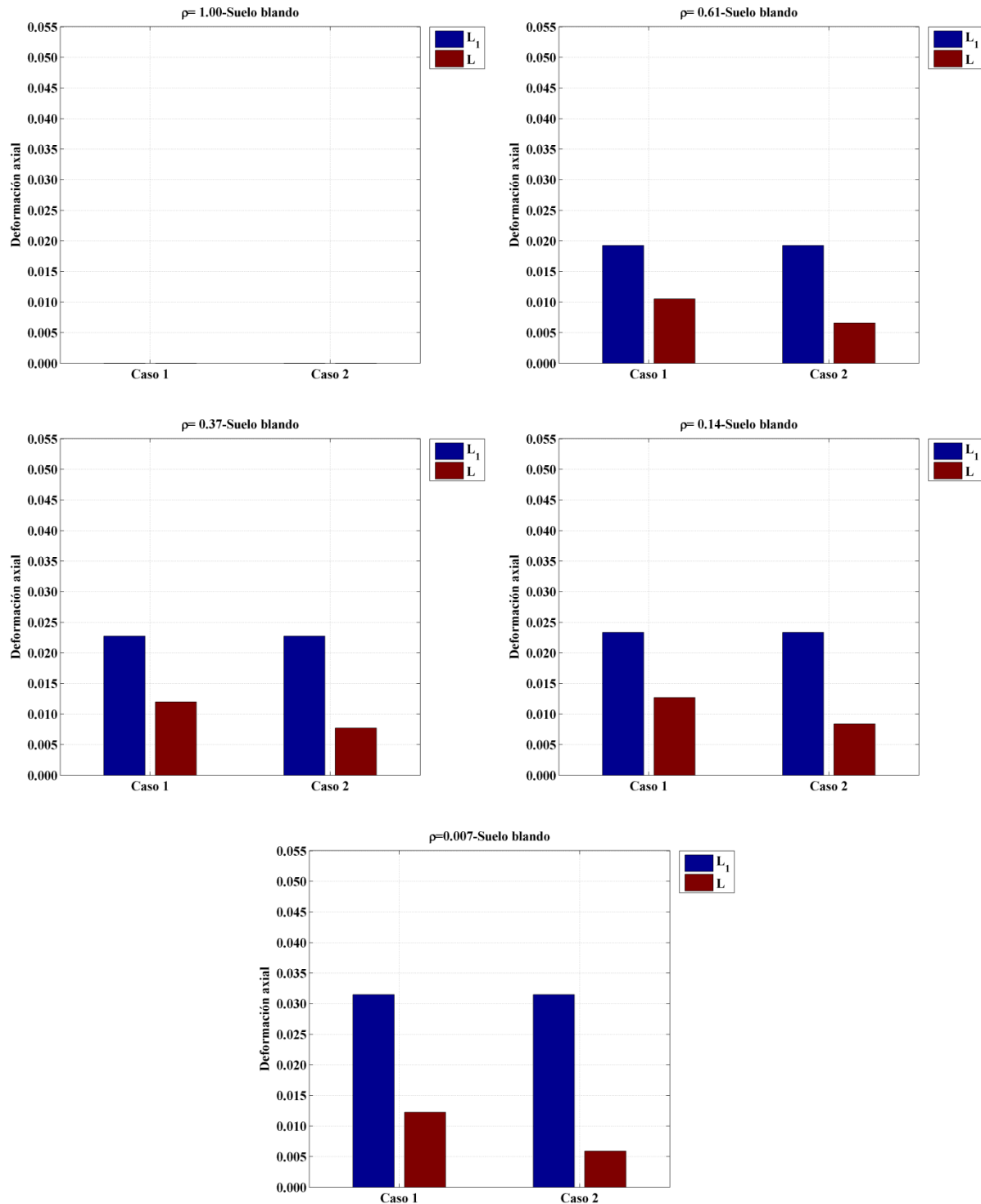


Figura 30 – Variación de la deformación axial con la longitud en tuberías tipo 3 – Suelo blando

Capítulo 6 – Resultados y conclusiones

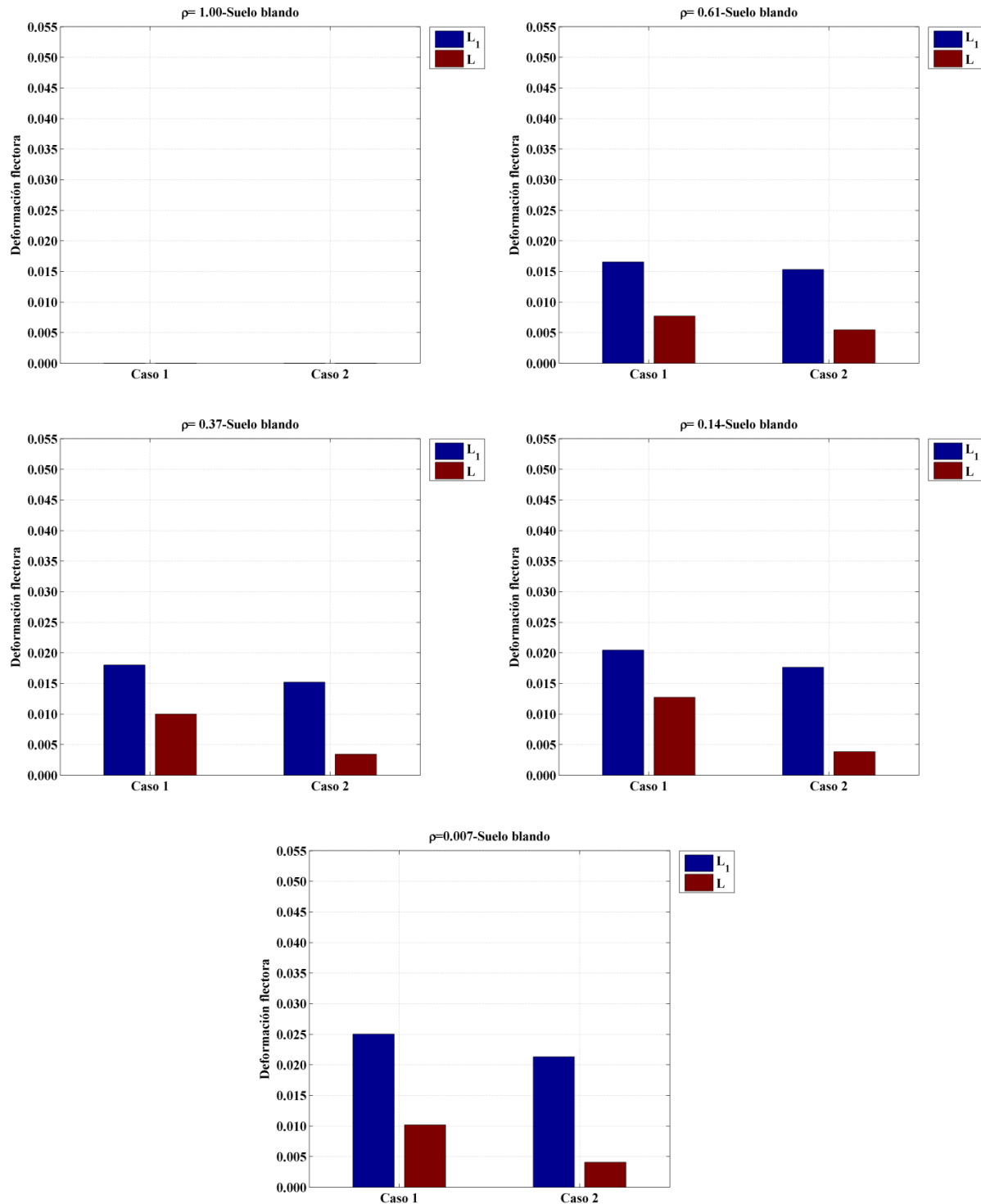


Figura 31 – Variación de la deformación flectora con la longitud en tuberías tipo 3 – Suelo blando

Capítulo 6 – Resultados y conclusiones

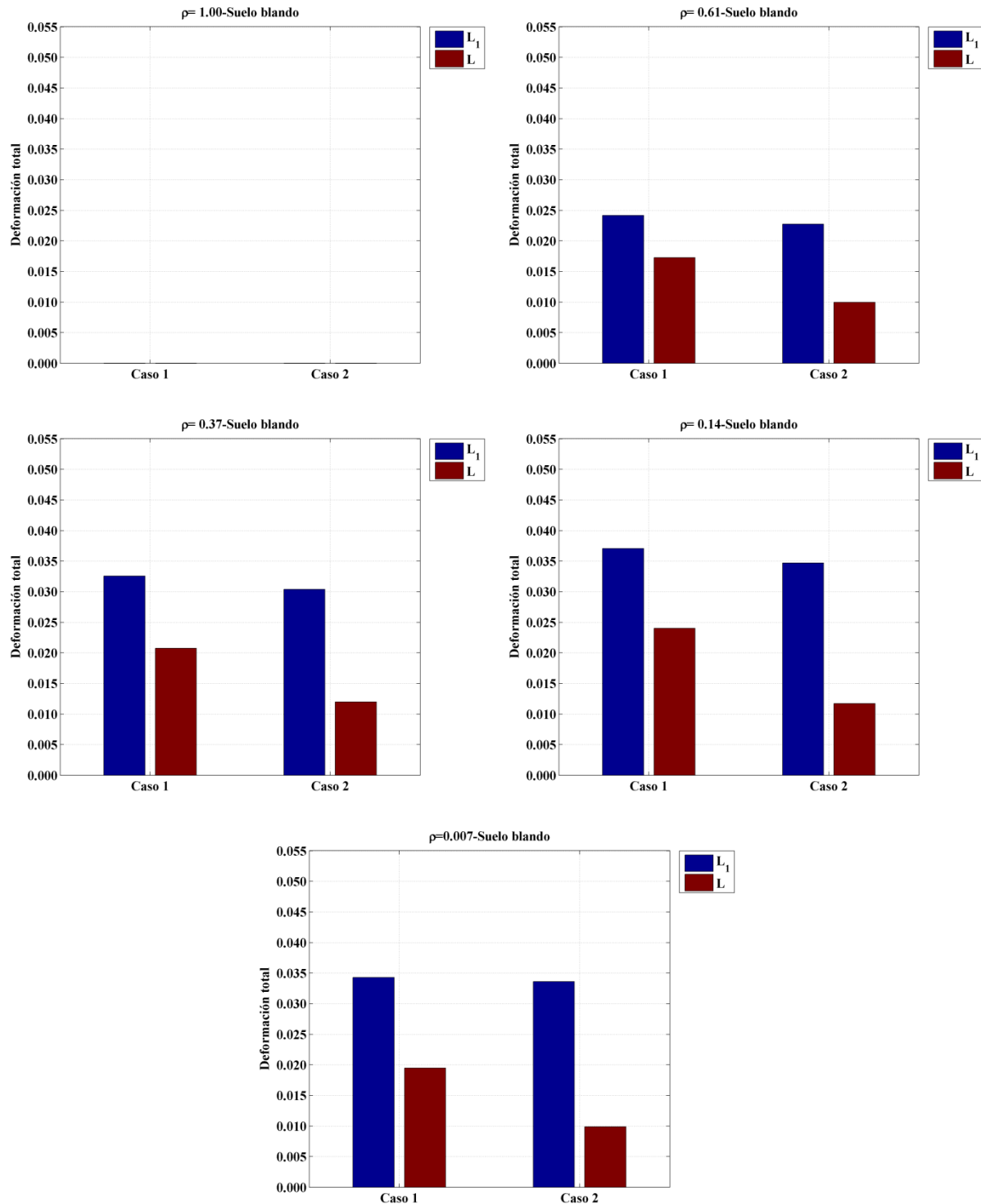


Figura 32 – Variación de la deformación total con la longitud en tuberías tipo 3 – Suelo blando

Capítulo 6 – Resultados y conclusiones

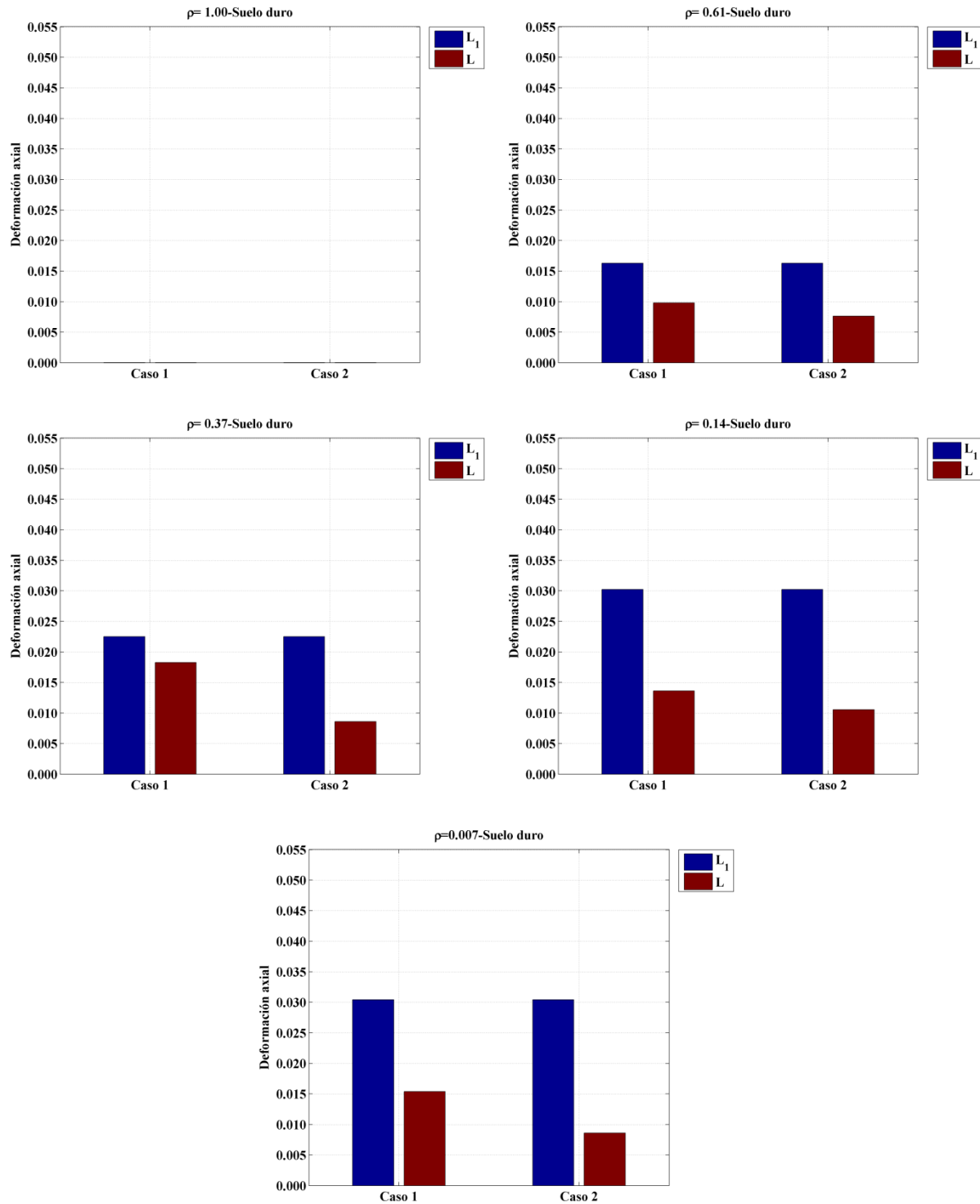


Figura 33 – Variación de la deformación axial con la longitud en tuberías tipo 3 – Suelo duro

Capítulo 6 – Resultados y conclusiones

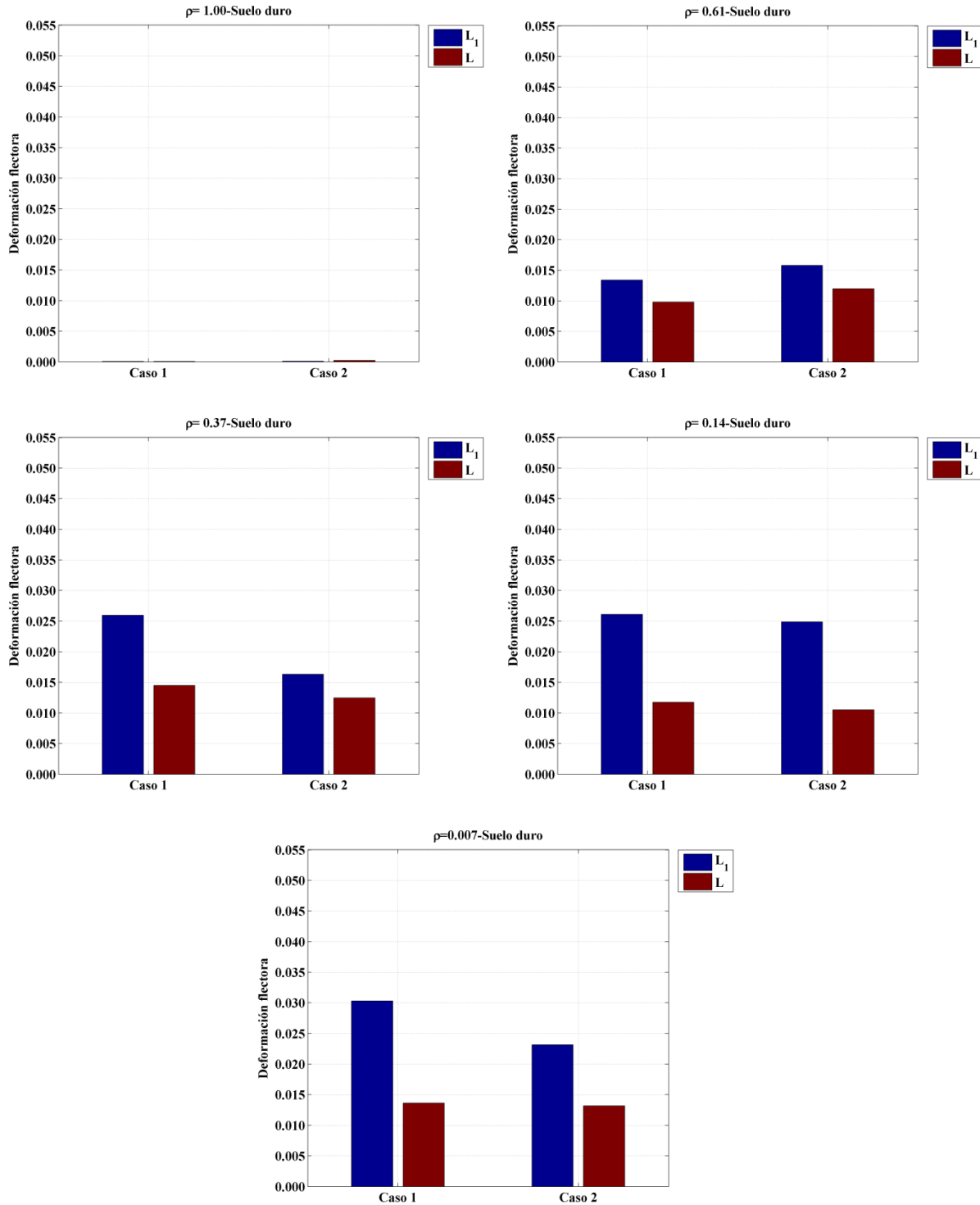


Figura 34 – Variación de la deformación flexora con la longitud en tuberías tipo 3 – Suelo duro

Capítulo 6 – Resultados y conclusiones

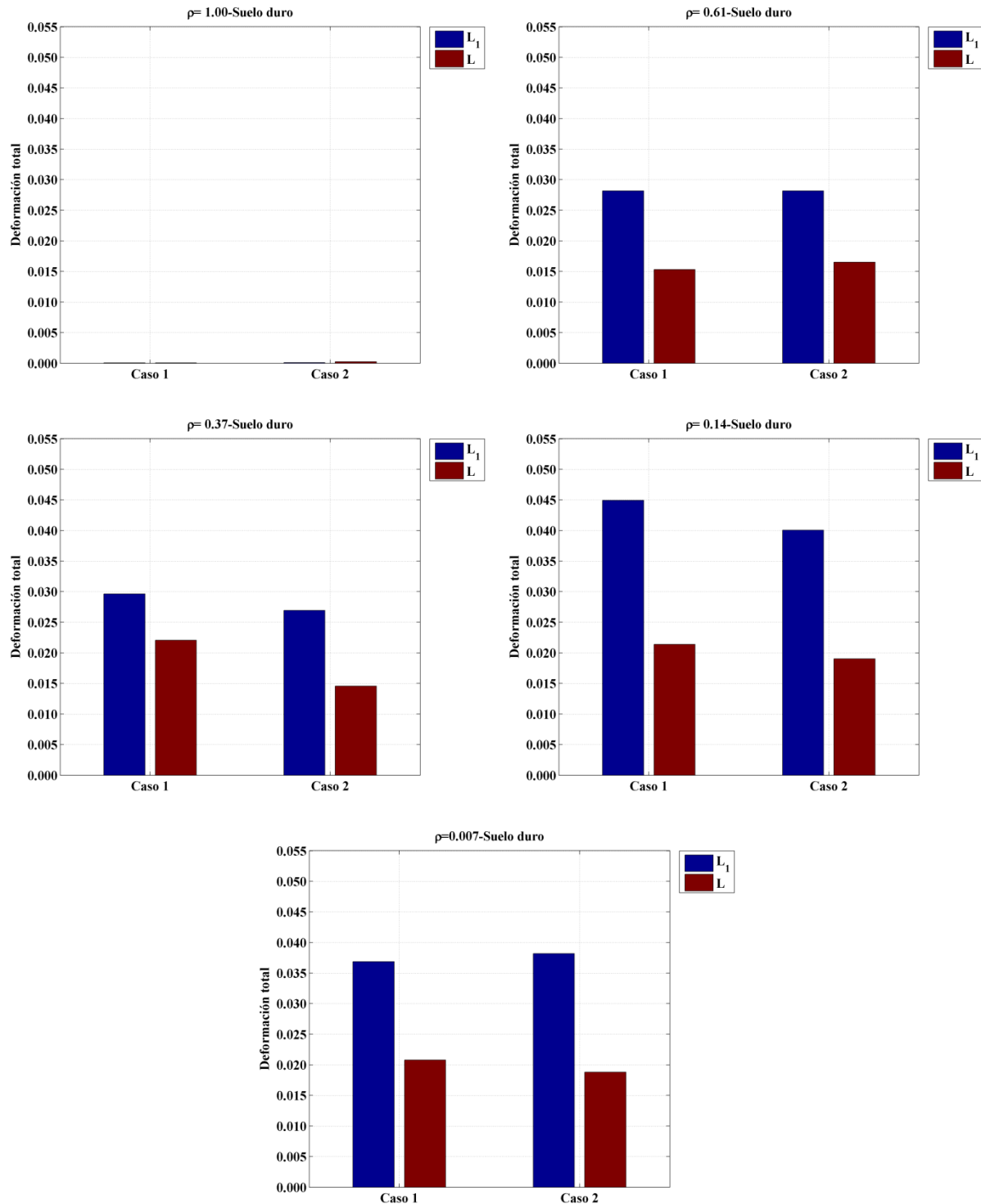


Figura 35 – Variación de la deformación total con la longitud en tuberías tipo 3 – Suelo duro

Capítulo 6 –Resultados y conclusiones

6.3.2. Comparación de los resultados

El error medio relativo de las deformaciones halladas con el modelo propuesto y con el modelo numérico para tuberías con 14 apoyos y $L_1=L_2$ sobre suelo blando es de 13% para la deformación axial, 65% para la deformación flectora y 43% para la deformación total, y sobre suelo duro es de 19% para la deformación axial, 60% para la deformación flectora y 50% para la deformación total.

Por otro lado, el error medio relativo de las deformaciones halladas con el modelo propuesto y con el modelo numérico para tuberías con 14 apoyos y $L_1 \neq L_2$ sobre suelo blando es de 13% para la deformación axial, 72% para la deformación flectora y 37% para la deformación total, y sobre suelo duro es de 18% para la deformación axial, 56% para la deformación flectora y 42% para la deformación total.

Finalmente, el error medio relativo de las deformaciones halladas con el modelo propuesto y con el modelo numérico para tuberías con 3 apoyos sobre suelo blando es de 14% para la deformación axial, 42% para la deformación flectora y 32% para la deformación total, y sobre suelo duro es de 17% para la deformación axial, 44% para la deformación flectora y 33% para la deformación total.

De acuerdo a los errores medios reportados antes, se puede concluir que las mayores diferencias entre los valores predichos por el modelo y los resultados numéricos se presentan para las deformaciones flectoras.

Observando las diferencias entre las deformaciones que se calculan con el modelo y las que se calculan en forma numérica para cada caso, se encuentra que para tuberías con tramos diferentes las deformaciones son bastante altas, en especial para las deformaciones por flexión y en condición de suelo duro. La componente inercial de la deformación flectora en suelo duro es, en promedio, 10 veces mayor que en suelo blando.

Capítulo 6 –Resultados y conclusiones

La primera causa para el aumento de la componente inercial son los factores de participación modal. Al igual que en las tuberías con tramos iguales, en las de tramos diferentes hay modos superiores con una participación en la respuesta total casi igual a la del modo fundamental. Sin embargo, lo anterior no es suficiente para explicar el aumento de la componente inercial en las tuberías con tramos diferentes, ya que los modos de vibración son una propiedad de la estructura, que no se ve alterada por las condiciones del suelo sobre el que ésta se encuentra. Al comparar el primer modo de vibración de las tuberías con tramos iguales con el de las tuberías con tramos diferentes, se pudo determinar que mientras para las primeras no hay cambios de signo en la forma modal entre tramo y tramo, para las segundas sí los hay. La presencia de tramos de diferentes longitudes en una tubería posibilita que el primer modo de vibración cambie de signo entre un tramo y otro, y que tenga frecuencias de vibración mucho menores que para una tubería con tramos iguales. Además de lo anterior, las nuevas frecuencias de vibración del primer modo serán muy cercanas a las frecuencias contenidas en las excitaciones sísmicas. La amplitud del movimiento sísmico para las frecuencias cercanas a la frecuencia del primer modo de vibración de las tuberías con tramos diferentes es 10 veces mayor en suelo duro que en suelo blando. Esto explica porqué la participación de las deformaciones inerciales en la respuesta total en suelo duro es, en promedio, casi 10 veces mayor que en suelo blando.

La otra causa para explicar las diferencias entre los resultados hallados se deben a las limitaciones inherentes que tiene el modelo en virtud de las hipótesis sobre las cuales fue desarrollado.

Al aplicar el modelo a las tuberías con tramos diferentes, hay algunas hipótesis que no son tan cercanas a éstas, y por lo tanto, los resultados que su aplicación arroje tendrán un error o discrepancia inherente (que no necesariamente debe ser grande), con respecto al modelo numérico, el cual tiene hipótesis menos restrictivas que el modelo analítico propuesto.

En primer lugar, el modelo asume que el primer modo de vibración es el único que participa en la respuesta estructural y que además no cambia de signo entre tramos. Los resultados numéricos para tuberías con tramos iguales muestran que si bien el primer modo sí es como lo supone el modelo, no es el único con participación importante en la respuesta. Hay modos de vibración

Capítulo 6 –Resultados y conclusiones

superiores con participación igual o cercana al del modo fundamental. Por otro lado, para las tuberías con tramos diferentes los resultados numéricos muestran que el primer modo de vibración cambia de signo entre tramos, y además, al igual que en tuberías con tramos iguales, no es el único con participación importante en la respuesta.

Por otro lado, en el modelo se asume que todas las formas modales son las mismas en los tramos de las tuberías dado que ésta se asume con todos sus tramos iguales. Para las tuberías con tramos diferentes, esta hipótesis no es cierta. La presencia de tramos con diferentes longitudes afecta las formas de los modos de vibración, por lo que dejan de ser iguales entre sí. Incluso, en las tuberías con tramos iguales la igualdad en las formas modales es cierta sólo si se analizan tramos de la tubería lejos de los extremos.

Una segunda causa de diferencias es la función de influencia para el desplazamiento longitudinal o transversal. En virtud de que la tubería es considerada infinita y de tramos iguales en la deducción del modelo, se puede tomar una misma función sin importar qué apoyo se desplace. Esta situación garantiza que dicha función sea simétrica respecto al punto que se mueva, y que los factores de participación modal sean independientes del apoyo en cuestión. Para las tuberías con tramos iguales, esta hipótesis es válida, principalmente cuando se estudian tramos lejos de los extremos, donde la función de influencia deja de ser la misma y pierde su simetría. Para tuberías con tramos diferentes, la función de influencia depende del apoyo que se desplace, perdiendo su carácter simétrico. Es importante mencionar que la hipótesis sobre la función de influencia puede afectar tanto la componente cuasiestática como la inercial de la deformación: la primera ya que la derivada de ésta multiplica los desplazamientos del terreno y en la segunda, porque altera el factor de participación modal.

En las tuberías con tramos iguales y en las tuberías con tramos diferentes en suelo blando, no es posible dimensionar cómo las hipótesis sobre las que está basado el modelo afectan los valores que éste predice, ya que la mayoría de las simplificaciones que se hacen, son acerca de la componente inercial de deformación, la cual es despreciable cuando se compara con la cuasiestática en los casos de tuberías antes mencionados. Para las tuberías anteriores, el único caso en el cual se podía “ver” la componente inercial era cuando los movimientos en los apoyos

Capítulo 6 –Resultados y conclusiones

están completamente correlacionados. En las tuberías con tramos diferentes en suelo duro, es en donde es posible dimensionar cómo las hipótesis del modelo afectan los resultados que éste predice, puesto que en este caso la componente inercial de la deformación empieza a ser igual de importante a la cuasiestática, y por lo tanto ya no es despreciable.

- **Error vs longitud**

Para las deformaciones axial, flectora y total con correlación $\rho=1.0$, tanto en suelo blando como duro, se presentan los mayores errores entre el modelo y los resultados numéricos. Esto se explica teniendo en cuenta que cuando la correlación entre los movimientos de los apoyos es total, la única componente de deformación que se tiene es la inercial, la cual, por las razones ya explicadas en este documento, se ve seriamente afectada por los cambios en la forma del primer modo de vibración y las otras condiciones que se dejan de cumplir respecto a las hipótesis del modelo.

Para los casos con $\rho \neq 1.0$, los mayores errores se presentan para las deformaciones flectoras, especialmente en aquellas tuberías con algún tramo de 20.0 m. El error en las deformaciones axiales es menor que en las deformaciones flectoras y totales, tanto en suelo blando como en suelo duro.

La variación del error para las deformaciones axial, flectora y total en todos los casos de las tuberías tipo 1, en condición de suelo blando, se presentan en las figuras 36, 37 y 38 respectivamente y en condición de suelo duro en las figuras 39, 40 y 41 respectivamente.

La variación del error para las deformaciones axial, flectora y total en todos los casos de las tuberías tipo 2, en condición de suelo blando, se presentan en las figuras 42, 43 y 44 respectivamente y en condición de suelo duro en las figuras 45, 46 y 47 respectivamente.

Capítulo 6 –Resultados y conclusiones

La variación del error para las deformaciones axial, flectora y total en todos los casos de las tuberías tipo 3, en condición de suelo blando, se presentan en las figuras 48, 49 y 50 respectivamente y en condición de suelo duro en las figuras 51, 52 y 53 respectivamente.

- **Error vs número de apoyos**

Aunque para las tuberías con tramos diferentes sólo se consideraron modelos con 3 y 14 apoyos, el error entre los resultados del modelo y los numéricos, no es atribuible a ésta variable, ya que tanto para las tuberías con 3 y 14 apoyos las diferencias entre los resultados del modelo y los numéricos son similares. Es decir, a pesar de que se varía el número de apoyos, los niveles de error se mantienen.

El hecho de que las deformaciones en un tramo de tubería dependan sólo de la longitud de éste, permite descartar que el número de apoyos ocasione errores apreciables entre los resultados que arroja el modelo y los resultados numéricos.

- **Error vs correlación**

Las mayores diferencias entre los resultados del modelo y los resultados numéricos se presentan para valores de correlación cercanos a 1.0. Esto se explica teniendo en cuenta que a medida que la correlación se acerca a 1.0, la componente inercial va ganando participación en la respuesta total gracias a que la cuasiestática va reduciéndose. En esta situación donde la única componente presente en la deformación es la inercial, el error se hace mayor, ya que para dicha componente las hipótesis del modelo tienen mayor efecto.

En las figuras 54, 55 y 56 se muestra la variación del error relativo con la correlación para todos los casos de las tuberías tipo 1, tipo 2 y tipo 3 en suelo blando. Las figuras 57, 58 y 59 muestran la variación del error relativo con la correlación para todos los casos de las tuberías tipo 1, tipo 2 y tipo 3 en suelo duro.

Capítulo 6 – Resultados y conclusiones

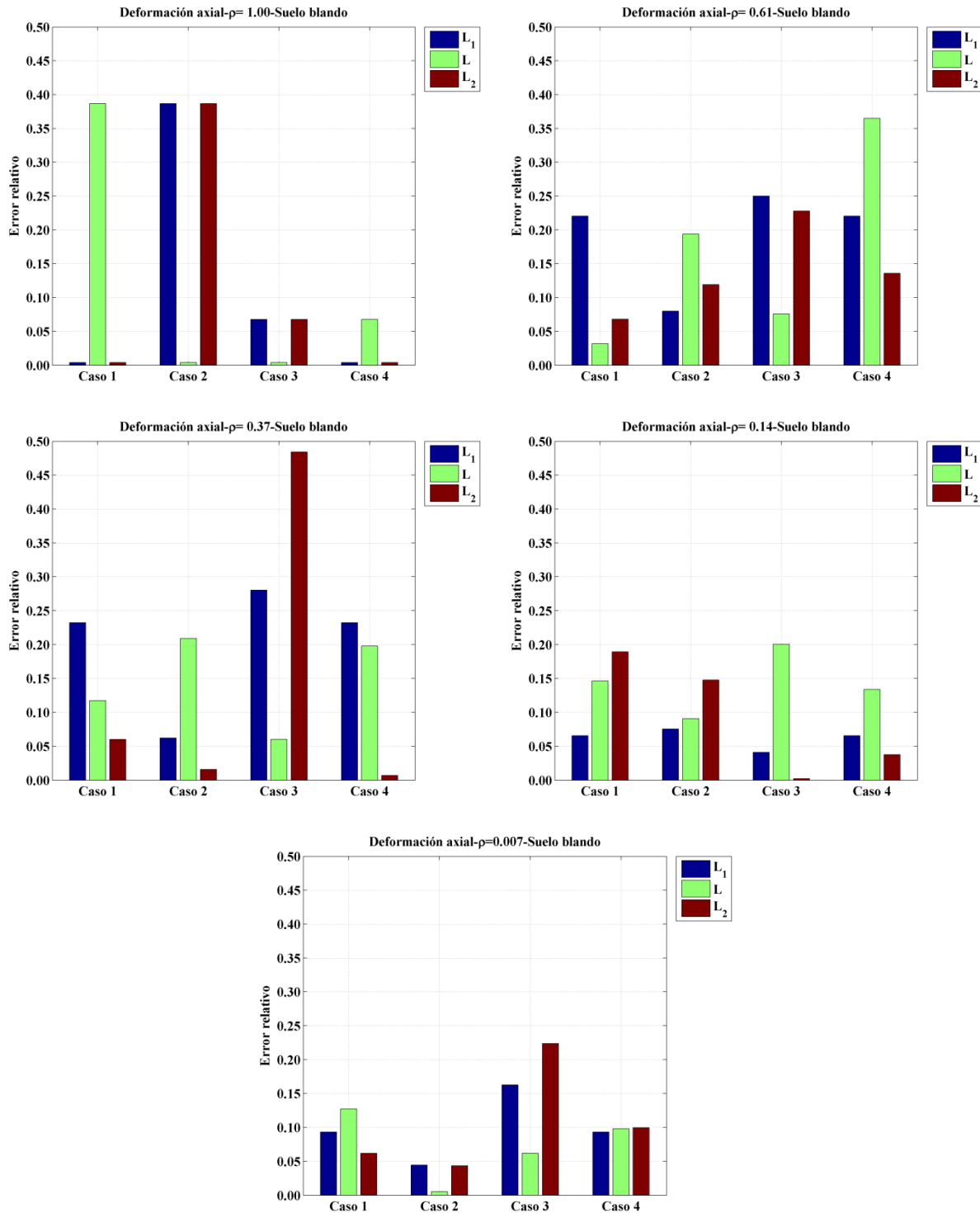


Figura 36 – Error relativo para deformación axial en tuberías tipo 1 – Suelo blando

Capítulo 6 – Resultados y conclusiones

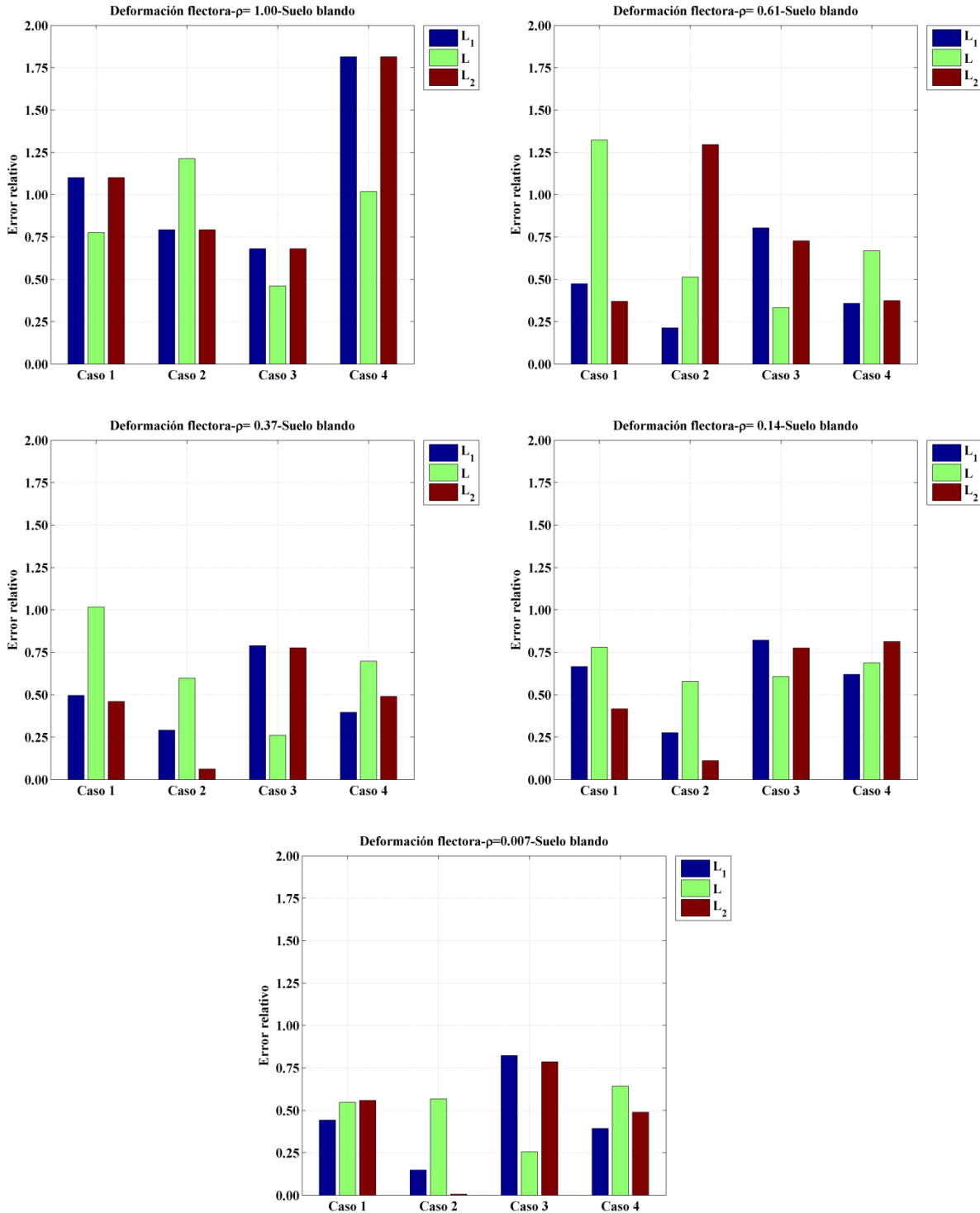


Figura 37 – Error relativo para deformación flectora en tuberías tipo 1 – Suelo blando

Capítulo 6 – Resultados y conclusiones

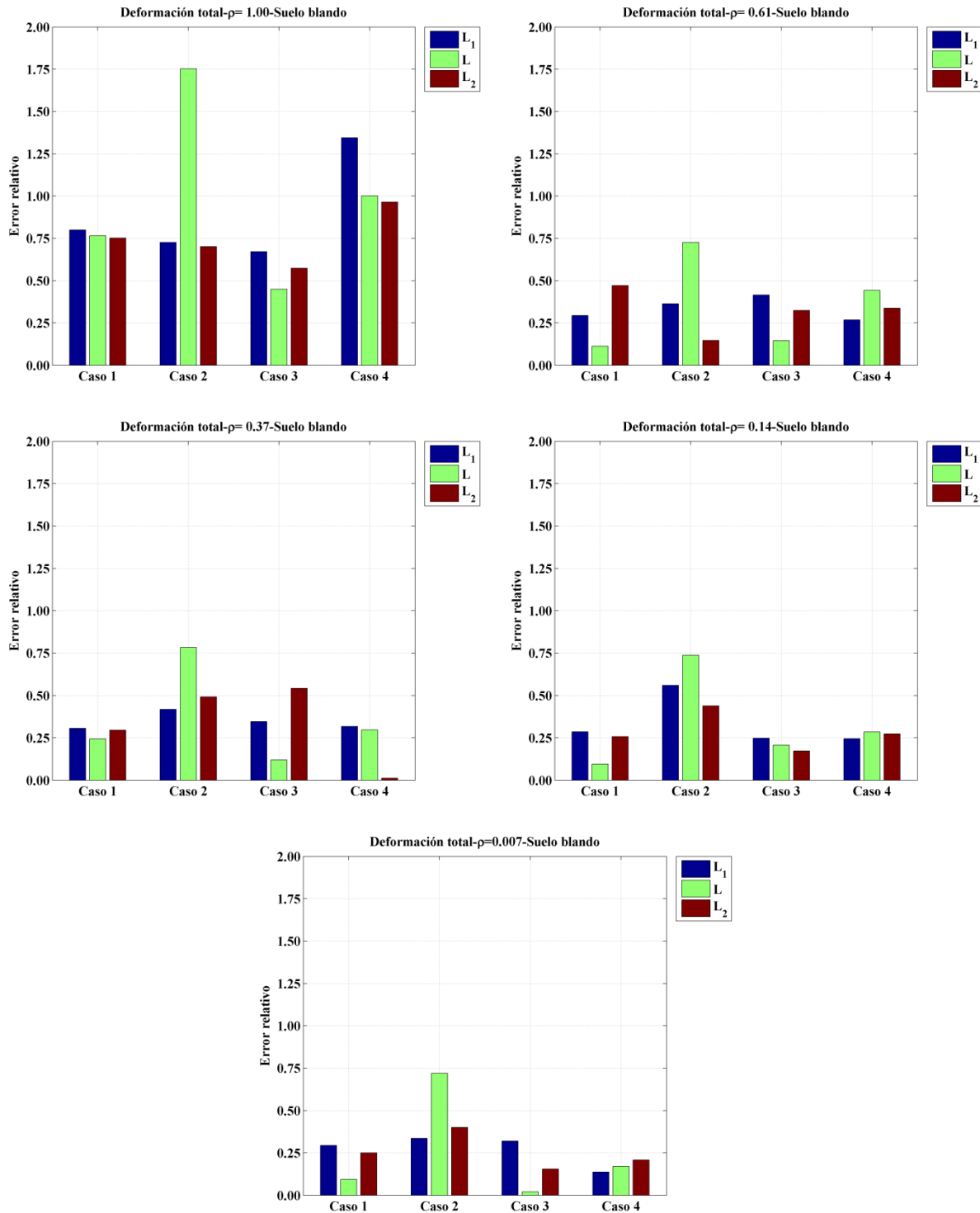


Figura 38 – Error relativo para deformación total en tuberías tipo 1 – Suelo blando

Capítulo 6 – Resultados y conclusiones

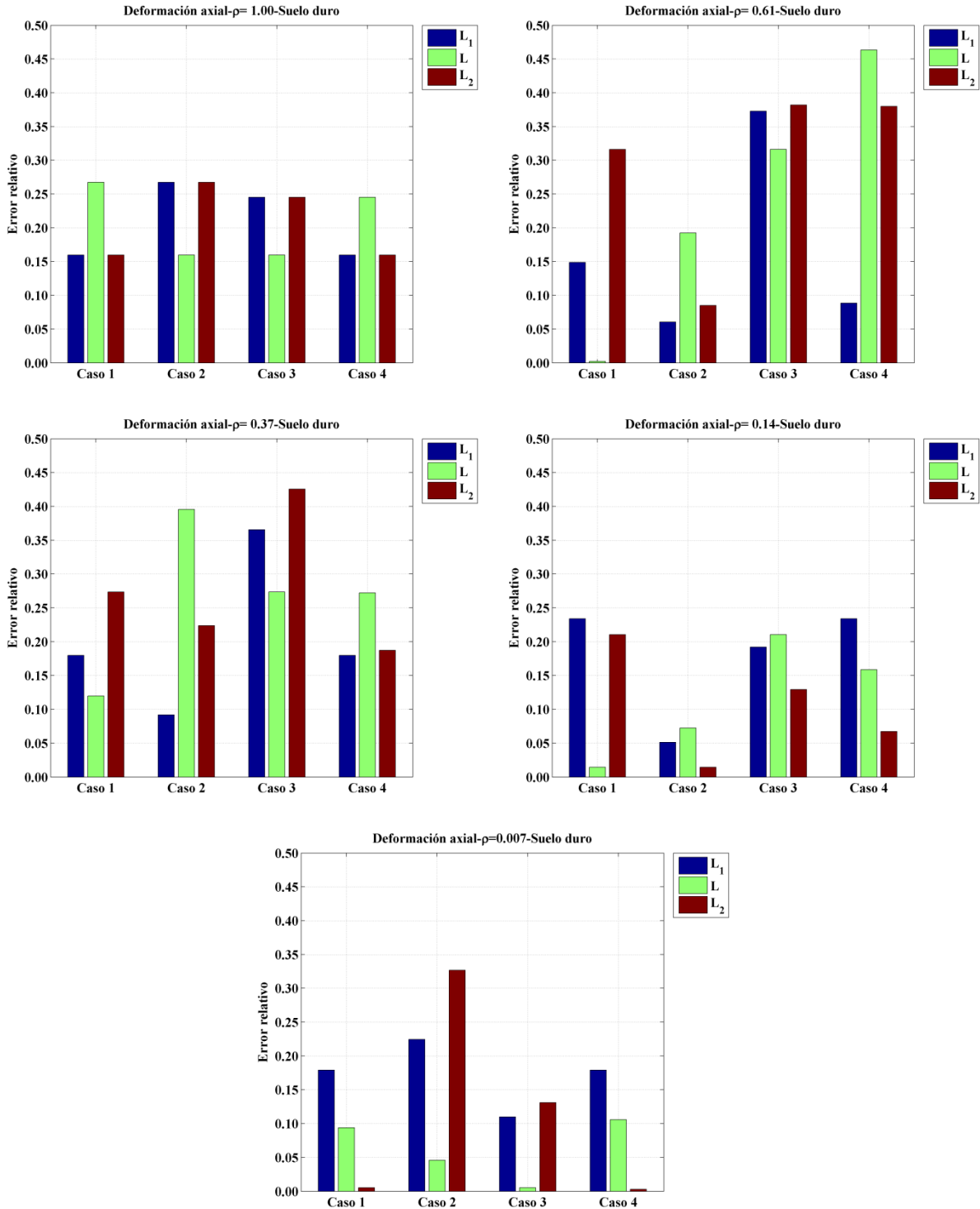


Figura 39 – Error relativo para deformación axial en tuberías tipo 1 – Suelo duro

Capítulo 6 – Resultados y conclusiones

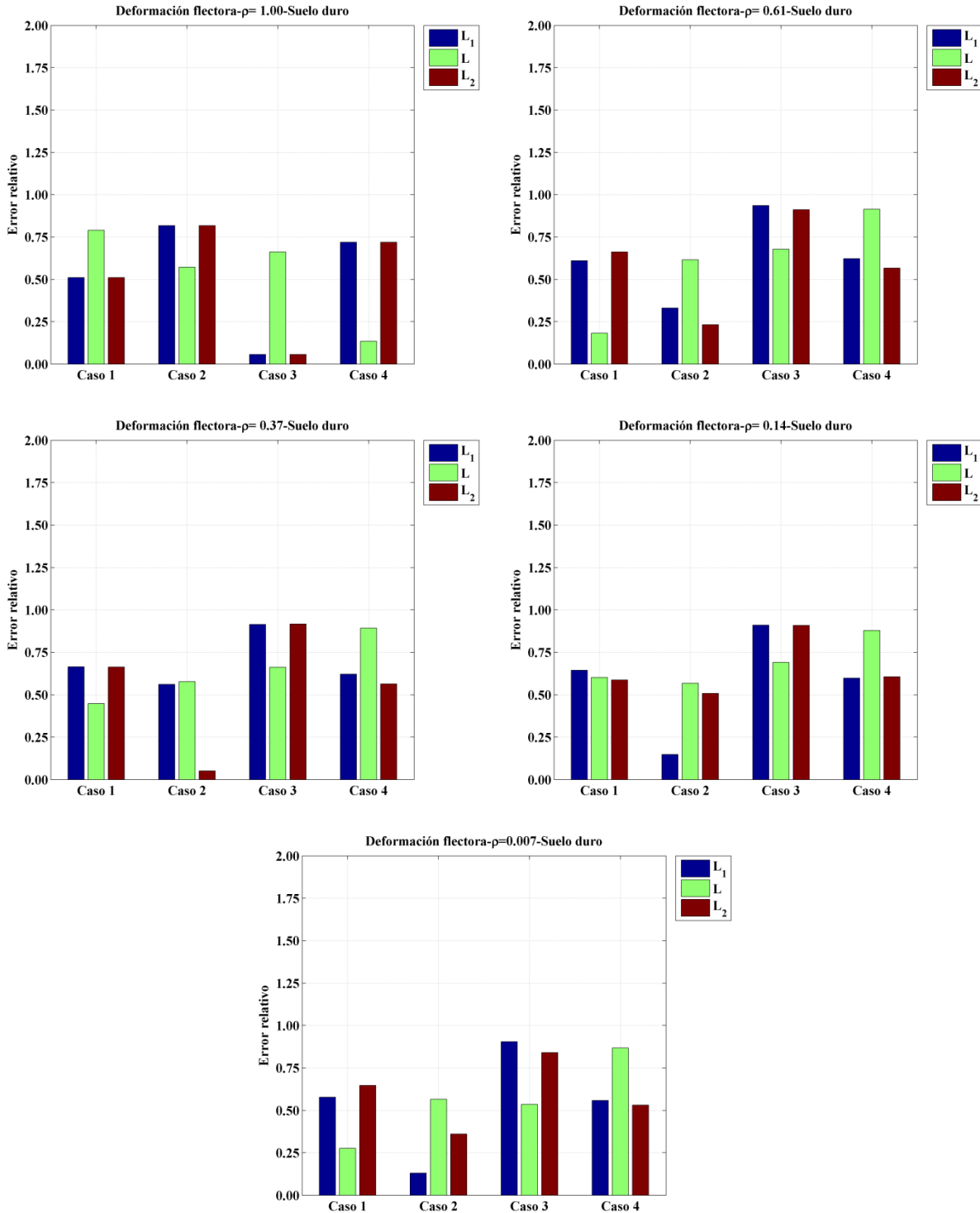


Figura 40 – Error relativo para deformación flectora en tuberías tipo 1 – Suelo duro

Capítulo 6 – Resultados y conclusiones

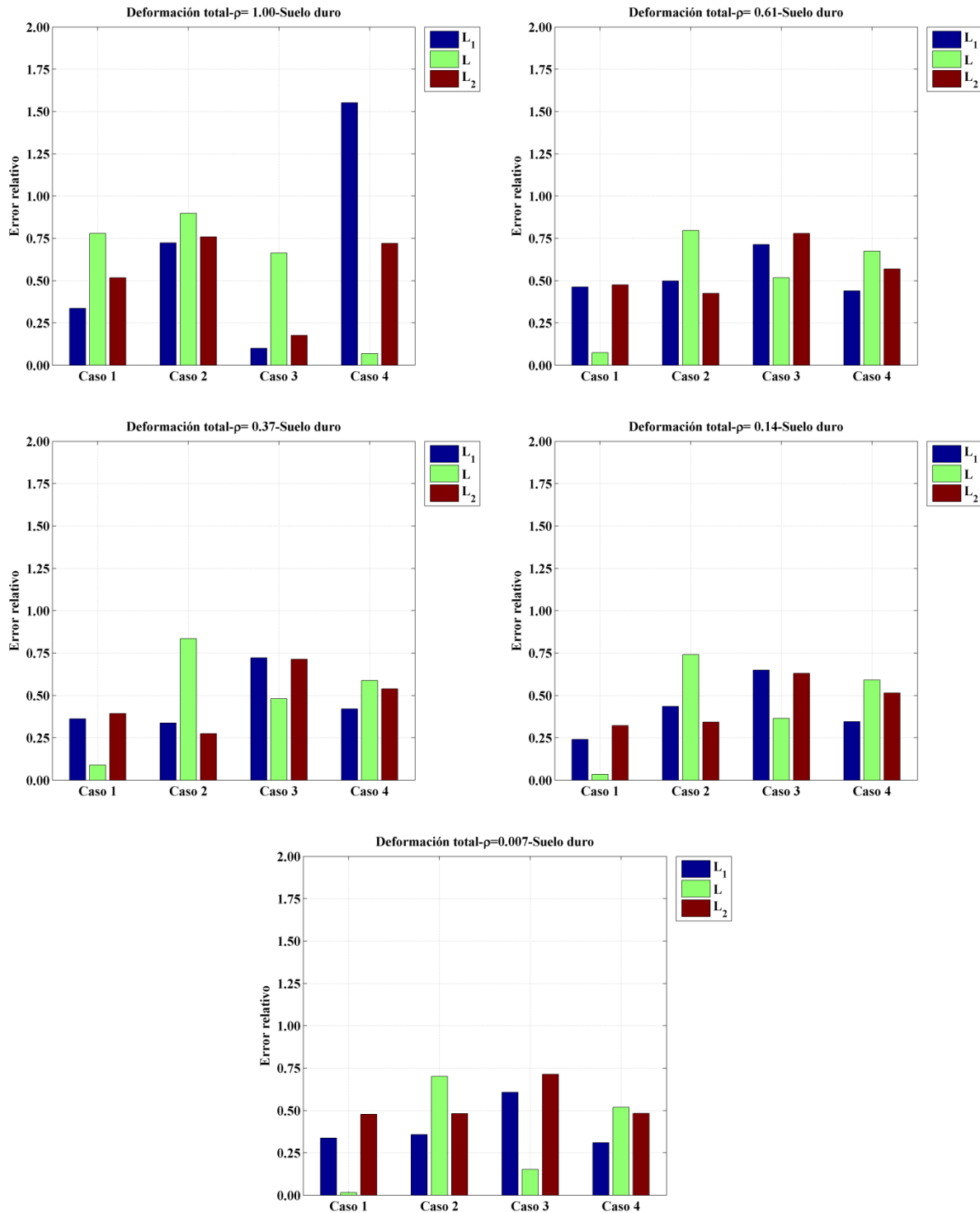


Figura 41 – Error relativo para deformación total en tuberías tipo 1 – Suelo duro

Capítulo 6 – Resultados y conclusiones

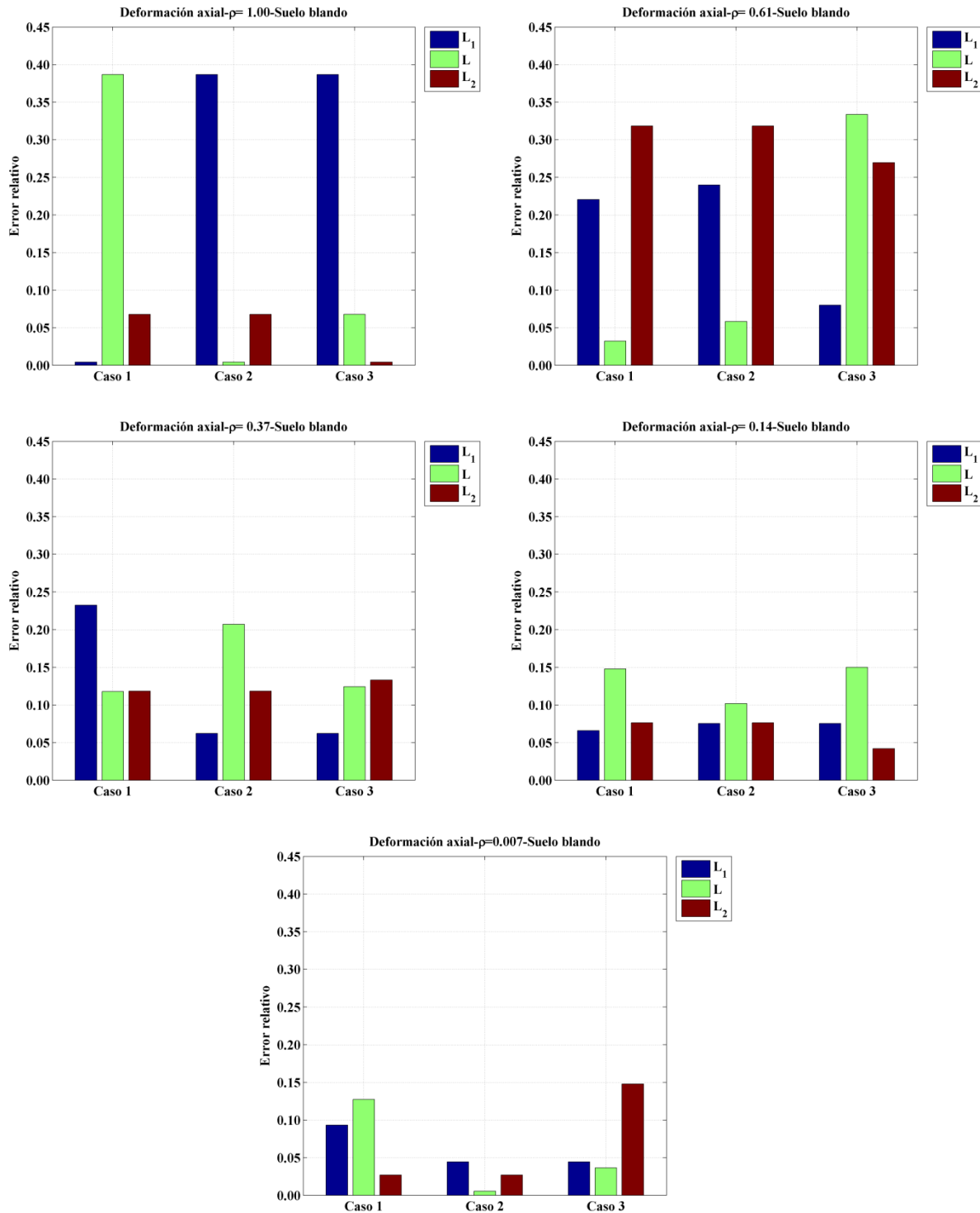


Figura 42 – Error relativo para deformación axial en tuberías tipo 2 – Suelo blando

Capítulo 6 – Resultados y conclusiones

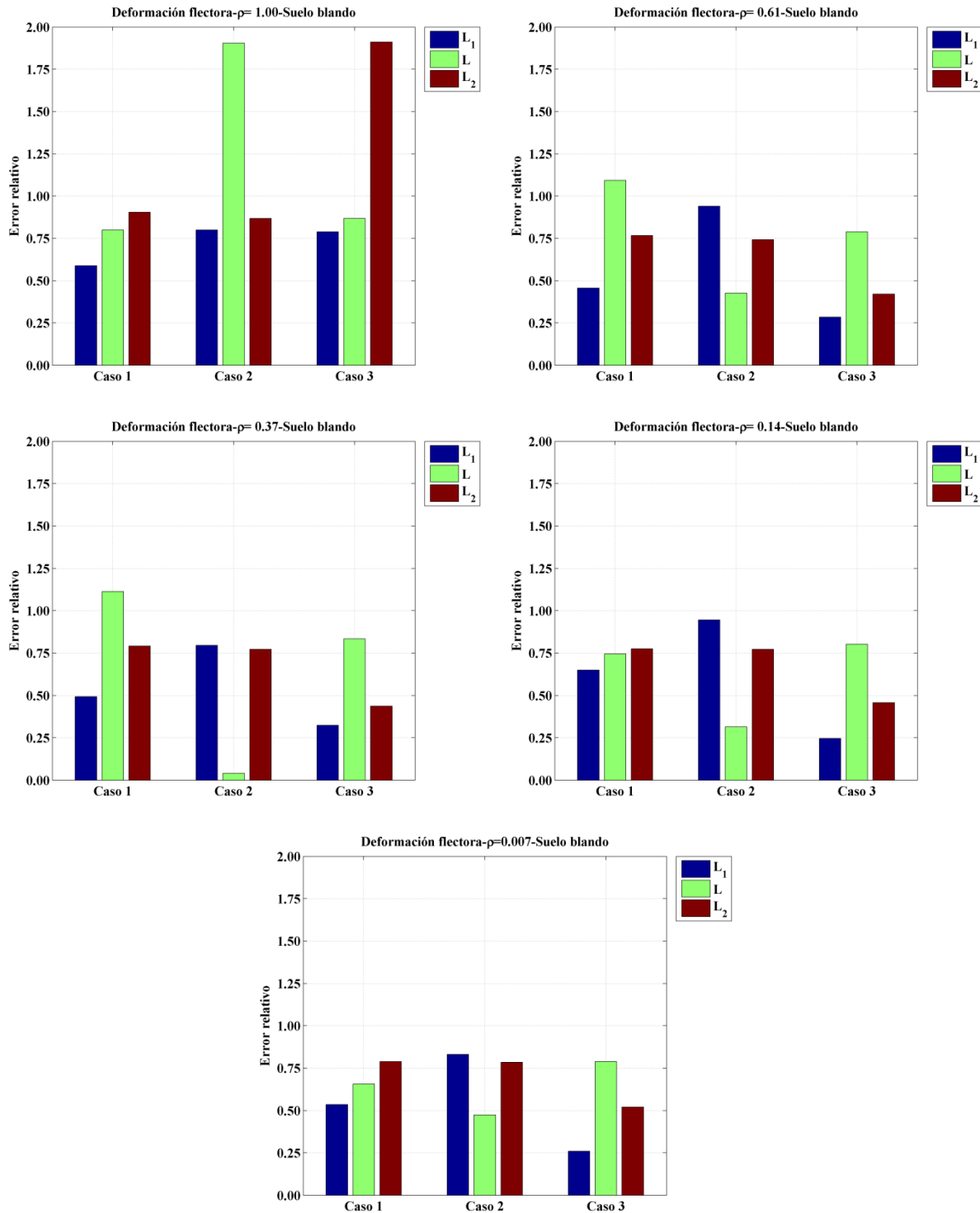


Figura 43 – Error relativo para deformación flectora en tuberías tipo 2 – Suelo blando

Capítulo 6 – Resultados y conclusiones

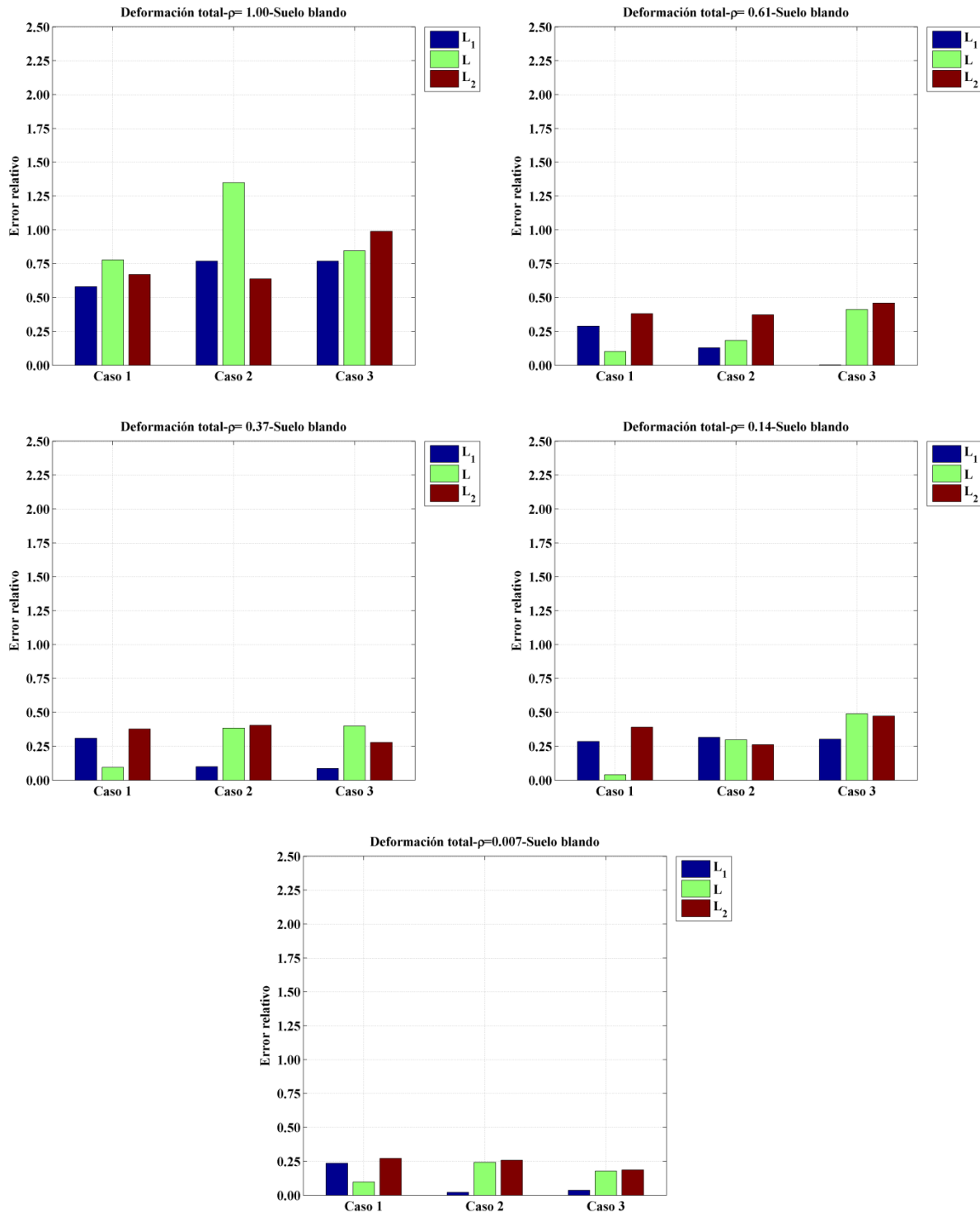


Figura 44 – Error relativo para deformación total en tuberías tipo 2 – Suelo blando

Capítulo 6 – Resultados y conclusiones

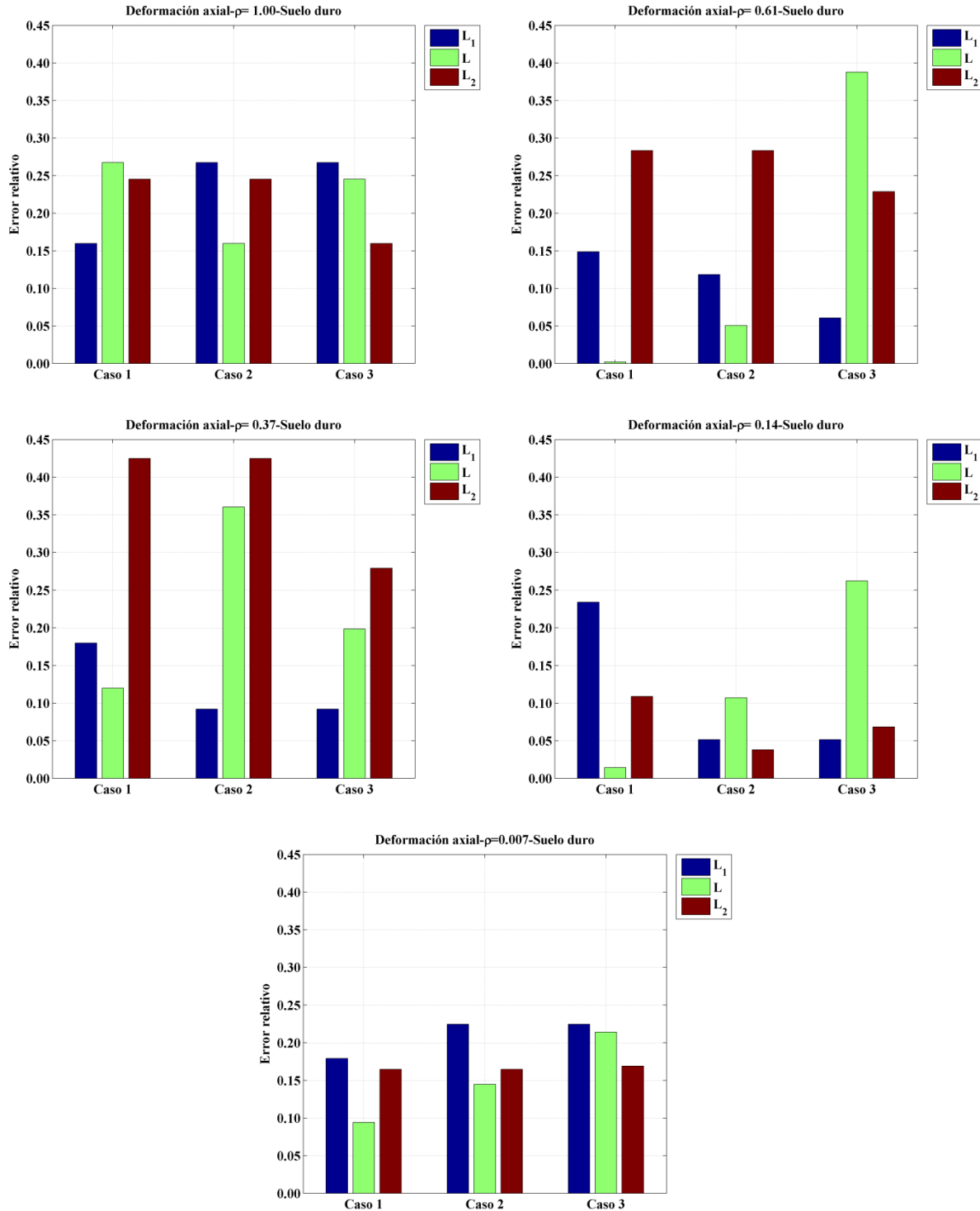


Figura 45 – Error relativo para deformación axial en tuberías tipo 2 – Suelo duro

Capítulo 6 – Resultados y conclusiones

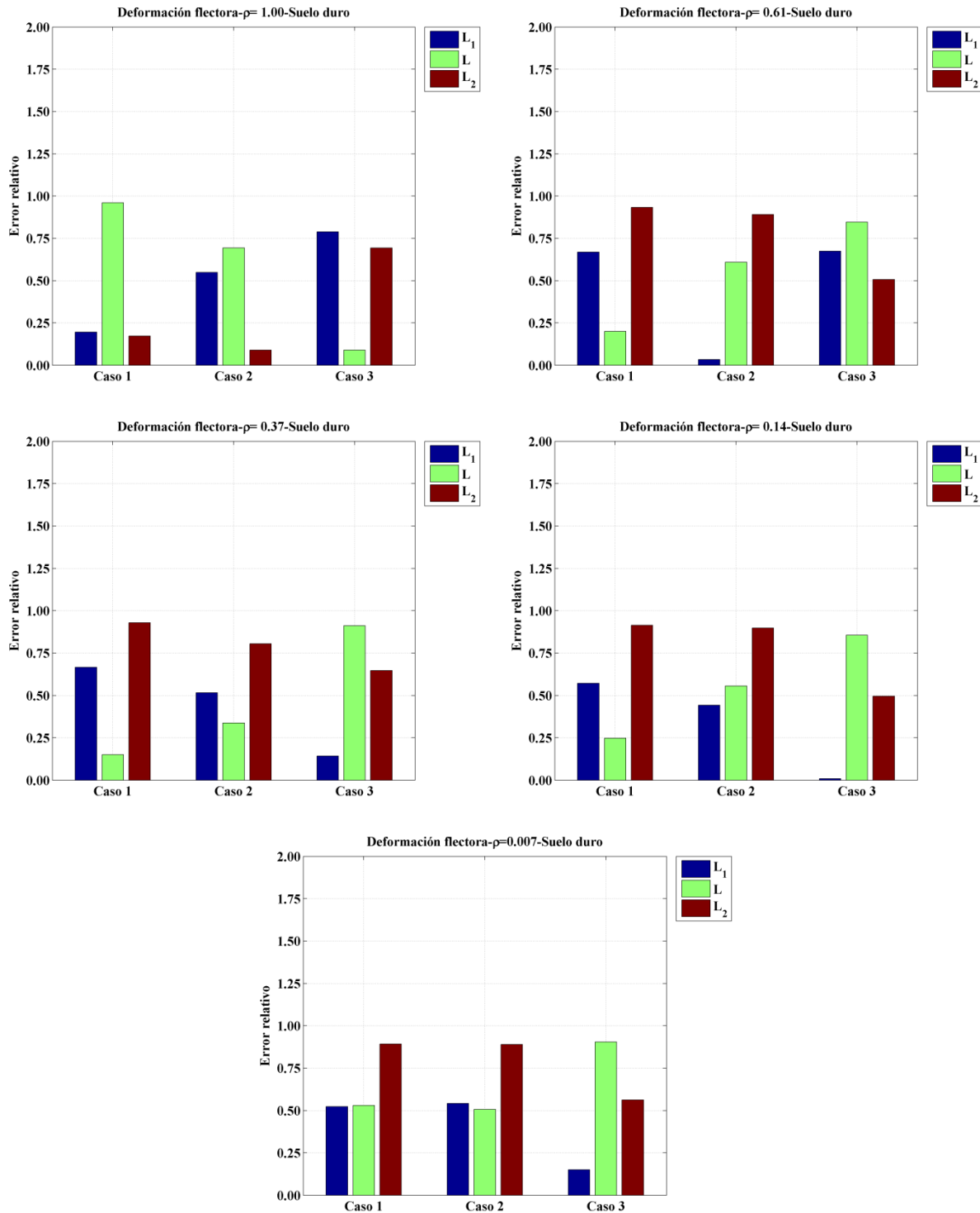


Figura 46 – Error relativo para deformación flectora en tuberías tipo 2 – Suelo duro

Capítulo 6 – Resultados y conclusiones

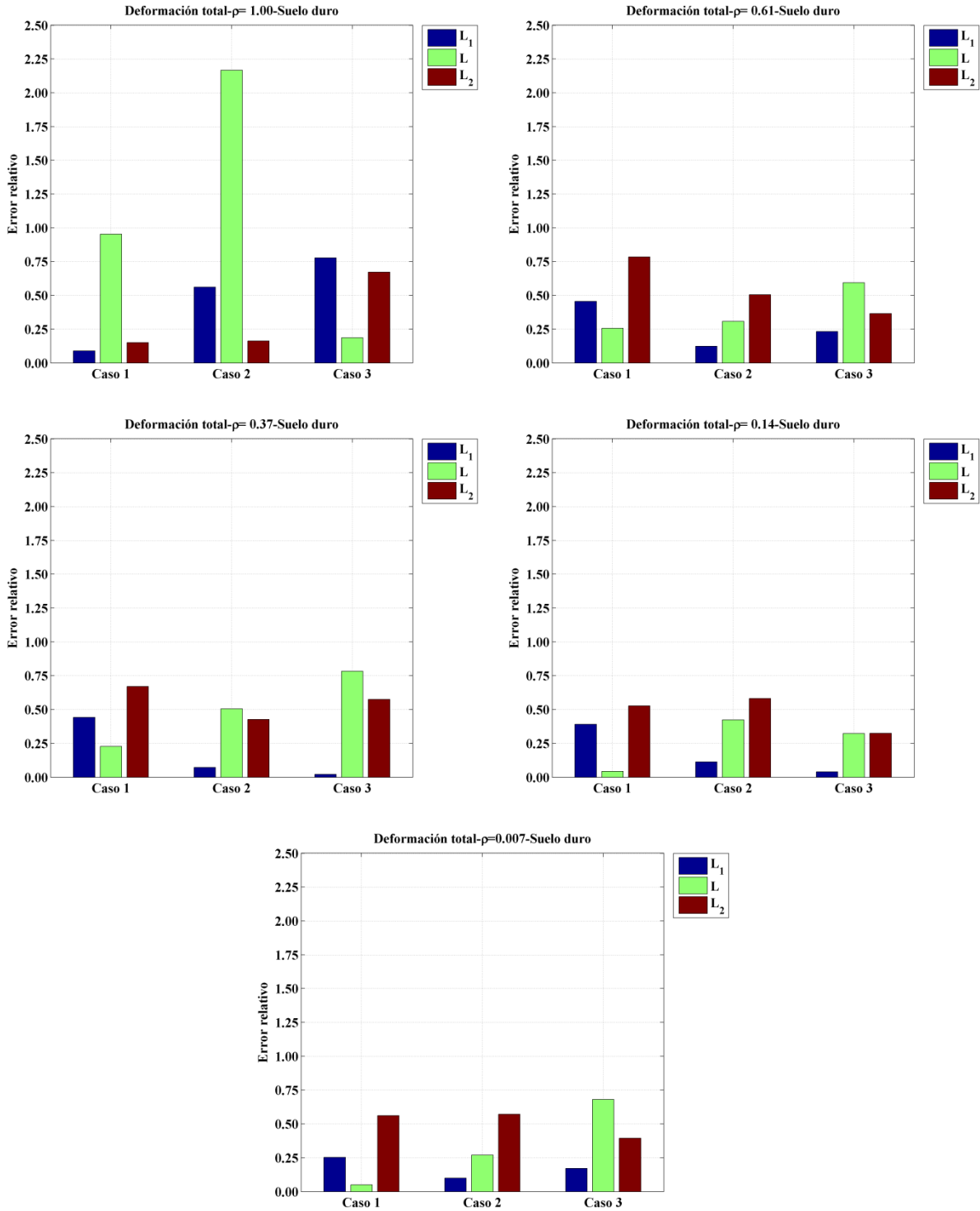


Figura 47 – Error relativo para deformación total en tuberías tipo 2 – Suelo duro

Capítulo 6 – Resultados y conclusiones

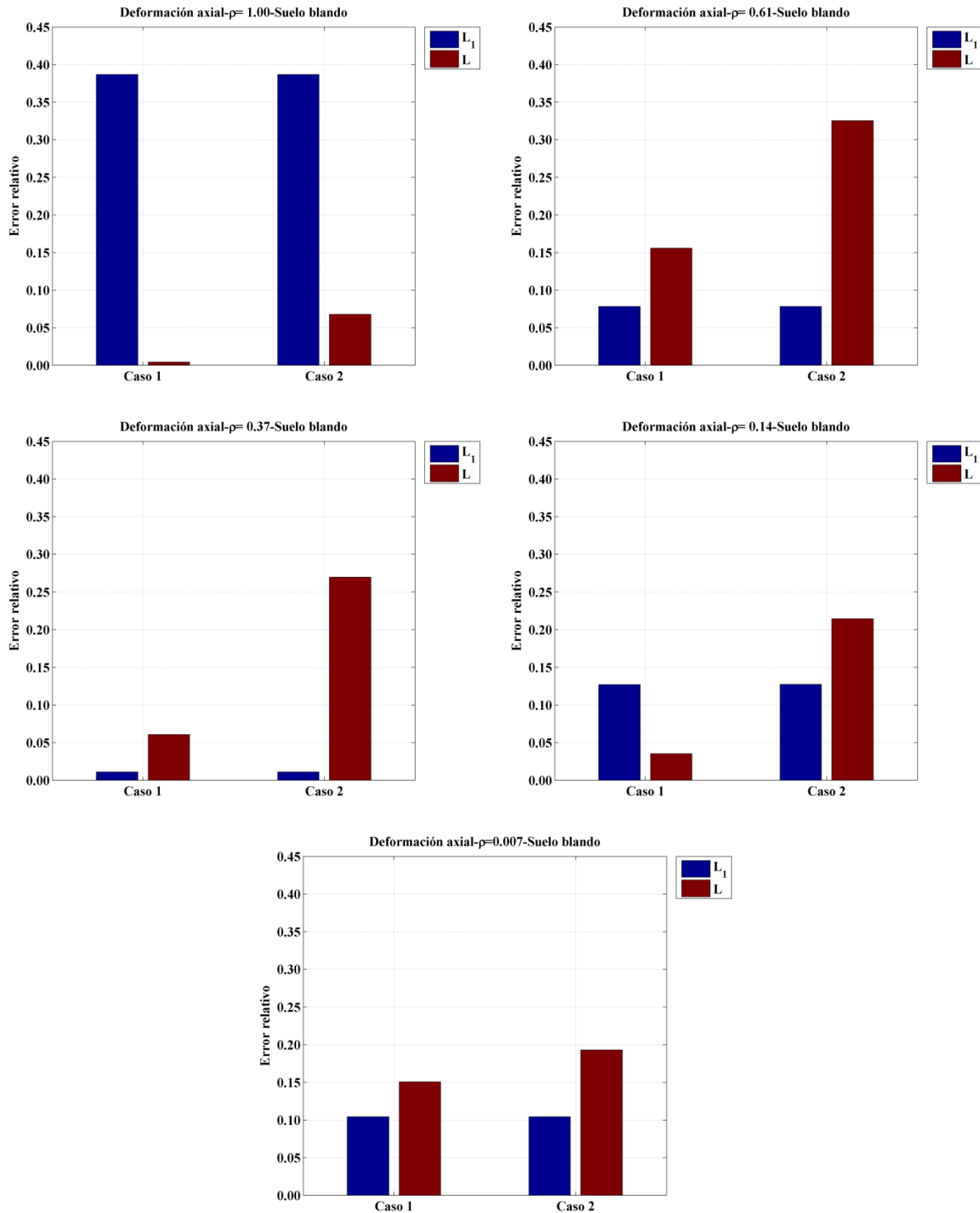


Figura 48 – Error relativo para deformación axial en tuberías tipo 3 – Suelo blando

Capítulo 6 – Resultados y conclusiones

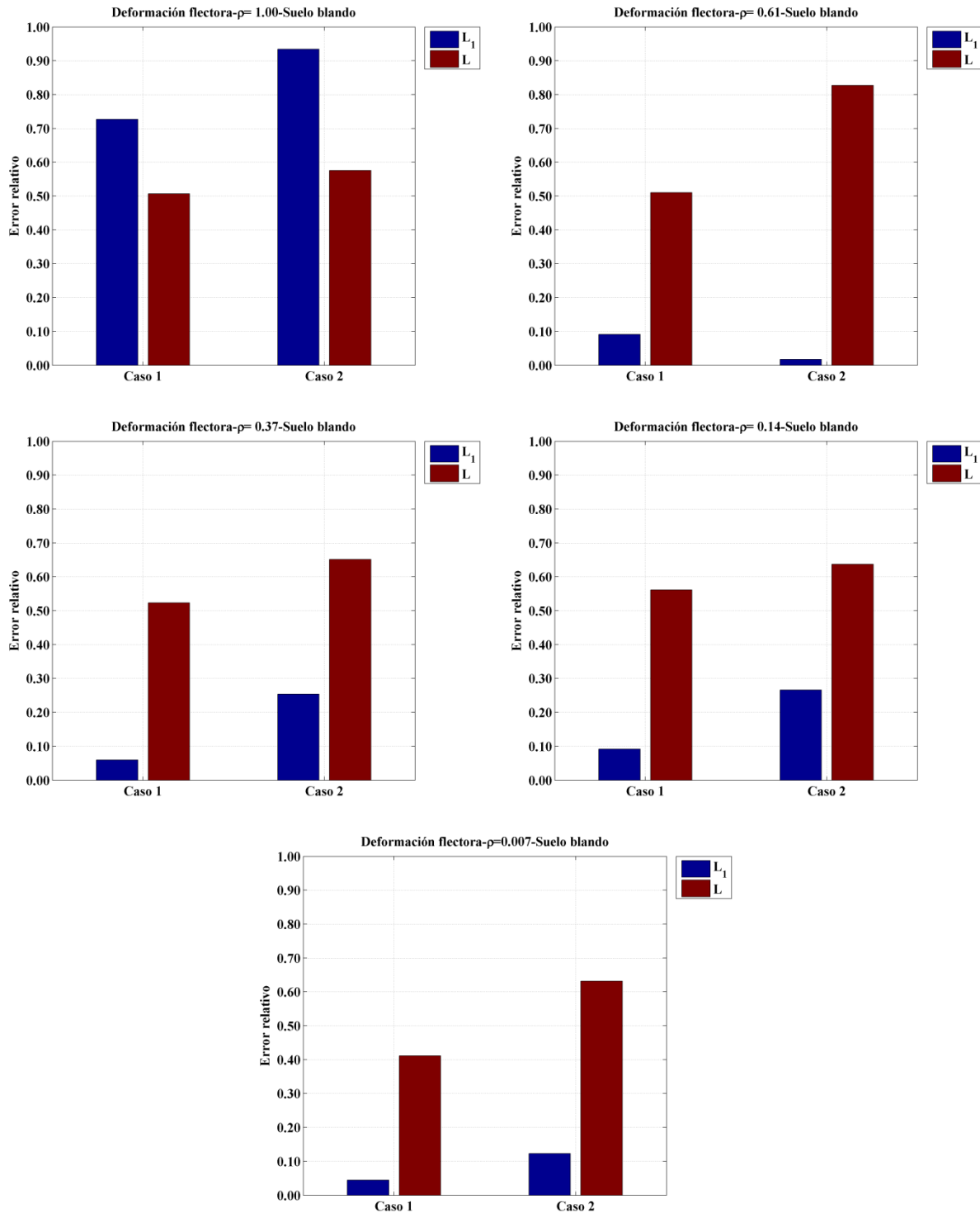


Figura 49 – Error relativo para deformación flectora en tuberías tipo 3 – Suelo blando

Capítulo 6 – Resultados y conclusiones

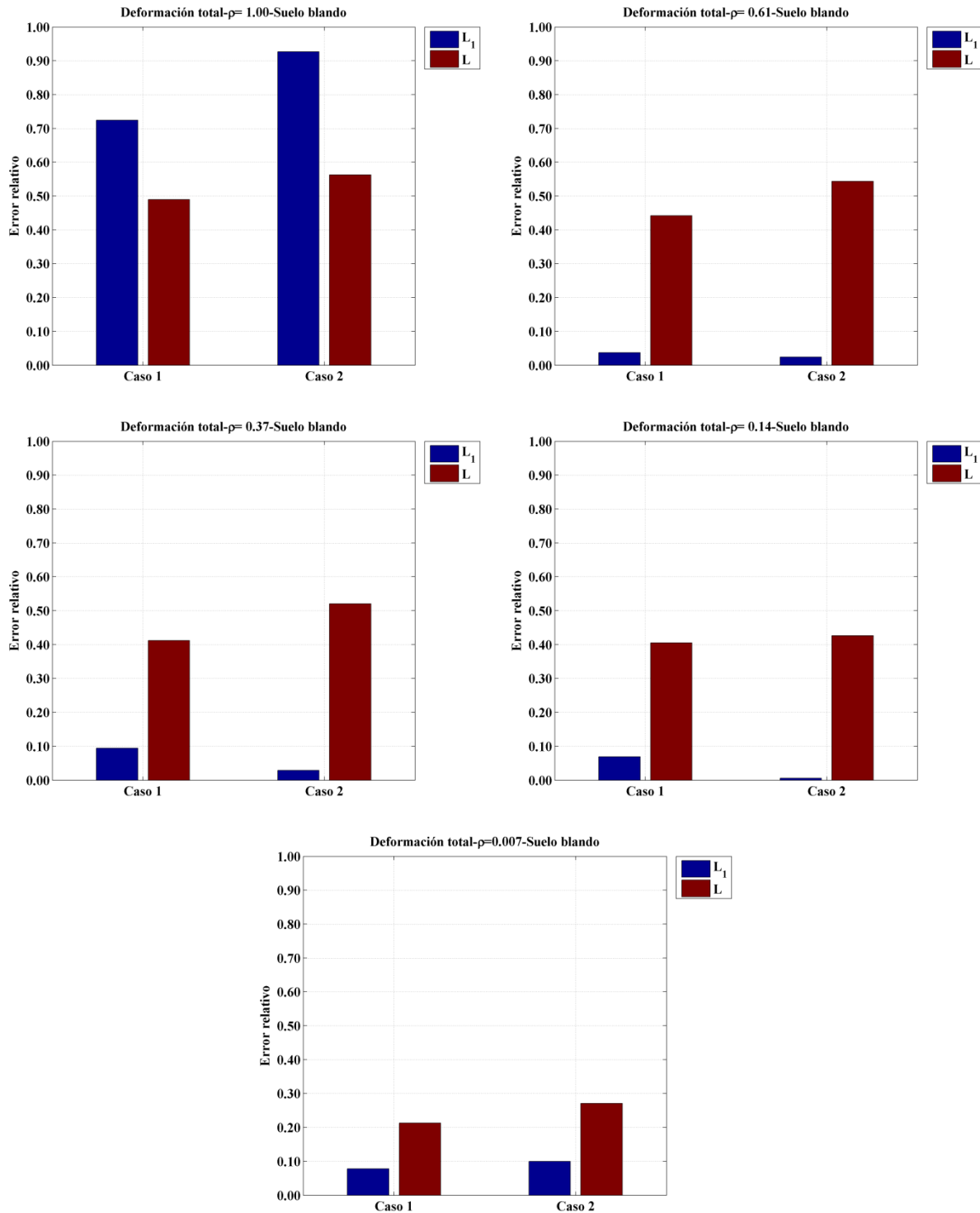


Figura 50 – Error relativo para deformación total en tuberías tipo 3 – Suelo blando

Capítulo 6 – Resultados y conclusiones

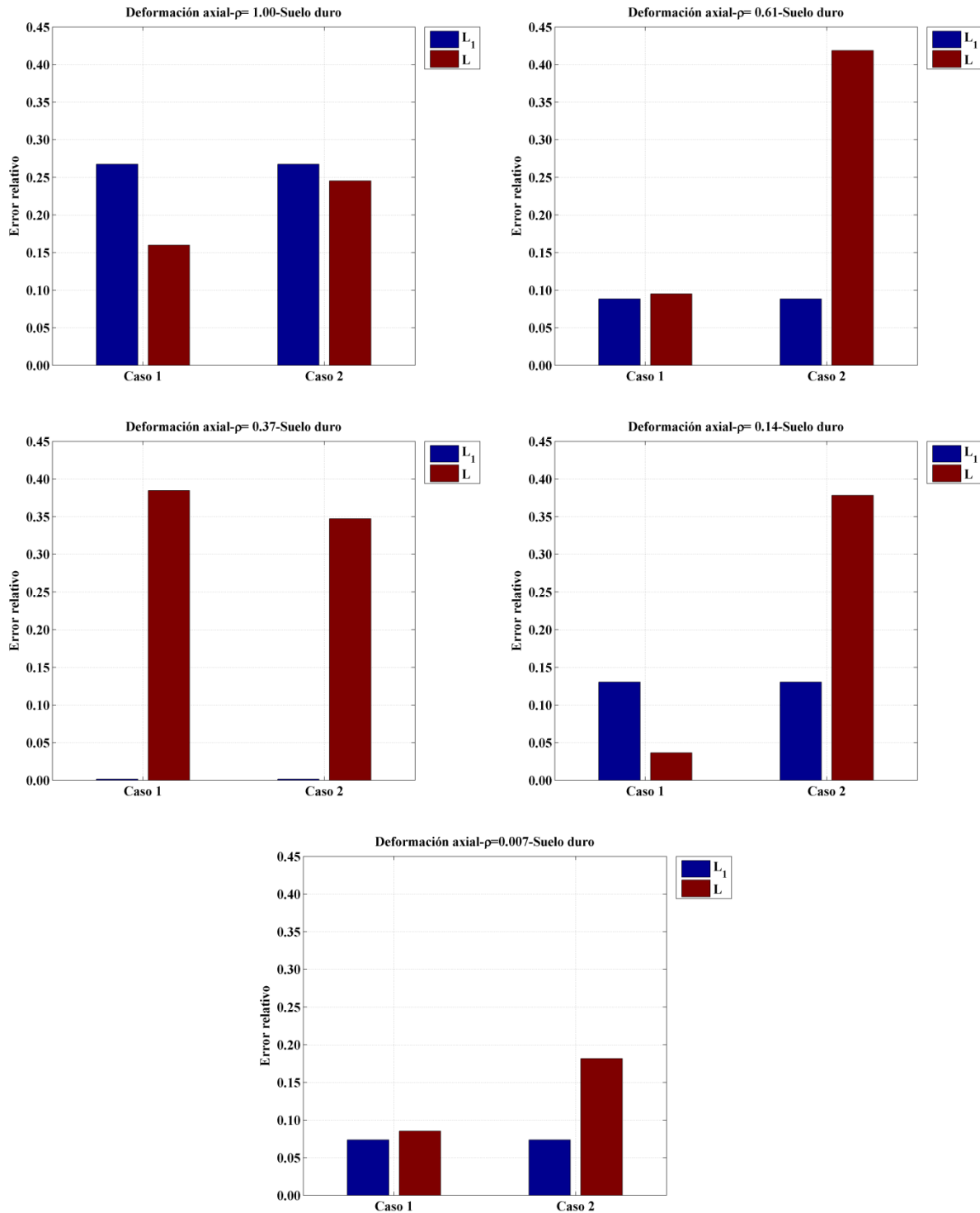


Figura 51 – Error relativo para deformación axial en tuberías tipo 3 – Suelo duro

Capítulo 6 – Resultados y conclusiones

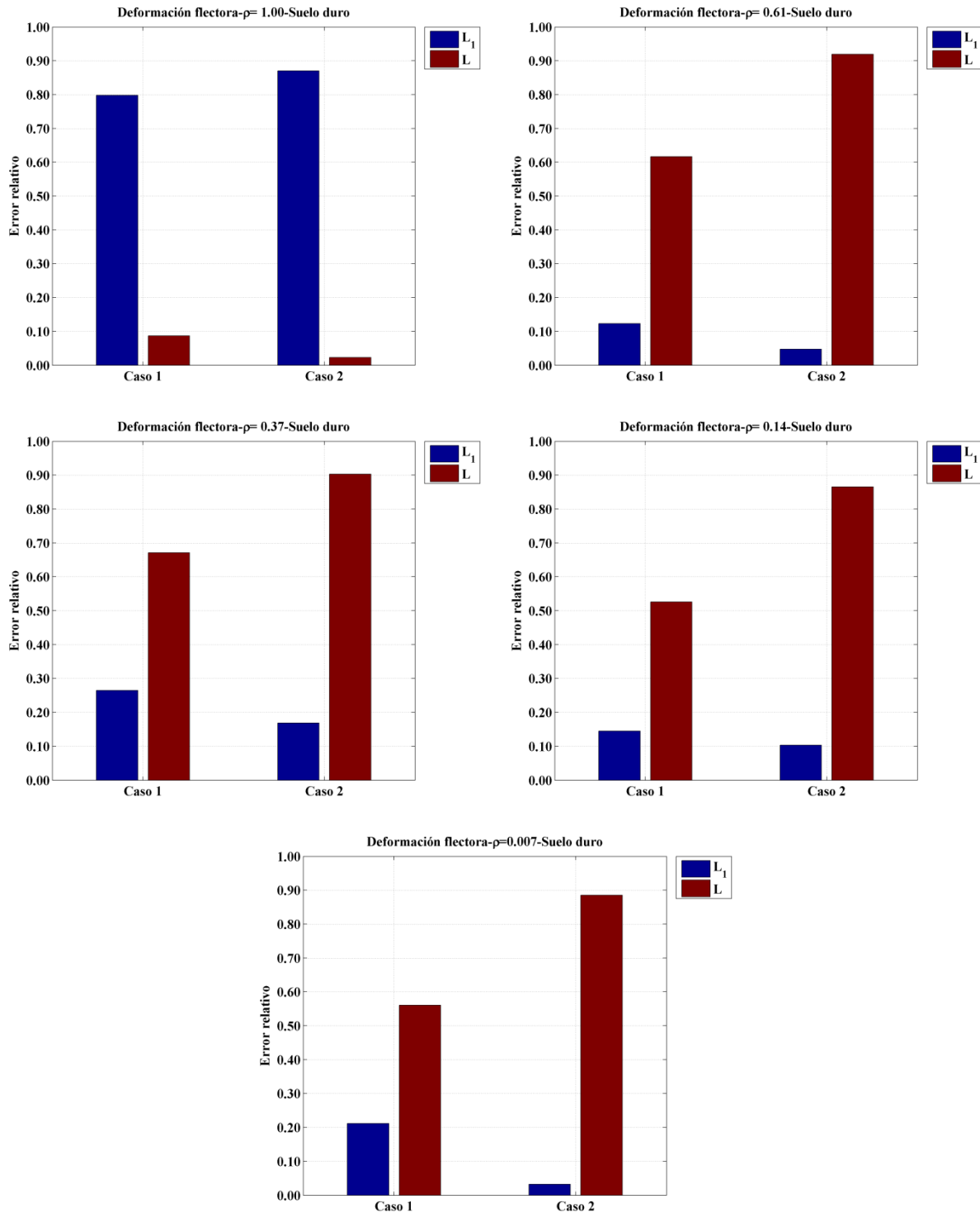


Figura 52 – Error relativo para deformación flectora en tuberías tipo 3 – Suelo duro

Capítulo 6 – Resultados y conclusiones

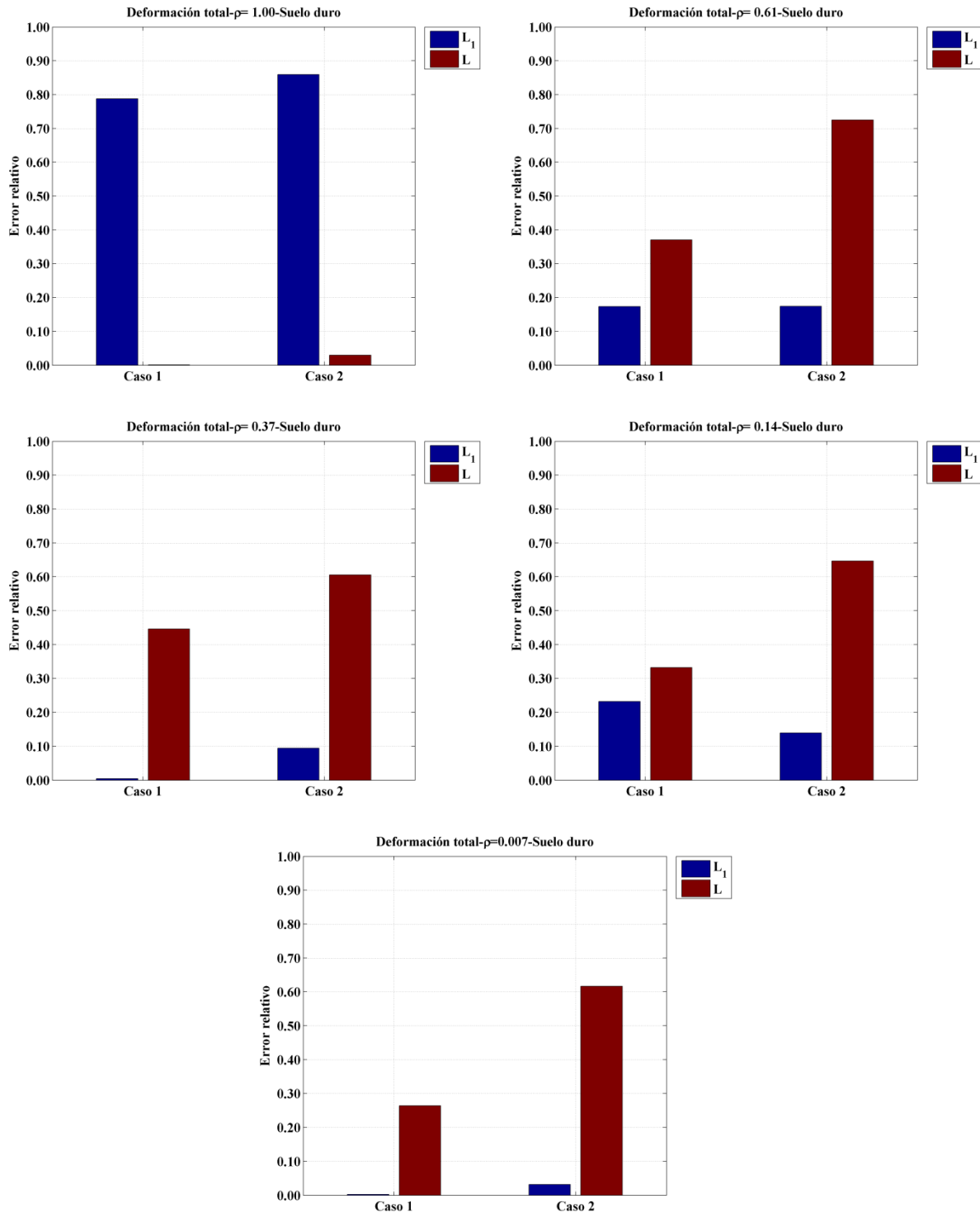


Figura 53 – Error relativo para deformación total en tuberías tipo 3 – Suelo duro

Capítulo 6 – Resultados y conclusiones

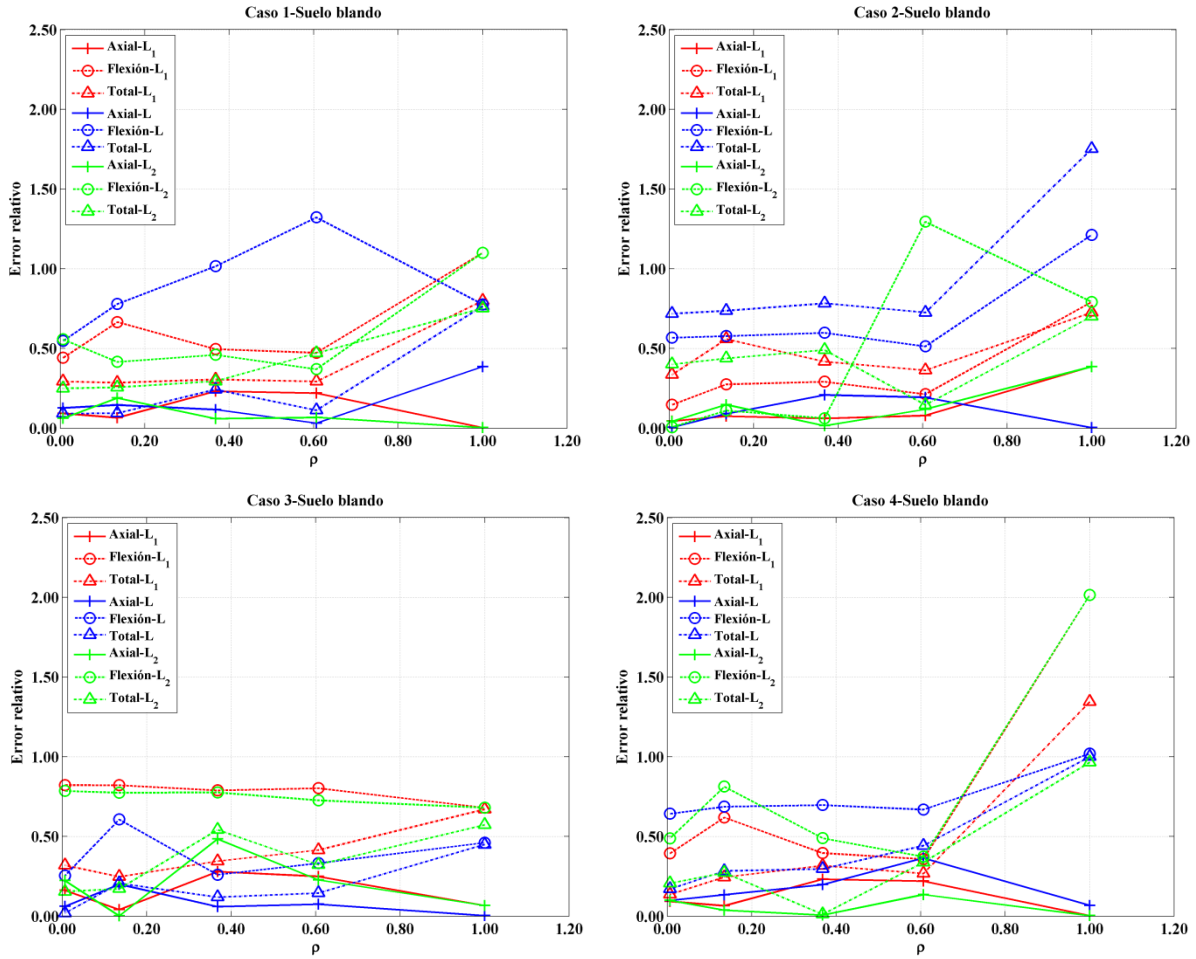


Figura 54 – Variación del error relativo con la correlación en tuberías tipo 1 – Suelo blando

Capítulo 6 – Resultados y conclusiones

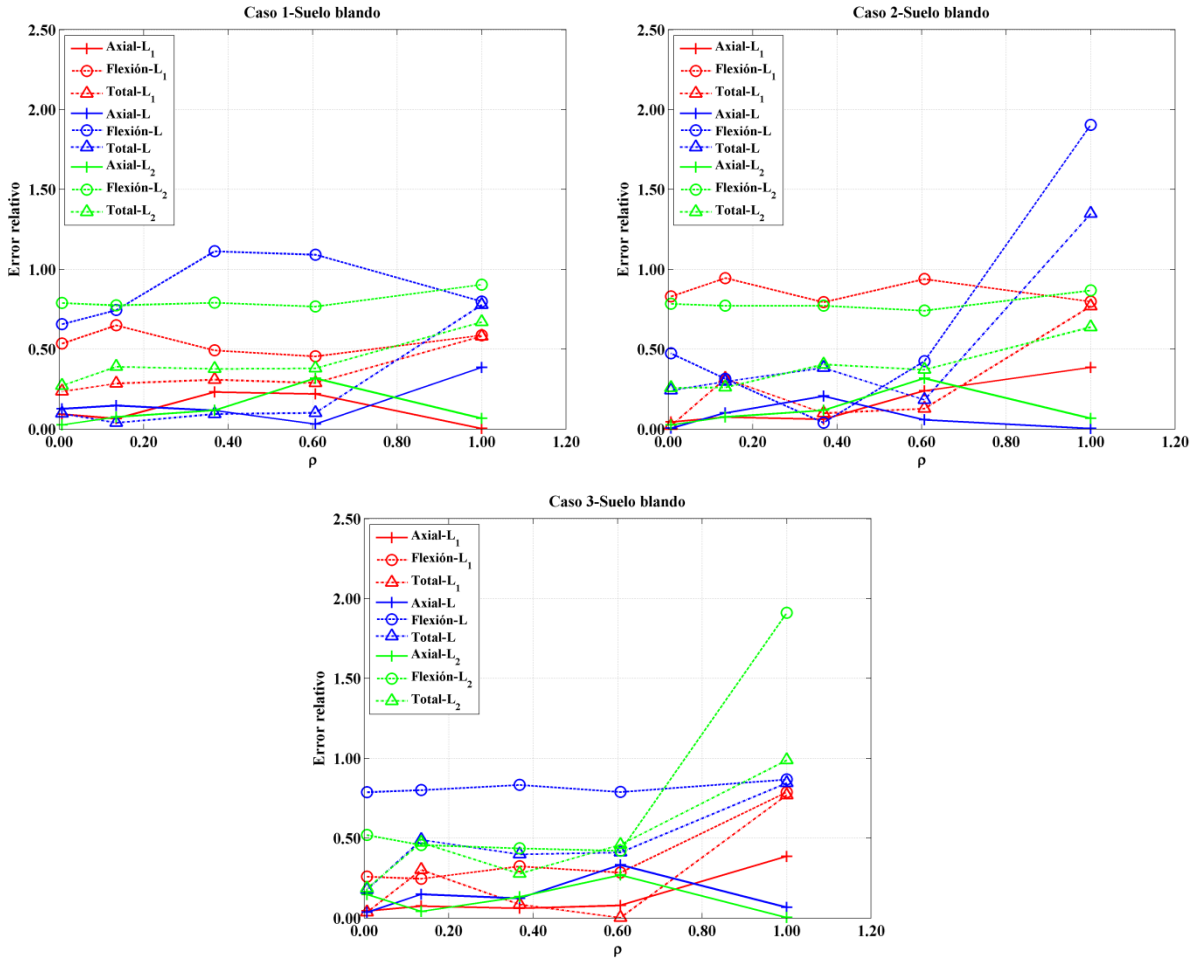


Figura 55 – Variación del error relativo con la correlación en tuberías tipo 2 – Suelo blando

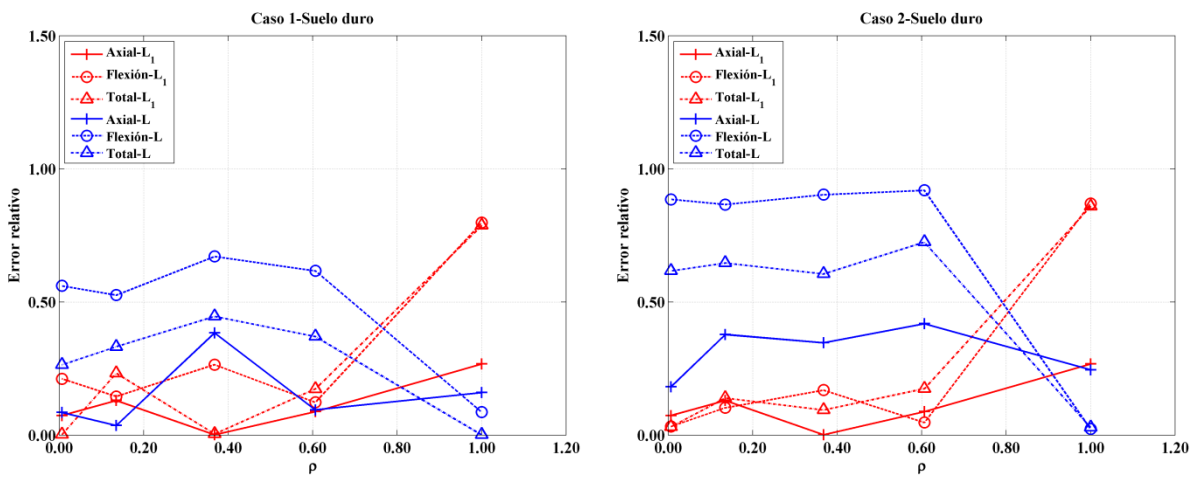


Figura 56 – Variación del error relativo con la correlación en tuberías tipo 3 – Suelo blando

Capítulo 6 – Resultados y conclusiones

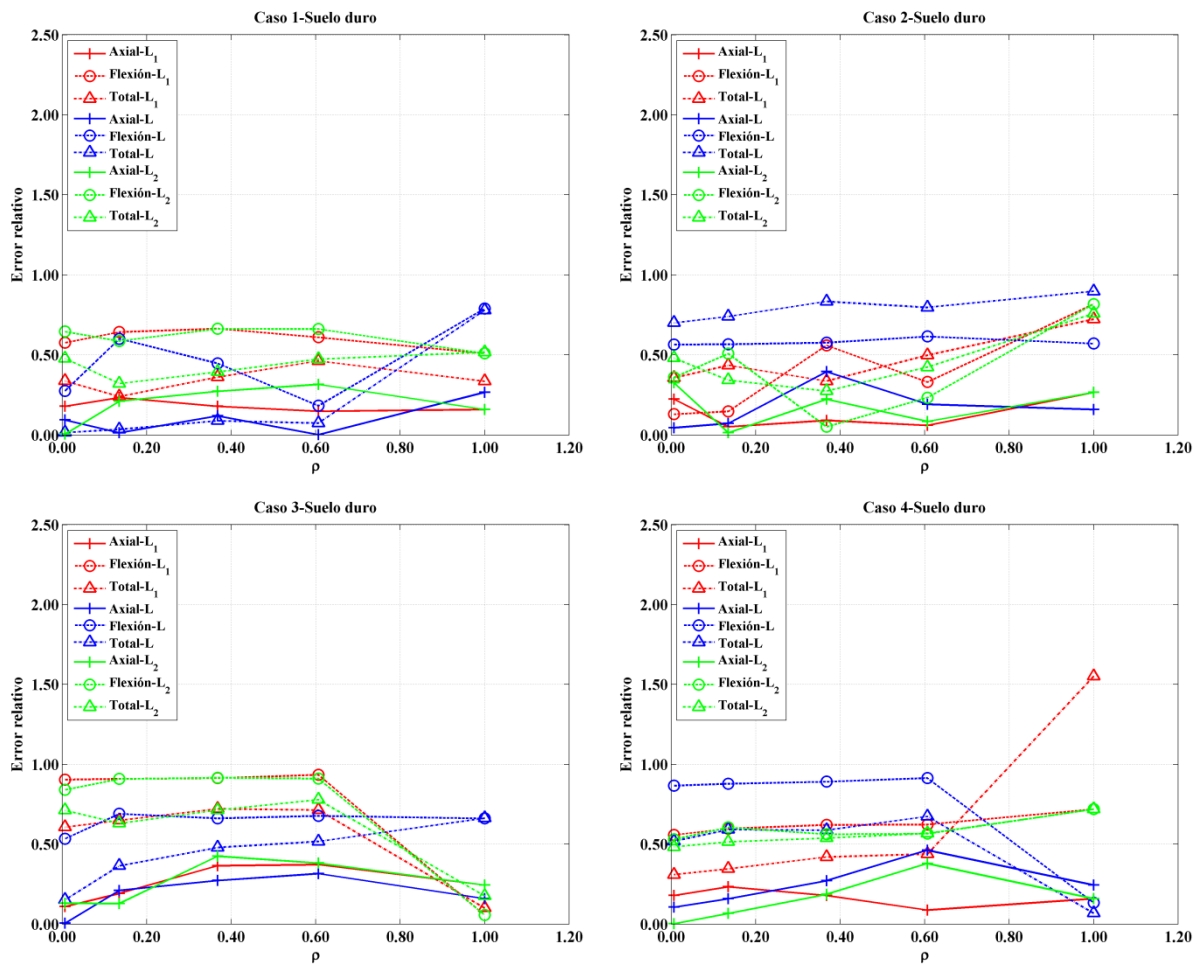


Figura 57 – Variación del error relativo con la correlación en tuberías tipo 1 – Suelo duro

Capítulo 6 – Resultados y conclusiones

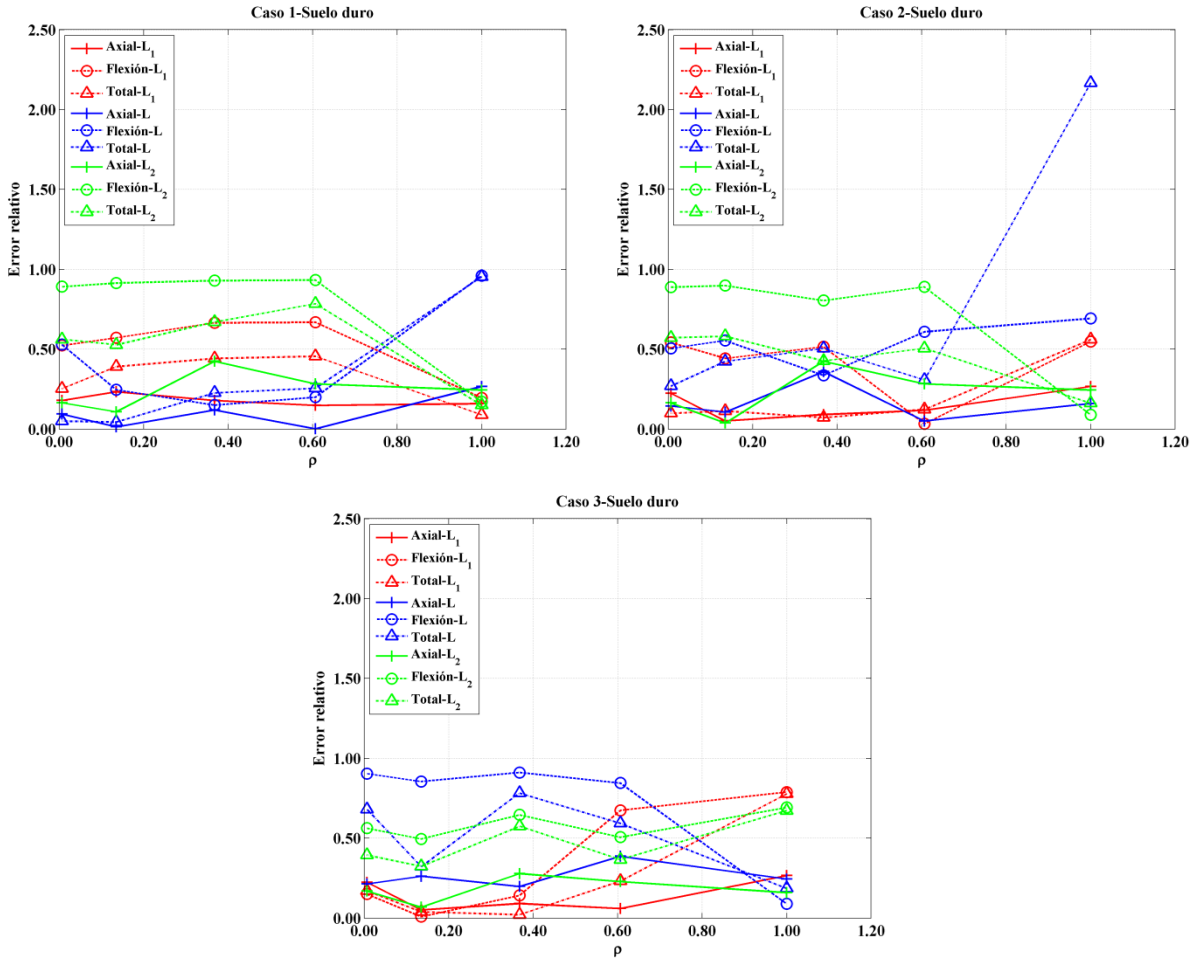


Figura 58 – Variación del error relativo con la correlación en tuberías tipo 2 – Suelo duro

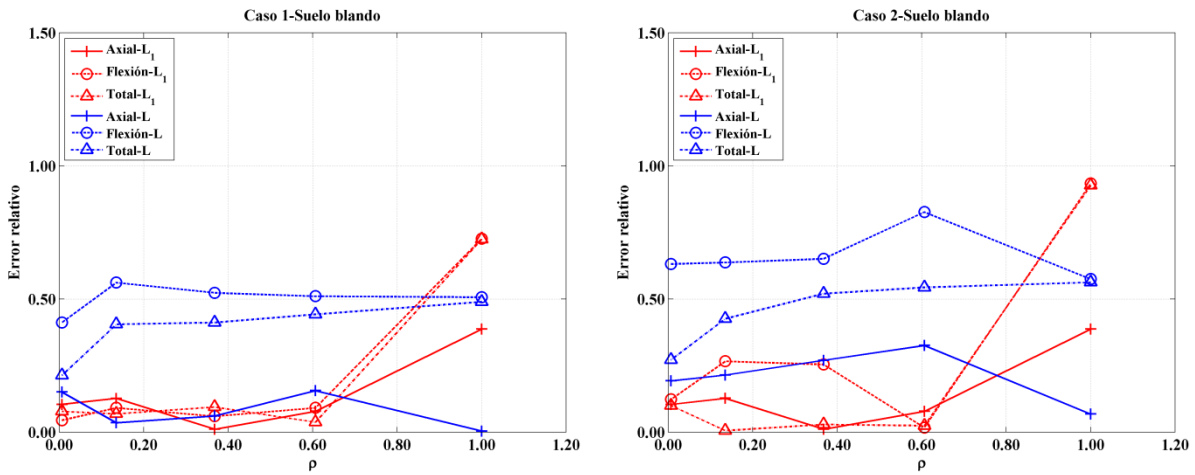


Figura 59 – Variación del error relativo con la correlación en tuberías tipo 3 – Suelo blando

Capítulo 6 –Resultados y conclusiones

6.4. Conclusiones

Se estudió la aplicabilidad de un modelo sencillo que permite estimar la esperanza de las deformaciones máximas que sufriría una tubería superficial sometida a los movimientos sísmicos en tres direcciones ortogonales.

Se definieron tuberías superficiales de sección tubular con tramos rectos de igual y diferente longitud, sometidas en sus apoyos a historias de tiempo con distintos valores de correlación entre ellas.

Para los diferentes tipos de tuberías se determinaron las deformaciones inducidas por sismo usando el método de análisis dinámico modal cronológico por medio del software SAP2000, para luego ser comparadas con las deformaciones calculadas por medio del modelo estudiado y poder determinar la aplicabilidad, y limitaciones del mismo.

Para las tuberías con tramos iguales se pudo verificar, de acuerdo a lo que se predice en el modelo, que la componente cuasiestática de las deformaciones es quien más participación tiene en la respuesta total, pudiéndose desprestigiar la componente inercial de las deformaciones.

Para las tuberías con tramos diferentes se encontró que la componente inercial de la deformación puede tener una participación casi igual a la componente cuasiestática en la respuesta total en condiciones de suelo duro. Esto se debe a que la presencia de tramos de diferente longitud en la tubería disminuye la frecuencia fundamental de vibración, haciéndola cercana a algunas componentes de frecuencia de la excitación, que en suelo duro tienen amplitudes casi 10 veces mayores que en suelo blando para las mismas frecuencias. Por esta razón para tuberías con tramos diferentes en suelo blando no se presenta amplificaciones de la componente inercial de deformación. En presencia de tramos de diferente longitud en la tubería se presentan cambios de signo en el primer modo de vibración, algo que no sucede en las tuberías con tramos iguales, y es justamente este hecho el que hace que disminuya sensiblemente la frecuencia de vibración de estos modos.

Capítulo 6 –Resultados y conclusiones

Los resultados numéricos mostraron que en una tubería hay modos de vibración con participación en la respuesta total casi que igual a la del modo fundamental.

Las discrepancias entre los resultados numéricos y los valores predichos por el modelo se deben fundamentalmente al hecho de que hay algunas hipótesis en las que se basa este último que no se cumplen en forma exacta para todas las tuberías, especialmente cuando tienen tramos diferentes. Sin embargo, a pesar de lo anterior, puede decirse que el modelo proporciona estimaciones precisas de las deformaciones máximas a las que puede verse una tubería debido a la acción de sismos.

Se recomienda el uso del modelo para estimar las deformaciones máximas por sismo en tuberías con tramos iguales para cualquier condición de suelo y en tuberías con tramos diferentes en condición de suelo blando, en cuyos casos la componente inercial de las deformaciones resulta despreciable y sólo la componente cuasiestática de las deformaciones es la que controla la respuesta de dichos sistemas estructurales.

Referencias

Referencias

[1] J.D. Jaramillo. “Estimación de deformaciones producidas por sismo en conducciones superficiales”. 2014. *En proceso de revision.*

[2] A. Zerva, V. Zervas. “Spatial variation of seismic ground motions: an overview”. *Applied Mechanics Reviews*. Vol. 55. No. 3. 2002. pp. 271 – 297.

[3] T.E. Price, M.O. Eberhard. “Effects of spatially varying ground motions on short bridges”. *Journal of Structural Engineering*. Vol. 124. No. 8. 1998. pp. 948–955.

[4] A.D. Kiureghan, A. Neuenhofer. “Response spectrum method for multi-support seismic excitations”. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. Vol. 21. 1992. pp. 713–740.

[5] R.S. Harichandran. “Spatial variation of earthquake ground motion: What is it, how do we model it, and what are its engineering implications?” Department of Civil and Environmental Engineering. Universidad del Estado de Michigan. 1999.

[6] A.K. Chopra. “Earthquake analysis of linear systems”. *Dynamics of structures: theory and applications to earthquake engineering*. 2^a edición. Ed. Prentice Hall. Nueva Jersey. 2001. pp. 508– 513.

[7] R.W. Clough, J. Penzien. “Deterministic earthquake response: systems on rigid foundations”. *Dynamics of structures*. 3a edición. Ed. Computers and Structures. Berkeley. 2003. pp. 219–256, 603–611, 643–647.

[8] N.E. Abdel-Ghaffar, L.I. Rubin. “Suspension bridge response to multiple-support excitations”. *Journal of the Engineering Mechanics Division*. Vol. 108. No. 2. 1982. pp. 419–435.

Referencias

- [9] A.A. Dumanoglu, R.T. Severn. “Stochastic response of suspension bridges to earthquake forces”. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. Vol. 19. No. 1. 1990. pp 133–152.
- [10] N.A. Abrahamson. “Estimation of seismic wave coherency and rupture velocity using the SMART 1 strong motion array recordings”. *Ph.D. Thesis*. Universidad de California –Berkeley. 1985.
- [11] S.D. Wegner, L.C. Lee, M.D. Trifunac. “Structural response to traveling seismic waves”. *Journal of the Structural Division*. Vol. 105. No. 12. 1979. pp. 2547–2564.
- [12] R.S. Harichandran, W. Wang. “Response of indeterminate two-span beams to spatially varying seismic excitation”. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. Vol. 19. No. 2. 1990. pp. 173–187.
- [13] A. Zerva. “Response of multi-span beams to spatially random ground motions”. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. Vol. 19. 1990. pp. 819– 832.
- [14] A.A. Shama. “Simplified procedure for simulating spatially correlated earthquake ground motions”. *Engineering Structures*. Vol. 29. 2007. pp. 248–258.
- [15] K. Soylik. “Comparison of random vibration methods for multi-support seismic excitation analysis of long-span bridges”. *Engineering Structures*. Vol 26. 2004. pp. 1573–1583.
- [16] C.H. Loh, B.D. Ku. “An efficient analysis of structural response for multiple-support seismic excitations”. *Engineering Structures*. Vol. 17. No.1.1995. pp. 15–26.
- [17] J.H. Lin, Y.H. Zhang, Q.S. Li, F.W. Williams. “Random vibration analysis of long-span structures subjected to spatially varying ground motions”. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. Vol. 29. 2009. pp. 620–629.

Referencias

- [18] J.H. Lin, Y.H. Zhang, Q.S. Li, F.W. Williams. “Seismic spatial effects for long-span bridges, using the pseudo excitation method”. *Engineering Structures*. Vol. 26. 2004. pp. 1207–1216.
- [19] N.A. Alexander. “Multi–support excitation of single span bridges, using real seismic ground motion recorded at the SMART–1 array”. *Computers and Structures*. Vol. 86. 2007. pp. 88–103.
- [20] S. Ates, A. Bayraktar, A. Aydin Dumanoglu. “The effect of spatially varying earthquake ground motions on the stochastic response of bridges isolated with friction pendulum systems”. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. Vol. 26. 2006. pp. 31–44.
- [21] J.D. Jaramillo. “Generación de señales de tiempo correlacionadas”. 2014. *En proceso de revision*.
- [22] E. Samaras, M. Shinozuka, A. Tsurui. “Time Series Generation Using the Auto-Regressive Moving-Average Model”, Technical Report, Department of Civil Engineering, Universidad de Columbia, Nueva York. 1983.
- [23] H.C. Martin. “The uniforme, rectilinear beam”. *Introduction to matrix methods of structural analysis*. 1^a edición. Ed. Mc Graw Hill. Tokyo. 1966. pp. 93–96.
- [24] J.D. Jaramillo, E. Montoya. Manual del usuario SERIES[®]. Programa para el procesamiento y análisis de señales de tiempo. Universidad EAFIT. 2001.
- [25] Computers and Structures Inc. Manuales del usuario SAP2000[®] V 14.0.

Anexo – Tablas con deformaciones

El presente anexo incluye las tablas donde se reportan los resultados de las deformaciones axiales, flectoras y totales, por medio del modelo propuesto y de los modelos con elementos finitos, para todos los tipos de tuberías con tramos iguales y con tramos diferentes para los diferentes valores de correlación definidos. Para las deformaciones halladas por medio del modelo, se calcularon las componentes inerciales y cuasiestáticas para el caso axial y el caso flector.

A.1. Resultados para las tuberías con tramos iguales

Tabla 7 – Deformaciones de la tubería con 2 apoyos y L=10.0 m (Suelo blando)

ρ	Modelo							Exacto		
	Respuesta Axial			Respuesta Flexión			Total	Axial	Flexión	Total
	Estático	Dinámico	Total	Estático	Dinámico	Total				
1.00	0.00	2.02E-06	2.0E-06	0.00	8.2E-06	8.2E-06	8.4E-06	2.3E-06	9.9E-06	1.0E-05
0.61	0.0089	0.0000	0.0089	0.0038	0.0000	0.0038	0.0096	0.0075	0.0048	0.0099
0.37	0.0112	0.0000	0.0112	0.0048	0.0000	0.0048	0.0122	0.0093	0.0071	0.0133
0.14	0.0132	0.0000	0.0132	0.0056	0.0000	0.0056	0.0143	0.0127	0.0075	0.0173
0.01	0.0141	0.0000	0.0141	0.0060	0.0000	0.0060	0.0153	0.0142	0.0086	0.0188

Tabla 8 – Deformaciones de la tubería con 2 apoyos y L=10.0 m (Suelo duro)

r	Modelo							Exacto		
	Respuesta Axial			Respuesta Flexión			Total	Axial	Flexión	Total
	Estático	Dinámico	Total	Estático	Dinámico	Total				
1.00	0.00	2.02E-06	2.02E-06	0.00	8.20E-06	8.20E-06	8.44E-06	2.28E-06	9.90E-06	1.04E-05
0.61	0.0089	1.75E-06	0.009	0.004	0.000	0.004	0.010	7.51E-03	0.005	0.010
0.37	0.0112	1.75E-06	0.011	0.005	0.000	0.005	0.012	9.34E-03	0.007	0.013
0.14	0.0132	1.75E-06	0.013	0.006	0.000	0.006	0.014	1.27E-02	0.008	0.017
0.01	0.0141	1.75E-06	0.014	0.006	0.000	0.006	0.015	1.42E-02	0.009	0.019

Tabla 9 – Deformaciones de la tubería con 2 apoyos y L=10.0 m (Suelo duro)

ρ	Modelo							Exacto		
	Respuesta Axial			Respuesta Flexión			Total	Axial	Flexión	Total
	Estático	Dinámico	Total	Estático	Dinámico	Total				
1.00	0.00	1.75E-05	1.75E-05	0.00	7.07E-05	7.07E-05	7.29E-05	1.66E-05	7.19E-05	8.01E-05
0.61	0.009	0.000	0.009	0.004	0.000	0.004	0.010	0.008	0.007	0.011
0.37	0.011	0.000	0.011	0.005	0.000	0.005	0.012	0.011	0.006	0.014
0.14	0.013	0.000	0.013	0.006	0.000	0.006	0.014	0.012	0.008	0.015
0.01	0.014	0.000	0.014	0.006	0.000	0.006	0.015	0.014	0.008	0.016

Tabla 10 – Deformaciones de la tubería con 5 apoyos y L=10.0 m (Suelo blando)

ρ	Modelo							Exacto		
	Respuesta Axial			Respuesta Flexión			Total	Axial	Flexión	Total
	Estático	Dinámico	Total	Estático	Dinámico	Total				
1.00	0.00	2.02E-06	2.02E-06	0.00	8.20E-06	8.20E-06	8.44E-06	2.31E-06	9.92E-06	1.02E-05
0.61	0.0089	0.0000	0.0089	0.0038	0.0000	0.0038	0.0096	0.0087	0.0041	0.0105
0.37	0.0112	0.0000	0.0112	0.0048	0.0000	0.0048	0.0122	0.0115	0.0054	0.0137
0.14	0.0132	0.0000	0.0132	0.0056	0.0000	0.0056	0.0143	0.0147	0.0065	0.0194
0.01	0.0141	0.0000	0.0141	0.0060	0.0000	0.0060	0.0153	0.0131	0.0081	0.0160

Tabla 11 – Deformaciones de la tubería con 5 apoyos y L=10.0 m (Suelo duro)

ρ	Modelo							Exacto		
	Respuesta Axial			Respuesta Flexión			Total	Axial	Flexión	Total
	Estático	Dinámico	Total	Estático	Dinámico	Total				
1.00	0.00	1.75E-05	1.75E-05	0.00	7.07E-05	7.07E-05	7.29E-05	1.7E-05	7.24E-05	7.6E-05
0.61	0.0089	0.0000	0.0089	0.0038	0.0000	0.0038	0.0096	0.0088	0.0043	0.0107
0.37	0.0112	0.0000	0.0112	0.0048	0.0000	0.0048	0.0122	0.0119	0.0057	0.0151
0.14	0.0132	0.0000	0.0132	0.0056	0.0000	0.0056	0.0143	0.0130	0.0063	0.0160
0.01	0.0141	0.0000	0.0141	0.0060	0.0000	0.0060	0.0153	0.0148	0.0063	0.0163

Tabla 12 – Deformaciones de la tubería con 10 apoyos y L=5.0 m (Suelo blando)

ρ	Modelo							Exacto		
	Respuesta Axial			Respuesta Flexión			Total	Axial	Flexión	Total
	Estático	Dinámico	Total	Estático	Dinámico	Total				
1.00	0.00	6.89E-07	6.89E-07	0.00	1.30E-06	1.30E-06	1.47E-06	1.19E-06	4.57E-06	4.60E-06
0.61	0.0177	0.0000	0.0177	0.0159	0.0000	0.0159	0.0238	0.0184	0.0157	0.0278
0.37	0.0225	0.0000	0.0225	0.0201	0.0000	0.0201	0.0302	0.0235	0.0203	0.0350
0.14	0.0263	0.0000	0.0263	0.0235	0.0000	0.0235	0.0353	0.0270	0.0255	0.0400
0.01	0.0282	0.0000	0.0282	0.0252	0.0000	0.0252	0.0378	0.0286	0.0288	0.0465

Tabla 13 – Deformaciones de la tubería con 10 apoyos y L=5.0 m (Suelo duro)

ρ	Modelo							Exacto		
	Respuesta Axial			Respuesta Flexión			Total	Axial	Flexión	Total
	Estático	Dinámico	Total	Estático	Dinámico	Total				
1.00	0.00	5.65E-06	5.65E-06	0.00	1.06E-05	1.06E-05	1.20E-05	8.54E-06	2.09E-05	2.23E-05
0.61	0.0177	0.0000	0.0177	0.0151	0.0000	0.0151	0.0233	0.0175	0.0144	0.0249
0.37	0.0225	0.0000	0.0225	0.0191	0.0000	0.0191	0.0295	0.0222	0.0203	0.0319
0.14	0.0263	0.0000	0.0263	0.0223	0.0000	0.0223	0.0345	0.0286	0.0289	0.0411
0.01	0.0282	0.0000	0.0282	0.0239	0.0000	0.0239	0.0370	0.0283	0.0304	0.0433

Tabla 14 – Deformaciones de la tubería con 10 apoyos y L=10.0 m (Suelo blando)

ρ	Modelo							Exacto		
	Respuesta Axial			Respuesta Flexión			Total	Axial	Flexión	Total
	Estático	Dinámico	Total	Estático	Dinámico	Total				
1.00	0.00	2.02E-06	2.02E-06	0.00	8.20E-06	8.20E-06	8.44E-06	2.31E-06	9.91E-06	1.00E-05
0.61	0.0089	0.0000	0.0089	0.0040	0.0000	0.0040	0.0097	0.0089	0.0036	0.0107
0.37	0.0112	0.0000	0.0112	0.0050	0.0000	0.0050	0.0123	0.0114	0.0046	0.0136
0.14	0.0132	0.0000	0.0132	0.0059	0.0000	0.0059	0.0144	0.0131	0.0058	0.0149
0.01	0.0141	0.0000	0.0141	0.0063	0.0000	0.0063	0.0154	0.0140	0.0065	0.0172

Tabla 15– Deformaciones de la tubería con 10 apoyos y L=10.0 m (Suelo duro)

ρ	Modelo							Exacto		
	Respuesta Axial			Respuesta Flexión			Total	Axial	Flexión	Total
	Estático	Dinámico	Total	Estático	Dinámico	Total				
1.00	0.00	1.75E-05	1.75E-05	0.00	7.07E-05	7.07E-05	7.29E-05	1.66E-05	7.18E-05	7.36E-05
0.61	0.0089	0.0000	0.0089	0.0040	0.0000	0.0040	0.0097	0.0085	0.0033	0.0098
0.37	0.0112	0.0000	0.0112	0.0050	0.0000	0.0050	0.0123	0.0108	0.0047	0.0126
0.14	0.0132	0.0000	0.0132	0.0059	0.0000	0.0059	0.0144	0.0140	0.0066	0.0155
0.01	0.0141	0.0000	0.0141	0.0063	0.0000	0.0063	0.0154	0.0138	0.0069	0.0162

Tabla 16– Deformaciones de la tubería con 10 apoyos y L=20.0 m (Suelo blando)

ρ	Modelo							Exacto		
	Respuesta Axial			Respuesta Flexión			Total	Axial	Flexión	Total
	Estático	Dinámico	Total	Estático	Dinámico	Total				
1.00	0.00	4.18E-06	4.18E-06	0.00	3.08E-05	3.08E-05	3.11E-05	4.64E-06	2.47E-05	2.48E-05
0.61	0.0044	0.0000	0.0044	0.0010	0.0000	0.0010	0.0045	0.0045	0.0009	0.0049
0.37	0.0056	0.0000	0.0056	0.0013	0.0000	0.0013	0.0058	0.0057	0.0012	0.0062
0.14	0.0066	0.0000	0.0066	0.0015	0.0000	0.0015	0.0067	0.0066	0.0015	0.0069
0.01	0.0070	0.0000	0.0070	0.0016	0.0000	0.0016	0.0072	0.0070	0.0017	0.0077

Tabla 17– Deformaciones de la tubería con 10 apoyos y L=20.0 m (Suelo duro)

ρ	Modelo							Exacto		
	Respuesta Axial			Respuesta Flexión			Total	Axial	Flexión	Total
	Estático	Dinámico	Total	Estático	Dinámico	Total				
1.00	0.00	3.67E-05	3.67E-05	0.00	2.38E-04	2.38E-04	2.41E-04	3.33E-05	2.47E-04	2.51E-04
0.61	0.0044	0.0000	0.0044	0.0010	0.0001	0.0010	0.0045	0.0043	0.0008	0.0050
0.37	0.0056	0.0000	0.0056	0.0013	0.0001	0.0013	0.0058	0.0055	0.0012	0.0061
0.14	0.0066	0.0000	0.0066	0.0015	0.0001	0.0015	0.0067	0.0070	0.0016	0.0075
0.01	0.0070	0.0000	0.0070	0.0016	0.0001	0.0016	0.0072	0.0070	0.0018	0.0076

Tabla 18– Deformaciones de la tubería con 20 apoyos y L=10.0 m (Suelo blando)

ρ	Modelo							Exacto		
	Respuesta Axial			Respuesta Flexión			Total	Axial	Flexión	Total
	Estático	Dinámico	Total	Estático	Dinámico	Total				
1.00	0.00	2.02E-06	2.02E-06	0.00	8.20E-06	8.20E-06	8.44E-06	2.31E-06	9.86E-06	9.91E-06
0.61	0.0089	0.0000	0.0089	0.0040	0.0000	0.0040	0.0097	0.0088	0.0039	0.0105
0.37	0.0112	0.0000	0.0112	0.0050	0.0000	0.0050	0.0123	0.0116	0.0046	0.0136
0.14	0.0132	0.0000	0.0132	0.0059	0.0000	0.0059	0.0144	0.0137	0.0063	0.0159
0.01	0.0141	0.0000	0.0141	0.0063	0.0000	0.0063	0.0154	0.0139	0.0068	0.0163

Tabla 19– Deformaciones de la tubería con 20 apoyos y L=10.0 m (Suelo duro)

ρ	Modelo							Exacto		
	Respuesta Axial			Respuesta Flexión			Total	Axial	Flexión	Total
	Estático	Dinámico	Total	Estático	Dinámico	Total				
1.00	0.00	1.75E-05	1.75E-05	0.00	7.07E-05	7.07E-05	7.29E-05	1.66E-05	7.13E-05	7.22E-05
0.61	0.0089	0.0000	0.0089	0.0040	0.0000	0.0040	0.0097	0.0090	0.0034	0.0103
0.37	0.0112	0.0000	0.0112	0.0050	0.0000	0.0050	0.0123	0.0116	0.0051	0.0134
0.14	0.0132	0.0000	0.0132	0.0059	0.0000	0.0059	0.0144	0.0138	0.0059	0.0161
0.01	0.0141	0.0000	0.0141	0.0063	0.0000	0.0063	0.0154	0.0153	0.0061	0.0171

A.2. Resultados para las tuberías con tramos diferentes

Tabla 20 – Deformaciones de las tuberías tipo 1 – Clase 1 (Suelo blando)

ρ	Tramo	Modelo							Exacto		
		Respuesta Axial			Respuesta Flexión			Total	Axial	Flexión	Total
		Estático	Dinámico	Total	Estático	Dinámico	Total				
1.00	L1	0.0E+00	1.8E-05	1.8E-05	0.0E+00	7.3E-05	7.3E-05	7.5E-05	1.6E-05	4.8E-05	5.6E-05
	L	0.0E+00	5.9E-06	5.9E-06	0.0E+00	1.1E-05	1.1E-05	1.3E-05	8.0E-06	5.3E-05	5.7E-05
	L2	0.0E+00	1.8E-05	1.8E-05	0.0E+00	7.3E-05	7.3E-05	7.5E-05	1.6E-05	4.8E-05	4.9E-05
0.60	L1	0.0089	5.0E-06	0.0089	0.0038	2.0E-05	0.0038	0.0096	0.0104	0.0097	0.0180
	L	0.0177	1.6E-06	0.0177	0.0151	3.1E-06	0.0151	0.0233	0.0177	0.0127	0.0217
	L2	0.0089	5.0E-06	0.0089	0.0038	2.0E-05	0.0038	0.0096	0.0130	0.0111	0.0183
0.37	L1	0.0112	5.0E-06	0.0112	0.0048	2.0E-05	0.0048	0.0122	0.0137	0.0142	0.0191
	L	0.0225	1.6E-06	0.0225	0.0191	3.1E-06	0.0191	0.0295	0.0256	0.0132	0.0271
	L2	0.0112	5.0E-06	0.0112	0.0048	2.0E-05	0.0048	0.0122	0.0155	0.0142	0.0201
0.14	L1	0.0132	5.0E-06	0.0132	0.0056	2.0E-05	0.0056	0.0143	0.0172	0.0157	0.0188
	L	0.0263	1.6E-06	0.0263	0.0223	3.1E-06	0.0223	0.0345	0.0267	0.0139	0.0358
	L2	0.0132	5.0E-06	0.0132	0.0056	2.0E-05	0.0056	0.0143	0.0167	0.0135	0.0211
0.01	L1	0.0141	5.0E-06	0.0141	0.0060	2.0E-05	0.0060	0.0153	0.0172	0.0141	0.0231
	L	0.0282	1.6E-06	0.0282	0.0239	3.1E-06	0.0239	0.0370	0.0311	0.0187	0.0364
	L2	0.0141	5.0E-06	0.0141	0.0060	2.0E-05	0.0060	0.0153	0.0140	0.0169	0.0293

Tabla 21 – Deformaciones de las tuberías tipo 1 – Clase 1 (Suelo duro)

ρ	Tramo	Modelo							Exacto		
		Respuesta Axial			Respuesta Flexión			Total	Axial	Flexión	Total
		Estático	Dinámico	Total	Estático	Dinámico	Total				
1.00	L1	0.0E+00	2.2E-06	2.2E-06	0.00E+00	8.7E-06	8.7E-06	9.0E-06	2.2E-06	4.2E-06	5.0E-06
	L	0.0E+00	6.8E-07	6.8E-07	0.00E+00	1.3E-06	1.3E-06	1.5E-06	1.1E-06	5.6E-06	6.2E-06
	L2	0.0E+00	2.2E-06	2.2E-06	0.00E+00	8.7E-06	8.7E-06	9.0E-06	2.2E-06	4.2E-06	5.1E-06
0.60	L1	0.0088	6.0E-07	0.0088	0.0037	2.4E-06	0.0037	0.0096	0.0113	0.0071	0.0136
	L	0.0177	1.9E-07	0.0177	0.0150	3.6E-07	0.0150	0.0232	0.0171	0.0064	0.0209
	L2	0.0088	6.0E-07	0.0088	0.0037	2.4E-06	0.0037	0.0096	0.0095	0.0059	0.0182
0.37	L1	0.0112	6.0E-07	0.0112	0.0047	2.4E-06	0.0047	0.0122	0.0146	0.0094	0.0176
	L	0.0224	1.9E-07	0.0224	0.0190	3.6E-07	0.0190	0.0294	0.0201	0.0094	0.0237
	L2	0.0112	6.0E-07	0.0112	0.0047	2.4E-06	0.0047	0.0122	0.0119	0.0088	0.0173
0.14	L1	0.0131	6.0E-07	0.0131	0.0055	2.4E-06	0.0055	0.0142	0.0140	0.0166	0.0200
	L	0.0263	1.9E-07	0.0263	0.0223	3.6E-07	0.0223	0.0344	0.0308	0.0125	0.0315
	L2	0.0131	6.0E-07	0.0131	0.0055	2.4E-06	0.0055	0.0142	0.0162	0.0095	0.0192
0.01	L1	0.0140	6.0E-07	0.0140	0.0059	2.4E-06	0.0059	0.0153	0.0128	0.0107	0.0216
	L	0.0281	1.9E-07	0.0281	0.0239	3.6E-07	0.0239	0.0369	0.0250	0.0154	0.0338
	L2	0.0140	6.0E-07	0.0140	0.0059	2.4E-06	0.0059	0.015	0.0150	0.0135	0.0204

Tabla 22 – Deformaciones de las tuberías tipo 1 – Clase 2 (Suelo blando)

ρ	Tramo	Modelo							Exacto		
		Respuesta Axial			Respuesta Flexión			Total	Axial	Flexión	Total
		Estático	Dinámico	Total	Estático	Dinámico	Total				
1.00	L1	0.0E+00	6.8E-07	6.8E-07	0.0E+00	1.3E-06	1.3E-06	1.8E-06	1.1E-06	6.2E-06	6.6E-06
	L	0.0E+00	2.2E-06	2.2E-06	0.0E+00	8.7E-06	8.7E-06	1.2E-05	2.2E-06	3.9E-06	4.5E-06
	L2	0.0E+00	6.8E-07	6.8E-07	0.0E+00	1.3E-06	1.3E-06	1.8E-06	1.1E-06	6.2E-06	6.1E-06
0.60	L1	0.018	1.9E-07	0.018	0.015	3.5E-07	0.015	0.015	0.019	0.012	0.024
	L	0.009	6.0E-07	0.009	0.004	2.4E-06	0.004	0.004	0.011	0.008	0.014
	L2	0.018	1.9E-07	0.018	0.015	3.5E-07	0.015	0.015	0.016	0.007	0.018
0.37	L1	0.022	1.9E-07	0.022	0.019	3.5E-07	0.019	0.019	0.024	0.015	0.033
	L	0.011	6.0E-07	0.011	0.005	2.4E-06	0.005	0.005	0.014	0.012	0.022
	L2	0.022	1.9E-07	0.022	0.019	3.5E-07	0.019	0.019	0.023	0.020	0.038
0.14	L1	0.026	1.9E-07	0.026	0.022	3.5E-07	0.022	0.022	0.024	0.031	0.051
	L	0.013	6.0E-07	0.013	0.006	2.4E-06	0.006	0.006	0.014	0.013	0.021
	L2	0.026	1.9E-07	0.026	0.022	3.5E-07	0.022	0.022	0.031	0.020	0.040
0.01	L1	0.028	1.9E-07	0.028	0.024	3.5E-07	0.024	0.024	0.027	0.021	0.036
	L	0.014	6.0E-07	0.014	0.006	2.4E-06	0.006	0.006	0.014	0.014	0.021
	L2	0.028	1.9E-07	0.028	0.024	3.5E-07	0.024	0.024	0.027	0.024	0.040

Tabla 23 – Deformaciones de las tuberías tipo 1 – Clase 2 (Suelo duro)

ρ	Tramo	Modelo							Exacto		
		Respuesta Axial			Respuesta Flexión			Total	Axial	Flexión	Total
		Estático	Dinámico	Total	Estático	Dinámico	Total				
1.00	L1	0.0E+00	5.9E-06	5.9E-06	0.0E+00	1.1E-05	1.1E-05	1.6E-05	8.0E-06	6.1E-05	5.7E-05
	L	0.0E+00	1.8E-05	1.8E-05	0.0E+00	7.3E-05	7.3E-05	1.0E-04	1.6E-05	4.6E-05	5.4E-05
	L2	0.0E+00	5.9E-06	5.9E-06	0.0E+00	1.1E-05	1.1E-05	1.6E-05	8.0E-06	6.1E-05	6.5E-05
0.60	L1	0.018	1.6E-06	0.018	0.015	3.1E-06	0.015	0.015	0.019	0.011	0.030
	L	0.009	5.0E-06	0.009	0.004	2.0E-05	0.004	0.004	0.011	0.010	0.019
	L2	0.018	1.6E-06	0.018	0.015	3.1E-06	0.015	0.015	0.019	0.012	0.026
0.37	L1	0.022	1.6E-06	0.022	0.019	3.1E-06	0.019	0.019	0.025	0.012	0.029
	L	0.011	5.0E-06	0.011	0.005	2.0E-05	0.005	0.005	0.019	0.011	0.029
	L2	0.022	1.6E-06	0.022	0.019	3.1E-06	0.019	0.019	0.029	0.020	0.026
0.14	L1	0.026	1.6E-06	0.026	0.022	3.1E-06	0.022	0.022	0.028	0.026	0.040
	L	0.013	5.0E-06	0.013	0.006	2.0E-05	0.006	0.006	0.014	0.013	0.022
	L2	0.026	1.6E-06	0.026	0.022	3.1E-06	0.022	0.022	0.027	0.015	0.034
0.01	L1	0.028	1.6E-06	0.028	0.024	3.1E-06	0.024	0.024	0.036	0.021	0.037
	L	0.014	5.0E-06	0.014	0.006	2.0E-05	0.006	0.006	0.015	0.014	0.020
	L2	0.028	1.6E-06	0.028	0.024	3.1E-06	0.024	0.024	0.042	0.018	0.046

Tabla 24 – Deformaciones de las tuberías tipo 1 – Clase 3 (Suelo blando)

ρ	Tramo	Modelo							Exacto		
		Respuesta Axial			Respuesta Flexión			Total	Axial	Flexión	Total
		Estático	Dinámico	Total	Estático	Dinámico	Total				
1.00	L1	0.0E+00	4.6E-06	4.6E-06	0.0E+00	3.4E-05	3.4E-05	3.4E-05	4.4E-06	2.0E-05	2.1E-05
	L	0.0E+00	2.2E-06	2.2E-06	0.0E+00	8.7E-06	8.7E-06	9.0E-06	2.2E-06	1.6E-05	1.6E-05
	L2	0.0E+00	4.6E-06	4.6E-06	0.0E+00	3.4E-05	3.4E-05	3.4E-05	4.4E-06	2.0E-05	2.2E-05
0.60	L1	0.004	1.4E-06	0.004	0.001	1.0E-05	0.001	0.005	0.006	0.005	0.008
	L	0.009	6.5E-07	0.009	0.004	2.6E-06	0.004	0.010	0.010	0.003	0.011
	L2	0.004	1.4E-06	0.004	0.001	1.0E-05	0.001	0.005	0.006	0.003	0.007
0.37	L1	0.006	1.4E-06	0.006	0.001	1.0E-05	0.001	0.006	0.008	0.006	0.009
	L	0.011	6.5E-07	0.011	0.005	2.6E-06	0.005	0.012	0.012	0.004	0.014
	L2	0.006	1.4E-06	0.006	0.001	1.0E-05	0.001	0.006	0.011	0.005	0.013
0.14	L1	0.007	1.4E-06	0.007	0.001	1.0E-05	0.001	0.007	0.007	0.008	0.009
	L	0.013	6.5E-07	0.013	0.006	2.6E-06	0.006	0.014	0.016	0.003	0.018
	L2	0.007	1.4E-06	0.007	0.001	1.0E-05	0.001	0.007	0.007	0.006	0.008
0.01	L1	0.007	1.4E-06	0.007	0.001	1.0E-05	0.001	0.007	0.008	0.008	0.011
	L	0.014	6.5E-07	0.014	0.006	2.6E-06	0.006	0.015	0.015	0.005	0.016
	L2	0.007	1.4E-06	0.007	0.001	1.0E-05	0.001	0.007	0.006	0.007	0.009

Tabla 25 – Deformaciones de las tuberías tipo 1 – Clase 3 (Suelo duro)

ρ	Tramo	Modelo							Exacto		
		Respuesta Axial			Respuesta Flexión			Total	Axial	Flexión	Total
		Estático	Dinámico	Total	Estático	Dinámico	Total				
1.00	L1	0.0E+00	3.9E-05	3.9E-05	0.0E+00	2.5E-04	2.5E-04	2.5E-04	3.1E-05	2.7E-04	2.8E-04
	L	0.0E+00	1.8E-05	1.8E-05	0.0E+00	7.3E-05	7.3E-05	7.5E-05	1.6E-05	2.2E-04	2.2E-04
	L2	0.0E+00	3.9E-05	3.9E-05	0.0E+00	2.5E-04	2.5E-04	2.5E-04	3.1E-05	2.7E-04	3.1E-04
0.60	L1	0.004	1.2E-05	0.004	0.001	7.5E-05	0.001	0.005	0.007	0.015	0.016
	L	0.009	5.4E-06	0.009	0.004	2.2E-05	0.004	0.010	0.013	0.012	0.020
	L2	0.004	1.2E-05	0.004	0.001	7.5E-05	0.001	0.005	0.007	0.011	0.021
0.37	L1	0.006	1.2E-05	0.006	0.001	7.5E-05	0.001	0.006	0.009	0.014	0.021
	L	0.011	5.4E-06	0.011	0.005	2.2E-05	0.005	0.012	0.015	0.014	0.023
	L2	0.006	1.2E-05	0.006	0.001	7.5E-05	0.001	0.006	0.010	0.014	0.020
0.14	L1	0.007	1.2E-05	0.007	0.001	7.5E-05	0.001	0.007	0.008	0.016	0.019
	L	0.013	5.4E-06	0.013	0.006	2.2E-05	0.006	0.014	0.017	0.018	0.022
	L2	0.007	1.2E-05	0.007	0.001	7.5E-05	0.001	0.007	0.008	0.015	0.018
0.01	L1	0.007	1.2E-05	0.007	0.001	7.5E-05	0.001	0.007	0.008	0.016	0.018
	L	0.014	5.4E-06	0.014	0.006	2.2E-05	0.006	0.015	0.014	0.013	0.018
	L2	0.007	1.2E-05	0.007	0.001	7.5E-05	0.001	0.007	0.008	0.009	0.025

Tabla 26 – Deformaciones de las tuberías tipo 1 – Clase 4 (Suelo blando)

ρ	Tramo	Modelo							Exacto		
		Respuesta Axial			Respuesta Flexión			Total	Axial	Flexión	Total
		Estático	Dinámico	Total	Estático	Dinámico	Total				
1.00	L1	0.0E+00	2.2E-06	2.2E-06	0.0E+00	8.7E-06	8.7E-06	9.0E-06	2.2E-06	2.9E-06	3.8E-06
	L	0.0E+00	4.6E-06	4.6E-06	0.0E+00	3.4E-05	3.4E-05	3.4E-05	4.4E-06	1.7E-05	1.7E-05
	L2	0.0E+00	2.2E-06	2.2E-06	0.0E+00	8.7E-06	8.7E-06	9.0E-06	2.2E-06	2.9E-06	4.6E-06
0.60	L1	0.009	6.0E-07	0.009	0.004	2.4E-06	0.004	0.010	0.011	0.006	0.013
	L	0.004	1.3E-06	0.004	0.001	9.4E-06	0.001	0.005	0.007	0.003	0.008
	L2	0.009	6.0E-07	0.009	0.004	2.4E-06	0.004	0.010	0.010	0.006	0.015
0.37	L1	0.011	6.0E-07	0.011	0.005	2.4E-06	0.005	0.012	0.015	0.008	0.018
	L	0.006	1.3E-06	0.006	0.001	9.4E-06	0.001	0.006	0.007	0.004	0.008
	L2	0.011	6.0E-07	0.011	0.005	2.4E-06	0.005	0.012	0.011	0.009	0.012
0.14	L1	0.013	6.0E-07	0.013	0.006	2.4E-06	0.006	0.014	0.014	0.015	0.019
	L	0.007	1.3E-06	0.007	0.001	9.4E-06	0.001	0.007	0.008	0.004	0.009
	L2	0.013	6.0E-07	0.013	0.006	2.4E-06	0.006	0.014	0.013	0.003	0.020
0.01	L1	0.014	6.0E-07	0.014	0.006	2.4E-06	0.006	0.015	0.013	0.010	0.018
	L	0.007	1.3E-06	0.007	0.001	9.4E-06	0.001	0.007	0.008	0.004	0.009
	L2	0.014	6.0E-07	0.014	0.006	2.4E-06	0.006	0.015	0.016	0.004	0.019

Tabla 27 – Deformaciones de las tuberías tipo 1 – Clase 4 (Suelo duro)

ρ	Tramo	Modelo							Exacto		
		Respuesta Axial			Respuesta Flexión			Total	Axial	Flexión	Total
		Estático	Dinámico	Total	Estático	Dinámico	Total				
1.00	L1	0.0E+00	1.8E-05	1.8E-05	0.0E+00	7.3E-05	7.3E-05	7.5E-05	1.6E-05	2.6E-04	2.9E-05
	L	0.0E+00	3.9E-05	3.9E-05	0.0E+00	2.5E-04	2.5E-04	2.5E-04	3.1E-05	2.2E-04	2.4E-04
	L2	0.0E+00	1.8E-05	1.8E-05	0.0E+00	7.3E-05	7.3E-05	7.5E-05	1.6E-05	2.6E-04	2.7E-04
0.60	L1	0.009	5.0E-06	0.009	0.004	2.0E-05	0.004	0.010	0.010	0.010	0.017
	L	0.004	1.1E-05	0.004	0.001	7.0E-05	0.001	0.005	0.008	0.011	0.014
	L2	0.009	5.0E-06	0.009	0.004	2.0E-05	0.004	0.010	0.014	0.009	0.022
0.37	L1	0.011	5.0E-06	0.011	0.005	2.0E-05	0.005	0.012	0.014	0.013	0.021
	L	0.006	1.1E-05	0.006	0.001	7.0E-05	0.001	0.006	0.008	0.011	0.014
	L2	0.011	5.0E-06	0.011	0.005	2.0E-05	0.005	0.012	0.014	0.011	0.026
0.14	L1	0.013	5.0E-06	0.013	0.006	2.0E-05	0.006	0.014	0.017	0.014	0.022
	L	0.007	1.1E-05	0.007	0.001	7.0E-05	0.001	0.007	0.008	0.012	0.016
	L2	0.013	5.0E-06	0.013	0.006	2.0E-05	0.006	0.014	0.014	0.014	0.029
0.01	L1	0.014	5.0E-06	0.014	0.006	2.0E-05	0.006	0.015	0.017	0.014	0.022
	L	0.007	1.1E-05	0.007	0.001	7.0E-05	0.001	0.007	0.008	0.011	0.015
	L2	0.014	5.0E-06	0.014	0.006	2.0E-05	0.006	0.015	0.014	0.013	0.030

Tabla 28 – Deformaciones de las tuberías tipo 2 – Clase 1 (Suelo blando)

ρ	Tramo	Modelo							Exacto		
		Respuesta Axial			Respuesta Flexión			Total	Axial	Flexión	Total
		Estático	Dinámico	Total	Estático	Dinámico	Total				
1.00	L1	0.0E+00	2.2E-06	2.2E-06	0.0E+00	8.7E-06	8.7E-06	9.0E-06	2.2E-06	5.5E-06	5.7E-06
	L	0.0E+00	6.8E-07	6.8E-07	0.0E+00	1.3E-06	1.3E-06	1.5E-06	1.1E-06	6.4E-06	6.5E-06
	L2	0.0E+00	4.6E-06	4.6E-06	0.0E+00	3.4E-05	3.4E-05	3.4E-05	4.4E-06	1.8E-05	2.1E-05
0.60	L1	0.009	6.0E-07	0.009	0.004	2.4E-06	0.004	0.010	0.011	0.007	0.014
	L	0.018	1.9E-07	0.018	0.015	3.5E-07	0.015	0.023	0.017	0.007	0.021
	L2	0.004	1.3E-06	0.004	0.001	9.4E-06	0.001	0.005	0.007	0.004	0.007
0.37	L1	0.011	6.0E-07	0.011	0.005	2.4E-06	0.005	0.012	0.015	0.009	0.018
	L	0.022	1.9E-07	0.022	0.019	3.5E-07	0.019	0.029	0.020	0.009	0.027
	L2	0.006	1.3E-06	0.006	0.001	9.4E-06	0.001	0.006	0.006	0.006	0.009
0.14	L1	0.013	6.0E-07	0.013	0.006	2.4E-06	0.006	0.014	0.014	0.016	0.020
	L	0.026	1.9E-07	0.026	0.022	3.5E-07	0.022	0.034	0.031	0.013	0.033
	L2	0.007	1.3E-06	0.007	0.001	9.4E-06	0.001	0.007	0.007	0.006	0.011
0.01	L1	0.014	6.0E-07	0.014	0.006	2.4E-06	0.006	0.015	0.013	0.013	0.020
	L	0.028	1.9E-07	0.028	0.024	3.5E-07	0.024	0.037	0.025	0.014	0.034
	L2	0.007	1.3E-06	0.007	0.001	9.4E-06	0.001	0.007	0.007	0.007	0.010

Tabla 29 – Deformaciones de las tuberías tipo 2 – Clase 1 (Suelo duro)

ρ	Tramo	Modelo							Exacto		
		Respuesta Axial			Respuesta Flexión			Total	Axial	Flexión	Total
		Estático	Dinámico	Total	Estático	Dinámico	Total				
1.00	L1	0.0E+00	1.8E-05	1.8E-05	0.0E+00	7.3E-05	7.3E-05	7.5E-05	1.6E-05	6.1E-05	6.9E-05
	L	0.0E+00	5.9E-06	5.9E-06	0.0E+00	1.1E-05	1.1E-05	1.3E-05	8.0E-06	2.8E-04	2.7E-04
	L2	0.0E+00	3.9E-05	3.9E-05	0.0E+00	2.5E-04	2.5E-04	2.5E-04	3.1E-05	2.1E-04	2.2E-04
0.60	L1	0.009	5.0E-06	0.009	0.004	2.0E-05	0.004	0.010	0.010	0.011	0.018
	L	0.018	1.6E-06	0.018	0.015	3.1E-06	0.015	0.023	0.018	0.013	0.019
	L2	0.004	1.1E-05	0.004	0.001	7.0E-05	0.001	0.005	0.006	0.014	0.021
0.37	L1	0.011	5.0E-06	0.011	0.005	2.0E-05	0.005	0.012	0.014	0.014	0.022
	L	0.022	1.6E-06	0.022	0.019	3.1E-06	0.019	0.029	0.026	0.017	0.038
	L2	0.006	1.1E-05	0.006	0.001	7.0E-05	0.001	0.006	0.010	0.017	0.017
0.14	L1	0.013	5.0E-06	0.013	0.006	2.0E-05	0.006	0.014	0.017	0.013	0.023
	L	0.026	1.6E-06	0.026	0.022	3.1E-06	0.022	0.034	0.027	0.018	0.036
	L2	0.007	1.1E-05	0.007	0.001	7.0E-05	0.001	0.007	0.007	0.016	0.014
0.01	L1	0.014	5.0E-06	0.014	0.006	2.0E-05	0.006	0.015	0.017	0.013	0.021
	L	0.028	1.6E-06	0.028	0.024	3.1E-06	0.024	0.037	0.031	0.016	0.035
	L2	0.007	1.1E-05	0.007	0.001	7.0E-05	0.001	0.007	0.008	0.014	0.016

Tabla 30 – Deformaciones de las tuberías tipo 2 – Clase 1 (Suelo blando)

ρ	Tramo	Modelo							Exacto		
		Respuesta Axial			Respuesta Flexión			Total	Axial	Flexión	Total
		Estático	Dinámico	Total	Estático	Dinámico	Total				
1.00	L1	0.0E+00	6.8E-07	6.8E-07	0.0E+00	1.3E-06	1.3E-06	1.5E-06	1.1E-06	6.4E-06	6.3E-06
	L	0.0E+00	2.2E-06	2.2E-06	0.0E+00	8.7E-06	8.7E-06	9.0E-06	2.2E-06	3.0E-06	3.8E-06
	L2	0.0E+00	4.6E-06	4.6E-06	0.0E+00	3.4E-05	3.4E-05	3.4E-05	4.4E-06	1.8E-05	2.1E-05
0.60	L1	0.018	1.9E-07	0.018	0.015	3.5E-07	0.015	0.023	0.023	0.008	0.027
	L	0.009	6.0E-07	0.009	0.004	2.4E-06	0.004	0.010	0.008	0.003	0.012
	L2	0.004	1.3E-06	0.004	0.001	9.4E-06	0.001	0.005	0.007	0.004	0.007
0.37	L1	0.022	1.9E-07	0.022	0.019	3.5E-07	0.019	0.029	0.024	0.011	0.033
	L	0.011	6.0E-07	0.011	0.005	2.4E-06	0.005	0.012	0.014	0.005	0.020
	L2	0.006	1.3E-06	0.006	0.001	9.4E-06	0.001	0.006	0.006	0.005	0.010
0.14	L1	0.026	1.9E-07	0.026	0.022	3.5E-07	0.022	0.034	0.024	0.011	0.050
	L	0.013	6.0E-07	0.013	0.006	2.4E-06	0.006	0.014	0.015	0.004	0.020
	L2	0.007	1.3E-06	0.007	0.001	9.4E-06	0.001	0.007	0.007	0.006	0.009
0.01	L1	0.028	1.9E-07	0.028	0.024	3.5E-07	0.024	0.037	0.027	0.013	0.036
	L	0.014	6.0E-07	0.014	0.006	2.4E-06	0.006	0.015	0.014	0.004	0.020
	L2	0.007	1.3E-06	0.007	0.001	9.4E-06	0.001	0.007	0.007	0.007	0.010

Tabla 31 – Deformaciones de las tuberías tipo 2 – Clase 1 (Suelo duro)

ρ	Tramo	Modelo							Exacto		
		Respuesta Axial			Respuesta Flexión			Total	Axial	Flexión	Total
		Estático	Dinámico	Total	Estático	Dinámico	Total				
1.00	L1	0.0E+00	5.9E-06	5.9E-06	0.0E+00	1.1E-05	1.1E-05	1.3E-05	8.0E-06	2.4E-05	2.9E-05
	L	0.0E+00	1.8E-05	1.8E-05	0.0E+00	7.3E-05	7.3E-05	7.5E-05	1.6E-05	2.4E-04	2.4E-05
	L2	0.0E+00	3.9E-05	3.9E-05	0.0E+00	2.5E-04	2.5E-04	2.5E-04	3.1E-05	2.3E-04	2.2E-04
0.60	L1	0.018	1.6E-06	0.018	0.015	3.1E-06	0.015	0.023	0.020	0.016	0.027
	L	0.009	5.0E-06	0.009	0.004	2.0E-05	0.004	0.010	0.009	0.010	0.014
	L2	0.004	1.1E-05	0.004	0.001	7.0E-05	0.001	0.005	0.006	0.009	0.009
0.37	L1	0.022	1.6E-06	0.022	0.019	3.1E-06	0.019	0.029	0.025	0.013	0.028
	L	0.011	5.0E-06	0.011	0.005	2.0E-05	0.005	0.012	0.018	0.007	0.025
	L2	0.006	1.1E-05	0.006	0.001	7.0E-05	0.001	0.006	0.010	0.006	0.010
0.14	L1	0.026	1.6E-06	0.026	0.022	3.1E-06	0.022	0.034	0.028	0.015	0.039
	L	0.013	5.0E-06	0.013	0.006	2.0E-05	0.006	0.014	0.015	0.013	0.025
	L2	0.007	1.1E-05	0.007	0.001	7.0E-05	0.001	0.007	0.007	0.014	0.016
0.01	L1	0.028	1.6E-06	0.028	0.024	3.1E-06	0.024	0.037	0.036	0.016	0.041
	L	0.014	5.0E-06	0.014	0.006	2.0E-05	0.006	0.015	0.016	0.012	0.021
	L2	0.007	1.1E-05	0.007	0.001	7.0E-05	0.001	0.007	0.008	0.013	0.017

Tabla 32 – Deformaciones de las tuberías tipo 2 – Clase 2 (Suelo blando)

ρ	Tramo	Modelo							Exacto		
		Respuesta Axial			Respuesta Flexión			Total	Axial	Flexión	Total
		Estático	Dinámico	Total	Estático	Dinámico	Total				
1.00	L1	0.0E+00	6.8E-07	6.8E-07	0.0E+00	1.3E-06	1.3E-06	1.5E-06	1.1E-06	6.1E-06	6.3E-06
	L	0.0E+00	4.6E-06	4.6E-06	0.0E+00	3.4E-05	3.4E-05	3.4E-05	4.4E-06	1.8E-05	1.9E-05
	L2	0.0E+00	2.2E-06	2.2E-06	0.0E+00	8.7E-06	8.7E-06	9.0E-06	2.2E-06	3.0E-06	4.5E-06
0.60	L1	0.018	1.9E-07	0.018	0.015	3.5E-07	0.015	0.023	0.019	0.012	0.023
	L	0.004	1.3E-06	0.004	0.001	9.4E-06	0.001	0.005	0.007	0.004	0.008
	L2	0.009	6.0E-07	0.009	0.004	2.4E-06	0.004	0.010	0.012	0.007	0.018
0.37	L1	0.022	1.9E-07	0.022	0.019	3.5E-07	0.019	0.029	0.024	0.014	0.032
	L	0.006	1.3E-06	0.006	0.001	9.4E-06	0.001	0.006	0.006	0.007	0.010
	L2	0.011	6.0E-07	0.011	0.005	2.4E-06	0.005	0.012	0.013	0.008	0.017
0.14	L1	0.026	1.9E-07	0.026	0.022	3.5E-07	0.022	0.034	0.024	0.030	0.049
	L	0.007	1.3E-06	0.007	0.001	9.4E-06	0.001	0.007	0.008	0.007	0.013
	L2	0.013	6.0E-07	0.013	0.006	2.4E-06	0.006	0.014	0.014	0.010	0.027
0.01	L1	0.028	1.9E-07	0.028	0.024	3.5E-07	0.024	0.037	0.027	0.019	0.036
	L	0.007	1.3E-06	0.007	0.001	9.4E-06	0.001	0.007	0.007	0.007	0.009
	L2	0.014	6.0E-07	0.014	0.006	2.4E-06	0.006	0.015	0.017	0.012	0.019

Tabla 33 – Deformaciones de las tuberías tipo 2 – Clase 2 (Suelo duro)

ρ	Tramo	Modelo							Exacto		
		Respuesta Axial			Respuesta Flexión			Total	Axial	Flexión	Total
		Estático	Dinámico	Total	Estático	Dinámico	Total				
1.00	L1	0.0E+00	5.9E-06	5.9E-06	0.0E+00	1.1E-05	1.1E-05	1.3E-05	8.0E-06	5.2E-05	5.6E-05
	L	0.0E+00	3.9E-05	3.9E-05	0.0E+00	2.5E-04	2.5E-04	2.5E-04	3.1E-05	2.3E-04	2.1E-04
	L2	0.0E+00	1.8E-05	1.8E-05	0.0E+00	7.3E-05	7.3E-05	7.5E-05	1.6E-05	2.4E-04	2.3E-04
0.60	L1	0.018	1.6E-06	0.018	0.015	3.1E-06	0.015	0.023	0.019	0.009	0.019
	L	0.004	1.1E-05	0.004	0.001	7.0E-05	0.001	0.005	0.007	0.006	0.011
	L2	0.009	5.0E-06	0.009	0.004	2.0E-05	0.004	0.010	0.012	0.008	0.015
0.37	L1	0.022	1.6E-06	0.022	0.019	3.1E-06	0.019	0.029	0.025	0.017	0.030
	L	0.006	1.1E-05	0.006	0.001	7.0E-05	0.001	0.006	0.007	0.013	0.026
	L2	0.011	5.0E-06	0.011	0.005	2.0E-05	0.005	0.012	0.016	0.013	0.029
0.14	L1	0.026	1.6E-06	0.026	0.022	3.1E-06	0.022	0.034	0.028	0.023	0.036
	L	0.007	1.1E-05	0.007	0.001	7.0E-05	0.001	0.007	0.009	0.010	0.010
	L2	0.013	5.0E-06	0.013	0.006	2.0E-05	0.006	0.014	0.014	0.011	0.021
0.01	L1	0.028	1.6E-06	0.028	0.024	3.1E-06	0.024	0.037	0.036	0.021	0.045
	L	0.007	1.1E-05	0.007	0.001	7.0E-05	0.001	0.007	0.009	0.016	0.023
	L2	0.014	5.0E-06	0.014	0.006	2.0E-05	0.006	0.015	0.017	0.014	0.025

Tabla 34– Deformaciones de las tuberías tipo 3 (Suelo blando)

ρ	Tramo	Modelo							Exacto		
		Respuesta Axial			Respuesta Flexión			Total	Axial	Flexión	Total
		Estático	Dinámico	Total	Estático	Dinámico	Total				
1.00	L1	0.0E+00	6.8E-07	6.8E-07	0.0E+00	1.3E-06	1.3E-06	1.5E-06	1.1E-06	4.7E-06	5.3E-06
	L	0.0E+00	2.2E-06	2.2E-06	0.0E+00	8.7E-06	8.7E-06	9.0E-06	2.2E-06	5.8E-06	6.0E-06
0.60	L1	0.0177	5.9E-07	0.0177	0.0151	1.1E-06	0.0151	0.0233	0.0192	0.0166	0.0242
	L	0.0089	1.9E-06	0.0089	0.0038	7.6E-06	0.0038	0.0096	0.0105	0.0077	0.0173
0.37	L1	0.0225	5.9E-07	0.0225	0.0191	1.1E-06	0.0191	0.0295	0.0227	0.0180	0.0326
	L	0.0112	1.9E-06	0.0112	0.0048	7.6E-06	0.0048	0.0122	0.0120	0.0100	0.0208
0.14	L1	0.0263	5.9E-07	0.0263	0.0223	1.1E-06	0.0223	0.0345	0.0233	0.0204	0.0370
	L	0.0132	1.9E-06	0.0132	0.0056	7.6E-06	0.0056	0.0143	0.0127	0.0127	0.0240
0.01	L1	0.0282	5.9E-07	0.0282	0.0239	1.1E-06	0.0239	0.0370	0.0315	0.0250	0.0343
	L	0.0141	1.9E-06	0.0141	0.0060	7.6E-06	0.0060	0.0153	0.0123	0.0102	0.0195

Tabla 35– Deformaciones de las tuberías tipo 3 (Suelo duro)

ρ	Tramo	Modelo							Exacto		
		Respuesta Axial			Respuesta Flexión			Total	Axial	Flexión	Total
		Estático	Dinámico	Total	Estático	Dinámico	Total				
1.00	L1	0.0E+00	5.9E-06	5.9E-06	0.0E+00	1.1E-05	1.1E-05	1.3E-05	8.0E-06	5.5E-05	5.9E-05
	L	0.0E+00	1.8E-05	1.8E-05	0.0E+00	7.3E-05	7.3E-05	7.5E-05	1.6E-05	6.7E-05	7.5E-05
0.60	L1	0.0177	5.1E-06	0.0177	0.0151	9.6E-06	0.0151	0.0233	0.0163	0.0134	0.0282
	L	0.0089	1.6E-05	0.0089	0.0038	6.3E-05	0.0038	0.0096	0.0098	0.0098	0.0153
0.37	L1	0.0225	5.1E-06	0.0225	0.0191	9.6E-06	0.0191	0.0295	0.0225	0.0260	0.0296
	L	0.0112	1.6E-05	0.0112	0.0048	6.3E-05	0.0048	0.0122	0.0183	0.0145	0.0221
0.14	L1	0.0263	5.1E-06	0.0263	0.0223	9.6E-06	0.0223	0.0345	0.0302	0.0261	0.0449
	L	0.0132	1.6E-05	0.0132	0.0056	6.3E-05	0.0056	0.0143	0.0136	0.0118	0.0214
0.01	L1	0.0282	5.1E-06	0.0282	0.0239	9.6E-06	0.0239	0.0370	0.0304	0.0303	0.0369
	L	0.0141	1.6E-05	0.0141	0.0060	6.3E-05	0.0060	0.0153	0.0154	0.0136	0.0208

Tabla 36– Deformaciones de las tuberías tipo 3 (Suelo blando)

ρ	Tramo	Modelo							Exacto		
		Respuesta Axial			Respuesta Flexión			Total	Axial	Flexión	Total
		Estático	Dinámico	Total	Estático	Dinámico	Total				
1.00	L1	0.0E+00	6.8E-07	6.8E-07	0.0E+00	1.3E-06	1.3E-06	1.5E-06	1.1E-06	1.9E-05	2.0E-05
	L	0.0E+00	4.6E-06	4.6E-06	0.0E+00	3.4E-05	3.4E-05	3.4E-05	4.4E-06	2.2E-05	2.2E-05
0.60	L1	0.0177	5.9E-07	0.0177	0.0151	1.1E-06	0.0151	0.0233	0.0192	0.0153	0.0227
	L	0.0044	4.0E-06	0.0044	0.0009	2.9E-05	0.0009	0.0045	0.0066	0.0054	0.0099
0.37	L1	0.0225	5.9E-07	0.0225	0.0191	1.1E-06	0.0191	0.0295	0.0227	0.0152	0.0304
	L	0.0056	4.0E-06	0.0056	0.0012	2.9E-05	0.0012	0.0057	0.0077	0.0034	0.0120
0.14	L1	0.0263	5.9E-07	0.0263	0.0223	1.1E-06	0.0223	0.0345	0.0233	0.0176	0.0347
	L	0.0066	4.0E-06	0.0066	0.0014	2.9E-05	0.0014	0.0067	0.0084	0.0038	0.0117
0.01	L1	0.0282	5.9E-07	0.0282	0.0239	1.1E-06	0.0239	0.0370	0.0315	0.0213	0.0336
	L	0.0070	4.0E-06	0.0070	0.0015	2.9E-05	0.0015	0.0072	0.0059	0.0041	0.0099

Tabla 37– Deformaciones de las tuberías tipo 3 (Suelo duro)

ρ	Tramo	Modelo							Exacto		
		Respuesta Axial			Respuesta Flexión			Total	Axial	Flexión	Total
		Estático	Dinámico	Total	Estático	Dinámico	Total				
1.00	L1	0.0E+00	5.9E-06	5.9E-06	0.0E+00	1.1E-05	1.1E-05	1.3E-05	8.0E-06	8.5E-05	8.9E-05
	L	0.0E+00	3.9E-05	3.9E-05	0.0E+00	2.5E-04	2.5E-04	2.5E-04	3.1E-05	2.5E-04	2.6E-04
0.60	L1	0.0177	5.1E-06	0.0177	0.0151	9.6E-06	0.0151	0.0233	0.0163	0.0158	0.0282
	L	0.0044	3.4E-05	0.0044	0.0009	2.2E-04	0.0010	0.0045	0.0076	0.0120	0.0165
0.37	L1	0.0225	5.1E-06	0.0225	0.0191	9.6E-06	0.0191	0.0295	0.0225	0.0163	0.0270
	L	0.0056	3.4E-05	0.0056	0.0012	2.2E-04	0.0012	0.0058	0.0086	0.0125	0.0146
0.14	L1	0.0263	5.1E-06	0.0263	0.0223	9.6E-06	0.0223	0.0345	0.0302	0.0249	0.0401
	L	0.0066	3.4E-05	0.0066	0.0014	2.2E-04	0.0014	0.0067	0.0106	0.0105	0.0190
0.01	L1	0.0282	5.1E-06	0.0282	0.0239	9.6E-06	0.0239	0.0370	0.0304	0.0232	0.0382
	L	0.0070	3.4E-05	0.0070	0.0015	2.2E-04	0.0015	0.0072	0.0086	0.0132	0.0188